



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Gestionale

**VALUTAZIONE DEI COSTI, DELLE PROPRIETÀ
MECCANICHE E DEGLI IMPATTI AMBIENTALI DI DUE
PROCESSI DI STAMPA 3D: SLS E FDM**

MECHANICAL PROPERTIES, COST AND ENVIRONMENTAL
IMPACTS ASSESSMENTS OF SLS AND FDM 3D PRINTING
PROCESSES

Relatore:

Prof. Ing. Alessio Vita

Tesi di Laurea di:

Giorgia Capitani

Matricola:

S1098221

A.A. 2022 / 2023

INDICE

INDICE DELLE FIGURE

INDICE DEI GRAFICI

INDICE DELLE TABELLE

ABSTRACT

1.	INTRODUZIONE	1
1.1.	STAMPA 3D.....	1
1.2.	TECNOLOGIE DI STAMPA 3D	3
1.3.	MATERIALI STAMPA 3D.....	7
1.3.1	Polveri SLS.....	9
1.3.2	Materiali Compositi.....	12
2.	METODI DI ANALISI	15
2.1.	ANALISI DEI COSTI.....	15
2.2.	ANALISI DEGLI IMPATTI AMBIENTALI.....	18
2.2.1	Definizione Dell’obiettivo.....	21
2.2.2	Analisi Dell’inventario	21
2.2.3	Analisi Degli Impatti Ambientali	22
2.2.4	Interpretazione Dei Risultati.....	24
2.2.5	SimaPro	25
2.3.	ANALISI DELLE PROPRIETÀ MECCANICHE	26
3.	CASI DI STUDIO	29
3.1.	SINTERIZZAZIONE LASER SELETTIVA	29
3.1.1.	Fasi del Processo SLS	30

3.1.2.	Analisi LCA.....	32
3.1.2.1.	Definizione degli Obiettivi	33
3.1.2.2.	Analisi dell’Inventario	34
3.1.2.3.	Valutazione degli Impatti.....	36
3.1.3.	Analisi dei Costi	37
3.1.4.	Analisi delle Proprietà Meccaniche.....	38
3.2.	MODELLAZIONE A DEPOSIZIONE FUSA	40
3.2.1.	Analisi LCA.....	42
3.2.1.1.	Definizione degli Obiettivi	42
3.2.1.2.	Analisi dell’Inventario	44
3.2.1.3.	Valutazione degli Impatti.....	45
3.2.2.	Analisi dei Costi	45
4.	RISULTATI	47
4.1.	RISULTATI ANALISI LCA	47
4.2.	RISULTATI ANALISI DEI COSTI.....	55
4.3.	RISULTATI ANALISI DELLE PROPRIETÀ MECCANICHE	60
5.	CONCLUSIONI.....	64
	BIBLIOGRAFIA	66
	RINGRAZIAMENTI	

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 Stereolitografia	3
Figura 2 Pezzo stampato tramite tecnologia SLM.....	4
Figura 3 Schema stampa 3D SLS	5
Figura 4 Schema stampa 3D FDM.	6
Figura 5 Confronto tra pezzi realizzati in PLA e in ABS	7
Figura 6 Pezzi realizzati con Polimeri ad Alte Prestazioni.....	8
Figura 7 Problemi di elaborazione SLS per una "finestra di sinterizzazione" troppo piccola: arricciamento o crescita laterale.....	10
Figura 8 Metodi per la produzione di polveri polimeriche SLS.....	11
Figura 9 Fibre di vetro	13
Figura 10 Fibre aramidiche.....	13
Figura 11 Fibre di carbonio	13
Figura 12 Schema processo LCA	20
Figura 13 Macchina da prova per test di Trazione	28
Figura 14 Stampante 3D Lisa X	30
Figura 15 Stampante Lisa X internamente	31
Figura 16 Stampante, PHS, Sabbiatrice.....	32
Figura 17 Provino di trazione in PA12	33
Figura 18 Confini di sistema del processo di stampa SLS	34
Figura 19 Misuratore dei consumi elettrici.....	35
Figura 20 Software di controllo della macchina di trazione.....	39
Figura 21 Provino durante il test di trazione.....	39
Figura 22 RobozeOne+400.....	41
Figura 23 Fasi del processo FDM.....	41
Figura 24 Bobina di Filamento di Carbon PA	42
Figura 25 Confini di sistema processo FDM	43

INDICE DEI GRAFICI

Grafico 1 GWP100 Fibra di Carbonio	48
Grafico 2 CED totale FDM.....	49
Grafico 3 CED stampa FDM	49
Grafico 4 ReCiPe normalizzato FDM	50
Grafico 5 GWP100 Stampa SLS	51
Grafico 6 CED totale normalizzazione SLS	52
Grafico 7 ReCiPe imballaggio SLS normalizzato	53
Grafico 8 GWP100 Confronto scenari.....	54
Grafico 9 Contributi di costo totale con design scenario FDM	56
Grafico 10 Costo unitario x Volume di produzione scenario FDM	57
Grafico 11 Contributi di costo senza design scenario SLS.....	58
Grafico 12 Costo unitario x Volume di produzione scenario SLS	59
Grafico 13 Confronto analisi dei costi	59
Grafico 14 Curve di elasticità	61
Grafico 15 Ricerca Modulo di Young SLS1	62
Grafico 16 Ricerca Modulo di Young SLS2	62
Grafico 17 Ricerca Modulo di Young SLS3	63

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 Dati in input SLS	35
Tabella 2 Dati di costo SLS	38
Tabella 3 Dati in Input FDM	44
Tabella 4 Dati di costo FDM	46
Tabella 5 Costo totale produzione scenario FDM	55
Tabella 6 Costo totale produzione scenario SLS	57

ABSTRACT

La produzione additiva di materiali compositi sta conquistando molta importanza nel mercato, poichè comporta una riduzione degli impatti ambientali garantendo al tempo stesso elevate prestazioni del prodotto. Questo studio mira ad indagare le differenze tra provini realizzati con processi di stampa 3D SLS e FDM in ambito di sostenibilità ambientale, costi di produzione e proprietà meccaniche.

Per mezzo dell'Analisi degli Impatti ambientali, è stato possibile comprendere quali processi di produzione incidono di più nell'ambiente e quali materiali sono i meno inquinanti durante il ciclo vita di un provino stampato con la tecnica 3D. Da questa analisi, si è dedotto che la produzione del provino stampato con la tecnica SLS genera maggiori impatti ambientali.

Per mezzo dell'Analisi dei Costi, si è calcolato quali sono le componenti di costo che influiscono di più sul costo totale generato dalla fase di produzione del provino. Il provino stampato con la tecnica FDM ha un costo unitario maggiore.

Infine, nell'Analisi delle Proprietà Meccaniche, si è discusso su quali fossero i materiali più prestazionali adatti a rispettare le caratteristiche che si richiedono ai pezzi stampati, il Carbon PA materiale con cui è realizzato il provino dello scenario FDM, ha una resistenza maggiore rispetto alla poliammide con cui è realizzato il provino dello scenario SLS.

1. INTRODUZIONE

Il capitolo tratterà della stampa 3D, in particolare si focalizzerà su due tipi di stampa, SLS e FDM, e sui materiali che essi utilizzano.

1.1. STAMPA 3D

La stampa 3D, anche chiamata manifattura additiva (AM), per distinguerla dai tradizionali metodi sottrattivi quando viene utilizzata per la produzione aziendale, è il processo che crea oggetti depositando strati di materiale uno sull'altro. Quando questa tecnica è stata inventata all'inizio degli anni Ottanta, era molto lenta e costosa, ma gli ampi sviluppi tecnologici hanno reso le stampanti moderne più accessibili e veloci [1].

Facendo alcuni riferimenti storici, il Dr. Hideo Kodama dal Giappone è stata la prima persona documentata a sperimentare la tecnologia di stampa 3D all'inizio del 1980, egli stava cercando un modo per sviluppare un sistema di prototipazione rapida. Il dottor Kodama ha creato un sistema di stampa in cui la resina è esposta alla luce UV strato per strato, producendo alla fine un solido modello 3D. Il suo metodo di stampa 3D non è mai stato commercializzato.

Ad essere accreditato come uno dei pionieri della stampa 3D è Chuck Hall essendo stato il primo a depositare ufficialmente un brevetto per la stampa 3D SLA nel 1984. Fu l'inventore della parola stereolitografia (SLA), che si riferisce al metodo in cui oggetti vengono resi solidi stampando strati di materiale induriti dalla luce ultravioletta.

Nel 1987 è nato un nuovo metodo di stampa 3D la Selective Laser Sintering (SLS), però solo nel 2006 la stampa 3D SLS divenne disponibile in commercio.

La stampa 3D FDM è stata creata solo nel 1988. Dal 1990 in poi, la stampa 3D si è evoluta man mano che aziende, startup, scienziati e professionisti medici hanno iniziato a sperimentare con essa e da ciò, sono state create nuove applicazioni, tra cui il bioprinting e applicazioni scientifiche.

Oggi, la stampa 3D è largamente utilizzata, è in grado di stampare modelli dettagliati con precisione e risoluzione estremamente elevate. La stampa 3D sta anche diventando più accessibile al pubblico con l'aumento di risorse come file stampabili 3D, software CAD e altro ancora [2].

Dai vantaggi della stampa 3D si comprende perché ha avuto grande successo e un largo utilizzo negli ultimi anni. Il primo vantaggio è la velocità, anche se la stampa di un oggetto può richiedere ore o giorni, confrontata con metodi di produzione tradizionali risulta essere più veloce.

Il vantaggio più significativo è la capacità di produrre progetti altamente complessi che sarebbero impossibili da realizzare altrimenti.

Un altro vantaggio è la quantità di materiali che si possono stampare; infatti, è possibile stampare in 3D con quasi tutti i materiali, quelli più comuni sono a base di plastica, dal PLA standard ai polimeri avanzati e altamente resistenti come il PEEK o il PEI, oppure anche materiali termoplastici rinforzati con fibre di carbonio o fibre di vetro. Addirittura, materiali di nicchia permettono di sperimentare la stampa 3D in campi come la biologia, l'alimentare e l'edilizia.

Si possono inoltre realizzare parti per uso finale, per mezzo della post-elaborazione, le odierne parti stampate in 3D di livello industriale possono essere utilizzate direttamente dall'industria, oppure si possono produrre oggetti dedicati al consumatore finale. Questo è possibile sfruttando la capacità della stampa additiva di riuscire a produrre in massa oggetti che sono però personalizzati, si tratta della cosiddetta mass customization.

Essa è vantaggiosa soprattutto nella prototipazione, infatti la stampa 3D ha un utilizzo molto diffuso proprio in questo, può essere effettuata internamente con tempi di realizzazione minimi e le iterazioni del progetto possono essere

implementate e stampate sul posto. Si parla anche di prototipazione rapida, essa dà una risposta immediata e illustra perfettamente il potenziale, l'adattabilità e la velocità (time-to-market) offerti dalla produzione additiva [1].

1.2. TECNOLOGIE DI STAMPA 3D

Ci sono alcune caratteristiche che accomunano tutte le tecnologie di stampa 3D, una in particolare è l'utilizzo di un computer combinato ad un software di modellazione 3D; quindi, è necessario creare o reperire un disegno CAD per iniziare il processo. Una volta concluso il disegno, bisognerà passare al programma di slicing che legge dati in formato STL e traduce il modello con struttura "strato per strato" in linguaggio macchina. Dopo questa fase si potrà stampare il modello con qualsiasi metodo e in base ai materiali che si vuole utilizzare si potrà scegliere tra una tecnologia e un'altra. Infatti, le caratteristiche che distinguono una tecnologia dall'altra sono proprio i materiali e la tecnica con cui vengono stampati gli oggetti. Alcuni dei metodi di stampa disponibili oggi sono:

-Stereolitografia (SLA)

È il metodo più antico, le stampanti stereolitografiche funzionano con un eccesso di plastica liquida "caricata" con un materiale fotosensibile, che sottoposta alla luce laser per un certo periodo di tempo indurisce e trasformandosi prende la forma dell'oggetto solido. Il risultato è un oggetto tridimensionale con pareti molto lisce.

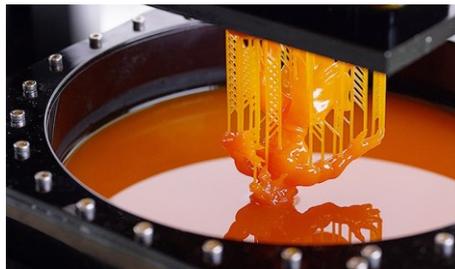


Figura 1 Stereolitografia

-Stampa con luci digitali (DLP)

La stampa DLP funziona come la SLA con fotopolimeri, ciò che rende tale processo diverso è la fonte di luce usata per la polimerizzazione. In questa tecnologia la luce necessaria è fornita da un display a cristalli liquidi, che viene applicato a tutta la superficie del materiale da costruire durante ogni singola esecuzione del processo di stampa.

-Fusione laser selettiva (SLM)

È una tecnologia di stampa che utilizza un raggio laser ad alta potenza che fonde e scioglie polveri metalliche insieme. Il processo SLM fonde completamente il materiale metallico prima di trasformarlo in solido.



Figura 2 Pezzo stampato tramite tecnologia SLM

-Fusione a fascio elettronico (EBM)

È un altro tipo di fabbricazione additiva per parti metalliche. Questa tecnica è molto simile alla SLM, però utilizza un fascio elettronico invece del laser ad alta energia, che è la principale differenza tra i due metodi.

-Creazione di Oggetto laminato (LOM)

È una delle tecnologie di stampa innovative. Durante il processo LOM, strati di laminati di carta, plastica o metallo adesivizzato sono fusi insieme mediante calore e pressione e poi tagliati nella forma desiderata [3].

Le caratteristiche che si tengono in considerazione quando si vuole scegliere quale tecnica utilizzare e che permettono di fare un confronto tra le diverse tecnologie sono: il costo della stampante 3D, il costo del prototipo, la velocità, l'impatto ambientale ecc.

In questo capitolo e nei seguenti si prenderanno in esame due tecnologie di stampa 3D, la Sinterizzazione Laser Selettiva (SLS) e la Modellazione per deposizione di materiale fuso (FDM).

La Sinterizzazione Laser Selettiva (SLS) è una tecnologia di produzione additiva (AM) che usa un laser ad alta potenza per sinterizzare piccole particelle di polvere di polimero e trasformarle in una struttura solida basata su un modello 3D. Per decenni, la stampa 3D SLS è stata utilizzata nello sviluppo dei prodotti e le recenti innovazioni in termini di meccanica, materiali e software hanno reso la stampa SLS accessibile a una vasta gamma di attività, consentendo a sempre più aziende di utilizzare questi strumenti [4].

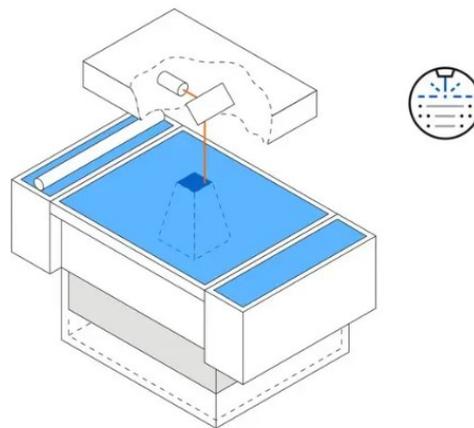


Figura 3 Schema stampa 3D SLS

La Modellazione per deposizione di materiale fuso è un processo di stampa 3D basato principalmente sull'estrusione di un filamento di materiale termoplastico. I filamenti sono avvolti in un contenitore ermetico ed estrusi da una testina riscaldata, la testina spostandosi li fonde e li deposita su una piattaforma di stampa strato per strato. Tipicamente, la testina di stampa si sposta in due dimensioni per

creare un intero strato orizzontale, per poi essere di nuovo utilizzata una volta che la piattaforma si è spostata in altezza, per iniziare un nuovo strato [5].

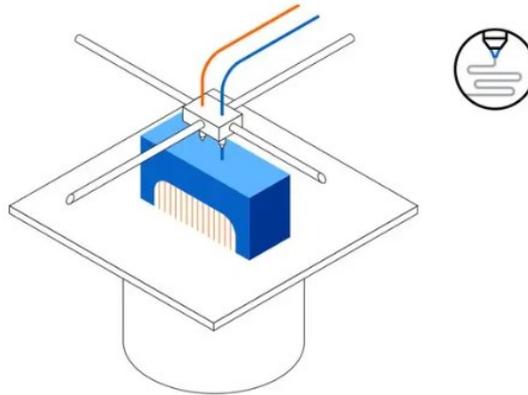


Figura 4 Schema stampa 3D FDM.

1.3. MATERIALI STAMPA 3D

In base al tipo di stampante, all'utilizzo che se ne vuole fare, al costo e alle proprietà fisiche e meccaniche, esistono molti tipi di materiali differenti da poter utilizzare nella stampa 3D. Prima del loro utilizzo, possono trovarsi sotto diversi stati, possono essere polveri, filamenti solidi o semisolidi, liquidi da trasformare chimicamente.

Le plastiche sono tra i materiali più utilizzati per la stampa 3D, questo grazie alla loro facilità di produzione, versatilità e impermeabilità, nonché al basso costo. Le plastiche sono impiegate in una moltitudine di prodotti e settori, si può avere a che fare con filamenti di plastica nelle tecniche FDM, mentre invece per parti industriali e per utilizzo finale, per avere maggiore precisione e qualità, si opta per polveri di plastica o resine di plastica.

I filamenti di ABS sono i più utilizzati nella stampa 3D, si utilizzano nella carrozzeria delle automobili, negli elettrodomestici e nelle custodie dei cellulari. Il PLA, invece, ha il vantaggio di essere biodegradabile ed è realizzato utilizzando materie prime rinnovabili come l'amido di mais.

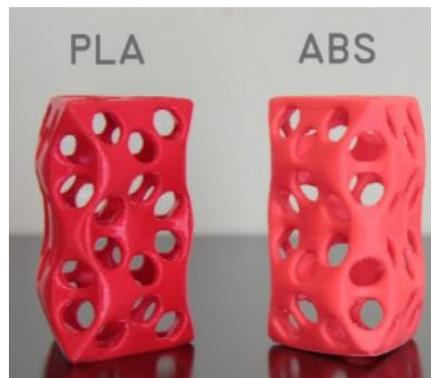


Figura 5 Confronto tra pezzi realizzati in PLA e in ABS

L' ASA è un materiale che ha proprietà simili all'ABS, ma una maggiore resistenza ai raggi UV; invece, se si vuole realizzare un oggetto che deve entrare a contatto con il cibo si utilizza il tereftalato di polietilene, o PET.

