



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA MECCANICA

**OTTIMIZZAZIONE DELLE PROPRIETÀ MECCANICHE MEDIANTE
TECNICHE DI SIMULAZIONE E VALUTAZIONE DELL'IMPATTO
AMBIENTALE DI COMPONENTI IN MATERIALE COMPOSITO
AVANZATO REALIZZATI MEDIANTE FILAMENT WINDING**

OPTIMIZATION OF MECHANICAL PROPERTIES USING SIMULATION
TECHNIQUES AND ASSESSMENT OF THE ENVIRONMENTAL IMPACT OF
ADVANCED COMPOSITE COMPONENTS MADE BY FILAMENT WINDING

Relatore:
PROF. ING. ARCHIMEDE FORCELLESE

Studente:
VERONICA PESARESI

Correlatore:
PROF. ING. MICHELA SIMONCINI

ANNO ACCADEMICO 2022-2023

Indice

INDICE DELLE FIGURE	5
INDICE DELLE TABELLE	7
INTRODUZIONE	8
CAPITOLO 1 - STATO DELL'ARTE	10
1.1 Introduzione	10
1.1.1 Stoccaggio idrogeno gassoso.....	10
1.2 Materiali compositi	13
1.2.1 Introduzione.....	13
1.2.2 Sostenibilità materiali compositi	14
1.3 Filament Winding	16
1.4 Progettazione serbatoio	20
1.4.1 Teoria del netting.....	21
1.4.2 Analisi FEM	23
CAPITOLO 2 - PROCEDURE SPERIMENTALI	26
2.1 Procedimento	26
2.2 Ottimizzazione progettuale del serbatoio.....	26
2.2.1 Progettazione preliminare.....	28
2.2.2 CADWIND.....	29
2.2.3 Analisi agli elementi finiti (NX)	36
2.3 Analisi LCA del serbatoio	41
2.3.1 SimaPro	42
2.3.2 ICCP GWP 2021	43
2.3.3 ReCiPe 2016.....	44
2.3.4 Definizione dell'obiettivo e degli scopi	46
2.3.5 Analisi dell'Inventario (LCI).....	47
2.3.6 Valutazione degli impatti	52
2.3.7 Interpretazione dei risultati.....	53
CAPITOLO 3 - RISULTATI E DISCUSSIONI	54

3.1 Ottimizzazione progettuale del serbatoio.....	54
3.2 Interpretazione dei risultati dell'analisi LCA	61
CAPITOLO 4 - CONCLUSIONI	67
BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA	69

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1-1 Serbatoi idrogeno. Fonte [3].	10
Figura 1-2 Tipologia serbatoi. Fonte: [1].	12
Figura 1-3: Schemi del processo di avvolgimento del filamento per tubi compositi. Fonte: [7].	17
Figura 1-4: Confronto grafico tra avvolgimenti polari ed elicoidali.	18
Figura 1-5: Tipi di avvolgimento: elicoidale (a), polare(b) e circonferenziale(c). Fonte [7].	19
Figura 1-6: Rappresentazione del crossover e della turning zone.	20
Figura 1-7: Distribuzione delle tensioni su avvolgimenti circonferenziali ed elicoidali.	21
Figura 1-8: Carichi applicati alla parte cilindrica del serbatoio (destra) e diagramma di un corpo libero nelle due direzioni θ e φ	22
Figura 2-1: Variazione dello spessore in funzione dell'angolo di avvolgimento....	28
Figura 2-2: Rappresentazione all'interno del software CADWIND di una tipica parte dalla geometria assialsimmetrica [10].	31
Figura 2-3: Laminati con angoli di avvolgimento a 10 e 65°.	33
Figura 2-4: Comandi per la creazione del laminato in un file .DAT.	35
Figura 2-5: Rappresentazione corpo 3D Liner in alluminio.	37
Figura 2-6: Rappresentazione mesh 3D relativa al liner.	38
Figura 2-7: Esito del comando Surface to surface gluing.	39
Figura 2-8: Serbatoio nell'ambiente di simulazione con la pressione interna applicata.	39
Figura 2-9: Serbatoio con i vincoli fissi applicati.	40
Figura 2-10: Interfaccia del software NX per mostrare i risultati nell'ambiente SIM.	40

Figura 2-11: Rappresentazione delle categorie d'impatto a livello di Midpoint e Endpoint. Fonte: [13].....	45
Figura 3-1: Risultati in termini di tensioni [MPa] relative al liner in alluminio.	54
Figura 3-2: Risultati in termini di tensioni [MPa] relative al composito per un ply a 20°.....	55
Figura 3-3: Risultati in termini di deformazioni relative al composito per un ply a 20°.....	55
Figura 3-4: Risultati in termini di deformazioni relative al composito per un ply a 20°.....	56
Figura 3-5: Risultati in termini di tensioni [MPa] relative al composito per un ply a 20°.....	57
Figura 3-6: Risultati in termini di tensioni [MPa] relative al composito per un ply a 85°.....	58
Figura 3-7: Valori di deformazione relativi rispettivamente a ply di 10° e 85°.....	59
Figura 3-8: Valori di tensione relativi rispettivamente a ply di 10° e 85°.....	59
Figura 3-9: Grafico relativo all'impatto ambientale del serbatoio GWP 100.	61
Figura 3-10: Impatto ambientale relativo al fine vita.	62
Figura 3-11: Impatto ambientale relativo ai materiali.	63
Figura 3-12: Impatto ambientale relativo al liner.	63
Figura 3-13: Impatto ambientale relativo alla produzione.	64
Figura 3-14: Impatto ambientale relativo al processo di cura.	65
Figura 3-15: Impatto ambientale relativo al prepregging.	65

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 2-1: Proprietà Toray T700 e Resina epossidica.	27
Tabella 2-2: Parametri laminati CADWIND.	32
Tabella 2-3: Stratificazione (N laminati per ogni angolo di avvolgimento) delle 4 prove.	34
Tabella 2-4: Proprietà del composito.	37
Tabella 2-5: Dati relativi al quantitativo di materiale per realizzare il serbatoio..	49
Tabella 2-6: Dati relativi a consumi energetici e materiali dei processi di produzione.....	49
Tabella 2-7: Dati relativi al consumo energetico del processo di produzione dell'idrogeno.....	51
Tabella 2-8 Dati relativi al trasporto dei materiali e del componente.....	51
Tabella 2-9: Dati relativi alla fase di fine vita.....	52
Tabella 3-1: Kg CO ₂ equivalenti relativi ai vari contributi.....	61
Tabella 3-2: Kg CO ₂ equivalenti relativi al fine vita.	62
Tabella 3-3: Kg CO ₂ equivalenti relativi ai materiali.....	63
Tabella 3-4: Kg CO ₂ equivalenti relativi al liner.....	64
Tabella 3-5: Kg CO ₂ equivalenti relativi alla produzione.	64
Tabella 3-6: Confronto impatti ambientali serbatoio di tipo III e di tipo I.	66

INTRODUZIONE

I materiali compositi hanno svolto un ruolo importante nel corso della storia umana, sin dalle prime civiltà, ed hanno consentito progressive innovazioni. Tali materiali offrono molti vantaggi e le loro caratteristiche comuni sono la resistenza alla corrosione, la flessibilità del design, la durata, la leggerezza e la resistenza meccanica. I compositi hanno permeato la nostra vita quotidiana come prodotti utilizzati nelle costruzioni, nelle applicazioni mediche, nei trasporti, nello sport, nel campo aerospaziale e in molti altri settori.

Al giorno d'oggi, l'industria dei compositi è ancora in evoluzione, con gran parte della crescita ora focalizzata sulle energie rinnovabili.

Inoltre, considerato che i combustibili fossili minacciano l'ambiente poiché utilizzano le risorse naturali, sono responsabili dei gas serra e inquinano l'aria, e che pertanto è necessaria energia più pulita, in questo studio i compositi verranno utilizzati proprio per la progettazione di serbatoi per lo stoccaggio di idrogeno gassoso.

Oltre a consentire la decarbonizzazione del trasporto su strada, l'energia dell'idrogeno può anche ridurre significativamente l'inquinamento atmosferico locale. L'idrogeno è un gas non tossico, incolore e inodore con la più alta densità di energia per massa rispetto ai carburanti standard (il suo potere calorifico inferiore PCI è di 120 MJ/kg, all'incirca pari a tre volte quello della benzina e del gasolio) e, soprattutto, la sua infrastruttura del carburante è alla pari con i carburanti stradali tradizionali [1].

Con riguardo al serbatoio, esso va progettato adattando il composito in base ai requisiti prestazionali, rendendo il foglio composito molto resistente in una direzione, allineando le fibre in modo opportuno, ma realizzandolo più debole in un'altra direzione dove la forza non è così importante. Negli ultimi anni, una crescente consapevolezza ambientale e la conoscenza della necessità di uno sviluppo sostenibile hanno suscitato interesse nell'utilizzo di fibre naturali come rinforzi nei compositi per

sostituire le fibre sintetiche. I vantaggi ambientali legati all'uso dei compositi sono anzitutto i seguenti:

- minor consumo energetico
- minori emissioni di gas serra
- maggiore durata dei componenti anche in assenza di manutenzione
- migliori prestazioni
- maggiore sicurezza [2].

Esistono diversi metodi per fabbricare materiali compositi. La selezione di tale metodo dipenderà dai materiali, dal design della parte, dalle prestazioni e dall'uso finale o dall'applicazione. Ad esempio, il *Filament Winding* è un metodo di fabbricazione continuo che può essere altamente automatizzato e ripetibile, con costi di materiale relativamente bassi. Le aziende di tutto il mondo si stanno man mano adeguando alle nuove tecniche di produzione, per velocizzare il processo e ottenere proprietà meccaniche elevate.

Nella seguente trattazione analizzeremo l'ottimizzazione delle proprietà meccaniche di un elemento strutturale in materiale composito, in particolare di un serbatoio di tipo III per lo stoccaggio di idrogeno, realizzato mediante una tecnica di avvolgimento di filamenti continui di materiale di rinforzo (fibra di carbonio) impregnati in resina (generalmente epossidica), ovvero il *Filament Winding* sopra citato. Inoltre, ne valuteremo il relativo impatto ambientale attraverso un'analisi LCA (*Life Cycle Assessment*).

Capitolo 1- STATO DELL'ARTE

1.1 Introduzione

1.1.1 Stoccaggio idrogeno gassoso

Le modalità con cui l'idrogeno può essere immagazzinato possono essere molteplici. In particolare, questo può essere conservato e trasportato come:

1. gas ad alta pressione (350-700 bar o 5000-10.000 psi);
2. liquido a bassa temperatura e pressione atmosferica;
3. idrogeno allo stato liquido e/o gassoso ad elevata pressione e bassa temperatura.

In questa trattazione si approfondiranno le caratteristiche progettuali dei serbatoi in composito per lo stoccaggio di idrogeno sotto forma di gas ad alta pressione (Figura 1.1).

Un sistema di stoccaggio deve essere in grado di soddisfare tre esigenze fondamentali:

- massimizzare la quantità di idrogeno immagazzinata (a parità di peso ed ingombro del serbatoio)
- minimizzare il costo dell'impianto
- massimizzare la sicurezza del sistema.



Figura 1-1 Serbatoi idrogeno. Fonte [3].

Dall'inizio del secolo scorso, l'idrogeno è stato immagazzinato in cilindri di acciaio senza saldatura. Negli anni '70 però, è stata posta particolare attenzione all'*hydrogen embrittlement*, ovvero infragilimento da idrogeno. Infatti, l'idrogeno invade facilmente i metalli e interagisce con vari difetti reticolari (come dislocazioni e bordi di grano), causando il degrado delle proprietà meccaniche [4]. In realtà, verso la fine degli anni '60, venivano già utilizzate anche bombole di alluminio per lo stoccaggio dell'idrogeno, ma il loro costo era più alto rispetto quelle in acciaio e permettevano una minore capacità dell'acqua. Per aumentare ulteriormente la pressione di servizio di serbatoi di idrogeno o per diminuire leggermente il peso, le bombole metalliche possono essere rinforzate con degli strati in materiale composito sul corpo cilindrico. Poi, con sviluppi specifici per applicazioni spaziali o militari, iniziarono a essere sviluppati carri armati completamente avvolti negli anni '80. A causa del loro peso ridotto, iniziarono ad essere utilizzati per applicazioni portatili, ad esempio per veicoli (serbatoi a bordo di gas naturale). Questi serbatoi compositi completamente rivestiti, denominati tipi III, IV e V, sono ora sviluppati per lo stoccaggio di energia dell'idrogeno.

Essendo la pressione richiesta molto alta (da 700 a 850 bar), è molto difficile trovare il giusto compromesso progettuale tra resistenza e spessore (e quindi peso).

Le forme impiegate possono essere varie. Attualmente la geometria più utilizzata è quella cilindrica, anche se non raramente in letteratura è possibile trovare studi riguardanti geometrie sferiche o toroidali. Per semplicità, nella presente tesi, tutte le informazioni riportate fanno riferimento a serbatoi cilindrici.

In base ai materiali impiegati ed alle soluzioni costruttive si distinguono, oggi, 5 tipologie di serbatoi per lo stoccaggio di gas ad alta pressione (Figura 1.2):

1. Tipo I: completamente realizzati in materiale metallico (acciaio o alluminio), quindi molto pesanti;
2. Tipo II: la struttura principale è in materiale metallico, alla quale sono aggiunti avvolgimenti circonferenziali in materiale composito che conferiscono maggiore resistenza al serbatoio, permettendo di ridurre lo spessore delle pareti metalliche, e quindi il peso;

3. Tipo III: costituito da un liner metallico interno e da un rinforzo esterno in materiale composito che supporta fino al 90% del carico di pressione; la struttura resistente è prevalentemente realizzata in materiale composito e avvolge tutta la superficie del serbatoio;
4. Tipo IV: la struttura resistente è totalmente in materiale composito. È comunque presente un sottile strato interno in materiale polimerico, il quale ha la sola funzione di impedire la fuoriuscita del gas dal sistema (contributo strutturale irrilevante);
5. Tipo V: realizzato interamente in materiale composito, senza alcun rivestimento interno.

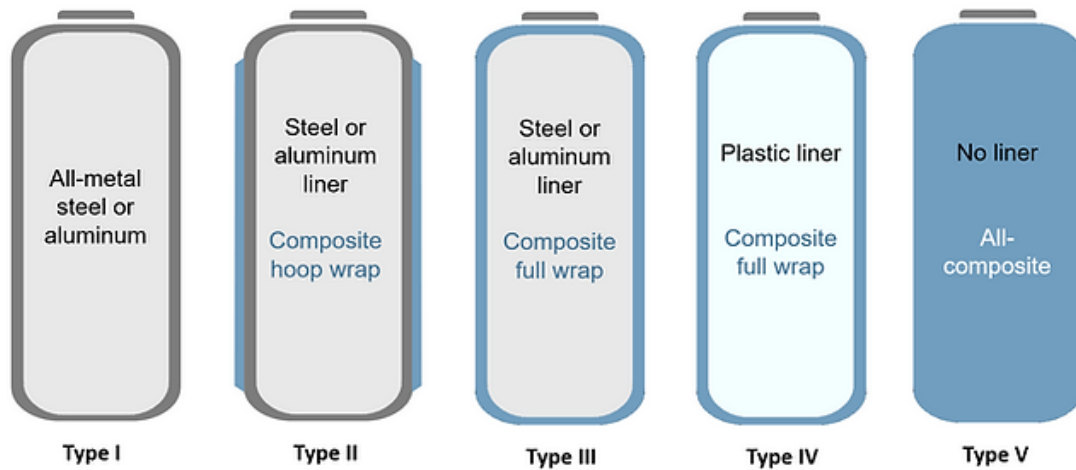


Figura 1-2 Tipologia serbatoi. Fonte: [1].

Dai serbatoi di tipo I a quelli di tipo V si va verso una maggior resistenza (grazie alla maggior presenza del materiale composito) e minor peso specifico, bensì si ha un notevole aumento del costo.

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

In particolare, in questa trattazione verrà approfondito lo studio di un serbatoio di tipo III, nel quale si ha che il liner interno ha una duplice funzione: infatti, oltre ad impedire la fuoriuscita del gas dal sistema, ha anche una funzione strutturale sorreggendo fino al 20% del carico di pressione.

Si esaminerà la procedura per ottimizzarne la progettazione, a partire dalla definizione dei parametri del componente (come, ad esempio, la variazione dell'angolo di avvolgimento nella tecnica del Filament Winding) 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 materiali compositi nascono dalla necessità di soddisfare determinate proprietà in un unico materiale; si tratta di una combinazione di almeno due componenti tra loro chimicamente differenti, con proprietà significativamente diverse e un'interfaccia di separazione, in modo tale che dall'unione risultino i vantaggi dei vari materiali a discapito dei punti deboli.

