



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria

**ANALISI DEGLI IMPATTI AMBIENTALI DI
DIVERSI PROCESSI DI PRODUZIONE DI
MANUFATTI IN MATERIALE COMPOSITO**

ANALYSIS OF THE ENVIRONMENTAL IMPACTS OF
DIFFERENT PRODUCTION PROCESSES FOR
COMPOSITE MATERIAL PRODUCTS

Relatore:
Prof. Ing. Alessio Vita

Tesi di Laurea di:
Lorenzo Pece

A.A. 2022/2023

INDICE

Capitolo 1 – Introduzione	4
1.1 CFRP	5
1.1.1 Processi di produzione per i CFRP	5
1.2 LCA	6
1.3 Stampa 3D	9
Capitolo 2 – Materiali e metodi	10
2.1 Studio dalla letteratura scientifica	10
Capitolo 3 - Caso di studio	13
3.1 Descrizione degli scenari	13
3.2 Analisi inventario	16
3.2.1 Densità dei costituenti	16
3.2.2 Consumi energetici	17
3.2.3 Stampo 3D	17
3.2.4 Autoclave	18
3.2.5 Stampo alluminio	18
3.2.6 Riassunto dati	18
3.3 Sima Pro	21
Capitolo 4 – Risultati	24
4.1 Analisi LCA su Excel	24
4.1.1 Analisi grafici prepeg e autoclave	24
4.1.2 Analisi grafici dei due scenari	27
4.1.3 Confronto tra i due scenari	32
4.1.4 Analisi sensitività impatto al variare del volume di produzione	33
Capitolo 5 – Conclusioni	35

INDICE DEI GRAFICI

Grafico 1 GWP prepreg.....	25
Grafico 2 CED prepreg.....	25
Grafico 3 GWP autoclave.....	26
Grafico 4 CED autoclave.....	26
Grafico 5 CED stampo 3D.....	27
Grafico 6 GWP stampo 3D.....	28
Grafico 7 GWP scenario totale con stampo 3D.....	28
Grafico 8 CED scenario totale stampo 3D	29
Grafico 9 GWP stampo alluminio	30
Grafico 10 CED stampo alluminio	30
Grafico 11 GWP scenario totale con stampo alluminio	31
Grafico 12 CED scenario totale con stampo in alluminio	31
Grafico 13 GWP confronto tra i due scenari	32
Grafico 14 CED a confronto tra i due scenari	33
Grafico 15 Andamento GWP per piccoli lotti.....	34

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 fasi del ciclo di vita	7
Figura 2 fasi fondamentali LCA.....	8
Figura 3 analisi LCA	16
Figura 4 scenario stampo in alluminio	22
Figura 5 scenario stampo 3D.....	22
Figura 6 fasi dettagliate stampo 3D.....	23

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 analisi emissioni cabapa e lino	11
Tabella 2 analisi emissioni cotone biologico.....	11
Tabella 3 analisi traversa di trasmissione	11
Tabella 4 analisi impatto di materiali per la realizzazione di travi.....	12
Tabella 5 analisi impatti di resina polipropilene 1	12
Tabella 6 analisi impatti di resina polipropilene 2	12
Tabella 7 dati densità dei costituenti	19
Tabella 8 dati consumi energetici	19
Tabella 9 dati stampo 3D.....	20
Tabella 10 dati autoclave.....	20
Tabella 11 dati stampo in alluminio	20

Capitolo 1 – Introduzione

Oggi viviamo in un'epoca in cui l'umanità è sempre più consapevole degli effetti devastanti dell'inquinamento ambientale causato principalmente dall'uso massiccio di combustibili fossili. Questa crescente consapevolezza ha innescato una serie di cambiamenti e ha portato l'attenzione su un problema urgente: il riscaldamento globale.

Il riscaldamento globale è ormai un fatto innegabile, con ripercussioni dirette sulla qualità della vita e sul futuro del nostro pianeta. Le case automobilistiche, tra i principali responsabili delle emissioni di gas serra, stanno reagendo a questa emergenza e cercano attivamente di contribuire a mitigare il problema.

Un aspetto fondamentale di questa risposta è la transizione verso una produzione sostenibile. Ciò significa che le case automobilistiche stanno cercando di rivedere i propri processi produttivi e i propri prodotti, orientandosi verso soluzioni che riducano l'impatto ambientale. Gli aspetti principali presi in considerazione sono: la riduzione delle emissioni di carbonio, l'adozione di materiali riciclabili e l'investimento in tecnologie a basse emissioni.

Un processo produttivo che sta prendendo sempre più piede è il bag molding, noto anche come stampaggio a pressione in autoclave, processo che è stato anche soggetto di questo studio. Rappresenta il metodo ideale per ottenere elevate prestazioni in combinazione con bassi volumi di produzione e si distingue per la sua versatilità nell'ottenere forme complesse e dettagliate riuscendo a garantire un'elevata ripetibilità. Questo processo coinvolge l'impiego di un tessuto o nastro in fibra di carbonio, già impregnato con una matrice termoindurente, che viene accuratamente stratificato su uno stampo in alluminio. Subito dopo questa disposizione sequenziale, si procede alla creazione di un sacco a vuoto mediante l'utilizzo di diversi materiali consumabili. La fase principale avviene in autoclave, durante la polimerizzazione, che assicura un indurimento uniforme del materiale composito, conferendo al prodotto finale le caratteristiche di resistenza e leggerezza desiderate. L'utilizzo di una matrice termoindurente, insieme alla pressione controllata e al vuoto generato, consente di ottenere un prodotto finale con prestazioni ottimali e una struttura solida.

1.1 CFRP

Un approccio che sta guadagnando interesse per il risparmio di massa e, allo stesso tempo, il miglioramento delle prestazioni consiste nel sostituire i metalli con materiali più leggeri, come la plastica rinforzata con fibra di carbonio (CFRP), per produrre parti sia strutturali che non strutturali. [1]

Questo studio è incentrato proprio sull'utilizzo di CFRP, un materiale composito avanzato che combina fibre di carbonio ad alta resistenza con una matrice polimerica. Questo materiale è ampiamente utilizzato in vari settori industriali grazie alle sue eccezionali proprietà meccaniche, alla leggerezza e alla resistenza alla corrosione. [2] Le fibre di carbonio del CFRP sono costituite da sottili filamenti di carbonio, estremamente leggeri e molto resistenti. Queste fibre sono intrecciate o disposte in modo casuale all'interno di una matrice polimerica, che può essere costituita da resine epossidiche, poliestere o altre resine termoindurenti. La leggerezza è una proprietà aggiuntiva del CFRP che può ridurre, ad esempio, il peso complessivo di un veicolo fino al 10% rispetto all'acciaio e all'alluminio con una riduzione del consumo di carburante o un aumento della durata delle batterie per i veicoli elettrici, con conseguente minore impatto ambientale durante la fase di utilizzo. In effetti, i compositi CFRP stanno sempre più sostituendo altri materiali come l'acciaio e l'alluminio in un'ampia gamma di settori come le attrezzature sportive, l'energia eolica, l'aeronautica, l'edilizia e l'automotive. Proprio nell'industria automobilistica, il CFRP viene utilizzato per produrre parti strutturali leggere, come pannelli della carrozzeria, telai e componenti della cabina presenta molti vantaggi, tra cui il risparmio di peso, l'aumento dell'efficienza energetica, la riduzione delle emissioni di CO₂ e una migliore resistenza alla corrosione.

1.1.1 Processi di produzione per i CFRP

I sistemi di produzione principali sono ad esempio: compression molding (stampaggio a compressione), bag molding (stampaggio in sacchi a pressione), resin transfer molding (stampaggio a trasferimento di resina). [3]

I processi basati su materiali pre-impregnati, come lo stampaggio in sacchi a pressione (bag molding) o lo stampaggio a compressione (compression molding), sono tipicamente associati alle migliori proprietà meccaniche dei componenti, ottenute grazie all'elevata

pressione di compattazione a al lungo tempo di polimerizzazione, che consentono di evitare il flusso di resina e i vuoti. I metodi basati su stampi a secco, come lo stampaggio a trasferimento di resina (resin transfer molding), sono preferiti in quanto le prestazioni del processo, come il tempo di produzione, sono predominanti rispetto alle prestazioni del prodotto. Il processo bag molding è il metodo più adatto quando sono richieste alte prestazioni e bassi volumi di produzione. In questo processo, un tessuto o un nastro in fibra di carbonio, pre-impregnato con una matrice termoindurente, viene impilato in sequenza su uno stampo in alluminio o plastica. Successivamente, viene realizzato un sacco a vuoto utilizzando diversi materiali di consumo e la fase di polimerizzazione avviene in un forno o in un'autoclave.

Nonostante le innegabili potenzialità dei CFRP, sono state sollevate da molti studi, tra cui gli studi Life Cycle Assessment (LCA) e Life Cycle Costing (LCC), preoccupazioni ambientali ed economiche sulla diffusione dei CFRP. LCA e LCC sono i principali strumenti adottati, rispettivamente, per la valutazione degli oneri ambientali e di costo nell'intero ciclo di vita di un prodotto o di un servizio. Questi studi hanno evidenziato come il CFRP presenti alcuni lati negativi, tra cui gli elevati costi di produzione, i complessi processi produttivi e la difficoltà di riciclaggio. [4]

1.2 LCA

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

Si tratta di un metodo oggettivo quantitativo che consente di esprimere in termini numerici il potenziale impatto ambientale di un prodotto, servizio o attività sui differenti macrosistemi terrestri, attraverso una quantificazione dei consumi di materiale, energia e delle emissioni ambientali in relazione all'intero ciclo di vita. Quindi, si includono nell'analisi le fasi di estrazione e trattamento delle materie prime, la fabbricazione, il trasporto, la fase d'uso e la fase di fine vita. [5]

Nella Figura 1 sono illustrate tutte le fasi del ciclo di vita del prodotto incluse nell'analisi LCA.

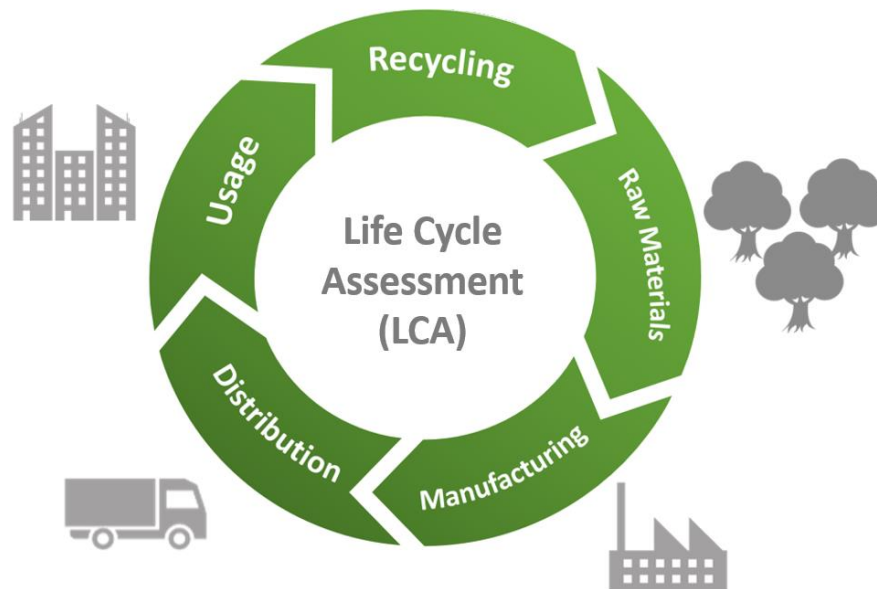


Figura 1 fasi del ciclo di vita

L'obiettivo di questo strumento è quello di individuare le fasi del ciclo vita che influiscono maggiormente sull'impatto ambientale complessivo, in modo tale da agire su quelle più critiche per ottenere dei miglioramenti, ovvero per ridurre l'impatto ad esse relativo . [6]

Generalmente, l'LCA opera mediante due approcci:

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

Il quadro di riferimento per la LCA utilizzato è quello stabilito dagli standard dell'Organizzazione internazionale di standardizzazione (ISO 14040 2006; ISO 14044

2006), e comprende l'esecuzione di quattro fasi fondamentali, rappresentate nella figura 2 sottostante:

Definizione dell'obiettivo e degli scopi, Analisi dell'Inventario, Valutazione degli impatti ed Interpretazione dei risultati.

