



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di laurea triennale in Ingegneria Gestionale

**Valutazione degli impatti ambientali di due differenti processi
di stampa 3D di materiale metallico e composito**

**Life Cycle Assessment of two different 3D printing processes of
metallic and composite material**

Relatore:

Prof. Archimede Forcellese

Tesi di Laurea di:

Simone Taddei

Correlatore:

Prof. Alessio Vita

Anno Accademico 2021/2022

INDICE

Lista delle figure	6
Abstract	7
INTRODUZIONE	8
CAPITOLO 1 STAMPA 3D	10
1.1 Storia	10
1.2 Tecniche di stampa.....	11
1.3 Materiali utilizzati nella stampa 3D	12
1.4 Confronto con i processi tradizionali di manifattura sottrattiva.....	14
CAPITOLO 2 LIFE CYCLE ASSESSMENT	16
2.1 Introduzione all’LCA	16
2.2 Definizione dell’obiettivo e del campo di applicazione.....	17
2.2.1 Definizione dell’obiettivo.....	17
2.2.2 Confini del sistema	17
2.2.2 Unità funzionale	18
2.3 Analisi dell’inventario.....	18
2.4 Valutazione degli impatti del ciclo di vita	19
2.4.1 Categorie d’impatto	20
2.4.1.1 <i>Cumulative Energy Demand</i>	20
2.4.1.2 <i>IPCC Greenhouse Gas Emission</i>	20
2.4.1.3 <i>ReCiPe</i>	21
2.5 Interpretazione dei risultati.....	21
2.6 SimaPro	22

CAPITOLO 3 BOUND METAL DEPOSITION LIFE CYCLE ASSESSMENT	24
.....	24
3.1 Introduzione alla <i>Bound Metal Deposition</i>	24
3.2 Le fasi del processo di <i>Bound Metal Deposition</i>	24
3.3 Analisi LCA	26
3.3.1 Definizione degli obiettivi.....	26
3.3.2 Analisi dell’inventario	27
3.3.3 Valutazione degli impatti	29
3.3.3.1 <i>Cumulative Energy Demand</i>	29
3.3.3.2 <i>Global Warming Potential</i>	31
3.3.3.3 <i>ReCiPe</i>	31
3.3.4 Interpretazione dei risultati – Analisi di sensibilità.....	32
3.3.4.1 Analisi di sensibilità CED e GWP	32
3.3.4.2 Analisi di sensibilità <i>ReCiPe</i>	35
CAPITOLO 4 FUSED FILAMENT FABRICATION LIFE CYCLE ASSESSMENT	37
.....	37
4.1 Introduzione alla <i>Fused Filamen Fabrication</i>	37
4.2 <i>Roboze One+400</i>	37
4.3 Processo di stampa FFF.....	38
4.4 Analisi LCA	39
4.4.1 Definizione degli obiettivi.....	39
4.4.2 Analisi dell’inventario	41
4.4.3 Valutazione degli impatti	41
4.4.3.1 <i>Cumulative Energy Demand</i>	42
4.4.3.2 <i>Global Warming Potential</i>	43

CAPITOLO 5 CONCLUSIONI	46
Bibliografia	49
Sitografia.....	51

Lista delle figure

Figura 2.1 Fasi di un LCA	17
Figura 3.1 Stampante, debinder e fornace della Studio System	26
Figura 3.2 Confini del sistema del processo produttivo	27
Figura 3.3 Dati in input: peso della parte finale e dei materiali utilizzati.....	28
Figura 3.4 Dati in input: consumi energetici, tempi di produzione e trasporti.....	28
Figura 3.5 CED del processo di produzione delle bacchette di polvere e legante.....	30
Figura 3.6 Confronto degli impatti energetici di tutte le fasi di produzione	30
Figura 3.7 Percentuali degli impatti delle singole fasi di produzione sul totale (100%) secondo la categoria <i>ReCiPe</i>	32
Figura 3.8 Analisi di sensibilità CED	33
Figura 3.9 Analisi di sensibilità GWP	34
Figura 3.10 Analisi di sensibilità <i>ReCiPe</i>	35
Figura 4.1 Stampante Roboze One+400	38
Figura 4.2 Processo di stampa FFF.....	39
Figura 4.3 Confini del sistema del processo di stampa FFF	40
Figura 4.4 CED provini a confronto	42
Figura 4.5 Confronto <i>Cumulative Energy Demand</i> per la produzione dei due tipi di filamento	43
Figura 4.6 GWP provini a confronto	44
Figura 4.7 Confronto <i>Global Warming Potential</i> per la produzione dei due tipi di filamento	44

ABSTRACT

Negli ultimi anni è stato molto forte lo sviluppo di una tecnologia di produzione chiamata manifattura additiva o più comunemente stampa 3D. Essa consiste nella produzione di parti o componenti per aggiunta di materiale strato per strato tramite vari processi come l'estrusione di bacchette metalliche o di filamenti di materiale termoplastico. La stampa 3D permette principalmente di ridurre gli scarti dei processi di produzione e di ridurre i tempi di realizzazione delle parti. Ci sono però anche molti strumenti che permettono di analizzare gli impatti ambientali di questa tecnologia di produzione. Infatti sono stati studiati due diversi processi di stampa 3D, una che utilizza bacchette di metallo e una filamenti di materiale composito ed è stata fatta un'analisi *Life Cycle Assessment* tramite un apposito software, che ha calcolato gli impatti ambientali di alcuni pezzi stampati con le due tecnologie. L'analisi dei due tipi di stampa ha riportato che la maggior parte degli impatti è dovuta ai consumi energetici delle macchine di stampa e alla produzione dei materiali. Inoltre per la stampa di materiali termoplastici è fondamentale stabilire quali proprietà meccaniche questi materiali trasferiscono alle parti stampate per scegliere quali sono i migliori. Infine per il futuro sarebbe molto interessante proporre un'analisi che unisce gli impatti ambientali e le proprietà fisiche e meccaniche delle parti stampate per comprendere quali materiali sono i più utilizzabili in un'ottica di sostenibilità ambientale ma anche economica.

INTRODUZIONE

L'utilizzo sempre maggiore nel corso degli anni dell'*additive manufacturing*, o più comunemente chiamato stampa 3D, ha cambiato drasticamente i metodi di realizzazione dei prodotti; essa ha avuto origine dalla maggior complessità dei prodotti richiesti e dal bisogno di rendere più veloce la prototipazione e lo sviluppo di determinati prodotti, che ha coinvolto molti settori come l'aerospaziale, l'energetico, l'*automotive*, il settore medico.

Questo processo si distingue dalle tradizionali tecnologie di lavorazione sottrattive, perché non si asporta del materiale dal grezzo ma attraverso il deposito di strati di materiale si ottengono forme tridimensionali anche molto complesse, così da ridurre gli scarti presenti nelle lavorazioni tradizionali.

La stampa 3D è stata definita come una rivoluzione nella manifattura e soprattutto una grande opportunità per ottenere miglioramenti ambientali. La presenza di stampanti 3d domestiche e negozi che offrono servizi di stampa consente la riduzione della dipendenza dal trasporto e dalla logistica. Quali sono quindi i principali vantaggi che può portare la stampa 3D?

- Riduzione delle spedizioni: le continue spedizioni di prodotti portano molti mezzi a percorrere un'enorme quantità di km. La stampa 3D invece permette di produrre merci più vicino all'utente finale; è addirittura possibile produrre pezzi negli uffici o nelle proprie case.
- Riduzione degli scarti: nella produzione tradizionale una grandissima quantità dei materiali utilizzati per fabbricare parti può finire come scarto. Con la produzione additiva invece si riduce in maniera considerevole l'ammontare di scarti, con un effetto positivo su costi e sprechi.
- Utilizzo di materiali sostenibili: nel corso degli anni si stanno implementando nuove sostanze sempre più sostenibili ed ecologici da utilizzare nella stampa 3D.

- Riduzione dei consumi energetici: uno studio dei ricercatori della Michigan Technological University [1] paragona l'energia necessaria per stampare oggetti con una stampante 3D rispetto a quanto necessario per fabbricarli in una fabbrica all'estero e spedirli negli Stati Uniti. Il risultato fa notare che la stampa usa tra il 41 % e 64 % di energia in meno, seppur sia ancora incerta la mole dell'impatto energetico che la stampa 3D possa avere su larga scala.

In seguito dunque tratteremo di due tecnologie di stampa 3D, la *Bound Metal Deposition* (BMD), che stampa oggetti metallici e la *Fused Filament Fabrication* (FFF) che utilizza materiali termoplastici, e ne analizzeremo gli impatti ambientali, principalmente a livello energetico e di emissioni nell'atmosfera. Questa analisi, chiamata *Life Cycle Assessment* (LCA) riguarderà l'intero ciclo di produzione degli oggetti stampati, a partire dall'approvvigionamento delle materie prime, passando appunto per la stampa, il ciclo di vita del prodotto fino al fine vita, ossia l'eventuale riciclo del prodotto stesso o lo smaltimento.

L'analisi LCA è stata effettuata tramite un apposito software, SimaPro, che prende i dati in input riguardo ai materiali usati, il loro peso, i trasporti effettuati, le varie quantità di energia usata per i processi del sistema di produzione, e li trasforma in dati in output relativi agli impatti ambientali del ciclo di vita dei prodotti. I risultati ottenuti sono stati poi esportati dal software e raccolti nelle tabelle del foglio di calcolo "Excel" e trasformati in grafici facilmente leggibili che ci hanno permesso di capire quali sono le parti dei processi produttivi che hanno il maggior impatto ambientale e provare a capire quali materiali sono i più convenienti da utilizzare per la stampa 3D.

CAPITOLO 1

STAMPA 3D

1.1 Storia

Le tecniche di stampa 3D che ancora oggi vengono utilizzate nacquero principalmente negli anni 80, quando Chuck Hull inventò la stereolitografia, che permette di realizzare oggetti tridimensionali a partire da dati elaborati da un software CAD/CAM contenuti all'interno di un file STL ("*Standard Triangulation Language*"); essa consiste nell'indurimento di un liquido polimerico mediante una luce ultravioletta che, controllata da un computer, disegna ogni strato dell'oggetto sulla superficie liquida. Nel 1987 fu messa in commercio la prima macchina per stereolitografia.

Nello stesso periodo fu inventata la *Selective Laser Sintering* (SLS), che ha un processo simile alla stereolitografia ma utilizza un raggio laser di maggior potenza.

Successivamente fu brevettata la *Fused Deposition Modeling* (FDM), o modellazione a deposizione fusa, che non utilizza più né laser né polvere ma materiali plastici. Un estrusore scioglie un filamento termoplastico e, guidato in direzione orizzontale o verticale da un meccanismo a controllo numerico, deposita il materiale sul piano di stampa per creare l'oggetto.

Circa nella metà degli anni 90 ci fu una grande scoperta perché la tecnologia permise di fondere polveri metalliche ottenendo così oggetti di densità simile a quelli ottenuti dall'industria tradizionale.

Nei primi anni 2000 venne inventata l'*Electron Beam Melting*, una tecnologia il cui funzionamento si basa sull'uso di un fascio di elettroni che colpisce sottili strati di polvere metallica e li fonde garantendo una densità ancora maggiore di quella ottenibile con la tecnologia SLS [2].

Per quanto riguarda la possibilità di avere modelli 3D da trasmettere alla stampante, già negli anni 70 esisteva un software che permetteva ai progettisti di disegnare modelli 3D al computer, però il software CAD 3D fu una vera e propria rivoluzione anche se all'inizio era molto costoso e complesso e il suo utilizzo fu ristretto all'industria spaziale e automobilistica. Tra gli anni '90 e i primi anni 2000 diverse aziende iniziarono a sperimentare la manifattura additiva e i software CAD 3D divennero disponibili per un pubblico più ampio; nel 2006 fu messa in commercio la prima stampante 3D ad uso hobbistico [3].

