

**POLITECNICO DI TORINO**

**Corso di Laurea Magistrale**

**in Ingegneria della Produzione Industriale e dell'Innovazione**

**Tecnologica**

**Tesi di Laurea**

**VALUTAZIONE DEL CICLO DI VITA  
DELL'ADDITIVE MANUFACTURING:  
Analisi LCA di processi produttivi additivi**



**Politecnico  
di Torino**

**Relatore**

Saboori Abdollah

**Candidato**

Enrico Staccione

Matricola S301727

**Anno Accademico 2025/2026**



# Indice

|  |           |
|--|-----------|
| INTRODUZIONE .....   | 6         |
| <b>1. TECNOLOGIE DI ADDITIVE MANUFACTURING: PRINCIPI, MATERIALI E APPLICAZIONI .....</b> | <b>11</b> |
| <b>1.1 Fondamenti dell'Additive Manufacturing.....</b>                                   | <b>11</b> |
| <b>1.2 Classificazione delle Tecnologie di Produzione Additiva .....</b>                 | <b>12</b> |
| 1.2.1 Binder Jetting .....   | 12        |
| 1.2.2 Directed Energy Deposition (DED).....  | 13        |
| 1.2.3 Material Extrusion .....   | 14        |
| 1.2.4 Material Jetting .....   | 14        |
| 1.2.5 Powder Bed Fusion (PBF) .....  | 15        |
| 1.2.6 Sheet Lamination .....   | 15        |
| 1.2.7 Vat Photopolymerization .....  | 16        |
| <b>1.3 Materiali per la Produzione Additiva .....</b>                                    | <b>16</b> |
| 1.3.1 Polimeri.....  | 17        |
| 1.3.2 Metalli e Leghe Metalliche .....   | 18        |
| 1.3.3 Materiali Ceramici .....   | 19        |
| 1.3.4 Materiali Compositi .....  | 19        |
| <b>1.4 Vantaggi Competitivi e Limitazioni Tecniche.....</b>                              | <b>20</b> |
| 1.4.1 Vantaggi Principali della Produzione Additiva .....                                | 20        |
| 1.4.2 Limitazioni Tecnologiche e Sfide Operative .....                                   | 22        |
| <b>1.5 Settori Applicativi dell'Additive Manufacturing.....</b>                          | <b>23</b> |
| 1.5.1 Industria Aerospaziale .....   | 24        |
| 1.5.2 Industria Automobilistica.....   | 25        |
| 1.5.3 Settore Biomedico e Dispositivi Medici .....                                       | 26        |
| 1.5.4 Settori Emergenti .....  | 26        |
| <b>1.6 Implicazioni Ambientali Preliminari .....</b>                                     | <b>27</b> |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>2. METODOLOGIA LIFE CYCLE ASSESSMENT: QUADRO NORMATIVO E STRUMENTI OPERATIVI.....</b>   | <b>30</b> |
| <b>2.1 Principi Fondamentali del Life Cycle Assessment.....</b>                            | <b>30</b> |
| <b>2.2 Struttura Metodologica dell'LCA .....</b>   | <b>31</b> |
| 2.2.1 Definizione dell'Obiettivo e del Campo di Applicazione .....                         | 31        |
| 2.2.2 Analisi di Inventario del Ciclo di Vita (LCI).....                                   | 32        |
| 2.2.3 Valutazione degli Impatti del Ciclo di Vita (LCIA) .....                             | 33        |
| 2.2.4 Interpretazione dei Risultati.....   | 34        |
| <b>2.3 Strumenti Software, Database e Risorse per l'LCA .....</b>                          | <b>36</b> |
| <b>2.4 Criticità Metodologiche, Limiti e Incertezze .....</b>                              | <b>37</b> |
| <b>2.5 Considerazioni Conclusive .....</b>   | <b>40</b> |
| <b>3. APPLICAZIONE DELL'LCA ALL'ADDITIVE MANUFACTURING: STATO DELL'ARTE.....</b>           | <b>41</b> |
| <b>3.1 Quadro Generale e Contesto di Ricerca .....</b>                                     | <b>41</b> |
| <b>3.2 Principi di Applicazione dell'LCA ai Processi Additivi .....</b>                    | <b>43</b> |
| <b>3.3 Confronto tra Produzione Additiva e Processi Manifatturieri Convenzionali .....</b> | <b>45</b> |
| <b>3.4 Fattori Critici dell'Impatto Ambientale.....</b>                                    | <b>48</b> |
| <b>3.5 Indicatori e Metriche Ambientali per la Valutazione dell'AM.....</b>                | <b>50</b> |
| <b>3.6 Strategie di Miglioramento della Sostenibilità .....</b>                            | <b>53</b> |
| <b>3.7 Limiti Metodologici e Prospettive Future di Ricerca .....</b>                       | <b>56</b> |
| <b>4. CASI DI STUDIO: ANALISI LCA DI PROCESSI ADDITIVI.....</b>                            | <b>59</b> |
| <b>4.1 Caso di Studio A: Protesi di Ginocchio in Ti-6Al-4V ELI .....</b>                   | <b>59</b> |
| 4.1.1 Contesto Tecnologico e Applicativo.....  | 59        |
| 4.1.2 Obiettivi e Metodologia dell'Analisi.....  | 60        |
| 4.1.3 Inventario del Ciclo di Vita.....  | 61        |
| 4.1.4 Risultati e Discussione.....   | 62        |
| 4.1.5 Analisi Critica e Opportunità di Miglioramento.....                                  | 64        |
| 4.1.6 Considerazioni Conclusive .....  | 65        |

|  |           |
|--|-----------|
| 4.1.7 Approfondimento Metodologico e Analisi delle Assunzioni .....            | 66        |
| 4.1.8 Analisi di Sensibilità .....   | 67        |
| 4.1.9 Analisi Comparativa Cradle-to-Grave .....                                | 68        |
| 4.1.10 Analisi per Categorie di Impatto Ambientale .....                       | 69        |
| 4.1.12 Discussione Complessiva e Limitazioni del Modello.....                  | 70        |
| 4.1.12 Sintesi Conclusiva del Caso A .....                                     | 71        |
| <b>4.2 Caso di Studio B: Componenti in Inconel 718.....</b>                    | <b>71</b> |
| 4.2.1 Inquadramento Tecnologico .....  | 71        |
| 4.2.2 Obiettivi e Perimetro dello Studio .....                                 | 72        |
| 4.2.3 Caratteristiche Ambientali della Lega Inconel 718 .....                  | 73        |
| 4.2.4 Inventario del Ciclo di Vita: Produzione Additiva .....                  | 75        |
| 4.2.5 Inventario del Ciclo di Vita: Produzione Convenzionale .....             | 76        |
| 4.2.6 Confronto dei Risultati: AM vs. Lavorazioni Tradizionali.....            | 77        |
| 4.2.7 Analisi di Sensibilità .....   | 78        |
| 4.2.8 Valutazione degli Impatti nel Ciclo di Vita Esteso.....                  | 79        |
| 4.2.9 Risultati e Discussione .....  | 80        |
| 4.2.10 Discussione Complessiva e Limitazioni del Modello.....                  | 81        |
| 4.2.11 Sintesi Conclusiva del Caso B .....                                     | 82        |
| <b>4.3 Confronto Trasversale dei Casi di Studio.....</b>                       | <b>83</b> |
| <b>4.4 Considerazioni conclusive Generali .....</b>                            | <b>84</b> |
| <b>5. CONCLUSIONI FINALI .....</b>   | <b>86</b> |
| <b>5.1 Sintesi dei risultati principali.....</b>                               | <b>86</b> |
| <b>5.2 Implicazioni per l'industria e per la pratica progettuale .....</b>     | <b>87</b> |
| <b>5.3 Il ruolo del mix energetico e delle energie rinnovabili.....</b>        | <b>89</b> |
| <b>5.4 Manifattura additiva ed economia circolare .....</b>                    | <b>89</b> |
| <b>5.5 Limitazioni dello studio e aree di miglioramento metodologico .....</b> | <b>90</b> |
| <b>5.6 Direzioni per la ricerca futura .....</b>                               | <b>91</b> |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>5.7 Raccomandazioni per ridurre l'impatto ambientale .....</b> | <b>93</b> |
| <b>5.8 Considerazioni conclusive .....</b>                        | <b>94</b> |
| <b>6. BIBLIOGRAFIA.....</b>                                       | <b>96</b> |

# INTRODUZIONE

## CONTESTO E MOTIVAZIONI DELLA RICERCA

La crescente attenzione verso i temi della sostenibilità ha profondamente ridefinito le priorità del settore industriale negli ultimi anni. I cambiamenti climatici, l'esaurimento progressivo delle risorse naturali e la necessità di contenere le emissioni di gas serra hanno spinto i governi e le organizzazioni internazionali a promuovere strategie di sviluppo più responsabili. L'industria manifatturiera, tradizionalmente tra le principali fonti di consumo energetico e impatti ambientali, si trova al centro di questa trasformazione. Le imprese sono chiamate a ripensare modelli produttivi consolidati per orientarsi verso soluzioni più efficienti e compatibili con obiettivi di lungo periodo.

L'avvento dell'Industria 4.0 ha accelerato processi di digitalizzazione e automazione che hanno reso possibile un utilizzo più razionale delle risorse. Tecnologie avanzate come l'Internet delle Cose, l'intelligenza artificiale e la produzione digitale permettono di monitorare i consumi in tempo reale, ottimizzare la pianificazione e ridurre gli sprechi. In questo contesto, l'Additive Manufacturing (AM) rappresenta una delle innovazioni più significative, poiché modifica radicalmente il modo in cui i componenti vengono progettati e realizzati.

L'Additive Manufacturing consiste nella costruzione, partendo da un modello digitale, di oggetti tridimensionali mediante deposizione successiva di materiale. A differenza dei processi sottrattivi, che rimuovono materiale da un blocco iniziale, l'AM aggiunge materiale solo dove necessario. Questa caratteristica offre vantaggi teorici considerevoli: riduzione degli scarti, capacità di produrre geometrie complesse senza ricorso a stampi costosi, possibilità di personalizzazione elevata. Molti studi evidenziano come la produzione additiva possa consentire risparmi materiali e alleggerimenti di peso che, in applicazioni aerospaziali e biomedicali, si traducono in benefici lungo tutto il ciclo di vita del prodotto (Kokare et al., 2023; Ford e Despeisse, 2016).

I benefici ambientali dell'Additive Manufacturing non possono essere dati per scontati. Diversi fattori influenzano il bilancio complessivo: il consumo energetico della macchina, la fase di produzione della polvere o del filamento, i trattamenti termici post-processo e l'efficienza di recupero del materiale non sinterizzato. In alcune applicazioni, il consumo di energia per unità di prodotto può essere superiore rispetto a processi tradizionali, soprattutto quando i volumi sono contenuti o i parametri non sono ottimizzati (Faludi et al., 2015; Baumers et al., 2011).

Risulta quindi essenziale adottare un approccio quantitativo che valuti gli impatti ambientali considerando tutte le fasi del ciclo di vita, dalla produzione delle materie prime fino allo smaltimento finale del componente.

Il Life Cycle Assessment (LCA) costituisce lo strumento metodologico più idoneo per questa valutazione. Basato sugli standard internazionali ISO 14040 e ISO 14044, l'LCA consente di identificare e quantificare i carichi ambientali associati a ciascuna fase del ciclo di vita di un prodotto. L'applicazione di tale metodologia all'Additive Manufacturing presenta complessità specifiche. La disponibilità di dati accurati è spesso limitata, soprattutto per tecnologie recenti o per processi caratterizzati da elevata variabilità. I confini del sistema devono essere definiti con attenzione, includendo non solo la fase di stampa ma anche la produzione delle polveri metalliche, i trattamenti termici e le lavorazioni di finitura superficiale (Peng et al., 2018; Liu et al., 2016).

Il settore dei dispositivi medici rappresenta un ambito particolarmente interessante per l'applicazione della produzione additiva. La possibilità di realizzare protesi, impianti e strumentazioni personalizzate risponde a esigenze cliniche specifiche e migliora i risultati terapeutici. Le leghe biocompatibili come il titanio Ti-6Al-4V sono ampiamente utilizzate in queste applicazioni. La complessità di tali materiali e l'esigenza di garantire standard qualitativi elevati rendono cruciale una valutazione ambientale rigorosa. Gli impianti devono superare controlli di biocompatibilità, sterilizzazione e resistenza meccanica, operazioni che aggiungono fasi produttive e incrementano i consumi energetici. La personalizzazione e la riduzione di peso consentite dall'AM possono compensare questi oneri, ma solo un'analisi dettagliata può quantificare i benefici netti (Shah et al., 2019; Jung et al., 2021).

Questa tesi nasce dalla necessità di approfondire la valutazione ambientale dell'Additive Manufacturing in applicazioni industriali concrete, con particolare attenzione ai settori medico e aerospaziale. L'obiettivo è fornire dati quantitativi e interpretazioni basate su evidenze scientifiche, utilizzando la metodologia LCA per identificare criticità e opportunità di miglioramento. L'analisi si concentra su due casi di studio: protesi di ginocchio in titanio Ti-6Al-4V ELI e componenti per il settore aerospace in Inconel 718. Attraverso un confronto con i processi manifatturieri convenzionali, si intende offrire un contributo concreto alla comprensione della sostenibilità della produzione additiva e suggerire strategie per ridurre l'impronta ambientale di questi processi.

## **OBIETTIVI DELLA RICERCA**



La finalità generale di questo lavoro è valutare l'impatto ambientale del ciclo di vita dei processi di Additive Manufacturing attraverso l'applicazione della metodologia Life Cycle Assessment. Lo studio si propone di verificare in quali condizioni e con quali parametri la produzione additiva può rappresentare un'alternativa sostenibile rispetto alle tecnologie manifatturiere tradizionali, individuando i principali fattori critici e i margini di ottimizzazione.

Per raggiungere questo scopo, la ricerca si articola attorno ai seguenti obiettivi specifici:

#### 1. Analizzare le tecnologie di Additive Manufacturing

Approfondire i principi di funzionamento, i materiali impiegati e le caratteristiche delle principali tecniche di AM. Identificare i fattori che influenzano maggiormente il bilancio ambientale, quali il consumo energetico, l'efficienza di utilizzo del materiale, la generazione di scarti e le fasi di post-processing.

#### 2. Approfondire la metodologia LCA e la sua applicabilità all'AM

Descrivere le fasi operative dell'LCA: definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione, analisi dell'inventario del ciclo di vita (LCI), valutazione degli impatti (LCIA) e interpretazione dei risultati. Illustrare i riferimenti normativi, in particolare gli standard ISO 14040 e ISO 14044, e le principali banche dati e software utilizzati (SimaPro, OpenLCA, Ecoinvent, GaBi). Esaminare criticità metodologiche specifiche per i processi additivi.

#### 3. Applicare la metodologia LCA a casi di studio concreti

Condurre studi di caso relativi a componenti realizzati tramite Additive Manufacturing, includendo dispositivi medici come protesi di ginocchio in titanio Ti-6Al-4V ELI e componenti aerospaziali in Inconel 718. Quantificare gli impatti ambientali lungo l'intero ciclo di vita e confrontarli con quelli derivanti da tecnologie convenzionali.

#### 4. Confrontare i processi di Additive Manufacturing con i metodi convenzionali

Eseguire analisi comparative tra processi additivi e sottrattivi, valutando non solo l'impatto ambientale ma anche l'efficienza materiale, i consumi energetici e le prestazioni meccaniche. Esaminare scenari diversi, considerando variazioni nei parametri operativi, nel mix energetico utilizzato e nelle strategie di riciclo del materiale.

#### 5. Identificare strategie di ottimizzazione e miglioramento ambientale

Proporre linee guida per ridurre l'impatto ambientale dei processi additivi. Analizzare l'influenza di fattori quali l'adozione di energie rinnovabili, l'aumento del tasso di riutilizzo delle polveri, l'ottimizzazione dei parametri di stampa e la riduzione dei supporti. Fornire indicazioni per progettisti, ingegneri di processo e decisori aziendali.

## **STRUTTURA DEL LAVORO**

Il lavoro è strutturato in quattro capitoli più le conclusioni finali, organizzati secondo una logica progressiva che parte dai fondamenti teorici per giungere all'applicazione pratica e alla discussione dei risultati ottenuti.

Il Capitolo 1 descrive le tecnologie di Additive Manufacturing. Vengono esaminati i principi di funzionamento delle diverse tecniche produttive, le classificazioni proposte dalle principali norme di riferimento, i materiali utilizzabili (polimeri, metalli, ceramiche, compositi) e le applicazioni industriali più rilevanti. Particolare attenzione è dedicata ai vantaggi competitivi della produzione additiva, alle limitazioni tecniche e alle implicazioni ambientali preliminari.

Il Capitolo 2 approfondisce la metodologia Life Cycle Assessment, illustrando i principi fondamentali e il quadro normativo di riferimento (ISO 14040 e ISO 14044). Vengono descritte le quattro fasi dell'LCA: definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione, analisi di inventario, valutazione degli impatti e interpretazione dei risultati. Il capitolo esamina inoltre gli strumenti software, le banche dati disponibili e le criticità metodologiche che emergono nell'applicazione dell'LCA ai processi di produzione additiva.

Il Capitolo 3 presenta lo stato dell'arte della ricerca sull'applicazione dell'LCA all'Additive Manufacturing. Vengono analizzati studi comparativi tra produzione additiva e processi convenzionali, identificati i fattori critici che influenzano l'impatto ambientale e discusse le strategie proposte in letteratura per migliorare la sostenibilità delle tecnologie AM. Sono esaminati indicatori e metriche ambientali rilevanti e si evidenziano limiti metodologici e prospettive di ricerca futura.

Il Capitolo 4 presenta i casi di studio analizzati. Il primo riguarda protesi di ginocchio in titanio Ti-6Al-4V ELI prodotte mediante Electron Beam Melting (EBM), confrontate con il processo di lavorazione meccanica tradizionale. Il secondo caso si concentra su componenti in Inconel 718 per applicazioni aerospaziali, confrontando la produzione additiva mediante Selective Laser Melting con tecnologie convenzionali. Per ciascun caso vengono presentati i dati di

inventario, i risultati della valutazione degli impatti, le analisi di sensibilità e le considerazioni conclusive.

Le Conclusioni Finali riassumono i risultati ottenuti, discutono le implicazioni per la pratica industriale e propongono direzioni per la ricerca futura. Vengono evidenziate le condizioni in cui l'Additive Manufacturing può effettivamente rappresentare un'alternativa sostenibile e si forniscono raccomandazioni per ridurre l'impronta ambientale dei processi additivi.

# **1. TECNOLOGIE DI ADDITIVE MANUFACTURING: PRINCIPI, MATERIALI E APPLICAZIONI**

## **1.1 Fondamenti dell'Additive Manufacturing**

L'Additive Manufacturing rappresenta un cambio radicale nel modo di concepire e realizzare componenti industriali. A differenza dei metodi sottrattivi, che rimuovono materiale da un blocco iniziale attraverso operazioni di fresatura o tornitura, la manifattura additiva costruisce oggetti tridimensionali mediante deposizione successiva di strati di materiale. Questo principio ha origini negli anni '80, quando le prime tecnologie di prototipazione rapida utilizzavano resine fotopolimerizzabili per creare modelli funzionali direttamente da file digitali (Manco et al., 2023).

Il processo parte da un modello tridimensionale realizzato mediante software CAD, che viene suddiviso in sezioni trasversali sottili. Ogni sezione corrisponde a uno strato fisico che la macchina deposita, solidifica o fonde in sequenza. La geometria finale emerge dalla sovrapposizione controllata di centinaia o migliaia di questi strati. Rispetto ai processi convenzionali, l'AM offre vantaggi significativi: riduzione degli scarti di materiale, possibilità di realizzare geometrie complesse senza l'uso di stampi costosi e capacità di produrre componenti altamente personalizzati (Pereira et al., 2019).

L'evoluzione tecnologica degli ultimi due decenni ha trasformato l'AM da semplice strumento di prototipazione rapida a tecnologia di produzione industriale. Materiali sempre più performanti, tra cui leghe metalliche ad alte prestazioni, polimeri tecnici e ceramiche avanzate, hanno esteso il campo applicativo della manifattura additiva a settori critici come aerospaziale, biomedicale ed energetico. La diffusione dei principi dell'Industria 4.0, con l'integrazione di sistemi digitali e automazione, ha ulteriormente accelerato l'adozione dell'AM nelle catene produttive globali.

Dal punto di vista strategico, la manifattura additiva risponde a due esigenze fondamentali del settore industriale contemporaneo. Da un lato, permette una maggiore flessibilità produttiva, fattore critico in un mercato che richiede personalizzazione crescente e produzioni in piccola serie. Dall'altro, offre il potenziale per orientare la produzione verso modelli più sostenibili, riducendo sprechi, abilitando il recupero dei materiali e accorciando le catene di approvvigionamento. I benefici ambientali dell'AM non sono automatici: il consumo energetico elevato di alcune tecnologie, i trattamenti post-processo necessari e la produzione delle polveri

metalliche possono comportare impatti significativi che richiedono valutazioni rigorose (Landi et al., 2022).

## **1.2 Classificazione delle Tecnologie di Produzione Additiva**

Le tecnologie che rientrano sotto il termine Additive Manufacturing sono numerose e si differenziano per tipo di materiale impiegato, forma fisica del materiale di partenza (filamento, polvere, resina liquida o fogli solidi), fonte di energia utilizzata e modalità di consolidamento del materiale. Per uniformare la terminologia e facilitare la comprensione delle diverse tecnologie, la norma ISO/ASTM 52900:2021 ha introdotto una classificazione standardizzata che distingue sette categorie fondamentali: vat photopolymerization, material extrusion, powder bed fusion, material jetting, binder jetting, directed energy deposition e sheet lamination (ISO/ASTM, 2021).

Questa classificazione fornisce un quadro di riferimento che consente di comprendere le caratteristiche distintive di ciascun processo, i materiali compatibili, i settori applicativi e le prestazioni ottenibili. Ogni tecnologia presenta vantaggi e limitazioni specifiche che ne determinano l'idoneità per diverse applicazioni industriali. Nei paragrafi seguenti vengono analizzate in dettaglio le principali famiglie di processi additivi.

### **1.2.1 Binder Jetting**

Il Binder Jetting deposita selettivamente un legante liquido su strati successivi di polvere fine, che può essere costituita da metallo, ceramica o materiale polimerico. Durante il processo, uno strato sottile di polvere viene steso uniformemente su una piattaforma di costruzione e una testina di stampa applica il legante nelle zone corrispondenti alla sezione del modello tridimensionale. Al termine del processo, si ottiene un componente provvisorio che necessita di una fase di sinterizzazione o infiltrazione per raggiungere la densità e le proprietà meccaniche finali (Ahangar et al., 2019).

Dal punto di vista produttivo, questa tecnologia risulta veloce e adatta alla realizzazione di geometrie complesse. Viene ampiamente utilizzata per produrre stampi e anime per fonderia in sabbia, modelli architettonici, utensili personalizzati e, più recentemente, parti metalliche in acciaio inox o Inconel con densità elevate. Nell'industria aerospaziale

e automobilistica, il Binder Jetting consente di produrre prototipi funzionali e pre-serie in tempi ridotti, accorciando il time-to-market.

