



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di laurea triennale in ingegneria gestionale

Titolo della tesi

Analisi degli impatti ambientali di un innovativo prepreg con
matrice vitrimerica e confronto con soluzioni

Sustainability assessment of vitrimer based prepreg and
comparison with traditional alternative

Relatore:

Prof. Alessio Vita

Tesi di Laurea di:

Marco Corvelli

A.A. 2022/2023

Sommario

ABSTRACT	4
1.INTRODUZIONE	5
1.1 MATERIALI COMPOSITI.....	5
1.2 CLASSIFICAZIONE POLIMERI	7
1.3 VITRIMERI	8
1.4 RESINE TERMOINDURENTI	11
1.5 RESINE EPOSSIDICHE	14
1.6 PROCESSO DI PRODUZIONE IN AUTOCLAVE	15
2.1. ANALISI LCA.....	17
2.1.1 Obiettivo dello studio e unità funzionale	19
2.1.2 LCI (LIFE CYCLE INVENTORY)	20
2.1.3 ANALISI LCIA	21
2.2 MODELLAZIONE DEI PREPREG	23
2.2.1 PREPREG TRADIZIONALE.....	24
2.2.2 PREPREG VITRIMERICO	26
2.3 PROVINO DI TRAZIONE.....	29
3.RISULTATI	30
3.1 GLOBAL WARMING POTENTIAL (GWP).....	31
3.1.1 GWP PREPREG TRADIZIONALE	33
3.1.2 GWP PREPREG VITRIMERO	34
3.1.3 GWP 4AFD	35
3.2 ReCiPe MIDPOINT	36
4. CONCLUSIONI	39
5. BIBLIOGRAFIA	40

ABSTRACT

La tesi proposta ha lo scopo di effettuare l'analisi LCA di due scenari differenti:

- Prepreg tradizionale, composto da fibra di carbonio e resina epossidica;
- Prepreg vitrimerico, composto da fibra di carbonio e 4-AFD;

L'analisi dei dati è stata possibile grazie alle informazioni trovate sui vari articoli scientifici e grazie ai dati presenti nel software Simapro.

I risultati mostrano gli impatti ambientali, dei due prepreg, tramite i metodi di calcolo utilizzati, ovvero, GWP e ReCiPe, mostrando, come effettivamente, l'utilizzo del prepreg vitrimerico, in sostituzione di quello tradizionale, sia effettivamente una soluzione valida.

Il seguente lavoro di tesi nasce in seguito all'esperienza svolta presso il Dipartimento d'Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche del politecnico delle Marche. Lo scopo dell'elaborato è quello di confrontare l'analisi LCA, del Vitrimerico e del polimero tradizionale.

La tesi è divisa in quattro capitoli.

Nel primo capitolo si parla in generale dei materiali compositi, elencando le principali caratteristiche dei tali, ed evidenziando le problematiche ambientali, segue un'introduzione sui vitrimeri, sulle resine termoindurenti e sul processo in autoclave.

Nel secondo capitolo è stata fatta un'introduzione sul metodo LCA, e sulle quattro fasi che compongono il tale

Nel terzo capitolo vengono mostrati materiali e metodi, utilizzati in azienda, ovvero il software utilizzato per il calcolo dell'impatto ambientale dei due materiali, con i relativi LCI e LCIA.

Nel quarto capitolo vengono mostrati i risultati trovati, durante lo studio dei materiali presi in considerazione, con i relativi grafici e tabelle.

Nell'ultimo capitolo, è stata fatta un'analisi del nostro caso studio, quindi se effettivamente la produzione del vitrimerico, con il relativo ciclo di fine vita, risulterà conveniente, rispetto a quella di un polimero tradizionale.

1.INTRODUZIONE

1.1 MATERIALI COMPOSITI

Un materiale composito è un materiale eterogeneo, cioè, costituito da due o più fasi con proprietà fisiche differenti, le cui proprietà sono molto migliori di quelle delle fasi che lo costituiscono. Tipicamente, un composito è composto da una matrice, che agisce come un materiale legante, e rinforzi, che conferiscono al materiale proprietà specifiche. Per esempio, rinforzo (fibra di carbonio) e matrice (Resina epossidica). Vi sono tuttavia delle eccezioni in cui le diverse fasi sono fatte dello stesso materiale. Questi materiali sono ampiamente utilizzati in diversi settori (figura 1), come l'aerospaziale, l'automobilistico, il settore delle costruzioni e molti altri, grazie alla loro leggerezza, resistenza e durata.

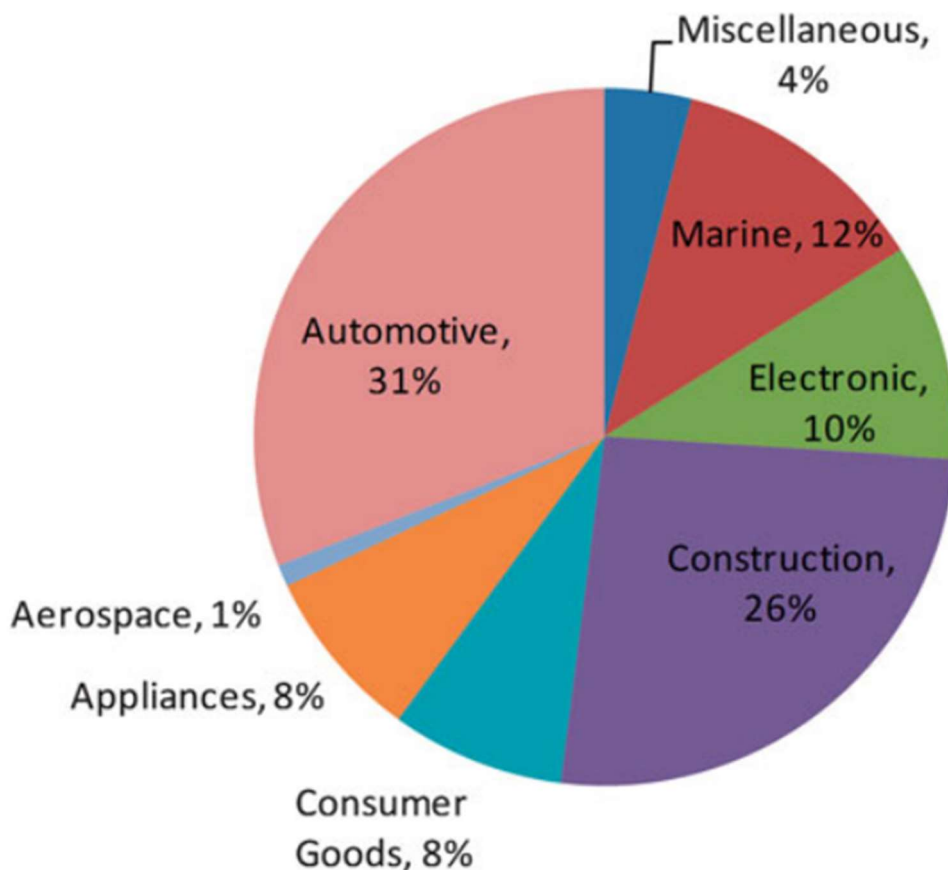


Figura 1: market share di polimeri a fibra rinforzata

Nonostante le numerose applicazioni vantaggiose dei materiali compositi, la loro produzione e smaltimento possono generare problematiche ambientali. Alcune delle sfide principali includono:

- **Processi di Produzione:** La produzione di materiali compositi spesso richiede processi che consumano molta energia, contribuendo alle emissioni di gas serra e all'impiego di risorse naturali.
- **Rischi per la Salute durante la Produzione;**
- **Difficoltà nel Riciclaggio:** La separazione dei componenti di un composito per il riciclaggio può essere complessa, rendendo difficile la gestione sostenibile di questi materiali alla fine del loro ciclo di vita.
- **Smaltimento e Rifiuti:** Il corretto smaltimento dei materiali compositi può essere problematico, poiché alcuni composti possono persistere nell'ambiente per lungo tempo, contribuendo alla contaminazione dei suoli e delle acque.
- **Consumo di Risorse Naturali:** La produzione di rinforzi per i compositi, come la fibra di carbonio, può richiedere l'estrazione e l'utilizzo intensivo di risorse naturali, con impatti negativi sull'ambiente.

Affrontare queste problematiche richiede un approccio integrato che coinvolga miglioramenti nei processi di produzione, lo sviluppo di tecniche di riciclaggio più efficienti e l'adozione di materiali alternativi più sostenibili.

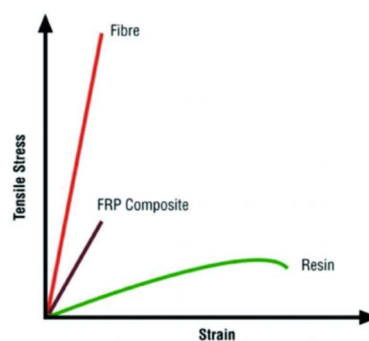


Figura 2: curve di trazione, fibre, resine e compositi

1.2 CLASSIFICAZIONE POLIMERI

I polimeri possono essere divisi in tre categorie:

- Polimeri termoplastici: sono materiali solidi a temperatura ambiente, diventano liquidi viscosi se riscaldati a temperature di pochi gradi centigradi. Questa caratteristica permette loro di essere facilmente ed economicamente modellati in prodotti finali.
- Polimeri termoindurenti: non tollerano cicli di riscaldamento ripetuti come possono fare i termoplastici. Quando inizialmente riscaldati, si ammorbidiscono e scorrono per lo stampaggio, ma temperature elevate producono una reazione chimica che indurisce il materiale e lo rende un solido infusibile.
- Elastomeri (gomme): estrema elasticità se sottoposti a sollecitazioni meccaniche relativamente basse.

1.3 VITRIMERI

Attualmente una percentuale significativa dei rifiuti in tutto il mondo è costituita da quelli polimerici (figura 3).

