



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

**SIMULAZIONI DEL PROCESSO DI FILAMENT
WINDING DI COMPONENTI STRUTTURALI IN
MATERIALE COMPOSITO E VALUTAZIONE DEL
RELATIVO IMPATTO AMBIENTALE**

SIMULATIONS OF FILAMENT WINDING PROCESS OF
STRUCTURAL COMPONENTS IN COMPOSITE
MATERIAL AND ASSESSMENT OF THE RELATED
ENVIRONMENTAL IMPACT

Relatore:
Prof. Ing. Michela Simoncini

Tesi di Laurea di:
Chiara Mignanelli

Correlatore:
Prof. Ing. Archimede Forcellese

Anno Accademico 2021/2022

A mia nonna

Indice

| | |
|---|-----------|
| Indice delle figure | 1 |
| Indice delle tabelle | 5 |
| Introduzione | 7 |
| Capitolo 1 – Stato dell’arte | 10 |
| 1.1 Introduzione | 10 |
| 1.2 Materiali compositi | 12 |
| 1.2.1 Introduzione..... | 12 |
| 1.2.2 Compositi a matrice polimerica (PMC)..... | 14 |
| 1.3 Filament Winding | 15 |
| 1.3.1 Introduzione..... | 15 |
| 1.3.2 Modalità di impregnazione | 16 |
| 1.3.3 Metodi di avvolgimento | 18 |
| 1.3.4 Parametri di processo | 21 |
| 1.3.5 Filament Winding robotizzato | 22 |
| 1.4 Progettazione del serbatoio..... | 22 |
| 1.4.1 Geometria del componente | 24 |
| 1.4.2 Definizione del laminato e teoria del netting..... | 26 |
| 1.4.3 Analisi FEM di serbatoi in composito | 31 |
| 1.4.4 Verifica a fatica dei compositi | 37 |
| Capitolo 2 – Analisi LCA | 43 |
| 2.1 Introduzione | 43 |
| 2.2 Definizione dell’obiettivo e degli scopi | 45 |

| | |
|---|-----------|
| 2.3 Analisi dell’Inventario (LCI) | 46 |
| 2.4 Valutazione degli impatti | 48 |
| 2.5 SimaPro | 50 |
| 2.5.1 Cumulative Energy Demand..... | 52 |
| 2.5.2 ReCiPe 2016..... | 52 |
| 2.5.3 ICCP GWP 2021 | 54 |
| 2.6 Interpretazione dei risultati | 56 |
| 2.7 Riesame critico | 56 |
| Capitolo 3 – Procedure sperimentali | 58 |
| 3.1 Oggetto di studio | 58 |
| 3.2 Ottimizzazione progettuale del serbatoio | 58 |
| 3.2.1 Definizione della geometria esterna e valutazioni preliminari con la teoria del netting | 58 |
| 3.2.2 CADWIND..... | 63 |
| 3.2.3. Siemens NX..... | 70 |
| 3.2.4 Progettazione del componente strutturale in composito..... | 72 |
| 3.3 Analisi LCA del serbatoio di tipo IV | 79 |
| 3.3.1 Caso di studio - Definizione dell’obiettivo e degli scopi..... | 79 |
| 3.3.2 Caso di studio - Analisi dell’inventario (LCI)..... | 81 |
| 3.3.3 Caso di studio - Valutazione degli impatti ambientali (LCIA) | 90 |
| 3.3 Analisi LCA di un serbatoio metallico | 91 |
| Capitolo 4 – Risultati e discussioni | 94 |
| 4.1 Ottimizzazione progettuale del serbatoio | 94 |
| 4.2 Interpretazione dei risultati dell’analisi LCA | 120 |
| 4.2.1 Risultati – Cumulative Energy Demand (CED) | 121 |
| 4.2.2 Risultati – ReCiPe | 127 |
| 4.2.3 Risultati – ICCP GWP 100 | 132 |
| 4.2.4 Analisi di sensibilità..... | 139 |

| | |
|---|------------|
| 4.3 Interpretazione dei risultati dell'analisi LCA del serbatoio metallico e confronto | 142 |
| Capitolo 5 – Conclusioni | 147 |
| Bibliografia..... | 149 |
| Sitografia | 152 |
| Ringraziamenti..... | 153 |

Indice delle figure

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 Tipologie di serbatoi. Fonte: [2] | 11 |
| Figura 1.2 Schema del processo di FW mediante avvolgimento per via umida. Fonte: [3] ... | 17 |
| Figura 1.3 Schema del processo di filament winding mediante avvolgimento di preimpregnati. Fonte: [3] | 18 |
| Figura 1.4 Rappresentazione dell'angolo di avvolgimento delle fibre attorno al mandrino. Fonte: [3] | 18 |
| Figura 1.5 Tipologie di avvolgimento: (a) elicoidale, (b) polare, (c) circonferenziale. Fonte: [3] | 19 |
| Figura 1.6 Rappresentazione delle intersezioni delle fibre durante il processo di filament winding. Fonte: [3] | 19 |
| Figura 1.7 Rappresentazione delle zone di turning. Fonte: [5] | 20 |
| Figura 1.8 Rappresentazione schematica dell'avvolgimento polare. Fonte: [3] | 21 |
| Figura 1.9 Schematizzazione della sezione radiale della calotta di un serbatoio cilindrico (profilo di meridiana evidenziato in rosso)..... | 23 |
| Figura 1.10 Geometria esterna ed interna di un serbatoio in pressione e relative sistemi di coordinate | 24 |
| Figura 1.11 Distribuzione delle tensioni su avvolgimenti circonferenziali ed elicoidali. | 27 |
| Figura 1.12 Carichi applicati alla parte cilindrica del serbatoio (destra) e diagramma di un corpo libero nelle due direzioni θ e φ | 27 |
| Figura 1.13 Spessori del laminato nella zona delle calotte: in blu, spessore teorico calcolato con la teoria di Wang, in nero e in rosso, spessori ottenuti considerando stratificazioni con angoli variabili e raggi polari differenti. Fonte: [13]..... | 31 |
| Figura 1.14 Pressione di scoppio di un serbatoio in composito al variare dell'angolo di avvolgimento. Valori di pressione massima simili sono stati ottenuti per diverse teorie di failure del laminato (Tsai_wu, Tsai-Hill e tensione massima ammissibile)..... | 35 |
| Figura 1.15 Risultati del processo di ottimizzazione per stratificazioni angle – ply..... | 36 |
| Figura 1.16 Tipologia di scoppio di serbatoi in pressione. (a) scoppio in condizioni di sicurezza con espulsione verso l'interno delle basi metalliche; (b) scoppio non sicuro con espulsione verso l'esterno delle basi metalliche. | 37 |
| Figura 1.17 Stadi del cedimento a fatica del materiale. Fonte: [33]..... | 38 |
| Figura 1.18 Andamento del carico in relazione al numero di cicli. Fonte: [33]..... | 39 |

| | |
|---|----|
| Figura 1.19 Andamento della σ_a in funzione della σ_m in relazione al numero di cicli N. Fonte: [34] | 41 |
| Figura 2.1 Rappresentazione delle fasi del ciclo di vita di un prodotto incluse nell'analisi. Fonte: [f]..... | 44 |
| Figura 2.2 Fasi dello studio LCA. Fonte: [g] | 45 |
| Figura 2.3 Elementi che costituiscono la fase di LCIA. Fonte: [35]..... | 48 |
| Figura 2.4 Relazione tra i dati dell'inventario e le categorie d'impatto ai livelli intermedio e finale. Fonte: [37] | 54 |
| Figura 3.1 (a) curva mediana definita tramite il foglio di calcolo Excel per la realizzazione di un serbatoio isotensoide; (b) tipico output del foglio di calcolo per la creazione di un file .mdr; per punti viene definita la curva nel piano che, tramite rivoluzione attorno all'asse centrale, genera il mandrino tridimensionale. | 61 |
| Figura 3.2 Esempio di modellazione di un componente mediante il software CADWIND ... | 65 |
| Figura 3.3 Interfaccia del software CADWIND per la creazione del mandrino: (a) comando per la creazione del mandrino, (b) parametri di progetto, (c) rappresentazione del mandrino creato | 68 |
| Figura 3.4 Visualizzazione della copertura completa delle cupole sul software CADWIND | 68 |
| Figura 3.5 Passaggio dalla simulazione nel software CADWIND al reale processo di filament winding..... | 69 |
| Figura 3.6 Simulazione del processo di filament winding visualizzata nel software CADWIND | 69 |
| Figura 3.7 Interfaccia del software CADWIND per l'inserimento dei parametri del laminato (a) e del materiale (b)..... | 74 |
| Figura 3.8 Comandi per la creazione del laminato in un file .DAT | 75 |
| Figura 3.9 Barra degli strumenti di Siemens NX | 75 |
| Figura 3.10 Serbatoio nell'ambiente di simulazione con i vincoli e la pressione interna applicati | 76 |
| Figura 3.11 Interfaccia del software NX per comunicare all'utente il peso del componente . | 77 |
| Figura 3.12 Interfaccia del software NX per mostrare i risultati nell'ambiente SIM..... | 78 |
| Figura 3.13 Rappresentazione schematica delle fasi incluse nei confini del sistema dell'analisi LCA condotta | 80 |
| Figura 3.14 Rappresentazione della geometria dei boss. Fonte: [44]..... | 83 |
| Figura 4.1 Risultati in termini di (a) tensioni e (b) deformazioni equivalenti per il primo strato della laminazione [85 ₃ /10 ₄ /85 ₃ /15 ₄ /85 ₃ /20 ₄ /85 ₃ /25 ₄ /85 ₃ /30 ₄ /85 ₃]. La struttura mostra dei punti | |

| | |
|---|-----|
| critici sulle calotte, in particolare subito dopo la zona di transizione tra la geometria cilindrica e le calotte..... | 95 |
| Figura 4.2 Risultati delle simulazioni per la stratificazione [85 ₃ /10 ₄ /15 ₄ /20 ₄ /85 ₃ /30 ₄ /35 ₄ /45 ₄ /85 ₃], sia per le (a) tensioni equivalenti che per (b) le deformazioni..... | 96 |
| Figura 4.3 Andamento della tensione in corrispondenza del ply 1 | 97 |
| Figura 4.4 Andamento della tensione in corrispondenza del ply 13 | 98 |
| Figura 4.5 Andamento della tensione in corrispondenza del ply 37 | 99 |
| Figura 4.6 Andamento della tensione in corrispondenza del ply 65 | 99 |
| Figura 4.7 Andamento della deformazione in corrispondenza del ply 1..... | 100 |
| Figura 4.8 Andamento della deformazione in corrispondenza del ply 29..... | 101 |
| Figura 4.9 Andamento della deformazione in corrispondenza del ply 65..... | 102 |
| Figura 4.10 Andamento della tensione in corrispondenza del ply con angolo di avvolgimento a 10°..... | 104 |
| Figura 4.11 Andamento della deformazione in corrispondenza del ply con angolo di avvolgimento a 10°..... | 105 |
| Figura 4.12 Andamento della deformazione in corrispondenza del ply con angolo di avvolgimento a 85°..... | 105 |
| Figura 4.13 Andamento della tensione in corrispondenza del ply con angolo di avvolgimento a 10° (a) ed a 85° (b)..... | 107 |
| Figura 4.14 Andamento della deformazione in corrispondenza del ply con angolo di avvolgimento a 10°..... | 108 |
| Figura 4.15 Andamento della deformazione in corrispondenza del ply con angolo di avvolgimento a 85°..... | 109 |
| Figura 4.16 Distribuzione valori di spessore, Prova 6..... | 112 |
| Figura 4.17 Distribuzione valori di spessore, Prova 8..... | 114 |
| Figura 4.18 Distribuzione dei valori di failure index nel ply con angolo di avvolgimento a 10°, Prova 10..... | 119 |
| Figura 4.19 Distribuzione dei valori di failure index nel ply con angolo di avvolgimento a 55°, Prova 10..... | 120 |
| Figura 4.20 Impatti ambientali delle fasi di vita e di fine vita del componente, CED..... | 121 |
| Figura 4.21 Impatto ambientale di ciascuna fase della vita del componente, CED..... | 122 |
| Figura 4.22 Impatto ambientale del towpreg, CED..... | 123 |
| Figura 4.23 Impatto ambientale dei boss, CED..... | 124 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4.24 Impatto ambientale del liner, CED | 125 |
| Figura 4.25 Impatto ambientale degli scenari di fine vita, CED | 126 |
| Figura 4.26 Contributi percentuali dell'impatto ambientale di ciascuna fase della vita del prodotto, ReCiPe | 128 |
| Figura 4.27 Contributi percentuali degli impatti ambientali del towpreg, ReCiPe | 129 |
| Figura 4.28 Contributi percentuali degli impatti ambientali dei boss, ReCiPe | 130 |
| Figura 4.29 Contributi percentuali degli impatti ambientali del liner, ReCiPe | 131 |
| Figura 4.30 Contributi percentuali degli impatti ambientali degli scenari di fine vita, ReCiPe | 132 |
| Figura 4.31 Impatti ambientali delle fasi di vita e di fine vita del componente, GWP | 133 |
| Figura 4.32 Impatti ambientali delle fasi di vita del componente, GWP | 134 |
| Figura 4.33 Impatti ambientali relativi al towpreg, GWP | 135 |
| Figura 4.34 Impatti ambientali relativi ai boss, GWP | 136 |
| Figura 4.35 Impatti ambientali relativi al liner, GWP | 137 |
| Figura 4.36 Impatti ambientali relativi agli scenari di fine vita, GWP | 138 |
| Figura 4.37 Analisi di sensibilità dei dati analizzati utilizzando il metodo GWP | 140 |
| Figura 4.38 Confronto impatti ambientali della fase d'uso negli scenari considerati, in kg di CO ₂ equivalenti | 142 |
| Figura 4.39 Impatto ambientale del ciclo di vita e dell'EoL del serbatoio metallico | 143 |
| Figura 4.40 Impatto ambientale delle fasi del ciclo di vita | 144 |

Indice delle tabelle

| | |
|---|-----|
| Tabella 2.1 Categorie d’impatto considerate nel metodo IPCC GWP100. | 55 |
| Tabella 3.1 Proprietà del materiale composito utilizzato. | 59 |
| Tabella 3.2 Parametri dei laminati creati con CADWIND. | 72 |
| Tabella 3.3 Parametri del materiale composito utilizzato. | 73 |
| Tabella 3.4 Proprietà del composito inserite nel software Siemens NX. | 76 |
| Tabella 3.5 Dati relativi al quantitativo di materiale da utilizzare per realizzare il serbatoio. | 85 |
| Tabella 3.6 Dati relativi a materiali e consumi energetici dei processi di produzione coinvolti nell’analisi. | 88 |
| Tabella 3.7 Dati relativi al consumo energetico del processo di produzione dell’idrogeno.... | 89 |
| Tabella 3.8 Dati relativi al trasporto dei materiali e del componente..... | 89 |
| Tabella 3.9 Dati relativi alla fase di fine vita..... | 90 |
| Tabella 3.10 Dati raccolti nella fase di analisi dell’inventario (LCI) del serbatoio metallico. | 93 |
| Tabella 4.1 Valori massimi di tensione raggiunti nei vari ply (a); valori massimi di deformazione raggiunti nei vari ply (b), Prova 4..... | 103 |
| Tabella 4.2 Valori massimi di tensione e deformazione ottenuti nei vari ply, Prova 5..... | 106 |
| Tabella 4.3 Valori massimi di tensione e deformazione ottenuti nei vari ply, Prova 6..... | 110 |
| Tabella 4.4 Valori massimi di tensione e deformazione ottenuti nei vari ply, Prova 7..... | 111 |
| Tabella 4.5 Confronto valori medi di spessori nelle 3 zone considerate, Prove 6 e 7..... | 112 |
| Tabella 4.6 Valori massimi di tensione e deformazione ottenuti nei vari ply, Prova 8..... | 113 |
| Tabella 4.7 Valori massimi di tensione e deformazione, Prova 9..... | 115 |
| Tabella 4.8 Confronto valori medi di spessori nelle 3 zone considerate, Prove 6, 7, 8, 9..... | 116 |
| Tabella 4.9 Valori di tensione massima ottenuti nei vari ply, Prova 10..... | 117 |
| Tabella 4.10 Valori massimi di failure index ottenuti nei vari ply, Prova 10..... | 119 |
| Tabella 4.11 Valori di impatto ambientale delle fasi di vita e fine vita del componente, CED | 121 |
| Tabella 4.12 Valori di impatto ambientale di ciascuna fase della vita del componente, CED | 121 |
| Tabella 4.13 Impatti ambientali del towpreg, CED..... | 122 |
| Tabella 4.14 Impatti ambientali dei boss, CED..... | 123 |
| Tabella 4.15 Impatti ambientali del liner, CED..... | 124 |
| Tabella 4.16 Impatto ambientale degli scenari di fine vita del prodotto, CED..... | 125 |

| | |
|---|-----|
| Tabella 4.17 Valori di impatto ambientale delle fasi di vita e fine vita del componente, ReCiPe | 127 |
| Tabella 4.18 Valori di impatto ambientale delle fasi di vita e fine vita del componente, GWP | 134 |
| Tabella 4.19 Valori di impatto ambientale delle fasi di vita del prodotto, GWP | 135 |
| Tabella 4.20 Valori di impatto ambientale del towpreg, GWP | 136 |
| Tabella 4.21 Valori di impatto ambientale relativi ai boss, GWP | 137 |
| Tabella 4.22 Valori di impatto ambientale relativi al liner, GWP | 138 |
| Tabella 4.23 Valori di impatto ambientale relativi agli scenari di fine vita, GWP | 139 |
| Tabella 4.24 Valori di impatto ambientale della fase d'uso relativi all'utilizzo di energia prodotta mediante impianto fotovoltaico..... | 141 |
| Tabella 4.25 Valori di impatto ambientali della fase d'uso relativi all'utilizzo di un mix energetico tedesco..... | 141 |
| Tabella 4.26 Confronto impatti ambientali serbatoi di tipo I e IV | 145 |
| Tabella 4.27 Confronto impatti ambientali serbatoio tipo IV e tipo I (materiale e fase d'uso) | 145 |

Introduzione

Ai giorni d'oggi, si riscontra una crescente competitività nel settore dell'industria manifatturiera e, per questo motivo, le aziende appartenenti a questo settore necessitano di innovarsi in maniera continua per poter sopravvivere e rimanere nel mercato.

Generalmente, quando si parla di innovazione per il settore manifatturiero, si fa riferimento sia all'utilizzo di materiali non convenzionali, come i compositi, sia al Piano Industria 4.0 che comprenda, oltre l'automazione dei processi produttivi, anche le attività di innovazione digitale estese alle varie componenti dell'impresa, in modo tale da avere una visione integrata di tutti i settori.

I materiali compositi vengono sempre più utilizzati per applicazioni ingegneristiche, poiché sono in grado di fornire numerosi vantaggi in termini prestazionali rispetto a quelli tradizionali. Infatti, se negli anni passati venivano utilizzati soltanto nei settori in cui venivano richieste delle elevatissime prestazioni meccaniche come quello aerospaziale, oggi non è difficile trovarli nelle più varie applicazioni come nell'industria petrolifera, nelle energie rinnovabili e molte altre ancora, e si prevede un'ulteriore crescita del loro utilizzo nel futuro. [1]

Per quanto riguarda l'Industria 4.0, invece, si può affermare che essa costituisca un vero e proprio cambiamento radicale nel settore manifatturiero, che sta trasformando il modo di lavorare delle aziende. [a]

Si tratta, infatti, di un nuovo modo di interpretare la realizzazione di un prodotto, a partire dalla progettazione fino ad arrivare alla sua distribuzione, ponendo particolare attenzione ai processi produttivi. Ciò è legato alla necessità di rendere le aziende e le intere linee produttive maggiormente agili, efficienti, flessibili e sostenibili a livello economico, sociale, ma soprattutto ambientale e viene garantito dall'integrazione tra i vari sistemi dell'azienda stessa che risultano essere sempre più interconnessi e modulari. [b]

A tal proposito, lo sviluppo di una tecnologia come la *Smart Tow Winding*, costituisce un ottimo spunto per l'innovazione aziendale poiché permette di combinare l'utilizzo di un materiale innovativo come il composito, ad un processo di produzione automatizzato. Si tratta, infatti, della versione automatizzata del processo di filament winding convenzionale, che consente di produrre delle strutture in materiale composito alto – prestazionali mediante l'avvolgimento automatizzato di un tow, ovvero un fascio di filamenti continui non intrecciati.

Sicuramente, lo sviluppo di una tecnologia di questo tipo impatterà in maniera significativa nel settore della produzione di strutture in composito, in quanto, consente di superare una difficoltà

tipica di questo settore legata all'utilizzo di processi manuali, che limita le applicazioni a settori di nicchia o ad alto valore aggiunto come l'aerospaziale. Essa, inoltre, fornisce dei vantaggi rispetto al processo di filament winding tradizionale che, essendo basato sull'impregnazione del tow su un bagno di resina, non riesce a garantire delle elevate prestazioni ed un'elevata costanza delle proprietà del prodotto finale.

Un altro aspetto che le aziende devono sicuramente tenere in considerazione nel loro processo di innovazione è quello di operare mirando ad una maggiore sostenibilità, in particolar modo, quella ambientale.

In questo senso, nel settembre del 2015, in occasione dell'assemblea generale delle Nazioni Unite, i paesi di tutto il mondo hanno siglato l'Agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile definendo i suoi 17 obiettivi, noti come SDGs, ovvero, Obiettivi dello Sviluppo Sostenibile.

L'Agenda 2030 costituisce l'insieme delle linee guida da seguire per avere un mondo migliore e per garantire uno sviluppo sostenibile: i leader mondiali si sono accordati, infatti, per impegnarsi ad eliminare la povertà, proteggere il pianeta e a garantire pace e prosperità a tutti.

[c]

Il tredicesimo obiettivo di sviluppo sostenibile è noto come “*Climate action*” e mira a mobilitare un'elevata somma di denaro all'anno, allo scopo di rispondere alle necessità dei paesi in via di sviluppo di adattarsi ai cambiamenti climatici e di investire nello sviluppo a basse emissioni di carbonio.

Una problematica molto comune ai giorni d'oggi, infatti, è quella dell'inquinamento ambientale che influisce, a sua volta, sul cambiamento climatico; infatti, non c'è paese che non stia riscontrando i drastici effetti di questo fenomeno.

Degli studi dimostrano che le emissioni di gas serra sono aumentate del 50% rispetto al 1990 e il riscaldamento globale che ne consegue sta provocando dei cambiamenti consistenti e di lunga durata sul sistema climatico. Senza poi considerare tutte le perdite economiche medie annue dovute ai disastri legati al clima, che si aggirano sull'ordine di centinaia di miliardi di dollari e l'impatto umano dei disastri geofisici, che sono per il 91% legati al clima e che negli ultimi 24 anni hanno causato la morte di 1,3 milioni di persone e 4,4 miliardi di feriti.

Per questo motivo, in accordo con l'Agenda 2030, le azioni che vengono svolte devono mirare a ridurre il rischio di catastrofi e a gestire in maniera sostenibile le risorse naturali e la sicurezza umana nelle strategie di sviluppo nazionali. [d]

A tal proposito, l'industria manifatturiera è stata accusata di operare secondo la mentalità *Take – Make – Waste*, nonostante avesse le potenzialità per realizzare prodotti che generassero valore ecologico, sociale ed economico.

Per tale ragione, le aziende hanno visto necessario implementare delle metodologie che abbiano lo scopo di valutare l'impatto che prodotti, processi, servizi, organizzazioni o altre varie attività hanno sull'ambiente.

L'interesse sviluppato nei confronti di queste tematiche è alla base del lavoro effettuato che consiste, in primo luogo, nell'ottimizzazione progettuale di un componente strutturale in materiale composito, ovvero un serbatoio di tipo IV, che verrà utilizzato come dimostratore per lo sviluppo della tecnologia di avvolgimento ad alta produttività precedentemente citata.

Successivamente, per rispondere al tredicesimo obiettivo dell'Agenda 2030, sono stati valutati gli impatti ambientali che il componente genera, attraverso un'analisi LCA.

Capitolo 1 – Stato dell’arte

1.1 Introduzione

Il serbatoio è il componente strutturale maggiormente utilizzato per lo stoccaggio di carburante: a partire da gas combustibili, fino ad arrivare ai gas naturali che ai giorni d’oggi costituiscono un’ottima soluzione per ridurre le emissioni di CO₂.

La struttura tradizionale caratteristica dei serbatoi utilizzati per lo stoccaggio di carburante gassoso in pressione a bordo, presenta un corpo cilindrico e delle teste a cupola. Quest’ultime, però, potrebbero risultare inefficienti a causa dell’eccessiva progettazione richiesta e delle numerose difficoltà che si riscontrano in fase di produzione.

Infatti, spesso accade che si verifichino delle concentrazioni di tensione in corrispondenza delle regioni ad elevata curvatura comportate dal consistente scostamento delle loro sezioni trasversali dai tradizionali profili circolari e ciò limita la loro flessibilità di progettazione.

A tal proposito, i recipienti a pressione toroidali sono stati recentemente individuati come una valida soluzione alternativa in grado di superare queste problematiche in maniera tale da ridurre il peso, aumentare l’efficienza volumetrica ed utilizzare delle pressioni di esercizio maggiori. A causa delle lacune nella letteratura a questo riguardo, però, non è ancora possibile sfruttare appieno il potenziale che questa tecnica di stoccaggio possiede.

Pertanto, in accordo con la classica struttura dei serbatoi pressurizzati internamente che presentano geometrie sferiche o cilindriche, attualmente la struttura più diffusa prevede un corpo cilindrico centrale e due calotte esterne a forma di cupola. Invece, in relazione ai materiali, essi possono essere realizzati in materiale metallico, composito o ottenuti come combinazione di questi.

In letteratura sono delineate cinque tipologie di serbatoi differenti che vengono indicate di seguito:

- Tipo I: interamente realizzato in materiale metallico;
- Tipo II: costituito da un liner metallico interno che supporta il 55% della pressione interna, rinforzato con degli avvolgimenti a hoop in materiale composito;
- Tipo III: costituito da un liner metallico interno e da un rinforzo esterno in materiale composito che supporta fino all’80% del carico di pressione;

- Tipo IV: realizzato in materiale composito, presenta un liner interno in materiale plastico, come ad esempio l'HDPE, che non supporta il carico, ma contiene il gas e funge da mandrino per il processo di Filament Winding;
- Tipo V: realizzato interamente in materiale composito, senza liner interno.

Nella Figura 1.1 sottostante sono rappresentate le 5 tipologie di serbatoi.

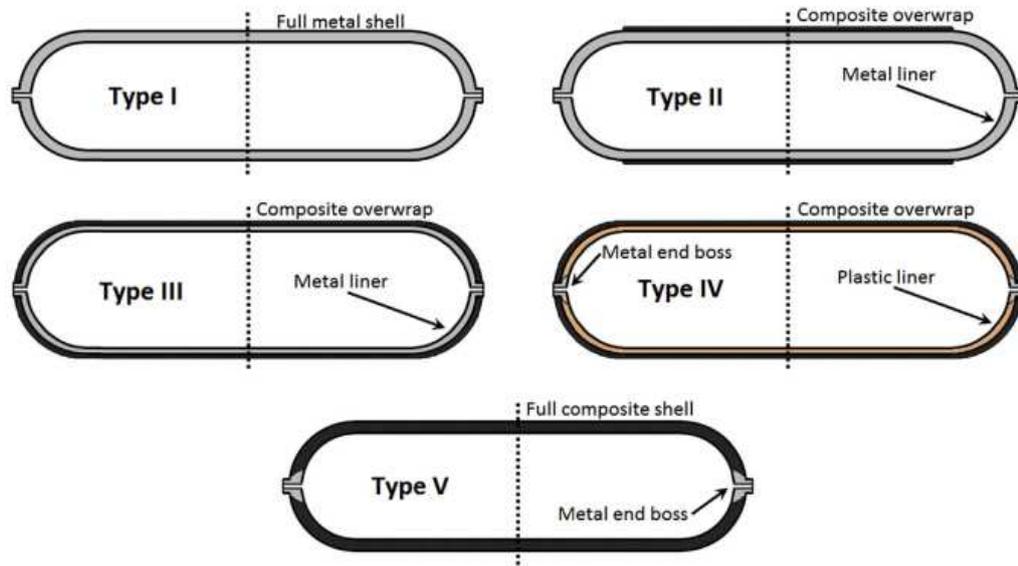


Figura 1.1 Tipologie di serbatoi. Fonte: [2]

Generalmente, il gas utilizzato nelle applicazioni industriali viene stoccato all'interno di serbatoi cilindrici di Tipo I, in quanto sono i meno costosi; però, per contro, sono i più pesanti. I serbatoi di Tipo II, invece, sono comunemente utilizzati in presenza di elevate pressioni per applicazioni stazionarie: sono più leggeri dei serbatoi di Tipo I, ma allo stesso tempo più costosi.

Per impieghi in cui è necessario garantire un'elevata leggerezza, invece, si utilizzano i serbatoi di Tipo III, IV e V, in cui il materiale composito è generalmente rinforzato mediante fibre di vetro, aramidiche, o di carbonio. Nello specifico, quelli di tipo IV e V sono in assoluto i più leggeri, in quanto non presentano liner metallici; tuttavia, sono i più costosi a causa dell'utilizzo di materiale composito.

La progettazione e l'ottimizzazione dei serbatoi cilindrici in pressione realizzati in composito sono ampiamente trattate in letteratura. [2]

Pertanto, in questo capitolo, si tratterà del materiale e del processo coinvolti nella realizzazione di un serbatoio di tipo IV specificando, inoltre, i passaggi da seguire per ottimizzarne la

progettazione a partire dalla definizione dei parametri del componente fino ad arrivare all'analisi agli elementi finiti, sulla base delle informazioni ricavate dalle attività di ricerca condotte.

1.2 Materiali compositi

1.2.1 Introduzione

I compositi sono dei materiali innovativi che offrono delle opportunità uniche nella progettazione. Essi, infatti, consentono di realizzare delle parti molto resistenti, rigide, leggere, caratterizzate anche da geometrie molto complesse, rispettando sempre le proprietà definite per la specifica applicazione. Sono dei materiali che forniscono la possibilità di sviluppare delle soluzioni innovative per poter superare i limiti che presentano i materiali convenzionali. Essi, infatti, offrono dei vantaggi come:

- una versatilità di progettazione;
- una riduzione dei costi di produzione;
- una riduzione del peso.

Questi motivi fanno sì che i materiali compositi siano sempre più apprezzati e richiesti dal mercato; infatti, stando ad un report di *Grand View Research*, si evince che la dimensione del mercato globale dei compositi nel 2019 si aggirava sugli 89,04 miliardi di dollari e si prevede una costante crescita con un tasso medio del circa 7,5 % fino al 2027.

Il tasso di crescita della produzione è dovuto all'aumento della domanda dei compositi soprattutto nei settori automobilistico, dei trasporti, aerospaziale, civile e dell'energia eolica.
[e]

I materiali compositi sono più complessi a livello strutturale rispetto a quelli convenzionali, in quanto, sono costituiti da due fasi chimicamente distinte con caratteristiche fisico – meccaniche differenti e separate da un'interfaccia riconoscibile, che vengono definite come *matrice* e *rinforzo*.

La prima costituisce la fase continua e con proprietà meccaniche inferiori, mentre la seconda rappresenta la fase discontinua con caratteristiche meccaniche maggiori. Complessivamente, si può affermare che i compositi siano dei materiali costituiti da una matrice continua che lega e dà forma ad un sistema di rinforzo utilizzato per conferire resistenza e rigidità.

Le proprietà meccaniche complessive dei compositi sono maggiori rispetto a quelle dei singoli costituenti e, generalmente, il modulo di elasticità del rinforzo è almeno pari al quadruplo di quello della matrice.

La matrice svolge tre funzioni principali, ovvero, tiene assieme le fibre, trasferisce e distribuisce il carico cui è sottoposto il materiale alle fibre e protegge quest'ultime dagli agenti ambientali. Essa può essere costituita da materiali differenti, pertanto, i compositi possono essere classificati in:

- Compositi a matrice ceramica (*Ceramic Matrix Composite, CMC*);
- Compositi a matrice metallica (*Metal Matrix Composite, MMC*);
- Compositi a matrice polimerica (*Polymer Matrix Composite, PMC*).

Questi ultimi, a seconda del tipo di resina che viene utilizzato, si suddividono a loro volta in:

- Compositi a matrice termoindurenti;
- Compositi a matrice termoplastica.

Il materiale che costituisce la matrice influisce sulla modalità e l'efficienza con cui opera il rinforzo.

Quest'ultimo ha il compito di conferire al composito elevate proprietà fisico – meccaniche come rigidità, resistenza, densità, conducibilità termica ed elettrica. Il rinforzo può presentarsi sotto forma di *particelle* o *fibre* e quest'ultime si suddividono a loro volta in base alla lunghezza, in fibre corte, o *discontinue*, e lunghe, o *continue*. La differenza tra le due tipologie di rinforzo sta nella forma: le fibre sono dei filamenti con diametro dell'ordine di grandezza dei micrometri e una lunghezza dell'ordine dei millimetri, nel caso di quelle corte, o maggiori per quelle lunghe; le particelle, invece, sono degli elementi sferici con diametro dell'ordine dei micrometri. Inoltre, un composito con rinforzo fibroso presenta, generalmente, un comportamento anisotropo poiché presenta proprietà più spiccate nella direzione di orientamento delle fibre; se il rinforzo è particellare, invece, il comportamento risulta essere equiassico in quanto non si hanno direzioni preferenziali.

Per ottenere un materiale composito dalle prestazioni desiderate è fondamentale scegliere il tipo di rinforzo, la quantità e l'orientamento più adatti, si deve verificare che i materiali che costituiscono il rinforzo e la matrice siano compatibili e, infine, si valuta anche il fattore costo. Dato che l'efficacia del trasferimento degli sforzi aumenta al crescere della superficie di contatto tra le fasi, ovvero l'interfaccia di adesione, le migliori performance si ottengono

quando si utilizza un composito rinforzato con fibra lunga; in particolare, le fibre maggiormente utilizzate sono quelle di vetro, di carbonio, aramidiche e naturali. [3]

1.2.2 Compositi a matrice polimerica (PMC)

Fra le varie tipologie di materiali compositi presenti in commercio, quelli maggiormente utilizzati per le applicazioni industriali sono i PMC, in quanto sono costituiti da materiali che combinano le prestazioni tipiche della matrice polimerica quali resistenza chimica, durabilità e leggerezza con quelle del rinforzo come rigidità, resistenza meccanica e all'usura.

I compositi presentano dei vantaggi come quello di realizzare delle strutture caratterizzate da un'elevata resistenza specifica; in termini di sostenibilità ambientale permettono di accrescere l'efficienza energetica; e infine aumentano la vita utile rispetto ad un manufatto tradizionale.

In modo particolare, il PMC in assoluto più utilizzato in ambiti industriali è il CFRP, ovvero Carbon Fiber Reinforced Plastics. Si tratta di un materiale composito costituito da una matrice in resina termoindurente e da un rinforzo in fibra di carbonio. Presenta una resistenza maggiore fino a dieci volte quella dell'acciaio, ma un peso corrispondente ad un quarto di quello dell'acciaio.

Generalmente, è più comune trovare nel mercato un materiale composito sottoforma di prepreg, ovvero un semilavorato ottenuto effettuando un'impregnazione delle fibre nella resina. In questo modo è possibile riuscire a controllare il contenuto di resina e del rinforzo nel composito e a mantenere costante il rapporto tra le due fasi, requisito indispensabile per poter ottenere un materiale dalle caratteristiche ripetibili; a scapito di un aumento del costo.

In genere, la matrice è costituita da una resina termoindurente parzialmente indurita per facilitarne la manipolazione, che viene stesa sul rinforzo grazie al passaggio di rulli. Inoltre, vengono utilizzati dei raschiatori che hanno il compito di mantenere lo spessore della resina depositata costante.

Il processo di impregnazione può avvenire in due differenti modalità: *in soluzione* o *a caldo* (*hot melt*).

Il primo metodo prevede di immergere le fibre in un bagno di resina in soluzione con un solvente (ad esempio, 30-40% di acetone o alcol per le resine epossidiche) che ha il compito di ridurre la viscosità e favorire l'impregnazione. Il prepreg viene fatto passare attraverso dei rulli che rimuovono la resina in eccesso; successivamente il tessuto ottenuto viene riscaldato mediante un forno per garantire l'eliminazione del solvente e per favorire la polimerizzazione della resina. Infine, il materiale viene avvolto in rotoli in cui viene applicato un film distaccante in entrambi i lati affinché si eviti l'adesione fra i vari strati. Questo processo, però, presenta dei

problemi ambientali legati all'utilizzo dei solventi volatili ed alla presenza di residui di solvente nel composito, in quanto possono compromettere l'operazione di laminazione introducendo difetti di compattazione e vuoti.

Per superare questi limiti sono stati sviluppati dei processi di impregnazione *a caldo*, o *hot melt*, che prevedono di convogliare fibre o tessuti secchi tra due film di resina supportati da carta siliconata. Essi vengono fatti passare attraverso un sistema di compattazione costituito da dei rulli riscaldati che regolano lo spessore e impongono pressione. Infine, prima di avvolgere il prepreg nel rotolo, il materiale viene fatto passare attraverso dei rulli di raffreddamento.

I prepreg che si ottengono sono disponibili in più versioni: con valori di contenuto di fibre differenti, con fibre sia unidirezionali che tessuti, con fibre costituite da vari materiali e con diversi tipi di resina.

Il preimpregnato viene utilizzato poiché presenta numerosi vantaggi, come un miglior controllo del contenuto di resina e rinforzo nel composito, una maggiore uniformità di impregnazione, l'ottenimento di migliori proprietà meccaniche, una maggior semplicità di lavorazione, la possibilità di utilizzarli in compositi sandwich e tanti altri ancora.

Invece, per quanto riguarda le tecnologie di formatura che vengono utilizzate per realizzare parti in composito, possono basarsi sia sulla sovrapposizione di lamine all'interno di uno stampo (*processi di lay-up*), sia sulla deposizione a spruzzo di fibre discontinue sullo stampo (*processi di spray-up*). I processi di lay-up, a loro volta, vengono suddivisi in *tecnologie a stampo aperto* che includono la laminazione manuale, la formatura in sacco, il Filament Winding (FW), l'Automated Tape Laying (ATL) e l'Automated Fiber Placement (AFP) e *tecnologie a stampo chiuso*, ovvero, Resin Transfer Molding (RTM), Resin Infusion under Flexible Tool (RIFT) e la pultrusione. [3]

1.3 Filament Winding

1.3.1 Introduzione

Il Filament Winding è una tecnologia che permette di realizzare delle parti in materiale composito, tipicamente PMC a matrice termoindurente, a basso costo. Questo processo consiste nell'avvolgimento di fibre impregnate su un supporto cilindrico rotante, denominato *mandrino*, che può presentare una geometria più o meno complessa a seconda delle caratteristiche del prodotto che si vuole realizzare. Esso deve essere progettato in maniera opportuna, altrimenti si possono riscontrare delle problematiche correlate al danneggiamento del rinforzo, errori

dimensionali ed eccessive tensioni residue. Il mandrino, infatti, deve essere rigido strutturalmente, indeformabile, resistente al calore, leggero, economico, a basso impatto ambientale e, infine, deve avere un basso coefficiente di espansione termica ed essere caratterizzato da un bilanciamento dinamico. Esso, inoltre, può essere *permanente*, ovvero, costituito da un unico pezzo di forma semplice; *collassabile a perdere*, realizzato in materiale solubile affinché possa disciogliersi ed essere estratto dal pezzo e, infine, *collassabile non a perdere*, ovvero pieghevole o costituito da più parti che consentano lo smontaggio e la rimozione in pezzi più piccoli.

Il sistema di produzione prevede l'utilizzo di due supporti terminali che sostengono il mandrino orizzontalmente e la *testa*, ovvero la struttura che viene utilizzata per l'applicazione della fibra, che si muove in direzione orizzontale lungo la lunghezza del mandrino attraverso un carro mobile. Con questa tecnica è possibile realizzare dei manufatti caratterizzati da una superficie esterna che è assimilabile ad un solido di rivoluzione, come ad esempio alberi, tubazioni, serbatoi e molti altri ancora, che presentano proprietà meccaniche e ripetibilità elevate grazie al limitato intervento dell'uomo. Generalmente, per ottenere delle parti caratterizzate da un'elevata complessità geometrica si utilizzano dei processi di *Filament Winding robotizzati*, che consistono nella sostituzione del mandrino con un robot a più gradi di libertà. Chiaramente, però, si tratta di una soluzione molto costosa, pertanto, quando è possibile, è preferibile utilizzare il mandrino semplice.

I processi di Filament Winding possono essere classificati sia in base alla modalità di impregnazione delle fibre, sia in base al metodo di avvolgimento delle fibre. La prima classificazione prevede di suddividere i processi in *avvolgimento per via umida (wet-FW)* e *avvolgimento di preimpregnati (dry-FW)*; mentre la seconda li ripartisce in *avvolgimento elicoidale* ed *avvolgimento polare*. [3]

1.3.2 Modalità di impregnazione

L'*avvolgimento per via umida* rappresenta la soluzione maggiormente utilizzata e prevede di impregnare le fibre, generalmente presenti sotto forma di roving, con la giusta quantità di resina prima che vengano avvolte.

In un primo momento, le fibre vengono fatte passare all'interno di un bagno di resina e successivamente, tramite una serie di rulli, viene eliminata quella in eccesso; infine, mediante l'utilizzo di un apposito pettine, si evita la sovrapposizione delle fibre stesse. Tutto ciò che è necessario all'esecuzione del processo come la vasca d'impregnazione, i rulli e il pettine, viene montato sul carro mobile che permette di avvolgere le fibre sulla superficie del mandrino.

Inoltre, dato che non è previsto l'utilizzo di un sacco da vuoto, non è possibile rimuovere le bolle d'aria che si formano durante il processo a causa del passaggio delle fibre nella vasca d'impregnazione; per questo motivo, si utilizzano generalmente delle resine termoindurenti a basso contenuto di sostanze volatili. In questo modo, si riesce a prevenire la formazione di bolle nella struttura avvolta e a mantenere una bassa viscosità ed un'elevata bagnabilità a temperatura ambiente, favorendo l'impregnazione delle fibre. Nella Figura 1.2 sottostante viene illustrato il processo di avvolgimento per via umida in maniera schematica.

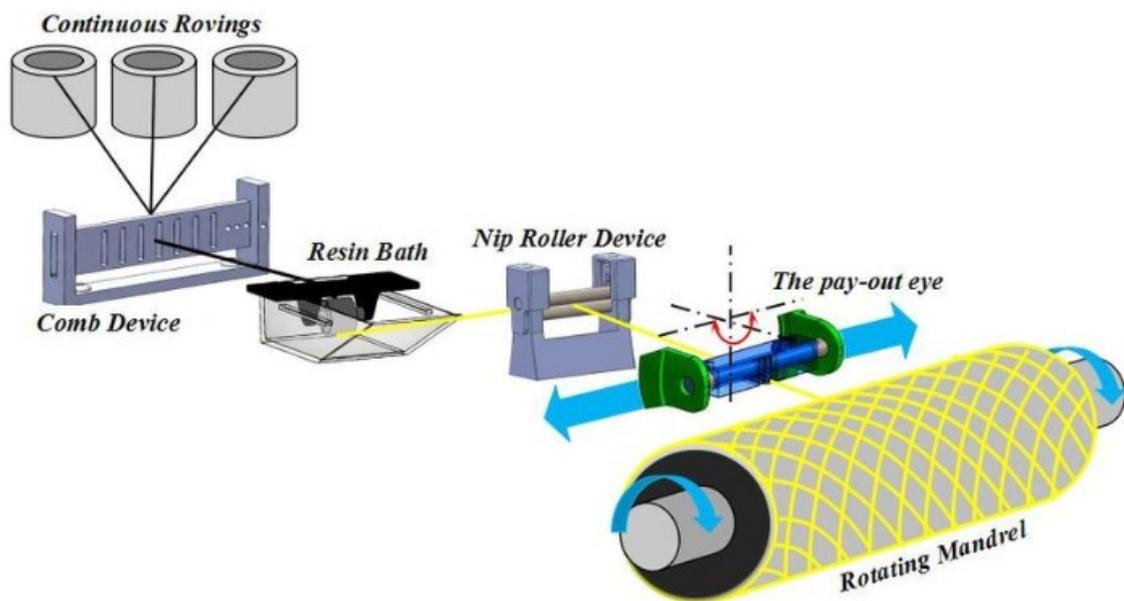


Figura 1.2 Schema del processo di FW mediante avvolgimento per via umida. Fonte: [3]

L'*avvolgimento di preimpregnati* è un processo che prevede di avvolgere sul mandrino direttamente un prepreg, ovvero un nastro unidirezionale preimpregnato, che costituisce il materiale di partenza in modo tale da evitare l'esecuzione della fase di impregnazione delle fibre, in quanto costituisce una criticità. Con questa tecnica, è possibile ottenere un manufatto utilizzando diversi tipi di resina senza riscontrare problemi di viscosità, bagnabilità e formazione di gas e che presenta ottime caratteristiche in termini di qualità, ripetibilità, controllo del contenuto di resina e uniformità di larghezza e spessore del nastro.

Si tratta, quindi, di un processo che presenta un'elevata velocità di produzione, facile da automatizzare e che consente di realizzare prodotti di elevata qualità; per contro, però, richiede degli elevati costi del materiale di partenza e di immagazzinamento. L'avvolgimento per via umida, invece, richiede dei tempi di preparazione più bassi rispetto al processo precedentemente descritto ed una maggior economicità, ma allo stesso tempo si riscontra un'elevata difficoltà

nel dosaggio della resina, presenta una limitata velocità di produzione e i prodotti che si ottengono sono caratterizzati da una bassa qualità. La Figura 1.3 sottostante rappresenta lo schema del processo di avvolgimento di preimpregnati. [3]

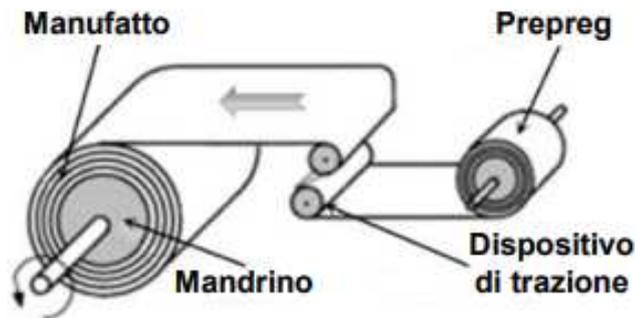


Figura 1.3 Schema del processo di filament winding mediante avvolgimento di preimpregnati. Fonte: [3]

1.3.3 Metodi di avvolgimento

Come già definito nel paragrafo 1.3.1, esistono due differenti metodologie con cui avvolgere i filamenti attorno al mandrino, ovvero l'*avvolgimento elicoidale* e l'*avvolgimento polare*. La differenza tra le due è data dall'angolo che si forma tra la direzione dei filamenti e la tangente al meridiano del mandrino, noto come *angolo di avvolgimento* α , illustrato nella Figura 1.4 sottostante.

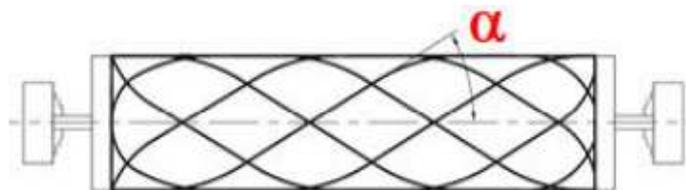


Figura 1.4 Rappresentazione dell'angolo di avvolgimento delle fibre attorno al mandrino. Fonte: [3]

Si parla di avvolgimento elicoidale quando l'angolo di avvolgimento assume un valore compreso tra 20° ed 85° , mentre se è compreso tra 0° e 20° si ha un avvolgimento polare. Esiste, inoltre, una tipologia di avvolgimento elicoidale, nota come *avvolgimento circonferenziale*, che si verifica quando α è circa pari a 90° . La Figura 1.5 sottostante illustra le tre tipologie di avvolgimento.

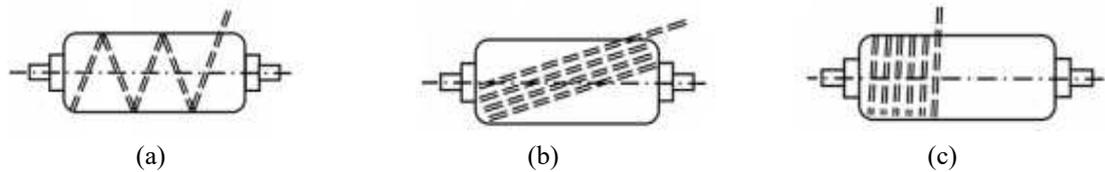


Figura 1.5 Tipologie di avvolgimento: (a) elicoidale, (b) polare, (c) circonferenziale. Fonte: [3]

Nello specifico, l'*avvolgimento elicoidale* prevede il verificarsi di un moto elicoidale delle fibre, che viene ottenuto dalla combinazione del moto rotatorio del mandrino attorno al proprio asse con il moto traslatorio rettilineo del carro mobile in direzione parallela all'asse del mandrino. Si assiste, quindi, ad un avvolgimento del roving o del prepreg attorno al mandrino secondo una traiettoria elicoidale il cui valore di passo è prefissato. Il valore dell'angolo di avvolgimento desiderato si ottiene regolando in maniera opportuna i valori di velocità di avanzamento del carro mobile e di rotazione del mandrino. Durante questo processo, si verificano delle intersezioni delle fibre, definite come *crossover*, dovute alla loro differente orientazione tra la corsa di andata e quella di ritorno del carro mobile. Infatti, come definito da Quanjin et al. [4], esiste una *turning zone*, in corrispondenza della quale, l'orientamento della fibra inizia a variare l'angolo di avvolgimento per tornare ad avvolgere un altro lato. Pertanto, il generico strato del laminato è costituito da un tessuto in cui i fasci di fibre sono intrecciati tra loro seguendo due direzioni uguali ma con segno opposto: $+\alpha$ e $-\alpha$. Il laminato che si ottiene risulta, quindi, equilibrato, poiché è costituito da fibre unidirezionali con angoli uguali e contrari rispetto all'asse del mandrino; ma proprio per questo motivo, a causa della tortuosità del percorso seguito dalle fibre, è difficile ottenere le massime proprietà meccaniche.

Le Figure 1.6 e 1.7 illustrano rispettivamente le intersezioni delle fibre e la *turning zone*.

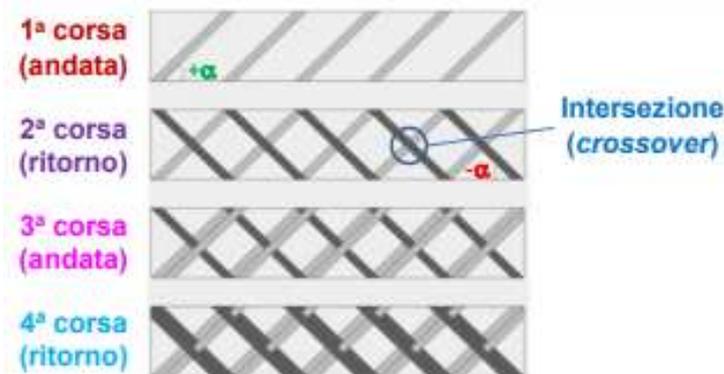


Figura 1.6 Rappresentazione delle intersezioni delle fibre durante il processo di filament winding. Fonte: [3]

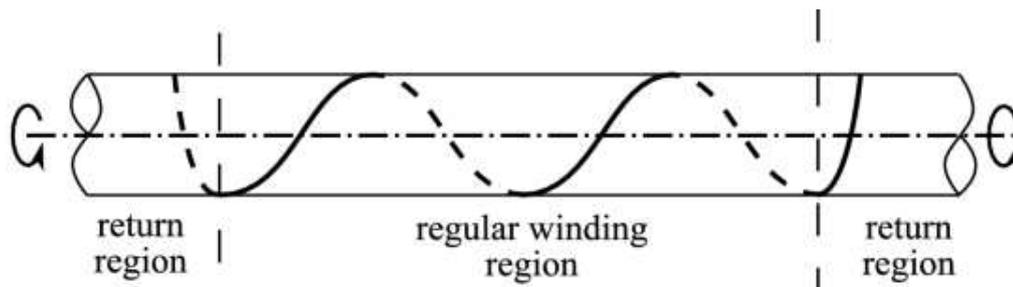


Figura 1.7 Rappresentazione delle zone di tuning. Fonte: [5]

Per evitare la formazione di eventuali gap (spazi vuoti) o overlap (sovrapposizioni) di materiale, ad ogni corsa successiva alla prima, la testa di deposizione viene fatta traslare in direzione longitudinale di una quantità pari alla larghezza della banda di materiale, in modo da depositare le fibre in posizione adiacente rispetto a quella precedentemente posizionata.