Il PC è un materiale dalla elevata resistenza concepito per applicazioni tecniche, tuttavia tende ad assorbire l'umidità dall'aria.

L'evoluzione delle tecnologie di stampa 3D ha portato allo sviluppo di una gamma completa di filamenti dalle elevate prestazioni, con caratteristiche meccaniche simili a quelle dei metalli come PEEK, PEKK o ULTEM e le loro proprietà li rendono molto interessanti nei settori aerospaziale, automobilistico e medico.



Figura 6 Pezzi realizzati con Polimeri ad Alte Prestazioni.

Il PP polipropilene è un'altra termoplastica ampiamente utilizzata nella produzione di centinaia di oggetti di uso quotidiano; poi c'è il Nylon che può essere presentato sotto forma di polvere o di filamento.

La stampa 3D con i materiali metallici, seppure meno conosciuta, sfrutta metalli come l'alluminio, principalmente utilizzato sotto forma di lega, l'acciaio che è popolare soprattutto nelle applicazioni industriali, metalli come il gallio, il cromo-cobalto per applicazioni mediche e il titanio per la sua buona resistenza alla corrosione e la sua biocompatibilità per applicazioni mediche. Invece i metalli preziosi sono principalmente impiegati in gioielleria.

Esistono infine anche materiali ibridi, che nascono dalla miscela di plastiche e polveri che danno loro un nuovo colore, una nuova finitura o ulteriori proprietà.

Tra i materiali più innovativi troviamo i filamenti ricavati da gusci marini, il cioccolato, lo zucchero, il lino, il legno, le ceneri, le cellule e tanti altri [6].

1.3.1 Polveri SLS

La stampa 3D SLS utilizza come materiale per la realizzazione degli oggetti una polvere, in particolare la polvere SLS comunemente applicata fino ad oggi è la poliammide 12 (PA 12). Essa occupa infatti il 90% del consumo industriale totale, la restante quantità è distribuita tra poliammide 11 (PA11) e materiali come il PEEK. La ragione di questi dati sta nel fatto che per realizzare polveri promettenti per l'applicazione SLS è necessario che questa abbia una combinazione di proprietà intrinseche ed estrinseche. Quando si realizza una polvere devono essere presi in considerazione la forma delle particelle, la distribuzione della polvere, i requisiti termici, reologici e ottici e solo una combinazione di proprietà particolarmente controllata porta a un'implementazione SLS di successo. Per comprendere al meglio le caratteristiche che deve avere il materiale, si può fare una analisi accurata delle cinque proprietà fondamentali: particelle e polvere (proprietà estrinseche) e ottiche, termiche e reologiche (proprietà intrinseche).

Le proprietà intrinseche sono tipicamente date da forma e dalla struttura molecolare del polimero stesso e non possono essere facilmente influenzate, mentre la lavorazione anticipata ne controlla le proprietà estrinseche.

Proprietà termiche

In un sistema SLS viene utilizzato un raggio laser CO₂ per fondere le particelle di polimero depositate in uno strato sottile, è necessaria una coalescenza localmente completa delle particelle di polimero nello strato di polvere superiore, nonché un'adesione con i precedenti strati sinterizzati. Ciò implica che la cristallizzazione dovrebbe essere inibita durante la lavorazione il più a lungo possibile, almeno per diversi strati sinterizzati. Pertanto, la temperatura di lavorazione deve essere controllata con precisione tra la fusione (T_m) e la cristallizzazione (T_c) del dato polimero, nella regione termodinamica chiamata "finestra di sinterizzazione". Se T_s (temperatura di sinterizzazione) è troppo vicina a T_c , si rischia l'arricciamento del provino, se T_s è troppo vicina a T_m , si rischia la perdita di definizione.

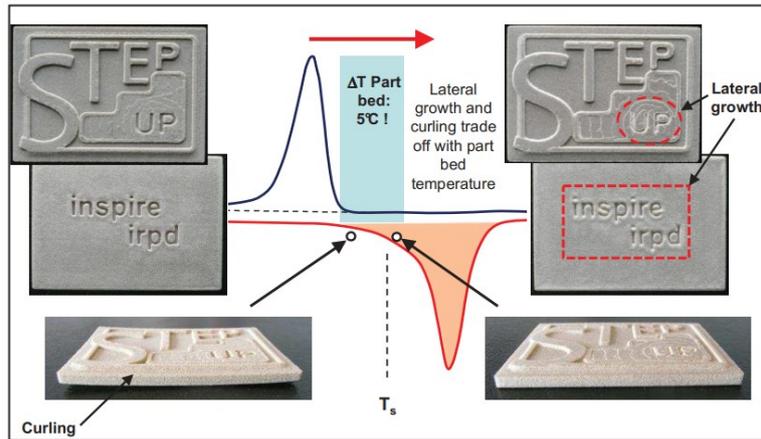


Figura 7 Problemi di elaborazione SLS per una "finestra di sinterizzazione" troppo piccola: arricciamento o crescita laterale

Proprietà ottiche

Capacità dei materiali di assorbire energia alla lunghezza d'onda del laser attuale di sinterizzazione.

Proprietà reologiche

Le polveri per la lavorazione SLS devono avere bassa viscosità e bassa tensione superficiale, altrimenti non si verifica una corretta coalescenza. Soprattutto è importante una bassa viscosità del fuso senza stress di taglio, poiché, a differenza dello stampaggio a iniezione, SLS non può fornire un'ulteriore compattazione durante la generazione del pezzo.

Particella

La forma e la superficie della particella devono essere il più possibile sferiche per indurre lo scorrimento libero. Per studiare la fluidità si determinano la massa volumica e la densità volumica (bulk e tap density), da queste si calcola il coefficiente o fattore di Hausner, $HR = \rho_{tap}/\rho_{bulk}$. Un $HR < 1,25$ significa comportamento della polvere a flusso libero e un $HR > 1,4$ significa problemi di fluidizzazione.

Polvere

Per le polveri SLS è necessaria una certa distribuzione granulometrica (PSD) per poter essere processate su apparecchiature SLS. Questa distribuzione è favorevolmente tra 20 μm e 80 μm per il sistema commerciale. La PSD viene solitamente misurata mediante sistemi di diffrazione laser.

Per far sì che la polvere rispetti queste caratteristiche, è necessario che si utilizzino i giusti processi di produzione di tali polveri. I processi più importanti per la produzione di polveri sono il processo di coestrusione, che fornisce risultati eccezionali per quanto riguarda la sfericità delle particelle e quindi il comportamento a flusso libero delle polveri, all'altro estremo della scala, il processo di macinazione che produce tipicamente particelle frantumate geometricamente con fluidità e densità della polvere notevolmente ridotte. Sia le particelle precipitate in soluzione che quelle polimerizzate presentano proprietà da buone a molto buone in termini di forma, superficie, densità della polvere e comportamento a flusso libero [7][8].

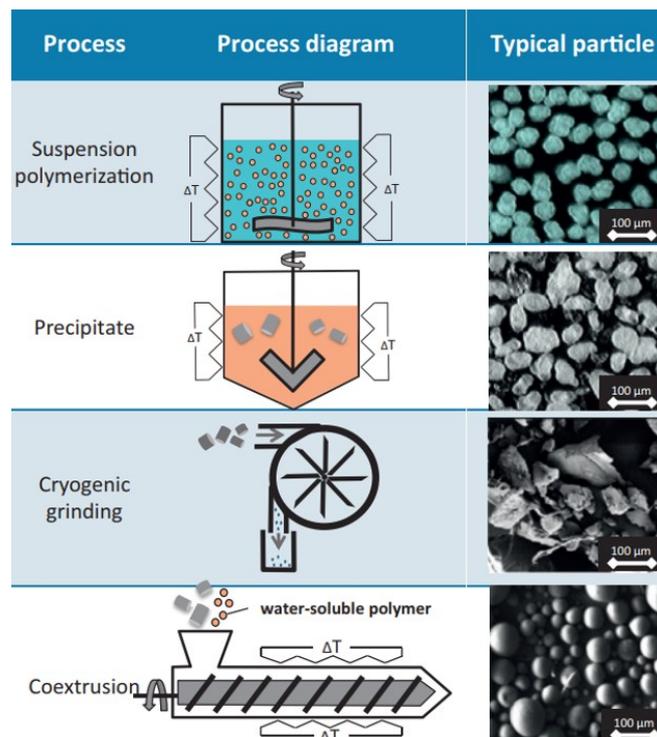


Figura 8 Metodi per la produzione di polveri polimeriche SLS

1.3.2 Materiali Compositi

I materiali compositi sono i materiali ottenuti mediante la stretta coesione di almeno due componenti, le cui caratteristiche fisiche e chimiche, sono tali da renderli diversi e reciprocamente insolubili e quindi separati tra loro. Tali materiali vengono chiamati, uno fibra o tessuto di rinforzo, l'altro matrice. L'unione di due o più costituenti di questo tipo dà luogo ad un materiale solido continuo, in grado di trasmettere e ridistribuire gli sforzi interni, dovuti alle sollecitazioni esterne, sui suoi componenti.

Esso inoltre deve essere in grado di resistere anche a carichi termici se sottoposto a differenze di temperatura, ed a quelli elettrici, quando sottoposto a campi elettrici. Il composito può essere plastico, metallico, o ceramico, è la matrice a caratterizzarlo. Le fibre di rinforzo possono essere di tipo plastico, metallico, vetroso e ceramico. Le fibre di rinforzo possono essere distinte in varie tipologie: continue, discontinue, con orientamento casuale o con una direzione predominante.

Il campo di maggiore applicazione dei materiali compositi è sicuramente il settore aeronautico e quello aerospaziale essendo settori all'avanguardia per quanto riguarda l'impiego di questi materiali. Altri campi di applicazione dei materiali compositi sono il motorsport, le autovetture e la nautica. I materiali compositi vengono utilizzati soprattutto per realizzare e sostituire parti metalliche grazie alla loro leggerezza, consentendo così un risparmio di peso, e grazie alla possibilità di creare forme aereodinamiche, consentendo un risparmio di spazio. Tra i vantaggi dei materiali compositi troviamo quindi la leggerezza, la resistenza, la rigidità, la resistenza alla corrosione, la resistenza all'usura. Queste caratteristiche si traducono in un costo di realizzazione più elevato, se paragonato ad altri metodi costruttivi più tradizionali [9].

Tra le principali fibre di rinforzo commercializzate si hanno le *fibre di vetro*, utilizzate in tubi, serbatoi, imbarcazioni, hanno come vantaggio il basso costo, la resistenza alla corrosione e la trasparenza alle radiofrequenze. Ne esistono vari

tipi: E-Glass, economico/bassa resistenza, S-Glass, miglior resistenza/rigidezza meccanica, C-Glass, resistenza alla corrosione da ambienti acidi.



Figura 9 Fibre di vetro

Le *fibre aramidiche* utilizzate per indumenti protettivi, resistenza balistica, articoli sportivi, pneumatici, possiedono una elevata resistenza specifica rispetto alle fibre di vetro, e sono più duttili e flessibili delle fibre di carbonio.



Figura 10 Fibre aramidiche

Infine, le *fibre di carbonio* utilizzate nell'aeronautica, aerospazio, trasporti, articoli sportivi, hanno elevata resistenza e rigidezza, bassa densità, un comportamento relativamente fragile, e un costo elevato.

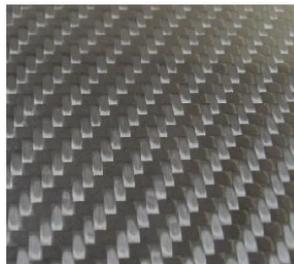


Figura 11 Fibre di carbonio

Esistono poi anche *fibre di boro* (boro depositato su filo in tungsteno), *fibre di polietilene* e *fibre ceramiche*.

Le matrici invece devono trasmettere e distribuire il carico alle fibre, mantenere le fibre nell'orientazione desiderata, proteggere le fibre dall'ambiente. Le Matrici si distinguono in *matrici polimeriche*:

-termoindurenti, che induriscono per reazione chimica tra cui poliestere, vinilestere, che hanno basso costo e resistenza ad ambiente aggressivo, e epoxy (resina epossidica), che ha proprietà meccaniche elevate;

-termoplastiche, vengono messe in forma riscaldando il materiale, questa reazione è reversibile, tra cui il polipropilene accoppiato con fibre di nylon o di vetro.

Altre matrici sono quelle *metalliche* e quelle *ceramiche* [10].

La Carbon PA è uno dei materiali compositi più utilizzati nella stampa 3D ed è un materiale polimerico ultraleggero a base di nylon rinforzato al 20% di fibra di carbonio che conferisce al materiale proprietà meccaniche di resistenza a trazione e rigidità tali da poter sostituire le leghe metalliche in alluminio.

La matrice della Carbon PA è un compound poliammidico in grado di resistere alle alte temperature, per questo è utilizzato nel settore dell'automotive in cui resistenza termica e meccanica costituiscono condizioni necessarie per l'efficienza dei veicoli.

Le applicazioni di questo materiale passano dal settore militare e aerospaziale, all'industria manifatturiera, finendo nel settore automotive dove la Carbon PA trova la sua massima espressione: pesi ridotti, consumi ed emissioni abbattuti per una efficienza dei veicoli sempre maggiore grazie alla produzione di componenti sottocofano, collettori di aspirazione d'aria, componenti strutturali e organi di trasmissione [11].

2. METODI DI ANALISI

Il capitolo tratterà in generale dei tre metodi di analisi che sono stati utilizzati per la valutazione dei due scenari di produzione, l'analisi dei costi, l'analisi LCA e l'analisi delle proprietà meccaniche.

2.1. ANALISI DEI COSTI

L'analisi dei costi del ciclo di vita (L.C.C. Life Cycle Costing) è una metodologia che consente di calcolare i costi lungo il ciclo di vita di un prodotto, attraverso l'approccio definito "dalla culla alla tomba" e quindi dalle fasi di produzione, alle fasi di uso sino allo smaltimento. Tale approccio permette di definire, sulla base di determinate specifiche, quali possono essere le risposte maggiormente efficienti dal punto di vista economico [12].

Applicando una analisi LCC, gli acquirenti di un determinato macchinario o i produttori di un determinato oggetto tengono conto dei costi di utilizzo, manutenzione e smaltimento delle risorse che non si riflettono nel prezzo di acquisto. Attraverso una analisi dei costi è possibile fare valutazioni riguardo ai principali potenziali di risparmio durante il ciclo di vita di un bene, opera o servizio, questi sono:

- Risparmio sull'uso di energia, materie prime e consumabili
- Risparmio sull'impiego della manodopera
- Risparmio su manutenzione e sostituzione
- Risparmio sui costi di smaltimento [13].

L'analisi dei costi del ciclo di vita è utilizzata in ambito manageriale per identificare i costi e i vantaggi relativi a decisioni aziendali, è infatti uno strumento di analisi fondamentale che viene utilizzato nel processo decisionale. Un'analisi dei costi permette di prendere decisioni che potrebbero migliorare i guadagni e la competitività di una azienda anche a lungo termine.

Condurre una valutazione del costo del ciclo di vita di un prodotto o servizio aiuta a predire i costi che le aziende dovranno sostenere per mettere sul mercato un nuovo prodotto. Per calcolare LCC di un prodotto o servizio, bisogna tenere conto di molte variabili di costo, come ad esempio quella di acquisto e installazione, quella relativa alle fasi di utilizzo dei prodotti e dei macchinari, quella di produzione, fino a quella di dismissione dell'oggetto prodotto o del macchinario. Dal punto di vista formale è possibile rappresentare LCC come $LCC = \text{Costo di acquisto} + \text{Costo di manutenzione e di riparazione} + \text{Costo delle materie prime} + \text{Consumo di energia} + \text{Costo consumabili} + \text{Costo manodopera} + \text{Costo smaltimento}$.

Nel calcolo del costo di ciclo di vita di un prodotto a volte si tiene conto anche delle risorse intangibili, come il design, i brevetti, la reputazione e il brand. Anche per le risorse intangibili l'analisi LCC prevede la quantificazione monetaria del costo inerente all'acquisto e al mantenimento di queste risorse.

I costi legati al brand, ad esempio, si riferiscono allo sviluppo di un marchio, alla registrazione del nome, alla costruzione di un sito web e alle spese per il marketing.

Un'analisi LCC aiuta le aziende a stimare, in termini monetari, il costo delle proprie risorse tangibili e intangibili.

L'analisi dei costi è un processo importante, permette di decidere tra due o più risorse disponibili, ovvero permette di prendere decisioni di acquisto molto più consapevoli. Questo perché la valutazione del Costo del Ciclo di Vita di un prodotto o servizio tiene in considerazione anche la manutenzione, che potrebbe essere decisiva all'acquisto di determinate materie prime a scapito di altre.

I risultati della LCC permettono alle aziende di fare investimenti intelligenti: quando si deve decidere per quali risorse optare, non si deve considerare solo il loro prezzo, ma il costo generale che l'adozione di quelle determinate risorse avrà sull'intero Costo del Ciclo di Vita del prodotto o servizio in questione.

Inoltre, permette di determinare i benefici che le risorse scelte apportano al proprio business.

Valutare se comprare o no una determinata risorsa è molto importante, usando il metodo LCC si può facilmente predire se il ritorno di investimento di una determinata risorsa vale l'investimento che si vuole compiere.

L'analisi dei costi permette di creare un budget accurato, infatti quando si conosce il costo totale delle risorse che si vogliono comprare, si può creare un budget che rappresenta le spese attuali della propria azienda: in questo modo i costi del business aziendale non saranno sottostimati.

Per definire un budget accurato si devono tenere in considerazione:

- costi;
- ricavi;
- utile.

Infine, l'analisi LCC permette di minimizzare i costi di produzione del singolo prodotto, con questa analisi infatti è possibile fare uno studio accurato su quali costi influenzino di più o di meno il costo unitario totale. Individuata la categoria di costo che maggiormente influisce sul totale si può agire cercando di ridurre tali costi.