Il processo non richiede potenze laser elevate né camere a vuoto, aspetto che limita il consumo energetico durante la stampa. I trattamenti post-stampa, in particolare la sinterizzazione, sono energivori e possono ridurre parte dei vantaggi ambientali. La densità finale del componente tende a essere inferiore rispetto ai pezzi realizzati con tecniche di fusione selettiva, e la finitura superficiale richiede spesso levigature o lavorazioni aggiuntive.

### 1.2.2 Directed Energy Deposition (DED)

La tecnologia Directed Energy Deposition fonde il materiale direttamente nel punto di deposizione utilizzando una sorgente energetica ad alta intensità, come un laser, un fascio di elettroni o un arco al plasma. Il materiale di alimentazione può essere in forma di polvere o filo metallico e viene immesso nel punto focale della sorgente energetica, dove viene fuso e immediatamente depositato sulla superficie del pezzo o su una base preesistente (Gupta et al., 2023).

Il DED è particolarmente apprezzato per la riparazione di componenti metallici di grande valore, come pale di turbina, stampi e componenti aeronautici. Permette di aggiungere materiale solo nelle zone danneggiate, prolungando la vita utile dei componenti e riducendo gli scarti. Viene inoltre utilizzato per fabbricare strutture di grandi dimensioni in settori come quello aeronautico o della produzione energetica, dove la scala e la robustezza prevalgono sulla finitura superficiale.

La possibilità di combinare materiali diversi all'interno dello stesso processo consente di creare gradienti di composizione, utili per rivestimenti antiusura o anticorrosione. Il controllo termico e metallurgico del processo è complesso e richiede una gestione accurata dei parametri di potenza e velocità di deposizione. Anche la rugosità superficiale dei pezzi DED tende a essere elevata e necessita di finiture meccaniche successive. Dal punto di vista ambientale, la capacità del DED di riparare anziché sostituire i componenti rappresenta un vantaggio notevole in termini di sostenibilità, riducendo il consumo di materia prima e di energia associata alla produzione di nuove parti.

### 1.2.3 Material Extrusion

Il Material Extrusion rappresenta probabilmente la tecnologia più conosciuta e diffusa nel mondo della stampa tridimensionale. Il processo prevede la fusione di un filamento termoplastico (solitamente PLA, ABS, PETG o nylon) che, riscaldato all'interno di un estrusore, viene depositato strato su strato per costruire l'oggetto desiderato. La sua declinazione più popolare è il Fused Deposition Modeling (FDM), sviluppato da Stratasys, e la variante open-source Fused Filament Fabrication (FFF) (Redwood et al., 2017).

Questa tecnologia è ampiamente utilizzata nella prototipazione rapida, nella didattica, nel design industriale e in ambito maker, dove la velocità di iterazione progettuale è più importante della resistenza meccanica finale. Gli sviluppi recenti hanno ampliato le potenzialità del processo: oggi esistono stampanti FDM industriali capaci di lavorare materiali tecnici come PEEK, ULTEM o PC-ABS, che resistono a temperature elevate e trovano impiego in componenti aerospaziali leggeri, guide chirurgiche e parti per dispositivi medici.

Nonostante la versatilità, il Material Extrusion presenta limiti legati alla qualità superficiale e alla resistenza anisotropa dei componenti, che dipende fortemente dall'orientamento di stampa e dall'adesione tra i layer. Il processo richiede spesso supporti di stampa, che aumentano gli scarti di materiale. Dal punto di vista ambientale, l'uso di biopolimeri come il PLA e la possibilità di riciclare gli scarti rendono questa tecnologia una delle più sostenibili nel panorama additivo.

### 1.2.4 Material Jetting

Il Material Jetting si basa su un principio analogo a quello delle stampanti a getto d'inchiostro: minuscole gocce di materiale fotopolimerico vengono depositate su un piano di costruzione e solidificate immediatamente tramite luce ultravioletta. Questo processo consente di ottenere parti con elevatissima risoluzione e finitura superficiale, spesso con la possibilità di utilizzare più materiali o colori simultaneamente. È una tecnologia diffusa nella prototipazione estetica, nella gioielleria e nel settore dentale, dove la fedeltà dimensionale e l'aspetto visivo sono prioritari (Pérez et al., 2020).

Dal punto di vista tecnico, il Material Jetting permette di creare oggetti multi-materiale con variazioni di rigidità, trasparenza o colore all'interno dello stesso pezzo, aspetto fondamentale per il design di prodotti e modelli anatomici realistici. I limiti principali riguardano la fragilità dei fotopolimeri e la scarsa resistenza termica, che rendono questi componenti poco adatti a impieghi strutturali. Nonostante ciò, la precisione e la qualità estetica rendono il Material Jetting una tecnologia di riferimento per la validazione visiva e funzionale di nuovi prodotti.

### 1.2.5 Powder Bed Fusion (PBF)

Tra tutte le tecnologie additive, la Powder Bed Fusion ha trovato la maggiore diffusione industriale. Il processo prevede la stesura di uno strato sottile di polvere, metallica o polimerica, che viene poi fusa localmente da una sorgente energetica ad alta potenza, tipicamente un laser o un fascio di elettroni. A seconda del materiale e della fonte energetica, si distinguono varianti come Selective Laser Sintering (SLS), Selective Laser Melting (SLM) e Electron Beam Melting (EBM) (Huang et al., 2015).

La PBF consente di ottenere componenti ad alta densità e precisione, spesso comparabili per qualità meccaniche a quelli prodotti mediante lavorazioni tradizionali. È ampiamente utilizzata nel settore aerospaziale per staffe e supporti strutturali in titanio, e in quello biomedicale per impianti ortopedici personalizzati, grazie alla possibilità di creare strutture porose ottimizzate per l'osteointegrazione. Il principale limite di questa tecnologia risiede nei lunghi tempi di costruzione e raffreddamento, nonché nei costi energetici legati al mantenimento di un'atmosfera controllata. La riduzione degli scarti di materiale e la possibilità di recuperare oltre il novantacinque per cento della polvere non fusa la rendono un processo altamente efficiente e sostenibile (Khalid e Peng, 2021).

### 1.2.6 Sheet Lamination

La Sheet Lamination consiste nell'unione successiva di fogli sottili di materiale, metallici, plastici o persino cartacei, che vengono tagliati secondo il profilo di ogni sezione e poi incollati o saldati per formare l'oggetto finale. Sebbene sia una tecnologia meno utilizzata rispetto ad altre, trova applicazioni interessanti nella realizzazione di



modelli architettonici, stampi rapidi e prototipi di grande scala dove la velocità di produzione è un requisito essenziale (Szymczyk-Ziółkowska et al., 2020).

Dal punto di vista ambientale, il consumo energetico di questo processo è relativamente basso rispetto alle tecniche di fusione, ma le proprietà meccaniche dei pezzi risultano inferiori, e la precisione dipende fortemente dallo spessore dei fogli e dalla qualità dell'adesivo. In alcuni casi, la Sheet Lamination è combinata con lavorazioni sottrattive per ottenere tolleranze più strette, rappresentando una forma di ibridazione produttiva tra AM e tecniche convenzionali.

### 1.2.7 Vat Photopolymerization

La categoria della Vat Photopolymerization racchiude tecnologie come la Stereolitografia (SLA) e il Digital Light Processing (DLP), in cui un fotopolimero liquido viene solidificato selettivamente mediante l'esposizione controllata a un raggio laser o a una fonte luminosa proiettata. Si tratta di uno dei primi processi di stampa tridimensionale sviluppati e ancora oggi rappresenta un punto di riferimento per la precisione dimensionale e la qualità superficiale (Muñoz et al., 2021).

Le applicazioni principali includono odontoiatria digitale, gioielleria, prototipi estetici di alta qualità e componenti microfluidici. La limitata disponibilità di materiali resistenti e la necessità di post-curing ne circoscrivono l'impiego alla produzione di piccole serie o modelli di verifica. In prospettiva, la ricerca su nuovi fotopolimeri biocompatibili e ad alte prestazioni termiche potrebbe estendere notevolmente il campo di applicazione di questa tecnologia.

## 1.3 Materiali per la Produzione Additiva

L'evoluzione dei materiali è stata uno dei principali fattori che ha consentito all'Additive Manufacturing di compiere il salto qualitativo dalla semplice prototipazione rapida alla produzione di componenti funzionali destinati a settori critici. Nei primi anni di sviluppo della stampa tridimensionale, i materiali utilizzati erano perlopiù polimeri a basso costo, adatti a realizzare modelli concettuali o verifiche di forma. Oggi, grazie ai progressi nella ricerca sui materiali e nell'ingegneria dei processi, l'AM è in grado di lavorare una gamma estremamente

ampia di sostanze: dai termoplastici ai metalli ad alte prestazioni, dalle ceramiche tecniche ai compositi ibridi.

La scelta del materiale non è mai neutra: essa determina non solo le prestazioni meccaniche e funzionali del prodotto finale, ma anche il consumo energetico, la quantità di scarto, la complessità dei post-processi e l'impatto ambientale complessivo del ciclo di vita.

### 1.3.1 Polimeri

I materiali polimerici rappresentano il punto di partenza storico dell'Additive Manufacturing e restano, ancora oggi, la categoria più diffusa in termini di numero di applicazioni. Comprendono sia termoplastici, come PLA (acido polilattico), ABS (acrilonitrile-butadiene-stirene), PETG (polietilene tereftalato glicolato), nylon (PA12, PA6) e PEEK (polietere etere chetone), sia termoindurenti, come le resine fotopolimeriche utilizzate nei processi di stereolitografia o Digital Light Processing.

I termoplastici sono apprezzati per la loro facilità di lavorazione, basso costo e riciclabilità. Il PLA, ad esempio, è di origine bio-based e biodegradabile, il che lo rende uno dei materiali più sostenibili per la stampa tridimensionale a livello di laboratorio o prototipazione rapida. Viene ampiamente impiegato in ambiti educativi, design industriale e packaging. L'ABS e il PETG, grazie a una maggiore resistenza meccanica e termica, trovano applicazione nella produzione di parti funzionali, involucri per elettronica e componenti automotive non strutturali (Manco et al., 2023).

Materiali tecnopolimerici come il nylon o il PEEK hanno esteso le possibilità applicative della stampa tridimensionale in contesti industriali avanzati. Il PEEK, in particolare, resiste a temperature fino a duecentocinquanta gradi Celsius e presenta un'ottima biocompatibilità, motivo per cui viene utilizzato nella produzione di impianti spinali, guide chirurgiche, protesi craniche e componenti aerospaziali. Le sue prestazioni, comparabili a quelle di alcune leghe leggere, ne fanno uno dei materiali più promettenti per la sostituzione parziale del metallo in applicazioni critiche.

Le resine fotopolimeriche termoindurenti, impiegate nei processi a base di luce, permettono di ottenere superfici molto lisce e dettagli estremamente precisi. Sono utilizzate in settori come odontoiatria digitale, gioielleria e prototipazione estetica, dove la precisione dimensionale è prioritaria rispetto alla resistenza meccanica. Il loro limite principale resta la fragilità e la scarsa resistenza agli agenti chimici e termici, che ne

impediscono l'utilizzo in applicazioni strutturali. Dal punto di vista ambientale, i polimeri offrono vantaggi legati alla possibilità di riutilizzare o riciclare il materiale di scarto, ma l'origine petrolchimica di molti di essi resta una criticità. La ricerca attuale si concentra sulla produzione di biopolimeri derivati da fonti rinnovabili, come PLA e PHB, e sull'utilizzo di polimeri riciclati per ridurre la dipendenza da risorse fossili.

### 1.3.2 Metalli e Leghe Metalliche

Le leghe metalliche rappresentano il cuore della manifattura additiva industriale. Sono i materiali che hanno reso possibile la transizione dell'AM verso la produzione di componenti strutturali ad alte prestazioni, utilizzati in settori strategici come aerospaziale, automotive, energia, difesa e biomedicale. Tra le leghe più utilizzate si trovano gli acciai inossidabili (316L, 17-4PH), il titanio e le sue leghe (Ti-6Al-4V, Ti-6Al-7Nb), le leghe di alluminio (AlSi10Mg), le superleghe a base di nichel (Inconel 625, 718) e le leghe di cobalto-cromo (Co-Cr-Mo).

Questi materiali vengono lavorati principalmente attraverso tecniche come Powder Bed Fusion e Directed Energy Deposition, che utilizzano un laser o un fascio di elettroni per fondere il materiale metallico strato per strato. Il vantaggio principale è la possibilità di ottenere componenti complessi, leggeri e ad alta resistenza, riducendo drasticamente gli scarti di lavorazione rispetto ai metodi sottrattivi. Ad esempio, nel settore aerospaziale, le leghe di titanio sono utilizzate per realizzare supporti strutturali, staffe, pale di turbina e condotti di carburante, con riduzioni di peso che arrivano fino al quaranta per cento rispetto ai componenti tradizionali (Javaid et al., 2021).

Nel campo biomedicale, il titanio è il materiale di riferimento per protesi e impianti grazie alla sua eccellente biocompatibilità e alla capacità di favorire l'osteointegrazione. Le superleghe Inconel trovano impiego in camere di combustione e ugelli di motori a reazione, dove la resistenza a temperature elevate è essenziale. Le leghe di alluminio, leggere e relativamente economiche, sono utilizzate per parti automobilistiche, droni e strutture robotiche.

Nonostante le prestazioni elevate, la manifattura additiva di metalli comporta sfide notevoli: elevato consumo energetico durante la fusione, necessità di post-trattamenti termici (come l'HIP, Hot Isostatic Pressing) e rigorosi controlli di qualità non distruttivi. Anche dal punto di vista ambientale, la produzione di polveri metalliche richiede molta

energia, rendendo cruciale il riuso del materiale non fuso. La possibilità di riciclare oltre il novanta per cento della polvere e la riduzione degli scarti rispetto alla lavorazione meccanica tradizionale compensano in parte l'elevato input energetico (Watari et al., 2021).

### 1.3.3 Materiali Ceramici

Le ceramiche rappresentano una frontiera ancora in evoluzione dell'Additive Manufacturing. La loro intrinseca fragilità e le difficoltà legate ai processi di sinterizzazione e finitura hanno a lungo limitato le applicazioni industriali, ma negli ultimi anni i progressi tecnologici stanno rendendo possibile la produzione di componenti ceramici complessi con elevata precisione dimensionale.

Le ceramiche utilizzate in AM si dividono in due grandi categorie: ceramiche tradizionali, come l'allumina ( $Al_2O_3$ ), la zirconia ( $ZrO_2$ ) e la silice ( $SiO_2$ ), e ceramiche avanzate, come il carburo di silicio (SiC) e il nitruro di alluminio (AlN). Questi materiali sono caratterizzati da eccezionale resistenza alle alte temperature, durezza, stabilità chimica e isolamento elettrico, proprietà che li rendono ideali per applicazioni in ambienti estremi.

Le tecnologie più comuni per la stampa di ceramiche includono la stereolitografia con sospensioni ceramiche, il binder jetting e il robocasting, dove una pasta ceramica viene estrusa e successivamente sinterizzata. Le applicazioni principali si trovano nei settori aerospaziale (componenti resistenti all'erosione e al calore per motori e ugelli), energetico (isolatori termici e parti per turbine a gas), medicale (protesi dentali e impianti ossei bioceramici) e elettronico (substrati isolanti per circuiti di potenza).

Dal punto di vista ambientale, le ceramiche hanno il vantaggio di una lunga durata e alta resistenza all'usura, ma il loro processo di sinterizzazione richiede temperature molto elevate (fino a milleseicento gradi Celsius), con conseguente consumo energetico significativo. La ricerca attuale si concentra su tecniche di sinterizzazione assistita da microonde o laser, in grado di ridurre tempi e consumi fino al quaranta per cento.

### 1.3.4 Materiali Compositi

I materiali compositi rappresentano una delle aree di ricerca più promettenti nell'ambito dell'Additive Manufacturing. Essi combinano due o più fasi, una matrice (polimerica, metallica o ceramica) e un rinforzo (fibre continue o discontinue, particelle o nanotubi), per ottenere proprietà meccaniche e funzionali superiori rispetto a ciascun materiale preso singolarmente.

I compositi a matrice polimerica rinforzati con fibre di carbonio o di vetro sono già diffusi in ambiti come l'automotive, il navale e l'aerospaziale leggero, dove è fondamentale ridurre il peso mantenendo buone caratteristiche di rigidità e resistenza. Tecnologie come il fused filament fabrication o il continuous fiber fabrication consentono di depositare fibre orientate in modo controllato, ottenendo strutture anisotrope con elevate prestazioni meccaniche.

Altri compositi più avanzati combinano matrici metalliche e rinforzi ceramici (come TiC o Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) per produrre componenti resistenti all'usura e al calore impiegati in turbine, freni o utensili da taglio. Dal punto di vista funzionale, i compositi permettono anche di ottenere proprietà intelligenti, come conducibilità elettrica localizzata, schermatura elettromagnetica o capacità auto-riparante.

Un esempio concreto è la produzione di bracci robotici leggeri in composito polimerico-carbonio mediante AM, che uniscono leggerezza strutturale e resistenza alla fatica. Nel campo biomedicale, i compositi bioattivi (ad esempio PEEK rinforzato con idrossiapatite) vengono utilizzati per impianti che favoriscono la crescita ossea, con risultati promettenti in termini di integrazione e biocompatibilità.

Dal punto di vista ambientale, i compositi pongono sfide legate alla riciclabilità: la combinazione di materiali diversi rende difficile la separazione e il recupero delle singole fasi. La riduzione del peso e la maggiore durata del componente spesso compensano questi limiti sul piano del ciclo di vita complessivo.

## **1.4 Vantaggi Competitivi e Limitazioni Tecniche**

### **1.4.1 Vantaggi Principali della Produzione Additiva**

L'Additive Manufacturing si distingue dai metodi produttivi tradizionali per una serie di vantaggi strutturali, tecnologici e ambientali che ne hanno determinato la rapida

diffusione negli ultimi due decenni. Il primo e forse più evidente beneficio riguarda la riduzione degli sprechi di materiale: poiché l'AM costruisce i componenti aggiungendo strati di materiale solo dove necessario, non si generano trucioli o sfridi come nei processi sottrattivi. Questo principio additivo consente un utilizzo molto più efficiente delle materie prime, con rendimenti che, nel caso di leghe metalliche costose come titanio o Inconel, possono ridurre gli scarti dal novanta per cento a meno del dieci per cento rispetto alla lavorazione meccanica convenzionale (Ford e Despeisse, 2016).

Un secondo vantaggio fondamentale è rappresentato dalla straordinaria libertà geometrica offerta dalla manifattura additiva. L'assenza di utensili e stampi consente di produrre forme impossibili da realizzare con tecniche tradizionali, come cavità interne, canali di raffreddamento conformali, strutture reticolari o gradienti di densità. Questa flessibilità progettuale permette di concepire componenti ottimizzati dal punto di vista strutturale, riducendo il peso senza compromettere la resistenza meccanica. In ambito aerospaziale, la possibilità di eliminare materiale superfluo ha portato a riduzioni di massa fino al cinquanta per cento, con benefici diretti sul consumo di carburante e sull'impatto ambientale dei veicoli (Kokare et al., 2023).

La personalizzazione del prodotto è un altro punto di forza cruciale. A differenza delle tecnologie tradizionali, che richiedono costosi stampi o attrezzature per la produzione in serie, l'AM è economicamente sostenibile anche per singole unità o piccole serie. Questo la rende ideale per la produzione di dispositivi medici su misura, come protesi, impianti dentali, guide chirurgiche, ma anche per beni di consumo personalizzati, come occhiali, calzature o gioielli. In un contesto industriale sempre più orientato alla personalizzazione e alla produzione flessibile, la stampa tridimensionale consente di passare agevolmente da un design all'altro senza lunghi tempi di riconfigurazione (Shah et al., 2019).

Dal punto di vista dei tempi e dei costi di sviluppo, la manifattura additiva offre un vantaggio competitivo nella fase di prototipazione e validazione del design. Poiché non sono necessari stampi o attrezzature specifiche, il passaggio dal modello CAD al pezzo fisico è pressoché immediato, riducendo in modo drastico i tempi di iterazione progettuale. Questa rapidità accelera i processi di innovazione e consente alle aziende di ridurre il time-to-market dei nuovi prodotti, aspetto cruciale nei settori ad alta competitività come l'elettronica, l'automotive o la moda industriale.

Un ulteriore vantaggio di grande rilievo riguarda la possibilità di decentralizzare la produzione. L'AM consente di fabbricare i componenti direttamente nel luogo di utilizzo

o in prossimità del cliente finale, riducendo la necessità di lunghi trasporti, magazzini e catene logistiche complesse. Questa forma di produzione distribuita è particolarmente utile in contesti come quello aerospaziale, militare o sanitario, dove la disponibilità immediata di parti di ricambio può essere critica. In prospettiva, la stampa tridimensionale locale riduce non solo i costi logistici, ma anche le emissioni di CO<sub>2</sub> associate al trasporto internazionale di beni e materiali (Jung et al., 2021).

#### 1.4.2 Limitazioni Tecnologiche e Sfide Operative

Nonostante i numerosi vantaggi, la manifattura additiva presenta ancora limitazioni tecniche, economiche e ambientali che ne frenano la diffusione su larga scala. Una delle criticità più discusse riguarda il consumo energetico elevato, in particolare per le tecnologie metalliche come la Powder Bed Fusion e la Directed Energy Deposition. Questi processi richiedono potenze laser significative, atmosfere controllate in gas inerte e lunghi tempi di raffreddamento, con un fabbisogno energetico per chilogrammo di materiale lavorato che può essere fino a cinque volte superiore a quello della lavorazione meccanica tradizionale (Faludi et al., 2015).

Un'altra sfida importante è rappresentata dai tempi di produzione, che tendono ad aumentare in modo non lineare con la dimensione o la complessità del pezzo. La costruzione strato per strato è intrinsecamente più lenta rispetto a tecniche formative come la pressofusione o lo stampaggio a iniezione, e la presenza di supporti di stampa, indispensabili per evitare deformazioni, aggiunge ulteriore tempo nella fase di costruzione e nella rimozione successiva. Ciò rende l'AM meno competitiva per produzioni di massa, limitandone l'utilizzo a componenti ad alto valore aggiunto o con geometrie particolarmente complesse.

La necessità di post-processing costituisce un ulteriore limite operativo. Nella maggior parte dei casi, i pezzi stampati richiedono trattamenti termici per migliorare la microstruttura e la resistenza meccanica, finiture superficiali per ridurre la rugosità o lavorazioni meccaniche per garantire le tolleranze dimensionali. Queste operazioni aggiuntive incidono sui costi, sui tempi e sull'impatto ambientale complessivo del processo, riducendo la convenienza della produzione additiva in alcuni scenari industriali (Baumers et al., 2011).

Un aspetto altrettanto rilevante è il controllo della qualità e della ripetibilità del processo. Le condizioni termiche e di raffreddamento durante la fusione possono variare anche all'interno dello stesso lotto di produzione, influenzando la microstruttura e generando anisotropie o porosità indesiderate nei materiali metallici. Queste disomogeneità possono compromettere la resistenza a fatica o la tenacità del pezzo, richiedendo rigorosi controlli non distruttivi (radiografie, tomografie, analisi metallografiche) che aumentano ulteriormente i costi e la complessità del processo.

