



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Gestionale

**Valutazione degli impatti ambientali di processi di
manifattura additiva per materiali compositi
fibrorinforzati**

**Environmental impact assessment of additive
manufacturing processes for carbon fiber reinforced
polymers**

Relatore:

Prof. Alessio Vita

Tesi di Laurea di:

Francesca Bocale

Anno Accademico 2022/2023

A te mamma, il mio esempio di vita.

Ai miei fratelli,

le colonne portanti

della mia vita.

INDICE

INDICE DELLE FIGURE.....	IV
INDICE DEI GRAFICI.....	V
INDICE DELLE TABELLE	VI
ABSTRACT.....	1
1. INTRODUZIONE.....	2
1.1. STORIA.....	5
1.2. I VANTAGGI DELLA STAMPA 3D	6
1.3. I METODI DI STAMPA 3D	7
1.4. I MATERIALI NELLA STAMPA 3D	8
1.5. CONFRONTO MANIFATTURA ADDITIVA E SOTTRATTIVA.....	12
2. LIFE CYCLE ASSESSMENT	15
2.1. UTILIZZO DELL'ANALISI LCA	16
2.2. LE FASI DELL'ANALISI LCA.....	16
2.2.1. Definizione Degli Scopi E Obiettivi	17
2.2.2. Analisi Dell'inventario.....	18
2.2.3. Valutazione Degli Impatti	19
2.2.4. Interpretazione Dei Risultati	20
2.3. LCA: IL POTENZIALE STRATEGICO	20
2.4. IL SOFTWARE SIMAPRO	21
2.5. GWP: GLOBAL POTENTIAL WARMING	22
2.6. IL METODO RECIPE	22
3. ANALISI LCA DEI TRE PROCESSI	24

3.1.	PROCESSO IN AUTOCLAVE.....	24
3.2.	ANALISI LCA.....	26
3.2.1.	Definizione Degli Scopi E Obiettivi.....	26
3.2.2.	Analisi Dell'inventario.....	27
3.2.3.	Valutazione Degli Impatti Ambientali.....	29
3.3.	ANISOPRINT: ALTE PRESTAZIONI.....	29
3.4.	ANISOPRINT: CARATTERISTICHE.....	29
3.5.	I MATERIALI DI STAMPA.....	31
3.5.1.	Le Materie Plastiche.....	31
3.5.2.	Le Fibre Di Rinforzo.....	32
3.6.	ANALISI LCA.....	33
3.6.1.	Definizione Degli Scopi E Obiettivi.....	33
3.6.2.	Analisi Dell'inventario.....	34
3.6.3.	Valutazione Degli Impatti Ambientali.....	35
3.7.	SPHERECUBE: PROCESSO INNOVATIVO.....	36
3.8.	ANALISI LCA.....	38
3.8.1.	Valutazione Degli Scopi E Obiettivi.....	38
3.8.2.	Analisi Dell'inventario.....	39
3.8.3.	Valutazione Degli Impatti Ambientali.....	41
4.	RISULTATI E DISCUSSIONE.....	42
4.1.	METODO GWP PER I TRE SCENARI.....	42
4.1.1.	Autoclave Metodo GWP.....	43
4.1.2.	Anisoprint Metodo GWP.....	45
4.1.3.	Spherecube Metodo GWP.....	46
4.2.	METODO "ReCiPe" PER I TRE SCENARI.....	46
4.2.1.	Autoclave Metodo ReCiPe.....	47

4.2.2.	Anisoprint Metodo ReCiPe	48
4.2.3.	Spherecube Metodo ReCiPe.....	49
4.2.4.	Confronto Scenari.....	50
4.2.4.	Analisi Di Sensibilita' per i tre scenari.....	51
4.2.5.	Autoclave: Analisi Di Sensibilita'	52
4.2.6.	Anisoprint: Analisi Di Sensibilita'	53
4.2.7.	Spherecube: Analisi Di Sensibilita'	53
4.3.	ANALISI DI SENSIBILITA': CONFRONTO SCENARI.....	54
5.	CONCLUSIONI.....	57
	RINGRAZIAMENTI	Error! Bookmark not defined.
	Bibliografia	60

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1. Rappresentazione delle fasi dell'analisi LCA. Fonte [2]	16
Figura 2. Rappresentazione del processo in autoclave	27
Figura 3. Stampante Anisoprint A3. Fonte [16]	31
Figura 4. Smooth Pa 750 cc. Fonte [16]	32
Figura 5. Rappresentazione del processo Anisoprint	34
Figura 6. Provino di trazione stampato con Anisoprint nel dipartimento DIISM .	35
Figura 7. Rappresentazione del processo innovativo Sphercube	39
Figura 8. Power factor misurato per Sphercube nel dipartimento DIISM.....	40
Figura 9. Dispendio energetico misurato per Sphercube nel dipartimento DIISM	41

INDICE DEI GRAFICI

Grafico 1. Metodo GWP per il processo in autoclave	43
Grafico 2. Caratterizzazione dei materiali in input per l'autoclave	44
Grafico 3. Metodo GWP per Anisoprint	45
Grafico 4. Metodo GWP per Spherecube	46
Grafico 6. Metodo ReCiPe per la caratterizzazione dei materiali in input	48
Grafico 7. Metodo ReCiPe per Anisoprint	49
Grafico 8. Metodo ReCiPe per Spherecube	50
Grafico 14. Confronto con il metodo GWP tra l'autoclave, Anisoprint e Spherecube	51
Grafico 9. Analisi di sensibilità per lo scenario in autoclave	52
Grafico 10. Analisi di sensibilità per Anisoprint	53
Grafico 11. Analisi di sensibilità per il processo innovativo Spherecube	54
Grafico 12. Analisi di sensibilità per confrontare la differenza di energia tra Spherecube e il processo in autoclave	55
Grafico 13. Analisi di sensibilità per confrontare lo scenario in autoclave e Spherecube	56

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1. Analisi dell'inventario del processo in autoclave	28
Tabella 2. Analisi dell'inventario Anisoprint	34
Tabella 3. Analisi dell'inventario Spherecube	40

ABSTRACT

Nel corso del tempo, la manifattura additiva è cambiata grazie ai significativi progressi nel settore industriale. Infatti, la produzione additiva svolge un ruolo significativo in diversi settori. L'obiettivo della manifattura additiva è produrre oggetti stampati in 3D in modo efficiente e creativo. A tal fine, il materiale viene posizionato con precisione e solo dove è necessario. Al contrario, il processo di manifattura sottrattiva crea gli oggetti rimuovendo il materiale a partire da un blocco solido. Gli studi condotti si concentrano sull'analisi del ciclo di vita di tre processi distinti. I processi analizzati sono il metodo tradizionale in autoclave, l'efficiente stampante Anisoprint e il nuovo processo Sphercube. L'analisi LCA è una procedura standardizzata a livello internazionale che consente di valutare gli impatti ambientali tramite quattro fasi. Negli studi condotti fino a questo momento, per valutare, monitorare e raccogliere gli impatti ambientali è stato utilizzato un software professionale chiamato SimaPro. Le informazioni sono state inserite all'interno di SimaPro dopo essere state raccolte e aggiornate e in un secondo momento i dati sono stati trasferiti su "Excel". Infine, dai grafici elaborati su "Excel" e dall'analisi di sensibilità condotta si evince che, dei tre scenari, il processo in autoclave è il meno sostenibile, infatti, è di per sé più elaborato sia per il quantitativo di dati sia per l'utilizzo di stampo e contro stampo. Le fasi di taglio, lay-up, sformatura e stampa del processo in autoclave sono tra le più complesse e lunghe. A tal proposito con l'evoluzione del settore industriale i ricercatori si stanno concentrando sullo sviluppo di sistemi di lay-up automatizzati; tuttavia, questi sistemi hanno bisogno di miglioramenti costanti e soprattutto di un lungo periodo di studio prima di poter dimostrare la loro efficacia. Al contrario, gli altri due scenari sono più veloci e "snelli". Infatti, il divario tra Anisoprint e Sphercube è molto basso ciononostante la procedura più sostenibile risulta essere Anisoprint rispetto a Sphercube perché quest'ultima richiede tempi di lavorazione e preparazione più lunghi.

1. INTRODUZIONE

A differenza della fabbricazione sottrattiva, che utilizza strati di materiale per creare un oggetto, la fabbricazione additiva utilizza strati di materiale per creare un oggetto da zero, come nel caso di molte tecniche di produzione tradizionali (tornitura, fresatura, ecc.).

Al contrario, la capacità di "stampare" un oggetto (in plastica, metallo, ceramica, vetro, gesso, ecc.) sulla base di un disegno CAD (Computer-Aided Design) appartiene attualmente a un gruppo più ristretto di operatori, sia nell'industria manifatturiera (aziende produttrici e professionisti della prototipazione e produzione "rapida") sia nel mondo dei "makers", i cosiddetti "artigiani 2.0".

L'uso dell'espressione "stampanti 3D" è giustificato dall'analogia tra i metodi di stampa convenzionali e le nuove tecnologie. Anche la tecnologia di stampa 3D non è uno sviluppo recente. Infatti, il loro ruolo nella "prototipazione rapida" per aiutare lo sviluppo di nuovi prodotti risale agli anni '80, con una maggiore diffusione a partire dalla seconda metà di quel decennio, in particolare nell'industria automobilistica.

Per cogliere appieno il potenziale di sviluppo della manifattura additiva, è necessario comprendere due caratteristiche: innanzitutto, la capacità di produrre oggetti con geometrie complesse, altrimenti impossibili da realizzare in un unico pezzo con le tecniche convenzionali, migliorando al contempo le prestazioni e utilizzando materiali diversi da quelli attualmente in uso. In secondo luogo, la capacità di rendere le varianti più costose da produrre rispetto all'originale.

Ciò significa che l'aggiunta di ulteriori caratteristiche alle produzioni su larga scala non è realmente indicata (perché non si applicano le economie di scala), ma può aprire nuove opportunità di "personalizzazione di massa".

Sulla base di queste caratteristiche, si ritiene che i seguenti tipi di produzione siano adatti all'uso della fabbricazione additiva:

- Quando la tecnologia consente di risparmiare sui costi producendo beni con caratteristiche tecniche uguali o migliori o quando permette di raggiungere standard qualitativi unici, non possibili con le tecniche convenzionali (come nella produzione di articoli protettivi ortopedici, ad esempio).

- Ogni volta che la tecnologia diventa più competitiva dal punto di vista dei costi, con l'avvertenza che la progettazione dell'oggetto da produrre viene modificata. Le modifiche alla progettazione consentono di massimizzare il potenziale del processo di manifattura additiva senza compromettere le caratteristiche tecniche del prodotto. Si tratta di un fatto che ha un enorme potenziale di utilizzo in diversi campi, a patto che la progettazione o la riprogettazione strutturale sia coerente con le potenzialità delle tecnologie additive.

- quando la tecnologia è economicamente svantaggiosa per altri motivi, anche se non è competitiva in assoluto. [1]

La valutazione del ciclo di vita (LCA) è un approccio che analizza e valuta sistematicamente l'impatto ambientale di un bene o di un servizio nel corso del suo intero ciclo di vita.

Infatti, lo spazio viene calcolato dalle fasi di estrazione delle materie prime che compongono il prodotto fino alla sua produzione, distribuzione e smaltimento finale, restituendo i valori di impatto ambientale relativi a ciascuna fase del suo ciclo di vita.

Anche l'impatto ambientale di un servizio può essere calcolato con tecniche LCA, tenendo conto dell'impatto ambientale di tutto ciò che è necessario per produrre quel particolare servizio.

Alla fine dei calcoli, il valore dell'impatto ambientale di un prodotto o di un servizio viene quindi determinato in base a diverse "categorie di impatto", che rappresentano tutti i molteplici impatti che questo ha sui vari contesti ambientali.

Una delle categorie di impatto prese in considerazione è la crescita dell'effetto serra antropogenico (Global Warming Potential - 100 anni), misurato in base alla quantità di emissioni di CO₂ prodotte dall'uso di energia e materiali durante il ciclo di vita di un bene o servizio.

Quando si tratta di comprendere l'impatto che i prodotti, i servizi, i sistemi economici e le strutture produttive hanno sull'ambiente, la metodologia della valutazione del ciclo di vita (LCA) funge da base tecnica per un'ampia gamma di iniziative volte ad aumentare la sostenibilità dei prodotti e dell'industria.

Infatti, definendo i "confini del sistema" (cioè il campo di analisi), il metodo LCA consente di misurare l'impatto ambientale.

L'obiettivo finale è quello di riuscire a gestire gli impatti calcolati, sia attraverso la loro riduzione e compensazione sia scegliendo metodi di produzione e materiali con un impatto ambientale minimo. Secondo questo ragionamento, le tecniche di LCA sono anche alla base dell'eco-progettazione (ecodesign), con l'obiettivo di minimizzare l'impatto ambientale. [2]

L'analisi LCA è stata condotta analizzando tre processi diversi tra di loro: il processo in autoclave, la stampante alto performante Anisoprint e il processo innovativo di Spherecube. L'obiettivo finale è quello di far emergere le peculiarità e le caratteristiche innovative ed ecosostenibili di un determinato processo. L'analisi LCA, in questione, è stata condotta utilizzando un determinato software: SimaPro.

SimaPro è uno strumento professionale utilizzato per raccogliere, analizzare e monitorare le prestazioni ambientali di prodotti e servizi. SimaPro consente di modellare e analizzare in modo trasparente e metodico cicli di vita complessi, di identificare gli hotspot ambientali e di valutare varie strategie di mitigazione. SimaPro include le metodologie e i database più recenti. Inoltre, offer la possibilità di creare grafici e tabelle in MS Word e MS Excel e dispone di una serie di componenti aggiuntivi che possono essere utilizzati per facilitare gli studi LCA o per soddisfare determinati requisiti dei risultati. Questo permette di fornire

strumenti pratici per migliorare i cicli di vita dei prodotti, i processi aziendali o i progressi tecnologici, riducendo al contempo l'impatto dell'azienda. [3]

Dopo aver condotto lo studio LCA su SimaPro, i dati raccolti e studiati sono stati esportati su un foglio di calcolo "Excel". Qui sono stati convertiti in grafici facilmente leggibili per mostrare i risultati finali di questa valutazione degli impatti ambientali. Dagli studi presi in esame è stato determinato quale dei tre processi è il più sostenibile e quali sono gli elementi del processo che hanno il maggiore impatto. Grazie agli studi condotti, è possibile apportare miglioramenti concreti tendendo ad un futuro più innovativo, sostenibile ed efficace.

1.1. STORIA

Chuck Hull ha inventato la stereolitografia. Essa consente l'aggiunta di singoli oggetti 3D direttamente da modelli generati al computer utilizzando resine fotosensibili. Full è il responsabile dell'invenzione della stampa 3D negli anni '80. È stato lui a produrre i primi francobolli 3D negli anni '90.

Hull ha ispirato Carl Deckard, Joe Beaman e Paul Forderhase a sviluppare la sinterizzazione laser selettiva, nota anche come tecnica di sinterizzazione, che sostituisce il nylon per la resina in stereolitografia nel 1986. A differenza della resina, il tessuto in nylon è solido e non richiede supporti appropriati, rendendo il processo di stampa 3D significativamente più flessibile di quello della resina.

Nel 1989, S. Scott Crump ricevette un brevetto per la modellazione della deposizione fusa, o stampa 3D utilizzando materiale fuso, che consente ai filamenti di plastica fusi di costruire strati sopra gli strati. Quattro anni dopo, il MIT di Boston riuscì a stampare oggetti colorati in 3D, un progresso tecnologico costoso ma impressionante.

L'era dei metalli è iniziata nel 1995 quando i ricercatori del Fraunhofer Institute hanno sviluppato un processo chiamato fusione laser selettiva che consente di

produrre oggetti metallici solidi 3D con densità fino al 98% attraverso la stampa. Dopo otto anni, si passa alla fusione di componenti elettronici, una tecnologia complessa che permette di produrre oggetti sostanzialmente identici a quelli prodotti con il metodo industriale.

Nel 2005, la tecnologia di stampa 3D ha fatto progressi che in precedenza si pensava fossero impossibili: è stato creato un prototipo di una macchina da stampa in grado di replicarsi. Da allora, grazie a un brevetto del 2009, il costo delle stampanti 3D è notevolmente diminuito e tutti possono beneficiare di prototipi di stampa 3D rapidi.

La manifattura additiva, nota anche come stampa 3D, è un processo di produzione in cui gli oggetti vengono creati strato per strato aggiungendo materiale attraverso un processo di deposizione controllata. Questo processo, che si è evoluto nel corso degli anni, è in netto contrasto con la tradizionale lavorazione sottrattiva, dove gli oggetti vengono creati rimuovendo il materiale da un blocco solido.