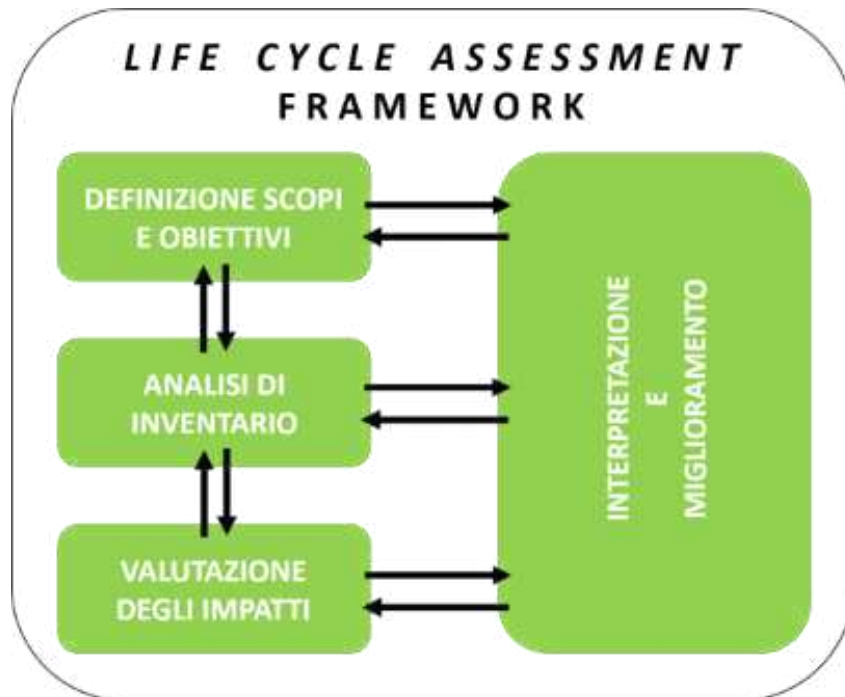


Figura 2 fasi fondamentali LCA

1. Definizione dell'obiettivo e dello scopo: l'obiettivo dello studio, i prodotti o i sistemi considerati, l'unità funzionale e i confini spaziali e temporali;
2. Analisi dell'inventario del ciclo di vita (Life Cycle Inventory LCI): raccolta e quantificazione di tutti gli input e output all'interno dei confini del sistema;
3. Valutazione dell'impatto (Life Cycle Impact Assessment LCIA): fase nella quale vengono effettivamente identificati e quantificati gli impatti ambientali associati del prodotto o servizio analizzato, lungo tutte le sue fasi, dalla produzione allo smaltimento;
4. Interpretazione dei risultati: conclusioni.

[7] [8]

1.3 Stampa 3D

Diverse tecnologie di produzione di CFRP, come la lavorazione in autoclave o in pressa, richiedono l'uso di stampi; questi sono tipicamente prodotti utilizzando alluminio, acciaio o materiali compositi a fibra lunga, e sono caratterizzati da lunga durata, costi elevati e impatti ambientali [9,10].

Quindi, per piccoli lotti o prodotti personalizzati, aumentano fortemente i costi dei componenti da stampare. Per superare tali problemi sono stati studiati metodi di produzione alternativi e innovativi, come le tecnologie di stampa 3D.

I processi di produzione additiva offrono l'opportunità di ridurre i tempi e i costi di produzione delle parti, nonché la quantità di materie prime necessarie per la lavorazione. Sul mercato sono attualmente disponibili diversi metodi di stampa 3D che consentono anche la stampa di più materiali. Tra le diverse tecniche presenti, la Fused Filament Fabrication (FFF) mostra un grande potenziale nello stampaggio di compositi a fibra corta. Recentemente questa tecnica ha riscosso un maggiore interesse da parte della comunità di ricerca a causa del suo basso spreco di materiale, una capacità di facile gestione e il costo relativamente basso rispetto ad altre tecniche. [11]

Tuttavia, il processo FFF presenta alcune limitazioni, come ad esempio le parti termoplastiche che hanno scarse proprietà meccaniche rispetto ai metodi di produzione tradizionali come lo stampaggio a iniezione. [12]

Uno dei materiali polimerici per stampa 3D più performanti è un materiale composito costituito da una matrice polimerica rinforzata con fibre di carbonio corte. In particolare, la matrice PA 6.10 garantisce minore igroscopicità e maggiore stabilità nel tempo. La poliammide rinforzata con fibra di carbonio ha un'eccellente resistenza all'abrasione e agli agenti chimici, creando, insieme a eccellenti proprietà meccaniche, un candidato perfetto per applicazioni di sostituzione del metallo. Infatti, è considerato un candidato per la sostituzione del metallo nelle applicazioni ad alto carico grazie alla sua elevata resistenza alla trazione che lo rende paragonabile all'alluminio. [13,14]

Capitolo 2 – Materiali e metodi

2.1 Studio dalla letteratura scientifica

Il presente studio è partito con un'analisi dalla letteratura all'interno di SCOPUS, una delle più grandi banche dati bibliografiche e di abstract al mondo, alla ricerca di articoli che trattassero di analisi LCA per i CFRP in ambito automobilistico. La ricerca è stata possibile grazie all'inserimento delle seguenti parole chiavi, con l'ausilio di operatori logici:

- LCA or Life Cycle Assessment and
- composite material or CFRP or carbon fiber and
- car or automotive or racing.

I documenti trovati (162) dovevano quindi contenere al loro interno le parole sopra riportate; di questi 162 articoli sono stati analizzati i più recenti, quelli degli ultimi 3 anni, in totale 48. Di questi sono stati scartati quelli non inerenti alla ricerca mentre gli altri sono stati riassunti e analizzati estrapolando i contenuti principali e schedulandoli secondo le seguenti caratteristiche:

- Termoplastico/termoindurente
- Tipo di materiale e di rinforzo
- Applicazioni
- Sistema di produzione
- Riciclato e recuperato
- Confini del sistema

La seconda parte della ricerca si è soffermata invece sull'analisi delle emissioni di CO₂, andando quindi a selezionare tra questi articoli quelli più inerenti al tema. Ci si è soffermati sugli impatti dei vari materiali e si è potuto effettuare un confronto tra i compositi tradizionali e i biocompositi realizzati con materiali alternativi e meno impattanti. Nelle seguenti tabelle sono stati riassunti i dati più significativi dalla ricerca, inerenti alle emissioni di GWP dei materiali e il confronto con i due tipi di composito.

Nella tabella 1 troviamo due materiali come canapa e lino [15] che risultano essere entrambi vantaggiosi con i biocompositi C/PLA e L/PLA.

MATERIALE	GWP	BIOCOMPOSITO	COMPOSITO TRADIZIONALE	CONFRONTO BIOCOMPOSITO VS COMPOSITO TRADIZIONALE
CANAPA	1,57 kg	C/PLA 1,7 kg	PA66/GF 9,14 kg di CO2	-81% emissioni
LINO	1,27 kg	L/PLA 1,19 kg	PA66/GF 9,14 kg di CO2	-87% emissioni

Tabella 1 analisi emissioni canapa e lino

Nella seguente, tabella 2, troviamo l'analisi del cotone biologico. [16]

MATERIALE	GWP (CO2 eq)	BIO COMPOSITO	COMPOSITO TRADIZIONALE	CONFRONTO BIOCOMPOSITO VS COMPOSITO TRADIZIONALE
COTONE BIOLOGICO	978 kg -46% rispetto al tradizionale	Fibra sisal	Fibra in vetro	-75/95% emissioni

Tabella 2 analisi emissioni cotone biologico

La tabella 3 illustra l'analisi del documento riguardante una traversa di trasmissione. [17]

MATERIAE	PROCESSO	BIOCOMPOSITO	COMPOSITO TRADIZIONALE	CONFRONTO BIOCOMPOSITO VS COMPOSITO TRADIZIONALE
TRAVERSA DI TRASMISSIONE	Stampaggio a compressione	Lastre in fibra di carbonio CF-SMC	Alluminio A	-30/40% emissioni

Tabella 3 analisi traversa di trasmissione

Nella seguente tabella 4 viene riassunto l'analisi di diversi tipi di materiali utilizzati per la produzione di travi. [18]

MATERIALE	PROCESSO	GWP (CO2 eq)
Alluminio AL	Stampaggio	13,877 kg
Acciaio ST	Stampaggio	8,860 kg
Termoplastica rinforzata con fibra di carbonio CF-TP	Stampaggio a trasferimento di resina RTM	4,492 kg
Termoset rinforzato con fibra di carbonio CF-TS	Stampaggio a trasferimento di resina RTM	10,297 kg
Termoset rinforzato con fibra di vetro GF-TS	Stampaggio a trasferimento di resina RTM	3,312 kg
Polycarbonato	Termoformatura	4,649 kg

Tabella 4 analisi impatto di materiali per la realizzazione di travi

Con la tabella 5 e tabella 6 si è riassunta l'analisi di due documenti riguardanti la resina polipropilene. [19,20]

MATERIALE	PROCESSO	GWP (CO2 eq)	BIOCOMPOSITO	COMPOSITO TRADIZIONALE	CONFRONTO BIOCOMPOSITO VS COMPOSITO TRADIZIONALE
Resina polipropilene	Stampaggio a iniezione		Rinforzato con biocarbonio e miscanthus 11,3 kg	PP con talco e colorante 12,8 kg	-11,7% emissioni
MISCANTHUS		1,32 kg			
BIOCARBONIO		0,11 kg			
TALCO		0,17 kg			
COLORANTE		2,55 kg			
RESINA PP		1,23 kg			

Tabella 5 analisi impatti di resina polipropilene 1

MATERIALE	PROCESSO	BIOCOMPOSITO	COMPOSITO TRADIZIONALE	CONFRONTO BIOCOMPOSITO VS COMPOSITO TRADIZIONALE
Resina polipropilene	estrusione e stampaggio a iniezione	Biochar di Miscanthus MB-PP 23,74 kg	Talco-PP 29,69 kg	-25% emissioni

Tabella 6 analisi impatti di resina polipropilene 2

Da questa ricerca si è dedotto come potenzialmente esistano in natura materiali alternativi che possono avere impatti ambientali inferiori. Tutti i biocompositi studiati hanno evidenziato un notevole risparmio di emissioni e potranno quindi in futuro andare a sostituire i compositi tradizionali più dannosi per l'ambiente.