Tale accoppiamento può essere studiato sia a livello macroscopico che microscopico. Nel primo caso il composito è studiato nella sua visione "globale" e la struttura è considerata macroscopicamente omogenea. Nel secondo invece si considera il materiale come non omogeneo, le fasi sono considerate singolarmente omogenee e vengono valutate le caratteristiche che derivano dalle mutue interazioni.

I materiali compositi sono costituiti da fasi chimicamente distinte, con caratteristiche fisico-meccaniche diverse:

- **Matrice:** è il costituente continuo che, bloccando il rinforzo, ne assicura la coesione, permette la distribuzione dei carichi esterni sul rinforzo e lo protegge dagli effetti dell'ambiente (ad es. dalla corrosione), dall'usura e da eventuali azioni meccaniche di taglio;
- **Rinforzo:** viene aggiunto sotto forma di fibre lunghe, fibre corte o particelle, ed è il costituente che determina, grazie alle proprietà fisico-meccaniche superiori rispetto a quelle della matrice, rigidità, resistenza meccanica, conducibilità elettrica e termica e altre proprietà del composito.

In particolare, in questo studio verrà trattato un composito a matrice termoindurente. Tale materiale è costituito da una resina polimerica (che, liquida a temperatura ambiente, diventa solida all'aumentare della temperatura), e da materiali di rinforzo

sotto forma di fibre e/o tessuti o microsfele. Le resine utilizzate per la produzione di manufatti sono le resine poliesteri insature, le resine epossidiche e le resine fenoliche; mentre come rinforzi i più usati sono le fibre ed i tessuti di vetro e/o carbonio, in minor misura le fibre aramidiche. Il composito trattato in questo studio è quindi costituito da una resina epossidica e fibre di carbonio (TORAY T600).

Il vantaggio unico dei laminati compositi rinforzati con fibre rispetto ai materiali metallici è che le sue proprietà possono essere personalizzate regolando i parametri dello strato di fibra (angolo di posa della fibra, spessore di posa e sequenza di posa) con produzione integrata senza aumentare il peso della struttura. Le proprietà personalizzabili dei materiali offrono ai progettisti grandi opportunità per migliorare le prestazioni strutturali in termini di rigidità, resistenza, stabilità e multifunzionalità, senza aumentare il peso strutturale [5].

1.2.2 Sostenibilità materiali compositi

I vantaggi ambientali legati all'impiego dei compositi sono indiscutibili: minor consumo di energia e minori emissioni di gas serra, maggior durata del componente anche in assenza di manutenzione, migliori prestazioni e maggiore sicurezza. Per quanto riguarda le altre fasi, il sistema di analisi più idoneo per quantificare l'impatto ambientale dei prodotti in materiale composito è senza dubbio l'analisi del ciclo di vita (Life Cycle Assessment, LCA).

L'analisi LCA è una metodologia internazionale sviluppatasi a partire dagli Anni '90 in ambito industriale (SETAC - Society of Environmental Toxicology and Chemistry), generalmente riconosciuta come uno strumento potenzialmente molto efficace per tener conto della dimensione ambientale dei prodotti. Essa nasce come principale strumento del "life-cycle thinking" (considerazione del ciclo di vita) ossia, di un approccio che mirava a considerare il ciclo di vita di un prodotto (bene o servizio) allo scopo di ridurre l'impatto ambientale complessivo "dalla culla alla tomba" (che tiene conto della produzione delle materie prime, del trasporto presso il fabbricante e della produzione del componente), cercando, allo stesso tempo, di evitare che iniziative di

prevenzione e minimizzazione delle esternalità incentrate su singole fasi di tale ciclo di vita trasferissero il carico ambientale su altre fasi.

Nel tempo, il ruolo dell'LCA è andato sempre più crescendo nel settore industriale per favorire la riduzione degli effetti ambientali negativi complessivamente considerati durante l'intero ciclo di vita di beni e servizi. Utilizzato in vari ambiti (dal marketing, alla pianificazione strategica, alle analisi comparative di benchmarking, etc.) il principale vantaggio dell'LCA è quello di offrire un approccio analitico di tipo globale che, all'interno di un unico strumento, permetta di comprendere meglio l'impatto ambientale di un prodotto inteso come oggetto sistemico di osservazione ("sistema di prodotto") e il suo effetto in ogni fase della catena di produzione e che permetta altresì di mostrarne i vantaggi competitivi rispetto a un altro sistema concorrente o sostitutivo. Quindi, una volta definiti i "confini del sistema" (cioè il campo di analisi), uno studio di LCA consente di misurare l'impatto ambientale generato dai diversi processi produttivi in esso compresi, individuando quelli a maggior impatto e comprendendo così le performance ambientali di ogni ciclo produttivo in forma oggettiva e tecnicamente argomentata.

Con riguardo al fine vita dei materiali compositi, esso è ancora un problema aperto. Infatti, per i compositi a base indurente:

- Il riuso è praticamente impossibile in quanto i legami delle catene polimeriche della matrice termoindurente, una volta avvenuta la cura, non possono essere più rotti per formarne dei nuovi;
- Il riciclo è poco conveniente, ma possibile, infatti può avvenire per riciclo termico (la matrice viene degradata e il rinforzo viene recuperato), riciclo meccanico (il composito viene triturato e ridotto in polveri di pochi millimetri, per poi essere utilizzato come filler per altri compositi, calcestruzzo, asfalti, etc.) e riciclo chimico (la matrice viene dissolta totalmente da un fluido, tipicamente allo stato supercritico, lasciando intatte le fibre). Di contro, questi metodi di lavorazione possono avere effetti non trascurabili sulla qualità delle fibre (lunghezza, resistenza, rigidità) influenzando così il modo in cui le fibre riciclate possono essere utilizzate;

- Il recupero infine è l'ultima possibilità prima dello smaltimento in discarica (come materiale inerte), e consiste nell'incenerimento del composito per produrre energia; questa tecnica permette di evitare lo smaltimento in discarica; pertanto, riduce problemi di natura ambientale/sociale;
- Gli sfridi sono presenti in maniera non poco consistente. Mediamente, un processo di taglio ha un rendimento dell'80%. Nel 2017 sono state realizzate circa 100.000 tonnellate di prepreg al mondo, e nel 2025 ci si aspetta 250.000 tonnellate. Pertanto, considerando un rendimento dell'80%, nel 2025 si avranno 50.000 tonnellate di scarti di preimpregnato. Inoltre, bisogna considerare che per produrre un Kg di prepreg si emettono circa 30 Kg di CO₂ [6].

1.3 Filament Winding

Il Filament Winding è una delle pratiche di produzione emergenti con un alto grado di eccellenza e automazione che ha rivoluzionato la dottrina dello stoccaggio e del trasporto del gas.

Con questa tecnica vengono avvolti filamenti continui di materiale di rinforzo impregnati in resina su un mandrino rotante. 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 avanti e indietro lungo tutta la lunghezza del mandrino rotante, attraverso un carro mobile, posizionando la fibra secondo geometrie e finiture ben precise e predeterminate.

La forma del mandrino determinerà la geometria del componente che vogliamo realizzare e infine ci sarà un indurimento totale della resina ad alte temperature [7].

Il mandrino è un elemento fondamentale, esso può essere sia fisso, cioè parte integrante della struttura, sia rimovibile o solubile (nel nostro caso di serbatoio di tipo III, il mandrino non sarà rimosso).

Negli attuali impianti di *filament winding* è possibile realizzare manufatti in composito di diverse dimensioni, da oggetti di diametro di pochi centimetri, fino a componenti per uso aerospaziale di qualche metro.

Per la realizzazione di serbatoi in fibra di carbonio, come già accennato, è tipicamente utilizzata resina epossidica (termoindurente). Si distinguono quindi due sottotipi di processo:

- il *dry-filament winding*
- il *wet-filament winding*.

Nel *dry-filament winding* si utilizzano fibre pre-impregnate di resina (tecnologia *pre-preg*). Si tratta di un metodo più costoso ma che assicura elevata ripetibilità in termini di contenuto di resina, e di dimensioni del fascio di fibre, motivi per cui tratteremo la tecnica di preimpregnati piuttosto che quella per via umida.

Nonostante ciò, più diffuso è il *wet-filament winding*, processo dal minor costo, in cui i *rovings* di fibra di carbonio sono immersi in un bagno di resina poco prima di essere applicati. Oltre alla vasca di resina, un altro componente fondamentale è il sistema di messa in trazione dei *rovings*. La tensione delle fibre è indispensabile per assicurare l'adeguata compattazione degli avvolgimenti, per eliminare la presenza di vuoti tra i vari strati, e per garantire un posizionamento accurato delle fibre. Per evitare che il mandrino si danneggi, o affinché le tensioni residue nel manufatto non siano deleterie, il carico di trazione applicato ai *rovings* non deve essere eccessivo. Tanto più la tensione delle fibre è costante e di valore ottimale, tanto migliore è la ripetibilità del processo nel generare oggetti conformi alle specifiche. Esistono infatti dei sistemi di messa in trazione con delle celle di carico che, in base alla tensione rilevata, alterano istantaneamente la distanza tra i rulli affinché la tensione rimanga costante durante il processo.

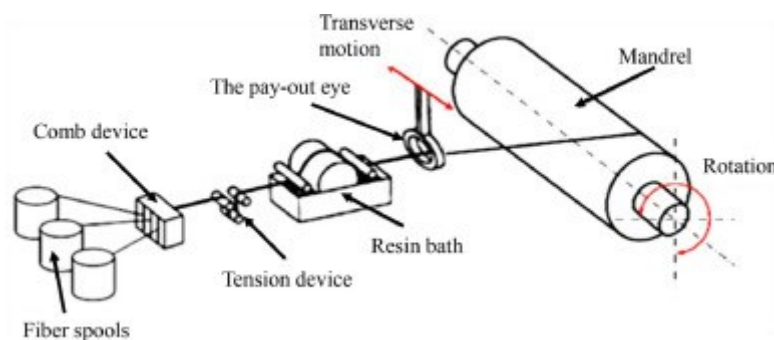


Figura 1-3: Schemi del processo di avvolgimento del filamento per tubi compositi. Fonte: [7].

Un'ulteriore distinzione dei processi di Filament Winding può essere fatta in base al metodo di avvolgimento delle fibre. Esistono due differenti metodologie con cui avvolgere i filamenti attorno al mandrino:

- l'avvolgimento elicoidale
- l'avvolgimento polare.

Nel caso di *polar winding* (avvolgimento polare) la tipologia di macchinario è più semplice. Il carrello di alimentazione della fibra orbita attorno al mandrino, mantenendo la sua posizione all'interno di un piano. Vengono così applicati avvolgimenti da un'estremità all'altra dell'oggetto, con un angolo pari all'inclinazione relativa tra l'asse del mandrino ed il piano di rotazione del pattino di alimentazione. Ad ogni giro completo, il mandrino ruota di una quantità pari alla larghezza della banda di fibre, in modo tale che il secondo avvolgimento venga posto adiacente al primo. Gli avvolgimenti realizzati con questo tipo di macchinario sono detti anche planari. Gli avvolgimenti planari non seguono sulla superficie del mandrino una traiettoria geodetica, ovvero non coincidono con il percorso più breve che collega due punti sulla superficie del serbatoio, e questo comporta una minore capacità della fibra di sostenere i carichi di pressione, nonché una minore resistenza dell'intero serbatoio. Inoltre, all'aumentare della differenza tra la traiettoria geodetica e quella effettiva, si ha un maggior rischio di slittamento delle fibre sul mandrino dovuto al precarico.

Per evitare questi inconvenienti è preferibile utilizzare la tecnica di *helical winding* (avvolgimento elicoidale). Il carrello di alimentazione delle fibre si muove di moto rettilineo alternato, parallelamente all'asse del mandrino, mentre quest'ultimo ruota con continuità. Oltre al moto descritto, il braccio di alimentazione delle fibre può anche ruotare attorno al proprio asse per controllare l'orientazione della banda, o traslare perpendicolarmente all'asse del mandrino, in modo da ottenere una modellazione più accurata nella zona delle calotte.

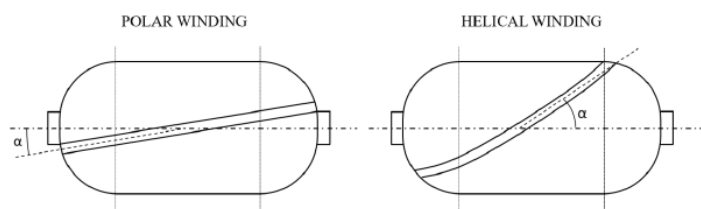


Figura 1-4: Confronto grafico tra avvolgimenti polari ed elicoidali.

L'angolo di elica, definito in questo caso come l'angolo compreso tra l'asse del mandrino e la direzione della fibra (Figura 2.19), risulta solitamente compreso tra 10° e 90° . I serbatoi di Tipo III e Tipo IV sono tipicamente costruiti utilizzando tre tipologie di avvolgimenti:

1. Avvolgimenti circolari (*hoop*), dunque ad elevatissimo angolo di elica (88° - 89°), aventi la funzione di resistere alle tensioni circonferenziali;
2. Avvolgimenti longitudinali, a basso angolo di elica (10° - 15°), aventi lo scopo di resistere alle tensioni assiali del serbatoio;
3. Avvolgimenti ad elevato angolo di elica (50° - 55°), i quali offrono un contributo in entrambe le direzioni (non sempre presenti).

La figura sottostante illustra le tre tipologie di avvolgimento.

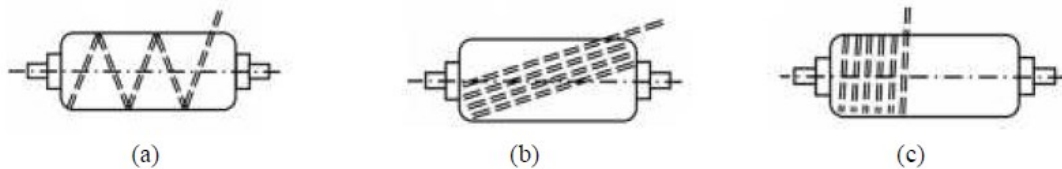


Figura 1-5: Tipi di avvolgimento: elicoidale (a), polare(b) e circonferenziale(c).

Fonte [7].

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. Inoltre, esiste una *turning zone*, in corrispondenza della quale, l'orientamento della fibra inizia a variare l'angolo di avvolgimento (che aumenterà fino a 90° per poi ritornare, nella corsa di ritorno al valore nominale) 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.

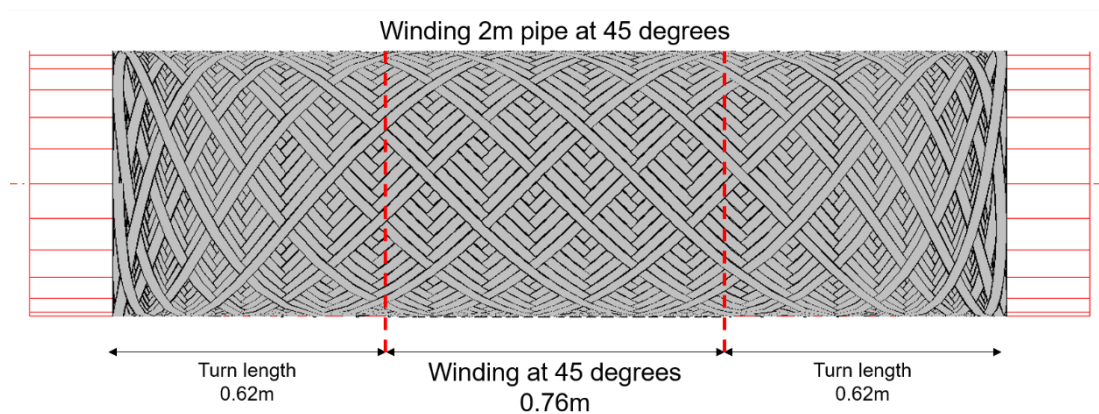


Figura 1-6: Rappresentazione del crossover e della turning zone.

Tra i vantaggi del Filament Winding c'è la possibilità di utilizzare rinforzi continui senza rotture o giunzioni, così come l'elevata percentuale di volume di fibre che è possibile ottenere, dal 50 all'80%. I costi sono abbastanza elevati, ma pesando i pro e i contro è sicuramente una tecnica efficace e molto apprezzata.

1.4 Progettazione serbatoio

Prendendo in considerazione la progettazione di un serbatoio di tipo III, in primo luogo bisogna determinare i parametri geometrici e prestazionali, e le condizioni dell'ambiente in cui si opera.