Se i costi di ammortamento del macchinario, manutenzione, design ecc. risultano eccessivi, si può sempre fare una analisi che studia come il costo unitario totale del prodotto varia all'aumentare del volume di produzione. Se il costo, aumentando i volumi di produzione, diminuisce sensibilmente è necessario cercare di produrre di più, ovviamente cercando di saturare il macchinario entro i limiti.

I vantaggi del metodo LCC:

- in base ai risultati ottenuti è possibile agire tempestivamente per generare guadagno, o per abbassare i costi della catena di produzione di un prodotto o servizio;
- è possibile prendere decisioni efficienti in base alle valutazioni eseguite sui profitti e sui costi, all'interno di un determinato step del Ciclo di vita;
- è possibile ottenere valutazioni accurate e realistiche sul Costo del Ciclo di Vita dei prodotti;
- è possibile previsione accurata, nel lungo termine, dell'utile aziendale;
- è possibile previsione dei costi relativi a tutto il Ciclo di Vita di un prodotto o servizio [14].

2.2. ANALISI DEGLI IMPATTI AMBIENTALI

L'analisi LCA (Life Cycle Assessment), significa valutazione del ciclo di vita ed è una metodologia che permette di quantificare gli impatti ambientali relativi a un bene o a un servizio. L'LCA tratta gli aspetti ambientali e i potenziali impatti ambientali, per esempio l'uso delle risorse e le conseguenze ambientali dei rilasci, lungo tutto il ciclo di vita del prodotto, dall'acquisizione delle materie prime attraverso la fabbricazione e l'utilizzo, fino al trattamento di fine vita, riciclaggio e allo smaltimento finale. Questo tipo di approccio è definito “dalla culla alla tomba” [15].

È riconosciuto infatti che per valutare le conseguenze ambientali di un prodotto o di un'attività, si deve considerare l'impatto che risulta da ogni fase del suo ciclo di vita. La metodologia LCA risulta essere la migliore, per la comunità scientifica, soprattutto per la valutazione degli oneri ambientali. Esistono diverse definizioni di LCA, ma tutte essenzialmente seguono l'Organizzazione internazionale per la

normazione (ISO) che definisce l'LCA come la compilazione e valutazione degli input, degli output e dei potenziali impatti ambientali di un sistema di prodotto durante il suo ciclo di vita [16].

La definizione della metodologia LCA ha le proprie radici negli anni Settanta, durante i quali si iniziarono a valutare il profilo ambientale e il consumo di risorse connessi alla produzione di alcuni contenitori, si ebbe poi un ulteriore sviluppo nel decennio successivo, con un numero crescente di studi sugli imballaggi. Nel 1990 la Setac (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) utilizzò per la prima volta in un report l'espressione Life Cycle Assessment, accompagnata dalla struttura generale che caratterizza tuttora tale strumento. Al giorno d'oggi, il riferimento normativo internazionale per la realizzazione di studi LCA è composto da due norme ISO che fanno parte della serie 14000, dedicata alla gestione ambientale: l'ISO 14040, contenente i principi e il quadro riassuntivo, e l'ISO 14044, che fornisce i requisiti e le linee guida. Questo tipo di analisi può essere applicata a diversi contesti lavorativi.

Portare avanti uno studio LCA su dei prodotti, a livello aziendale, permette di avere una visione più chiara e completa dei propri processi. Questo fa sì che sia possibile avviare una ottimizzazione della catena produttiva e distributiva, dato che questa analisi può essere utilizzata per valutare quale sia la fase o il processo che causa i maggiori impatti o per confrontare preventivamente diverse alternative e scegliere quella più ambientalmente sostenibile dal punto di vista dell'intero ciclo. La scelta dell'alternativa più sostenibile può risultare molto importante per le soluzioni basate sui principi di economia circolare, allo scopo di verificare che quelle adottate o ipotizzate siano in grado di apportare davvero un vantaggio in termini di riduzione degli impatti.

Il Life Cycle Assessment è inoltre di supporto per la definizione di schemi di etichettatura ambientale, è uno strumento aggiuntivo nel processo decisionale in una ottica strategica anche per enti pubblici che attuano politiche ambientali. La stessa Commissione Europea si riferisce a una analisi LCA in diversi documenti e iniziative [17].

Lo studio dell'LCA prevede quattro fasi:

1) la fase di definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione. Il campo di applicazione, i limiti del sistema e il livello di dettaglio dell'LCA dipende dall'utilizzo previsto dallo studio. La profondità e l'ampiezza dell'LCA possono differire in modo considerevole in funzione dell'obiettivo

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

3) la fase di valutazione degli impatti, fase LCIA è la terza fase dell'LCA. In questa fase lo scopo è di fornire informazioni aggiuntive per contribuire a valutare i risultati LCI del sistema di prodotto in modo da giungere a una migliore comprensione del loro significato ambientale.

4) la fase di interpretazione dei risultati, è la fase finale della procedura LCA, nella quale i risultati vengono riepilogati e discussi, secondo la definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione, come base per conclusioni, raccomandazioni e decisioni [15].

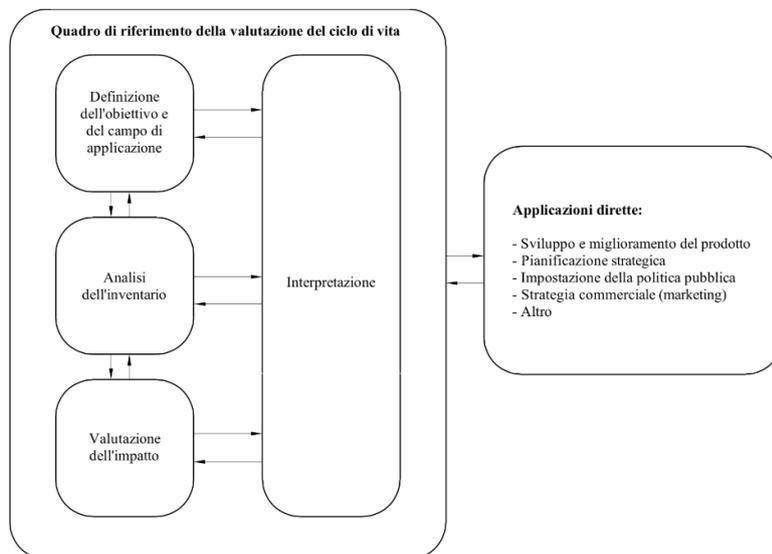


Figura 12 Schema processo LCA

2.2.1 Definizione Dell'obiettivo

La definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione di una LCA fornisce una descrizione del sistema in termini di confini del sistema, scopo e unità funzionale. L'obiettivo specifica quale sia l'applicazione futura dei risultati ottenuti, le ragioni per cui vengono generati questi risultati e il pubblico previsto per questi risultati. Lo scopo di uno studio LCA definisce la natura del prodotto in esame e riassume il livello di dettaglio con cui viene esaminato.

L'unità funzionale è la base che consente di confrontare e analizzare beni o servizi. Lo scopo principale di un'unità funzionale è fornire un riferimento a cui sono correlati gli input e gli output. Questo riferimento è necessario per garantire la comparabilità dei risultati dell'LCA. L'unità funzionale di solito non è solo una quantità di materiale, la comparabilità si verifica se gli oneri ambientali sono attribuiti a un'unità.

I confini di sistema definiscono i processi da includere nel sistema. Nello stabilire il confine del sistema, viene tracciata una linea immaginaria attorno al ciclo di vita. Sono inclusi i processi dell'estrazione delle materie prime e della produzione di materiali ausiliari, oltre alla contabilizzazione dei flussi energetici e dei materiali del prodotto primario. Anche lo smaltimento, i sottoprodotti e i rifiuti sono inclusi nel limite del ciclo di vita.

2.2.2 Analisi Dell'inventario

L'analisi dell'inventario prevede la raccolta dei dati e le successive operazioni di calcolo per quantificare gli input e gli output di un sistema di prodotti e generare l'inventario del ciclo di vita. La catena di processo è la sequenza di attività specifiche coinvolte nella produzione, nell'uso e nello smaltimento finale del prodotto in esame. I dati per ciascun processo unitario all'interno del confine del sistema possono essere classificati nel seguente modo: Input energetici, input di

materie prime, input ausiliari e altri input fisici; Prodotti, coprodotti e rifiuti; Emissioni nell'aria, scarichi nell'acqua e nel suolo; Altri aspetti ambientali.

La fase di raccolta di dati è la più impegnativa ed è quella che richiede più tempo nell'esecuzione di una LCA. Ci sono infatti dati disponibili in letteratura che richiedono un dispendio di tempo minore mentre ci sono dati che devono essere ricavati da lunghe procedure di misurazione e di calcolo. La raccolta dati è solitamente suddivisa in due tipologie principali:

-Dati in primo piano (o primari);

-Dati di sfondo (o secondari).

I dati in primo piano si riferiscono ai dati specifici ottenuti direttamente dalla modellazione di un sistema di prodotti. Questi dati primari vengono solitamente ottenuti tramite misurazioni o analisi dirette. Di solito sono i dati che descrivono un particolare sistema di prodotti. I dati di base sono dati per materiali generici, energia, trasporti e sistemi di gestione dei rifiuti, che sono generalmente dati trovati in banche dati e letteratura. Per produrre l'inventario del ciclo di vita è però necessaria una combinazione di dati in primo piano e di sfondo.

2.2.3 Analisi Degli Impatti Ambientali

La fase LCIA ha lo scopo di descrivere gli impatti dei carichi ambientali quantificati nell'analisi dell'inventario. La valutazione dell'impatto è il luogo in cui vengono valutati gli effetti reali sugli oneri ambientali selezionati. Questa fase presenta quindi informazioni sugli impatti sull'ambiente, anziché solo informazioni sulle emissioni e sull'uso delle risorse. Un ulteriore scopo di questa fase è quello di aggregare le informazioni provenienti dalla fase precedente in un numero inferiore di parametri.

La fase di valutazione dell'impatto è suddivisa in diversi elementi. I principali elementi che compongono questa fase sono:

Selezione e identificazione delle categorie di impatto: gli impatti vengono quindi raggruppati in categorie e, per quantificare i danni finali, queste categorie sono a loro volta riferite a delle aree di protezione;

Classificazione: significa semplicemente aggregare i dati di inventario alla categoria di impatto;

Caratterizzazione: è dove vengono calcolati i contributi relativi delle emissioni e dei consumi di risorse a ciascun impatto ambientale;

Normalizzazione: qui i risultati vengono resi adimensionali per consentire il confronto dell'importanza relativa di ciascuna categoria di impatto;

Raggruppamento: delle categorie di impatto, per facilitare la comprensione, in sottogruppi;

Ponderazione: le categorie di impatto sono ponderate l'una rispetto all'altra [16].

Le categorie di impatto più significative e che verranno anche utilizzate nello studio per i capitoli successivi, sono disponibili all'interno del software SimaPro. Questo software è stato utilizzato per la realizzazione della analisi LCA. I più importanti metodi di valutazione degli impatti sono:

ReCiPe 2016

ReCiPe 2016 è un metodo per calcolare gli indicatori della categoria di impatto del ciclo vita del prodotto. ReCiPe 2016 include sia categorie di impatto midpoint (orientate al problema) che endpoint (orientate al danno), disponibili per tre diverse prospettive: individualista (I), gerarchica (H) ed egualitaria (E). I fattori di caratterizzazione sono rappresentativi della scala globale.

ReCiPe comprende due serie di categorie di impatto con relative serie di fattori di caratterizzazione. A livello intermedio, vengono affrontate 18 categorie di impatto.

CED- Cumulative Energy Demand

Il metodo di calcolo della Domanda Cumulativa di Energia comprende il consumo di tutti i processi compresi nel ciclo vita ed è espresso in MJ. Questa versione predefinita del CED si basa sui valori di riscaldamento più elevati dei combustibili. I fattori di caratterizzazione sono indicati per le risorse energetiche suddivise in cinque categorie di impatto: Non rinnovabili, fossili; Non rinnovabile, nucleare; Rinnovabile, biomassa; Rinnovabili, eolico, solare, geotermico; Rinnovabili, acqua.

GWP100 – Global Warming Potential

Il GWP100 è un metodo utilizzato per descrivere le caratteristiche radiative integrate nel tempo di gas a effetto serra ben miscelati su un orizzonte temporale di 100 anni. Le emissioni totali di gas serra per un inventario di prodotto sono calcolate come la somma delle emissioni di gas serra, in unità di CO₂-eq, di tutti i processi in primo piano e dei processi di fondo significativi all'interno del confine del sistema [18].

2.2.4 Interpretazione Dei Risultati

L'interpretazione è la fase dell'LCA nella quale i risultati ottenuti nell'analisi d'inventario e nella valutazione d'impatto vengono combinati fra loro. La fase di interpretazione dovrebbe fornire risultati coerenti con l'obiettivo e il campo di applicazione definiti, così da poter trarre conclusioni, spiegare le limitazioni e fornire raccomandazioni. I risultati dell'interpretazione possono prendere la forma di conclusioni e raccomandazioni indirizzate a coloro che hanno fatto l'analisi per prendere decisioni, in coerenza con l'obiettivo e il campo di applicazione. Inoltre, è importante che tali risultati dello studio si presentino in modo facilmente comprensibile, completo e coerente, in conformità con la definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione dello studio.

Questa fase può, infine, generare un procedimento iterativo di riesame e di revisione del campo di applicazione, come anche una revisione della natura e della qualità dei dati raccolti per conseguire l'obiettivo definito [15].

2.2.5 SimaPro

SimaPro è un software che fornisce informazioni dettagliate sulle prestazioni ambientali di prodotti e servizi. È uno dei principali software LCA da oltre 30 anni e viene utilizzato in più di 80 paesi da aziende, società di consulenza e università. SimaPro è stato progettato per fornire informazioni basate sulla scienza con piena trasparenza ed evitare processi black-box.

È una soluzione per raccogliere, analizzare e monitorare i dati sulle performance di sostenibilità di prodotti e servizi. Il software può essere utilizzato per varie applicazioni come il reporting di sostenibilità, l'impronta di carbonio e acqua, la progettazione del prodotto, la generazione di dichiarazioni ambientali di prodotto e la determinazione degli indicatori chiave di prestazione.

Con SimaPro è possibile modellare e analizzare facilmente cicli di vita complessi in modo sistematico e trasparente, misurare l'impatto ambientale di prodotti, processi e servizi in tutte le fasi del ciclo di vita, infine permette di identificare in ogni anello della catena di approvvigionamento, i punti critici, dall'estrazione delle materie prime alla produzione, trasporto e distribuzione, utilizzo, smaltimento e riciclo [19].

SimaPro è un software LCA che offre una vasta gamma di funzionalità. Contiene i più recenti metodi e database e offre la possibilità di creare grafici e tabelle. Dispone anche di diverse estensioni per facilitare gli studi di LCA o per rispondere a specifiche esigenze dei fruitori dei risultati. Questo favorisce la collaborazione con altri reparti aziendali e fornisce strumenti concreti per

migliorare il ciclo di vita di prodotti, processi o tecnologie e ridurre l'impatto della propria azienda.

SimaPro è l'unico software LCA che offre un controllo completo degli studi di LCA, permettendo scelte più consapevoli, calcoli avanzati ed evitando assunti non espliciti. Offre trasparenza completa nel lavoro. È uno strumento scientifico che offre soluzioni per ogni utente, con una gamma di versioni per rispondere a diverse esigenze sia per le aziende che le università. Permette di svolgere qualsiasi studio di LCA, include una varietà di database LCI, come Ecoinvent o Agri-footprint. SimaPro si basa sull'affidabilità scientifica della LCA, il metodo più usato per valutare la sostenibilità di un prodotto. È stato sviluppato e continuamente migliorato nella ricerca e negli sviluppi metodologici ed è lo strumento scelto da chi desidera svolgere LCA conformi alle norme ISO 14040-14044 [20].

2.3. ANALISI DELLE PROPRIETÀ MECCANICHE

Test di Trazione

Il comportamento di un materiale in relazione al rapporto tra le tensioni cui è soggetto e le deformazioni che si destano può essere lineare, elastico o plastico.

Nel caso di un comportamento lineare, la deformazione è direttamente proporzionale alla tensione applicata. Nel caso di un comportamento elastico, le deformazioni si annullano al cessare delle tensioni applicate, la deformazione elastica è legata allo stiramento dei legami interatomici nei solidi che si interrompe al cessare delle tensioni.

Nel caso di un comportamento plastico, rimangono deformazioni permanenti al cessare delle tensioni applicate, la deformazione plastica è legata allo slittamento tra piani di atomi nei grani cristallini, questo accade in modo incrementale a causa del movimento delle dislocazioni sotto tensioni elevate.

Per questo motivo, la deformazione plastica non provoca variazioni di volume nel materiale.

Il comportamento sforzi-deformazioni di un materiale è generalmente caratterizzato mediante la prova di trazione. Il test di trazione consiste nel sottoporre un provino di geometria e dimensioni opportune, solitamente standardizzate da norme tipo ISO, ad una forza di trazione unidirezionale che cresce da zero ad un valore tale da determinarne la rottura. Il test consiste quindi nel misurare sia la forza applicata che la deformazione del provino. Generalmente il provino è una barretta a sezione costante, in molti casi esso è costituito da estremità più robuste da afferrare e una porzione più sottile che costituisce il tratto utile per la prova di lunghezza.

Il provino viene collegato ad una macchina di prova dalle estremità, mediante afferraggi, uno dei quali è fisso, e l'altro è solidale al pistone attuatore. Lo spostamento di quest'ultimo permette l'applicazione del carico.

Durante la prova si misurano la forza applicata mediante un apposito trasduttore e lo spostamento dell'elemento mobile, in molti casi si misura direttamente la deformazione con un estensimetro. I dati misurati sono riportati su un diagramma tensioni nominali-deformazioni nominali (σ - ϵ), nel quale le prime sono date dal rapporto tra il carico applicato e l'area iniziale del provino, le seconde dal rapporto tra l'allungamento totale e la lunghezza iniziale.

Per valutare i risultati dei test di trazione uniassiale del provino, si utilizzano due parametri principali:

Modulo di Young

Il rapporto fra tensione applicata e deformazione è una costante tipica del materiale che prende il nome di modulo di Young, espresso in MegaPascal. Detto anche modulo elastico, è una grandezza il cui valore dipende dal materiale in esame ed esprime la tendenza del materiale ad allungarsi o ad accorciarsi per l'azione di una forza di carico.