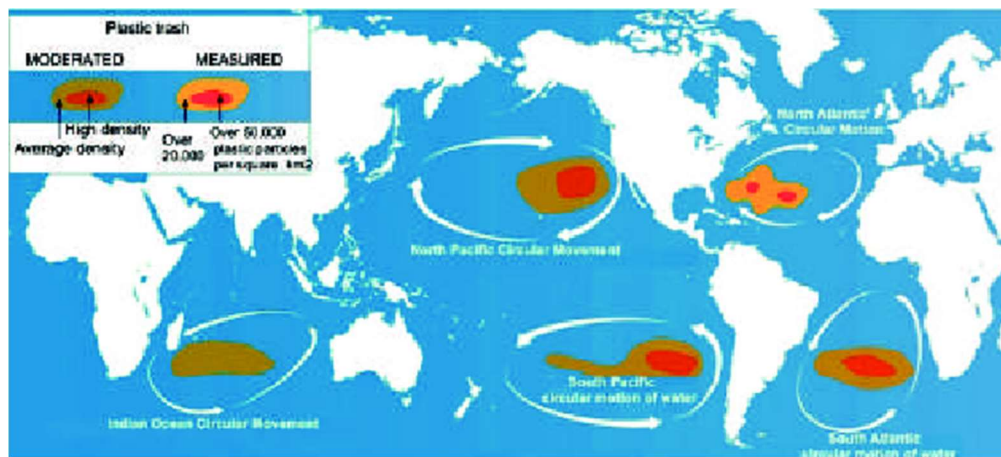


Figura 3: rifiuti polimerici

A seguito dell'aumento del costo delle materie prime, della quantità di rifiuti, delle limitazioni imposte dagli standard ambientali è nata la necessità di passare da un'economia lineare a una circolare [4]. L'economia lineare si basa sulla progettazione, sulla trasformazione delle materie prime in prodotto, distribuzione e consumo fino all'ottenimento di rifiuti. Al contrario, l'economia circolare si basa sulla progettazione, produzione e distribuzione sostenibili, consumo e riciclo del prodotto. Pertanto i benefici della transizione da un modello lineare a uno circolare si estendono al concetto di sostenibilità poiché ci si focalizza sul redesign ed eco progettazione, quindi sulla realizzazione di un prodotto in grado di durare il più a lungo possibile e sulla progettazione anche del fine vita del medesimo, produzione efficiente mediante strumentazione e processi innovativi riducendo la materia prima e gli scarti, consapevolezza del consumatore e raccolta e riciclo, stimolando quindi il mercato delle materie prime seconde o sfridi di lavorazione [5]. Pertanto, un'economia circolare segue l'approccio delle 3R [6]:

- Ridurre;

- riutilizzare;
- riciclare;

Il riciclo delle materie plastiche si suddivide in:

- Riciclo primario: consiste nel recupero e rilavorazione degli sfridi di lavorazione o dei pezzi difettosi con caratteristiche prestazionali simili a quelle del materiale di partenza;
- Riciclo secondario: consiste nella rielaborazione dei prodotti a fine vita in prodotti con caratteristiche prestazionali inferiori a quelle dei prodotti di partenza;
- Riciclo terziario: si tratta di un riciclo chimico che converte i rifiuti in materie prime;
- Riciclo quaternario: consiste nel ricavare energia dalla combustione dei rifiuti plastici.

La tipologia di riciclo secondario più comune delle materie plastiche è il riciclaggio meccanico poiché è il più economico e non richiede un trattamento chimico complesso dei rifiuti, seppur si incorre in contaminazione della plastica riprocessata e nella degradazione del materiale a causa della rilavorazione [4]. Attualmente i polimeri ampiamente sottoposti ai processi di riciclo sono i termoplastici, ovvero quei polimeri duttili in grado di fluire quando sottoposti a riscaldamento. Quest'ultima proprietà, quindi, consente il riprocesso dei polimeri termoplastici mediante metodi di produzione convenzionali dei polimeri come estrusione, stampaggio ad iniezione e a compressione. Invece i polimeri termoindurenti sono caratterizzati da una struttura permanentemente reticolata che non può essere perturbata a seguito del riscaldamento (figura 5). Pertanto, una volta formati, i polimeri termoindurenti non possono essere riprocessati. Di contro i polimeri termoindurenti, grazie alla struttura reticolata, mostrano proprietà quali insolubilità, stabilità dimensionale, resistenza meccanica e termica superiori rispetto ai polimeri termoplastici.

Anche per i compositi a matrice termoindurente sono state investigate le tre tipologie di riciclo viste per i compositi a matrice termoplastica ovvero riciclo meccanico, chimico e termico, tuttavia questi materiali non possono essere riciclati mediante i convenzionali

metodi di produzione delle materie plastiche a causa della propria struttura chimica che non può essere rifiuta. Nel caso di riciclo meccanico dapprima si frantuma il composito, successivamente la dimensione viene ulteriormente ridotta mediante l'ausilio di mulino a martelli ad alta velocità e infine mediante l'ausilio di cicloni e setacci è possibile separare le frazioni ricche di fibre da quelle ricche di matrice ottenendo così una materia prima riciclata [7]. Tuttavia, tale processo richiede un importante dispendio di energia ed è in grado di produrre solo fibre con proprietà meccaniche inferiori rispetto al materiale di partenza. Mediante il riciclo termico invece si effettua la combustione impiegando temperature elevate per ottenere recupero energetico [8]. Infine, il riciclo chimico prevede la separazione di riempitivo e matrice mediante depolimerizzazione chimica o dissoluzione della matrice [9]. Nel primo caso è possibile rigenerare sia filler che matrice. Considerate le problematiche ancora esistenti nell'ambito del riciclo dei materiali compositi convenzionali, si studia la possibilità di riciclare anche i compositi vetrimerici. Infatti, i compositi vetrimerici, essendo materiali che combinano le proprietà sia dei termoplastici che dei termoindurenti grazie alla loro natura chimica, possono essere riciclati mediante riscaldamento e rimodellamento conseguibili mediante stampaggio a compressione.

1.4 RESINE TERMOINDURENTI

La produzione del vitrimero avviene tramite l'utilizzo di materiale termoindurente.

La differenza più importante è che, quelle termoindurenti, come si può vedere in figura 5, una volta riscaldate ed in seguito raffreddate, non possono più essere modificate o modellate mentre quelle termoplastiche a temperatura ambiente sono dure ma, se riscaldate, diventano nuovamente malleabili e modellabili finché non vengono raffreddate, , come mostrato in figura 4; durante questo processo la struttura chimica non varia e il processo può essere eseguito più volte [1].

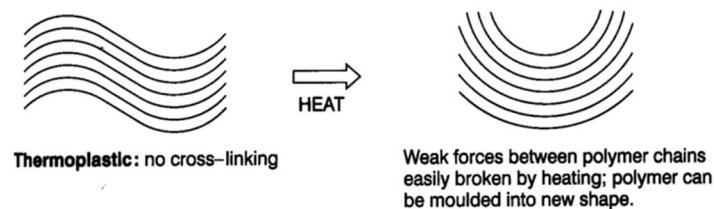


Figura 4: reazione al calore di polimeri termoindurenti

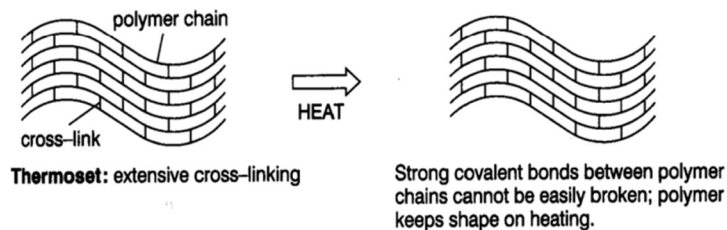


Figura 5: reazione al calore di polimeri termoindurente

I materiali termoindurenti vengono induriti mediante un processo di polimerizzazione, utilizzando il calore, per formare polimeri fortemente reticolati con legami rigidi insolubili o infusibili che non si sciolgono in caso di esposizione al calore.

Dei materiali indurenti fanno parte le resine epossidiche che generalmente superano la maggior parte degli altri tipi di resina in termini di proprietà meccaniche e resistenza al degrado ambientale.

Una resina termoindurente è un polimero che indurisce o assume una forma dura utilizzando un metodo di polimerizzazione come il calore o la radiazione. Il processo di polimerizzazione è irreversibile in quanto introduce una rete polimerica reticolata da legami chimici covalenti. Al riscaldamento, a differenza dei termoplastici, i termoindurenti rimangono solidi fino a quando la temperatura non raggiunge il punto in cui il termoindurente inizia a degradarsi.

Le resine termoindurenti sono altamente impiegate per la produzione di materiali compositi perché la loro bassa viscosità aiuta a raggiungere una buona penetrazione nella rete di fibre (Questo permette l'uso di più fibre e aumenta la resistenza del materiale composito finale).

Tra i tipi di resine termoindurenti, le epossidiche sono tra i termoindurenti più comuni e ampiamente utilizzati oggi nelle applicazioni strutturali e speciali. A causa della loro elevata resistenza e rigidità (a causa dell'alto grado di reticolazione), le resine epossidiche termoindurenti sono adattabili a quasi tutte le applicazioni.

Le principali proprietà delle resine epossidiche sono:

- Rigidi: il modulo di elasticità è da due a tre volte maggiore di termoplastici;
- Fragili, praticamente nessuna duttilità;
- Meno solubili dei termoplastici nei comuni solventi;
- Temperature di servizio più elevate rispetto ai termoplastici;
- Non possono essere rifusi, invece si degradano o bruciano;

Le reazioni di reticolazione sono esotermiche. In generale, la temperatura della reazione, la velocità di reazione e l'entalpia di reazione (calore di reazione) sono i principali punti di interesse. Durante la reazione, la viscosità, la densità e il modulo di elasticità aumentano a causa di un aumento della massa molare e della reticolazione.