Capitolo 3 - Caso di studio

Il nostro caso di studio verte proprio sulla possibilità di andare a sostituire l'alluminio con un materiale polimerico. Quest'ultimo viene realizzato grazie a uno stampo in CarbonPA utilizzando la tecnologia di stampa 3D FFF, e viene utilizzato per la laminazione e la produzione di una parte finale in composito. Il lavoro è stato quello di valutare gli impatti ambientali della produzione in composito realizzati in autoclave, con due diversi tipi di stampo:

1. Stampo tradizionale in alluminio
2. Stampo in 3D

3.1 Descrizione degli scenari

- Scenario stampo in alluminio:
 1. PREPREG: La prima fase coinvolge la preparazione del materiale composito, noto come prepreg. Questo materiale è costituito da tessuti in fibra di carbonio o vetro impregnati con una resina termoindurente o termoplastica. I tessuti vengono tagliati in forme specifiche per adattarsi al prodotto finale. I singoli strati vengono posizionati nello stampo in alluminio, seguendo uno schema specifico di orientamento delle fibre per ottenere le proprietà desiderate del composito.
 2. LAVORAZIONE PER ASPORTAZIONE DI TRUCIOLO: Per creare lo stampo in alluminio, è necessario partire da un blocco grezzo di alluminio. Questo blocco viene lavorato utilizzando macchine di fresatura o tornitura per rimuovere il materiale in eccesso e ottenere la forma desiderata del prodotto. Durante questo processo, strati di alluminio vengono progressivamente rimossi fino a ottenere la cavità o la forma specifica richiesta per la laminazione. Questo processo richiede un alto grado di precisione per garantire uno stampo con le dimensioni e la geometria richiesta.
 3. LAMINAZIONE E AUTOCLAVE: Dopo aver formato lo stampo in alluminio avviene il processo di laminazione insieme al materiale

composito. Questo processo può richiedere la disposizione accurata dei tessuti e l'applicazione di pressione per assicurare che il materiale composito si adatti alla forma dello stampo. Successivamente il pezzo entra nell'autoclave, un dispositivo che combina calore e pressione per consolidare il materiale composito. Il processo di autoclave è controllato con precisione e coinvolge un ciclo di temperatura e pressione programmato per indurire la resina, fondere il materiale prepreg e consolidare le fibre di rinforzo. Questo processo può richiedere diverse ore a diverse centinaia di gradi Celsius. Al termine del processo in autoclave, oltre a inevitabili scarti, avremo il pezzo finale.

- Scenario stampo 3D:
 1. **PRODUZIONE DEL FILAMENTO CARBONPA:** La prima fase coinvolge la produzione del filamento di CarbonPA, che è il materiale di base utilizzato nel processo di stampa 3D. Il CarbonPA è un materiale termoplastico rinforzato con fibre di carbonio, noto per la sua resistenza e leggerezza. Il filamento viene prodotto attraverso l'estrusione di pellet di CarbonPA attraverso una macchina che lo trasforma in un filamento continuo di diametro specifico.
 2. **RISCALDAMENTO:** Il filamento di CarbonPA viene caricato in una stampante 3D FFF. Durante il processo di stampa, il filamento viene riscaldato a temperature precise per renderlo fuso e viene depositato strato su strato sulla piattaforma di stampa per creare il modello 3D desiderato. Per effettuare questo passaggio la stampante 3D è guidata da un modello CAD che controlla la posizione del filamento per ottenere la forma desiderata.
 3. **STAMPO IN 3D CON LAMINAZIONE:** Dopo aver completato lo stampo in CarbonPA, il passo successivo coinvolge la laminazione del composito. Il materiale composito, come abbiamo visto anche nel caso dello stampo in alluminio, costituito da tessuti in fibra di carbonio impregnati con resina, viene posizionato all'interno dello stampo in 3D. La laminazione del composito può richiedere la disposizione accurata dei

tessuti e l'applicazione di pressione per assicurare che il materiale composito si adatti alla forma dello stampo.

4. AUTOCLAVE: Come nel caso del processo con stampo in alluminio, il materiale entra in autoclave, dove viene applicato calore e pressione controllati. Questo processo indurisce la resina e consolida le fibre del composito, creando un prodotto finale solido e resistente.

Confrontando i due scenari notiamo come Entrambi coinvolgono la laminazione del composito e l'uso dell'autoclave, ma le fasi iniziali e il metodo di creazione dello stampo differiscono significativamente.

Lo scenario con stampo in alluminio prevede la creazione di uno stampo solido tramite lavorazione meccanica, mentre lo scenario con stampo 3D utilizza una stampante 3D per creare lo stampo in CarbonPA.

Nel primo caso, si parte da un blocco grezzo di alluminio, mentre nel secondo caso si parte dalla produzione di un filamento termoplastico rinforzato con fibre di carbonio.

3.2 Analisi inventario

Nel nostro caso di studio l'analisi dell'inventario è iniziata evidenziando, nel seguente schema in figura 3, quelle che sono le fasi principali della produzione per i due diversi scenari: scenario stampo alluminio e scenario stampo 3D; così facendo è stata effettuata un'analisi LCA dalla culla al cancello. Dalla letteratura sono stati trovati tutti i dati necessari per l'analisi LCA, rapportati al nostro caso di studio come vedremo di seguito.

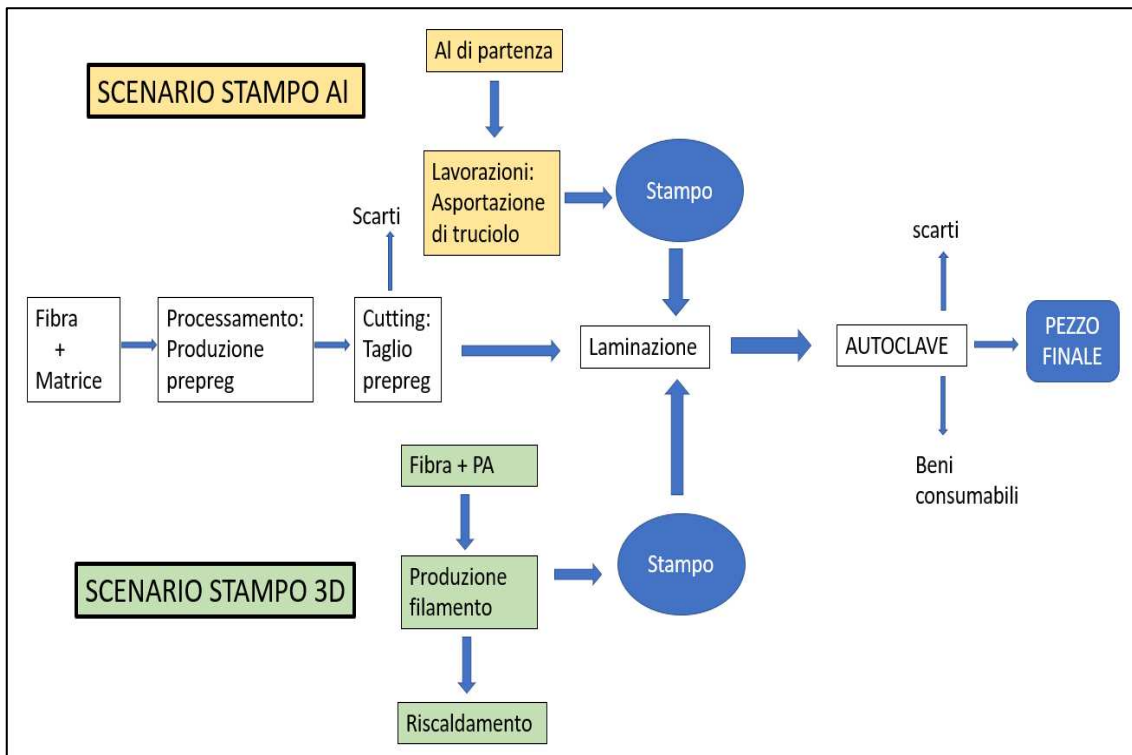


Figura 3 analisi LCA

3.2.1 Densità dei costituenti

- Resina epossidica (PA) = $P_m=1,1$ (matrice)
- Fibra di canapa $P_f=0,86$ (fibra)

Attraverso la regola delle miscele possiamo ricavare la densità del composito:

$$P_c = (0,86 * 0,6) + (1,1 * 0,4) = 0,956$$

$$W_f = \frac{0,86}{0,956} * 0,6 = 0,54 = 54\%$$

$$W_m = 46\%$$

$$\text{Volume parte forata} = 2,308\text{mm}^3 * 3\text{mm}^3 = 6924\text{mm}^3 = 6,924\text{cm}^3$$

$$\text{Peso totale pezzo finale} = 6,924 \text{ cm}^3 * \frac{0,956g}{\text{cm}^3} = 6,62g$$

A cui aggiungiamo circa un +30% = 9,46g che è il peso del materiale pre-impregnato che acquisto, di cui 4,35g matrice e 5,11g fibra.

$$\text{Impatti ambientali fibra di carbonio} = 0,00511kg * \frac{25kg}{\text{CO}_2} = 0,12775 \frac{kg}{\text{CO}_2}$$

$$\text{Impatti ambientali fibra pezzo stampato} = 0,03817kg * \frac{25kg}{\text{CO}_2} = 0,95425 \frac{kg}{\text{CO}_2}$$

3.2.2 Consumi energetici

Dalla letteratura, fonte [21], sono stati presi i dati inerenti al consumo energetico delle fasi di lavorazione prepreg e cutting, che sono stati rapportati per il nostro caso attraverso le seguenti equazioni:

- PREPREG: $\frac{40MJ * 9,46g}{1000g} = 0,378MJ$
- CUTTING: $\frac{0,74kwh * 0,00946kg}{15,7kg} = 0,000446kwh$

$$\text{Peso pezzo stampato: } 163,117\text{cm}^3 * 1,17 \frac{g}{\text{cm}^3} = 190,85g$$

Di cui: 38,17g carbonio, 152,68g poliammide

3.2.3 Stampa 3D

Analizzando la fonte [22] sono stati estrapolati I dati relativi allo stampo 3D e ai relativi consumi sotto riportati nelle equazioni.

$$\text{TEMPO DI STAMPA: } \frac{4,04h * 190,85g}{67,86g} = 11,36 [h]$$

RISCALDAMENTO:

- Filament dryng: 413,48 [wh] (non dipende dal peso)
- Filament heating: $\frac{858,56wh * 190,85g}{67,86g} = 2414,62[wh]$

3.2.4 Autoclave

Riprendendo la fonte [21] sono stati raccolti i dati necessari per calcolare i consumi e gli impatti dell'autoclave come sotto riportati nelle equazioni:

$$\text{CONSUMO: } \frac{17\text{kwh} * 0,00662}{11,4\text{kg}} = 0,01\text{kwh}$$

$$\text{VACUUM BAG polyamide 66 (PA66): } \frac{500\text{g} * 6,62}{11400} = 0,29\text{g}$$

$$\text{FILM} = 0$$

$$\text{BREATHER polyethylene terephthalate (PET): } \frac{375\text{g} * 6,62}{11400} = 0,217\text{g}$$

$$\text{RELEASE FILM polytetrafluoroethylene (PTFE): } \frac{(55\text{g} * 6,62\text{g})}{11400\text{g}} = 0,032\text{g}$$

$$\text{RELEASE AGENT organic solvent: } \frac{30\text{g} * 6,62}{11400\text{g}} = 0,017\text{g}$$

3.2.5 Stampo alluminio

Di seguito sono riportati i dati inerenti allo stampo in alluminio:

$$\text{Densità alluminio: } 2,7 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$\text{Peso alluminio: } 648\text{g}$$

$$\text{Alluminio removed by milling: } 207,6\text{g}$$

$$\text{Peso totale: } 648\text{g} + 207,6\text{g} = 855,6\text{g}$$

3.2.6 Riassunto dati

Tutti i dati sopra citati sono stati riportati in maniera riassuntiva nelle tabelle di seguito (tabella 7, tabella 8, tabella 9, tabella 10, tabella 11).