La manifattura additiva ha numerose applicazioni in diversi settori, tra cui la prototipazione rapida, la produzione personalizzata, la produzione di componenti complessi e la produzione di parti di ricambio. Inoltre, consente di ridurre i tempi e i costi di produzione, nonché di ottenere una maggiore flessibilità nella progettazione degli oggetti. [4]

1.2. I VANTAGGI DELLA STAMPA 3D

Essa presenta molteplici vantaggi tra cui:

-Flessibilità: un oggetto complesso può essere prodotto utilizzando la stampa 3D senza modificare gli strumenti di lavoro.

-Personalizzazione: la possibilità di stampare articoli completamente personalizzati rende la produzione additiva utile per la produzione di prodotti su ordinazione.

-Risparmio di tempo: l'uso della produzione additiva riduce il tempo necessario per produrre molti beni perché non richiede lo sviluppo di macchinari elaborati o utensili speciali.

-Riduzione degli sprechi: utilizzando solo i materiali necessari per creare l'oggetto desiderato, la stampa 3D evita l'uso di materiali costosi.

-Innovazione: è possibile produrre oggetti con forme e caratteristiche che sarebbero difficili o impossibili da ottenere utilizzando tecniche di produzione convenzionali.

-Riduzione dei consumi energetici: la stampa 3D riduce significativamente il consumo di energia durante la produzione. [26] e [27]

In generale, la manifattura additiva è una tecnologia innovativa che sta rivoluzionando il modo in cui vengono prodotti i beni, fornendo numerosi vantaggi in termini di adattabilità, personalizzazione ed efficienza di produzione. [27]

1.3. I METODI DI STAMPA 3D

Esaminando la storia della stampa 3D, abbiamo scoperto che ci sono numerosi metodi di produzione. L'unica distinzione tra le varie metodologie è come vengono stampati gli strati.

Alcune tecniche, come la modellazione mediante il deposito di un flusso o la sinterizzazione laser selettiva, utilizzano materiali che sinterizzano a causa della presenza di calore. Altre tecniche fanno uso di materiali liquidi che vengono trasformati in solidi. Altre tecniche fanno ancora uso della laminazione, che

comporta l'incisione di strati sottili che vengono successivamente assemblati uno sopra l'altro.

Non esiste un metodo migliore dell'altro; i prezzi possono variare a seconda dei materiali utilizzati o delle velocità di produzione e delle opzioni di colore per la stampa 3D. [28]

La comunanza tra questi metodi è che tutti iniziano con un modello digitale; nel nostro caso, Anisoprint e Sphercube partiranno da un file gcode.

1.4. I MATERIALI NELLA STAMPA 3D

Uno dei materiali più popolari per la stampa 3D è la plastica. Grazie alla sua facilità di produzione, precisione e impermeabilità e al suo basso costo, le materie plastiche vengono utilizzate in un'ampia gamma di prodotti e industrie, senza eccezioni. Esamineremo insieme più nel dettaglio le caratteristiche e le applicazioni di questi materiali.

La plastica è una sostanza che è stata creata utilizzando composti sintetici o semi-sintetici e ha la capacità di cambiare forma. La maggior parte delle materie plastiche attualmente sul mercato sono interamente sintetiche, o derivati da elementi a base di petrolio. Tuttavia, con la crescente preoccupazione per l'ambiente, le plastiche riciclabili come l'acido polilattico (PLA) sono ancora una volta molto popolari sul mercato.

-ABS: nella stampa 3D, i filamenti ABS sono molto utilizzati. Viene utilizzato nella carrozzeria di automobili, negli elettrodomestici e nelle custodie per i cellulari. È un termoplastico che ha una base in elastomero e polibutadiene, rendendolo più flessibile e resistente agli urti. Inoltre, l'ABS è disponibile in forma liquida per le tecnologie SLA e PolyJet e in polvere per processi come SLS. L'ABS utilizza una temperatura compresa tra 230°C e 260 °C. È un materiale resistente che può facilmente resistere a temperature comprese tra -20 °C e 80 °C.

Oltre alla sua elevata resistenza, questo materiale è riutilizzabile e può essere saldato con processi chimici. L'ABS non è biodegradabile e reagisce negativamente al contatto con l'aria.

-PLA: questa sostanza, nota anche come acido polilattico o PLA, ha il vantaggio di essere biodegradabile rispetto all'ABS. È stato creato con materiali primari riutilizzabili. Nonostante la sua propensione al ritiro dopo la stampa 3D, il PLA è uno dei materiali più facili da stampare. Al contrario della stampa con ABS, la stampa con PLA non richiede il piano di lavoro riscaldato. Inoltre, il PLA stampa a una temperatura inferiore tra 190°C e 230 °C rispetto all'ABS. È fondamentale notare che questa sostanza può deteriorarsi a contatto con l'acqua. Nonostante ciò, il materiale è facile da usare ed ha una vasta gamma di colori, per cui è molto adatto alla stampa 3D con FDM.

-ASA: è un materiale con caratteristiche simili a quelle dell'ABS ma con maggiore resistenza ai raggi UV. Simile all'ABS, si consiglia di stampare il materiale su un piano riscaldato per evitare qualsiasi deformazione. Quando si stampa con l'ASA, vengono utilizzate impostazioni di stampa simili all'ABS, ma è necessario prestare molta attenzione alla stampa con camera chiusa per prevenire le emissioni di stirene.

-PET: PET, noto anche come tereftalato di polietilene, si trova spesso nelle bottiglie di plastica usa e getta. Inoltre, il materiale è abbastanza rigido e ha una buona resistenza chimica. Per ottenere i migliori risultati di stampa in PET è consigliabile stampare tra 75 e 90 °C. Il PET è spesso visto come un filamento trasparente e alcune varianti del PET sono le forme di PETG, PETE e PETT. I vantaggi del PET includono il fatto che non emette odori durante la stampa ed è riciclabile al 100%.

-PETG: PETG, o polietilene modificato con glicole, è un termoplastico ampiamente utilizzato nell'industria della manifattura additiva. Combina, allo stesso tempo, la semplicità della stampa 3D con PLA e la forza dell'ABS. È una plastica amorfa che può essere completamente riciclata. Ha la stessa composizione chimica del PET e la presenza del glicole ne riduce la fragilità.

-PC: il polycarbonato (PC) è un materiale ad alta resistenza progettato per applicazioni tecniche. Il materiale presenta una buona resistenza alla temperatura e può resistere a qualsiasi deformazione fino a circa 150 ° C. Tuttavia, il PC ha la tendenza ad assorbire l'umidità dall'aria, il che potrebbe influenzare negativamente le prestazioni e la resistenza di stampa. Pertanto, il PC deve essere conservato in contenitori stagni. L'industria AM apprezza molto il PC per la sua durata e trasparenza. Ha una densità molto inferiore rispetto al vetro, rendendolo particolarmente interessante per la costruzione di parti ottiche, schermi protettivi o oggetti decorativi.

-Polimeri ad alte prestazioni: sono disponibili numerosi tipi di plastica per la stampa 3D con prestazioni elevate, come PEEK, PEKK o ULTEM, che si distinguono in poliarileterchetoni per (PAEK) o polieterimmidi (PEI). Questi filamenti sono estremamente forti pur essendo significativamente più leggeri di alcuni metalli. Hanno un'altissima resistenza termica e meccanica. I polimeri ad alte prestazioni non possono essere stampati su tutte le macchine FDM disponibili a causa delle loro caratteristiche. Infatti, la stampante 3D deve avere una piastra riscaldata che possa raggiungere almeno 230 gradi.

-PP: un altro termoplastico comune è il polipropilene, ampiamente utilizzato nella produzione di oggetti di uso quotidiano. Oltre alla sua relativa rigidità e flessibilità, il PP è noto per la sua resistenza all'abrasione e la sua capacità di assorbire gli urti. Tuttavia, tra i vantaggi del materiale ci sono la sua debole resistenza alle variazioni di temperatura e la sua sensibilità ai raggi UV, che può portare ad un'espansione.

-Nylon: gli articoli in poliammide (nylon) sono realizzati esclusivamente con una polvere fine, bianca e granulata utilizzando la tecnologia SLS. Tuttavia, ci sono altre varianti del materiale, utilizzati nella modellazione di deposizione fusa (FDM). Grazie alla loro biocompatibilità, le poliammidi possono essere utilizzate per produrre prodotti nel settore alimentare. Le strutture semicristalline che compongono le poliammidi hanno un buon equilibrio di caratteristiche chimiche e meccaniche che forniscono una buona stabilità, rigidità, flessibilità e resistenza all'abrasione.

-Materiali compositi: l'uso di materiali compositi è molto utile nella produzione di parti leggere e durevoli poiché le fibre forniscono forza senza aggiungere peso agli oggetti che vengono creati. Ci sono due tipi di rinforzo: fibre corte o fibre continue. Nel primo caso, le fibre con segmenti di lunghezza inferiore a un millimetro vengono mescolate con materiali di stampa plastica convenzionali per aumentare la rigidità e, in misura minore, la resistenza delle parti componenti. Le fibre tagliate possono essere mescolate con materiali termoplastici come nylon, ABS o PLA. In alternativa, le fibre possono essere aggiunte continuamente alle termoplastiche per produrre un prodotto finale più forte. La fibra principale utilizzata nel settore 3D è la fibra di carbonio, anche se ci sono anche altre fibre, come vetro o Kevlar.

-Materiali ibridi: i materiali che vengono miscelati sono realizzati con varie materie plastiche e polveri che danno loro nuovi colori o altre proprietà. Questi materiali, che sono spesso basati su PLA, sono esclusivamente composti da 30% materiali misti e 70% PLA. La combinazione di questi materiali PLA a base di legno conferisce al filamento ibrido una consistenza più organica. Alcuni materiali ibridi contengono polvere di metallo per dare ai prodotti finiti una finitura metallizzata.

-Materiali solubili per la stampa 3D: i materiali solubili sono quelli stampati con l'intenzione di dissolversi in una fase successiva del processo di fabbricazione. I due materiali più popolari per la solubilizzazione dei filamenti sono HIPS (polistirene antiurto) e PVA (polivinil acetato). L'HIPS è collegato all'ABS e può essere disciolto con il limonene, mentre il PVA è collegato al PLA e può essere disciolto con l'acqua. Ci sono anche filamenti BVOH, che stanno diventando sempre più popolari.

-Materiali flessibili: anche se sono fatti soltanto di TPE o di TPU, i filamenti flessibili sono simili a PLA. Utilizzando questi filamenti per la stampa 3D c'è il vantaggio di consentire la creazione di oggetti deformabili, che sono ampiamente utilizzati nel settore della moda. Questi filamenti flessibili sono disponibili in una varietà di gamme in base alla loro rigidità, ma hanno tutte le stesse caratteristiche di stampa del PLA. Per evitare lo stallo durante il passaggio alla stampa 3D, è

importante determinare quale tipo di estrusore è più adatto per ogni tipo di materiale.

-Resine: infine, tra le plastiche per la stampa 3D, troviamo le resine. Le resine sono utilizzate nelle tecnologie di stampa 3D basate sulla fotopolimerizzazione per creare oggetti strato per strato e sono più sensibili ai raggi UV. In altre parole, usano una sorgente luminosa, come un laser o uno schermo LCD, per solidificare un fotopolimero liquido. La produzione di parti in resina si traduce in oggetti estremamente precisi con superfici lisce, ma la gamma di colori che si possono ottenere con questa procedura è ancora piuttosto piccola e limitata. La distinzione tra resine e filamenti FDM è che diverse resine non possono essere utilizzate insieme per produrre risultati diversi. Le resine standard hanno caratteristiche simili all'ABS: la finitura superficiale dell'articolo sarà eccellente grazie al processo di fotopolimerizzazione, ma le caratteristiche meccaniche saranno modeste. Sono disponibili resine più avanzate per applicazioni tecniche come l'odontoiatria e l'ingegneria. Pertanto, è possibile trovare resine resistenti alle alte temperature, in grado di sostenere urti potenti, o avere un elevato grado di allungamento. Anche le tecnologie di stampa in resina 3D vengono costantemente migliorate. [5]

1.5. CONFRONTO MANIFATTURA ADDITIVA E SOTTRATTIVA

Contrariamente alla tecnica di produzione sottrattiva, che comporta la rimozione di materiale da un pezzo più grande, la produzione additiva o la stampa 3D creano oggetti aggiungendo materiale uno strato alla volta, assicurando che ogni strato successivo aderisca a quello prima di esso finché il pezzo non è finito.

Le tecnologie additive e sottrattive sono disponibili in una varietà di forme con una vasta gamma di prezzi e capacità, dalle applicazioni desktop alle attrezzature industriali di massa.

Vediamo alcune differenze tra i due diversi processi:

-Costo per l'attrezzatura: le stampanti da tavolo professionali per materie plastiche sono disponibili partendo da circa 3.200 euro per la produzione additiva. Le macchine industriali su larga scala per i metalli partono da circa 360.000 euro. Mentre le più piccole macchine a controllo numerico computerizzato per laboratori hanno un prezzo di partenza di circa 1.800 euro per la cosiddetta produzione sottrattiva. In base al numero di assi, alla funzionalità, alle dimensioni del pezzo e alla quantità di abrasività richiesta per i materiali, gli strumenti per i laboratori più avanzati vanno ben oltre tale cifra.

-Formazione: le desktop stampanti sono facili da avviare per la manifattura additiva e richiedono una formazione minima sull'impostazione della stampa, manutenzione, utilizzo della macchina e finitura. I sistemi industriali di produzione supplementare richiedono personale specializzato e formazione a lungo termine. Le piccole macchine a controllo numerico computerizzato per la fabbricazione strutturale scelgono una formazione moderata in software, implementazione del progetto, manutenzione della macchina, funzionamento e finitura.

-Requisiti della struttura: i computer desktop e i sistemi bancari sono adatti per uffici e laboratori con spazi privati quando sono utilizzati nella produzione additiva. Una stanza o uno spazio dedicato con controllo HVAC è spesso richiesto dalle stampanti 3D industriali. Tuttavia, i laboratori possono usare le piccole macchine a controllo numerico. I sistemi industriali richiedono uno spazio ancora più ampio.

-Attrezzatura aggiuntiva: utilizzati per la produzione additiva includono strumenti e sistemi per la pulizia, il lavaggio, la polimerizzazione e la finitura, a seconda del processo. Sistemi più sofisticati automatizzano alcuni processi come lo scambio di

apparecchiature, la pulizia e la manipolazione dei trucioli e la gestione della refrigerazione dei liquidi. [6]

2. LIFE CYCLE ASSESSMENT

Una metodologia relativamente nuova è l'LCA. Lo studio più noto, a cui si fa solitamente riferimento quando si parla dell'inizio dell'LCA, è quello condotto dalla Coca-Cola nel 1971 per affrontare i vari problemi della bevanda. Tuttavia, secondo alcuni esperti, studi precedenti erano già stati condotti nei Paesi Scandinavi. Nonostante questo primo tentativo da parte del colosso americano, la metodologia LCA è stata inizialmente più che altro un esercizio accademico che solo in seguito è stato accettato dal mondo delle imprese, tipicamente attraverso i canali di distribuzione R&S. Il valore dell'LCA è stato riconosciuto su scala globale grazie ai continui sviluppi metodologici e al numero crescente di studi. Il valore dell'LCA è stato riconosciuto su scala globale grazie ai continui sviluppi metodologici e al crescente numero di studi, tanto che l'Unione Europea lo ha definito "il miglior strumento attualmente disponibile per valutare il potenziale impatto ambientale dei prodotti". Molte aziende lo hanno adottato per comprendere meglio gli effetti dei loro prodotti, le priorità di intervento e per aiutare la comunicazione ambientale con dati alla mano. L'LCA consente di esaminare a fondo ogni aspetto di ciascun componente di un bene o servizio, rivelando la complessità dell'intero ciclo di vita. Ciò consente di individuare i processi e le fasi ambientali più significativi e fornisce una chiara indicazione delle questioni che richiedono un intervento in ordine di priorità. L'LCA può essere utilizzato per migliorare un prodotto esistente o per orientare il processo decisionale nello sviluppo di nuovi prodotti. [3]

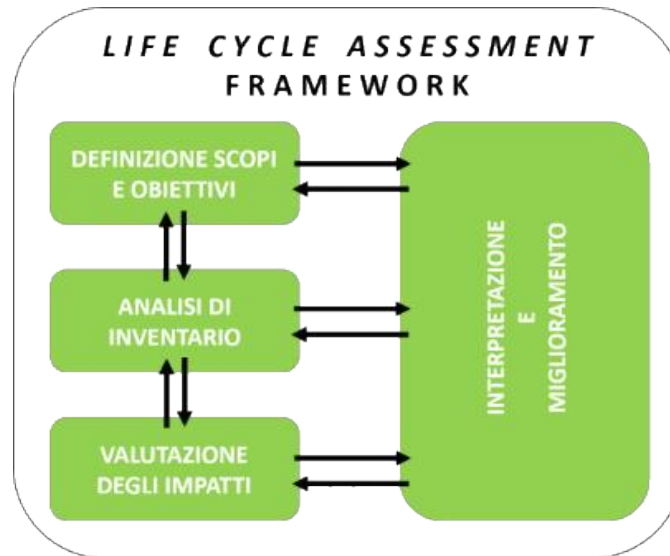


Figura 1. Rappresentazione delle fasi dell'analisi LCA. Fonte [2]

2.1. UTILIZZO DELL'ANALISI LCA

Quando si avvia un progetto di LCA, il primo passo consiste nell'identificare tutti i processi coinvolti in ogni componente del prodotto e del suo imballaggio. Successivamente, per ogni fase si raccolgono le informazioni relative alle risorse utilizzate come input, ad esempio, come energia o acqua e agli output come ad esempio emissioni nell'atmosfera e nell'acqua. Gli effetti sono calcolati in base alle risorse utilizzate e alle emissioni (ad esempio, eutrofizzazione, riduzione dello strato di ozono, acidificazione, tossicità, ecc.) [3]

2.2. LE FASI DELL'ANALISI LCA

Le fasi che compongono uno studio LCA sono quattro e sono interconnesse.