Nel processo di polimerizzazione, si verificano tre diversi stati fisici, (vedi figura 6), che possono verificarsi durante la polimerizzazione sono generalmente visualizzati in un diagramma di polimerizzazione con trasformazione tempo-temperatura (TTT).

- Al di sotto di T_g , la resina è allo stato vetroso e la reazione è praticamente bloccata.

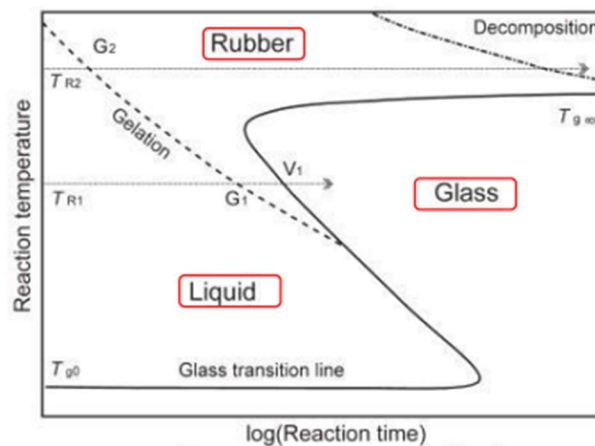


Figura 6: le tre fasi del processo di polimerizzazione

- A una temperatura di indurimento T_{R2} , la linea di gelificazione viene raggiunta dopo un tempo relativamente breve, il materiale gelifica (punto di gelificazione G_2) e viene trasformato allo stato gommoso e la reticolazione continua fino a quando la polimerizzazione è completa. La temperatura di indurimento è quindi sempre superiore alla massima temperatura di transizione vetrosa $T_{g\infty}$. Con tempi di reazione più lunghi, può iniziare la decomposizione
- Se viene scelta una temperatura di reazione T_{R1} , il raggiungimento del punto di gel a G_1 richiede più di tempo. La reticolazione continua nel materiale elastico gommoso fino a quando non si verifica la vetrificazione a V_1 . La temperatura di transizione vetrosa aumenta a causa della continua reticolazione fino a raggiungere la temperatura di reazione. Al passaggio allo stato vetroso, la reazione si arresta. Se la temperatura T_{R1} di un termoindurente, polimerizzato in questo modo, viene superata durante l'uso, si verifica un rammollimento che può portare a un difetto del materiale. Allo stato vetroso la reazione non è completamente ostacolata ma può comunque procedere a velocità molto bassa.

Il superamento della T_g non comporta necessariamente il degrado chimico del materiale (osservabile a molto più alte di T_g) ma il polimero potrebbe svolgere in maniera non adeguata la sua funzione strutturale [1].

1.5 RESINE EPOSSIDICHE

Il termine «epossidico» o «resina epossidica» si riferisce a un ampio gruppo di composti reattivi caratterizzati dalla presenza di un anello di ossirano o epossidico. Questo è rappresentato da un anello a tre membri contenente un atomo di ossigeno che è legato con due atomi di carbonio già uniti in qualche altro modo. Hanno successo perché offrono la diversità nella struttura molecolare che può essere prodotta utilizzando lo stesso metodo chimico.

Le resine epossidiche rappresentano una famiglia di materiali polimerici termoindurenti che non danno luogo a prodotti secondari di reazione quando induriscono; per questo motivo hanno un basso ritiro di reticolazione. Essi presentano anche buona adesione ad altri materiali, buona resistenza chimica e ambientale, buone proprietà meccaniche e di isolamento elettrico.

1.6 PROCESSO DI PRODUZIONE IN AUTOCLAVE

Il processo di lavorazione in autoclave per materiali compositi prepreg è una tecnica utilizzata per la produzione di componenti leggeri e ad alte prestazioni. I materiali compositi prepreg sono costituiti da fibre rinforzate, come la fibra di carbonio, impregnate con una resina termoindurente, solitamente epossidica. Il termine "prepreg" deriva dalla combinazione di "pre-impregnato", indicando che le fibre sono già impregnate con la resina prima del processo di produzione.

Panoramica del processo di lavorazione in autoclave per materiali compositi prepreg:

- Preparazione del prepreg: Le fibre di rinforzo vengono immerse o rivestite con la resina termoindurente, creando il materiale prepreg.
 - Strato di materiale composito: Il materiale prepreg viene disposto in strati o tessuti, seguendo il layout desiderato per la componente finale. Questo può essere realizzato manualmente o tramite sistemi di posizionamento automatizzati.
 - Vacuum bagging (confezionamento sottovuoto): Il materiale composito stratificato viene posto in un sacco sottovuoto per rimuovere l'aria intrappolata. Questo processo migliora la qualità del prodotto finale, riducendo la presenza di bolle d'aria e garantendo una distribuzione uniforme della resina.
 - Pre-consolidazione: La lamina composita è quindi sottoposta a una pre-consolidazione, in cui viene applicata una pressione moderata e una temperatura controllata. Questo passaggio aiuta a rimuovere eventuali bolle d'aria residue e a iniziare il processo di polimerizzazione della resina.
 - Posizionamento nell'autoclave: Il materiale pre-consolidato viene quindi posizionato all'interno di un'autoclave.
-
- Ciclo di polimerizzazione in autoclave: All'interno dell'autoclave, la temperatura e la pressione vengono incrementate gradualmente a livelli predeterminati. Questo processo consente alla resina di polimerizzare completamente, creando una struttura

composita solida e leggera. La pressione applicata dall'autoclave aiuta a comprimere il materiale, eliminando eventuali porosità e garantendo una densità uniforme.

- Raffreddamento e rimozione: Una volta completato il ciclo di polimerizzazione, la temperatura all'interno dell'autoclave viene ridotta gradualmente. Dopo il raffreddamento, il prodotto finito può essere rimosso dall'autoclave.

Questo metodo offre la possibilità di produrre componenti con prestazioni elevate e proprietà meccaniche superiori.

In figura 7, si può vedere, com'è fatta un'autoclave, utilizzata per la produzione di compositi e di fibra di carbonio.

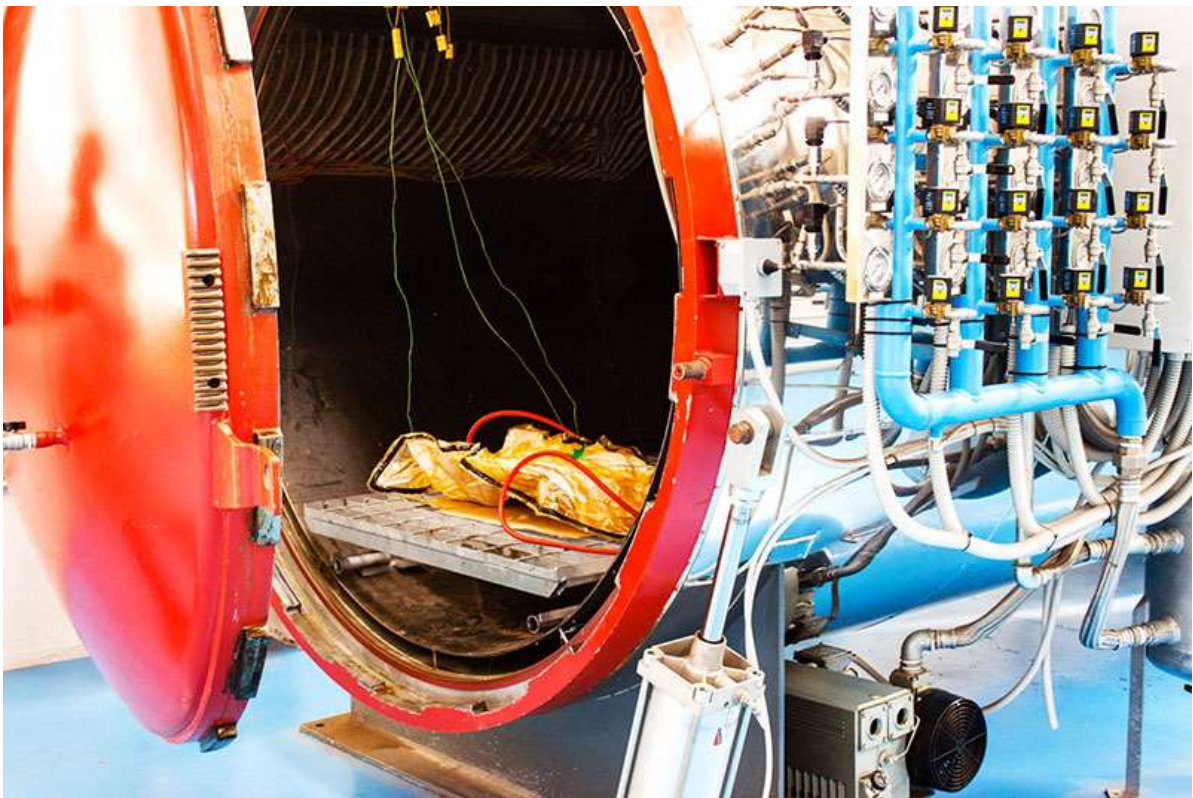


Figura 7: Autoclave utilizzata per la produzione di fibra di carbonio e compositi

2.MATERIALI E METODI

La Valutazione del Ciclo di Vita (LCA) è stata utilizzata come metodologia di analisi per quantificare e confrontare gli impatti ambientali dei processi di produzione considerati per il vitrimero ed il prepeg tradizionale. L' LCA è una metodologia standard ISO (ISO 14040-14044) ampiamente impiegata nel contesto dell'ingegneria ambientale per valutare il carico ambientale di prodotti, processi, servizi e attività in una prospettiva del ciclo di vita (dalla culla alla tomba) [2].