1.2 Tecniche di stampa 3D

I diversi tipi di tecnologie di stampa 3D si distinguono principalmente per la tecnica con cui vengono stampati gli oggetti e per i materiali usati. Alcune tecnologie usano materiali fondibili o che si ammorbidiscono col calore per produrre gli strati, o altre che utilizzano materiali liquidi che vengono fatti indurire.

Generalmente, i fattori principali presi in considerazione nella scelta della tecnica di stampa sono la velocità, il costo del prototipo stampato, il costo della stampante 3D, la scelta dei materiali ecc.

I due metodi di stampa che tratteremo nei prossimi capitoli sono il *Bound Metal Deposition* e il *Fused Filament Fabrication*.

BDM è un processo di stampa 3D basato sull'estrusione di metalli in cui i componenti vengono costruiti attraverso la deposizione di una polvere metallica tenuta insieme da un legante polimerico. Dopo la fase di stampa, il legante viene rimosso mediante un solvente tramite il processo di *debinding* e quindi il pezzo viene sinterizzato in un forno [4].

FFF invece utilizza una bobina di filamenti che funge da materiale di stampa; il filamento viene spinto e fuso in un estrusore della stampante, che deposita il materiale strato per strato su una lastra. Tra i materiali più conosciuti per la tecnologia di stampa FFF ci sono il PLA di origine naturale, l'ABS utilizzato in

moltissimi settori, il Nylon, ma anche tutta una nuova linea di materiali ad alta tecnologia come l'Ultem, il PEEK e altri materiali caricati con fibre di carbonio, fibre di vetro e titanio [5].

Esistono però tante altre tecniche di stampa, e la più usata nell'industria è la SLS: esso si basa sulla fusione di un materiale in polvere. Si fondono delle particelle di polvere metallica utilizzando un laser ad alta potenza. La polvere non fusa sostiene il pezzo durante la stampa, eliminando la necessità di supporti speciali. Per questo motivo il processo SLS è ideale per pezzi con geometrie complesse, soprattutto quando hanno dettagli interni o pareti sottili. I pezzi prodotti tramite SLS hanno ottime proprietà meccaniche e ottima resistenza.

Anche la stereolitografia (SLA) è uno dei processi più utilizzati. Utilizzando un laser si trasforma una resina liquida in plastica solida tramite il processo di fotopolimerizzazione. Tra tutte le tecnologie di stampa 3D, la stereolitografia è quella che produce pezzi con la massima risoluzione e precisione, i dettagli più fini e un'eccellente finitura superficiale [6].

1.3 Materiali utilizzati nella stampa 3D

Esistono tantissimi tipi di materiali che si possono usare nella stampa 3D e ovviamente l'utilizzo di uno piuttosto che di un altro dipende dal tipo di stampa che si vuole effettuare e dal tipo di utilizzo del prodotto che si stampa in quanto ogni materiale ha delle proprietà specifiche differenti. Prima di essere utilizzati per la stampa i materiali possono presentarsi in diversi stati: polveri da sinterizzare, fondere o da legare chimicamente, possono essere solidi o semisolidi da incollare, oppure possono essere liquidi da solidificare tramite reazioni chimiche.

I materiali metallici lavorabili tramite additive manufacturing sono ancora pochi, perché possono presentare delle microfratture interne durante il processo di stampa dovute alla fusione prima e alla rapida solidificazione poi. Però grazie a opportuni parametri di lavorazione e trattamenti termici si possono ottenere parti metalliche con densità vicina al 100%. I materiali metallici più utilizzati sono: leghe cobalto-cromo,

leghe di nichel, alluminio, acciaio, leghe di titanio. Queste leghe possono essere lavorate sottoforma di filamenti metallici o in particolar modo sottoforma di polvere metallica. Proprio le polveri metalliche sono utilizzate nella *Bound Metal Deposition*; queste polveri devono avere delle proprietà ben specifiche per essere idonee al processo di stampa: prive di contaminazioni da impurità, buona scorrevolezza, bassa rugosità superficiale, basso attrito tra le particelle [6].

I materiali polimerici sono quelli che hanno la più grande varietà nella stampa 3D. Ci sono due tipi di polimeri: termoplastici, che mantengono le loro proprietà anche ad elevate temperature e sono rifondibili, e termoindurenti, che invece non sono rifondibili. Entrambe sono caratterizzate da proprietà come la resistenza agli agenti chimici, durabilità e leggerezza.

I termoplastici sono più utilizzati per via dei costi inferiori sia per l'acquisto sia per le tecnologie di stampa; i più diffusi sono l'Acido Polilattico (PLA), Poliammide (PA), Nylon, Acrilnitrile-Butadiene-Stirene (ABS), polietilene ad alta densità (HDPE), alcool polivinilico (PVA), capoliestere di polietilene tereftalato (PETG), polietere etere chetone (PEEK) [5].

Un'altra classe di materiali che si utilizzano sempre più spesso *nell'additive manufacturing* sono i materiali compositi. Essi sono composti generalmente da due tipologie di materiali differenti, una matrice e un rinforzo. Il polimero più utilizzato nella stampa 3D è la Poliammide, che viene rinforzata con diversi tipi di fibre come quelle di vetro, alluminio e carbonio per migliorare le proprietà come la resistenza a trazione, durezza e rigidità. Il materiale composito che vede il più largo utilizzo è il filamento CF PA-12 [7], una matrice poliammide 12 caricata con fibre di carbonio: tale materiale consente lo stampaggio di componenti altamente resistenti e caratterizzati da alti valori di rigidità e resistenza allo strappo.

Nella stampa con tecnologia FFF di cui parleremo nei prossimi capitoli sono stati utilizzati due tipi di materiali compositi: PLA rinforzato con fibre di canapa e Poliammide rinforzato con fibre di vetro.

1.4 Confronto con i processi tradizionali di manifattura sottrattiva

Il processo di stampa 3D si contrappone ai tradizionali processi di produzione che avvengono per sottrazione di materiale. Alcune differenze tra le due famiglie di tecnologie sono rappresentate da [8]:

- I tipi di geometrie realizzabili: con la manifattura tradizionale ci sono dei limiti a queste mentre con la stampa 3D si possono realizzare parti più flessibili e complesse;
- Obiettivi di produzione: in quanto la manifattura sottrattiva ha come obiettivo la produzione di massa, mentre la stampa 3D la produzione customizzata, cioè la produzione di beni e servizi orientata a soddisfare i bisogni individuali dei clienti e contemporaneamente preservare i bassi costi di produzione e quindi prezzi di vendita contenuti;
- Nella stampa 3D il tempo del ciclo di produzione è ridotto e anche parti complesse possono essere realizzate in poche ore, mentre l'intero ciclo, includendo anche la post-produzione, può durare pochi giorni o settimane a differenza dei processi sottrattivi che possono richiedere anche diversi mesi;
- I costi dei processi: più è complesso l'oggetto da realizzare più i costi della manifattura additiva eguagliano quelli della manifattura sottrattiva; se però l'oggetto è molto complesso, l'*additive manufacturing* ha costi ridotti perché non richiede lunghe lavorazioni meccaniche e di assemblaggio dei componenti;
- Nei processi additivi l'intervento da parte dell'operatore è ridotto al minimo;
- L'*additive manufacturing* permette un minimo scarto e la possibilità di riciclo del materiale;
- Normalmente i processi additivi permettono una riduzione del consumo energetico;
- Nella stampa 3D sono utilizzabili materiali innovativi e più efficienti.

La stampa 3D è ideale per produrre rapidamente quando è richiesta una produzione di piccoli lotti o tempi di consegna brevi, inoltre permette di ridurre il *time to market* accelerando la fase di prototipazione; inoltre permette di ridurre i costi della fase di sviluppo del prodotto.

Nonostante le differenze presenti tra la manifattura additiva e quella sottrattiva, esse spesso vengono utilizzate insieme in diversi stadi dello sviluppo e della produzione. Ad esempio la prototipazione si basa su strumenti sia additivi che sottrattivi: generalmente i prototipi sono più veloci ed economici da realizzare con la produzione additiva, mentre nelle fasi più avanzate dei processi di sviluppo che richiedono lotti più grandi, la produzione sottrattiva è più competitiva.

CAPITOLO 2

LYFE CICLE ASSESSMENT

2.1 Introduzione all'LCA

Nel corso degli anni è diventato sempre più importante riuscire a studiare e analizzare gli impatti che i prodotti fabbricati hanno sull'ambiente e i consumi legati ad essi. Così è aumentato l'interesse verso lo sviluppo di metodi per comprendere meglio tali impatti e ridurli; una di queste tecniche è la valutazione del ciclo di vita (LCA – *Lyfe Cycle Assessment*). Essa può essere utilizzata per identificare le opportunità di migliorare la prestazione ambientale dei prodotti nei diversi stadi del loro ciclo di vita, per fornire informazioni a chi prende decisioni nell'industria come chi si occupa di pianificazione strategica o progettazione, per decidere indicatori di prestazione ambientale con le relative tecniche di misurazione, e inoltre può aggiungere valore percepito al prodotto finito grazie a politiche di marketing che mostrino l'ecosostenibilità dei processi e dell'azienda. I principi di esecuzione dell'LCA sono descritti dalle normative UNI EN ISO 14040 e 14044 [9, 10]. L'LCA studia gli impatti ambientali lungo tutto il ciclo di vita di un prodotto dall'acquisizione delle materie prime fino allo smaltimento finale.

Essa prevede quattro fasi:

- Definizione degli obiettivi: definire e descrivere il prodotto, il processo o l'attività analizzata. Stabilire il contesto in cui deve essere effettuata la valutazione e identificare i confini e gli effetti ambientali da considerare ai fini della valutazione;
- Analisi dell'inventario (*Lyfe Cycle Inventory* - LCI): si analizzano i dati in input e output relativi al sistema da studiare. Implica la raccolta dei dati necessari per raggiungere gli obiettivi;
- Valutazione degli impatti (*Lyfe Cycle Impact Assessment* - LCIA): fornisce informazioni per valutare i risultati della fase precedente in modo da comprenderli meglio;

- Interpretazione dei risultati: i risultati delle prime 3 fasi vengono riepilogati e discussi per poi giungere a conclusioni e decisioni.

Il legame tra le quattro fasi è rappresentato nella Figura 2.1.

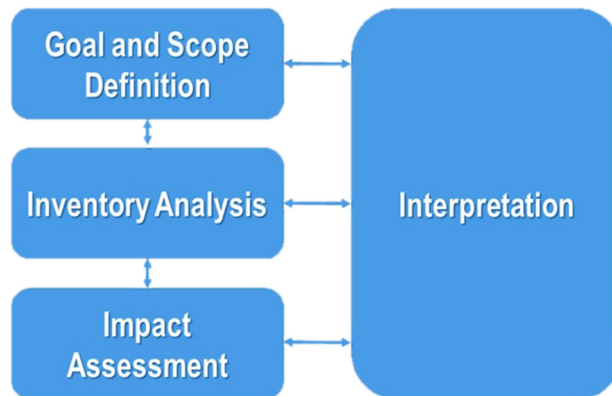


Figura 2.1: Fasi di un LCA

2.2 Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione

La definizione degli obiettivi è la fase iniziale dell'LCA e definisce lo scopo e il metodo di analisi degli impatti ambientali del ciclo di vita nel processo decisionale. È necessario descrivere l'applicazione prevista e le motivazioni dello studio come ad esempio le emissioni di CO₂ o la creazione di linee guida per migliorare i processi produttivi.