DENSITÀ DEI COSTITUENTI	DATI
COSTITUENTI DEL COMPOSITO	
Resina epossidica (PA)	
- Pm (matrice)	1,1
- Fibra di canapa (Pf)	0,86
- Pc (densità del composito)	0,956
- Wf (percentuale in peso di fibra)	54%
- Wm (percentuale in peso di matrice)	46%
VOLUME PARTE FORATA	6,924 cm ³
PESO TOTALE PEZZO FINALE	6,62 g
- + aggiunta 30%	9,46 g
- Matrice (pre-impregnato)	4,35 g
- Fibra (pre-impregnato)	5,11 g
IMPATTI AMBIENTALI	
- Impatti ambientali fibra di carbonio	0,12775 kg/CO2
- Impatti ambientali fibra pezzo stampato	0,95425 kg/CO2

Tabella 7 dati densità dei costituenti

CONSUMI ENERGETICI	DATI
PREPREG	0,378 MJ
CUTTING	0,000446 kWh
PESO PEZZO STAMPATO	190,85 g
- Carbonio	38,17 g
- Poliammide	152,68 g

Tabella 8 dati consumi energetici

STAMPO 3D		DATI
TEMPO DI STAMPA		11,36 h
RISCALDAMENTO		
- Filament drying		413,48 Wh
- Filament heating		2.414,62 Wh

Tabella 9 dati stampo 3D

AUTOCLAVE		DATI
CONSUMO		0,01 kWh
VACUUM BAG (PA66)		0,29 g
FILM		0 g
BREATHING (PET)		0,217 g
RELEASE FILM (PTFE)		0,032 g
RELEASE AGENT (solvente)		0,017 g

Tabella 10 dati autoclave

STAMPO IN ALLUMINIO		DATI
Densità alluminio (ρ)		2,7 g/(cm ³)
Peso alluminio (senza lavorare)		648 g
Alluminio rimosso dalla fresatura		207,6 g
Peso totale (dopo lavorazione)		855,6 g

Tabella 11 dati stampo in alluminio

3.3 Sima Pro

Tutti i dati trovati per l'analisi LCA sono stati inseriti e implementarli su Sima Pro, il software più utilizzato per supportare l'analisi LCA di un prodotto, processo o servizio durante la fase di LCIA. [23]

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

Sima Pro 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.

Nel nostro caso di studio sono stati implementati i dati presi precedentemente riguardanti:

1. Prepreg
2. Autoclave
3. Stampo 3D
4. Stampo alluminio

Di seguito nelle immagini 4 e 5 vengono riportati i due schemi degli scenari implementati dal software.

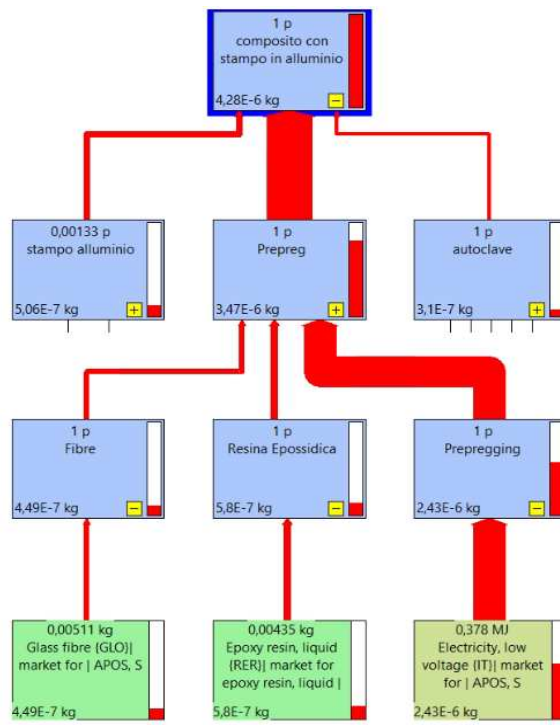


Figura 4 scenario stampo in alluminio

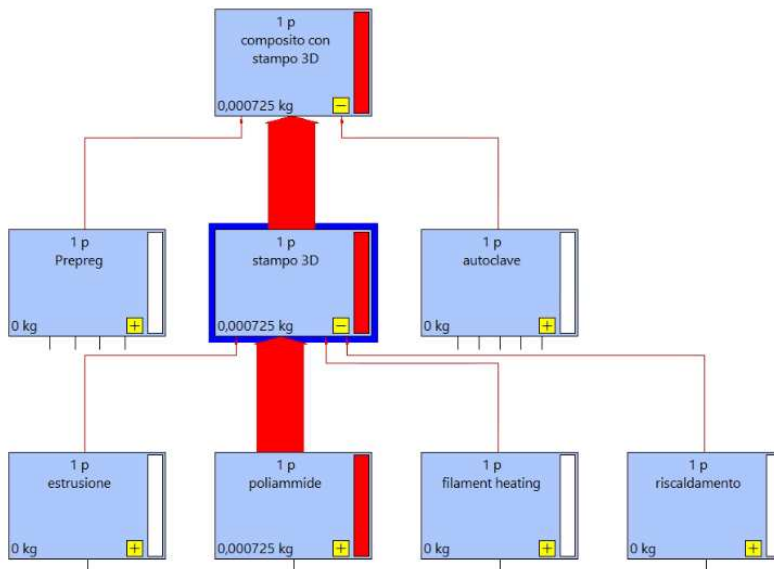


Figura 5 scenario stampo 3D

Nella figura 6 viene mostrato nel dettaglio le fasi di lavorazione necessarie per arrivare allo stampo in 3D. Graficamente possiamo notare, dalla freccia rossa notevolmente più spessa, come la lavorazione della poliammide abbia un impatto notevolmente elevato rispetto al resto della lavorazione.

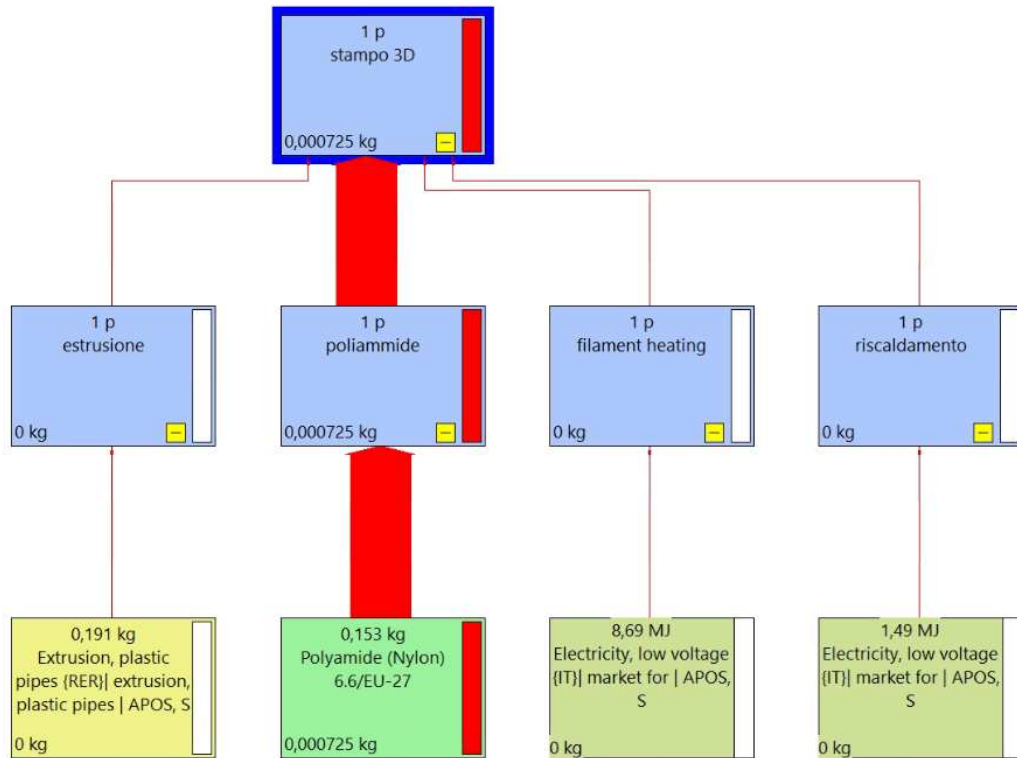


Figura 6 fasi dettagliate stampo 3D

Capitolo 4 – Risultati

In questa fase dello studio è stata effettuata un'analisi e un confronto critico dei risultati ottenuti da Sima Pro.

4.1 Analisi LCA su Excel

I dati sono stati trascritti su Excel e tramite il foglio di calcolo è stato possibile analizzare i risultati. Da questi sono stati creati dei grafici per effettuare un confronto più oculato tra i due diversi scenari, rendendo visibili e facilmente intuibili le conclusioni. Di seguito saranno riportati tutti i grafici in questione.

4.1.1 Analisi grafici prepreg e autoclave

Nei seguenti grafici è descritto rispettivamente l'impatto ambientale in termini di Global Warming Potential (GWP) e Cumulative Energy Demand (CED) per due processi di lavorazione: il prepreg, grafico 1 e 2, e per l'autoclave, grafico 3 e 4. Come abbiamo visto in precedenza sono due processi indispensabili per entrambi gli scenari, quindi verranno presi in considerazione entrambi quando si andranno a calcolare gli scenari totali.

Nel dettaglio, per i consumi di GWP del prepreg la fase di prepegging è sicuramente quella maggiormente impattante 0,04008 kg CO₂ eq, considerando il totale dell'impatto che è di 0,07198 kg CO₂ eq; in termini di CED anche qui la fase più impattante è quella del prepegging, 0,908 MJ, al fronte del totale che è di 1,546 MJ.

Per quanto riguarda gli impatti ambientali durante il processo in autoclave, essi sono meno significativi rispetto alla fase precedente. Infatti in termini di GWP si avrà un impatto totale pari a 0,0116 kg CO₂ eq, mentre per il CED riscontriamo un impatto totale di 0,1475 MJ.