Come già definito, l'*avvolgimento circonferenziale*, anche noto come *avvolgimento a hoop*, costituisce una variante dell'avvolgimento elicoidale e viene generalmente utilizzato per la deposizione di un singolo o di pochi roving. L'angolo che si forma è prossimo a 90° poiché ad ogni giro del mandrino corrisponde un avanzamento del carro mobile pari alla larghezza della banda avvolta che è molto stretta. Con questa tecnica, risulta impossibile avvolgere le fibre in corrispondenza delle calotte, ovvero le estremità del mandrino, a causa dello scivolamento delle stesse.

L'*avvolgimento polare*, invece, viene utilizzato per realizzare strutture chiuse come serbatoi o recipienti poiché l'angolo di avvolgimento basso consente di depositare le fibre anche in corrispondenza delle calotte. Inoltre, è possibile ottenere un avvolgimento di questo tipo anche utilizzando una macchina costituita da un mandrino e da un braccio di alimentazione delle fibre rotante. L'avvolgimento si ottiene combinando il moto di rotazione del braccio di alimentazione delle fibre e quello di rotazione del mandrino, ciascuno attorno al proprio asse.

La Figura 1.8 sottostante mostra, in maniera schematica, l'avvolgimento polare. [3]

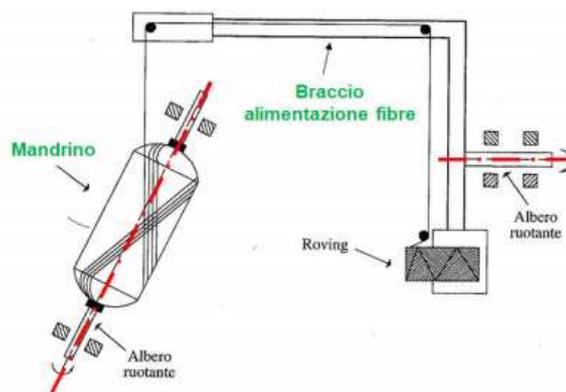


Figura 1.8 Rappresentazione schematica dell'avvolgimento polare. Fonte: [3]

1.3.4 Parametri di processo

Per ottimizzare un processo di Filament Winding è necessario tenere in considerazione dei parametri come la tensione di avvolgimento e la modalità di impregnazione delle fibre.

La tensione di avvolgimento influisce sulle proprietà meccaniche e sull'uniformità del manufatto e da essa dipendono anche la larghezza della banda depositata, l'allineamento delle fibre e il grado di compattazione. Infatti, le fibre vengono depositate sul mandrino seguendo delle direzioni definite in fase di progettazione, ma durante l'esecuzione del processo potrebbero verificarsi delle ondulazioni o corrugamenti che comportano la presenza di difetti nel manufatto ed un aumento della tensione di avvolgimento, per cui si vede necessario allineare in maniera migliore le fibre. Inoltre, all'aumentare della tensione, si verifica un aumento della compattazione delle fibre sul mandrino o sugli strati precedentemente depositati, permettendo di ridurre gli spazi vuoti e quindi, di ottenere una struttura caratterizzata da una maggior densità. Durante il processo di FW, inoltre, è necessario porre particolare attenzione alla fase di impregnazione delle fibre, poiché una velocità di impregnazione troppo elevata fa sì che l'aria inizialmente presente tra le fibre non venga eliminata completamente durante il passaggio nella vasca d'impregnazione, comportando la formazione di un'emulsione di resina ed aria che impregna le fibre. Per questo motivo è possibile che, dopo l'avvolgimento, si verifichino dei fenomeni di coalescenza dei microvuoti dell'emulsione che portano all'ottenimento di manufatti caratterizzati da elevate porosità. Per evitare problemi di questo genere, si possono adottare delle soluzioni come: eseguire l'avvolgimento a bassa velocità in modo tale da consentire all'aria di fuoriuscire dalla resina, si può mantenere la vasca in un ambiente sottovuoto, oppure, le fibre possono essere impregnate per contatto di un rullo solo parzialmente

immerso nella vasca. La soluzione migliore viene scelta in base a parametri progettuali e tecnologici come il massimo grado di porosità che può essere accettato, le dimensioni del mandrino, la quantità di fibre da impregnare e la velocità di produzione. [3]

1.3.5 Filament Winding robotizzato

Generalmente i sistemi di produzione più utilizzati sono costituiti da macchine a 2 gradi di libertà simili al tornio ma, per poter ottenere delle strutture geometricamente molto complesse che presentano anche delle concavità, non sono sufficienti le macchine di FW tradizionali e per questo motivo si ricorre all'utilizzo di celle robotizzate (RFW) che presentano un numero di gradi di libertà maggiore di due. Si possono adottare due soluzioni differenti in cui il principio che sta alla base del funzionamento è lo stesso dei sistemi a 2 gdl, ma viene esteso a traiettorie più complesse. La prima prevede di porre in rotazione il mandrino mediante una macchina simile al tornio, mentre la testa di deposizione viene manipolata dal robot; la seconda, invece, prevede che la testa di deposizione rimanga in posizione fissa, mentre il mandrino viene manipolato e messo in rotazione dal robot.

La cella robotizzata (RFW), che è costituita da un robot antropomorfo dotato di un sistema di alimentazione e di deposizione per posizionare le fibre impregnate sul mandrino, viene utilizzata per sostituire l'operatore, che fino a questo momento rappresentava l'unico sistema per produrre parti geometricamente complesse. [3]

1.4 Progettazione del serbatoio

Prendendo in considerazione la progettazione di un serbatoio di tipo IV, per prima cosa si determinano i parametri principali del componente stesso, ovvero:

- dimensioni (lunghezza e diametro);
- prestazioni (pressione interna, peso e volume);
- ambiente esterno (temperatura, umidità e carichi esterni);
- interfacce (altri stadi, ugelli, iniettori).

Una volta noti, si procede effettuando un primo dimensionamento mediante l'utilizzo della netting-analysis, che porta a termine la progettazione preliminare.

Dato che i serbatoi cilindrici per gas ad alta pressione presentano una forma assialsimmetrica, la geometria delle calotte è definita in maniera univoca dal profilo di sezione radiale, noto come *profilo di meridiana*, ovvero *meridian profile*.

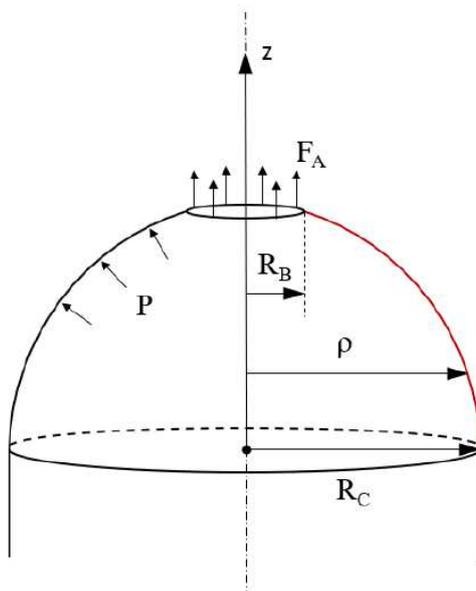


Figura 1.9 Schematizzazione della sezione radiale della calotta di un serbatoio cilindrico (profilo di meridiana evidenziato in rosso)

I carichi che vengono presi in considerazione per il modello in questione sono: la pressione interna P ed una generica forza assiale F_A , che può essere identificata con la forza esercitata dal boss metallico collocato sull'apertura polare del serbatoio. La curva che descrive il profilo di meridiana è definita dalle coordinate radiale r ed assiale z ; mentre R_B ed R_C corrispondono, rispettivamente, al raggio del boss e della parte cilindrica.

Per quanto riguarda la scelta del materiale, invece, dipende dalle prestazioni richieste e dalle condizioni ambientali. La capacità di avvolgimento del materiale, infatti, costituisce un problema rilevante; pertanto, viene richiesta un'attenta selezione del metodo di avvolgimento appropriato affinché si possa ottenere la geometria desiderata.

Una volta completata la progettazione preliminare, si procede con l'analisi in dettaglio utilizzando l'angolo di avvolgimento selezionato, lo spessore calcolato dello strato e il peso del composito che ne consegue. Successivamente, vengono presi in considerazione gli inserti polari (boss) e il relativo spessore, per poi procedere con la conclusione dell'analisi agli elementi finiti che prevede una focalizzazione sullo spessore degli strati collocati in prossimità degli inserti polari e della zona di collegamento tra la parte cilindrica in composito e i boss metallici.

Infine, si ottiene una validazione del progetto mediante l'esecuzione di una prova di scoppio a dimensioni reali opportunamente strumentata.

Di seguito vengono elencati e descritti brevemente i principali parametri da considerare durante la fase iniziale della progettazione di componenti che vengono ottenuti mediante filament winding.

1.4.1 Geometria del componente

Il comportamento meccanico di componenti ottenuti tramite il processo di filament winding è strettamente connesso alla loro geometria, la quale viene suddivisa in due livelli: *geometria esterna* e *interna*. La prima costituisce la forma complessiva della struttura e nel caso in esame coincide con una parte centrale cilindrica e due calotte laterali. La seconda, invece, è determinata da parametri quali orientazione, spessore e sequenza dei vari strati depositati; per quanto riguarda il liner interno in materiale termoplastico, generalmente si tende a non considerare il contributo che esso dà alla resistenza strutturale complessiva del componente.

La geometria dei serbatoi in pressione può essere definita come una superficie di rivoluzione; pertanto, considerando le coordinate cilindriche e_r , e_θ , e_z , la superficie esterna del serbatoio viene ottenuta mediante la rotazione della curva meridiana m attorno all'asse e_z ; dove m viene definita come curva parametrica sul piano e_r , e_z .

$$\mathbf{m}(\xi^m) = f_r(\xi^m)\mathbf{e}_r + f_z(\xi^m)\mathbf{e}_z \quad (1)$$

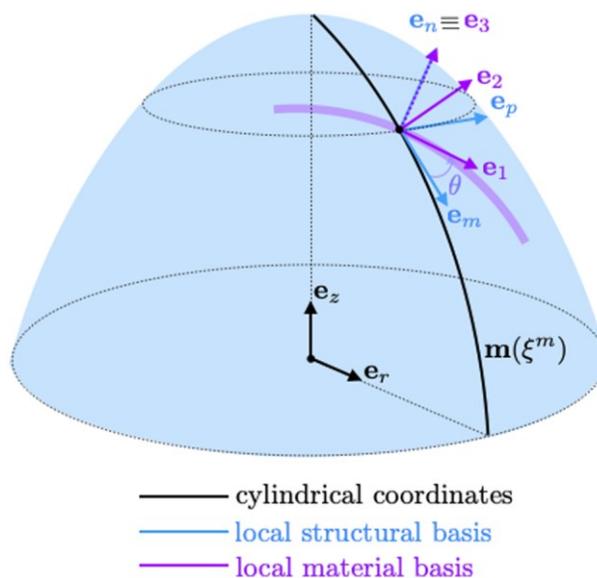


Figura 1.10 Geometria esterna ed interna di un serbatoio in pressione e relative sistemi di coordinate

Per ogni punto della meridiana, si può definire una base locale ortonormale del tipo: e_m, e_p, e_n , in cui i primi due vettori sono tangenti rispettivamente alla meridiana e al parallelo, mentre l'ultimo è normale alla curva.

Per quanto riguarda la geometria interna, come accennato precedentemente, è necessario specificare l'angolo di orientazione di ogni layer, noto come α , ovvero l'angolo che si forma tra il vettore e_m , tangente alla meridiana, ed il vettore e_1 che rappresenta la direzione lungo cui sono orientate le fibre in quello specifico strato. Si fa riferimento ad una base locale del materiale (e_1, e_2, e_3), in cui e_2 è il vettore nel piano perpendicolare alla direzione delle fibre ed e_3 è il vettore perpendicolare al piano del materiale e coincide con e_n .

Come descritto nel paragrafo 1.3.3, durante il processo di filament winding, il materiale viene depositato su un mandrino rotante generando degli strati che includono tow orientati a $+\alpha$ e $-\alpha$ con dei pattern di incrocio dipendenti dai parametri di processo. Per semplicità, in fase di progettazione, si considera che gli strati siano costituiti da tow orientati ad angoli $\pm\alpha$ in proporzioni uguali.

Generalmente, nella zona cilindrica, il filamento viene direzionato secondo un angolo α di progetto, mentre nella zona in corrispondenza delle calotte segue delle traiettorie più complesse e l'angolo di inclinazione varia a seconda della geometria del componente e dei parametri di processo definiti.

Solitamente, per evitare il verificarsi di fenomeni di slip della fibra durante il processo produttivo dovuti al pretensionamento della fibra stessa, si utilizzano delle traiettorie geodetiche, ovvero delle traiettorie che congiungono due punti nello spazio con la minor distanza possibile.

Nel caso in cui si voglia sfruttare l'attrito tra due strati successivi di materiale depositato, o si utilizzino tecniche di avvolgimento di materiali termoplastici con l'ausilio di laser in modo tale da saldare immediatamente gli strati depositati per poter realizzare delle curve complesse, vengono seguite delle traiettorie non geodetiche.

Nel caso di traiettorie geodetiche, vale la relazione di Clairault [6]:

$$f_r(\xi^m) \sin(\alpha(\xi^m)) = \text{costante} \quad (2)$$

Essa lega l'angolo di inclinazione della fibra alla distanza dall'asse di rivoluzione e determina la distanza minima dall'asse di rivoluzione che il materiale può raggiungere qualora si considerino traiettorie geodetiche; inoltre, si ricava che l'angolo d'inclinazione evolve sulla superficie della calotta fino ad assumere un valore massimo di 90° .

Poiché la geometria del mandrino, ed in particolare quella delle calotte, influenza notevolmente le tensioni che si sviluppano in serbatoi soggetti a pressioni interne, sono stati sviluppati dei modelli per poter ottimizzare la geometria della parte in relazione ai vincoli di progetto, come ad esempio, le dimensioni esterne e i raggi di apertura delle calotte. Una soluzione ottimale è quella che prevede di utilizzare dei serbatoi isotensoidi definiti all'interno di un brevetto europeo [7] in cui la geometria di un mandrino utilizzato per la realizzazione di serbatoi mediante processi di filament winding, viene definita da una superficie geodetica in grado di garantire dei carichi isotensoidi dell'avvolgimento, in modo tale che in ciascun punto del percorso di avvolgimento il filamento sia soggetto agli stessi carichi.

1.4.2 Definizione del laminato e teoria del netting

Generalmente, per valutare le condizioni di utilizzo ed ottimizzare le caratteristiche di componenti strutturali a pareti sottili si utilizzano diversi modelli, tra cui la Teoria di Mariotte. Le ipotesi fondamentali alla base di questa teoria riguardano il fatto che il componente in esame deve essere caratterizzato da una geometria assiale, deve avere uno spessore costante e ridotto ($D_e = D_i = D$, $D/s < 20$), i carichi radiali ed assiali devono essere assialsimmetrici ed infine non devono essere presenti brusche variazioni di diametro. Sulla base di queste ipotesi, le direzioni principali dello stato di tensione sulla superficie del serbatoio sono tre: circonferenziale, assiale e radiale. Quest'ultima risulta essere trascurabile rispetto alle altre due, pertanto, la teoria prende in considerazione soltanto le prime due tensioni definite, espresse dalle seguenti relazioni:

$$\sigma_c = \frac{PD}{2s} \quad (3)$$

$$\sigma_a = \frac{PD}{4s} \quad (4)$$

dove P rappresenta la pressione interna al serbatoio, D è il diametro ed s è lo spessore. [8]

La Teoria di Mariotte, però, non risulta essere ottimale per valutare lo stato tensionale di un componente strutturale realizzato in materiale composito, poiché i parametri da tenere in considerazione sono notevolmente maggiori rispetto a quelli di un materiale convenzionale e, per questo motivo, si utilizza un altro metodo di analisi noto come Teoria del Netting.

La *netting analysis* si basa sull'ipotesi fondamentale che prevede di considerare che soltanto le fibre sostengano il carico di pressione, mentre la resina non fornisce alcun contributo meccanico: per questo motivo, dato che le proprietà meccaniche del materiale composito vengono sottostimate, questa teoria risulta essere conservativa da tale punto di vista. Questa ipotesi costituisce, inoltre, un ottimo punto di partenza per il primo dimensionamento di un serbatoio in pressione quando la percentuale di carico sopportata dal liner viene considerata trascurabile.

Secondo la teoria dei serbatoi cilindrici, la pressione interna genera due componenti di tensione: quella assiale e quella circonferenziale: la prima viene sostenuta soltanto dagli avvolgimenti elicoidali, ovvero quelli con valori di α ridotti, mentre la seconda agisce principalmente su quelli circolari, con valori di α circa pari a 90° .

Nella Figura 1.11 seguente viene rappresentato come i carichi vengono distribuiti sulle fibre del materiale composito.

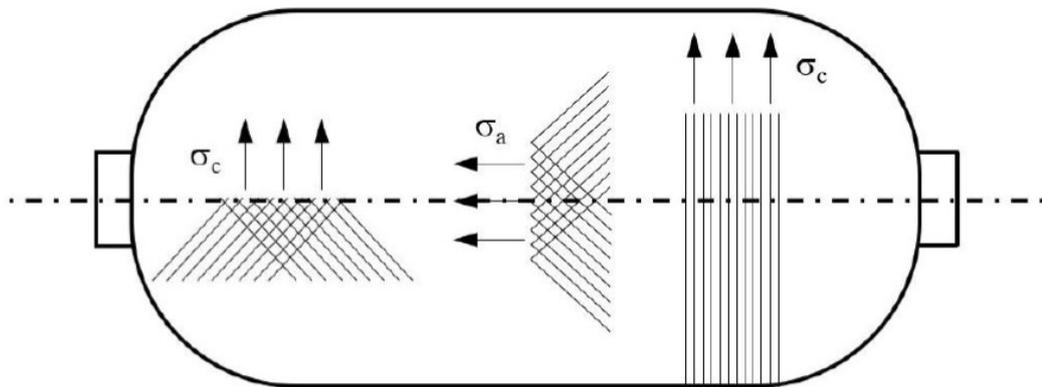


Figura 1.11 Distribuzione delle tensioni su avvolgimenti circolari ed elicoidali.

Sulla base delle ipotesi della teoria del Netting, è possibile ricavare il valore dello spessore minimo che devono avere gli avvolgimenti elicoidali e circolari affinché il serbatoio rimanga in sicurezza quando viene sottoposto a delle pressioni di esercizio.

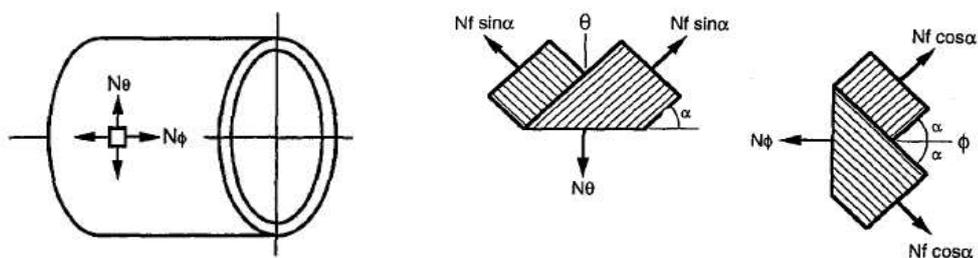


Figura 1.12 Carichi applicati alla parte cilindrica del serbatoio (destra) e diagramma di un corpo libero nelle due direzioni θ e ϕ

Come mostrato in Figura 1.12, le pareti del serbatoio in pressione sono soggette ai due carichi N_θ e N_ϕ . Per soddisfare l'equilibrio è necessario che vengano rispettate le seguenti equazioni:

$$N_\theta = 2N_f \sin^2 \alpha \quad (5)$$

$$N_\phi = 2N_f \cos^2 \alpha \quad (6)$$

dove N_f rappresenta il carico sopportato dalle fibre di un singolo ply. Si moltiplica per due poiché, per definizione, ogni strato della struttura avvolta per filament winding è costituito da due ply. Il carico complessivo cui è sottoposta la struttura si ottiene come sommatoria lungo gli strati del laminato per ciascuna direzione di orientamento delle fibre.

$$N_\theta = \sum_{J=1}^i 2n_J N_{fJ} \sin^2 \alpha_J \quad (7)$$

$$N_\phi = \sum_{J=1}^i 2n_J^- N_{fJ} \cos^2 \alpha_J \quad (8)$$

n_1, n_2, \dots, n_i rappresentano i numeri degli strati ottenuti con avvolgimenti di angoli α_1, α_2 e α_n . Considerando due angoli di avvolgimento arbitrari, è possibile calcolare i carichi che riescono a sopportare le fibre degli strati orientati a quegli angoli, mediante le seguenti equazioni:

$$N_{f1} = \frac{N_\theta \cos^2 \alpha_2 - N_\phi \sin^2 \alpha_2}{2n_1 (\cos^2 \alpha_2 \sin^2 \alpha_1 - \sin^2 \alpha_2 \cos^2 \alpha_1)} \quad (9)$$

$$N_{f2} = \frac{N_\theta \cos^2 \alpha_1 - N_\phi \sin^2 \alpha_1}{2n_2 (\cos^2 \alpha_1 \sin^2 \alpha_2 - \sin^2 \alpha_1 \cos^2 \alpha_2)} \quad (10)$$

Queste, a loro volta, consentono di ricavare la tensione applicata alle fibre avvolte per i due valori di angoli α_1 ed α_2 .

$$\sigma_{\alpha_1} = \frac{2N_{f1}}{t_{\alpha_1}} \quad (11)$$

$$\sigma_{\alpha_2} = \frac{2N_{f2}}{t_{\alpha_2}} \quad (12)$$

I prodotti $n_1 t_{\alpha_1}$ e $n_2 t_{\alpha_2}$ rappresentano il valore di spessore totale delle fibre per ciascun angolo di avvolgimento e possono essere espressi nel seguente modo:

$$t_{\alpha_1 f} = n_1 t_{\alpha_1} \quad (13)$$

$$t_{\alpha_2 f} = n_2 t_{\alpha_2} \quad (14)$$

A questo punto, è possibile riscrivere le formule (11) e (12) esplicitando lo spessore totale delle fibre:

$$t_{\alpha_1 f} = \frac{N_{\theta} \cos^2 \alpha_2 - N_{\theta} \sin^2 \alpha_2}{\sigma_{\alpha_1} (\cos^2 \alpha_2 \sin^2 \alpha_1 - \sin^2 \alpha_2 \cos^2 \alpha_1)} \quad (15)$$

$$t_{\alpha_2 f} = \frac{N_{\theta} \cos^2 \alpha_1 - N_{\theta} \sin^2 \alpha_1}{\sigma_{\alpha_2} (\cos^2 \alpha_1 \sin^2 \alpha_2 - \sin^2 \alpha_1 \cos^2 \alpha_2)} \quad (16)$$

Le formule (15) e (16) forniscono in generale, per qualsiasi combinazione di due angoli di avvolgimento differenti, il valore di spessore degli strati di fibre affinché si ottenga un serbatoio resistente.

Generalmente, molte strutture tubolari o serbatoi vengono prodotti utilizzando degli avvolgimenti ottenuti con dei valori di angoli di avvolgimento elevati, prossimi a 90° (avvolgimenti circolari, o *hoop*) ed altri con dei valori di angoli di avvolgimento bassi (*avvolgimenti elicoidali*); pertanto, le equazioni di netting che definiscono lo spessore degli strati di fibra, possono essere semplificate considerando questa combinazione di angoli. Sostituendo, quindi, alle equazioni precedenti α_1 con α ed α_2 con 90° ; si ottengono le equazioni (17) e (18):

$$t_{\alpha f} = \frac{N_{\phi}}{\sigma_{\alpha} \cos^2 \alpha} \quad (17)$$

$$t_{90 f} = \frac{N_{\theta} - N_{\phi} \tan^2 \alpha}{\sigma_{90}} \quad (18)$$

Le equazioni sopraelencate, oltre ad essere valide per i carichi di pressione interna, possono essere generalizzate per carichi assiali e flessionali, sostituendo i seguenti valori per i carichi applicati:

$$N_{\theta p} = PR \quad (19)$$

$$N_{\phi_P} = \frac{PR}{2} \quad (20)$$

$$N_{\phi_T} = \frac{T}{2\pi R} \quad (21)$$

$$N_{\phi_B} = \frac{M}{\pi R^2} \quad (22)$$

Dato che, come già definito, la teoria del netting considera che i carichi siano sostenuti soltanto dalle fibre, trascurando il contributo della matrice e del liner, per calcolare lo spessore effettivo degli strati, i valori ottenuti dalle equazioni (17) e (18) vanno divisi per la Fiber Volume Fraction (VF) del composito utilizzato, ovvero il rapporto tra il volume delle fibre e quello del composito totale. In questo modo si ottengono gli spessori minimi richiesti per gli strati sia con avvolgimenti elicoidali che circonferenziali [9,10]. È necessario precisare, però, che il valore di angolo di avvolgimento definisce soltanto la direzione di orientamento delle fibre limitatamente alla zona centrale cilindrica, in quanto la teoria del netting non tiene in considerazione ciò che accade nelle calotte.

Questa teoria, grazie alla sua facile applicazione, è stata ampiamente studiata nella letteratura scientifica ed utilizzata per la progettazione e realizzazione di strutture in composito [6,11,12]. In un articolo di Zhang et al [13], si parla dell'utilizzo di questa teoria per una valutazione iniziale degli strati elicoidali e circonferenziali per la laminazione di un serbatoio per lo stoccaggio di gas a 700 bar; successivamente sono stati definiti degli strati con angoli di avvolgimento variabili in modo tale da avere una copertura delle calotte differente per i vari strati, in accordo con i coefficienti di sicurezza considerati. Un aumento dell'angolo di avvolgimento comporta una riduzione sempre maggiore delle porzioni di calotte ricoperte dagli strati, limitando il fenomeno legato all'incremento dello spessore in prossimità delle aperture delle calotte [14] e in modo da ottenere uno spessore pressoché costante.

Di seguito, nella Figura 1.13 è rappresentato l'andamento del valore che assume lo spessore in corrispondenza delle calotte in relazione a stratificazioni con angoli di avvolgimento variabili e raggi polari differenti.

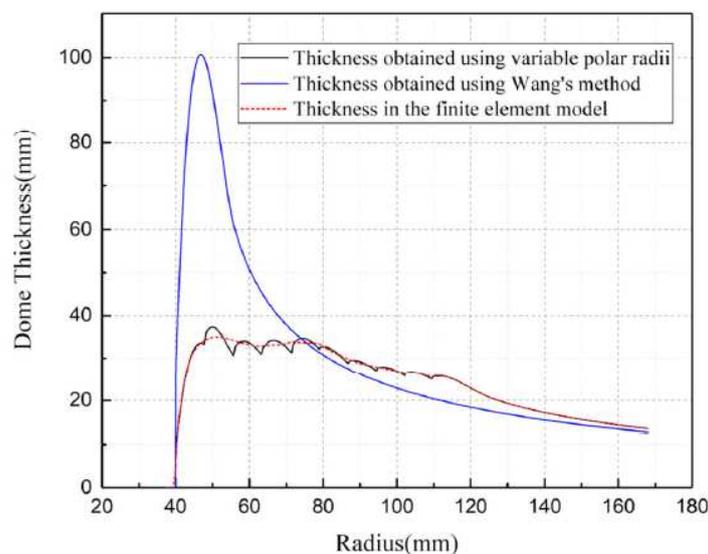


Figura 1.13 Spessori del laminato nella zona delle calotte: in blu, spessore teorico calcolato con la teoria di Wang, in nero e in rosso, spessori ottenuti considerando stratificazioni con angoli variabili e raggi polari differenti. Fonte: [13]

Benché la teoria del netting sia uno strumento molto utile e rapido per effettuare una stima dello spessore desiderato per il rivestimento in composito, nelle fasi più avanzate della progettazione è necessario ricorrere a dei metodi di analisi più sofisticati che siano in grado di valutare anche quegli aspetti che vengono trascurati da questa teoria.

Ad esempio, se si volesse considerare anche il contributo della matrice sulla resistenza della parte, ma non l'evoluzione correlata ad una progressiva degradazione, si definisce un modello elastico ortotropo. Inoltre, nella fase di progettazione si possono effettuare delle valutazioni anche mediante i criteri di crisi degli strati [15-17].

Infine, esistono dei modelli ancora più complessi che vengono utilizzati per effettuare delle previsioni sulla progressiva degradazione delle fibre, della matrice e dell'interfaccia fibra/matrice. Ad esempio, nei modelli a danneggiamento continuo per valutare la redistribuzione dei carichi durante il danneggiamento, si introducono dei fenomeni irreversibili come microcracking e deformazioni plastiche [18,19].

Delle valutazioni di questo tipo possono essere supportate da degli strumenti che si basano sul metodo degli elementi finiti.

1.4.3 Analisi FEM di serbatoi in composito

Uno strumento largamente utilizzato per la progettazione di componenti strutturali assialsimmetrici realizzati in materiale composito come serbatoi, ma in generale per svolgere un'analisi strutturale, è l'analisi agli elementi finiti, nota come *analisi FEM*: si tratta di uno dei

metodi numerici più diffusi nel campo ingegneristico. Esso si basa sulla discretizzazione di una struttura continua che generalmente presenta infiniti gradi di libertà, con un insieme di regioni di dimensioni finite e forma semplice che non si intersecano e che sono tra loro interconnesse in un numero finito di punti predefiniti, detti *nodi*. Si suppone che gli spostamenti di un punto interno alla regione siano funzioni degli spostamenti nodali: il moto di ogni nodo viene, a sua volta, descritto da sei gradi di libertà indipendenti, dove ciascun grado di libertà viene definito come componente indipendente di traslazione o di rotazione. In questo modo si ottiene un'approssimazione del problema elastico del sistema continuo considerato alla soluzione di un sistema di equazioni lineari.

Si tratta di un metodo molto diffuso grazie alla sua flessibilità nel considerare le disomogeneità dei materiali e la loro anisotropia, le condizioni al contorno complesse e i problemi dinamici, e ciò lo si può notare dal vasto numero di software di calcolo disponibili in commercio.

Per ottenere dei risultati significativi è necessario che l'analisi sia caratterizzata da un elevato grado di precisione e un errore il più limitato possibile, e ciò dipende dalle dimensioni delle regioni in cui il sistema continuo è stato discretizzato; infatti, più la distanza tra i punti nodali è bassa e, quindi, le regioni hanno dimensioni ridotte, più i risultati ottenuti saranno attendibili. Pertanto, sistemi continui caratterizzati da geometrie particolarmente complesse, vengono discretizzati in modo tale da ottenere delle regioni il più ridotte possibile, soprattutto in corrispondenza delle zone di maggior interesse.

Si tratta, però, di una tecnica che non riesce a rappresentare in maniera ottimale il comportamento tenso – deformativo dei sistemi soggetti a rottura, poiché, trattandosi di un metodo al continuo, non consente la separazione reciproca tra gli elementi infinitesimi e ciò costituisce il maggiore svantaggio di questo metodo. [20]

Nel caso di un serbatoio di tipo IV, questa analisi risulta fondamentale per valutare la risposta meccanica delle calotte, poiché si tratta di una zona in cui sia la struttura del materiale, sia la geometria sono particolarmente complesse.

Come accennato precedentemente, sono molti i software che vengono utilizzati per condurre questa analisi, ma quello che viene riportato nella maggior parte degli articoli presenti in letteratura [21-24], è il Wound Composite Modeler, ovvero un particolare plug-in di Abaqus, che viene utilizzato per la modellazione di componenti realizzati mediante filament winding. Si tratta, infatti, di uno strumento particolarmente utile poiché presenta numerosi vantaggi, quali:

- Possibilità di realizzare in tempi brevi il profilo di base del serbatoio, che coincide con la superficie esterna del liner, utilizzando un modello a traiettorie geodetiche. Inoltre, si può definire una geometria arbitraria del liner, sulla quale il plug-in è in grado di sviluppare il lay-up.
- Possibilità di eseguire sia delle analisi semplificate basate sulla formulazione assialsimmetrica degli elementi, sia modelli completi tridimensionali.
- Capacità di emulare, nella costruzione del modello, il processo di filament winding: il plug-in costruisce gli strati in materiale composito tenendo in considerazione la variazione di spessore e di orientazione nella zona delle calotte, cercando di realizzare una geometria il più vicina possibile al manufatto reale.
- Capacità di calcolare, al termine della simulazione, gli output dedicati per il materiale composito: tensioni e deformazioni sia nella direzione delle fibre, che in quelle ortogonali ad essa e failure index relativi ai criteri di crisi più diffusi per i materiali compositi, come Tsai-Wu, Tsai-Hill, Hashin, ed altro ancora.

Mediante questo strumento, il progettista riesce a costruire un modello agli elementi finiti fedele al vero serbatoio in pochi passaggi.

Il primo step che prevede l'utilizzo di questo plug-in consiste nella costruzione della geometria definendo quale profilo di meridiana utilizzare e i parametri geometrici principali come R_B , R_C e la lunghezza del serbatoio L . Con questo strumento, è possibile sia creare modelli a metà serbatoio per ridurre il tempo necessario al calcolo, nel caso in cui le calotte siano simmetriche, sia a serbatoio completo.

Il profilo della meridiana può essere di vario tipo: può presentare una geometria emisferica, semi-ellissoidale o basata su delle traiettorie geodetiche, ma talvolta, se necessario, è possibile definire un profilo di calotta arbitrario esternamente al plug-in. Invece, il liner e i boss devono essere creati a parte poiché il software non presenta i comandi necessari alla loro modellazione. Il secondo step consiste nella definizione del rivestimento strutturale, prevedendo di specificare lo spessore di ciascuno strato, l'angolo di avvolgimento, la tipologia di materiale, ovvero, composito unidirezionale e la larghezza della banda di rovings.

Il terzo step prevede la creazione della mesh: in maniera molto rapida ripartisce la geometria in modo tale da facilitare la suddivisione in elementi. Una volta conclusa la fase di discretizzazione, il plug-in associa automaticamente le proprietà meccaniche a ciascun elemento: la matrice di elasticità del legame costitutivo viene opportunamente ruotata a seconda dell'orientazione delle fibre in corrispondenza dell'elemento stesso.

Infine, l'ultimo step prevede l'avviamento del calcolo e l'analisi dei risultati.

Come accennato in precedenza, il metodo appena descritto, ovvero il plug-in di Abaqus, costituisce una possibile soluzione da adottare per realizzare un'analisi agli elementi finiti di componenti assialsimmetrici ottenuti mediante filament winding, però, in letteratura scientifica, sono presenti numerosi esempi di software utilizzati per realizzare simulazioni FEM di serbatoi in materiale composito come, ad esempio, Ansys e NX [25-27].

In ogni caso, il procedimento risulta essere analogo a quello descritto precedentemente, ovvero, è necessario definire dapprima la geometria del mandrino e gli angoli di avvolgimento del filamento ponendo particolare attenzione alla zona delle calotte, per poi determinare la stratificazione complessiva, le proprietà dei materiali da utilizzare, la mesh e infine le condizioni al contorno del modello.

Molto spesso, vengono utilizzati dei software specificatamente sviluppati per realizzare delle simulazioni del processo di filament winding affinché fungano da supporto ai software utilizzati per l'analisi agli elementi finiti. Fra questi, sicuramente il software CADWIND è in assoluto quello più diffuso e viene utilizzato per definire la geometria del mandrino ed effettuare una valutazione accurata degli angoli di avvolgimento del filamento sia per la parte cilindrica, che per le calotte. A partire da simulazioni di processo è possibile esportare i dati ottenuti in software FEM per poi procedere con l'esecuzione di verifiche strutturali dei componenti.

L'utilizzo di simulazioni di processo ed agli elementi finiti è di fondamentale importanza per trarre vantaggi in fase di progettazione dei componenti, poiché si limita il numero di prototipi fisici necessari ad individuare il design ottimale che soddisfi i requisiti di progetto, comportando anche una riduzione dei costi della materia prima e dei tempi di produzione.

Di conseguenza, visti i costi limitati e grazie anche a teorie semplificate come quella del netting, è possibile realizzare numerose prove che generano risultati che possono essere scartati o validati prima di trovare le condizioni ottimali di avvolgimento e stratificazione. [28,29]

In uno studio di Sulaiman et al [30], sono state eseguite delle simulazioni FEM mediante il software Abaqus con lo scopo di valutare come l'angolo di avvolgimento del filamento influisse sulla pressione di scoppio e sullo spostamento massimo del guscio: angoli di avvolgimento a 0° e 90° sono stati testati per individuare quale fosse il valore che massimizzava le prestazioni meccaniche di serbatoi sottoposti a pressione interna. Nello studio è stata utilizzata una laminazione asimmetrica $[\theta/-\theta]_n$.

Dalla Figura 1.14, si evince che il valore ottimale dell'angolo di avvolgimento è pari a 55° ; ciò è in linea con i risultati previsti dalle teorie di failure applicate ai serbatoi e con le evidenze sperimentali.

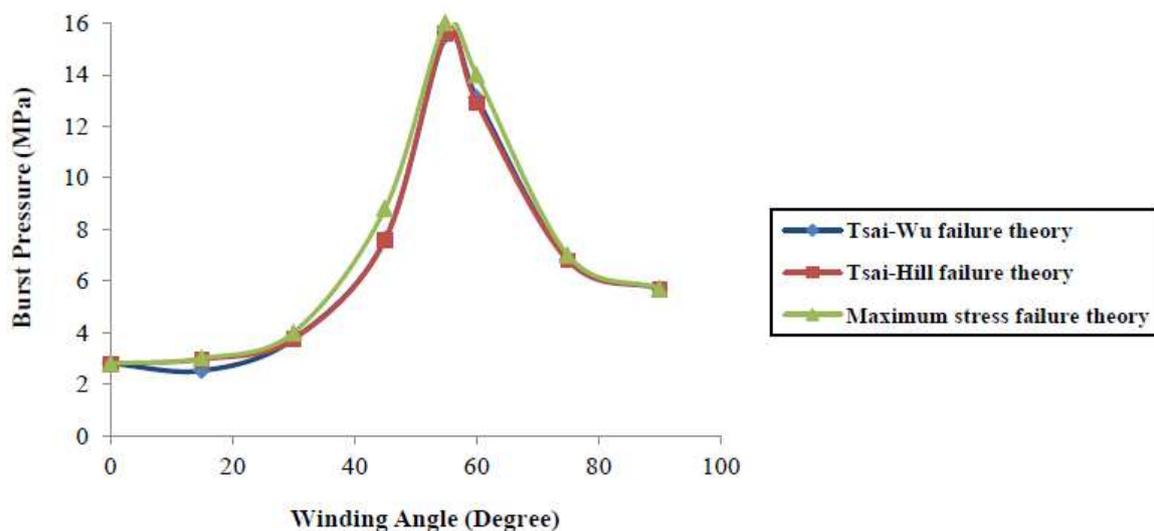


Figura 1.14 Pressione di scoppio di un serbatoio in composito al variare dell'angolo di avvolgimento. Valori di pressione massima simili sono stati ottenuti per diverse teorie di failure del laminato (Tsai_wu, Tsai-Hill e tensione massima ammissibile)

Uno studio di Mian et al [31], ha previsto l'esecuzione di analisi relative a diverse tipologie di stratificazione di serbatoi in composito con liner in alluminio. Nello specifico, sono state valutate delle sequenze cross – ply $[0/90]_s$ ed angle – ply $[\pm\theta]_{ns}$, $[90/\pm\theta]_{ns}$, $[0/\pm\theta]_{ns}$ per tre materiali differenti, ovvero, resina epossidica rinforzata con fibre di vetro, di kevlar e di carbonio, definendo, per ciascuna di esse, il numero di strati e gli angoli di avvolgimento. Le simulazioni sono state eseguite mediante il software Ansys, mentre i processi di ottimizzazione hanno richiesto l'utilizzo dei moduli di Design Optimization e Ansys APDL (Ansys Parametric Design Language). L'obiettivo dell'ottimizzazione consisteva nella minimizzazione del peso della struttura nel rispetto dei vincoli associati alla propria sicurezza strutturale, in accordo con il criterio di failure di Tsai-Wu.

I risultati ottenuti hanno dimostrato la fattibilità della metodologia proposta, in quanto ha consentito di ottenere delle stratificazioni ottimali per i serbatoi presi in esame. Lo spessore massimo della struttura si è ridotto notevolmente rispetto alle condizioni iniziali durante le iterazioni e inoltre si è riscontrato, come già verificato dallo studio precedente, che inclinazioni del filamento nell'intorno dei 55° costituiscono la soluzione ottimale poiché consentono di minimizzare il peso e massimizzare le performance meccaniche.

La Figura 1.15 sottostante rappresenta l'andamento dello spessore in relazione all'angolo di avvolgimento utilizzato.

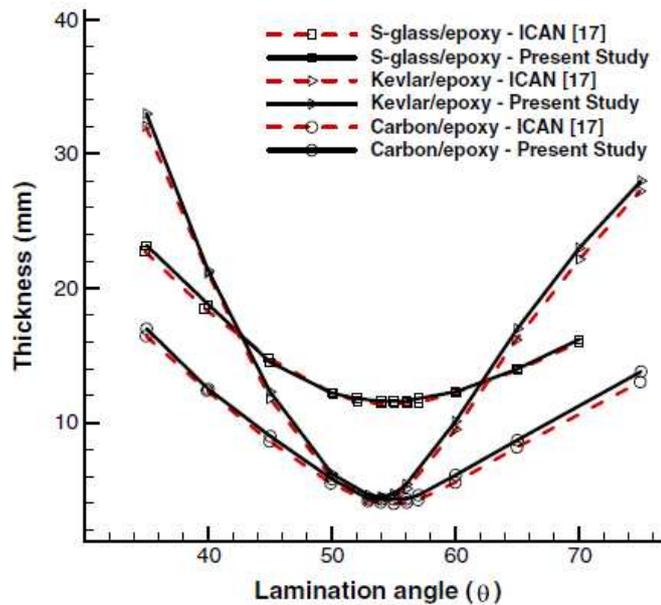


Figura 1.15 Risultati del processo di ottimizzazione per stratificazioni angle – ply

Inoltre, Leh et al [32] hanno proposto dei processi di ottimizzazione per serbatoi in composito con lo scopo di minimizzare il peso e, conseguentemente, anche costi e tempi di produzione, andando a modificare i seguenti parametri di progettazione: gli angoli di avvolgimento, il numero di strati circolari (hoop) ed elicoidali e la linea del lay-up. Inoltre, la funzione di ottimizzazione considerava anche il tipo di scoppio che può verificarsi, oltre al fatto di dover garantire la sicurezza fino ad un valore massimo di pressione.

La Figura 1.16 illustra le due modalità principali in cui può avvenire lo scoppio del serbatoio, ovvero:

- Safe: in cui avviene l'espulsione interna delle basi metalliche (Figura 1.16 a);
- Unsafe: le basi metalliche delle calotte vengono espulse verso l'esterno del serbatoio (Figura 1.16 b).

Entrambi questi fenomeni possono essere valutati mediante simulazioni FEM.



(a)



(b)

Figura 1.16 Tipologia di scoppio di serbatoi in pressione. (a) scoppio in condizioni di sicurezza con espulsione verso l'interno delle basi metalliche; (b) scoppio non sicuro con espulsione verso l'esterno delle basi metalliche.

1.4.4 Verifica a fatica dei compositi

Quando si progetta un componente strutturale, dopo aver verificato che sia in sicurezza mediante un'analisi FEM, una valutazione di fondamentale importanza è quella che prevede di stimare la sua vita a fatica.

La fatica è quel fenomeno che prevede il danneggiamento progressivo del materiale causato dall'applicazione di un carico in maniera ciclica continua per cui, benché il materiale venga sottoposto a dei valori di carico al di sotto del limite elastico, si verificano dei danni microscopici.

Come accade per i materiali isotropi, anche nei compositi le rotture a fatica sono molto frequenti e si manifestano con la formazione e propagazione dei difetti: i danni che si creano, inizialmente microscopici, tendono ad accumularsi in tutto il materiale aumentando progressivamente le proprie dimensioni fino a diventare delle vere e proprie macro-crepe, oppure, possono causare dei danni su scala macroscopica che comportano il cedimento definitivo del materiale.

Parametri come il carico meccanico, i gradienti termici, la penetrazione di sostanze chimiche e le condizioni ambientali influiscono notevolmente sulla velocità con cui si verificano e si propagano i danni nel materiale; pertanto, la fatica costituisce un processo molto complesso.

La vita a fatica (N) di un componente viene definita come il numero totale di cicli di sollecitazione necessari a comportare il cedimento del materiale: l'inizio del cedimento può essere suddiviso in differenti stadi, riportati nella Figura 1.17.



Figura 1.17 Stadi del cedimento a fatica del materiale. Fonte: [33]

Nella prima fase della rottura per fatica, si formano delle microcricche all'interno del materiale che portano alla nucleazione delle cricche stesse, e quindi, ad un danneggiamento (seconda fase) che a sua volta comporta delle microfratture (terzo stadio). Generalmente, in questa fase, la probabilità che si verifichi una nucleazione delle cricche aumenta in funzione dell'intensità della sollecitazione, K_I . Questo fattore dipende dalla presenza di vuoti, inclusioni e difetti e dalla topografia delle superfici o delle interfacce: una bassa rugosità aumenta il tempo necessario per la nucleazione delle cricche. La fase successiva all'innescio delle cricche prevede la crescita delle stesse in maniera costante fino a raggiungere una dimensione critica; a questo punto si verifica una propagazione catastrofica poiché il materiale rimanente non è più in grado di sostenere un'ulteriore sollecitazione.

Generalmente, il regime delle prove a fatica prevede di esercitare un carico ciclico tra due livelli prefissati di sollecitazione: quest'ultima può presentare un'ampiezza costante, comportando un'inversione completa del carico, come illustrato in Figura 1.18.

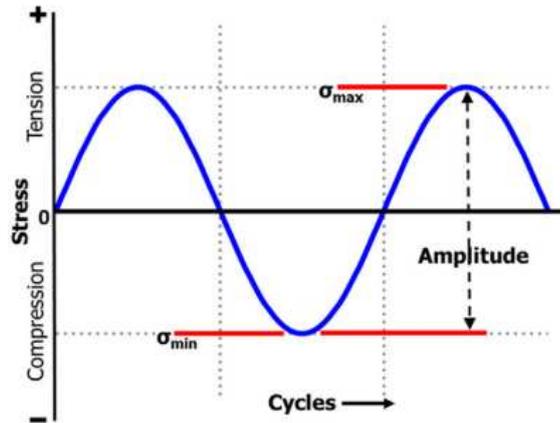


Figura 1.18 Andamento del carico in relazione al numero di cicli. Fonte: [33]

In questo modo, l'onda di carico sinusoidale passa da un carico a trazione ad un carico a compressione con sollecitazioni massime e minime uguali.

Le espressioni matematiche che definiscono l'intervallo di sollecitazione ($\Delta\sigma$), il valore di sollecitazione media (σ_m) e l'ampiezza della sollecitazione (σ_a) sono le seguenti [33]:

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (23)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (24)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (25)$$

Il fenomeno della rottura a fatica nei materiali compositi è ben più complesso rispetto a quello tipico dei materiali metallici, in quanto si possono innescare differenti processi di danneggiamento, come:

- Scollamento tra fibra e matrice (*debonding*);
- Fessurazione della matrice;
- Rottura delle fibre;
- Scollamento delle lamine (delaminazione)

La frattura delle fibre dipende fortemente dalla loro resistenza, così come la fessurazione della matrice che può essere in qualche modo rallentata se il rinforzo utilizzato è caratterizzato da un'elevata rigidità, come ad esempio il carbonio, poiché essendo in grado di sopportare dei

carichi elevati, limita la deformazione del sistema. Il debonding si genera solitamente quando l'adesione in corrispondenza dell'interfaccia fibra – matrice è molto bassa.

Inoltre, diversamente da quanto accade nei materiali isotropi in cui la formazione di un difetto è seguita da una crescita rapida e con legge esponenziale, nei compositi il danneggiamento a fatica può iniziare anche molto prima del cedimento e, in alcuni casi, la formazione di cricche, grazie alla particolare struttura del laminato, può subire un arresto piuttosto che portare ad una rottura. Se il composito è costituito da degli strati multipli, può verificarsi una rottura a fatica per delaminazione.

La resistenza a fatica dei materiali compositi dipende da numerosi fattori legati sia alla struttura del materiale, sia alle condizioni di sollecitazione ed ambientali, quali:

- materiale della matrice;
- orientamento delle fibre e sequenza di impacchettamento;
- percentuale in volume di fibre;
- adesione fibra – matrice;
- tipologia di sollecitazione;
- tensione media;
- frequenza di applicazione del carico;
- condizioni ambientali (umidità, corrosione);
- effetti di intaglio.

Tra questi, l'effetto della tensione media ricopre sicuramente un ruolo fondamentale e l'evidenza sperimentale mostra che per i materiali compositi, per quanto riguarda la trazione, essa è simile a quella dei materiali isotropi. In particolare, all'aumentare della tensione media, la tensione alternata corrispondente ad una vita a fatica prefissata decresce fino a tendere a zero quando la tensione media tende a quella di rottura del materiale, come mostrato in Figura 1.19.

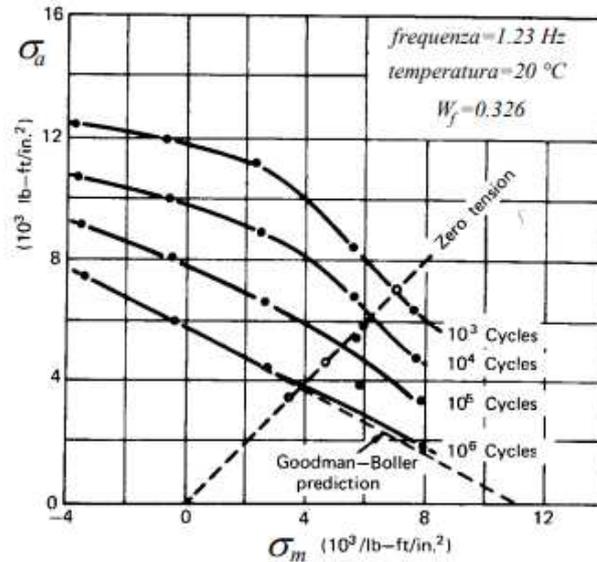


Figura 1.19 Andamento della σ_a in funzione della σ_m in relazione al numero di cicli N. Fonte: [34]

Analogamente ai materiali isotropi, l'influenza della tensione media viene rilevata effettuando delle curve di fatica a tensione media costante. Nelle condizioni di temperatura ambiente ed in presenza di cicli trazione-trazione, i risultati sperimentali validano una legge, nota come legge di Goodman – Boller, simile a quella utilizzata per i materiali metallici, ovvero:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_l} + \frac{\sigma_m}{\sigma_R} = 1 \quad (26)$$

È stata dimostrata la sua validità sia per la resistenza a vita infinita, sia a vita prefissata e, in quest'ultimo caso, la tensione limite σ_l rappresenta la resistenza a fatica a termine.