2.1. ANALISI LCA

Ogni analisi LCA conforme agli standard ISO deve includere quattro fasi diverse ma strettamente correlate:

- Definizione degli Obiettivi e dello Scopo: In primo luogo, è necessario definire gli obiettivi dell'analisi, l'unità funzionale e i confini del sistema (spaziali e temporali);
- Inventario del Ciclo di Vita e LCI: In secondo luogo, in base agli obiettivi e allo scopo scelti, è necessario raccogliere tutti i dati rilevanti (primari e secondari) per costruire un modello di ciclo di vita del prodotto/processo. In modo più specifico, questa fase prevede la suddivisione del sistema in analisi in processi unitari e la realizzazione di un'analisi input-output per classificare e quantificare tutti i flussi rilevanti inclusi nei confini del sistema
- Valutazione degli Impatti del Ciclo di Vita e LCIA: In terzo luogo, i flussi input-output vengono "tradotti" in categorie di impatto (intermedie e finali) mediante diverse metodologie di valutazione degli impatti che utilizzano fattori specifici per la caratterizzazione e la ponderazione dei flussi
- Interpretazione dei Risultati: Inoltre, gli standard incoraggiano la revisione continua delle diverse scelte con l'obiettivo di ottimizzare l'intera analisi

Il campo di applicazione, dell'LCA dipende dal soggetto e dall'utilizzo previsto dallo studio.

La fase di analisi dell'inventario del ciclo di vita (Fase LCI -Life cycle inventory) è la seconda fase dell'LCA. Si tratta dell'inventario dei dati in ingresso e in uscita relativi al sistema da studiare. L'LCI implica la raccolta dei dati necessari per raggiungere gli obiettivi dello studio definito.

La fase di valutazione dell'impatto del ciclo di vita (fase LCIA) è la terza fase dell'LCA. Lo scopo dell'LCIA è di fornire informazioni aggiuntive per contribuire a valutare i risultati LCI del sistema di prodotti in modo da giungere ad una migliore comprensione del loro significato ambientale.

L'interpretazione del ciclo di vita è la fase finale della procedura LCA, nella quale i risultati di una LCI o di una LCIA, o entrambe, sono riepilogati e discussi, in conformità con la definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione, come base per conclusioni, raccomandazioni e decisioni.

La presente norma internazionale copre due tipi di studi: gli studi di valutazione del ciclo di vita (studi di LCA) e gli studi dell'inventario del ciclo di vita (studi LCI). Gli studi di LCI sono simili agli studi LCA, ma escludono la fase LCIA. Gli studi LCI non sono da confondersi con la fase LCI di uno studio dell'LCA.[10]

2.1.1 Obiettivo dello studio e unità funzionale

L'obiettivo di questa ricerca è misurare e confrontare gli impatti ambientali di due processi di produzione, il Prepreg tradizionale e Prepreg vitrimerico, con le relative fasi di formatura in autoclave e fasi di formatura del sacco da vuoto. In dettaglio, lo studio LCA mira a confrontare differenti scenari e stabilire quale sia più ecologico da una prospettiva di ciclo di vita. I risultati dovrebbero essere principalmente di interesse per le industrie dei materiali compositi al fine di ridurre il carico ambientale dei loro processi, mantenendo al contempo invariata la performance. Inoltre, questo studio comparativo può essere la base per una rivalutazione dei compositi da un punto di vista ambientale. Il componente analizzato in questo studio è: il prepreg tradizionale ed un prepreg vitrimerico (omega stiffner). Questa parte è realizzata con tessuto di fibra di carbonio ad alta resistenza e resina epossidica ed è composta da due parti principali. Il peso totale finale del provino è di circa 1 kg.

2.1.2 LCI (LIFE CYCLE INVENTORY)

In questo studio, l'Inventario del Ciclo di Vita (LCI) è stato realizzato mediante un'analisi input-output di tutti i processi inclusi nei confini di sistema scelti. Sono stati utilizzati sia dati primari, raccolti attraverso il software simapro, che comprende un database commerciale di LCI. In particolare, Ecoinvent 3.1 è stato utilizzato come fonte di dati LCI secondari. La versione del database scelta è il modello di sistema "allocazione, predefinito", che si basa sulle seguenti scelte metodologiche:

- utilizza l'offerta media di prodotti;
- utilizza l'allocazione per convertire set di dati multiprodotto in set di dati mono-prodotto;
- i flussi sono allocati in base al loro reddito economico corretto per alcune imperfezioni e fluttuazioni di mercato (Wernet et al., 2016);

Per quanto riguarda le ipotesi, sono state utilizzate le seguenti per la raccolta dei dati di inventario rilevanti:

A causa dell'indisponibilità di dati LCI primari e secondari da Ecoinvent, la produzione di prepeg vitrimerico, è stata modellata sulla base di studi rilevanti della letteratura;

I dati relativi a ciò che si è utilizzato (ad es. stampi) sono stati calcolati sulla base dei modelli 3D del componente e dell'equipaggiamento;

I dati relativi all'energia e ad altre risorse consumate durante tutte le diverse fasi della produzione del vitrimerico e del prepeg tradizionale sono stati raccolti misurando il consumo effettivo della produzione degli stessi o stimando un valore da dati aggregati;

I dati di inventario relativi ai materiali di input sono stati derivati dal database Ecoinvent 3.1;

I dati di inventario relativi alla generazione di energia e ad altre risorse (ad es. energia termica, aria compressa) sono stati derivati dal database Ecoinvent 3.1; Gli impatti legati alla

produzione delle macchine utilizzate durante i processi di produzione del Vitrimero (ad es. autoclave) sono derivati dal database del software simapro.

In conformità ai confini di sistema, l'uso e la fine vita del vitrimero e del prepreg tradizionale sono considerati nello studio attuale.

2.1.3 ANALISI LCIA

Attualmente, un'ampia serie di metodi di valutazione d'impatto e di esistono categorie e possono essere utilizzate come indicatori chiave di prestazione quantificare i risultati degli studi LCA. Ognuno di loro è più rappresentare una specifica tipologia di impatti. Al fine di avere una visione completa dei danni ambientali potenzialmente causati dalla produzione di prepreg tradizionali, e prepreg vitrimerici.

I metodi utilizzati in questo studio sono i seguenti:

- Il primo indicatore scelto è il Potenziale di Riscaldamento Globale (GWP), che si concentra principalmente sulla quantificazione gas a effetto serra (GHG) emessi nell'atmosfera e la loro contributo al riscaldamento globale e ai cambiamenti climatici. Questa metodologia esprime il contributo di ciascun flusso emesso nell'effetto serra in un arco temporale predefinito (100 anni nel caso dell'indicatore GWP 100 scelto dall'IPCC del 2013), confrontandolo con il biossido di carbonio, il cui potenziale effetto serra viene preso come riferimento (cioè, un fattore di caratterizzazione pari = 1).

- Il secondo metodo utilizzato è ReCiPe 2008 il quale fornisce una panoramica completa dei carichi ambientali, può essere ottenuta solo considerando congiuntamente un insieme sufficientemente ampio di indicatori diversi ed eterogenei. Questo è il motivo per cui è stata scelta questa metodologia di valutazione dell'impatto. Considerando il livello di mezzo, la metodologia ReCiPe con la prospettiva Hierarchist (H) [11] consente di considerare diverse tipologie di impatti (ad esempio, eutrofizzazione dell'acqua, tossicità umana, acidificazione dei suoli) raggruppandoli in 18 categorie di impatto, tutte considerate nello studio in questione.

2.2 MODELLAZIONE DEI PREPREG

La modellazione dei prepreg presi in considerazione, è stata fatta, tramite ricerche su articoli scientifici. Il primo passo per la produzione del prepreg consiste nella produzione del precursore poliacrilonitrile (PAN), ottenuto attraverso la polimerizzazione del monomero di base acrilonitrile (AN). Questa fase è stata modellata secondo lo studio di Duflou et al., e l'inventario è riportato nella tabella seguente (Duflou et al., 2009).

Inventory data for the production of 1 kg of PAN (Duflou et al., 2009).

Item	Material typology	Quantity
Input	Acrylonitrile (AN)	1 kg
	Dimethylformamide solvent	0,00335 kg
	Polydimethylsiloxane	0,1 kg
Energy and other resources	Electric energy	60 MJ
	Steam	18 kg

Tabella 1: Produzione di 1kg di PAN

L'ultima operazione è la preparazione del prepreg (prepregging). In questa fase, le fibre vengono impregnate con resina pre-polimerizzata al fine di ottenere uno strato composito singolo. Questo strato presenta uno spessore uniforme e una frazione di volume di fibra costante; inoltre, può essere facilmente manipolato e lavorato.

2.2.1 PREPREG TRADIZIONALE

Nella fase di preparazione del prepreg (prepregging), le fibre vengono impregnate con resina pre-polimerizzata al fine di ottenere uno strato composito singolo. Questo strato presenta uno spessore uniforme e una frazione di volume di fibra costante; inoltre, può essere facilmente manipolato e lavorato. Ai fini di questo studio, è stata presa in considerazione la produzione sia delle fibre di carbonio (CF) che della resina epossidica, e la quantità necessaria per produrre il prepreg è stata calcolata dalle informazioni tecniche fornite dall'azienda coinvolta. Il processo di preparazione del prepreg è stato modellato secondo i dati trovati su delle ricerche scientifiche. Riporta i dettagli dei dati di inventario utilizzati per modellare il prepreg.