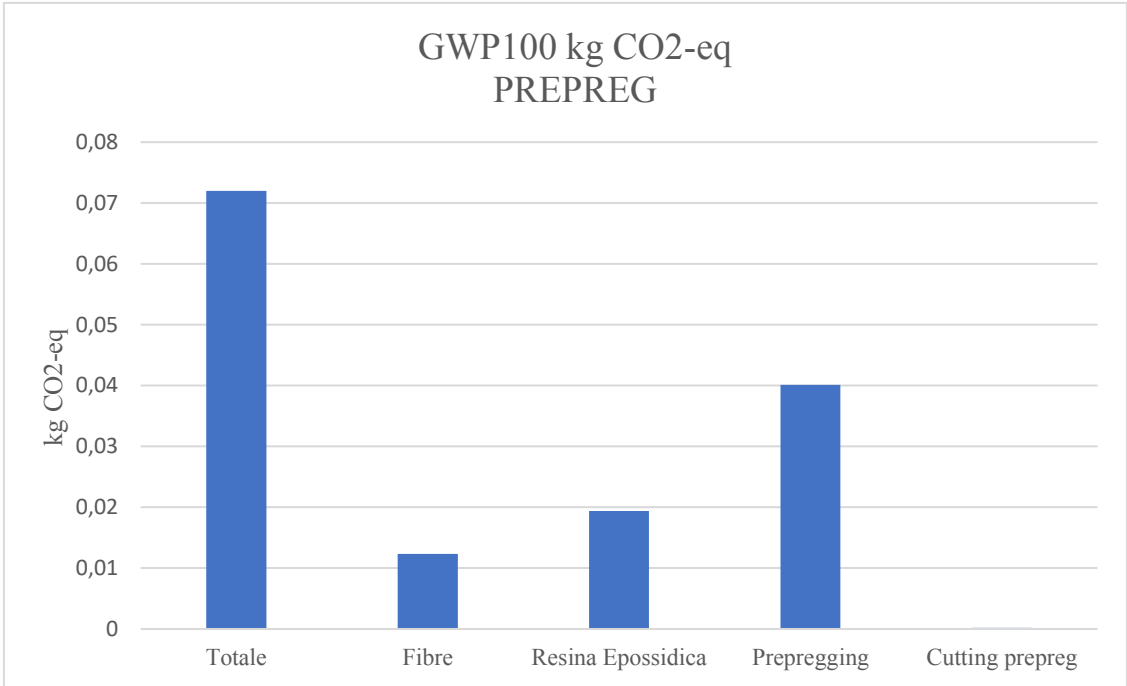


Grafico 1 GWP prepreg

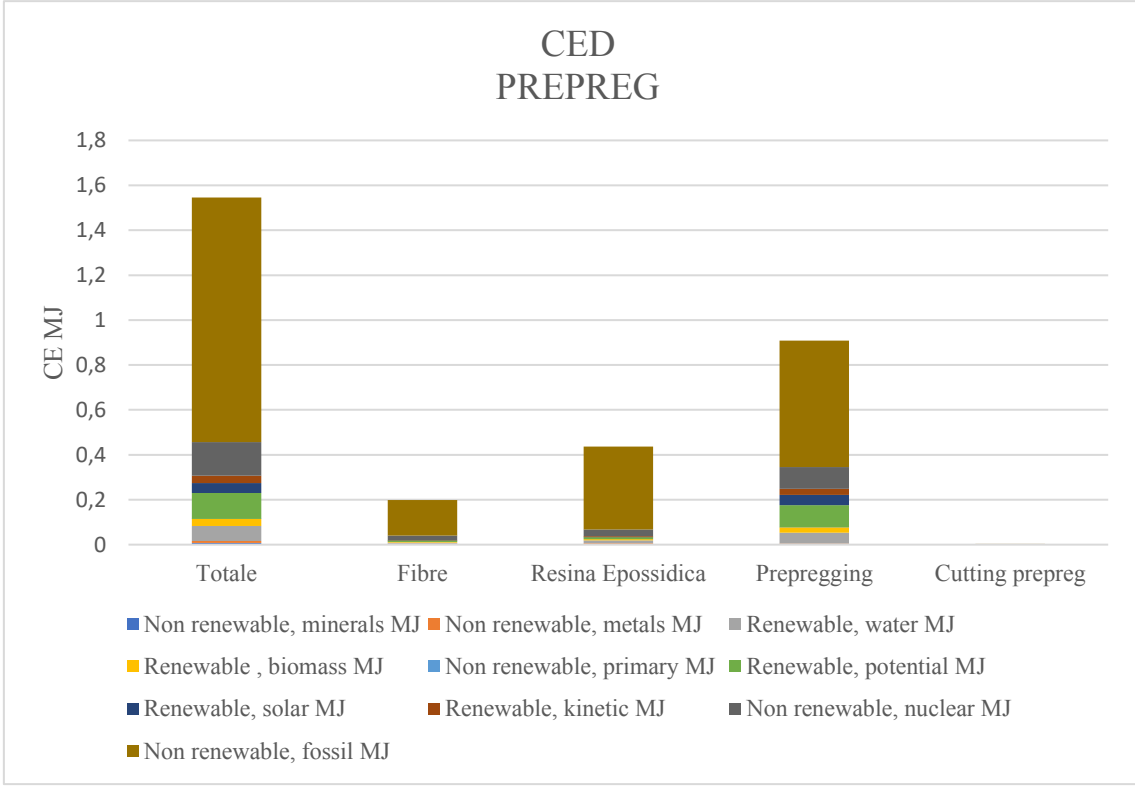


Grafico 2 CED prepreg

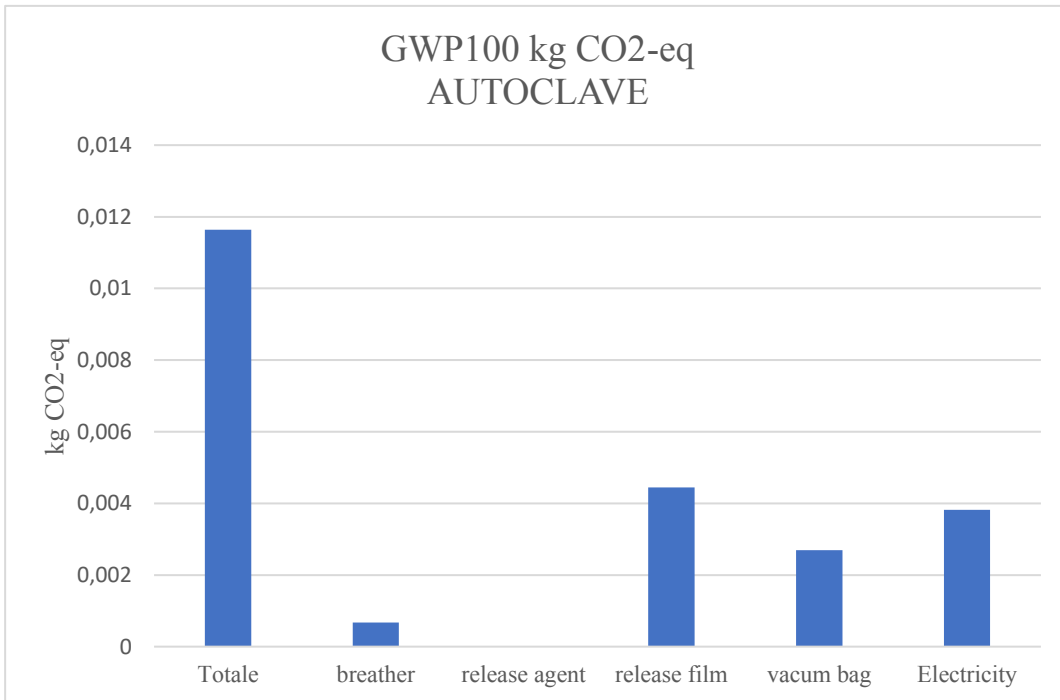


Grafico 3 GWP autoclave

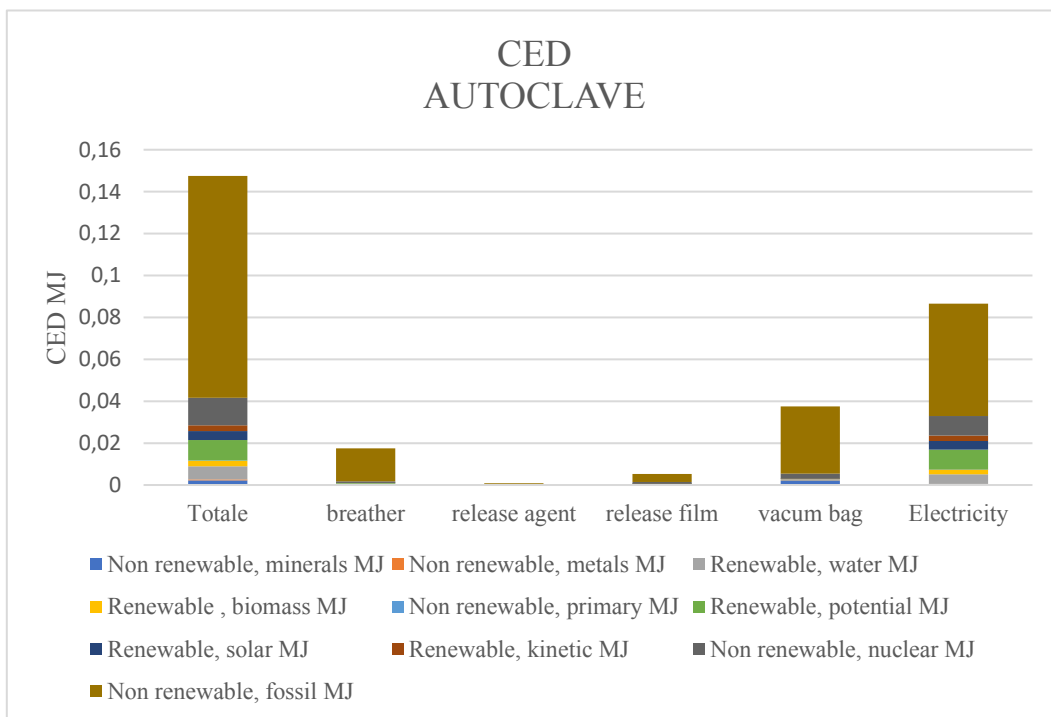


Grafico 4 CED autoclave

4.1.2 Analisi grafici dei due scenari

Successivamente si è andata ad analizzare quelli che sono gli impatti ambientali dello stampo 3D, per il CED e per il GWP, rispettivamente nel grafico 5 e grafico 6, e ottenuti i dati si è potuto effettuare il calcolo totale dello scenario dello stampo 3D sempre in termini di GWP, nel grafico 7, e CED, nel grafico 8. Lo stampo 3D ha un impatto complessivo in termini di CO2 di 2,12790 kg co2 eq, nel dettaglio i dati dell'estrusione e del riscaldamento sono minimi se paragonati a quelli della poliammide 0,99489 kg co2 eq, del filament heating 0,92189 kg co2 eq e della fibra di carbonio 0,95425 kg co2 eq.

In termini di CED, invece, il totale dell'impatto ambientale è di 25,467 MJ e notiamo come l'impatto più significativo sia dato dal filament heating con 20,88 MJ.