La legge (26), però, non è sempre valida; ad esempio, nei compositi in fibra di carbonio, si è notato che la presenza di tensioni medie negative comporta una maggior riduzione della resistenza a fatica soprattutto quando si verificano dei fenomeni di concentrazione delle tensioni; pertanto, in questo caso per ottenere una valutazione attendibile della resistenza o della vita a fatica del componente in progetto, è necessario utilizzare i dati sperimentali che si hanno a disposizione.

Per operare in maniera accurata, quindi, dopo aver definito le caratteristiche del laminato che si vuole utilizzare ed effettuato una progettazione del componente, è necessario procedere con la valutazione della fatica, se possibile, considerando le condizioni di esercizio.

L'equazione maggiormente utilizzata per mettere in relazione la vita a fatica (a termine) con il carico e le caratteristiche della sollecitazione è espressa nel seguente modo:

$$S = \sigma_R(m \log N + b) \quad (27)$$

dove S è la resistenza a fatica, σ_R è la tensione a rottura del materiale, N il numero di cicli ed m e b due coefficienti che dipendono dal materiale. [34]

Capitolo 2 – Analisi LCA

2.1 Introduzione

Negli ultimi tempi, a causa dell'aumento dei problemi legati all'inquinamento ambientale, si è riscontrata una maggior consapevolezza dell'importanza della protezione ambientale, sia da parte delle aziende che dei consumatori. Le aziende, infatti, tendono sempre di più ad inserire nel mercato dei prodotti opportunamente progettati per ridurre l'impatto ambientale. Molto spesso, però, si sente parlare anche di *greenwashing*, ovvero una strategia di comunicazione o marketing adottata da aziende, istituzioni ed enti, che presentano le attività svolte come ecosostenibili per cercare di ingannare i consumatori, tenendo nascosto l'impatto ambientale negativo che hanno. A tal proposito, fare affidamento su degli strumenti in grado di valutare l'effettivo impatto ambientale di un prodotto, processo o servizio risulta necessario sia ai consumatori per non “cadere nella trappola”, sia a tutte le aziende che si impegnano in maniera genuina verso processi di sostenibilità.

Per poter valutare l'impatto di un prodotto, processo o servizio in maniera efficace, è necessario avere una visione complessiva del prodotto e considerare tutti gli impatti che si generano durante le varie fasi del ciclo di vita a partire dall'estrazione delle materie prime, fino ad arrivare al suo smaltimento; questa mentalità è nota come *Life Cycle Thinking (LCT)*.

La metodologia che mette in pratica il concetto di *LCT* per valutare l'impatto ambientale è nota come *LCA*, ovvero *Life Cycle Assessment*.

Si tratta di un metodo oggettivo quantitativo che consente di esprimere in termini numerici il potenziale impatto ambientale di un prodotto, servizio o attività sui differenti macrosistemi terrestri, attraverso una quantificazione dei consumi di materiale, energia e delle emissioni ambientali in relazione all'intero ciclo di vita. Quindi, si includono nell'analisi le fasi di estrazione e trattamento delle materie prime, la fabbricazione, il trasporto, la fase d'uso e la fase di fine vita (*End of Life*). Tuttavia, questo metodo fornisce dei risultati non estremamente precisi per svariate cause come: l'incertezza intrinseca nella modellazione degli impatti e dei dati che vengono utilizzati, l'integrazione dei dati nel tempo e nello spazio e il fatto che molto spesso gli impatti che si valutano sono futuri.

Nella Figura 2.1 sono illustrate tutte le fasi del ciclo di vita del prodotto incluse nell'analisi LCA.



Figura 2.1 Rappresentazione delle fasi del ciclo di vita di un prodotto incluse nell'analisi. Fonte: [f]

L'obiettivo di questo strumento è quello di individuare le fasi del ciclo vita che influiscono maggiormente sull'impatto ambientale complessivo, in modo tale da agire su quelle più critiche per ottenere dei miglioramenti, ovvero per ridurre l'impatto ad esse relativo. L'analisi LCA può essere condotta durante qualsiasi fase del ciclo di vita, ma generalmente si utilizza in fase iniziale di progettazione; pertanto, si parla di *Eco-Design* o *DfE*, ovvero *Design for Environment*. [g]

Generalmente, l'LCA opera mediante due approcci:

- From cradle to grave (“dalla culla alla tomba”): prende in esame l'intero ciclo di vita del prodotto, ovvero dall'estrazione/realizzazione delle materie prime fino alla fase di fine vita;
- From cradle to gate (“dalla culla al cancello”): l'analisi si ferma all'interno dell'azienda, tralasciando ciò che accade durante la fase d'uso e la fase di fine vita.

Facendo riferimento alla norma UNI EN ISO 14040, lo studio LCA comprende l'esecuzione di quattro fasi fondamentali, rappresentate nella Figura 2.2 sottostante: *Definizione dell'obiettivo e degli scopi*, *Analisi dell'Inventario*, *Valutazione degli impatti* ed *Interpretazione dei risultati*.

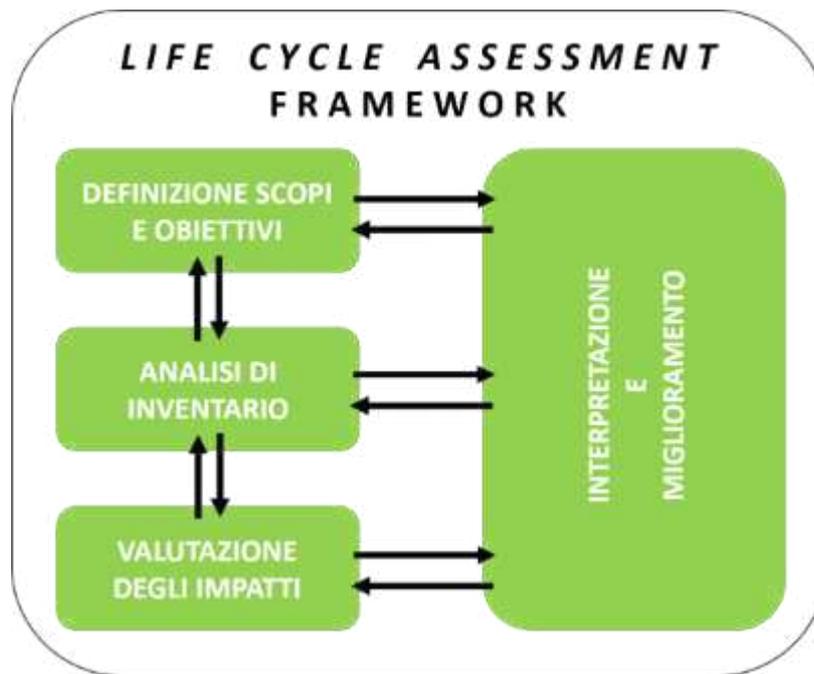


Figura 2.2 Fasi dello studio LCA. Fonte: [g]

2.2 Definizione dell'obiettivo e degli scopi

In questa fase si definiscono l'obiettivo e il campo di applicazione dell'analisi, specificando l'unità funzionale e i confini del sistema. In primo luogo, è necessario definire le motivazioni che portano alla valutazione dell'impatto ambientale del ciclo di vita del prodotto, ovvero l'*obiettivo*, poiché si tratta di un'analisi specifica e mirata. L'obiettivo indica l'applicazione prevista, le motivazioni per cui effettuare lo studio, il tipo di pubblico cui è destinato, ovvero a chi verranno comunicati i risultati e, infine, se questi ultimi saranno utilizzati per effettuare delle comparazioni con altre analisi LCA. In quest'ultimo caso, però, è necessario che le ipotesi e i contesti degli studi LCA condotti siano equivalenti.

Generalmente, le motivazioni per cui si conduce lo studio riguardano il tema legato all'ambiente, come ad esempio, valutare quanto un prodotto rechi danno ad un particolare ecosistema, quantificare le emissioni di CO₂ e identificare le opportunità di miglioramento del prodotto; ma talvolta si estendono anche all'ambito del marketing.

Successivamente, si definisce il *campo di applicazione* del sistema in maniera tale da assicurare che l'ampiezza, la profondità e il grado di dettaglio dello studio siano in accordo con l'obiettivo prefissato e sufficienti a conseguirlo. Questo, inoltre, determina l'affidabilità dei risultati che si ottengono dall'analisi, includendo aspetti come: i confini del sistema di analisi, le categorie

d'impatto ambientale valutate, le metodologie di valutazione, la qualità dei dati, le limitazioni del metodo e le ipotesi iniziali.

L'unità funzionale rappresenta l'oggetto di studio che si vuole analizzare che può essere un prodotto, un'attività umana o un processo produttivo. Essa costituisce l'unità di riferimento delle prestazioni del sistema, che esprime la funzione del prodotto in un'unità definita, misurabile e coerente con gli scopi dello studio. Un sistema, generalmente, può avere un elevato numero di funzioni, però ne viene scelta soltanto una in accordo con l'obiettivo e il campo di applicazione dell'analisi. Il suo scopo principale è quello di rappresentare un riferimento a cui legare elementi in ingresso e in uscita e ciò è necessario per comparare i risultati dell'LCA relativi anche a sistemi differenti; per questo motivo, definire l'unità funzionale in maniera ottimale è fondamentale.

Inoltre, l'unità funzionale è utile per descrivere il sistema attraverso un diagramma di flusso che evidenzia i processi unitari e le loro interrelazioni. Ciascun processo unitario deve essere definito indicando dove esso ha inizio, dove finisce e qual è la natura delle trasformazioni che vengono eseguite al suo interno.

Una volta nota l'unità funzionale, si definiscono i confini del sistema, ovvero, quali processi unitari vengono inclusi. I criteri che vengono utilizzati per farlo sono fondamentali per ottenere dei risultati caratterizzati da un elevato grado di fiducia e per avere una maggior probabilità di raggiungere gli obiettivi prefissati. Generalmente, i processi unitari e i flussi che vengono inclusi nei confini del sistema e, quindi, che vengono sottoposti ad analisi sono: l'acquisizione delle materie prime; gli elementi in ingresso e in uscita nei processi produttivi; la distribuzione ed il trasporto; la produzione e l'utilizzo dei combustibili, dell'elettricità e del calore; l'uso e la manutenzione dei prodotti; lo smaltimento dei rifiuti; il recupero dei prodotti dopo l'uso; la fabbricazione dei materiali ausiliari; la fabbricazione, la manutenzione e la dismissione delle attrezzature utilizzate ed infine operazioni aggiuntive come illuminazione e riscaldamento. Molto spesso accade che durante l'esecuzione dell'analisi si vede necessario ridefinire i confini del sistema andando ad includere altri processi rilevanti o ad escluderne alcuni irrilevanti. [35,36] [g]

2.3 Analisi dell'Inventario (LCI)

L'analisi dell'inventario, nota anche come *Life Cycle Inventory*, include la raccolta dei dati e le procedure di calcolo che consentono di quantificare gli elementi in ingresso e in uscita relativi

al sistema considerato. Si tratta di un processo iterativo, infatti, all'aumentare dei dati che si hanno a disposizione e delle informazioni riguardo il sistema, è possibile identificare dei nuovi requisiti o limitazioni dei dati stessi; in questo modo si richiede una variazione nella modalità di raccolta, purché si rispettino gli obiettivi dello studio.

Per poter valutare l'input e l'output di tutte le fasi del ciclo di vita, ovvero ciò che si preleva dall'ambiente e ciò che viene restituito, è necessario che i dati siano attendibili e chiari. Essi possono essere classificati in differenti macrocategorie, tra cui: elementi in ingresso come energia, materie prime, materiali ausiliari; prodotti, coprodotti e rifiuti del processo; emissioni in aria, scarichi nell'acqua e nel suolo ed altri aspetti ambientali. Una volta che i dati sono stati raccolti devono essere validati, messi in relazione con i processi unitari e correlati al flusso di riferimento, ovvero all'unità funzionale.

Il materiale raccolto può essere suddiviso in dati primari, ovvero quelli che vengono forniti dall'azienda, in quanto fanno riferimento ai processi specifici ed agli impianti oggetti di studio e dati secondari che appartengono a database, alla letteratura tecnica del settore, oppure che vengono ottenuti calcolandoli da altre fonti. Inoltre, esistono dati specifici che si riferiscono al processo che si sta prendendo in esame e possono essere sia primari che secondari e dati generici che riguardano, invece, dei sistemi altrettanto generici; quindi, sono meno dettagliati e caratterizzati da una qualità inferiore.

Per poter rispettare l'obiettivo e il campo di applicazione dell'LCA è necessario valutare la qualità dei dati. Generalmente, i requisiti di qualità dei dati dovrebbero includere il periodo temporale di riferimento, l'area geografica, la tecnologia di riferimento, ma anche la precisione, la completezza, la rappresentatività, la coerenza, la riproducibilità, le fonti e l'incertezza delle informazioni.

In questo modo, si ottengono i risultati d'inventario del sistema considerato per ogni processo unitario e per l'unità funzionale presa in considerazione. Generalmente, il calcolo dei flussi di energia dovrebbe considerare i diversi combustibili, le varie tipologie di sorgenti elettriche utilizzate, l'efficienza della conversione e della distribuzione di energia, così come degli input e output correlati all'utilizzo di questi flussi. In realtà, però, sono pochi i processi industriali che producono un solo elemento di output o che presentano una linearità tra ingresso e uscita; infatti, una gran parte di essi ha più di un prodotto e ricicla prodotti intermedi o di scarto considerandoli come materie prime. Per questo motivo, è necessario utilizzare delle procedure di allocazione che trattano sistemi che includono processi multipli e sistemi di riciclaggio.

[35,36] [g]

2.4 Valutazione degli impatti

Dopo aver eseguito l'analisi dell'inventario si procede con la fase più complessa e delicata dell'intera analisi, ovvero la fase di valutazione dei potenziali impatti ambientali, anche nota come LCIA, acronimo di *Life Cycle Impact Assessment*. L'LCIA consente di valutare la portata degli impatti ambientali sulla base dei risultati ottenuti dalla fase di LCI. Si tratta, infatti, di un processo che associa i dati dell'inventario a delle specifiche categorie di impatto e indicatori di categoria. Durante l'esecuzione di questa fase, è possibile assistere ad un processo iterativo di revisione dell'obiettivo e del campo di applicazione dello studio, qualora si noti, dalla valutazione eseguita, che questi non possano essere raggiunti e rispettati. Inoltre, si possono riscontrare dei problemi di soggettività legati alla scelta, alla modellazione ed alla valutazione delle categorie considerate.

La fase di LCIA è suddivisa in più elementi, rappresentati nella Figura 2.3.

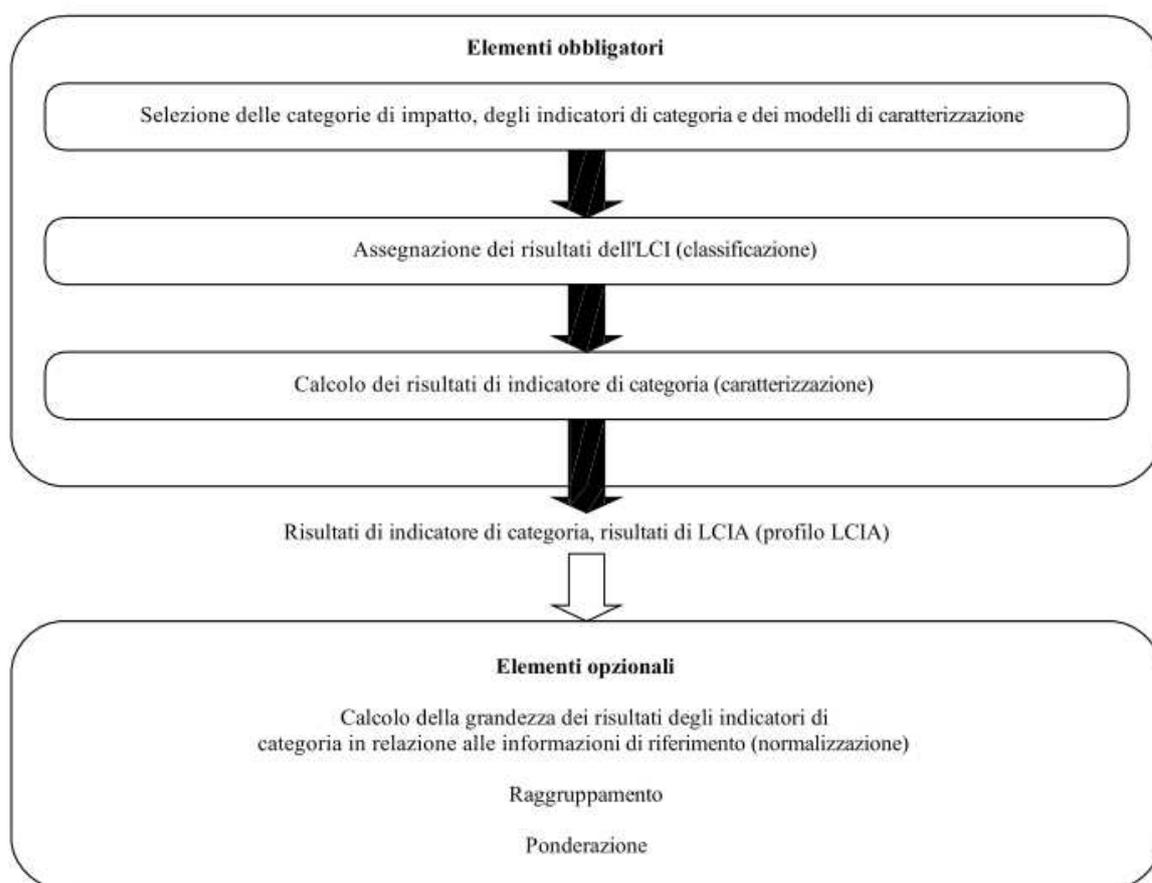


Figura 2.3 Elementi che costituiscono la fase di LCIA, Fonte: [35]

I motivi per cui viene effettuata tale suddivisione vengono riportati di seguito:

- ciascun elemento dell'LCIA è distinto e può essere definito chiaramente;
- la definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione può considerare ciascun elemento dell'LCIA separatamente;
- una valutazione della qualità dei metodi dell'LCIA può essere effettuata per ciascun elemento;
- l'uso dei valori e della soggettività di ogni elemento possono essere resi chiari per il riesame critico e la redazione dei rapporti.

Solitamente, questa fase di valutazione è assistita da un software di calcolo, come ad esempio GaBi, SimaPro ed altri ancora, che si occupa di aggregare i risultati dell'analisi LCA, noti come flussi in ingresso e in uscita, e di normalizzarli in grandezze o parametri facilmente utilizzabili, chiamati *Eco-punti* o *Eco-indicatori*.

Questo metodo valuta tre tipi di danno ambientale:

- Human Health (Salute Umana): l'unità di misura utilizzata è *DALY*, acronimo di *Disability Adjusted Life Years*, ovvero gli anni vissuti al netto della disabilità; si tratta della somma degli anni di vita persi a causa della mortalità prematura (*Years of Life Lost – YLLs*) e degli anni di vita vissuti in condizioni di salute non ottimale o di disabilità (*Years Lived with Disability – YLDs*).
- Ecosystem Quality (Qualità dell'ecosistema): l'unità di misura di riferimento è $PDF * m^2 * Year$ e rappresenta la categoria d'impatto del Land Use. *PDF*, acronimo di *Potential Disappeared Fraction* definisce l'incremento percentuale delle specie di piante vascolari che hanno un'elevata probabilità di estinguersi; il danno totale si ricava moltiplicando il *PDF* per un'area e un intervallo di tempo.
- Resources (Sfruttamento delle risorse): si misura in *MJ surplus* e si tratta della tendenza alla riduzione della qualità delle risorse. L'ipotesi effettuata è che, se la disponibilità di risorse diminuisce, lo sforzo per la successiva procurazione delle stesse sarà maggiore e il danno in *MJ surplus energy* sta a significare che, in seguito ad una certa estrazione, quella successiva per la stessa risorsa richiederà un quantitativo di energia aggiuntiva pari ad un MJ. Ciò è dovuto sia ad una minor concentrazione della risorsa, sia alle caratteristiche di estrazione sempre più sfavorevoli.

I tre parametri sopraelencati sono i più significativi dell'impatto e vengono sottoposti ad un processo di normalizzazione per poter ricavare degli *ECO-punti*.

La normalizzazione, infatti, viene utilizzata per omogenizzare i dati espressi in *DALY*, *MJ surplus* e *PDF * m² * Year*, in modo tale da ottenere un parametro univoco del danno ambientale.

I valori normalizzati vengono successivamente moltiplicati per i relativi pesi e sommati tra loro per ottenere gli ECO-punti.

La legge (28) definisce il valore pesato del danno come il prodotto tra il valore del danno normalizzato *N* e il fattore peso di ciascuna categoria di danno $P(P_1, P_2, P_3)$:

$$W = N * P \quad (28)$$

Da questa si evince che il danno causato dal processo analizzato è maggiore quanto più il punteggio ottenuto è elevato.

Questa fase di valutazione degli impatti presenta delle limitazioni correlate al fatto che tratta soltanto i problemi ambientali specificati nell'obiettivo e nel campo di applicazione, senza considerare tutti i problemi ambientali del sistema. Inoltre, non sempre è in grado di dimostrare differenze significative tra le categorie d'impatto e i risultati dell'indicatore correlato di sistemi di prodotto alternativi; ciò può essere legato al limitato sviluppo dei modelli di caratterizzazione, all'analisi di sensibilità e di incertezza della fase di LCIA; alle limitazioni della fase di LCI come l'impostazione dei confini del sistema, che potrebbe non includere tutti gli elementi di input e output di ciascun processo unitario; ad una qualità dei dati inadeguata a causa di incertezze o differenze nelle procedure di allocazione e aggregazione ed, infine, alle limitazioni nella raccolta di dati appropriati e rappresentativi per ciascuna categoria d'impatto. L'analisi della sensibilità citata nelle righe precedenti è una tecnica di analisi dell'incertezza che viene generalmente utilizzata per valutare l'influenza che un certo cambiamento di fattori ha su un gruppo di indicatori chiave dal punto di vista quantitativo. [35,36] [g]

2.5 SimaPro

Il software utilizzato come supporto all'analisi LCA nel presente lavoro è SimaPro. Esso, infatti, costituisce il software più diffuso per supportare l'analisi LCA di un prodotto, processo o servizio durante la fase di LCIA da oltre 30 anni e viene utilizzato sia da aziende, sia da società di consulenza ed università in più di 80 paesi. Si tratta di uno strumento che agevola

l'utente ad applicare le proprie competenze riguardo la sostenibilità in modo tale da ottenere un processo decisionale efficace, migliorare il ciclo di vita degli elementi analizzati e ridurre l'impatto negativo dell'azienda. Costituisce la soluzione ottimale per raccogliere, analizzare e monitorare dati relativi alle prestazioni ambientali di prodotti, processi e servizi, fornendo le informazioni necessarie all'utente per effettuare un cambiamento sostenibile.

Questo software è stato sviluppato da Pré Sustainability per fornire informazioni basate sulla scienza e in totale trasparenza, evitando processi di tipo "black-box".

Il software può essere utilizzato per varie applicazioni come: reportistica di sostenibilità, carbon footprinting e water footprinting, progettazione di prodotti, generazione di dichiarazioni ambientali di prodotto e determinazione di indicatori chiave di prestazione.

SimPro consente di:

- modellare ed analizzare facilmente cicli di vita complessi in maniera sistematica e trasparente;
- misurare l'impatto ambientale di prodotti e servizi in tutte le fasi del ciclo di vita;
- identificare i punti critici in ogni punto della catena di fornitura: dall'estrazione delle materie prime alla produzione, alla distribuzione, all'uso ed allo smaltimento.

Si tratta inoltre di un software particolarmente trasparente, economicamente vantaggioso, robusto ed affidabile, ma soprattutto presenta un'interfaccia caratterizzata da un'elevata semplicità.

In relazione alla prima caratteristica elencata, esso costituisce l'unico software LCA in grado di offrire una trasparenza completa e di garantire il pieno controllo degli studi LCA effettuati, consentendo di visualizzare tutti i dettagli relativi a database, processi unitari, reti di fornitura, risultati ed ogni singola fonte d'impatto. È chiaro, però, che alla base del suo utilizzo devono esserci delle scelte consapevoli: ipotesi nascoste vanno assolutamente evitate.

Per quanto riguarda l'aspetto economico, invece, si deve considerare che con un abbonamento a SimaPro si avrà sempre accesso alla sua ultima versione, al supporto tecnico ed agli aggiornamenti del database. Generalmente include una serie di database LCI, come Ecoinvent v3 e Agri-footprint specifico per il settore. Si tratta, quindi, di uno strumento economico e scientifico in grado di offrire soluzioni ottimali per qualsiasi utente.

Infine, essendo stato realizzato sulla base di 30 anni di leadership di pensiero sulle metriche di sostenibilità e di contributi ai principali sviluppi della ricerca e delle politiche, risulta essere molto robusto ed affidabile. Pertanto, è lo strumento preferito per la realizzazione di LCA conformi alle norme ISO, come ISO 14067 e 14040, EPD e report.

Con SimaPro, inoltre, è possibile costruire modelli complessi e sistematici dal punto di vista del ciclo di vita calcolando l'incertezza, i parametri di processo e di progetto. Processi unitari e allocazione di più processi di output sono compresi nel modello.

Esso dispone anche di una potente vista di rete che permette di andare in profondità nel modello per visualizzarne i risultati: in questo modo risulta molto semplice individuare eventuali criticità, approfondirle e risolverle.

Questo software possiede anche una funzione multiutente che consente a più persone di lavorare contemporaneamente allo stesso progetto in un unico database centrale condiviso, permettendo la collaborazione fra vari colleghi e clienti in tempo reale con lo scopo di raccogliere dati o condividere scenari LCA. [h]

SimaPro, inoltre, consente di utilizzare numerosi metodi per l'analisi dei risultati che tengono in considerazione delle categorie d'impatto ambientali differenti; pertanto, a seconda delle esigenze è possibile scegliere il metodo che risulta essere più adatto.

Nel caso specifico in esame, i metodi utilizzati per elaborare i risultati sono i seguenti: Cumulative Energy Demand, ReCiPe 2016 e ICCP Greenhouse Gas Emission.

2.5.1 Cumulative Energy Demand

La Cumulative Energy Demand, anche nota come consumo di energia primaria, quantifica, attraverso dei fattori di caratterizzazione, tutta l'energia diretta e indiretta utilizzata nel ciclo di vita di un prodotto. Sono inclusi tutti i processi che rientrano nei confini del sistema come l'estrazione delle materie prime, la produzione e la fase di smaltimento. Il CED viene espresso in MJ ed è la somma della domanda di energia fossile, nucleare, eolica, idroelettrica e solare utilizzata durante le varie fasi del ciclo di vita considerate nello studio specifico. Già dalle prime analisi LCA, il consumo di energia primaria è stato uno degli indicatori chiave utilizzati e ancora oggi viene spesso impiegato. Nonostante ciò, non esiste ancora una standardizzazione di questo metodo. [37]

2.5.2 ReCiPe 2016

ReCiPe è un metodo sviluppato nel 2008 che fornisce una "ricetta" per calcolare gli indicatori delle categorie d'impatto del ciclo di vita. L'acronimo rappresenta le iniziali degli istituti che hanno contribuito al progetto: RIVM e Radbound University, CML e Prè. Questo metodo unisce due differenti approcci e fornisce risultati sia a livello intermedio (come CML), sia a livello finale (come Eco-indicatore 99).

Esso costituisce il successore di Eco-indicator 99 e CML-LA, e lo scopo iniziale per cui è stato realizzato era quello di integrare “l’approccio orientato al problema” di CML-LA e “l’approccio orientato al danno” di Eco-indicator 99. Il primo definisce le categorie d’impatto ad un livello intermedio comportando una bassa incertezza dei risultati, ma allo stesso tempo, fornendo informazioni relative a numerose categorie d’impatto, complica l’interpretazione dei risultati; il secondo invece la facilita, poiché fornisce dati relativi soltanto a tre categorie d’impatto, ma allo stesso tempo, presenta una maggiore incertezza. ReCiPe implementa entrambe le strategie presentando sia categorie d’impatto intermedie (orientate ai problemi), sia finali (orientate ai danni).

A livello intermedio vengono considerate diciotto categorie d’impatto che sono focalizzate in specifici problemi ambientali e la loro valutazione fornisce una visione comprensiva dell’effetto di un prodotto o processo sull’ambiente; esse vengono riportate di seguito:

1. climate change (CC)
2. ozone depletion (OD)
3. terrestrial acidification (TA)
4. freshwater eutrophication (FE)
5. marine eutrophication (ME)
6. human toxicity (HT)
7. photochemical oxidant formation (POF)
8. particulate matter formation (PMF)
9. terrestrial ecotoxicity (TET)
10. freshwater ecotoxicity (FET)
11. marine ecotoxicity (MET)
12. ionising radiation (IR)
13. agricultural land occupation (ALO)
14. urban land occupation (ULO)
15. natural land transformation (NLT)
16. water depletion (WD)
17. mineral resource depletion (MRD)
18. fossil fuel depletion (FD)

A livello finale, la maggior parte di queste categorie d’impatto intermedie è moltiplicata per i fattori di danno e aggregate in tre categorie:

1. Human Health
2. Ecosystems
3. Resource surplus costs

Quest'ultime vengono poi normalizzate, ponderate ed aggregate in un unico punteggio. [37]

La Figura 2.4 sottostante illustra le relazioni tra i parametri dell'inventario del ciclo di vita (a sinistra), le diciotto categorie a livello intermedio (al centro) e le tre categorie finali, compreso il singolo punteggio (a destra).

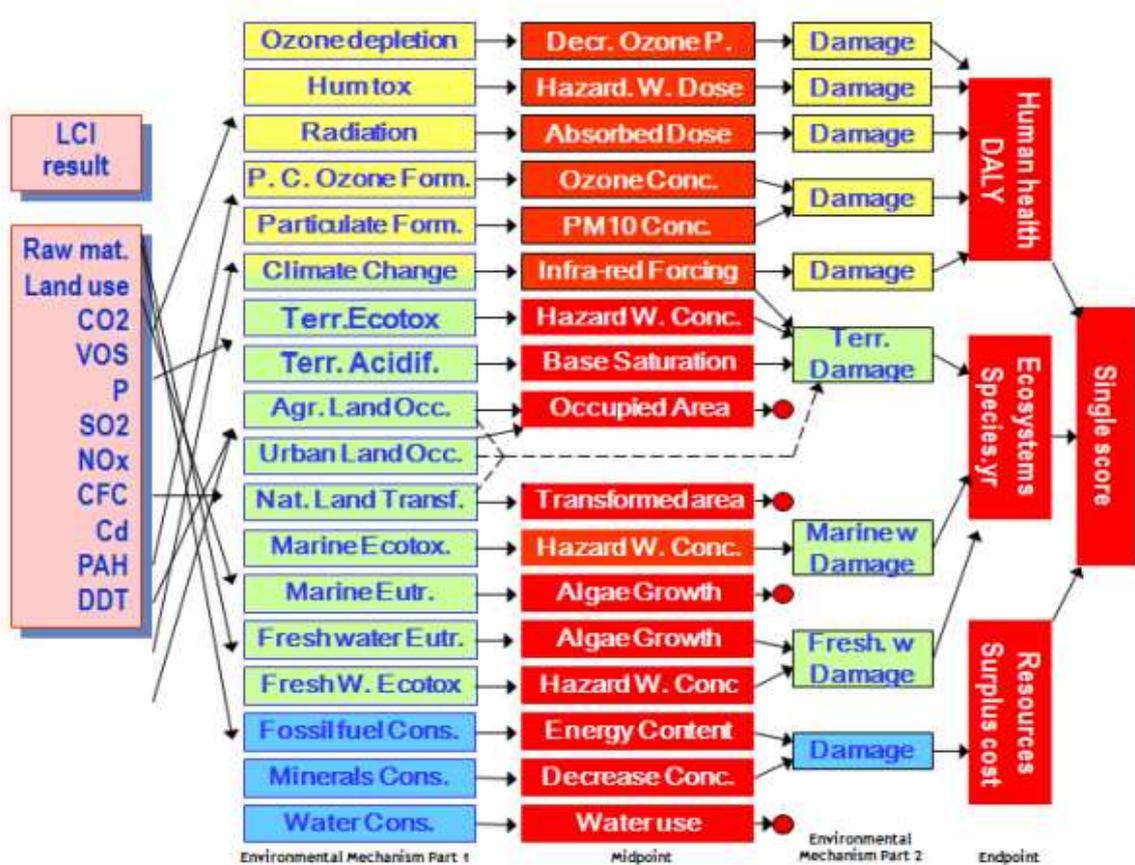


Figura 2.4 Relazione tra i dati dell'inventario e le categorie d'impatto ai livelli intermedio e finale. Fonte: [37]

2.5.3 ICCP GWP 2021

Il Global Warming Potential (GWP) è un metodo che viene utilizzato per quantificare le emissioni dei gas serra nell'atmosfera, definiti anche come GreenHouse Gases (GHG), e per valutare come essi influiscano sul riscaldamento globale e sul cambiamento climatico. Esso considera il calore assorbito da ciascun gas serra come un multiplo del calore che sarebbe assorbito dalla stessa quantità di anidride carbonica e valuta i loro effetti negli anni. Le stime

dei valori di GWP ogni 20 e 100 anni sono periodicamente compilati ed inseriti in dei report dell'International Panel on Climate Change (IPCC). Nello specifico, il metodo utilizzato nell'analisi è l'ICCP GWP 2021, ovvero il successore dell'ICCP GWP 2013. Esso fornisce differenti fattori di caratterizzazione: sei quantificano il potenziale di riscaldamento globale (GWP) e due il potenziale di temperatura globale (GTP). In SimaPro, sono incluse due versioni dello stesso metodo, una include l'aggiornamento sull'anidride carbonica e una no. Per il GWP, inoltre, sono implementati differenti orizzonti temporali: 20 anni, 100 anni (default) e 500 anni. Di seguito vengono riportati gli otto fattori di caratterizzazione:

- IPCC2021 GTP 100
- IPCC2021 GTP100 (incluso assorbimento di CO₂)
- IPCC2021 GWP100
- IPCC2021 GWP100 (incluso assorbimento di CO₂)
- IPCC2021 GWP20
- IPCC2021 GWP20 (incluso assorbimento di CO₂)

I fattori di caratterizzazione IPCC per il potenziale di riscaldamento globale e di temperatura sono modellati nella seguente modalità:

- si include la risposta del ciclo di carbonio;
- non è inclusa la formazione indiretta di monossido di azoto dalle emissioni di azoto;
- non si tiene conto del forcing radioattivo dovuto alle emissioni di ossidi di azoto;
- non si includono effetti indiretti delle emissioni del monossido di carbonio (CO).

In SimaPro, i risultati possono essere presentati in alcune categorie d'impatto, le quali possono essere aggregate in un unico risultato di valutazione dell'impatto, selezionando la voce "Damage assessment".

La Tabella 2.1 sottostante riporta le varie categorie d'impatto.

Tabella 2.1 Categorie d'impatto considerate nel metodo IPCC GWP100.

| Including CO₂ uptake | Default (not including CO₂ uptake) |
|--|--|
| fossil | fossil |
| carbon dioxide uptake | biogenic emissions |
| biogenic emissions | land transformation |
| land transformation | |

2.6 Interpretazione dei risultati

L'interpretazione è la fase dell'LCA in cui i risultati ottenuti nell'analisi dell'inventario e nella valutazione degli impatti vengono combinati tra loro consentendo di individuare i possibili danni o effetti ambientale relativi all'oggetto di studio considerato. La loro interpretazione può presentarsi sotto forma di conclusioni e raccomandazioni rivolte a chi deve prendere le decisioni in relazione all'obiettivo e al campo di applicazione prefissati.

L'interpretazione del ciclo di vita, inoltre, si prefigge di presentare i risultati dell'analisi LCA, in modo tale che siano facilmente comprensibili, completi e coerenti, quindi, generalmente si trovano sotto forma di grafici.

Le condizioni necessarie affinché si abbiano dei risultati validi sono:

- trasparenza e capacità di modificare le banche-dati;
- le banche-dati devono essere più rappresentative della realtà che si vuole studiare;
- trasparenza e capacità di modificare i metodi per la valutazione degli impatti;
- i metodi devono essere adeguati al problema che si sta analizzando;
- metodi e banche-dati devono essere correlati;
- trasparenza del risultato numerico dello studio.

Per migliorare l'affidabilità dei dati è possibile avere alcune accortezze come: costruire una banca-dati italiana dedicata; definire un metodo italiano per valutare il danno in relazione al metodo comunitario con cui si confrontano i risultati; certificare le procedure per compiere l'analisi LCA ed eseguirla in maniera dettagliata, chiara e basata su indicatori specifici.

Inoltre, è molto importante che ci sia un'ottima comunicazione affinché i risultati e le conclusioni possano essere presentati in una forma adeguata al tipo di pubblico previsto. [35,36]

[g]

2.7 Riesame critico

Il riesame critico è una tecnica che viene utilizzata per verificare se un'analisi LCA soddisfi i requisiti per quanto riguarda la metodologia, i dati, l'interpretazione e la comunicazione; viene generalmente effettuato per agevolare la comprensione ed aumentare la credibilità dell'analisi condotta.

La tipologia e il campo di applicazione del riesame critico devono essere definiti nel campo di applicazione dell'LCA, in cui viene precisato anche il motivo per cui si realizza questo

processo, con che livello di dettaglio si opera e quali persone sono coinvolte. Generalmente, viene stabilito un comitato di parti interessate che si occupa di revisionare in maniera critica gli studi di LCA condotti per ridurre il più possibile la probabilità che si verifichino interpretazioni scorrette o effetti negativi sulle parti interessate esterne, soprattutto quando i risultati ottenuti devono essere utilizzati per sostenere delle comparazioni destinate ad essere divulgate al pubblico. Il riesame critico può essere eseguito da un esperto esterno o interno, indipendente dall'LCA: in entrambi i casi si devono avere le conoscenze necessarie e le competenze specifiche e tecniche. [35]

Capitolo 3 – Procedure sperimentali

3.1 Oggetto di studio

L'oggetto dello studio sperimentale condotto può essere suddiviso in due parti principali: la prima consiste nell'ottimizzazione progettuale di un serbatoio di tipo IV, ovvero, un componente strutturale realizzato in materiale composito che presenta un liner interno in materiale polimerico termoplastico e alle cui estremità vengono applicati dei boss in alluminio. Si tratta di un componente che verrà poi utilizzato come dimostratore per lo sviluppo di una tecnologia innovativa di Filament Winding, nota come Smart Tow Winding. L'obiettivo dello studio è quello di individuare la laminazione ottimale del componente affinché presenti delle caratteristiche in termini di peso, spessori e proprietà meccaniche, che siano in accordo con le specifiche richieste. Ciò prevede l'utilizzo di software di supporto: uno per la simulazione del processo di avvolgimento delle fibre, noto come CADWIND, ed un altro per l'esecuzione dell'analisi agli elementi finiti, ovvero Siemens NX.

La seconda parte dello studio prevede la realizzazione di un'analisi LCA del componente ottimizzato, mediante il supporto del software SimaPro, allo scopo di valutarne l'impatto ambientale. Infine, per poter definire se si tratti di un prodotto maggiormente sostenibile rispetto alle soluzioni adottate in precedenza, viene effettuata un'analisi LCA di un serbatoio di pari dimensioni a quello in esame, ma realizzato interamente in materiale metallico.

3.2 Ottimizzazione progettuale del serbatoio

3.2.1 Definizione della geometria esterna e valutazioni preliminari con la teoria del netting

Nel caso specifico in esame, il serbatoio considerato è caratterizzato da una geometria costituita da una zona centrale cilindrica e due calotte laterali. Esso presenta un volume di circa 60 L, un diametro in corrispondenza della parte cilindrica di 380 mm ed una lunghezza totale compresa tra i 530 mm e 540 mm.

Come già definito precedentemente, trattandosi di un serbatoio di tipo IV, gli elementi che lo costituiscono sono: un liner interno che funge da mandrino durante il processo di filament winding e, qualora venisse impiegato per lo stoccaggio dell'idrogeno, si occupa anche di evitare

la fuoriuscita del gas che, invece, si verificherebbe nel caso in cui si utilizzasse soltanto materiale composito; una struttura esterna realizzata in composito che ha il compito di conferire al componente elevate proprietà meccaniche mantenendo un peso ridotto e dei boss in alluminio che vengono applicati in corrispondenza delle estremità delle calotte.

Il liner interno è realizzato in materiale polimerico termoplastico, nello specifico HDPE (High Density Polyethylene), ed è caratterizzato da uno spessore di circa 5 mm.

Il materiale composito utilizzato è un towpreg costituito da una fibra di carbonio del tipo 24k T700 Toray ed una resina epossidica, presente circa al 32% in peso. Nella Tabella 3.1 sottostante vengono riportate le relative proprietà.

Tabella 3.1 Proprietà del materiale composito utilizzato.

| | Toray T700 | Resina epossidica |
|---|-----------------------|--------------------------|
| Modulo di elasticità (E) | 230 GPa | 3700 MPa |
| Tensione a rottura (σ_R) | 4900 MPa | 73 MPa |
| Deformazione a rottura (ϵ_R) | 2.1% | 9% |
| Densità (ρ) | 1.8 g/cm ³ | 1.1 g/cm ³ |

L'utilizzo di un preimpregnato favorisce il controllo del contenuto di resina e fibra all'interno del composito. Mediante l'utilizzo di relazioni tratte dalla teoria della micromeccanica sui materiali compositi, come ad esempio la *regola della miscela*, e tenendo in considerazione i valori riportati nella Tabella 3.1, è stato possibile ottenere i valori della frazione volumetrica di fibra e matrice, che corrispondono rispettivamente a 56.3% e 43.7%, e la densità complessiva del componente che è pari ad 1.6 g/cm³. Di seguito viene riportato il procedimento effettuato:

$$\rho_{comp} = \frac{1}{(W_f/\rho_f + W_m/\rho_m)} = 1.9$$

$$V_f = \frac{\rho_{comp}}{\rho_f} \cdot W_f = 56.3\%$$

dove $W_f = \frac{M_f}{M_{comp}}$ e $W_m = \frac{M_m}{M_{comp}}$ corrispondono rispettivamente alla frazione di peso del rinforzo e della matrice.

Successivamente, sono state calcolate anche le proprietà meccaniche complessive del composito, mediante le seguenti relazioni:

$$\sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m = 2790 \text{ MPa}$$

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m = 131.1 \text{ GPa}$$

$$E_T = \frac{E_f E_m}{E_m V_f + E_f V_m} = 8.3 \text{ GPa}$$

$$\sigma_{T,R} \sim \sigma_{m,R}$$

dove σ_c rappresenta la resistenza a trazione longitudinale, E_c il modulo di elasticità longitudinale, E_T il modulo di elasticità trasversale e $\sigma_{T,R}$ la resistenza in direzione trasversale. Quest'ultima viene generalmente approssimata alla resistenza della matrice, poiché le proprietà meccaniche del composito nella direzione ortogonale a quella di orientamento delle fibre sono molto basse, approssimabili a quelle del materiale che costituisce la matrice.

I valori ottenuti risultano utili sia in fase di simulazione del processo di filament winding con il software CADWIND, sia nelle fasi di valutazione preliminare con la teoria del netting.

Durante il processo di avvolgimento, verrà considerato l'utilizzo di 8 tow da 6 mm disposti parallelamente in maniera tale da creare una banda di composito che presenti una larghezza complessiva di 48 mm.

La valutazione delle proprietà meccaniche del componente si basa sui seguenti valori assunti dai parametri progettuali: una pressione di esercizio di 700 bar, una pressione di scoppio di 1050 bar ed un coefficiente di sicurezza per la progettazione pari a 2.

Essa è stata eseguita considerando soltanto la struttura in materiale composito in quanto, dal punto di vista strutturale, il liner interno può essere considerato trascurabile, in accordo con quanto viene definito in letteratura scientifica. [6,11,38]

In primo luogo, la fase di progettazione ha previsto la definizione della geometria delle calotte del serbatoio, poiché, essendo la zona più complessa del componente, risulta essere di fondamentale importanza per garantire che esso sia caratterizzato da un'elevata resistenza strutturale.

La zona centrale, invece, essendo cilindrica, viene definita in maniera più semplice in quanto sono necessarie soltanto le informazioni riguardanti il raggio e la lunghezza.

Pertanto, dato che si tratta di un solido di rivoluzione, il problema relativo alla definizione della geometria del mandrino si traduce in quello della realizzazione di una curva meridiana che, ruotando attorno ad un asse centrale, genera la geometria tridimensionale.

Sulla base dei dati riguardanti l'ingombro del serbatoio definiti precedentemente, la geometria del mandrino è stata individuata riferendosi al brevetto europeo per i serbatoi isotensoidi ottenuti per filament winding. A partire dallo sviluppo teorico della geometria isotensoide, la curva è stata definita per punti, mediante l'utilizzo di un foglio di calcolo Excel. Esso riceve in input parametri geometrici del serbatoio come la lunghezza ed il diametro della zona cilindrica ed il diametro di apertura dei poli, e fornisce in output la curva mediana del serbatoio; ciò viene illustrato nella Figura 3.1.

La geometria del serbatoio costituisce un input fondamentale per la successiva verifica strutturale.

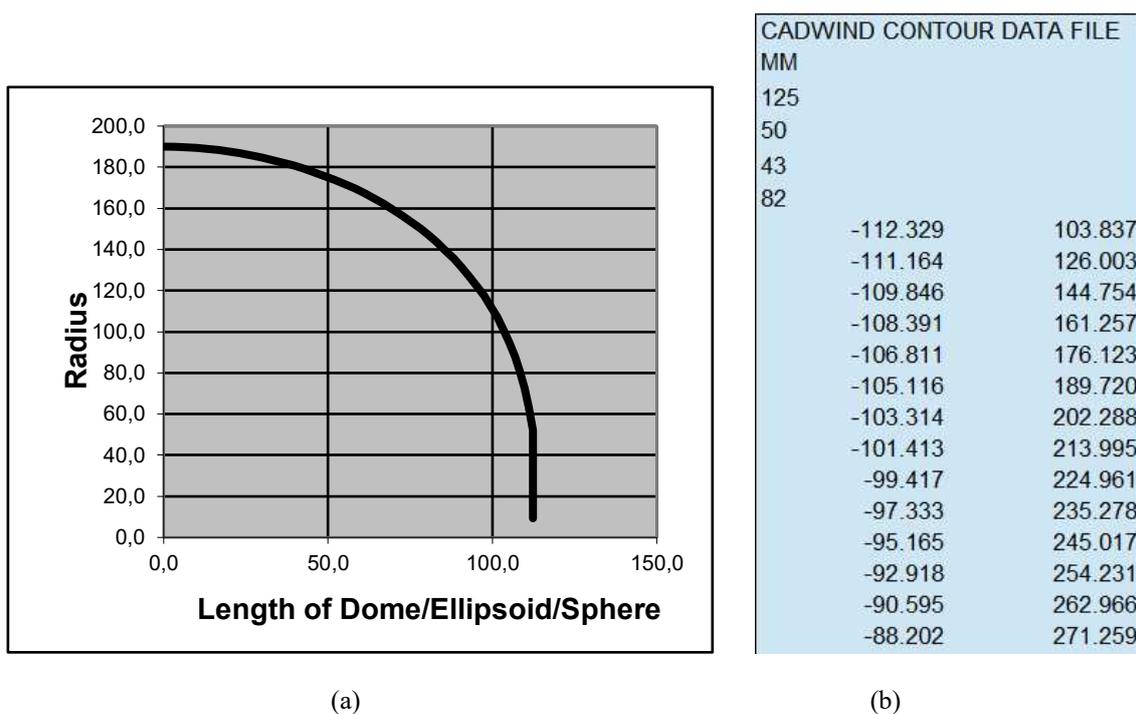


Figura 3.1 (a) curva mediana definita tramite il foglio di calcolo Excel per la realizzazione di un serbatoio isotensoide; (b) tipico output del foglio di calcolo per la creazione di un file .mdr; per punti viene definita la curva nel piano che, tramite rivoluzione attorno all'asse centrale, genera il mandrino tridimensionale.

Successivamente alla definizione della geometria esterna del mandrino, si è passati alla valutazione della stratificazione del materiale composito che consentisse di ottenere un componente che rientrasse nelle condizioni di sicurezza definite per le condizioni di esercizio. L'utilizzo di Excel è stato un metodo sostitutivo per la definizione del mandrino che, altrimenti, avverrebbe direttamente sul software CADWIND. L'output del foglio di calcolo viene esportato in un formato .mdr in modo tale da essere leggibile dal software CADWIND su cui viene successivamente importato. Per questo motivo, è necessario che su Excel venga definito

anche il numero dei frame che costituiscono la parte cilindrica e quella delle calotte; questi, poi, costituiranno la mesh durante la fase di analisi agli elementi finiti.

Per effettuare una stima preliminare dell'ordine di grandezza degli spessori di composito attesi per il serbatoio, considerando sia gli strati elicoidali che quelli circonferenziali, è stata utilizzata la teoria del netting e tutte le formule riportate nel paragrafo 1.4.2.

$$t_{\alpha f} = \frac{N_{\phi}}{\sigma_{\alpha} \cos^2 \alpha}$$

$$t_{90f} = \frac{N_{\theta} - N_{\phi} \tan^2 \alpha}{\sigma_{90}}$$

La teoria del netting è stata necessaria anche per valutare la ripartizione dello spessore degli strati che presentano un angolo di avvolgimento pari a θ e di quelli circonferenziali, ovvero con angolo di avvolgimento di 90° . È stato possibile individuare una dipendenza dello spessore dal valore che assume l'angolo che viene scelto: infatti, aumentando il valore di θ , il numero di strati con angolo di avvolgimento pari a θ aumenta, mentre gli strati circonferenziali diminuiscono. Complessivamente, si è notato che al variare di θ , lo spessore della struttura si mantiene costante; inoltre, per valori di θ compresi tra 54° e 55° , il valore che assume lo spessore degli strati elicoidali è massimizzato, mentre il numero di strati circonferenziali necessari al serbatoio si riduce fino ad annullarsi. Le valutazioni effettuate sono state dimostrate mediante un processo che ha previsto di variare in maniera continua l'angolo θ e considerando i risultati ottenuti in termini di spessore del laminato.

A partire dai valori ricavati dalle formule precedentemente elencate, è possibile ottenere lo spessore complessivo degli strati di composito necessari, considerando la frazione volumetrica delle fibre definita.

Nel caso specifico, gli spessori minimi del laminato sono stati calcolati considerando la pressione interna di esercizio (70 MPa), un fattore di correzione pari a 2.5 e differenti possibili soluzioni per gli angoli medi di avvolgimento degli strati elicoidali. Si ottiene un valore di spessore minimo complessivo per le fibre di carbonio pari a 10.18 mm e, considerando un determinato valore medio di angolo di avvolgimento per gli strati elicoidali, lo spessore ad essi relativo risulta essere pari a 3.84 mm contro i 6.34 mm degli strati circonferenziali. Tenendo in considerazione che la teoria del netting valuta soltanto il rinforzo, e che la frazione volumetrica delle fibre è pari a 56.3%, lo spessore minimo del laminato in composito è pari a 18.08 mm.

Come è stato poi successivamente verificato mediante il software CADWIND, lo spessore medio di ogni strato dipende sia dalle caratteristiche del towpreg utilizzato, sia dalla percentuale di ricopertura di ciascuno strato. Pertanto, per poter garantire una buona ricopertura del mandrino, il filamento tende a sovrapporsi su sé stesso nei singoli strati, in modo tale da ottenere una percentuale di ricopertura del mandrino superiore al 100% in ognuno di essi: in questo modo, lo spessore medio di ogni strato dipende dalla percentuale di sovrapposizione e può variare all'incirca tra 0.2 mm e 0.3 mm. Considerando questi valori ottenuti e quello individuato dalla teoria del netting, per poter assicurare che il serbatoio operi in condizioni di sicurezza saranno necessari almeno 70 – 80 layer di towpreg, e le informazioni ottenute sono in accordo con quanto trovato nella letteratura scientifica.