2.2.1 Definizione dell'obiettivo

Gli obiettivi dell'analisi devono essere fissati e inoltre devono essere indicati i clienti e i gruppi target. Quando si comunicano i risultati bisogna chiarire per quali obiettivi l'LCA è adatta e per quali non lo è.

2.2.2 Confini del sistema

Il limite del sistema deve essere determinato in base agli obiettivi definiti. Bisogna considerare i mezzi disponibili, l'arco temporale e le disponibilità dei dati necessari.

Il confine del sistema segna l'interfaccia tra l'ambiente e altri sistemi di produzione e definisce quali procedure sono incluse o escluse dall'analisi. È fondamentale definire dei criteri di separazione, come ad esempio criteri di massa o energetici, per ridurre la portata e la complessità del quadro dell'indagine.

2.2.3 Unità funzionale

Le unità funzionali dei sistemi esaminati devono essere chiaramente definite. Essa rappresenta la prestazione quantificata di un sistema di prodotto da utilizzare come unità di riferimento.

2.3 Analisi dell'inventario

È un processo di quantificazione del fabbisogno energetico, di materie prime, di emissioni nell'atmosfera, di rifiuti solidi e altre emissioni per l'intero ciclo di vita di un prodotto. Le analisi dell'inventario sono molto utili per aiutare un'organizzazione a confrontare prodotti o processi considerando fattori ambientali o possono essere usate nel processo decisionale. Uno strumento importante per l'analisi dell'inventario è il diagramma di flusso, che serve per mappare gli ingressi e le uscite in un processo o sistema; più è complesso e maggiore è la precisione e l'utilità dei risultati anche se la complessità comporta più tempo e risorse da dedicare alla raccolta e analisi dei dati.

Bisogna inoltre elaborare un piano di raccolta dati. Quando si selezionano le fonti dei dati per completare l'inventario del ciclo di vita, un piano di raccolta dei dati LCI assicura che la qualità e l'accuratezza dei dati soddisfino le aspettative dei decisori. Gli elementi chiave di un piano di raccolta dei dati sono i seguenti: definizione degli obiettivi di qualità dei dati, identificazione delle fonti e dei tipi di dati, identificazione degli indicatori di qualità dei dati, e sviluppo di un foglio di lavoro per la raccolta dei dati e una lista di controllo.

Le attività di raccolta dei dati comportano una combinazione di ricerca, visite in loco e contatti diretti con esperti, che generano grandi quantità di dati. Tutti i processi industriali hanno flussi di input multipli e possono generare flussi di output multipli.

Infine bisogna valutare e riferire i risultati. Quando si redige un rapporto per presentare i risultati finali dell'inventario del ciclo di vita, è importante descrivere dettagliatamente la metodologia utilizzata nell'analisi. Il rapporto dovrebbe definire esplicitamente i sistemi analizzati e i confini che sono stati definiti. Tutte le ipotesi formulate nell'effettuare l'inventario devono essere spiegate chiaramente. Dovrebbe essere fornita la base per il confronto tra i sistemi e spiegati tutti i rapporti di equivalenza utilizzati.

2.4 Valutazione degli impatti del ciclo di vita

La fase di valutazione degli impatti del ciclo di vita è la valutazione dei potenziali impatti sulla salute umana e sull'ambiente, delle risorse e delle emissioni ambientali associate al sistema considerato. Questi effetti, quantificati tramite opportuni indicatori, sono calcolati a partire dagli input e output del sistema.

Questa fase si compone delle seguenti fasi:

- 1) Selezione e definizione delle categorie di impatto, ad esempio l'energia richiesta (*Cumulative Energy Demand*), cambiamento climatico (*Global Warming*), o l'esaurimento delle risorse naturali (*Resource Depletion*).
- 2) Classificazione: i dati di inventario sono associati alle varie categorie d'impatto.
- 3) Caratterizzazione: mira a quantificare il valore degli indicatori ambientali. L'impatto di ogni consumo è calcolato moltiplicando la quantità consumata o emessa per il rispettivo fattore di valutazione dell'impatto (o di caratterizzazione) relativo a ciascuna categoria di impatto. L'accuratezza dei risultati dipende dall'accuratezza delle fasi precedenti.

- 4) Normalizzazione: consente una più facile interpretazione dei punteggi d'impatto di un LCIA, che spesso sono indicati da unità di misure come kg CO₂ equivalenti. Consiste nel dividere i punteggi per punteggi di riferimento, come l'emissione annuale e l'uso di risorse di una persona media.
- 5) Raggruppamento: Il raggruppamento delle categorie di impatto in uno o più gruppi serve per facilitare l'interpretazione dei risultati in settori specifici. In genere, il raggruppamento comprende indicatori di ordinamento o classificazione.
- 6) Ponderazione: le diverse categorie d'impatto sono ponderate l'una rispetto all'altra. Tutti i risultati possono essere aggregati in un unico punteggio per l'impatto ambientale totale.

2.4.1 Categorie d'impatto

La scelta delle categorie d'impatto e degli indicatori è di fondamentale importanza per ottenere risultati chiari da gestire e comunicare. Il software SimaPro offre un'ampia scelta di metodi da utilizzare e alcuni di essi sono descritti di seguito.

2.4.1.1 Cumulative Energy Demand - CED

Comprende il consumo di tutti i processi compresi nei confini del sistema; è espresso in megajoule (MJ) ed è la somma della domanda di energia fossile, nucleare, eolica, idroelettrica e solare utilizzata durante le fasi del ciclo di vita.

2.4.1.2 IPCC Greenhouse Gas Emission

Il potenziale di riscaldamento globale (*Global Warming Potential - GWP*) viene utilizzato per quantificare le emissioni di gas serra nell'atmosfera e il loro effetto sul riscaldamento globale e sui cambiamenti climatici. Considera il calore assorbito da qualsiasi gas serra come multiplo del calore che verrebbe assorbito dalla stessa massa di CO₂ e ne valuta gli effetti nel corso degli anni. Solitamente si prendono in considerazione periodi di 20, 50 o 100 anni.

2.4.1.3 ReCiPe

Fornisce un metodo per calcolare gli indicatori della categoria d'impatto del ciclo di vita. Si distingue in due tipi a seconda che le emissioni di sostanze pericolose e il consumo di risorse naturali siano convertite mediante indicatori di impatto intermedio (*midpoint*) o finale (*endpoint*). A livello intermedio sono presenti diciotto categorie d'impatto e si concentrano su problemi ambientali. La maggior parte di queste categorie vengono aggregate in tre categorie di endpoint:

- 1) Danno sulla salute umana.
- 2) Danno alla diversità degli ecosistemi.
- 3) Danno alla disponibilità delle risorse.

L'aggregazione rende i risultati più facili da interpretare ma aumenta la loro incertezza.

2.5 Interpretazione dei risultati

Nell'ultima fase si identificano, quantificano e valutano le informazioni derivanti dalle fasi precedenti. Vengono quindi elaborate conclusioni per orientare il processo decisionale. A seconda della necessità dello studio, la verifica dei risultati può essere effettuata considerando 3 differenti aspetti:

- Verifica della completezza: verificare la completezza dello studio, in modo che le problematiche ambientali significative precedentemente identificate rappresentino le informazioni delle diverse fasi dell'LCA in modo adeguato in funzione dell'obiettivo e del campo di applicazione definito.
- Analisi di sensibilità: verificare se i risultati finali e le conclusioni sono influenzati da incertezze nei dati o nei metodi di valutazione selezionati. Lo scopo del controllo della sensibilità è quindi quello di stabilire il grado di fiducia ottenuto nei risultati dello studio rispetto all' obiettivo generale. Questo controllo

è utilizzato principalmente per testare le ipotesi fatte durante lo studio. L'analisi di sensibilità può essere effettuata facendo una sorta di scenario ipotetico, in cui il valore dei diversi parametri di ingresso viene modificato sistematicamente. Questo può essere fatto anche utilizzando delle simulazioni.

- Controllo di coerenza: valutare la coerenza dei metodi, delle procedure e del trattamento dei dati utilizzati durante lo studio e verificare la loro coerenza con l'obiettivo e la portata dello studio. Le voci che possono essere sottoposte al controllo di coerenza sono: fonte dei dati, accuratezza dei dati, rappresentazione geografica, limiti e ipotesi del sistema.

2.6 SimaPro

SimaPro è uno strumento professionale che permette di raccogliere, analizzare e monitorare gli impatti ambientali di prodotti e servizi. Con SimaPro è possibile modellare e analizzare cicli di vita anche molto complessi in modo chiaro e sistematico, seguendo le norme ISO 14040-14044. Quest software viene utilizzato da aziende, università e istituti di ricerca in oltre 80 paesi nel mondo. Esso permette di:

- svolgere studi di *Life Cycle Assessment*(LCA);
- svolgere calcoli per l'ottenimento della Dichiarazione ambientale di prodotto (EPD);
- calcolare il *carbon footprint* e il *water footprint* a livello di prodotto e aziendale;
- sviluppare attività di comunicazione ambientale basate su dati dimostrabili;
- supportare attività di *eco-design* e di sviluppo del prodotto;
- avviare politiche di *green procurement*.

Le caratteristiche principali di SimaPro sono:

- La possibilità di scegliere tra diversi pacchetti a seconda delle esigenze dell'utente;

- Interfaccia utente intuitiva conforme alla normativa ISO 14040;
- Modellazione parametrizzata con analisi di scenario che consente di eseguire analisi di sensibilità e definire relazioni non lineari tra i diversi parametri;
- Collegamento diretto a *database* Excel o ASP;
- Calcoli diretti della valutazione dell'impatto da ogni fase del modello;
- Risultati disponibili in grafici e tabelle.

SimaPro include molti database di inventario che includono migliaia di processi e materiali. Alcuni di essi sono:

- *Ecoinvent 3*: è incluso di default nel *software* ed è il *database* LCI più grande. Comprende migliaia di set di dati LCI nei settori della fornitura di energia, agricoltura, trasporti, elettronica, materiali da costruzione, trattamento dei rifiuti e tanti altri;
- *Agri-footprint*: è un database completamente incentrato sui prodotti agricoli; fornisce informazioni sui metodi di produzione per l'industria chimica ed energetica;
- *US Life Cycle Inventory Database*: considera i flussi di energia e materiali associati ai sistemi di produzione negli Stati Uniti;
- *ELCD (European Life Cycle Database)*: contiene dati sulla produzione industriale e di energia, trasporti e processi di fine vita.

CAPITOLO 3

BOUND METAL DEPOSITION LIFE CYCLE ASSESSMENT

3.1 Introduzione alla *Bound Metal Deposition*

La *Bound Metal Deposition* (BMD) è una tecnologia di *additive manufacturing* basata sull'estrusione di una bacchetta composta da polvere metallica tenuta insieme da un legante polimerico; la bacchetta viene scaldata ed estrusa su una piastra di costruzione (*build plate*), modellando una parte strato per strato. Dopo la stampa il materiale viene rimosso tramite il processo di debinding e poi sinterizzato in un forno permettendo alle particelle di metallo di addensarsi. Il pezzo stampato è chiamato "parte verde". Le tecnologie di stampa di materiali metallici comprendono anche quelle che utilizzano la fusione di polvere o materiale tramite laser o fasci di elettroni, ma queste sono più complesse e richiedono maggiori lavorazioni. Quindi la tecnologia BMD, sviluppata dalla *Studio System*, si distingue dalle altre perché non utilizza laser o fasci di elettroni e inoltre la rimozione dei supporti con cui sono stampate le parti, è più semplice in quanto le parti sono separate dagli stessi supporti da un'interfaccia di ceramica.

