



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA MECCANICA

SVILUPPO DI UN METODO PER IL CALCOLO
SEMPLIFICATO DELLA SOSTENIBILITÀ
AMBIENTALE DI UN PROCESSO DI STAMPA 3D

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR THE SIMPLIFIED
CALCULATION OF THE ENVIRONMENTAL
SUSTAINABILITY OF A 3D PRINTING PROCESS

RELATORE:

PROF. MARCO MANDOLINI

TESI DI LAUREA DI:

LORENZO ALIAJ

CORRELATORE:

PROF. MARTA ROSSI

Gli scienziati sognano di fare grandi cose. Gli ingegneri le realizzano.

James Michener

I. Sommario

I. Sommario.....	ii
II. Elenco delle figure.....	iv
III. Elenco delle tabelle.....	v
1 Abstract.....	1
2 Introduzione.....	2
3 Stato dell'arte	5
3.1 Aspetti Generali.....	5
3.2 Impatto Ambientale	10
3.3 Prestazione Energetica.....	11
3.4 DfAM Guidelines	12
3.5 Economy Strategies	14
3.6 Ottimizzazione Topologica	16
4 Metodo	17
4.1 Strumento di simulazione	17
4.2 EPA model.....	18
4.3 Flusso di lavoro basato sull'EPA.....	21
4.4 Approccio	23
5 Caso studio	25
5.1 Recupero informazione riguardante l'energia del processo	26
5.2 Definire gli EnPI	28
5.3 Metodologia di calcolo.....	29
5.3.1 Normalized EnPI	30
5.3.2 Weighting factors.....	31
5.3.3 Aggregated EnPI.....	32
6 Risultati e discussione.....	33
6.1 Componente 1v1.....	34
6.1.1 SLS.....	35
6.1.2 FDM	36
6.1.3 SLM.....	38
6.1.4 DED.....	39

6.2	Componente 2v2.....	41
6.2.1	SLS.....	42
6.2.2	FDM.....	42
6.2.3	SLM.....	44
6.2.4	DED.....	46
6.3	Componente v14.....	47
6.3.1	SLS.....	48
6.3.2	FDM.....	48
6.3.3	SLM.....	50
6.3.4	DED.....	52
7	Conclusioni.....	53
8	Bibliografia	55

II. Elenco delle figure

Figura 3.1 Linea Temporale della produzione additiva

Figura 3.2 Esempio di una lavorazione per laser selettivo

Figura 3.3 Esempio di processo DED, la materia prima viene introdotta in una sorgente luminosa (A) o come polvere (B).

Figura 3.4 Esempio processo FDM

Figura 4.1 General Workflow

Figure 5.1 Casi di studio: parte con codice 1 v1 (a), parte con codice 2 v2 (b), parte con codice v14 (c)

III. Elenco delle tabelle

Tabella 4.1 Tipologie di EnPI

Tabella 5.1 Valori di SEC e EL derivati dalla letteratura in funzione del tipo di processo, macchina e materiali

Tabella 5.2 Valori di SEC e EL utilizzati nel caso di studio

Tabella 5.3 Original EnPI per il componente 2v2 con il processo FDM

Tabella 5.4 Normalized EnPI per il componente 2v2 con il processo FDM

Tabella 5.5 WF per questo caso di studio

Tabella 5.6 Aggregated EnPI per il componente 2v2 con il processo FDM

Tabella 6.1 Orientazioni componente 1v1

Tabella 6.2 Original EnPI 1v1 SLS

Tabella 6.3 Original EnPI 1v1 FDM

Tabella 6.4 Normalized EnPI 1v1 FDM

Tabella 6.5 Aggregated EnPI 1v1 FDM

Tabella 6.6 Original EnPI 1v1 SLM

Tabella 6.7 Normalized EnPI 1v1 SLM

Tabella 6.8 Aggregated EnPI 1v1 SLM

Tabella 6.9 Original EnPI 1v1 DED

Tabella 6.10 Orientamento Componente 2v2

Tabella 6.11 Original EnPI 2v2 SLS

Tabella 6.12 Original EnPI 2v2 FDM

Tabella 6.13 Normalized EnPI 2v2 FDM

Tabella 6.14 Aggregated EnPI 2v2 FDM

Tabella 6.15 Original EnPI 2v2 SLM

Tabella 6.16 Normalized EnPI 2v2 SLM

Tabella 6.17 Aggregated EnPI 2v2 SLM

Tabella 6.18 Original EnPI 2v2 DED

Tabella 6.19 Orientamento Componente v14

Tabella 6.20 Original EnPI v14 SLS

Tabella 6.21 Original EnPI v14 FDM

Tabella 6.22 Normalized EnPI v14 FDM

Tabella 6.23 Aggregated EnPI v14 FDM

Tabella 6.24 Original EnPI v14 SLM

Tabella 6.25 Normalized EnPI v14 SLM

Tabella 6.26 Aggregated EnPI v14 SLM

Tabella 6.27 Original EnPI v14 DED

1 Abstract

I processi di stampaggio 3D, o più chiamati processi di produzione additiva, rappresentano il futuro della produzione manifatturiera. Grazie a questi processi si è in grado di ottenere modelli 3D, anche di forme molto complesse, partendo dal nulla, sovrapponendo strati di un certo tipo di materiale sulla base di un modello digitale

Per valutare e garantire questa sostenibilità, e quindi i benefici della produzione additiva, è necessario utilizzare un tipo di approccio, che varia a seconda di cosa si vuole considerare nel processo.

Nel seguente elaborato di tesi l'aspetto che si va a considerare è l'energia utilizzata nel processo di produzione.

L'obiettivo che ci si pone è lo sviluppo di un metodo di calcolo dell'energia del processo al variare dell'orientazione di stampaggio in modo da ottenere l'orientazione ottimale, cioè quella con il minor consumo energetico e quindi più sostenibile. La tesi viene sviluppata in più fasi. Nella prima fase si presentano le principali ricerche nel campo della sostenibilità ambientale dei processi di produzione additiva, in modo da visualizzare gli approcci che comunemente vengono utilizzati per garantire questa sostenibilità.

Successivamente viene scelto il metodo che si andrà ad utilizzare per questa tesi, che, come detto prima, si basa sull'energia del processo. Il metodo verrà opportunamente analizzato in modo da poterlo applicare al nostro caso di studio, identificato da tre componenti diversi stampati con diverse tecnologie e con diversi materiali. I risultati ottenuti dimostrano la validità del metodo di ottenere il design di stampaggio ottimale, considerando l'energia del processo. Inoltre, per i lavori futuri potrebbe essere utile considerare non solo sull'energia del processo, ma di tutto il ciclo di vita del componente (ad esempio l'energia per la produzione delle materie prime o l'energia per i post-processi).

2 Introduzione

I processi di stampaggio 3D, o più comunemente chiamati processi di produzione additiva, rappresentano il futuro della produzione manifatturiera. Questi innovativi metodi consentono di creare modelli tridimensionali, inclusi quelli di forme estremamente complesse, partendo da zero e sovrapponendo strati di materiali specifici seguendo un modello digitale predefinito. Questa tecnologia sta rivoluzionando il modo in cui concepiamo e realizziamo oggetti, eliminando le limitazioni tradizionali del processo di produzione. Uno dei vantaggi chiave dei processi di stampaggio 3D è la capacità di realizzare geometrie complesse che sarebbero difficili o addirittura impossibili da ottenere con i metodi di produzione tradizionali. Attraverso la deposizione strato su strato di materiali come plastica, metallo o ceramica, si può creare un oggetto fisico che corrisponde esattamente al modello digitale progettato. Ciò consente la produzione di prototipi rapidi, personalizzazioni su misura e la produzione su piccola scala di parti complesse. Inoltre, i processi di stampaggio 3D offrono notevoli vantaggi in termini di efficienza e riduzione degli sprechi di materiale. Poiché il materiale viene utilizzato solo dove è necessario, si possono ottenere risparmi significativi rispetto ai metodi di lavorazione tradizionali che richiedono la rimozione di materiale in eccesso. Ciò si traduce in una maggiore sostenibilità ambientale e in un utilizzo ottimizzato delle risorse. I processi di stampaggio 3D sono ampiamente utilizzati in diversi settori, tra cui l'industria manifatturiera, l'aerospaziale, l'automobilistico, la medicina e molti altri. La capacità di creare rapidamente prototipi funzionali, parti personalizzate e componenti complessi ha aperto nuove possibilità in termini di innovazione e design. In conclusione, i processi di stampaggio 3D stanno trasformando il panorama della produzione manifatturiera, consentendo la creazione di oggetti personalizzati, complessi e funzionali in modo più efficiente ed ecologicamente sostenibile. Questa tecnologia rappresenta un passo avanti significativo verso un futuro in cui la produzione su misura e la personalizzazione di massa saranno all'ordine del giorno.

La produzione additiva comprende una vasta gamma di tecnologie di stampaggio, come ad esempio il FDM (fused deposition modeling), il SLM (selective laser melting), il SLS (selective laser sintering) e il DED (direct energy deposition), tutte basate sulla sovrapposizione di materiale durante il processo di fabbricazione. Uno degli aspetti positivi della produzione additiva è la capacità di utilizzare una vasta gamma di materiali per lo stampaggio, che spaziano dal metallo alla ceramica, al vetro e alle plastiche. Questa flessibilità nell'uso dei materiali consente di adattare il processo alle esigenze specifiche di ogni applicazione, consentendo la realizzazione di componenti con proprietà e caratteristiche desiderate. L'impatto ambientale è un aspetto chiave della produzione additiva su cui molti ricercatori si stanno concentrando negli ultimi anni. Ci sono diversi aspetti da considerare al fine di ridurre l'impatto ambientale di questo processo.

Uno dei concetti chiave è l'ottimizzazione topologica, che mira a ottenere una forma efficiente riducendo la quantità di materiale necessario per la stampa. Questo approccio consente di ridurre lo spreco di materiale e di ottimizzare le proprietà meccaniche dei componenti.

Inoltre, sono state sviluppate linee guida per la progettazione e la produzione dei processi additivi al fine di garantire una produzione sostenibile. Queste linee guida coprono diversi aspetti, tra cui la geometria, la qualità, il materiale, le proprietà meccaniche e la sostenibilità del prodotto finale. L'adozione di queste "strategie" contribuisce a migliorare l'efficienza per ridurre l'impatto ambientale del processo di produzione additiva.

Infine, vi sono ricercatori che si concentrano sull'energia del processo come uno dei principali problemi da affrontare nei processi additivi. Questo approccio mira a ottimizzare l'utilizzo dell'energia durante la produzione additiva, considerando fattori come i materiali utilizzati, le dimensioni e la complessità delle parti, la velocità di costruzione e gli schemi di scansione. L'obiettivo energetico è ridurre al minimo il consumo senza compromettere la qualità dei componenti. In conclusione, la produzione additiva offre diverse tecnologie di stampaggio e una vasta gamma di materiali, consentendo un approccio flessibile e adattabile alla produzione di componenti. Ridurre l'impatto ambientale del processo è un obiettivo importante, e gli sforzi dei ricercatori si concentrano sull'ottimizzazione topologica, sulle linee guida di progettazione e produzione e sull'efficienza energetica per rendere la produzione additiva sempre più sostenibile ed eco-friendly.

Questa tesi si concentrerà nel campo dell'energia del processo.

L'obiettivo è quello di osservare, al cambiamento di orientazione di stampaggio di un componente, l'energia utilizzata per ogni orientazione e scegliere, grazie al metodo che si utilizzerà nella tesi, l'orientazione ottimale. I componenti utilizzati nel caso di studio vengono ottenuti con 4 diverse tecnologie (FDM, SLM, SLS, DED) e quindi di 4 diversi materiali (rispettivamente ABS, Inconel 718, Poliammide PA e AISI 316), in modo da considerare, oltre l'orientazione, anche il tipo di tecnologia e i materiali utilizzati.

I risultati ottenuti convalidano il metodo utilizzato per ottenere il design ottimale tra tutti quelli analizzati. Per i lavori futuri potrebbe essere molto utile concentrarsi anche al di fuori del processo; quindi, considerando l'energia utilizzata per produrre le materie prime per i processi additivi, siccome utilizzano molta energia, e l'energia utilizzata nei processi di post-produzione, utili per la rimozione delle strutture di appoggio e finitura. In questo modo si ha una visione più completa dell'energia utilizzata nell'intero ciclo di vita del componente e stabilire i principali punti critici.

3 Stato dell'arte

In questo capitolo si presenteranno lo stato attuale delle ricerche sulla sostenibilità ambientale nei processi di produzione additiva. Nella letteratura scientifica, sono stati proposti diversi approcci per garantire la sostenibilità ambientale, a seconda dell'ambito di studio, come ad esempio l'energia o la forma del componente.

3.1 Aspetti Generali

Per produzione additiva si definisce un processo di unione di materiali per creare parti da dati di modelli 3D, solitamente strato su strato, in contrasto con la produzione sottrattiva e le metodologie di produzione formativa [1].

La storia di AM può essere suddivisa in tre periodi:

- Preistoria, che va dal 1860 al 1960, in cui gli oggetti venivano costruiti manualmente strato dopo strato senza l'uso di utensili da taglio o computer;
- Precursori, che vanno dagli anni '60 alla metà degli anni '80, in cui AM le tecnologie comprendevano tutte le caratteristiche dei moderni processi AM ad eccezione dell'uso del computer interfaccia;
- Processi moderni, che risalgono alla metà degli anni '80 e sono caratterizzati da processi AM commercializzati che sono pienamente supportati da computer e tecnologie di informazione [2].