Tensione massima

Descrive la massima tensione raggiunta dal provino nel test [21].

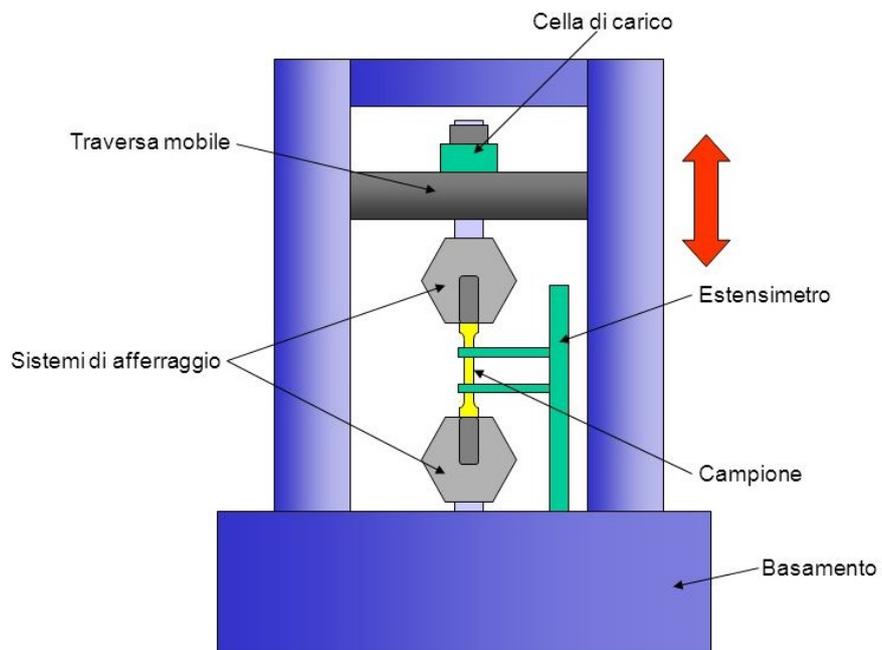


Figura 13 Macchina da prova per test di Trazione

3. CASI DI STUDIO

In questo capitolo verranno presentati i casi di studio e i processi eseguiti per giungere alle conclusioni delle analisi.

3.1. SINTERIZZAZIONE LASER SELETTIVA

È una tecnologia di produzione additiva, il suo funzionamento è molto semplice: un raggio laser sinterizza il materiale in polvere in una camera sigillata, la camera viene preriscaldata appena al di sotto della temperatura di fusione della polvere, il laser viene utilizzato solo per aggiungere una piccola quantità di energia per sciogliere la polvere. Al termine della sinterizzazione dello strato, le piattaforme vengono riposizionate e un meccanismo dedicato reintegra lo strato di polvere da una camera di alimentazione a quella di stampa e il processo viene ripetuto. Nella tecnologia SLS non sono necessari supporti in quanto la polvere non sinterizzata, che circonda le stampe nella camera di stampa, diventa essa stessa un supporto [22].

In particolare, si analizzerà la tecnologia SLS sviluppata dalla Sinterit. I provini sono stati realizzati dalla macchina Lisa X, essa si distingue dalle altre per velocità di costruzione che può raggiungere i 14 mm/h, con la possibilità di poter prototipare e iterare più velocemente. Un'alto vantaggio di questa macchina è il volume di costruzione più grande, Lisa X è la stampante SLS compatta che può stampare più elementi e oggetti più grandi. Inoltre, si possono stampare una vasta gamma di materiali, questo fa sì che il raggio di applicazione sia molto vasto. Infine, rappresenta un sistema di stampa aperto, non avendo nessun parametro predefinito si ha una flessibilità anche maggiore.



Figura 14 Stampante 3D Lisa X

3.1.1. Fasi del Processo SLS

Il processo di stampa SLS è composto dalle seguenti fasi:

Preparazione della stampante: per prima cosa si carica il progetto di stampa, dopo di che la macchina si muoverà internamente creando nel feed bed, ovvero il letto in cui non avviene la stampa, lo spazio adatto per inserire il volume di polvere necessario alla realizzazione dei provini. Successivamente si inserisce la polvere per mezzo di un imbuto e poi si comprime tale polvere per eliminare le bolle di aria che si potrebbero formare. La fase di preparazione del macchinario comprende anche la pulizia dello stesso, inserita la polvere infatti si puliscono con alcool e veline le guide del rullo e il pirometro che misura la temperatura interna. Successivamente si utilizza un olio per lubrificare tali guide. Fatto ciò, il rullo inizia a muoversi distribuendo uniformemente la polvere su tutto il piano di lavoro della stampante e anche sul print bed, ovvero il letto di stampa. Si chiude il coperchio e si conclude la preparazione.

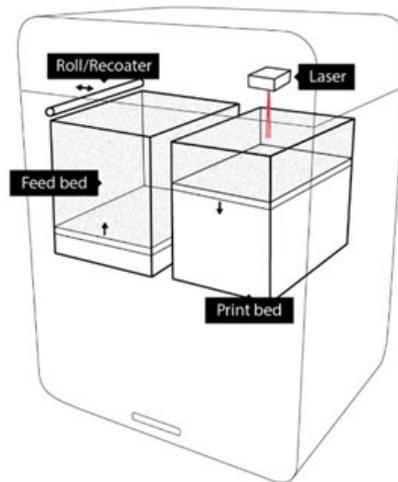


Figura 15 Stampante Lisa X internamente

Stampa: un sottile strato di polvere viene depositato sulla piattaforma all'interno della camera di stampa, la stampante riscalda la polvere fino al raggiungimento di una temperatura di poco inferiore al punto di fusione del materiale. In questo modo, il laser può facilmente aumentare la temperatura di aree specifiche del letto di polvere, mentre traccia il modello per realizzare una parte solida. La piattaforma si abbassa di un livello all'interno della camera di stampa, e il processo si ripete per ogni strato, fino al completamento delle parti. Quando la stampa è terminata, è necessario aspettare per il raffreddamento della camera di stampa [4].

Pulizia pezzo: dopo che un lavoro di stampa è stato completato, si rimuove il cake dalla camera di stampa, per mezzo del IO Box in modo che possa essere facilmente spostata dall'area della stampante. Posizionato il cake sulla Stazione di Movimentazione Polveri (PHS), si attiva tale macchina per aspirare e raccogliere la polvere in eccesso. Il processo di setacciatura e rinfrescamento avviene sotto il piano di lavoro della PHS, il modulo di vagliatura setaccia tutta la polvere versata durante il lavoro e la prepara per essere riutilizzata. Nella stazione di movimentazione polveri per mezzo di pennelli, aria compressa e griglie di aspirazione si passa alla pulizia del provino.

Pulizia macchina: si passa poi alla pulizia della stampante per mezzo del tubo di aspirazione presente nella stazione di movimentazione polveri. Dopo la pulizia delle polveri rimaste nella macchina, si svuota il contenitore del troppopieno, overflow container, nella stazione di movimentazione polveri per procedere al recupero quasi totale delle polveri.

Sabbiatura: per la migliore pulizia superficiale dei provini dai residui di polvere viene utilizzata una sabbiatrice che utilizza aria compressa e sabbia per le stampe SLS. Questa viene attaccata per mezzo di un tubo di aspirazione ad una aspirapolvere Atex che consente di aspirare la sabbia utilizzata per la pulizia e di riciclarla. La pistola di sabbiatura manuale garantisce precisione, mentre l'ugello di sabbiatura montato a parete consente di ruotare liberamente gli oggetti [23].



Figura 16 Stampante, PHS, Sabbiatrice

3.1.2. Analisi LCA

Si è condotta un'analisi del ciclo di vita (LCA) per valutare gli impatti ambientali associati al processo di produzione di un provino di materiale plastico realizzato attraverso la tecnologia di sinterizzazione laser selettiva. Di seguito, verranno

illustrate le fasi dell'analisi. Per le fasi di Analisi di Inventario e Valutazione degli impatti ambientali si è utilizzato il software Simapro.

3.1.2.1. Definizione degli Obiettivi

L'obiettivo dell'analisi è di valutare gli impatti ambientali di tutti i processi produttivi di un provino di trazione realizzato con polvere di PA12. L'unità funzionale è definita come un provino di trazione che presenta caratteristiche definite, realizzato utilizzando lo scenario di produzione SLS.



Figura 17 Provino di trazione in PA12

Si farà una valutazione del ciclo vita “dalla culla alla tomba” che comprende all'interno dei confini di sistema tutte le unità di processo dall'estrazione delle materie prime necessarie al processo produttivo, alle fasi di lavorazione, imballaggio e trasporto, allo smaltimento del prodotto a fine vita ed eventuale riciclaggio.

Pertanto, i confini del sistema analizzato includono le seguenti fasi:

- Estrazione materia prima
- Produzione Polvere PA12
- Imballaggio e Trasporto
- Processamento SLS
- Fine vita
- Riciclo

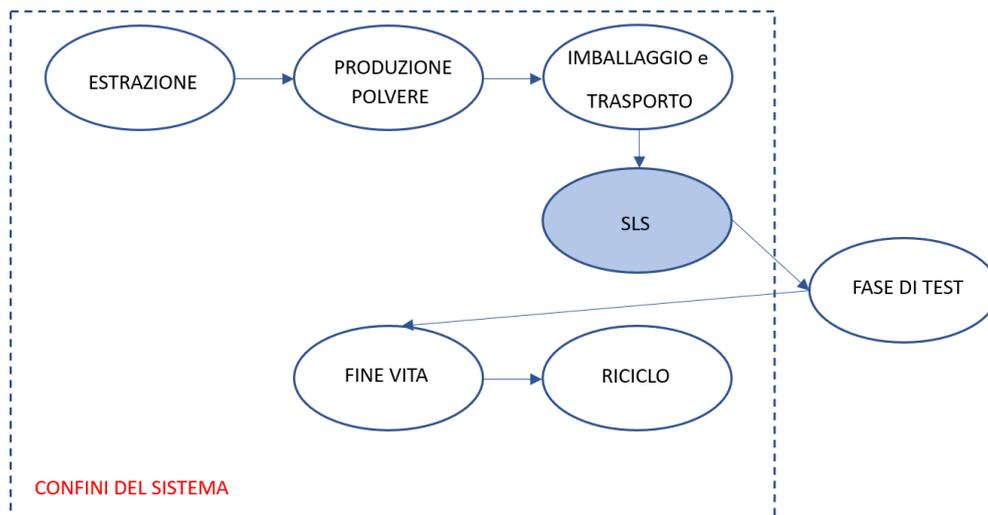


Figura 18 Confini di sistema del processo di stampa SLS

La fase di estrazione e di produzione comprende i consumi energetici, le risorse e i trasporti per la produzione della polvere di poliammide 12. Questi tipi di consumi sono compresi anche nella fase di processamento SLS che è costituita dalle fasi di Preparazione Macchina, Stampa, Pulizia Pezzo, Pulizia Macchina e Sabbiatura.

3.1.2.2. Analisi dell’Inventario

In questa fase sono stati inseriti i dati di inventario in Input al sistema come “Parametri” in SimaPro. Tali dati indicano il peso dei materiali utilizzati, i consumi energetici, il peso dei materiali richiesti per l’imballaggio e i trasporti. Questi dati sono stati presi e ricavati da misurazioni dirette effettuate, in particolare i Tempi e Consumi Energetici sono stati misurati attraverso uno strumento di misurazione della corrente elettrica attaccato direttamente alla presa di corrente.

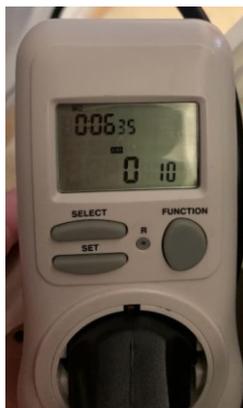


Figura 19 Misuratore dei consumi elettrici

Nella tabella sono presenti anche i tempi necessari alla Preparazione Macchina, Stampa, Pulizia Pezzo, Pulizia macchina, Sabbiatura e il trasporto relativo alla polvere di poliammide 12.

Articolo	Quantità
Materiali in input	
Polvere PA12	0,004196 kg
Imballaggio Cartone	0,000268 kg
Imballaggio Pluriball	0,000033 kg
Bottiglia HDPE polvere	0,000376 kg
Tempi	
Preparazione Macchina	13 min
Stampa	960 min
Pulizia Pezzo	6 min
Pulizia Macchina	14 min
Sabbiatura	11 min
Consumi energetici	
Preparazione Macchina	0,01 kWh
Stampa	15,01 kWh
Pulizia Pezzo	0,10 kWh
Pulizia Macchina	0,22 kWh
Sabbiatura	0,13 kWh
Trasporto	
Trasporto Polvere	7,06585 kgkm

Tabella 1 Dati in input SLS

Nelle categorie Tempi e Consumi Energetici i dati sono riferiti alla produzione di otto provini di trazione, per rispettare l'unità funzionale definita inizialmente, quando si richiamano i parametri corrispondenti, all'interno delle "Fasi del prodotto", si considera una quantità del parametro pari a un ottavo del valore

totale. Questi dati, per appunto, sono stati poi inseriti nella sezione “Fasi del prodotto” del software SimaPro, che comprende l’Assemblaggio e lo Scenario di fine vita.

L’assemblaggio è suddiviso in ulteriori sottogruppi per facilitare l’inserimento dei dati:

-Materiali SLS

-Consumi energetici SLS

-Fine processamento SLS

-Trasporto e Imballaggio SLS

Mentre lo Scenario di fine vita comprende il riciclo della plastica e del cartone utilizzati per l’Imballaggio e della Poliammide con cui è realizzato il provino.

3.1.2.3. Valutazione degli Impatti

Per la valutazione degli effetti degli impatti ambientali dei processi di produzione, sono stati utilizzati i dati in uscita forniti da SimaPro. Questi dati sono stati esportati in un foglio di calcolo Excel e organizzati in grafici di facile interpretazione. Sono state considerate le seguenti categorie di impatto: la Cumulative Energy Demand (CED), il Global Warming Potential (GWP), e ReCiPe Midpoint. Il CED (Cumulative Energy Demand) espresso in MJ (megajoule), indica il consumo totale di energia associato al processo, ovvero tutta l’energia che serve complessivamente per il processo. Considera anche l’efficienza della produzione dell’energia stessa. In questo metodo i fattori di caratterizzazione sono dati per le risorse energetiche, esse sono suddivise in 5 categorie di impatto: Fossili non rinnovabili, Non rinnovabili-nucleari, Biomassa rinnovabile, Rinnovabili-eolichesolari-geotermiche e Fonti rinnovabili-acqua.[18]

L’ IPCC 2021 GWP100(Global Warming Potential) espresso in kg CO₂-eq (kilogrammi CO₂ equivalenti), rappresenta il potenziale di riscaldamento globale

di un gas ad effetto serra rispetto a quello dell'anidride carbonica, in un arco di cento anni [24].

E infine il ReCiPe 2016 Midpoint (H), racchiude 18 categorie di danno che si concentrano su problematiche ambientali e permettono una valutazione completa degli impatti del prodotto/processo. Consente di capire se ci sono dei problemi singoli associati ad un solo prodotto.

L'interpretazione dei risultati verrà svolta nel capitolo successivo.

3.1.3. Analisi dei Costi

L'analisi dei costi o LCI (Life Cycle Costing) permette di calcolare i costi lungo tutto il ciclo di vita dell'oggetto, con un approccio definito "dalla culla alla tomba", in questo caso si è posta la concentrazione soprattutto su una analisi che si riferisce alla fase di produzione del provino, tralasciando la fase di utilizzo e smaltimento per il calcolo dei costi. Si è tenuto conto del costo delle materie prime, dei consumabili, della manodopera, del macchinario e dell'energia consumata durante la fase di produzione.

L'analisi dei costi è stata fatta tenendo conto del costo della Polvere di PA12 che è dipendente dal peso del provino, dell'energia che è dipendente dal consumo energetico misurato durante l'analisi LCA, della manodopera che è dipendente dal tempo di realizzazione del provino anche esso misurato nella analisi LCA e del design che è dipendente dal numero di provini che si realizza. Per il calcolo dei costi si è partiti da una tabella in cui sono stati inseriti tutti i dati necessari per il calcolo del costo totale della fase di produzione di un provino di trazione realizzato in PA12.

Anche in questo caso i dati riferiti ai Tempi e all'Energia consumata sono riferiti a 8 provini, si dovranno dividere per 8 per ottenere il valore associato ad un singolo provino di trazione.

INPUTS		UNITÀ	VALORE
Materiali	Costo materie prime	€/kg	130
	Massa provino	kg	0,004196
	Volume provino	cm3	4,51221
Macchina Lisa X	Costo acquisto macchina	€	30000
	vita utile	anni	8
	Costo infrastrutture (% costo macchina)	%	0,01
	Costo manutenzione (% costo macchina)	%	0,03
	tempo attività macchina	%	80%
	ore/giorno	h	18,00
	giorni/settimana	d	5,00
Sabbiatrice	Costo acquisto macchina		1590,00
	Tempo attività macchina	%	40,00%
	ore/giorno	h	18,00
	giorni/settimana	d	5,00
Processi	Tempo stampa	h	16
	Tempo preparazione macchina	h	0,22
	Tempo pulizia pezzo	h	0,1
	Tempo pulizia macchina	h	0,23
	Tempo sabbiatura	h	0,18
	Design	h	10
	Volume prodotti	parti	8
	Costo lavoro	€/h	30
	Costo designer	€/h	35
	Energia	Costo energia	€/kWh
Preparazione macchina		kWh	0,01
Stampa		kWh	15,01
Pulizia pezzo		kWh	0,1
Pulizia macchina		kWh	0,22
Sabbiatura		kwH	0,13

Tabella 2 Dati di costo SLS

3.1.4. Analisi delle Proprietà Meccaniche

In questa fase è stato effettuato il test di trazione, che si è svolto nel laboratorio di chimica dell'Istituto Tecnico Tecnologico "G. e M. Montani" a Fermo. La macchina con cui è stato svolto il test di trazione è una Quasar 5 della azienda Galdabini, dotata di sistema rigido a doppia colonna con portata massima di 5 kN. Tale macchina è adatta a materie plastiche e materiali compositi, inoltre presenta una risoluzione estremamente elevata delle letture del carico e della corsa, con velocità minima di prova di 0.0005 mm/min, per alte prestazioni e risultati più accurati. Dotata di estensore ottico laser per la misurazione non a contatto dell'allungamento per provini in plastica. Per garantire una corretta misurazione della deformazione, è necessario segnare sul provino due riferimenti a contrasto con il colore del provino. In questo modo il software con cui si comanda la

macchina è in grado di vedere la zona interessata che subirà l'allungamento e l'estensometro laser riesce a misurare la deformazione.