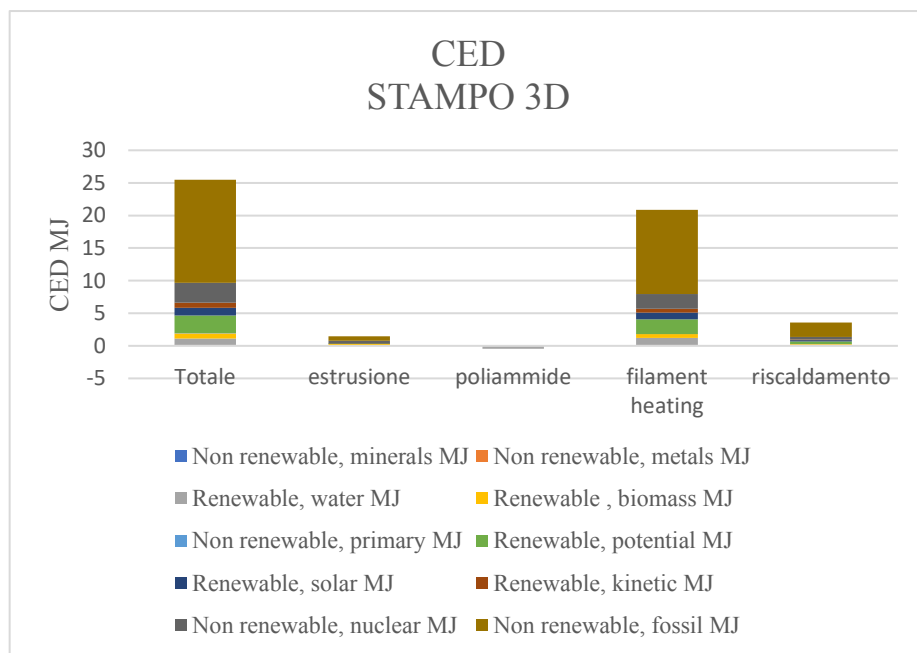


Grafico 5 CED stampo 3D

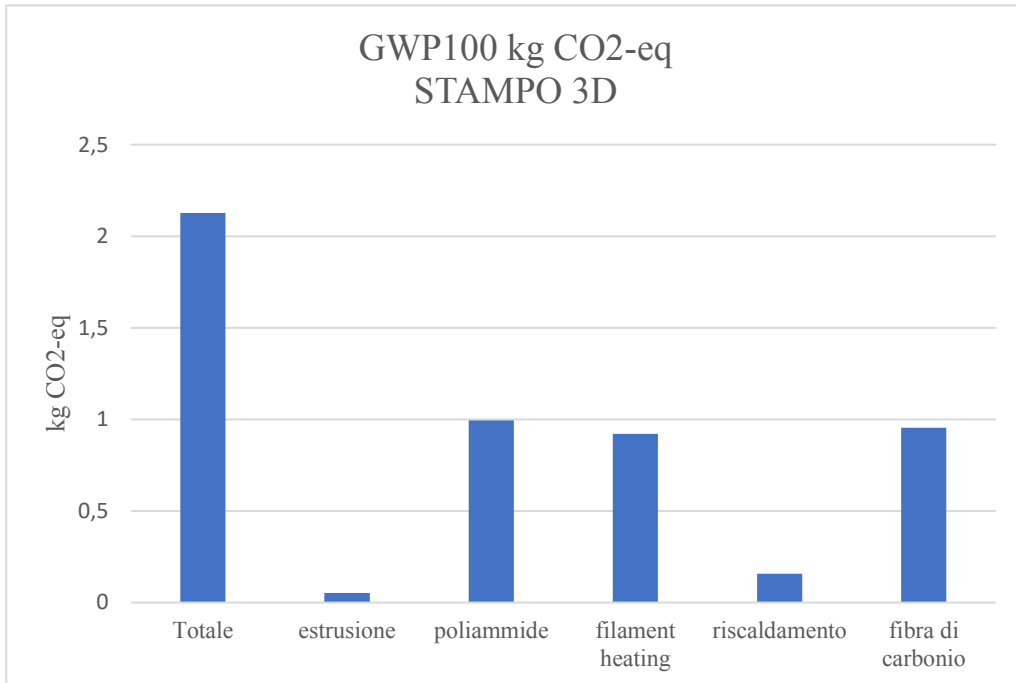


Grafico 6 GWP stampo 3D

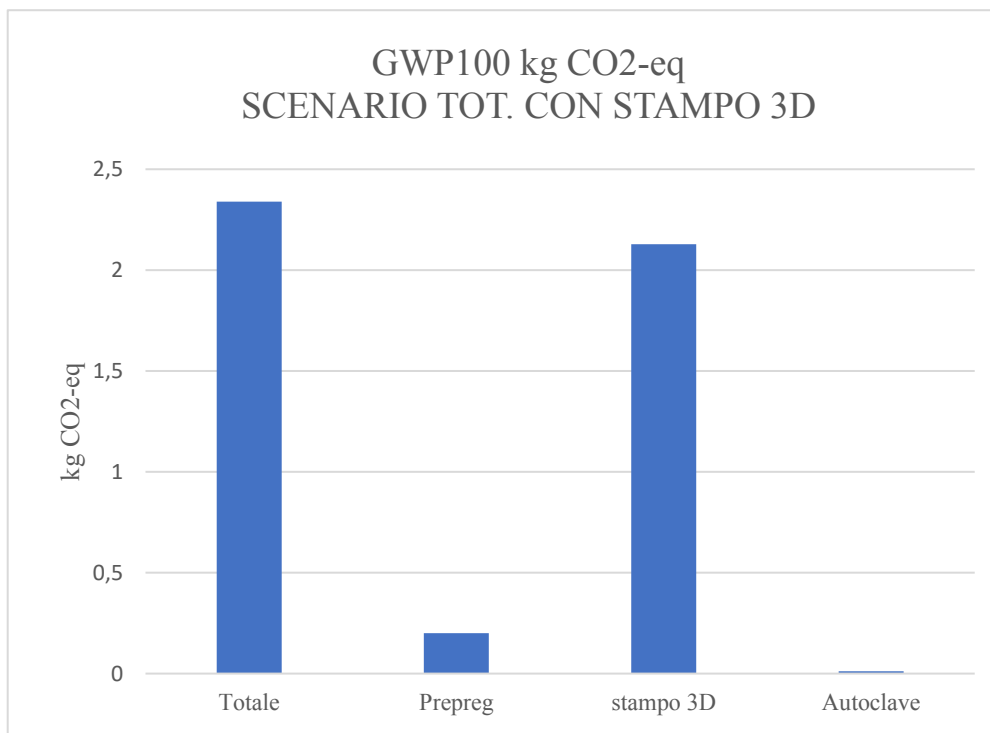


Grafico 7 GWP scenario totale con stampo 3D

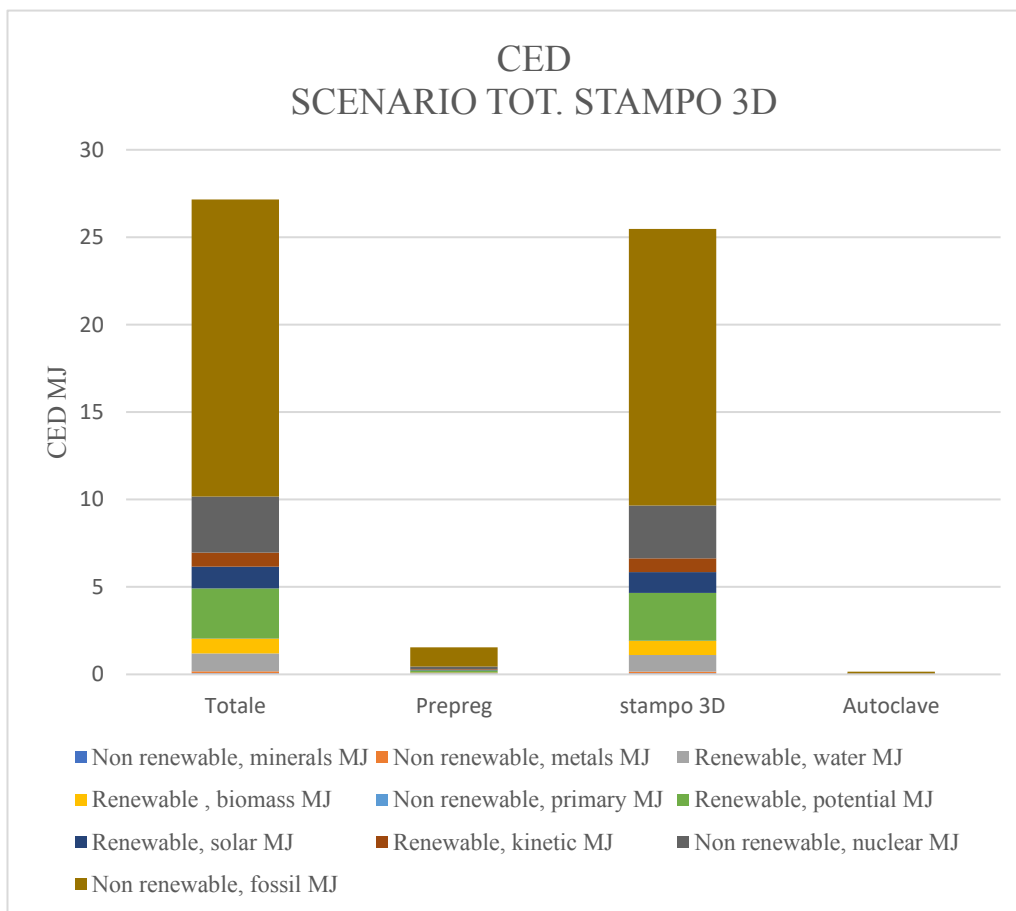


Grafico 8 CED scenario totale stampa 3D

Dai grafici sopra riportati possiamo notare come per quanto concerne lo scenario totale per lo stampo in 3D le fasi di prepreg e di autoclave siano nettamente inferiori rispetto alla fase di stampa che occupa il 2,1279 kg CO₂-eq a fronte del totale che è di poco superiore 2,33928 kg CO₂-eq. Anche in termini di CED l'impatto maggiore è dato dalla fase di stampa 25,467 MJ, di poco inferiore rispetto al totale che è di 27,163 MJ.

Nel grafico 9 e grafico 10 sono riportati i dati per quanto concerne lo stampo in alluminio: rispettivamente con il GWP, dove l'impatto totale è pari a 4,9577 kg CO₂ eq, e in termini di CED, dove l'impatto è di 82,17 MJ. Nei successivi, grafico 11 e 12, si è potuto calcolare il totale dello scenario in alluminio rispettivamente per i dati del GWP 0,21799 kg CO₂-eq e del CED di 1,803 MJ.