La Figura 3.1 **Errore. L'origine riferimento non è stata**

trovata. rappresenta i passi principali fatti dall'AM nella storia.

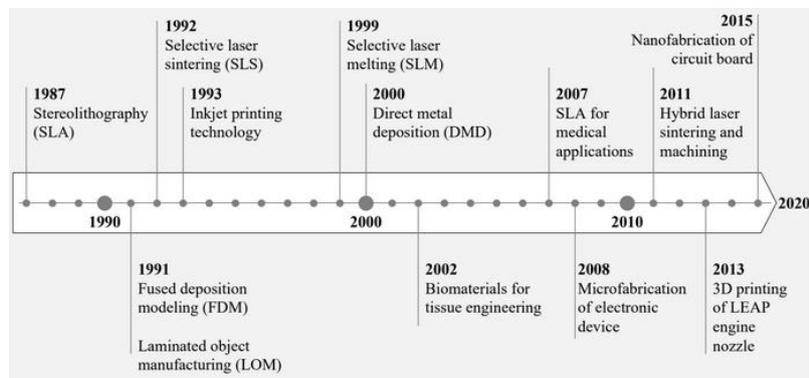


Figura 3.1 Linea Temporale della produzione additiva

Le principali caratteristiche dei processi additivi sono:

- Modello preparato mediante CAD: utilizzato per elaborare parametri di costruzione, come spessore del layer o velocità di costruzione, poi questi set di parametri vengono utilizzati per avviare il processo [3].
- Materiali: i processi AM sono in grado di utilizzare qualsiasi materiale, in particolare polimeri, metalli, compositi e ceramiche [4].
- Assenza di utensili da taglio: la costruzione dei layer durante l'AM non richiede gli strumenti di taglio o di bloccaggio. Quindi, teoricamente, i processi AM possono creare una parte in tutti gli orientamenti possibili senza problemi di bloccaggio [3].
- Necessarie strutture di supporto: per due scopi: prevenire il collasso degli strati fusi (in particolare quando si creano grandi superfici a sbalzo) e dissipare il calore per prevenire alti stati tensionali residui. La struttura di supporto dovrà essere rimossa dopo il completamento dell'operazione [5].
- Libertà di progettazione: i processi AM consentono maggiore libertà progettuale, che si esprime in quattro aspetti: utilizzo di geometrie complesse (quali corpi cavi e strutture reticolari); utilizzo di geometrie personalizzate dai clienti; consolidamento delle parti e integrazione delle caratteristiche in singole parti per evitare problemi di assemblaggio; eliminazione dei vincoli imposti dai processi di produzione convenzionale [6].

Il processo AM si dirama in diverse tecnologie e metodologie di produzione. In questo elaborato si trattano tecnologie come:

SLS (sinterizzazione laser selettiva) è un tipo di fusione a letto di polvere in cui un letto di polimero in polvere, resina o metallo viene preso di mira parzialmente (sinterizzazione) o completamente (fusione) da una fonte di riscaldamento direzionale ad alta potenza come un laser che si traduce in una solidificazione strato di polvere fusa [7].

SLM (fusione laser selettiva) è una tecnica di stampa 3D specifica, che utilizza un laser ad alta densità di potenza per fondere completamente e fondere polveri metalliche per produrre parti quasi a forma di rete con densità quasi completa [8]. Nella Figura 3.2 è rappresentata una lavorazione mediante laser.

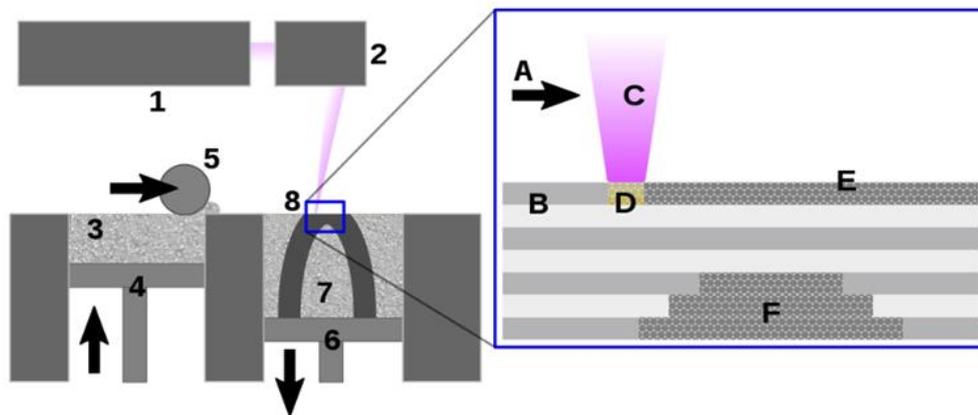


Figura 3.2 Esempio di una lavorazione per laser selettivo

DED (deposizione di energia diretta) è un processo di produzione additivo in cui l'energia termica focalizzata viene utilizzata per fondere i materiali fondendoli mentre vengono depositati [9] (Figura 3.3).

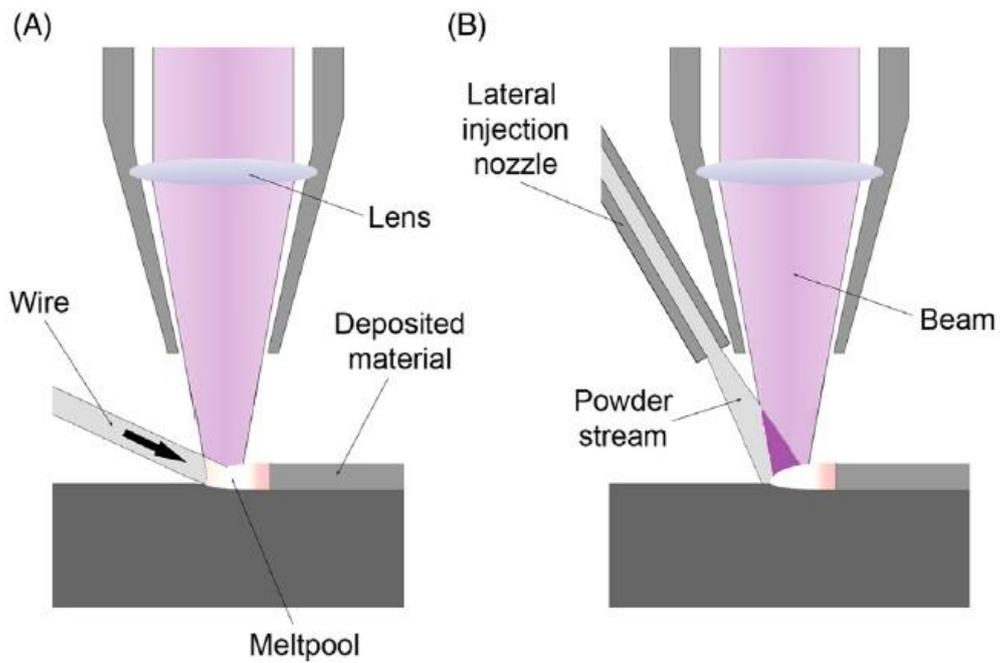


Figura 3.3 Esempio di processo DED, la materia prima viene introdotta in una sorgente luminosa (A) o come polvere (B).

FDM (modellazione a deposizione fusa) è una tecnologia di produzione additiva che crea componenti 3D utilizzando un filo continuo di materiale termoplastico o composito sotto forma di filamento. Un estrusore alimenta il filamento di plastica attraverso un ugello di estrusione, che viene fuso e quindi depositato selettivamente strato dopo strato sulla piattaforma di costruzione in un percorso automatizzato predeterminato [10] (Figura 3.4).

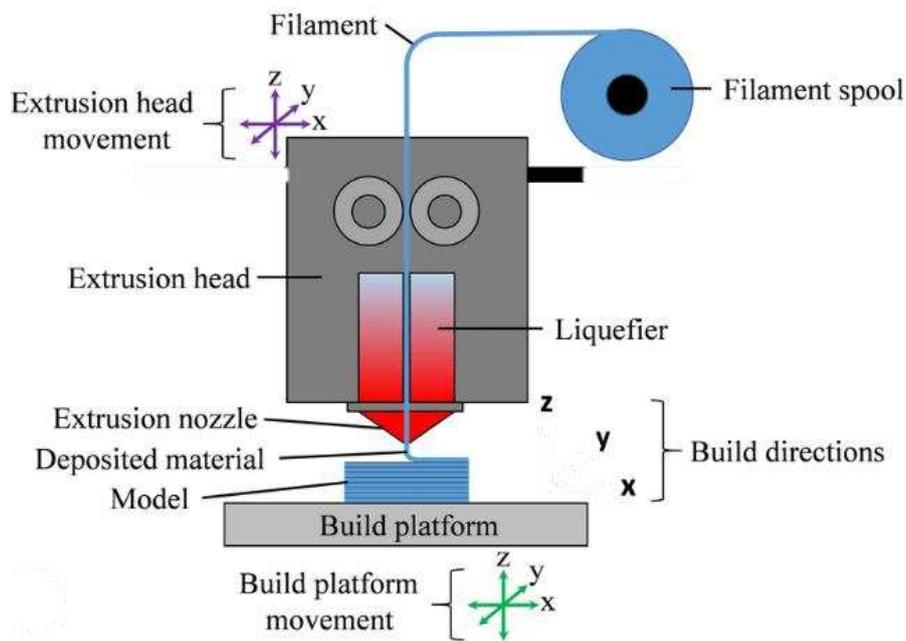


Figura 3.4 Esempio processo FDM

3.2 Impatto Ambientale

A cause dell'aumento dell'inquinamento mondiale i moderni sistemi di produzione devono essere più puliti e più sostenibili [11].

Principali benefits dei processi AM:

Strutture leggere: implica l'uso di meno materiale durante la fase di produzione e si rilevano vantaggiosi per l'ambiente nella fase di utilizzo.

Materiale di scarto: le polveri inutilizzate possono essere riciclate e riutilizzate[12]. Gli sfridi vengono prodotti solo quando vengono eliminate le strutture di supporto e per i processi di post-produzione.

Riduzione dei processi di produzione: i processi AM consente il consolidamento delle parti, in cui più parti sono integrate in singole parti complesse, riducendo così le operazioni di produzione. Si stima che entro il 2025 l'energia primaria e l'intensità delle emissioni di CO2 dell'industria manifatturiera potrebbe essere ridotta di un massimo del 5% attraverso la filiera riorganizzazione mediante implementazione AM [13].

Principali preoccupazioni per i processi AM:

Produzione delle materie prime: a differenza dei processi convenzionali, che non sono suscettibili alla forma delle materie prime, le materie prime per i processi AM devono essere prodotte in una forma ben specifica [14].

Lunghi tempi di processo: i tempi di processo possono variare da ore a giorni in funzione dei parametri di processo impostati e delle macchine utilizzate [15]. Tempi di costruzione più lunghi implicano un maggiore consumo di elettricità e un rischio maggiore di errore.

In caso di errore durante il processo, la compilazione dovrà essere ripetuta; di conseguenza, gli strati prodotti verranno raschiati e l'energia consumata verrà sprecata.

Digitalizzazione: un processo inizia con un set di parametri digitali, inoltre il monitoraggio e il controllo del processo si basano sulla raccolta e l'analisi di immagini basate su telecamera [16]. Pertanto, tali requisiti implicano che l'applicazione di AM è fortemente dipendente dalle tecnologie digitali [2] e tali tecnologie richiedono quantità significative di energia elettrica [17].

3.3 Prestazione Energetica

Rispetto alla prestazione ambientale, in cui vengono considerate diverse categorie di impatto, la prestazione energetica si concentra esclusivamente su misure relative al consumo energetico, all'efficienza energetica e all'uso di energia di un sistema o processo e omette tutti gli altri impatti [18]. Infatti, il problema più importante riguardo alla sostenibilità del AM è proprio la questione energetica, come visto dagli autori in [19]. Il rendimento energetico è uno dei problemi ambientali più importanti associati all'AM a causa dei seguenti motivi:

- **Consumo Energetico:** il consumo di elettricità durante i processi AM è significativo. Secondo uno studio condotto da [20], considerando un componente prodotto mediante processo SLM, il consumo di elettricità rappresenta circa l'80% dell'energia incorporata e la proporzione dell'impatto causato dal consumo di elettricità varia da circa il 67% al 75% dell'impatto totale del ciclo di vita del componente. Rispetto al consumo di energia elettrica, l'impatto causato dallo spreco di materiale, argon, trasporto e smaltimento delle macchine è trascurabile e il l'impatto causato dalla produzione di polvere non rappresenta mai più del 10-12% dell'impatto totale.
- **Prestazione energetica:** la prestazione energetica del AM può essere influenzata da molti fattori. I fattori relativi al prodotto includono i materiali utilizzati, dimensione della parte e numero di parti presenti in un compito di costruzione [14]. I fattori invece legati al processo includono l'orientamento della costruzione, velocità di costruzione, spessore dello strato e pattern di scansione [20]. Modificando l'orientamento della costruzione porta a dei cambiamenti nella struttura di supporto e del numero di strati, comportando diversi livelli di consumo energetico.
- **Minore efficienza energetica ed elevato consumo specifico:** nei processi AM basati su laser, la radiazione termica, la riflessione, la conduzione e la convezione dei pool fusi portano a un elevato spreco di energia. Ad esempio, l'efficienza adiabatica dei processi laser AM (il rapporto tra la velocità di costruzione effettiva con perdita di calore e la velocità di costruzione massima teorica senza perdita di calore) varia dal

3,6% al 7% per l'alluminio e dal 9% al 23% per l'acciaio [21]. Il consumo energetico specifico (consumo energetico per 1 kg di materiale) dei processi AM può essere da uno a due ordini di grandezza superiore a quello dei processi tipici di lavorazione [14].