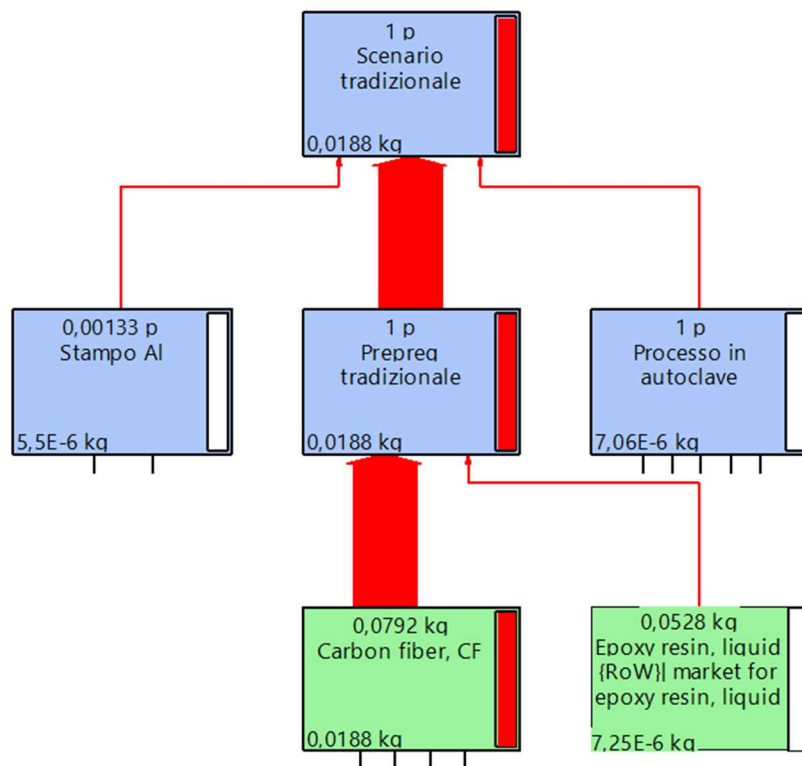


Figura 8: Grafico ad albero scenario vitrimero

Tramite lo studio su Simapro, e l'inserimento dei dati a disposizione, si è notato che nel prepreg tradizionale, la maggior parte dell'impatto ambientale del seguente scenario, è dato proprio dalla produzione del prepreg stesso. Oltre all'impatto della produzione del prepreg,

in questo scenario si è anche tenuto conto di quello del processo in autoclave, e dello stampo in alluminio.

2.2.2 PREPREG VITRIMERICO

A fronte delle ricerche effettuate, si è deciso di utilizzare una nuova produzione per i vitrimeri, prodotto con un tipo di resina diversa. Il nuovo sistema di vitrimeri studiato è a base di resina epossidica, la cui unicità rispetto ad altri vitrimeri correlati si basa su diversi aspetti, come:

- facilità di sintesi da materiali di partenza facilmente reperibili in modo scalabile;
- rapido rilassamento dello stress a temperature elevate (comportamento vitrimerico) senza la necessità di un catalizzatore;
- La facilità nell'impiego per la produzione di compositi polimerici rinforzati con fibra di carbonio (FRPCs) (ri)processabili, riparabili e riciclabili. Questo sistema dinamico a base di resina epossidica si basa sullo scambio reversibile di disolfuri aromatici, un approccio che abbiamo recentemente descritto per la creazione di elastomeri poli(urea-uretano) auto-riparanti e (ri)processabili. Tale reazione di scambio è stata recentemente proposta per procedere attraverso un meccanismo [2+1] mediato da radicali.

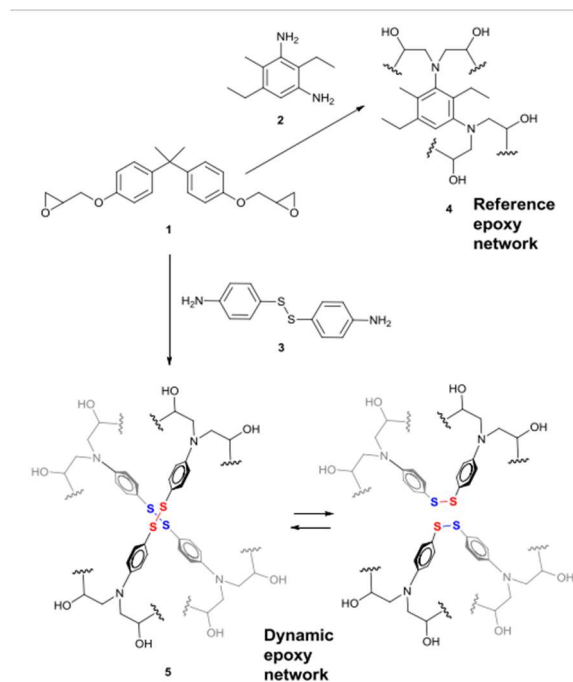


Figura 9: Chimica matrici dinamiche

Si è deciso di utilizzare il II bisfenolo A (figura 9) perché è uno dei monomeri epossidici più ampiamente utilizzati sul mercato. Mentre il 4-AFD è stato scelto come indurente dinamico, essendo un prodotto facilmente accessibile, a livello di prezzo e reperibilità [3].

La combinazione di DGEBA e 4-AFD porta a un vitrimero epossidico con tempi di rilassamento molto rapidi e bassa energia di attivazione. A differenza di altri sistemi vitrimeri riportati, in questo caso i materiali di partenza sono facilmente reperibili e il processo sintetico è facilmente scalabile, il che rende questo sistema facilmente applicabile per la produzione di compositi polimerici rinforzati con fibra di carbonio (FRPC). Gli FRPC così preparati mostrano proprietà meccaniche equivalenti ai corrispondenti epossidi di riferimento, presentando allo stesso tempo nuove caratteristiche come la (ri)processabilità, riparabilità e riciclabilità.

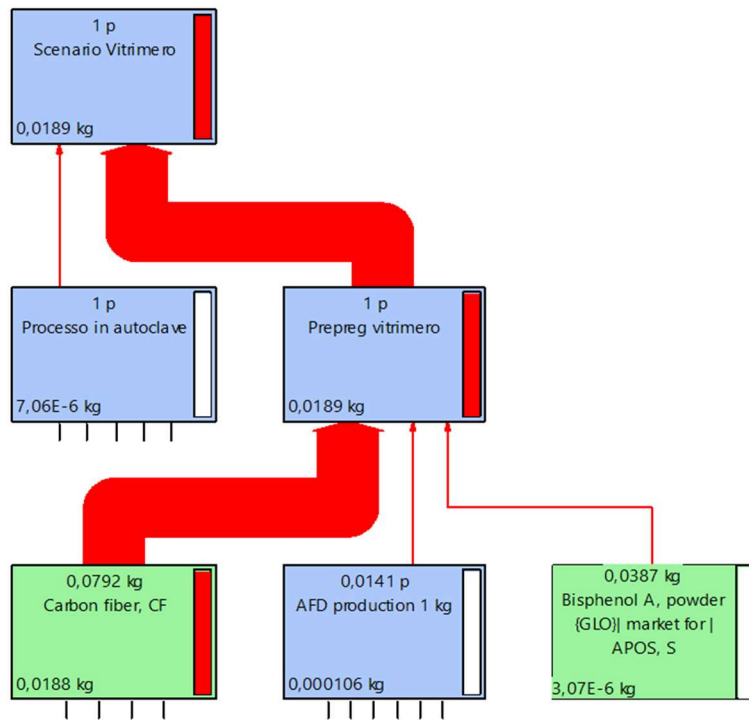


Figura 10:Schema ad albero scenario vitrimero

Oltre alla composizione del materiale, nello schema ad albero (figura 10) è possibile vedere gli impatti ambientali, causati dalla produzione del prepreg, e del processo in autoclave (figura 11), preso in considerazione, che tiene conto anche della produzione del sacco da vuoto. Però si osserva che la maggior parte dell’impatto ambientale è causato dalla produzione del prepreg, e nello specifico per la produzione di fibra di carbonio.

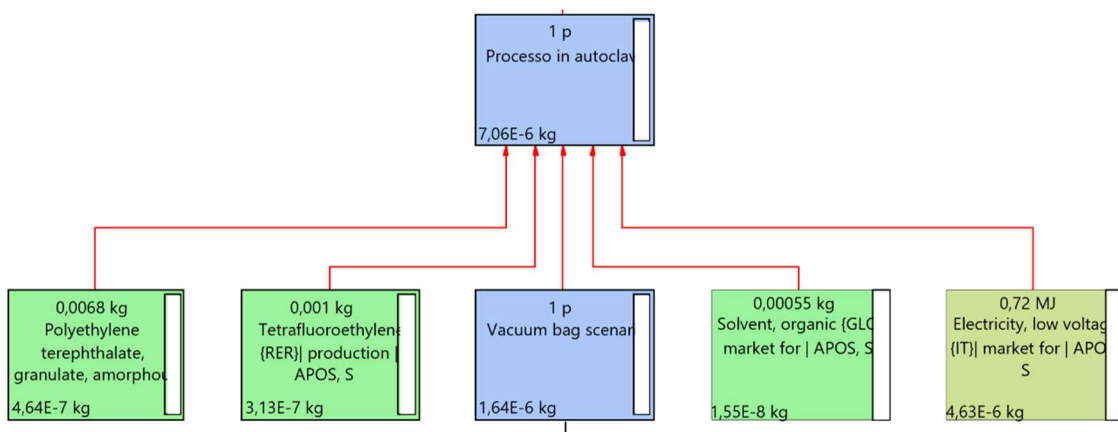


Figura 11:schema impatti ambientali autoclave

2.3 PROVINO DI TRAZIONE

In laboratorio è stato anche analizzato un provino di resina termoindurente.