Dal punto di vista economico, i costi delle macchine e dei materiali restano elevati. Le stampanti metalliche di fascia industriale richiedono investimenti iniziali superiori a un milione di euro, mentre le polveri metalliche atomizzate possono costare fino a dieci volte di più del materiale grezzo utilizzato nelle lavorazioni convenzionali. Anche la manutenzione degli impianti, l'uso di gas inerti e la gestione delle polveri rappresentano costi aggiuntivi che ne limitano l'adozione su larga scala.

È necessario considerare la complessità ambientale della manifattura additiva. Sebbene la riduzione degli scarti di materiale sia un indubbio vantaggio, il bilancio ecologico complessivo dipende da numerosi fattori, tra cui il tipo di energia impiegata, la durata dei trattamenti post-processo e la possibilità di riciclare le polveri o i supporti di stampa. Diversi studi di Life Cycle Assessment hanno dimostrato che, in alcune condizioni, il consumo energetico elevato o la necessità di finiture complesse possono rendere l'impatto ambientale della stampa tridimensionale comparabile o persino superiore a quello dei metodi tradizionali (Peng et al., 2018; Liu et al., 2016).

Nonostante ciò, la ricerca scientifica e industriale si sta concentrando sull'ottimizzazione dei parametri di processo, sull'uso di energie rinnovabili e sull'incremento dell'efficienza delle macchine, con l'obiettivo di ridurre le barriere tecnologiche e ambientali che ancora separano la manifattura additiva da una piena industrializzazione sostenibile.

## **1.5 Settori Applicativi dell'Additive Manufacturing**

Le applicazioni dell'Additive Manufacturing si estendono oggi a un numero crescente di settori industriali e scientifici, trasformando profondamente il modo di concepire, progettare e produrre beni complessi. Se inizialmente l'utilizzo della stampa tridimensionale era confinato alla prototipazione rapida e alla realizzazione di modelli concettuali, negli ultimi anni



l'evoluzione dei materiali, delle tecnologie di fusione e dei sistemi di controllo ha reso possibile la produzione di componenti funzionali, anche in ambiti ad alto contenuto tecnologico. Tra i settori che più beneficiano dell'AM vi sono quello aerospaziale, automobilistico e biomedicale, a cui si aggiungono nuove aree emergenti come l'edilizia, la moda, l'alimentazione e la bio-stampa.

### 1.5.1 Industria Aerospaziale

Il settore aerospaziale rappresenta il campo di applicazione più maturo e tecnologicamente avanzato della manifattura additiva. Le motivazioni principali risiedono nell'elevata complessità geometrica dei componenti e nella necessità di ridurre al minimo il peso strutturale per migliorare le prestazioni energetiche dei velivoli. Ogni chilogrammo risparmiato in un aereo o in un razzo spaziale si traduce in un significativo risparmio di carburante e in una riduzione delle emissioni durante il ciclo operativo. È proprio questa relazione diretta tra leggerezza e sostenibilità ad aver reso l'AM una tecnologia chiave nel settore.

Le applicazioni tipiche includono supporti strutturali, condotti di carburante, staffe, ugelli di combustione, componenti di turbine e scambiatori di calore, spesso realizzati in leghe di titanio o superleghe a base di nichel come l'Inconel. La tecnologia Powder Bed Fusion è la più utilizzata in questo contesto poiché consente di ottenere densità e proprietà meccaniche comparabili a quelle dei metodi convenzionali, ma con geometrie più sofisticate e un numero ridotto di parti assemblate.

Un esempio emblematico è rappresentato dal fuel nozzle del motore LEAP di General Electric Aviation, interamente prodotto in AM: grazie alla fusione in un unico pezzo di diciotto componenti tradizionali, si è ottenuta una riduzione del peso del venticinque per cento e una durabilità superiore, con un taglio netto dei costi di manutenzione e delle emissioni complessive. Anche l'Agenzia Spaziale Europea e la NASA impiegano la stampa tridimensionale per la produzione di propulsori, serbatoi criogenici e componenti strutturali dei satelliti, sfruttando la possibilità di produrre in orbita pezzi di ricambio mediante sistemi additivi portatili.

Dal punto di vista ambientale, la manifattura additiva consente di ridurre le scorte e i trasporti, rendendo la logistica aerospaziale più sostenibile. L'implementazione su larga

scala richiede standard di qualifica molto rigorosi e controlli di qualità avanzati, soprattutto per componenti critici soggetti a forti sollecitazioni.

### 1.5.2 Industria Automobilistica

Nel comparto automobilistico, l'Additive Manufacturing ha inizialmente trovato spazio nella prototipazione rapida e nella realizzazione di modelli estetici o funzionali, riducendo drasticamente i tempi di sviluppo di nuovi veicoli. Oggi, grazie al miglioramento delle prestazioni meccaniche dei materiali e alla diffusione delle tecnologie PBF e DED, la stampa tridimensionale è diventata uno strumento produttivo anche per componenti funzionali e parti di piccola serie.

Le case automobilistiche di fascia alta utilizzano l'AM per produrre collettori di aspirazione, staffe strutturali, supporti sospensioni e sistemi di raffreddamento ottimizzati. In questi casi, la tecnologia consente di ottenere geometrie impossibili da realizzare con tecniche tradizionali e di ridurre il peso fino al quaranta per cento, migliorando al contempo la rigidità e la distribuzione dei carichi. La combinazione della stampa tridimensionale con strumenti di topology optimization e generative design permette di rimuovere il materiale non necessario e di creare componenti che rispondono in modo preciso alle sollecitazioni reali, massimizzando l'efficienza meccanica.

Oltre alla produzione diretta di parti, la stampa tridimensionale è ampiamente impiegata nella fabbricazione di attrezzature e utensili personalizzati, come maschere di saldatura, dime o supporti per l'assemblaggio, riducendo tempi e costi nella linea di produzione. Anche nel settore aftermarket, l'AM sta rivoluzionando la gestione dei ricambi, permettendo di produrre on-demand componenti fuori catalogo o personalizzati.

Dal punto di vista ambientale, la manifattura additiva nel settore automotive contribuisce a ridurre gli scarti di produzione, ma il vero beneficio emerge nella fase d'uso, dove la diminuzione del peso del veicolo comporta una minore resistenza aerodinamica e quindi un minor consumo di carburante o di energia elettrica. In prospettiva, l'AM potrebbe giocare un ruolo determinante nella transizione verso la mobilità elettrica, consentendo la realizzazione di strutture leggere e di sistemi di gestione termica più efficienti per le batterie.

### 1.5.3 Settore Biomedico e Dispositivi Medici

Il settore biomedicale è probabilmente quello in cui l'impatto dell'Additive Manufacturing è stato più trasformativo. La possibilità di produrre dispositivi su misura per il singolo paziente rappresenta un cambio di paradigma rispetto alla produzione di massa. La stampa tridimensionale consente di creare protesi personalizzate, impianti ortopedici, placche craniche, dispositivi dentali e guide chirurgiche con geometrie perfettamente adattate alla morfologia del paziente, migliorando la precisione dell'intervento e riducendo i tempi operatori.

Tra i materiali più utilizzati vi sono le leghe di titanio (Ti-6Al-4V ELI) per gli impianti ortopedici e i biopolimeri come il PEEK per dispositivi temporanei o riassorbibili. Le tecnologie di stampa più diffuse sono la Powder Bed Fusion per i metalli e la Material Extrusion o la Vat Photopolymerization per i polimeri biocompatibili. Un vantaggio notevole risiede nella possibilità di creare strutture porose controllate, che favoriscono l'osteointegrazione e migliorano la fissazione dell'impianto, replicando la struttura del tessuto osseo naturale.

La manifattura additiva trova inoltre applicazione nella modellazione anatomica per la pianificazione chirurgica: partendo da dati TAC o MRI, è possibile stampare modelli realistici degli organi o delle ossa del paziente, consentendo al chirurgo di simulare l'intervento in anticipo. Questa pratica riduce i rischi intraoperatori e migliora i risultati clinici.

L'integrazione dell'AM nel settore medico richiede il rispetto di severi standard di sicurezza e tracciabilità. Le normative in materia di biocompatibilità, sterilizzazione e validazione del processo sono fondamentali per garantire la qualità del dispositivo. Anche in ambito sanitario, il tema della sostenibilità del ciclo di vita sta acquisendo crescente importanza: la possibilità di produrre localmente, ridurre gli scarti e personalizzare le forniture contribuisce a un modello di medicina più efficiente ed ecologicamente responsabile.

### 1.5.4 Settori Emergenti

Oltre ai settori già consolidati, l'Additive Manufacturing sta guadagnando terreno in una vasta gamma di applicazioni emergenti che testimoniano la versatilità e la capacità di

adattamento della tecnologia. Nel campo dell'edilizia, la stampa tridimensionale è utilizzata per la produzione di elementi architettonici complessi, stampi per cemento e, più recentemente, per la realizzazione diretta di strutture abitative mediante deposizione di calcestruzzo. Progetti pilota in Europa, Cina e Stati Uniti hanno dimostrato la fattibilità di costruire abitazioni complete in meno di quarantotto ore, con una riduzione significativa dei rifiuti e dei tempi di costruzione.

Nel settore della moda e del design, l'AM consente una libertà creativa senza precedenti: stilisti e designer possono produrre abiti, calzature e accessori personalizzati, sperimentando nuove forme e texture impossibili da ottenere con le tecniche tessili tradizionali. Anche l'industria alimentare sta esplorando l'uso della stampa tridimensionale per creare cibi con forme artistiche, porzioni calibrate o diete personalizzate, aprendo la strada a una nuova dimensione dell'alimentazione digitale.

Un altro ambito in forte crescita è quello della bio-stampa (bioprinting), che combina la manifattura additiva con l'ingegneria dei tessuti. Utilizzando bioinchiostri a base di cellule e materiali biocompatibili, i ricercatori stanno sviluppando tessuti artificiali, modelli organici per la ricerca farmacologica e, in prospettiva, organi trapiantabili. Sebbene ancora in fase sperimentale, la bio-stampa rappresenta una delle frontiere più promettenti della tecnologia additiva.

Tutti questi esempi dimostrano come la stampa tridimensionale non sia più una tecnologia di nicchia, ma un pilastro della manifattura avanzata. La sua capacità di adattarsi a contesti diversi, di ridurre gli sprechi e di favorire la personalizzazione la rende una componente essenziale della transizione verso un'economia più sostenibile, digitale e flessibile.

## **1.6 Implicazioni Ambientali Preliminari**

L'Additive Manufacturing è spesso percepita come una tecnologia più sostenibile rispetto ai processi convenzionali, grazie alla riduzione degli scarti di materiale e alla potenziale produzione distribuita. La realtà è più complessa e richiede una valutazione oggettiva che consideri l'intero ciclo di vita del prodotto: dalla produzione dei materiali (polveri, filamenti, resine), attraverso la fase di stampa (energia, supporti, gas protettivi), il post-processing (trattamenti termici, finitura superficiale) fino al fine vita (riciclo, smaltimento).

Alcuni studi hanno rilevato che, per alcuni materiali e metodi, l'energia richiesta può essere così elevata da ridurre i vantaggi ambientali rispetto a processi tradizionali. Faludi e colleghi (2015) hanno mostrato che il consumo energetico specifico della Powder Bed Fusion può superare significativamente quello della lavorazione meccanica convenzionale, soprattutto quando i parametri di processo non sono ottimizzati. Baumers e colleghi (2011) hanno evidenziato come i tempi di riscaldamento e raffreddamento delle camere di costruzione contribuiscano sostanzialmente al bilancio energetico complessivo.

La produzione delle polveri metalliche rappresenta una fase spesso trascurata ma energeticamente intensiva. I processi di atomizzazione richiedono temperature elevate e gas inerti, con consumi energetici che possono raggiungere valori significativi per chilogrammo di polvere prodotta. Il recupero e il riutilizzo delle polveri non sinterizzate diventano quindi fattori critici per migliorare la sostenibilità complessiva del processo (Peng et al., 2018).

I trattamenti post-processo aggiungono ulteriori impatti ambientali. La rimozione dei supporti, i trattamenti termici di distensione o di Hot Isostatic Pressing, le lavorazioni meccaniche di finitura e i controlli non distruttivi richiedono energia, tempo e materiali ausiliari che devono essere considerati in una valutazione ambientale completa. Liu e colleghi (2016) hanno sottolineato come l'omissione di queste fasi possa portare a sottostimare significativamente l'impatto ambientale della manifattura additiva.

È importante riconoscere che i benefici ambientali dell'AM dipendono fortemente dal contesto applicativo. Quando la riduzione di peso permette risparmi significativi durante la fase d'uso del prodotto, come nel caso di componenti aerospaziali o automobilistici, l'impatto complessivo può essere favorevole nonostante l'elevato consumo energetico in fase di produzione. Al contrario, per componenti statici o produzioni in grande serie, i metodi convenzionali possono risultare più efficienti dal punto di vista ambientale.

Questi elementi rendono necessario adottare una metodologia sistematica e quantitativa per valutare l'impatto ambientale dei processi AM. Il Life Cycle Assessment costituisce lo strumento più idoneo per questa valutazione. Basato sugli standard internazionali ISO 14040 e ISO 14044, l'LCA consente di identificare e quantificare i carichi ambientali associati a ciascuna fase del ciclo di vita di un prodotto, fornendo un quadro completo e comparabile tra alternative tecnologiche differenti.

L'applicazione della metodologia LCA all'Additive Manufacturing presenta complessità specifiche. La disponibilità di dati accurati è spesso limitata, soprattutto per tecnologie recenti o per processi caratterizzati da elevata variabilità. I confini del sistema devono essere definiti con attenzione, includendo non solo la fase di stampa ma anche la produzione delle polveri

metalliche, i trattamenti termici e le lavorazioni di finitura superficiale. La scelta dei metodi di allocazione, la gestione dell'incertezza dei dati e la selezione degli indicatori di impatto appropriati richiedono competenze metodologiche specifiche.

I capitoli successivi di questa tesi approfondiranno la metodologia LCA, esaminando i principi fondamentali, il quadro normativo di riferimento e gli strumenti operativi disponibili. Verranno poi presentati studi di caso concreti relativi a componenti realizzati tramite Additive Manufacturing, con particolare attenzione ai settori medicale e aerospaziale, quantificando gli impatti ambientali lungo l'intero ciclo di vita e confrontandoli con quelli derivanti da tecnologie convenzionali. L'obiettivo è fornire dati quantitativi e interpretazioni basate su evidenze scientifiche, contribuendo alla comprensione della sostenibilità della produzione additiva e suggerendo strategie per ridurre l'impronta ambientale di questi processi.

## **2. METODOLOGIA LIFE CYCLE ASSESSMENT: QUADRO NORMATIVO E STRUMENTI OPERATIVI**

### **2.1 Principi Fondamentali del Life Cycle Assessment**

La Life Cycle Assessment rappresenta oggi uno degli strumenti metodologici più rigorosi per analizzare l'impatto ambientale di prodotti, processi e servizi. Essa nasce come risposta alla necessità di superare approcci parziali, che si concentrano su singole fasi produttive o su specifici tipi di emissioni, per abbracciare una visione d'insieme capace di considerare l'intero ciclo di vita. L'obiettivo della LCA è quantificare in modo sistematico e trasparente le risorse consumate e le emissioni generate dalla produzione delle materie prime, attraverso tutte le fasi di trasformazione, distribuzione, utilizzo e fine vita del prodotto.

Questo approccio permette di evitare il fenomeno noto come *burden shifting*, in cui la riduzione dell'impatto in una fase del ciclo di vita viene compensata da un aumento in un'altra. Un esempio classico è la sostituzione di materiali convenzionali con alternative ritenute più sostenibili, che possono risultare effettivamente vantaggiose nella fase d'uso ma comportare maggiori consumi energetici in fase di produzione o difficoltà di riciclo a fine vita. Solo attraverso un'analisi completa è possibile identificare questi spostamenti di carico e orientare le scelte verso soluzioni realmente più sostenibili.

La LCA si basa su un insieme di principi e requisiti normativi definiti dalle serie ISO 14040 e ISO 14044, pubblicate dall'International Organization for Standardization. Lo standard ISO 14040 stabilisce i principi generali e il quadro di riferimento, mentre lo standard ISO 14044 fornisce i requisiti operativi e le linee guida per ciascuna fase della valutazione. Questi standard sono riconosciuti a livello internazionale e garantiscono la comparabilità, la trasparenza e la riproducibilità degli studi LCA condotti in qualsiasi parte del mondo (ISO, 2006a; ISO, 2006b). L'applicazione della LCA richiede competenze multidisciplinari, che spaziano dall'ingegneria alla chimica ambientale, dalla gestione dei dati alla modellazione matematica. La complessità metodologica è bilanciata dalla capacità di fornire informazioni quantitative e comparabili, utili per il miglioramento continuo dei processi produttivi, per il supporto alle decisioni strategiche aziendali e per la comunicazione ambientale verso consumatori e stakeholder. In particolare, la LCA costituisce la base scientifica per la redazione delle Environmental Product Declarations (EPD), documenti standardizzati che comunicano in modo trasparente le prestazioni ambientali di un prodotto (Finkbeiner et al., 2006).

## 2.2 Struttura Metodologica dell'LCA

Il framework metodologico dell'LCA si articola in quattro fasi distinte e interconnesse, come definito dagli standard ISO 14040 e ISO 14044. Queste fasi sono spesso interdipendenti: i risultati di una fase possono richiedere aggiustamenti nelle altre, rendendo il processo iterativo per sua natura. Nessuna fase può considerarsi conclusa fino al completamento dell'intero studio (ISO, 2006a; Guinée et al., 2002).

### 2.2.1 Definizione dell'Obiettivo e del Campo di Applicazione

La prima fase di un'analisi LCA consiste nella definizione chiara e inequivocabile dell'obiettivo e del campo di applicazione dello studio. Questa fase è fondamentale perché stabilisce le basi su cui poggia l'intera valutazione e determina la qualità e l'attendibilità dei risultati finali.

L'obiettivo dello studio deve specificare il motivo per cui l'LCA viene condotta, a chi sono destinati i risultati e quale uso se ne intende fare. Ad esempio, uno studio LCA può essere finalizzato al confronto tra processi manifatturieri alternativi per identificare la soluzione più sostenibile, oppure può essere condotto per supportare lo sviluppo di un prodotto ecologico o per soddisfare requisiti normativi e di certificazione. La chiarezza dell'obiettivo influenza direttamente il livello di dettaglio richiesto nell'analisi e le metodologie di valutazione da applicare.

Il campo di applicazione definisce il perimetro del sistema studiato, specificando quali processi, flussi di materiali ed energie vengono inclusi o esclusi dall'analisi. La definizione dei confini del sistema rappresenta una delle scelte metodologiche più critiche dell'LCA. I confini possono essere definiti secondo approcci diversi: cradle-to-gate, che considera le fasi dalla produzione delle materie prime fino alla consegna del prodotto finito; cradle-to-grave, che estende l'analisi fino al fine vita del prodotto includendo uso e smaltimento; cradle-to-cradle, che considera anche il riuso o riciclo del materiale.

Un altro elemento centrale è la scelta dell'unità funzionale, che rappresenta la base quantitativa di riferimento per tutti i calcoli. L'unità funzionale deve descrivere la funzione primaria del prodotto o servizio in termini misurabili. Ad esempio, per un



componente meccanico l'unità funzionale potrebbe essere definita come un chilogrammo di materiale stampato con specifiche caratteristiche meccaniche, oppure come un componente funzionale in grado di resistere a determinate sollecitazioni per un certo numero di cicli operativi. La corretta definizione dell'unità funzionale è essenziale per garantire la comparabilità tra alternative diverse (Heijungs et al., 1992; Hauschild et al., 2018).

Devono essere specificate anche le assunzioni e le limitazioni dello studio, includendo considerazioni sulla qualità dei dati, sui criteri di esclusione e sulle scelte di allocazione nei casi di processi multi-prodotto. La trasparenza in questa fase è cruciale per consentire la replicabilità dello studio e per comunicare correttamente le conclusioni ai destinatari dei risultati.

### 2.2.2 Analisi di Inventario del Ciclo di Vita (LCI)

L'analisi di inventario del ciclo di vita costituisce la fase di raccolta e organizzazione dei dati relativi a tutti i flussi di input e output associati al sistema studiato. Questa fase può richiedere tempi considerevoli ed è spesso la più impegnativa dal punto di vista operativo. L'inventario include i consumi di materie prime, di energia elettrica e termica, le emissioni in atmosfera, gli scarichi idrici, la produzione di rifiuti solidi e le emissioni di inquinanti.

I dati di inventario possono essere di due tipi: primari e secondari. I dati primari sono quelli raccolti direttamente dal processo produttivo in esame, attraverso misurazioni sperimentali, monitoraggio degli impianti o interviste con gli operatori. Questi dati offrono una rappresentazione accurata del sistema reale ma richiedono risorse considerevoli per la loro acquisizione. I dati secondari provengono invece da banche dati standardizzate, pubblicazioni scientifiche o da stime basate su processi analoghi. Le principali banche dati LCI, come Ecoinvent, GaBi, ELCD e USLCI, forniscono informazioni dettagliate su migliaia di processi industriali e materiali, facilitando l'analisi anche quando non sono disponibili dati primari (Wernet et al., 2016).

Un aspetto critico dell'analisi di inventario riguarda la gestione dei processi multi-prodotto, ovvero situazioni in cui un singolo processo genera più di un prodotto o sottoprodotto. In questi casi è necessario applicare metodi di allocazione per ripartire gli impatti ambientali tra i vari output. Lo standard ISO 14044 stabilisce una gerarchia di

metodi di allocazione: si raccomanda innanzitutto di evitare l'allocazione suddividendo il processo in sotto-processi più semplici; se ciò non è possibile, si applica un'espansione del sistema per includere i prodotti sostitutivi evitati; come ultima opzione si ricorre ad allocazioni basate su criteri fisici, economici o di massa. La scelta del metodo di allocazione può influenzare significativamente i risultati dell'LCA e deve essere giustificata e documentata in modo trasparente (Ekvall e Finnveden, 2001).

Per facilitare la raccolta sistematica dei dati è spesso utile adottare metodologie consolidate come il Unit Process Life Cycle Inventory (UPLCI), che suddivide il consumo energetico in base ai diversi modi operativi e alle sottounità dell'impianto. Questo approccio, proposto da Kellens et al. (2012), è particolarmente efficace per i processi di manifattura additiva, dove il consumo energetico può variare notevolmente tra le fasi di riscaldamento, stampa, raffreddamento e post-processing.

### 2.2.3 Valutazione degli Impatti del Ciclo di Vita (LCIA)

La fase di valutazione degli impatti del ciclo di vita ha lo scopo di tradurre i dati dell'inventario in indicatori di impatto ambientale comprensibili e comparabili. Questa trasformazione avviene attraverso una serie di passaggi metodologici standardizzati che permettono di quantificare il contributo del sistema studiato a diverse categorie di impatto ambientale.