Tuttavia, dato che la teoria del netting non tiene in considerazione il contributo strutturale della matrice, i valori ottenuti da questo studio costituiscono un punto di partenza per analisi più approfondite mediante sistemi più accurati e sofisticati come le analisi agli elementi finiti. Lo studio, infatti, procede in maniera iterativa per individuare la stratificazione ottimale, ovvero, quella che garantisce al serbatoio delle elevate prestazioni meccaniche ed una buona uniformità degli spessori, rientrando nei limiti definiti nelle specifiche di progetto. Il serbatoio deve avere un peso compreso tra i 30 kg e i 35 kg, una tensione massima di circa 2500 MPa ed una deformazione massima di circa 0,007.

Di seguito vengono definiti i software utilizzati in questa prima fase di ottimizzazione progettuale, ovvero, CADWIND e Siemens NX.

3.2.2 CADWIND

Il software CADWIND è stato scelto per simulare i processi di filament winding a seguito di un'accurata analisi di mercato: si tratta di un software consolidato, ampiamente utilizzato in progetti ed applicazioni per la progettazione, l'ottimizzazione e la verifica di componenti in materiale composito sia assialsimmetrici che non.

CADWIND è nato nel 1985 come progetto di ricerca presso l'Institute für Kunststoffverarbeitung (Istituto per la Lavorazione delle Materie Plastiche) dell'Università di Aachen in Germania dall'esigenza di automatizzare il processo di filament winding, in quanto costituiva uno dei metodi più importanti ed utilizzati per la produzione di parti in composito, ma allo stesso tempo risultava essere molto costoso ed utilizzato perlopiù nel campo dell'industria aerospaziale. A causa della diffusione di questo processo nei più vari campi di applicazione e in moltissimi paesi del mondo, si è verificata un'evoluzione del software da progetto di ricerca accademica ad uno standard industriale per il controllo computerizzato di

processi di avvolgimento di ogni tipo: da semplici applicazioni a quelle ad alta tecnologia. Il software è stato sviluppato con lo scopo di simulare al computer il processo di filament winding sulla base di un modello fisico, calcolando il percorso delle fibre ed il modello di avvolgimento per qualsiasi geometria del mandrino e generando in maniera automatica il programma del pezzo per produrlo su qualsiasi macchina o robot. [39]

Inoltre, CADWIND consente di esportare la struttura laminata all'interno di un software FEA (Finite Element Analysis) per valutare le caratteristiche meccaniche del pezzo. In questo modo, è possibile sfruttare al meglio i materiali compositi per i processi di FW, ottimizzare i processi stessi di avvolgimento, risparmiare sui costi dei materiali per la realizzazione di eventuali prototipi fisici e ridurre i tempi di produzione. [i]

Il concetto di simulazione è sicuramente molto più potente delle solite formule geometriche analitiche; essa, infatti, permette di considerare nella modellazione anche l'attrito che si genera tra le fibre ed il mandrino, che generalmente comporta una deviazione della fibra dalla traiettoria geodetica, offrendo una più ampia gamma della possibilità di progettazione e produzione.

Per il calcolo del percorso delle fibre sul mandrino, viene utilizzato un modello di mandrino tridimensionale su cui il percorso viene valutato ed ottimizzato in maniera continua sulla base dei parametri di processo desiderati, inseriti dall'utente.

Per poter essere implementato come strumento pratico per l'industria, CADWIND deve essere in grado di generare il programma del pezzo per qualsiasi macchina o tipologia di controllo, non facendo distinzioni tra una macchina a due assi, a sei assi, un avvolgitore a T specializzato o un robot: essendo caratterizzato da un'elevata flessibilità, è in grado di adattarsi ad un elevato grado di automazione.

Un altro obiettivo dello studio condotto per lo sviluppo di questo software era quello di migliorare la dinamica della macchina cercando di ottimizzare, quindi, i dati di controllo relativi a differenti aspetti come: la riduzione dei tempi di produzione, l'avvolgimento con velocità costante del mandrino o con velocità di uscita costante.

Come già accennato, CADWIND offre dei vantaggi per la fase di progettazione in quanto, in passato, questa fase prevedeva di procedere per tentativi, infatti, si realizzavano numerose prove che comportavano la produzione di molti prototipi, successivamente testati per individuare quali miglioramenti potessero essere apportati. Invece, ai giorni d'oggi, l'integrazione di questo software con programmi specializzati per l'analisi dei laminati, come il software MATERIAL'S COMPOSITE STAR, consentono di prevedere il comportamento meccanico

dei componenti ottenuti quando sono sottoposti a dei carichi. In questo modo, si evita che il progettista esegua molti cicli di produzione e collaudo di prototipi.

L'ultimo aggiornamento del software è CADWIND 2006, dove le principali innovazioni riguardano la progettazione, l'analisi dei componenti avvolti, la simulazione, l'automazione e l'avvolgimento robotizzato, nel totale rispetto di un obiettivo importante, ovvero, mantenere la semplicità. Questo software, infatti, è caratterizzato da un'interfaccia utente molto semplice e stabile.

Inoltre, con questa nuova versione, è possibile visualizzare nello schermo di un computer il processo di avvolgimento come un'animazione in tempo reale. In questo modo, l'utente potrà avere una visione migliore del processo di avvolgimento e notare tutti i vari movimenti della macchina, la loro dinamica e il raggio d'azione; inoltre, può valutare se il programma di avvolgimento funzioni in maniera corretta e se i parametri di post-elaborazione scelti risultano essere ottimali per l'applicazione. [39]

La Figura 3.2 sottostante mostra un esempio di un componente modellato mediante CADWIND.

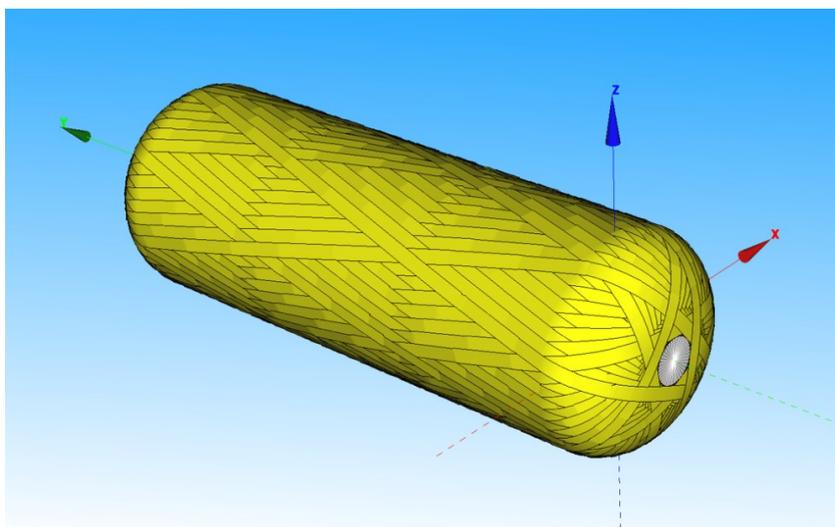


Figura 3.2 Esempio di modellazione di un componente mediante il software CADWIND

Come già definito, il primo passo per la simulazione prevede di indicare la geometria del mandrino su cui deve essere depositato il materiale fibro-rinforzato, definita rapidamente mediante la sezione “Mandrel Model Generator” del software. In seguito, si simula l'avvolgimento del filamento attorno al mandrino calcolando le possibili configurazioni sulla base dei parametri come, ad esempio, l'orientazione delle fibre, prevedendo sia l'utilizzo di traiettorie geodetiche (le più brevi che congiungono due punti nello spazio), che quelle non

geodetiche. Quest'ultime vengono utilizzate, generalmente, quando viene modellato anche l'attrito tra fibre e mandrino.

Per poter simulare correttamente il processo è necessario inserire in CADWIND informazioni riguardo:

- la posizione iniziale del processo e la direzione del mandrino;
- l'area del mandrino da coprire con il materiale;
- l'angolo di avvolgimento;
- il coefficiente di attrito;
- la larghezza dei filamenti avvolti.

Inoltre, introducendo informazioni di input come la densità delle fibre e della resina, la composizione del materiale intesa come frazione volumetrica dei singoli costituenti e la densità lineare delle fibre, è possibile valutare il peso e lo spessore del laminato.

Inserendo nel software anche dati relativi a: configurazione, dimensioni, velocità ed accelerazioni massime del sistema di produzione disponibile è possibile calcolare, nella sezione di post-processing, i movimenti della macchina o del robot per il filament winding che devono essere eseguiti per ottenere la parte modellata.

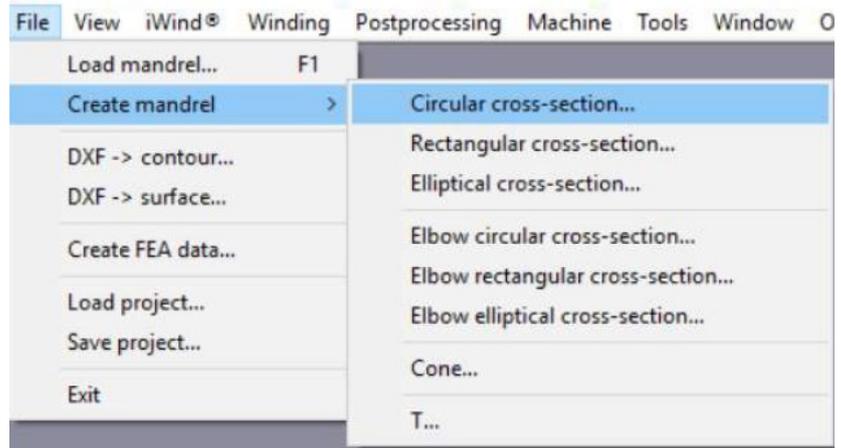
In questo modo si realizza un "part program" che può essere direttamente implementato nelle macchine a controllo numerico; pertanto, oltre ad ottimizzare il processo, è possibile trasferire in maniera diretta le informazioni ottenute alla macchina di produzione.

Successivamente, la struttura viene esportata in software di analisi agli elementi finiti in modo tale da valutare il comportamento meccanico sia del laminato, che dell'intero componente; questo passaggio risulta fondamentale per l'ottimizzazione del processo di produzione.

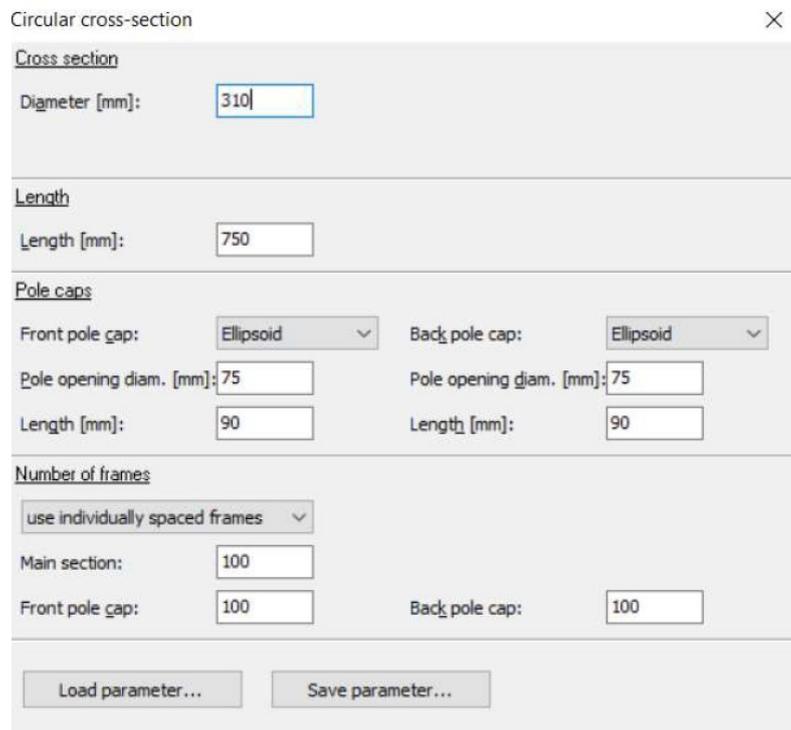
Di seguito vengono riportati gli step principali eseguiti per simulare il processo di filament winding tramite CADWIND.

1. Creazione del mandrino

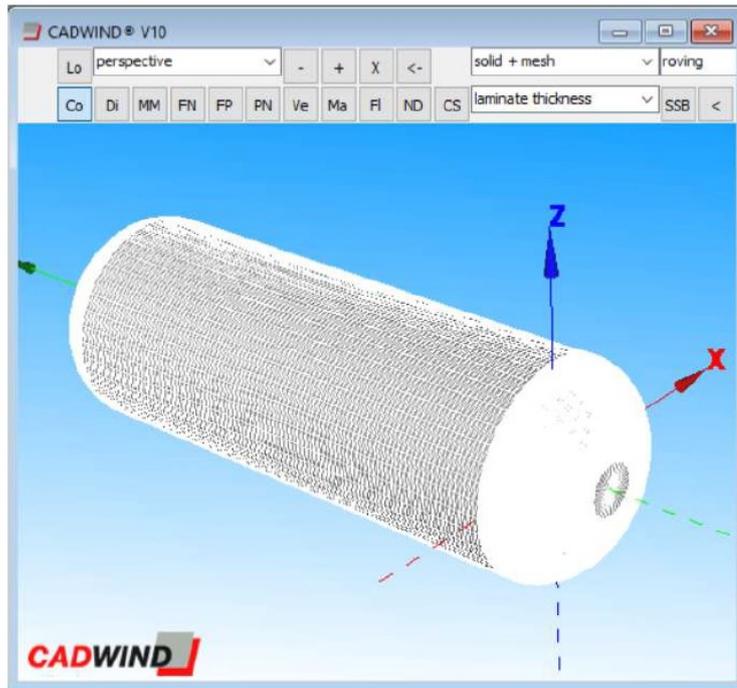
La Figura 3.3 mostra l'interfaccia del software e i comandi da utilizzare nella fase di creazione del mandrino.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.3 Interfaccia del software CADWIND per la creazione del mandrino: (a) comando per la creazione del mandrino, (b) parametri di progetto, (c) rappresentazione del mandrino creato

2. Avvolgimento sul mandrino: copertura completa della cupola

La Figura 3.4 illustra come viene visualizzata nel software la completa copertura delle cupole.

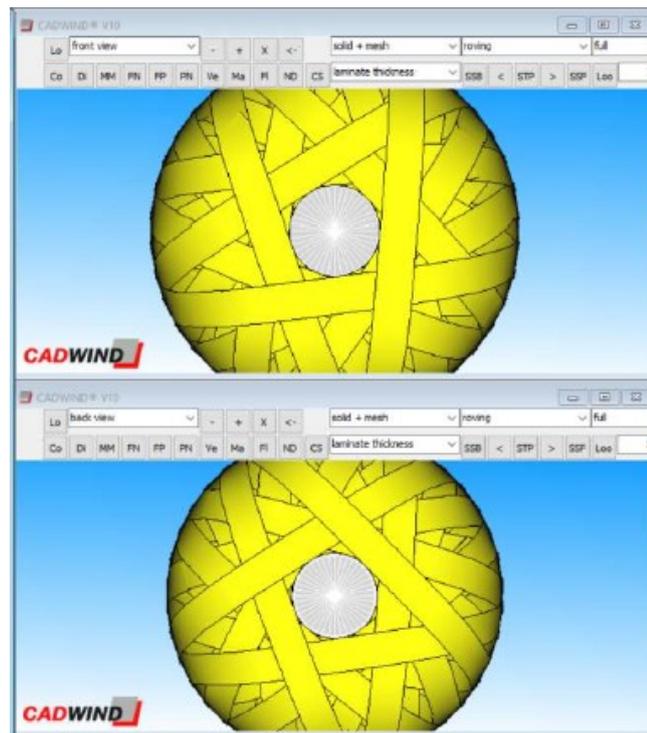


Figura 3.4 Visualizzazione della copertura completa delle cupole sul software CADWIND

3. Creazione di un part-program di un processo di filament winding

La Figura 3.5 rappresenta il passaggio dalla simulazione all'effettivo processo di FW.

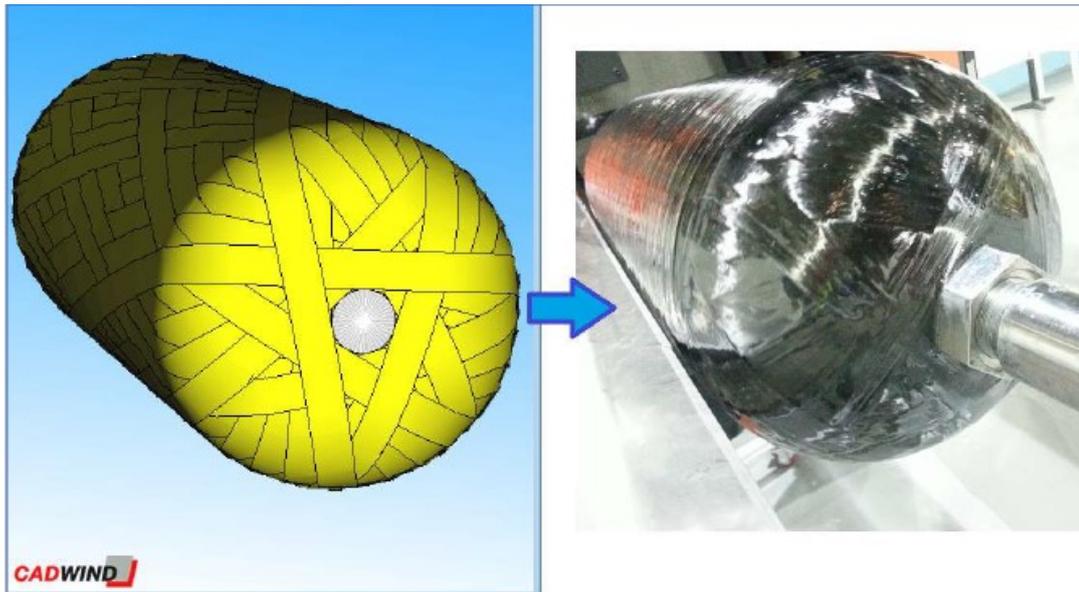


Figura 3.5 Passaggio dalla simulazione nel software CADWIND al reale processo di filament winding

4. Controllo della simulazione del movimento della macchina

La Figura 3.6 rappresenta l'interfaccia del software durante la simulazione del processo.

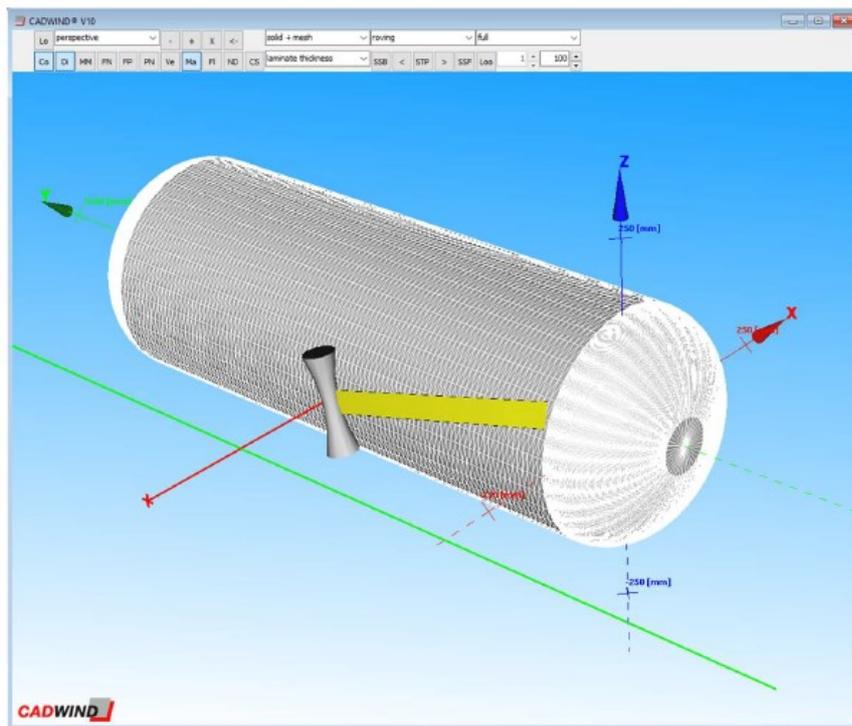


Figura 3.6 Simulazione del processo di filament winding visualizzata nel software CADWIND

3.2.3. Siemens NX

Il software Siemens NX costituisce una formula integrata, potente e flessibile in grado di realizzare prodotti in maniera rapida, efficace e sicura. Esso prevede di generare soluzioni innovative di progettazione, simulazione e produzione, che consentano alle aziende di realizzare il valore di Digital Twin. NX costituisce un elemento di supporto per ogni singola fase del processo di sviluppo prodotto: dal design del concept alla progettazione ed alla fabbricazione; si tratta inoltre di un insieme integrato di strumenti in grado di coordinare le discipline, preservare l'integrità dei dati e la finalità di progettazione e, infine, di semplificare l'intero processo. [j]

Questo software viene ampiamente utilizzato poiché è in grado di fornire una comprensione più approfondita del design ed una comunicazione più efficace, di valutare istantaneamente l'impatto delle modifiche di progettazione, di migliorare le funzionalità in modo tale da ridurre i tempi di progettazione ed infine di integrare gli ultimi aggiornamenti nel flusso di lavoro, riducendo al minimo la curva di apprendimento.

Le potenzialità di Siemens NX sono:

- Ambiente di modellazione più produttivo;
- Generative Design;
- Additive Manufacturing;
- Design Elettromeccanico;
- Progettazione e gestione collaborativa;
- Simulazione e produzione integrate.

L'ambiente di modellazione maggiormente produttivo è ottenuto dal costante impegno negli investimenti tecnologici e dalla facilità con cui vengono apportate modifiche, anche complesse, mediante delle funzioni organizzate che consentono di modificare ed aggiornare il progetto localmente. Inoltre, è possibile ridurre il tempo di gestione delle proprietà di massa, in quanto, NX è in grado di aggiornare in maniera automatica i dati relativi ad essa quando si apportano modifiche al progetto; in questo modo si ottiene un'automatizzazione del lavoro manuale. Nell'ultima versione del software sono presenti degli strumenti semplificati che filtrano velocemente e facilmente i dati di progettazione a disposizione, consentendo un passaggio rapido attraverso i vari livelli di progettazione.

Per quanto riguarda il Generative Design, NX fornisce un set completo di strumenti dall'idea alla validazione, con lo scopo di importare e preparare i dati di nuvole di punti in geometria convergente, in modo tale da consentire all'utente di lavorarci subito dopo l'importazione.

NX Industrialize Additive Manufacturing consente di operare con una maggior efficienza grazie anche ad un'interfaccia utente interattiva intuitiva ed una risoluzione più rapida del modello; in questo modo si riesce a passare dall'idea alla realtà del modello stesso nel minor tempo possibile. Si tratta di potenzialità molto significative nel settore dell'Additive Manufacturing che consentono di migliorare le capacità di alleggerimento, grazie anche all'esecuzione di analisi agli elementi finiti, ma soprattutto di ottimizzare l'orientamento di stampa della parte, valutando molteplici aspetti di progettazione e produzione. Con questo software, quindi, ci si assicura che il prodotto venga realizzato correttamente e con precisione, risparmiando tempo e fatica.

Per quanto riguarda l'Electromechanical Design, generalmente, si ottiene una rappresentazione completa del pannello in PCB. La potenzialità di Siemens NX sta nel riuscire a fornire contemporaneamente i dati relativi a più PCB e inoltre, elimina la necessità di definire dei corpi rigidi in maniera manuale.

Un'altra peculiarità del software è quella di ottimizzare la comunicazione a valle mediante nuove opzioni che supportano la collaborazione con il fornitore, la produzione, l'ispezione e la qualità, l'assemblaggio, il servizio ed altri team che richiedono l'accesso al contenuto 3D; per questo motivo si parla di progettazione e gestione collaborativa.

NX, inoltre, è l'unico software in grado di passare dalla progettazione alla simulazione, fino alla produzione; in particolare, genera delle soluzioni di progettazione, simulazione e produzione con funzionalità CAD, CAM, CAE e PLM evolute, in grado di supportare qualsiasi tipologia di sviluppo prodotto. [k]

Come già definito, Siemens NX può essere utilizzato per vari scopi, tra cui la realizzazione di analisi agli elementi finiti, come nel caso del presente studio.

Questo software, infatti, viene utilizzato in maniera parallela a CADWIND per eseguire l'analisi agli elementi finiti e può sia realizzare modelli CAD dei mandrini, sia simulare i componenti realizzati. Si presta molto bene alla simulazione di strutture in composito, grazie alla sua estensione "Laminated Composites", sviluppata appositamente per la modellazione di laminati in composito.

Si possono simulare le strutture in laminato insieme a componenti ad esse abbinati, mediante la creazione di mesh 2D e 3D e, in particolare, utilizzando il solutore FEA NX Nastran è possibile eseguire analisi strutturali sia statiche, che dinamiche.

Le strutture ottenute possono essere verificate tramite differenti criteri di crisi per materiali compositi come: Tsai-Wu, Tsai-Hill, Hashin o il criterio di massima deformazione ammissibile. In questo modo, si possono ottimizzare le strutture ottenute mediante filament winding sia dal punto di vista delle caratteristiche fisiche, sia in relazione alle proprietà meccaniche.

3.2.4 Progettazione del componente strutturale in composito

La fase iniziale della progettazione ha visto necessario l'utilizzo del software CADWIND per poter simulare i processi di filament winding per il deposito di materiale attorno al mandrino. In primo luogo, è stato importato il mandrino ISOT costruito con la modalità definita nel paragrafo 3.2.1 mediante il foglio di calcolo Excel; successivamente sono stati creati dei laminati i cui parametri di processo vengono riportati nella Tabella 3.2.

Tabella 3.2 Parametri dei laminati creati con CADWIND.

| Laminato | Winding angle [°] | Turning zone front to | Turning zone back from | Coverage [%] |
|----------|-------------------|-----------------------|------------------------|--------------|
| 1 | 10 | 20 | 105 | 102,1 |
| 2 | 15 | 14 | 111 | 133,3 |
| 3 | 20 | 8 | 117 | 107,0 |
| 4 | 25 | 5 | 120 | 102,1 |
| 5 | 30 | 7 | 118 | 130,1 |
| 6 | 35 | 5 | 120 | 122,8 |
| 7 | 40 | 6 | 119 | 147,1 |
| 8 | 45 | 9 | 116 | 153,6 |
| 9 | 50 | 12 | 113 | 150,2 |
| 10 | 55 | 15 | 110 | 140,3 |
| 11 | 60 | 17 | 108 | 120,7 |
| 12 | 65 | 27 | 98 | 123,8 |
| 13 | 70 | 30 | 95 | 188,2 |
| 14 | 75 | 35 | 90 | 155,5 |
| 15 | 80 | 41 | 84 | 162,2 |
| 16 | 85 | 40 | 85 | 184,7 |

Tutti i laminati presentano uno stesso valore di *friction factor* pari a 0.3 ed uno *start frame* di 59.

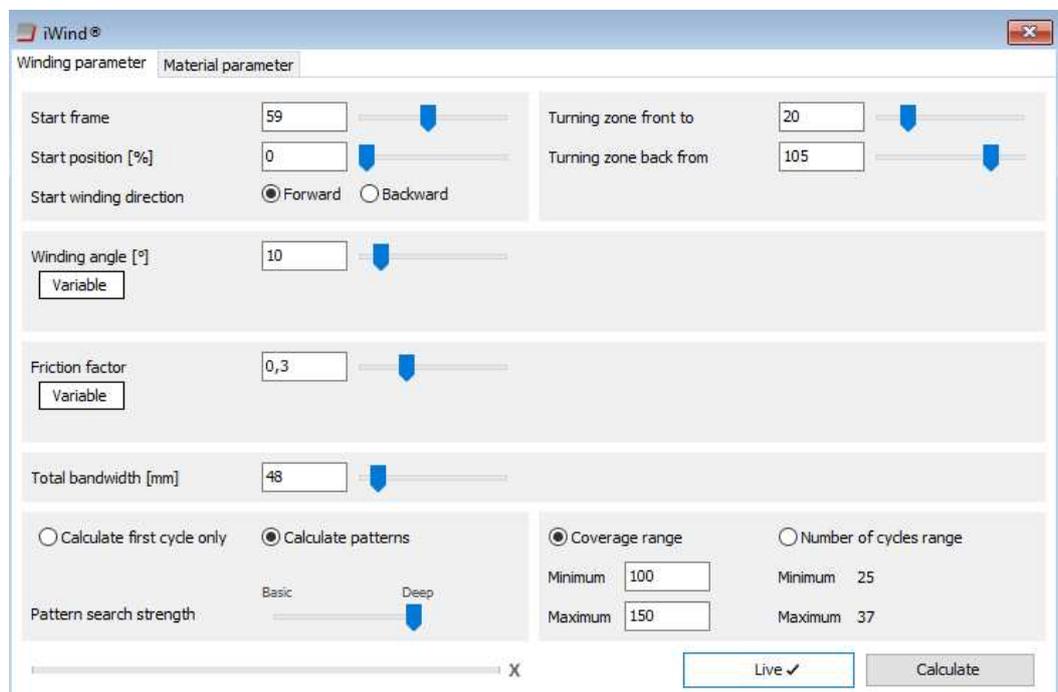
I valori che assumono i parametri “*Turning zone*” e “*Coverage*” riportati, che rappresentano rispettivamente la zona in corrispondenza della quale il filamento di materiale cambia direzione per tornare indietro e la percentuale di ricopertura, sono stati definiti in maniera tale da ottenere un manufatto simmetrico evitando un’elevata sovrapposizione del materiale depositato che,

altrimenti, comporterebbe un aumento di spessore indesiderato. Il valore di *friction factor* pari a 0.3, invece, è stato scelto affinché non si assista ad uno scivolamento della banda di composito depositata che, in caso contrario, non consentirebbe l'ottenimento del componente privo di difetti. Di seguito, nella Tabella 3.3, vengono riportati i parametri relativi al materiale composito utilizzato necessari per definire il processo di filament winding.

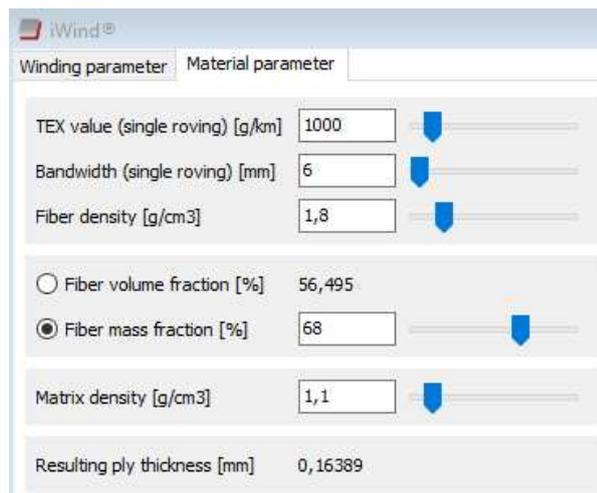
Tabella 3.3 Parametri del materiale composito utilizzato.

| TEX value (single roving) [g/km] | Bandwidth (single roving) [mm] | Fiber density [g/cm ³] | Fiber mass fraction [%] | Matrix density [g/cm ³] | Resulting ply thickness [mm] |
|--|-----------------------------------|---------------------------------------|-------------------------|--|---------------------------------|
| 1000 | 6 | 1,8 | 68 | 1,1 | 0,16389 |

L'interfaccia che presenta il software per l'inserimento dei parametri viene riportata di seguito nella Figura 3.7:



(a)



(b)

Figura 3.7 Interfaccia del software CADWIND per l’inserimento dei parametri del laminato (a) e del materiale (b)

Una volta definiti i parametri di processo per ciascun laminato, sono state realizzate delle prove utilizzando delle stratificazioni differenti. Ciò ha previsto, dapprima, di definire la sequenza dei laminati in CADWIND, mediante il comando “Crea FEA Data”, in modo tale da ottenere un file .DAT compatibile con il software Siemens NX e, successivamente, di importarlo per eseguire la simulazione agli elementi finiti. Una scelta accurata della stratificazione necessita di effettuare numerose considerazioni come, ad esempio, è fondamentale individuare il numero degli strati di materiale da depositare; un altro fattore importante è costituito dalla definizione dell’angolo di avvolgimento di ciascuno strato poiché più l’angolo si riduce, maggiore sarà l’area di serbatoio ricoperta. L’angolo di avvolgimento, inoltre, influisce sulla resistenza del componente: se esso assume un valore prossimo ai 90° aumenta la resistenza alle tensioni tangenziali, viceversa, strati di materiale con angoli di avvolgimento bassi resistono maggiormente alle tensioni assiali. È necessario, inoltre, dopo un valore definito di deposizioni elicoidali, depositare degli strati di materiale a *hoop*, ovvero con angoli di avvolgimento di circa 90° , sia per compattare gli strati sottostanti, sia per eliminare un eventuale eccesso di resina. L’interfaccia del software CADWIND in questo passaggio di determinazione della sequenza dei laminati viene rappresentata nella Figura 3.8.

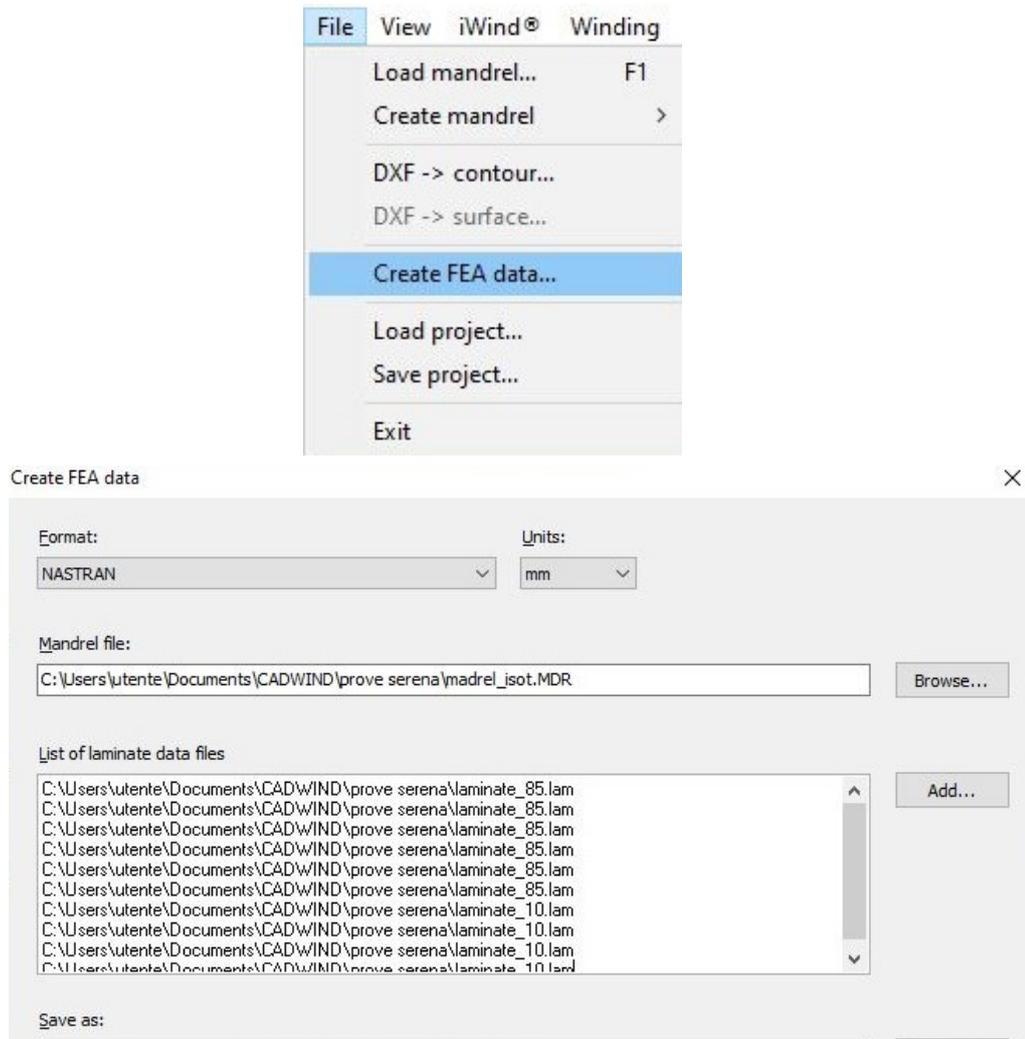


Figura 3.8 Comandi per la creazione del laminato in un file .DAT

Una volta importato il file .DAT nell'ambiente di simulazione del software Siemens NX, lo studio è proseguito definendo tutte le informazioni necessarie per avviare l'analisi, ovvero, la pressione interna del serbatoio, i vincoli cinematici imposti e le proprietà del materiale, utilizzando, rispettivamente, i comandi "Load Type", "Constraints Type" e "Manage Materials".

Nella Figura 3.9 viene rappresentata una parte della barra degli strumenti della schermata "Home" del software, in cui compaiono quelli citati precedentemente (cerchiati in rosso).



Figura 3.9 Barra degli strumenti di Siemens NX

Nelle prime prove effettuate, il valore di pressione interna utilizzato coincideva con quello delle condizioni di esercizio, ovvero 700 bar, mentre in quelle successive è stato utilizzato il valore della pressione di scoppio, cioè 1050 bar. I vincoli cinematici, invece, sono stati considerati gli stessi per tutte le prove: si tratta di due incastrati, ovvero, dei vincoli fissi posti alle estremità delle calotte. Le proprietà del materiale inserite tengono in considerazione: la densità del composito, definita all’inizio del paragrafo 3.2.1 pari a 1.6 g/cm³, e i valori del modulo di Young, del modulo di taglio e il coefficiente di Poisson relativi al rinforzo utilizzato (Toray T700), riportati in Tabella 3.4.

Tabella 3.4 Proprietà del composito inserite nel software Siemens NX.

| Direzioni | Young’s modulus [MPa] | Shear Modulus [MPa] | Poisson’s ratio |
|-----------|--------------------------|------------------------|-----------------|
| E1 | 130000 | 4500 | 0.3 |
| E2 | 9500 | 4500 | |
| E3 | 9500 | 4500 | |

Nella Figura 3.10 sottostante viene illustrato il serbatoio sottoposto al carico di pressione uniformemente distribuito e con i vincoli applicati nell’ambiente di simulazione.

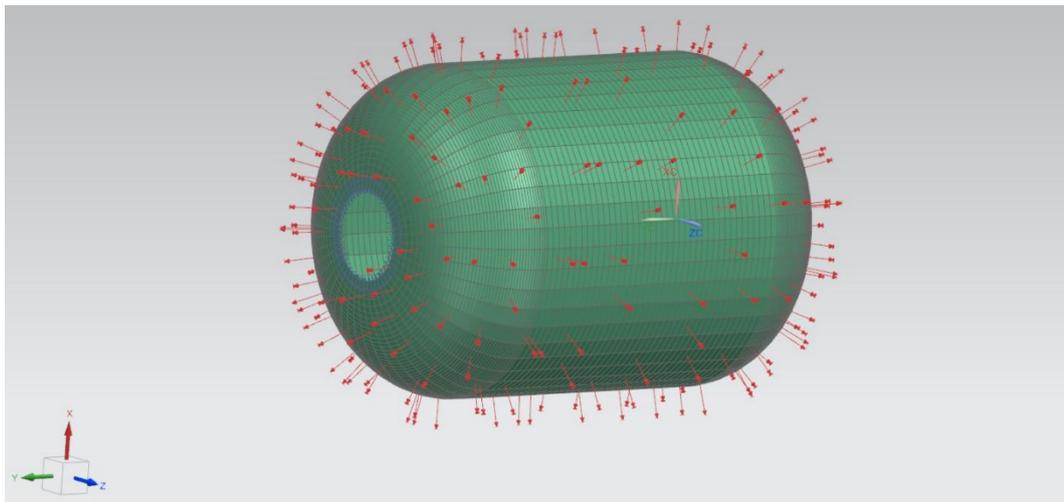


Figura 3.10 Serbatoio nell’ambiente di simulazione con i vincoli e la pressione interna applicati

Dopo aver inserito tutte le informazioni necessarie, è stato possibile visualizzare il peso del componente in modo tale da poter stabilire, prima ancora di avviare la simulazione, se rientrasse nei limiti di peso stabiliti, utilizzando il comando “Check and Information” → “More” nella

barra degli strumenti della schermata “Home”, illustrato nella Figura 3.9 (cerchiato in verde). Questa informazione viene visualizzata nel software come rappresentato nella Figura 3.11 sottostante:

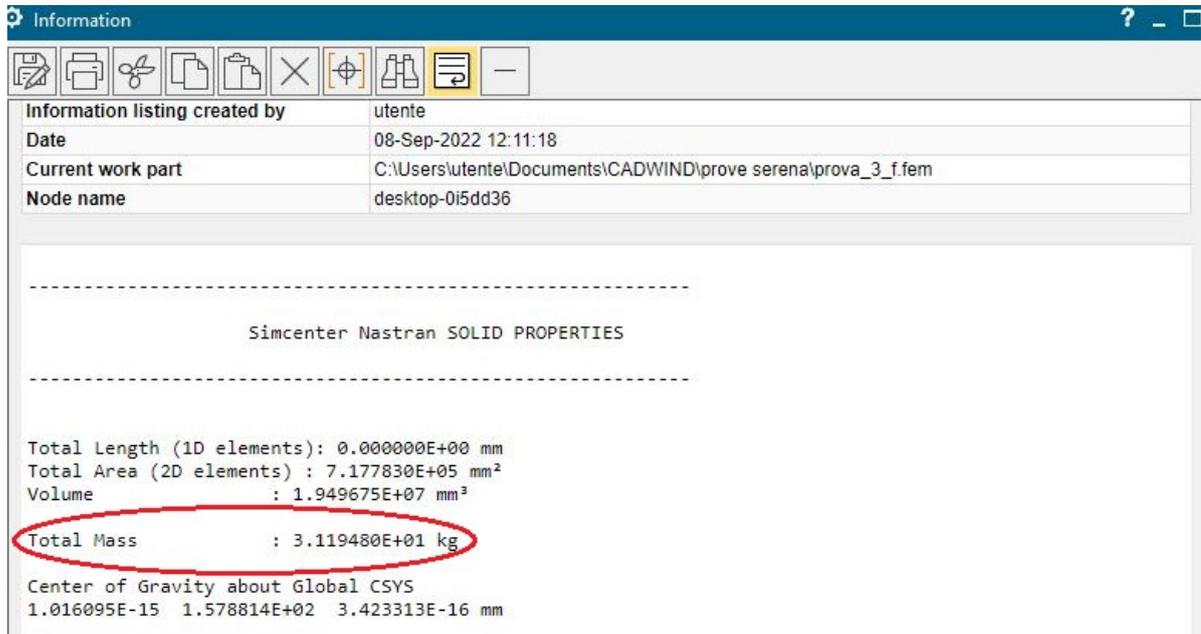


Figura 3.11 Interfaccia del software NX per comunicare all'utente il peso del componente

Successivamente, è stata creata una nuova soluzione e con il comando “Solve” illustrato nell'immagine 3.9 (cerchiato in blu), è stata avviata la simulazione.

I risultati ottenuti sono stati visualizzati in due ambienti differenti: il FEM e il SIM. Il primo fornisce informazioni basate sui dati relativi alle proprietà del materiale, quindi, gli spessori complessivi di ciascun frame e la ripartizione degli stessi nei vari layer considerati; il secondo, invece, tiene in considerazione i carichi e i vincoli applicati; pertanto, le informazioni che si ottengono riguardano le proprietà meccaniche. La Figura 3.12 sottostante illustra come vengono rappresentati i risultati ottenuti nell'ambiente SIM.

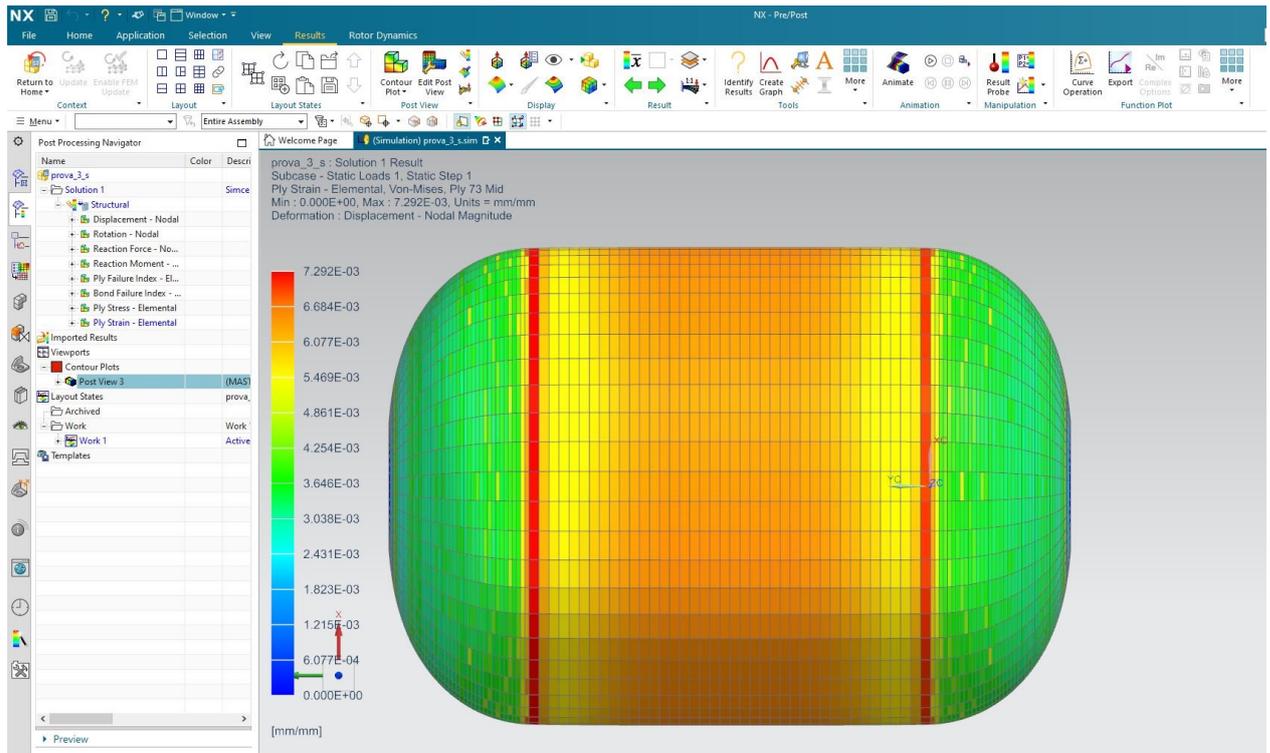


Figura 3.12 Interfaccia del software NX per mostrare i risultati nell'ambiente SIM

I valori di tensione e deformazione ottenuti sono stati osservati per tutti i ply presi come riferimento per ciascun angolo di avvolgimento utilizzato, in modo tale da ottenere delle informazioni accurate.

Nell'ultima prova eseguita, ovvero quella che determina la stratificazione ottimale del serbatoio, è stata effettuata una verifica delle proprietà mediante il criterio di Tsai – Hill, anche noto come criterio del massimo lavoro. Si tratta di un'estensione del criterio di Von Mises ai materiali anisotropi, il quale afferma che la rottura di una lamina si verifica nel momento in cui il lavoro di distorsione supera il valore limite ammissibile. Le condizioni di resistenza di questa teoria tengono in considerazione tutte le componenti principali di tensione e, ciò, lo si può notare nella seguente disuguaglianza che definisce quando il materiale è in sicurezza nel caso di uno stato piano di trazione, ovvero quando si hanno tensioni normali positive:

$$\left(\frac{\sigma_L}{\sigma_{L,R}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_T}{\sigma_{T,R}}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_L}{\sigma_{L,R}}\right)\left(\frac{\sigma_T}{\sigma_{T,R}}\right) + \left(\frac{\tau_{LT}}{\tau_{LT,R}}\right)^2 < 1 \quad (29)$$

σ_L è la tensione in direzione longitudinale, σ_T è la tensione in direzione trasversale e τ_{LT} è il taglio. Nel caso di uno stato piano di compressione, i valori di tensione a rottura di trazione utilizzati nella precedente relazione vengono sostituiti da quelli di compressione. [40]

3.3 Analisi LCA del serbatoio di tipo IV

Fra i vari impieghi che può avere un componente strutturale di questo tipo, sicuramente, lo stoccaggio dell'idrogeno negli autoveicoli risulta essere quello più attuale, in accordo con una maggior sostenibilità. Per tale ragione, è stata condotta un'analisi LCA del serbatoio di tipo IV caratterizzato da proprietà fisiche e strutturali ottenute dall'attività svolta nella prima parte del presente lavoro. La metodologia utilizzata per condurre l'analisi segue la normativa UNI EN ISO 14040, definita nel capitolo 2; pertanto, di seguito verranno presentate le quattro fasi dell'analisi specifica per l'oggetto in esame.

3.3.1 Caso di studio - Definizione dell'obiettivo e degli scopi

L'obiettivo dell'analisi LCA condotta è quello di valutare gli impatti ambientali relativi al serbatoio di tipo IV in esame, potendo individuare se il materiale composito costituisca una scelta maggiormente sostenibile rispetto all'utilizzo di un materiale convenzionale. Inoltre, viene posta l'attenzione su eventuali criticità affinché diano uno spunto per delle possibili soluzioni da adottare allo scopo di ridurre gli impatti ambientali.

Il passo successivo alla definizione dell'obiettivo è quello di determinare l'unità funzionale del sistema da analizzare. Nel presente studio, essa coincide con la capacità del componente di stoccare, all'interno di autoveicoli, l'idrogeno necessario per percorrere una distanza pari a 250000 km durante la sua vita utile.

L'approccio mediante il quale si è operato nell'esecuzione dell'analisi è del tipo *“from cradle to grave”*, ovvero, “dalla culla alla tomba”; pertanto, i confini del sistema analizzato includono le seguenti fasi:

- Estrazione delle materie prime
- Produzione delle materie prime
- Trasporto delle materie prime
- Produzione dei componenti del serbatoio
- Produzione del serbatoio
- Fase d'uso
- Fine vita

La Figura 3.13 sottostante illustra, in maniera schematica, le fasi che sono incluse nei confini del sistema.