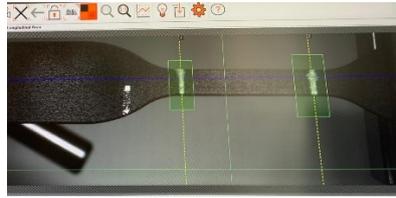


Figura 20 Software di controllo della macchina di trazione

Il test di trazione è stato ripetuto per 3 provini di trazione realizzati in poliammide 12, la procedura seguita per il test di trazione è costituita dalle seguenti fasi:

- Misurazione dello spessore e della larghezza dei provini con un calibro digitale. Si prendono tre misure di spessore e larghezza, e si fa la media delle tre.
- Inserimento dei valori di spessore e larghezza nel software informatico con cui si comanda la macchina.
- Fissaggio del provino al macchinario e successivo controllo affinché il software segnali l'area tra i due riferimenti presenti sul provino.
- Test di trazione. Durante il test l'estensometro misura le deformazioni del provino.



Figura 21 Provino durante il test di trazione.

3.2. MODELLAZIONE A DEPOSIZIONE FUSA

Il processo di stampa FDM, che sta per modellazione a deposizione fusa, è una tecnologia di stampa additiva. Quando si parla di FDM si descrive in realtà il processo FFF, la fabbricazione di filamenti fusi. La FFF è una delle tecnologie di stampa 3D commerciali più popolari al giorno d'oggi, si tratta principalmente di una tecnologia che utilizza l'estrusione di materiali. Il processo FDM si occupa anche di materiali compositi, nei materiali compositi la plastica viene rinforzata con riempitivi che possono variare dai metalli alle sostanze vegetali, inclusi molti composti organici

Il processo di stampa FDM parte da una bobina di filamento costituito da materiale termoplastico. Il filamento viene alimentato nell'ugello, dove viene riscaldato ed estruso per depositare strati di materiale sul piano di costruzione. Il piano di costruzione si raffredda e solidifica il materiale depositato. L'estrusore segue istruzioni specifiche ottenute da software dedicati per depositare il materiale in modo preciso. Durante il processo, il piano di costruzione si abbassa gradualmente. Questo ciclo si ripete fino al completamento della parte desiderata.

In genere, i pezzi ottenuti tramite questa tecnologia non richiedono processi di post-lavorazione, e la tolleranza di stampa può variare da 0,05 mm a 0,5 mm.

La tecnologia FDM offre la possibilità di personalizzare il riempimento del componente desiderato, consentendo una riduzione nell'uso di materiale, nei costi e nel tempo di stampa.

La stampante 3D, che viene utilizzata in questo caso, è la RobozeOne+400 dell'azienda italiana Roboze.

Il materiale stampato con questa stampante è Carbon PA, poliammide rinforzata con fibre corte di carbonio per un contenuto in peso pari al 20%.



Figura 22 RobozeOne+400

Il processo di stampa FDM è composto dalle seguenti fasi:

Asciugatura: per ridurre il contenuto di umidità nel filamento di poliammide, la bobina di filamento di materiale composito viene essiccata per 2 ore a 120°C.

Riscaldamento: durante la stampa 3D, il materiale viene mantenuto in un'atmosfera controllata a 70°C per evitare l'assorbimento di umidità.

Stampa: la temperatura di estrusione è 240°C, quella della piastra è 45°C [25].

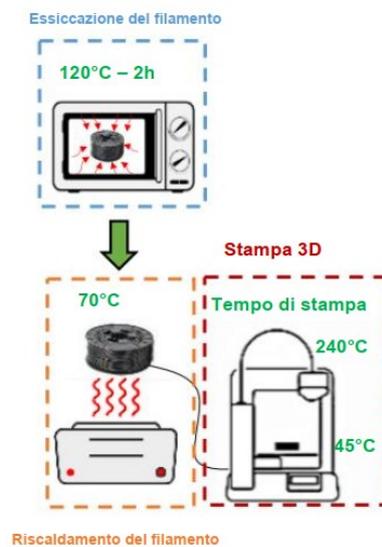


Figura 23 Fasi del processo FDM

3.2.1. Analisi LCA

Si è condotta un'analisi del ciclo di vita (LCA) per valutare gli impatti ambientali associati al processo di produzione di un provino di materiale composito, realizzato attraverso la tecnologia di modellazione per deposizione fusa. Di seguito, verranno illustrate le fasi dell'analisi. Per le fasi di Analisi di Inventario e Valutazione degli impatti ambientali si è utilizzato il software Simapro.

3.2.1.1. Definizione degli Obiettivi

L'obiettivo dell'analisi è di valutare gli impatti ambientali di tutti i processi produttivi di un provino di trazione realizzato con Carbon PA. L'unità funzionale è definita come un provino di trazione che presenta caratteristiche definite, realizzato utilizzando lo scenario di produzione FDM.



Figura 24 Bobina di Filamento di Carbon PA

Si farà una valutazione del ciclo vita “dalla culla alla tomba”, che comprende all'interno dei confini di sistema tutte le unità di processo dall'estrazione delle materie prime necessarie al processo produttivo, alle fasi di lavorazione, imballaggio e trasporto, allo smaltimento del prodotto a fine vita ed eventuale riciclaggio.

Pertanto, i confini del sistema analizzato includono le seguenti fasi:

- Estrazione materie prime
- Produzione Poliammide

- Produzione Fibre di Carbonio
- Produzione Filamento
- Trasporto e Imballaggio
- Asciugatura Filamento
- Riscaldamento Filamento
- Processamento
- Fine Vita
- Riciclo

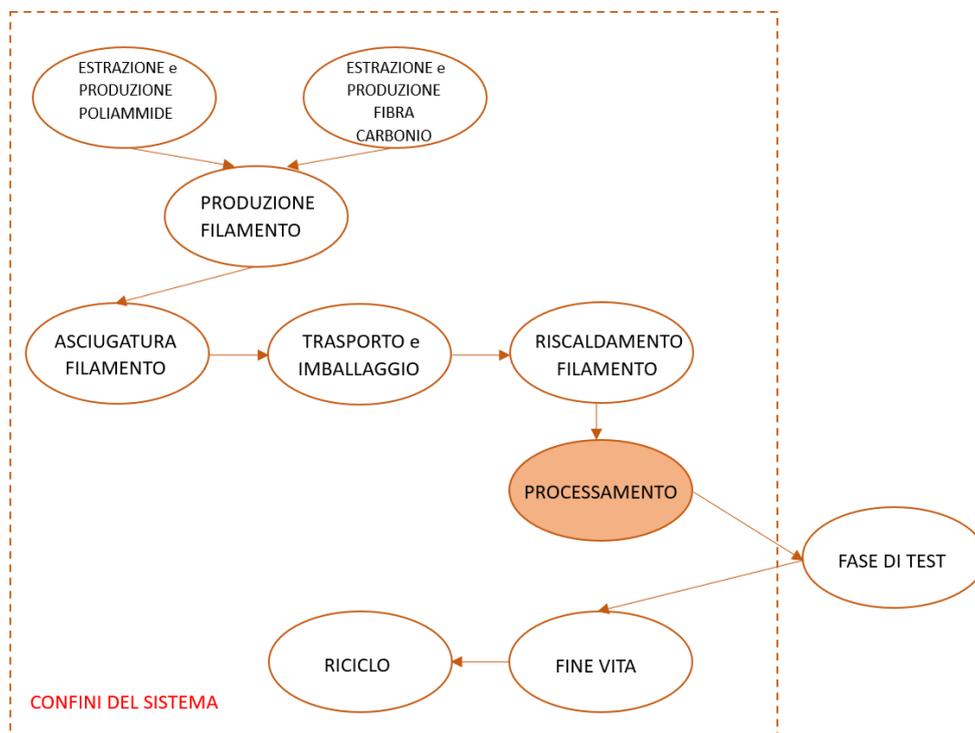


Figura 25 Confini di sistema processo FDM

La fase di estrazione e di produzione comprende i consumi energetici, le risorse e i trasporti per la produzione dei filamenti in Carbon PA. I consumi energetici sono compresi anche nella fase di asciugatura, riscaldamento e processamento FDM.

3.2.1.2. Analisi dell'Inventario

In questa fase sono stati inseriti i dati di inventario in Input al sistema come “Parametri” in SimaPro. Tali dati indicano il peso dei materiali utilizzati, i consumi energetici, il peso dei materiali richiesti per l’imballaggio, i trasporti, i tempi e i consumi energetici delle varie fasi di produzione. Tutti questi valori sono stati estrapolati da ricerche letterarie [25] e [26].

Articolo	Quantità
Materiali in input	
Fibre di carbonio	0,001263 kg
Poliammide	0,005054 kg
Filamento Carbon PA	0,006317 kg
Imballaggio Cartone	0,000404 kg
Imballaggio Pluriball	0,000049 kg
Bobina di supporto	0,002275 kg
Tempi	
Asciugatura	120 min
Riscaldamento	22,8 min
Stampa	22,8 min
Consumi energetici	
Asciugatura	0,4135 kWh
Riscaldamento	0,0799 kWh
Stampa	0,0146 kWh
Trasporto	
Trasporto filamento	4,07025 kgkm

Tabella 3 Dati in Input FDM

I valori relativi ai Tempi di produzione e ai Consumi Energetici sono stati ricavati da dati di letteratura [26], sapendo che i Tempi e i Consumi Energetici sono dipendenti dal peso del provino. Tutti i dati presenti nella tabella sono riferiti alla produzione di un singolo provino di trazione attraverso la metodologia di stampa 3D FDM. Questi dati sono stati poi inseriti nella sezione “Fasi del prodotto” del software SimaPro che comprende l’Assemblaggio e lo Scenario di fine vita.

L’assemblaggio è suddiviso in ulteriori sottogruppi per facilitare l’inserimento dei dati:

-Materiali FDM

-Produzione filamento

-Consumi energetici FDM

-Trasporto e Imballaggio FDM

Nel sottogruppo “Produzione filamento” è presente il processo di estrusione del filamento, questo processo vede in input il peso del filamento. Mentre lo Scenario di fine vita comprende il riciclo della plastica e del cartone utilizzati per l’Imballaggio e della Poliammide con cui è realizzato il provino.

3.2.1.3. Valutazione degli Impatti

Per la valutazione degli effetti degli impatti ambientali dei processi di produzione, sono stati utilizzati i dati in uscita forniti da SimaPro. Questi dati sono stati esportati in un foglio di calcolo Excel e organizzati in grafici di facile interpretazione. Sono state considerate le seguenti categorie di impatto: la Cumulative Energy Demand (CED), che rappresenta l'energia totale richiesta per i diversi processi, il Global Warming Potential (GWP), che indica l'effetto sul riscaldamento globale nel corso di 100 anni, e ReCiPe Midpoint.

L’interpretazione dei risultati verrà svolta nel capitolo successivo.

3.2.2. Analisi dei Costi

Nell’analisi dei costi, si è posta l’attenzione soprattutto su una analisi che si riferisse alla fase di produzione del provino, tralasciando la fase di utilizzo e smaltimento. Si è tenuto conto del costo delle materie prime, dei consumabili, della manodopera, del macchinario e dell’energia consumata durante la fase di produzione. L’analisi dei costi è stata fatta tenendo conto del costo della materia prima, il Carbon PA, dipendente dal peso del provino, dell’energia dipendente dai consumi energetici delle fasi di produzione del provino, moltiplicato per il costo

dell'energia al kWh, dei consumabili ovvero il costo dell'estrusore, della manodopera dipendente dal tempo di lavorazione e del design dipendente dal numero di provini.

INPUTS		UNITÀ	VALORE
Materiali	Costo materie prime	€/kg	100
	Massa provino	kg	0,006317
	Volume occupato	cm ³	4,51221
Macchina RobozeOne+400	Costo acquisto macchina	€	40000
	vita utile	anni	8
	Costo infrastrutture (% costo macchina)	%	0,01
	Costo manutenzione (% costo macchina)	%	0,03
	tempo attività macchina	%	80%
	ore/giorno	h	18,00
	giorni/settimana	d	5,00
Estrusore	Costo acquisto	€	20,00
Forno	Costo acquisto	€	145,00
Essiccatore	Costo acquisto	€	120,00
Processi	Tempo asciugatura	h	2
	Tempo riscaldamento	h	0,38
	Tempo stampa	h	0,38
	Tempo rimozione parti	h	0,25
	Tempo set up	h	0,25
	Tempo cambio estrusore	h	0,17
	Tempo utilizzo estrusore	h	100
	Design	h	10
	Volume prodotti	parti	1
	Costo lavoro	€/h	30
	Costo designer	€/h	35
Energia	Costo energia	€/kWh	0,5
	Asciugatura	kWh	0,41348
	Riscaldamento	kWh	0,0799
	Stampa	kWh	0,0146

Tabella 4 Dati di costo FDM

4. RISULTATI

In questo capitolo verranno presentati tutti i risultati ottenuti dalle analisi fatte ai due scenari di studio, SLS e FDM. I risultati dell'Analisi LCA rappresenteranno l'ultima fase, ovvero l'interpretazione degli impatti ambientali generati dal processo. I risultati dell'Analisi dei Costi e dell'Analisi delle Proprietà meccaniche permetteranno di porre le basi per un confronto dei due scenari.

4.1. RISULTATI ANALISI LCA

L'interpretazione dei risultati, ottenuti dalla fase di valutazione degli effetti ambientali, inizia dall'analisi del processo di stampa 3D FDM. Il primo metodo con cui è stato analizzato è il GWP100, da questo risulta che la fase di "Asciugatura" del filamento di Carbon PA, ha maggiore impatto, avendo un valore di kg CO₂-equivalenti più alto. I kg CO₂-equivalenti dell'"Asciugatura" risultano essere maggiori in tutte e tre le categorie, sia per la categoria caratterizzazione GWP100 "fossile" che per la "biogenica" che per la "trasformazione del terreno". Nella fase di "Asciugatura" le emissioni sono dovute all'elettricità consumata durante il processo.

Facendo una valutazione anche dello scenario GWP100 TOTALE, si nota chiaramente come la fase di "Asciugatura" abbia maggiore impatto con un valore pari a 0,159 kg CO₂-eq. Al secondo posto per valore di impatto maggiore c'è la "fibra di carbonio" con 0,050 kg CO₂-eq, mentre al terzo posto la "Poliammide filamento" con 0,042 kg CO₂-eq.

Se si fa una analisi più accurata sulla fibra di carbonio, si può vedere che tra i suoi componenti quello che genera maggiore impatto è il PAN. Grazie allo studio eseguito con SimaPro è stato possibile osservare quali fasi di produzione del PAN

lo rendessero così impattante e si è dedotto che il componente con maggiore impatto secondo il metodo GWP100 è l'“Elettricità” consumata per la produzione del PAN. Facendo una valutazione della fase di “Riciclo” si evince che questo processo ha fatto guadagnare, ovvero risparmiare 0,0078 kg CO₂-eq al sistema.

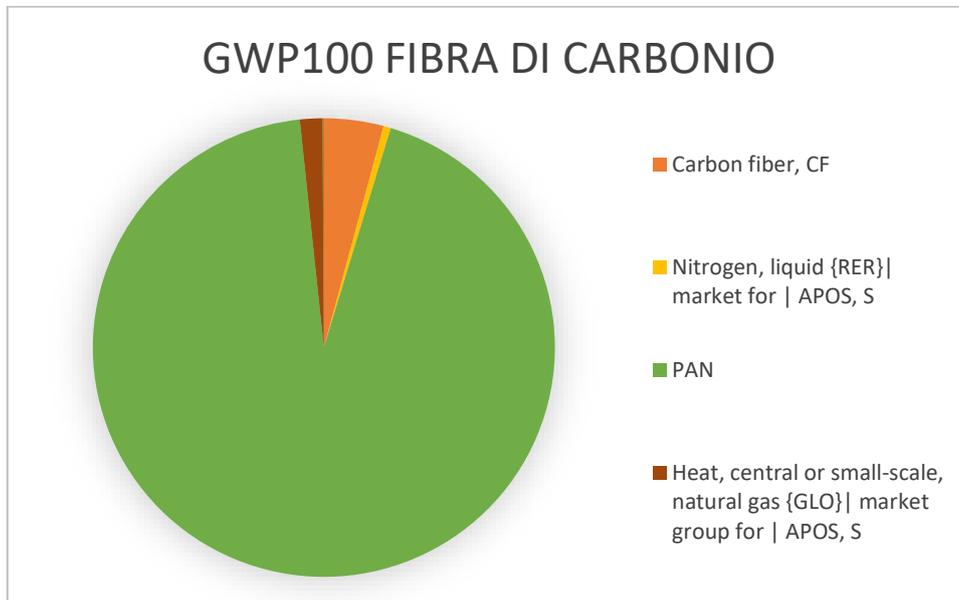


Grafico 1 GWP100 Fibra di Carbonio

Il risultato ottenuto dall'analisi del processo FDM, effettuata con il metodo CED, è molto simile a quello presentato sopra; infatti, osservando il grafico CED di caratterizzazione TOTALE, la fase di “Asciugatura” rappresenta il 58,6%, ovvero 3,5 MJ su un totale di impatto di 5,97MJ. La “fibra di carbonio” è sempre la seconda fonte di maggiore impatto, rappresenta il 14,2% del totale, ovvero 0,85 MJ. In questo metodo invece, come terza fase di maggiore impatto, c'è la fase di “stampa”, essa rappresenta il 13,4% del totale ovvero 0,79 MJ.