Materiale	Densità (g/cm ³)	Resistenza alla Trazione (MPa)	Resistenza all'Impatto (J/m)	Rigidità Dielettrica (V/m)	Max temperatura di utilizzo (°C)
FENOLICHE:					
con cellulosa	1.34 – 1.45	34 – 62	11 – 32	10250 – 15750	150 – 177
con mica	1.65 – 1.92	38 – 48	16 – 21	13800 – 15750	120 – 150
con vetro	1.69 – 1.95	34 – 124	16 – 960	5500 – 15750	177 – 288
POLIESTERE:					
SMC con vetro	1.7 – 2.1	55 – 138	427 – 1175	12600 – 15750	150 – 177
BMC con vetro	1.7 – 2.3	28 – 69	800 – 855	11800 – 16550	150 – 177
MELAMMINICA:					
con cellulosa	1.45 – 1.52	34 – 62	11 – 21	13800 – 15750	120
con fiocco	1.50 – 1.55	48 – 62	21 – 27	11800 – 13000	120
con vetro	1.8 – 2.0	34 – 69	32 – 960	6700 – 11800	150 – 200
UREICA:					
con cellulosa	1.47 – 1.52	38 – 90	11 – 21	11800 – 15750	77
ALCHIDICA:					
con vetro	2.12 – 2.15	28 – 66	32 – 534	13800 – 17750	230
con minerali	1.60 – 2.30	21 – 62	16 – 27	13800 – 17750	150 – 230
EPOSSIDICA:					
non caricata	1.06 – 1.40	28 – 90	11 – 534	15750 – 25600	120 – 260
con minerali	1.6 – 2.0	34 – 103	16 – 21	11800 – 15750	150 – 260
con vetro	1.7 – 2.0	69 – 207	...	11800 – 15750	150 – 260

Figura 12: Caratteristiche dei vari tipi di resine termoindurenti

Ed è risultato che Le densità delle resine termoindurenti sono maggiori delle resine termoplastiche (1,34 -2,3 g/cm³). La resistenza a trazione è relativamente bassa 30 - 100 MPa, però a seconda della quantità e del tipo di riempitivo può essere molto aumentata (nel caso del vetro fino a 200 MPa), con una contestuale resistenza all'urto più elevata (figura 12)

3.RISULTATI

Per determinare e confrontare l'impatto ambientale del composito vitrimerico e del composito tradizionale, si è ricorso all'utilizzo del software SimaPro, che è uno strumento professionale per raccogliere, analizzare e monitorare le prestazioni ambientali di prodotti e servizi. Con SimaPro è possibile modellare e analizzare cicli di vita complessi in modo trasparente e sistematico, identificare hotspot ambientali e valutare diverse strategie per la riduzione dell'impatto. Fare scelte orientate alla sostenibilità e comunicarle è possibile se si è supportati da dati scientifici affidabili. SimaPro contiene i più recenti metodi e database. Offre inoltre la possibilità di creare grafici e tabelle in Word ed Excel e dispone di diversi add-on per facilitare gli studi di LCA o per rispondere a specifiche esigenze dei fruitori dei risultati. Questo permette di favorire la collaborazione con altri reparti aziendali e di fornire ai colleghi strumenti concreti di miglioramento del ciclo di vita di prodotti, processi o tecnologie e ridurre l'impatto della propria azienda.[12]

In questo capitolo vengono presentati e discussi i risultati sperimentali ottenuti dalle prove eseguite in laboratorio. Il presente capitolo è suddiviso in tre parti:

- 1) Composizione dei compositi, e schemi ad albero;
- 2) Metodo GWP per l'analisi dell'impatto ambientale
- 3) Metodo ReCiPe;

3.1 GLOBAL WARMING POTENTIAL (GWP)

Tramite il software SimaPro, si è proceduto con il calcolo del Global Warming Potential. Dal quale si hanno avuto risultati riguardanti l’impatto ambientale del prepreg tradizionale e del prepreg vitrimerico.

	Categoria di danno	Unità	Total e	Processo in autoclave	Prepreg	Stampo Al	EoL
Vitrimerico	GWP100	kg CO2-eq	1,92	0,32	3,82	0,08	-2,29
Tradizionale	GWP101	kg CO2-eq	3,80	0,32	3,40	0,08	0,02

Tabella 2: GWP prepreg vitrimerico vs GWP prepreg tradizionale

Per entrambi i prepreg si è tenuto conto, dell’impatto del processo in autoclave, di quello dovuto alla produzione del prepreg, dello stampo di alluminio, e anche del ciclo di fine vita, che nel caso del prepreg tradizionale, calcola l’impatto dovuto al suo smaltimento, mentre per il prepreg vitrimerico, si è tenuto conto della possibilità di riciclare il materiale, fino a cinque volte.

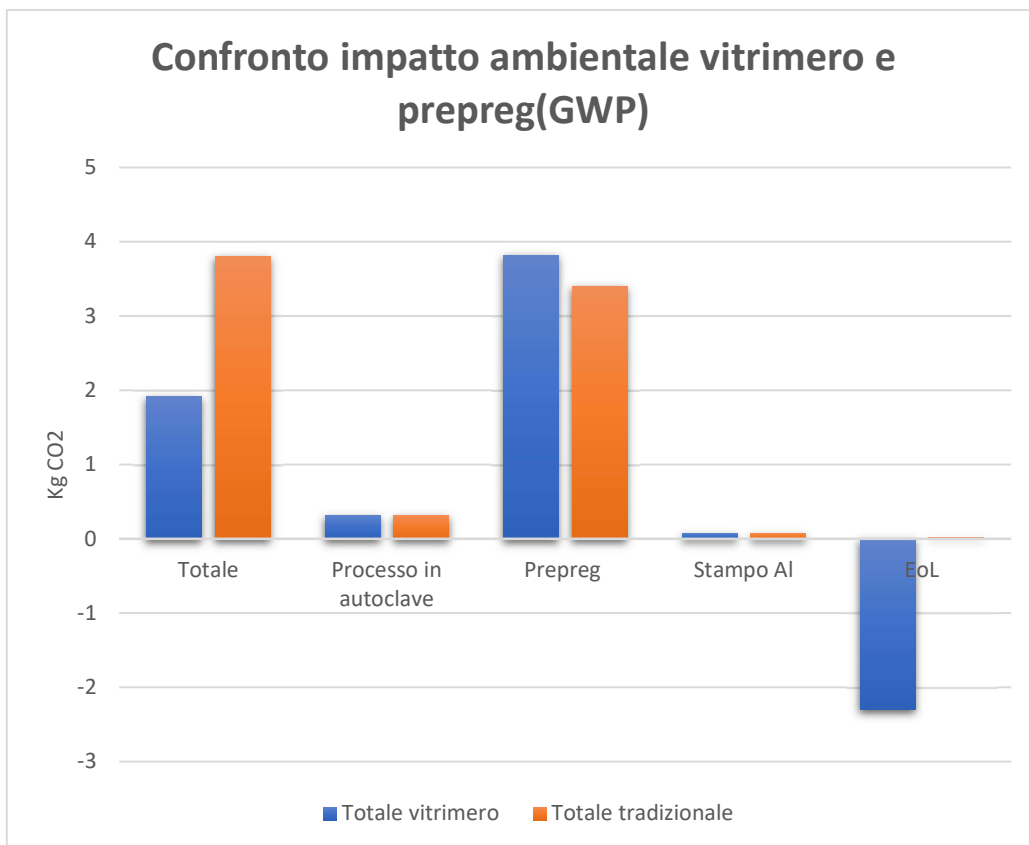


Figura 13: Confronto GWP vitrimero e tradizionale

Si può notare che in entrambi i casi, lo stampo di alluminio ha un impatto quasi trascurabile, per l'unità di misura presa in considerazione, mentre l'impatto più alto è dato proprio dalla produzione del prepreg, ed anche se per quanto riguarda il vitrimero, ha un impatto più alto, nel totale, è minore, essendo che al contrario del prepreg tradizionale, esso può essere riciclato.

3.1.1 GWP PREPREG TRADIZIONALE

Categoria d'impatto	Unità	Totale	Carbon fiber	Epoxy resin
GWP100	kg CO2-eq	3,40	3,16	0,24

Tabella 3:GWP prepreg tradizionale

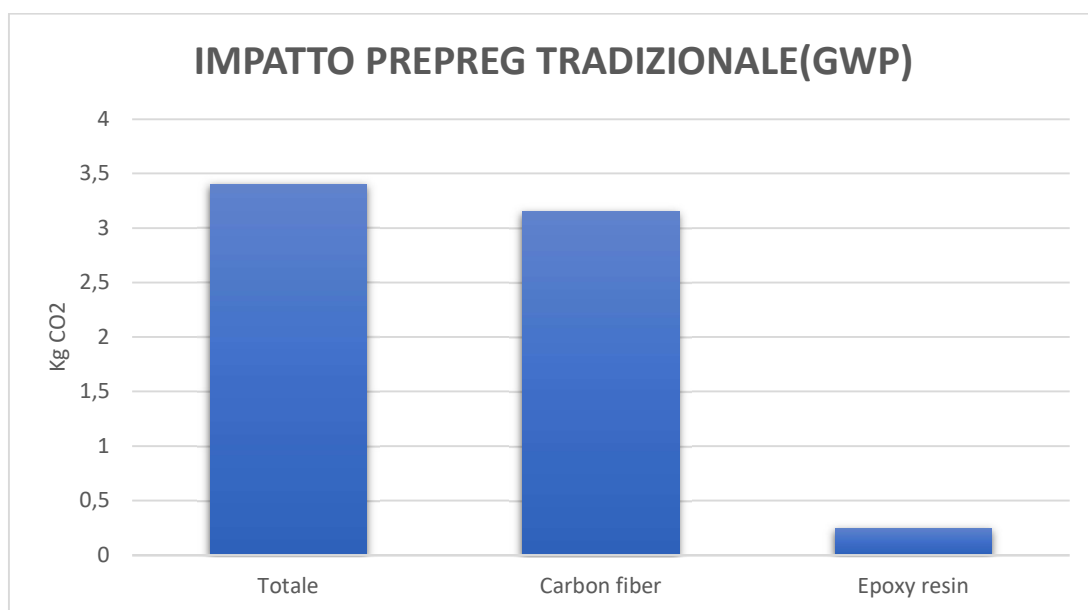


Figura 14: Grafico GWP prepreg tradizionale

Per quanto riguarda la produzione del prepreg tradizionale, si può notare come la maggior parte dell'impatto ambientale derivi proprio dalla produzione della fibra di carbonio.