Gli autori in [22], [23] sviluppano un nuovo eco-design per un quadro di produzione additiva basato sulla valutazione della prestazione energetica del processo (EPA "energy performance assessment").

Questo quadro si compone di tre parti: strumento di simulazione energetica, modello di valutazione della prestazione energetica (EPA model) e flusso di lavoro di eco-design per AM. Per sviluppare questo strumento di simulazione si possono usare due metodi: empirico e fisico, visto in [24], [25].

Gli autori in [25] sviluppano e applicano lo strumento di simulazione energetica a una macchina SLM. La valutazione della prestazione energetica si basa sull'uso di indicatori di prestazione energetica (EnPI) [26]. Questi indicatori si suddividono in quattro tipologie: valore energetico misurato, rapporto del valore misurato, modello statistico e modello ingegneristico [27].

3.4 DfAM Guidelines

Le DfAM (design for additive manufacturing) guidelines sono delle strategie che guidano il progettista a una migliore progettazione e produzione dei componenti realizzati da processi additivi.

Varie linee guida DFAM (design for AM) sono state presentate in [28], considerando costo e prestazione del prodotto.

Gli autori in [29] analizzano delle linee guida progettuali per prodotti AM per facilitarne l'implementazione durante le prime fasi di progettazione e migliorare l'efficacia del prodotto in termini di sostenibilità. Per analizzarle si utilizza l'approccio AD (axiomatic design) e il TOPSIS (grey technique for order preference by similarity to ideal solution).

AD aiuta il progettista a migliorare l'attività di progettazione traducendo in modo efficiente i requisiti tecnici in parametri di progettazione [30].

Il metodo TOPSIS aiuta ad analizzare e dare la priorità alle alternative basate su soluzioni ideali [31].

Come si vede in [32] gli autori, implementando queste linee guida su un caso di studio, riscontrano una riduzione del 50% dei costi di produzione e un aumento fino al 50% della produttività.

Gli autori in [33] propongono delle strategie in base alla parte da realizzare, il consumo di energia e resistenza ambientale. In particolare, per la parte le strategie sono: considerare l'effetto dell'air gap sull'uso del materiale; mirare a schemi aperti (valori di air gap elevati) per parti visive, leggere, a bassa inerzia o a bassa resistenza meccanica; orientare la parte in un certo modo per ridurre l'uso di strutture di supporto.

Per il consumo energetico: mirare a ridurre il tempo di costruzione riducendo al minimo il numero di contorni e strati e aumentando lo spessore dello strato e il traferro; orientare la parte con la sua altezza minima corrispondente all'orientamento di costruzione; ridurre la quantità di produzioni per diluire il preriscaldamento tra le produzioni; ridurre i tempi non produttivi del sistema di estrusione.

Infine, per la resistenza ambientale: garantire la totale adesione o legatura del materiale e degli strati nella parte; fornire un rivestimento aggiuntivo alle parti per aumentarne la resistenza ambientale; fornire un rivestimento protettivo alle parti che saranno esposte ad ambienti aggressivi, corrosione, sostanze chimiche, umidità, radiazioni UV o alte temperature; evitare l'esposizione delle parti in plastica a temperature elevate (tipicamente superiori a 50 °C).

3.5 Economy Strategies

Gli autori in [34] presentano una revisione sulla progettazione sostenibile di AM, evidenziando in particolare gli elementi di sostenibilità dell'AM e diverse strategie di economia circolare supportate mostrandone i potenziali benefici. Un'economia circolare (CE) può essere definita come un sistema economico progettato con l'obiettivo di massimizzare l'uso delle risorse estratte e ridurre al minimo i rifiuti generati per lo smaltimento [35].

L'Economia Circolare può essere utilizzata per la minimizzazione dei rifiuti e riciclaggio come una sorta di strategia, basata su ridurre, riutilizzare, riciclare, riprogettare, recuperare e rigenerazione (CE strategy) [36].

In [37] viene proposto un framework per esplorare e garantire i valori sostenibili delle tecnologie AM; questo quadro applica un approccio di road-mapping e analisi del valore sostenibile. Sei strategie sono identificate per garantire i valori sostenibili: progettazione di prodotti e processi per l'efficienza, configurazione del sistema di produzione, modello di business, efficienza nell'uso, vita del prodotto estensione e chiusura del ciclo.

In questo articolo [38] si presenta una revisione su diversi lavori relativi all'eco-design di AM. In primis si valuta l'aspetto ambientale di ricerche su differenti metodi di AM. Poi viene effettuata una revisione critica su opere che presentano processi di progettazione per AM. Infine gli autori propongono un approccio di eco-design per prodotti AM in fase CAD. Una metodologia per la fase di progettazione concettuale è stata introdotta dagli autori in [39] e si basa su delle sessioni creative in cui sono necessari supporti dedicati, in termini di decisioni ambientali, per guidare le scelte.

In [40] gli autori propongono una metodologia formata da quattro fasi che ha lo scopo di aiutare il progettista a decidere quale processo genera meno inquinamento.

3.6 Ottimizzazione Topologica

Gli autori in [41] propongono un approccio che integra l'ottimizzazione topologica nella progettazione bio-ispirata, tenendo conto contemporaneamente delle condizioni di lavoro e delle funzionalità della struttura. Questo metodo mira a ottenere soluzioni ottimali che siano sia efficienti dal punto di vista strutturale che rispettose dell'ambiente.

Nel documento [42] riporta i risultati di indagini condotte sull'effetto dell'ottimizzazione topologica basata sull'analisi agli elementi finiti (FEA) sulla qualità e la sostenibilità dei prodotti realizzati mediante il processo FDM (fused deposition modeling). Questo studio ha esaminato come l'ottimizzazione topologica possa influenzare la geometria dei componenti e migliorare le prestazioni strutturali, riducendo al contempo il consumo di materiale e l'impatto ambientale.

In [43] gli autori presentano un metodo di ottimizzazione topologica basato sul LSTO (level set topology optimization) e affrontano la questione del ciclo di vita e del riciclaggio dei componenti. Il LSTO utilizza una descrizione implicita flessibile del dominio materiale, in cui il contorno di livello zero della funzione di livello definisce il confine strutturale. Questo metodo consente di ottenere una progettazione ottimizzata che tiene conto delle esigenze di sostenibilità e delle fasi successive del ciclo di vita dei prodotti.

In sintesi, gli studi menzionati presentano approcci innovativi per incorporare l'ottimizzazione topologica nella progettazione, considerando sia gli aspetti strutturali che quelli ambientali. Questi metodi consentono di ottenere soluzioni ottimali che migliorano la qualità, la sostenibilità e le prestazioni dei prodotti fabbricati, tenendo conto anche dei principi di riciclaggio e del ciclo di vita dei componenti.

4 Metodo

Il metodo utilizzato in questo elaborato si basa sull'analisi e sulla valutazione della prestazione energetica del processo (EPA) [23]. Lo sviluppo dell'EPA può essere realizzato attraverso tre diverse metodologie:

- Strumento di simulazione;
- Modello di valutazione della prestazione energetica (EPA model);
- Flusso di lavoro generale dell'eco-design.

L'utilizzo di queste metodologie permette di analizzare e valutare la prestazione energetica dei processi di produzione additiva in modo approfondito e fornire indicazioni per migliorare l'efficienza energetica complessiva.

4.1 Strumento di simulazione

I strumenti di simulazione consentono di modellare il processo di produzione additiva e stimare il consumo energetico associato. Questi strumenti utilizzano parametri specifici del processo, come velocità di stampa, temperatura di estrusione e geometria dei componenti, per calcolare l'energia richiesta durante la stampa. Questa simulazione consente di valutare e confrontare l'efficienza energetica di diverse differenze di processo e identificare possibili aree di miglioramento.

Lo sviluppo di questo strumento di simulazione viene svolto in quattro fasi:

- 1° Fase: Si va ad analizzare e specificare la struttura e le funzioni dei componenti del sistema AM.
- 2° Fase: I flussi di potenza del sistema AM vengono mappati utilizzando il metodo del grafico dei legami [44].
- 3° Fase: Si usano software come MATLAB/Simulink per sviluppare uno strumento di simulazione energetica per il sistema AM. Consiste nella creazione di modelli di circuiti equivalenti al sistema AM che si sta prendendo come riferimento per

ottenere dati di potenza del sistema senza dover effettuare uno stampaggio del componente.

- 4° Fase: Infine si eseguono degli esperimenti per confermare l'accuratezza dello strumento di simulazione. Dagli esperimenti fatti in [22], l'indice di accuratezza è del 93,75%.

4.2 EPA model

La seconda metodologia consiste nella creazione di un modello di valutazione della prestazione energetica (EPA model). Questo modello si basa su dati empirici o sperimentali raccolti da studi precedenti o test specifici. Il modello considera i diversi fattori che influenzano il consumo energetico nel processo di produzione additiva, come il tipo di macchina, il materiale di stampa, i parametri di processo e le caratteristiche dei componenti. Utilizzando il modello EPA, è possibile calcolare in modo accurato il consumo energetico per un dato processo e identificare i fattori chiave che ne influenzano la prestazione energetica. Possono essere distinti in quattro tipologie (Tabella 4.1).

Tabella 4.1 Tipologie di EnPI

Tipologie EnPI	Esempio di EnPI
Valori di energia misurati	Consumo energetico per attività di costruzione (J, kWh) Consumo energetico giornaliero o settimanale (J, kWh) Spreco energetico nell'attività di costruzione (J, kWh) Consumo energetico di picco (W)
Rapporto del valore misurato	Consumo energetico specifico (J/cm ³ o J/kg) Consumo energetico per layer (E/layer) Rapporto tra consumo energetico richiesto/totale (%) Rapporto tra dissipazione del calore e consumo di energia (%) Rapporto tra consumo di energia e creazione di valore (J/€) o costo dell'energia (€)
Modello statistico	Relazione tra potenza media e temperatura media (rapporto W - °C) Relazione tra il consumo di energia e la densità di energia del raggio laser (rapporto J - J/m ³).
Modello ingegneristico	Rapporto tra fattore di sicurezza e consumo energetico (1/J) Rapporto tra stress residuo e consumo energetico (MPa/J) Rapporto tra il consumo di energia e la deformazione termica (J/mm) Rapporto tra consumo di energia e densità del materiale (J/ %).

Nel caso in cui il progettista debba scegliere il tipo di design, se si ha un solo EnPI, la decisione può essere eseguita in modo relativamente semplice confrontando gli indicatori delle diverse soluzioni tra loro. Tuttavia, quando si presentano più vincoli di progetto e quindi più indicatori da, diventa necessario adottare un approccio adeguato da considerare per ponderare, normalizzare e aggregare gli EnPI al fine di identificare la soluzione più ottimale. La ponderazione degli EnPI coinvolge l'assegnazione di pesi relativi a ciascun indicatore, in base all'importanza che rivestono all'interno del contesto specifico del progetto. Ad esempio, se l'efficienza energetica è una priorità maggiore rispetto all'impatto ambientale generale, è possibile assegnare un peso più elevato all'EnPI associato all'energia.

Successivamente, è necessaria la normalizzazione degli EnPI per assicurare che i valori siano comparabili tra loro. Questo può coinvolgere la trasformazione dei dati grezzi degli indicatori in una scala comune o nella riduzione a un'unità di misura standardizzata. La normalizzazione permette di confrontare gli EnPI in modo significativo, indipendentemente dalle loro unità di misura originali. Infine, l'aggregazione degli EnPI normalizzati viene eseguita per ottenere un valore complessivo che rappresenta l'efficacia complessiva di ciascuna soluzione in considerazione. Questo processo fornisce una valutazione complessiva delle diverse soluzioni e facilita la scelta della soluzione più ottimale, considerando l'insieme dei vincoli di progetto.

L'uso di una corretta ponderazione, normalizzazione e aggregazione degli EnPI consente ai progettisti di prendere decisioni informate e guidate dai dati nella scelta del design più adatto, tenendo conto dei diversi aspetti dell'efficienza energetica e dell'impatto ambientale. Questo approccio aiuta a ottimizzare la soluzione finale, tenendo conto delle diverse priorità e vincoli di progetto.