Per quanto riguarda la geometria del serbatoio, va posta particolare attenzione alla zona delle calotte in quanto questa influenza notevolmente le tensioni che si sviluppano in serbatoi soggetti a pressioni interne. Infatti, 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 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.

Una volta definita la geometria del serbatoio occorre stabilire la quantità di materiale necessaria per il rivestimento strutturale. Un primo calcolo approssimativo può essere svolto con uno strumento semplice, detto “*Netting analysis*”.

1.4.1 Teoria del netting

Questa teoria tratta di un modello analitico che permette di stimare lo spessore di avvolgimenti elicoidali e circonferenziali a partire dalla conoscenza della pressione interna, di informazioni geometriche di base, e del valore di resistenza a trazione del materiale composito.

Alla base della *netting analysis* vi è l’ipotesi fondamentale per cui sono le sole fibre a sostenere il carico di pressione, mentre la resina non fornisce alcun contributo meccanico: pertanto, il modello risulta essere conservativo dal punto di vista delle proprietà meccaniche del materiale composito, essendo queste sottostimate [8].

Dalla teoria dei serbatoi cilindrici è noto come la pressione interna generi due componenti principali di tensione: quella assiale e quella circonferenziale.

La prima è sostenuta unicamente dagli avvolgimenti elicoidali (basso angolo di elica), mentre la seconda agisce principalmente su quelli circonferenziali (angolo di elica di circa 90°). In Figura 1-7 è illustrata la modalità di distribuzione dei carichi sulle fibre del materiale composito.

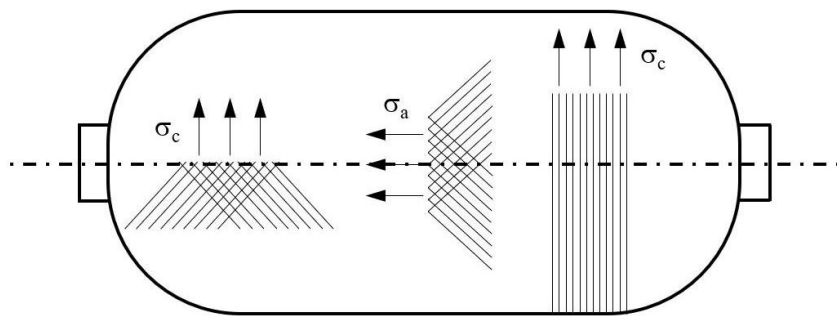


Figura 1-7: Distribuzione delle tensioni su avvolgimenti circonferenziali ed elicoidali.

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

esercizio. In figura 1-8 sono rappresentati i carichi ai quali è sottoposto il serbatoio (con la teoria del *netting* possiamo analizzare solo la zona cilindrica):

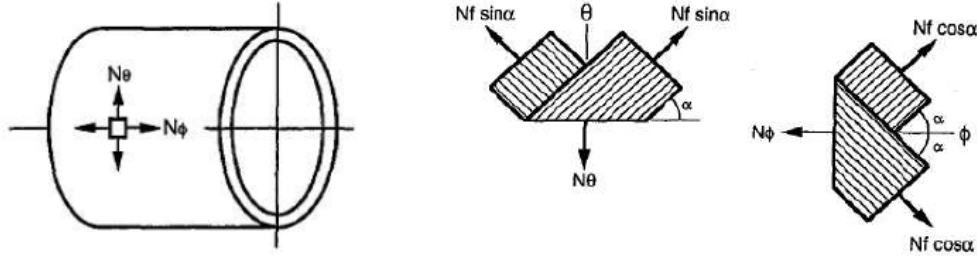


Figura 1-8: Carichi applicati alla parte cilindrica del serbatoio (destra) e diagramma di un corpo libero nelle due direzioni θ e ϕ .

A partire dalle equazioni di equilibrio delle pareti del serbatoio in pressione (soggette ai due carichi N_θ e N_ϕ), e 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:

$$N_{f_1} = \frac{N_\theta \cos^2 \alpha_2 - N_\phi \sin^2 \alpha_2}{2n_1 (\cos^2 \alpha_2 \sin^2 \alpha_1 - \sin^2 \alpha_2 \cos^2 \alpha_1)}$$

$$N_{f_2} = \frac{N_\theta \cos^2 \alpha_1 - N_\phi \sin^2 \alpha_1}{2n_2 (\cos^2 \alpha_1 \sin^2 \alpha_2 - \sin^2 \alpha_1 \cos^2 \alpha_2)}$$

dove n_1 e n_2 rappresentano i numeri degli strati ottenuti con avvolgimenti di angoli α_1 e α_2 .

Successivamente, da queste si può ricavare la tensione applicata alle fibre avvolte per i due valori di angoli α_1 e α_2 .

Inoltre, esplicitando lo spessore totale delle fibre (dato dal prodotto del numero di strati n_i per lo spessore di uno strato della fibra orientata con un angolo pari a α_i), si possono ricavare le seguenti espressioni che 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:

$$t_{\alpha_{1f}} = \frac{N_\theta \cos^2 \alpha_2 - N_\phi \sin^2 \alpha_2}{\sigma_{\alpha_1} (\cos^2 \alpha_2 \sin^2 \alpha_1 - \sin^2 \alpha_2 \cos^2 \alpha_1)}$$

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

Infine, dato che 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 soprascritte vanno divisi per la Fiber Volume Fraction (VF) del composito utilizzato, ovvero il rapporto tra il volume delle fibre e quello del composito totale (che nel nostro caso è 0.6).

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.

1.4.2 *Analisi FEM*

Per analisi degli elementi finiti, altrimenti detta FEA – Finite Element Analysis oppure FEM – Finite Element Method, si intende una serie di strumenti software che permettono di effettuare simulazioni ingegneristiche.

Tali strumenti riproducono un banco di prova vero e proprio, dove il nostro pezzo meccanico può subire sollecitazioni statiche o dinamiche, può deformarsi o subire una variazione di temperatura. Come in un banco di prova, siamo interessati alla verifica dei requisiti di progetto da parte del pezzo meccanico. Differentemente da un banco di prova però, in un'analisi FEM siamo in una piattaforma virtuale, dove il prototipo, che è formato direttamente dal file CAD 3D, può essere modificato in pochi istanti e subire un nuovo test di funzionamento. Già qui emergono i vantaggi di tale tecnologia: si riduce il numero di prototipi fisici da realizzare e annessi costi e soprattutto tempi di sviluppo; in un mondo dove costi e tempi sono le due parole chiave per aver successo nel mercato non è ovviamente una cosa da poco [9].

A prescindere dal software utilizzato, un'analisi FEM è un processo suddiviso in tre fasi fondamentali:

1. *pre-processing*, ovvero la definizione del modello ad elementi finiti, composto da geometria (mesh) e condizioni al contorno (carichi e vincoli);
2. *processing*, ovvero l'analisi vera e propria, con la risoluzione del problema agli elementi finiti ad opera di un software di risoluzione (solutore);
3. *post-processing*, dove viene elaborata e rappresentata la soluzione al problema, tipicamente con tabelle di valori o grafici ed immagini.

Il FEM tipicamente si applica a corpi fisici suscettibili di essere suddivisi in un certo numero, anche molto grande, di elementi di forma definita e dimensioni contenute. Infatti, la caratteristica principale del metodo degli elementi finiti è la discretizzazione attraverso la creazione di una griglia (mesh) composta da primitive (elementi finiti) di forma codificata: triangoli e quadrilateri per domini 2D, tetraedri ed esaedri per domini 3D. Si tratta quindi di una suddivisione della geometria in elementi base che costituiscono il punto di appoggio per la risoluzione matematica del problema.

La qualità della mesh può influenzare i risultati in maniera a volte determinante.

Ovviamente la trattazione della qualità di una mesh risulta estremamente vasta, ma in generale vale la *regola del gradiente*: laddove si ha una variazione di tensione molto accentuata all'interno del modello, è consigliabile inserire un numero di elementi più elevato e di dimensione inferiore.

Ogni elemento della mesh è caratterizzato da un certo numero di nodi, ovvero punti caratteristici che hanno determinati gradi di libertà (DOF) e che in funzione delle condizioni al contorno potranno subire degli spostamenti (o rotazioni) che fungeranno da punti chiave nel calcolo della deformata del modello oggetto della simulazione.

Per capire come si comporta un modello soggetto a sollecitazione, vanno definite anche le caratteristiche meccaniche del materiale di cui è composto (Resistenza alla trazione/compressione, tensione di snervamento, Modulo di Young, coefficiente di Poisson, etc...).

Come abbiamo visto, il fatto di poter simulare i prototipi virtuali direttamente nel tuo PC porta inevitabili vantaggi.

Ovviamente, affinché un'analisi sia affidabile, è necessario che le condizioni al contorno siano ben definite e che il software adottato sia in grado di simulare il fenomeno correttamente. Oltre a questo, va considerato inoltre che gli strumenti

diventano potenti solo se messi nelle mani corrette: non bisogna sottovalutare aspetti importanti come la conoscenza della materia e la formazione sullo strumento.

Capitolo 2- **PROCEDURE SPERIMENTALI**

2.1 **Procedimento**

Nel seguente capitolo si tratta l'ottimizzazione progettuale di un serbatoio di tipo III, ovvero, un elemento strutturale realizzato in materiale composito (mediante la tecnica di Filament Winding) che presenta un liner interno in materiale metallico.

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 (CADWIND), ed un altro per l'esecuzione dell'analisi agli elementi finiti (Siemens NX).

2.2 **Ottimizzazione progettuale del serbatoio**

In primo luogo, per poter procedere alla progettazione di un serbatoio di tipo III, bisogna definire i parametri geometrici e di utilizzo di questo. Il serbatoio in analisi avrà le seguenti dimensioni:

- Volume: 60 L
- Lunghezza zona centrale cilindrica: 340 mm
- Lunghezza totale (comprese le calotte): 540 mm
- Diametro interno: 380 mm.

I parametri relativi alle condizioni di utilizzo e le proprietà del materiale composito (calcolati attraverso la regola delle miscele) sono le seguenti:

- Pressione interna: 700 bar = 70 MPa
- Tensione rottura σ_{rottura} : 2790 MPa
- Tensione ammissibile $\sigma_{\text{ammissibile}} = 0.5 \sigma_{\text{rottura}} = 1395 \text{ MPa}$
- Densità ρ : 0.0016 g/cm³.

I parametri soprariportati, relativi al composito, sono stati ottenuti dalla regola delle miscele, per la quale una certa grandezza fisica del materiale composito si ottiene come media pesata secondo le frazioni di volume della stessa grandezza fisica associata a fibra e matrice.

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 seguente tabella vengono riportate le proprietà relative alla matrice e al rinforzo.

Tabella 2-1: Proprietà Toray T700 e Resina epossidica.

	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

Grazie alla regola delle miscele 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. Infatti:

$$\rho_{comp} = \frac{1}{\frac{W_f}{\rho_f} + \frac{W_m}{\rho_m}}$$

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

dove W_f rappresenta la frazione di peso del rinforzo. Per calcolare le proprietà meccaniche complessive del composito, si utilizzano 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.

2.2.1 Progettazione preliminare

In primo luogo, per avere un'idea approssimativa dell'ordine di grandezza degli spessori e della massa del composito (considerando però la sola zona cilindrica del serbatoio), è stata svolta un'analisi preliminare facente uso della teoria del netting precedentemente citata.

Questa teoria è stata utilizzata ipotizzando due soli angoli di avvolgimento delle fibre, uno fisso di 90° e l'altro variabile. Al variare dell'angolo d'elica α si ottengono diversi valori dello spessore minimo che devono avere gli avvolgimenti affinché il serbatoio rimanga in sicurezza quando viene sottoposto a delle pressioni di esercizio.

Tramite il software Excel è stato possibile individuare la condizione ottimale dell'angolo α al fine di ottenere il minor spessore possibile, essendo comunque in sicurezza, e si è visto che si verifica per $\alpha=26^\circ$ (Figura 2-1), con uno spessore del composito pari a 21.8 mm e una massa del composito di 22.1 Kg.

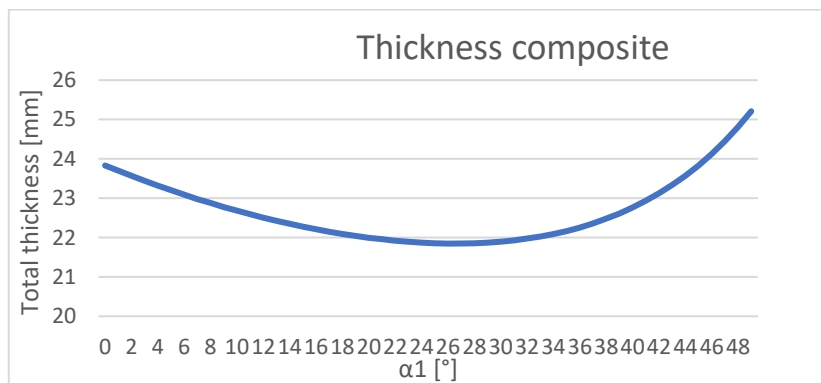


Figura 2-1: Variazione dello spessore in funzione dell'angolo di avvolgimento.

Si ricorda che questi dati sono esclusivamente riferiti alla sola zona cilindrica del serbatoio in composito, e questo è un grosso limite della Teoria del Netting, motivo

per cui si approfondirà lo studio progettuale mediante software 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. La parte del serbatoio realizzata in composito deve avere un peso dell'ordine dei 30 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.

2.2.2 CADWIND

Il software CADWIND è nato nel 1985 in Germania, come progetto di ricerca presso l'Istituto per la Lavorazione delle Materie Plastiche dell'Università di Aachen, dall'esigenza di automatizzare il processo di Filament Winding, che risultava essere una delle tecnologie più importanti e più utilizzate per la realizzazione di parti in materiale composito; tuttavia, era molto costosa ed utilizzata principalmente nel campo dell'industria aerospaziale.

È inoltre stato definito come il software di avvolgimento dei filamenti più sofisticato al mondo. È il risultato di oltre 30 anni di ricerca e sviluppo e si è affermato ripetutamente in un gran numero di progetti e applicazioni di avvolgimento.

I componenti realizzati con CADWIND possono essere trovati ovunque: sulla terraferma, in mare, nelle profondità del sottosuolo, sul fondo degli oceani, nell'aria, nello spazio e persino sul pianeta Marte [10].

Questo programma svolge le seguenti mansioni:

- simula sulla base di un modello fisico il processo di avvolgimento al computer;
- calcola il percorso della fibra e il modello di avvolgimento per qualsiasi geometria del mandrino;

- genera automaticamente il part-program per produrre il pezzo su qualsiasi macchina filament winding o robot;
- può esportare la struttura del laminato calcolata in un software FEA (Finite Element Analysis) in modo che le caratteristiche meccaniche della parte possano essere calcolate immediatamente.

Quest'ultimo punto si rivela essere molto importante; infatti, esportare il laminato all'interno di un software FEA (Finite Element Analysis) permette di 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.

Il concetto di simulazione risulta essere molto più potente delle comuni formule geometriche analitiche, infatti, esso include anche la modellazione dell'attrito che si genera tra la fibra e la superficie del mandrino, il quale determina la deviazione della fibra dalla traiettoria geodetica. Pertanto, offre più possibilità in termini di progettazione e produzione.

Per la simulazione, è utilizzato un modello tridimensionale del mandrino, sul quale il percorso delle fibre viene calcolato ed ottimizzato in modo continuo, in base ai parametri di processo, come l'angolo di avvolgimento desiderato ed il metodo di avvolgimento, inseriti dall'utente.

CADWIND dispone di un proprio generatore integrato di modelli di mandrino, con il quale è possibile generare rapidamente e facilmente le geometrie dei mandrini più comuni per la tecnologia di FW, oppure esso può importare anche modelli di mandrini da altri software CAD tramite il formato DXF; è anche possibile creare modelli di mandrini utilizzando altri software come fogli di calcolo e caricarli direttamente su CADWIND stesso.

L'aggiornamento CADWIND 2006 prevede delle novità ed innovazioni nei campi della progettazione, dell'analisi dei componenti avvolti, della simulazione ed automazione della macchina e dell'avvolgimento con robot. Tutto ciò è stato fatto sempre con l'obiettivo principale di mantenere semplici le cose; infatti, il software è stato sempre riconosciuto per avere un'interfaccia utente molto semplice e stabile.

Inoltre, con questa versione, è possibile visualizzare nello schermo di un computer il processo di avvolgimento come un'animazione in tempo reale. In questo modo l'utente ha una migliore visione del processo e può valutare meglio i relativi parametri per la specifica applicazione.