2.2.1. Definizione Degli Scopi E Obiettivi

La definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione di un LCA fornisce una descrizione del sistema di prodotto in termini di componenti funzionali, portata e definizioni. L'obiettivo di uno studio LCA specifica l'uso previsto per i risultati, oltre alle ragioni per cui sono stati generati e al pubblico a cui sono destinati. L'obiettivo di uno studio LCA è quello di stabilizzare l'ambito definendo la natura del prodotto in esame e determinando il livello di dettaglio utilizzato nella valutazione.

La base fondamentale che consente di confrontare e valutare beni o servizi alternativi è l'unità funzionale. L'obiettivo principale di un'unità funzionale è fornire un riferimento a cui collegare gli input e gli output. Questo riferimento è necessario per garantire la comparabilità dei risultati dell'LCA. L'unità funzionale non è solo una quantità di materiale; piuttosto, i professionisti dell'LCA confrontano di solito la quantità di un prodotto o di un servizio che il prodotto fornisce. Se le risorse ambientali possono essere assegnate a una particolare unità, si determina la comparabilità.

I confini del sistema specificano i singoli processi che dovrebbero essere inclusi nel sistema. Per stabilizzare i confini del sistema, si traccia una linea immaginaria intorno al ciclo di vita. Per fissare i parametri di un sistema LCA si dovrebbe utilizzare il modo più espansivo possibile. Oltre a tenere conto dei flussi di energia e di materiali che concorrono alla produzione del prodotto primario, si devono considerare anche i processi di estrazione delle materie prime. I materiali ausiliari sono utilizzati indirettamente nella creazione del prodotto finale. A livello di base, è possibile determinare se un'analisi di inventario fa parte di una LCA coordinata "dalla culla alla tomba" o "dalla culla al cancello" utilizzando i parametri del sistema.

Le fasi principali del ciclo di vita, i processi unitari e i flussi che vengono presi in considerazione nella definizione dei confini del sistema sono i seguenti:

- L'individuazione delle materie prime

- Input e output per la produzione
- Distribuzione e trasporto
- Produzione e utilizzo di combustibili, elettricità o calore
- Smaltimento rifiuti e discarica
- Riciclaggio dei prodotti usati
- Fabbricazione di materiali

È utile creare un diagramma di flusso nella fase degli obiettivi e del contesto che includa tutti i potenziali impatti ed effetti dello studio.

2.2.2. Analisi Dell'inventario

L'analisi dell'inventario richiede la raccolta di dati e metodi di calcolo per quantificare gli input e gli output rilevanti di un sistema di prodotti e creare l'inventario del ciclo di vita (LCI). La sequenza di attività coinvolte nella produzione, nell'uso e nello smaltimento finale del prodotto esaminato è nota come catena di processo. Le informazioni per ogni singolo processo unitario all'interno dei confini del sistema possono essere classificate nelle seguenti categorie principali: input energetici, input di materie prime e altri input fisici, prodotti, rifiuti, emissioni nell'aria, scarichi nell'acqua e nel suolo e altri aspetti ambientali.

L'attività più lunga e impegnativa nell'esecuzione di un LCA è la raccolta dei dati. Tuttavia, esistono molti database che forniscono dati di inventario su vari materiali e processi. Pertanto, la raccolta dei dati è suddivisa nelle due categorie di dati primari e secondari. Il termine "dati primari" si riferisce ai dati unici ottenuti direttamente attraverso la modellazione del sistema prodotto. Questi dati vengono ottenuti in azienda, attraverso misurazioni o analisi dirette. I dati di base si

trovano tipicamente nei database di dati e letteratura e sono utilizzati per materiali generali, trasporti e sistemi di gestione dei rifiuti. L'inventario del ciclo di vita (LCI) deve essere prodotto utilizzando una combinazione di dati primari e secondari.

2.2.3. Valutazione Degli Impatti

L'obiettivo della valutazione dell'impatto del ciclo di vita (LCIA) è quello di descrivere o evidenziare gli effetti dei danni ambientali misurati nell'analisi dell'inventario. La valutazione dell'impatto è il momento in cui vengono valutati gli effetti sulle risorse ambientali scelte.

L'obiettivo principale della LCIA è trasformare i risultati dell'inventario in informazioni più rilevanti per l'ambiente. Pertanto, la LCIA fornisce informazioni sugli impatti ambientali piuttosto che solo dati sulle emissioni e sull'uso delle risorse. Un altro scopo, spesso trascurato, è quello di aggregare le informazioni dell'LCI in un numero minore di parametri. Ogni LCA deve comprendere almeno la classificazione e la caratterizzazione. Se non si seguono tali procedure, lo studio può essere definito solo un "inventario del ciclo di vita".

Gli elementi cardini sono:

-Classificazione: semplicemente aggregando i dati di inventario in base al tipo di impatto ambientale che ciascun articolo contribuisce a generare.

-Caratterizzazione: È qui che vengono calcolati i contributi a ciascun impatto ambientale derivanti dal consumo di risorse e dal calcolo delle emissioni.

-Normalizzazione: I risultati sono presentati in un formato adimensionale per consentire un confronto dell'importanza relativa di ciascuna categoria di impatto.

[7]

2.2.4. Interpretazione Dei Risultati

Una strategia di comunicazione efficace o un processo di eco-design potrebbero basarsi su conclusioni e raccomandazioni raggiunte durante la fase di interpretazione dei risultati.

L'identificazione degli hot-spot (i materiali e i processi che contribuiscono maggiormente agli effetti complessi) è una delle componenti chiave dell'interpretazione dei risultati, insieme alla valutazione della completezza e della robustezza del modello (come le analisi di sensibilità e incertezza) e alla definizione delle conclusioni dello studio alla luce di eventuali limitazioni intrinseche.

Di conseguenza, lo strumento del Life Cycle Assessment consente di sviluppare una comprensione chiara, trasparente e scientifica delle problematiche ambientali legate a prodotti e servizi non più in commercio, permettendo di pianificare azioni di miglioramento (eco-design). [8]

2.3. LCA: IL POTENZIALE STRATEGICO

Le aziende più creative e imprenditoriali utilizzano la LCA per sviluppare nuovi prodotti, servizi e processi, ma la applicano anche a nuove strategie aziendali.

L'ecoinnovazione attraverso l'LCA si sta sviluppando per concentrarsi sulla creazione di nuovi modelli di business e, infine, utilizzarli per sostenere gli obiettivi aziendali a medio e lungo termine. La maggior parte delle aziende non ha ancora sfruttato appieno il potenziale della metodologia e le opportunità di miglioramento e differenziazione sono reali e meritano un'attenta considerazione.

È possibile applicare il pensiero del ciclo di vita alla strategia aziendale, identificando gli impatti chiave e le fasi critiche e utilizzando poi i modelli di business più adatti per ciascuna fase.

L'LCA è molto utile per le aziende che decidono di stabilire obiettivi chiari per la riduzione dell'impatto ambientale e le tempistiche necessarie per raggiungerli. Esempi di tali obiettivi sono la riduzione delle emissioni di gas a effetto serra, l'utilizzo di acqua, l'aumento dell'uso di fonti energetiche rinnovabili, la riduzione dell'inquinamento atmosferico e la massimizzazione del valore del lavoro. [3]

2.4. IL SOFTWARE SIMAPRO

L'LCA fornisce un'analisi approfondita dell'impatto ambientale di un prodotto o di un servizio dalla sua concezione fino allo smaltimento. È ampiamente riconosciuto come lo strumento principale per valutare le prestazioni ambientali di prodotti e servizi su scala globale.

SimaPro consente di raccogliere, analizzare e monitorare i dati relativi alle prestazioni ambientali di prodotti e servizi. Il software consente diverse applicazioni, come il calcolo dell'impronta di carbonio e dell'impronta idrica, e fornisce le basi per la progettazione ecologica dei prodotti e per le dichiarazioni ambientali di prodotto (EPD). SimaPro semplifica inoltre la modellazione e l'analisi di cicli di vita complessi in modo sistematico e trasparente; consente di valutare l'impatto ambientale di prodotti e servizi in tutte le fasi del ciclo di vita e identifica i punti deboli della catena di fornitura a partire dalle materie prime fino ai prodotti finiti.

Le tre caratteristiche fondamentali del software SimaPro:

-Efficienza: poiché permette la realizzazione di studi LCA ed EPD in conformità agli standard ISO.

-Unicità: consente la realizzazione di modelli complessi in modo sistematico e trasparente. Inoltre, permette di condurre analisi di incertezza, di allocare le risorse ai processi multi-output, di analizzare i punti deboli e di creare scenari dettagliati di striscio.

-Affidabilità: SimaPro è dotato di numerose banche dati LCI, tra cui la banca dati ecoinvent, la banca dati ELCD e la banca dati Agri-footprint, specifica per l'industria agroalimentare. La metodologia di SimaPro è coerente, trasparente e consente di concentrarsi facilmente sui risultati di ogni fase del ciclo di vita esaminato. [9]

2.5. GWP: GLOBAL POTENTIAL WARMING

Il potenziale di riscaldamento globale (GWP) è la quantità di energia assorbita da qualsiasi gas atmosferico come multiplo dell'energia assorbita dalla stessa massa di anidride carbonica (CO₂). Il GWP per l'anidride carbonica è pari a 1. Per gli altri gas, dipende dal gas e dall'intervallo di tempo.

Il GWP viene utilizzato per calcolare l'equivalente di anidride carbonica (CO₂ o CO₂ eq). Per ogni gas, è la massa di idrato di acido carbonico che farebbe bruciare la terra quanto la massa di quel gas. Pertanto, fornisce una scala standard per misurare gli effetti climatici dei vari gas. Si calcola come GWP moltiplicato per la massa dell'altro gas. [10]

2.6. IL METODO RECIPE

ReCiPe è un metodo per la valutazione dell'impatto (LCIA) in una LCA. Le emissioni e le estrazioni di risorse vengono trasformate dalla valutazione

dell'impatto del ciclo di vita (LCIA) in un numero limitato di punteggi di impatto ambientale utilizzando i cosiddetti fattori di caratterizzazione.

Esistono due modi convenzionali per ricavare le caratteristiche distintive, ossia a livelli di scala intermedi e finali. ReCiPe calcola: 18 indicatori intermedi e 3 indicatori finali. Gli indicatori intermedi si concentrano su questioni ambientali specifiche, come l'acidificazione.

Gli indicatori endpoint mostrano l'impatto ambientale su tre livelli superiori di aggravamento, ovvero:

- Effetto sulla salute umana

- Biodiversità

- Scarsità di risorse

L'interpretazione dei risultati della LCIA è semplificata dalla conversione dei punti intermedi in punti finali. [11]

3. ANALISI LCA DEI TRE PROCESSI

In questo capitolo tratteremo lo svolgimento dell'analisi LCA di tre processi differenti. Inizieremo trattando il processo tradizionale in autoclave, proseguiremo con la trattazione della stampante alto performante Anisoprint ed infine, analizzeremo il processo innovativo Sphercube.

3.1. PROCESSO IN AUTOCLAVE

In tutti i mercati in cui le prestazioni sono più essenziali dei costi o della velocità di produzione, come l'industria aerospaziale, l'elaborazione in autoclave o "Processo sottovuoto", è molto comune. È uno scenario di stampa a processo aperto dove operatori specializzati supervisionano la fase di lay-up. Questa fase richiede molto tempo e potrebbe causare errori di posizionamento, soprattutto quando si tratta di componenti complessi (come le parti auto). Per evitare questo, i ricercatori si stanno concentrando sullo sviluppo di sistemi di lay-up automatizzati; tuttavia, questi sistemi hanno bisogno di ulteriori miglioramenti prima di poter dimostrare la loro efficacia. Il processo può essere suddiviso in quattro fasi principali: taglio, lay-up, stampa e sformatura. In particolare, il prepreg viene posto in frigorifero e mantenuto a temperatura ambiente durante la fase di taglio per facilitare il congelamento. Pertanto, viene posizionato sul tavolo di taglio per essere tagliato nella forma, dimensione e orientamento desiderati. La scheda di protezione viene rimossa dal prepreg e aderisce alla superficie dello stampo (fase di laminazione). Ogni strato prepreg viene depositato, e dopo ogni strato avviene un'operazione preliminare di debulking eseguita per rimuovere l'aria intrappolata tra gli strati. Il sottovuoto viene creato una volta che la sequenza pianificata di impilamenti è stata raggiunta. L'agente distaccante è impiegato per impedire l'adesione sulla superficie dello stampo su cui gli strati prepreg sono

depositati. Lo scopo di questo strato è quello di consentire all'aria e ad altre sostanze infiammabili di fuoriuscire dal laminato assorbendo la resina in eccesso che fuoriesce durante il processo di stampa. Dopo la laminazione e l'imballaggio, l'intero gruppo viene posto all'interno di un'autoclave per la polimerizzazione e il consolidamento. Questa tecnica si ottiene combinando pressione esterna, calore e umidità. Lo scopo è quello di rimuovere l'aria e le sostanze infiammabili mentre la pressione esterna solidifica il laminato. La velocità della reazione di polimerizzazione aumenta con il calore fino a includere l'intera matrice. A seconda del tipo di resina e laminato utilizzato, la temperatura e la pressione di polimerizzazione vengono mantenute per due ore o più fino a raggiungere il livello di polimerizzazione desiderato. Al termine del processo di polimerizzazione è necessaria una fase di raffreddamento per la formatura del pezzo. Il raffreddamento avviene all'interno dell'autoclave utilizzando uno speciale sistema di raffreddamento. Così, fino a quando i componenti raggiungono la temperatura ambiente, vengono rimossi dall'autoclave. La lavorazione in autoclave consente proprietà materiali convenienti, maggiore volume di fibre, flessibilità nell'orientamento delle fibre, prestazioni meccaniche eccezionali e la produzione di forme complesse (arrotondate o con sub-squadri) senza colla o resina eccessiva. Tuttavia, il processo di confezionamento sottovuoto ha anche alcune limitazioni. È un processo ad alta intensità di lavoro che richiede molto tempo, soprattutto quando si producono componenti su larga scala, e richiede molto sforzo per mantenere l'integrità del sacchetto. Inoltre, a seconda delle loro dimensioni e geometrie, i componenti vengono mantenuti a temperatura ambiente per un tempo molto lungo. A causa del meccanismo di trasferimento del calore convettivo all'interno dell'autoclave, l'incrostazione interna non è efficace. Inoltre, è difficile prevedere l'esatta quantità di tempo necessaria per la polimerizzazione completa evitando tempi aggiuntivi a causa del flusso irregolare di aria nell'autoclave. [12]

3.2. ANALISI LCA

È stata condotta l'analisi LCA per lo scenario in autoclave ed è stato analizzato un provino di trazione con dimensioni note. Lo studio dell'analisi LCA comprende altri due scenari che vedremo nel dettaglio in un secondo momento. Lo scopo ultimo degli studi condotti serve per far emergere lo scenario più sostenibile a livello di impatti ambientali. Di seguito analizziamo le varie fasi dell'analisi LCA per lo scenario in autoclave.

3.2.1. Definizione Degli Scopi E Obiettivi

La prima fase dell'analisi LCA prevede la definizione degli scopi e degli obiettivi. Questi ultimi devono essere chiari, noti e ben specifici. In questo caso l'obiettivo finale è quello di valutare l'impatto ambientale partendo dall'estrazione delle materie prime fino allo scenario di fine vita, di fatto l'analisi LCA che abbiamo condotto viene definita dalla "culla alla tomba"; se non ci fosse lo scenario di fine vita avremmo avuto un'analisi LCA "dalla culla al cancello". Nel caso dell'autoclave, per lo scenario di fine vita, è presente sia il riciclo dell'alluminio sia la discarica per i materiali in input.