3.1.2 GWP PREPREG VITRIMERO

Materiale	Unità	Totale	Carbon fiber	4-AFD production (1 kg)	Bisphenol A
Vitrimerero	kg CO2-eq	3,82	3,16	0,51	0,15

Tabella 4: GWP PREPREG VITRIMERO

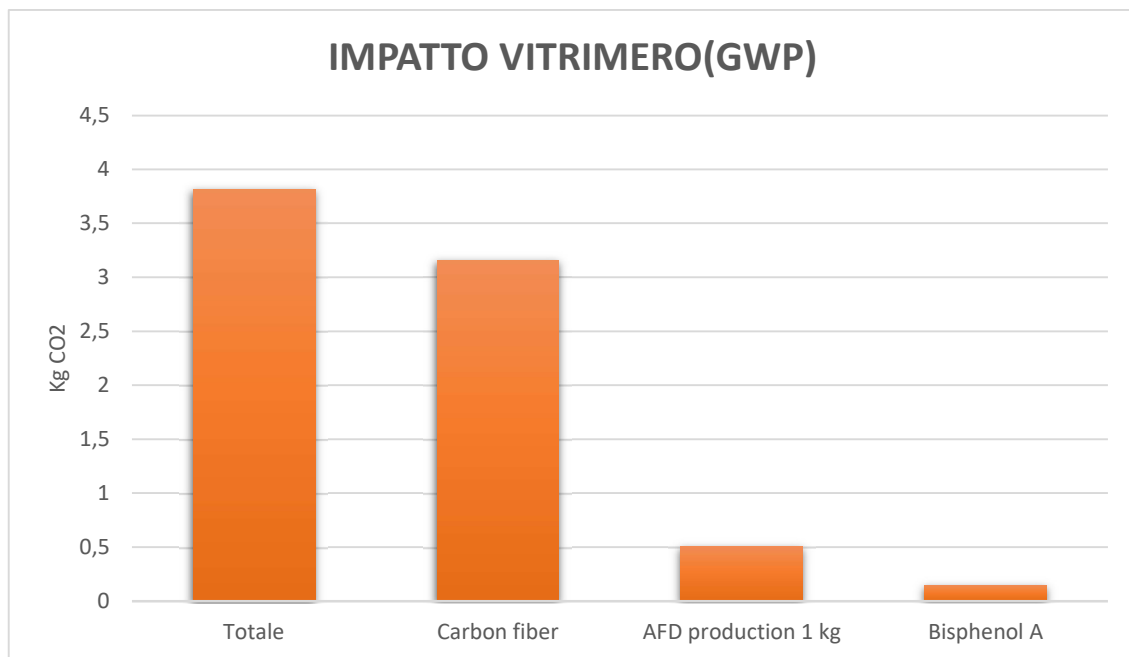


Figura 15: Grafico GWP Vitrimerero

Analizzando i risultati, si può notare che anche l'impatto ambientale del prepreg vitrimerico, è maggiore rispetto a quello tradizionale, e si può vedere che anche in questo caso, la maggior parte dell'impatto ambientale è dato, come nel caso del prepreg tradizionale, per la maggior parte dalla fibra di carbonio.

3.1.3 GWP 4AFD

Si sono analizzato nello specifico gli impatti ambientali delle componenti del 4AFD, il materiale che si è deciso di utilizzare per la produzione del prepreg vitrimerico.

Material	Material component	Impact
4AFD	Totale	36,18 kg CO2-eq
	hydrogen peroxide (30%)	2,10 kg CO2-eq
	p-chloronitrobenzene	7,45 kg CO2-eq
	Sodium sulfide	24,39 kg CO2-eq
	Water	0,01 kg CO2-eq
	Heat	1,39kg CO2-eq
	Electricity	0,84 kg CO2-eq

Tabella 5: Produzione 4-AFD

Grafico GWP per 4-AFD (figura 16)

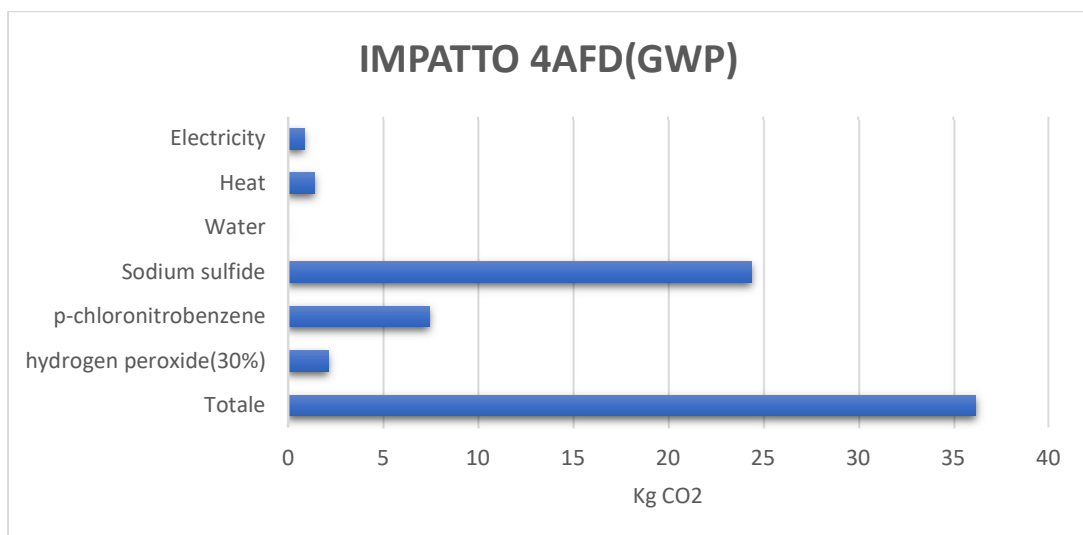


Figura 16: grafico GWP del 4-AFD

Dal quale si può notare che l'impatto maggiore è dato dalla produzione del solfuro di sodio.

3.2 ReCiPe MIDPOINT

In questa sezione, vengono riportati i risultati del metodo ReCiPe midpoint. Questa analisi, (consistente nel dividere ciascun valore per il valore massimo ottenuto in ciascuna categoria di impatto), lo scenario più impattante per ciascuna categoria ha un impatto del 100%, e quindi i benefici totali percentuali degli altri scenari possono essere facilmente determinati. Inoltre, per comprendere meglio le principali cause degli impatti per ciascuno scenario e per ciascuna categoria di impatto.

Tabella 6: Classificazione ReCiPe midpoint per il prepeg vitrimerico

Categoria d'impatto	Unità	Totale vitrime	Processo in al	Prepeg vitrimerico	Stampo AI	EoL
Global warming	kg CO2 eq	2,31E+00	3,66E-01	4,64E+00	8,85E-02	-2,79E+00
Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq	2,81E-05	5,71E-06	5,59E-05	2,08E-08	-3,36E-05
Ionizing radiation	kBq Co-60 eq	9,77E-02	1,18E-02	2,06E-01	3,41E-03	-1,24E-01
Ozone formation, Human health	kg NOx eq	4,09E-02	3,80E-04	1,01E-01	2,05E-04	-6,04E-02
Fine particulate matter formation	kg PM2.5 eq	4,79E-04	3,12E-05	9,79E-04	5,61E-05	-5,87E-04
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	kg NOx eq	4,10E-02	3,93E-04	1,01E-01	2,11E-04	-6,06E-02
Terrestrial acidification	kg SO2 eq	3,40E-02	5,87E-04	8,25E-02	3,93E-04	-4,95E-02
Freshwater eutrophication	kg P eq	6,79E-04	4,01E-05	1,46E-03	5,52E-05	-8,75E-04
Marine eutrophication	kg N eq	2,59E-04	6,09E-06	6,15E-04	6,60E-06	-3,69E-04
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB	2,15E+00	1,70E-01	4,15E+00	3,25E-01	-2,49E+00
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB	8,02E-02	8,07E-03	1,42E-01	1,55E-02	-8,50E-02
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB	2,19E-02	2,09E-03	3,81E-02	4,61E-03	-2,28E-02
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	2,73E-03	7,58E-04	4,79E-03	5,68E-05	-2,88E-03
Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	4,43E-02	1,11E-02	6,89E-02	5,71E-03	-4,13E-02
Land use	m2a crop eq	5,47E-02	4,02E-03	1,20E-01	2,87E-03	-7,17E-02
Mineral resource scarcity	kg Cu eq	4,66E-03	2,45E-04	7,24E-03	1,52E-03	-4,34E-03
Fossil resource scarcity	kg oil eq	5,71E-01	6,08E-02	1,23E+00	1,72E-02	-7,39E-01
Water consumption	m3	1,57E-02	2,90E-03	2,86E-02	1,29E-03	-1,72E-02