3.2 Le fasi del processo di *Bound Metal Deposition*

Il processo di BMD è composto dalle seguenti fasi:

- Stampa: si utilizzano delle bacchette metalliche rilegate composte da polvere metallica e legante polimerico. Il sistema riscalda ed estrude il materiale strato su strato seguendo le geometrie di un modello virtuale. La camera di costruzione ha delle dimensioni di 30x20x20 cm. Grazie alle barrette metalliche si evita l'utilizzo di polveri e di fonti di energia ad alta intensità, come laser o torce al plasma. La macchina di stampa è stata progettata per permettere il cambio rapido dei materiali senza interruzione dei processi di stampa e senza rischi di contaminazioni tramite cartucce

intercambiabili. La stampante è attrezzata con due estrusori: uno serve per lo stampaggio del materiale metallico, l'altro estrude un materiale ceramico che viene interposto tra i supporti e il pezzo. Alla fine del processo di stampa si ottiene la cosiddetta "parte verde".

- *Debinding* o deceraggio: consiste nell'eliminazione del legante dalla parte stampata. Il processo avviene in una apposita macchina riempita con un solvente che sommerge il pezzo stampato, penetra all'interno delle porosità e dissolve il legante polimerico. Il solvente viene successivamente rimosso dalla macchina in modo automatico e viene effettuato un ciclo di riscaldamento fino a 200-600 °C per asciugare la parte e eliminare il polimero residuo. Il tempo necessario per questa fase è solitamente compreso tra 9 e 72 ore. Una completa rimozione del binder è importante per garantire delle buone proprietà metallurgiche al pezzo; inoltre, un processo di *debinding* non corretto può portare a difetti della parte.
- Sinterizzazione: è la terza fase del processo e avviene in una fornace con un gas inerte in pressione. La parte aumenta in densità fino al 96-99% e le porosità si riducono con un aumento delle proprietà meccaniche del pezzo stampato. La temperatura massima di riscaldamento è di circa 1400°C. Con il processo di sinterizzazione si ottiene una parte dalla quale vanno rimossi i supporti ed effettuate eventuali post lavorazioni.

Le tre macchine di stampa, *debinding* e sinterizzazione sono rappresentate nella Figura 3.1.



Figura3.1: Stampante, debinder e fornace della Studio System

3.3 Analisi LCA

Abbiamo dunque effettuato una analisi LCA relativa agli impatti ambientali del processo di produzione di un pezzo metallico stampato tramite BMD. Di seguito saranno descritte le fasi dell'analisi.

3.3.1 Definizione degli obiettivi

L'obiettivo dell'analisi è quella di valutare gli impatti ambientali di tutti i processi produttivi del pezzo metallico, a partire dall'acquisizione delle materie prime fino ad arrivare allo smaltimento del pezzo stesso.

L'unità funzionale è un componente di acciaio inossidabile 17-4 PH con un peso finale di 260,4 grammi.

Nella figura sono rappresentati i confini del sistema del processo produttivo.

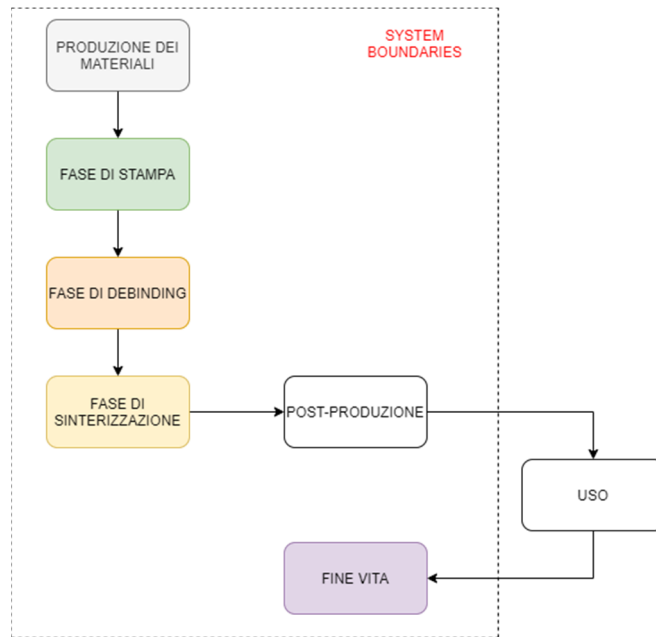


Figura 3.2: Confini del sistema del processo produttivo

La fase di produzione dei materiali in figura comprende i consumi energetici, di risorse e i trasporti per la produzione del legante polimerico [11], della polvere metallica [12], e dell’acetone [13]. Questi consumi sono compresi anche nella fase di stampa, *debinding* e sinterizzazione. La fase di post-produzione è la fase in cui si lavora il pezzo stampato per renderlo pronto all’uso. Infine la fase di fine vita prevede lo smaltimento o il riciclaggio del pezzo.

I *database* di dati selezionati su SimaPro sono stati *Agri-footprint*, *Ecoinvent 3*, *ELCD*, *Methods* e *USLCI*.

3.3.2 Analisi dell’inventario

In questa fase sono stati inseriti nella sezione “Inventario” del *software* i parametri, cioè i dati in *input* indicanti il peso dei materiali utilizzati, i vari consumi di energia richiesti e i trasporti. I dati relativi al peso della parte finale e dei materiali, rappresentati in Figura 3.3, sono stati presi da misurazioni dirette effettuate.

Item		Quantity	
Input materials			
Part final weight		Material	
Bound metal rods		17-4 PH stainless steel	260,40 g
Support material		Metal powder and binder	331,31 g
Ceramic		Metal powder and binder	60,22 g
Steel		Ceramic interface	0,62 g
Binder	(percentage on rods)	17-4 PH stainless steel	331,21 g
Solvent debinding	[1]	Polypropylene	13,09 g (~ 4%)
Argon		Acetone	45 g

Figura 3.3: Dati in input: peso della parte finale e dei materiali utilizzati

Invece i dati dei consumi energetici dei processi di stampa, *debinding* e sinterizzazione e dei processi di produzione delle bacchette di metallo, cioè l'estrusione e l'atomizzazione, rappresentati in Figura 3.4, sono stati presi dalle schede tecniche della stampante della *Desktop Metal*. Nella figura vediamo anche i tempi necessari alla stampa, *debinding* e sinterizzazione e i trasporti relativi alle bacchette di metallo.

Electric energy consumption			
Gas atomisation	[2]	Energy consumption	2,7 MJ/kg
Estrusion	[?]		
Printing			1500 W
Debinding		Machines nominal power	2000 W
Sintering		CATALOGO	6240 W
Time			
Printing			14 h 14 min
Debinding		Hours and minutes	45 h 18 min
Sintering			41 h 19 min
Transportation			
		Transportation typology	
Bound metal rods		Transpoceanic ship	11000 km
		Transport truck 16-32 ton	150 km

Figura 3.4: Dati in input: consumi energetici, tempi di produzione e trasporti.

In seguito questi parametri sono stati inseriti nella sezione “Fasi del prodotto” che comprendono:

- Assemblaggio, ossia la produzione dei materiali, stampa, *debinding* e sinterizzazione;
- Ciclo di vita;
- Scenario di fine vita, che nel nostro caso comprende il riciclo dell'acciaio.

3.3.3 Valutazione degli impatti

Per valutare gli impatti dei processi produttivi sono stati presi i dati in output forniti da SimaPro e esportati sul foglio di calcolo Excel e raggruppati in dei grafici di facile interpretazione. Sono state scelte le seguenti categorie d'impatto: *Cumulative Energy Demand* (CED), cioè l'energia totale richiesta per i vari processi, *Global Warming Potential* (GWP), ossia il potenziale di riscaldamento globale con un periodo di tempo di 100 anni, *ReCiPe Midpoint* e *ReCiPe Endpoint*, cioè gli impatti sulla salute umana, gli ecosistemi e le risorse.

3.3.3.1 Cumulative Energy Demand

Analizziamo dunque i consumi energetici delle quattro fasi di produzione. Analizzando le fasi di stampa, *debinding* e sinterizzazione è venuto fuori che più del 90% dell'energia che consumano derivano dall'elettricità usata per far funzionare i macchinari e il restante dalla produzione di solvente per il *debinding* e gas inerte per la sinterizzazione e dai trasporti. Più interessante è invece vedere l'impatto della produzione delle bacchette di metallo (Figura 3.5) perché l'energia consumata deriva principalmente dalla produzione della polvere di acciaio inossidabile 17-4 PH (24,74 MJ su 31,21 totali).

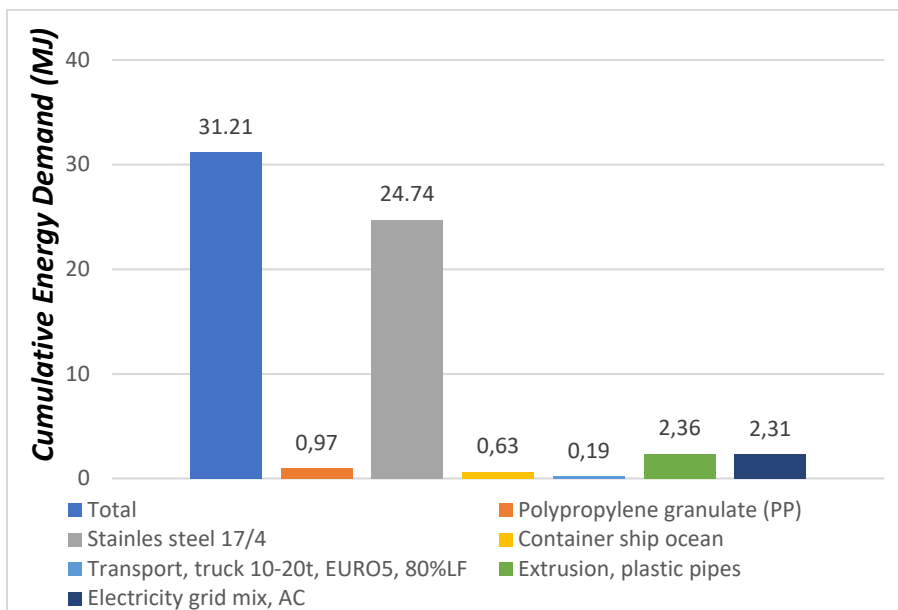


Figura 3.5: CED del processo di produzione delle bacchette di polvere e legante

Se invece mettiamo a confronto gli impatti di tutti i processi, quindi le quattro fasi di produzione e anche il riciclo dell'acciaio nella fase di fine vita, in uno stesso grafico otteniamo il grafico di Figura 3.6.

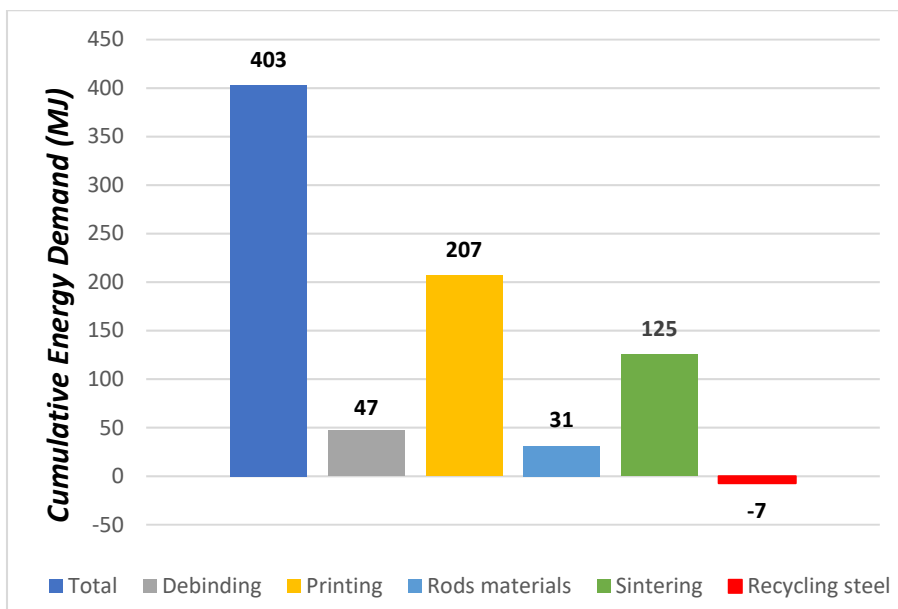


Figura 3.6: Confronto degli impatti energetici di tutte le fasi di produzione

Su un totale di 403 MJ di energia richiesta per tutti i processi, le fasi che ne richiedono di più sono la fase di stampa con 207 MJ e di sinterizzazione con 125 MJ. Meno energia invece richiedono gli altri processi.