L'unità funzionale designa il punto di riferimento del nostro sistema in cui tutti i dati in entrata e in uscita saranno normalizzati. Viene definito dalla normativa ISO 14040 in questo modo: misurazione delle prestazioni del flusso funzionale in uso del sistema.[13] Nel caso dell'autoclave, come unità funzionale avremo un provino di trazione con dimensioni note pari a 25mm x 250mm x 2,5mm.

La seguente figura rappresenta i confini del sistema del processo produttivo in autoclave. Tutte le varie fasi del processo produttivo per l'autoclave sono state spiegate nei paragrafi soprastanti. È possibile soffermarsi sulla complessità del processo produttivo; infatti, è un processo che prevede diverse fasi: materiali in input, la fase di taglio, la fase di cura, stampo, la fase di lay-up, polimerizzazione

e la fase di de-stampaggio. È semplice evincere che il processo in autoclave sia molto elaborato e in particolare alcune fasi sono molto lunghe.

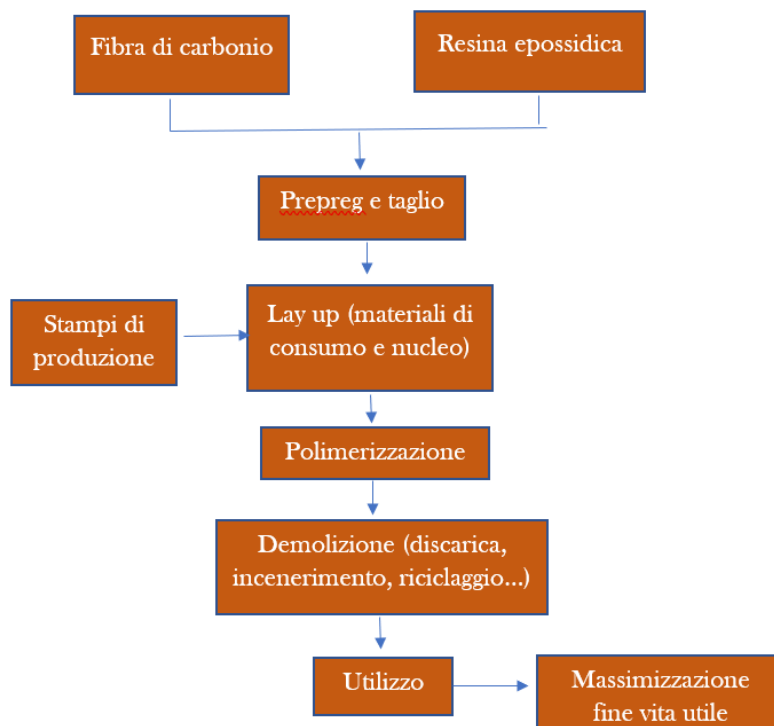


Figura 2. Rappresentazione del processo in autoclave

3.2.2. Analisi Dell'inventario

La fase più delicata e impegnativa di uno studio LCA è l'analisi dell'inventario. Qui vengono definiti e quantificati i flussi di input e output nel ciclo di vita del sistema, al fine di costruire il modello più accurato possibile del sistema. Il primo passo consiste nel visualizzare tutte le fasi del ciclo di vita e le loro relazioni in un diagramma di flusso, identificando tutti gli input e gli output e i dati da raccogliere. Una volta raccolti, tutti i dati devono essere classificati (ad esempio, materiali primari, energia, trasporto) e archiviati in una tabella di inventario, che servirà come base principale per la successiva valutazione degli impatti. [14]

La figura seguente rappresenta l'analisi dell'inventario dello scenario in autoclave.

Sui dati presenti nella tabella sono stati effettuati dei calcoli perché ad esempio lo stampo può essere riutilizzato per 750 stampe, per cui i dati sono stati resi conformi alle caratteristiche dello scenario e alla normativa D3039.

					Risultati
Materiale di input	Fibra di carbonio	6,4	kg		0,1339
	Resina epossidica	3,6	kg		0,0753
	Nucleo	0,3	kg		0,0063
Taglio:	Energia Elettrica	0,082	kWh		0,0017
	Rottami di prepreg	2	kg		0,0419
Maestro:	Poliuretano	Assente			Errore
	MDF	Assente			Errore
Muffa:	Alluminio	67	kg		1,402
	Rottami di alluminio	41	kg		0,8579
	CFRP	Assente			Errore
Controstampo:	Gomma di silicone	Assente			Errore
	E.E (polimerizzazione)	0,5	kWh		0,0105
Lay-up:	PA66 (sacco sottovuoto)	0,5	kg		0,0105
	TFE (film)	Assente			Errore
	PET (pausa)	0,375	kg		0,0078
	TFE (pellicola di rilascio)	0,055	kg		0,0012
	Solvente organico	0,03	kg		0,0006
Polimerizzazione:	E.E (polimerizzazione)	11	kWh		0,2302
	E.E (riscaldamento)	Assente			Errore
	E.E (morsetto)	Assente			Errore
	Aria compressa 6 bar	Assente			Errore
De-stampaggio:	E.E (raffreddamento)	Assente			Errore

Tabella 1. Analisi dell'inventario del processo in autoclave

3.2.3. Valutazione Degli Impatti Ambientali

Per la valutazione degli impatti ambientali è stato utilizzato il software SimaPro, un software riconosciuto a livello internazionale utile per la valutazione degli impatti ambientali. Sono state utilizzate due categorie di impatto differenti il metodo GWP, ossia Global Potential Warming utile a valutare il riscaldamento globale su un lasso di tempo di cento anni e il metodo ReCiPe Midpoint suddiviso in tre macrocategorie ossia salute umana, risorse ed ecosistema.

3.3. ANISOPRINT: ALTE PRESTAZIONI

Anisoprint Composer è una stampante 3D professionale progettata per l'uso nel settore industriale. È in grado di stampare con precisione e qualità in fibra di carbonio continua.

Questo tipo di stampante si avvale della tecnologia di coestruzione in fibra composita (CFC) e, grazie all'utilizzo di due materiali (termoindurente e termoplastico), è in grado di produrre rinforzi strutturali per parti soggette a sollecitazioni meccaniche perché garantisce una bassa porosità e una buona adesione tra fibra e polimero. [15]

3.4. ANISOPRINT: CARATTERISTICHE

In seguito sono state riportate le caratteristiche tecniche della stampante alto performante Anisoprint.

Tecnologia di stampa: FFF(FDM)/ CFC

- Peso Stampante: Composer A3: 65KG
- Altezza minima strato: 60 μ m
- Doppio ugello: estrusore FFF(FDM) ed estrusore CFC con dispositivo di taglio della fibra di rinforzo
- Ugello: 0,4mm
- Dimensione stampante: composer A3: 720mm x 630mm x 490mm
- Area di stampa: Composer A3: 420mm x 297mm x 210mm
- Temperatura di stampa: fino a 270 ° C
- Piatto di stampa: in vetro
- Temperatura piatto di stampa: fino a 120 ° C
- Trasferimento dati: tramite scheda SD / cavo USB [15]

Il processo CFC risulta essere la caratteristica vincente per la stampante alto performante Anisoprint. La coestrusione di fibre composite (CFC) è un processo di produzione additiva utilizzato per creare parti composite leggere e resistenti con forme e strutture interne complesse. Il metodo si basa sullo sviluppo preciso di una testina di stampa per includere fibre composite continue nella plastica fusa. Due estrusori in plastica (FFF) e composito (CFC) sono inclusi nella testina di stampa mostrata nella figura seguente. L'estrusore costruito ha due ingressi e un ugello. L'ingresso centrale è per la fibra composita, mentre l'ingresso laterale è per la plastica. Il CF passa attraverso il canale centrale ed è protetto dal fusibile di plastica fornito attraverso il canale laterale nel blocco termico dell'estrusore.

Attraverso il foro dell'estrusore sulla superficie di lavoro, il CF con la plastica fusa deposita uno strato dopo l'altro, così continua a costruire un elemento composito rinforzato con fibre. L'estrusore di plastica ha un ingresso per il filamento di plastica e un ugello. La tecnologia consente di produrre materiali rinforzati di alta qualità sfruttando la flessibilità delle forme e un'ampia gamma di materiali plastici.

L'utilizzo di una varietà di plastiche a una temperatura di lavorazione fino a 270°C è reso possibile dalla tecnologia. È possibile utilizzare plastiche ABS, PLA, PETG, PA e PC. A seconda degli obiettivi, il materiale può essere cambiato per ottenere i migliori parametri operativi o economici per ciascuna parte.

La figura sottostante rappresenta una panoramica della stampante 3D. Questa foto permette di capire e di approfondire la struttura interna della stampante. [16]

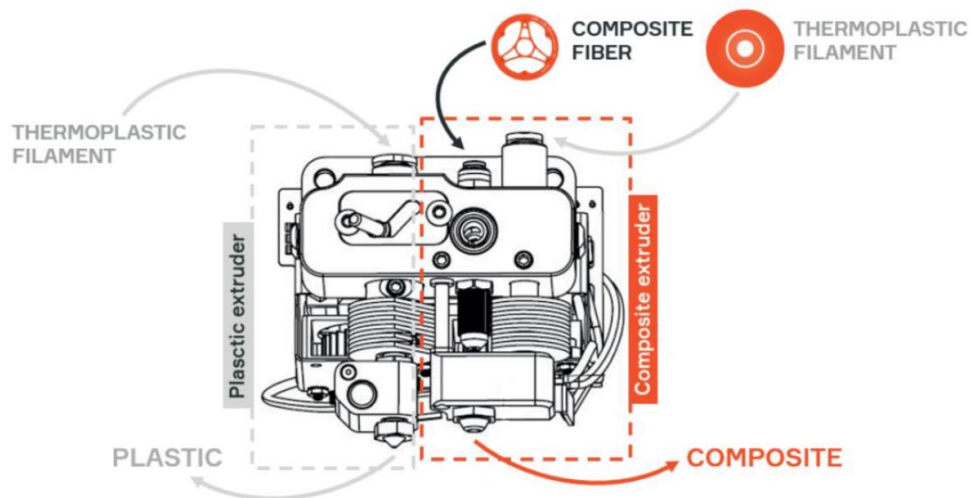


Figura 3. Stampante Anisoprint A3. Fonte [16]

3.5. I MATERIALI DI STAMPA

Nei due paragrafi successivi verranno spiegati i materiali utilizzati maggiormente nella stampa 3D di Anisoprint. Analizzeremo più nel dettaglio le materie plastiche e le fibre di rinforzo.

3.5.1. Le Materie Plastiche

Nell'imballaggio della spedizione sono inclusi due diversi materiali plastici, PA liscio e PA CFC. Questi materiali plastici sono stati sviluppati per essere utilizzati

insieme per ottenere i migliori risultati. Tuttavia, è possibile utilizzare questi materiali plastici insieme ad altri tipi di plastica nei contenitori EXT e OPEN.

Smooth è un materiale termoplastico polimerico con marchio registrato sviluppato da Polymaker basato su poliammide PA12 e riempito con fibre di carbonio. Il materiale è destinato alla stampa 3D di parti composite secondarie (non rinforzate). Queste parti sono rinforzate con fibre continue e superfici frontali. Il materiale viene fornito sotto forma di filamenti con un diametro trasversale di 1,75 mm. Smooth utilizza una tecnologia anti-deformazione e ha un basso tasso di assorbimento dell'umidità.

Qualità superficiale perfetta e facilità d'uso sono anche le caratteristiche del CFC, un materiale termoplastico polimerico sviluppato da Polymaker specificamente per il processo Anisoprint CFC (continuous fiber construction). Il CFC viene utilizzato come matrice di materiale in parti composite stampate in 3D e rinforzate con fibre continue. Il materiale viene fornito sotto forma di filamenti con un diametro trasversale di 1,75 mm. [16]



Figura 4. Smooth Pa 750 cc. Fonte [16]

3.5.2. Le Fibre Di Rinforzo

Viene utilizzata una fibra composita appositamente preparata e protetta da brevetto, chiamata Anisoprint CCF, per la stampa con rinforzo. Fornisce un

adesivo di alta qualità per la plastica. Anisoprint CCF è un tessuto di rinforzo composto da milioni di monofilamenti di fibra di carbonio estremamente sottili, impregnati con una miscela polimerica unica che garantisce un'impregnazione e un'adesione di alta qualità tra il polimero e la fibra. La fibra composita viene utilizzata per rinforzare la plastica durante la produzione dell'articolo.[16]

3.6. ANALISI LCA

L'analisi del ciclo di vita è un metodo strutturato e standardizzato a livello internazionale che consente di quantificare i potenziali effetti sull'ambiente e sulla salute umana associati a un bene o servizio. Nella sua concezione convenzionale, il termine "dalla culla alla tomba" si riferisce a un approccio che considera l'intero ciclo di vita del sistema dall'acquisizione delle materie prime alla gestione del sistema al termine della sua vita utile come oggetto di analisi. [17]

3.6.1. Definizione Degli Scopi E Obiettivi

La prima fase dell'analisi LCA è la definizione degli scopi e degli obiettivi. Questa fase è fondamentale per impostare un'analisi coerente e corretta, infatti, la definizione dell'obiettivo deve essere chiara, specifica e coerente.

La figura sottostante rappresenta il processo produttivo di Anisoprint. Trattandosi di un'analisi LCA dalla culla alla tomba il processo produttivo racchiude anche lo scenario di fine vita. Per la stampante Anisoprint lo scenario di fine vita sarà caratterizzato dalla discarica per lo smaltimento dei materiali.

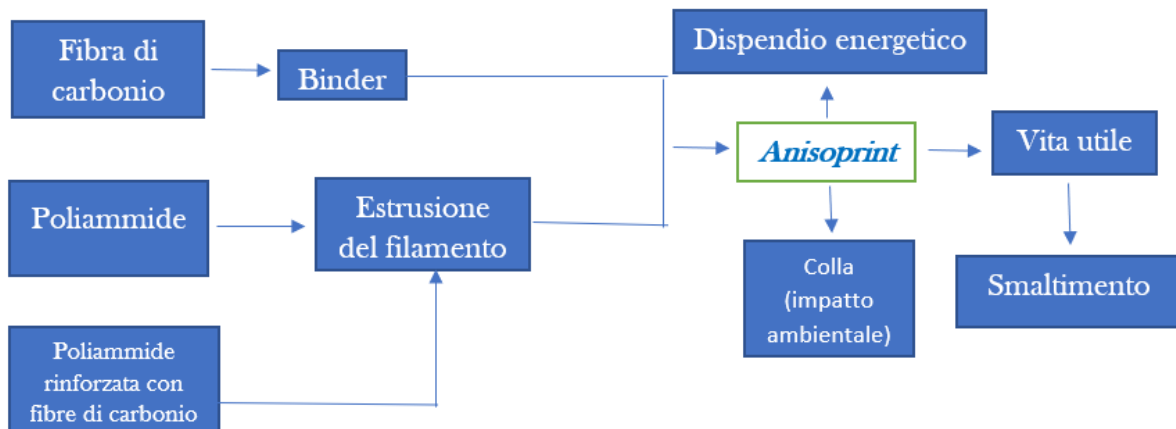


Figura 5. Rappresentazione del processo Anisoprint

3.6.2. Analisi Dell’inventario

L’analisi dell’inventario è una delle fasi più delicate per lo studio dell’analisi LCA poiché consente di individuare tutte le fasi dell’intero ciclo di vita produttivo e di conseguenza occorre inserire nella tabella dell’inventario tutti i materiali di input e output utilizzati nel processo produttivo di Anisoprint.

La tabella dell’inventario di Anisoprint:

Componenti:	Quantità	Quale
Fibra di carbonio	0,00427 kg	Fibra di carbonio
Poliammide	0,000186 kg	Nylon 6-6
Binder	0,0000604 kg	Epoxy resin liquid
Colla	0,00011 kg	Vynil acetate
Disp. Energetico	0,29 Kwh	En. high voltage

Tabella 2. Analisi dell’inventario Anisoprint

A differenza del processo in autoclave, come spiegato nei paragrafi precedenti, è semplice notare che questo processo produttivo è più snello. Infatti, a differenza del processo in autoclave, Anisoprint non ha delle fasi complesse e lunghe. I dati che sono stati riportati nella tabella dell'inventario sono stati calcolati facendo riferimento alla normativa D3039 e alle dimensioni note del provino pari a 250mm x 15mm x 2mm.