- Original EnPI: Sono gli indicatori di cui si hanno informazione e che si considerano per eseguire questa metodologia.
- Normalized EnPI: Una volta raggruppati gli EnPI originali, viene eseguita una normalizzazione di essi. Può essere eseguita in due modi:

Upper Difference: per indicatori con l'unità di misura dell'energia al numeratore.

$$UD_i^j = \max(EnPI_i^j) - EnPI_i^j$$

Lower Difference: per indicatori con l'unità di misura dell'energia al denominatore.

$$LD_i^j = EnPI_i^j - \min(EnPI_i^j)$$

Infine, si divide il valore ottenuto, che sia per UD o LD, per il range (differenza tra EnPI massimo e EnPI minimo)

- Weighting factors (WF): I pesi degli EnPI sono calcolati mediante confronto a coppie [45]. Il primo step è quello di definire il livello di importanza degli EnPI, successivamente si costruisce una matrice contenente gli indicatori (sia nelle righe che nelle colonne). Se l'EnPI nella riga ha un livello di importanza maggiore, uguale o minore all'EnPI nella colonna allora si inserirà nella cella in comune rispettivamente un valore di 6, 3 e 1. Per ogni EnPI si sommano i valori ottenuti, così da avere lo score (S), e infine si calcolano i $WF^j = \frac{S^j}{\sum_{j=1}^m S^j}$
- Aggregated EnPI: Per ottenere gli EnPI finali bisogna moltiplicare i WF per gli EnPI normalizzati e infine sommarli per ogni soluzione di design. La soluzione ottimale sarà quella con la somma degli aggregated EnPI maggiore.

4.3 Flusso di lavoro basato sull'EPA

Questa metodologia propone l'implementazione di un flusso di lavoro generale per l'eco-design. Questo approccio integra considerazioni sulla prestazione energetica fin dalle prime fasi del processo di progettazione, consentendo di valutare l'impatto ambientale dei componenti durante l'intero ciclo di vita. Questo flusso di lavoro coinvolge l'analisi della topologia ottimizzata, la selezione dei materiali più sostenibili e l'ottimizzazione dei parametri di processo per ridurre il consumo energetico. In questo modo, si favorisce la progettazione di componenti che soddisfano le esigenze funzionali richieste, minimizzando al contempo l'impatto ambientale.

Nell'articolo [22] viene proposto un workflow generale per l'eco-design, strutturato in 7 step (Figura 4.1):

1. Analizzare vincoli di progetto, requisiti e regolamenti.
2. Definire caratteristiche geometriche e del materiale del prodotto.
3. Selezione e progettazione del sistema AM.
4. Definire parametri del processo di stampa.
5. Simulare il consumo energetico.
6. Definire e calcolare gli EnPI.
7. Valutazione e decisione.

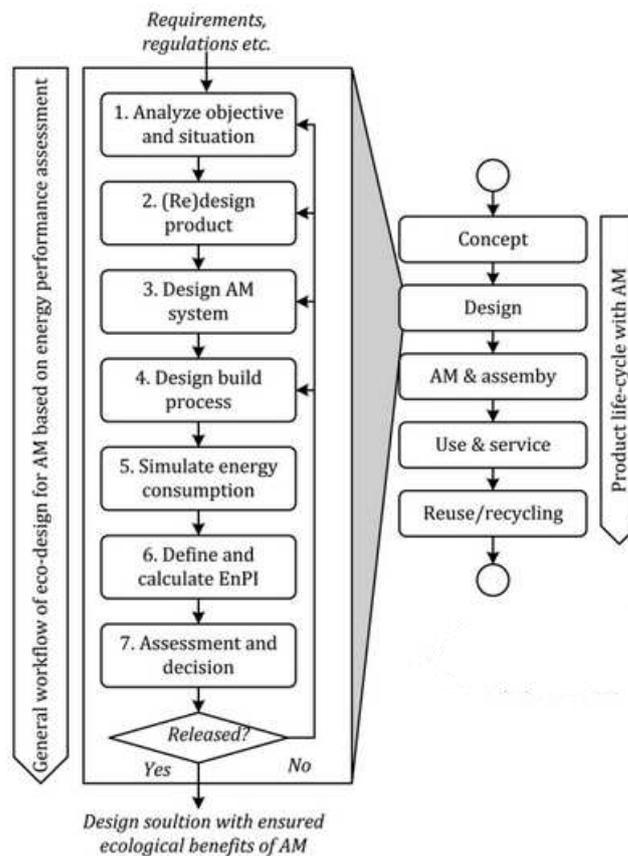


Figura 4.1 General Workflow

4.4 Approccio

Nella seguente tesi, si adotta l'approccio basato sull'utilizzo del modello di valutazione energetica mediante gli indicatori di prestazione energetica, descritto nel capitolo 4.2. Le diverse soluzioni di design analizzate rappresentano i diversi orientamenti di stampaggio dei componenti considerati.

Il processo di ricerca è strutturato come segue:

1. Recupero informazione riguardante l'energia del processo: Questa fase consiste nella ricerca di informazioni e valori di consumo energetico specifico indicati in letteratura, che siano confrontabili con le tecnologie, i materiali e le macchine utilizzate nel caso di studio. L'obiettivo è ottenere dati affidabili e pertinenti per le valutazioni successive.
2. Definire gli EnPI: Una volta raccolti i valori di consumo energetico specifico, si procede a definire gli indicatori di prestazione energetica che verranno considerati nell'analisi.
3. Metodologia di calcolo: Viene replicato il metodo utilizzato per la normalizzazione, l'aggregazione e il calcolo dei punteggi EnPI su un foglio di calcolo Excel. Questo include la creazione di formule e l'applicazione dei pesi appropriati per la normalizzazione e l'aggregazione degli EnPI. Vengono considerate diverse tecnologie di stampaggio e le diverse orientazioni dei componenti.
4. Scelta della soluzione: Una volta ottenuta la somma degli EnPI finali per ciascun'orientazione, la soluzione energeticamente ottimale sarà quella con il valore della somma maggiore.

Vantaggi del metodo utilizzato:

Valutazione basata su più EnPI: rispetto all'uso di un solo indicatori, l'applicazione di più indicatori permette una visione più completa e approfondita delle prestazioni energetiche nei processi di produzione additiva. Questo approccio consente di considerare diversi aspetti rilevanti che influenzano l'efficienza energetica, fornendo una valutazione più accurata e informativa.

Considerazioni di variabili non energetiche: Il metodo utilizzato consente di combinare variabili energetiche con variabili non energetiche nell'analisi e nella valutazione. Ciò significa che, oltre agli aspetti energetici, vengono prese in considerazione anche le caratteristiche specifiche del processo e i vantaggi di progettazione offerti dalla produzione additiva. Questa integrazione di diverse variabili consente di ottenere una valutazione più completa delle prestazioni complessive dei processi AM.

Integrazione delle esigenze progettuali: La metrica del consumo energetico utilizzata nel metodo proposto è quantificabile in modo oggettivo attraverso esperimenti o simulazioni. Ciò rende il calcolo dei WF una valutazione che tiene conto delle aspettative soggettive dei progettisti nella selezione dei pesi attribuiti all'EnPI. Questa integrazione delle esigenze progettuali permette di ottenere una soluzione ottimale che si avvicina maggiormente ai requisiti specifici di progettazione e al contesto applicativo desiderato dal progettista.

5 Caso studio

I componenti presi in esame, al fine di verificare e validare il metodo di valutazione energetica proposto, sono già stati trattati nella tesi [46] (Figure 5.1). Questi componenti saranno analizzati utilizzando quattro diverse tecnologie di stampa: selective laser sintering SLS con l'uso della poliammide PA 12, fused deposition modeling FDM con l'uso del ABS, selective laser melting SLM con l'uso del Inconel 718 e direct energy deposition DED con l'uso dell'AISI 316.

Gli EnPI che si andranno a considerare per questo caso di studio saranno:

- TEC (total energy consumption): misurato in kWh, rappresenta il consumo energetico totale associato alla produzione di ciascun componente.
- EL (energy layer): misurato kWh, rappresenta il consumo energetico derivato dall'energia specifica per layer moltiplicata per il numero dei layer.

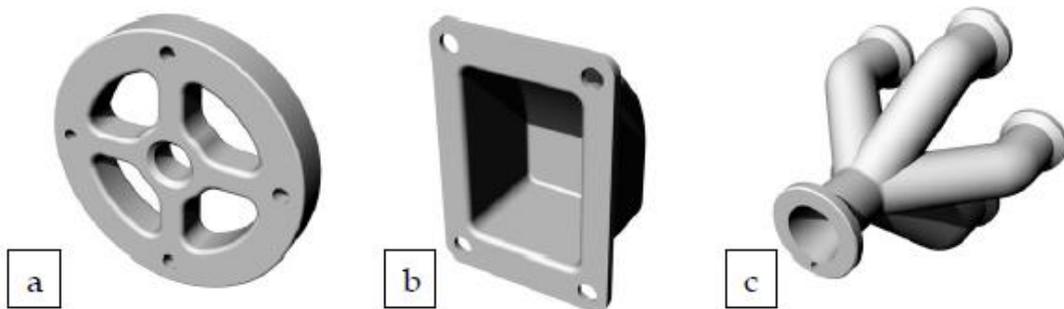


Figure 5.1 Casi di studio: parte con codice 1 v1 (a), parte con codice 2 v2 (b), parte con codice v14 (c)

5.1 Recupero informazione riguardante l'energia del processo

Al fine di ottenere gli indicatori desiderati, è necessario consultare la letteratura per reperire informazioni specifiche riguardanti il consumo energetico totale e il consumo energetico per strato. È importante notare che questi valori possono variare a seconda della tecnologia di stampaggio, dei materiali utilizzati e delle macchine impiegate nel processo. La consultazione energetica della letteratura fornisce dati preziosi sul consumo associato a diverse tecnologie di produzione additiva, materiali specifici e legami di macchine. Queste informazioni consentono di determinare le energie di consumo specifiche e le energie per layer specifiche per ogni caso di studio. Le tecnologie di stampaggio, come la modellazione a deposizione fusa (FDM), la sinterizzazione laser selettiva (SLS), la fusione laser selettiva (SLM) e la deposizione diretta di energia (DED), possono richiedere diverse quantità di energia per strato a causa delle loro modalità di funzionamento e delle caratteristiche del processo. Allo stesso modo, l'utilizzo di diversi materiali, come l'ABS, la poliammide PA 12, l'Inconel 718 o l'AISI 316, può comportare variazioni significative nel consumo energetico.

È quindi necessario eseguire una ricerca accurata e dettagliata sulla letteratura scientifica e tecnica per trovare informazioni specifiche riguardanti il consumo energetico nei processi di produzione additiva. Questi dati forniranno le basi per calcolare gli indicatori energetici necessari alla valutazione delle prestazioni energetiche dei componenti e dei processi considerati. Nella Tabella 5.1 sono riportati alcuni valori derivati dalla letteratura.

Tabella 5.1 Valori di SEC e EL derivati dalla letteratura in funzione del tipo di processo, macchina e materiali

Processo	Materiali	SEC (kWh/kg)	EL (kWh/layer)	Macchina	Ref
SLS	PA 2200	36,04	0,0188	EOSINT P 390	[47]
SLS	PA 12	14,5	/	3D Systems Sinterstation HiQ+HS	[48]
SLS	PA 12	29,72	0,017	EOSINT P 390	[47]
SLS	Duraform PA PA 2200	56,75-66,02	/	3D Systems Sinterstation HiQ+HS EOSINT P 390	[49]
SLS	PA 3200/PA 2200	26,3-36,5	/	EOSINT P760	[50]
FDM	ABS	80,55	/	Fortus 360	[51]
FDM	Polycarbonate	148,89	0,1789	FDM 400 mc	[47]
FDM	ABS	50-63,8	/	Dimension SST 1200es	[52]
SLM	X5CrNi18-10	27	0,036	M3 Linear	[47]
SLM	Steel 316L	29,4	0,066	SLM 250	[47]
DED	Nistelle 625	292,22	/	Optomec LENS 750	[53]
DED	Carbon steel	16,97	/	/	[54]
DED	SS 17-4 PH	67	0,0584	EOSINT M 270	[47]

I valori di energia scelte per questo caso di studio sono rappresentati nella Tabella 5.2.

Tabella 5.2 Valori di SEC e EL utilizzati nel caso di studio

Processo	SEC (kWh/kg)	EL (kWh/layer)
SLS	29,72	0,017
FDM	148,89	0,1789
SLM	29,4	0,066
DED	67	0,0584

Alcuni dei valori selezionati per il caso di studio presentano differenze nei materiali e nelle macchine utilizzate rispetto al riferimento della tesi. Ad esempio, nel caso del processo DED, viene utilizzato un SS 17-4 PH anziché un AISI 316L come indicato nella tesi di riferimento. Tuttavia, questo non rappresenta un problema significativo in quanto il foglio di calcolo Excel consente di inserire valori personalizzati ed esegue automaticamente il modello di valutazione energetica. La flessibilità del foglio di calcolo Excel consente di adattare facilmente i valori alle specifiche del caso di studio. Pertanto, anche se i materiali e le macchine utilizzate possono variare rispetto al riferimento, è possibile inserire i valori appropriati nel foglio di calcolo e il modello di valutazione energetica verrà eseguito in modo coerente.

5.2 Definire gli EnPI

- TEC: per ricavarsi l'energia totale di consumo è sufficiente moltiplicare l'energia specifica per la massa del componente.
- EL: il primo passo per ricavarsi questo indicatore è conoscere l'energia specifica per layer dalla letteratura. Successivamente si definiscono i vari spessori del layer delle tecnologie prese in esame. Per SLS vale 0,1 mm, per FDM vale 0,2 mm, per SLM vale 0,03 mm e per DED vale 0,46 mm. Una volta ottenuti gli spessori bisogna ricavarsi il numero di layer necessari per ogni tipo di stampaggio, ottenuto dividendo l'altezza del componente per lo spessore del layer. Infine, per ottenere l'indicatore è sufficiente moltiplicare il numero dei layer per l'energia specifica.