In primo luogo, per eseguire la simulazione bisogna indicare la geometria del mandrino, sul quale deve essere avvolto il materiale fibro-rinforzato. Successivamente, si simula l'avvolgimento del filamento attorno al mandrino stesso, in base a diversi parametri di processo. Per poter simulare in modo corretto il processo di FW, è necessario inserire in CADWIND i seguenti parametri:

- la posizione e la direzione iniziale di avvolgimento sul mandrino;
- l'area della superficie del mandrino da coprire con il materiale;
- l'angolo di avvolgimento;
- il coefficiente di attrito;
- la larghezza del filamento.

Invece, per calcolare lo spessore ed il peso del laminato, occorre inserire nel software dei dati riguardo la densità delle fibre e della resina, la frazione di volume o di massa delle fibre e la densità lineare delle fibre stesse.

Di seguito, nella Figura 2-2 è mostrata una parte di geometria assialsimmetrica all'interno di CADWIND.

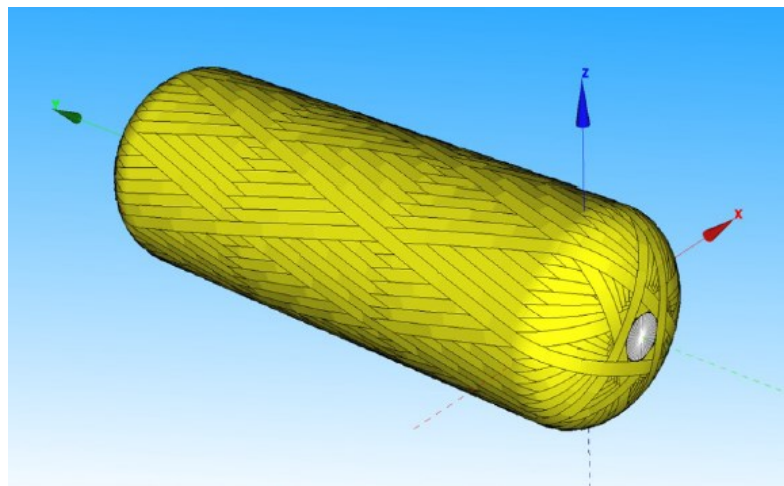


Figura 2-2: Rappresentazione all'interno del software CADWIND di una tipica parte dalla geometria assialsimmetrica [10].

Analizziamo ora gli step principali eseguiti in questo studio per simulare il processo di filament winding.

In primo luogo, è stato importato il mandrino ISOT, la cui geometria è stata accuratamente individuata riferendosi al brevetto europeo per i serbatoi isotensoidi ottenuti per filament winding.

Successivamente sono stati creati dei laminati aventi differenti angoli di avvolgimento. I principali parametri che concorrono a definire la struttura del laminato sono:

- Il *Winding angle* (angolo di avvolgimento della fibra);
- Lo *Start frame*, ovvero il punto dove inizia l'avvolgimento, che nel nostro caso si è assunto sempre pari a 43;
- La *Turning zone*, ossia la zona in corrispondenza della quale il filamento di materiale cambia direzione per tornare indietro scelta in maniera tale da ottenere un manufatto simmetrico;
- Il *Coverage* (o % di copertura), che è stato scelto in modo da evitare un'elevata sovrapposizione del materiale depositato che comporterebbe un aumento di spessore indesiderato;
- Il *Friction factor*, che è pari a 0.3 per tutti i laminati ed è necessario affinché non si assista ad uno scivolamento della banda di composito depositata.

Nella seguente tabella sono riportati tutti i laminati creati in funzione dei parametri appena descritti.

Tabella 2-2: Parametri laminati CADWIND.

Laminato	Angolo di avvolgimento [°]	Turning zone	Coverage
1	10	25-100	110.3
2	20	35-90	111.3
3	30	30-95	106.9
4	40	30-95	131.3
5	45	30-95	108.1

6	50	35-90	125.2
7	55	34-91	119.2
8	60	38-87	104.6
9	65	45-80	123.8
10	70	43-82	141.2
11	80	43-82	185.4
12	85	40-85	138.5

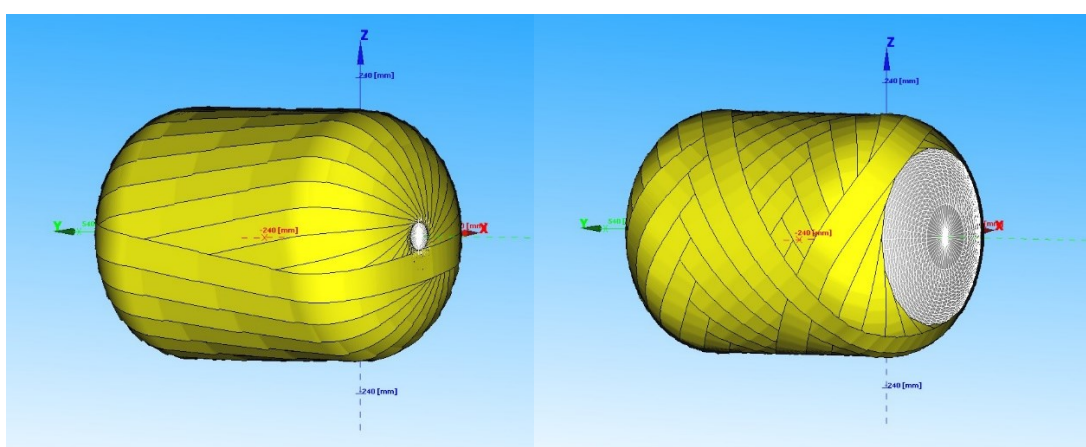


Figura 2-3: Laminati con angoli di avvolgimento a 10 e 65°.

Per definire il processo di filament winding sono necessari ulteriori parametri relativi al materiale composito, ovvero:

- Densità lineare (di un roving): 1000 g/km
- Larghezza (di un roving): 6 mm
- Densità fibre: 1.8 g/cm³
- Percentuale massa fibre: 68 %
- Densità matrice: 1.1 g/cm³
- Spessore ply: 0,16389 mm

Dopo aver definito i parametri di processo per ciascun laminato, sono state realizzate delle prove utilizzando delle stratificazioni differenti. Tramite il comando “Crea FEA

Data”, è stato possibile ottenere le stratificazioni desiderate in un formato .DAT compatibile con il software di analisi Siemens NX.

Il tipo ed il numero di laminati in ogni prova sono state una conseguenza di diverse considerazioni. Infatti:

1. All’aumentare dell’angolo di avvolgimento avremo che si resisterà sempre meglio alle tensioni circonferenziali a scapito di quelle assiali, e allo stesso tempo avremo anche una riduzione dell’area ricoperta dal composito.
2. Per coprire la zona delle calotte quindi, oltre che per resistere alle tensioni assiali, sono necessari strati con angoli di avvolgimento piuttosto bassi, fino ai 10° (questa demarcazione inferiore è dovuta a limiti costruttivi).
3. Inoltre, è importante depositare degli strati a *hoop* ogni N strati, in modo da compattare gli strati sottostanti e rimuovere, eventualmente, la resina in eccesso.
4. Un ultimo fattore da tenere in considerazione è quello di evitare di creare spessori del composito che siano poco uniformi. In effetti, si potrebbe ottenere un serbatoio che sia in sicurezza anche se questo fosse realizzato mediante soli strati a 85° e a 10° (come dimostrato anche dallo studio preliminare), ma questo comporterebbe un eccessivo aumento di spessore nelle Turning Zone.

La stratificazione di partenza (Prova 1) è stata ottenuta anche in funzione di studi precedentemente effettuati su serbatoi di tipo IV (che hanno però un maggior numero di strati di composito, in quanto il liner in HDPE non ha alcuna funzione strutturale). Le stratificazioni studiate in questa trattazione sono riportate nella seguente tabella:

Tabella 2-3: Stratificazione (N laminati per ogni angolo di avvolgimento) delle 4 prove.

	Prova 1	Prova 2	Prova 3	Prova 4
N laminati 85°	4	6	6	5
N laminati 10°	4	6	10	8
N laminati 20°	4	6	6	7
N laminati 30°	4	6	6	6
N laminati 85°	4	6	6	4
N laminati 45°	4	6	6	6

N laminati 60°	4	6	6	6
N laminati 70°	4	6	6	6
N laminati 85°	4	6	6	5

L'interfaccia che presenta il software per la creazione della sequenza dei laminati viene riportata di seguito nella Figura 2-3:

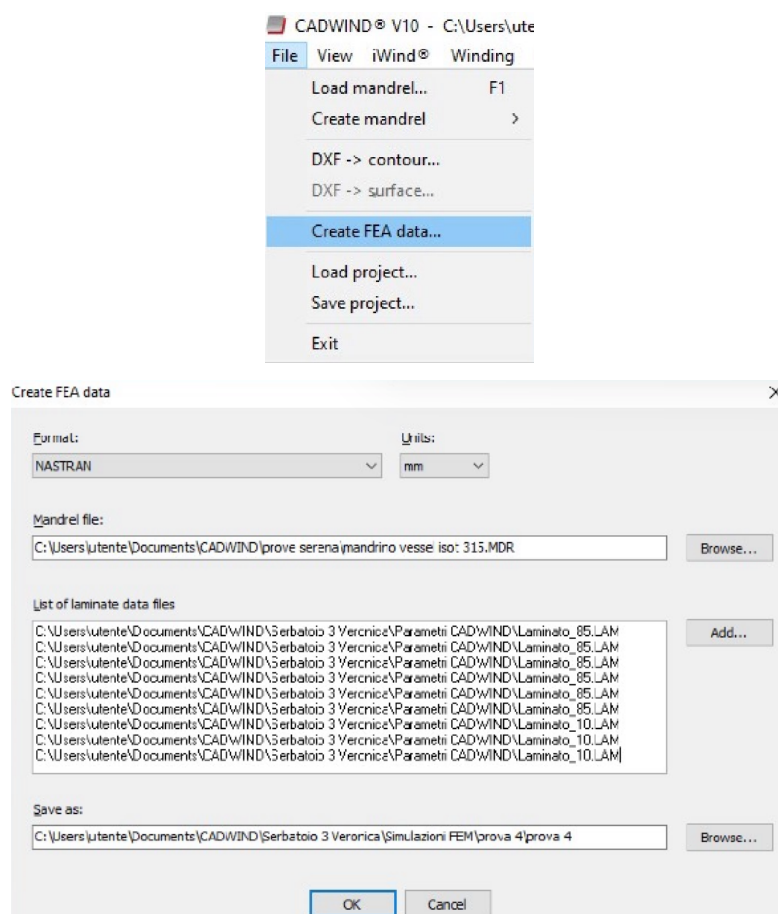


Figura 2-4: Comandi per la creazione del laminato in un file .DAT.

Successivamente, questi file sono stati importati nell'ambiente di simulazione del software Siemens NX con il fine di valutare quale fosse la stratificazione ottimale, derivante da un compromesso tra molteplici fattori, tra cui elevate proprietà meccaniche, sicurezza e peso.

2.2.3 Analisi agli elementi finiti (NX)

Il software NX di Siemens è la soluzione che consente di realizzare i prodotti in modo più rapido ed efficiente rispetto al passato offrendo una nuova generazione di soluzioni di progettazione, simulazione e produzione, che consentono alle aziende di realizzare il valore del *digital twin*.

NX costituisce un elemento di supporto per ogni singola fase del processo di sviluppo prodotto: dal design del concetto alla progettazione e alla fabbricazione, grazie ad un set di strumenti integrato che coordina le discipline, aiutandoti a preservare l'integrità dei dati e la finalità di progettazione ed ottenendo come risultato finale una semplificazione dell'intero processo di sviluppo e realizzazione dei prodotti.

Non si tratta solo di una soluzione CAD perché grazie al modulo NX Mechatronic Concept Designer di Siemens diviene oggi possibile creare il *Virtual Commissioning* ossia la riproduzione virtuale del comportamento fisico di un macchinario o impianto tramite la simulazione software.

L'obiettivo finale dell'emulazione consiste nel permettere ai progettisti o esperti di analisi e simulazione di testare tutti gli elementi progettati e le relative automazioni.

NX MCD di Siemens è lo strumento con potenti funzionalità che consente di creare soluzioni personalizzate sulle esigenze specifiche di un cliente senza dovere sostenere tutti i costi dei test e della prototipazione fisica derivanti da un prodotto customizzato [11].

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.

Questo software è costituito da due ambienti:

1. FEM: fornisce informazioni basate sui dati relativi alle proprietà del materiale, quindi, gli spessori complessivi di ciascun frame e permette la definizione della mesh;
2. SIM: tiene in considerazione i carichi e i vincoli applicati.

Analizziamo ora nel concreto l'*iter* che è stato seguito nel software appena descritto in questo studio di progettazione.

In primo luogo, è necessario importare nel software Siemens NX il file .DAT precedentemente creato su CADWIND. Successivamente, si inseriscono le proprietà del materiale composito: la densità del composito, pari a 1.6 g/cm^3 , e i valori del modulo di Young, del modulo di taglio e il coefficiente di Poisson relativi al rinforzo utilizzato (Toray T700), riportati nella seguente tabella.

Tabella 2-4: *Proprietà del composito.*

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

In seguito, come rappresentato in Figura 2-4, è stato importato anche il liner metallico precedentemente creato sul software di modellazione CAD.

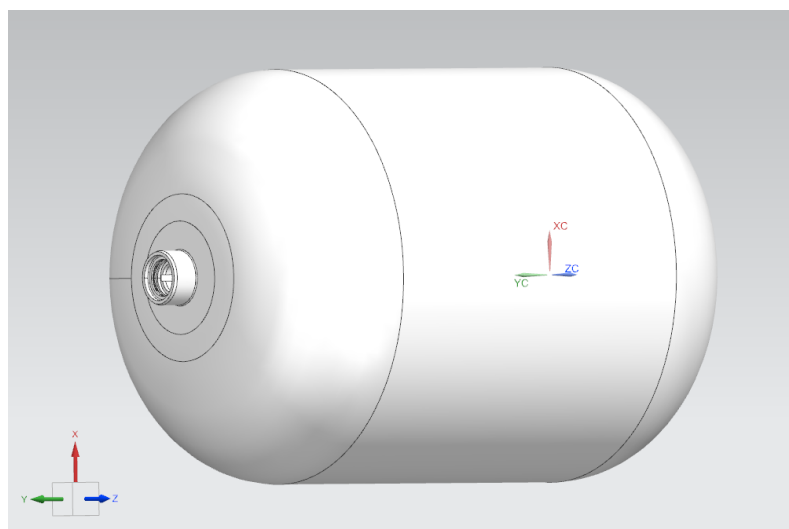


Figura 2-5: *Rappresentazione corpo 3D Liner in alluminio.*

Bisogna poi creare una mesh relativa a questo corpo 3D e lo si fa mediante il comando “3D Tetraedral”, presente nell’ambiente FEM del software. Durante questa operazione, è possibile impostare l’“Element size”, che indica la grandezza degli elementi finiti del corpo. Ovviamente, più è fine, e meglio si analizzano i risultati; però, di contro, risulterà più lento il programma. È importante trovare il giusto compromesso, e quindi, usufruire di elementi finiti più piccoli ove il componente è più sollecitato. Difatti, è stato impostato un *Element Size* pari a 10 mm nella zona cilindrica, e pari a 5 mm nella zona prossima alle calotte (in quanto vengono ritenute zone più critiche).

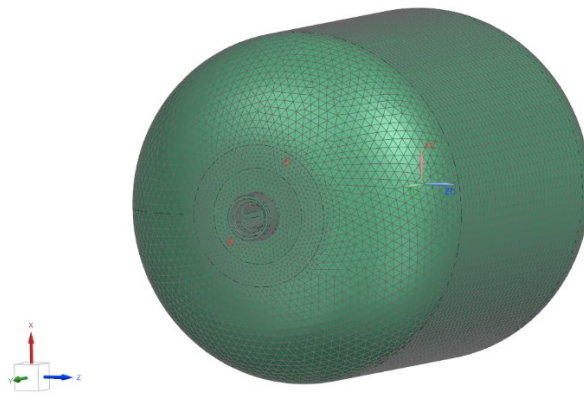


Figura 2-6: Rappresentazione mesh 3D relativa al liner.

Nel software sono quindi ora presenti due mesh:

1. *2D collector*, relativa agli strati di materiale composito importato
2. *3D collector*, relativa al liner.

Pertanto, è necessario ricreare il corpo, ovvero bisogna “legare” le due mesh in modo tale che durante l’analisi il software possa analizzare il comportamento dovuto all’interazione di questi due elementi (composito e liner). Questa operazione viene compiuta nell’ambiente SIM attraverso l’utilizzo del comando *Surface to surface gluing* (Figura 2-6).