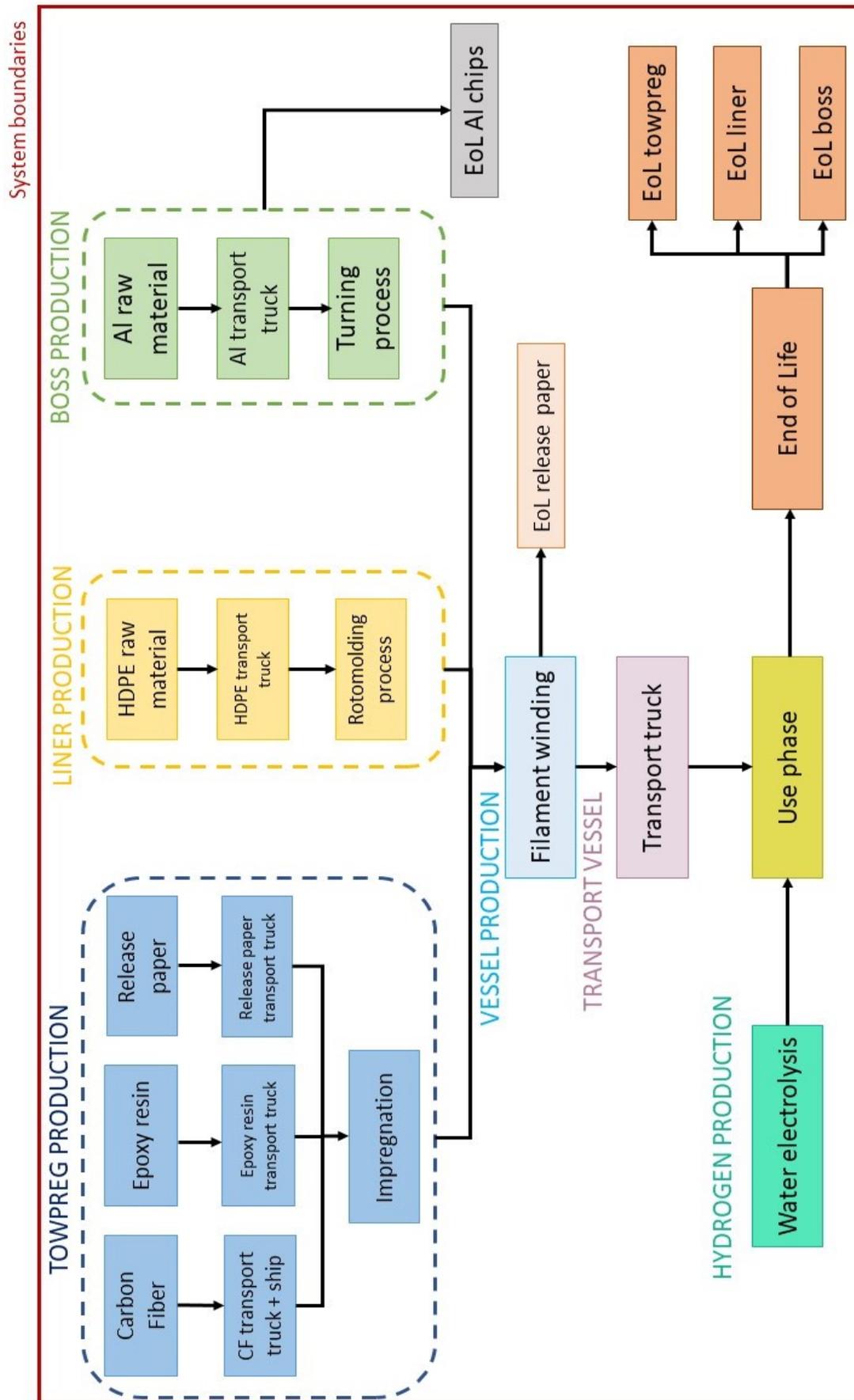


Figura 3.13 Rappresentazione schematica delle fasi incluse nei confini del sistema dell'analisi LCA condotta

3.3.2 Caso di studio - Analisi dell'inventario (LCI)

La fase di analisi dell'inventario considera tutti i dati raccolti e le procedure di calcolo necessarie per quantificare gli input e gli output dei vari processi inclusi nei confini del sistema. I dati sono stati ottenuti in modalità differenti, pertanto, possono essere classificati in primari e secondari: i primi sono stati calcolati in maniera diretta sulla base delle informazioni a disposizione, mentre i secondi sono stati ricavati a seguito di approfondite ricerche in letteratura e dal database utilizzato, ovvero, Ecoinvent.

Per i dati dell'inventario, sono state effettuate le seguenti assunzioni:

- Le quantità di fibre di carbonio e resina epossidica considerate, sono state calcolate sulla base delle informazioni ricavate dalla precedente fase di ottimizzazione progettuale del serbatoio.
- Informazioni relative al trasporto delle fibre di carbonio e della resina epossidica sono state fornite dallo studio condotto da Forcellese et al. [41]
- Allo stesso modo [41], sono stati ottenuti i consumi energetici della produzione delle fibre di carbonio, mentre quelli relativi alla produzione di resina epossidica sono presenti nel database Ecoinvent.
- Il quantitativo di release paper (film distaccante) necessario durante il processo di preimpregnazione delle fibre è stato stimato sulla base di informazioni estrapolate dall'articolo di Postacchini et al. [42].
- Dallo stesso articolo [42], mediante delle procedure di allocazione, sono stati ottenuti dati relativi ai consumi energetici del processo di impregnazione.
- Il quantitativo di materiale termoplastico utilizzato per realizzare il liner è stato calcolato sulla base dei dati a disposizione riguardo il componente e di informazioni derivanti dall'articolo [43].
- I consumi energetici del processo di produzione del liner, ovvero rotomolding, e del processo di filament winding per la realizzazione del serbatoio, sono stati presi dalla letteratura, nello specifico dall'articolo di Benitez et al. [43].
- Il quantitativo di alluminio necessario per la realizzazione dei boss in alluminio è stato stimato sulla base di informazioni trovate in letteratura, nell'articolo [44]; mentre per quanto riguarda il processo di produzione si è assunto che fosse una tornitura: il valore relativo al consumo energetico di questo processo è presente nel database utilizzato.

- Il consumo energetico relativo al processo di produzione dell'idrogeno, ovvero elettrolisi ad acqua, viene calcolato mediante delle procedure di allocazione considerando dei dati di partenza ricavati dall'articolo di Benitez et al. [43].
- Il trasporto dell'alluminio per i boss e dell'HDPE per il liner è stato calcolato mediante Google Maps considerando la distanza media tra delle aziende che producono rispettivamente alluminio e HDPE in Italia e l'azienda produttrice del serbatoio, situata nel centro Italia.
- In maniera analoga è stato valutato il trasporto del serbatoio dall'azienda che lo realizza ad un possibile cliente: si è assunto che si trovi a sud della Germania.

Nei paragrafi successivi, si esegue l'analisi dell'inventario in maniera dettagliata per tutte le fasi del ciclo di vita del prodotto.

3.3.2.1 Fase dei materiali

I materiali impiegati nella realizzazione del serbatoio sono: il materiale composito per la parte esterna strutturale, l'HDPE per il liner interno e l'alluminio per i boss laterali.

Materiale composito

Dalla fase di ottimizzazione progettuale del serbatoio è stato ottenuto il valore di peso che è pari a 33,5 kg; inoltre, conoscendo il valore della frazione in massa di rinforzo e matrice, sono state calcolate le quantità effettive di resina epossidica e fibra di carbonio per realizzare il componente strutturale.

Di seguito viene riportato il procedimento effettuato:

$$W_f = \frac{M_f}{M_c} = 68\%$$

$$\text{Massa serbatoio} = 33,5 \text{ kg}$$

$$\text{Massa fibre di carbonio} = 0,68 \cdot 33,5 = 22,78 \text{ kg}$$

$$\text{Massa resina} = 0,32 \cdot 33,5 = 10,72 \text{ kg}$$

Liner

Come definito in precedenza, il quantitativo di HDPE necessario alla realizzazione del liner è stato stimato sulla base di informazioni ricavate dall'articolo di Benitez et al. [43].

Quindi, considerando un valore di spessore del liner pari a 5 mm, conoscendo le dimensioni del serbatoio e la densità del materiale e approssimando la geometria delle calotte a due mezzesfere cave, è stato possibile calcolare il volume e, di conseguenza, il peso. Il procedimento eseguito è il seguente:

$$\text{spessore del liner } [s] = 5 \text{ mm}$$

$$\text{diametro serbatoio } [d_1] = 380 \text{ mm}$$

$$\text{diametro interno } [d_2] = 370 \text{ mm}$$

$$\text{raggio serbatoio } [r_1] = 190 \text{ mm}$$

$$\text{raggio interno } [r_2] = 185 \text{ mm}$$

$$\text{lunghezza } [l] = 535 \text{ mm}$$

$$\rho_{HDPE} = 0,95 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{Volume parte cilindrica} = \pi (r_1^2 - r_2^2) \cdot l = 3,15 \text{ dm}^3$$

$$\text{Volume calotte} = \frac{4}{3} \pi (r_1^3 - r_2^3) \cdot l = 2,2 \text{ dm}^3$$

$$\text{Volume liner} = \text{Volume parte cilindrica} + \text{Volume calotte} = 5,35 \text{ dm}^3$$

$$\text{Massa liner} = \rho_{HDPE} \cdot \text{Volume liner} = 5,1 \text{ kg}$$

Boss

Dall'articolo di Patra et al. [44], è stato possibile cogliere informazioni riguardo la geometria e le dimensioni dei boss di alluminio, che hanno determinato il punto di partenza per il calcolo della quantità di alluminio necessaria per ottenere i boss. La Figura 3.14 sottostante illustra lo schema della geometria dei boss.

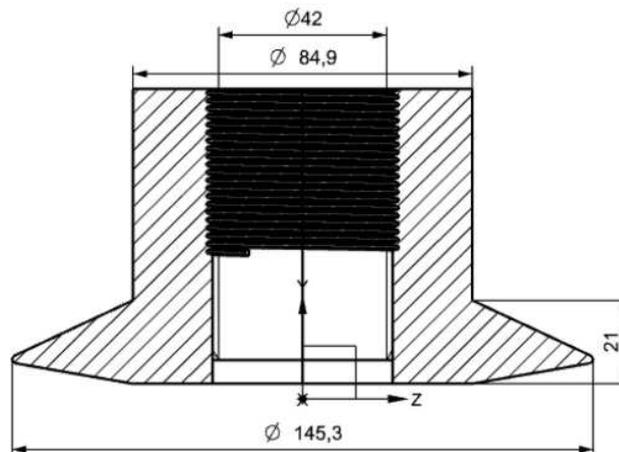


Figura 3.14 Rappresentazione della geometria dei boss. Fonte: [44]

Di seguito, viene riportato il calcolo eseguito per ottenere la quantità di alluminio da considerare nell'analisi; per semplicità si considera la flangia come un corpo cilindrico cavo.

$$\text{diametro esterno } [d_1] = 145,3 \text{ mm}$$

$$\text{diametro interno } [d_2] = 42 \text{ mm}$$

$$\text{diametro intermedio } [d_3] = 84,9 \text{ mm}$$

$$\text{raggio esterno } [r_1] = 72,65 \text{ mm}$$

$$\text{raggio interno } [r_2] = 21 \text{ mm}$$

$$\text{raggio intermedio } [r_3] = 42,45 \text{ mm}$$

$$\text{altezza flangia } [h_1] = 21 \text{ mm}$$

$$\text{altezza corpo cilindrico } [h_2] = 53 \text{ mm}$$

$$\rho_{Al} = 2,7 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{Volume flangia} = \pi(r_1^2 - r_2^2) \cdot h_1 = 319 \text{ cm}^3$$

$$\text{Volume corpo cilindrico} = \pi(r_3^2 - r_2^2) \cdot h_2 = 226 \text{ cm}^3$$

$$\text{Volume BOSS} = \text{Volume flangia} + \text{Volume corpo cilindrico} = 545 \text{ cm}^3$$

$$\text{Massa BOSS} = \rho_{Al} \cdot \text{Volume BOSS} = 1,5 \text{ kg}$$

Dato che nel serbatoio verranno applicati due boss, la quantità di alluminio da considerare è di 3 kg. Però, assumendo che vengano realizzati per tornitura a partire da un blocco di alluminio grezzo, è necessario sovradimensionare i boss e considerare un quantitativo di alluminio da estrarre pari a quello relativo al blocco da tornire.

Considerando che il grezzo di partenza presenti una geometria tubolare caratterizzata da delle dimensioni maggiorate rispetto a quelle effettive, si assume un diametro pari a 160 mm ed un'altezza di 90 mm. Pertanto, la quantità di alluminio da estrarre viene calcolata in questo modo:

$$\text{Volume} = \pi \cdot r^2 \cdot h = 1809 \text{ cm}^3$$

$$\text{Massa} = \rho_{Al} \cdot \text{Volume} = 4,9 \text{ kg}$$

Sempre in relazione al fatto che occorrono due boss, il quantitativo di alluminio di partenza sarà raddoppiato; quindi, sarà pari a 9,8 kg.

La Tabella 3.5 riporta i quantitativi di materiale da utilizzare.

Tabella 3.5 Dati relativi al quantitativo di materiale da utilizzare per realizzare il serbatoio.

| COMPONENTE | MATERIALE | QUANTITÀ |
|-------------------|--------------------|-----------------|
| Serbatoio | Fibre di carbonio | 22,78 kg |
| | Resina epossidica | 10,72 kg |
| Liner | Polietilene (HDPE) | 5,1 kg |
| Boss | Alluminio | 9,8 kg |

3.3.2.2 Fase di produzione

Come già definito in precedenza, sono già noti rispettivamente dall'articolo [41] e dal database Ecoinvent, i consumi energetici relativi ai processi di produzione delle fibre di carbonio e della resina epossidica; mentre vengono modellati i processi di produzione del liner, dei boss, del serbatoio (filament winding) e del towpreg.

Preimpregnazione

Dall'articolo [42] è possibile individuare i consumi energetici relativi a ciascuna fase di funzionamento della macchina, ovvero:

- Fase di riscaldamento della macchina: si verifica un consumo energetico di 2,5 kW per due ore di riscaldamento, quindi, nel complesso 5 kWh;
- Fase di riscaldamento della resina: si considera un consumo medio di energia pari a 350 W da moltiplicare per 8 ore; l'energia consumata per il riscaldamento di un singolo grammo di resina è pari a 1,12 Wh/g;
- Fase operativa della macchina: considerando un tasso di impregnazione di 20 m/min, il consumo di energia è pari a 0,87 kWh.
- Fase di pulizia della macchina: utilizzo di 0,5 l di Acetone e 4 l di DBE.

Mediante delle procedure di allocazione, sono stati ripartiti i consumi energetici su un metro di towpreg e il processo è stato modellato su SimaPro considerando questa quantità di materiale; successivamente, i consumi sono stati moltiplicati per la quantità di towpreg necessaria alla realizzazione del serbatoio, calcolata come segue sulla base dei dati ricavati da CADWIND:

larghezza banda [l] = 6 mm

spessore banda [s] = 0,16 mm

$\rho_{composito} = 1,6 \text{ g/cm}^3$

$$Volume\ towpreg = l \cdot s \cdot 1000 = 6 \cdot 0,16 \cdot 1000 = 960\ mm^3$$

$$Massa\ towpreg = 1,6 \cdot 0,96 = 1,5\ g$$

$$Metri\ di\ towpreg = \frac{33,5\ kg}{0,0015\ kg} = 22333\ m = 22,3\ km$$

Dall'articolo [42] emerge anche la necessità di utilizzare un film distaccante per evitare che durante l'avvolgimento del towpreg si incollino i vari strati di materiale. Nello specifico, la quantità di film polimerico necessaria per un metro di towpreg è pari a 0,55 g quindi, mediante una proporzione, è stato possibile calcolare il quantitativo necessario per 22,3 km di towpreg utilizzati per il serbatoio:

$$quantità\ di\ film\ distaccante = \frac{0,55 \cdot 22,3}{0,001} = 12265\ g = 12,265\ kg$$

Sulla base delle informazioni riportate nelle righe precedenti riguardo la fase di riscaldamento della macchina, si ottiene che in un'ora vengono impregnati 1200 m di fibre e, considerando che essa operi per un intero turno di lavoro, quindi 8 ore, saranno impregnati 9600 m di fibre. Ripartendo il consumo energetico ottenuto su 9600 m di fibre, si otterrà quello relativo ad un metro di towpreg.

Il procedimento utilizzato è il seguente:

$$consumo\ energetico\ per\ 1\ m\ di\ materiale\ impregnato = \frac{5\ kWh}{9600\ km} = 0,0005\ kWh$$

Considerando i consumi della fase di riscaldamento della resina definiti nell'articolo [42], conoscendo il peso di un metro di towpreg (1,5 g) e la frazione volumetrica della matrice nel composito (32%), è stata calcolata la quantità di resina presente in un metro di towpreg, ovvero 0,48 g. Moltiplicando questo valore per il consumo energetico per un grammo di resina, si ottiene il consumo energetico relativo al riscaldamento del quantitativo di resina in un metro di towpreg, ovvero 0,54 Wh.

La fase operativa della macchina, invece, consuma un quantitativo di energia pari a 0,87 kWh quindi, considerando un tasso di impregnazione di 20 m/min, in un'ora l'impregnazione viene

effettuata per 1200 m di materiale; dividendo il consumo energetico per 1200 m, si ottiene il consumo energetico relativo ad un metro di materiale che è di 0,0007 kWh.

Infine, per quanto riguarda la fase di pulizia, considerando che questa operazione venga effettuata ogni 2 turni di lavoro, quindi ogni 16 ore, sono stati calcolati i metri di materiale impregnati in 16 ore (19200 m). Successivamente è stata ripartita la quantità di acetone su 1 m di materiale impregnato e risulta pari a 0,01568 g. Non è stato considerato il quantitativo di DBE poiché non era presente in SimaPro e, in ogni caso, avrebbe contribuito in maniera trascurabile sull'impatto complessivo.

Liner

L'articolo [43] definisce che il liner venga realizzato mediante un processo di rotomolding e i consumi associati ad esso sono: il gas naturale emesso, pari a 100 g per un kg di plastica, ed il consumo energetico che è di 0,23 kWh per un kg di plastica. Dato che il gas naturale su SimaPro viene considerato come un valore energetico, è stato considerato il potere calorifico del metano rapportato a 100 g che è di 820 kcal per un chilogrammo di plastica.

Boss

Il processo di produzione dei boss utilizzato nell'analisi, ovvero la tornitura da pieno, è già modellato su SimaPro come "Aluminium removed by turning, average, computer numerical controlled {GLO}| market for | APOS, S".

Filament winding

Il processo di filament winding, dalla letteratura [43], ha un consumo energetico di 2,32 kWh per un chilogrammo di composito; quindi, moltiplicando questo valore per i kg di composito che costituiscono il serbatoio, si ottiene il consumo energetico complessivo.

Nella Tabella 3.6 sottostante vengono riportati i consumi energetici e i materiali di input necessari ai processi di produzione definiti.

Tabella 3.6 Dati relativi a materiali e consumi energetici dei processi di produzione coinvolti nell'analisi.

| PROCESSO DI PRODUZIONE | ELEMENTO | QUANTITÀ |
|--|--|--------------------------|
| Preimpregnazione (valori per 1 m di towpreg) | Film distaccante | 0,55 g |
| | Consumo energetico (riscaldamento macchina) | 0,0005 kWh |
| | Consumo energetico (riscaldamento resina) | 0,54 Wh |
| | Consumo energetico (fase operativa della macchina) | 0,0007 kWh |
| | Acetone (pulizia della macchina) | 0,01568 g |
| Rotomolding | Consumo energetico | 0,23 kWh/kg di plastica |
| Filament winding | Consumo energetico | 2,32 kWh/kg di composito |

3.3.2.3 Fase d'uso

Nella fase d'uso del serbatoio, si tiene conto soltanto del processo di produzione dell'idrogeno poiché le emissioni da esso generate sono considerate pressoché nulle; difatti, generalmente dopo esser stato consumato, si libera in atmosfera sottoforma di vapore acqueo.

Benitez et al. hanno riportato nell'articolo [43] i consumi del processo relativi all'intero autoveicolo; pertanto, si procede effettuando un'allocazione per peso. Il primo passaggio ha previsto di riportare il consumo energetico di 50 kWh /kg sul peso del serbatoio mediante la seguente proporzione:

$$33,5 : 800 = x : 50 \frac{kWh}{kg},$$

dove 33,5 kg è il peso del serbatoio e 800 kg quello della macchina.

In questo modo si ottiene che il consumo energetico della produzione di idrogeno rapportato al serbatoio è di 2,1 kWh/kg. Dato che questo valore influisce sulla vita utile del componente, è necessario valutare quanti kg di idrogeno verranno utilizzati e moltiplicare questa quantità per il consumo relativo alla produzione di un kg di idrogeno. Considerando che l'autoveicolo operi per 250000 km, il quantitativo di idrogeno necessario sulla base di un consumo di 100 km al kg è di 2500 kg; pertanto, il consumo energetico complessivo è pari a 5250 kWh.

Nella Tabella 3.7 viene riportato il consumo energetico del processo di produzione dell'idrogeno necessario per 250000 km.

Tabella 3.7 Dati relativi al consumo energetico del processo di produzione dell'idrogeno.

| PROCESSO | ELEMENTO | QUANTITÀ |
|-----------------------------|--------------------|-----------------|
| Elettrolisi ad acqua | Consumo energetico | 5250 kWh |

3.3.2.4 Fase di trasporto

La maggior parte dei dati relativi al trasporto sono stati ottenuti facendo delle assunzioni riguardo alle possibili aziende che producono i materiali considerati e conoscendo il punto di arrivo, ovvero, l'azienda produttrice del serbatoio, situata nel centro Italia. Allo stesso modo, si fanno delle ipotesi sulla collocazione di un possibile cliente. Per quanto riguarda il trasporto relativo alle fibre di carbonio e la resina epossidica, si considerano i dati presenti nell'articolo [41].

Di seguito vengono riportate le assunzioni effettuate sulla collocazione geografica delle aziende:

- Aziende produttrici di fibre di carbonio: Giappone
- Aziende produttrici di resina epossidica: Germania
- Aziende produttrici di alluminio: centro – nord Italia
- Aziende produttrici di HDPE: nord Italia
- Cliente: Germania

Non si considera il trasporto del towpreg poiché viene prodotto internamente all'azienda.

Nella Tabella 3.8 vengono riportati i dati relativi al trasporto.

Tabella 3.8 Dati relativi al trasporto dei materiali e del componente.

| TRASPORTO | DISTANZA [km] | TIPOLOGIA |
|-------------------------------|----------------------|-------------------|
| Fibre di carbonio | 150 | Truck 16 – 32 ton |
| | 16800 | Transoceanic ship |
| Resina epossidica | 1200 | Truck 16 – 32 ton |
| Alluminio | 360 | Truck 16 – 32 ton |
| HDPE | 550 | Truck 16 – 32 ton |
| Serbatoio (al cliente) | 900 | Truck 16 – 32 ton |

3.3.2.5 Fine vita

La fase di fine vita del prodotto viene modellata considerando scenari differenti per i vari materiali. L'EoL dei boss tiene in considerazione sia il riciclo all'80% dell'alluminio, sia il trasporto del materiale verso l'azienda che si occupa di riciclarlo, che si assume sia la stessa che lo produce. Lo scenario di fine vita del liner, invece, prevede un riciclo del materiale pari al 100%. Infine, per quanto riguarda il towpreg, si considera un riciclo del 100% del film distaccante, mentre le fibre di carbonio e la resina epossidica vengono smaltite in discarica; pertanto, viene incluso anche il trasporto dall'azienda alla discarica. In SimaPro, lo smaltimento in discarica viene modellato come "Municipal solid waste (landfill) Europe without Switzerland". Nella Tabella 3.9 sono riportati i dati relativi alla fase di fine vita.

Tabella 3.9 Dati relativi alla fase di fine vita.

| | MATERIALE | SCENARIO | TIPOLOGIA | DISTANZA |
|------------------|----------------------|-----------------------------|----------------------|-----------------|
| | | | TRASPORTO | [km] |
| EoL BOSS | Alluminio | Riciclato all'80% | Truck 16 – 32 ton | 360 |
| EoL LINER | HDPE | Riciclato al 100% | – | – |
| EoL | Film distaccante | Riciclato al 100% | – | – |
| TOWPREG | (polietilene) | | | |
| | Fibre di carbonio | Smaltimento in discarica | Truck 16 – 32 ton | 200 |
| | Resina epossidica | Smaltimento in discarica | Truck 16 – 32 ton | 200 |

3.3.3 Caso di studio - Valutazione degli impatti ambientali (LCIA)

L'LCIA è la fase che prevede di implementare i dati raccolti nell'analisi dell'inventario sul software utilizzato, ovvero SimaPro, affinché possano essere elaborati e generare dei risultati attendibili. Per garantire una visione completa degli impatti ambientali complessivi del prodotto in esame, sono state utilizzate le metodologie definite nel paragrafo 2.5: Cumulative Energy Demand (CED), ReCiPe a livello intermedio (midpoint) e Global Warming Potential (GWP).

3.3 Analisi LCA di un serbatoio metallico

Per rendere lo studio più completo, si è deciso di valutare gli impatti ambientali di un serbatoio realizzato in materiale metallico e che presentasse le stesse dimensioni di quello esaminato, per poter definire se quest'ultimo costituisse una soluzione maggiormente sostenibile o meno.

Il procedimento eseguito è analogo a quello utilizzato per l'analisi del serbatoio di tipo IV e include le fasi riportate di seguito:

- Definizione degli obiettivi e degli scopi;
- Analisi dell'inventario (LCI);
- Valutazione degli impatti (LCIA);
- Interpretazione dei risultati.

Definizione degli obiettivi e degli scopi

L'obiettivo dell'analisi, come specificato nelle righe precedenti, è quello di valutare l'impatto ambientale generato da un serbatoio di tipo I caratterizzato dalle stesse dimensioni del componente esaminato nello studio, per individuare quale delle due soluzioni risulta essere maggiormente sostenibile. È possibile effettuare un confronto poiché l'unità funzionale risulta essere identica e coincide con la capacità del componente di stoccare, all'interno di autoveicoli, l'idrogeno necessario per percorrere una distanza pari a 250000 km durante la sua vita utile. Per condurre l'analisi è stato utilizzato un approccio del tipo “*from cradle to grave*”; infatti, sono incluse nei confini del sistema le fasi di produzione e trasporto della materia prima, produzione e trasporto del componente, fase d'uso e fine vita.

Analisi dell'inventario (LCI)

I dati raccolti per effettuare l'analisi riguardano il materiale e i processi di produzione utilizzati, la fase d'uso, il trasporto e il fine vita.

Dall'articolo [45] sono state ricavate delle informazioni utilizzate nel lavoro eseguito, come il materiale che generalmente si utilizza per realizzare dei serbatoi di questo tipo, ovvero Al 6061 T6, e lo spessore minimo che è di 42 mm. Quindi, conoscendo anche la densità del materiale (2,7 g/cm³), la lunghezza e il diametro della parte centrale del serbatoio, rispettivamente pari a 540 mm e 380 mm, mediante il procedimento riportato di seguito, è stata calcolata la quantità di materiale da utilizzare.

diametro esterno $[d_1] = 380 \text{ mm}$

diametro interno $[d_2] = 296 \text{ mm}$

raggio esterno $[r_1] = 190 \text{ mm}$

raggio interno $[r_2] = 148 \text{ mm}$

lunghezza $[l] = 540 \text{ mm}$

$\rho_{Al} = 2,7 \text{ g/cm}^3$

$$Volume = \frac{4}{3}\pi(r_1^3 - r_2^3) + \pi(r_1^2 - r_2^2) \cdot l = 22276 \text{ cm}^3$$

$$Massa = \rho_{Al} \cdot Volume = 60,1 \text{ kg}$$

Si è assunto che la realizzazione del serbatoio avvenisse mediante un'imbutitura seguita da una saldatura: entrambi i processi sono già modellati in SimaPro rispettivamente come "Deep drawing, steel 10000 kN press, automode {GLO}| market for | APOS, S" e "Welding, arc aluminium, {GLO}| market for | APOS, S".

Come nell'analisi del serbatoio di tipo IV, anche in questo caso, nella fase d'uso viene considerata soltanto la produzione dell'idrogeno mediante un processo di elettrolisi ad acqua. Facendo riferimento all'articolo di Benitez et al. [43], il consumo energetico di questo processo rapportato all'autoveicolo complessivo è di 50 kWh su kg di idrogeno. Allocando questa quantità sul peso del serbatoio, mediante la seguente proporzione, è stato calcolato il consumo energetico effettivo del processo:

$$60,1 : 830 = x : 50 \frac{kWh}{kg}$$

$$x = 3,62 \frac{kWh}{kg}$$

dove 830 kg è il valore assunto per il peso dell'autoveicolo.

Moltiplicando il valore ottenuto per il numero di kg di idrogeno necessari nella vita utile (2500 kg), il consumo energetico complessivo è risultato pari a 9051,2 kWh.

Per quanto riguarda il trasporto, è stata considerata la distanza media fra un'azienda che produce alluminio e quella che realizza il serbatoio, ovvero 360 km.

Infine, è stato modellato il fine vita considerando che il materiale venga riciclato all'80%.

Nella Tabella 3.10 sono riportati i dati che dovranno essere implementati nel software per valutare gli impatti ambientali.

Tabella 3.10 Dati raccolti nella fase di analisi dell'inventario (LCI) del serbatoio metallico.

| ELEMENTO | QUANTITÀ | CONSUMO ENERGETICO | TIPOLOGIA TRASPORTO | DISTANZA |
|---------------------------------|-----------------|-------------------------------|--------------------------------|-----------------|
| Alluminio | 60,1 kg | x | x | x |
| Elettrolisi ad acqua | x | 9051,2 kWh | x | x |
| Trasporto | x | x | Truck 16 – 32 ton | 360 km |

Valutazione degli impatti

I dati riportati nella Tabella 3.10 sono stati successivamente implementati nel software SimaPro per procedere con l'effettiva fase di valutazione degli impatti ambientali che, come nel caso precedente, ha previsto di osservare i risultati utilizzando tre metodi differenti: CED, ReCiPe e GWP.

Capitolo 4 – Risultati e discussioni

4.1 Ottimizzazione progettuale del serbatoio

In questo capitolo vengono riportati i risultati ottenuti dalle prove effettuate per l'individuazione della laminazione ottimale da utilizzare per realizzare il serbatoio.

- **Prova 1**

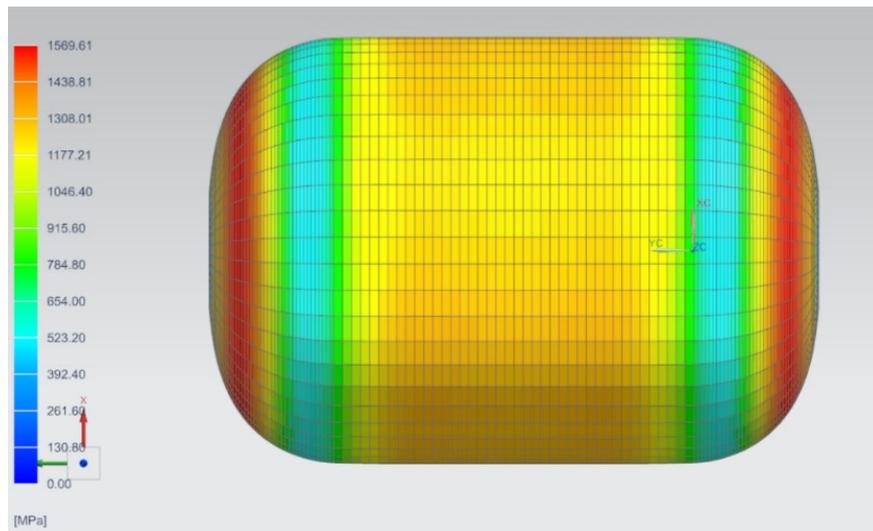
La prima prova è stata eseguita utilizzando il seguente laminato: [85₃/10₄/85₃/15₄/85₃/20₄/85₃/25₄/85₃/30₄/85₃], che presenta un numero totale di plies pari a 62 ed uno spessore complessivo di 14 mm nella zona cilindrica.

Osservando i valori di tensione ottenuti, si è notato che la zona più sollecitata si trova in corrispondenza delle calotte che costituiscono delle vere e proprie criticità; pertanto, la stratificazione testata non è in grado di garantire la sicurezza del serbatoio.

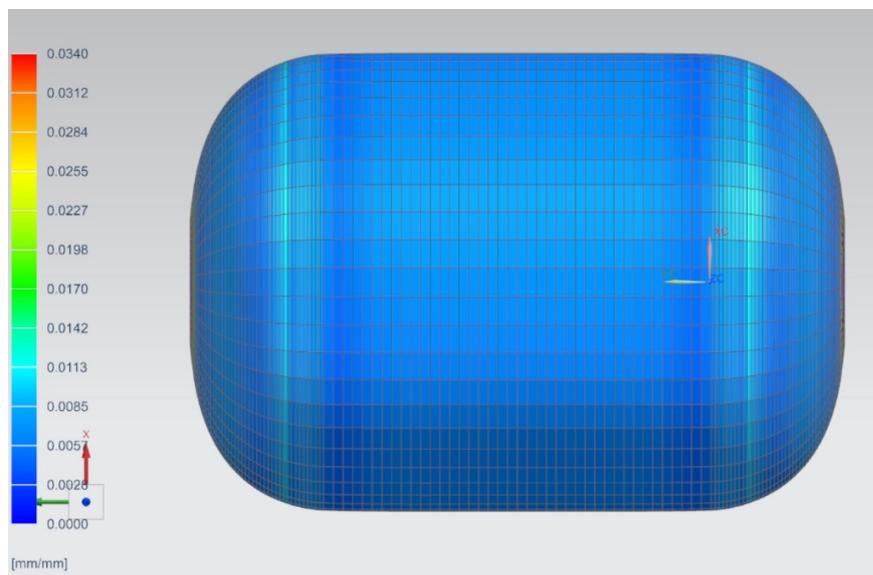
Per tale ragione, si è deciso di procedere aumentando lo spessore del laminato in maniera graduale in corrispondenza della zona più sollecitata per rafforzarla e, ciò, è stato ottenuto utilizzando degli angoli di avvolgimento che consentissero al laminato di arrivare ad una turning zone in corrispondenza delle zone più sollecitate delle calotte.

Inoltre, come mostrato da Zhang et al [13], è importante cercare di mantenere uno spessore più o meno costante nella zona delle calotte ed una possibile soluzione da adottare è quella di sovrapporre strati di materiale con angolo di avvolgimento crescente, in modo tale da ricoprire delle zone sempre minori della calotta; così facendo, si limita il fenomeno dell'incremento dello spessore nell'intorno delle aperture delle calotte per ottenere degli spessori del serbatoio il più uniformi possibili; pertanto, si è operato in questo senso.

La Figura 4.1 sottostante illustra l'andamento delle tensioni e delle deformazioni risultate da questa prima simulazione.



(a)



(b)

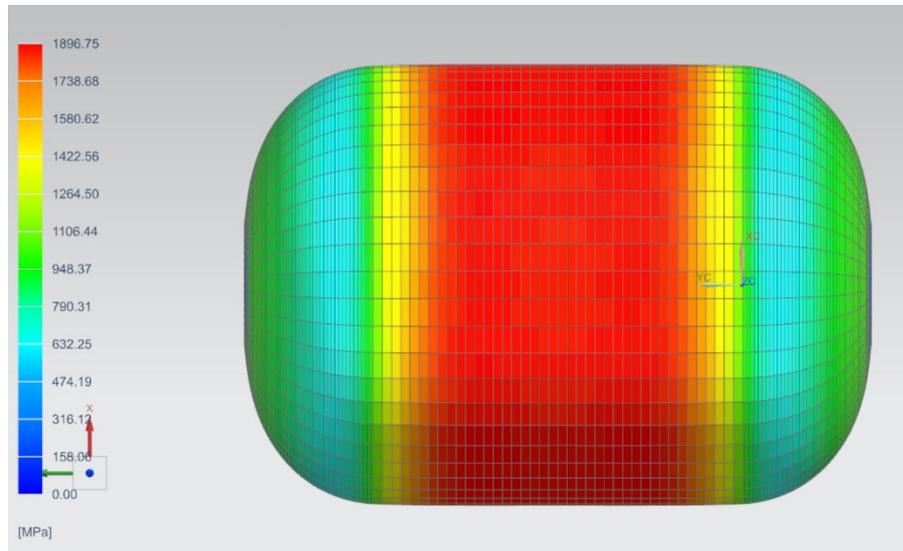
Figura 4.1 Risultati in termini di (a) tensioni e (b) deformazioni equivalenti per il primo strato della laminazione $[85_3/10_4/85_3/15_4/85_3/20_4/85_3/25_4/85_3/30_4/85_3]$. La struttura mostra dei punti critici sulle calotte, in particolare subito dopo la zona di transizione tra la geometria cilindrica e le calotte.

- **Prova 2**

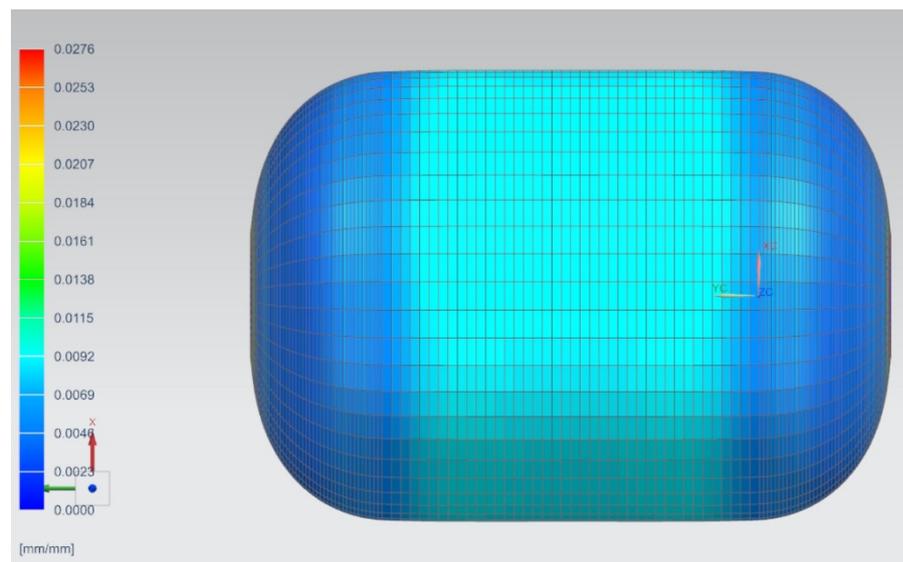
Per risolvere le problematiche emerse dalla prova precedente è stata analizzata una seconda stratificazione con l'obiettivo di rinforzare le zone più critiche; pertanto, la sequenza del laminato scelto è la seguente: $[85_3/10_4/15_4/20_4/85_3/30_4/35_4/45_4/85_3]$. In questo caso il numero totale di plies è pari a 66 e lo spessore in corrispondenza della zona cilindrica è di 13.8 mm.

Dalla simulazione si è notato che, a livello di tensione, non si hanno più criticità sulle calotte, ma la parte più sollecitata è la zona cilindrica in cui viene raggiunto un valore di tensione massima di 1897 MPa ed una deformazione di 0.0092, superando il limite massimo definito di 0.007.

I risultati ottenuti vengono mostrati nella Figura 4.2.



(a)



(b)

Figura 4.2 Risultati delle simulazioni per la stratificazione [85₃/10₄/15₄/20₄/85₃/30₄/35₄/45₄/85₃], sia per le (a) tensioni equivalenti che per (b) le deformazioni.

- **Prova 3**

Dalla prova eseguita precedentemente, risulta che la zona più critica è quella centrale cilindrica, in quanto, oltre ad essere quella maggiormente sollecitata, si raggiungono dei valori di deformazione che superano il valore limite imposto; pertanto, la prova 3 prevede di andare a superare questa problematica aumentando il numero di strati a hoop. Infatti, la stratificazione utilizzata presenta un maggior numero di strati di materiale con angolo di avvolgimento ad 85°: [85₆/10₄/15₄/20₄/85₆/30₄/35₄/45₄/85₆].

Il laminato presenta 84 plies, un peso di 21 kg ed uno spessore in corrispondenza della parte cilindrica pari a circa 20 mm. Per osservare i valori di tensione e deformazione del serbatoio nella maniera più accurata possibile, sono stati osservati i risultati ottenuti considerando un ply di riferimento per ciascun angolo di avvolgimento.

Di seguito, vengono riportati i valori di tensione individuati nei vari plies analizzati:

- Ply 1 – 85°: dalla Figura 4.3. emerge che procedendo dalle estremità della zona cilindrica verso la parte centrale, si verifica un aumento di tensione da un valore minimo di 685 MPa ad un valore massimo di 993 MPa.

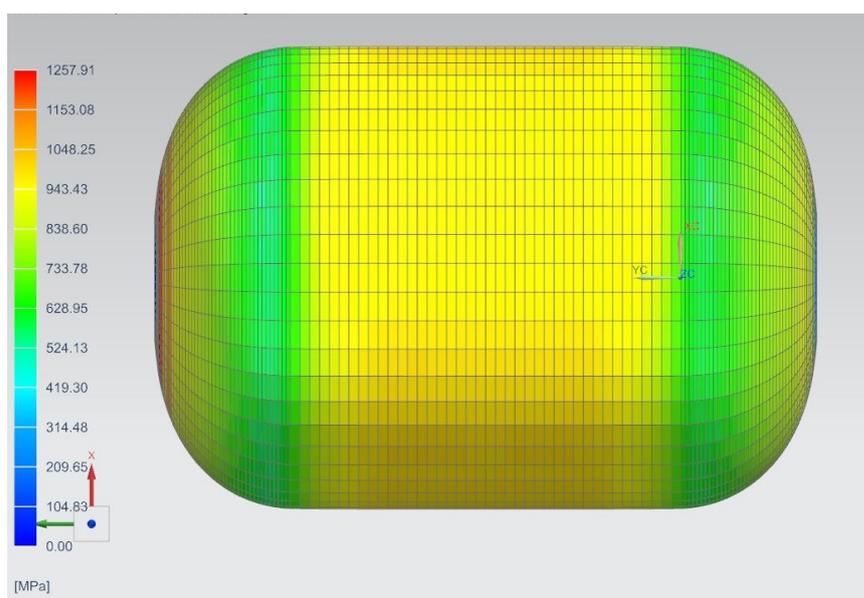


Figura 4.3 Andamento della tensione in corrispondenza del ply 1

- Ply 13 – 10°: in corrispondenza di questo ply si individua un valore massimo di tensione in corrispondenza dell'estremità della calotta, pari a 1290 MPa e si assiste, inoltre, ad un aumento graduale del valore di tensione a partire dalle calotte fino ad arrivare ad un

valore massimo di 1030 MPa nella zona di transizione tra le calotte e la parte cilindrica. La Figura 4.4. illustra l'andamento delle tensioni nel ply 13.

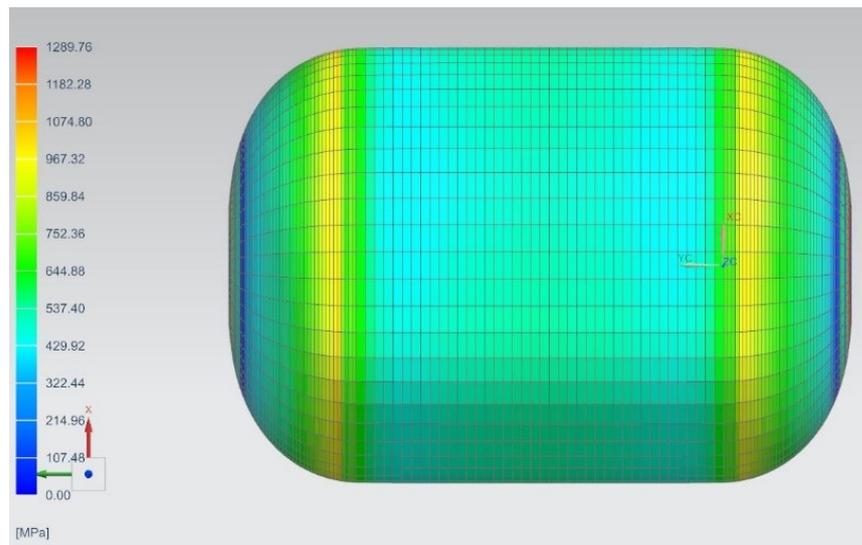


Figura 4.4 Andamento della tensione in corrispondenza del ply 13

- Ply 21 – 15°: si raggiunge un valore massimo di tensione in corrispondenza della zona di transizione tra le calotte e la parte cilindrica pari a 899 MPa.
- Ply 29 – 20°: nella zona centrale si ottiene un valore di tensione di circa 575 MPa; mentre in corrispondenza della zona di transizione tra la parte cilindrica e le calotte si ottiene un valore di tensione pari a 788 MPa.
- Ply 37 – 85°: nella zona centrale si verifica un aumento del valore di tensione del 72% rispetto al ply precedente, raggiungendo un valore massimo di circa 990 MPa e ciò è dovuto al fatto che le fibre sono orientate lungo la direzione circonferenziale, ovvero quella più sollecitata secondo la teoria di Mariotte; infatti, gli strati con angoli di avvolgimento ad 85° sono quelli che rispondono maggiormente alla sollecitazione e, pertanto, vengono inseriti nel composito proprio per rafforzarlo. La Figura 4.5 mostra l'andamento delle tensioni in corrispondenza di questo ply.

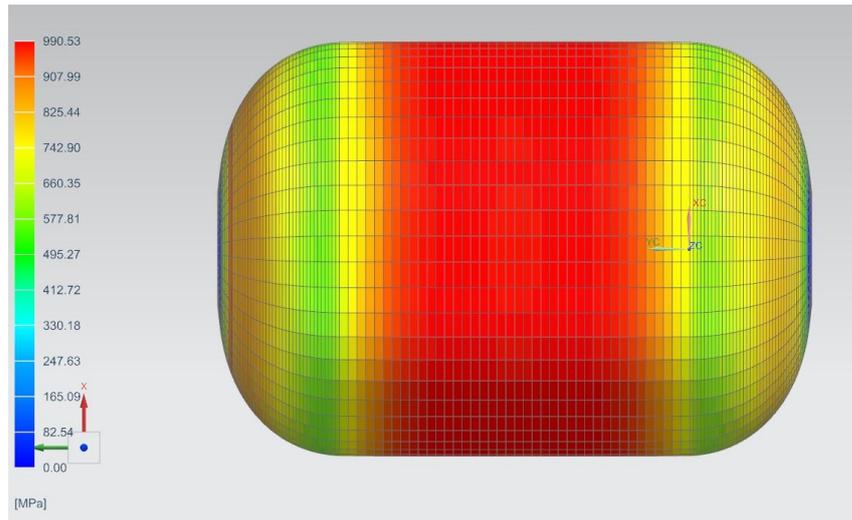


Figura 4.5 Andamento della tensione in corrispondenza del ply 37

- Ply 49 – 30°: in corrispondenza di questo ply viene raggiunto un valore di tensione di circa 650 MPa nella parte cilindrica che diminuisce nella zona di transizione, per poi riaumentare in corrispondenza delle calotte fino a valori di 728 MPa.
- Ply 57 – 35°: nella zona centrale il valore di tensione si aggira sui 650 MPa, mentre in corrispondenza delle calotte la tensione assume un valore di circa 730 MPa.
- Ply 65 – 45°: nella zona centrale si raggiunge un valore massimo di tensione di circa 820 MPa, mentre in corrispondenza della zona di transizione la tensione è bassa: il valore che assume è di circa 500 MPa. La Figura 4.6 mostra l'andamento dei valori di tensioni in questo ply.

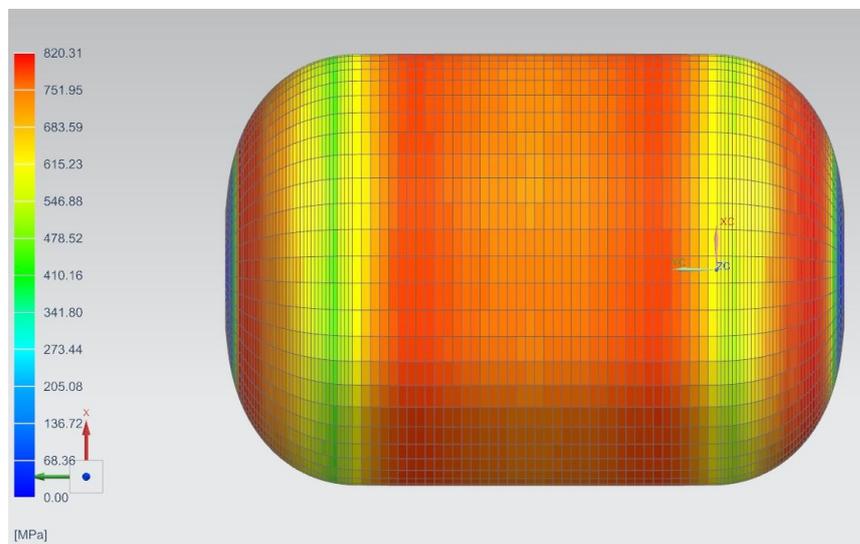


Figura 4.6 Andamento della tensione in corrispondenza del ply 65

- Ply 73 – 85°: si verifica il raggiungimento del valore di tensione massima in corrispondenza della zona centrale che risulta quella maggiormente sollecitata, pari a 992 MPa, mentre alle estremità della zona cilindrica il valore raggiunto è circa pari a 600 MPa.

Sulla base dei risultati ottenuti si può osservare che il serbatoio è in sicurezza, in quanto, sebbene ci siano delle zone maggiormente sollecitate rispetto ad altre, si rientra comunque nei limiti di tensione prefissati. In maniera analoga, sono state fatte delle valutazioni riguardo la deformazione e i risultati vengono riportati di seguito:

- Ply 1 – 85°: la deformazione si distribuisce in maniera uniforme in tutto il componente ed il valore raggiunto è di circa 0.0044; pertanto, si è in condizioni di sicurezza. La Figura 4.7 mostra l'andamento della deformazione in corrispondenza del ply considerato.

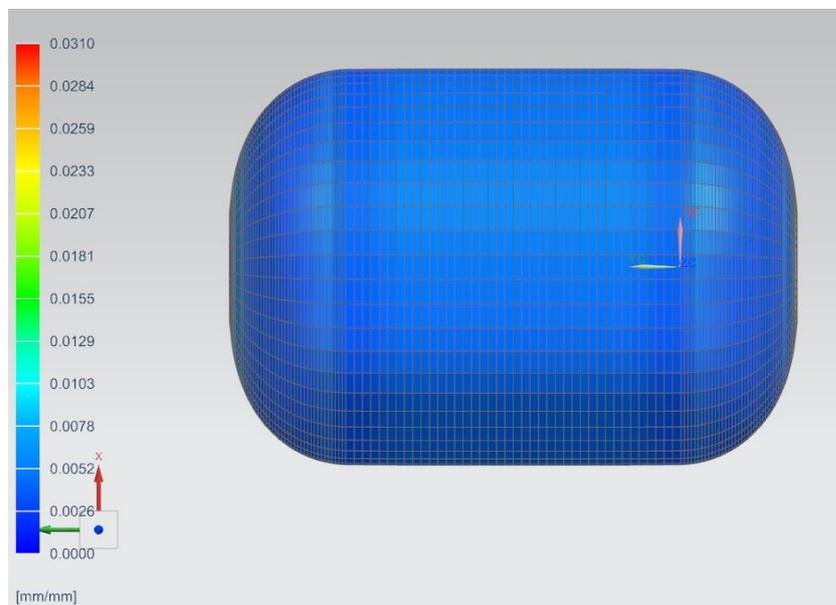


Figura 4.7 Andamento della deformazione in corrispondenza del ply 1

- Ply 13 – 10°: l'andamento della deformazione è lo stesso che si osserva nel ply precedente, quindi si è in sicurezza.
- Ply 21 – 15°: nel complesso il serbatoio è in sicurezza, in quanto, il valore di deformazione è di circa 0.006, ma in corrispondenza delle estremità delle calotte si

raggiungono valori elevati (0.0216) che non consentono di rientrare nelle condizioni di sicurezza definite.

- Ply 29 – 20°: la deformazione si distribuisce in maniera uniforme e garantisce le condizioni di sicurezza poiché, al massimo, si raggiunge un valore di 0.006 in corrispondenza della zona di transizione. La Figura 4.8 mostra l'andamento della deformazione nel ply 29.