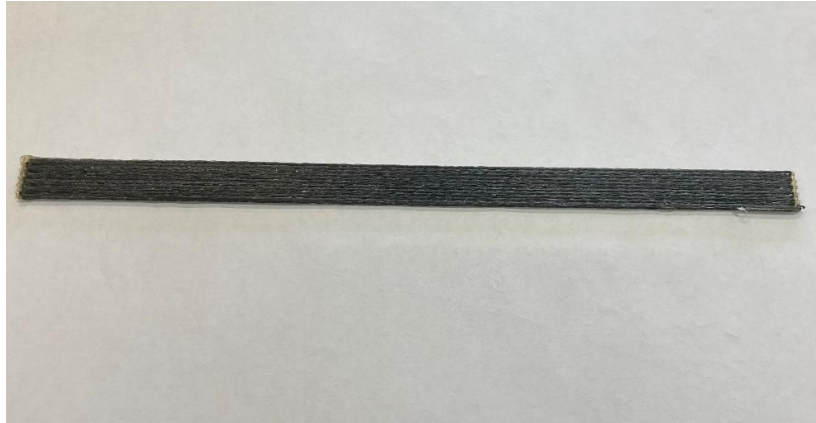


Figura 6. Provino di trazione stampato con Anisoprint nel dipartimento DIISM

3.6.3. Valutazione Degli Impatti Ambientali

La terza fase dell'analisi LCA prevede la valutazione degli impatti ambientali, una fase molto delicata. Negli studi condotti è stato utilizzato il software SimaPro volto proprio alla valutazione degli impatti. Infatti, l'utilizzo del software ha consentito l'esportazione dei dati su un foglio "excel" e subito dopo è stato possibile creare dei grafici di semplice lettura per analizzare lo scenario della stampante alto performante di Anisoprint. Per rendere lo studio condotto più esaustivo e completo ci saranno dei grafici di confronto tra gli scenari così da far risaltare le peculiarità dei tre scenari.

3.7. SPHERECUBE: PROCESSO INNOVATIVO

La tecnologia SphereCube è in grado di creare materiali compositi ad alte prestazioni senza l'uso di stampi, il che significa che non è necessario alcun impatto ambientale. Questi materiali sono anche molto più leggeri e resistenti dei materiali tradizionali, il che li rende molto prestanti ed efficienti per la costruzione di parti che devono essere resistenti all'usura, ad esempio.

Questa stampante si basa sui principi del Thermal Laser Curing, le cui principali caratteristiche sono:

-Resistenza: data dalle eccezionali proprietà chimico-fisiche dei materiali compositi che garantiscono ottime proprietà meccaniche a fronte di un basso peso e li rendono buoni sostituti dei metalli in determinate applicazioni e questo significa che sono in grado di sopportare carichi elevati, rendendoli una buona scelta per cose come automobili e parti di aeroplani.

-Leggerezza: realizzare componenti in materiale composito consente di ridurre di circa tre volte il peso di un oggetto rispetto allo stesso prodotto in alluminio. Questo rende i compositi una valida alternativa ai metalli per diverse applicazioni.

-Complessità: poiché i sistemi che utilizzano la tecnologia di stampa 3D consentono la creazione di forme innovative che non sono realizzabili utilizzando metodi di produzione convenzionali. Ovunque sia possibile, questi sistemi semplificano notevolmente il processo di produzione, liberando i progettisti dalle restrizioni di forma e complessità e aprendo la porta a nuove applicazioni.

-Automazione: processo di stampa 3D totalmente automatizzato, che garantisce alta ripetibilità, produttività e abbattimento dei costi di produzione di materiali compositi rinforzati con fibre lunghe.

-Risparmio: grazie alla stampa 3D ed al sistema SphereCube, si possono abbattere i costi di produzione di componenti in materiale composito, eliminando la necessità di utilizzare autoclave e stampi.

-Moldless: crea liberamente la forma geometrica che preferisci e, inoltre, il suo sistema di stampa 3D, supera i vincoli imposti dall'uso dei timbri e minimizza i costi di processo.

-Ripetibilità: l'elevata automazione del sistema SphereCube, assicura elevati livelli di ripetibilità del processo di stampa 3D tramite Thermal Laser Curing.

-Ecosostenibilità: La possibilità di stampare in tre dimensioni e la libertà di testare nuove geometrie ci consentono di ridurre il peso dei componenti in settori come quello automobilistico e aerospaziale, riducendo così il nostro impatto ambientale.[18]

Thermal Laser Curing è il nome del sistema in attesa di brevetto di SphereCube. La macchina per lo stampaggio è progettata per utilizzare filamenti composti costituiti da una varietà di polimeri e piccole quantità di altri materiali, come fibra di carbonio o plastica. Questi filamenti vengono riscaldati insieme per creare oggetti tridimensionali in una stampante tridimensionale.[18]

Senza limitazioni geometriche, l'innovativo processo produttivo è in grado di produrre beni con livelli di prestazioni più elevati in modo completamente automatico.[18]

In generale, il funzionamento di Sphercube possiamo definirlo in questa maniera:

- Preparazione del modello: per iniziare, è necessario utilizzare un software CAD o di modellazione 3D. Una volta terminato, il modello deve essere salvato in un formato compatibile con la stampante 3D.

-Caricamento del filamento: il filamento del materiale composito viene progettato in una stampante 3D utilizzando una fresa per filamenti, che fa avanzare il filamento attraverso il tubo di alimentazione fino a raggiungere l'estrusore.

-Riscaldamento del filamento: il filamento si trova all'interno della piastra di stampa di prova dopo essere stato progettato. La temperatura di fusione varia a seconda del tipo di materiale utilizzato nella composizione e può essere controllata tramite il software di stampa.

-Stampa di modelli: seguendo le istruzioni del modello 3D, la testina di stampa viene posizionata sulla superficie di stampa e riscaldata rapidamente per creare il modello strato per strato. La stazione di lavoro viene pulita prima dell'uso. Il piatto di stampa si sposta in una posizione inferiore a intervalli regolari durante l'operazione per consentire alla stampante di aggiungere gli strati successive.

-Terminazione: al termine della stampa, il modello deve essere rimosso dalla superficie di stampa e rifinito, se necessario. Ciò può comportare la rimozione di qualsiasi supporto di stampa, la modifica del modello o entrambe le cose.

Il processo appena descritto non è estremamente dettagliato, anzi, è una descrizione volta a fornire un'infarinatura generale su questo processo di stampa innovativo poiché i dati sono sensibili.

3.8. ANALISI LCA

L'analisi LCA è stata sviluppata anche per il processo innovativo di Sphercube, proprio perché il processo in esame è alternativo, efficace e innovativo paragonare questo scenario agli altri ha portato a delle considerazioni interessanti.

3.8.1. Valutazione Degli Scopi E Obiettivi

La prima fase prevede la definizione degli scopi e degli obiettivi in maniera definita e specifica. Questa fase è molto importante, infatti, l'obiettivo deve essere specifico e coerente.

La figura sottostante rappresenta il processo produttivo di Sphercube, l'analisi LCA in questione comprende lo scenario di fine vita per cui sarà “dalla culla alla tomba”.

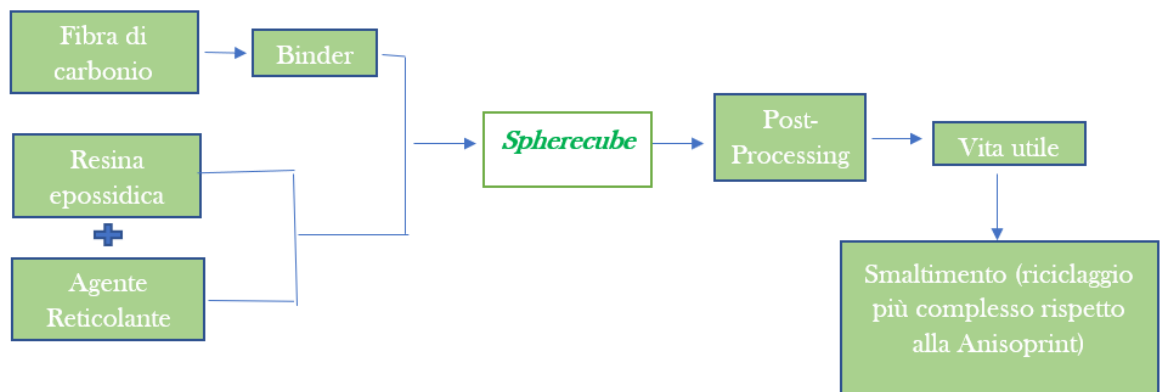


Figura 7. Rappresentazione del processo innovativo Sphercube

L'unità funzionale è un provino di trazione con delle dimensioni pari a 250mm x 15mm x 2mm.

3.8.2. Analisi Dell'inventario

L'analisi dell'inventario di seguito rappresentata nella tabella dell'inventario non presenterà dei valori specifici poiché i dati utilizzati sono sensibili. I dati utilizzati per la stesura dell'analisi LCA sono stati accuratamente misurati e contestualizzati.

Componenti:	Quantità	Quale
Resina	5,3625g	Epoxy resin and snap curing hardener
Solvente organico	0,01 kg	Mek
Distaccante		Release agent

Acetone		Acetone
Binder		Binder epossidico
Aria compressa		Compressed air, 1200 kPa
Post- processing		Riscaldamento in forno a 120°C per 1 h
Dispendio energetico		Dispendio energetico

Tabella 3. Analisi dell'inventario Sphercube

La mancanza di alcuni dati presenti nella tabella è data dalla riservatezza dei dati utilizzati per questo processo innovativo. Il dispendio energetico di Sphercube è stato misurato con un classico misuratore di energia in diversi intervalli di tempo.

Questa prima foto rappresenta il power factor nella fase iniziale in cui la stampante deve raggiungere una determinata temperatura.

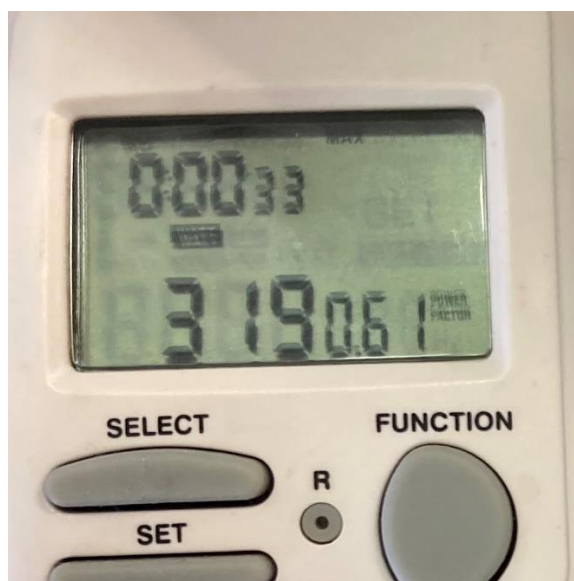


Figura 8. Power factor misurato per Sphercube nel dipartimento DIISM

Questa seconda foto rappresenta il dispendio energetico della stampante dopo 30 minuti e 03 secondi.



Figura 9. Dispendio energetico misurato per Sphercube nel dipartimento DIISM

Dagli studi condotti sino a qui si evince che il dispendio energetico di questo processo innovativo è molto basso. Infatti, Sphercube permette di risparmiare e di abbattere i costi di produzione di componenti in materiale composito, eliminando la necessità di utilizzare autoclave e stampi.

3.8.3. Valutazione Degli Impatti Ambientali

La valutazione degli impatti ambientali rappresenta il punto di svolta nella stesura dell'analisi LCA perché permette di capire e di esaminare i dati valutati fino a quel momento. Inoltre, consente di ampliare e valutare in maniera critica i grafici ottenuti dall'esportazione dei dati da SimaPro ad excel. Essendo Sphercube un processo innovativo ed in costante via di sviluppo le conclusioni di quest'analisi LCA saranno utili ed interessanti.

4. RISULTATI E DISCUSSIONE

In questo capitolo tratteremo in maniera critica la quarta fase dell'analisi LCA. Infatti, verranno discussi i risultati ottenuti dallo studio dell'analisi LCA condotta sino a qui. Infine, per completare e avvalorare gli studi condotti sino a qui analizzeremo e valuteremo l'analisi di sensibilità degli scenari.

Lo sviluppo della tecnologia di stampa 3D e la produzione additiva negli ultimi dieci anni sono stati definiti come una vera e propria rivoluzione manifatturiera, per non parlare di una significativa opportunità per i miglioramenti ambientali ad essa coordinate.

Attualmente non sono disponibili analisi quantitative per le prestazioni dell'ambiente di stampa tridimensionale. I pochi studi condotti finora si concentrano esclusivamente sull'energia utilizzata durante la produzione, senza tenere conto degli effetti della produzione di materie prime, dell'utilizzo di prodotti finiti, della gestione dei rifiuti o della gestione dei flussi di rifiuti. [19]

Nel corso degli studi sono stati analizzati tre diversi scenari: lo scenario in autocalve, la stampante 3D alto performante Anisoprint e la nuova tecnologia Sphercube. Nell'analisi per la valutazione degli impatti ambientali sono stati utilizzati due metodi differenti: il ReCiPe e il metodo IPCC 2021 GWP 100.

4.1. METODO GWP PER I TRE SCENARI

Il metodo GWP, potenziale di riscaldamento globale, esprime quanto un gas contribuisce all'effetto di riscaldamento globale di CO₂ rispetto ad altri gas, utilizzando come punto di riferimento 1. Ogni valore di GWP è calcolato su un

determinato periodo di tempo. Negli studi esaminati è stato utilizzato il metodo IPCC 2021 GWP 100. [20]

4.1.1. Autoclave Metodo GWP

Iniziamo analizzando lo scenario in autoclave, dal grafico sottostante si evince che la fase più impattante per il potenziale di riscaldamento globale è data dai materiali in input con un valore di 1,13 kg CO₂- equivalenti. Nel processo in autoclave, per la fase di produzione, ci sono sei fasi differenti: “Cura”, “Lay-up”, “Stampo”, “Taglio” e “Materiali in input” poiché per questo processo produttivo occorrono stampo e contro stampo. Ognuna di queste fasi dà un proprio contributo più o meno alto, si nota che le fasi meno impattanti sono la fase di “Cura” e “Taglio”. Per quanto riguarda lo scenario di fine vita è presente il riciclo dell’alluminio, il quale ha un valore negativo, esattamente -0,00467 kg CO₂-equivalenti, il che significa trarre vantaggio dal riciclo di questo materiale per la fase di produzione di questo determinato processo. Infine, analizziamo la fase di “Lay-up” che, in questo processo, rappresentano il valore più alto subito dopo il valore dei materiali in input.