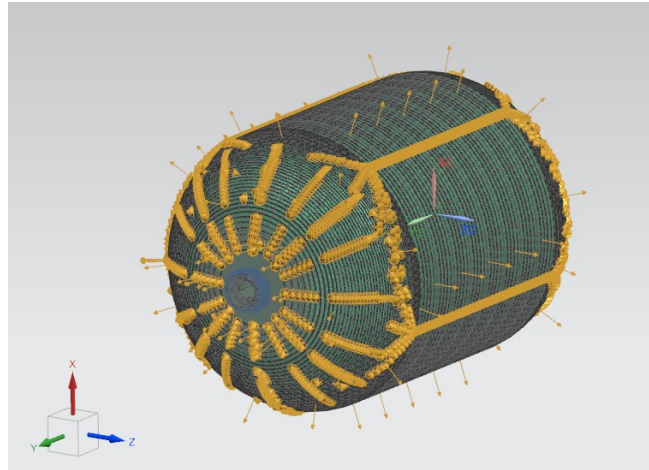


Figura 2-7: Esito del comando *Surface to surface gluing*.

Il passo successivo è stato quello di creare una nuova soluzione (dal comando *Create solution*) e inserire all'interno carichi (ovvero la pressione interna del serbatoio) e vincoli cinematici, utilizzando, rispettivamente, i comandi “Load Type” e “Constraints Type”.

Il valore della pressione interna utilizzato non coincide con quello delle condizioni di esercizio, ovvero 70 MPa, bensì è stato utilizzato il valore della pressione di scoppio, cioè 105 MPa. Per quanto riguarda i vincoli cinematici, si tratta di due incastri, ovvero, dei vincoli fissi posti alle estremità delle calotte. Nelle Figure sottostanti viene illustrato il serbatoio sottoposto al carico di pressione uniformemente distribuito e con i vincoli applicati nell'ambiente di simulazione.

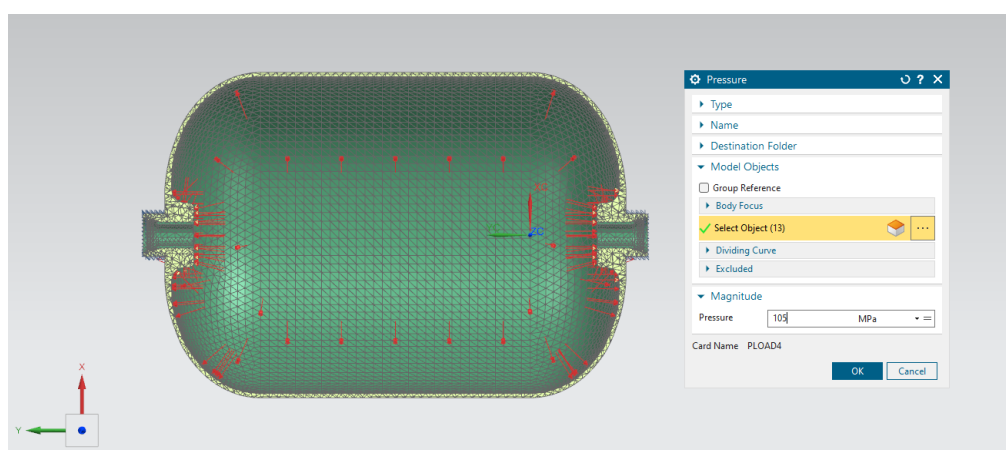


Figura 2-8: Serbatoio nell'ambiente di simulazione con la pressione interna applicata.

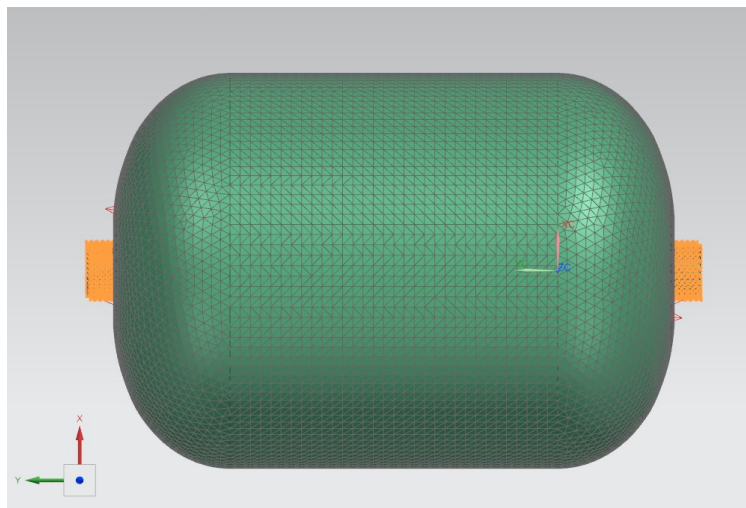


Figura 2-9: Serbatoio con i vincoli fissi applicati.

Infine, attraverso il comando “Solve” è stata avviata la simulazione. La Figura 2-9 sottostante illustra come vengono rappresentati i risultati ottenuti nell’ambiente SIM.

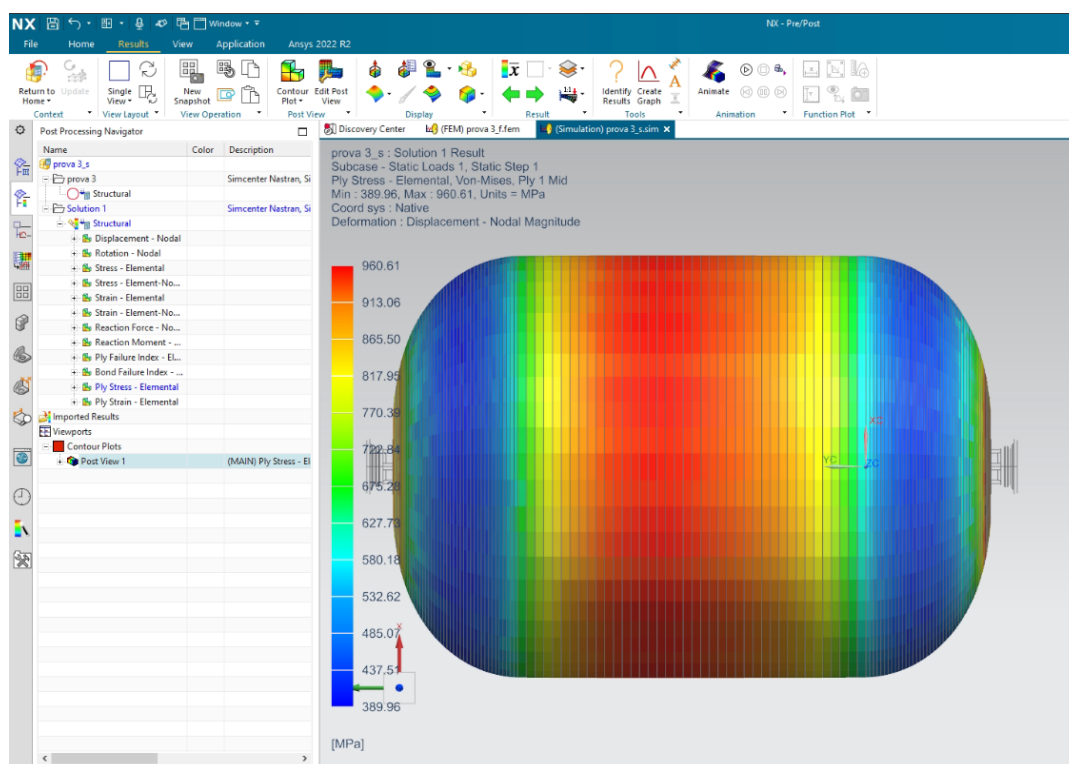


Figura 2-10: Interfaccia del software NX per mostrare i risultati nell’ambiente SIM.

I risultati ottenuti verranno accuratamente analizzati nel successivo capitolo della trattazione.

2.3 Analisi LCA del serbatoio

Uno studio LCA, ai sensi delle norme ISO della serie 14040, si compone di quattro fasi principali, sequenziali:

1. *Goal and Scope Definition*, ovvero definizione degli obiettivi e dell'unità funzionali (ossia correlata alla vita utile del prodotto, sapendo che il consumo di H₂ è di 1 Kg/Km);
2. *LCI – Life Cycle Inventory Analysis*, ossia l'analisi dell'inventario del ciclo di vita (eco-bilancio) che consiste nella raccolta e analisi di tutti i dati ambientali in input e di output (massa e consumo energetico) legati ad un prodotto lungo l'intero ciclo di vita, dall'acquisizione e consumo delle materie prime ed energetiche, alle emissioni, al fine vita, mediante riciclaggio, recupero o smaltimento finale;
3. *LCIA – Life Cycle Impact Assessment*, o “Valutazione degli Impatti del ciclo di vita” dove si stimano gli indicatori di pressione ambientale, quali: cambiamenti climatici, smog, esaurimento delle risorse, acidificazione, effetti sulla salute umana, etc. correlati agli input e agli output di natura ambientale attribuibili al ciclo di vita del prodotto esaminato;
4. *Interpretation*, ovvero l'analisi e interpretazione dei risultati, che si traducono in raccomandazioni e interventi per la minimizzazione degli impatti ambientali.

Ai fini di una corretta analisi del ciclo di vita di un bene/servizio è dunque chiaro come sia fondamentale poter disporre di dati di dettaglio, coerenti rispetto alle effettive filiere produttive di riferimento e di elevata qualità, nonché di un'azione sistematica di raccolta dei medesimi, perché possano costituire un affidabile punto di partenza per le valutazioni successive [12].

Prima di analizzare singolarmente le 4 fasi sopracitate, verrà illustrato il software SimaPro utilizzato per questa analisi.

2.3.1 *SimaPro*

Nel presente lavoro, come supporto all' analisi LCA. si è adoperato il software SimaPro 7.3.3, uno dei software più utilizzati a livello internazionale e sviluppato dalla PRè (Product Ecology Consultants - NL) per conto del ministero dell'ambiente olandese.

L'obiettivo principale di questo software è quello di approfondire materiali e processi che individuano elementi di maggior impatto ambientale, andando a lavorare sull'ottimizzazione dei processi più critici al fine di migliorarne le prestazioni ambientali. Durante uno studio di LCA sussiste la necessità di lavorare con un set di dati consistente e documentato. I dati per uno studio di LCA dovrebbero essere raccolti, presso il committente. Nel caso in cui i dati raccolti non siano sufficienti, ci si può riferire a specifici database per LCA: le Banche dati.

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.

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.

SimaPro 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.

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.

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:

1. *ICCP GWP 2021*
2. *ReCiPe 2016*.

2.3.2 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 i 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".

Le varie categorie d'impatto sono le seguenti:

- fossile (incluso l'assorbimento di CO₂)
- assorbimento di anidride carbonica (incluso l'assorbimento di CO₂)
- emissioni biogeniche (incluso l'assorbimento di CO₂)
- trasformazione del territorio (incluso l'assorbimento di CO₂)
- fossile
- emissioni biogeniche
- trasformazione del terreno.

2.3.3 ReCiPe 2016

ReCiPe è uno dei metodi di valutazione dell'impatto più recenti e aggiornati a disposizione degli operatori LCA. Il metodo affronta una serie di problematiche ambientali a livello di *midpoint* (vengono considerate diciotto categorie d'impatto che sono focalizzate in specifici problemi ambientali) e poi aggrega i midpoint in una serie di tre categorie di *endpoint* (vengono forniti dati relativi soltanto a tre categorie d'impatto).

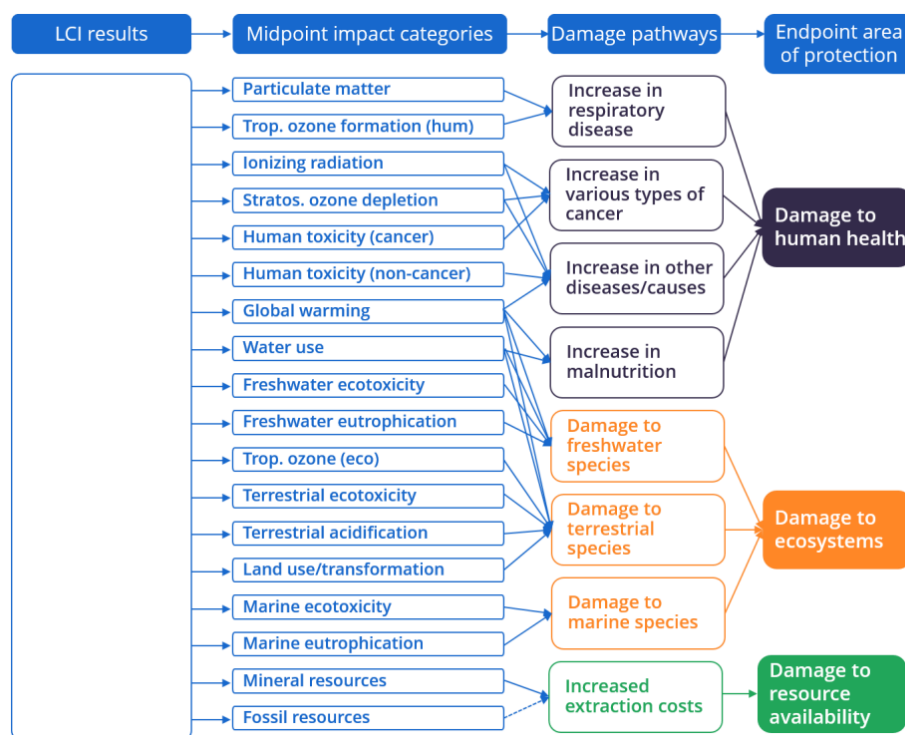


Figura 2-11: Rappresentazione delle categorie d'impatto a livello di Midpoint e Endpoint. Fonte: [13].

Quindi possiamo distinguere i due metodi come segue:

1. Metodi *midpoint* misurano un effetto prima che si verifichi il danno a una delle aree di protezione. Hanno un'incertezza relativamente bassa, ma i risultati tendono a essere più difficili da interpretare dato il numero e la complessità delle categorie incluse. I punteggi d'impatto intermedi delle valutazioni del ciclo di vita sono spesso presentati in unità difficili da comprendere, come kg di CO₂ equivalenti o CTUh.
2. Metodi *endpoint* sono una misura del danno, alla fine della catena causa-effetto, causato da un fattore di stress in termini di anni di vita umani persi e di anni vissuti con disabilità, specie scomparse e risorse perse. A causa dei passaggi aggiuntivi richiesti per convertire gli impatti da midpoint a endpoint introducono ulteriore incertezza, ma rendono i risultati più accessibili ai non esperti. Inoltre, i risultati degli endpoint possono essere aggregati, in modo che un unico punteggio esprima tutti gli impatti che un determinato prodotto ha sull'ambiente. Ciò richiede fasi di normalizzazione e ponderazione, che ancora

una volta aumentano l'incertezza e, attraverso la ponderazione, introducono scelte soggettive.

Un modo per rendere più facile l'interpretazione di tali punteggi è normalizzarli: dividere i punteggi per i punteggi di una situazione di riferimento. La normalizzazione converte unità complicate in frazioni di punteggio di un cittadino medio per categoria di impatto (ReCiPe offre diversi fattori di normalizzazione).

La ponderazione consiste nel moltiplicare i risultati normalizzati di ciascuna categoria di impatto con un fattore di ponderazione che esprime l'importanza relativa della categoria di impatto. I risultati ponderati hanno tutti la stessa unità e possono essere sommati per creare un unico punteggio per l'impatto ambientale di un prodotto (ReCiPe offre diversi set di pesi).

Si analizzano ora le quattro fasi distinte dell'analisi LCA definite precedentemente.

2.3.4 Definizione dell'obiettivo e degli scopi

La definizione dell'obiettivo e dell'ambito di una LCA fornisce una descrizione del sistema di prodotto in termini di confini del sistema, scopo e unità funzionale. L'obiettivo di uno studio LCA specifica l'applicazione prevista dei risultati successivi, le ragioni per la generazione di questi risultati e il pubblico previsto per questi risultati. Nel caso in esame, il motivo per cui si conduce lo studio è quello di valutare gli impatti ambientali relativi al serbatoio di tipo III in esame, potendo individuare se il materiale composito costituisca una scelta maggiormente sostenibile rispetto all'utilizzo di un materiale convenzionale e inoltre, si vogliono identificare le opportunità di miglioramento del prodotto.