Un esempio è la Tabella 5.3 in cui sono rappresentati gli Original EnPI per il componente 2v2 ottenuto mediante processo FDM a seconda dell'orientamento di costruzione.

Tabella 5.3 Original EnPI per il componente 2v2 con il processo FDM

Orientamento			FDM			
X	Y	Z	Massa	N° Layer	TEC (kWh)	EL (kWh)
0	0	0	0,3007	650	44,768	116,285
90	0	0	0,3591	300	53,465	53,67
180	0	0	0,3916	650	58,304	116,285
270	0	0	0,3887	300	57,881	53,67
0	90	0	0,4344	450	64,683	80,505
0	180	0	0,3916	650	58,305	116,285
0	270	0	0,4344	450	64,682	80,505
0	0	90	0,3007	650	44,768	116,285
0	0	180	0,3007	650	44,768	116,285
45	45	45	0,3007	628	44,768	112,4208
45	45	135	0,1974	628	29,395	112,4208
45	135	45	0,1974	628	29,394	112,4208
135	45	45	0,1974	682	29,395	121,9204
45	135	135	0,1974	628	29,395	112,4208
135	45	135	0,1621	682	24,133	121,9204
135	135	45	0,1621	682	24,132	121,9204
135	135	135	0,1974	682	29,394	121,9204

5.3 Metodologia di calcolo

Dopo aver ottenuto i diversi indicatori per tutte le orientazioni di stampaggio e per tutte le tecnologie prese in considerazione, si può procedere all'applicazione del metodo di valutazione energetica mediante EnPI.

5.3.1 Normalized EnPI

Per ottenere gli EnPI normalizzati si può procedere per due strade:

- Upper Difference: per indicatori con l'unità di misura dell'energia al numeratore, questo perché un basso valore dell'indicatore corrisponde a un meno consumo di energia. In questo caso la normalizzazione di questo tipo viene fatta al TEC, EL.

$$UD_i^j = \max(EnPI_i^j) - EnPI_i^j$$

- Lower Difference: per indicatori con l'unità di misura dell'energia al denominatore, questo perché un elevato valore dell'indicatore corrisponde a un meno consumo di energia. Ad esempio, se avessi avuto un EnPI con unità di misura 1/J avrei utilizzato questo tipo di normalizzazione.

$$LD_i^j = EnPI_i^j - \min(EnPI_i^j)$$

Infine, si dividono i valori ottenuti, che siano per UD o LD, per il range, cioè la differenza tra il massimo e il minimo di ogni Original EnPI. Nella Tabella 5.4 sono rappresentati i Normalized EnPI per il componente 2v2 ottenuto mediante processo FDM a seconda dell'orientamento di costruzione.

Tabella 5.4 Normalized EnPI per il componente 2v2 con il processo FDM

Orientamento			FDM	
X	Y	Z	TEC	EL
0	0	0	0,491121	0,082569
90	0	0	0,276645	1
180	0	0	0,157317	0,082569
270	0	0	0	0,606815
0	90	0	0,157281	0,082569
0	180	0	0,491121	0,082569
0	270	0	0,491121	0,082569
0	0	90	0,491117	0,139187
0	0	180	0,870232	0,139187
45	45	45	0,870246	0,139187
45	45	135	0,870218	0
45	135	45	0,870224	0,139187
135	45	45	1	0
45	135	135	1,00001	0
135	45	135	0,870257	0
135	135	45	0,491121	0,082569
135	135	135	0,276645	1

5.3.2 Weighting factors

I weighting factors, o semplicemente WF, sono dei valori utilizzati per attribuire un peso agli indicatori utilizzati e consentono l'ottenimento degli Aggregated EnPI, indicatori che guidano alla scelta ottimale.

Il primo passo consiste nel definire il livello di priorità degli indicatori utilizzati. Questi livelli di priorità possono essere alto, medio e basso, a seconda dell'importanza relativa dei singoli indicatori per il processo decisionale.

Successivamente si elencano, a coppie, gli EnPI sia nelle colonne che nelle righe in modo da formare una matrice a celle.

Una volta ottenuta la matrice, si confrontano gli EnPI delle righe con quelli delle colonne. Se l'EnPI nella riga ha un livello di priorità maggiore, uguale o minore all'EnPI nella colonna, viene inserito un valore di 6, 3 o 1 nella cella corrispondente. Nelle celle in comune tra EnPI uguali non va inserito alcun valore. Successivamente si calcola lo score per ogni indicatore, che rappresenta la somma dei valori nelle righe. Il WF per ogni indicatore è il rapporto tra lo score dell'indicatore e la somma totale degli score.

$$WF^j = \frac{S^j}{\sum_{j=1}^m S^j}$$

Nella Tabella 5.5 è possibile osservare i WF per questo caso di studio. Per questo caso di studio il TEC ha un livello di priorità alto e EL un livello di priorità medio. Questi livelli possono cambiare a seconda delle esigenze che l'operatore richiede dal componente; quindi, possono essere molto soggettivi i WF.

Tabella 5.5 WF per questo caso di studio

		EnPI			
EnPI	Priority	TEC	EL	Score	WF
TEC	High		6	6	0,090
EL	Middle	1		1	0,015

5.3.3 Aggregated EnPI

Gli Aggregated EnPI sono gli indicatori finale che consentono all'utente di effettuare la scelta della soluzione ottimale tra le opzioni proposte. Nel contesto di questa tesi, si tratta di selezionare l'orientamento ottimale basandosi sul consumo energetico nel processo.

Per ottenere questo tipo di EnPI si vanno a moltiplicare gli indicatori per il rispettivo WF.

$$EnPI_i^{j''} = EnPI_i^{j'} * WF^j$$

Una volta definiti questi indicatori per ogni orientamento, si calcola la somma degli EnPI ottenuti. L'orientamento ottimale sarà quello che presenta la somma maggiore. Nella Tabella 5.6 sono rappresentati gli Aggregated EnPI per il componente 2v2 ottenuto mediante processo FDM a seconda dell'orientamento di costruzione.

Tabella 5.6 Aggregated EnPI per il componente 2v2 con il processo FDM

Orientamento			FDM		
X	Y	Z	TEC	EL	Sum
0	0	0	0,043981	0,001232	0,045213
90	0	0	0,024774	0,014925	0,0397
180	0	0	0,014088	0,001232	0,01532
270	0	0	0	0,009057	0,009057
0	90	0	0,014085	0,001232	0,015317
0	180	0	0,043981	0,001232	0,045213
0	270	0	0,043981	0,001232	0,045213
0	0	90	0,043981	0,002077	0,046058
0	0	180	0,077931	0,002077	0,080009
45	45	45	0,077932	0,002077	0,08001
45	45	135	0,07793	0	0,07793
45	135	45	0,077931	0,002077	0,080008
135	45	45	0,089552	0	0,089552
45	135	135	0,089553	0	0,089553
135	45	135	0,077933	0	0,077933
135	135	45	0,043981	0,001232	0,045213
135	135	135	0,024774	0,014925	0,0397

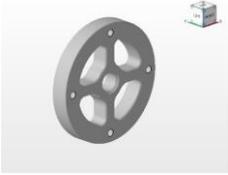
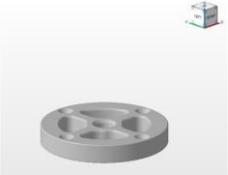
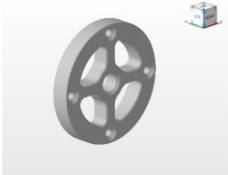
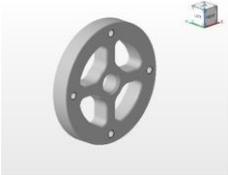
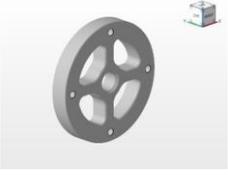
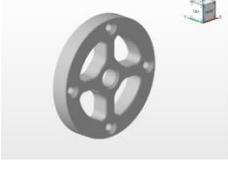
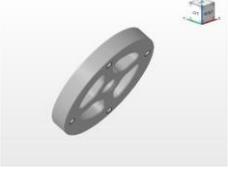
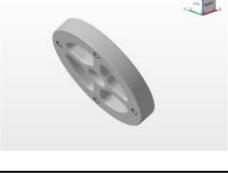
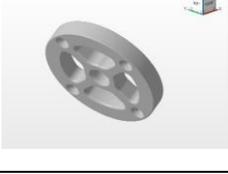
6 Risultati e discussione

In questo capitolo, saranno presentati i risultati del caso di studio e saranno oggetto di discussione adeguata. Per una migliore organizzazione, il capitolo verrà suddiviso in sotto-capitoli basati sui componenti analizzati e la relativa tecnologia utilizzata. Attraverso questa suddivisione, si avrà una struttura chiara e coerente per presentare e discutere i risultati ottenuti. Ogni sotto-capitolo fornisce un'analisi dettagliata dei risultati specifici per il componente esaminato e la tecnologia corrispondente.

6.1 Componente 1v1

Nella Tabella 6.1 è rappresentato il seguente componente con le relative orientazioni.

Tabella 6.1 Orientazioni componente 1v1

<p>Orientamento $0^\circ, 0^\circ, 0^\circ$</p> 	<p>Orientamento $90^\circ, 0^\circ, 0^\circ$</p> 	<p>Orientamento $180^\circ, 0^\circ, 0^\circ$</p> 
<p>Orientamento $0^\circ, 90^\circ, 0^\circ$</p> 	<p>Orientamento $0^\circ, 180^\circ, 0^\circ$</p> 	<p>Orientamento $0^\circ, 0^\circ, 90^\circ$</p> 
<p>Orientamento $0^\circ, 0^\circ, 180^\circ$</p> 	<p>Orientamento $45^\circ, 45^\circ, 45^\circ$</p> 	<p>Orientamento $45^\circ, 45^\circ, 135^\circ$</p> 
<p>Orientamento $45^\circ, 135^\circ, 45^\circ$</p> 	<p>Orientamento $135^\circ, 45^\circ, 45^\circ$</p> 	<p>Orientamento $45^\circ, 135^\circ, 135^\circ$</p> 
<p>Orientamento $135^\circ, 45^\circ, 135^\circ$</p> 	<p>Orientamento $135^\circ, 135^\circ, 45^\circ$</p> 	<p>Orientamento $135^\circ, 135^\circ, 135^\circ$</p> 

6.1.1 SLS

Nella Tabella 6.2 è possibile osservare i valori degli Original EnPI nel caso del processo SLS

Tabella 6.2 Original EnPI 1v1 SLS

Orientamento			SLS			
X	Y	Z	Massa (kg)	N° Layer	TEC (kWh)	EL (kWh)
0	0	0	0,0732	1000	2,17	17
90	0	0	0,0732	150	2,17	2,55
180	0	0	0,0732	1000	2,17	17
0	90	0	0,0732	1000	2,17	17
0	180	0	0,0732	1000	2,17	17
0	0	90	0,0732	1000	2,17	17
0	0	180	0,0732	1000	2,17	17
45	45	45	0,0732	934	2,17	15,873
45	45	135	0,0732	934	2,17	15,873
45	135	45	0,0732	934	2,17	15,873
135	45	45	0,0732	934	2,17	15,873
45	135	135	0,0732	934	2,17	15,873
135	45	135	0,0732	934	2,17	15,873
135	135	45	0,0732	934	2,17	15,873
135	135	135	0,0732	934	2,17	15,873

Nel processo SLS, poiché i componenti durante la costruzione non richiedono supporti aggiuntivi, la massa rimane costante indipendentemente dall'orientamento. Di conseguenza, il valore del consumo energetico totale (TEC) rimane invariato, rendendo impossibile la normalizzazione dato che il range è uguale a zero. Pertanto, nell'ambito del processo SLS, si considera solo il consumo energetico per strato (EL) come indicatore rilevante. Risulta quindi inutile applicare il metodo, è solamente necessario confrontare il consumo energetico fra le varie orientazioni (questo discorso vale anche per gli altri componenti stampati mediante SLS). In questo caso l'orientazione X=90° Y=0° Z=0° risulta essere quella ottimale siccome ha il valore energetico più basso.

Risulta importante conoscere l'orientamento ottimale, siccome vi è una grossa differenza di EL tra l'orientazione ottimale e le altre.

6.1.2 FDM

Nella Tabella 6.3 è possibile osservare i valori degli Original EnPI nel caso del processo FDM.

Tabella 6.3 Original EnPI 1v1 FDM

Orientamento			FDM			
X	Y	Z	Massa	N° Layer	TEC (kWh)	EL (kWh)
0	0	0	0,1113	500	16,565	89,45
90	0	0	0,0968	75	14,416	13,4175
180	0	0	0,1112	500	16,563	89,45
0	90	0	0,1113	500	16,565	89,45
0	180	0	0,1113	500	16,565	89,45
0	0	90	0,1113	500	16,565	89,45
0	0	180	0,1113	500	16,565	89,45
45	45	45	0,1330	467	19,796	83,519465
45	45	135	0,1330	467	19,796	83,519465
45	135	45	0,1385	467	20,619	83,519465
135	45	45	0,1329	467	19,793	83,519465
45	135	135	0,1385	467	20,619	83,519465
135	45	135	0,1329	467	19,793	83,519465
135	135	45	0,1385	467	20,626	83,519465
135	135	135	0,1385	467	20,626	83,519465

Successivamente si passa ai Normalized EnPI (Tabella 6.4).