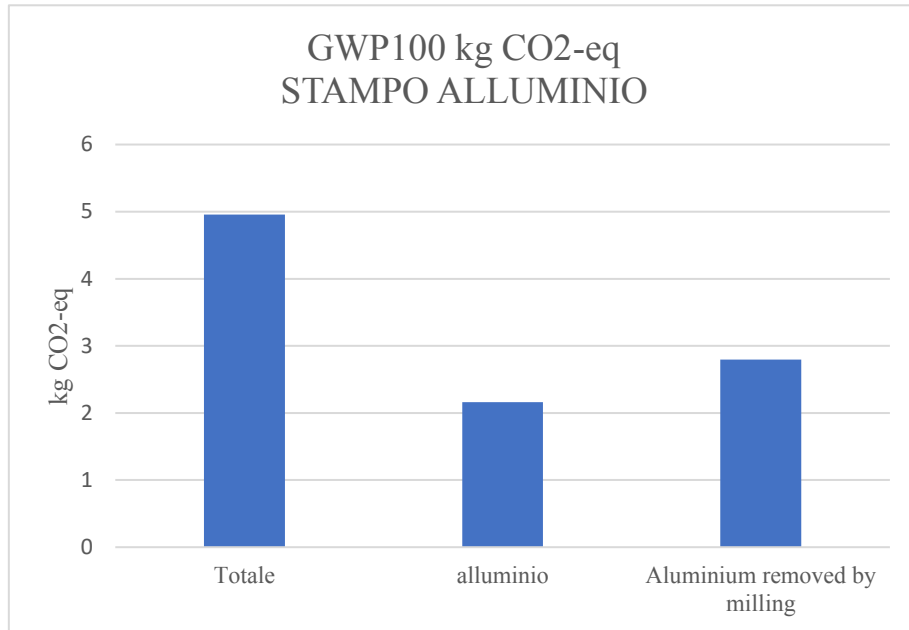


Grafico 9 GWP stampo alluminio

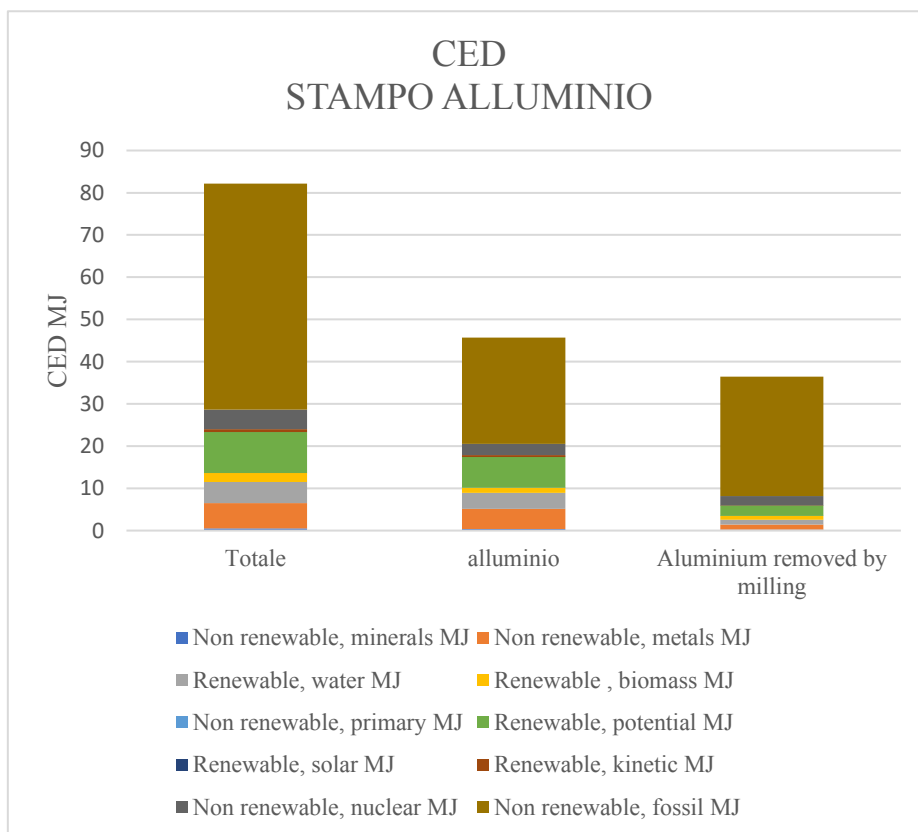


Grafico 10 CED stampo alluminio

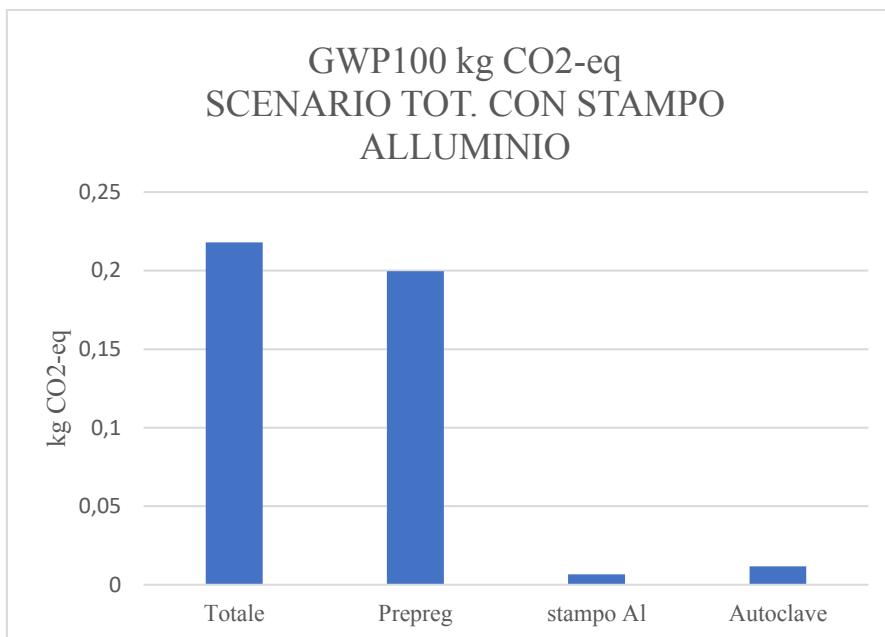


Grafico 11 GWP scenario totale con stampo alluminio

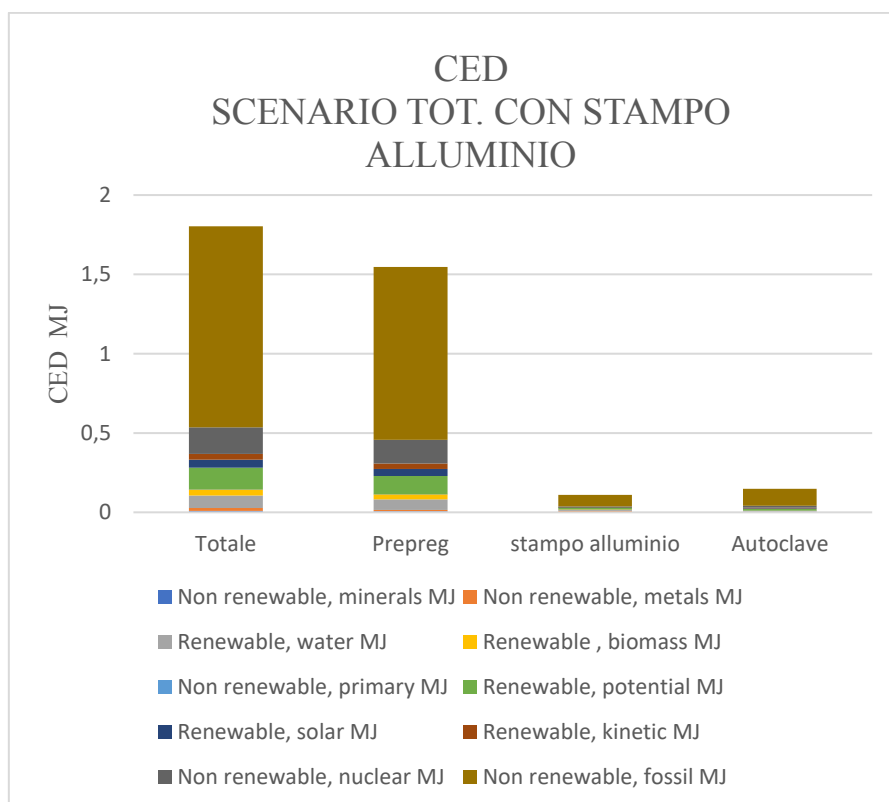


Grafico 12 CED scenario totale con stampo in alluminio

4.1.3 Confronto tra i due scenari

I risultati precedenti dei due diversi scenari sono stati messi a confronto e risulta intuitivo come lo stampo in 3D sia molto più impattante rispetto a quello in alluminio.

Possiamo vederlo meglio nel dettaglio nei due grafici di seguito 13 e 14, dove lo scenario totale dello stampo in 3D, sia in termini di GWP che di CED, risulta decisamente più impattante dello scenario in alluminio. Nel dettaglio, in termini di GWP, lo scenario totale con lo stampo in 3D ha un impatto pari a 2,339 kg CO₂-eq , notevolmente superiore rispetto a quello con lo stampo in alluminio di 0,21799 kg CO₂-eq. In termini di CED la situazione non cambia, con lo scenario dello stampo in 3D sempre superiore rispetto all'alluminio, rispettivamente di 27,163 MJ e di 1,803 MJ.

Questo è dovuto soprattutto al fatto che i dati dello stampo in alluminio vengono presi considerando un lotto di 750 cicli mentre per lo stampo in 3D uno solo. Così facendo gli impatti ambientali dell'alluminio vengono divisi per 750, motivo per cui i risultati vengono notevolmente diminuiti perché spalmati per 750 cicli di lavorazione.