L'unità funzionale è la base importante che consente di confrontare e analizzare beni o servizi alternativi. Lo scopo principale di un'unità funzionale è fornire un riferimento a cui sono correlati gli input e gli output. 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.

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. I processi unitari e i flussi che vengono inclusi nei confini del sistema e, quindi, che vengono sottoposti ad analisi sono:

- 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.

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.

2.3.5 Analisi dell'Inventario (LCI)

Questa fase comprende tutte le attività volte alla raccolta ed elaborazione dei dati relativi a tutti gli input e output (sia in termini di massa che di energia) del sistema produttivo considerato.

I dati sono stati ottenuti in modalità differenti, dunque, possono essere classificati in

- Primari: calcolati direttamente sulla base di informazioni a disposizione;
- Secondari: ricavati a seguito di approfondite ricerche in letteratura e dal database utilizzato, ovvero, Ecoinvent.

Relativamente ai dati dell'inventario, sono state fatte 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 consumi energetici della produzione delle fibre di carbonio e della resina epossidica sono state ricavate in letteratura.
- Informazioni relative 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 [14].
- Dallo stesso articolo, 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.
- 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.
- Il quantitativo di alluminio necessario per la realizzazione dei boss in alluminio è stato stimato sulla base di informazioni trovate in letteratura 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 trasporto dell'alluminio per il liner è stato calcolato mediante Google Maps considerando la distanza media tra delle aziende che producono alluminio 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.

Verrà ora eseguita l'analisi dell'inventario in maniera dettagliata per tutte le fasi del ciclo di vita del prodotto, ovvero:

1. *Fase dei materiali*: i materiali utilizzati nella realizzazione del serbatoio sono il materiale composito per la parte esterna strutturale e l'alluminio per il liner interno. Dalla fase di ottimizzazione progettuale del serbatoio è stato ottenuto il valore di peso che è pari a 33,3 kg; inoltre, conoscendo il valore della frazione in massa di rinforzo e matrice, è stato possibile ricavare le quantità effettive di resina epossidica e fibra di carbonio riportate nella Tabella 2-5. Il quantitativo di alluminio necessario alla realizzazione del liner è stato stimato tramite valutazioni del volume del serbatoio (sommando il volume della zona cilindrica di lunghezza pari a 315 mm ed il volume delle due calotte

approssimate a due semisfere di raggio 190 mm; considerando inoltre uno spessore del liner di 5), successivamente moltiplicato per la densità dell'alluminio. Nella seguente tabella si riportano i quantitativi di materiale da utilizzare.

Tabella 2-5: Dati relativi al quantitativo di materiale per realizzare il serbatoio.

COMPONENTI	MATERIALE	QUANTITÀ
Serbatoio	Fibre di carbonio	22,64 Kg
	Resina epossidica	10,66 Kg
Liner	Alluminio	10,4 Kg

2. *Fase di produzione:* grazie ai dati forniti dal database Ecoinvent, i consumi energetici relativi ai processi di produzione delle fibre di carbonio e della resina epossidica sono già noti; mentre vengono modellati i processi di produzione del liner, dei boss, del serbatoio (filament winding) e del towpreg. Nella seguente tabella vengono riportati i consumi energetici e i materiali di input necessari ai processi di produzione definiti.

Tabella 2-6: Dati relativi a consumi energetici e materiali dei processi di produzione.

PROCESSO DI PRODUZIONE	ELEMENTO	QUANTITÀ
Filament winding	Consumo energetico	2,32 kWh/kg di composito
Processo di cura	Consumo energetico	1,08 kWh/kg di composito
	PA66	0,03 kWh/kg di composito
	PET	0,02 kWh/kg di composito

	PTFEE	0,0035 kWh/kg di composito
	Organic Solvent	0,002 kWh/kg di composito
Pre-pregging (valori per 1 m di towpreg)	Consumo energetico (riscaldamento macchina)	0,0005 kWh
	Consumo energetico (riscaldamento resina)	0,54 Wh
	Consumo energetico (fase operativa della macchina)	0,0007 kWh
	Film distaccante	0,55 g
	Acetone (pulizia della macchina)	0,01568 g

3. *Fase d'uso*: si tiene conto unicamente del processo di produzione dell'idrogeno poiché le emissioni da esso originate sono considerate sostanzialmente nulle in quanto l'idrogeno si libera in atmosfera sottoforma di vapore acqueo. Nell'articolo [15], sono riportati i consumi del processo relativi all'intero autoveicolo. Per cui è stato rapportato il consumo energetico di 50 kWh /kg sul peso del serbatoio mediante la seguente proporzione:

$$33,3 : 800 = x : 50$$

dove 33,3 Kg è il peso del serbatoio, 800 Kg è il peso dell'autoveicolo citato nell'articolo, e 50 kWh /kg è il consumo per unità di massa. In questo modo si ottiene che il consumo energetico della produzione di idrogeno rapportato al serbatoio è di 2,08 kWh/kg di H₂. Questo valore andrà poi moltiplicato per i Kg di idrogeno che definiscono la vita utile del veicolo; considerando che l'autoveicolo operi per 250000 km, il quantitativo di idrogeno necessario sulla

base di un consumo di 100 kg al km è di 2500 kg; pertanto, come mostrato nella Tabella 2-7 il consumo energetico complessivo è pari a 5203 kWh.

Tabella 2-7: *Dati relativi al consumo energetico del processo di produzione dell'idrogeno.*

PROCESSO	ELEMENTO	QUANTITÀ
Elettrolisi ad acqua	Consumo energetico	5203 kWh

4. *Fase di trasporto:* i dati relativi al trasporto sono stati ottenuti facendo delle assunzioni riguardo alle eventuali aziende che producono i materiali considerati e conoscendo il punto di arrivo, ovvero, l'azienda produttrice del serbatoio, situata nel centro Italia. Nella Tabella 2-8 vengono riportati i dati relativi al trasporto.

Tabella 2-8 *Dati relativi al trasporto dei materiali e del componente.*

TRASPORTO	DISTANZA [km]	TIPOLOGIA	PROVENIENZA
Fibre di carbonio	150	Truck 16 – 32 ton	Centro italia
	16 800	Transoceanic ship	Giappone
Resina epossidica	1200	Truck 16 – 32 ton	Germania
Alluminio	360	Truck 16 – 32 ton	Centro-nord Italia

Serbatoio (al cliente)	900	Truck 16 – 32 ton	Germania
-------------------------------	-----	-------------------	----------

5. *Fine vita*: gli scenari di fine vita sono diversi in base al tipo di materiale. Lo scenario di fine vita dell'alluminio prevede un riciclo all' 80%. Al contrario, le fibre di carbonio e la resina epossidica vengono smaltite in discarica. Nella Tabella 2-9 sono riportati i dati relativi alla fase di fine vita.

Tabella 2-9: *Dati relativi alla fase di fine vita.*

MATERIALE	SCENARIO	TIPOLOGIA TRASPORTO	DISTANZA [km]
Alluminio	Riciclato all'80%	Truck 16 – 32 ton	360
Fibre di carbonio	Smaltimento in discarica	Truck 16 – 32 ton	200
Resina epossidica	Smaltimento in discarica	Truck 16 – 32 ton	200

2.3.6 Valutazione degli impatti

Gli input e gli output del sistema produttivo individuati nella fase precedente vengono convertiti in potenziali impatti ambientali applicando ai dati di inventario i relativi fattori di caratterizzazione. Si ottiene in questo modo un profilo dei potenziali impatti ambientali, costituito dai risultati delle diverse categorie d'impatto considerate [15]. Le norme di riferimento contemplano anche una successiva elaborazione (facoltativa) dei risultati ottenuti, mediante le operazioni di:

- normalizzazione (i valori di ogni categoria vengono espressi in funzione di un valore di riferimento),
- raggruppamento (smistamento e classificazione delle categorie di impatto),

- pesatura (conversione e aggregazione degli indicatori applicando fattori di pesatura).

2.3.7 Interpretazione dei risultati

La fase di interpretazione dei risultati permette di derivare conclusioni e raccomandazioni robuste, sulle quali, ad esempio, basare una strategia comunicativa e/o un processo di eco-design.

I principali elementi dell'interpretazione dei risultati sono:

- identificazione degli hot-spot (vengono individuati i materiali/processi che contribuiscono maggiormente agli impatti complessivi);
- valutazioni sulla completezza e robustezza del modello (come analisi di sensitività e incertezza);
- definizione delle conclusioni dello studio, anche alla luce delle limitazioni presenti.

Lo strumento del *Life Cycle Assessment* consente quindi l'ottenimento di una comprensione chiara, trasparente e scientifica delle problematiche ambientali legate ai prodotti e servizi erogati al mercato in un'ottica di ciclo di vita così da permettere la programmazione di azioni per il miglioramento (eco-design) [15].

Capitolo 3 - RISULTATI E DISCUSSIONI

3.1 Ottimizzazione progettuale del serbatoio

In questo capitolo si procede con l'analisi dei risultati relativi alle 4 prove effettuate, al fine di individuare la laminazione ottimale impiegabile per la realizzazione del serbatoio.

1) Prova 1:

La laminazione relativa alla prova 1, che presenta un numero di plies pari a 36, è la seguente: [85₄/10₄/20₄/30₄/85₄/45₄/60₄/70₄/85₄].

È necessario analizzare tensioni e deformazioni relative sia al materiale composito, sia al liner di alluminio (essendo l'alluminio molto duttile, ci focalizzeremo in particolare sulle tensioni). Di seguito vengono riportati i risultati ottenuti su NX riguardanti le tensioni dei due materiali:

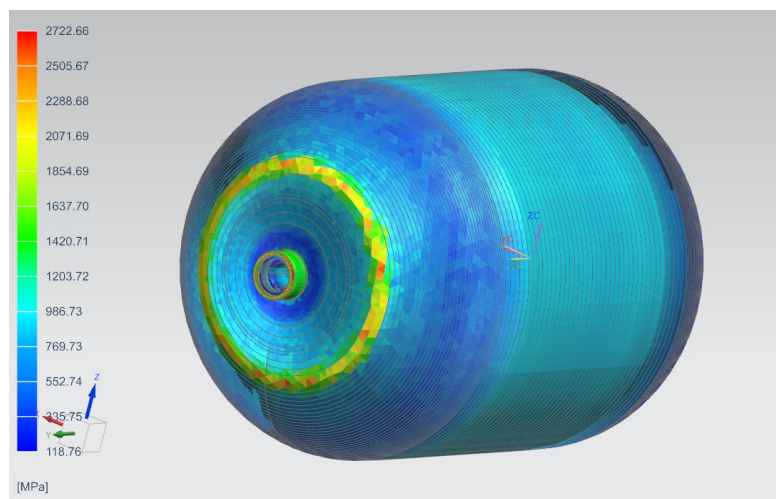


Figura 3-1: Risultati in termini di tensioni [MPa] relative al liner in alluminio.

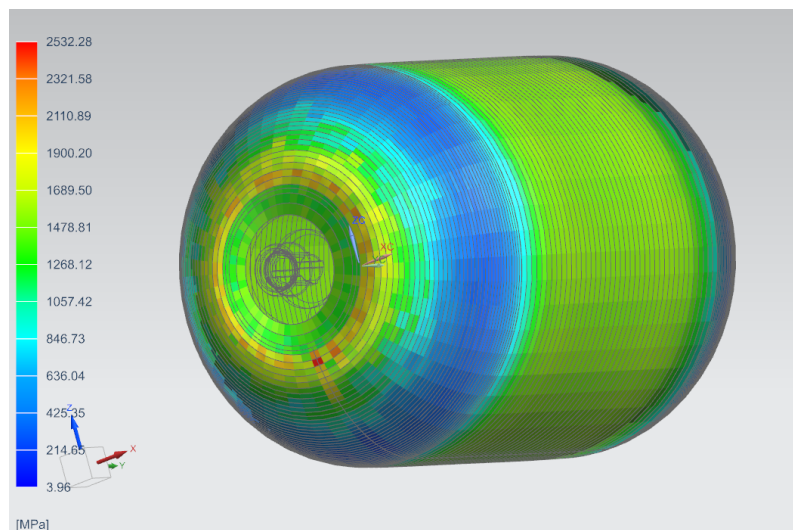


Figura 3-2: Risultati in termini di tensioni [MPa] relative al composito per un ply a 20°.

Come si può osservare dalle figure soprariportate, le tensioni relative all'alluminio sono di gran lunga superiori alla tensione di snervamento (pari circa a 450 MPa), mentre le tensioni relative al composito sono accettabili nella zona cilindrica ma, in prossimità delle calotte, si arrivano a tensioni troppo prossime a quella di rottura del composito, pari a 2790 MPa (calcolata con la regola delle miscele). Per quanto riguarda le deformazioni del composito si hanno i seguenti risultati:

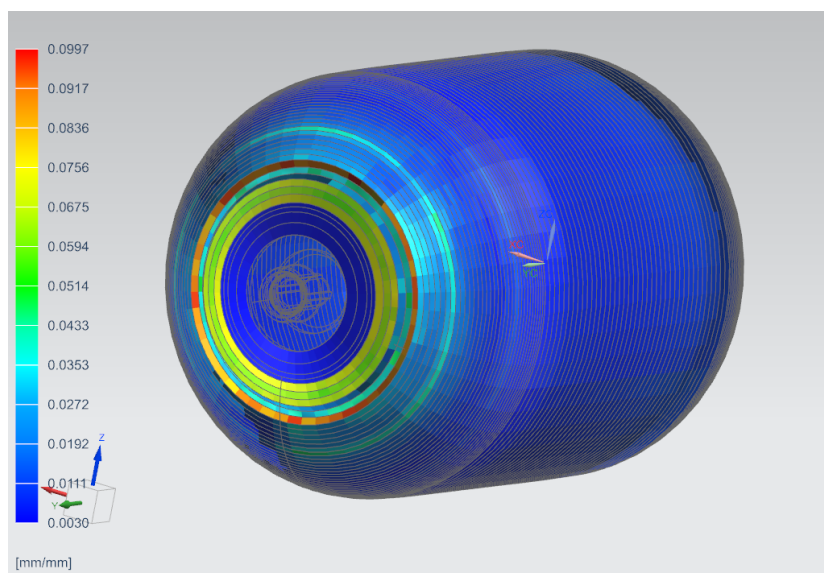


Figura 3-3: Risultati in termini di deformazioni relative al composito per un ply a 20°.

La criticità principale relativa a questo laminato è riscontrabile nei valori delle deformazioni sia nella zona delle calotte, dove si raggiunge una deformazione massima pari a 0,0997 (Figura 3-3), che è più di un ordine di grandezza superiore a quella di rottura del composito (ovvero 0,007), sia nella zona cilindrica in cui si hanno deformazioni più modeste rispetto alle calotte, ma comunque superiori a 0,007.

Per questo motivo nella prova successiva sono stati aumentati i plies sia ad angoli di avvolgimento alti, sia ad angoli più bassi per poter rientrare in sicurezza.

2) Prova 2:

Nella prova 2 si sono quindi volute rinforzare sia la zona delle calotte, sia la zona cilindrica, per cui la sequenza del laminato scelto è la seguente: $[85_6/10_6/20_6/30_6/85_6/45_6/60_6/70_6/85_6]$, con un totale di 54 plies.

Grazie al rinforzo fornito dagli ulteriori plies, si è risolto il problema dello *stress* relativo al composito, ma ancora non si è in sicurezza in termini di deformazioni; infatti, si ha che si raggiungono deformazioni massime nella zona delle calotte (ovvero la più critica) pari a 0,01076.

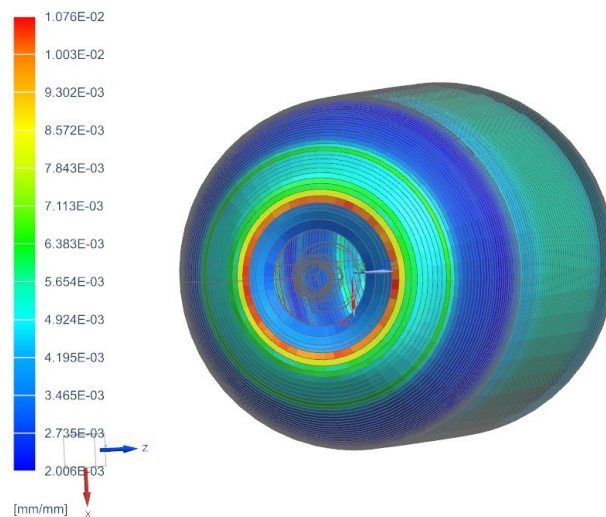


Figura 3-4: Risultati in termini di deformazioni relative al composito per un ply a 20°.