Il primo passo consiste nella selezione delle categorie di impatto ambientale rilevanti per lo studio. Le categorie più comunemente utilizzate includono il cambiamento climatico, l'acidificazione, l'eutrofizzazione, la tossicità umana, l'ecotossicità acquatica e terrestre, la formazione di ozono fotochimico, il consumo di risorse abiotiche e l'uso del suolo. La scelta delle categorie di impatto deve essere coerente con l'obiettivo dello studio e con le caratteristiche del sistema analizzato. Gli standard ISO richiedono che la selezione sia giustificata e che copra un insieme sufficientemente ampio di problematiche ambientali (ISO, 2006b).

Una volta selezionate le categorie, si procede con la classificazione dei flussi di inventario, assegnando ciascuna sostanza emessa o risorsa consumata alle rispettive categorie di impatto. Ad esempio, le emissioni di CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O vengono classificate nella categoria del cambiamento climatico, mentre le emissioni di SO<sub>2</sub> e NO<sub>2</sub> rientrano nella categoria dell'acidificazione.

Segue la fase di caratterizzazione, in cui i flussi classificati vengono convertiti in unità comuni utilizzando fattori di caratterizzazione scientificamente validati. Questi fattori traducono la quantità di ciascuna sostanza emessa in un potenziale impatto equivalente. Per il cambiamento climatico, ad esempio, il fattore di caratterizzazione più utilizzato è il Global Warming Potential (GWP), che esprime l'effetto di ciascun gas serra in termini di CO<sub>2</sub> equivalente considerando un orizzonte temporale di cento anni. Il metano ha un GWP di circa 28, il che significa che una tonnellata di CH<sub>4</sub> ha un impatto sul riscaldamento globale pari a 28 tonnellate di CO<sub>2</sub>.

Esistono diversi metodi di valutazione degli impatti riconosciuti a livello internazionale, tra cui CML-IA, ReCiPe, TRACI, ILCD e Environmental Footprint. Ciascun metodo adotta modelli di caratterizzazione specifici e può fornire risultati leggermente diversi. La scelta del metodo deve essere basata sulla rilevanza geografica dello studio, sulla disponibilità di dati e sulla chiarezza degli indicatori prodotti. Il metodo ReCiPe, ad esempio, fornisce risultati sia a livello midpoint, con indicatori specifici per categorie come acidificazione ed eutrofizzazione, sia a livello endpoint, che aggregano gli impatti in tre macro-categorie: salute umana, qualità dell'ecosistema e scarsità di risorse (Goedkoop et al., 2009; Hauschild et al., 2013).

Opzionalmente, l'LCIA può includere fasi di normalizzazione, raggruppamento e ponderazione. La normalizzazione esprime i risultati in relazione a un valore di riferimento, come l'impatto medio pro capite di una regione geografica in un anno. Il raggruppamento consiste nel classificare le categorie di impatto secondo criteri di priorità o rilevanza. La ponderazione assegna pesi diversi alle categorie di impatto per riflettere giudizi di valore sulla loro importanza relativa. Questi passaggi opzionali sono utili per semplificare la comunicazione dei risultati ma introducono una componente soggettiva che deve essere esplicitata e giustificata (Finnveden et al., 2009).

## 2.2.4 Interpretazione dei Risultati

La fase di interpretazione rappresenta il momento conclusivo e sintetico dell'LCA, in cui i risultati delle fasi precedenti vengono analizzati criticamente per trarre conclusioni coerenti con gli obiettivi dello studio. L'interpretazione non si limita a riportare i numeri ottenuti ma richiede un'analisi approfondita dei fattori che influenzano i risultati, delle incertezze associate e delle implicazioni pratiche per il decision-making.

Il primo passo dell'interpretazione consiste nell'identificazione delle questioni significative. Questo include l'analisi delle fasi del ciclo di vita che contribuiscono maggiormente agli impatti ambientali, l'individuazione dei processi critici e la comprensione dei fattori che influenzano i risultati. Spesso emerge che una frazione relativamente piccola dei processi è responsabile della maggior parte degli impatti: identificare questi hotspot permette di orientare gli sforzi di miglioramento verso le aree più rilevanti.

La valutazione deve includere tre tipi di controlli: il controllo di completezza, il controllo di coerenza e l'analisi di sensibilità. Il controllo di completezza verifica che tutte le informazioni e i dati necessari per raggiungere le conclusioni dello studio siano stati raccolti e che non manchino elementi significativi. Il controllo di coerenza accerta che le assunzioni, i metodi e i dati siano stati applicati in modo uniforme lungo tutto lo studio, garantendo la comparabilità dei risultati. L'analisi di sensibilità valuta quanto i risultati finali dipendano da specifiche assunzioni, parametri o scelte metodologiche, testando scenari alternativi per quantificare l'incertezza associata alle conclusioni (Heijungs e Huijbregts, 2004).

L'analisi di sensibilità può essere condotta modificando i parametri critici entro un intervallo ragionevole e osservando la variazione dei risultati. Ad esempio, in uno studio LCA sull'additive manufacturing, potrebbe essere utile testare l'influenza del mix energetico utilizzato, del tasso di riutilizzo delle polveri metalliche non fuse o dei parametri di processo come la potenza del laser e la velocità di stampa. Se i risultati cambiano drasticamente in funzione di queste variabili, è necessario raffinare i dati o riconoscere esplicitamente le limitazioni dello studio.

Le conclusioni devono essere formulate in modo chiaro e devono specificare le limitazioni dello studio, evidenziando eventuali incertezze, assunzioni critiche o esclusioni significative. È importante comunicare i risultati in modo trasparente, evitando interpretazioni fuorvianti o generalizzazioni non giustificate. Le raccomandazioni pratiche devono essere basate sui dati ottenuti e devono fornire indicazioni concrete per il miglioramento delle prestazioni ambientali del sistema studiato (Bjørn et al., 2018).

## 2.3 Strumenti Software, Database e Risorse per l'LCA

L'applicazione pratica della metodologia LCA richiede l'uso di strumenti software specializzati e di banche dati di inventario del ciclo di vita. Questi strumenti permettono di gestire la complessità del calcolo, di accedere a informazioni standardizzate su migliaia di processi industriali e di applicare metodi di valutazione degli impatti riconosciuti a livello internazionale.

Tra i software LCA più diffusi a livello globale si distinguono SimaPro, GaBi (ora LCA for Experts), OpenLCA e Umberto. SimaPro, sviluppato da PRé Sustainability, è uno dei software più utilizzati in ambito accademico e di consulenza, apprezzato per la sua interfaccia intuitiva, la vasta gamma di metodi di valutazione degli impatti disponibili e l'integrazione con il database Ecoinvent. SimaPro offre funzionalità avanzate di analisi di sensibilità, di confronto tra scenari e di modellazione di processi complessi. Il software supporta diversi standard di reporting ambientale, inclusi gli Environmental Product Declarations (Goedkoop et al., 2013).

GaBi, prodotto da Sphera Solutions, rappresenta un'altra soluzione leader nel settore industriale, particolarmente diffusa in Europa. GaBi si distingue per la profondità e l'ampiezza del suo database interno, che copre una vasta gamma di settori industriali e processi produttivi. Il software offre strumenti avanzati per l'analisi di scenari, la modellazione parametrica e l'integrazione con sistemi aziendali. GaBi è spesso la scelta preferita per progetti di sviluppo tecnologico e per analisi comparative complesse. Il database GaBi è stato costruito a partire da casi reali di consulenza, il che garantisce una forte applicabilità pratica.

OpenLCA rappresenta un'alternativa open-source sviluppata da GreenDelta, particolarmente apprezzata in ambito accademico e da piccole e medie imprese. OpenLCA è gratuito e offre un alto grado di flessibilità e trasparenza. Il software supporta l'importazione di database esterni come Ecoinvent, ELCD e USLCI, e permette di personalizzare i modelli di impatto. OpenLCA è compatibile con il formato di scambio ILCD, che facilita l'interoperabilità tra piattaforme diverse. La natura open-source consente agli utenti di modificare e adattare il codice sorgente alle proprie esigenze specifiche.

Umberto, sviluppato da IFU Hamburg, è un software che combina analisi di flussi di materiali ed energia con la metodologia LCA. È particolarmente indicato per applicazioni industriali che richiedono un'analisi integrata di aspetti tecnici, economici e ambientali. Umberto offre strumenti di visualizzazione avanzati che facilitano la comunicazione dei risultati agli stakeholder non tecnici.

I database di inventario del ciclo di vita costituiscono la fonte principale di dati secondari per gli studi LCA. Ecoinvent è il database LCI più diffuso e completo a livello mondiale, sviluppato dal Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Copre migliaia di processi industriali, dalla produzione di energia alla lavorazione di materiali, dalla produzione agricola ai trasporti. Ecoinvent fornisce tre versioni alternative del database, basate su diversi approcci di allocazione: cut-off, che esclude il contenuto riciclato a monte, APOS (allocation at the point of substitution), che alloca gli impatti ambientali al punto di sostituzione dei materiali riciclati, e consequential, che adotta un approccio basato sull'economia di mercato (Wernet et al., 2016). Altri database rilevanti includono GaBi database, che integra dati specifici per il mercato europeo e nordamericano, ELCD (European Life Cycle Database), sviluppato dalla Commissione Europea, e USLCI (United States Life Cycle Inventory), focalizzato sul contesto statunitense. Alcuni settori specifici hanno sviluppato database dedicati, come il database australiano AusLCI per l'industria mineraria o il database thailandese TH LCI per l'edilizia. La scelta del software e del database dipende da diversi fattori: la natura e la complessità del progetto, la disponibilità di risorse economiche, le competenze del team di lavoro, la necessità di rispettare specifici standard normativi e la copertura geografica richiesta. Studi comparativi hanno dimostrato che l'uso di database e software diversi può generare risultati leggermente differenti, anche quando si analizza lo stesso sistema con gli stessi metodi di valutazione. Questa variabilità sottolinea l'importanza della trasparenza metodologica e della documentazione accurata delle scelte effettuate (Lesage e Samson, 2016).

## **2.4 Criticità Metodologiche, Limiti e Incertezze**

L'applicazione della metodologia LCA, sebbene consolidata e standardizzata, presenta diverse criticità metodologiche che devono essere riconosciute e gestite per garantire la validità e l'affidabilità dei risultati. Queste criticità riguardano la disponibilità e qualità dei dati, le scelte metodologiche soggettive, l'incertezza dei risultati e le difficoltà nell'applicazione a processi innovativi come l'Additive Manufacturing.

La disponibilità e qualità dei dati rappresentano uno dei principali ostacoli nella conduzione di studi LCA robusti. I dati primari, raccolti direttamente dai processi produttivi, offrono la massima accuratezza ma richiedono risorse significative in termini di tempo, costi e accesso agli impianti. I dati secondari, provenienti da banche dati standardizzate, sono più facilmente

accessibili ma possono non rappresentare fedelmente le specificità del sistema studiato. In particolare, per processi produttivi recenti o innovativi, i dati disponibili nei database generici possono essere obsoleti, riferiti a tecnologie diverse o basati su assunzioni non applicabili al contesto specifico dello studio.

Nel contesto dell'Additive Manufacturing, la carenza di dati primari è particolarmente evidente. Molti processi AM sono ancora in fase di sviluppo e i parametri operativi variano notevolmente tra macchine, materiali e applicazioni. I consumi energetici specifici dipendono dalla geometria del pezzo, dall'orientamento di stampa, dai parametri del laser o dell'estrusore, dalla presenza e dimensione dei supporti, dai tempi di riscaldamento e raffreddamento. Questa variabilità rende difficile l'uso di valori medi e richiede un'attenta caratterizzazione del processo specifico (Kokare et al., 2023).

Un'altra criticità riguarda la definizione dei confini del sistema e le scelte di allocazione. La decisione su quali processi includere o escludere dall'analisi può influenzare significativamente i risultati. Ad esempio, l'esclusione della fase di produzione delle polveri metalliche in uno studio LCA sull'AM può portare a una sottostima considerevole dell'impatto ambientale complessivo. Le regole di allocazione applicate nei processi multi-prodotto introducono una componente di soggettività che, sebbene regolamentata dagli standard ISO, lascia margini di scelta agli analisti. L'adozione di criteri di allocazione diversi, basati su massa, valore economico o funzione, può generare risultati non direttamente confrontabili tra studi diversi (Ekvall e Finnveden, 2001).

L'incertezza è una componente intrinseca di ogni studio LCA e deriva da diverse fonti: variabilità nei dati di input, semplificazioni del modello, assunzioni metodologiche, scelta dei fattori di caratterizzazione. L'incertezza può essere di tipo aleatorio, legato alla variabilità naturale dei processi, o epistemico, derivante dalla mancanza di conoscenza o dalla scelta di parametri incerti. Gli strumenti di analisi dell'incertezza, come la simulazione Monte Carlo o l'analisi di sensibilità, permettono di quantificare l'intervallo di confidenza dei risultati e di identificare i parametri che influenzano maggiormente le conclusioni dello studio (Heijungs e Huijbregts, 2004).

Nell'ambito dell'AM, l'incertezza è amplificata dalla natura dinamica e multiscala dei processi. Le variabili di processo interagiscono in modo complesso, influenzando non solo i consumi energetici ma anche la qualità del pezzo finito, la necessità di rilavorazioni e il tasso di scarto. Studi recenti hanno proposto l'uso di tecniche avanzate di machine learning, come la regressione basata su Gaussian Process, per modellare l'incertezza in tempo reale e migliorare l'adattabilità delle valutazioni LCA ai dati operativi (Wang et al., 2021).

Le scelte metodologiche relative alla selezione dei metodi di valutazione degli impatti introducono ulteriori elementi di variabilità. Metodi diversi possono adottare modelli di caratterizzazione differenti per le stesse categorie di impatto, portando a risultati non direttamente confrontabili. Ad esempio, il metodo CML-IA esprime l'acidificazione in termini di SO<sub>2</sub> equivalente, mentre il metodo ReCiPe utilizza un approccio basato su deposizioni cumulative. La scelta del metodo deve essere giustificata in base alla rilevanza geografica, alla disponibilità di dati e agli obiettivi dello studio.

Un limite metodologico specifico per l'LCA applicata all'AM riguarda la difficoltà di includere in modo completo le fasi post-processo. Molti componenti prodotti mediante AM richiedono trattamenti termici di distensione, Hot Isostatic Pressing (HIP), lavorazioni meccaniche di finitura, controlli non distruttivi e operazioni di pulizia. L'omissione o la sottostima di queste fasi può portare a conclusioni errate sul bilancio ambientale complessivo della tecnologia additiva rispetto ai metodi convenzionali (Liu et al., 2016).

Esistono inoltre barriere organizzative e di supporto che ostacolano l'adozione diffusa dell'LCA nell'ambito dell'AM. Tra queste, la mancanza di linee guida specifiche per la conduzione di LCA su processi additivi, la scarsa integrazione tra i sistemi informatici di gestione della produzione e gli strumenti LCA, la carenza di formazione specialistica e la limitata disponibilità di risorse economiche per condurre studi approfonditi. Studi recenti hanno identificato ventisette barriere principali alla diffusione dell'LCA nell'AM, classificate in cinque categorie: barriere di supporto, barriere legate ai dati, barriere di risorse, barriere metodologiche e barriere di complessità. Le strategie per superare queste barriere includono lo sviluppo di standard specifici per l'AM, la creazione di database settoriali, la formazione di figure professionali specializzate e l'adozione di framework integrati che combinino LCA con strumenti di ottimizzazione e decision-making (Desai et al., 2024).

La gestione di queste criticità richiede trasparenza metodologica, documentazione accurata delle scelte effettuate, uso appropriato di analisi di sensibilità e incertezza, e consapevolezza dei limiti dei risultati ottenuti. Solo attraverso un approccio critico e rigoroso è possibile garantire che le conclusioni degli studi LCA siano affidabili e utilizzabili per supportare decisioni strategiche informate.



## 2.5 Considerazioni Conclusive

La metodologia Life Cycle Assessment rappresenta uno strumento essenziale per la valutazione quantitativa e sistematica degli impatti ambientali di prodotti, processi e servizi. La sua applicazione, regolamentata dagli standard internazionali ISO 14040 e ISO 14044, garantisce rigore metodologico, trasparenza e confrontabilità dei risultati. Il framework dell'LCA, articolato in quattro fasi interconnesse, definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione, analisi di inventario, valutazione degli impatti e interpretazione dei risultati, fornisce un percorso strutturato per identificare le fasi critiche del ciclo di vita e per orientare le decisioni verso soluzioni più sostenibili.

L'applicazione dell'LCA all'Additive Manufacturing presenta opportunità e sfide specifiche. La complessità dei processi additivi, caratterizzati da variabilità elevata, consumi energetici dipendenti da numerosi parametri e necessità di trattamenti post-processo, richiede un'attenzione particolare nella raccolta dei dati e nella definizione dei confini del sistema. La carenza di dati primari consolidati e la rapida evoluzione tecnologica del settore rendono necessario un approccio prudente nell'interpretazione dei risultati e nell'estensione delle conclusioni a contesti diversi da quelli specificamente studiati.

Gli strumenti software e i database disponibili facilitano l'implementazione pratica della metodologia, ma la scelta dello strumento, del metodo di valutazione degli impatti e delle fonti di dati deve essere coerente con gli obiettivi dello studio e giustificata in modo trasparente. Le criticità metodologiche, legate alla disponibilità e qualità dei dati, alle scelte di allocazione, all'incertezza dei risultati e ai limiti dei modelli, devono essere riconosciute e gestite attraverso analisi di sensibilità, controlli di qualità e documentazione accurata.

L'LCA non fornisce risposte definitive o soluzioni univoche, ma offre un quadro informativo basato su evidenze scientifiche che supporta il decision-making strategico. I risultati di uno studio LCA devono essere interpretati alla luce delle assunzioni fatte, dei limiti metodologici e del contesto specifico di applicazione. Solo un approccio critico, trasparente e consapevole dei propri limiti può garantire che le valutazioni LCA siano uno strumento efficace per orientare l'innovazione tecnologica e le scelte industriali verso percorsi di sostenibilità ambientale reale. Il capitolo successivo approfondirà l'applicazione specifica della metodologia LCA ai processi di Additive Manufacturing, esaminando lo stato dell'arte della ricerca scientifica, i fattori critici che influenzano l'impatto ambientale delle tecnologie additive, le strategie proposte per migliorare la sostenibilità e le prospettive future di sviluppo metodologico.

### **3. APPLICAZIONE DELL'LCA ALL'ADDITIVE MANUFACTURING: STATO DELL'ARTE**

#### **3.1 Quadro Generale e Contesto di Ricerca**

La crescente diffusione delle tecnologie di Additive Manufacturing nei settori industriali ad alta intensità tecnologica ha generato un interesse parallelo per la valutazione della loro sostenibilità ambientale. Se da un lato l'AM promette riduzioni degli scarti materiali, flessibilità produttiva e possibilità di realizzare geometrie complesse non ottenibili con metodi tradizionali, dall'altro emergono interrogativi sul reale bilancio ambientale di questi processi. Il consumo energetico elevato durante la stampa, la produzione delle polveri metalliche, i trattamenti termici post-processo e le fasi di finitura superficiale possono infatti generare impatti significativi che rischiano di compensare, o persino superare, i benefici teorici della manifattura additiva.

La metodologia Life Cycle Assessment rappresenta lo strumento più efficace per quantificare questi impatti in modo rigoroso e comparabile. Negli ultimi due decenni, numerosi gruppi di ricerca hanno applicato l'LCA ai processi additivi, con l'obiettivo di confrontare le prestazioni ambientali dell'AM rispetto alle tecnologie convenzionali e di identificare i fattori critici che influenzano il bilancio complessivo. La letteratura scientifica evidenzia un panorama complesso e articolato, in cui i risultati dipendono fortemente da variabili quali il tipo di tecnologia impiegata, il materiale utilizzato, la complessità geometrica del componente, i volumi di produzione e il mix energetico del contesto produttivo (Kokare et al., 2023).

Una revisione sistematica condotta da Kokare et al. (2023) ha analizzato 77 studi focalizzati sull'LCA di processi AM, evidenziando cinque principali lacune della ricerca esistente. Prima lacuna: alcune tecnologie AM sono ancora poco studiate, con una predominanza di analisi su Powder Bed Fusion e Material Extrusion, mentre processi come Binder Jetting e Sheet Lamination ricevono attenzione limitata. Seconda lacuna: molti studi si concentrano esclusivamente sulla dimensione ambientale della sostenibilità, trascurando gli aspetti economici e sociali. Terza lacuna: la qualità del prodotto finale e le sue proprietà meccaniche vengono raramente integrate nelle valutazioni di sostenibilità. Quarta lacuna: le fasi del ciclo di vita successive alla produzione, come l'uso e il fine vita, sono spesso escluse dall'analisi. Quinta

lacuna: l'effetto delle variabili di progetto sulla sostenibilità dei processi AM non è stato esplorato in modo estensivo.

Gli studi comparativi tra AM e manifattura convenzionale mostrano risultati contrastanti. In 19 articoli su 77 analizzati, la produzione additiva è risultata più sostenibile rispetto ai processi tradizionali. Tra questi, 9 studi si concentravano su Powder Bed Fusion. Serres et al. (2021) hanno confrontato il processo CLAD con la fresatura CNC per la produzione di un componente in Ti-6Al-4V, concludendo che il CLAD risulta più ecologico grazie alla minore perdita di materiale, che compensa il consumo energetico superiore. Huang et al. (2015) hanno dimostrato che le riduzioni di materiale, energia e emissioni di gas serra ottenibili con tecnologie come EBM, SLM e DMLS nella produzione di componenti aeronautici derivano principalmente dall'alleggerimento dei componenti finali, che riduce i consumi durante la fase d'uso.

Un elemento critico emerso dalla letteratura riguarda la necessità di estendere i confini dell'analisi LCA. Molti studi si limitano a una valutazione cradle-to-gate, concentrandosi sulla produzione del componente senza considerare le fasi d'uso e di fine vita. Eppure, proprio in queste fasi possono manifestarsi i vantaggi più significativi dell'AM, specialmente nei settori aerospaziale e automobilistico, dove la riduzione di peso dei componenti si traduce in risparmi di carburante lungo tutto il ciclo di vita operativo. Fruggiero et al. (2019) hanno sottolineato che una valutazione completa cradle-to-grave è essenziale per catturare i benefici netti della produzione additiva.

La disponibilità e la qualità dei dati rappresentano un altro ostacolo rilevante. I database LCA consolidati, come Ecoinvent e GaBi, contengono informazioni limitate sui processi AM, spesso basate su assunzioni generalizzate o su dati sperimentali non rappresentativi della produzione industriale. La variabilità intrinseca dei processi additivi, dovuta a differenze nei parametri di stampa, nelle macchine utilizzate e nei materiali impiegati, rende difficile standardizzare i dati e garantire la confrontabilità degli studi. Nagarajan e Haapala (2018) hanno evidenziato la necessità di sviluppare dataset specifici per l'AM, basati su misurazioni dirette in contesti industriali reali.