Tabella 6.4 Normalized EnPI 1v1 FDM

Orientamento			FDM	
X	Y	Z	TEC	EL
0	0	0	0,653929	0
90	0	0	1	1
180	0	0	0,654254	0
0	90	0	0,653929	0
0	180	0	0,653929	0

0	0	90	0,653929	0
0	0	180	0,653929	0
45	45	45	0,133613	0,078
45	45	135	0,133608	0,078
45	135	45	0,0011	0,078
135	45	45	0,134079	0,078
45	135	135	0,001095	0,078
135	45	135	0,134094	0,078
135	135	45	1,5E-05	0,078
135	135	135	0	0,078

Infine, si hanno gli Aggregated EnPI (Tabella 6.5).

Tabella 6.5 Aggregated EnPI 1v1 FDM

Orientamento			FDM		
X	Y	Z	TEC	EL	Sum
0	0	0	0,058561	0	0,058561
90	0	0	0,089552	0,014925	0,104478
180	0	0	0,05859	0	0,05859
0	90	0	0,058561	0	0,058561
0	180	0	0,058561	0	0,058561
0	0	90	0,058561	0	0,058561
0	0	180	0,058561	0	0,058561
45	45	45	0,011965	0,001164	0,01313
45	45	135	0,011965	0,001164	0,013129
45	135	45	9,85E-05	0,001164	0,001263
135	45	45	0,012007	0,001164	0,013171
45	135	135	9,8E-05	0,001164	0,001262
135	45	135	0,012008	0,001164	0,013173
135	135	45	1,34E-06	0,001164	0,001166
135	135	135	0	0,001164	0,001164

Nel caso del FDM l'orientazione ottimale risulta essere $X=90^\circ$ $Y=0^\circ$ $Z=0^\circ$. Questo risultato deriva molto dai valori della massa a dal numero di layer che sono molto più inferiori rispetto alle altre orientazioni.

6.1.3 SLM

Nella Tabella 6.6 è possibile osservare i valori degli Original EnPI nel caso del processo SLM.

Tabella 6.6 Original EnPI 1v1 SLM

Orientamento			SLM			
X	Y	Z	Massa	N° Layer	TEC (kWh)	EL (kWh)
0	0	0	0,6764	3333	19,886	220
90	0	0	0,6674	500	19,622	33
180	0	0	0,6764	3333	19,886	220
0	90	0	0,6764	3333	19,886	220
0	180	0	0,6764	3333	19,886	220
0	0	90	0,6764	3333	19,886	220
0	0	180	0,6764	3333	19,886	220
45	45	45	0,6579	3112	19,342	205,414
45	45	135	0,6579	3112	19,342	205,414
45	135	45	0,6644	3112	19,534	205,414
135	45	45	0,6580	3112	19,345	205,414
45	135	135	0,6644	3112	19,534	205,414
135	45	135	0,6580	3112	19,345	205,414
135	135	45	0,6647	3112	19,541	205,414
135	135	135	0,6647	3112	19,541	205,414

Successivamente si passa ai Normalized EnPI (Tabella 6.7).

Tabella 6.7 Normalized EnPI 1v1 SLM

Orientamento			SLM	
X	Y	Z	TEC	EL
0	0	0	0	0
90	0	0	0,485164	1
180	0	0	0	0
0	90	0	0	0
0	180	0	0	0
0	0	90	0	0
0	0	180	0	0
45	45	45	1	0,078
45	45	135	0,999973	0,078

45	135	45	0,647331	0,078
135	45	45	0,995765	0,078
45	135	135	0,647331	0,078
135	45	135	0,995703	0,078
135	135	45	0,634218	0,078
135	135	135	0,634191	0,078

Infine, si hanno gli Aggregated EnPI (Tabella 6.8).

Tabella 6.8 Aggregated EnPI 1v1 SLM

Orientamento			SLM		
X	Y	Z	TEC	EL	Sum
0	0	0	0	0	0
90	0	0	0,043447	0,014925	0,058373
180	0	0	0	0	0
0	90	0	0	0	0
0	180	0	0	0	0
0	0	90	0	0	0
0	0	180	0	0	0
45	45	45	0,089552	0,001164	0,090716
45	45	135	0,08955	0,001164	0,090714
45	135	45	0,05797	0,001164	0,059134
135	45	45	0,089173	0,001164	0,090337
45	135	135	0,05797	0,001164	0,059134
135	45	135	0,089167	0,001164	0,090332
135	135	45	0,056796	0,001164	0,05796
135	135	135	0,056793	0,001164	0,057957

L'orientamento ottimale risulta essere $X=45^\circ$ $Y=45^\circ$ $Z=45^\circ$.

6.1.4 DED

Nella Tabella 6.9 è possibile osservare i valori degli Original EnPI nel caso del processo DED.

Anche per questo tipo di processo vale lo stesso discorso fatto nel processo SLS, cioè si considera soltanto l'indicatore EL.

L'orientamento ottimale risulta essere $X=90^\circ$ $Y=0^\circ$ $Z=0^\circ$.

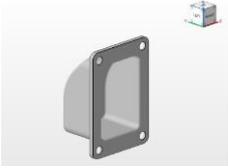
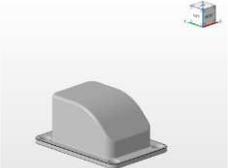
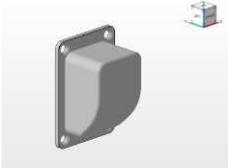
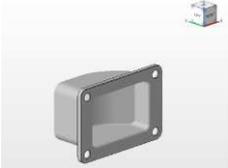
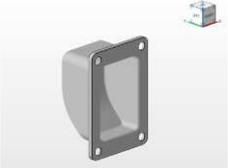
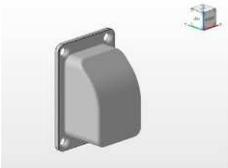
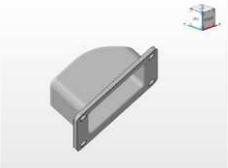
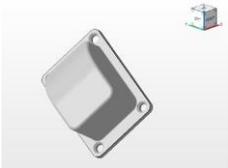
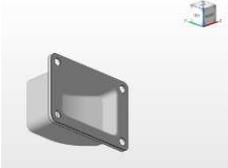
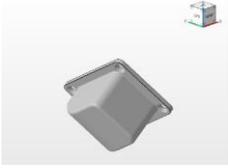
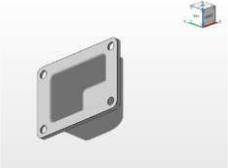
Tabella 6.9 Original EnPI 1v1 DED

Orientamento			DED			
X	Y	Z	Massa	N° Layer	TEC (kWh)	EL (kWh)
0	0	0	0,6444	217	43,177	12,69565
90	0	0	0,6444	33	43,177	1,904348
180	0	0	0,6444	217	43,177	12,69565
0	90	0	0,6444	217	43,177	12,69565
0	180	0	0,6444	217	43,177	12,69565
0	0	90	0,6444	217	43,177	12,69565
0	0	180	0,6444	217	43,177	12,69565
45	45	45	0,6444	203	43,177	11,85393
45	45	135	0,6444	203	43,177	11,85393
45	135	45	0,6444	203	43,177	11,85393
135	45	45	0,6444	203	43,177	11,85393
45	135	135	0,6444	203	43,177	11,85393
135	45	135	0,6444	203	43,177	11,85393
135	135	45	0,6444	203	43,177	11,85393
135	135	135	0,6444	203	43,177	11,85393

6.2 Componente 2v2

Nella Tabella 6.10 è rappresentato il seguente componente con le relative orientazioni.

Tabella 6.10 Orientamento Componente 2v2

<p>Orientamento $0^{\circ},0^{\circ},0^{\circ}$</p> 	<p>Orientamento $90^{\circ},0^{\circ},0^{\circ}$</p> 	<p>Orientamento $180^{\circ},0^{\circ},0^{\circ}$</p> 
<p>Orientamento $0^{\circ},90^{\circ},0^{\circ}$</p> 	<p>Orientamento $0^{\circ},180^{\circ},0^{\circ}$</p> 	<p>Orientamento $0^{\circ},0^{\circ},90^{\circ}$</p> 
<p>Orientamento $0^{\circ},0^{\circ},180^{\circ}$</p> 	<p>Orientamento $45^{\circ},45^{\circ},45^{\circ}$</p> 	<p>Orientamento $45^{\circ},45^{\circ},135^{\circ}$</p> 
<p>Orientamento $45^{\circ},135^{\circ},45^{\circ}$</p> 	<p>Orientamento $135^{\circ},45^{\circ},45^{\circ}$</p> 	<p>Orientamento $45^{\circ},135^{\circ},135^{\circ}$</p> 
<p>Orientamento $135^{\circ},45^{\circ},135^{\circ}$</p> 	<p>Orientamento $135^{\circ},135^{\circ},45^{\circ}$</p> 	<p>Orientamento $135^{\circ},135^{\circ},135^{\circ}$</p> 

6.2.1 SLS

Nella Tabella 6.11 è possibile osservare i valori degli Original EnPI nel caso del processo SLS.

Tabella 6.11 Original EnPI 2v2 SLS

Orientamento			SLS			
X	Y	Z	Massa (kg)	N° Layer	TEC (kWh)	EL (kWh)
0	0	0	0,1181	1300	3,51	22,1
90	0	0	0,1181	600	3,51	10,2
180	0	0	0,1181	1300	3,51	22,1
0	90	0	0,1181	900	3,51	15,3
0	180	0	0,1181	1300	3,51	22,1
0	0	90	0,1181	1300	3,51	22,1
0	0	180	0,1181	1300	3,51	22,1
45	45	45	0,1181	1257	3,51	21,3656
45	45	135	0,1181	1257	3,51	21,3656
45	135	45	0,1181	1257	3,51	21,3656
135	45	45	0,1181	1363	3,51	23,171
45	135	135	0,1181	1257	3,51	21,3656
135	45	135	0,1181	1363	3,51	23,171
135	135	45	0,1181	1363	3,51	23,171
135	135	135	0,1181	1363	3,51	23,171

L'orientamento ottimale risulta essere $X=90^\circ$ $Y=0^\circ$ $Z=0^\circ$.

6.2.2 FDM

Nella Tabella 6.12 è possibile osservare i valori degli Original EnPI nel caso del processo FDM.

Tabella 6.12 Original EnPI 2v2 FDM

Orientamento			FDM			
X	Y	Z	Massa	N° Layer	TEC (kWh)	EL (kWh)
0	0	0	0,3007	650	44,768	116,285
90	0	0	0,3591	300	53,465	53,67
180	0	0	0,3916	650	58,304	116,285
0	90	0	0,4344	450	64,683	80,505
0	180	0	0,3916	650	58,305	116,285
0	0	90	0,3007	650	44,768	116,285
0	0	180	0,3007	650	44,768	116,285
45	45	45	0,3007	628	44,768	112,4208
45	45	135	0,1974	628	29,395	112,4208
45	135	45	0,1974	628	29,394	112,4208
135	45	45	0,1974	682	29,395	121,9204
45	135	135	0,1974	628	29,395	112,4208
135	45	135	0,1621	682	24,133	121,9204
135	135	45	0,1621	682	24,132	121,9204
135	135	135	0,1974	682	29,394	121,9204

Successivamente si passa ai Normalized EnPI (Tabella 6.13).

Tabella 6.13 Normalized EnPI 2v2 FDM

Orientamento			FDM	
X	Y	Z	TEC	EL
0	0	0	0,491121	0,082569
90	0	0	0,276645	1
180	0	0	0,157317	0,082569
0	90	0	0	0,606815
0	180	0	0,157281	0,082569
0	0	90	0,491121	0,082569
0	0	180	0,491121	0,082569
45	45	45	0,491117	0,139187
45	45	135	0,870232	0,139187
45	135	45	0,870246	0,139187
135	45	45	0,870218	0
45	135	135	0,870224	0,139187
135	45	135	1	0
135	135	45	1,00001	0
135	135	135	0,870257	0

Infine, si hanno gli Aggregated EnPI (Tabella 6.14).

Tabella 6.14 Aggregated EnPI 2v2 FDM

Orientamento			FDM		
X	Y	Z	TEC	EL	Sum
0	0	0	0,043981	0,001232	0,045213
90	0	0	0,024774	0,014925	0,0397
180	0	0	0,014088	0,001232	0,01532
0	90	0	0	0,009057	0,009057
0	180	0	0,014085	0,001232	0,015317
0	0	90	0,043981	0,001232	0,045213
0	0	180	0,043981	0,001232	0,045213
45	45	45	0,043981	0,002077	0,046058
45	45	135	0,077931	0,002077	0,080009
45	135	45	0,077932	0,002077	0,08001
135	45	45	0,07793	0	0,07793
45	135	135	0,077931	0,002077	0,080008
135	45	135	0,089552	0	0,089552
135	135	45	0,089553	0	0,089553
135	135	135	0,077933	0	0,077933

L'orientamento ottimale risulta essere $X=135^\circ$ $Y=135^\circ$ $Z=45^\circ$.