La cosa interessante da notare è che la voce “*Recycling steel*”, cioè il riciclo dell'acciaio ha una valenza negativa, cioè c'è una sorta di “guadagno” di energia. In altre parole il riciclo dell'acciaio permette un piccolo risparmio sul consumo di energia nel processo di produzione della parte.

3.3.3.2 *Global Warming Potential*

L'unità di misura per questa categoria d'impatto è kg CO₂ eq. (chilogrammi di CO₂ equivalente) che esprime l'impatto sul riscaldamento globale di una certa quantità di gas serra rispetto alla stessa quantità di anidride carbonica (CO₂).

I risultati ottenuti sono molto simili a quelli della categoria precedente: nella fase di produzione delle bacchette di metallo la maggior parte delle emissioni è dovuta alla produzione della polvere di acciaio inossidabile; per i processi di stampa, *debinding* e sinterizzazione le emissioni sono dovute quasi esclusivamente all'elettricità consumata dalle macchine durante i processi.

Se invece mettiamo a paragone i quattro processi come fatto per la categoria CED, otteniamo che su un totale di 22,8 kg CO₂ eq., il 47% quindi 12 kg CO₂ eq., sono dovuti al processo di stampa e il 29% cioè 7,2 kg CO₂ eq. al processo di sinterizzazione. I processi di *debinding* e di produzione delle bacchette metalliche hanno un impatto minore. Inoltre anche in questa categoria l'impatto del riciclo di acciaio è negativo, cioè c'è un “guadagno” sulle emissioni dei processi di produzione.

3.3.3.3 *ReCiPe*

Per il metodo ReCiPe abbiamo analizzato solo i dati relativi all'endpoint, poiché raggruppa in maniera migliore i dati, essendo diviso solo in tre categorie. L'unità di misura è il milli-Point (mPt).

La Figura 3.7 rappresenta, su un totale di 679 mPt di impatto ambientale di categoria ReCiPe, quanto ogni singola fase di produzione contribuisce.

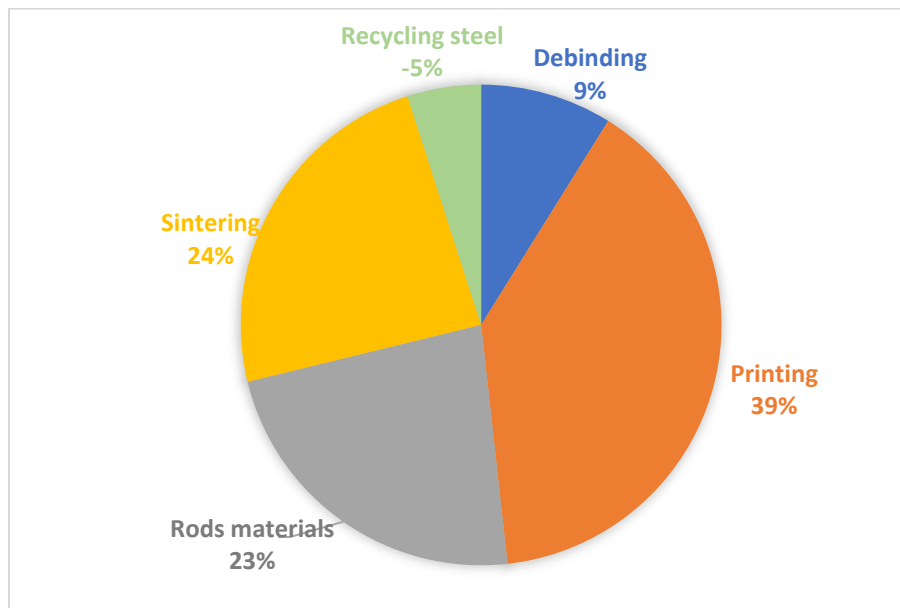


Figura 3.7: Percentuali degli impatti delle singole fasi di produzione secondo la categoria ReCiPe

I risultati ottenuti sono differenti rispetto alle categorie CED e GWP. Diminuisce l'impatto della fase di stampa al 39% (297 mPt) e leggermente anche quello della sinterizzazione al 24% (180 mPt) mentre aumenta sensibilmente quello della fase di produzione delle bacchette al 23% (173 mPt), che è dovuto alla fase di produzione dell'acciaio inossidabile che nel metodo ReCiPe ha impatto molto maggiore rispetto a CED e GWP e che rappresenta circa il 90% dell'impatto totale della fase di produzione delle bacchette.

3.3.4 Interpretazione dei risultati – Analisi di sensibilità

Nell'ultima fase dell'analisi LCA abbiamo effettuato un'analisi di sensibilità sui risultati ottenuti precedentemente che ne verifica la coerenza e la stabilità. Consiste nel far variare dal -100% al +100% i valori degli impatti di ogni fase di produzione e poi calcolare l'influenza di questa variazione sull'impatto totale dei processi.

3.3.4.1 Analisi di sensibilità CED e GWP

Le analisi di sensibilità delle due categorie d'impatto CED e GWP sono rappresentate dalle figure 3.8 e 3.9. Nella figura 3.8 l'asse verticale rappresenta

l'energia richiesta (in MJ) mentre l'asse orizzontale la variazione in percentuale. Le cinque rette rappresentano la variazione degli impatti delle varie fasi di produzione lungo l'asse orizzontale, quindi partendo dal -100% di variazione andando verso destra nel grafico varia l'energia richiesta. Ogni retta ha pendenza differente; la pendenza rappresenta la stabilità dei dati: maggiore è la pendenza della retta e maggiore è l'incertezza del dato.

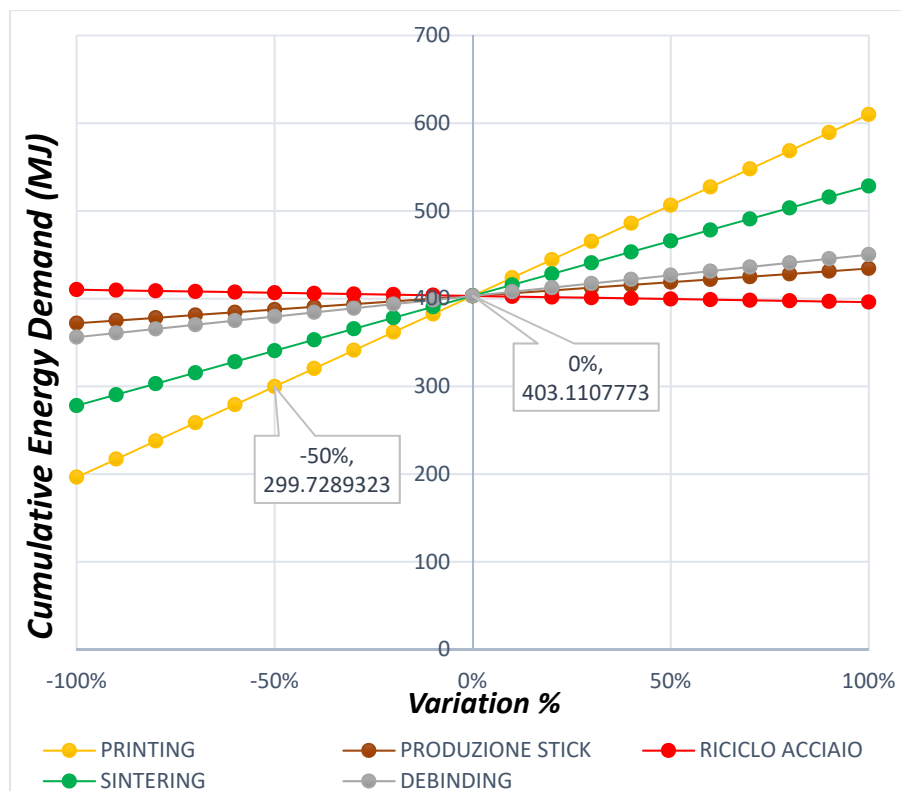


Figura 3.8: Analisi di sensibilità CED

Il grafico della Figura 3.9 è strutturato allo stesso modo del precedente, a variare è solo l'asse verticale che rappresenta i kg di CO₂ equivalenti.

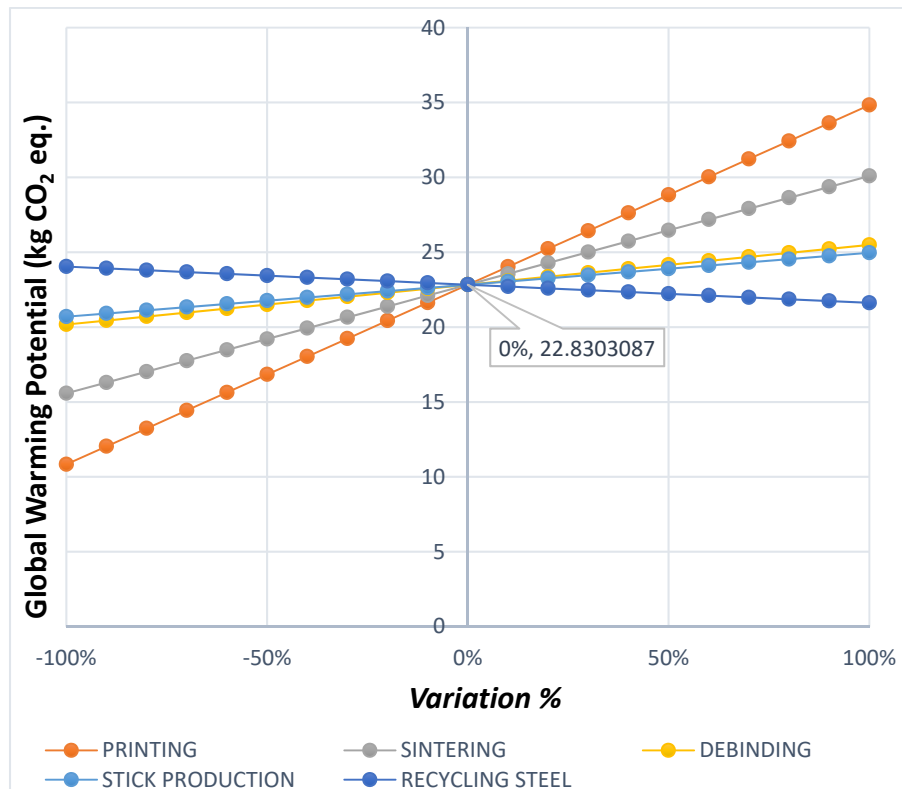


Figura 3.9: Analisi di sensibilità GWP

In entrambe le figure si nota che le cinque rette si incontrano nello stesso punto dell'asse verticale corrispondente ad una variazione dello 0%. Quel punto rappresenta i dati ottenuti precedentemente, cioè 403 MJ di energia richiesta e 22,83 kg di CO₂ equivalenti.