Il contesto di ricerca attuale si caratterizza quindi per una crescente consapevolezza della complessità dell'AM dal punto di vista della sostenibilità. La transizione da un approccio principalmente focalizzato sulla validazione tecnica del processo a una valutazione ambientale sistematica richiede la definizione di metodologie standardizzate, lo sviluppo di database affidabili e l'integrazione di prospettive economiche e sociali nell'analisi. I prossimi paragrafi di questo capitolo approfondiscono i principi di applicazione dell'LCA ai processi additivi, i

risultati dei confronti con le tecnologie convenzionali, i fattori critici dell'impatto ambientale e le strategie di miglioramento proposte in letteratura.

### **3.2 Principi di Applicazione dell'LCA ai Processi Additivi**

L'applicazione della metodologia LCA ai processi di Additive Manufacturing richiede attenzione particolare nella definizione dei confini del sistema, nella raccolta dei dati di inventario e nella scelta degli indicatori di impatto. La natura stratificata dei processi additivi, caratterizzati da fasi preparatorie, di stampa e di post-processing, impone una comprensione dettagliata di ciascun contributo al bilancio ambientale complessivo.

La definizione del goal and scope rappresenta il primo passaggio critico. Per l'AM, occorre specificare quale unità funzionale si intende analizzare. La scelta più comune è rappresentata dalla produzione di un singolo componente finito, ma alcune analisi adottano unità alternative come il volume di materiale processato o la massa del componente. La scelta influenza significativamente i risultati: quando l'unità funzionale è basata sul componente finito, le fasi di post-processing e di scarto vengono allocate interamente al prodotto finale. Al contrario, se l'unità è basata sul volume processato, il recupero e il riutilizzo delle polveri non fuse diventano elementi centrali dell'analisi.

I confini del sistema devono essere definiti con precisione. Un approccio cradle-to-gate include le fasi dalla produzione delle materie prime fino alla realizzazione del componente finito, escludendo l'uso e il fine vita. Un approccio cradle-to-grave estende l'analisi all'intero ciclo di vita, includendo la fase d'uso e lo smaltimento o il riciclo del componente. Per i componenti aerospaziali o automobilistici, in cui la riduzione di peso ha impatti diretti sul consumo di carburante durante l'uso, un'analisi cradle-to-grave può ribaltare completamente le conclusioni rispetto a un'analisi cradle-to-gate. Paris et al. (2016) hanno dimostrato che l'inclusione della fase d'uso per componenti aeronautici in titanio può portare a riduzioni delle emissioni complessive fino al 40%, nonostante un impatto maggiore in fase produttiva.

La raccolta dei dati di inventario costituisce la fase più laboriosa e soggetta a incertezze. Per i processi AM, i dati devono coprire almeno le seguenti voci: produzione della polvere metallica o del filamento polimerico, energia elettrica consumata durante la stampa, materiali ausiliari come gas inerti o supporti, energia per i trattamenti termici e per le lavorazioni di finitura, scarti di materiale non recuperabile e consumi di acqua per operazioni di raffreddamento o lavaggio.

La produzione delle polveri metalliche, in particolare, rappresenta un contributo significativo. La tecnica più diffusa è l'atomizzazione mediante gas, che richiede elevate quantità di energia per fondere il metallo e nebulizzarlo in particelle sferiche di dimensioni controllate. Faludi et al. (2015) hanno stimato che la produzione di polveri di titanio può rappresentare fino al 60% dell'energia totale incorporata nel componente finale.

L'energia consumata durante la stampa è una delle voci principali dell'inventario. Tuttavia, misurare questo consumo in modo accurato presenta difficoltà. Le macchine AM consumano energia non solo per il processo di fusione o solidificazione del materiale, ma anche per sistemi ausiliari quali laser, fasci di elettroni, riscaldatori di camera, sistemi di raffreddamento, pompe a vuoto, sistemi di movimentazione delle polveri e unità di controllo. Baumers et al. (2011) hanno sviluppato un modello di stima del consumo energetico basato sulla potenza nominale della macchina e sul tempo di costruzione. Studi successivi hanno raffinato questo approccio introducendo misure dirette tramite power meter in contesti industriali. Ochs et al. (2021) hanno proposto un modello generale per valutare l'intensità energetica delle catene di processo PBF, includendo pre-processing, main process e post-processing.

I trattamenti termici post-stampa rappresentano un'altra voce rilevante. Componenti metallici realizzati mediante PBF richiedono spesso stress relief, sinterizzazione o Hot Isostatic Pressing per migliorare la densità e le proprietà meccaniche. Questi processi avvengono in forni che operano a temperature elevate per diverse ore. Ahmad e Enemuoh (2020) hanno calcolato che per componenti in acciaio inossidabile 316L il trattamento termico può contribuire fino al 20% del consumo energetico totale del processo AM.

La gestione delle polveri non fuse costituisce un aspetto peculiare dell'LCA applicata all'AM. Tecnologie come Powder Bed Fusion consentono di recuperare e riutilizzare oltre il 90% della polvere non fusa. Questo riutilizzo riduce drasticamente il consumo di materia prima e l'impatto ambientale associato alla produzione di nuove polveri. Liao e Cooper (2018) hanno sottolineato che il tasso di riutilizzo delle polveri è uno dei parametri più influenti nel bilancio ambientale complessivo. Le polveri possono essere riutilizzate per numerosi cicli produttivi, ma la loro qualità tende a degradarsi a causa di contaminazioni, ossidazione e cambiamenti morfologici. L'introduzione di polvere vergine per compensare la degradazione deve essere contabilizzata nell'inventario.

La scelta degli indicatori di impatto ambientale dipende dagli obiettivi dello studio. Gli indicatori più comuni includono il Global Warming Potential, espresso in kg di CO<sub>2</sub> equivalente, il Cumulative Energy Demand, misurato in MJ, l'Acidification Potential, l'Eutrophication Potential e l'Abiotic Depletion Potential. Alcuni studi adottano metodi di

valutazione degli impatti più completi, come ReCiPe o CML, che aggregano i diversi indicatori in punteggi normalizzati e pesati. La scelta del metodo influenza i risultati e la loro interpretabilità. Liu et al. (2024) hanno condotto un'analisi comparativa tra metodi LCIA applicati a processi PBF, concludendo che il GWP è l'indicatore più robusto e comunemente utilizzato, mentre indicatori come l'ecotossicità e l'impatto sulla salute umana presentano maggiore incertezza.

Un'altra considerazione riguarda l'allocazione degli impatti quando più componenti vengono prodotti simultaneamente nella stessa camera di costruzione. In un job di stampa multi-parte, l'energia consumata dai sistemi ausiliari deve essere ripartita tra i diversi componenti. Le strategie di allocazione più comuni sono basate sulla massa, sul volume o sulla superficie proiettata dei componenti. La scelta influenza i risultati, specialmente quando componenti di dimensioni molto diverse condividono lo stesso ciclo di stampa.

Infine, l'analisi di sensibilità è fondamentale per valutare la robustezza dei risultati rispetto alle incertezze nei dati di input. Parametri come il mix energetico del contesto produttivo, il tasso di riutilizzo delle polveri, il fattore di utilizzo della macchina e il numero di cicli di riutilizzo delle polveri possono variare significativamente tra scenari diversi. Un'analisi di sensibilità ben condotta identifica quali parametri hanno l'influenza maggiore sui risultati e fornisce indicazioni su dove concentrare gli sforzi di miglioramento.

### **3.3 Confronto tra Produzione Additiva e Processi Manifatturieri Convenzionali**

Il confronto tra Additive Manufacturing e processi manifatturieri convenzionali rappresenta uno degli aspetti più studiati nella letteratura LCA. I risultati dipendono da numerosi fattori, tra cui il materiale impiegato, la complessità geometrica del componente, il volume di produzione e l'efficienza dei sistemi produttivi. La maggior parte degli studi si concentra sul confronto tra AM e lavorazioni sottrattive come fresatura e tornitura CNC, che costituiscono il riferimento tradizionale per componenti metallici di precisione.

Un risultato ricorrente evidenzia che il vantaggio ambientale dell'AM cresce all'aumentare del rapporto buy-to-fly, ossia del rapporto tra la massa del blocco iniziale di materiale e la massa del componente finito. Per componenti con geometrie complesse, in cui i processi sottrattivi devono rimuovere grandi quantità di materiale, l'AM può risultare significativamente più efficiente. Morrow et al. (2007) hanno dimostrato che quando il rapporto solido-cavità è

superiore a 1:7, i processi DED consumano più energia della fresatura CNC, ma quando tale rapporto scende a 1:3, il DED diventa più efficiente. Huang et al. (2015) hanno trovato risultati simili per componenti aeronautici in titanio prodotti mediante EBM, con riduzioni dell'impatto ambientale dal 5% al 51% rispetto alla fresatura CNC per rapporti buy-to-fly superiori a 7.

La riduzione degli scarti di materiale è uno dei vantaggi più evidenti dell'AM. Nei processi sottrattivi, il materiale rimosso diventa scarto, che può essere parzialmente riciclato ma richiede processi energeticamente intensivi per essere rifiuto e riutilizzato. Nell'AM, invece, il materiale non utilizzato durante la stampa può essere recuperato direttamente e riutilizzato nei cicli successivi con perdite minime. Fruggiero et al. (2019) hanno calcolato che per componenti in acciaio inossidabile la produzione mediante DMLS genera fino all'80% in meno di scarti rispetto alla lavorazione CNC tradizionale. Questo vantaggio diventa ancora più rilevante per materiali costosi come titanio e superleghe a base di nichel.

Il consumo energetico rappresenta un fattore più complesso e dipendente dal contesto. Le tecnologie AM, specialmente quelle basate su laser o fasci di elettroni, richiedono potenze elevate durante la stampa. Inoltre, i tempi di costruzione possono essere lunghi, soprattutto per componenti di grandi dimensioni. Ahmad e Enemuoh (2020) hanno confrontato DMLS, EBM e fresatura CNC per la produzione di componenti in acciaio inossidabile 316L. Lo studio ha concluso che il DMLS ibrido consuma l'84% in più di energia rispetto agli altri due processi durante la fase di produzione, ma l'impatto della lavorazione CNC risulta dominante durante la fase di produzione della materia prima, consumando il 70% in più di energia.

Il mix energetico utilizzato per alimentare i processi produttivi gioca un ruolo cruciale. La stessa macchina AM può avere impatti ambientali molto diversi a seconda che l'energia provenga da fonti fossili o rinnovabili. Studi condotti in contesti geografici diversi evidenziano questa variabilità. Nagarajan e Haapala (2018) hanno dimostrato che l'adozione di energia rinnovabile riduce il GWP dei processi PBF fino al 40%, rendendo l'AM competitivo anche per applicazioni a basso rapporto buy-to-fly.

Un altro aspetto rilevante riguarda i trattamenti termici e le lavorazioni di finitura. Componenti prodotti mediante AM richiedono spesso stress relief termico per ridurre le tensioni residue e lavorazioni meccaniche per migliorare la finitura superficiale. Questi passaggi aggiuntivi aumentano il consumo energetico complessivo e devono essere confrontati con i trattamenti analoghi richiesti dai processi convenzionali. Faludi et al. (2015) hanno evidenziato che per alcuni componenti in titanio i trattamenti post-processo possono rappresentare fino al 30% dell'energia totale consumata nel ciclo di vita cradle-to-gate.

La produzione di polveri metalliche rappresenta una voce di impatto significativa. Le polveri di alta qualità utilizzate nei processi PBF richiedono atomizzazione mediante gas inerte, con consumi energetici elevati. Per contro, i processi convenzionali utilizzano materiali in forma di barre, billette o lamiere che hanno minori requisiti di produzione. Liao e Cooper (2018) hanno stimato che la produzione di polveri di titanio consuma circa il doppio dell'energia necessaria per produrre barre di titanio equivalenti. Questo divario può essere parzialmente compensato dal riutilizzo delle polveri non fuse, che riduce la necessità di produrre nuove polveri.

I volumi di produzione influenzano significativamente la competitività ambientale dell'AM. Per produzioni di massa, i processi convenzionali beneficiano di economie di scala e di ammortamento dei costi energetici su grandi volumi. Per contro, l'AM è particolarmente competitivo per piccole serie, componenti personalizzati o prototipi, dove i costi di setup dei processi tradizionali sarebbero proibitivi. Uno studio comparativo condotto da Rizk et al. (2025) ha analizzato la produzione di componenti in Ti-6Al-4V mediante PBF e CNC, concludendo che per lotti inferiori a 50 pezzi l'AM risulta più sostenibile, mentre per volumi superiori il CNC diventa preferibile.

Un caso particolare riguarda l'hybrid additive manufacturing, che combina fasi di deposizione additiva e lavorazioni sottrattive nella stessa macchina. Questa tecnologia cerca di unire i vantaggi dell'AM con la precisione e la finitura superficiale delle lavorazioni meccaniche. Yang et al. (2023) hanno condotto un'analisi LCA su pale di turbina prodotte mediante HAM e CNC tradizionale, concludendo che l'HAM può ridurre l'impatto ambientale complessivo fino al 53%, con riduzioni del GWP pari al 68% rispetto al CNC. Questi risultati sono attribuiti principalmente alla riduzione degli scarti di materiale e al minor consumo energetico per la produzione delle materie prime.

In sintesi, il confronto tra AM e processi convenzionali non ammette conclusioni univoche. La sostenibilità relativa dei due approcci dipende da numerose variabili tecniche, economiche e contestuali. L'AM risulta generalmente più vantaggioso per componenti complessi, con geometrie ottimizzate, in materiali costosi come titanio e superleghe, prodotti in piccole serie o personalizzati. I processi convenzionali mantengono invece un vantaggio per produzioni di massa, componenti semplici e applicazioni in cui la finitura superficiale e le tolleranze dimensionali sono critiche.



### 3.4 Fattori Critici dell'Impatto Ambientale

L'impatto ambientale dei processi di Additive Manufacturing è determinato da un insieme di fattori interconnessi che agiscono su scale temporali e spaziali diverse. L'identificazione di questi fattori critici consente di orientare gli sforzi di ottimizzazione verso le aree più rilevanti e di formulare strategie di miglioramento efficaci.

Il primo fattore critico è rappresentato dal consumo energetico diretto durante la stampa. La potenza assorbita dalle macchine AM varia notevolmente in funzione della tecnologia utilizzata. Le macchine Powder Bed Fusion a base laser possono consumare tra 3 e 10 kW durante la stampa, a seconda della potenza del laser, del numero di laser installati e delle dimensioni della camera di costruzione. Le macchine EBM, che utilizzano fasci di elettroni, operano sotto vuoto e richiedono potenze comparabili, ma con tempi di costruzione generalmente inferiori. Le tecnologie polimeriche come FDM consumano potenze minori, tipicamente tra 0,5 e 2 kW, ma presentano tempi di stampa più lunghi. Baumers et al. (2011) hanno proposto un modello di stima del consumo energetico basato sulla formula:  $E = P_{base} \times t_{build} + P_{laser} \times t_{laser}$ , dove  $P_{base}$  rappresenta la potenza dei sistemi ausiliari e  $P_{laser}$  la potenza del laser.

Il secondo fattore riguarda la produzione delle materie prime. Per i metalli, la produzione delle polveri mediante atomizzazione con gas inerte è un processo energeticamente intensivo. Liao e Cooper (2018) hanno stimato che l'energia incorporata nelle polveri di titanio può rappresentare fino al 60% dell'energia totale del ciclo di vita cradle-to-gate di un componente AM. Le polveri di alluminio e acciaio inossidabile presentano energie incorporate inferiori, ma comunque significative. Per i polimeri, la situazione è diversa: i filamenti per FDM hanno energie incorporate generalmente inferiori rispetto alle polveri metalliche, ma l'impatto ambientale dipende dalla fonte delle materie prime. L'uso di biopolimeri o materiali riciclati può ridurre drasticamente l'impatto di questa fase.

Il terzo fattore critico è il tasso di riutilizzo delle polveri. Nei processi PBF, la polvere non fusa può essere recuperata e riutilizzata per cicli successivi. Il tasso di riutilizzo varia tipicamente tra l'85% e il 95%, a seconda del materiale e dei requisiti di qualità. Una polvere riutilizzata per più cicli tende a subire degradazione morfologica, ossidazione e contaminazione, che possono compromettere la qualità del prodotto finale. Per compensare questa degradazione, è necessario introdurre polvere vergine fresca, tipicamente tra il 5% e il 30% del volume totale. Il tasso di refresh influenza direttamente il consumo di materia prima e l'energia incorporata nel processo.

Studi recenti hanno dimostrato che ottimizzare il riutilizzo delle polveri rappresenta una delle strategie più efficaci per ridurre l'impatto ambientale dell'AM (Reuse powder impacts, 2025).

Il quarto fattore riguarda i trattamenti termici post-processo. Componenti metallici prodotti mediante PBF richiedono spesso stress relief, sinterizzazione o Hot Isostatic Pressing per migliorare le proprietà meccaniche e ridurre le tensioni residue. Questi trattamenti avvengono in forni ad alta temperatura e possono richiedere diverse ore. Ahmad e Enemuoh (2020) hanno calcolato che per componenti in acciaio inossidabile 316L i trattamenti termici possono contribuire fino al 20% del consumo energetico totale. Per componenti in titanio, dove l'HIP è spesso necessario per chiudere la porosità interna e garantire proprietà a fatica elevate, il contributo può raggiungere il 30%.

Il quinto fattore critico è rappresentato dalle lavorazioni di finitura superficiale. La rugosità superficiale dei componenti prodotti mediante AM è generalmente superiore rispetto a quella ottenibile con lavorazioni meccaniche tradizionali. Per applicazioni che richiedono tolleranze strette o superfici funzionali, sono necessarie operazioni di fresatura, levigatura o elettroerosione. Queste lavorazioni consumano energia, generano scarti di materiale e aumentano il tempo complessivo di produzione. La riduzione della necessità di finitura superficiale, attraverso l'ottimizzazione dei parametri di stampa o l'adozione di tecnologie ad alta risoluzione, rappresenta un obiettivo prioritario per migliorare la sostenibilità dell'AM.

Il sesto fattore riguarda la generazione e la rimozione delle strutture di supporto. Molte tecnologie AM richiedono supporti per stabilizzare le geometrie sovra-sospese durante la costruzione e per dissipare il calore. I supporti vengono successivamente rimossi, generando scarti di materiale. In alcune tecnologie come FDM, i supporti sono realizzati con materiali diversi dal componente principale e non possono essere riutilizzati. Nei processi PBF, i supporti sono dello stesso materiale del componente e possono teoricamente essere riciclati, ma la loro rimozione richiede operazioni manuali o semi-automatiche che consumano tempo e energia. L'ottimizzazione dell'orientamento di stampa e la progettazione di geometrie self-supporting possono ridurre drasticamente la quantità di supporti necessari.

Il settimo fattore critico è il mix energetico del contesto produttivo. L'impatto ambientale dell'energia elettrica consumata dipende dalla sua provenienza. Un processo AM alimentato da energia rinnovabile ha un impatto sul GWP significativamente inferiore rispetto allo stesso processo alimentato da energia da fonti fossili. Nagarajan e Haapala (2018) hanno dimostrato che l'adozione di energia rinnovabile può ridurre il GWP dei processi PBF fino al 40%. Questa variabile è particolarmente importante per valutazioni comparative tra diversi contesti geografici o scenari produttivi.

L'ottavo fattore riguarda la progettazione del componente. La complessità geometrica, il volume del componente e l'orientamento di stampa influenzano direttamente il consumo di materiale, energia e tempo di costruzione. La progettazione ottimizzata per l'AM, che sfrutta le possibilità offerte dalla tecnologia per realizzare geometrie alleggerite mediante topology optimization, può ridurre il peso del componente e di conseguenza l'impatto ambientale durante le fasi d'uso. Paris et al. (2016) hanno dimostrato che la riduzione di peso ottenuta mediante topology optimization in componenti aeronautici può comportare risparmi di carburante durante la fase d'uso che compensano largamente l'impatto maggiore della fase produttiva.

Il nono fattore critico è il fattore di utilizzo della macchina. Una macchina AM utilizzata in modo continuo e con camera di costruzione piena distribuisce i costi energetici fissi su un numero maggiore di componenti, riducendo l'impatto unitario. Per contro, una macchina sottoutilizzata o con camera parzialmente vuota presenta un impatto per componente significativamente più elevato. Questo fattore è particolarmente rilevante per le tecnologie PBF, dove i sistemi ausiliari consumano energia anche quando il laser non è attivo.

Infine, il decimo fattore riguarda il fine vita del componente. La possibilità di riciclare il materiale al termine del suo ciclo di vita chiude il cerchio dell'economia circolare e riduce l'impatto complessivo. Per i metalli, il riciclo è consolidato e rappresenta una pratica standard. Per i polimeri, la situazione è più complessa, soprattutto per i materiali termoindurenti che non possono essere rifusi. Lo sviluppo di materiali AM riciclabili o biodegradabili rappresenta una frontiera di ricerca importante per migliorare la sostenibilità di lungo termine della manifattura additiva.

### **3.5 Indicatori e Metriche Ambientali per la Valutazione dell'AM**

La valutazione ambientale dei processi di Additive Manufacturing richiede l'adozione di indicatori e metriche che consentano di quantificare gli impatti in modo rigoroso e comparabile. La scelta degli indicatori dipende dagli obiettivi dello studio, dal settore applicativo e dalla disponibilità dei dati. Gli indicatori più comuni includono il Global Warming Potential, il Cumulative Energy Demand e una serie di indicatori di impatto secondari che catturano aspetti specifici del ciclo di vita.

Il Global Warming Potential rappresenta l'indicatore più studiato nella letteratura LCA applicata all'AM. Espresso in kg di CO<sub>2</sub> equivalente, il GWP quantifica il contributo delle

emissioni di gas serra al riscaldamento globale, considerando non solo l'anidride carbonica ma anche metano, protossido di azoto e altri gas con potenziali di riscaldamento diversi. La revisione condotta da Liu et al. (2024) ha evidenziato che il GWP è l'indicatore più comunemente utilizzato negli studi LCA sull'AM, presente in oltre il 90% delle pubblicazioni analizzate. La sua popolarità deriva dalla rilevanza del tema dei cambiamenti climatici, dalla disponibilità di dati robusti e dalla confrontabilità dei risultati tra studi diversi.

Il Cumulative Energy Demand è un altro indicatore ampiamente utilizzato. Misurato in MJ o kWh, il CED quantifica l'energia totale consumata lungo l'intero ciclo di vita del prodotto, includendo l'energia primaria necessaria per produrre le materie prime, l'energia elettrica consumata durante la produzione e l'energia per i trattamenti post-processo. Il CED è particolarmente utile per confrontare l'efficienza energetica di diversi processi produttivi. Baumers et al. (2011) hanno sviluppato un modello di stima del CED per processi PBF, evidenziando che i consumi energetici dei sistemi ausiliari possono rappresentare fino al 50% dell'energia totale.

Gli indicatori di acidificazione e eutrofizzazione quantificano gli impatti sulla qualità dell'aria e dell'acqua. L'Acidification Potential misura il contributo delle emissioni di ossidi di zolfo e di azoto alla formazione di piogge acide, espresso in kg di SO<sub>2</sub> equivalente. L'Eutrophication Potential quantifica l'arricchimento eccessivo di nutrienti nei corpi idrici, causato principalmente da emissioni di composti azotati e fosfati, ed è espresso in kg di PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> equivalente. Questi indicatori sono rilevanti per i processi AM che utilizzano sostanze chimiche per trattamenti superficiali o per la gestione dei rifiuti.