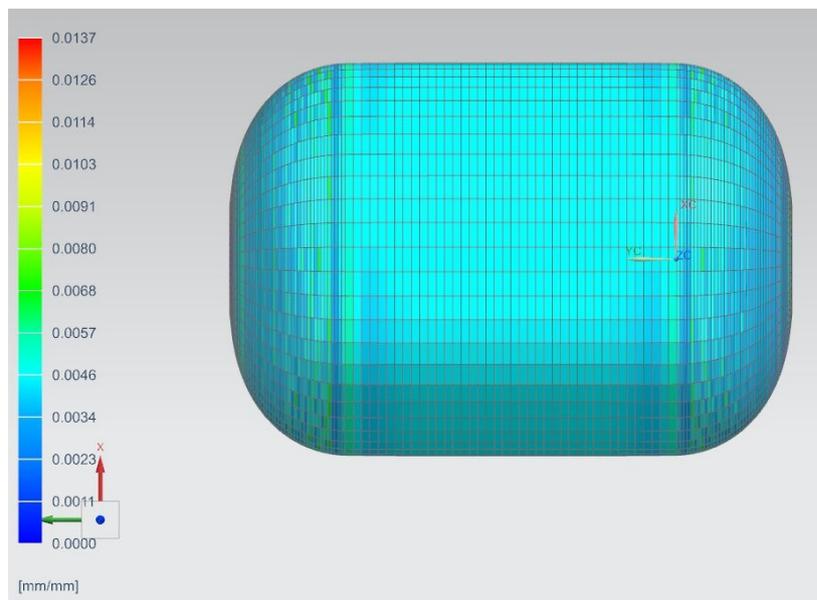


Figura 4.8 Andamento della deformazione in corrispondenza del ply 29

- Ply 37 – 85°: si è complessivamente in sicurezza, poiché il valore di deformazione massima è raggiunto in corrispondenza della zona di transizione ed è circa pari a 0.0067.
- Ply 49 – 30°: l'andamento della deformazione è analogo a quello del ply precedente; pertanto, si è in sicurezza.
- Ply 57 – 35°: si raggiunge un valore massimo di deformazione pari a 0.006 in corrispondenza delle calotte; pertanto, sono garantite le condizioni di sicurezza.
- Ply 65 – 45°: la deformazione è distribuita in maniera omogenea ed assume valori compresi tra un minimo di 0.003 in corrispondenza della zona di transizione ed un massimo di 0.005 nella zona di estremità delle calotte; nella parte cilindrica, invece, il

valore massimo di deformazione si aggira sui 0.0045. La Figura 4.9 mostra l'andamento della deformazione in corrispondenza di questo ply.

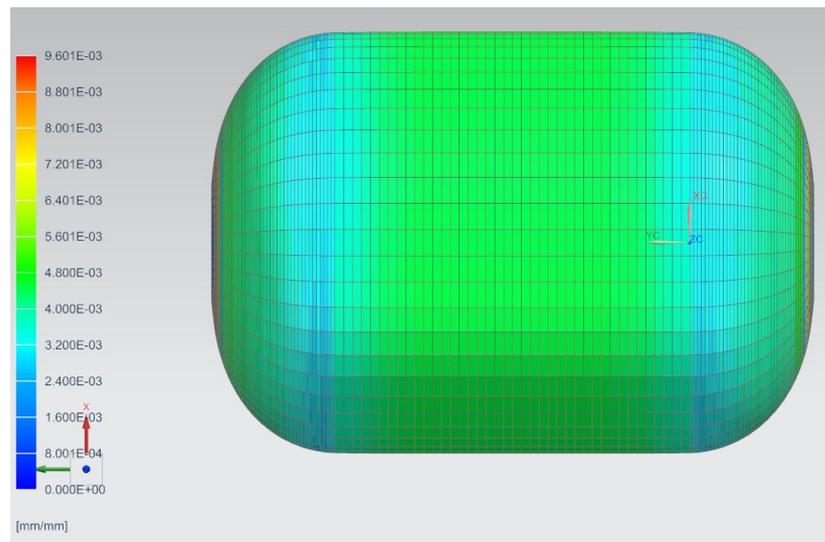


Figura 4.9 Andamento della deformazione in corrispondenza del ply 65

- Ply 73 – 85°: la distribuzione della deformazione è pressoché la stessa osservata nel ply precedente, ma in corrispondenza della zona di transizione si raggiungono valori ancora più bassi, all'incirca di 0.0025; pertanto sono rispettate le condizioni di sicurezza.

Alla luce dei risultati ottenuti, si può affermare che, in linea di massima, vengono garantite le condizioni di sicurezza eccetto che per alcune zone critiche, ovvero, le estremità delle calotte, in cui il valore di deformazione raggiunta supera il limite massimo ammissibile. Le prove eseguite fino a questo punto, però, hanno considerato un valore di pressione interna pari a 70 MPa, ovvero la pressione di esercizio. Per garantire la sicurezza del componente strutturale, però, sarebbe opportuno effettuarle considerando la pressione di scoppio, ovvero, maggiore del 50% di quella d'esercizio. Per questo motivo, è stata ripetuta questa prova utilizzando una pressione interna di 105 MPa, valore utilizzato anche in tutte le prove effettuate successivamente.

- **Prova 4**

Come spiegato nel capitolo precedente, è stato necessario ripetere la prova 3 utilizzando come condizioni di input un valore di pressione di scoppio. I risultati ottenuti sono stati analizzati in

maniera analoga alla prova precedente, ovvero, osservando per ciascun ply di riferimento i valori di tensione e deformazione raggiunti. Dato che la stratificazione utilizzata è esattamente la stessa della prova precedente, è stato possibile metterle a confronto. Le Tabelle 4.1 mostrano i risultati ottenuti, in termini di tensione e deformazione, delle due prove eseguite utilizzando la stratificazione: [85₆/10₄/15₄/20₄/85₆/30₄/35₄/45₄/85₆].

Tabella 4.1 Valori massimi di tensione raggiunti nei vari ply (a); valori massimi di deformazione raggiunti nei vari ply (b), Prova 4.

| Angolo di avvolgimento | Tensione massima | |
|-------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| | <i>Pressione interna 70 MPa</i> | <i>Pressione interna 105 MPa</i> |
| 85° | 993 MPa | 1500 MPa |
| 10° | 1290 MPa | 2333 MPa |
| 15° | 899 MPa | 1350 MPa |
| 20° | 788 MPa | 1200 MPa |
| 85° | 990 MPa | 1482 MPa |
| 30° | 720 MPa | 1116 MPa |
| 35° | 800 MPa | 1170 MPa |
| 45° | 820 MPa | 1265 MPa |
| 85° | 992 MPa | 1485 MPa |

(a)

| Angolo di avvolgimento | Deformazione massima | |
|-------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| | <i>Pressione interna 70 MPa</i> | <i>Pressione interna 105 MPa</i> |
| 85° | 0,0044 | < 0,006 |
| 10° | 0,004 | 0,026 |
| 15° | 0,0216 | 0,0216 |
| 20° | 0,006 | 0,014 |
| 85° | 0,0067 | 0,009 |
| 30° | in sicurezza | 0,009 |
| 35° | 0,006 | 0,0084 |
| 45° | 0,005 | in sicurezza |
| 85° | in sicurezza | in sicurezza |

(b)

Come ci si poteva aspettare, i valori di tensione e deformazione risultati dalla prova eseguita utilizzando la pressione di scoppio (105 MPa) sono maggiori rispetto a quelli ottenuti utilizzando la pressione d'esercizio (70 MPa): ciò significa che il serbatoio è maggiormente sollecitato e si deforma di più. In ogni caso, per quanto riguarda la tensione si è

complessivamente in sicurezza: il valore massimo viene raggiunto in corrispondenza del ply con angolo di avvolgimento di 10° nella zona di estremità della calotta ed è pari a 2333 MPa, quindi, si rientra comunque nei limiti prefissati. Il resto del serbatoio presenta dei valori di tensione nettamente inferiori, come mostra la Figura 4.10.

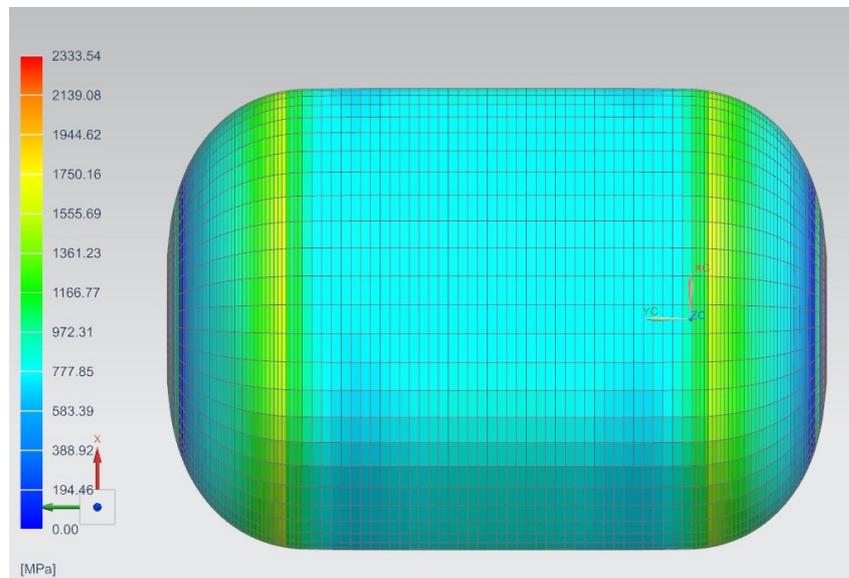


Figura 4.10 Andamento della tensione in corrispondenza del ply con angolo di avvolgimento a 10°

In termini di deformazione, invece, si nota che non vengono garantite le condizioni di sicurezza poiché, in corrispondenza di molti ply, si verificano dei valori di deformazione massima che superano il limite massimo ammissibile di 0.007.

Dato che i valori riportati nella Tabella 4.1 sono quelli massimi, per individuare la zona più critica, è stato osservato l'andamento della deformazione in corrispondenza dei ply in cui viene superato il valore limite.

Per angoli di avvolgimento pari a 10° , 15° , 20° si è notato un andamento analogo che individua come zona più critica la parte dell'estremità delle calotte, mentre il resto del componente risulta essere in sicurezza, in quanto i valori di deformazione raggiunti non superano 0.0067.

La Figura 4.11 mostra la distribuzione della deformazione nel ply di riferimento per l'angolo di avvolgimento di 10° .

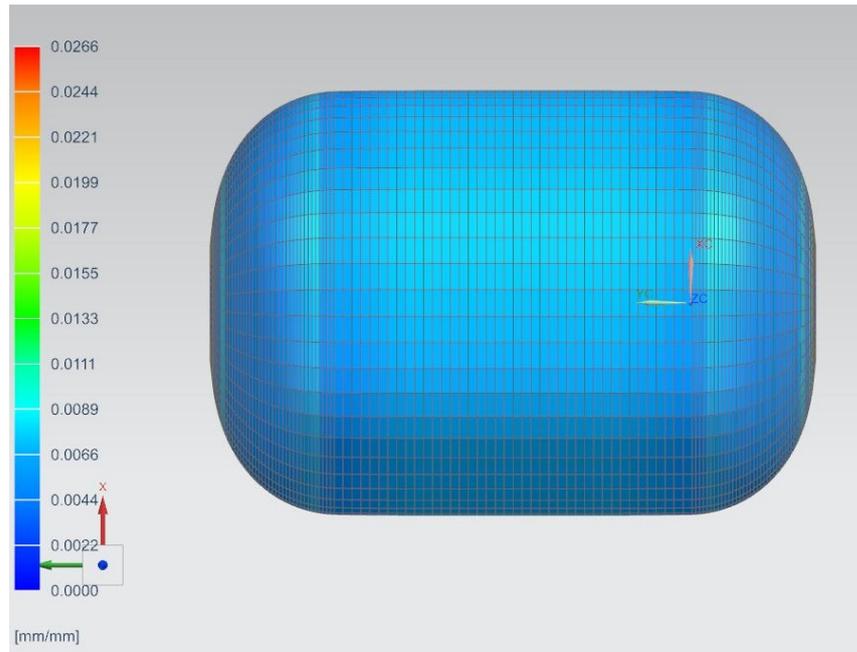


Figura 4.11 Andamento della deformazione in corrispondenza del ply con angolo di avvolgimento a 10°

Un comportamento analogo si verifica per gli strati di materiale con angoli di avvolgimento a 85°, 30° e 35°, in cui la zona più critica si trova in corrispondenza delle estremità della zona cilindrica. La distribuzione della deformazione viene illustrata nella Figura 4.12.

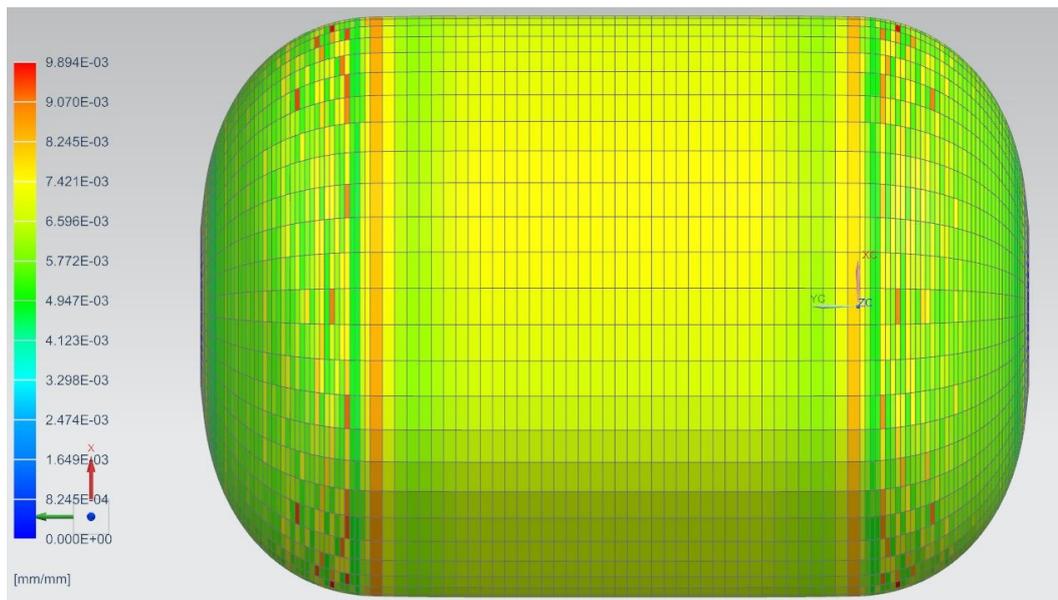


Figura 4.12 Andamento della deformazione in corrispondenza del ply con angolo di avvolgimento a 85°

Sulla base dei risultati ottenuti, si può definire che la parte più critica è quella di estremità delle calotte; pertanto, una soluzione plausibile per aumentare la resistenza in corrispondenza di quella zona, prevede di aumentare il numero di strati depositati con angoli di avvolgimento a 10°, 15° e 20°. Inoltre, dato che si ottiene una deformazione elevata anche in corrispondenza dell'estremità della parte cilindrica, si potrebbero aumentare anche gli strati con angoli di avvolgimento a 30°, 35° e 45°. Chiaramente, un aumento del numero di strati di materiale comporta un aumento di peso oltre che di spessore, ma dato che deve essere compreso tra 30 kg e 35 kg e, con la presente stratificazione è di circa 20 kg, questa soluzione può essere implementata.

- **Prova 5**

Sulla base delle problematiche emerse dalla prova precedentemente effettuata, lo studio è proceduto utilizzando una stratificazione che presentasse un maggior numero di strati con angoli di avvolgimenti bassi e intermedi, definita come segue: [85₆/10₆/15₆/20₆/85₆/30₆/35₆/45₆/85₆].

Il numero complessivo di plies per questa stratificazione è pari a 102. Il laminato pesa 28 kg e presenta uno spessore massimo in corrispondenza della parte cilindrica pari a 25 mm: come ci si poteva aspettare, si tratta di valori maggiori rispetto ai corrispettivi delle precedenti prove 3 e 4.

Nella Tabella 4.2 vengono riportati i valori massimi di tensione e deformazione ottenuti nei ply presi come riferimento per ciascun angolo di avvolgimento.

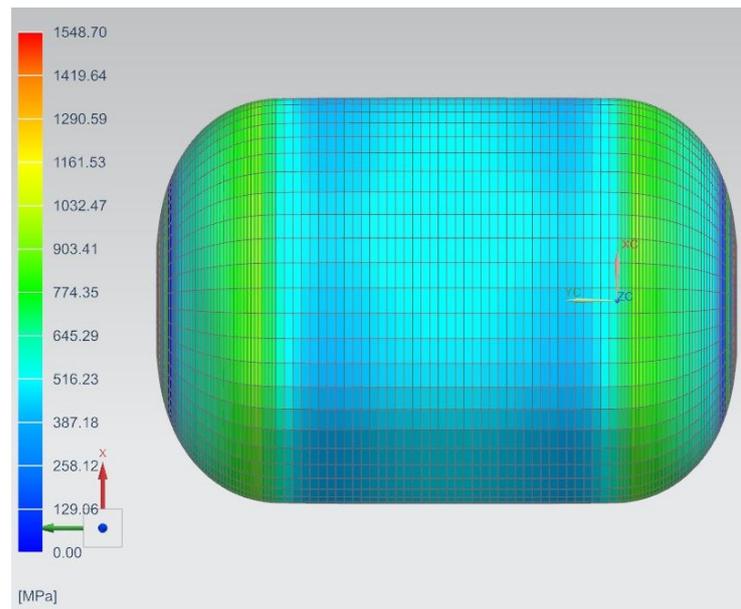
Tabella 4.2 Valori massimi di tensione e deformazione ottenuti nei vari ply, Prova 5

| Angolo di avvolgimento | Tensione massima | Deformazione massima |
|-------------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| 85° | 1422 MPa | in sicurezza |
| 10° | 1548 MPa | 0,0177 |
| 15° | 943 MPa | 0,0147 |
| 20° | 776 MPa | 0,01 |
| 85° | 1418 MPa | 0,0078 |
| 30° | 755 MPa | 0,0077 |
| 35° | 821 MPa | 0,0065 |
| 45° | 977 MPa | 0,0065 |
| 85° | 1420 MPa | 0,0065 |

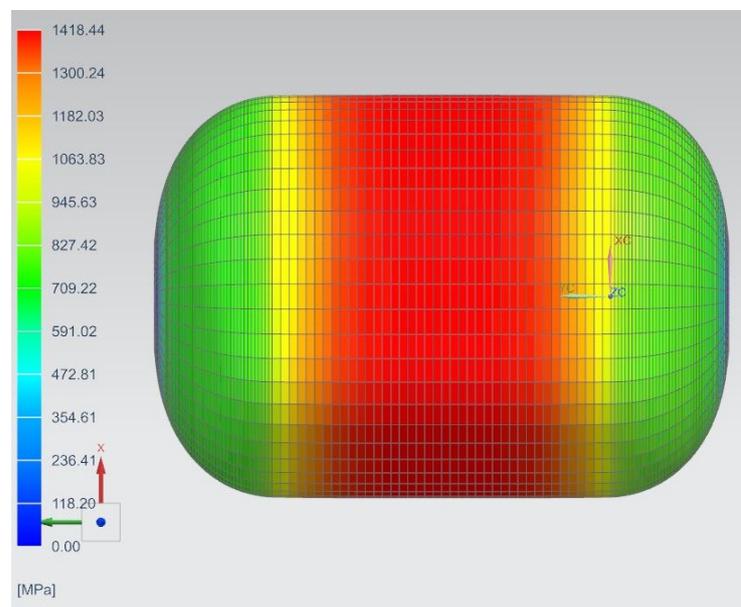
Per quanto riguarda la tensione, dalla Tabella 4.2 si evince che si è in sicurezza, in quanto non viene mai superato il limite massimo ammissibile di 2500 MPa.

In linea di massima, dalle osservazioni effettuate emerge che la parte maggiormente sollecitata in corrispondenza dei ply con angoli di avvolgimento superiori ai 20° è quella centrale cilindrica; mentre nei ply con angoli di avvolgimento bassi (10° , 15° , 20°) è quella in corrispondenza delle estremità delle calotte.

Di seguito vengono riportate delle immagini che rappresentano la distribuzione della tensione rispettivamente nei plies con angoli di avvolgimento a 10° (Figura 4.13 a) e a 85° (Figura 4.13 b).



(a)



(b)

Figura 4.13 Andamento della tensione in corrispondenza del ply con angolo di avvolgimento a 10° (a) ed a 85° (b)

Dai valori riportati nella Tabella 4.2. si può notare, inoltre, che non si raggiungono dei valori di deformazione inferiori al limite massimo ammissibile in corrispondenza dei ply con angoli di avvolgimento bassi, ovvero pari a 10° , 15° , 20° . Ciò accade, però, soltanto in corrispondenza della zona di estremità delle calotte, poiché, nel resto del serbatoio, i valori di deformazione sono inferiori a 0.007 e ciò lo si può notare nella Figura 4.14 sottostante che rappresenta la distribuzione della deformazione nel ply con angolo di avvolgimento a 10° . Viene riportato soltanto questo caso, in quanto la distribuzione è analoga ai plies con gli altri due valori di angoli di avvolgimento, l'unica cosa che varia è il valore massimo ottenuto.

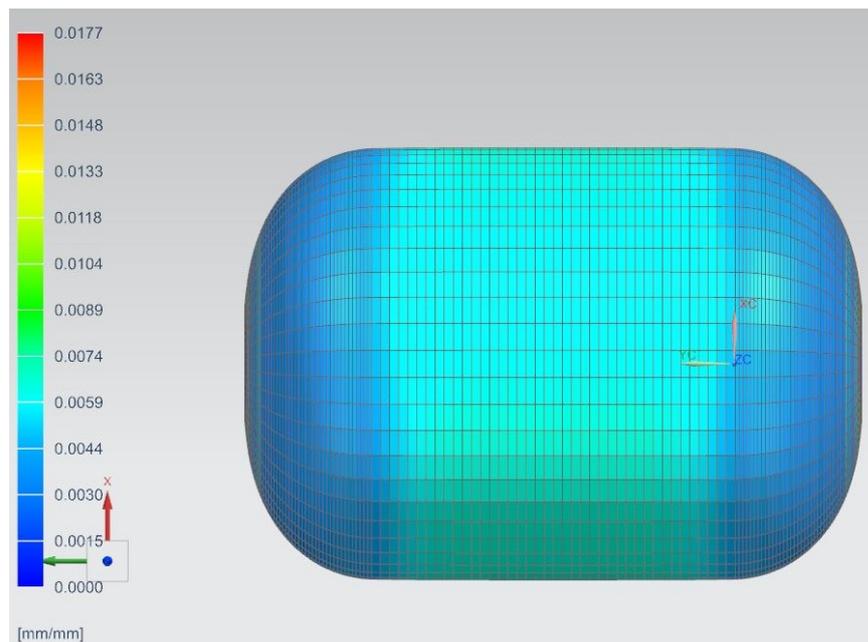


Figura 4.14 Andamento della deformazione in corrispondenza del ply con angolo di avvolgimento a 10°

In corrispondenza dei ply con angoli di avvolgimento pari a 85° (strati intermedi) e a 30° si verificano dei valori di deformazione limite in corrispondenza delle estremità della zona cilindrica, rispettivamente pari a 0.0078 e 0.0077. Si tratta di valori di poco superiori al limite ammissibile e per questo motivo possono essere considerati trascurabili; il resto del serbatoio, invece, è in sicurezza.

Nella Figura 4.15 viene illustrata la distribuzione della deformazione nel ply con angolo di avvolgimento ad 85° che è esattamente la stessa del ply con angolo di avvolgimento a 30° .

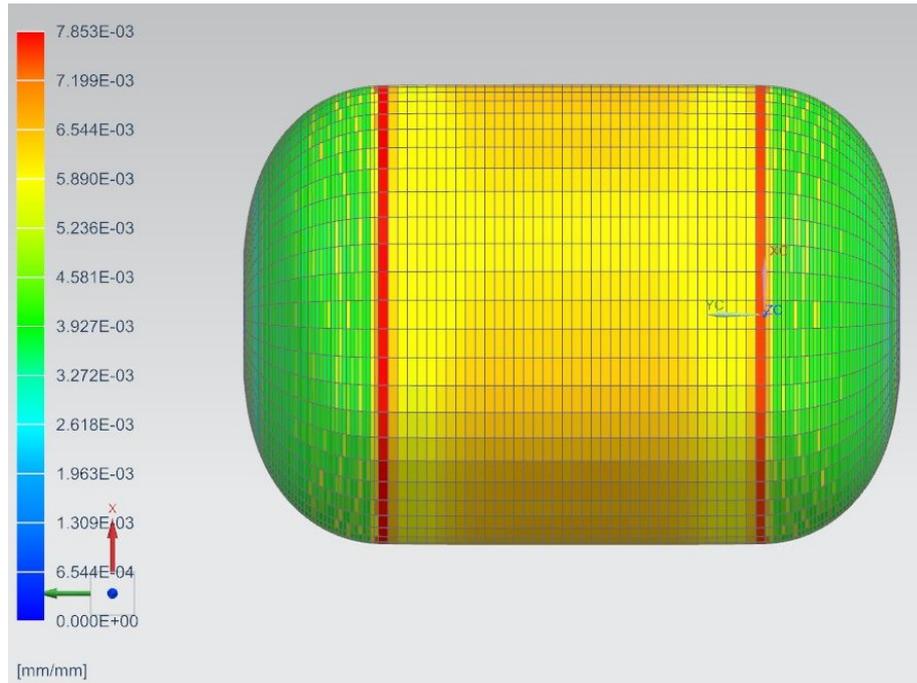


Figura 4. 15 Andamento della deformazione in corrispondenza del ply con angolo di avvolgimento a 85°

Da questa prova emerge che il numero di strati aggiunti non è stato sufficiente per ridurre la deformazione in corrispondenza della zona di estremità delle calotte; pertanto, si procede andando ad aumentare ulteriormente gli strati con angoli di avvolgimento bassi.

- **Prova 6**

Come accennato precedentemente, alla luce dei risultati ottenuti dalla prova 5 si è notato che il serbatoio risulta essere in sicurezza da un punto di vista delle tensioni, ma presenta ancora delle criticità nella zona di estremità delle calotte per quanto riguarda la deformazione. Pertanto, si è deciso di procedere aggiungendo degli strati di materiale che andassero ad aumentare la resistenza in corrispondenza di quelle zone, ovvero quelli con angoli di avvolgimento a 10°, 15° e 20°, poiché sono gli unici che ricoprono quella parte.

La stratificazione utilizzata è la seguente: [85₆/10₈/15₈/20₈/85₆/30₆/35₆/45₆/85₆]; presenta un numero complessivo di plies pari a 120 ed un peso di 31 kg.

I valori di tensione e deformazione massimi ottenuti vengono riportati nella seguente Tabella 4.3.

Tabella 4.3 Valori massimi di tensione e deformazione ottenuti nei vari ply, Prova 6

| <i>Angolo di avvolgimento</i> | Tensione massima | Deformazione massima |
|-------------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| 85° | 1418 MPa | 0,0066 |
| 10° | 1203 MPa | 0,0139 |
| 15° | 790 MPa | 0,0115 |
| 20° | 645 MPa | 0,008 |
| 85° | 1414 MPa | 0,0075 |
| 30° | 673 MPa | 0,0073 |
| 35° | 766 MPa | 0,0066 |
| 45° | 932 MPa | 0,0066 |
| 85° | 1415 MPa | 0,0066 |

Dai valori ottenuti si può notare una situazione analoga alle due prove precedenti, in cui si è in sicurezza per quanto riguarda le tensioni, ma i valori di deformazione ottenuti non sono inferiori al valore limite ammissibile per tutti i plies: sussistono ancora criticità in corrispondenza della zona di estremità delle calotte negli strati di materiale con angoli di avvolgimento di 10°, 15°, 20°. Pertanto, si è deciso di procedere per assurdo ed effettuare una simulazione utilizzando un elevato numero di strati con angoli di avvolgimento a 10° e si è notato che il problema permane ugualmente. Per questo motivo, si è deciso di trascurare questa criticità, in quanto, oltre a trattarsi di un valore non di molto superiore al limite e riguardante soltanto un frame, si tratta della zona in corrispondenza della quale dovranno essere inseriti i boss in alluminio che potrebbero conferire una maggior resistenza, eliminando la problematica.

A questo punto, l'attenzione è stata spostata sugli spessori, in quanto, entrando nell'ambiente FEM del software si è notata una certa disuniformità: in corrispondenza della zona cilindrica centrale il valore massimo di spessore è circa pari a 28 mm; in corrispondenza dell'estremità delle calotte è di circa 34 mm e nella zona di transizione il valore varia tra i 17 mm ed i 24 mm. L'elevato valore di spessore nella zona d'estremità delle calotte deriva dal consistente numero di strati di materiale depositati in quella zona (quelli con angoli di avvolgimento a 10°, 15°, 20°), ma soprattutto, essendo una zona di turning, si verifica un accumulo di materiale. Il ridotto valore di spessore in corrispondenza della zona di transizione, invece, è spiegato dal limitato numero di strati di materiale avvolti in quell'area. Lo spessore poi aumenta in corrispondenza della zona cilindrica poiché tutti gli strati depositati la ricoprono. A tal proposito, la simulazione successiva è stata eseguita proprio con lo scopo di cercare di ottenere un valore di spessore il più possibile uniforme sull'intero serbatoio.

- **Prova 7**

Sulla base dei risultati ottenuti nella prova precedente, una possibile soluzione per ridurre lo spessore nell'estremità delle calotte ed aumentarlo nella zona di transizione è quella di ridurre gli strati di materiale con angoli di avvolgimento bassi ed aggiungerne altri con angoli di avvolgimento intermedi; pertanto, la presente simulazione è stata effettuata utilizzando la seguente stratificazione: [85₆/10₈/20₈/35₆/85₆/55₆/65₆/75₆/85₆], che presenta un numero complessivo di plies pari a 120.

Dopo aver verificato che il serbatoio rientrasse nei limiti di peso prefissati, poiché il peso è di 28,7 kg e che fosse in sicurezza per quanto riguarda tensioni e deformazioni (Tabella 4.4), sono stati osservati i valori di spessore ottenuti.

Tabella 4.4 Valori massimi di tensione e deformazione ottenuti nei vari ply, Prova 7

| <i>Angoli di avvolgimento</i> | Tensione massima | Deformazione massima |
|-------------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| 85° | 1020 MPa | 0,0046 |
| 10° | 1858 MPa | 0,0190 |
| 20° | 990 MPa | 0,0199 |
| 35° | 953 MPa | 0,0097 |
| 85° | 1022 MPa | 0,0056 |
| 55° | 986 MPa | 0,0066 |
| 65° | 956 MPa | 0,0061 |
| 75° | 1000 MPa | 0,0066 |
| 85° | 997 MPa | 0,0047 |

Come nella prova precedente, nonostante siano stati variati alcuni angoli di avvolgimento degli strati di materiale depositato, il componente risulta essere in sicurezza per quanto riguarda le tensioni, ma presenta la solita criticità riscontrata in corrispondenza dell'estremità della calotta per quanto riguarda le deformazioni. In modo particolare, si ottengono dei valori di deformazione maggiori rispetto al caso precedente, pertanto, successivamente si è agito con lo scopo di cercare di contenerli il più possibile.

Ponendo l'attenzione sugli spessori invece, si è notato un miglioramento, in quanto è diminuito il valore in corrispondenza della zona di estremità delle calotte ed è aumentato nella zona di transizione. È possibile osservare la distribuzione dei valori di spessore nella Figura 4.16.

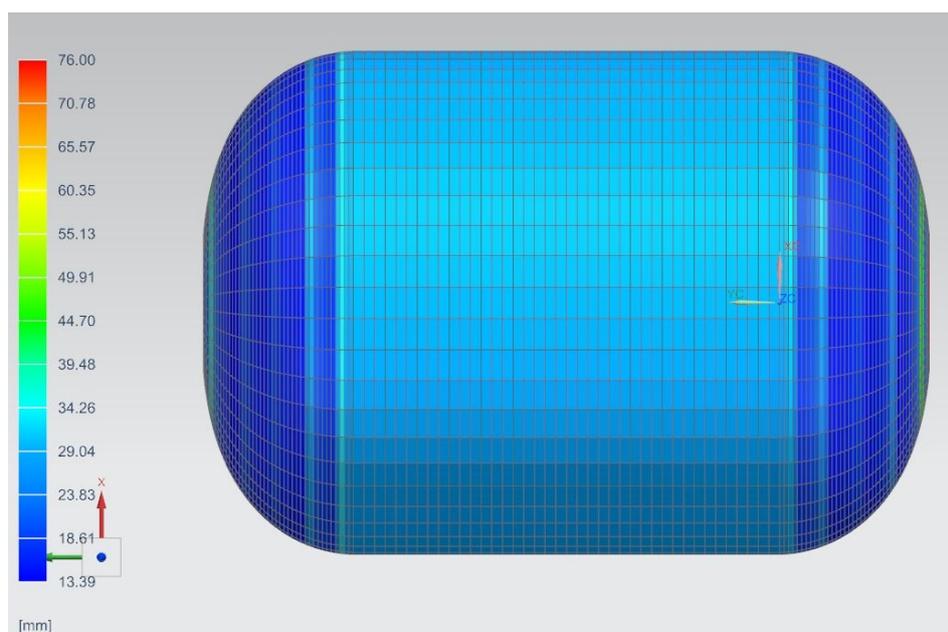


Figura 4.16 Distribuzione valori di spessore, Prova 6

La Tabella 4.5 mette a confronto i valori di spessore ottenuti nella prova precedente e in quella corrente:

Tabella 4.5 Confronto valori medi di spessori nelle 3 zone considerate, Prove 6 e 7

| Zone | Spessori [mm] | |
|----------------------------|----------------|----------------|
| | <i>Prova 6</i> | <i>Prova 7</i> |
| Estremità calotta | 34 | 28 |
| Parte cilindrica | 28 | 28,5 |
| Zona di transizione | 17 | 19 |

Sicuramente i risultati ottenuti mostrano che si sta procedendo in maniera corretta, in quanto, la differenza tra i valori di spessore nelle tre zone considerati si è ridotta rispetto alla prova precedente, ma è stato necessario eseguire altre prove per ridurre ulteriormente questo divario e, in accordo con quanto affermato nelle righe precedenti sul problema della deformazione, anche per ridurre i valori di deformazione ottenuti in corrispondenza della zona di estremità delle calotte.

- **Prova 8**

Sulla base dei risultati della prova precedentemente effettuata, si è vista la necessità di rinforzare la zona di estremità delle calotte per ridurre la deformazione e di uniformare maggiormente gli spessori. Pertanto, dato che il peso del componente è molto contenuto, è stato possibile procedere aggiungendo degli strati di materiale con un angolo di avvolgimento di 15° per risolvere la prima problematica definita e di 45° per la seconda; la stratificazione utilizzata è la seguente: [85₆/10₈/15₈/20₈/35₆/85₆/45₆/55₆/65₆/75₆/85₆].

In questo modo si è ottenuto un serbatoio di 144 plies ed un peso di 35,6 kg che risulta essere un valore limite, ma accettabile.

Dopo aver verificato che fosse in sicurezza per quanto riguarda le tensioni, sono stati analizzati i valori di deformazione ottenuti, riportati nella Tabella 4.6.

Tabella 4.6 Valori massimi di tensione e deformazione ottenuti nei vari ply, Prova 8

| <i>Angolo di avvolgimento</i> | Deformazione massima |
|-------------------------------|-----------------------------|
| 85° | 0,0044 |
| 10° | 0,0124 |
| 15° | 0,0145 |
| 20° | 0,0116 |
| 35° | 0,006 |
| 85° | 0,0054 |
| 45° | 0,0052 |
| 55° | 0,0045 |
| 65° | 0,0045 |
| 75° | 0,0045 |
| 85° | 0,0045 |

Dalla Tabella 4.6. emerge che i valori di deformazione ottenuti in corrispondenza dei vari plies sono nel complesso molto contenuti, ad eccezione dei plies con angoli di avvolgimento bassi, in cui, però, i valori di deformazione ottenuti sono inferiori rispetto a quelli della prova 7; ciò significa che questa stratificazione risulta essere migliore rispetto a quella precedente sotto questo aspetto.

Spostando l'attenzione sullo spessore, si è notato un netto miglioramento, in quanto, lo spessore della zona di transizione è passato da un valore medio di 19 mm della prova precedente ad un valore di 26 mm; in corrispondenza della parte centrale, invece, lo spessore assume un valore di circa 33 mm, contro i 28,5 mm della prova 7 e, infine, la parte di estremità delle calotte presenta uno spessore medio di 30 mm.

La Figura 4.17 rappresenta come sono distribuiti i valori di spessore nel componente.

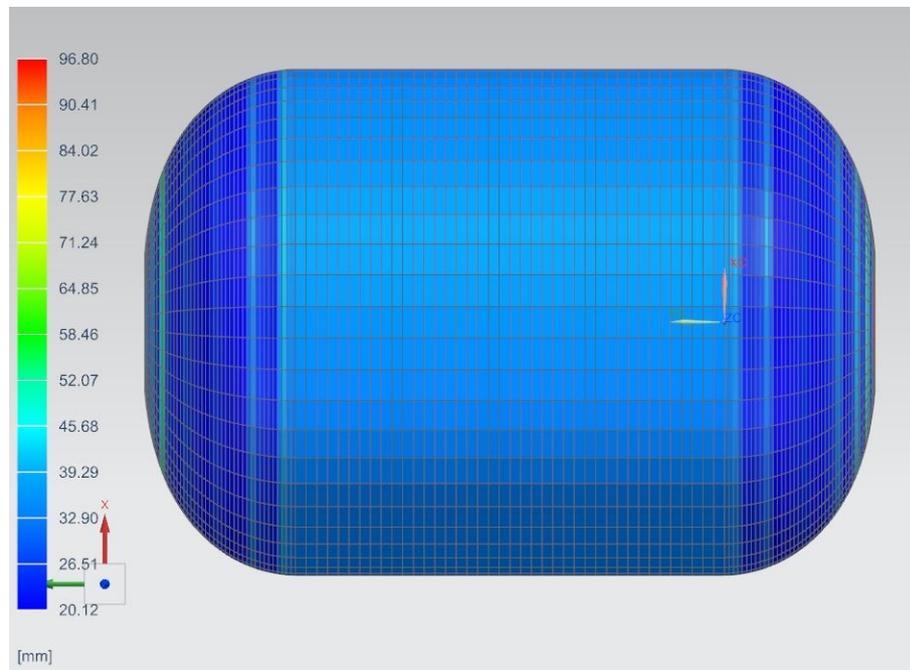


Figura 4.17 Distribuzione valori di spessore, Prova 8

Alla luce dei risultati ottenuti utilizzando questa stratificazione, si potrebbe affermare di essere molto vicini alla soluzione ottimale.

Viene eseguita un'ultima simulazione riducendo un numero contenuto di strati in modo tale da diminuire leggermente il peso per farlo rientrare perfettamente nei limiti definiti.

- **Prova 9**

Questa simulazione è stata eseguita allo scopo di perfezionare la stratificazione utilizzata nella prova precedente per far rientrare il peso del serbatoio tra i 30 kg e i 35 kg.

Chiaramente, è stato verificato che il componente fosse in sicurezza in termini di tensione e deformazione e che gli spessori fossero distribuiti in maniera uniforme.

La laminazione utilizzata è la seguente: [85₆/10₈/15₈/20₈/35₆/85₆/45₄/55₆/65₄/75₆/85₆].

Dalla stratificazione precedente non sono state effettuate variazioni consistenti, sono stati eliminati soltanto alcuni strati con angoli di avvolgimento intermedi (45° e 65°).

Questa laminazione presenta un numero complessivo di plies pari a 136 e il peso raggiunto è di 33,5 kg; pertanto, si è raggiunto l'obiettivo prefissato.

Di seguito, nella Tabella 4.7 vengono riportati i valori di tensione e deformazione ottenuti.

Tabella 4.7 Valori massimi di tensione e deformazione, Prova 9

| <i>Angolo di avvolgimento</i> | Tensione massima | Deformazione massima |
|-------------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| 85° | 1034 | 0,0047 |
| 10° | 1374 | 0,0129 |
| 15° | 800 | 0,0147 |
| 20° | 653 | 0,0116 |
| 35° | 697 | 0,0068 |
| 85° | 1030 | 0,0052 |
| 45° | 755 | 0,0047 |
| 55° | 849 | 0,0047 |
| 65° | 933 | 0,0047 |
| 75° | 996 | 0,0047 |
| 85° | 1031 | 0,0047 |

I risultati mostrano che il componente si trovi complessivamente in sicurezza; i valori di deformazione sono rimasti invariati rispetto alla prova precedentemente effettuata.

Le condizioni sono ottimali anche in termini di uniformità degli spessori, infatti, in corrispondenza della zona di transizione si ottiene un valor medio di circa 26 mm (rimane invariato rispetto alla stratificazione precedente), nella zona cilindrica lo spessore è di circa 31,6 mm, leggermente inferiore rispetto alla prova precedente, e infine, nella zona di estremità delle calotte, si verifica un valor medio di circa 30 mm.

La Tabella 4.8 sottostante mette a confronto i valori di spessore ottenuti con le differenti laminazioni.

Tabella 4.8 Confronto valori medi di spessori nelle 3 zone considerate, Prove 6, 7, 8, 9

| Zone | Spessori [mm] | | | |
|----------------------------|----------------------|----------------|----------------|----------------|
| | <i>Prova 6</i> | <i>Prova 7</i> | <i>Prova 8</i> | <i>Prova 9</i> |
| Estremità calotta | 34 | 28 | 30 | 30 |
| Parte cilindrica | 28 | 28,5 | 33 | 31,6 |
| Zona di transizione | 17 | 19 | 26 | 26 |

Concludendo, si può affermare che la presente stratificazione risulta essere quella ottimale, in quanto, il componente è in sicurezza dal punto di vista di tensione e deformazione, presenta una buona uniformità degli spessori con un valore massimo raggiunto di circa 3 cm e, inoltre, rientra nei limiti di peso definiti.

- **Prova 10**

Dopo aver individuato la laminazione ottimale, il componente è stato verificato a fatica.

Per poter stimare la vita a fatica del serbatoio in composito ci si è basati su un modello che esprime la tensione a fatica mediante la relazione (27) definita nel paragrafo 1.4.4:

$$S = \sigma_R(m \log N + b),$$

dove m e b sono due coefficienti che dipendono dal materiale. Inoltre, è stato fatto riferimento anche alla legge di Goudman-Boller (26), riportata anch'essa nel paragrafo 1.4.4. [34]

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_l} + \frac{\sigma_m}{\sigma_R} = 1$$

La valutazione della vita a fatica eseguita ha previsto di considerare una durata ben specifica calcolata sulla base di assunzioni ed informazioni ricavate in letteratura e adattate al caso specifico. Un serbatoio di tipo IV con un diametro di 465 mm ed una lunghezza di 1400 mm, può contenere 5,8 kg di idrogeno; pertanto, conoscendo le dimensioni del serbatoio in esame è stato possibile, mediante una proporzione, conoscere il quantitativo di idrogeno che può contenere, ovvero, 1,2 kg. [24]

Considerando un consumo medio di 100 km con un kg di idrogeno, con il pieno di un serbatoio di questo tipo, si possono percorrere circa 120 km. Assumendo, inoltre, una durata massima

dell'autoveicolo di 250000 km, è stato possibile calcolare il numero di cicli N del serbatoio nel seguente modo:

$$N = \frac{250000 \text{ km}}{120 \text{ km}} = 2083 \text{ cicli}$$

Per ottenere i valori di σ_{max} e σ_{min} necessari al calcolo della resistenza a fatica, è stata realizzata un'ulteriore simulazione agli elementi finiti utilizzando la laminazione ottimale definita nella Prova 9. Chiaramente, la vita a fatica deve essere valutata considerando una pressione interna di 70 MPa, in quanto il serbatoio deve trovarsi nelle condizioni di esercizio.

Nella Tabella 4.9 vengono riportati i valori di tensione ottenuti a seguito della simulazione effettuata.

Tabella 4.9 Valori di tensione massima ottenuti nei vari ply, Prova 10

| <i>Angolo di avvolgimento</i> | Tensione massima |
|-------------------------------|-------------------------|
| 85° | 707 MPa |
| 10° | 953 MPa |
| 15° | 551 MPa |
| 20° | 452 MPa |
| 35° | 486 MPa |
| 85° | 705 MPa |
| 45° | 526 MPa |
| 55° | 587 MPa |
| 65° | 642 MPa |
| 75° | 684 MPa |
| 85° | 706 MPa |

Si ricava che il valore massimo è pari a 953 MPa, mentre il minimo si assume pari a 0 MPa; pertanto, si ottiene:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} = 476,5 \text{ MPa}$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} = 476,5 \text{ MPa}$$

Sostituendo questi valori all'interno della legge di Goudmann-Boller, si ha:

$$\sigma_l = \frac{\sigma_a}{1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_R}} = 574 \text{ MPa}$$

A questo punto, per verificare se si rientri nei limiti della vita a fatica del materiale, vengono inseriti nella formula (27) i valori ricavati, ottenendo:

$$S = 2790 \cdot (-0,0542 \log 2083 + 1,0420) = 2400 \text{ MPa} ,$$

in cui i valori di m e b trovati in letteratura sono riferiti ad un materiale composito costituito da una resina epossidica duttile rinforzata con fibra di carbonio di tipo T300; pertanto, i risultati ottenuti approssimano il caso in esame ma non sono specifici per esso.

Confrontando il valore di vita a fatica ottenuto (σ_N) con il valore massimo raggiungibile (S) si può notare che si è in ampia sicurezza; ciò si può anche verificare effettuando il processo inverso, ovvero, calcolando il numero di cicli N considerando un valore di S pari a quello di tensione limite individuato, ovvero 574 MPa; in questo modo si ottiene:

$$\log N = \left(\frac{S}{\sigma_R} - b \right) \cdot \frac{1}{m} = 15 ,$$

di conseguenza $N = 10^{15}$; da qui si deduce che il serbatoio abbia vita infinita.

Successivamente, è stato individuato il *ply failure index* mediante il criterio di Tsai Hill, considerando un valore di resistenza a trazione longitudinale pari a quello della tensione massima a rottura, ovvero 2790 MPa, poiché si tratta della stessa direzione lungo cui sono orientate le fibre, mentre quello a trazione trasversale pari a 73 MPa, che coincide con il valore di tensione massima a trazione della resina epossidica. Si fa questa assunzione poiché nella direzione trasversale, che è ortogonale alle fibre, le proprietà meccaniche del composito sono molto basse, e quindi, approssimabili a quelle della matrice. Sono stati inseriti anche i valori di resistenza a snervamento che, trattandosi di un composito, coincidono con quelli della resistenza a rottura. Nella Tabella 4.10 vengono riportati i valori massimi di failure index ottenuti per ciascun ply di riferimento considerato.

Tabella 4.10 Valori massimi di failure index ottenuti nei vari ply, Prova 10

| <i>Angolo di avvolgimento</i> | Failure index |
|-------------------------------|----------------------|
| 85° | 0,6 |
| 10° | 1,8 |
| 15° | 0,59 |
| 20° | 0,57 |
| 35° | 0,5 |
| 85° | 0,4 |
| 45° | 0,55 |
| 55° | 0,8 |
| 65° | 0,56 |
| 75° | 0,7 |
| 85° | 0,45 |

A seguito di quest'ultima valutazione, è emerso che si è in sicurezza poiché il valore che assume il failure index è quasi sempre inferiore ad 1, in media esso assume un valore pari a 0,6.

Un valore di failure index critico, maggiore all'unità, si verifica soltanto in corrispondenza di un unico frame collocato all'estremità della calotta nel ply con angolo di avvolgimento a 10° e coincide con lo stesso punto in cui si verifica la criticità legata alla deformazione; ciò viene rappresentato nella Figura 4.18.

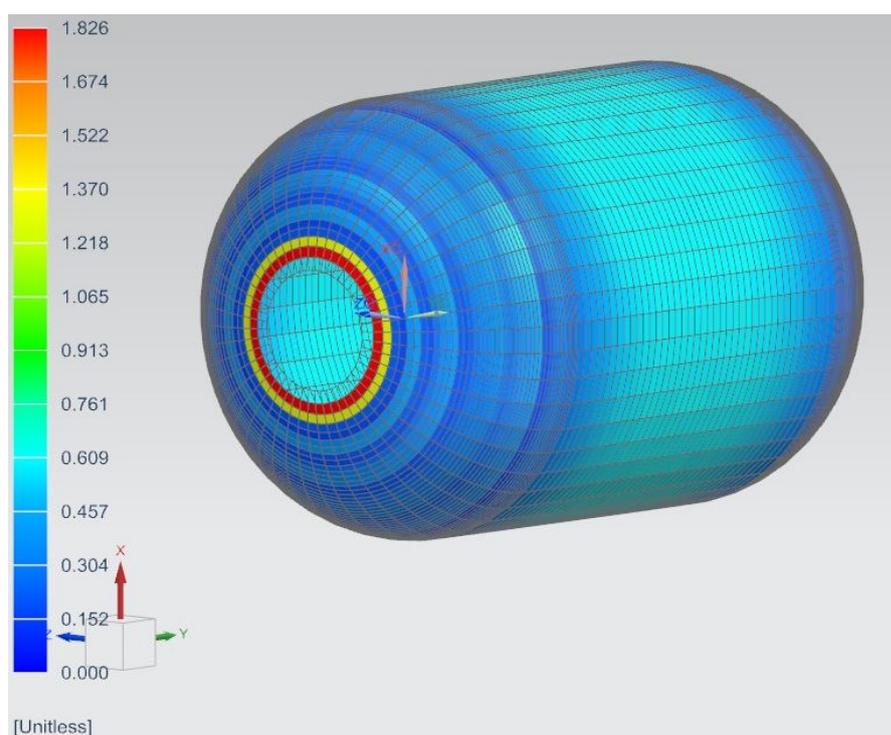


Figura 4.18 Distribuzione dei valori di failure index nel ply con angolo di avvolgimento a 10°, Prova 10

In corrispondenza dello stesso ply, nel resto del serbatoio il valore che assume il failure index è al massimo pari a 0,6. La Figura 4.19 sottostante rappresenta la distribuzione del valore di failure index in corrispondenza del ply con angolo di avvolgimento pari a 55° . È stato scelto di riportare questo ply piuttosto che un altro, in maniera del tutto arbitraria, in quanto si è osservato che il failure index si distribuisce in maniera analoga per tutti i ply presi come riferimento, l'unica cosa che varia è il valore massimo che assume.

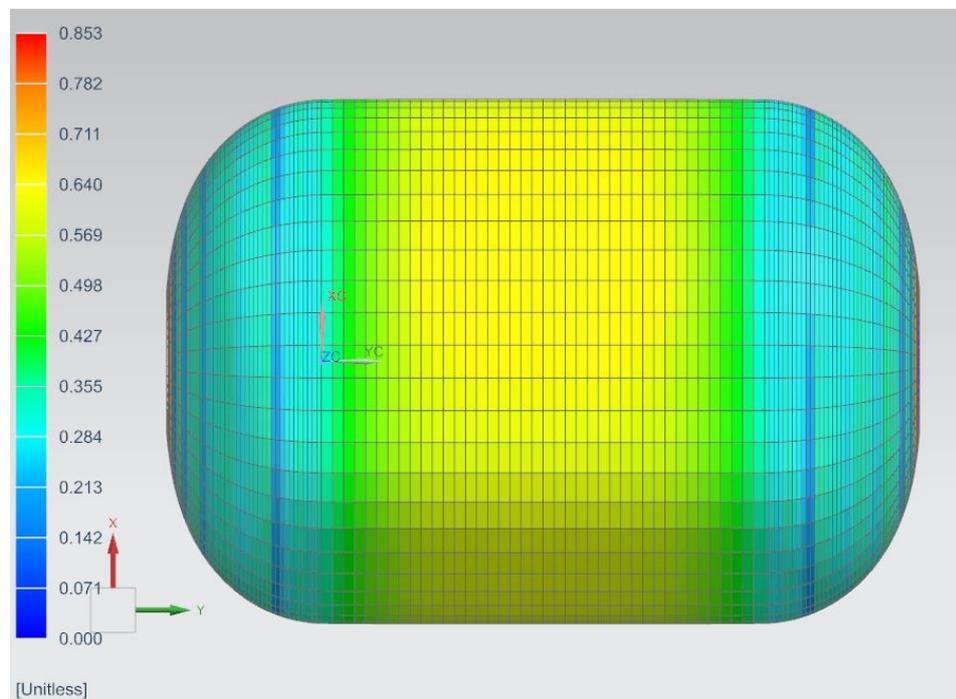


Figura 4.19 Distribuzione dei valori di failure index nel ply con angolo di avvolgimento a 55° , Prova 10

4.2 Interpretazione dei risultati dell'analisi LCA

In questo paragrafo, si procede con la seconda parte del lavoro svolto: vengono mostrati i risultati ottenuti nella fase di LCIA, definita nel capitolo 3.3.3, suddivisi in base ai metodi utilizzati, spiegati in precedenza, ovvero, CED, ReCiPe e GWP.