6.2.3 SLM

Nella Tabella 6.15 è possibile osservare i valori degli Original EnPI nel caso del processo SLM.

Tabella 6.15 Original EnPI 2v2 SLM

Orientamento			SLM			
X	Y	Z	Massa	N° Layer	TEC (kWh)	EL (kWh)
0	0	0	1,3059	4333	38,394	286
90	0	0	1,3979	2000	41,099	132
180	0	0	1,4491	4333	42,604	286
0	90	0	1,5166	3000	44,588	198
0	180	0	1,4491	4333	42,604	286

0	0	90	1,3059	4333	38,394	286
0	0	180	1,3059	4333	38,394	286
45	45	45	1,3059	4189	38,394	276,496
45	45	135	1,0609	4189	31,191	276,496
45	135	45	1,0609	4189	31,191	276,496
135	45	45	1,0609	4543	31,191	299,86
45	135	135	1,0609	4189	31,191	276,496
135	45	135	1,0484	4543	30,823	299,86
135	135	45	1,0486	4543	30,830	299,86
135	135	135	1,0609	4543	31,191	299,86

Successivamente si passa ai Normalized EnPI (Tabella 6.16).

Tabella 6.16 Normalized EnPI 2v2 SLM

Orientamento			SLM	
X	Y	Z	TEC	EL
0	0	0	0,449978	0,082569
90	0	0	0,25347	1
180	0	0	0,144138	0,082569
0	90	0	0	0,606815
0	180	0	0,144105	0,082569
0	0	90	0,449978	0,082569
0	0	180	0,449978	0,082569
45	45	45	0,449975	0,139187
45	45	135	0,973277	0,139187
45	135	45	0,973277	0,139187
135	45	45	0,973276	0
45	135	135	0,973273	0,139187
135	45	135	1	0
135	135	45	0,999539	0
135	135	135	0,973331	0

Infine, si hanno gli Aggregated EnPI (Tabella 6.17).

Tabella 6.17 Aggregated EnPI 2v2 SLM

Orientamento			SLM		
X	Y	Z	TEC	EL	Sum
0	0	0	0,040297	0,001232	0,041529
90	0	0	0,022699	0,014925	0,037624
180	0	0	0,012908	0,001232	0,01414

0	90	0	0	0,009057	0,009057
0	180	0	0,012905	0,001232	0,014137
0	0	90	0,040297	0,001232	0,041529
0	0	180	0,040297	0,001232	0,041529
45	45	45	0,040296	0,002077	0,042374
45	45	135	0,087159	0,002077	0,089237
45	135	45	0,087159	0,002077	0,089237
135	45	45	0,087159	0	0,087159
45	135	135	0,087159	0,002077	0,089236
135	45	135	0,089552	0	0,089552
135	135	45	0,089511	0	0,089511
135	135	135	0,087164	0	0,087164

L'orientamento ottimale risulta essere $X=135^\circ$ $Y=45^\circ$ $Z=135^\circ$.

6.2.4 DED

Nella Tabella 6.18 è possibile osservare i valori degli Original EnPI nel caso del processo DED. L'orientamento ottimale risulta essere $X=90^\circ$ $Y=0^\circ$ $Z=0^\circ$.

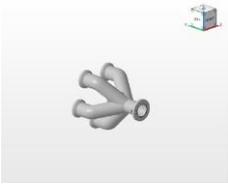
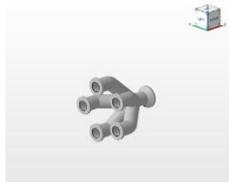
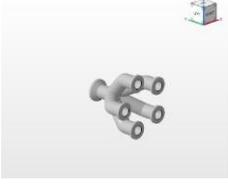
Tabella 6.18 Original EnPI 2v2 DED

Orientamento			DED			
X	Y	Z	Massa	N° Layer	TEC (kWh)	EL (kWh)
0	0	0	1,0404	283	69,710	16,50435
90	0	0	1,0404	130	69,710	7,617391
180	0	0	1,0404	283	69,710	16,50435
0	90	0	1,0404	196	69,710	11,42609
0	180	0	1,0404	283	69,710	16,50435
0	0	90	1,0404	283	69,710	16,50435
0	0	180	1,0404	283	69,710	16,50435
45	45	45	1,0404	273	69,710	15,9559
45	45	135	1,0404	273	69,710	15,9559
45	135	45	1,0404	273	69,710	15,9559
135	45	45	1,0404	296	69,710	17,30417
45	135	135	1,0404	273	69,710	15,9559
135	45	135	1,0404	296	69,710	17,30417
135	135	45	1,0404	296	69,710	17,30417
135	135	135	1,0404	296	69,710	17,30417

6.3 Componente v14

Nella Tabella 6.19 è possibile osservare il seguente componente con le relative orientazioni.

Tabella 6.19 Orientamento Componente v14

<p>Orientamento $0^{\circ},0^{\circ},0^{\circ}$</p> 	<p>Orientamento $90^{\circ},0^{\circ},0^{\circ}$</p> 	<p>Orientamento $180^{\circ},0^{\circ},0^{\circ}$</p> 
<p>Orientamento $0^{\circ},90^{\circ},0^{\circ}$</p> 	<p>Orientamento $0^{\circ},180^{\circ},0^{\circ}$</p> 	<p>Orientamento $0^{\circ},0^{\circ},90^{\circ}$</p> 
<p>Orientamento $0^{\circ},0^{\circ},180^{\circ}$</p> 	<p>Orientamento $45^{\circ},45^{\circ},45^{\circ}$</p> 	<p>Orientamento $45^{\circ},45^{\circ},135^{\circ}$</p> 
<p>Orientamento $45^{\circ},135^{\circ},45^{\circ}$</p> 	<p>Orientamento $135^{\circ},45^{\circ},45^{\circ}$</p> 	<p>Orientamento $45^{\circ},135^{\circ},135^{\circ}$</p> 
<p>Orientamento $135^{\circ},45^{\circ},135^{\circ}$</p> 	<p>Orientamento $135^{\circ},135^{\circ},45^{\circ}$</p> 	<p>Orientamento $135^{\circ},135^{\circ},135^{\circ}$</p> 

6.3.1 SLS

Nella Tabella 6.20 è possibile osservare i valori degli Original EnPI nel caso del processo SLS.

Tabella 6.20 Original EnPI v14 SLS

Orientamento			SLS			
X	Y	Z	Massa (kg)	N° Layer	TEC (kWh)	EL (kWh)
0	0	0	0,0038	393,3	0,11	6,6861
90	0	0	0,0038	380	0,11	6,46
180	0	0	0,0038	393	0,11	6,6861
0	90	0	0,0038	379	0,11	6,4498
0	180	0	0,0038	393	0,11	6,6861
0	0	90	0,0038	393	0,11	6,6861
0	0	180	0,0038	393	0,11	6,6861
45	45	45	0,0038	422	0,11	7,1706
45	45	135	0,0038	422	0,11	7,1706
45	135	45	0,0038	398	0,11	6,766
135	45	45	0,0038	422	0,11	7,1706
45	135	135	0,0038	422	0,11	7,1706
135	45	135	0,0038	422	0,11	7,1706
135	135	45	0,0038	398	0,11	6,766
135	135	135	0,0038	398	0,11	6,766

L'orientamento ottimale risulta essere $X=0^\circ$ $Y=90^\circ$ $Z=0^\circ$.

6.3.2 FDM

Nella Tabella 6.21 è possibile osservare i valori degli Original EnPI nel caso del processo FDM.

Tabella 6.21 Original EnPI v14 FDM

Orientamento			FDM			
X	Y	Z	Massa	N° Layer	TEC (kWh)	EL (kWh)
0	0	0	0,0133	197	1,975	35,18069

90	0	0	0,0045	190	0,670	33,991
180	0	0	0,0132	197	1,971	35,18069
0	90	0	0,0153	190	2,281	33,93733
0	180	0	0,0132	197	1,971	35,18069
0	0	90	0,0133	197	1,975	35,18069
0	0	180	0,0133	197	1,975	35,18069
45	45	45	0,0145	211	2,154	37,73001
45	45	135	0,0145	211	2,154	37,73001
45	135	45	0,0146	199	2,174	35,6011
135	45	45	0,0145	211	2,156	37,73001
45	135	135	0,0145	211	2,156	37,73001
135	45	135	0,0145	211	2,156	37,73001
135	135	45	0,0146	199	2,179	35,6011
135	135	135	0,0146	199	2,179	35,6011

Successivamente si passa ai Normalized EnPI (Tabella 6.22).

Tabella 6.22 Normalized EnPI v14 FDM

Orientamento			FDM	
X	Y	Z	TEC	EL
0	0	0	0,189783	0,67217
90	0	0	1	0,985849
180	0	0	0,192282	0,67217
0	90	0	0	1
0	180	0	0,192263	0,67217
0	0	90	0,189783	0,67217
0	0	180	0,189764	0,67217
45	45	45	0,078652	0
45	45	135	0,078662	0
45	135	45	0,066494	0,561321
135	45	45	0,07773	0
45	135	135	0,07773	0
135	45	135	0,07773	0
135	135	45	0,063283	0,561321
135	135	135	0,063235	0,561321

Infine, si hanno gli Aggregated EnPI (Tabella 6.23).

Tabella 6.23 Aggregated EnPI v14 FDM

Orientamento			FDM		
X	Y	Z	TEC	EL	Sum
0	0	0	0,016995	0,010032	0,027028
90	0	0	0,089552	0,014714	0,104266
180	0	0	0,017219	0,010032	0,027252
0	90	0	0	0,014925	0,014925
0	180	0	0,017218	0,010032	0,02725
0	0	90	0,016995	0,010032	0,027028
0	0	180	0,016994	0,010032	0,027026
45	45	45	0,007044	0	0,007044
45	45	135	0,007044	0	0,007044
45	135	45	0,005955	0,008378	0,014333
135	45	45	0,006961	0	0,006961
45	135	135	0,006961	0	0,006961
135	45	135	0,006961	0	0,006961
135	135	45	0,005667	0,008378	0,014045
135	135	135	0,005663	0,008378	0,014041

L'orientamento ottimale risulta essere $X=90^\circ$ $Y=0^\circ$ $Z=0^\circ$.

6.3.3 SLM

Nella Tabella 6.24 è possibile osservare i valori degli Original EnPI nel caso del processo SLM.

Tabella 6.24 Original EnPI v14 SLM

Orientamento			SLM			
X	Y	Z	Massa	N° Layer	TEC (kWh)	EL (kWh)
0	0	0	0,0478	1311	1,405	86,526
90	0	0	0,0340	1267	0,999	83,6
180	0	0	0,0478	1311	1,404	86,526
0	90	0	0,0510	1265	1,501	83,468
0	180	0	0,0478	1311	1,404	86,526
0	0	90	0,0478	1311	1,405	86,526
0	0	180	0,0478	1311	1,405	86,526
45	45	45	0,0497	1406	1,461	92,796
45	45	135	0,0497	1406	1,461	92,796
45	135	45	0,0499	1327	1,467	87,56

135	45	45	0,0497	1406	1,462	92,796
45	135	135	0,0497	1406	1,462	92,796
135	45	135	0,0497	1406	1,462	92,796
135	135	45	0,0500	1327	1,469	87,56
135	135	135	0,0500	1327	1,469	87,56

Successivamente si passa ai Normalized EnPI (Tabella 6.25).

Tabella 6.25 Normalized EnPI v14 SLM

Orientamento			SLM	
X	Y	Z	TEC	EL
0	0	0	0,189783	0,67217
90	0	0	1	0,985849
180	0	0	0,192282	0,67217
0	90	0	0	1
0	180	0	0,192263	0,67217
0	0	90	0,189783	0,67217
0	0	180	0,189764	0,67217
45	45	45	0,078652	0
45	45	135	0,078662	0
45	135	45	0,066494	0,561321
135	45	45	0,07773	0
45	135	135	0,07773	0
135	45	135	0,07773	0
135	135	45	0,063283	0,561321
135	135	135	0,063235	0,561321

Infine, si hanno gli Aggregated EnPI (Tabella 6.26).

Tabella 6.26 Aggregated EnPI v14 SLM

Orientamento			SLM		
X	Y	Z	TEC	EL	Sum
0	0	0	0,016995	0,010032	0,027028
90	0	0	0,089552	0,014714	0,104266
180	0	0	0,017219	0,010032	0,027252
0	90	0	0	0,014925	0,014925
0	180	0	0,017218	0,010032	0,02725
0	0	90	0,016995	0,010032	0,027028
0	0	180	0,016994	0,010032	0,027026
45	45	45	0,007044	0	0,007044

45	45	135	0,007044	0	0,007044
45	135	45	0,005955	0,008378	0,014333
135	45	45	0,006961	0	0,006961
45	135	135	0,006961	0	0,006961
135	45	135	0,006961	0	0,006961
135	135	45	0,005667	0,008378	0,014045
135	135	135	0,005663	0,008378	0,014041

L'orientamento ottimale risulta essere $X=90^\circ$ $Y=0^\circ$ $Z=0^\circ$.

6.3.4 DED

Nella Tabella 6.27 è possibile osservare i valori degli Original EnPI nel caso del processo DED.