Per le due categorie d'impatto i dati dell'analisi di sensibilità sono molto simili: le stime degli impatti di *debinding* e produzione bacchette ottenute nelle fasi precedenti dell'LCA sono abbastanza stabili perché le rette hanno piccola pendenza; si nota anche la pendenza negativa della retta del riciclo dell'acciaio, questo perché il valore del suo impatto è negativo. Invece le rette di stampa e sinterizzazione hanno pendenza maggiore e sono i dati per i quali una variazione dell'impatto influisce più sull'impatto totale, ad esempio, come mostra la figura 3.8, una variazione di -50% del processo di stampa influenza l'energia totale richiesta facendola diminuire circa del 25% in quanto da 403 MJ passa a 299,8 MJ. Questo risultato ci dice che le stime

fatte sui consumi dei processi di stampa e sinterizzazione sono le più instabili e ci aspetteremo dei dati minori di quelli che invece abbiamo ottenuto.

3.3.4.2 Analisi di sensibilità ReCiPe

Guardando i dati del ReCiPe nella Figura 3.10 si nota una differenza sostanziale rispetto all'analisi di sensibilità delle due categorie CED e GWP, ossia la retta rappresentante la fase di produzione delle bacchette di metallo ha una pendenza molto maggiore, quindi una sua variazione impatta maggiormente sul totale. Ad esempio una variazione di -50% di questa fase fa diminuire l'impatto totale del 13%, cioè passa da 679 mPt a 592 mPt.

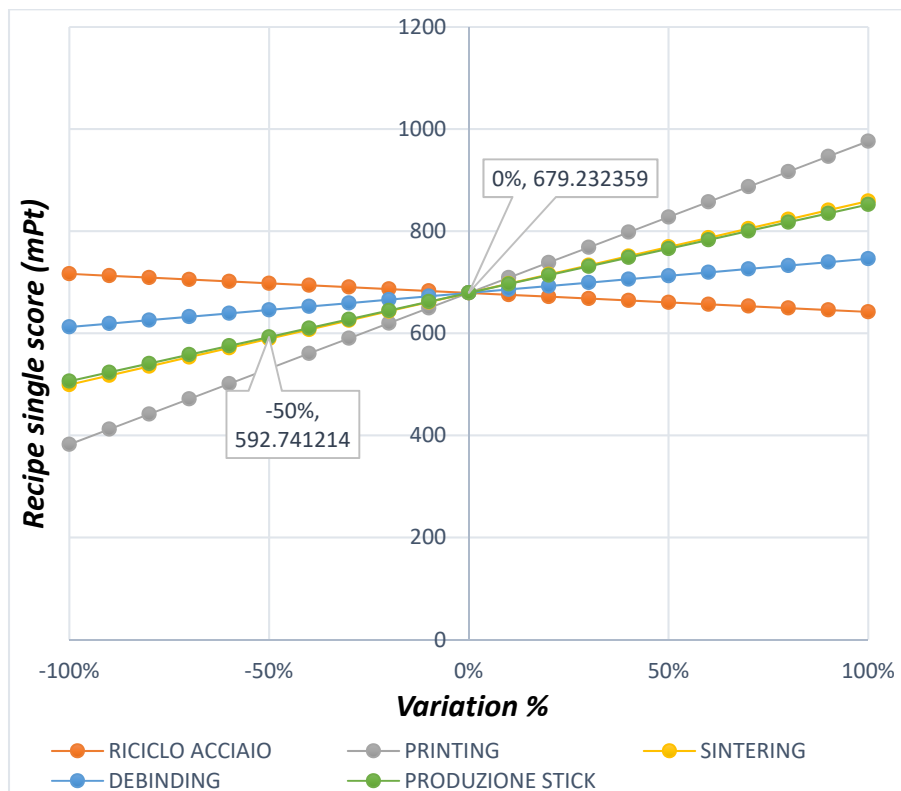


Figura 3.10: Analisi di sensibilità ReCiPe

I risultati ottenuti sono simili all'analisi precedente, la differenza sostanziale sta nella pendenza della retta della produzione delle bacchette di metallo che aumenta, e

questo vuol dire che la stima dell'impatto di questo processo è più instabile e quindi ci aspetteremo un impatto minore di quello ottenuto.

CAPITOLO 4

FUSED FILAMENT FABRICATION LIFE CYCLE ASSESSMENT

4.1 Introduzione alla *Fused Filament Fabrication*

Fused Filament Fabrication (FFF), chiamata anche *Fused Deposition Modeling* (FDM) è uno dei tipi più popolari di tecnologie di stampa 3D commerciali oggi. È in gran parte una tecnologia di estrusione di materiali a base termoplastica come l'acido polilattico (PLA), l'acrilonitrile butadiene stirene (ABS) e la Poliammide (PA).

Negli ultimi anni è aumentato l'utilizzo dei materiali compositi per questo tipo di stampa; sono realizzati rinforzando la plastica con riempitivi che vanno dai metalli alle sostanze vegetali inclusi molti composti organici. L'inclusione di sostanze vegetali nella matrice plastica aumenta l'uso di risorse a basso costo e rinnovabili e riduce la quantità di plastica nei compositi. Utilizzando materie plastiche biodegradabili come il PLA, tali compositi possono soddisfare la necessità di sostituire i compositi plastici non biodegradabili con materiali più ecologici [5].

4.2 *Roboze One+400*

Il nostro caso di studio riguarda la FFF effettuata dalla stampante *Roboze One+400* (Figura 4.1) della *Roboze*, produttore italiano di stampanti 3D professionali.

È stata progettata per la stampa di materiali termoplastici ad alta prestazione e offre ai clienti la possibilità di stampare materiali avanzati a costi accessibili.

Le applicazioni principali sono la realizzazione di prototipi funzionali e l'utilizzo nel settore dell'*automotive* e dell'industria manifatturiera.



Figura 4.1: Stampante Roboze One+400

4.3 Processo di stampa FFF

Il processo di stampa è rappresentato nella Figura 4.1: per la stampa si parte da una bobina di filamento di materiale termoplastico. Il filamento arriva all'ugello che, riscaldandosi, lo estrude e deposita gli strati di materiale sul piano di costruzione che si raffredda e quindi solidifica il materiale. L'estrusore deposita il materiale seguendo istruzioni definite da un codice specifico ottenuto da alcuni software. A mano a mano che si depositano gli strati, il piano di costruzione si abbassa. Questo processo si ripete fino a che la parte non è completata.

Solitamente il pezzo non necessita di processi di post lavorazione e la tolleranza di stampa della FFF può variare da 0,05 mm a 0,5 mm.

Questa tecnologia offre la possibilità di personalizzare a piacimento il riempimento del componente desiderato, portando ad una riduzione d'utilizzo del materiale, dei costi e del tempo di stampa. Inoltre le stampanti che utilizzano la FFF offrono la possibilità di creare pezzi anche di grandi dimensioni con materiali economici e biodegradabili.

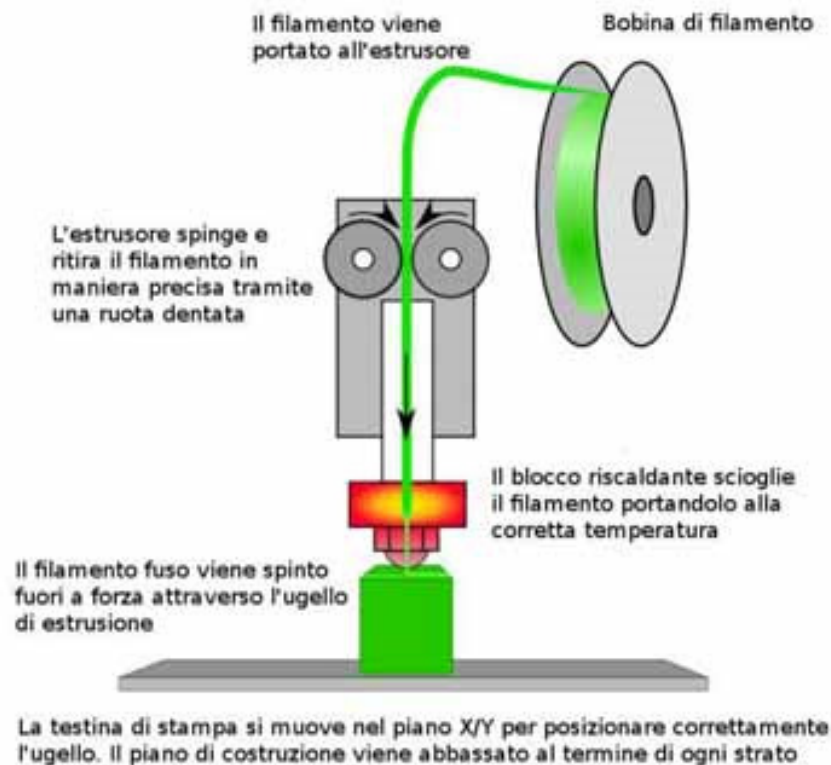


Figura 4.2: Processo di stampa FFF

4.4 Analisi LCA

L'analisi LCA del processo di stampa FFF è stata effettuata prendendo in considerazione due diversi oggetti stampati, ognuno da un filamento di materiale differente, il primo composto da Poliammide (nella simulazione sul *software* abbiamo inserito il Nylon 6 che è molto simile come caratteristiche e proprietà) rinforzato al 30% con fibre di vetro [14] e il secondo da Acido Polilattico (PLA) rinforzato al 30% con fibre di canapa.

4.4.1 Definizione degli obiettivi

L'obiettivo di questa analisi è il confronto tra gli impatti delle stampe dei due tipi di materiali.

Nella Figura 4.2 sono rappresentati i confini del sistema.

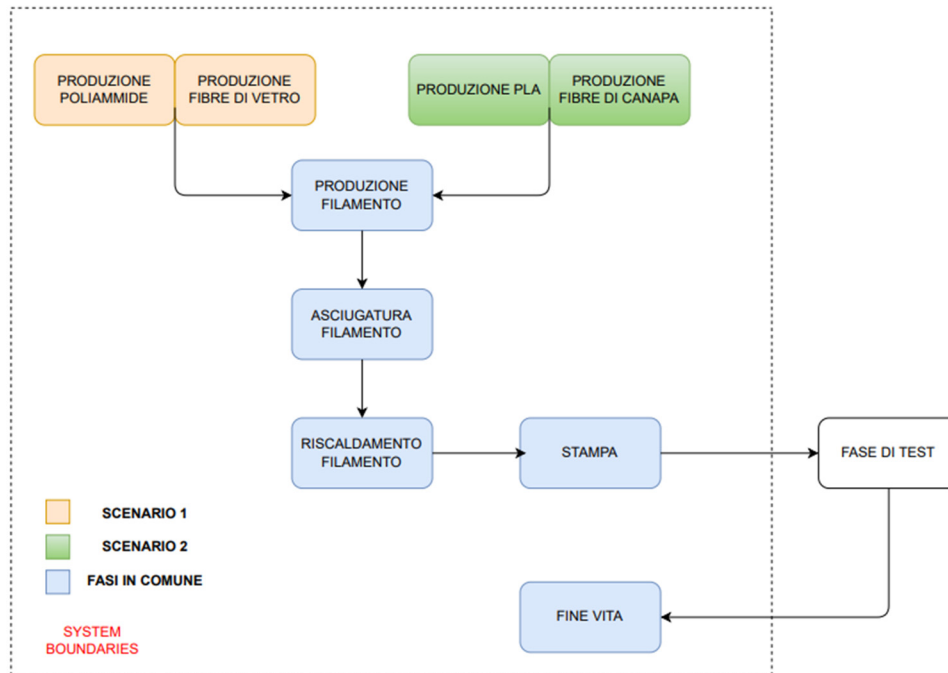


Figura 4.3: Confini del sistema del processo di stampa FFF

I confini comprendono la produzione dei due tipi di filamento. Lo scenario 1 comprende:

- Produzione di PA tramite polimerizzazione per condensazione di amminoacidi;
- Produzione di fibre di vetro tramite pultrusione.