4.2.1 Risultati – Cumulative Energy Demand (CED)

In primo luogo, sono stati confrontati gli impatti ambientali della vita del prodotto con quelli relativi alla fase di fine vita, mostrati nella Figura 4.20 sottostante.

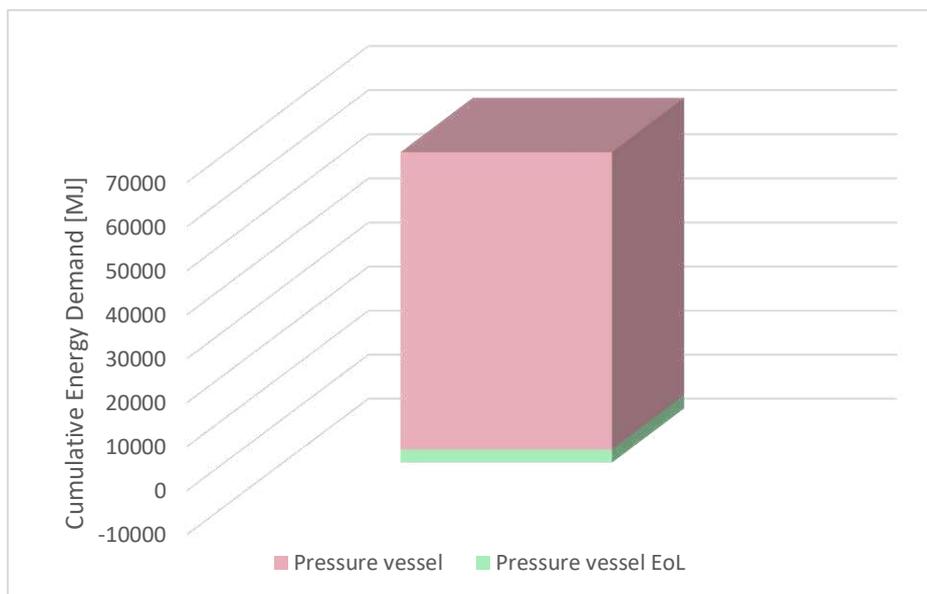


Figura 4.20 Impatti ambientali delle fasi di vita e di fine vita del componente, CED

Si può notare che la fase di fine vita contribuisce in maniera notevolmente inferiore rispetto alle fasi della vita del componente strutturale sugli impatti ambientali complessivi, in modo particolare, gli impatti dell'End of Life assumono un valore negativo, ciò significa che riducono l'impatto complessivo. La Tabella 4.11 mostra i valori effettivi degli impatti ambientali.

Tabella 4.11 Valori di impatto ambientale delle fasi di vita e fine vita del componente, CED

| Categoria d'impatto | Unità | Totale | Pressure vessel | Pressure vessel EoL |
|---------------------|-------|----------|-----------------|---------------------|
| Totale | MJ | 64555,97 | 67526,42 | -2970,45 |

A questo punto, si è osservato come tutte le fasi coinvolte nella vita del serbatoio contribuissero sull'impatto complessivo e i risultati ottenuti sono riportati numericamente nella Tabella 4.12 e graficamente nella Figura 4.21.

Tabella 4.12 Valori di impatto ambientale di ciascuna fase della vita del componente, CED

| Categoria d'impatto | Unità | Totale | Towpreg | Liner | Boss | Filament winding | Transport | Service life |
|---------------------|-------|--------|---------|-------|------|------------------|-----------|--------------|
| Totale | GJ | 67,53 | 18,47 | 0,45 | 3,44 | 0,66 | 0,10 | 44,41 |

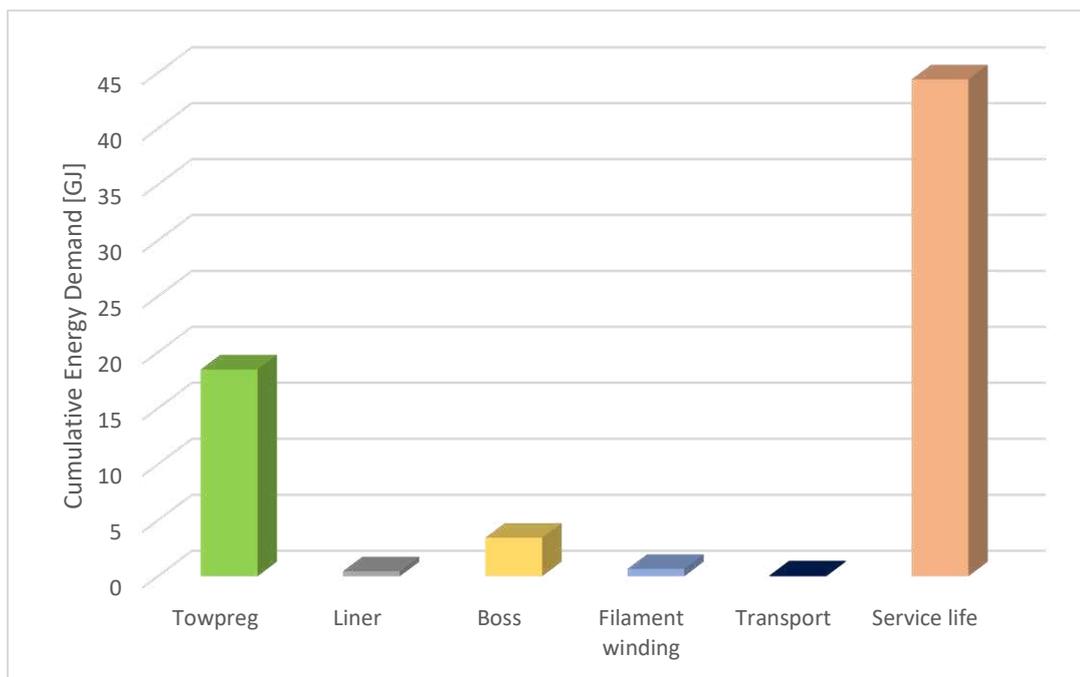


Figura 4.21 Impatto ambientale di ciascuna fase della vita del componente, CED

Dal grafico emerge che il contributo maggiore sull’impatto ambientale complessivo è fornito dalla fase d’uso. Essa è correlata al processo di elettrolisi ad acqua per la produzione di una quantità di idrogeno pari a quella che deve contenere il serbatoio per far funzionare un’auto nell’arco della sua vita utile, ipotizzata pari a 250000 km. Un contributo inferiore, ma pur sempre consistente, è dato dal towpreg che comprende sia i materiali che lo costituiscono e il trasporto ad essi relativo, sia il processo di produzione. Di seguito, vengono analizzate nello specifico le varie fasi della vita del componente, a partire da quelle che contribuiscono maggiormente sull’impatto complessivo, procedendo via via verso quelle che contribuiscono in maniera minore.

- Towpreg:

I risultati ottenuti vengono riportati in termini numerici nella Tabella 4.13 e graficamente nella Figura 4.22.

Tabella 4.13 Impatti ambientali del towpreg, CED

| Categoria d'impatto | Unità | Totale | Carbon fiber | Epoxy resin | Release paper | Transport | Impregnation process |
|---------------------|-------|--------|--------------|-------------|---------------|-----------|----------------------|
| Totale | GJ | 18,47 | 15,98 | 1,08 | 1,00 | 0,06 | 0,35 |

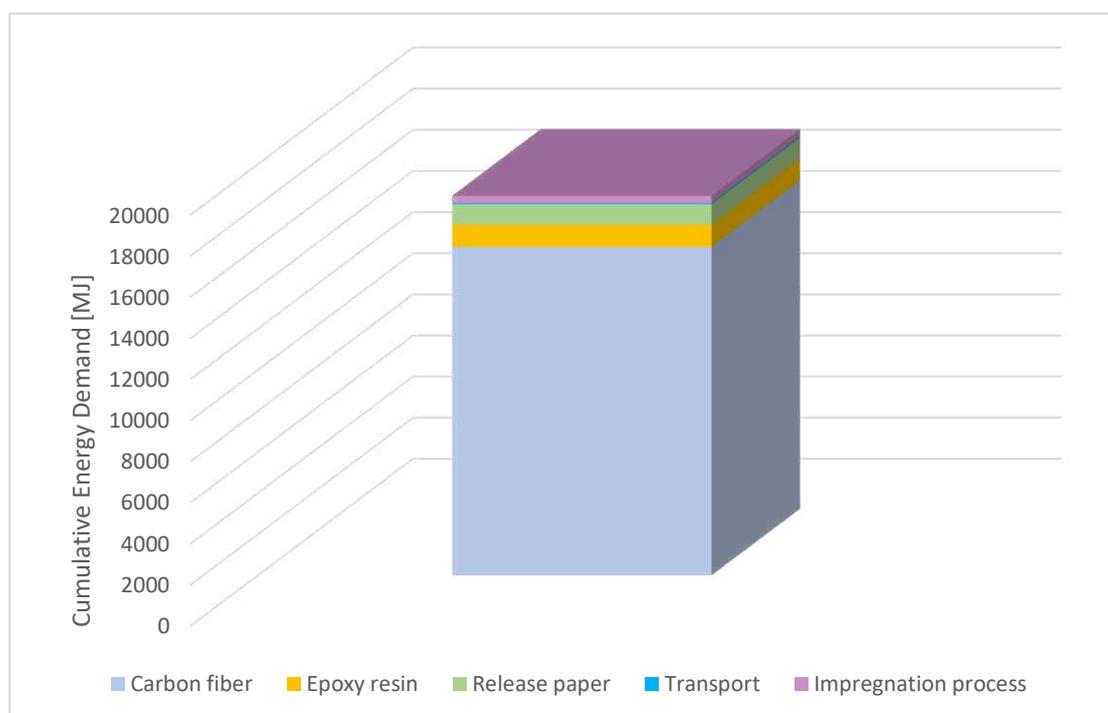


Figura 4.22 Impatto ambientale del towpreg, CED

Dal grafico si evince che le fibre di carbonio contribuiscono in maniera maggiore sull'impatto complessivo e ciò è dovuto probabilmente al quantitativo di poliacrilonitrile utilizzato per realizzarle. A seguire, l'impatto maggiore è dato dalla resina epossidica utilizzata, dal film distaccante, dal processo di impregnazione e infine dal trasporto dei materiali dall'azienda in cui vengono prodotti a quella che si occupa dell'impregnazione.

- Boss:

I risultati ottenuti vengono riportati in termini numerici nella Tabella 4.14 e graficamente nella Figura 4.23.

Tabella 4.14 Impatti ambientali dei boss, CED

| Categoria d'impatto | Unità | Totale | Aluminium | Turning | Transport |
|---------------------|-------|--------|-----------|---------|-----------|
| Totale | GJ | 3,45 | 2,23 | 1,21 | 0,01 |

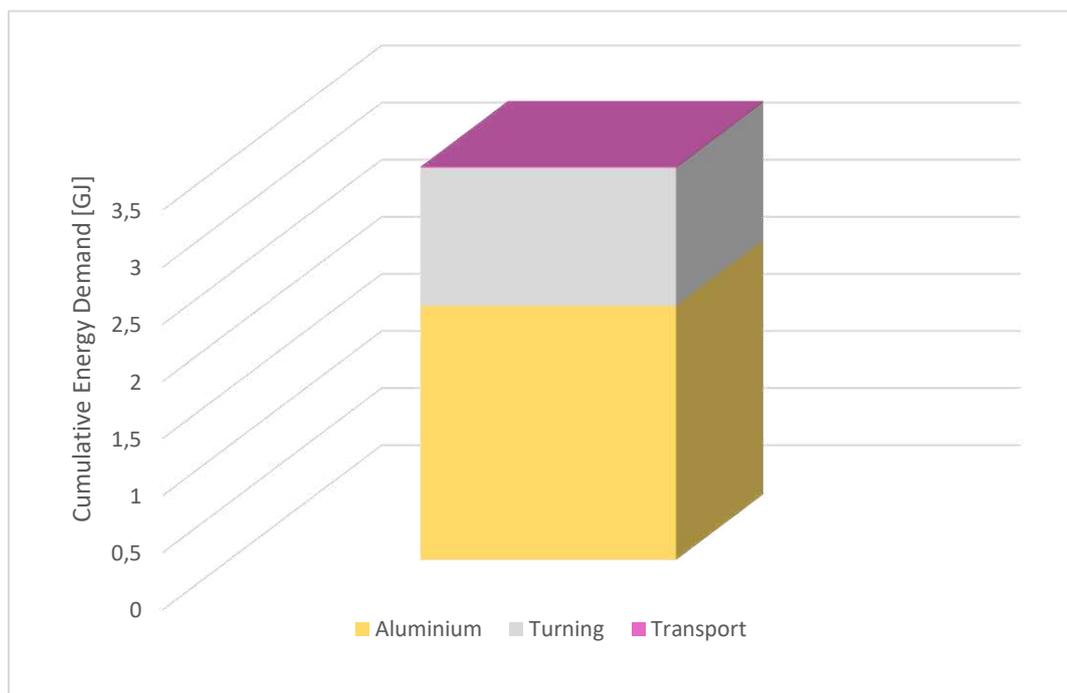


Figura 4.23 Impatto ambientale dei boss, CED

Per quanto riguarda i boss, si può notare che il maggior contributo d’impatto ambientale è dato dal quantitativo di alluminio utilizzato ed al relativo processo di estrazione, un valore inferiore è legato al processo di tornitura eseguito per la realizzazione degli stessi, mentre risulta trascurabile l’impatto relativo al trasporto dell’alluminio dall’azienda in cui viene estratto verso quella in cui viene utilizzato.

- Liner:

I risultati ottenuti vengono riportati in termini numerici nella Tabella 4.15 e graficamente nella Figura 4.24.

Tabella 4.15 Impatti ambientali del liner, CED

| Categoria d'impatto | Unità | Totale | Polyethylene | Rotomoulding | Transport |
|----------------------------|--------------|---------------|---------------------|---------------------|------------------|
| Totale | GJ | 0,45 | 0,42 | 0,02 | 0,01 |

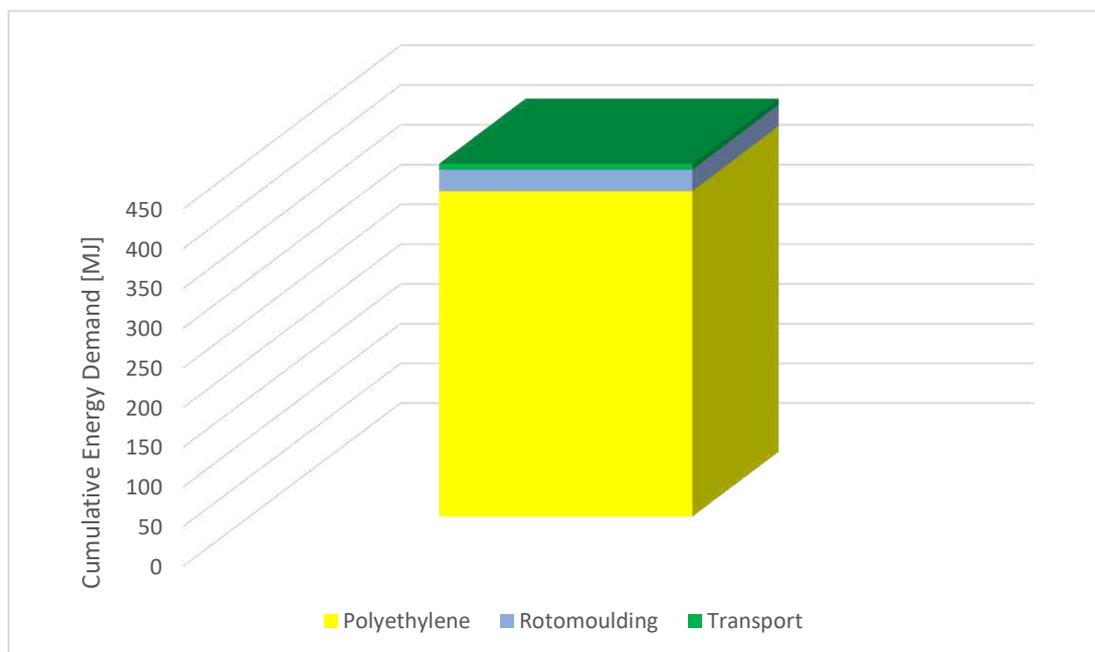


Figura 4.24 Impatto ambientale del liner, CED

Per quanto riguarda il liner, così come per i boss, si può notare che il contributo maggiore è dato dal quantitativo di materiale utilizzato, cioè polietilene; il processo di produzione, ovvero rotomolding, contribuisce in maniera consistentemente inferiore e, infine, un contributo trascurabile è legato al trasporto del polietilene dall'azienda che lo produce a quella in cui viene utilizzato.

- *Fine vita:*

Considerando che gli impatti ambientali del processo di filament winding e del trasporto del componente oltre ad essere minimi, dipendono rispettivamente soltanto dal consumo energetico e dalla distanza percorsa per consegnare il serbatoio al cliente, si procede direttamente analizzando nello specifico il fine vita.

I risultati ottenuti vengono riportati in termini numerici nella Tabella 4.16 e graficamente nella Figura 4.25.

Tabella 4.16 Impatto ambientale degli scenari di fine vita del prodotto, CED

| Categoria d'impatto | Unità | Totale | Towpreg EoL | Liner EoL | Boss EoL |
|---------------------|-------|--------|-------------|-----------|----------|
| Totale | GJ | -2,97 | -0,85 | -0,35 | -1,77 |

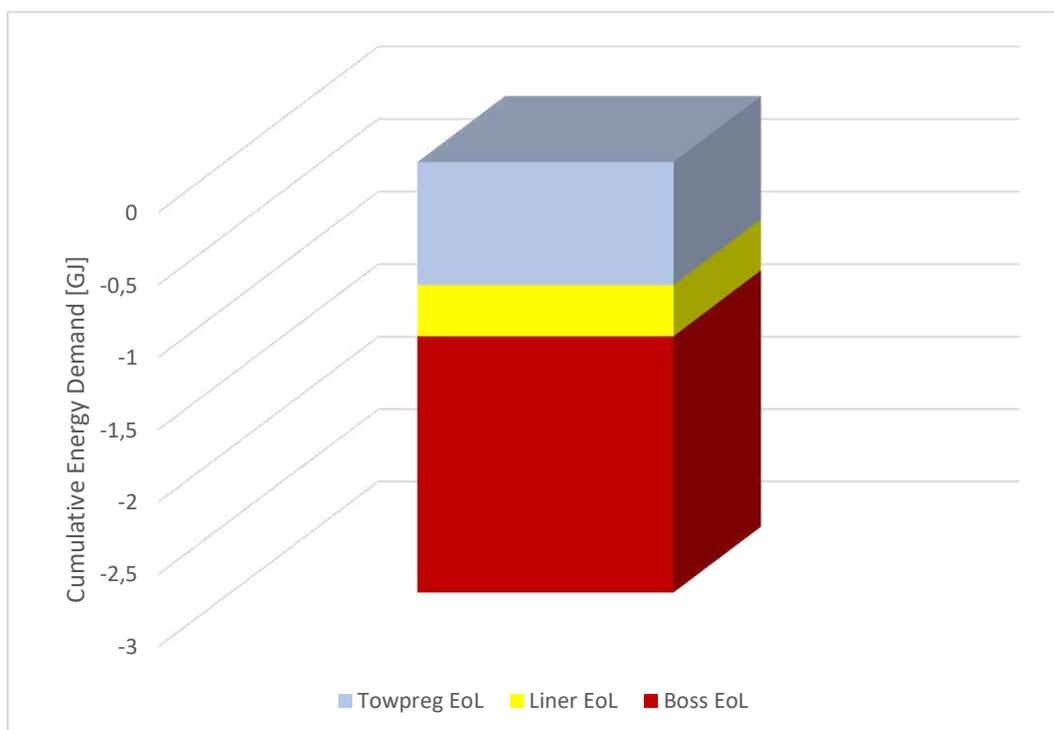


Figura 4.25 Impatto ambientale degli scenari di fine vita, CED

Dal grafico si evince che la fase di fine vita dei boss contribuisce in maniera maggiore sulla riduzione dell'impatto ambientale complessivo rispetto al liner; ciò è dovuto sia al quantitativo di materiale utilizzato, che nel caso dell'alluminio è maggiore rispetto a quello di polietilene (HDPE), sia al fatto che l'impatto relativo alla produzione del boss è maggiore rispetto a quella del liner, quindi, andandolo a riciclare si ottengono maggiori vantaggi. La fase di fine vita del towpreg influisce in maniera minore rispetto a quella dei boss e del liner sulla riduzione dell'impatto ambientale, nonostante il contributo che dà sull'impatto complessivo, in relazione alle fasi del ciclo di vita, sia maggiore rispetto a quello degli altri due. Ciò è spiegato dal fatto che il materiale composito, anche se presente in maggior quantità, non viene riciclato, ma smaltito in discarica. Questo accade poiché la resina epossidica non può essere trattata in quanto ad alte temperature non fonde, ma polimerizza e una cosa simile avviene per le fibre di carbonio, in quanto si potrebbe pensare di recuperarle sottoponendole ad un processo di pirolisi, ma ciò comporterebbe una notevole riduzione delle proprietà meccaniche. Per questo motivo è preferibile modellare il loro fine vita considerando di non riutilizzarle. Generalmente, lo smaltimento in discarica non ha impatti negativi, in questo caso però, essendo incluso nello scenario di fine vita del towpreg anche il riciclo del release paper, l'impatto assume complessivamente un valore negativo.

4.2.2 Risultati – ReCiPe

Pur cambiando metodo di valutazione degli impatti ambientali, il procedimento effettuato è analogo a quello utilizzato precedentemente. Inizialmente sono stati confrontati, in termini numerici, gli impatti ambientali relativi alla vita del componente e alla fase di fine vita facendo riferimento a tutte le categorie d'impatto considerate da ReCiPe.

I valori ottenuti sono riportati nella Tabella 4.17 sottostante.

Tabella 4.17 Valori di impatto ambientale delle fasi di vita e fine vita del componente, ReCiPe

| Categoria d'impatto | Unità | Totale | Pressure vessel | Pressure vessel EoL |
|--|--------------|---------------|------------------------|----------------------------|
| Global warming | kg CO2 eq | 2977,62 | 3151,20 | -173,58 |
| Stratospheric ozone depletion | kg CFC11 eq | 9,21E-03 | 9,26E-03 | -5,15E-05 |
| Ionizing radiation | kBq Co-60 eq | 508,74 | 512,31 | -3,58 |
| Ozone formation, Human health | kg NOx eq | 6,26 | 6,75 | -0,49 |
| Fine particulate matter formation | kg PM2.5 eq | 4,52 | 4,87 | -0,35 |
| Ozone formation, Terrestrial ecosystems | kg NOx eq | 6,43 | 6,93 | -0,50 |
| Terrestrial acidification | kg SO2 eq | 12,20 | 13,01 | -0,81 |
| Freshwater eutrophication | kg P eq | 1,29 | 1,28 | 0,01 |
| Marine eutrophication | kg N eq | 0,25 | 0,23 | 0,02 |
| Terrestrial ecotoxicity | kg 1,4-DCB | 9142,93 | 9288,18 | -145,25 |
| Freshwater ecotoxicity | kg 1,4-DCB | 241,55 | 231,70 | 9,85 |
| Marine ecotoxicity | kg 1,4-DCB | 783109,31 | 696005,80 | 87103,51 |
| Human carcinogenic toxicity | kg 1,4-DCB | 10888,24 | 13260,21 | -2371,97 |
| Human non-carcinogenic toxicity | kg 1,4-DCB | 627260,52 | 551682,4 | 75578,12 |
| Land use | m2a crop eq | 113,49 | 115,45 | -1,96 |
| Mineral resource scarcity | kg Cu eq | 6,97 | 8,90 | -1,93 |
| Fossil resource scarcity | kg oil eq | 1003,34 | 1064,34 | -61,00 |
| Water consumption | m3 | 57,62 | 58,50 | -0,88 |

Sulla base dei risultati individuati, si può affermare che l'impatto relativo alla fase di fine vita è nettamente inferiore rispetto a quello delle fasi di vita del prodotto e, inoltre, nella maggior

parte dei casi il valore che assume è negativo; ciò significa che lo scenario di fine vita considerato produce un effetto positivo sull'impatto ambientale, in quanto lo riduce.

Nelle prossime righe si analizzeranno nello specifico sia le fasi della vita del componente, sia gli scenari di fine vita.

- Life Cycle:

Nella Figura 4.26 seguente, viene riportato un grafico che mostra, in termini di percentuale, il contributo che ciascuna fase della vita del prodotto dà sull'impatto ambientale complessivo per tutte le 18 categorie d'impatto che considera il metodo utilizzato.

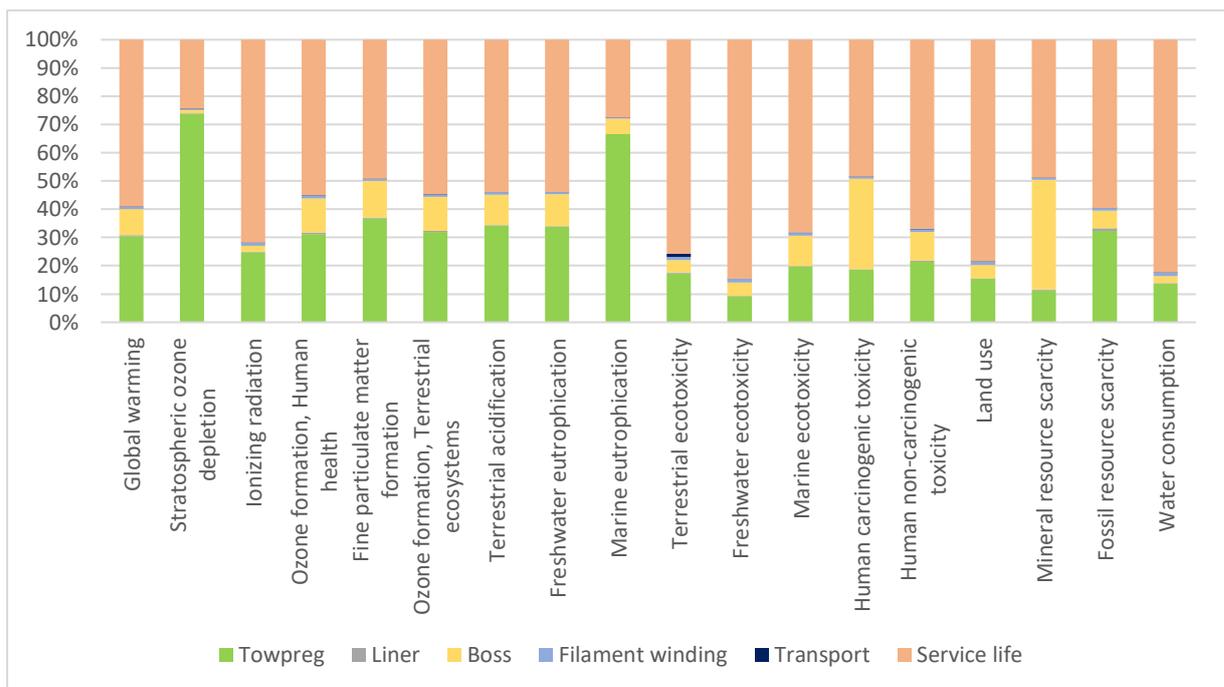


Figura 4.26 Contributi percentuali dell'impatto ambientale di ciascuna fase della vita del prodotto, ReCiPe

In linea di massima, si può notare che la fase d'uso è quella che contribuisce più di tutte le altre sull'impatto ambientale complessivo e ciò è in accordo con quanto si è osservato effettuando l'analisi con il metodo CED. Il secondo contributo più elevato è dato dal towpreg; in particolare, in relazione alle categorie *Stratospheric ozone depletion* e *Marine eutrophication* l'impatto ambientale dovuto al towpreg supera quello della fase d'uso. Ciò è legato all'utilizzo delle fibre di carbonio, infatti, nelle righe successive si fa un approfondimento sull'impatto del towpreg da cui emerge che, per queste due specifiche categorie, l'impatto deriva quasi interamente dalle fibre di carbonio. Analizzando nello specifico i fattori che contribuiscono sull'impatto da esse generato, si nota che la maggiore causa è legata non tanto al processo di produzione, quanto

alla materia prima stessa. In particolare, l'impatto è dovuto quasi esclusivamente all'utilizzo del poliacrilonitrile (PAN) che, nel caso di *Stratospheric ozone depletion*, è a sua volta correlato al consumo di polidimetilsilossano, mentre per *Marin eutrophication*, al consumo di acrilonitrile.

A questo punto, lo studio è proseguito valutando in maniera più approfondita i contributi percentuali dei vari aspetti considerati nelle fasi del ciclo di vita del prodotto.

- Towpreg:

Nella Figura 4.27 sono illustrati gli impatti ambientali degli elementi inclusi nella realizzazione del towpreg, in termini di percentuale, per tutte le categorie d'impatto.

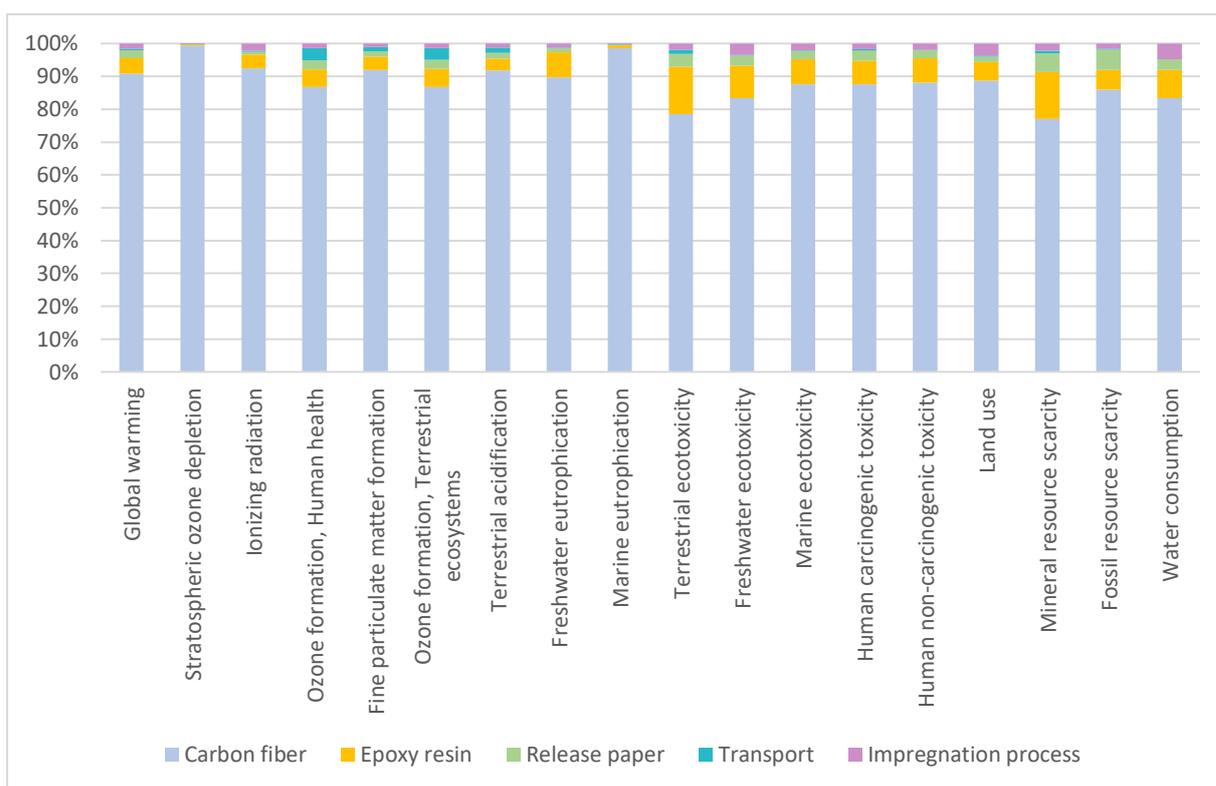


Figura 4.27 Contributi percentuali degli impatti ambientali del towpreg, ReCiPe

Si nota che, analogamente a quanto accade analizzando i dati con il metodo CED e come definito nelle righe precedenti, anche in questo caso il contributo percentuale maggiore è dato dalle fibre di carbonio per tutte le categorie d'impatto analizzate. Un apporto notevolmente inferiore è dato dalla resina epossidica utilizzata e, andando via via verso contributi inferiori, si avranno gli impatti del film distaccante, del trasporto e del processo di impregnazione.

- Boss:

Nella Figura 4.28 sottostante, invece, sono rappresentati i risultati ottenuti analizzando nello specifico gli impatti relativi ai boss.

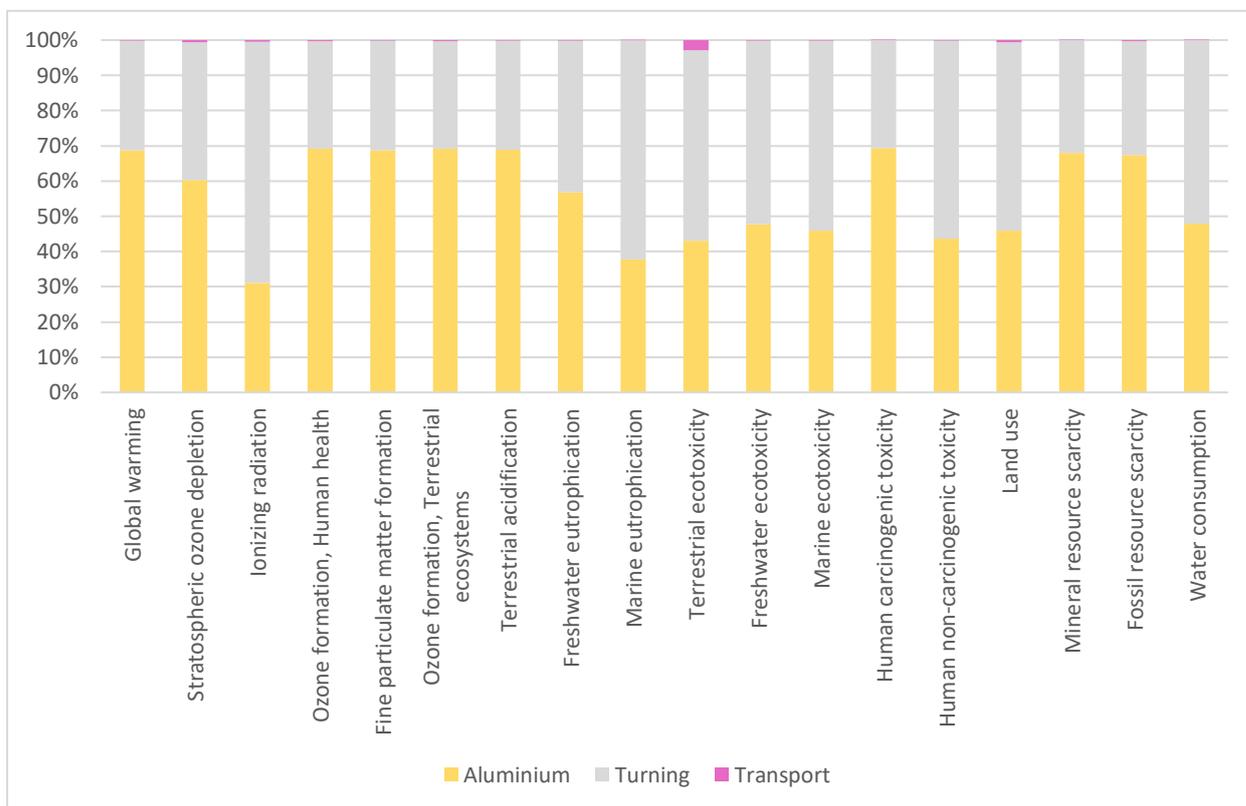


Figura 4.28 Contributi percentuali degli impatti ambientali dei boss, ReCiPe

In linea di massima, dal grafico si evince che il quantitativo di alluminio utilizzato, inclusa la relativa fase di estrazione, contribuisce maggiormente sull'impatto ambientale complessivo, ma anche il contributo legato all'operazione di tornitura è consistente. Infatti, quest'ultimo valore supera quello relativo all'alluminio per le seguenti categorie d'impatto: Ionizing radiation, Marine eutrophication, Terrestrial ecotoxicity, Marine ecotoxicity, Human non-carcinogenic toxicity, Land use e Water consumption.

Il trasporto dell'alluminio dall'azienda in cui viene estratto fino a quella in cui viene lavorato, fornisce un contributo trascurabile; soltanto per la categoria d'impatto Terrestrial ecotoxicity influisce in maniera maggiore, ma si tratta comunque di un valore percentuale di circa 3-4%.

- Liner:

Come per il towpreg e il boss, vengono riportati i contributi percentuali degli impatti complessivi anche per quanto riguarda il liner, illustrati nella Figura 4.29.

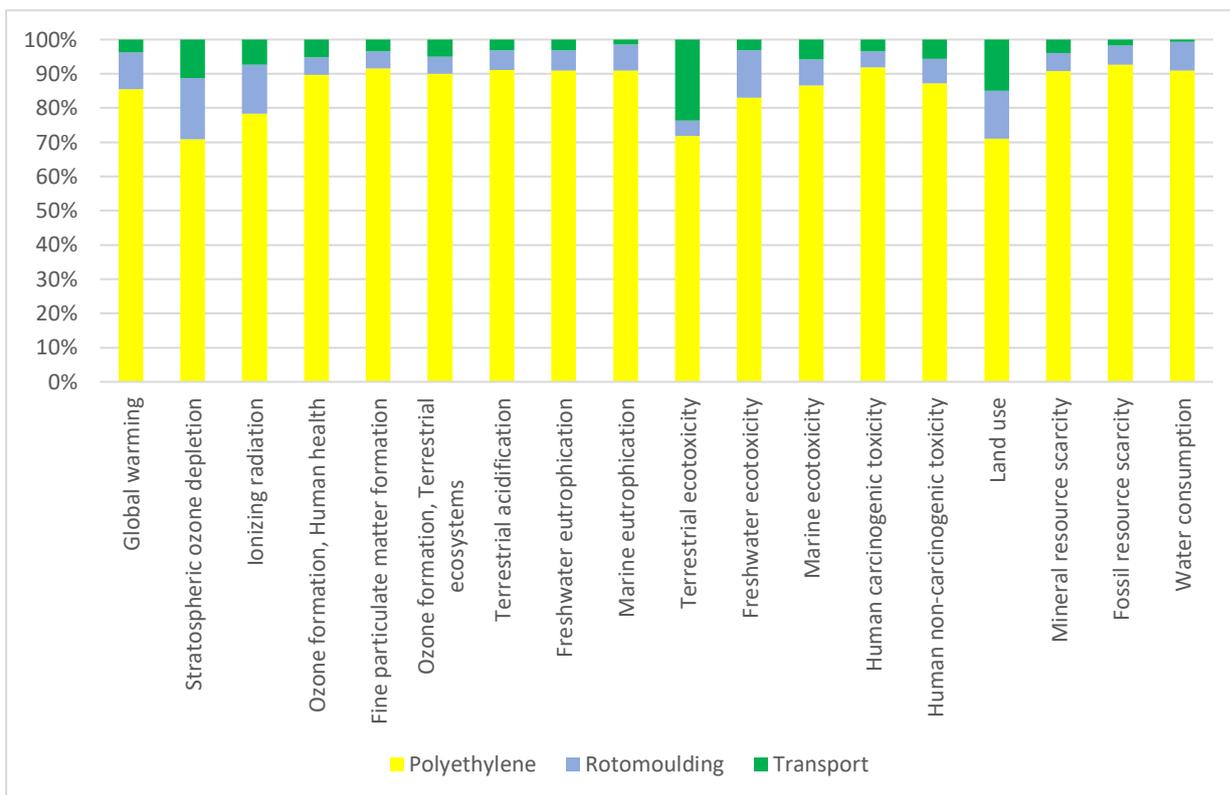


Figura 4.29 Contributi percentuali degli impatti ambientali del liner, ReCiPe

Il grafico mostra che l’impatto ambientale generato dal quantitativo di materiale utilizzato, ovvero polietilene, è nettamente superiore rispetto a quelli relativi al processo di produzione ed al trasporto che ricoprono, invece, una percentuale molto bassa. Inoltre, a livello generale, il contributo percentuale del rotomolding sull’impatto complessivo supera quello del trasporto, ad eccezione delle seguenti categorie d’impatto: Land use, Terrestrial ecotoxicity, Ozone formation – Terrestrial ecosystem, Ozone formation – Human health.

- Fine vita:

Dopo aver esaminato nello specifico tutte le varie fasi della vita del prodotto, sono stati analizzati gli impatti ambientali relativi al fine vita con lo scopo di osservare come contribuisce lo smaltimento del liner, piuttosto che quello dei boss o del towpreg sull’impatto complessivo. I risultati ricavati sono rappresentati graficamente nella Figura 4.30 sottostante.

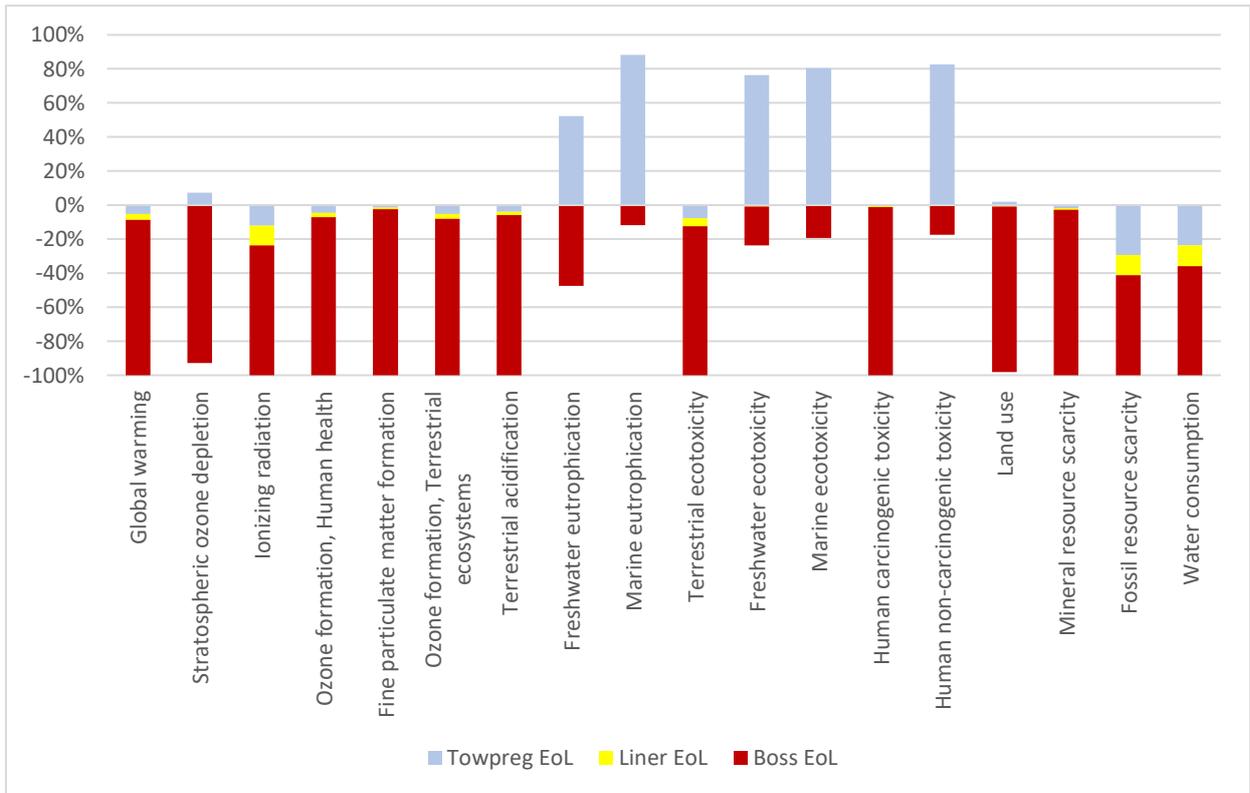


Figura 4.30 Contributi percentuali degli impatti ambientali degli scenari di fine vita, ReCiPe

Dal grafico emerge che, analogamente a quanto è risultato effettuando l’analisi mediante il metodo *Cumulative Energy Demand*, il fine vita dei boss dà un contributo maggiore alla riduzione degli impatti ambientali per tutte le categorie considerate. Per quanto riguarda il fine vita del towpreg, invece, non in tutte le categorie riduce l’impatto complessivo; infatti, per le categorie di Freshwater eutrophication, Marine eutrophication, Freshwater ecotoxicity, Marine ecotoxicity, Human non-carcinogenic toxicity, l’impatto assume un valore consistentemente positivo. Ciò è legato allo smaltimento in discarica, processo non previsto nella fase di fine vita del liner e dei boss, ma presente nello scenario di fine vita del towpreg. Per lo stesso motivo definito nel capitolo 4.2.1 riguardo la fase di fine vita, si definisce che il liner contribuisce in maniera minore sulla riduzione d’impatto ambientale rispetto ai boss, ma il contributo che dà è negativo per tutte le categorie d’impatto considerate.

4.2.3 Risultati – ICCP GWP 100

La valutazione degli impatti ambientali mediante il metodo GWP 100 è stata effettuata considerando i contributi di tutte le fasi del ciclo di vita nelle tre categorie: GWP 100 – fossils, GWP 100 – biogenic e GWP 100 – land transformation, ponendo l’attenzione ai valori di kg di CO₂ equivalenti ottenuti soltanto per la prima categoria citata, poiché maggiori rispetto a quelli

delle altre due categorie di circa 3 ordini di grandezza; pertanto, questi ultimi possono essere trascurati.

Come già effettuato per gli altri due metodi, in primo luogo vengono confrontati i valori d'impatto ambientale ottenuti per le fasi di vita del componente e quelli relativi al fine vita, in termini di kg di CO₂ equivalente, e vengono rappresentati nella Figura 4.31.

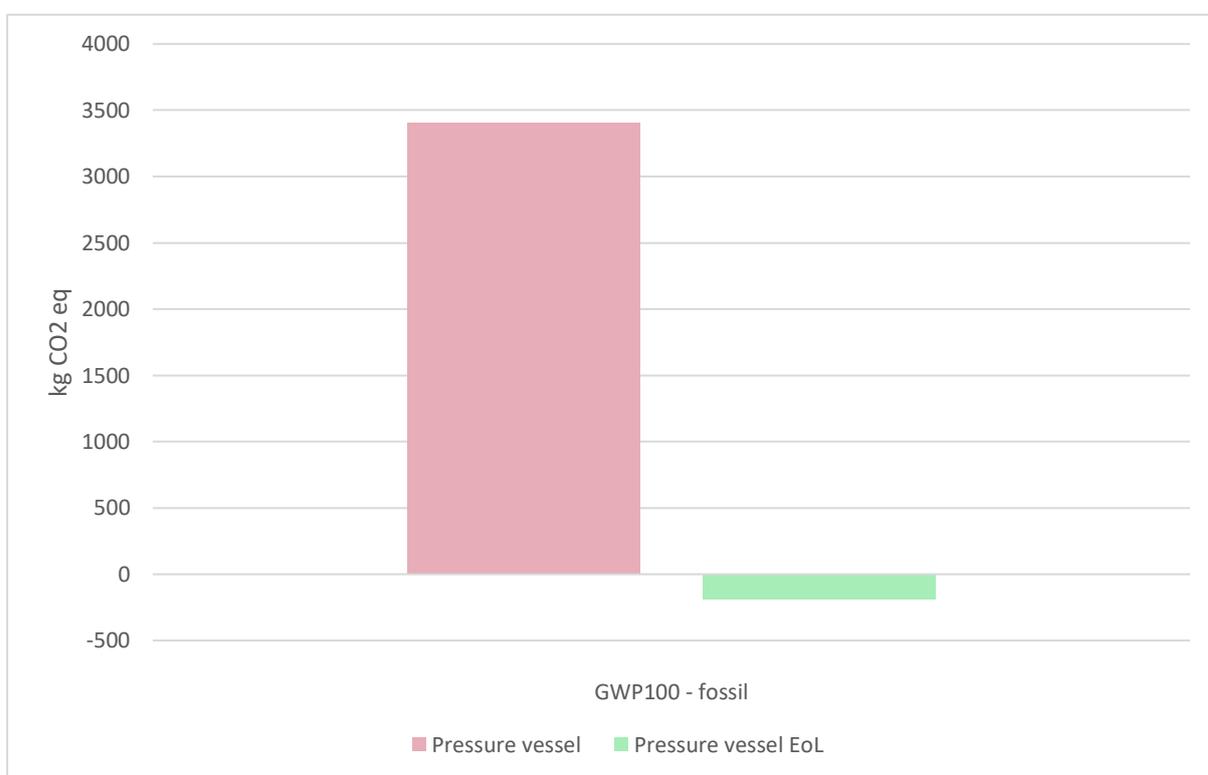


Figura 4.31 Impatti ambientali delle fasi di vita e di fine vita del componente, GWP

Dal grafico emerge che l'impatto ambientale della fase di fine vita è nettamente inferiore rispetto a quello dell'intero ciclo di vita, nello specifico, assume un valore negativo; ciò significa che la fase di fine vita riduce l'impatto ambientale complessivo e si è in accordo con quanto ottenuto dall'analisi effettuata con gli altri due metodi.

Di seguito, nella Tabella 4.18 vengono riportati i valori d'impatto relativi anche alle altre due categorie considerate, dalle quali si evince quanto affermato precedentemente, ovvero che i kg di CO₂ equivalenti sono di molto inferiori a quelli della categoria GWP – fossil.

Tabella 4.18 Valori di impatto ambientale delle fasi di vita e fine vita del componente, GWP

| Categoria d'impatto | Unità | Totale | Pressure vessel | Pressure vessel EoL |
|-------------------------------------|-----------|---------|-----------------|---------------------|
| GWP100 - fossil | kg CO2-eq | 3219,00 | 3411,93 | -192,93 |
| GWP100 - biogenic | kg CO2-eq | 31,00 | 12,19 | 18,81 |
| GWP100 - land transformation | kg CO2-eq | 4,51 | 4,74 | -0,23 |

Focalizzando l'attenzione sulla vita del componente, si può notare che anche in questo caso, ovvero effettuando l'analisi mediante il metodo GWP, emerge che la fase d'uso è quella che influisce maggiormente sull'impatto complessivo. Andando verso valori via via decrescenti, si ha il contributo del towpreg, dei boss, del liner, del processo di filament winding ed infine del trasporto: questi ultimi tre contributi sono trascurabili.

La Figura 4.32 sottostante rappresenta graficamente quanto affermato, ovvero, gli impatti relativi alle varie fasi.

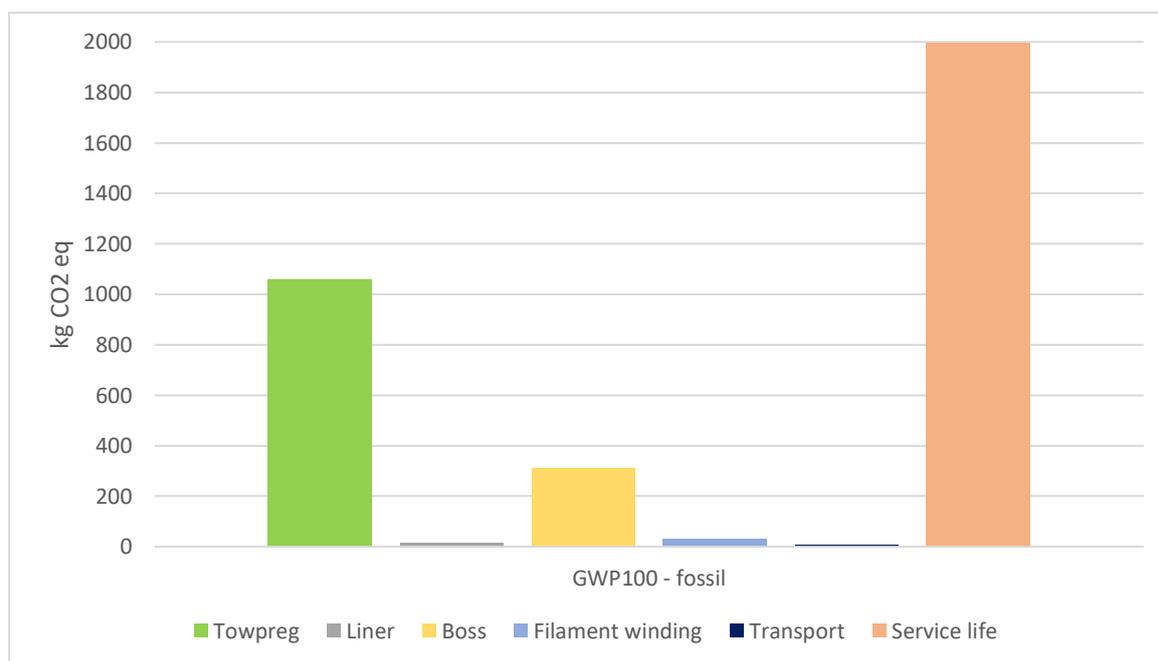


Figura 4.32 Impatti ambientali delle fasi di vita del componente, GWP

Nella Tabella 4.19 vengono riportati, nello specifico, i kg di CO₂ equivalenti relativi alle varie fasi per ciascuna categoria d'impatto considerata.