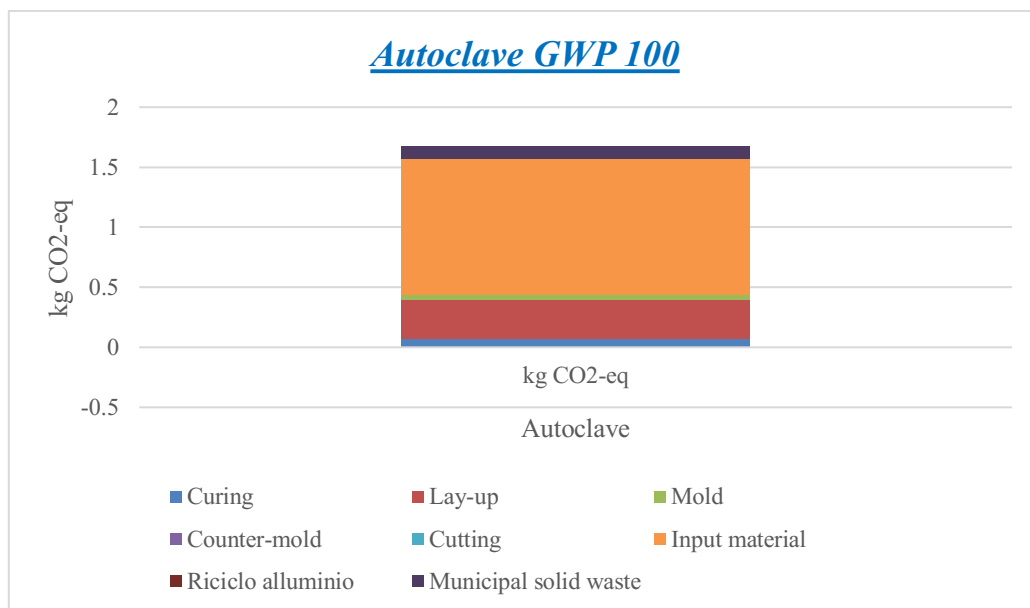


Grafico 1. Metodo GWP per il processo in autoclave

Dal grafico di caratterizzazione dell'autoclave sottostante è evidente che il materiale in input a fornire un maggior impatto ambientale è la fibra di carbonio, nonostante le sue ottime proprietà. L'impatto maggiore è dato dalla fibra di carbonio nella fase "GWP 100- fossil" con una percentuale di 94,10%, seguita dalla percentuale data dal GWP 100-biogenic 85,54% e infine abbiamo la percentuale del GWP 100 - land transformation 79,95%. È emerso che è il PAN, il poli acrilonitrile, a far sì che la fibra di carbonio abbia un impatto così elevato. Dallo studio condotto su SimaPro si evince che, per la produzione di 1 kg di PAN, la fase più impattante è l'energia utilizzata per la sua produzione, subito dopo abbiamo il vapore. Di fatto la fibra di carbonio negli ultimi anni è diventata oggetto di spicco nel settore di stampa 3D. La fibra di carbonio è estremamente sottile e resistente; rispetto all'acciaio, infatti, è 5 volte più resistente e 2 volte più rigida. Inoltre, ha un peso specifico ridotto rispetto ai materiali comuni ma, nonostante ciò, riesce a sopportare carichi molto grandi. [21]

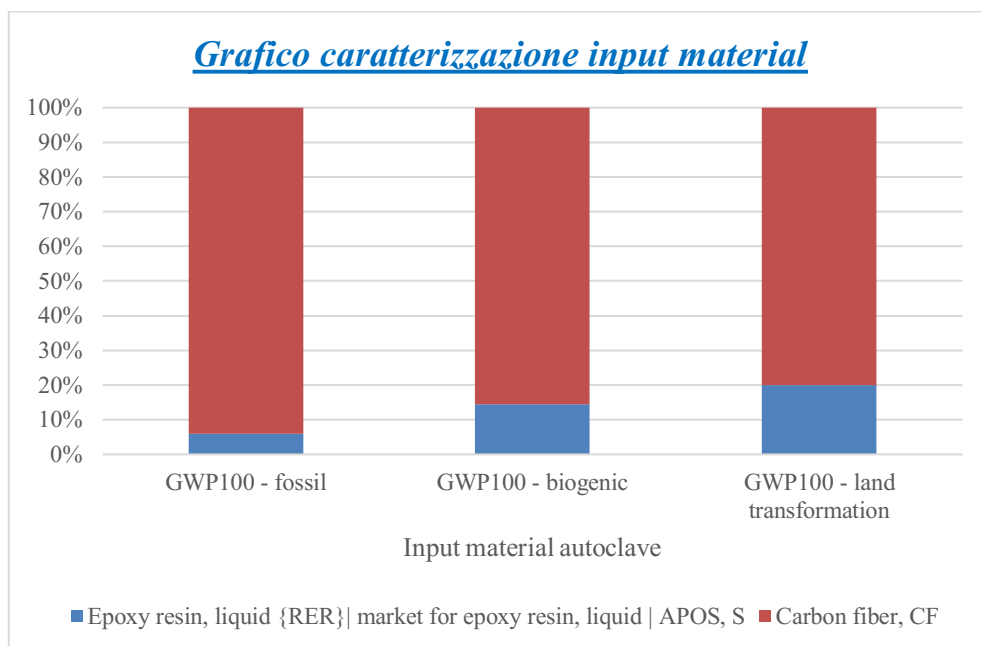


Grafico 2. Caratterizzazione dei materiali in input per l'autoclave

4.1.2. Anisoprint Metodo GWP

Per quanto riguarda Anisoprint, dal grafico in questione e dagli studi condotti si nota che, anche in questo caso, è la fibra di carbonio ad essere il materiale più impattante con un valore di 0,17 kg CO₂-equivalenti. Questo risultato, come nel caso dell'autoclave, è dato dalla presenza del PAN e di conseguenza dal suo eccessivo dispendio energetico. Si evince dal "Global Potential Warming" che il contributo maggiore è dato dal dispendio energetico relativo alla stampa di un provino di trazione. Mentre, tutti gli altri componenti come ad esempio: il Nylon 6-6, la resina epossidica, l'acetato di vinile e i rifiuti solidi urbani hanno un valore molto basso per cui il loro impatto è inferiore rispetto agli altri elementi.

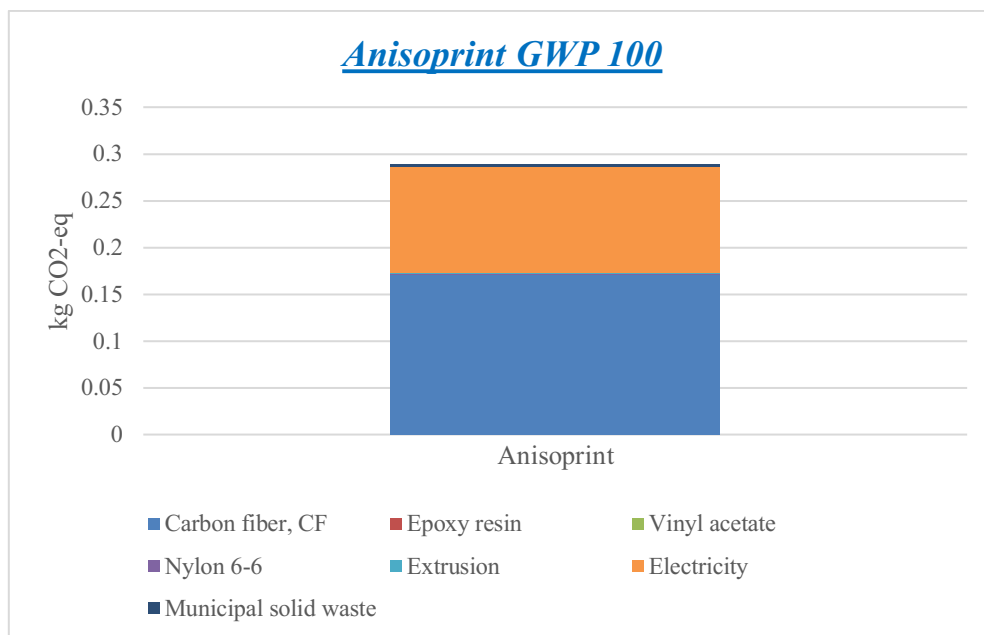


Grafico 3. Metodo GWP per Anisoprint

4.1.3. Sphercube Metodo GWP

Per Sphercube si evince che le varie fasi danno un contributo molto basso. Anche in questo scenario, è la fibra di carbonio ad avere l’impatto maggiore con un valore pari a 0,21 kg CO₂-equivalenti, anche questo risultato è dato dalla presenza del PAN. Nonostante i valori siano molto bassi, le fasi che danno un contributo maggiore sono quelle legate al consumo energetico, al “Solvente” e “Rifiuti Solidi Urbani”, mentre, la resina epossidica e l’acetone hanno il minor impatto.

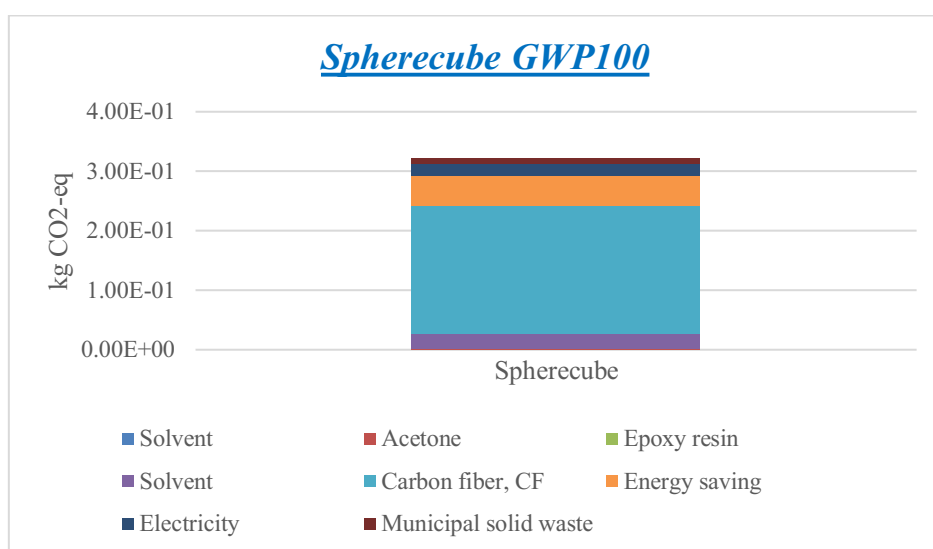


Grafico 4. Metodo GWP per Sphercube

4.2. METODO “ReCiPe” PER I TRE SCENARI

Analizziamo i 3 scenari con il metodo ReCiPe. Quest’ultimo è un metodo che prende in considerazione 17 categorie diverse che possono essere raggruppate in tre macrocategorie: human health, ecosystem, and resources. Il metodo consente inoltre di raggruppare tutte le categorie in una singola misurazione ottenuta in eco-point; [22] la procedura degli scenari in questione è stata eseguita utilizzando la metodologia ReCiPe 2016 Midpoint (I)V1.07 /World (2010) I.

4.2.1. Autoclave Metodo ReCiPe

Analizzando lo scenario in autoclave con il metodo in questione è facilmente intuibile che, in accordo con il metodo GWP 100, la fase più impattante è quella relativa ai materiali in input con un valore pari a 2,24 kg CO₂-equivalenti nella categoria d'impatto "Tossicità umana cancerogena". Questo perché il processo di infiammazione e inalazione causata dall'allungamento delle fibre di carbonio porterebbe ad un cambiamento nella composizione strutturale usuale del gene Cdkn2a. [23] Le altre categorie d'impatto con un contributo più importante sono "Ecotossicità delle acque", "Ecotossicità marina" e "Forazione dell'ozono".

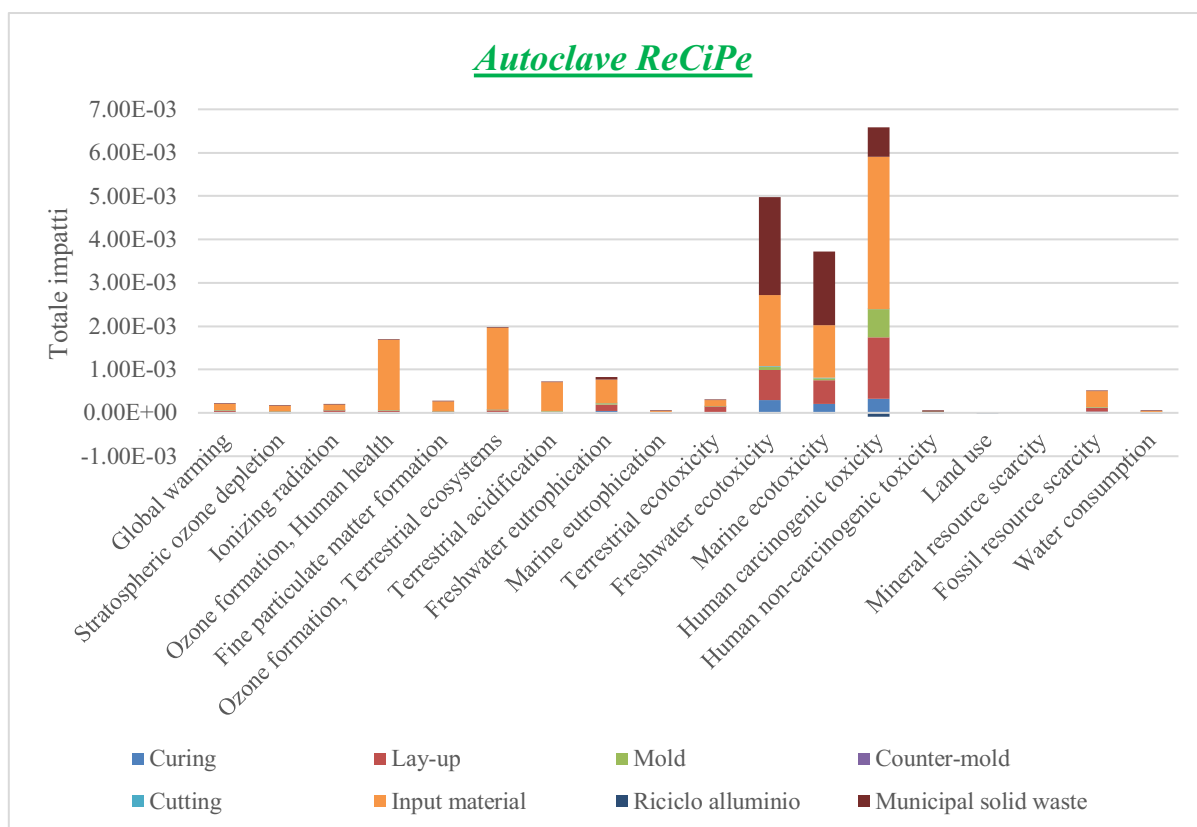


Grafico 5. Metodo ReCiPe per il processo in autoclave

Dal grafico di caratterizzazione del metodo in autoclave si evince che il materiale a dare un maggior impatto è la fibra di carbonio, per la presenza del PAN, e non la resina epossidica. Infatti, la percentuale della fibra di carbonio in tutte le categorie

d'impatto non è mai inferiore all'85%. La fibra di carbonio risulta essere più impattante nella categoria di impatto chiamata "Ozono Stratosferico". È facilmente intuibile che in tutte le categorie l'impatto maggiore è dato dalla fibra di carbonio.

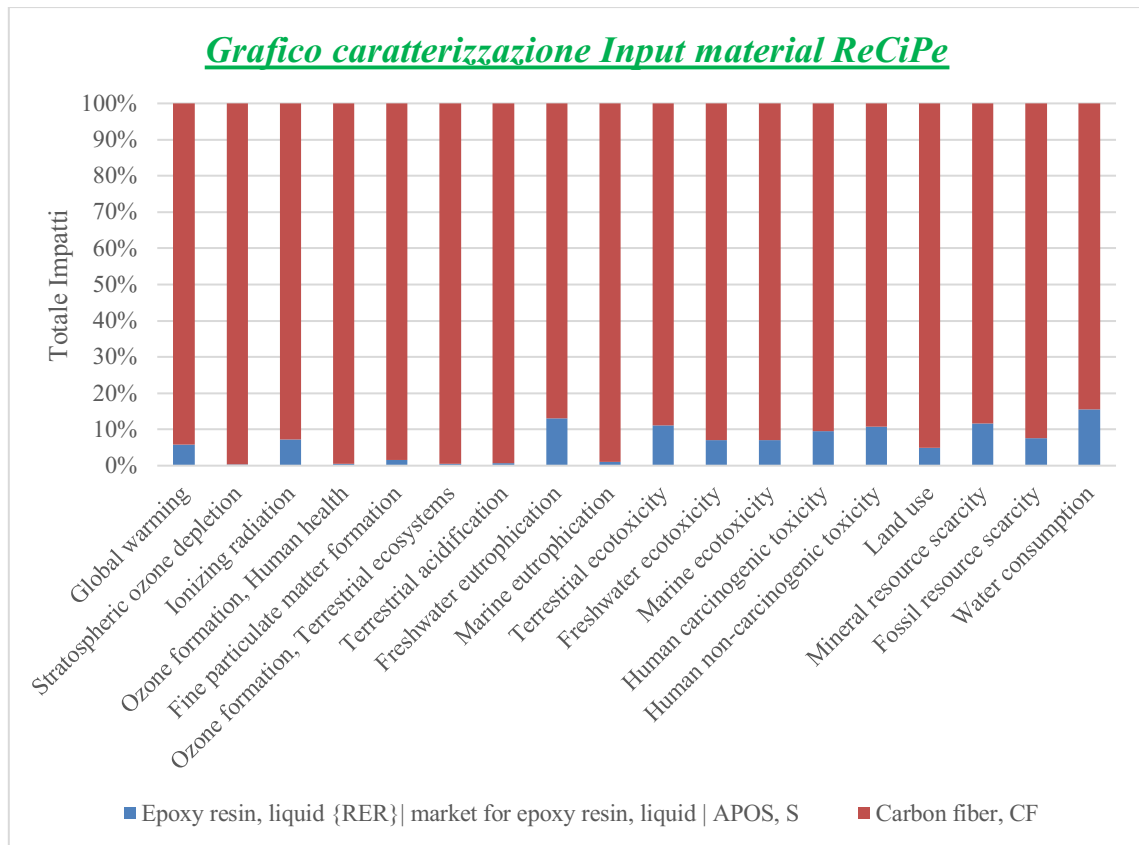


Grafico 5. Metodo ReCiPe per la caratterizzazione dei materiali in input

4.2.2. Anisoprint Metodo ReCiPe

Per lo scenario di Anisoprint si deduce che la fibra di carbonio ha un valore più alto rispetto agli altri componenti utilizzati nel processo di stampa. Quest'ultima ha un valore pari a 0,20 kg CO₂- equivalenti. Dopo aver analizzato il grafico di caratterizzazione della fibra di carbonio è emerso che la presenza del PAN attribuisce un valore così elevato all'impatto della fibra di carbonio. La categoria d'impatto con il valore maggiore è "Tossicità umana cancerogena". È noto come il tema del surriscaldamento globale sia un fenomeno da combattere e da evitare

date le sue molteplici conseguenze come ad esempio: l'innalzamento del livello del mare, la crescente frequenza degli incendi boschivi e l'espansione dei ghiacciai. [24] Oltre a questa categoria d'impatto, le altre due categorie più impattanti sono il "Ecotossicità dell'acqua" e "Formazione dell'ozono".