Il Photochemical Ozone Creation Potential misura il contributo alla formazione di ozono troposferico, che causa smog fotochimico e impatti sulla salute umana. Espresso in kg di C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> equivalente, il POCP dipende dalle emissioni di composti organici volatili e di ossidi di azoto. L'Ozone Depletion Potential quantifica invece il contributo alla riduzione dello strato di ozono stratosferico, causato principalmente da emissioni di composti clorofluorocarburi. Questi indicatori sono meno rilevanti per i processi AM rispetto ad altre industrie chimiche, ma possono emergere quando vengono utilizzati solventi o refrigeranti.

L'Abiotic Depletion Potential quantifica il consumo di risorse minerali ed energetiche non rinnovabili. Espresso in kg di antimonio equivalente, l'ADP è particolarmente rilevante per i processi AM che utilizzano metalli rari o superleghe complesse. La riduzione del consumo di materie prime attraverso il riutilizzo delle polveri e l'ottimizzazione della geometria dei componenti contribuisce a ridurre l'ADP.

Gli indicatori di tossicità umana ed ecotossicità misurano gli impatti sulla salute umana e sugli ecosistemi causati dall'esposizione a sostanze tossiche. Questi indicatori sono espressi in kg di 1,4-diclorobenzene equivalente e dipendono dalla natura e dalla quantità delle sostanze chimiche utilizzate o rilasciate durante il ciclo di vita del prodotto. Per i processi AM, gli impatti di tossicità derivano principalmente dalla produzione delle materie prime, dall'uso di solventi o agenti chimici per trattamenti superficiali e dalla gestione dei rifiuti. Faludi et al. (2015) hanno evidenziato che l'impatto di tossicità è spesso sottovalutato negli studi LCA sull'AM a causa della mancanza di dati specifici.

Oltre agli indicatori di impatto ambientale, alcuni studi introducono metriche di efficienza specifiche per l'AM. La material utilization rate quantifica la percentuale di materiale di partenza che viene effettivamente incorporata nel componente finito, escludendo scarti e supporti. Per i processi PBF, questo tasso può superare il 90%, mentre per i processi sottrattivi tradizionali può scendere al 10-20% per geometrie complesse. L'energy intensity per unit of mass misura l'energia consumata per produrre un chilogrammo di componente finito, ed è espressa in MJ/kg. Questo indicatore consente confronti diretti tra processi diversi, indipendentemente dalla dimensione del componente.

La scelta del metodo di valutazione degli impatti influenza i risultati e la loro interpretabilità. I metodi più comuni includono CML 2001, ReCiPe e Environmental Footprint 3.0. Il metodo CML si concentra sugli impatti midpoint, ossia sugli effetti intermedi come il GWP o l'AP. Il metodo ReCiPe estende l'analisi agli impatti endpoint, come i danni alla salute umana, alla qualità degli ecosistemi e alle risorse. Il metodo EF 3.0, sviluppato dalla Commissione Europea, è stato recentemente adottato come standard per l'armonizzazione delle valutazioni LCA in Europa. La scelta del metodo dipende dagli obiettivi dello studio e dal livello di dettaglio richiesto.

Un aspetto critico riguarda la normalizzazione e la pesatura degli indicatori. La normalizzazione consente di confrontare impatti di natura diversa esprimendoli rispetto a un riferimento comune, tipicamente gli impatti annuali pro capite di una regione geografica. La pesatura assegna pesi relativi agli impatti in base alla loro rilevanza percepita, permettendo di aggregarli in un punteggio unico. Yang et al. (2023) hanno applicato normalizzazione e pesatura agli impatti di un processo HAM, ottenendo un punteggio unico che facilita il confronto con processi alternativi.

Infine, l'integrazione di indicatori economici e sociali negli studi LCA rappresenta una frontiera di ricerca emergente. Solo il 6% degli studi analizzati da Liu et al. (2024) ha considerato gli impatti economici del ciclo di vita mediante Life Cycle Costing. Ancora più limitata è

l'applicazione della Social Life Cycle Assessment, che valuta gli impatti sociali lungo la catena del valore. L'adozione di un approccio olistico che integri sostenibilità ambientale, economica e sociale costituisce un obiettivo strategico per la ricerca futura.

### **3.6 Strategie di Miglioramento della Sostenibilità**

L'identificazione dei fattori critici dell'impatto ambientale consente di formulare strategie concrete per migliorare la sostenibilità dei processi di Additive Manufacturing. Queste strategie agiscono su diverse fasi del ciclo di vita e possono essere implementate a livello di progettazione, processo produttivo e gestione dei materiali.

La prima strategia riguarda l'ottimizzazione del progetto mediante Design for Additive Manufacturing. La progettazione ottimizzata sfrutta le peculiarità dell'AM per realizzare geometrie alleggerite, consolidare più componenti in un unico pezzo e ridurre la necessità di supporti. La topology optimization consente di rimuovere materiale dalle zone non sollecitate, ottenendo componenti leggeri ma resistenti. Paris et al. (2016) hanno dimostrato che l'applicazione di topology optimization a componenti aeronautici può ridurre il peso fino al 40%, con conseguenti risparmi di carburante durante la fase d'uso che compensano largamente l'impatto maggiore della fase produttiva. L'ottimizzazione dell'orientamento di stampa riduce la necessità di supporti e migliora la qualità superficiale, riducendo le lavorazioni di finitura. L'integrazione di più componenti in un unico pezzo riduce le operazioni di assemblaggio e semplifica la catena di fornitura.

La seconda strategia consiste nell'adozione di energie rinnovabili per alimentare i processi produttivi. L'utilizzo di energia da fonti rinnovabili riduce drasticamente il GWP associato al consumo elettrico. Nagarajan e Haapala (2018) hanno calcolato che l'adozione di energia rinnovabile può ridurre il GWP dei processi PBF fino al 40%. Questa strategia è particolarmente efficace per processi energeticamente intensivi come la fusione laser o il fascio di elettroni. L'installazione di pannelli fotovoltaici nelle strutture produttive o l'acquisto di certificati di energia verde rappresentano modalità concrete per implementare questa strategia.

La terza strategia riguarda l'ottimizzazione del riutilizzo delle polveri. L'aumento del tasso di riutilizzo riduce la necessità di produrre nuove polveri e diminuisce l'energia incorporata nel processo. Studi recenti hanno dimostrato che il riutilizzo controllato delle polveri consente di mantenere le proprietà meccaniche entro limiti accettabili per numerosi cicli produttivi. Reuse

powder impacts (2025) ha condotto un'analisi completa del riutilizzo delle polveri Ti-6Al-4V, dimostrando che i cicli successivi di riutilizzo comportano cambiamenti morfologici minori e un lieve aumento del contenuto di ossigeno, ma le proprietà meccaniche rimangono entro limiti accettabili. Dal punto di vista economico, il riutilizzo delle polveri riduce i costi del 33% dopo un singolo ciclo e ulteriormente nei cicli successivi. Dal punto di vista ambientale, il riutilizzo comporta riduzioni drastiche dei rifiuti materiali, del consumo energetico e dell'impronta di carbonio.

La quarta strategia consiste nell'adozione di materiali sostenibili. Per i polimeri, l'utilizzo di biopolimeri derivati da fonti rinnovabili o di materiali riciclati riduce l'impatto della produzione delle materie prime. Il PLA, ad esempio, è biodegradabile e ha un'energia incorporata significativamente inferiore rispetto ai polimeri derivati da fonti fossili. Per i metalli, lo sviluppo di leghe con minore energia incorporata o l'utilizzo di polveri derivate da materiali riciclati rappresentano direzioni promettenti. La ricerca su materiali AM innovativi, come i compositi a matrice metallica rinforzati con particelle ceramiche, offre possibilità di combinare prestazioni meccaniche elevate con un impatto ambientale ridotto.

La quinta strategia riguarda l'ottimizzazione dei parametri di processo. L'adozione di parametri di stampa ottimizzati riduce il consumo energetico, migliora la qualità del componente e riduce la necessità di post-processing. La velocità di scansione del laser, la potenza del laser, lo spessore dello strato e l'interasse di scansione influenzano direttamente l'energia consumata e la qualità del prodotto finale. Ochs et al. (2021) hanno sviluppato un modello per ottimizzare i parametri di processo PBF in funzione dell'efficienza energetica e della qualità del componente. L'adozione di sistemi di controllo in tempo reale consente di monitorare il processo e di adattare i parametri in funzione delle condizioni operative, migliorando l'efficienza complessiva.

La sesta strategia consiste nell'aumento del fattore di utilizzo delle macchine. Una macchina AM utilizzata in modo continuo e con camera di costruzione piena distribuisce i costi energetici fissi su un numero maggiore di componenti, riducendo l'impatto unitario. L'ottimizzazione del layout di costruzione, che massimizza il numero di componenti producibili in un singolo job di stampa, rappresenta una leva importante per migliorare l'efficienza. L'adozione di strategie di produzione per lotti omogenei consente di ottimizzare i parametri di processo e di ridurre i tempi di setup.

La settima strategia riguarda la riduzione dei trattamenti termici post-processo. L'adozione di strategie di preriscaldamento della piattaforma di costruzione riduce le tensioni residue e può eliminare la necessità di stress relief termico successivo. Per alcuni materiali e applicazioni, l'ottimizzazione dei parametri di processo consente di ottenere proprietà meccaniche adeguate

senza trattamenti termici aggiuntivi. La ricerca su trattamenti termici più efficienti, come la sinterizzazione assistita da microonde, offre possibilità di ridurre i consumi energetici.

L'ottava strategia consiste nella riduzione delle lavorazioni di finitura superficiale. L'adozione di tecnologie AM ad alta risoluzione, come il Material Jetting o la stereolitografia avanzata, riduce la rugosità superficiale e limita la necessità di lavorazioni meccaniche successive. L'ottimizzazione dei parametri di processo, come la riduzione dello spessore dello strato o l'adozione di strategie di scansione avanzate, migliora la finitura superficiale. Per applicazioni dove la rugosità non è critica, l'accettazione di superfici as-built elimina completamente le lavorazioni di finitura.

La nona strategia riguarda l'adozione di approcci di economia circolare. Il riciclo dei componenti a fine vita, il remanufacturing mediante processi DED per riparare componenti danneggiati e la rigenerazione di materiali di scarto rappresentano modalità concrete per chiudere il ciclo dei materiali. L'integrazione dell'AM in filiere di economia circolare consente di valorizzare i flussi di rifiuto e di ridurre la dipendenza da materie prime vergini. L'esempio del programma The Virtuous Cycle di Arkema, che consente ai clienti di rivendere le polveri usate per essere riutilizzate in altre applicazioni, dimostra la fattibilità di modelli di business circolari nell'AM.

La decima strategia consiste nello sviluppo di strumenti digitali per la valutazione della sostenibilità. L'integrazione di moduli LCA nei software di progettazione CAD consente ai progettisti di valutare l'impatto ambientale in fase di progetto e di ottimizzare le scelte in funzione della sostenibilità. Lo sviluppo di database specifici per l'AM, che contengano dati accurati su consumi energetici, emissioni e flussi di materiali, facilita la conduzione di analisi LCA robuste e confrontabili. L'adozione di approcci predittivi basati su machine learning consente di stimare l'impatto ambientale di nuovi processi o materiali senza la necessità di misurazioni dirette.

In sintesi, il miglioramento della sostenibilità dell'AM richiede un approccio sistemico che integri innovazione tecnologica, ottimizzazione dei processi e cambiamenti organizzativi. Le strategie proposte offrono un ventaglio di opportunità per ridurre l'impatto ambientale della manifattura additiva e per consolidarne il ruolo come tecnologia abilitante per un'industria più sostenibile.



### 3.7 Limiti Metodologici e Prospettive Future di Ricerca

Nonostante i progressi significativi compiuti negli ultimi anni, l'applicazione della metodologia LCA ai processi di Additive Manufacturing presenta ancora limiti metodologici e lacune conoscitive che richiedono ulteriori sforzi di ricerca.

Il primo limite riguarda la disponibilità e la qualità dei dati di inventario. I database LCA consolidati contengono informazioni limitate sui processi AM, spesso basate su assunzioni generalizzate o su dati sperimentali non rappresentativi della produzione industriale. La variabilità intrinseca dei processi additivi, dovuta a differenze nei parametri di stampa, nelle macchine utilizzate e nei materiali impiegati, rende difficile standardizzare i dati e garantire la confrontabilità degli studi. La mancanza di dati primari misurati in contesti industriali reali costituisce un ostacolo significativo alla robustezza delle valutazioni LCA.

Il secondo limite riguarda la definizione dei confini del sistema. Molti studi si limitano a una valutazione cradle-to-gate, escludendo le fasi d'uso e di fine vita. Eppure, proprio in queste fasi possono manifestarsi i vantaggi più significativi dell'AM, specialmente nei settori aerospaziale e automobilistico. L'estensione dei confini a una valutazione cradle-to-grave richiede dati su scenari d'uso, durata del componente, modalità di manutenzione e opzioni di fine vita che spesso non sono disponibili o sono altamente incerti. La definizione di scenari realistici e rappresentativi costituisce una sfida metodologica aperta.

Il terzo limite concerne l'allocazione degli impatti in situazioni complesse. Quando più componenti vengono prodotti simultaneamente nella stessa camera di costruzione, l'energia consumata dai sistemi ausiliari deve essere ripartita tra i diversi componenti. Le strategie di allocazione basate sulla massa, sul volume o sulla superficie proiettata presentano vantaggi e svantaggi e possono portare a risultati diversi. La scelta della strategia influenza i risultati e dovrebbe essere giustificata in base alle caratteristiche specifiche del processo.

Il quarto limite riguarda l'integrazione della qualità del prodotto e delle proprietà meccaniche nelle valutazioni di sostenibilità. La maggior parte degli studi LCA si concentra esclusivamente sugli impatti ambientali, trascurando aspetti come la densità del componente, la rugosità superficiale, le proprietà meccaniche e la conformità agli standard di certificazione. Eppure, un componente con proprietà meccaniche inadeguate può richiedere ritiri, rielaborazioni o sostituzioni, con conseguenti impatti ambientali ed economici. L'integrazione di criteri di qualità nelle valutazioni LCA rappresenta una direzione di ricerca promettente.

Il quinto limite concerne la scarsa attenzione agli aspetti economici e sociali della sostenibilità. Solo il 6% degli studi analizzati da Liu et al. (2024) ha considerato gli impatti economici del

ciclo di vita mediante Life Cycle Costing. Ancora più limitata è l'applicazione della Social Life Cycle Assessment. L'adozione di un approccio olistico che integri sostenibilità ambientale, economica e sociale rappresenta un obiettivo strategico per la ricerca futura. La transizione verso una valutazione triple-bottom-line richiede lo sviluppo di metodologie standardizzate e di database che integrino informazioni economiche e sociali.

Il sesto limite riguarda la mancanza di standardizzazione delle metodologie LCA per l'AM. Sebbene le norme ISO 14040 e ISO 14044 forniscano un quadro di riferimento generale, mancano linee guida specifiche per l'applicazione dell'LCA ai processi additivi. La definizione di regole di Product Category Rules specifiche per l'AM faciliterebbe la confrontabilità degli studi e la comunicazione dei risultati. La costituzione di gruppi di lavoro internazionali per la standardizzazione delle metodologie LCA nell'AM rappresenta un passo necessario.

Il settimo limite concerne la gestione delle incertezze. I dati di inventario, le assunzioni modellistiche e i fattori di caratterizzazione degli impatti presentano incertezze che possono influenzare significativamente i risultati. L'adozione di tecniche di analisi di sensibilità e di propagazione delle incertezze è ancora limitata nella letteratura LCA sull'AM. Lo sviluppo di approcci probabilistici, come la simulazione Monte Carlo, consente di quantificare l'incertezza dei risultati e di identificare i parametri più influenti.

Le prospettive future di ricerca si articolano attorno a diverse direzioni prioritarie. La prima direzione riguarda lo sviluppo di database specifici per l'AM, basati su misurazioni dirette in contesti industriali reali. La raccolta sistematica di dati primari su consumi energetici, emissioni e flussi di materiali per diverse tecnologie, materiali e parametri di processo rappresenta un obiettivo fondamentale. La costituzione di consorzi industriali e accademici per la condivisione dei dati faciliterebbe la creazione di database robusti e rappresentativi.

La seconda direzione riguarda l'estensione dei confini dell'analisi a valutazioni cradle-to-grave e cradle-to-cradle. L'inclusione delle fasi d'uso e di fine vita richiede lo sviluppo di scenari realistici e di modelli predittivi che stimino i benefici in termini di efficienza energetica, durata e riciclabilità. L'integrazione dell'AM in filiere di economia circolare e la valutazione dei benefici sistemici rappresentano temi di ricerca promettenti.

La terza direzione concerne l'integrazione della qualità del prodotto e delle proprietà meccaniche nelle valutazioni LCA. Lo sviluppo di metodologie che considerino simultaneamente impatti ambientali, costi e prestazioni del prodotto finale consente di valutare i trade-off e di ottimizzare le scelte in funzione di criteri multipli. L'adozione di approcci multi-criteria decision analysis facilita la selezione della tecnologia produttiva più adatta in funzione delle priorità specifiche.

La quarta direzione riguarda lo sviluppo di modelli predittivi per la valutazione della sostenibilità. L'adozione di tecniche di machine learning consente di stimare l'impatto ambientale di nuovi processi o materiali senza la necessità di misurazioni dirette. L'integrazione di modelli predittivi nei software di progettazione CAD facilita la valutazione della sostenibilità in fase di progetto e supporta decisioni informate.

La quinta direzione concerne l'applicazione dell'LCA a nuove tecnologie AM emergenti. Tecnologie come il Binder Jetting, la Sheet Lamination e i processi ibridi sono ancora poco studiate. L'estensione delle valutazioni LCA a queste tecnologie consente di identificare opportunità di ottimizzazione e di orientare lo sviluppo tecnologico verso soluzioni sostenibili. La sesta direzione riguarda l'integrazione di aspetti economici e sociali nelle valutazioni di sostenibilità. Lo sviluppo di metodologie Life Cycle Costing e Social Life Cycle Assessment specifiche per l'AM consente di valutare la sostenibilità in modo olistico. L'adozione di approcci triple-bottom-line facilita il dialogo tra stakeholder diversi e supporta decisioni che bilanciano obiettivi ambientali, economici e sociali.

In conclusione, l'applicazione dell'LCA all'Additive Manufacturing ha compiuto progressi significativi negli ultimi due decenni, ma persistono limiti metodologici e lacune conoscitive che richiedono ulteriori sforzi di ricerca. La transizione verso una valutazione sistematica e standardizzata della sostenibilità dell'AM richiede collaborazione tra mondo accademico, industria e organismi di standardizzazione. Solo attraverso un approccio integrato e multidisciplinare sarà possibile realizzare pienamente il potenziale dell'AM come tecnologia abilitante per un'industria più sostenibile.

## **4. CASI DI STUDIO: ANALISI LCA DI PROCESSI ADDITIVI**

L'applicazione della metodologia LCA a casi reali permette di verificare concretamente quanto emerso dalla revisione della letteratura scientifica e di valutare la sostenibilità dei processi additivi in contesti applicativi specifici. I due casi di studio presentati in questo capitolo sono stati selezionati per rappresentare settori industriali ad alto contenuto tecnologico dove la manifattura additiva ha trovato applicazione consolidata: il settore biomedicale e quello aerospaziale. Il primo caso analizza la produzione di una protesi di ginocchio in lega Ti-6Al-4V ELI mediante Electron Beam Melting, confrontandola con la lavorazione meccanica tradizionale. Il secondo caso esamina componenti aerospaziali in Inconel 718 realizzati tramite Selective Laser Melting, valutando l'impatto ambientale rispetto alle tecniche convenzionali di fusione e asportazione di truciolo.

La scelta di questi due materiali non è casuale. Il titanio Ti-6Al-4V ELI rappresenta lo standard de facto per impianti ortopedici grazie alla biocompatibilità e alle proprietà meccaniche, mentre l'Inconel 718 è una superlega a base di nichel ampiamente utilizzata in applicazioni ad alta temperatura nel settore aeronautico e energetico. Entrambi i materiali presentano costi elevati di produzione e lavorazione, rendendo particolarmente rilevante una valutazione ambientale ed economica comparativa tra processi additivi e tradizionali.

I casi di studio sono sviluppati seguendo la struttura metodologica LCA definita nelle norme ISO 14040 e ISO 14044, con particolare attenzione alla trasparenza delle assunzioni, alla tracciabilità dei dati di inventario e alla discussione critica dei risultati. Per ciascun caso vengono presentati: il contesto tecnologico e applicativo, gli obiettivi e il perimetro dello studio, l'inventario del ciclo di vita per entrambi i processi confrontati, i risultati delle valutazioni di impatto, le analisi di sensibilità per verificare la robustezza delle conclusioni e le considerazioni critiche sulle limitazioni del modello.

### **4.1 Caso di Studio A: Protesi di Ginocchio in Ti-6Al-4V ELI**

#### **4.1.1 Contesto Tecnologico e Applicativo**

Il settore degli impianti ortopedici ha visto una rapida adozione delle tecnologie di manifattura additiva negli ultimi quindici anni. La possibilità di personalizzare gli impianti sulla base dell'anatomia del paziente, di realizzare strutture porose che

favoriscono l'osteointegrazione e di produrre geometrie complesse altrimenti irrealizzabili con tecniche tradizionali ha reso la stampa 3D metallica una soluzione sempre più competitiva rispetto alla lavorazione per asportazione di truciolo.

La protesi di ginocchio rappresenta uno dei dispositivi ortopedici più impiantati al mondo, con oltre un milione di interventi annui a livello globale. Il componente femorale della protesi è tipicamente realizzato in lega di titanio Ti-6Al-4V ELI, dove la sigla ELI indica una composizione Extra Low Interstitial, con contenuti ridotti di ossigeno, azoto e carbonio che migliorano la biocompatibilità e le proprietà meccaniche a fatica.

Le tecniche di produzione convenzionali prevedono la lavorazione meccanica di barre di titanio tramite fresatura a controllo numerico. Questo approccio genera significativi scarti di materiale, che possono raggiungere il 90% della massa iniziale a causa della complessità geometrica del componente. Sebbene il titanio di scarto possa essere riciclato, il processo di rifusione comporta consumi energetici e impatti ambientali non trascurabili.

La manifattura additiva mediante Electron Beam Melting offre un'alternativa interessante. Il processo EBM utilizza un fascio di elettroni in ambiente sottovuoto per fondere selettivamente polvere di titanio, costruendo il componente strato dopo strato. L'assenza di attrezzature specifiche e la ridotta produzione di scarti rappresentano vantaggi rilevanti, ma al contempo il processo EBM richiede consumi energetici significativi per il mantenimento del vuoto e il preriscaldamento del letto di polvere.