Lo scenario 2 invece comprende:

- Produzione di PLA tramite polimerizzazione;
- Produzione di fibre di canapa tramite i processi di raccolta, macerazione e separazione.

Sono presenti anche le fasi di asciugatura (a 120°C per due ore) e di stampa, che comprende il riscaldamento (a 70°C) dei filamenti e la stampa vera e propria.

Infine c'è la fase di testing del pezzo stampato dove si analizzano le proprietà fisiche e meccaniche del pezzo e poi c'è la fase di fine vita [15].

L'unità funzionale è un provino di materiale composito di peso 20 grammi, che è stato stampato con i due differenti tipi di materiale formando i due scenari che si vedono nella Figura 4.2.

I database di dati selezionati su SimaPro sono stati *Agri-footprint*, *Ecoinvent 3*, *ELCD*, *Methods* e *USLCI*.

4.4.2 Analisi dell'inventario

La seconda fase dell'analisi LCA effettuata è stata quella dell'inserimento in SimaPro dei dati in input con cui poi il *software* ha calcolato gli impatti che cercavamo. Nelle "Fasi del prodotto" sono state inserite le fasi di "Assemblaggio", quindi la produzione dei filamenti, la stampa, l'asciugatura e il riscaldamento, "Ciclo di vita" e "Scenario di fine vita" che comprende lo smaltimento delle parti stampate.

Nella sezione "Parametri" sono stati inseriti i dati relativi ai pesi, consumi e trasporti. Alcuni dati però non erano presenti nei *database* di SimaPro o non avevamo delle misurazioni effettuate direttamente; allora sono state effettuate delle ricerche letterarie. I dati estrapolati da queste ricerche comprendono:

- Consumi energetici delle fasi di asciugatura, riscaldamento e stampa [15] che sono stati inseriti su SimaPro;
- I dati relativi al CED e GWP della produzione delle fibre di canapa [16] che non sono stati inseriti nel software ma direttamente sul foglio di calcolo di Excel;
- Resistenza alla trazione e modulo di trazione [17,18] dei materiali utilizzati che abbiamo poi usato per analizzare le proprietà dei prodotti stampati.

4.4.3 Valutazione degli impatti

Nella valutazione degli impatti sono state considerate solo le categorie del *Cumulative Energy Demand* e del *Global Warming Potential*, perché sono quelle più utilizzate e interessanti nell'analisi dei materiali compositi.

4.4.3.1 Cumulative Energy Demand dei due provini a confronto

Per quanto riguarda la categoria del *Cumulative Energy Demand* la Figura 4.4 ci mette a paragone la quantità di energia richiesta per i processi produttivi dei due provini, che chiamiamo Scenario 1 il provino in Poliammide e Scenario 2 quello in PLA.

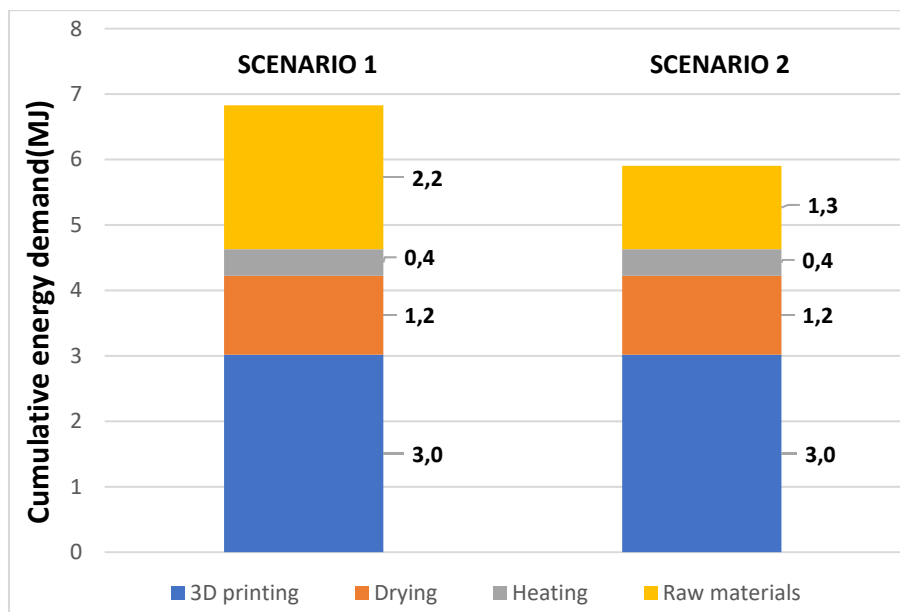


Figura 4.4: CED provini a confronto

Essendo i processi di asciugatura, riscaldamento e stampa gli stessi per entrambi gli scenari, i consumi energetici di queste fasi sono identici e ammontano a 4,6 MJ. La differenza la troviamo alla voce “*Raw materials*”, che sta ad indicare la fase di produzione dei due filamenti; infatti la produzione del filamento di Poliammide rinforzato con fibre di vetro richiede 2,2 MJ mentre quella del filamento di PLA rinforzato con fibre di canapa richiede 1,3 MJ.

Lo scopo di questo caso di studio è quello di scoprire da dove deriva questa differenza riscontrata; per questo è stata fatta un’analisi dei consumi energetici anche per le singole fasi di produzione dei due tipi di filamento che vediamo in Figura 4.5:

le fasi sono la produzione di materiali termoplastici (“*Thermoplastics*”), la produzione di fibre (“*Fibers*”), l’estrusione (“*Extrusion*”) e i trasporti (“*Transport*”).

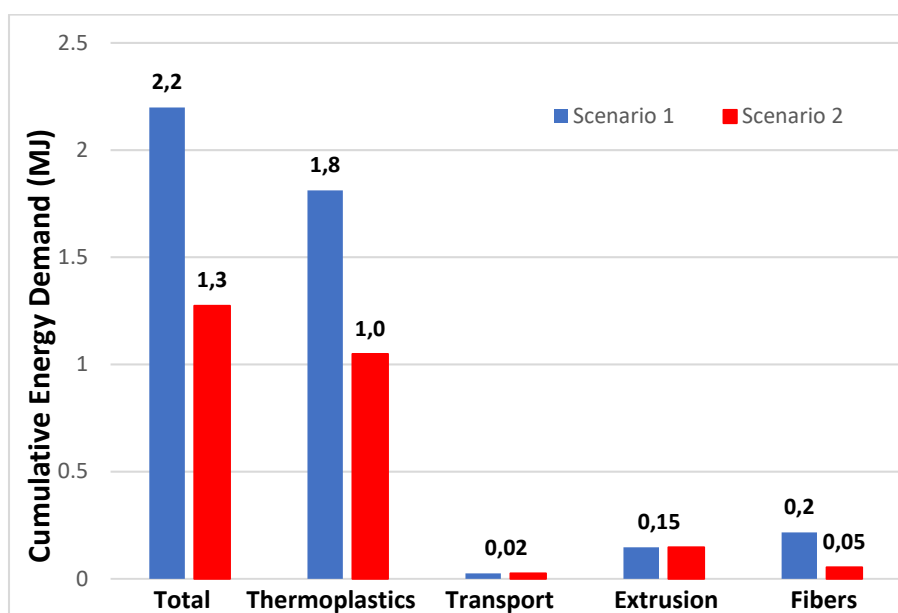


Figura 4.5: Confronto Cumulative Energy Demand per la produzione dei due tipi di filamento

In entrambi gli scenari risulta che la maggior parte dell’energia richiesta per produrre i filamenti deriva dalla produzione di Poliammide e PLA tramite i processi di polimerizzazione, in quanto la prima richiede 1,8 MJ sui 2,2 MJ totali mentre la seconda richiede 1,0 MJ su 1,3 MJ totali. Inoltre notiamo che l’energia totale richiesta dallo scenario 1 è maggiore di quella dello scenario 2, perché serve maggior energia per produrre Poliammide piuttosto che PLA e più energia per produrre fibre di vetro (0,2 MJ) che fibre di canapa (0,05 MJ).

4.4.3.2 Global Warming Potential dei due provini a confronto

Lo stesso tipo di risultati sono stati ottenuti per la categoria *Global Warming Potential*. Anche in questo caso siamo partiti dal confronto dei kg di CO₂ equivalenti emessi dalle fasi di produzione dei due provini (Figura 4.6) e allo stesso modo si nota che le fasi di riscaldamento, asciugatura e stampa hanno gli stessi valori di emissioni mentre i “*Raw materials*” hanno impatti differenti: la produzione del filamento di Poliammide rinforzato ha emissioni di 0,16 kg CO₂ eq. mentre la produzione del filamento di PLA ha emissioni di 0,06 kg CO₂ eq.

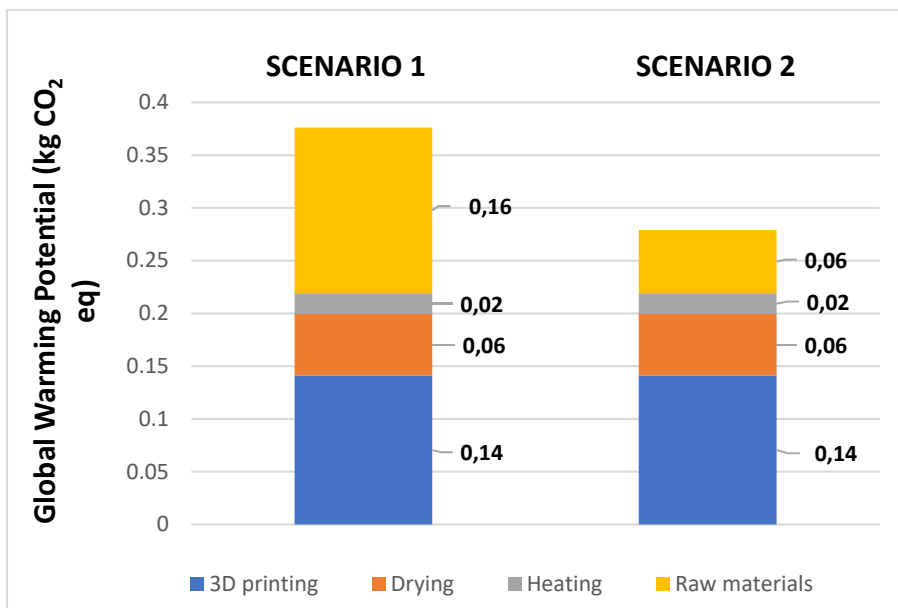


Figura 4.6: GWP provini a confronto

Anche per il GWP è importante capire da dove viene questa differenza di impatti ed è rappresentata dalla Figura 4.7.

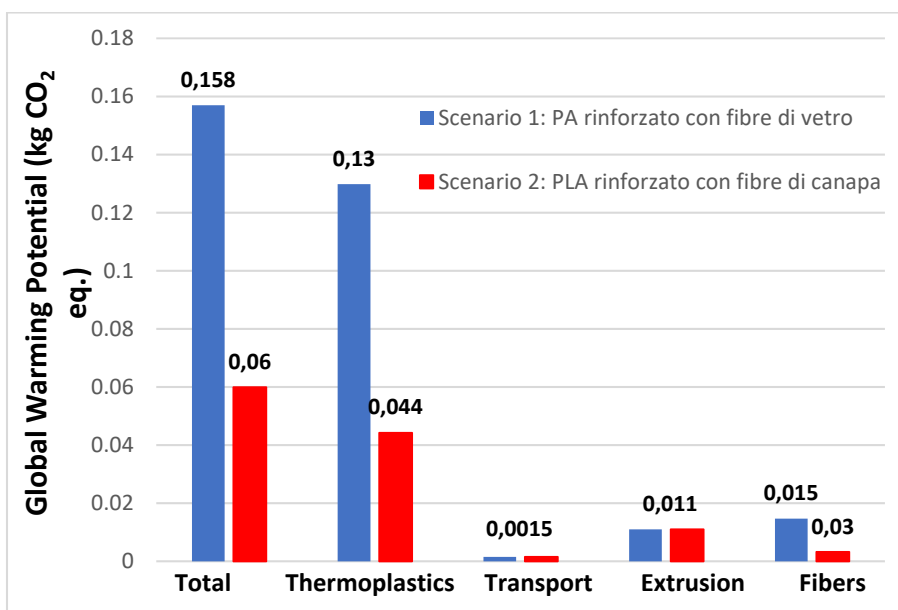


Figura 4.7: Confronto Global Warming Potential per i due tipi di filamento

Gli impatti totali dei due scenari sono di 0,158 kg CO₂ eq. per il primo e 0,06 kg CO₂ eq. per il secondo; lo Scenario 1 ha impatto maggiore in quanto la produzione di Poliammide (0,13 kg CO₂ eq.) impatta di più della produzione di PLA (0,044 kg CO₂

eq.), così come la produzione di fibre di vetro (0,015 kg CO₂ eq.) impatta di più della produzione delle fibre di canapa (0,03 kg CO₂ eq.).