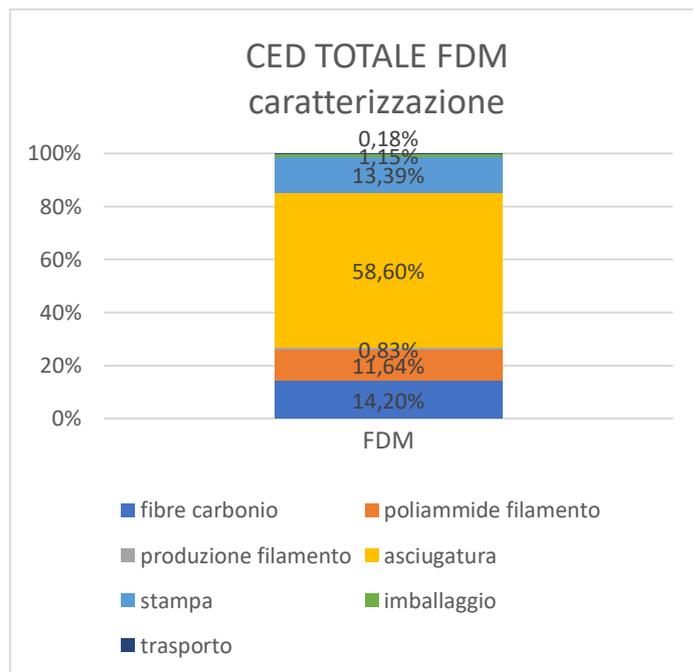


Grafico 2 CED totale FDM

La fase di “stampa” si distingue in fase di “mantenimento a filo caldo” e “stampa effettiva”. Tra le due risulta più impattante la fase di “mantenimento a filo caldo” con 0,68 MJ, tali emissioni sono dovute all’elettricità consumata durante il processo che è superiore rispetto alla fase di “stampa effettiva”. Anche per questo metodo analizzando il riciclo dei materiali si trova un impatto totale negativo, la voce “Riciclo” è pari a -0,319 MJ.

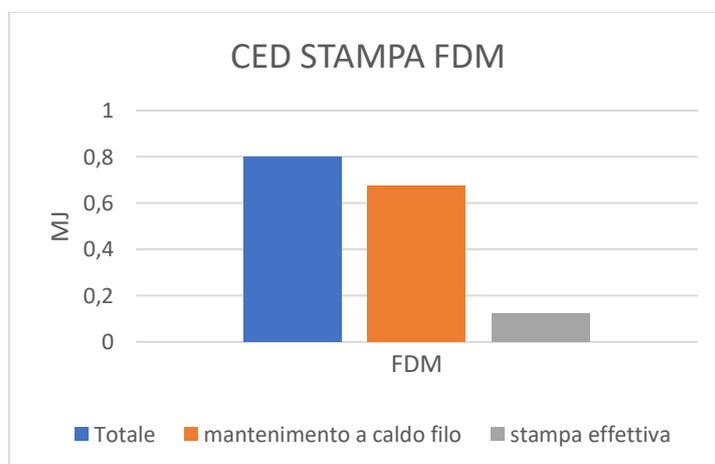


Grafico 3 CED stampa FDM

Per il metodo ReCiPe, la categoria di danno più rilevante è quella di “Tossicità umana cancerogena”. Anche in questa categoria di danno la fase più impattante risulta essere l’“Asciugatura”, così come nelle categorie di danno “Ecotossicità d'acqua dolce” e “Ecotossicità marina”, anche la “Stampa” presenta valori di impatto alti in tutte e tre le categorie. In particolare, notiamo come la “Poliammide” e la “Fibra carbonio” diano un contributo considerevole nella categoria di danno “Tossicità umana cancerogena”.

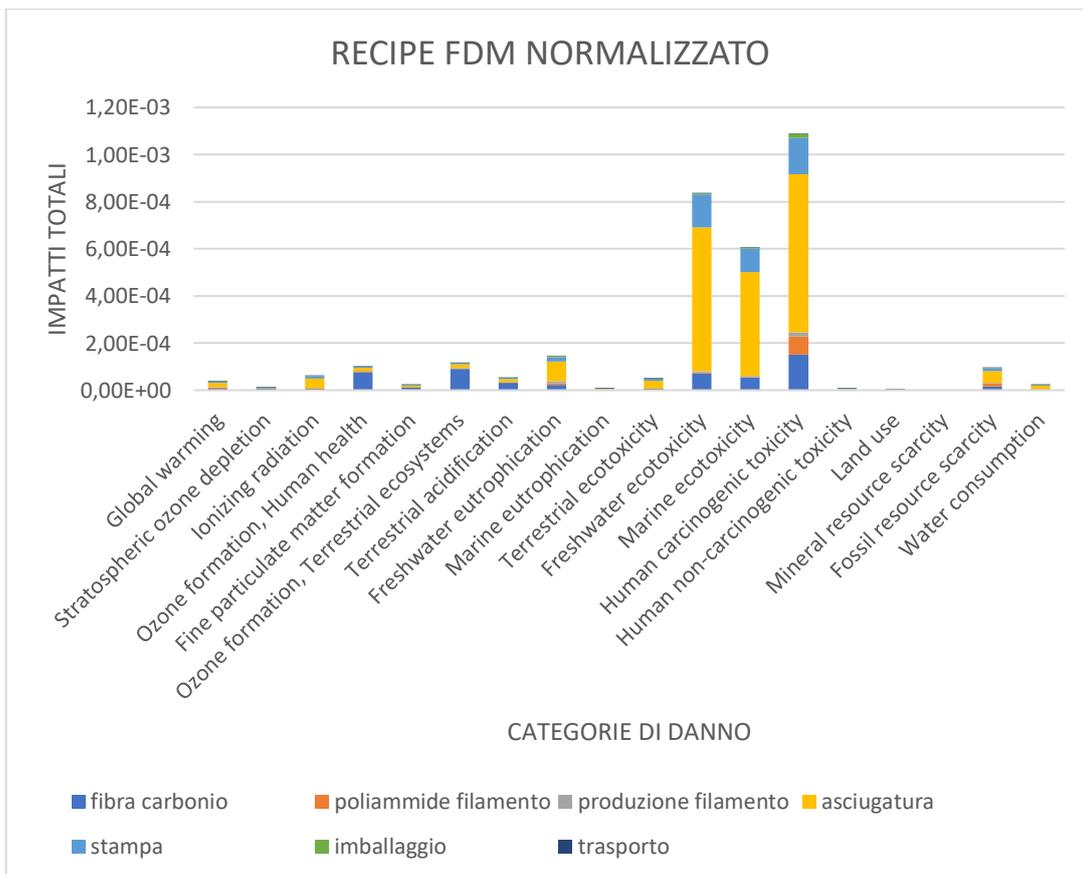


Grafico 4 ReCiPe normalizzato FDM

Per quanto riguarda il metodo GWP100 per la stampa 3D SLS, risulta che la fase più impattante è la “stampa”, con valore di impatto di 0,732 kg CO₂-eq, che rappresenta il 94,4% del totale pari a 0,776 kg CO₂-eq. La seconda fase più impattante, con valori comunque molto più bassi della “stampa”, risulta essere la “PA12 polvere”, questa rappresenta il 4,5% ovvero 0,035 kg CO₂-eq.

Analizzando più attentamente la fase di “stampa”, essa è costituita a sua volta da: “preparazione macchina”, “fase di stampa”, “pulizia macchina”, “pulizia pezzo”. Tra queste la fase con maggiore impatto risulta essere la “fase di stampa,” essendo il processo che richiede più tempo, ha un consumo energetico maggiore; infatti, le emissioni che essa genera sono dovute proprio alla consistente elettricità consumata. La seconda fase con maggiore impatto è la “pulizia macchina”, le emissioni di questa fase sono dovute ad un alto consumo energetico essendo la seconda fase più duratura. Lo scenario di fine vita con la fase di “Riciclo” di materiali plastici e cartone genera un impatto negativo pari a -0,006 kg CO₂-eq.

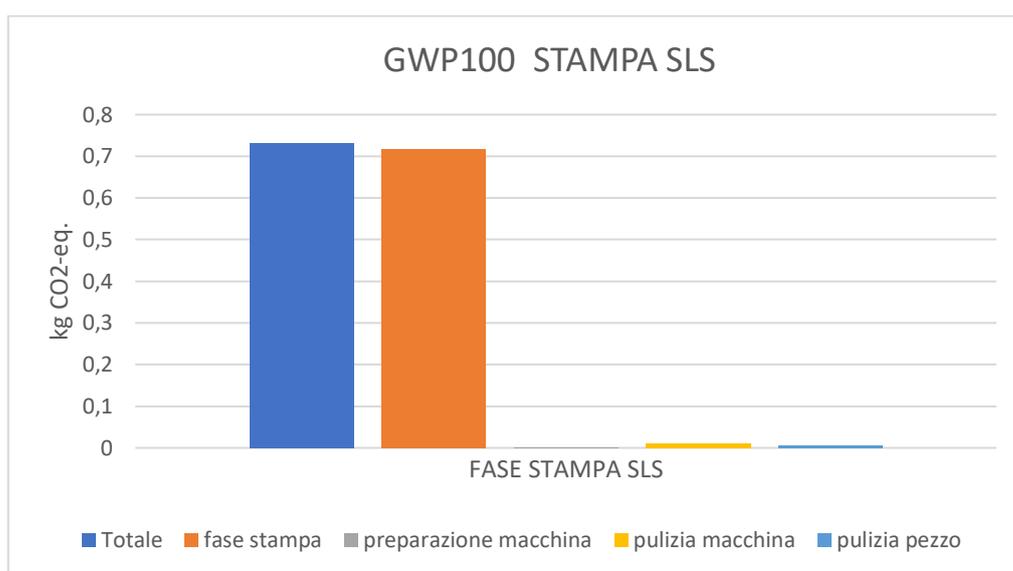


Grafico 5 GWP100 Stampa SLS

Il metodo CED vede un andamento simile a quello del metodo GWP100, la fase più impattante è la “stampa” con 16,22MJ. Come detto sopra la fase di “Stampa” presenta dei sotto processi, nel grafico di caratterizzazione della “Stampa” vedo che la “fase di stampa” rappresenta il 97,8% di 16,22MJ ovvero 15,87MJ, essendo la fase con maggiore consumo energetico e maggiore durata. Nel grafico CED normalizzato totale impatta, anche se con valori molto inferiori alla “Stampa”, l’input “PA12 polvere” e la fase “Sabbiatura”. Anche in questo caso troviamo una fase di “riciclo” con valori di “guadagno” pari a 0,265MJ.

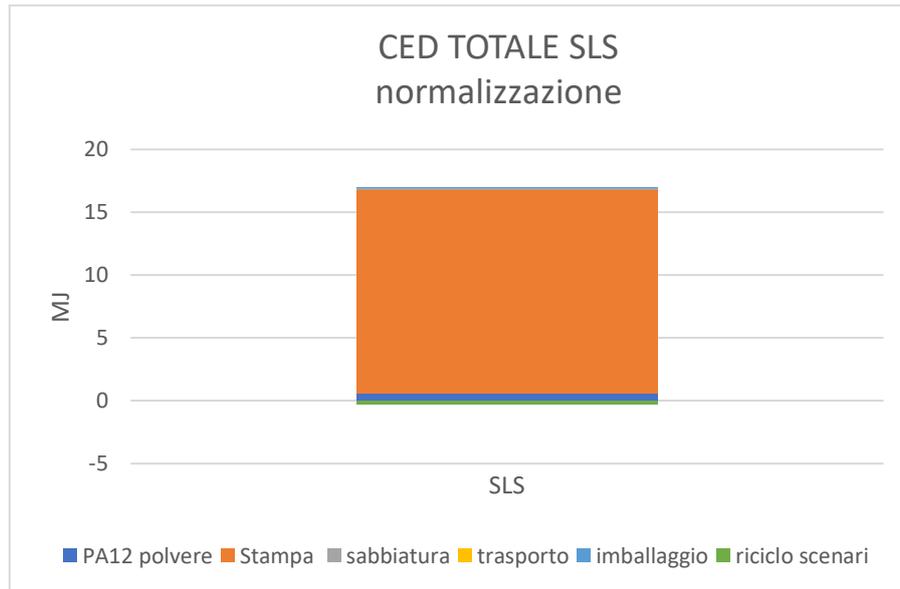


Grafico 6 CED totale normalizzazione SLS

Infine, si ha l'analisi del processo di stampa 3D SLS, fatta con metodo ReCiPe. Le classi di danno che spiccano dal grafico con maggiore impatto sono la "Tossicità umana cancerogena", l' "Ecotossicità d'acqua dolce" e l' "Ecotossicità marina", in cui la fase che genera maggiore impatto risulta essere sempre la "Stampa" e in seconda posizione la "PA12 polvere" e la "Sabbiatura".

Se volessimo fare una analisi più accurata su una fase del processo SLS, potremmo vedere quali sono le categorie di danno che sono maggiormente impattate dall' "Imballaggio" utilizzato in questo processo. Dal grafico che ricaviamo, la categoria di danno "Tossicità umana cancerogena" è quella che viene più influenzata dall' "imballaggio", in particolare dalla "Bottiglia HDPE," come anche la "Scarsità di risorse fossili", mentre per l' "Ecotossicità d'acqua dolce" e l' "Ecotossicità marina" ad impattare maggiormente è il "cartone ondulato".

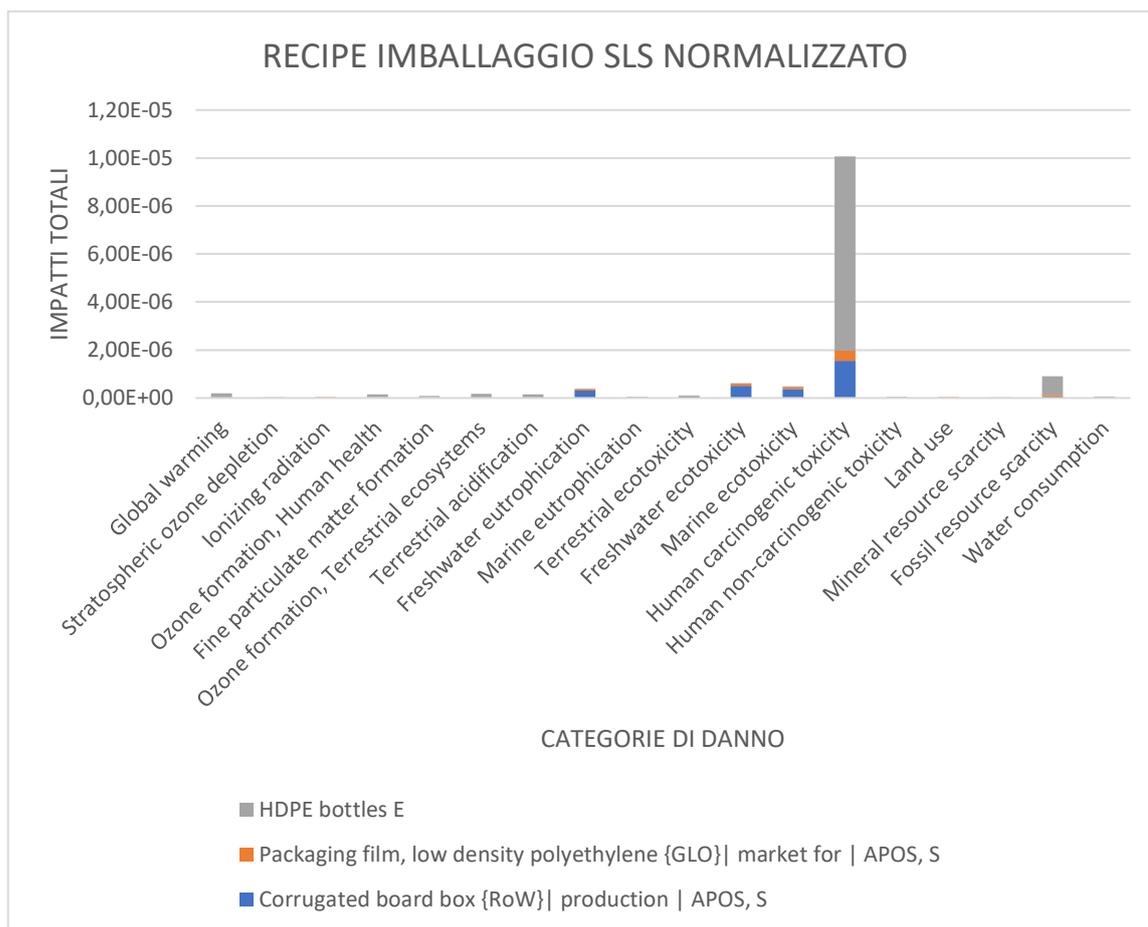


Grafico 7 ReCiPe imballaggio SLS normalizzato

Facendo un confronto degli impatti ambientali degli scenari di stampa 3D, SLS e FDM, con i metodi GWP100 e CED, si è dedotto che lo scenario che genera maggiore impatto è quello della stampa 3D SLS. Il valore di impatto ambientale della macrocategoria “Consumi energetici/stampa” dello scenario SLS risulta molto maggiore, questo è causato principalmente dalla durata dei processi che ne fanno parte.

Confrontando le tempistiche del processo FDM con quelle del processo SLS, le prime risultano essere molto inferiori. Se avessimo valutato, invece, solo la macrocategoria dei “Materiali”, invece sarebbe risultato più impattante lo scenario FDM a causa della “fibra di carbonio” che, come detto precedentemente, genera impatti rilevanti a causa di uno dei suoi componenti, il PAN.

Infine, mentre per la macrocategoria “Postprocessing” si hanno dati esclusivamente per lo scenario SLS, per le altre macrocategorie “Trasporto” e “Riciclo” i dati relativi ai due scenari sono molto simili.

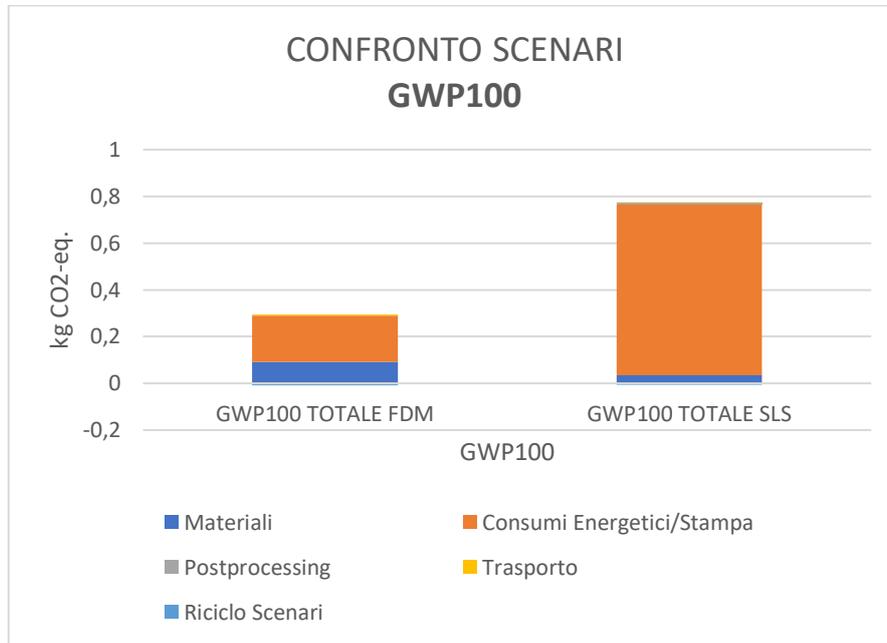


Grafico 8 GWP100 Confronto scenari

Si può quindi concludere, che da tutti e tre i metodi è risultato che la fase che genera maggiore impatto nello scenario SLS è la STAMPA e in particolare la “fase di stampa”, questo poiché è la fase con maggiore durata e maggiore consumo energetico.