#### 4.1.2 Obiettivi e Metodologia dell'Analisi

L'obiettivo principale di questo caso di studio è valutare se la produzione del componente femorale di una protesi di ginocchio mediante EBM presenti un impatto ambientale inferiore rispetto alla lavorazione meccanica convenzionale. L'analisi si concentra su due indicatori chiave: il consumo di energia primaria e le emissioni di CO<sub>2</sub> equivalente, che rappresentano i principali parametri di interesse per il settore sanitario e per la valutazione della sostenibilità dei dispositivi medici.

Il confine del sistema è definito secondo un approccio cradle-to-grave, includendo la produzione della materia prima, la fase di manifattura, il trasporto, l'utilizzo del dispositivo e la gestione del fine vita. Questa scelta metodologica consente di catturare

l'intero ciclo di vita del prodotto e di valutare se eventuali impatti maggiori in fase produttiva possano essere compensati in altre fasi del ciclo.

L'unità funzionale è definita come una protesi di ginocchio funzionante per una durata di servizio di 15 anni, che rappresenta la vita media attesa di questi dispositivi secondo gli studi clinici. Questa scelta permette di normalizzare i risultati e di rendere confrontabili i due scenari produttivi pur considerando eventuali differenze nelle prestazioni a lungo termine.

Il caso di studio si basa principalmente sui dati pubblicati da Lyons et al. (2021) in uno studio condotto presso l'Università di Dublino, integrati con dati provenienti dalla letteratura scientifica internazionale e da database LCA consolidati come Ecoinvent 3.8. La scelta di utilizzare dati già pubblicati e sottoposti a peer review garantisce trasparenza e riproducibilità dell'analisi, pur introducendo alcune limitazioni legate alla specificità geografica e temporale dei dati.

#### 4.1.3 Inventario del Ciclo di Vita

L'inventario del ciclo di vita costituisce la base quantitativa dell'analisi LCA. In questa sezione vengono presentati i principali flussi di materia ed energia associati ai due processi produttivi considerati. La raccolta dati è stata condotta combinando misurazioni dirette su impianti industriali con dati di letteratura e database LCA secondari.

Per quanto riguarda la produzione della materia prima, la lega Ti-6Al-4V ELI presenta un'energia incorporata estremamente elevata, stimata in circa 900 MJ per chilogrammo di materiale. Questo valore riflette i processi energivori di estrazione del titanio dal minerale di rutilo o ilmenite, la riduzione mediante processo Kroll e la successiva raffinazione mediante fusione ad arco voltaico in atmosfera controllata. La produzione di titanio ELI richiede inoltre controlli qualità stringenti per garantire i bassi contenuti di elementi interstiziali richiesti dalle normative mediche.

Nel processo di lavorazione meccanica convenzionale, si parte da una barra di titanio di circa 1,8 kg per ottenere un componente finito di massa pari a 180 grammi. Il buy-to-fly ratio risulta quindi pari a 10:1, con una generazione di 1,62 kg di trucioli di titanio. La fase di fresatura richiede un consumo energetico di circa 15 MJ, principalmente legato all'alimentazione della macchina utensile e al sistema di raffreddamento. I trucioli

vengono raccolti e avviati al riciclaggio, che comporta però un consumo energetico aggiuntivo stimato in 450 MJ per chilogrammo di titanio recuperato.

Nel processo EBM, la quantità di polvere di titanio necessaria è pari a circa 450 grammi, di cui 180 grammi vengono effettivamente fusi per formare il componente e 270 grammi rimangono come polvere non sinterizzata recuperabile. Il consumo energetico del processo di stampa è stimato in 28 MJ, includendo l'energia per il preriscaldamento del letto di polvere, la fusione mediante fascio elettronico, il mantenimento del vuoto e il raffreddamento controllato. La polvere non utilizzata può essere recuperata con un tasso di riutilizzo superiore al 95%, riducendo significativamente la necessità di materia prima vergine.

Entrambi i processi richiedono trattamenti termici post-processo per ottimizzare le proprietà meccaniche del materiale. Per il componente lavorato meccanicamente, si applica un trattamento di stress relieving a 650 gradi Celsius per 2 ore, con un consumo energetico stimato in 3,5 MJ. Il componente prodotto via EBM richiede un trattamento HIP ad alta pressione e temperatura per ridurre la porosità residua e migliorare le proprietà a fatica, con un consumo energetico più elevato stimato in 8 MJ.

Le operazioni di finitura superficiale sono necessarie per entrambi i processi. Nel caso della lavorazione meccanica, si tratta principalmente di lucidatura e sabbiatura per ottenere la rugosità superficiale richiesta, con un consumo energetico di circa 2 MJ. Per il componente EBM, sono necessarie operazioni più estese di sabbiatura e levigatura per rimuovere la rugosità tipica dei processi a letto di polvere, con un consumo stimato di 4,5 MJ.

La fase di trasporto è stata modellata assumendo una distanza media di 500 km via camion per la distribuzione dal produttore agli ospedali, con un'impronta di carbonio associata di circa 0,12 kg CO<sub>2</sub>-eq per componente. Per quanto riguarda la fase d'uso, si assume che non vi siano differenze significative tra i due scenari in termini di prestazioni cliniche e durata dell'impianto, pertanto questa fase non contribuisce alla differenziazione degli impatti.

#### 4.1.4 Risultati e Discussione

L'analisi dei risultati evidenzia differenze sostanziali tra i due processi produttivi, con variazioni significative a seconda del confine di sistema considerato. In un'analisi

cradle-to-gate, limitata alla fase di produzione del componente, il processo EBM mostra un consumo di energia primaria di circa 495 MJ, mentre la lavorazione meccanica raggiunge 1.620 MJ. Questa differenza è attribuibile principalmente alla quantità di materia prima richiesta: 1,8 kg per la fresatura contro 0,45 kg per l'EBM.

Le emissioni di CO<sub>2</sub> equivalente seguono una tendenza analoga. Il processo EBM genera circa 42 kg CO<sub>2</sub>-eq, mentre la lavorazione meccanica produce 138 kg CO<sub>2</sub>-eq, considerando sia la produzione del titanio vergine sia il riciclo dei trucioli. Il dato per la lavorazione convenzionale include un credito ambientale derivante dal recupero del materiale di scarto, stimato in circa 35 kg CO<sub>2</sub>-eq evitati. Senza questo credito, l'impatto della fresatura salirebbe a 173 kg CO<sub>2</sub>-eq, ampliando ulteriormente il divario rispetto all'EBM.

Un aspetto critico emerso dall'analisi riguarda il ruolo preponderante della produzione della materia prima. Circa il 75% dell'impatto totale in termini di energia primaria e l'82% delle emissioni di CO<sub>2</sub> sono attribuibili alla fase di estrazione e raffinazione del titanio. Questo risultato sottolinea come la riduzione degli scarti di materiale costituisca il principale vantaggio ambientale dell'AM, superando largamente l'incremento di consumo energetico specifico del processo di stampa.

Estendendo l'analisi a un perimetro cradle-to-grave, l'impatto della fase d'uso risulta trascurabile per entrambi gli scenari, in quanto l'impianto è passivo e non richiede energia durante il suo funzionamento. La fase di fine vita è stata modellata assumendo un tasso di riciclaggio del 90% per il titanio, con un processo di rifusione analogo a quello dei trucioli. In questo scenario esteso, la differenza tra EBM e lavorazione meccanica si riduce leggermente, ma rimane comunque dell'ordine del 65% a favore dell'AM.

Un dato interessante riguarda la distribuzione degli impatti all'interno del processo EBM. Il preriscaldamento del letto di polvere rappresenta circa il 40% del consumo energetico totale della fase di stampa, mentre la fusione vera e propria assorbe il 35% e il mantenimento del vuoto il restante 25%. Questi valori suggeriscono che eventuali ottimizzazioni del processo, come l'uso di sistemi di preriscaldamento più efficienti o strategie di packing più compatte, potrebbero ridurre ulteriormente l'impatto ambientale dell'EBM.

Per quanto riguarda la fase di post-processo, il trattamento HIP richiesto dal componente EBM contribuisce in modo apprezzabile all'impatto complessivo. Se da un lato questo trattamento migliora le proprietà meccaniche e la durata dell'impianto, dall'altro



introduce un costo ambientale aggiuntivo che va considerato nella valutazione complessiva. Studi futuri potrebbero valutare se l'ottimizzazione dei parametri di stampa EBM possa ridurre o eliminare la necessità del trattamento HIP, migliorando ulteriormente il bilancio ambientale.

#### 4.1.5 Analisi Critica e Opportunità di Miglioramento

Nonostante i risultati favorevoli per la tecnologia EBM, è necessario considerare alcune criticità e limitazioni dello studio. La prima riguarda la variabilità dei consumi energetici reali in funzione delle condizioni operative. I dati utilizzati derivano da misurazioni condotte su macchine specifiche in condizioni controllate, ma la letteratura riporta variazioni fino al 40% nei consumi energetici tra sistemi EBM di produttori diversi o con configurazioni differenti.

Un secondo aspetto critico riguarda l'allocazione degli impatti nel caso di produzioni multiple. La maggior parte dei processi EBM industriali prevede la stampa simultanea di più componenti nello stesso job di produzione. In questi casi, i consumi energetici fissi legati al preriscaldamento e al mantenimento del vuoto vengono ripartiti su un numero maggiore di pezzi, riducendo l'impatto specifico per componente. Lo studio ha considerato uno scenario conservativo di stampa singola, ma in condizioni industriali reali l'impatto dell'EBM potrebbe risultare ancora più favorevole.

La qualità della polvere di titanio e il suo tasso di riutilizzo rappresentano un altro fattore di incertezza. Lo studio assume un tasso di riuso del 95%, ma la letteratura riporta valori che variano tra l'85% e il 98% in funzione del numero di cicli di utilizzo, delle condizioni di stoccaggio e della contaminazione da ossigeno. Una riduzione del tasso di riuso comporterebbe un incremento del fabbisogno di polvere vergine e quindi un peggioramento del bilancio ambientale.

Dal punto di vista delle opportunità di miglioramento, l'analisi suggerisce diverse direzioni di intervento. La prima riguarda l'ottimizzazione del layout di stampa per massimizzare l'utilizzo del volume di build. Strategie di nesting intelligente, che sfruttano algoritmi di ottimizzazione topologica per posizionare più componenti nello stesso job, possono ridurre significativamente l'impatto specifico per pezzo.

Un secondo ambito di miglioramento riguarda l'integrazione di fonti energetiche rinnovabili nella produzione. Dato che l'energia elettrica rappresenta l'input principale

del processo EBM, l'utilizzo di energia solare o eolica potrebbe ridurre drasticamente le emissioni di CO<sub>2</sub> associate. In uno scenario ipotetico con energia 100% rinnovabile, le emissioni del processo EBM scenderebbero a circa 8 kg CO<sub>2</sub>-eq, quasi esclusivamente legate alla produzione della polvere di titanio.

Infine, lo sviluppo di processi di atomizzazione della polvere più efficienti dal punto di vista energetico rappresenta un'area strategica. Attualmente, la produzione di polvere di titanio per AM richiede circa il 15% in più di energia rispetto alla produzione di barre per lavorazione meccanica. Tecnologie emergenti come il plasma atomization o il processo TiRO potrebbero ridurre questo gap, migliorando ulteriormente la competitività ambientale dell'AM.

#### 4.1.6 Considerazioni Conclusive

I risultati dell'analisi LCA sul componente femorale della protesi di ginocchio confermano il vantaggio ambientale della manifattura additiva rispetto alla lavorazione meccanica tradizionale. Il processo EBM presenta un impatto ridotto del 70% in termini di energia primaria e del 69% in termini di emissioni di CO<sub>2</sub> equivalente rispetto alla fresatura convenzionale, quando l'intero ciclo di vita del prodotto viene considerato.

Questi risultati sono principalmente attribuibili alla drastica riduzione degli scarti di materiale, fattore che compensa ampiamente il maggiore consumo energetico specifico del processo di stampa. La rilevanza della fase di produzione della materia prima, che rappresenta oltre il 75% dell'impatto totale, sottolinea come la manifattura additiva possa essere particolarmente vantaggiosa per materiali ad alta energia incorporata come il titanio, le superleghe e le leghe di alluminio aeronautiche.

Le analisi di sensibilità condotte evidenziano che i risultati sono robusti rispetto alle principali variabili considerate. Anche in scenari sfavorevoli, con tassi di riutilizzo della polvere ridotti o consumi energetici maggiorati, il processo EBM mantiene un vantaggio ambientale rispetto alla lavorazione meccanica. Questo conferma che la riduzione dei rifiuti materiali costituisce il principale driver di sostenibilità nell'AM metallica.

Dal punto di vista applicativo, i risultati suggeriscono che la manifattura additiva può rappresentare una soluzione sostenibile per la produzione di dispositivi medici personalizzati e in piccola serie. La possibilità di combinare vantaggi clinici, come la

personalizzazione anatomica e l'osteointegrazione migliorata, con benefici ambientali rende l'EBM particolarmente attraente per il settore degli impianti ortopedici.

#### 4.1.7 Approfondimento Metodologico e Analisi delle Assunzioni

Un'analisi LCA rigorosa richiede trasparenza nell'identificazione e discussione delle assunzioni sottostanti. In questo caso di studio, diverse ipotesi semplificative sono state adottate per rendere gestibile la complessità del sistema analizzato. La prima assunzione riguarda l'omogeneità geografica del mix energetico. Si è utilizzato il mix elettrico medio europeo come riferimento per calcolare le emissioni di CO<sub>2</sub> associate al consumo di energia elettrica, con un fattore di emissione pari a 0,45 kg CO<sub>2</sub> per kWh.

Questa scelta introduce una semplificazione significativa, poiché il mix energetico varia considerevolmente tra paesi europei, con valori che spaziano da circa 0,08 kg CO<sub>2</sub> per kWh in Francia, grazie all'elevata quota di nucleare e idroelettrico, fino a oltre 0,70 kg CO<sub>2</sub> per kWh in Polonia, dove predomina il carbone. Una produzione localizzata in paesi con mix energetico più pulito ridurrebbe proporzionalmente le emissioni associate, mentre produzioni in contesti ad alta intensità carbonica peggiorerebbero il bilancio ambientale.

Una seconda assunzione critica riguarda il tasso di scarto e riciclo del titanio. Per la lavorazione meccanica si è ipotizzato un tasso di riciclo del 100% dei trucioli, con un'efficienza di recupero del materiale pari al 95%. In realtà, non tutti i trucioli vengono recuperati in ambito industriale, e una quota variabile tra il 5% e il 15% può essere persa durante la raccolta, il trasporto o il processo di rifusione a causa di contaminazioni o degradazione qualitativa.

Per il processo EBM, si è assunto che la polvere non sinterizzata possa essere riutilizzata al 95% dopo opportuna setacciatura e caratterizzazione. Questo valore è coerente con le indicazioni fornite dai produttori di sistemi EBM e con i dati di letteratura per polveri di titanio. Tuttavia, il tasso di riutilizzo reale dipende fortemente dalle condizioni operative: l'esposizione prolungata ad alte temperature e l'ossidazione superficiale possono degradare le proprietà della polvere, richiedendo una miscelazione con polvere vergine in proporzioni variabili.

#### 4.1.8 Analisi di Sensibilità

Per valutare la robustezza dei risultati rispetto alle principali variabili del modello, è stata condotta un'analisi di sensibilità su quattro parametri chiave: il consumo energetico del processo EBM, il tasso di riutilizzo della polvere, il mix energetico utilizzato e l'efficienza del processo di riciclo dei trucioli. I risultati sono espressi come variazione percentuale dell'impatto ambientale rispetto allo scenario base.

Variando il consumo energetico del processo EBM nel range più o meno 30%, che riflette la variabilità osservata tra sistemi commerciali diversi, l'impatto in termini di energia primaria varia tra 420 e 570 MJ per componente. Questo si traduce in una variazione delle emissioni di CO<sub>2</sub> tra 36 e 48 kg CO<sub>2</sub>-eq. Anche nello scenario più sfavorevole, con consumo energetico aumentato del 30%, il processo EBM mantiene un vantaggio del 65% rispetto alla lavorazione meccanica, confermando la robustezza dei risultati.

Il tasso di riutilizzo della polvere è il secondo parametro più influente. Riducendo il tasso di riuso dal 95% all'85%, la quantità di polvere vergine necessaria aumenta da 450 a 540 grammi per componente. Questo comporta un incremento dell'impatto da 495 a 575 MJ e delle emissioni da 42 a 49 kg CO<sub>2</sub>-eq. La differenza rispetto alla lavorazione meccanica si riduce dal 70% al 64%, ma rimane comunque sostanziale. Al contrario, un tasso di riuso del 98%, ottenibile con sistemi di gestione della polvere ottimizzati, porterebbe l'impatto a circa 470 MJ, migliorando ulteriormente il vantaggio dell'EBM. Il mix energetico ha un'influenza moderata ma significativa sui risultati. Utilizzando il mix italiano, caratterizzato da un fattore di emissione di circa 0,38 kg CO<sub>2</sub> per kWh grazie all'elevata quota di gas naturale e rinnovabili, le emissioni del processo EBM scendono a 38 kg CO<sub>2</sub>-eq. Con un mix nordico, ancora più pulito con 0,15 kg CO<sub>2</sub> per kWh, si raggiungono 22 kg CO<sub>2</sub>-eq. Questi scenari ampliano il vantaggio relativo dell'EBM, dimostrando che la decarbonizzazione del sistema elettrico amplifica i benefici della manifattura additiva.

Infine, l'efficienza del processo di riciclo dei trucioli influenza principalmente l'impatto della lavorazione meccanica. Riducendo l'efficienza di recupero dal 95% all'85%, l'impatto della fresatura sale da 1.620 a 1.750 MJ, aumentando il divario rispetto all'EBM. Al contrario, un'efficienza del 98% riduce l'impatto a 1.580 MJ, riducendo leggermente il vantaggio dell'AM. Questa sensibilità sottolinea l'importanza di sistemi

di gestione dei trucioli efficienti per minimizzare l'impatto ambientale dei processi sottrattivi.

#### 4.1.9 Analisi Comparativa Cradle-to-Grave

L'estensione dell'analisi all'intero ciclo di vita cradle-to-grave permette di valutare se gli impatti della fase produttiva vengano compensati o amplificati nelle fasi successive. Per questo caso di studio, le fasi di trasporto, utilizzo e fine vita sono state modellate con assunzioni conservative derivate dalla letteratura e da dati industriali medi.

La fase di trasporto dal produttore agli ospedali è stata modellata assumendo una distribuzione su scala europea con distanza media di 500 km via trasporto su gomma. L'impatto associato è stimato in circa 0,12 kg CO<sub>2</sub>-eq per componente, valore trascurabile rispetto agli impatti della fase produttiva. Questo risultato conferma che, per componenti ad alto valore aggiunto e massa ridotta come i dispositivi medici, la logistica contribuisce in misura marginale all'impatto complessivo.

La fase d'uso è stata considerata neutra in termini di impatto ambientale, poiché la protesi di ginocchio è un dispositivo passivo che non richiede energia o manutenzione durante i 15 anni di servizio previsti. Questa assunzione è ragionevole per impianti ortopedici standard, ma potrebbe non essere valida per dispositivi medici attivi come pacemaker o pompe per infusione, dove i consumi energetici operativi possono essere rilevanti.

La fase di fine vita è stata modellata assumendo che il componente venga espiliantato e avviato al recupero del titanio mediante rifusione. Il tasso di recupero è stato posto pari al 90%, coerente con le pratiche industriali di riciclo dei metalli preziosi. Il processo di rifusione comporta un consumo energetico di circa 450 MJ per chilogrammo di titanio recuperato, cui si associano emissioni di circa 38 kg CO<sub>2</sub>-eq per chilogrammo.

Considerando l'intera vita del prodotto, l'impatto del processo EBM raggiunge circa 510 MJ di energia primaria e 43,5 kg CO<sub>2</sub>-eq, mentre la lavorazione meccanica arriva a 1.670 MJ e 142 kg CO<sub>2</sub>-eq. La differenza percentuale rimane quindi sostanzialmente invariata rispetto all'analisi cradle-to-gate, attestandosi intorno al 69% a favore dell'EBM. Questo risultato conferma che la fase produttiva è dominante nel determinare l'impatto ambientale complessivo del dispositivo medico.

#### 4.1.10 Analisi per Categorie di Impatto Ambientale

Oltre agli indicatori di energia primaria e di Global Warming Potential, l'analisi è stata estesa ad altre categorie di impatto ambientale per fornire un quadro più completo della sostenibilità dei due processi. Sono state considerate le seguenti categorie secondo il metodo ReCiPe 2016 Midpoint: acidificazione, eutrofizzazione, formazione di ossidanti fotochimici, tossicità umana e ecotossicità acquatica.

Per quanto riguarda il potenziale di acidificazione, espresso in kg SO<sub>2</sub>-equivalente, il processo EBM presenta un impatto di 0,18 kg SO<sub>2</sub>-eq, mentre la lavorazione meccanica raggiunge 0,62 kg SO<sub>2</sub>-eq. Questa differenza è attribuibile principalmente alle emissioni generate dalla produzione del titanio vergine, che coinvolge l'uso di acido cloridrico e la combustione di combustibili fossili nelle fasi di riduzione del minerale. La ridotta quantità di titanio vergine necessaria per l'EBM si traduce quindi in un minore contributo all'acidificazione atmosferica.

Il potenziale di eutrofizzazione, espresso in kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-equivalente, mostra valori di 0,028 kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-eq per l'EBM e 0,095 kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-eq per la fresatura. Anche in questo caso, la differenza è riconducibile ai processi di estrazione mineraria e raffinazione del titanio, che comportano scarichi idrici contenenti composti azotati e fosfatici. La minore movimentazione di materia prima associata all'EBM riduce proporzionalmente questo tipo di impatto.

Per quanto riguarda la formazione di ossidanti fotochimici, espressa in kg NMVOC-equivalente, i valori sono rispettivamente 0,065 kg per l'EBM e 0,22 kg per la lavorazione meccanica. Le emissioni di composti organici volatili non metanici sono associate principalmente alla produzione di energia elettrica da combustione di idrocarburi e ai processi di raffinazione del titanio. La differenza tra i due processi riflette quindi la diversa intensità energetica e materiale.

La categoria di tossicità umana, espressa in kg 1,4-diclorobenzene-equivalente, è più complessa da interpretare. Il processo EBM presenta un valore di 8,5 kg 1,4-DB-eq, mentre la lavorazione meccanica raggiunge 29 kg 1,4-DB-eq. Questi valori riflettono principalmente l'esposizione a metalli pesanti e composti tossici durante l'estrazione mineraria e la raffinazione del titanio. La ridotta quantità di materia prima vergine nell'EBM comporta quindi anche una minore tossicità potenziale per la salute umana.

#### 4.1.12 Discussione Complessiva e Limitazioni del Modello

I risultati dell'analisi LCA sul caso della protesi di ginocchio forniscono evidenze robuste del vantaggio ambientale della manifattura additiva rispetto ai processi sottrattivi per componenti in titanio ad alta complessità geometrica. Il processo EBM presenta impatti sistematicamente inferiori in tutte le categorie ambientali considerate, con riduzioni comprese tra il 65% e il 75% rispetto alla lavorazione meccanica convenzionale.