CAPITOLO 5

CONCLUSIONI

Lo studio e l'analisi degli impatti ambientali delle tecnologie BMD e FFF di stampa 3D è di fondamentale importanza se si vuole comprendere quali processi di produzione incidono di più sul pianeta, sulla salute umana, sulle risorse naturali. È inoltre importante per capire quali sono i tipi di materiali più convenienti e meno inquinanti da utilizzare nella stampa 3D; naturalmente i risultati ottenuti nel caso di studio presentato tengono conto solo degli impatti ambientali e non di altri fattori come i costi delle materie prime o le proprietà meccaniche che si richiedono ai pezzi stampati.

La prima analisi effettuata è stata quella sulla stampa di oggetti metallici e i risultati più importanti ottenuti, guardando le prime due categorie d'impatto, evidenziano come la maggior parte degli effetti sull'ambiente sono dovuti ai consumi energetici delle macchine che eseguono le tre fasi del processo di stampa. Questo è normale se si guardano solo le tre fasi, ma anche se si prende in considerazione il processo di produzione delle bacchette metalliche si ottiene lo stesso esito, perché anche in questo caso è il consumo di elettricità del processo di atomizzazione per la creazione della polvere di acciaio inossidabile ad avere più del 90% dell'impatto totale. Solo nella categoria che tiene conto degli impatti sulla salute umana, ecosistema e risorse naturali si evidenzia una maggior influenza dei processi di produzione delle bacchette di metallo proprio perché questa categoria mette in risalto l'effettivo utilizzo di materie prime che inevitabilmente impatta sul consumo delle risorse del pianeta.

È stata eseguita anche un'analisi di sensibilità che ha evidenziato che i dati ottenuti nelle precedenti fasi di studio sono potenzialmente esatti se si considerano i processi di *debinding* e di riciclo dell'acciaio alla fine del ciclo di vita del pezzo. Se però si guarda alla produzione delle bacchette metalliche, stampa e sinterizzazione viene fuori che le stime fatte sono più o meno instabili e ci potremmo aspettare dei dati

minori di quelli ottenuti. Una delle motivazioni può essere che le macchine che effettuano le lavorazioni sono considerate sempre al 100% della potenza nominale riportata nella scheda tecnica, ma la realtà è che non è così perché ci sono dei periodi di tempo in cui queste consumano meno energia.

Il secondo caso di studio che abbiamo presentato riguarda la tecnologia FFF di stampa 3D che utilizza materiali termoplastici o materiali compositi. L'obiettivo era quello di analizzare i due scenari, cioè i due tipi di materiali utilizzati per la stampa e provare a capire quale dei due è il migliore in termini di impatti e di proprietà meccaniche che offre alla parte stampata. I risultati ottenuti sono i seguenti: secondo entrambe le categorie d'impatto utilizzate la maggior parte dell'energia richiesta e delle emissioni nell'atmosfera è dovuta ai processi di produzione dei materiali termoplastici e in maniera minore delle fibre di canapa e di vetro.

Sono stati anche messi a paragone gli impatti dei due scenari completi, quindi comprendendo la produzione dei filamenti, la stampa, l'asciugatura e il riscaldamento e si è ottenuto che lo scenario 1, quindi quello della stampa del filamento di poliammide rinforzato con fibre di vetro, ha consumi energetici e emissioni maggiori dello scenario 2, cioè quello del filamento in PLA rinforzato con fibre di canapa.

Quindi si potrebbe pensare che per la tecnologia di stampa FFF conviene utilizzare come materiale termoplastico il PLA e come rinforzo la fibra di canapa. Però non sono state prese in considerazione le proprietà meccaniche dei due provini stampati e allora sono state fatte delle ricerche per sopperire a questo limite. Sono stati presi in considerazione due parametri che spiegano le proprietà meccaniche:

- Resistenza a trazione: si misura tramite un test chiamato “prova a trazione”; si sottopone un provino di dimensioni finite ad una forza unidirezionale, a velocità uniforme si applica il carico che fa allungare il provino in direzione della forza generalmente fino alla rottura;
- Modulo di elasticità: indica la fase precedente alla rottura ed esprime la propensione dei materiali ad allungarsi o ad accorciarsi a seguito dell'azione di una forza di carico.

Dal risultato delle ricerche si evince che, secondo i due parametri meccanici, il filamento di Poliammide rinforzato ha resistenza a trazione e modulo di elasticità maggiori del filamento di PLA rinforzato. Quindi questo farebbe propendere la scelta del materiale da stampare verso lo scenario con il filamento in Poliammide, al contrario di quanto detto precedentemente seguendo i dati degli impatti ambientali ottenuti dall'analisi LCA.

Questo significa che la scelta del materiale dipende da più di un fattore non solo dai consumi energetici o dalle emissioni e che quindi essa dipende dal tipo di componente che si deve produrre e dall'utilizzo che ne verrà fatto dal cliente o dal consumatore.

Per facilitare la decisione in futuro potrebbe essere effettuata un'analisi che abbina i due parametri di impatto ambientale e proprietà meccaniche così da raccogliere dati più attendibili e che tengono conto di più fattori.

Nonostante la stampa 3D sia già una tecnologia innovativa che ha come obiettivo quello di ridurre gli impatti ambientali, nel futuro ci sono ancora molte aree di questa tecnologia dove si può intervenire per avere ancora minor impatto: ad esempio ci sono molte aziende che stanno incrementando sempre di più gli interventi di assistenza e di formazione a distanza, diminuendo così gli impatti dei trasporti; anche la produzione di scarti è di grande importanza nel discorso della sostenibilità e, nonostante la stampa 3D permetta di sprecare meno materiale dei tradizionali processi di produzione, essa stessa ne produce, ad esempio i supporti da applicare ai pezzi in stampa, alla fine della lavorazione devono essere rimossi e non sono riutilizzabili e questo comporta anche aumento del tempo di produzione e energia necessaria. Dunque si deve lavorare sulla minimizzazione del tempo e del materiale necessari per le fasi di produzione delle parti.

Bibliografia

- [1] Megan Kreiger and Joshua M. Pearce. *Environmental Life Cycle Analysis of Distributed Three-Dimensional Printing and Conventional Manufacturing of Polymer Products*. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, vol. 1, pp. 1511, 2013.
- [2] *La storia della stampa 3D in 9 pillole*, in ProtoReal, 12 Marzo 2022.
- [3] *Storia completa della stampa 3D: dal 1982 a oggi*, in Objects, 2016.
- [4] Bianchi Iacopo, Di Pompeo Valerio, Mancina Tommaso, Pieralisi Massimiliano, Vita Alessio. *Environmental impacts assessment of Bound Metal Deposition 3D printing process for stainless steel*. Procedia CIRP, vol. 105, pp. 386-391, 2022.
- [5] Samarthya Bhagia, Kamlesh Bornani, Ruchi Agrawal, Alok Satlewal, Jaroslav Durkovic, Rastislav Lagana, Meher Bhagia, Chang Geun Yoo, Xianhui Zhao, Vlastimil Kunc, Yunquiao Pu, Soydan Ozcan, Arthur J. Ragauskas. *Critical review of FDM 3D printing of PLA biocomposites filled with biomass resources, characterization, biodegradability, upcycling and opportunities for biorefineries*. Applied materialstoday, vol. 24, 2021.
- [6] Tuan D. Ngo, Alireza Kashani, Gabriele Imbalzano, Kate TQ Nguyen, David Hui. *Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges*. Composite Part B: Engineering, vol. 142, pp. 172-196, 2018.
- [7] Xu Zhang, Wei Fan, Tianxi Liu. *Fused deposition modeling 3D printing of polyamide-based composites and its application*. Composite Communications, vol. 21, 2020.
- [8] M. Nacucchi, F. Palano, A. Coglitore, A. Spada, U. De Angelis, A. Tati, D Mirabile Gattia. *Le Tecnologie Additive: sviluppo di metodi di caratterizzazione e qualifica dei materiali e dei prodotti*. Report RdS, pp. 5, 2019.
- [9] ISO 14040 UNI EN. *Valutazione del ciclo di vita Principi e quadro di riferimento*. Environmental Management, 2010

- [10] 14044 UNI EN. *Valutazione del ciclo di vita Requisiti e linee guida*. Environmental Management, 2011.
- [11] Amzan Alsabri, Furqan Tahir, Sami G. Al-Ghamdi. *Environmental impacts of polypropylene (PP) production and prospects of its recycling in the GCC region*. Materialstoday: proceedings, vol. 56, pp. 2245-2251, 2022.
- [12] J. M. C. Azevedo, A. CabreraSerrenho, and J. M. Allwood. *Energy and material efficiency of steel powder metallurgy*. Powder Technol., vol. 328, pp. 329–336, 2018.
- [13] K. Raoufi, S. Manoharan, T. Etheridge, B. K. Paul, and K. R. Haapala. *Cost and environmental impact assessment of stainless steel microreactor plates using binder jetting and metal injection molding processes*. Procedia Manuf., vol. 48, no. Mim, pp. 311–319, 2020.
- [14] Xu Zhang, Wei Fan, Liu Tianxi. *Fused deposition modeling 3D printing of polyamide-based composites and its applications*. Composites Communications, vol. 21, pp. 100413, 2020.
- [15] Archiede Forcellese, Marco Marconi, Michela Simoncini, Alessio Vita. *Environmental and buckling performance analysis of 3D printed composite isogrid structures*. Procedia CIRP, vol. 98, pp. 458-463, 2021.
- [16] Angela Daniela La Rosa, Giuseppe Recca, John Summerscales, Alberta Latteri, Giulia Cozzo, Gianluca Cicala. *Bio-based versus traditional polymer composites. A life cycle assessment perspective*. Journal of Cleaner Production, vol. 74, pp. 135-144, 2014.
- [17] I. A. Carmona-Cervantes, E. A. Paredes-Mogica, H. R. Lopez-Cabrera, U. Figueroa-Lopez, H. Vieyra-Ruiz, A. Guevara-Morales. *Tribological behavior of glass fiber reinforced polyamide (PA-GF) and recycled polyvinyl butyral (r-PVB) blends*. Materials Letters, vol. 319, pp. 132261, 2022.
- [18] Hmadullah Culvacı, Kadir Erbay, Huseyin Ipek. *Investigation of the Effect of Glass Fiber Content on the Meical Properties of Cast Plyamide*. Arabian Journal for science and engineering, vol. 39, pp. 9049-9056, 2012.

Sitografia

<https://simapro.com/>

SimaPro | 2B (to-be.it)

<https://www.desktopmetal.com/>

Stampante 3D Roboze One +400 | Elmec.com