Per quanto riguarda l'alluminio, nonostante sia stato aumentato notevolmente il numero di plies, non si rientra comunque in sicurezza; infatti, si raggiungono tensioni di 900 MPa.

3) Prova 3:

Per risolvere i problemi riscontrati nella prova 2 relativi alla zona delle calotte, sono stati aggiunti 4 ulteriori plies a basso angolo d'elica (10°) per poter resistere meglio alle tensioni assiali. La sequenza del laminato diventa quindi la seguente: $[85_6/10_{10}/20_6/30_6/85_6/45_6/60_6/70_6/85_6]$, per un totale di 60 plies.

Per verificare che si è in sicurezza anche relativamente alle tensioni del composito, è necessario analizzare le tensioni relative ai vari angoli d'elica. Riportiamo alcuni di questi risultati nelle figure sottostanti, in particolare per ply relativi ad angoli di avvolgimento rispettivamente di 20° e 85° :

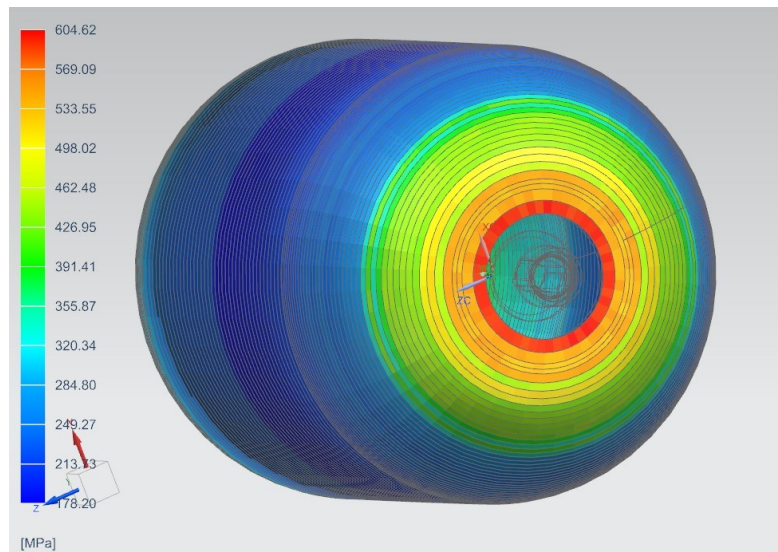


Figura 3-5: Risultati in termini di tensioni [MPa] relative al composito per un ply a 20° .

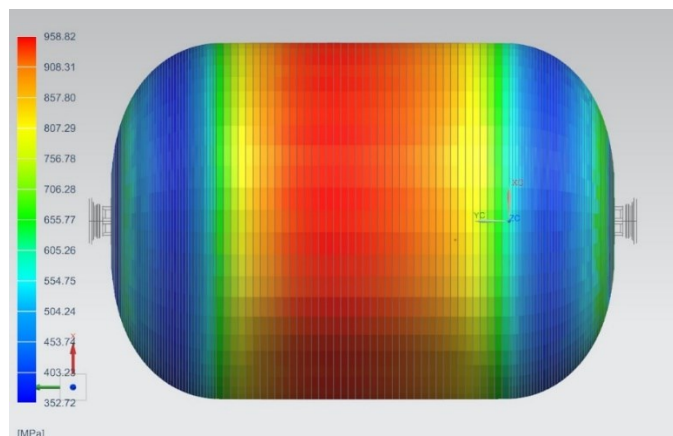


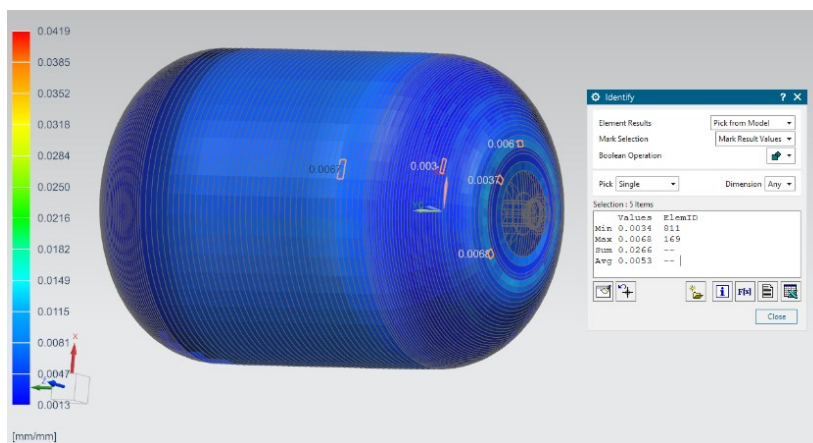
Figura 3-6: Risultati in termini di tensioni [MPa] relative al composito per un ply a 85°.

Si è arrivati ad una condizione di sicurezza, però sorgono altre problematiche relative al peso del composito. Il peso del serbatoio è di 37,6 Kg e quindi supera il valore limite trovato in letteratura per un serbatoio di tipo III.

Essendo molto in sicurezza nella zona cilindrica, possono essere quindi diminuiti gli strati del composito ad alto angolo di avvolgimento, con il fine di rientrare nel range ideale di peso del serbatoio (tra i 30 e 35 Kg), accertandosi di essere comunque in sicurezza. Si riporta quindi di seguito la stratificazione definitiva.

4) Prova 4:

Infine, sono stati ridotti i plies a 85° per le motivazioni soprariportate, fino a raggiungere la seguente laminazione ottimale: [85₅/10₁₀/20₇/30₆/85₄/45₆/60₆/70₆/85₅]. Di seguito vengono riportati i valori di *stress* e *strain* per il materiale composito relativi a due angoli di avvolgimento, ovvero 10° e 85°:



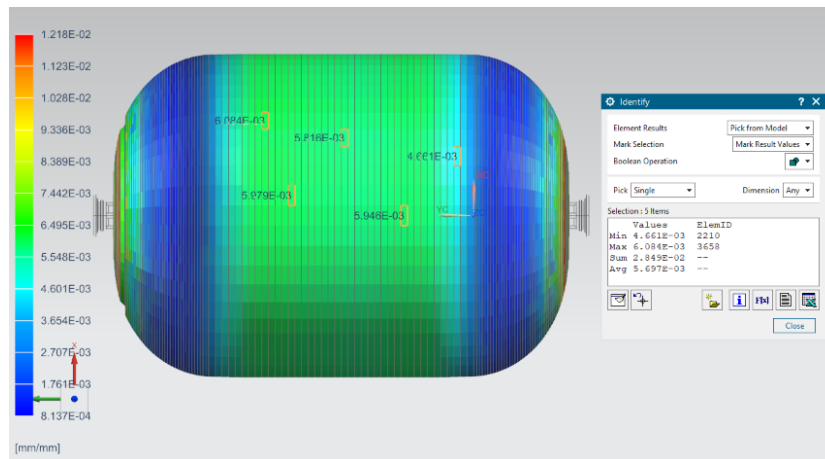


Figura 3-7: Valori di deformazione relativi rispettivamente a ply di 10° e 85°.

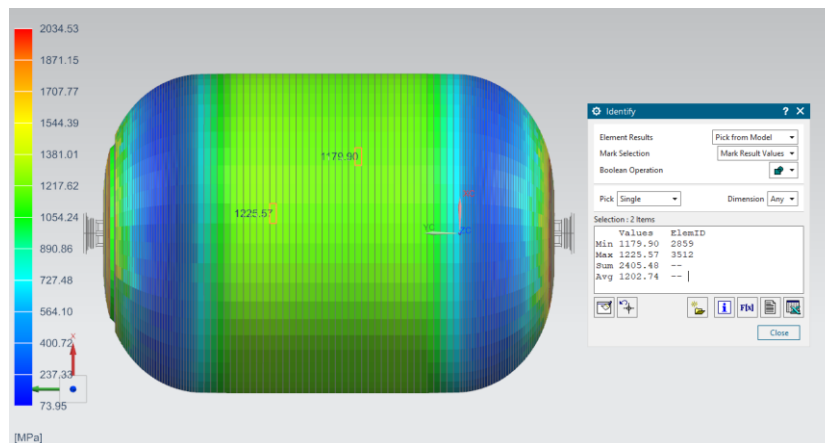
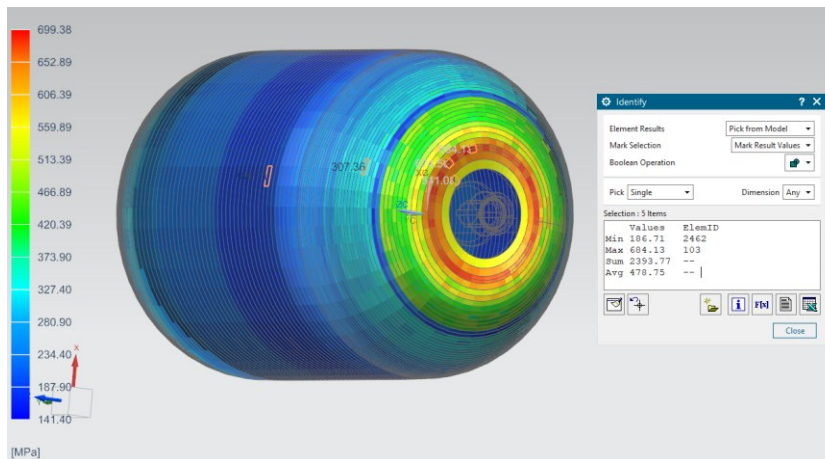
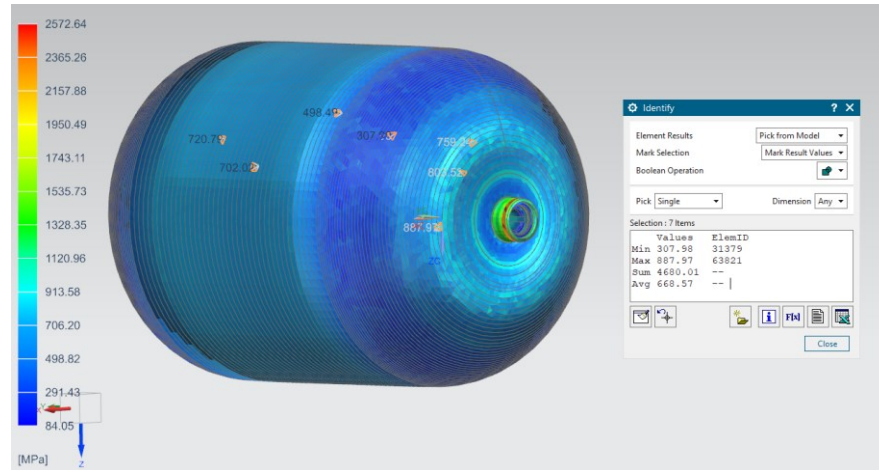


Figura 3-8: Valori di tensione relativi rispettivamente a ply di 10° e 85°.

Questa configurazione consta di 57 laminati, per un peso totale pari a 33,1 Kg. Considerando che il liner in alluminio ha un peso di 10,4 Kg, il peso complessivo di tutto il serbatoio sarà di 43,7 Kg.

Inoltre, si ha che la tensione massima nella zona cilindrica è di circa 1200 MPa (valore molto inferiore rispetto alla tensione a rottura del composito) e quindi in sicurezza e la deformazione massima è di circa 0,0068 (poco inferiore di 0,007 ma comunque in sicurezza).

Per quanto riguarda l'alluminio invece, si ha un comportamento piuttosto anomalo:



Nonostante siano state rinforzate, attraverso il composito, le zone delle calotte, le tensioni dell'alluminio rimangono molto elevate, superiori a quelle di snervamento dell'alluminio. Non potendo aggiungere ulteriore materiale di rinforzo (a causa del peso eccessivo che avrebbe il serbatoio), si può concludere che l'alluminio subisce inevitabilmente un fenomeno di plasticizzazione. A causa di questo fenomeno, come osservato anche in altri studi della letteratura scientifica, non è più valida l'ipotesi lineare-elastica e, per un'analisi più dettagliata, dovrebbero essere analizzate le tensioni e le deformazioni residue dopo lo scarico e la deformazione durante il carico successivo. Si può dimostrare che l'applicazione della soluzione basata sulla teoria della plasticità con incrudimento traslazionale porta a un migliore accordo tra dati teorici e sperimentali, in particolare durante i processi di scaricamento e ricarica.

Il modello matematico proposto (basato sull'analisi lineare-elastica) può comunque essere utile per una valutazione approssimativa della stratificazione migliore, anche se, a causa della plasticizzazione, la tensione reale dell'alluminio sarà minore di quella trovata con questo studio.

3.2 Interpretazione dei risultati dell'analisi LCA

Infine, si procede con l'analisi dei risultati ottenuti nella fase di LCIA.

Come visto nel capitolo precedente, questo metodo di analisi serve per quantificare le emissioni dei gas serra nell'atmosfera in termini di CO₂ equivalente di tutte le fasi del ciclo di vita del componente, nonché del fine vita. In questo paragrafo verranno analizzati i risultati ottenuti dall'analisi LCA, focalizzando l'attenzione principalmente sul metodo *ICCP GWP 100*.

Di seguito, si confrontano i valori d'impatto ambientale relativi ai seguenti contributi:

- Liner metallico
- Materiale
- Produzione
- Trasporto
- Fase d'uso
- Fine vita.

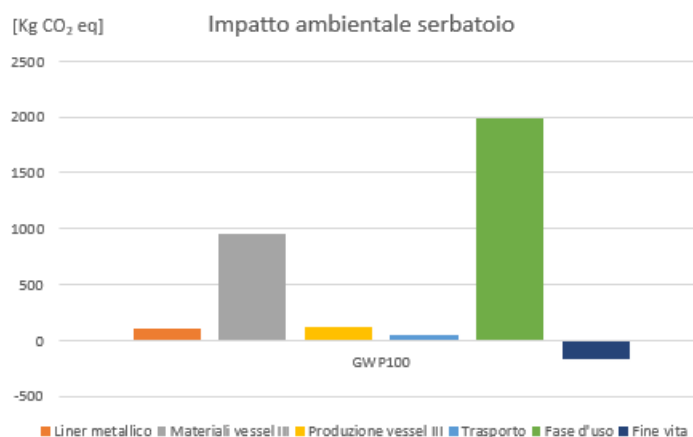


Figura 3-9: Grafico relativo all'impatto ambientale del serbatoio GWP 100.

Tabella 3-1: Kg CO₂ equivalenti relativi ai vari contributi.

Categoria di impatto	Unità	Liner metallico	Materiale	Produzione	Trasporto	Fase d'uso	Fine vita	Totale
GWP100	kg CO2-eq	108.57	949.39	113.57	51.13	1986.48	-163.02	3046.14

Nonostante il composito non possa essere riutilizzato o riciclato, a contribuire maggiormente sugli impatti ambientali complessivi è stata la Fase d'uso legata alla produzione dell'idrogeno necessario per gli anni di vita utile considerati nell'analisi. D'altra parte, il contributo meno impattante è quello relativo al Trasporto, con la produzione di “soli” 51 Kg di CO₂ equivalente.

Inoltre, si può osservare che al Fine vita corrisponde un contributo negativo di Kg di CO₂ in quanto, grazie al riciclo dell'alluminio, si riduce l'impatto ambientale complessivo.

Di seguito riportiamo l'analisi più dettagliata di alcuni dei contributi sopracitati:

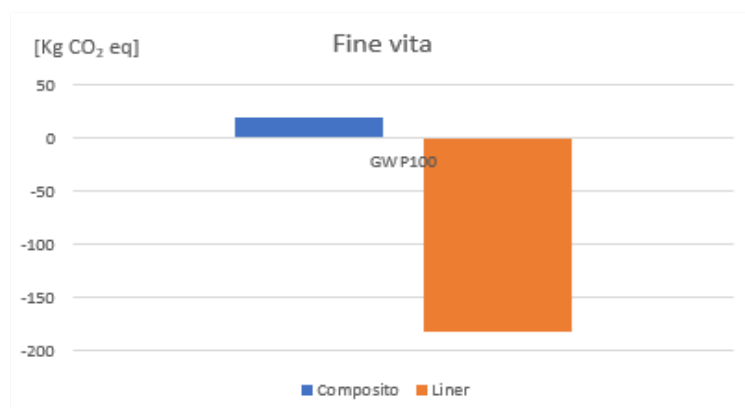


Figura 3-10: Impatto ambientale relativo al fine vita.

Tabella 3-2: Kg CO₂ equivalenti relativi al fine vita.

Categoria d'impatto	Unità	Composito	Liner	Totale
GWP100	kg CO ₂ -eq	18.41	-181.43	-163.02

Dagli scenari di fine vita del liner e del composito, come mostrato dalla Figura 3-10, si può notare che il riciclo dell'alluminio contribuisce maggiormente alla riduzione (considerazione dettata dal valore negativo del suo contributo) dell'impatto ambientale complessivo rispetto al composito.