Mentre la fase che genera maggiore impatto nello scenario FDM è la “asciugatura”, al secondo posto troviamo la “fibra di carbonio”. Questo dato elevato di asciugatura si potrebbe ridurre utilizzando l’intera bobina di filamento essiccato durante la fase di asciugatura, non solo per produrre un filamento, ma per produrne di più, così da suddividere gli impatti che genera questa fase su più provini.

4.2. RISULTATI ANALISI DEI COSTI

Il primo scenario studiato è stato il processo di stampa 3D FDM. Si è calcolato il costo totale necessario alla produzione di un provino di trazione in Carbon PA, i costi che hanno contribuito al calcolo del totale sono riferiti alle materie prime, ai consumabili, all'utilizzo della macchina, del forno e dell'essiccatore, al lavoro, all'energia consumata e al design. Calcolando il costo totale senza design, esso è pari a 16,68 euro, mentre il costo totale con il design è pari a 366,68 euro.

COSTO TOTALE PRODUZIONE		
Materie prime	0,6317	€
Consumabili	0,076	€
Utilizzo macchina	0,659722222	€
Utilizzo forno	0,012586806	€
Utilizzo essiccatore	0,001979167	€
Lavoro	15,051	€
Energia	0,25399	€
Costo totale per provino (senza design)	16,68697819	€
Design (1 parte)	350	€
Costo totale per provino	366,6869782	€

Tabella 5 Costo totale produzione scenario FDM

Facendo un'analisi più approfondita sui contributi di costo degli elementi presenti in tabella, si osserva che nel costo totale senza design il 90% è dato dal lavoro, ovvero dal costo relativo alla manodopera specializzata che si occupa delle rimozioni delle parti, del setup e del cambio dell'estrusore, mentre il 4% dalle materie prime e un ulteriore 4% dall'utilizzo della macchina in cui sono compresi anche i costi di ammortamento e manutenzione della stessa.

Si osserva che il costo totale con design è influenzato per il 96% dal design, voce di costo ottenuta dalle ore necessarie per la fase di design e il costo ad ora, e per il 4% dal lavoro. Risulta quindi, che per riuscire ad abbassare il costo del provino, bisogna lavorare e fare delle valutazioni soprattutto sul design, essendo la voce di costo più elevata e pari a 350 euro.

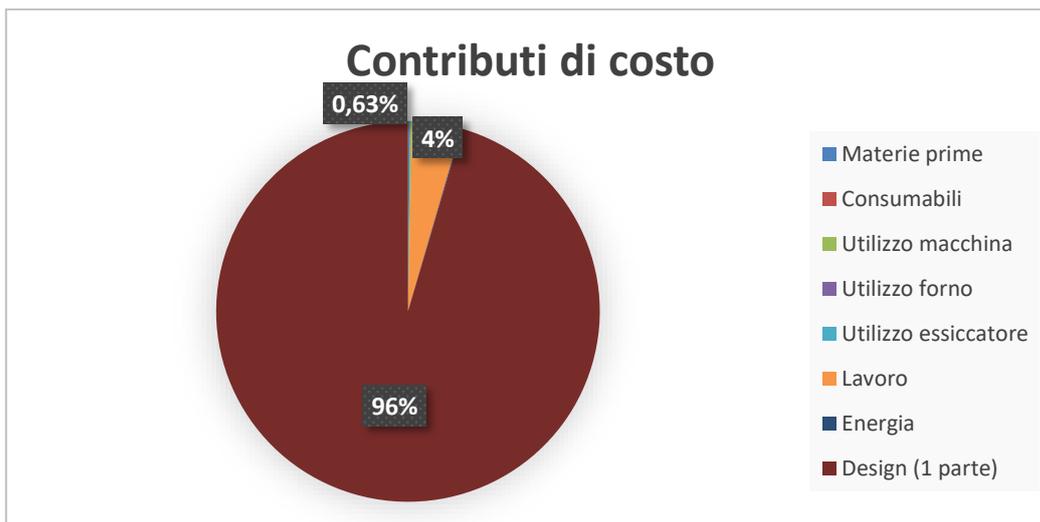


Grafico 9 Contributi di costo totale con design scenario FDM

Facendo una valutazione del costo totale unitario con design per provino, all'aumentare del volume di produzione, il costo totale unitario del provino diminuisce, facendo crescere il numero di provini prodotti. Il costo totale unitario con design del provino si assesterà ad un valore di circa 17 euro quando il volume di produzione è pari o superiore alle 270 unità. L'aumento del volume di produzione fa sì che i costi di design si possano ripartire su più provini e lo stesso accadrà anche ai costi relativi ai consumi della fase di essiccamento dell'intera bobina di filamento, con cui non si produrrà più un singolo filamento, ma un maggior numero.

Un progetto futuro, che porterà a una strategia di miglioramento del costo unitario, potrebbe essere quello di calcolare il volume di produzione che minimizzi tutti i costi, tenendo conto però dei valori relativi alla capienza massima ottimale.

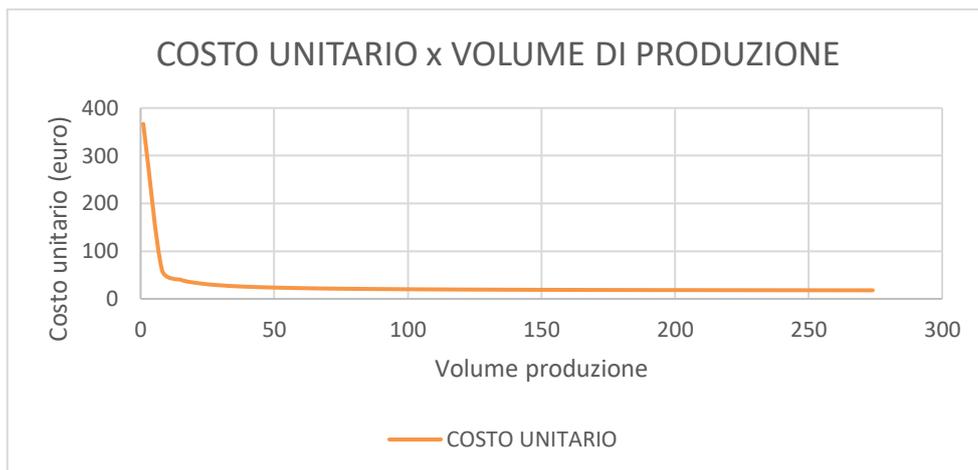


Grafico 10 Costo unitario x Volume di produzione scenario FDM

Allo stesso modo nello scenario SLS si è calcolato il costo totale necessario alla produzione di un provino di trazione in poliammiede. I costi che hanno contribuito al calcolo del totale sono riferiti alle materie prime, ai consumabili, all'utilizzo della macchina, della sabbiatrice, al lavoro, all'energia consumata e al design.

Il costo totale senza design risulta essere pari a 6,95 euro mentre il costo totale con il design è di 50,70 euro.

COSTO TOTALE PRODUZIONE		
Materie prime	0,54548	€
Consumabili	0	€
Utilizzo macchina	2,693684896	€
Utilizzo Sabbiatrice	0,003105469	€
Lavoro	2,7375	€
Energia	0,966875	€
Costo totale per provino (senza design)	6,946645365	€
Design (8 parti)	43,75	€
Costo totale per provino	50,69664536	€

Tabella 6 Costo totale produzione scenario SLS

Le percentuali di contributo delle categorie di costo nel totale sono il 39% dal lavoro e un altro 39% dall'utilizzo macchina, il 14% dall'energia consumata dal processo di produzione e l'8% dalle materie prime. Invece, ad influenzare maggiormente il costo totale unitario con design, è proprio il design e il costo della manodopera, ovvero del lavoro.

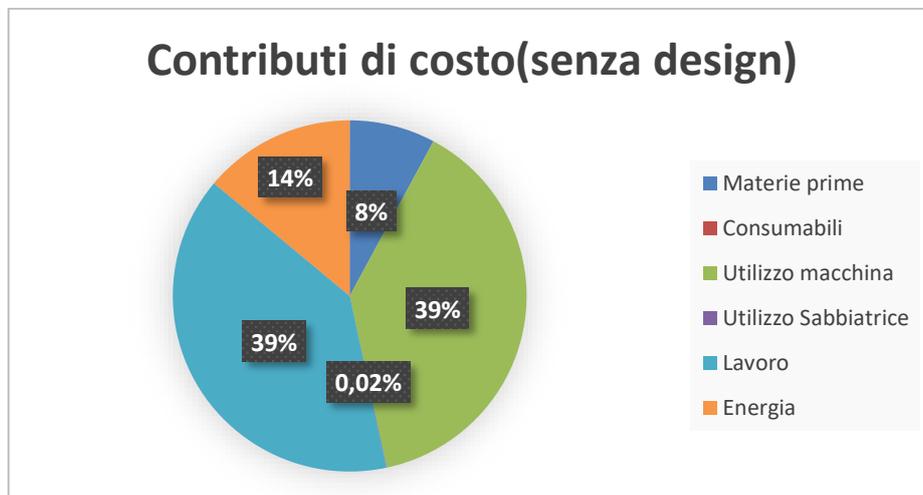


Grafico 11 Contributi di costo senza design scenario SLS

Successivamente si sono studiati i risultati ottenuti dall'analisi del costo unitario totale con design per provino, all'aumentare del volume di produzione, il valore di costo totale scende con il crescere del volume fino ad assestarsi ad un valore pari a 7 euro. Il costo totale unitario con design per provino pari a circa 7 euro, si ottiene quando il volume è uguale o superiore alle 340 unità.

Conviene quindi stampare un numero di provini maggiore, per far sì che i costi di design si spartiscano su ciascuno di essi; si potrebbe fare una valutazione sulla possibile massima capienza ottimale della macchina 3D, così da minimizzare i costi unitari.

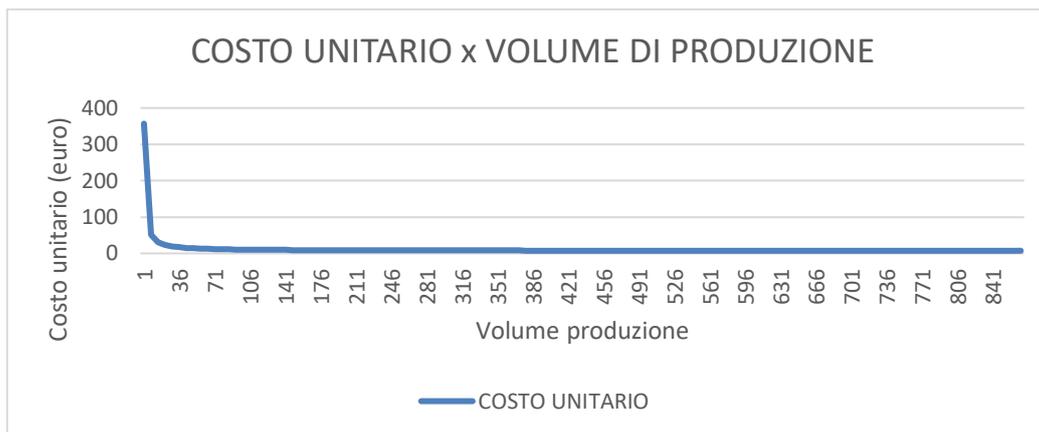


Grafico 12 Costo unitario x Volume di produzione scenario SLS

In conclusione, dai risultati dell'analisi dei costi, si deduce che il costo unitario totale con design del provino prodotto con il processo FDM, è maggiore rispetto a quello prodotto con il processo SLS. Facendo un vero e proprio confronto tra i due scenari risulta che sia il costo del lavoro, che il costo del design dello scenario FDM, sono più alti rispetto allo scenario SLS. Potremmo fare ulteriori considerazioni se si aumentasse il volume di produzione, ma comunque risulterebbe che il costo totale unitario con design del processo FDM è maggiore. Infatti, il costo totale unitario FDM si stabilizza ad un valore pari a 17 euro mentre quello SLS ad un valore pari a 7 euro.

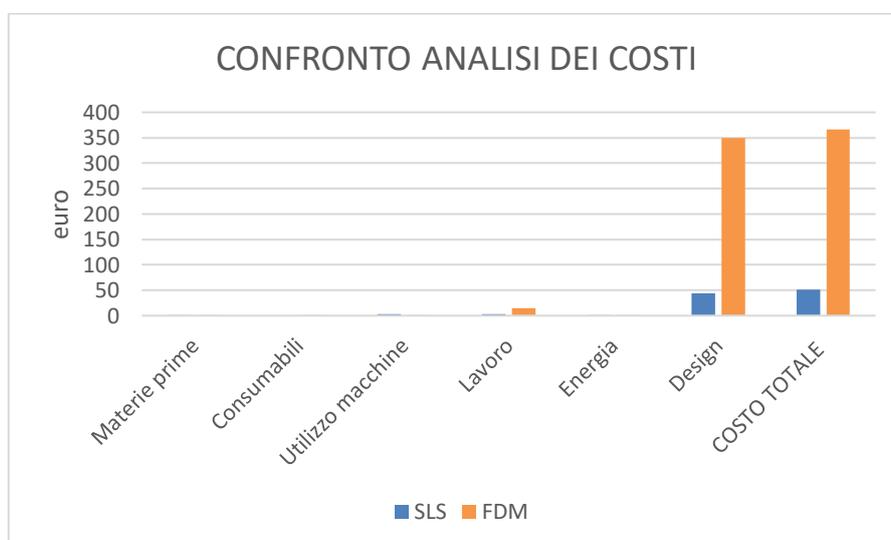


Grafico 13 Confronto analisi dei costi

4.3. RISULTATI ANALISI DELLE PROPRIETÀ MECCANICHE

I dati relativi alle proprietà meccaniche del provino di trazione stampato con il processo FDM, non sono stati ricavati da misurazioni dirette, ma da studi di letteratura [26]. In particolare, è stato possibile ricavare i valori relativi al Carico di Rottura del provino (UTS= ultimate tensile strength) e al Modulo Elastico anche chiamato Modulo di Young. Risulta che il Carico di Rottura (UTS) del provino realizzato in Carbon PA, e cioè rinforzato con fibre di carbonio, è pari a 124.0 ± 4.7 MPa, mentre il Modulo Elastico è pari a 11.6 ± 0.4 GPa.

Per quanto riguarda invece le proprietà meccaniche del provino di trazione stampato con il processo SLS, è stato possibile fare delle misurazioni dirette del Carico di Rottura del provino e del Modulo Elastico. Si sono sostenuti 3 test di trazione su 3 provini denominati, SLS1, SLS2 e infine SLS3, i risultati ottenuti da tali test sono stati poi modellati su Excel.

Per verificare che i tre test fossero significativi tra loro, si è costruito un grafico che mettesse insieme le curve di elasticità ricavabili dai tre test. Tale grafico ha per ascisse i valori di deformazione ϵ e per ordinate i valori della tensione σ misurati. Dal grafico è possibile osservare il comportamento elastico, plastico e il punto di rottura del provino nei tre test.

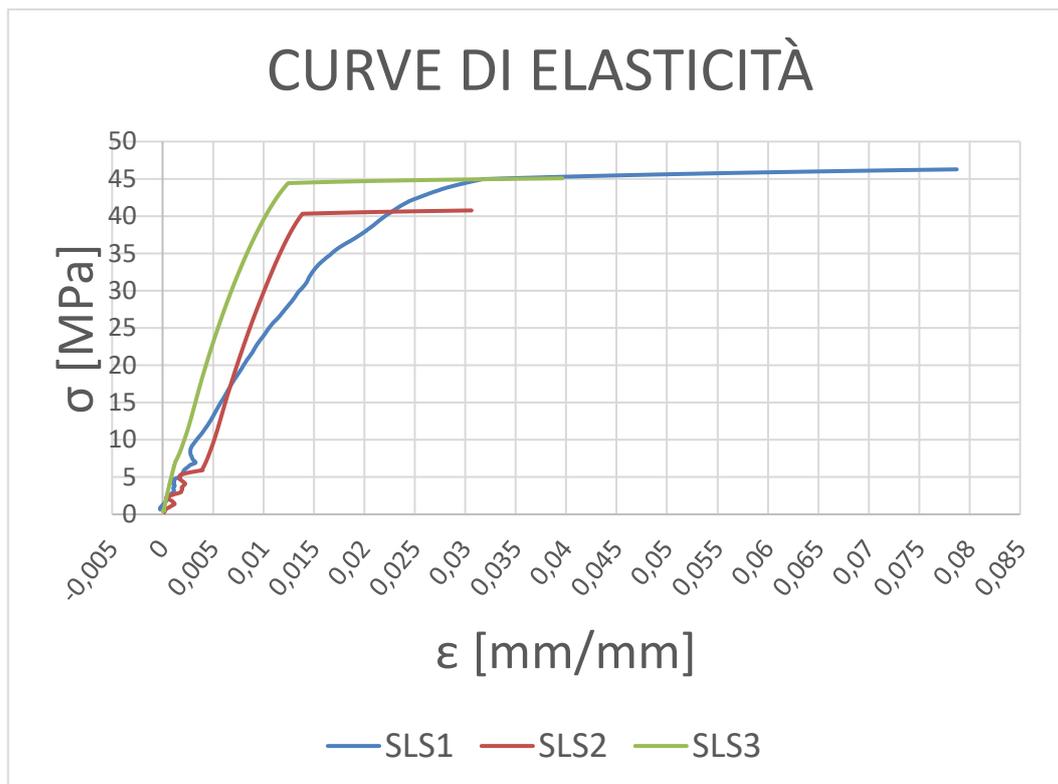


Grafico 14 Curve di elasticità

Per trovare il valore corrispondente al Carico di Rottura dei provini, si è trovata la massima tensione nella tabella delle tensioni σ , costruita con i dati ricavati dalle misurazioni. Mentre per ricavare il Modulo di Young si è costruito un grafico rappresentante una retta avente per ascisse i valori di deformazione ϵ e per ordinate i valori di tensione σ . Si identifica poi l'equazione corrispondente alla retta, $y = mx + q$, dove "m" è il valore corrispondente al Modulo di Young.