Tabella 6.27 Original EnPI v14 DED

Orientamento			DED			
X	Y	Z	Massa	N° Layer	TEC (kWh)	EL (kWh)
0	0	0	0,0328	86	2,199	4,9932
90	0	0	0,0328	83	2,199	4,8243478
180	0	0	0,0328	86	2,199	4,9932
0	90	0	0,0328	82	2,199	4,8167304
0	180	0	0,0328	86	2,199	4,9932
0	0	90	0,0328	86	2,199	4,9932
0	0	180	0,0328	86	2,199	4,9932
45	45	45	0,0328	92	2,199	5,3550261
45	45	135	0,0328	92	2,199	5,3550261
45	135	45	0,0328	87	2,199	5,0528696
135	45	45	0,0328	92	2,199	5,3550261
45	135	135	0,0328	92	2,199	5,3550261
135	45	135	0,0328	92	2,199	5,3550261
135	135	45	0,0328	87	2,199	5,0528696
135	135	135	0,0328	87	2,199	5,0528696

L'orientamento ottimale risulta essere $X=0^\circ$ $Y=90^\circ$ $Z=0^\circ$.

7 Conclusioni

L'obiettivo principale di questa tesi è la ricerca di una metodologia che possa rendere i processi additivi più sostenibili. Uno dei fattori fondamentali da considerare in questo tipo di tecnologie è l'energia consumata durante il processo. Pertanto, la metodologia utilizzata si basa sull'analisi delle prestazioni energetiche al fine di migliorare l'efficienza energetica complessiva. In sintesi, la metodologia adottata consiste nella definizione di indicatori di prestazioni energetiche, nel confronto tra di essi e nel processo decisionale finalizzato alla scelta del design ottimale che presenti il minor consumo energetico. Nel contesto di questa tesi, le diverse opzioni di design si incontrano agli orientamenti di costruzione dei vari componenti esaminati. Per progetti futuri, sarebbe altamente auspicabile considerare un ampio spettro di indicatori energetici al fine di valutare in modo più accurato le diverse opzioni di design nel contesto dei processi additivi. La valutazione di un singolo indicatore energetico potrebbe fornire solo una visione parziale dell'efficienza energetica di un determinato design. Tuttavia, l'inclusione di numerosi indicatori energetici consentirebbe di considerare una gamma più ampia di fattori che influenzano il consumo energetico complessivo. Ad esempio, oltre al consumo energetico totale (TEC) e al consumo energetico layer (EL), potrebbero essere presi in considerazione altri indicatori come il consumo energetico per unità di volume, il consumo energetico per unità di peso o il consumo energetico specifico per ogni componente del processo additivo. Includere un insieme diversificato di indicatori energetici consentirebbe di catturare meglio le varie sfaccettature dell'efficienza energetica e di valutare in modo più completo le prestazioni di diversi design. Ciò consentirebbe di identificare design che ottimizzino l'uso dell'energia in modo globale, considerando aspetti specifici come la geometria, il materiale, la qualità e la sostenibilità del prodotto. Sarebbe anche utile lavorare non solo l'energia utilizzata nel processo di produzione additiva, ma anche sulla quantità di energia impiegata per la produzione delle materie prime e per i processi di post-produzione. Questo approccio consentirebbe di avere una visione più completa del ciclo di vita complessivo di un componente prodotto tramite processi additivi. L'inclusione dell'energia utilizzata nelle

fasi precedenti e successive al processo di stampaggio fornirà una valutazione più accurata e globale dell'impatto energetico complessivo della produzione additiva. Ciò contribuirebbe a identificare possibili aree di miglioramento e a promuovere l'adozione di pratiche più sostenibili in tutte le fasi del ciclo di vita del prodotto. In conclusione, l'uso del modello di valutazione energetica mediante EnPI permette di analizzare e valutare le diverse orientazioni di stampaggio dei componenti, fornendo una base razionale per la scelta della soluzione ottimale dal punto di vista energetico. Questo processo coinvolge il recupero delle informazioni sull'energia del processo, la definizione degli EnPI, l'implementazione di una metodologia di calcolo e, infine, la selezione della soluzione energeticamente più efficiente.

8 Bibliografia

- [1] ISO/ASTM 52900:2015 (ASTM F2792): Additive manufacturing- General principles- Terminology, 2015.
- [2] Perspectives on Additive Manufacturing Bourell D Annual Review of Materials Research (2016) 46(1) 1-18.
- [3] Additive Fertigungsverfahren Gebhardt A. München, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, (2016), I-XXIV.
- [4] Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping Kruth J, Leu M, Nakagawa T CIRP Annals (1998) 47(2) 525-540.
- [5] Metallic additive manufacturing: state-of-the-art review and prospects Vayre B, Vignat F, Villeneuve F Mechanics & Industry (2012) 13(2) 89-96.
- [6] Additive Manufacturing Technologies Gibson I, Rosen D, Stucker B New York, NY, Springer New York, (2015).
- [7] Mechanical characterization of 3D-printed polymers Dizon J, Espera A, [...] Advincola R Additive Manufacturing (2018) 20 44-67.
- [8] 3D printed functional nanomaterials for electrochemical energy storage Zhu C, Liu T, [...] Li Y Nano Today (2017) 15 107-120.
- [9] Power ultrasonics for additive manufacturing and consolidating of materials Friel R Elsevier, (2015), 313-335.
- [10]<https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/fused-deposition-modeling/>
- [11] C. Herrmann: Ganzheitliches Life Cycle Management. Springer Berlin Heidelberg, (2010).
- [12] Environmental comparison of MESO-CLAD® process and conventional machining implementing life cycle assessment Serres N, Tidu D, [...] Hlawka F Journal of Cleaner Production (2011) 19(9-10) 1117-1124.

- [13] A global sustainability perspective on 3D printing technologies Gebler M, Schoot Uiterkamp A, Visser C *Energy Policy* (2014) 74 158-167.
- [14] Environmental Impact of Additive Manufacturing Processes: Does AM Contribute to a More Sustainable Way of Part Manufacturing? Kellens K, Mertens R, [...] Duflou J *Procedia CIRP* (2017) 61 582-587.
- [15] The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing Attaran M *Business Horizons* (2017) 60(5) 677-688.
- [16] Monitoring Approach to Evaluate the Performances of a New Deposition Nozzle Solution for DED Systems Mazzucato F, Tusacciu S, [...] Valente A *Technologies* (2017) 5(2) 29.
- [17] A.K. Mukhopadhyaya: Function analysis system technique - For breakout solutions. I.K. International Publishing House Pvt. Ltd, (2018).
- [18] ISO14001:2015: Environmental management systems- Requirements with guidance for use, 2015.
- [19] Research needs and recommendations on environmental implications of additive manufacturing Rejeski D, Zhao F, Huang Y *Additive Manufacturing* (2018) 19 21-28.
- [20] Environmental Impacts of Selective Laser Melting: Do Printer, Powder, Or Power Dominate? Faludi J, Baumers M, [...] Hague R *Journal of Industrial Ecology* (2017) 21(S1).
- [21] Charting the Environmental Dimensions of Additive Manufacturing and 3D Printing Baumers M, Duflou J, [...] Lifset R *Journal of Industrial Ecology* (2017) 21(S1).
- [22] An eco-design for additive manufacturing framework based on energy performance assessment Yi L, Glatt M, [...] Aurich J *Additive Manufacturing* (2020) 33.
- [23] Eco-design for additive manufacturing using energy performance quantification and assessment Yi L.
- [24] Development and validation of an energy simulation for a desktop additive manufacturing system Yi L, Ravani B, Aurich J *Additive Manufacturing* (2020) 32 101021
- [25] A method for energy modeling and simulation implementation of machine tools of selective laser melting Yi L, Glatt M, [...] Aurich J *Journal of Cleaner Production* (2020) 263 121282.

- [26] ISO, ISO 14040 Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework, ISO, 2006, <https://www.iso.org/standard/37456>.
- [27] ISO, Energy Management Systems - Measuring Energy Performance Using Energy Baselines and Energy Performance Indicators (EnPI) - General Principles and Guidance, (2014) <https://www.iso.org/standard/51869>.
- [28] (Re)Design for Additive Manufacturing Hällgren S, Pejryd L, Ekengren J *Procedia CIRP* (2016) 50 246-251.
- [29] Sustainable design guidelines for additive manufacturing applications Agrawal R *Rapid Prototyping Journal* (2022) 28(7) 1221-1240.
- [30] A goal-oriented approach based on fuzzy axiomatic design for sustainable mobility project selection Awasthi A, Omrani H *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics* (2019) 6(1) 86-98.
- [31] A Novel Hybrid Fuzzy Grey TOPSIS Method: Supplier Evaluation of a Collaborative Manufacturing Enterprise Feng Y, Zhang Z, [...] Tan J *Applied Sciences* (2019) 9(18) 3770.
- [32] A design for additive manufacturing case study: fingerprint stool on a BigRep ONE Novak J, O'Neill J *Rapid Prototyping Journal* (2019) 25(6) 1069-1079.
- [33] Design and Manufacturing Strategies for Fused Deposition Modelling in Additive Manufacturing: A Review Medellin-Castillo H, Zaragoza-Siqueiros J *Chinese Journal of Mechanical Engineering* (2019) 32(1) 53.
- [34] Design for sustainable additive manufacturing: A review Hegab H, Khanna N, [...] Salem A *Sustainable Materials and Technologies* (2023) 35 e00576.
- [35] A. Kobayashi, *International Encyclopedia of Human Geography*, Elsevier, 2019.
- [36] Critical appraisal and systematic review of 3D & 4D printing in sustainable and environment-friendly smart manufacturing technologies Ameta K, Solanki V, [...] Haque S *Sustainable Materials and Technologies* (2022) 34 e00481.
- [37] Sustainable Value Roadmapping Framework for Additive Manufacturing Despeisse M, Yang M, [...] Minshall T *Procedia CIRP* (2017) 61 594-599.
- [38] Eco-design and Additive Manufacturing: Analysis and proposals Chtioui N, Raoudha G, Benamara A.

- [39] A methodological proposal to link Design with Additive Manufacturing to environmental considerations in the Early Design Stages Markou F, Segonds F, [...] Perry N
International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM) (2017) 11(4) 799-812.
- [40] Manufacturability analysis to combine additive and subtractive processes Kerbrat O, Mognol P, Hascoet J Rapid Prototyping Journal (2010) 16(1) 63-72.
- [41] A Systems Approach of Topology Optimization for Bioinspired Material Structures Design Using Additive Manufacturing Ryan-Johnson W, Wolfe L, [...] Zhang H Sustainability (2021) 13(14) 8013.
- [42] An Investigation on Achieving Sustainability in Fused Deposition Modeling via Topology Optimization Espach A, Gupta K International Journal of Recent Contributions from Engineering, Science & IT (iJES) (2021) 9 (3) 4.
- [43] Sustainable Design-Oriented Level Set Topology Optimization Liu J, Ma Y Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME (2017) 139(1).
- [44] Bond Graph Methodology: Development and Analysis of Multidisciplinary Dynamic System Models Wolfgang Borutzky.
- [45] G.F. Kamiske, Handbuch QM-Methoden, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München, (2013).
- [46] Sviluppo di un metodo per l'ottimizzazione della direzione di stampa in processi additivi Spadoni Filippo Facoltà di Ingegneria, Università Politecnica delle Marche, (2021).
- [47] Baumers, M., Tuck, C., Wildman, R., Ashcroft, I., and Hague, R., "Energy Inputs to Additive Manufacturing: Does Capacity Utilization Matter?" EOS, Vol. 1000, No. 270, pp. 30-40, 2011.
- [48] Sreenivasan, R. and Bourell, D., "Sustainability Study in Selective Laser Sintering - An Energy Perspective," Proc. of the Solid Freeform Fabrication Symposium, pp. 257-265, 2009.
- [49] Sustainability of additive manufacturing: measuring the energy consumption of the laser sintering process Baumers M, Tuck C, [...] Hague R

Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture (2011) 225(12) 2228-2239.

[50] Kellens, K., Yasa, E., Renaldi, R., Dewulf, W., Kruth, J. P., et al., "Energy and Resource Efficiency of SLS/SLM Processes," Proc. of the Solid Freeform Fabrication Symposium, Paper No. 79, pp. 1-16, 2011.

[51] G. Corman, "Energy and Resource Efficiency of Additive Manufacturing Technologies," Master Thesis, RWTH Aachen University, 2014.

[52] Junk, S. and Côté, S., "A Practical Approach to Comparing Energy Effectiveness of Rapid Prototyping Technologies," Proc. of AEPR'12, 17th European Forum on Rapid Prototyping and Manufacturing, pp. 1-8, 2012.

[53] Remanufacturing of turbine blades by laser direct deposition with its energy and environmental impact analysis Wilson J, Piya C, [...] Ramani K Journal of Cleaner Production (2014) 80 170-178.

[54] A Comparison of Energy Consumption in Wire-based and Powder-based Additive-subtractive Manufacturing Jackson M, Van Asten A, [...] Pfefferkorn F Procedia Manufacturing (2016) 5 989-1005.

[55] T. Wohlers, R.I. Campbell: Wohlers report 2019-3D printing and additive manufacturing state of the industry. Wohlers Associates, (2019).

[56] A study on impact factors of the energy consumption of the fused deposition modeling process using two-level full factorial experiments Yi L, Chen T, [...] Aurich J Procedia CIRP (2020) 93 79-84.