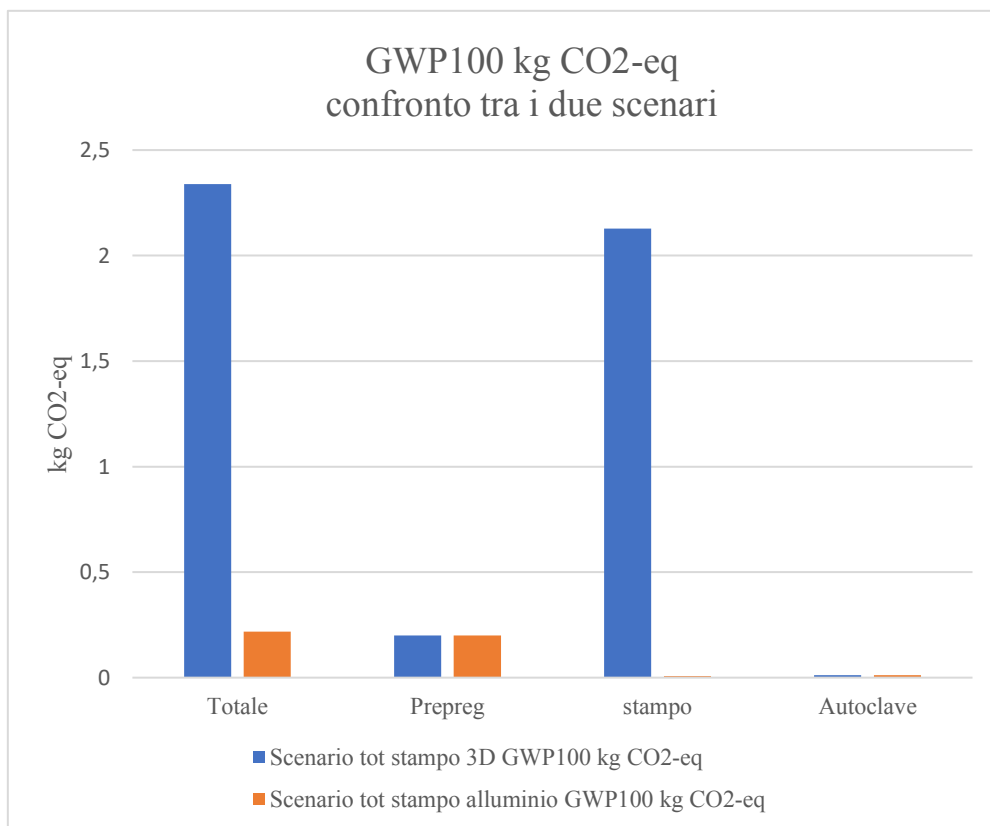


Grafico 13 GWP confronto tra i due scenari

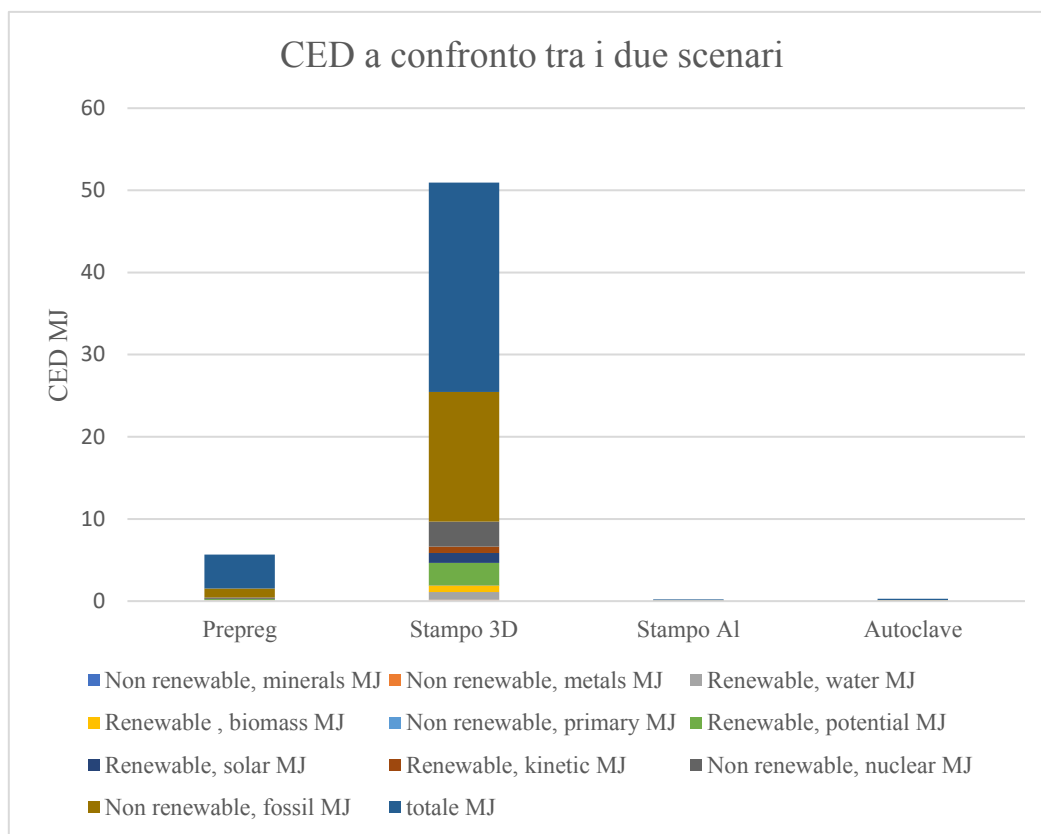


Grafico 14 CED a confronto tra i due scenari

4.1.4 Analisi sensitività impatto al variare del volume di produzione

Abbiamo visto quindi come per grandi produzioni risulti sempre conveniente lo stampo in alluminio; ma cosa succederebbe se andassimo a considerare una produzione per piccoli lotti? Lo scenario sarebbe ben diverso, ed è descritto di seguito nel grafico 15. Nella seguente ipotesi infatti è stato analizzato un possibile andamento temporale di 50 cicli di produzione. Notiamo come lungo tutto l'arco temporale lo stampo in 3D risulti sempre meno impattante. La curva in blu, che rappresenta lo scenario totale dello stampo in 3D, è sempre sottostante quella rossa dello stampo in alluminio, senza mai raggiungere il punto di pareggio.



Grafico 15 Andamento GWP per piccoli lotti

Capitolo 5 – Conclusioni

L'obiettivo centrale di questa tesi è stato quello di ricercare e analizzare le potenzialità di una produzione più sostenibile nel settore dei materiali compositi, concentrandosi specificamente sull'utilizzo del materiale CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer). Sono stati analizzati brevemente quelli che sono i sistemi di produzione principali, tra cui compression molding, bag molding e resin transfer molding, e abbiamo introdotto il concetto fondamentale del Life Cycle Thinking (LCT) attraverso l'applicazione della metodologia LCA (Life Cycle Assessment).

Un aspetto importante di questo lavoro è stata l'analisi approfondita dalla letteratura, che ha permesso di confrontare compositi tradizionali con biocompositi realizzati da materiali alternativi più sostenibili. Le evidenze raccolte hanno dimostrato che i biocompositi presentano un'ottima caratteristica per quanto concerne la riduzione delle emissioni, offrendo alternative valide rispetto ai materiali tradizionali più impattanti sull'ambiente.

Il caso di studio è stato rappresentato da un'analisi relativa alla sostituzione dell'alluminio con un materiale polimerico, prodotto attraverso la tecnologia avanzata di stampa 3D FFF in CarbonPA. Questa parte centrale del lavoro ha permesso di esaminare in dettaglio l'impatto ambientale associato a due diversi tipi di stampo utilizzati nella produzione di compositi in autoclave: lo stampo tradizionale in alluminio e lo stampo in 3D.

I dati analizzati hanno evidenziato una differenza significativa tra i due metodi di produzione. La fase iniziale di prepreg, analoga per entrambi gli scenari, ha un impatto totale del GWP pari a 0,07198 kg CO₂ eq, mentre in termini di CED è di 1,546 MJ. Anche l'ultima lavorazione in autoclave essendo analoga per entrambi gli stampi, avrà anch'essa gli stessi impatti ambientali in termini di GWP e di CED, rispettivamente pari a 0,0116 kg CO₂ eq e di 0,1475 MJ. Dai dati riportati si evince come la prima fase di prepreg sia più impattata in termini di GWP e di CED rispetto alla lavorazione in autoclave.

Successivamente si è andati a calcolare i dati di emissione per i due diversi scenari: nel dettaglio, in termini di GWP, lo scenario totale con lo stampo in 3D ha riscontrato un impatto pari a 2,339 kg CO₂-eq, notevolmente superiore rispetto a quello con lo stampo in alluminio di 0,21799 kg CO₂-eq. In termini di CED i risultati non cambiano, con lo

scenario dello stampo in 3D sempre superiore rispetto all'alluminio, rispettivamente di 27,163 MJ e di 1,803 MJ.

In seguito si è andati a effettuare un'analisi di sensitività dell'impatto in termini di GWP al variare del volume di produzione. Infatti i dati sopra riportati fanno fede su un volume di produzione elevato mentre se andassimo a considerare un volume di produzione ridotto, cambierebbero sensibilmente i risultati. Nell'analisi di sensitività, infatti, siamo andati a considerare un volume di produzione di 50 cicli e abbiamo riscontrato come in questo caso lo stampo in 3D risulti più conveniente.

Dunque l'analisi LCA ha chiaramente mostrato che, per una produzione elevata, rimane vantaggiosa la produzione tramite lo stampo in alluminio, grazie alla sua capacità di sostenere fino a 750 cicli di produzione. D'altro canto, però, l'utilizzo dello stampo in 3D si è rivelato vantaggioso, in termini di emissioni di CO₂, se utilizzato in una produzione unitaria o per piccoli lotti di produzione.

In conclusione, questo studio vuole fornire una panoramica dettagliata e informativa sulle dinamiche complesse dell'impatto ambientale nella produzione di compositi CFRP, riscontrando come i biocompositi siano promettenti candidati per una produzione più sostenibile, a discapito dei compositi tradizionali; in aggiunta è fondamentale considerare attentamente le variabili di produzione come dimostrato dal confronto tra stampo in alluminio e stampa 3D.

Bibliografia

- [1] European Environment Agency , 2018; Kabashi et al., 2020; Khorramshahi e Mokhtari, 2017
- [2] Akbarpour e Akbarpour, 2016; Wilson, 2017
- [3] 3D printed molds for manufacturing of CFRP components. 16th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, CIRP ICME '22, Italy. Iacopo Bianchi, Serena Gentili*, Luciano Greco, Tommaso Mancina, Michela Simoncini, Alessio
- [4] Environmental and Economic Assessment of Repairable Carbon-Fiber-Reinforced Polymers in Circular Economy Perspective
- [5] Simulazioni del processo di filament winding di componenti strutturali in materiale composito e valutazione del relativo impatto ambientale
- [6] <https://economiecircolare.com/analisi-lca-life-cycle-assessment/>
- [7] Organizzazione internazionale per la standardizzazione. ISO 14040: 2006-gestione ambientale- valutazione del ciclo di vita- principi e quadro di riferimento, vol. 14040; 2006. Ginevra.
- [8] Organizzazione internazionale per la standardizzazione. ISO 14044: 2006-Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Requisiti e linee guida, vol. 14044; 2006. Ginevra.
- [9] Bianchi I, Forcellese A, Simoncini M, Vita A, Castorani V, Arganese M, et al. Life cycle impact assessment of safety shoes toe caps realized with reclaimed composite materials. *J Clean Prod*
- [10] Bianchi I, Forcellese A, Simoncini M, Vita A, Castorani V. Comparative life cycle assessment of safety shoes toe caps manufacturing processes. *Int J Adv Manuf Technol* 2022. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09240-x>.
- [11] Sekar V, Fouladi MH, Namasivayam SN, Sivanesan S. Additive Manufacturing: A Novel Method for Developing an Acoustic Panel Made of Natural Fiber-Reinforced Composites with Enhanced Mechanical and Acoustical Properties. *J Eng (United Kingdom)* 2019;2019. <https://doi.org/10.1155/2019/4546863>.

- [12] Fischer A, Rommel S, Bauernhansl T. New Fiber Matrix Process with 3D Fiber Printer – A Strategic In-process Integration of Endless Fibers Using Fused Deposition Modeling (FDM). *IFIP Adv Inf Commun Technol* 2013;411:167–75. https://doi.org/10.1007/978-3-642-41329-2_17.
- [13] Forcellese A, Simoncini M, Vita A, Di Pompeo V. 3D printing and testing of composite isogrid structures. *Int J Adv Manuf Technol* 2020;109:1881–93. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05770-4>.
- [14] Bianchi I, Forcellese A, Mancia T, Simoncini M, Vita A. Process parameters effect on environmental sustainability of composites FFF technology. *Mater Manuf Process* 2022;37:591–601. <https://doi.org/10.1080/10426914.2022.2049300>.
- [15] Reducing Global Warming Potential Impact of Bio-Based Composites Based of LCA
- [16] A review on alternative raw materials for sustainable production: novel plant fibers
- [17] Experimental feasibility and environmental impacts of compression molded discontinuous carbon fiber composites with opportunities for circular economy
- [18] Environmental impact of material selection in a car body component – The side door intrusion beam
- [19] Evaluation of the life cycle of an automotive component produced from biocomposite
- [20] A comparative life-cycle assessment of talc- and biochar-reinforced composites for lightweight automotive parts
- [21] Life cycle impact assessment of different manufacturing technologies for automotive CFRP components
- [22] Environmental and buckling performance analysis of 3D printed composite isogrid structures
- [23] <https://simapro.com/>