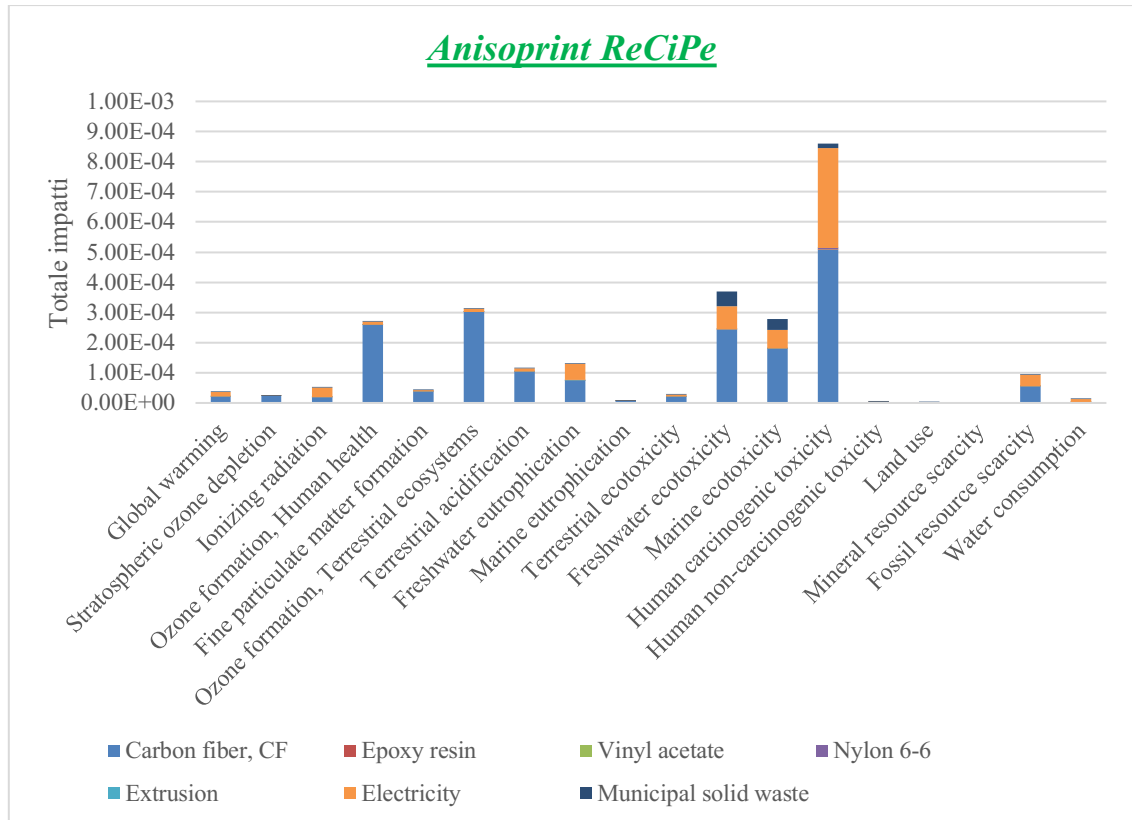


Grafico 6. Metodo ReCiPe per Anisoprint

4.2.3. Sphercube Metodo ReCiPe

Sphercube presenta il valore più alto nella fase di "Tossicità umana cancerogena" avendo come materiale più impattante la fibra di carbonio con 0,26kg CO₂-equivalente, ciò è dato dalla presenza del PAN. Mentre vediamo che il riscaldamento globale è molto basso, infatti, il fattore principale che causa il riscaldamento globale è la CO₂ prodotta dall'attività umana. Entro il 2020, la concentrazione atmosferica aveva superato i livelli preindustriali del 48%. (Prima del 1750). Altri gas con effetto salino vengono rilasciati in quantità minori a causa

dell'attività umana. [25] A differenza dello scenario in autoclave, per quanto riguarda Sphercube, abbiamo diverse fasi meno impattanti come ad esempio “Scarsità di risorse minerali”.

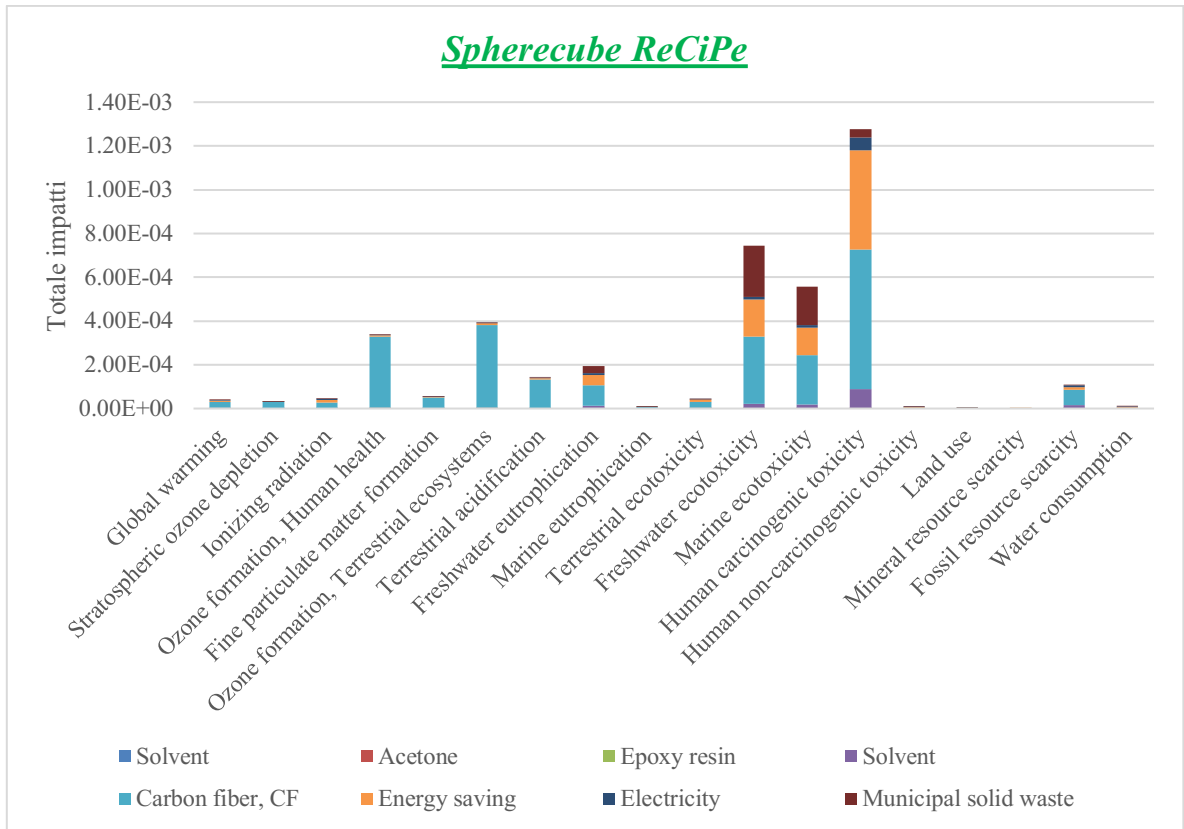


Grafico 7. Metodo ReCiPe per Sphercube

4.2.4. Confronto Scenari

Dai valori mostrati nel seguente grafico con il metodo GWP 100 e dagli studi presi in esame si dimostra che la nuova, innovativa ed alto performante tecnologia Anisoprint ha l’impatto ambientale minore seppure con un divario minimo rispetto a Sphercube. Si evince facilmente, in tutti e tre gli scenari, che la fase più impattante sia quella relativa ai materiali in input. Questo risultato è stato approfondito analizzando il grafico di caratterizzazione relativo alla produzione di 1 kg di fibra di carbonio. Il contributo maggiore è dato dal dispendio energetico

del poliacrilonitrile contenuto all'interno. Altrettanto evidente risulta essere il processo meno sostenibile ossia il processo in autoclave.

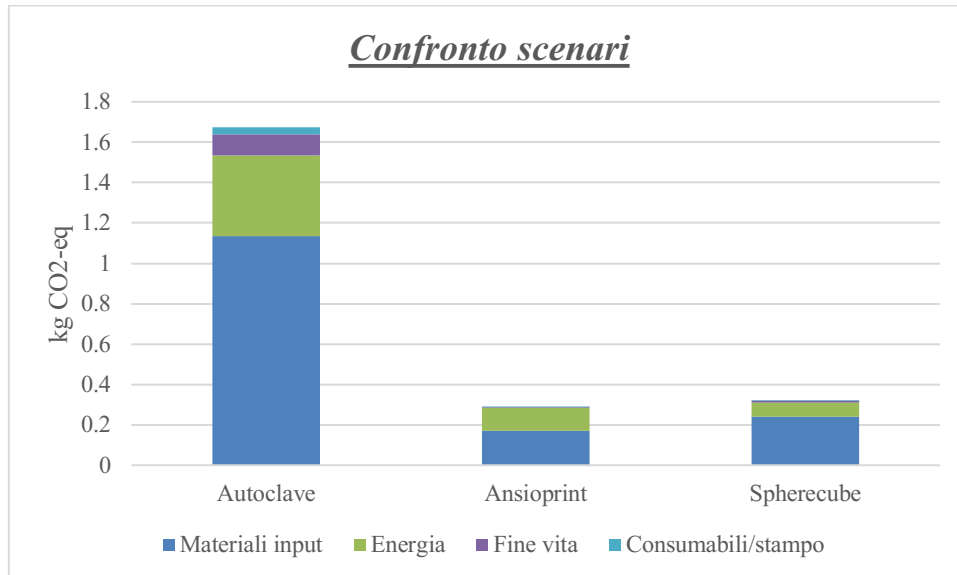


Grafico 8. Confronto con il metodo GWP tra l'autoclave, Anisoprint e Sphercube

4.2.4. Analisi Di Sensibilita' per i tre scenari

Nell'ultima parte dell'analisi LCA è stata svolta l'analisi di sensibilità. L'analisi di sensibilità è un approfondimento volto a rendere i risultati studiati precedentemente più coerenti e più stabili. Essa consiste nel vedere come variano gli output facendo variare gli input. Infatti, consiste nel far variare dal -100% al +100% i valori degli impatti di un determinato processo produttivo così da vedere come queste variazioni influenzano i valori degli impatti totali.

4.2.5. Autoclave: Analisi Di Sensibilita'

Iniziamo analizzando lo scenario in autoclave e come si evince dal grafico il totale dei materiali in input ha un andamento crescente fino ad arrivare a 2,81. Mentre, le altre tre rette ossia quella che rappresenta il totale della fase di lay-up, l'altra che caratterizza lo stampo e l'ultima rappresentante la fase di cura sono tutte ravvicinate tra di loro. In particolare, saltano all'occhio le rette inerenti lo stampo e la fase di cura perché sembrano quasi essere sovrapposte ed hanno un andamento abbastanza lineare; a differenza della fase di lay-up la quale presenta un andamento più crescente. Vedremo in ogni grafico che tutte le rette avranno una pendenza diversa, infatti, la pendenza della retta indica la stabilità dei dati per cui più la pendenza della retta è maggiore sarà la possibile variabilità dei risultati.

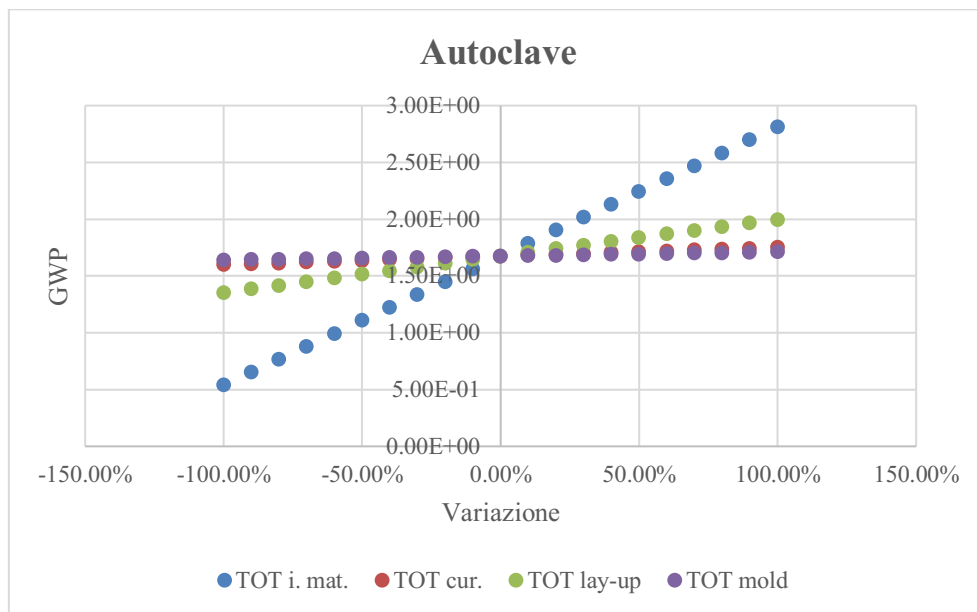


Grafico 9. Analisi di sensibilità per lo scenario in autoclave

4.2.6. Anisoprint: Analisi Di Sensibilita'

Valutando e analizzando il grafico di Anisoprint si evince che il nylon ha un andamento abbastanza lineare, infatti, dagli studi condotti su excel e dal grafico in questione si vede che la sua variazione è minima. Nello scenario di Anisoprint, prestando attenzione, si nota la sovrapposizione delle rette del nylon e della resina epossidica per cui si evince che l'andamento sia abbastanza simile, infatti, la resina epossidica parte dal -100% con un valore di 0,28 e arriva a +100% con 0,29 (valori abbastanza simili al nylon). A presentare un andamento differente abbiamo la fibra di carbonio e l'energia, entrambe le rette subiscono una crescita.

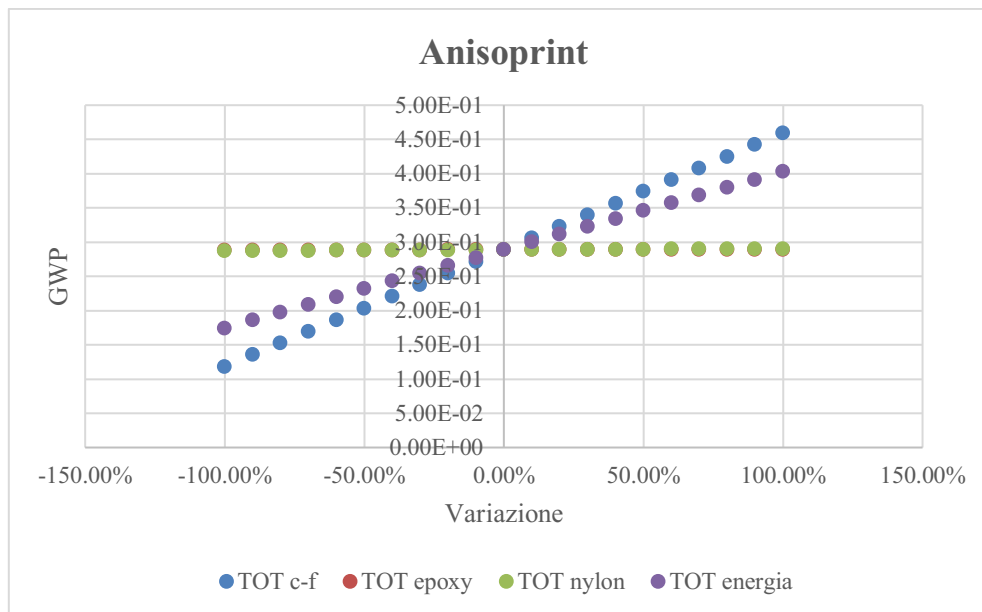


Grafico 10. Analisi di sensibilità per Anisoprint

4.2.7. Sphercube: Analisi Di Sensibilita'

Per quanto riguarda Sphercube ciò che salta subito all'occhio è sicuramente la pendenza positiva della retta della fibra di carbonio, parte infatti dal -100% con un

valore di 0,11 e arriva al +100% con un 0,54. Si nota nel grafico la leggera sovrapposizione tra la retta dell'energia e quella della resina epossidica. Entrambe queste rette presentano un andamento lineare. Se si presenta particolare attenzione all'inizio della variazione identificata con il - 100% si intravede la retta del solvente. Anche in questo caso, così come nei casi precedenti più la pendenza della retta è elevata e più sarà grande l'incertezza legata ad un determinato dato.