Tabella 4.19 Valori di impatto ambientale delle fasi di vita del prodotto, GWP

| Categoria d'impatto | Unità | Totale | Towpreg | Liner | Boss | Filament winding | Transport | Service life |
|-------------------------------------|--------------------------|---------|---------|----------|--------|------------------|-----------|--------------|
| GWP100 fossil | - kg CO ₂ -eq | 3411,93 | 1058,97 | 13,55 | 309,85 | 29,51 | 6,18 | 1993,87 |
| GWP100 - biogenic | kg CO ₂ -eq | 12,19 | 1,58 | 0,02 | 2,67 | 0,12 | 1,39E-03 | 7,80 |
| GWP100 - land transformation | kg CO ₂ -eq | 4,74 | 1,30 | 6,25E-03 | 0,64 | 0,04 | 2,3E-03 | 2,75 |

A questo punto, lo studio è proseguito analizzando in maniera più approfondita gli impatti delle fasi incluse nell'analisi.

- Towpreg:

Nella Figura 4.33 sottostante, vengono illustrati in maniera grafica i risultati ottenuti.

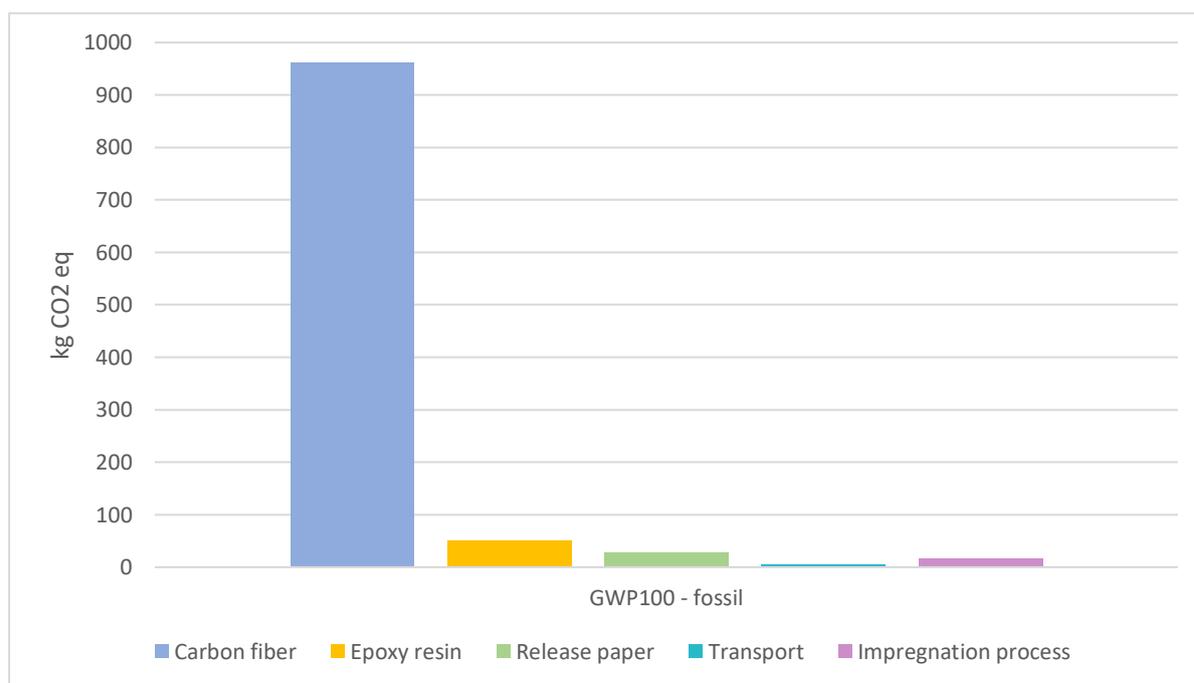


Figura 4.33 Impatti ambientali relativi al towpreg, GWP

Dal grafico emerge che il contributo maggiore sull'impatto complessivo è dato dalle fibre di carbonio, come si è riscontrato anche nelle analisi effettuate utilizzando gli altri due metodi;

valori di molto inferiori si ottengono per tutti gli altri elementi considerati, ovvero resina epossidica, film distaccante e, infine, contributi trascurabili sono forniti dal processo di impregnazione ed il trasporto.

I valori numerici specifici ottenuti vengono riportati nella Tabella 4.20.

Tabella 4.20 Valori di impatto ambientale del towpreg, GWP

| Categoria d'impatto | Unità | Totale | Carbon fiber | Epoxy resin | Release paper | Transport | Impregnation process |
|-------------------------------------|-----------|---------|--------------|-------------|---------------|-----------|----------------------|
| GWP100 - fossil | kg CO2-eq | 1058,97 | 961,10 | 49,76 | 27,90 | 4,13 | 16,08 |
| GWP100 - biogenic | kg CO2-eq | 1,58 | 1,39 | 0,09 | 0,04 | 7,35E-04 | 0,06 |
| GWP100 - land transformation | kg CO2-eq | 1,30 | 1,22 | 0,04 | 0,01 | 2,73E-03 | 0,02 |

- Boss:

I risultati ottenuti vengono illustrati graficamente nella Figura 4.34.

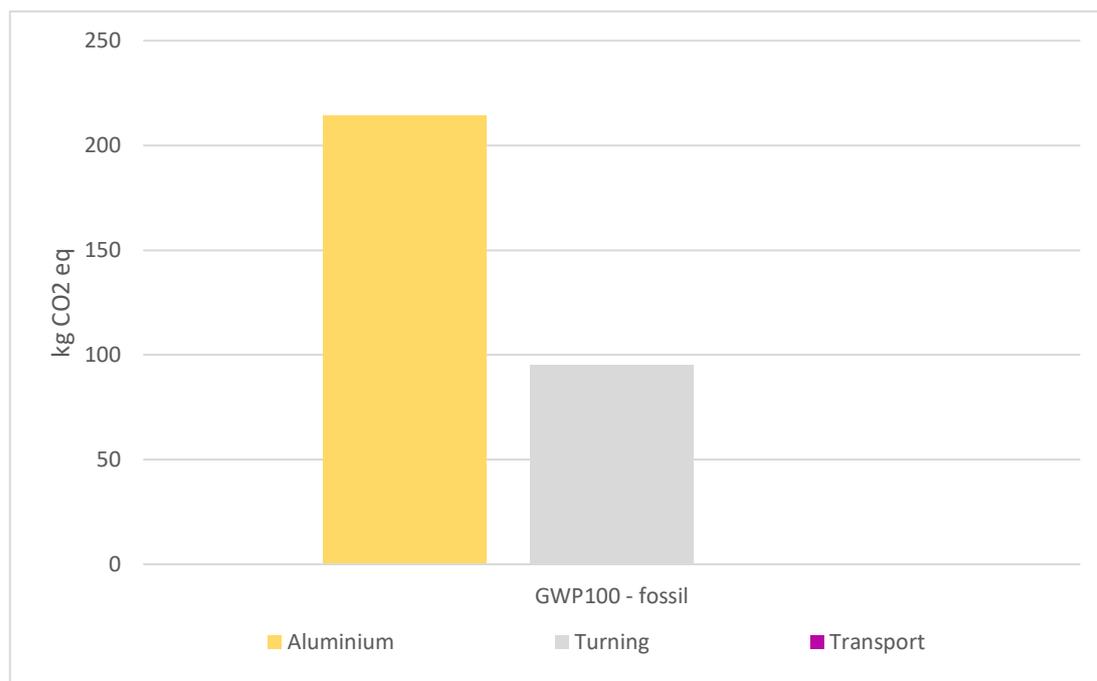


Figura 4.34 Impatti ambientali relativi ai boss, GWP

Il grafico illustra che il contributo maggiore sull'impatto ambientale complessivo legato ai boss di alluminio è dato dalla materia prima stessa ed il relativo processo di estrazione; il processo

di tornitura influisce in maniera minore, mentre il contributo relativo al trasporto del materiale dall'azienda in cui viene prodotto a quella in cui viene utilizzato è trascurabile. I risultati individuati sono in accordo con quelli ottenuti effettuando le analisi mediante gli altri due metodi.

Nella Tabella 4.21 sottostante vengono riportati i valori numerici degli impatti.

Tabella 4.21 Valori di impatto ambientale relativi ai boss, GWP

| Categoria d'impatto | Unità | Totale | Aluminium | Turning | Transport |
|------------------------------|-----------|--------|-----------|---------|-----------|
| GWP100 - fossil | kg CO2-eq | 309,85 | 213,96 | 95,30 | 0,59 |
| GWP100 - biogenic | kg CO2-eq | 2,67 | 0,18 | 2,49 | 1,31E-04 |
| GWP100 - land transformation | kg CO2-eq | 0,63 | 0,29 | 0,34 | 2,24E-04 |

- Liner:

I risultati ottenuti vengono illustrati graficamente nella Figura 4.35.

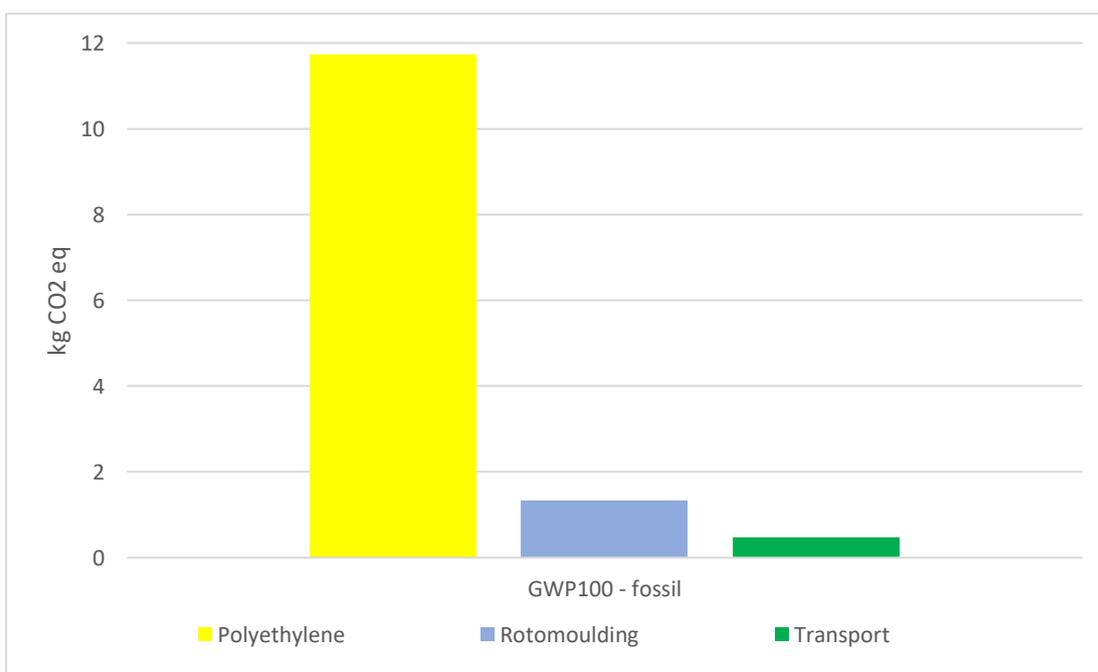


Figura 4.35 Impatti ambientali relativi al liner, GWP

Il contributo maggiore sull'impatto ambientale del liner è legato principalmente al consumo di materia prima, cioè polietilene e in maniera notevolmente inferiore dal processo di produzione,

ovvero rotomolding. L'impatto relativo al trasporto del materiale dall'azienda che lo produce a quella in cui viene utilizzato contribuisce in maniera quasi trascurabile.

Nella Tabella 4.22 vengono riportati i risultati ottenuti in termini numerici.

Tabella 4.22 Valori di impatto ambientale relativi al liner, GWP

| Categoria d'impatto | Unità | Totale | Polyethylene | Rotomoulding | Transport |
|-------------------------------------|-----------|----------|--------------|--------------|-----------|
| GWP100 - fossil | kg CO2-eq | 13,55 | 11,74 | 1,34 | 0,47 |
| GWP100 - biogenic | kg CO2-eq | 1,77E-02 | 1,58E-02 | 1,84E-03 | 1,04E-04 |
| GWP100 - land transformation | kg CO2-eq | 6,25E-03 | 5,42E-03 | 6,52E-04 | 1,78E-04 |

- *Fine vita:*

I risultati ottenuti vengono illustrati graficamente nella Figura 4.36.

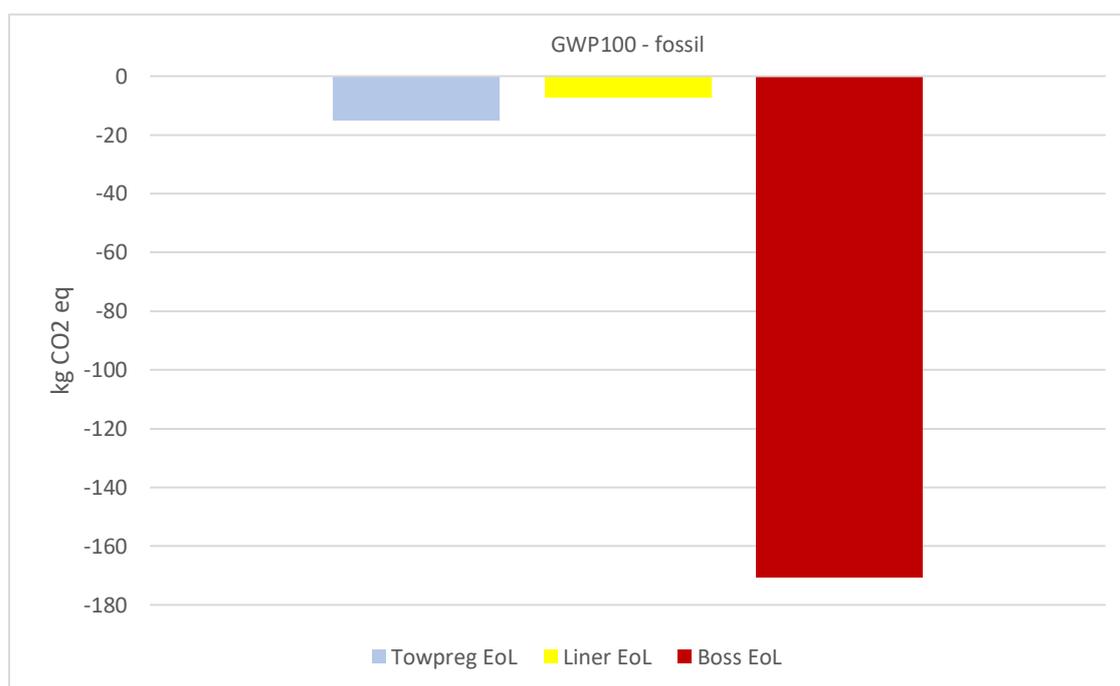


Figura 4.36 Impatti ambientali relativi agli scenari di fine vita, GWP

Analizzando nello specifico gli scenari di fine vita modellati, ovvero quello del towpreg, del liner e dei boss, si può notare che il riciclo dell'alluminio che costituisce i boss, contribuisce in maniera notevolmente maggiore alla riduzione dell'impatto ambientale complessivo rispetto al towpreg ed al liner che, invece, assumono dei valori inferiori e tra loro confrontabili. Nella

Tabella 4.23 sottostante vengono riportati i valori d'impatto ambientale dei tre scenari di fine vita considerati, in termini di kg di CO₂ equivalenti.

Tabella 4.23 Valori di impatto ambientale relativi agli scenari di fine vita, GWP

| Categoria d'impatto | Unità | Totale | Towpreg EoL | Liner EoL | Boss EoL |
|-------------------------------------|------------------------|---------------|--------------------|------------------|-----------------|
| GWP100 - fossil | kg CO ₂ -eq | -192,93 | -15,19 | -7,15 | -170,59 |
| GWP100 - biogenic | kg CO ₂ -eq | 18,80911 | 18,96151 | -0,00662 | -0,14578 |
| GWP100 - land transformation | kg CO ₂ -eq | -0,22875 | 0,005467 | 0,001224 | -0,23544 |

4.2.4 Analisi di sensibilità

Come già accennato nel paragrafo 2.4 è necessario, ai fini di valutare come l'incertezza dei dati possa influire sulla variazione dell'impatto ambientale, eseguire un'analisi di sensibilità.

Nel caso specifico in esame, sono molti i dati che possono essere sottoposti a delle variazioni come, ad esempio, la quantità di alluminio necessaria a realizzare i boss che è stata stimata sulla base di dati trovati in letteratura, quindi non specifici per il componente analizzato, così come per il consumo energetico del filament winding. Allo stesso modo, la tipologia di processo per la produzione di idrogeno può variare nel tempo, soprattutto nell'ottica di un futuro in cui questo gas verrà sempre più utilizzato, sicuramente verranno sviluppati dei processi che impattino meno e che consentano di produrre un idrogeno green. Anche gli impatti correlati all'utilizzo del liner, nel futuro potranno variare, poiché si può pensare ad un'eliminazione di questo elemento e, quindi, alla realizzazione di un serbatoio totalmente in composito.

Infine, per quanto riguarda il materiale composito, si potrebbe pensare di utilizzare una matrice costituita da una resina termoplastica affinché possa essere riciclata.

Supponendo che l'impatto ambientale di ciascuna fase ottenuto effettuando l'analisi mediante il metodo IPCC GWP100 possa subire una variazione da +100% a -100% del valore stesso, è stato possibile valutare come influisse sull'impatto complessivo. Ciò viene illustrato nella Figura 4.37 sottostante.

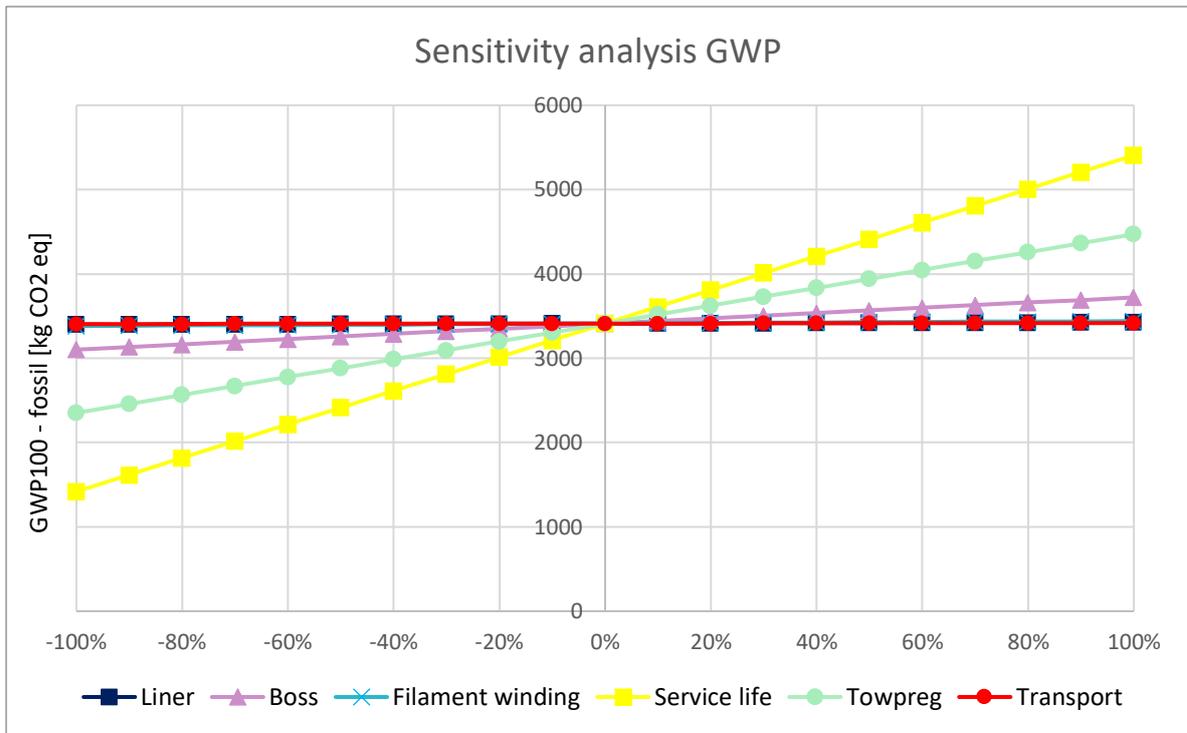


Figura 4.37 Analisi di sensibilità dei dati analizzati utilizzando il metodo GWP

Dal grafico si evince che la fase a cui variazione degli input influisce in maniera importante sull'impatto ambientale complessivo è la fase d'uso; pertanto, si vanno ad analizzare nello specifico degli scenari differenti per questa fase. Dato che l'impatto ambientale è dovuto totalmente all'energia consumata nel processo di produzione dell'idrogeno, un impatto inferiore del 100% lo si potrebbe ottenere utilizzando delle fonti di energia rinnovabili, come ad esempio, un impianto fotovoltaico, mentre un impatto maggiore del 100% lo si otterrebbe utilizzando un mix energetico meno pulito.

Di fatto, nell'analisi condotta è stato utilizzato un mix energetico a basso voltaggio specifico per l'area geografica italiana, ma considerando un mix energetico con produzione fotovoltaica, l'impatto ambientale della fase d'uso si è ridotto notevolmente; i valori ottenuti sono riportati nella Tabella 4.24 sottostante.

Tabella 4.24 Valori di impatto ambientale della fase d'uso relativi all'utilizzo di energia prodotta mediante impianto fotovoltaico

| Elettricità prodotta dal fotovoltaico | |
|--|-----------------------------|
| Categoria d'impatto | kg CO₂ eq |
| GWP100 – fossil | 374,34 |
| GWP100 - biogenic | 1,28 |
| GWP100 - land transformation | 0,93 |

Inoltre, dato che uno degli stati europei che utilizza maggiormente l'idrogeno come gas carburante è la Germania, è stato valutato l'impatto ambientale della fase d'uso considerando che il processo di elettrolisi ad acqua per la realizzazione di idrogeno abbia sfruttato un mix energetico specifico per l'area geografica tedesca. I valori ottenuti vengono riportati di seguito, nella Tabella 4.25.

Tabella 4.25 Valori di impatto ambientali della fase d'uso relativi all'utilizzo di un mix energetico tedesco

| Mix energetico Germania | |
|-------------------------------------|-----------------------------|
| Categoria d'impatto | kg CO₂ eq |
| GWP100 - fossil | 2702,95 |
| GWP100 - biogenic | 10,15 |
| GWP100 - land transformation | 6,99 |

Un'altra considerazione che è stata effettuata, riguarda i km percorsi dal veicolo durante la vita utile: l'analisi è stata condotta considerando che il serbatoio resista per una distanza percorsa pari a 250000 km e si è valutato come una variazione di questo parametro possa influire sull'impatto ambientale. I valori di distanza percorsa nella vita utile considerati sono: 200000 km e 300000 km; i relativi impatti ambientali vengono illustrati nel grafico rappresentato nella Figura 4.38 sottostante.

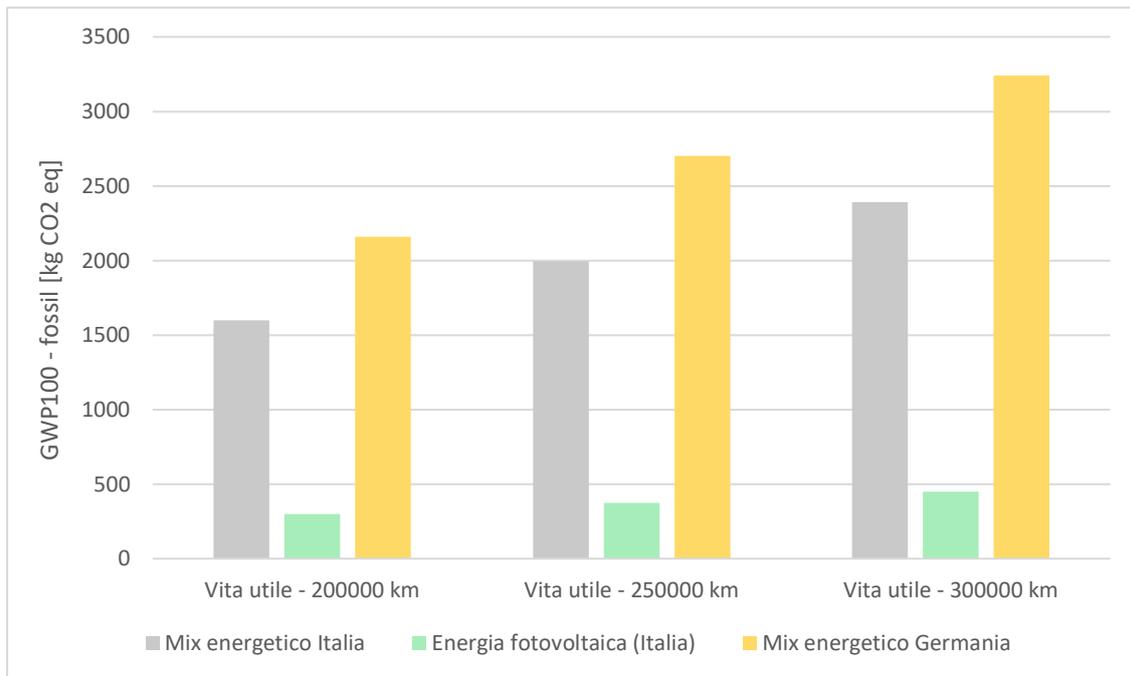


Figura 4.38 Confronto impatti ambientali della fase d'uso negli scenari considerati, in kg di CO₂ equivalenti

Chiaramente, dal grafico emerge che gli impatti relativi ad una distanza percorsa pari a 200000 km sono inferiori rispetto a quelli relativi a 250000 km, a loro volta inferiori a quelli ottenuti con una distanza percorsa di 300000 km. Si può notare, inoltre, che l'impatto ambientale è notevolmente ridotto quando si utilizza un mix energetico fotovoltaico, mentre nel caso in cui il mix energetico a basso voltaggio è specifico per l'Italia, gli impatti complessivi sono maggiori, ma vengono superati da quelli ottenuti quando si considera nell'analisi un mix energetico a basso voltaggio specifico per la Germania. Questo fenomeno può essere spiegato dal fatto che in Germania vengono molto più sfruttate fonti di energia non rinnovabili rispetto all'Italia, e vengono molto meno utilizzate quelle rinnovabili; ma questa è soltanto una delle possibili cause ipotizzate.

4.3 Interpretazione dei risultati dell'analisi LCA del serbatoio metallico e confronto

In questo paragrafo, vengono mostrati i risultati ottenuti nella fase LCIA dell'analisi del serbatoio metallico in termini di kg di CO₂ equivalenti e vengono successivamente confrontati con quelli relativi al serbatoio di tipo IV precedentemente analizzato.

Si è deciso di riportare soltanto i risultati ottenuti effettuando un'analisi mediante il metodo GWP 100 per due motivi principali, ovvero: poiché i contributi che le varie fasi del ciclo di vita

includere nei confini del sistema hanno sull'impatto ambientale complessivo sono in linea con quelli individuati utilizzando gli altri due metodi e, inoltre, il maggior interesse è volto proprio ai kg di CO₂ equivalenti.

Nelle figure 4.39 e 4.40 sottostanti sono illustrati gli impatti ambientali relativi alle fasi del ciclo di vita e al fine vita del serbatoio metallico analizzato.

Si considerano soltanto i valori relativi alla prima categoria d'impatto poiché, come nell'analisi precedente, anche in questo caso i valori relativi alle altre due categorie sono notevolmente inferiori, quindi possono essere trascurati.

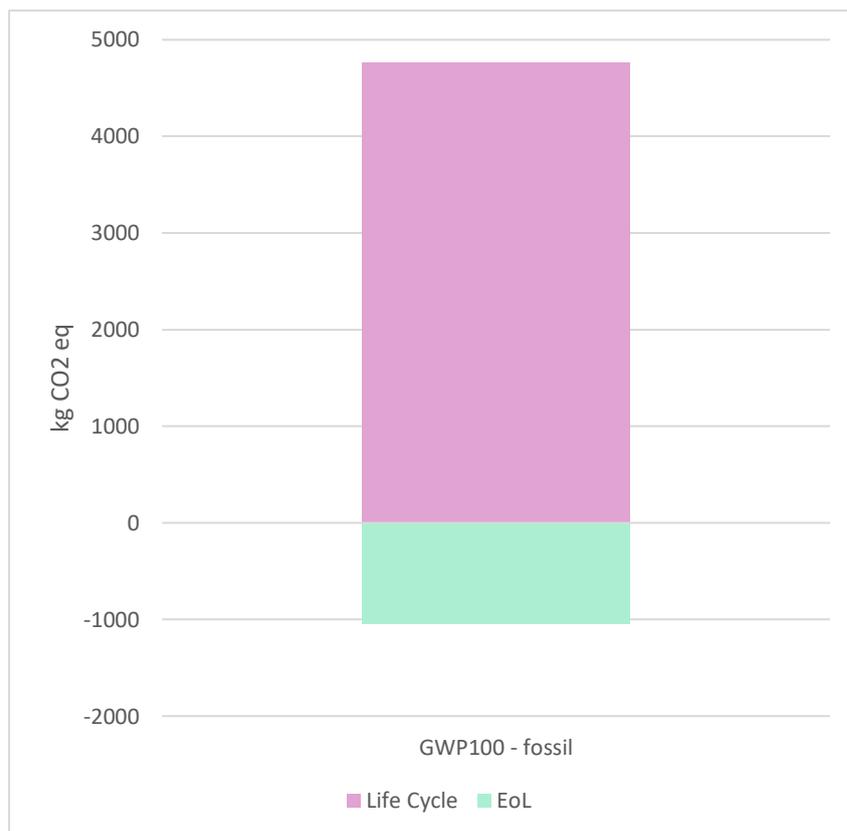


Figura 4.39 Impatto ambientale del ciclo di vita e dell'EoL del serbatoio metallico

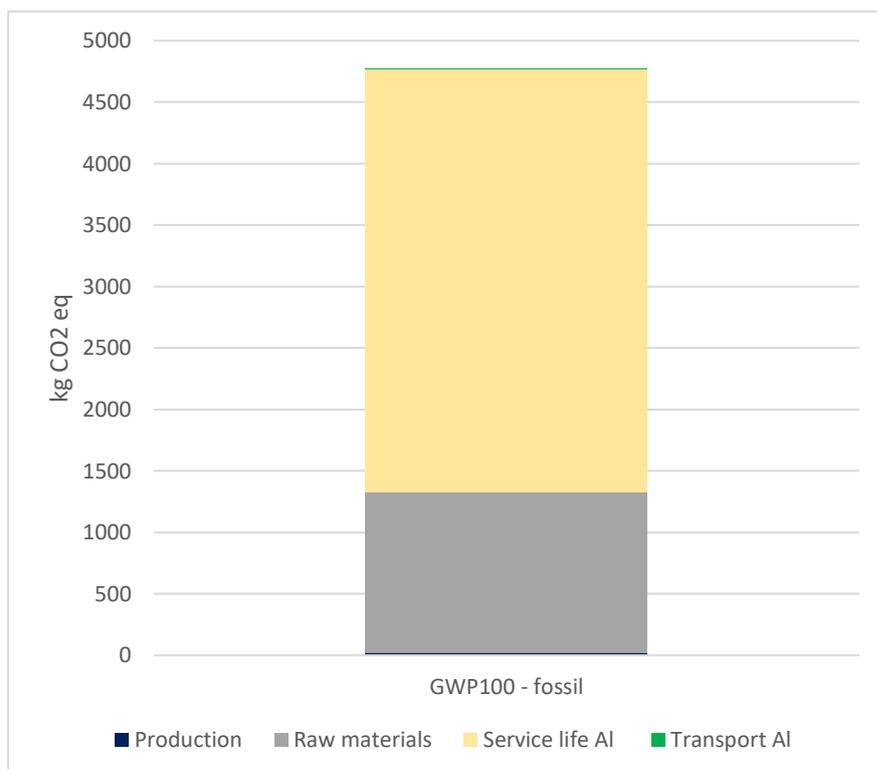


Figura 4.40 Impatto ambientale delle fasi del ciclo di vita

Da questi due grafici si evince che le fasi del ciclo di vita del serbatoio hanno un elevato impatto ambientale rispetto al contributo fornito dall'end of life che, invece, risulta essere negativo. Ciò significa che la fase di fine vita del componente comporta una riduzione degli impatti ambientali complessivi e, ciò, è legato al fatto che il materiale viene riciclato.

Analizzando nello specifico il ciclo di vita, si nota che la fase principalmente responsabile dell'impatto ambientale è la fase d'uso; un contributo inferiore è dato dal consumo della materia prima stessa, mentre il processo di produzione ed il trasporto forniscono dei valori trascurabili. In linea di massima, in termini di contributi percentuali, i risultati ottenuti analizzando il serbatoio di tipo I non si discostano di molto da quelli ricavati dall'analisi del serbatoio di tipo IV.

Nello specifico, la Tabella 4.26 mette a confronto i risultati delle due analisi effettuate, in termini numerici.

Tabella 4.26 Confronto impatti ambientali serbatoi di tipo I e IV

| FASI | SERBATOIO TIPO IV | SERBATOIO TIPO I |
|---|--------------------------|-------------------------|
| Life Cycle [kg CO₂ eq] | 3410,73 | 4768,37 |
| End of Life [kg CO₂ eq] | -192,93 | -1046,16 |
| Totale [kg CO₂ eq] | 3217,80 | 3722,21 |

Si può notare, quindi, che un serbatoio di tipo I ha un impatto ambientale complessivamente superiore del 15,7% rispetto a quello di un serbatoio di tipo IV di pari dimensioni. Si riscontra, però, che la fase di end of life riduce in maniera molto più consistente gli impatti complessivi nel caso di un serbatoio di tipo I e ciò è dovuto al fatto che tutto il materiale considerato, ovvero alluminio (60,1 kg), viene riciclato all'80%. Contrariamente al serbatoio di tipo IV che, invece, considera lo smaltimento in discarica del composito (33,5 kg), il riciclo all'80% di quasi 10 kg di alluminio e al 100% di 5 kg di polietilene. In termini percentuali, passando dal serbatoio di tipo IV a quello di tipo I si assiste ad una riduzione dell'81,6% degli impatti legati al fine vita. Dato che i contributi maggiori sull'impatto ambientale del serbatoio di tipo I sono forniti dalla materia prima e dalla fase d'uso, nella Tabella 4.27, vengono confrontati i relativi valori con quelli rispettivi del serbatoio di tipo IV. Inoltre, nell'ottica di una maggior sostenibilità, sono stati valutati gli impatti ambientali della fase d'uso considerando che l'energia consumata sia stata prodotta da impianti fotovoltaici, oltre che un mix energetico specifico per l'area geografica italiana.

Tabella 4.27 Confronto impatti ambientali serbatoio tipo IV e tipo I (materiale e fase d'uso)

| FASI | SERBATOIO TIPO IV | SERBATOIO TIPO I |
|---|--------------------------|-------------------------|
| Materiale [kg CO₂ eq] | 1236,7 | 1312,2 |
| Fase d'uso (mix IT) [kg CO₂ eq] | 1993,9 | 3437,5 |
| Fase d'uso (fotovoltaico) [kg CO₂ eq] | 374,3 | 645,4 |

I risultati ottenuti mostrano che la materia prima utilizzata per realizzare il serbatoio di tipo I ha un impatto ambientale superiore del 6,1% rispetto a quello generato dai materiali impiegati per la realizzazione del serbatoio di tipo IV. Ciò è correlato al quantitativo di materiale, in quanto, nel serbatoio di tipo I si parla di 60,1 kg di alluminio, mentre per il serbatoio di tipo IV la somma del peso di ciascun materiale utilizzato è inferiore.

Per quanto riguarda l'impatto ambientale relativo alla fase d'uso, si nota un incremento del 72% passando dal serbatoio di tipo IV a quello di tipo I, sia nel caso in cui si consideri un mix energetico italiano, che energia prodotta da impianti fotovoltaici; ciò è legato al quantitativo di idrogeno da produrre. Chiaramente, nel caso di utilizzo di energia fotovoltaica, si assiste ad una notevole riduzione degli impatti rispetto al mix energetico italiano.

Capitolo 5 – Conclusioni

Come già definito, lo scopo del presente lavoro è stato quello di individuare quale fosse la laminazione ottimale del serbatoio di tipo IV e, una volta nota, di valutare l'impatto ambientale da esso generato. Inoltre, effettuando un confronto con gli impatti relativi ad un serbatoio di pari dimensioni realizzato in materiale metallico, è stato possibile determinare se si trattasse di un componente maggiormente sostenibile o meno.

La prima parte dello studio ha previsto di procedere in maniera iterativa fino all'ottenimento della stratificazione ottimale che risulta essere la seguente: [85₆/10₈/15₈/20₈/35₆/85₆/45₄/55₆/65₄/75₆/85₆].

Un serbatoio di tipo IV realizzato considerando questa laminazione, garantisce di operare in condizioni di sicurezza anche in presenza di un valore di pressione interna elevato, corrispondente a quella di scoppio di 105 MPa, in quanto, a seguito dell'analisi agli elementi finiti si è riscontrato che:

- I valori di tensione massima raggiunti sono di molto inferiori rispetto al valore limite;
- I valori di deformazione massima raggiunti non superano il valore limite ammissibile;
- Gli spessori sono sufficientemente uniformi in tutto il componente;
- Il peso rientra nei limiti imposti;
- La vita a fatica è illimitata.

L'unica problematica che emerge, si verifica in corrispondenza di un unico frame nella parte più esterna della calotta, in cui il valore di deformazione ottenuto supera quello massimo consentito; però, considerando che la zona in questione sia quella destinata all'applicazione dei boss in alluminio, saranno essi stessi a risolvere questa difficoltà, aumentando la resistenza del componente.

Per quanto riguarda la valutazione degli impatti ambientali, si è notato che l'utilizzo di un materiale composito a matrice polimerica termoindurente, rinforzato con fibre di carbonio, non costituisce una soluzione altamente sostenibile, in quanto il materiale non viene riutilizzato o riciclato, bensì smaltito in discarica. Nonostante ciò, non è il composito a contribuire maggiormente sugli impatti ambientali complessivi, ma la fase d'uso legata alla produzione dell'idrogeno necessario per gli anni di vita utile considerati nell'analisi.

Confrontando gli impatti relativi al serbatoio di tipo IV esaminato con quelli di un serbatoio di tipo I di pari dimensioni, si è riscontrato che quest'ultimo presenta degli impatti maggiori.

Pertanto, il serbatoio analizzato nel presente lavoro, oltre a costituire una soluzione migliore in termini progettuali, in quanto è caratterizzato da uno spessore e da un peso inferiori, è maggiormente sostenibile.

Chiaramente, questo studio può essere uno spunto interessante per sviluppi futuri che abbiano lo scopo di superare i limiti presenti legati a:

- La presenza del liner interno;
- Il processo di produzione di idrogeno;
- L'utilizzo di una matrice termoindurente.

Di fatto, eliminando il liner interno è possibile sviluppare un serbatoio interamente realizzato in composito, che è noto in letteratura come serbatoio di tipo V. In questo modo, si potranno ottenere sia vantaggi in termini di peso, ma anche di impatti ambientali, poiché sarà totalmente assente il contributo legato alla produzione, al trasporto ed al materiale stesso che costituisce il liner, anche se non risulta essere particolarmente elevato.

Nell'ottica di una maggior sostenibilità, sicuramente l'utilizzo di una resina termoplastica come matrice del composito potrebbe costituire un'ottima soluzione poiché, potendo essere riciclata, comporterebbe una riduzione degli impatti ambientali. Allo stesso modo, l'utilizzo di un processo innovativo che sostituisce la produzione dell'idrogeno garantendo l'ottenimento di idrogeno green, costituirà sicuramente una soluzione ottimale per ridurre, in maniera consistente, il contributo che la fase d'uso ha sull'impatto ambientale e di conseguenza l'impatto complessivo stesso.

Bibliografia

- [1] William Harris, Constantinos Soutis, Matthieu Gresil, ChristopherAtkin, Pressure response and life assessment of filament-wound composite pipes after impact, 2020
- [2] Calum P. Fowler, Adrian C. Orifici, Chun H. Wang, A review of toroidal composite pressure vessel optimisation and damage tolerant design for high pressure gaseous fuel storage, 2016
- [3] Archimede Forcellese, Slide del corso di “Tecnologie di fabbricazione di manufatti in composito”, A.A. 2020/2021
- [4] Ma Quanjin, M R M Rejab, Jiang Kaige, M S Idris and M N Harith1, Filament winding technique, experiment and simulation analysis on tubular structure, 2018
- [5] Dalibor, I.H., Lisbôa, T.V., Marczak, R.J. et al., A geometric approach for filament winding pattern generation and study of the influence of the slippage coefficient. J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng. 41, 576, 2019
- [6] Daghia F., Baranger E., Tran DT, Pichon P., Ahierarchy of models for design of composite pressure vessel, 2019
- [7] EP0714753A2 – Filament-wound isotensoid pressure vessels having geodesic domes
- [8] Marco Sasso, Slide del corso di Costruzione di macchine, A.A. 2019 – 2020
- [9] Peters ST. Composite filament winding. vol. 3. 1972.
- [10] Tew BW. Preliminary design of tubular composite structures using netting theory and composite degradation factors. J Press Vessel Technol Trans ASME 1995
- [11] Solazzi L, Vaccari M. Reliability design of a pressure vessel made of composite materials, 2022
- [12] Verchery G., The netting analysis as a limit case of the laminated structure, 2013
- [13] Zhang Q, Xu H, Jia X, Zu L, Cheng S, Wang H. Design of a 70 MPa type IV hydrogen storage vessel using accurate modeling techniques for dome thickness prediction, 2020
- [14] Wang R., Jiao W., Liu W., Yang F., Dome Thickness Prediction of Composite Pressure Vessels by a Cubic Spline Function and Finite Element Analysis, 2011
- [15] Kaddour AS, Hinton MJ, Smith PA, Li S. The background to the third world-wide failure exercise, 2013
- [16] Hinton MJ, Soden PD. Predicting failure in composite laminates: the background to the exercise. Compos Sci Technol 1998
- [17] Hinton MJ, Kaddour AS. The background to the Second World-Wide Failure Exercise, 2012
- [18] Abisset E, Daghia F, Ladevze P. On the validation of a damage mesomodel for laminated composites by means of open-hole tensile tests on quasi-isotropic laminates, 2011
- [19] Daghia F, Ladeveze P. Identification and validation of an enhanced mesomodel for laminated composites within the WWFE-III, 2013

- [20] Tesi di Laurea di Matteo Lanciotti, Metodi numerici avanzati nello studio delle sovrastrutture stradali flessibili, Dipartimento di Ingegneria delle Strutture, dei Trasporti, delle Acque, del rilevamento e del Territorio, Università degli Studi di Bologna, A.A. 2008/2009
- [21] Hua TQ, Roh HS, Ahluwalia RK. Performance assessment of 700-bar compressed hydrogen storage for light duty fuel cell vehicles. *Int J Hydrogen Energy* 2017;42:25121–9.
- [22] Johnson K, Veenstra MJ, Gotthold D, Simmons K, Alvine K, Hobein B, et al. Advancements and Opportunities for On-Board 700 Bar Compressed Hydrogen Tanks in the Progression Towards the Commercialization of Fuel Cell Vehicles. *SAE Int J Altern Powertrains* 2017;6:201–18.
- [23] Berro Ramirez JP, Halm D, Grandidier JC, Villalonga S, Nony F. 700 bar type IV high pressure hydrogen storage vessel burst - Simulation and experimental validation. *Int J Hydrogen Energy* 2015;40:13183–92
- [24] Roh HS, Hua TQ, Ahluwalia RK. Optimization of carbon fiber usage in Type 4 hydrogen storage tanks for fuel cell automobiles.
- [25] William GW, Shoukry S, Prucz J, Evans T. Finite Element Analysis of Composite Over-wrapped Pressure Vessels for Hydrogen Storage. *SAE Int J Passeng Cars - Mech Syst* 2013;6:1499–504.
- [26] Kangal S, Kartav O, Tanoğlu M, Aktaş E, Artem HS. Investigation of interlayer hybridization effect on burst pressure performance of composite overwrapped pressure vessels with load-sharing metallic liner. *J Compos Mater* 2020;54:961–80.
- [27] Villalonga S, Kempeneers M, Saffré P, Renard J, Halm D, Nony F. Osirhys iv project, 700 bar on-board composite pressure vessel mechanical behaviour prediction with uncertainties knowledge, 2012
- [28] Kartav O, Kangal S, Yüçetürk K, Tanoğlu M, Aktaş E, Artem HS. Development and analysis of composite overwrapped pressure vessels for hydrogen storage, 2021
- [29] Alam S, Yandek GR, Lee RC, Mabry JM. Design and development of a filament wound composite overwrapped pressure vessel, 2020
- [30] Sulaiman S, Borazjani S, Tang SH. Finite element analysis of filament-wound composite pressure vessel under internal pressure, 2013.
- [31] Mian HH, Wang G, Dar UA, Zhang W. Optimization of composite material system and lay-up to achieve minimum weight pressure vessel, 2012.
- [32] Leh D, Magneville B, Saffré P, Francescato P, Arrieux R, Villalonga S. Optimisation of 700 bar type IV hydrogen pressure vessel considering composite damage and dome multi-sequencing, 2015
- [33] P. Alam, D. Mamalis, C. Robert, C. Floreani, Conchúr M. Ó Brádaigh, The fatigue of carbon fibre reinforced plastics - A review, 2019
- [34] B. Zuccarello, Progettazione meccanica con materiali compositi, Capitolo 9, Dipartimento di meccanica, Viale delle Scienze, 90128 Palermo
- [35] Norma Europea UNI EN ISO 14040 – Valutazione degli impatti ambientali, Ottobre 2006
- [36] Michele Germani, Slide del corso di Gestione del ciclo di vita del prodotto, A.A. 2021/2022

- [37] SimaPro database manual Methods library, PRé Sustainability, Version: 4.15, June 2020
- [38] Halawa M, Al-Huniti N. Optimum design of carbon/epoxy composite pressure vessels including moisture effects. *J Compos Sci* 2019
- [39] Christian Laval, CADWIND 2006 – 20 years of filament winding experience
- [40] Zuccarello B., Progettazione meccanica con materiali compositi, Capitolo 6, Dipartimento di meccanica, Viale delle Scienze, 90128 Palermo
- [41] Forcellese A., Marconi M., Simoncini M., Vita A., Life cycle impact assessment of different manufacturing technologies for automotive CFRP components, 2020
- [42] Postacchini L., Simoncini M., Forcellese A., Bevilacqua M., Ciarapica F. E., Andreassi G., Russo A. C., Environmental assessment of an automated impregnation process of carbon fiber tows, 2020
- [43] Benitez A., Wulf C., De Palmenaer A., Lengersdorf M., Roding T., Grube T., Robinius M., Stolten D., Kuckshinrichs W., Ecological assessment of fuel cell electric vehicles with special focus on type IV carbon fiber hydrogen tank, 2021
- [44] Subhamoy Patra, Phani Kumar Mallisetty, Naresh Chandra Murmu, Harish Hirani, Pranab Samanta, Study on fracture evaluation in hydrogen environment in 316L stainless steel used in high pressure hydrogen tank, 2022
- [45] Saim Kural, Mehmet Ayvaz, The ballistic behavior of type 1 metallic pressurized hydrogen storage tanks against ballistic threats, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Manisa Celal Bayar University, Manisa, Turkey , 2018

Sitografia

- [a] <https://www.internet4things.it/industry-4-0/industria-40-la-nuova-era-del-manifatturiero/>
- [b] <https://www.se.com/it/it/work/solutions/local/industria/smart-manufacturing.jsp>
- [c] <https://ec.europa.eu/info/strategy/international-strategies/sustainable-development-goals>
- [d] <https://www.undp.org/sustainable-development-goals>
- [e] <https://www.experisacademy.it/it/news/2021-09-10/lutilizzo-richiesta-crescente-materiali-compositi>
- [f] <https://www.reteclima.it/lca-life-cycle-assessment-analisi-del-ciclo-di-vita/>
- [g] <https://economiecircolare.com/analisi-lca-life-cycle-assessment/>
- [h] <https://simapro.com/>
- [i] <https://www.material.be/cadwind/intro/>
- [j] <https://www.plm.automation.siemens.com/global/it/products/nx/>
- [k] <https://team3d.it/product/nx-siemens/>

Ringraziamenti

Arrivata a questo punto, mi sento di dover dedicare questo spazio del mio elaborato a tutte le persone che mi hanno supportata durante questo percorso.

In primo luogo, ringrazio la Prof.ssa Ing. Michela Simoncini e il Prof. Ing. Archimede Forcellese per avermi dato la possibilità di svolgere questa attività di tirocinio fornendomi con estrema disponibilità, professionalità e competenza, tutti gli strumenti e i suggerimenti necessari.

Un secondo grazie va sicuramente a tutte le persone del dipartimento per la loro disponibilità e i consigli dati, in particolare, a Iacopo e Serena per avermi seguito durante questi mesi con molta pazienza. Grazie anche per il supporto dato e per aver creduto in me.

Ringrazio i miei genitori per avermi dato la possibilità economica di intraprendere questo percorso e per avermi supportata in ogni momento. Grazie anche a mia sorella che, nonostante sia molto lontana, trova sempre tempo e modo per essere presente e sostenermi più di chiunque altro.

Grazie ai miei nonni per tutto quello che hanno sempre fatto per me e che continuano a fare. Grazie nonno per i “cento milioni di in bocca al lupo” fatti prima di ogni esame, senza i quali non sarei sicuramente riuscita a raggiungere questo risultato e grazie nonna per aspettare con ansia la mia telefonata dopo ogni esame.

Grazie anche a nonna Delina per avermi trasmesso la forza di andare avanti nei momenti più difficili, caratteristica che l’ha sempre contraddistinta fino agli ultimi momenti. Grazie per esserti sempre interessata dei miei studi e, anche se per poco non sei riuscita ad arrivare alla fine, so che saresti fiera di me.

Un grazie speciale va ai miei quasi fratelli Michele, Valentina, Davide e Michela per i loro consigli, per il supporto dato e per aver creduto in me. Grazie anche ai piccoli Tommy e Richi per i momenti di spensieratezza passati insieme.

Grazie ai miei compagni di università, in particolare Mauro, Matteo e Morgo per aver alleviato questi cinque lunghi (ma non troppo) anni di università.

Grazie a tutti i miei amici per avermi regalato momenti di leggerezza durante questi anni, per non aver mai smesso di supportarmi, ma soprattutto sopportarmi e per aver creduto in me. Grazie in particolare a Margherita per non aver mai smesso di fare il tifo per me e per avermi incoraggiato nei momenti in cui non mi sentivo all'altezza di ciò che mi si presentava davanti.

Infine, grazie a tutte le altre persone che in questi anni, seppur indirettamente, hanno fatto parte di questo percorso.