Dai risultati ottenuti con il test di trazione del provino SLS1, si è ottenuto un Carico di Rottura pari a 46,3 MPa, mentre per la ricerca del Modulo di Young, si è deciso di considerare dei valori di Deformazione e Tensione in cui il grafico di elasticità fosse il più lineare possibile. Per le ascisse si è considerato un intervallo di valori di deformazione da 0,005 a 0,01, mentre per le ordinate si sono presi i valori di tensione corrispondenti all'intervallo di deformazione. Il modulo Elastico per il provino SLS1 è pari a 2,2 GPa.

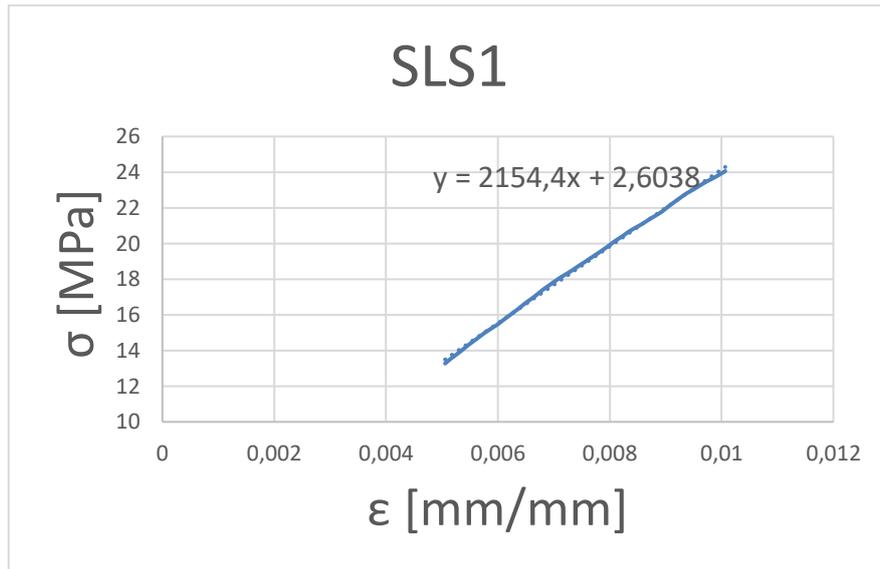


Grafico 15 Ricerca Modulo di Young SLS1

Dai risultati ottenuti con il test di trazione del provino SLS2, si è ottenuto un Carico di Rottura pari a 40,8 MPa. Nella ricerca del Modulo di Young, per le ascisse si è considerato un intervallo di valori di deformazione da 0,005 a 0,01, mentre per le ordinate si sono presi i valori di tensione corrispondenti all'intervallo di deformazione. Il modulo Elastico per il provino SLS2 è pari a 4,1 GPa.

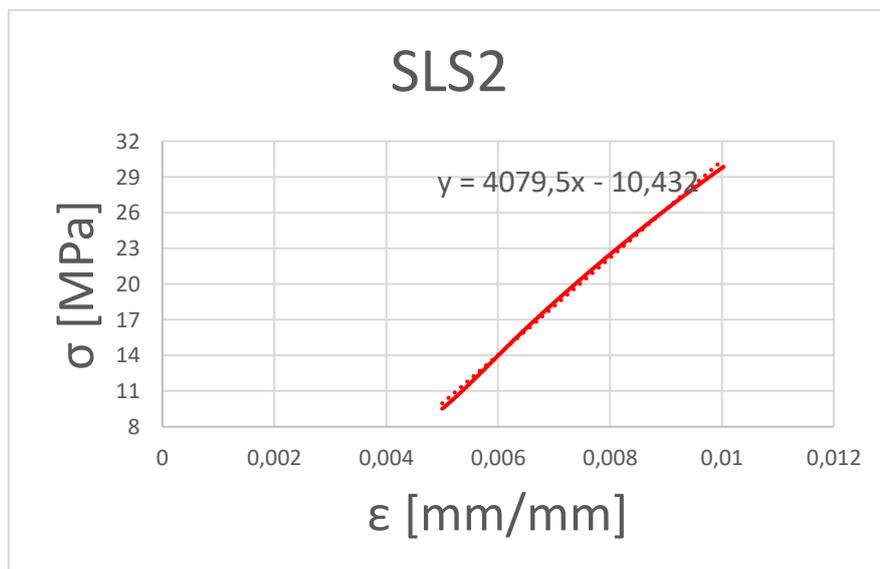


Grafico 16 Ricerca Modulo di Young SLS2

Dai risultati ottenuti con il test di trazione del provino SLS3, si è ottenuto un Carico di Rottura pari a 45,1 MPa. Nella ricerca del Modulo di Young, per le ascisse si è considerato un intervallo di valori di deformazione da 0,0025 a 0,005, mentre per le ordinate si sono presi i valori di tensione corrispondenti all'intervallo di deformazione. Il modulo Elastico per il provino SLS3 è pari a 4,7 GPa.

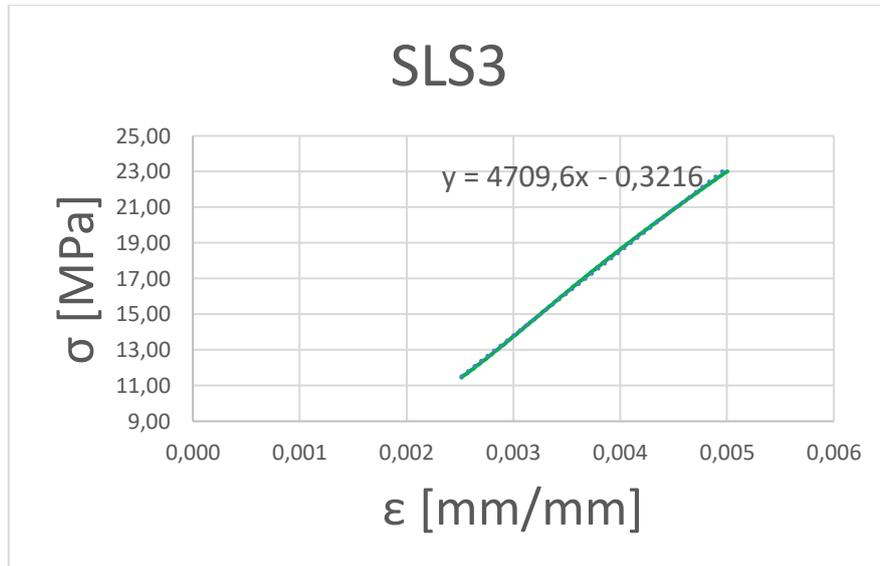


Grafico 17 Ricerca Modulo di Young SLS3

Facendo una media dei risultati ottenuti dai test di trazione dei provini stampanti con il processo SLS, si ricava un valore di Carico di Rottura pari a 44,1 MPa e un valore di Modulo Elastico pari a 3,7 GPa. Facendo un confronto dei risultati ottenuti dal test di trazione dei provini, risulta che i provini realizzati in Carbon PA, dal processo FDM, sono caratterizzati da un marcato aumento sia del Carico di Rottura (UTS) che del Modulo Elastico (E), rispetto ai valori della poliammide non rinforzata del processo SLS. Il Carbon PA risulta quindi essere un materiale più resistente alla trazione rispetto alla poliammide.

5. CONCLUSIONI

Alla luce dei risultati ottenuti, si possono fare delle considerazioni riguardo le analisi sperimentali condotte. Lo studio fatto per le tecnologie SLS e FDM di stampa 3D, si è concentrato soprattutto sull'ambito degli impatti ambientali, dei costi e delle proprietà meccaniche dei pezzi stampati. Per mezzo dell'Analisi degli Impatti ambientali, è stato possibile comprendere quali processi di produzione incidono di più, e quali materiali sono i meno inquinanti durante il ciclo vita di un provino stampato con la tecnica 3D. Per mezzo dell'Analisi dei Costi, si è dedotto quali sono le componenti di costo che influiscono di più sul costo totale generato dalla fase di produzione del provino. Infine, nell'Analisi delle Proprietà Meccaniche, si è discusso su quali fossero i materiali più prestazionali, adatti a rispettare le caratteristiche che si richiedono ai pezzi stampati.

Nello specifico risulta che, facendo un confronto degli impatti ambientali degli scenari di stampa 3D, SLS e FDM, la maggior parte degli effetti sull'ambiente sono dovuti ai consumi energetici. L'impatto ambientale derivante dai consumi energetici dello scenario SLS, risulta maggiore rispetto a quello generato dal processo FDM. Questo è causato principalmente dalla durata del processo, infatti se si confrontano i tempi impiegati per il processo FDM con quelli per il processo SLS, i primi sono inferiori. Facendo una valutazione sull'impatto ambientale generato dai Materiali utilizzati, invece, risulta più impattante lo scenario FDM a causa della *fibra di carbonio*. Si può concludere che lo scenario SLS genera maggiore impatto ambientale. Per quanto riguarda l'analisi dei costi, il costo unitario del provino prodotto con il processo FDM è maggiore, studiando più nel dettaglio si evince che sia il Costo del Lavoro che del Design è più alto rispetto al processo SLS. Si possono fare ulteriori considerazioni valutando l'andamento del costo unitario aumentando il volume di produzione, da queste risulta comunque che il costo unitario del processo FDM è maggiore. Un progetto futuro potrebbe

essere quindi quello di fare una valutazione sulla possibile massima capienza ottimale delle macchine 3D, così da minimizzare i costi unitari. Infine, dallo studio delle Proprietà Meccaniche risulta che il provino realizzato in Carbon PA, dal processo FDM, è caratterizzato da un Carico di Rottura e da un Modulo Elastico maggiori rispetto al provino realizzato con il processo SLS. Il Carbon PA risulta quindi essere un materiale più resistente e con prestazioni meccaniche migliori; infatti, questo materiale ha una resistenza alla trazione maggiore rispetto alla poliammide non rinforzata.

In seguito alle analisi condotte si sono ricavati tali risultati:

- Gli impatti ambientali totali per la categoria di impatto GWP100, sono pari a 0,29 kg CO₂-eq. per lo scenario FDM, e sono pari a 0,77 kg CO₂-eq per lo scenario SLS.
- Il costo unitario del provino per lo scenario FDM è 366,68 euro, per lo scenario SLS è 50,70 euro.
- Per lo scenario FDM il Carico di Rottura del provino è 124.0 ± 4.7 MPa, mentre il Modulo Elastico è 11.6 ± 0.4 GPa, per lo scenario SLS il Carico di Rottura è 44,1 MPa e il Modulo Elastico è 3,7 GPa .

In conclusione, si può riassumere che il provino stampato con il processo SLS genera maggiori impatti ambientali, ha tempi di realizzazione più lunghi e minore resistenza alla trazione, però ha un costo di produzione più basso. Invece, il provino stampato con il processo FDM genera minori impatti ambientali, ha tempi di realizzazione più brevi, maggiore resistenza alla trazione, ma un costo di produzione più alto. Prima di scegliere il processo ottimale da sviluppare, è doveroso prendere in considerazione tutte le variabili e contestualizzarle nel proprio ambito, in base anche alle risorse e ai tempi disponibili.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Stampa 3D (2022) Dassault Systèmes. Available at: <https://www.3ds.com/make/guide/process/3d-printing>
- [2] Carli, T. (2023) Scopri La Storia della Stampa 3D: Dal dr. Hideo Kodama Al primo oggetto stampato, TOP 3D -. Available at: <https://www.top3d.it/storia-della-stampa-3d/>
- [3] italia3dprint (2017) Stampanti 3d – Panoramica delle Tecnologie di Stampa, Stampa 3D | I3DP. Available at: <https://www.italia3dprint.it/tecnologie/>
- [4] Guida alla stampa 3D tramite Sinterizzazione Laser Selettiva (SLS) (2021), Formlabs. Available at: <https://formlabs.com/it/blog/sinterizzazione-laser/>
- [5] Tutto quello che devi sapere sulla stampa 3D FDM: ProtoReal (2022) RSS. Available at: <https://www.proto-real.it/blog-articoli/tutto-quello-che-devi-sapere-sulla-stampa-3d-fdm>
- [6] Nunzia, M. (2022) Guida AI Materiali per la stampa 3D: Le Plastiche, 3Dnatives. Available at: <https://www.3dnatives.com/it/plastiche-stampa-3d-090920219/>
- [7] AIP Conference Proceedings 1664, 160009 (2015); <https://doi.org/10.1063/1.4918516> (2015) Manfred Schmid, Antonio Amado e Konrad Wegener
- [8] Schmid, M. (2018) ‘LS Materials: Polymer Powders’, in Laser sintering with plastics: Technology, processes, and materials. Cincinnati, Stati Uniti: Hanser Publishers, pp. 101–124.
- [9] Benvenuti, E. (2017) Manuale basico sui materiali compositi, CreateSpace Independent Publishing Platform, Prima edizione. Available at:

<https://www.skyscooter.it/wp-content/uploads/2017/02/AnteprimaManualeBasicoMaterialiCompositi.pdf>

[10] Tecniche a stampo aperto (Open mould). File PDF (2020)

TecnicheCompositiMMC2020, pp.1-114 Available at:

<https://www.unica.it/static/resources/cms/documents/TecnicheCompositiMMC2020.pdf>

[11] Stampa 3D e Fibra di Carbonio: La Carbon Pa, Roboze. Available at:

<https://www.roboze.com/it/risorse/stampa-3d-e-fibra-di-carbonio-la-carbon-pa.html>

[12] LCA (Life Cycle Assessment) - LCC (life cycle cost) (2023) Regione Piemonte. Available at: <https://www.regione.piemonte.it/web/temi/ambiente-territorio/green-economy/lca-life-cycle-assessment-lcc-life-cycle-cost>

[13] Life-cycle costing, Life cycle costing - GPP - Environment - European Commission. Available at:

[https://ec.europa.eu/environment/gpp/lcc.htm#:~:text=Life%2Dcycle%20costing%20\(LCC\)%20means%20considering%20all%20the%20costs,water%20use%2C%20spares%2C%20and%20maintenance](https://ec.europa.eu/environment/gpp/lcc.htm#:~:text=Life%2Dcycle%20costing%20(LCC)%20means%20considering%20all%20the%20costs,water%20use%2C%20spares%2C%20and%20maintenance)

[14] Staff, S. (2020) Cos'è il life cycle costing e perché è importante per il tuo business? , Sfridoo. Available at: <https://www.sfridoo.com/blog/cose-il-life-cycle-costing-e-perche-e-importante-per-il-tuo-business/>

[15] ISO 14040 UNI EN. (2010) Valutazione del ciclo di vita Principi e quadro di riferiento. Environmental Management.

[16] Cioffi, R., Farina, I., Salzano C., Salzano, M., Travaglion M., De Pertis, M., De Pertis, O. (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/>

- [17] Planner, R.G. (2022) Life Cycle Assessment, valutare gli impatti ambientali di un prodotto, GreenPlanner Magazine. Available at: <https://www.greenplanner.it/life-cycle-assessment/>
- [18] Various authors (2020) SimaPro database manual Methods library. Available at: <https://simapro.com/wp-content/uploads/2020/10/DatabaseManualMethods.pdf>
- [19] SimaPro, il software LCA più diffuso al mondo (2020) SimaPro. Available at: <https://network.simapro.com/2b/>
- [20] SimaPro: Cos'è e come richiedere una demo (2022) 2B. Available at: <https://to-be.it/strumenti/simapro-software-di-life-cycle-assessment/#banche-dati-lca-e-metodi-di-life-cycle-impact-assessment>
- [21] Petrucci, G. (2023) Materiali. File PDF. Available at: <https://sites.unipa.it//giovanni.petrucci/Disp/Materiali.pdf>
- [22] FDM vs. SLA vs. SLS – Comparison (2023) Sinterit. Available at: <https://sinterit.com/blog/sls-technology/fdm-vs-sla-vs-sls-comparison/>
- [23] Sandblaster SLS (2023) Sinterit. Available at: <https://sinterit.com/peripherals/sandblaster-sls/>
- [24] Russolillo, D. (2012) Potenziale climalterante e dati di emissione di gas fluorurati nell'ambito delle politiche ambientali. File PDF. Available at: https://www.to.camcom.it/sites/default/files/ambiente/15259_CCIAATO_4102012.pdf
- [25] 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.
- [26] Iacopo Bianchi, Archimede Forcellese, Tommaso Mancina, Michela Simoncini & Alessio Vita (2022): Process parameters effect on environmental sustainability of composites FFF technology, *Materials and Manufacturing Processes*, DOI: 10.1080/10426914.2022.2049300

RINGRAZIAMENTI

In primo luogo, ringrazio il Prof. Ing. Alessio Vita e l'Ing. Iacopo Bianchi che mi hanno seguito nello svolgimento del tirocinio e con estrema disponibilità mi hanno dato consigli preziosi per la stesura della tesi.

Ringrazio la mia famiglia, che mi ha sempre sostenuta e appoggiata in ogni mia decisione. In particolare ringrazio mia madre, che ha sempre condiviso con me e fatte sue le mie preoccupazioni. Ringrazio mio padre, che con la sua serietà mi ha condotta sempre verso le giuste decisioni e ringrazio mia sorella che con la sua dolcezza mi ha tirato su nei momenti di sconforto.

Grazie ad Alessandro che mi ha accompagnato in questo percorso, sostenendomi e rassicurandomi. Grazie di essermi sempre stato accanto.

Ringrazio i miei nonni e miei zii, che si sono interessati ad ogni esame con le loro telefonate premurose.

Grazie ai miei cugini e alle mie amiche che attraverso una risata hanno reso i momenti difficili di questo percorso più spensierati.

Ringrazio i piccoli Alice, Michele e Sofia per aver allietato e movimentato le mie serate dopo ore di studio.