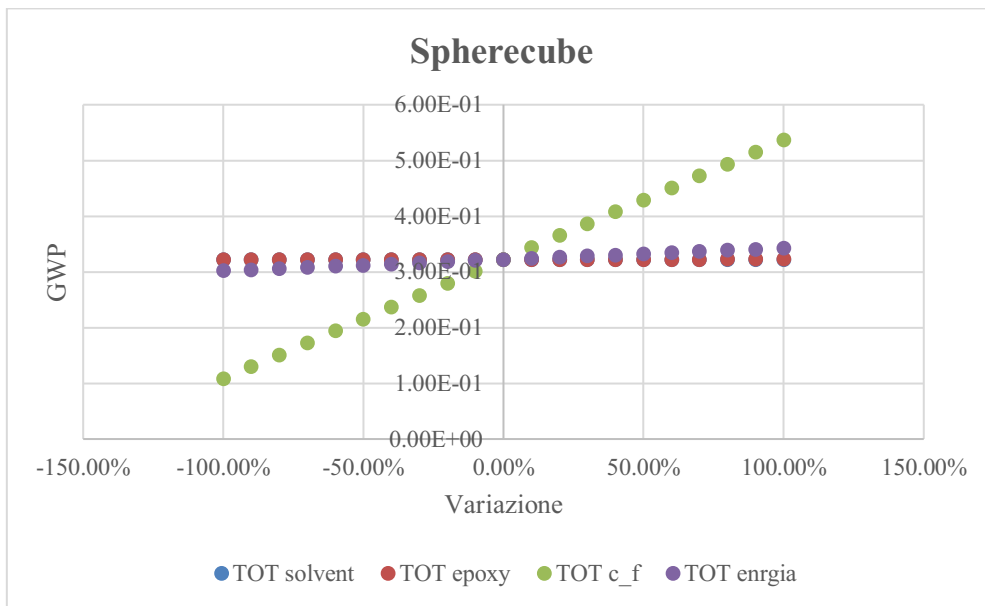


Grafico 11. Analisi di sensibilità per il processo innovativo Sphercube

4.3. ANALISI DI SENSIBILITA': CONFRONTO SCENARI

L'analisi di sensibilità è utile per quantificare la robustezza di un determinato risultato per cui ci permette di capire quanto sia consolidato un risultato. Motivo per il quale sono stati effettuati due grafici di confronto molto interessanti.

Il primo grafico di confronto rappresenta la differenza dell'energia utilizzata da Sphercube e dal processo in autoclave. Questa retta parte con una pendenza negativa pari al -1,28 fino ad arrivare a -1,43. Dagli studi condotti precedentemente, utilizzando il metodo GWP, si evince che il dispendio

energetico nella fase di cura nel processo in autoclave è pari a 0,07 kg CO2-eq mentre il dispendio energetico di Sphercube è 0,02 kg CO2-eq. Un risultato prevedibile data la complessità e la lunghezza del processo in autoclave.

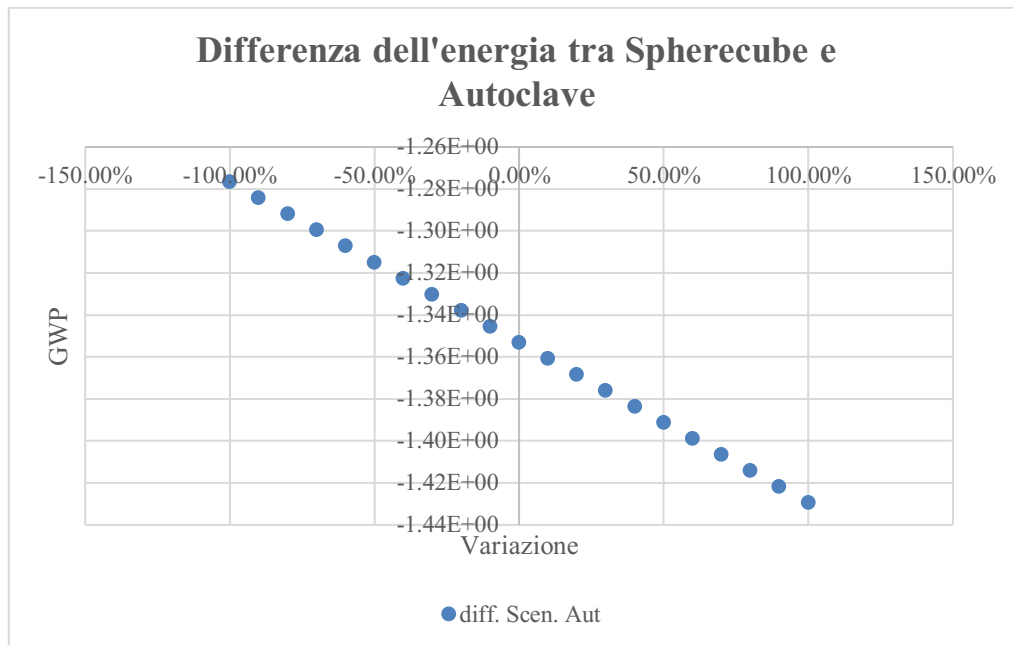


Grafico 12. Analisi di sensibilità per confrontare la differenza di energia tra Sphercube e il processo in autoclave

Il secondo grafico di confronto rappresenta la differenza tra l'autoclave e Sphercube con gli impatti in kwh di prodotti variabili. La retta rappresentata è abbastanza simile a quella del grafico precedente, parte dal - 100% con un valore di -1,54 e arriva al +100% con -1,65.

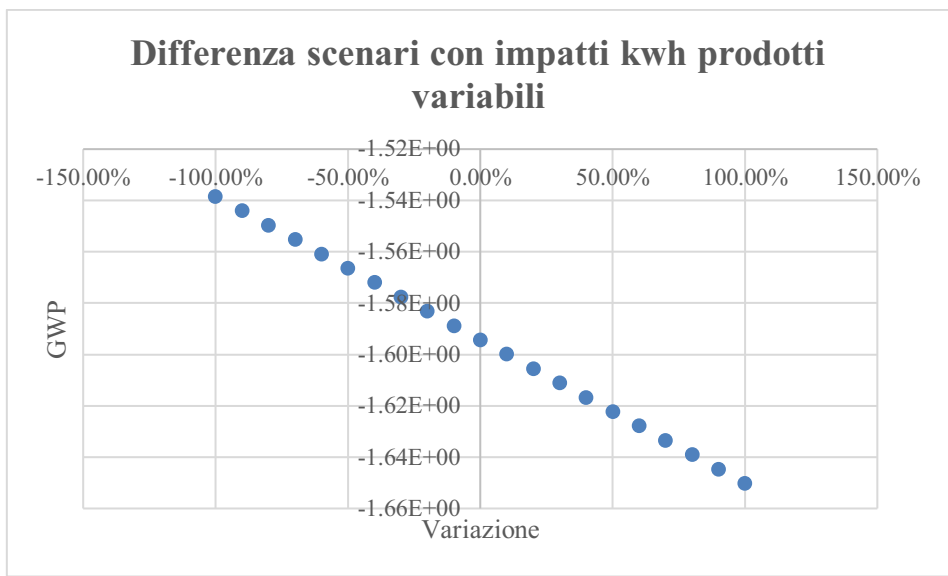


Grafico 13. Analisi di sensibilit  per confrontare lo scenario in autoclave e Spherecube

5. CONCLUSIONI

In questo capitolo tratteremo le conclusioni alle quali si è giunti dopo aver concluso gli studi condotti ed esaminati sino a qui.

Concludendo gli studi esaminati si dimostra che lo scenario che apporta un impatto superiore è proprio lo scenario in autoclave con la fase relativa ai materiali in input, in particolar modo, la fibra di carbonio. Dopo aver analizzato il grafico di caratterizzazione della fibra di carbonio si è compreso che è il poli acrilonitrile ad attribuire alla fibra un impatto così elevato. Dal grafico “Confronto scenari” si evince che lo scenario dell’autoclave è quello più impattante, in particolar modo si nota che ad impattare di più è il dispendio energetico che si utilizza per la fase di produzione. Subito dopo, l’impatto maggiore è dato dallo scenario di fine vita, che nel caso dell’autoclave, prevede il riciclo dell’alluminio e la discarica per alcuni materiali.

Infine, con il valore più basso abbiamo la categoria “Consumabili e Stampo” questo risultato possiamo attribuirlo al fatto che, ad esempio, lo stampo può essere riutilizzato. Sphercube ha dei valori nettamente più bassi rispetto allo scenario precedente, si evince che le fasi più impattanti sono due: ossia quella relativa ai materiali in input e il dispendio energetico utilizzato per portare la macchina ad una determinata temperatura. Mentre, le altre due categorie hanno un contributo trascurabile rispetto agli altri due sopracitati. Infine, Anisoprint, ha più o meno lo stesso andamento di Sphercube con la differenza che i valori sono più bassi e di fatto sono meno impattanti.

Facendo alcune considerazioni si nota che Anisoprint è il processo meno impattante, dunque, più conveniente. Questo possiamo evincerlo analizzando il suo processo di stampa, infatti, esso dura 40 minuti e la macchina in questione non ha bisogno di una elaborata fase preparatoria. Al contrario, Sphercube ha dei tempi di processamento e di preparazione più lunghi rispetto a quest’ultima.

Nonostante Spherecube risulta essere più impattante di Anisoprint è importante, ai fini di una corretta e coerente valutazione, rimarcare i vantaggi in termini di performance meccaniche legate all'utilizzo dei materiali termoindurenti. L'apparecchiatura di stampa Spherecube utilizza materiali termoindurenti, a differenza di Anisoprint che utilizza materiali termoplastici; quindi, il prodotto stampato rimane inalterato e la sua forma non viene alterata dopo il processo, mentre i prodotti di Anisoprint sono riciclabili, nel senso che le loro forme possono essere modificate ridimensionando il materiale, cosa che non è possibile con Spherecube.

Infine, il processo in autoclave è di per sé più elaborato sia per il quantitativo di input sia per l'utilizzo dello stampo.

Bibliografia

- [1] P. Sandonnini, *Manifattura Additiva, Cos'è, come funziona, quali Vantaggi Offre* (12/10/2020) *Industry 4 Business*. (Online) Available at: <https://www.industry4business.it/industria-4-0/manifattura-additive-come-come-funziona-quali-vantaggi-offre/>
- [2] Viganò, P. (03/11/2019) *LCA - Life Cycle Assessment (Analisi del Ciclo Di Vita)*, *Rete Clima*. Available at: <https://www.reteclima.it/lca-life-cycle-assessment-analisi-del-ciclo-di-vita/>
- [3] *LCA: Cos'è, a cosa serve nel 2023* (2022) *2B*. Available at: <https://to-be.it/soluzioni/life-cycle-assessment/#come-vengono-utilizzati-i-risultati-di-uno-studio-di-lca>
- [4] *3D modeling software - Adobe Substance 3D modeler*. Available at: <https://www.adobe.com/products/substance3d-modeler.html>
- [5] A., N. (09/12/2022) *Guida AI Materiali per la stampa 3D: Le Plastiche, 3Dnatives*. Available at: <https://www.3dnatives.com/it/plastiche-stampa-3d-090920219/#!>
- [6] *Produzione Additiva e produzione sottrattiva a Confronto* Formlabs. Available at: <https://formlabs.com/it/blog/produzione-additiva-e-produzione-sottrattiva-a-confronto/>
- [7] Raffaele Cioffi | Ilenia Farina | Cinzia Salzano | Milena Salzano | Marta Travaglioni | Marco de Pertis | Ornella de Pertis *et al.* (2022) *Le 4 Fasi dell'Analisi del Ciclo Di Vita Con La Metodologia LCA, Ingenio*. Available at: <https://www.ingenio-web.it/articoli/lca-e-le-4-fasi-dell-analisi-del-ciclo-di-vita/>
- [8] *Analisi del Ciclo Di Vita (LCA): Cos'è e da quali fasi è composta* (2020) *Passaporto Ambientale*. Available at: <https://www.passaportoambientale.it/approfondimenti/analisi-ciclo-di-vita-lca-cos-e-quali-fasi/>
- [9] *SimaPro, il software LCA più diffuso al mondo - 2b* (2020) *SimaPro*. Available at: <https://network.simapro.com/2b/#usp>
- [10] *Global warming potential* (2023) *Wikipedia*. Wikimedia Foundation. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Global_warming_potential

- [11] *LCIA: The recipe model* (no date) RIVM. Available at: <https://www.rivm.nl/en/life-cycle-assessment-lca/recipe>
- [12] Alessio Vita, Vincenzo Castorani, Michele Germani e Marco Marconi (2019). “*Comparative life cycle assessment and cost analysis of autoclave and pressure bag molding for producing CFRP components*”. *Spring Natur (editor). Pagine(2-5)*
- [13] Rovatti, M. (2000) *Fasi di UN LCA, LCA - Fasi di un LCA*. Available at: http://www.dichep.unige.it/old_site/consulenza_ambientale/lca-fasi.htm#:~:text=L'unit%C3%A0%20funzionale%20indica%20l,uscita%20funzionale%20del%20sistema%20prodotto
- [14] Aterini, L. (2015) *Impronta ambientale, Ecco Le 4 Fasi dell'Analisi del Ciclo Di Vita (LCA) - greenreport: Economia Ecologica e Sviluppo Sostenibile, Greenreport*. Available at: <https://greenreport.it/news/comunicazione/impronta-ambientale-ecco-le-4-fasi-dellanalisi-del-ciclo-di-vita-lca/#:~:text=Uno%20studio%20di%20LCA%20deve,degli%20impatti%3B%20interpretazione%20e%20miglioramento>
- [15] LAB, 3C.R.I. (no date) *Vendita Stampanti 3D, Vendita Stampanti 3D professionali accessori e ricambi*. Available at: <https://www.stampa3cri.com/stampanti-3d>
- [16] *Anisoprint support. (2020) “Composer user manual” Pagine (7-37-38-39)*
- [17] *Analisi del Ciclo Di Vita* (2022) *Wikipedia*. Wikimedia Foundation. Available at: https://it.wikipedia.org/wiki/Analisi_del_ciclo_di_vita
- [18] Sphercube (2021) *3D Printing High Performance Composite Technology, SphereCube*. Available at: <https://sphercube.eu/>
- [19] *Studio Legale Ambiente, Tecnologia, Affari - P&S Legal Milano* (2022) *pandslegal*. Available at: <http://www.pandslegal.it/>
- [20] *Potenziale di Riscaldamento Globale* (2022) *Wikipedia*. Wikimedia Foundation. Available at: https://it.wikipedia.org/wiki/Potenziale_di_riscaldamento_globale
- [21] Redazione, L. (2020) *Home, Green.it*. Available at: <https://www.green.it/>
- [22] S.p.A., V. *Life cycle assessment, Valsir*. Available at: [https://www.valsir.it/it/lca/sostenibilita/life-cycle-assessment#:~:text=Il%20metodo%20Recipe%20%C3%A8%20uno,\)%20e%20Risorse%20](https://www.valsir.it/it/lca/sostenibilita/life-cycle-assessment#:~:text=Il%20metodo%20Recipe%20%C3%A8%20uno,)%20e%20Risorse%20)

- [23] Meschia, V. (2019) *Nanotubi di Carbonio Come l'amianto?*, *Scienza in rete*. Available at: <https://www.scienzainrete.it/articolo/nanotubi-di-carbonio-come-l%E2%80%99amianto/valentina-meschia/2017-11-19#:~:text=Il%20processo%20di%20infiammazione%20dovuto,struttura%20del%20gene%20oncosoppressore%20Cdkn2a>
- [24] *Fatti e persone che cambiano il mondo* (2023) *The Good in Town*. Available at: <http://www.thegoodintown.it/>
- [25] *Le cause dei cambiamenti climatici* (no date) *Climate Action*. Available at: https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change_it#:~:text=La%20CO2%20prodotta%20dalle,attivit%C3%A0%20umane%20in%20quantit%C3%A0%20inferiori
- [26] *Stampa 3D in metallo - tutto quello che devi sapere* (2023) *Stampa 3D forum*. Available at: <https://www.stampa3d-forum.it/articoli/guide/stampa-3d-metallo/>
- [27] Pierri, C. (2023) *Introduzione alla stampa 3D: Processo, Tecniche E Materiali, Make a Shape*. Available at: <https://www.make-shape.com/introduzione-stampa-3d/>
- [28] Tech, L. (2022) *Tutto quello che devi sapere sulla stampa 3D!*, *Dr. Dietrich Müller GmbH*. Available at: <https://www.mueller-ahlhorn.com/it/tutto-quello-che-c%27%C3%A8-da-sapere-sulla-stampa-3D/>