Tabella 7: Classificazione ReCiPe midpoint per il prepeg tradizionale

Categoria d'impatto	Unità	Totale tradizionale	Stampo AI	Prepeg tradizionale	Processo in autoclave	Municipal solid waste
Global warming	kg CO2 eq	4,61E+00	8,85E-02	4,16E+00	3,66E-01	2,21E-05
Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq	6,14E-05	2,08E-08	5,56E-05	5,71E-06	6,86E-08
Ionizing radiation	kBq Co-60 eq	1,98E-01	3,41E-03	1,83E-01	1,18E-02	3,10E-07
Ozone formation, Human health	kg NOx eq	1,00E-01	2,05E-04	9,96E-02	3,80E-04	7,08E-07
Fine particulate matter formation	kg PM2.5 eq	8,84E-04	5,61E-05	7,97E-04	3,12E-05	1,66E-07
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	kg NOx eq	1,00E-01	2,11E-04	9,98E-02	3,93E-04	8,33E-07
Terrestrial acidification	kg SO2 eq	8,15E-02	3,93E-04	8,05E-02	5,87E-04	3,62E-07
Freshwater eutrophication	kg P eq	1,60E-03	5,52E-05	1,06E-03	4,01E-05	4,41E-04
Marine eutrophication	kg N eq	5,33E-04	6,60E-06	4,97E-04	6,09E-06	2,36E-05
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB	3,42E+00	3,25E-01	2,92E+00	1,70E-01	4,08E-07
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB	1,40E-01	1,55E-02	1,13E-01	8,07E-03	4,30E-03
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB	3,87E-02	4,61E-03	3,02E-02	2,09E-03	1,78E-03
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	4,10E-03	5,68E-05	3,24E-03	7,58E-04	5,14E-05
Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	6,91E-02	5,71E-03	5,22E-02	1,11E-02	1,11E-04
Land use	m2a crop eq	8,41E-02	2,87E-03	7,72E-02	4,02E-03	2,83E-08
Mineral resource scarcity	kg Cu eq	5,93E-03	1,52E-03	4,17E-03	2,45E-04	2,16E-11
Fossil resource scarcity	kg oil eq	1,19E+00	1,72E-02	1,11E+00	6,08E-02	9,93E-07
Water consumption	m3	2,30E-02	1,29E-03	1,88E-02	2,90E-03	1,57E-07

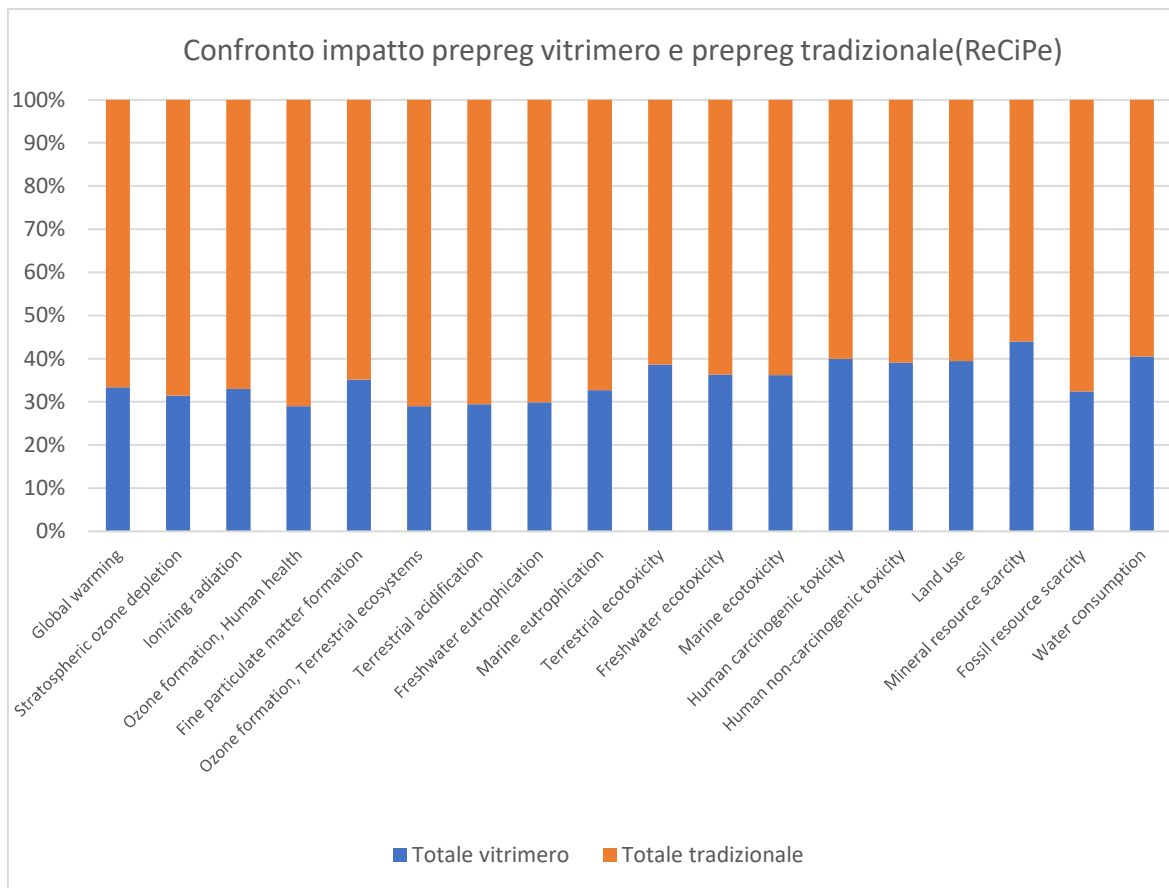


Figura 17: confronto impatto vitrimero e tradizionale, tramite metodo ReCiPe

Riferendosi al grafico sopraindicato, attraverso il metodo ReCiPe, si giunge alla conclusione che, per quanto riguarda tutti i valori presi in considerazione, il prepeg tradizionale, avrà circa il 30% di impatto in più del vitrimero.

Confronto grafico del ciclo di fine vita dei due prodotti, che, per quanto riguarda il prepreg vitrimerico, tiene in considerazione della possibilità di riciclo del materiale, invece per il prepreg tradizionale, si è preso in considerazione l'impatto ambientale dell'eventuale smaltimento in discarica.



Figura 18: confronto fine vita

Si può notare come a fine vita, per il prepreg tradizionale si verificherà una condizione di ulteriore impatto ambientale, proprio perché al contrario del vitrimerico, non verrà riciclato, ma bensì, smaltito in discarica.

4. CONCLUSIONI

La necessità di sviluppare processi più ecologici sta influenzando anche il settore dei compositi. Per questo motivo, la valutazione degli impatti ambientali delle tecniche di produzione di compositi. In questo studio, sono stati analizzati, due tipi di materiali differenti: un prepreg tradizionale, ed un vitrimero. Per mettere a confronto l'impatto ambientale dei due, si sono utilizzati due indicatori (GWP e ReCiPe midpoint). Lo studio LCA ha incluso le fasi principali dei processi, ovvero: La produzione dei prepreg, e i vari consumi. Nello studio condotto è evidente che il principale impatto ambientale, per i due materiali, è dato dalla produzione del prepreg.

Analizzando invece, i due indicatori presi in considerazione (GWP e ReCiPe), è noto che:

- Considerando il metodo GWP, risulta che, innanzitutto che, la produzione del prepreg ha maggiore impatto. E tenendo conto anche del ciclo di fine vita dei due materiali compositi, dal punto di vista ambientale, è conveniente utilizzare il vitrimero. Essendo che i valori corrispondono a circa 1,92kg CO₂-eq(vitrimero) contro circa 3,8kg CO₂-eq(tradizionale);
- Dall'analisi del metodo ReCiPe midpoint, si è visto come per tutte le categorie di impatto, il prepreg tradizionale è molto più impattante negativamente sull'ambiente, rispetto al Vitrimero. Per tutte le categorie, le percentuali del vitrimero si aggirano sul 30%, ed il restante 70% circa, per quanto riguarda il prepreg tradizionale.

In conclusione, si può affermare che l'utilizzo del vitrimero, sicuramente da dei benefits dal punto di vista di impatto ambientale, rispetto all'utilizzo del prepreg tradizionale.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Prof.ssa Eleonora Santecchia. Corso di perfezionamento (ingegneria dei materiali compositi)
- [2] Archimede Forcellese ^a, Marco Marconi ^b, Michela Simoncini ^c, Alessio Vita Life cycle impact assessment of different manufacturing technologies for automotive CFRP components Author links open overlay panel [https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122677]
- [3] A. Ruiz de Luzuriaga, R. Martin, N. Markaide, A. Rekondo, G. Cabanero, J. Rodriguez and I. Odriozola, Mater. Horiz., 2016, DOI: 10.1039/C6MH00029K
- [4] Gubanova, E., Kupinets, L., Deforz, H., Koval, V. E Gaska, K., (2020). Recycling Of Polymer Waste In The Context Of Developing Circular Economy. Architecture, Civil Engineering, Environment. 12(4), 99–108. [Doi: 10.21307/Acee-2019-055]
- [5] Plastiche, S., (2020). La nuova strada verde: l'Economia circolare nel riciclo della plastica. Soluzioni Plastiche. [https://www.soluzioniplastiche.com/post/la-nuova-strada-verde-l-economia-circolare-nelriciclo-della-plastica]
- [6] Tecnologie di riciclaggio dei polimeri 2020-2030, opzioni di fine vita per i rifiuti di plastica: strumenti, tendenze e mercati - MaTech. (s.d.). MaTech. [https://www.matech.it/tecnologie-diriciclaggio-dei-polimeri-2020-2030-opzioni-di-fine-vita-per-i-rifiuti-di-plastica-strumentitendenze-e-mercati/]
- [7] Palmer, J., Ghita, O. R., Savage, L., & Evans, K. E. (2009). Successful closed-loop recycling of thermoset composites. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 40(4), 490–498. [DOI: https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.02.002].
- [8] Pickering, S.J., (2010), Thermal methods for recycling waste composites, in: V. Goodship (Ed.), Management, Recycling and Reuse of Waste Composites, WP e CRC Press, Cambridge, UK, pp. 65-101
- [9] Yang, Y., Boom, R., Irion, B., van Heerden, D.-J., Kuiper, P. e de Wit, H., (2012). Recycling of composite materials. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. 51, 53–68. [DOI: 10.1016/j.cep.2011.09.007]

[10] Norma europea. Gestione ambientale, valutazione del ciclo di vita requisiti e linee guida. UNI EN ISO 14044(ottobre 2006)./

[11]Goedkoop, M., Heijungs, R., De Schryver, A., Struijs, J., van Zelm, R., 2008. ReCiPe 2008. A LCIA method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. Characterisation. A life cycle impact ... 133. <http://www.lcia-recipe.net>.

[12] <https://to-be.it/strumenti/simapro-software-di-life-cycle-assessment/>