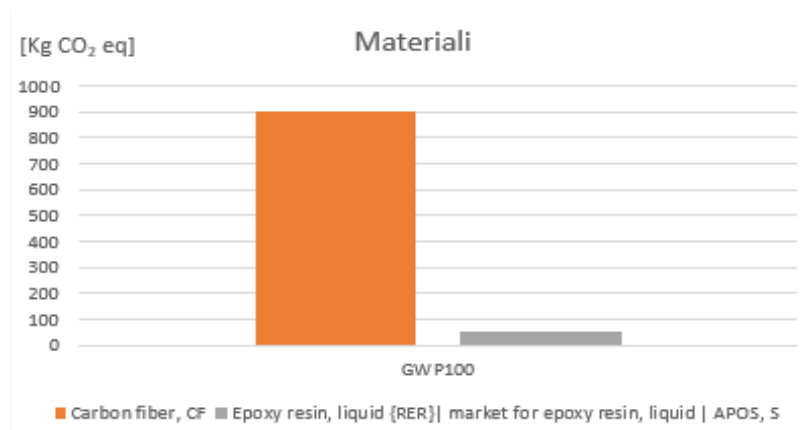


Figura 3-11: Impatto ambientale relativo ai materiali.

Tabella 3-3: Kg CO₂ equivalenti relativi ai materiali.

Categoria d'impatto	Unità	Fibra di carbonio	Resina epossidica	Totale
GWP100	kg CO2-eq	901.72	47.683	949.39

Dalla Figura 3-11 si può notare che tra i materiali del composito, ovvero fibra di carbonio e resina epossidica, è il carbonio ad avere un maggiore impatto, con un contributo pari a 901.7161 Kg di CO₂ equivalente.

Possono essere graficati anche i contributi del liner e della Produzione nel seguente modo:

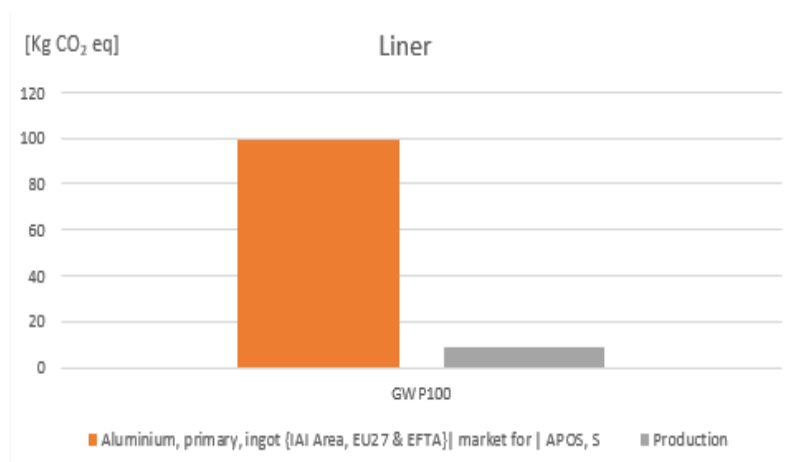


Figura 3-12: Impatto ambientale relativo al liner.

Tabella 3-4: Kg CO2 equivalenti relativi al liner.

Categoria d'impatto	Unità	Alluminio	Produzione	Totale
GWP100	kg CO2-eq	99.664849	8.910761	108.5756

In merito al liner, si ha che l'impatto più rilevante è dato proprio dal materiale di cui è composto, ovvero l'alluminio, piuttosto che dalla sua produzione.

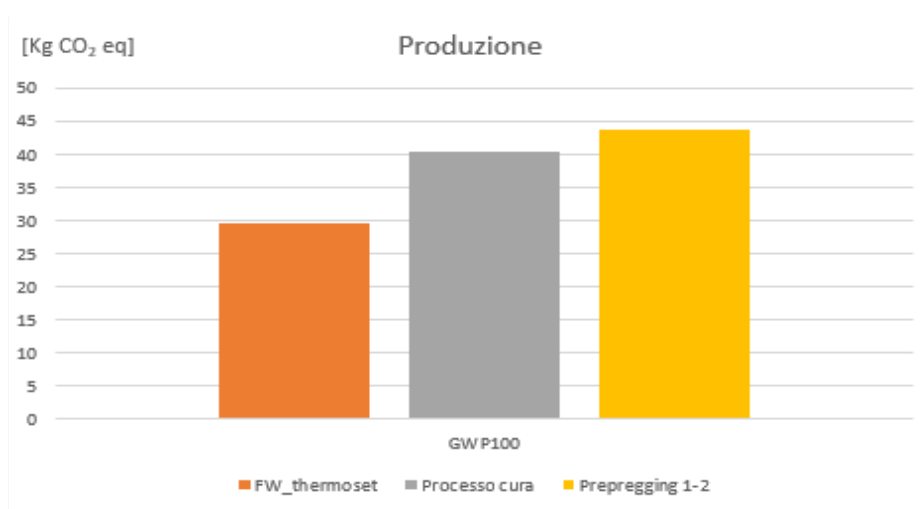


Figura 3-13: Impatto ambientale relativo alla produzione.

Tabella 3-5: Kg CO2 equivalenti relativi alla produzione.

Categoria d'impatto	Unità	Thermoset	Processo cura	Prepregging	Totale
GWP100	kg CO2-eq	29.4960	40.4750	43.6036	113.5746

La produzione del serbatoio può essere caratterizzata da tre operazioni, ovvero il *prepregging* (pre-impregnazione delle fibre di carbonio), la fase di avvolgimento e il processo di cura (necessario per far indurire il materiale). Dalla Figura 3-13 emerge che alla fase della pre-impregnazione corrisponde una maggiore produzione di anidride carbonica.

La fase del prepregging e il processo di cura possono essere ulteriormente analizzate, valutando quali sono i fattori che contribuiscono ad avere un alto impatto ambientale delle stesse: nel processo di cura il contributo più rilevante è dato dai film di tetrafluoroetilene, mentre nel prepregging dal polipropilene.

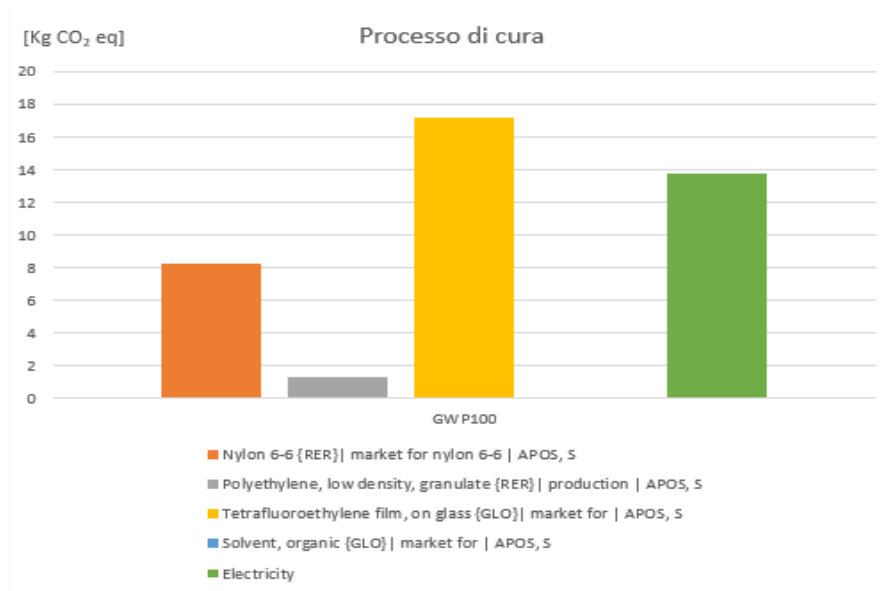


Figura 3-14: *Impatto ambientale relativo al processo di cura.*

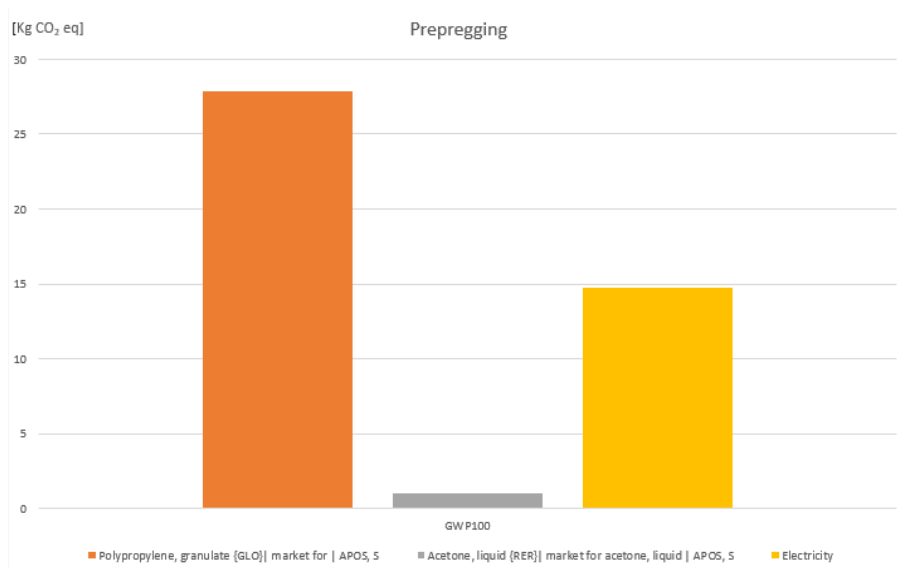


Figura 3-15: *Impatto ambientale relativo al prepregging.*

Si possono ora confrontare gli impatti ambientali di un serbatoio di tipo III con quelli di un serbatoio di tipo I (costituito solamente da materiale metallico). I risultati possono essere ben visualizzabili dalla seguente tabella:

Tabella 3-6: *Confronto impatti ambientali serbatoio di tipo III e di tipo I.*

FASI	SERBATOIO TIPO III	SERBATOIO TIPO I
CICLO DI VITA	3209.16	4768,37
FINE VITA	-163.02	-1046,16
TOTALE	3046.14	3722,21

Si può quindi concludere che un serbatoio di tipo I ha un impatto ambientale che è superiore del 22% rispetto ad un serbatoio di tipo III di pari dimensioni. Questo è dovuto al fatto che, nonostante i serbatoi di tipo I abbiano una riduzione notevole dell'impatto grazie al riciclo totale del materiale metallico (fine vita), questi serbatoi hanno un ciclo di vita che è meno sostenibile; infatti, la produzione di CO₂ equivalenti delle fasi dell'intero ciclo di vita è superiore del 48%.

In conclusione, la miglior sostenibilità dei serbatoi di tipo III rispetto a quelli di tipo I è dovuta ad un quantitativo di materiale inferiore, pari a $33,3+10,4=43,7$ Kg (III) contro i 60,1 kg di alluminio (I).

Capitolo 4 - CONCLUSIONI

Nel seguente lavoro è stata individuata la migliore laminazione del serbatoio di tipo III, tra le quattro analizzate, valutandone i vantaggi rispetto ai metodi convenzionali di produzione di serbatoi metallici e trovando il giusto compromesso tra i seguenti aspetti:

- ❖ Resistenza meccanica
- ❖ Sostenibilità ambientale
- ❖ Sicurezza
- ❖ Peso.

In primo luogo, è stato possibile procedere in maniera iterativa fino ad ottenere una stratificazione che soddisfi i requisiti di progetto. La configurazione trovata è riportata di seguito:

$$[85_5/10_{10}/20_7/30_6/85_4/45_6/60_6/70_6/85_5].$$

Questa stratificazione permette 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 è stato visto che:

- 1) I valori di tensione e di deformazione massimi sono inferiori rispetto ai valori ammissibili;
- 2) Gli spessori sono sufficientemente uniformi in tutto il componente (grazie alla presenza di strati con differenti angoli di avvolgimento);
- 3) Il peso rientra nei limiti imposti.

Purtroppo, è emersa una problematica relativa al liner in alluminio, in quanto si è potuto concludere che l'alluminio subisce inevitabilmente un fenomeno di plasticizzazione. A causa di questo fenomeno, non è più valida l'ipotesi lineare-elastica e, per un'analisi più dettagliata, dovrebbero essere analizzate le tensioni e le deformazioni residue dopo lo scarico e la deformazione durante il carico successivo.

Infine, il serbatoio analizzato nel presente lavoro, oltre a costituire una soluzione migliore in termini progettuali, in quanto caratterizzato da uno spessore e da un peso inferiori, è maggiormente sostenibile dal punto di vista ambientale rispetto ad un serbatoio di pari dimensioni realizzato in materiale metallico.

Difatti, in merito alla 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 viene smaltito in discarica e non può essere riutilizzato o riciclato. Nonostante ciò, è la fase d'uso (legata alla produzione dell'idrogeno necessario per gli anni di vita utile del veicolo) a incidere maggiormente sugli impatti ambientali complessivi.

Queste considerazioni sono importanti, in quanto costituiscono una base da cui partire per poter poi analizzare la convenienza di serbatoi di tipo IV, in cui il liner non è più di alluminio ma di HDPE, e V, in cui non è presente alcun liner.

Con un serbatoio di tipo V si avrebbe un "upgrade" legato al fatto che si avrebbero vantaggi sia in termini di peso (serbatoio più leggero), sia in termini di impatto ambientale, in quanto non si avrebbero più i contributi dovuti alla produzione, stoccaggio e trasporto dell'alluminio (o dell'HDPE nel caso di serbatoio di tipo IV).

Nell'ottica di voler migliorare ulteriormente gli impatti ambientali legati alla produzione di un serbatoio contenente idrogeno gassoso, si potrebbero fare due considerazioni. In primo luogo, bisognerebbe valutare l'ipotesi di sostituire la resina termoindurente (non riutilizzabile) con una resina termoplastica (riutilizzabile); in secondo luogo, occorrerebbe cercare di ridurre il contributo dell'impatto ambientale dovuto alla fase d'uso, ad esempio attraverso l'utilizzo di un processo innovativo che garantisca l'ottenimento di idrogeno green.

In conclusione, il serbatoio analizzato nel presente lavoro, oltre a costituire una soluzione migliore in termini progettuali, in quanto caratterizzato da uno spessore e da un peso inferiori, risulta anche maggiormente sostenibile da un punto di vista ambientale rispetto ad un serbatoio realizzato esclusivamente in materiale metallico.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- [1] M. W. F. B. H. Barthelemy, «Hydrogen storage: Recent improvements,» *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017.
- [2] E. Morandini, «Il PRFV per la riduzione dell'impatto ambientale,» *Materiali e Tecniche Costruttive*, 4 luglio 2022.
- [3] energia-plus.it, «Idrogeno, tre sfide da superare per essere un'alternativa vincente,» 16 giugno 2021. [Online].
- [4] G. P. C. K. Changhwan Lee, «Design of Type 3 High Vessel Liner for Hydrogen Vehicles,» *Journal of Pressure Vessel Technology*, vol. 144, 2022.
- [5] Y. L. J. F. K. L. B. X. J. Z. Zunyi Duan, *Composite Structures*, A.J.M. Ferreira, 2022.
- [6] M. Marconi, *Sostenibilità dei materiali compositi*, 2021.
- [7] H. H. Y. M. A. A. Mohammad Azeem, «Application of Filament Winding Technology in Composite Pressure Vessels and Challenges: A Review,» *Journal of Energy Storage*, vol. 49, n. 103468, 2022.
- [8] S. Peters, *Composite Filament Winding*, 2011.
- [9] R. Poletto, *Cosa si intende per analisi agli elementi finiti?*, 2017.
- [10] «MATERIAL innovative GmbH,» [Online]. Available: <https://www.material.be/cadwind/intro/>.
- [11] «www.tech-value.com,» [Online].
- [12] S. Tonini, «Linee guida per l'applicazione della metodologia LCA,» 27 Novembre 2020. [Online].
- [13] europa.eu, «Biodiversity Measurement Approaches,» Gennaio 2021. [Online].

- [14] S. M. F. A. B. M. C. F. E. A. G. R. Postacchini L., Environmental assessment of an automated impregnation process of carbon fiber tows, 2020.
- [15] «www.passaportoambientale.it/approfondimenti/analisi-ciclo-di-vita-lca-cos-e-quali-fasi,» 4 Dicembre 2019. [Online].
- [19] T.-D. Ngo, Composite and Nanocomposite Materials, Tri-Dung Ngo, 2020.
- [20] W. C. D. P. A. L. M. R. T. G. T. R. M. Benitez A., *Ecological assessment of fuel cell electric*, 2021.