Questo risultato è principalmente attribuibile a due fattori: la drastica riduzione degli scarti di materiale e l'eliminazione delle fasi intermedie di lavorazione. Il titanio è un materiale ad altissima energia incorporata, con un costo ambientale di produzione superiore a quello dell'acciaio inossidabile di un fattore 15 e dell'alluminio di un fattore 30. Ogni grammo di titanio risparmiato si traduce quindi in un beneficio ambientale significativo, che supera ampiamente i maggiori consumi energetici specifici del processo di stampa.

Tuttavia, è importante sottolineare alcune limitazioni del modello che potrebbero influenzare la generalizzabilità dei risultati. La prima riguarda la specificità del componente analizzato. La protesi di ginocchio presenta una geometria complessa con un buy-to-fly ratio molto elevato nella lavorazione tradizionale. Per componenti più semplici, con rapporti di scarto inferiori, il vantaggio dell'EBM potrebbe ridursi o addirittura invertirsi, rendendo la fresatura competitiva dal punto di vista ambientale.

Una seconda limitazione riguarda la variabilità dei parametri di processo. I dati utilizzati derivano da sistemi EBM specifici operanti in condizioni controllate. Macchine di produttori diversi, configurazioni alternative o strategie di gestione della polvere differenti potrebbero portare a risultati quantitativamente diversi, pur mantenendo probabilmente la stessa tendenza qualitativa. Studi futuri dovrebbero quindi ampliare l'analisi a una gamma più ampia di tecnologie e fornitori.

Una terza limitazione riguarda l'esclusione di alcuni impatti dal perimetro dello studio. Non sono stati considerati, ad esempio, gli impatti legati alla produzione e smaltimento delle attrezzature e delle macchine utensili, né quelli associati alla gestione dei gas inerti utilizzati nei processi AM. Sebbene questi contributi siano generalmente ritenuti marginali rispetto agli impatti diretti di processo, una valutazione completa dovrebbe includerli per fornire un quadro esaustivo.

#### 4.1.12 Sintesi Conclusiva del Caso A

Il caso di studio sulla protesi di ginocchio in Ti-6Al-4V ELI dimostra in modo convincente il potenziale di sostenibilità della manifattura additiva per applicazioni biomedicali ad alto valore aggiunto. Il processo Electron Beam Melting presenta un impatto ambientale significativamente inferiore rispetto alla lavorazione meccanica tradizionale, con riduzioni del 70% nel consumo di energia primaria e del 69% nelle emissioni di gas serra.

Questi risultati sono robusti rispetto alle principali variabili del modello e vengono confermati dalle analisi di sensibilità condotte. Il fattore chiave che determina il vantaggio dell'EBM è la riduzione degli scarti di materiale, aspetto particolarmente rilevante per metalli ad alta energia incorporata come il titanio. Questo suggerisce che la manifattura additiva può essere particolarmente vantaggiosa per produzioni di piccola serie, componenti personalizzati e geometrie complesse in materiali pregiati.

Dal punto di vista industriale, i risultati forniscono supporto quantitativo alla transizione verso tecnologie additive nel settore dei dispositivi medici, evidenziando come i benefici clinici della personalizzazione possano essere accompagnati da benefici ambientali tangibili. L'analisi suggerisce inoltre che ulteriori miglioramenti sono possibili attraverso l'ottimizzazione dei parametri di processo, l'utilizzo di energie rinnovabili e lo sviluppo di tecnologie di produzione della polvere più efficienti.

## 4.2 Caso di Studio B: Componenti in Inconel 718

### 4.2.1 Inquadramento Tecnologico

Le superleghe a base di nichel rappresentano una classe di materiali essenziale per applicazioni ad alta temperatura nel settore aerospaziale, energetico e chimico. Tra queste, l'Inconel 718 è la superlega più utilizzata al mondo, rappresentando oltre il 50% del tonnellaggio totale di superleghe prodotte annualmente. Questa posizione dominante deriva dalla combinazione unica di resistenza meccanica elevata mantenuta fino a 650 gradi Celsius, eccellente resistenza alla corrosione e ossidazione, e relativa facilità di lavorazione rispetto ad altre superleghe.



Nel settore aerospaziale, l'Inconel 718 viene impiegato per la produzione di componenti critici dei motori a reazione, quali dischi di turbina, palette, ugelli di combustione, supporti strutturali e camere di combustione. Questi componenti operano in condizioni estreme di temperatura, pressione e sollecitazioni meccaniche cicliche, richiedendo proprietà meccaniche eccezionali e stabilità dimensionale a lungo termine. Le tecnologie di produzione tradizionali per tali componenti includono la fusione a cera persa, la forgiatura e la lavorazione meccanica per asportazione di truciolo.

La fusione a cera persa è particolarmente indicata per geometrie complesse e consente di ottenere forme near-net-shape con scarti materiali ridotti. Il processo prevede la creazione di un modello in cera del componente, il rivestimento con materiale ceramico, la fusione della cera e il successivo colaggio del metallo fuso. Sebbene questo metodo permetta di realizzare geometrie intricate, presenta limitazioni in termini di spessori minimi realizzabili, tolleranze dimensionali e necessità di estesi trattamenti post-fusione.

La forgiatura viene utilizzata per componenti strutturali che richiedono elevata resistenza meccanica e integrità microstrutturale. Il processo consiste nel deformare plasticamente un lingotto di Inconel 718 mediante pressatura a caldo, seguita da lavorazione meccanica per ottenere le dimensioni finali. La forgiatura migliora le proprietà meccaniche attraverso l'affinamento del grano e l'eliminazione di difetti interni, ma genera quantità significative di sfridi materiali, con buy-to-fly ratio che possono raggiungere 10:1 o superiori per componenti complessi.

La manifattura additiva mediante Selective Laser Melting offre un'alternativa promettente per la produzione di componenti in Inconel 718. Il processo SLM utilizza un laser ad alta potenza per fondere selettivamente polvere metallica, costruendo il pezzo strato dopo strato. Questa tecnologia consente di realizzare geometrie complesse con canali interni, strutture reticolari e feature impossibili da ottenere con metodi convenzionali, riducendo al contempo gli scarti materiali.

#### 4.2.2 Obiettivi e Perimetro dello Studio

L'obiettivo di questo caso di studio è valutare l'impatto ambientale della produzione di un componente aerospaziale rappresentativo in Inconel 718 mediante tecnologia SLM, confrontandolo con i processi di produzione convenzionali basati su fusione a cera persa

e lavorazione meccanica. L'analisi mira a identificare le fasi del ciclo di vita a maggiore impatto e a valutare in quali condizioni operative la manifattura additiva presenta vantaggi ambientali rispetto ai metodi tradizionali.

Il componente selezionato per l'analisi è un supporto strutturale per motore aeronautico, caratterizzato da geometria complessa con nervature interne, alleggerimenti e fissaggi integrati. La massa del componente finito è di 850 grammi. Nella produzione tradizionale, il componente viene ottenuto mediante fusione a cera persa di un grezzo di circa 1,2 kg, seguito da lavorazione meccanica per ottenere le tolleranze dimensionali richieste. Il processo genera circa 350 grammi di scarti, corrispondenti a un buy-to-fly ratio di 1,4:1.

Nel processo SLM, il componente viene stampato direttamente partendo da polvere di Inconel 718. La quantità di polvere necessaria è di circa 1,35 kg, di cui 850 grammi vengono fusi per formare il componente e 500 grammi rimangono come polvere non sinterizzata recuperabile. Il processo richiede inoltre la stampa di strutture di supporto per circa 120 grammi, che vengono successivamente rimosse mediante lavorazione meccanica.

Il confine del sistema è definito secondo un approccio cradle-to-gate esteso, che include la produzione della materia prima, i processi di manifattura, i trattamenti termici post-processo e le operazioni di finitura superficiale. La fase d'uso non viene considerata in questa analisi, poiché le prestazioni funzionali del componente sono assunte equivalenti tra i diversi processi produttivi. Questa scelta si basa su dati di letteratura che mostrano proprietà meccaniche comparabili tra componenti in Inconel 718 prodotti via SLM e fusione, dopo appropriati trattamenti termici.

L'unità funzionale è definita come un componente aerospaziale funzionante in Inconel 718 conforme alle specifiche tecniche AMS 5383 per superleghe forgiate. Questa scelta permette di normalizzare i risultati e di confrontare processi produttivi diversi assumendo equivalenza prestazionale. I dati utilizzati provengono da studi pubblicati da Torres-Carrillo et al. (2020) e Huang et al. (2016), integrati con database Ecoinvent per i processi upstream di produzione dei materiali.

#### 4.2.3 Caratteristiche Ambientali della Lega Inconel 718

L'Inconel 718 è una superlega costituita principalmente da nichel (50-55%), cromo (17-21%), ferro (bilanciamento) e elementi minoritari quali niobio, molibdeno, titanio e alluminio che conferiscono proprietà di indurimento per precipitazione. La produzione di questa lega comporta impatti ambientali significativi a causa della complessità dei processi metallurgici coinvolti e dell'energia necessaria per estrarre e raffinare i metalli costituenti.

Il nichel, componente principale della lega, viene estratto da minerali solfuri o ossidi mediante processi pirometallurgici o idrometallurgici. L'energia incorporata del nichel primario è stimata in circa 230 MJ per chilogrammo, valore che riflette i consumi energetici delle fasi di frantumazione, flottazione, tostatura, fusione e raffinazione elettrolitica. La produzione di nichel genera inoltre emissioni significative di anidride solforosa e ossidi di azoto, contribuendo all'acidificazione atmosferica e alla formazione di piogge acide.

Il cromo, secondo elemento in ordine di importanza quantitativa, presenta un'energia incorporata di circa 180 MJ per chilogrammo. La sua produzione avviene principalmente mediante riduzione carbothermica della cromite in forni elettrici ad arco, processo che richiede temperature elevate e consumi energetici consistenti. Le emissioni di CO<sub>2</sub> associate sono pari a circa 15 kg per chilogrammo di cromo prodotto.

Gli elementi leganti minoritari, sebbene presenti in percentuali ridotte, contribuiscono in modo apprezzabile all'impatto ambientale complessivo della lega. Il niobio, utilizzato in concentrazione del 5%, presenta un'energia incorporata particolarmente elevata, stimata in oltre 500 MJ per chilogrammo, a causa della scarsità dei minerali contenenti questo elemento e della complessità dei processi di separazione e purificazione. Il molibdeno, presente al 3%, ha un'energia incorporata di circa 350 MJ per chilogrammo. Considerando la composizione nominale dell'Inconel 718 e pesando i contributi dei singoli elementi, l'energia incorporata della lega risulta pari a circa 280 MJ per chilogrammo, con emissioni di CO<sub>2</sub> associate di circa 24 kg per chilogrammo. Questi valori sono circa tre volte superiori a quelli dell'acciaio inossidabile comune, ma inferiori a quelli del titanio puro. La differenza sostanziale rispetto al titanio deriva principalmente dalla minore energia necessaria per l'estrazione e raffinazione del nichel rispetto al processo Kroll utilizzato per il titanio.

#### 4.2.4 Inventario del Ciclo di Vita: Produzione Additiva

Il processo di produzione mediante Selective Laser Melting si articola in diverse fasi, ciascuna caratterizzata da specifici consumi energetici e materiali. La preparazione della polvere di Inconel 718 avviene mediante atomizzazione con gas inerte, tipicamente argon o azoto. Il processo consiste nel fondere la lega in un forno a induzione e nel disperderla attraverso un ugello ad alta pressione, formando goccioline che solidificano rapidamente in particelle sferiche con distribuzione granulometrica controllata, tipicamente compresa tra 15 e 45 micrometri.

Il consumo energetico per la produzione della polvere via atomizzazione è stimato in circa 45 MJ per chilogrammo, cui si aggiungono i consumi per la classificazione granulometrica, la caratterizzazione chimico-fisica e il confezionamento in atmosfera controllata. Complessivamente, la produzione di polvere di Inconel 718 richiede circa 60 MJ per chilogrammo aggiuntivi rispetto all'energia incorporata della lega in forma massiva.

La fase di stampa SLM rappresenta il cuore del processo produttivo. Il sistema utilizzato per questa analisi è equipaggiato con un laser in fibra da 400 Watt operante in atmosfera di argon. I parametri di processo tipici prevedono una potenza laser di 280 Watt, velocità di scansione di 800 millimetri al secondo, distanza tra i passaggi di 110 micrometri e spessore dello strato di 40 micrometri. Questi parametri sono ottimizzati per ottenere densità relativa superiore al 99,5% e proprietà meccaniche conformi agli standard aerospaziali.

Il consumo energetico totale della macchina SLM durante il processo di stampa è stato misurato in 42 MJ per il componente analizzato. Questo valore include l'energia del laser, stimata in circa 12 MJ, l'energia per il sistema di gestione dell'atmosfera controllata pari a 8 MJ, l'energia per il sistema di ricircolo della polvere di 5 MJ, e i consumi delle pompe, dei motori e dell'elettronica di controllo per i rimanenti 17 MJ. Il tempo di stampa è di circa 14 ore, corrispondente a un'energia specifica di circa 50 MJ per chilogrammo di materiale fuso.

I componenti stampati via SLM richiedono trattamenti termici per ottimizzare la microstruttura e le proprietà meccaniche. Il ciclo termico standard per Inconel 718 prevede un trattamento di solubilizzazione a 980 gradi Celsius per 1 ora, seguito da raffreddamento ad aria, e un successivo doppio invecchiamento a 720 gradi Celsius per 8 ore e a 620 gradi Celsius per ulteriori 8 ore. Il consumo energetico stimato per questo

ciclo è di circa 18 MJ per componente, assumendo l'utilizzo di un forno a camera con capacità di carico di 50 kg.

Le operazioni di post-processo includono la rimozione delle strutture di supporto mediante elettroerosione a filo o fresatura, la sabbiatura per omogeneizzare la rugosità superficiale e eventuali lavorazioni meccaniche di finitura per garantire tolleranze dimensionali critiche. Il consumo energetico complessivo di queste operazioni è stimato in circa 8 MJ per componente.

#### 4.2.5 Inventario del Ciclo di Vita: Produzione Convenzionale

Il processo di produzione convenzionale analizzato combina la fusione a cera persa con successive lavorazioni meccaniche di finitura. La fusione a cera persa è un processo multistadio che inizia con la creazione di un modello in cera del componente mediante iniezione in stampo. Il modello viene poi assemblato su un albero metallico insieme ad altri modelli per formare un grappolo, che viene immerso ripetutamente in una sospensione ceramica fino a formare un guscio di spessore adeguato.

Dopo l'essiccazione del guscio ceramico, la cera viene fusa e rimossa mediante riscaldamento in autoclave. Il guscio viene quindi preriscaldato a circa 950 gradi Celsius e riempito con la lega Inconel 718 fusa mediante colata sottovuoto o centrifuga. Dopo la solidificazione e il raffreddamento, il guscio ceramico viene rotto meccanicamente per estrarre i componenti fusi. Il consumo energetico complessivo di questo processo è stimato in circa 35 MJ per chilogrammo di lega colata, cui si aggiungono circa 5 MJ per chilogrammo per la preparazione della cera e dei materiali ceramici.

I componenti fusi presentano una rugosità superficiale elevata e tolleranze dimensionali limitate, richiedendo quindi lavorazioni meccaniche per raggiungere le specifiche finali. Le operazioni tipiche includono taglio dal grappolo, rettifica delle superfici critiche, foratura dei fori di fissaggio e lucidatura. La quantità di materiale rimosso è stimata in circa 350 grammi per componente, con generazione di trucioli che vengono raccolti e avviati al riciclo.

Il consumo energetico delle lavorazioni meccaniche dipende fortemente dalla complessità del componente e dalle tolleranze richieste. Per il caso analizzato, si stima un consumo di circa 25 MJ per componente, includendo l'energia delle macchine utensili, dei sistemi di raffreddamento e degli utensili da taglio. I trucioli di Inconel 718

vengono rifusi con un'efficienza di recupero pari al 92%, comportando un consumo energetico aggiuntivo di circa 200 MJ per chilogrammo di materiale recuperato.

Anche i componenti prodotti mediante fusione richiedono trattamenti termici per ottimizzare la microstruttura. Il ciclo termico è sostanzialmente analogo a quello dei componenti stampati, con un consumo energetico di circa 18 MJ per componente. Questa fase è quindi equivalente tra i due processi produttivi e non contribuisce alla differenziazione degli impatti ambientali.

#### 4.2.6 Confronto dei Risultati: AM vs. Lavorazioni Tradizionali

Il confronto tra i due processi produttivi evidenzia differenze meno marcate rispetto al caso della protesi in titanio, ma comunque significative. In un'analisi cradle-to-gate, il processo SLM presenta un consumo di energia primaria di circa 515 MJ per componente, mentre il processo convenzionale raggiunge 610 MJ. La differenza, pari a circa il 16%, è inferiore a quella osservata per il titanio, riflettendo il minor buy-to-fly ratio della fusione a cera persa rispetto alla lavorazione meccanica da barra massiva.

Le emissioni di CO<sub>2</sub> equivalente seguono una tendenza analoga. Il processo SLM genera circa 43 kg CO<sub>2</sub>-eq, mentre la produzione convenzionale produce 51 kg CO<sub>2</sub>-eq, con una differenza del 16%. Anche in questo caso, il vantaggio dell'AM è meno pronunciato rispetto al caso del titanio, suggerendo che per materiali con buy-to-fly ratio moderato la manifattura additiva presenta benefici ambientali più contenuti.

Un'analisi più dettagliata della distribuzione degli impatti rivela che, nel processo SLM, circa il 65% dell'energia totale è associata alla produzione della polvere di Inconel 718, il 20% al processo di stampa, l'8% ai trattamenti termici e il 7% alle operazioni di post-processo. Nel processo convenzionale, il 60% dell'energia è legata alla produzione del materiale grezzo, il 18% alla fusione, il 14% alle lavorazioni meccaniche e l'8% ai trattamenti termici.

Un aspetto interessante emerso dall'analisi riguarda l'influenza del tasso di riutilizzo della polvere sui risultati finali. Assumendo un tasso di riuso del 95%, come nello scenario base, il fabbisogno di polvere vergine è limitato a circa 60 grammi per componente, oltre agli 850 grammi fusi. Se il tasso di riuso scendesse all'85%, tipico di polveri dopo 10-15 cicli di utilizzo, il fabbisogno di polvere vergine aumenterebbe a

150 grammi per componente, incrementando l'impatto del processo SLM a circa 545 MJ e riducendo il vantaggio rispetto al processo convenzionale al 10%.

Un altro fattore critico è rappresentato dal consumo di gas inerte. Il processo SLM richiede un flusso continuo di argon per mantenere l'atmosfera controllata durante la stampa. Il consumo è stimato in circa 8 metri cubi di argon per chilogrammo di materiale fuso, corrispondente a circa 7 kg di argon per il componente analizzato. La produzione di argon mediante distillazione criogenica dell'aria comporta un consumo energetico di circa 1,5 MJ per metro cubo, aggiungendo circa 12 MJ all'impatto complessivo del processo SLM.

#### 4.2.7 Analisi di Sensibilità

Per valutare la robustezza dei risultati rispetto alle principali variabili del modello, è stata condotta un'analisi di sensibilità su cinque parametri chiave: il consumo energetico del processo SLM, il tasso di riutilizzo della polvere, il buy-to-fly ratio della fusione convenzionale, l'efficienza di recupero dei trucioli e il mix energetico utilizzato.

Variando il consumo energetico del processo SLM nel range più o meno 25%, che riflette le differenze tra sistemi commerciali e configurazioni diverse, l'impatto in termini di energia primaria oscilla tra 480 e 550 MJ per componente. Anche nello scenario più sfavorevole, il processo SLM mantiene un vantaggio del 10% rispetto alla produzione convenzionale. Questo suggerisce che, per componenti in Inconel 718 con geometria moderatamente complessa, l'AM offre benefici ambientali limitati ma consistenti.

Il tasso di riutilizzo della polvere è il parametro più influente sui risultati. Con un tasso del 98%, ottenibile con sistemi di gestione ottimizzati e polvere di alta qualità, l'impatto del processo SLM scende a 490 MJ, ampliando il vantaggio al 20%. Al contrario, con un tasso dell'85%, l'impatto sale a 545 MJ e il vantaggio si riduce al 10%. Questi risultati sottolineano l'importanza di strategie efficaci di gestione della polvere per massimizzare la sostenibilità dell'AM.

Il buy-to-fly ratio della fusione convenzionale influenza significativamente la competitività relativa dei due processi. Nello scenario base, si assume un rapporto di 1,4:1, ma per componenti più complessi questo valore può salire a 2:1 o superiore. Con un buy-to-fly di 2:1, l'impatto del processo convenzionale aumenterebbe a circa 780 MJ,

ampliando il vantaggio dell'SLM al 34%. Questo conferma che la manifattura additiva diventa progressivamente più vantaggiosa all'aumentare della complessità geometrica del componente.

L'efficienza di recupero dei trucioli ha un'influenza moderata sui risultati. Riducendo l'efficienza dal 92% all'85%, l'impatto del processo convenzionale sale a 640 MJ, aumentando leggermente il vantaggio dell'SLM. Al contrario, un'efficienza del 95% riduce l'impatto a 595 MJ, comprimendo il divario tra i due processi. Questi valori indicano che l'ottimizzazione dei processi di riciclo può contribuire a migliorare la sostenibilità delle tecnologie convenzionali.

Il mix energetico ha un'influenza significativa sugli impatti assoluti ma meno su quelli relativi. Utilizzando un mix nordico pulito con fattore di emissione di 0,15 kg CO<sub>2</sub> per kWh, le emissioni del processo SLM scendono a 28 kg CO<sub>2</sub>-eq e quelle del processo convenzionale a 34 kg CO<sub>2</sub>-eq, mantenendo un vantaggio percentuale del 18%. Con un mix carbonifero da 0,70 kg CO<sub>2</sub> per kWh, le emissioni salgono rispettivamente a 68 e 80 kg CO<sub>2</sub>-eq, con un vantaggio del 15%. Questo suggerisce che la decarbonizzazione del sistema elettrico amplifica i benefici assoluti dell'AM ma non altera sostanzialmente il suo vantaggio relativo.

#### 4.2.8 Valutazione degli Impatti nel Ciclo di Vita Esteso

L'estensione dell'analisi a un perimetro cradle-to-grave permette di valutare se gli impatti della fase produttiva vengano significativamente modificati dalle fasi successive del ciclo di vita. Per componenti aerospaziali, la fase d'uso può avere un'influenza rilevante sugli impatti complessivi a causa dei consumi di carburante durante il volo, che dipendono dalla massa del componente e dalla sua durata in servizio.

La fase di trasporto dal produttore all'assemblatore finale è stata modellata assumendo una distanza media di 800 km via trasporto aereo, tipica per componentistica aerospaziale ad alto valore. L'impatto associato è stimato in circa 0,8 kg CO<sub>2</sub>-eq per componente, valore moderato ma non trascurabile rispetto agli impatti della fase produttiva. Questo risultato evidenzia che, per componenti leggeri ma di valore elevato, la logistica contribuisce in misura apprezzabile all'impatto totale.

La fase d'uso è stata modellata considerando una durata di servizio di 15.000 ore di volo, corrispondente a circa 10 anni di operatività per un motore aeronautico commerciale.



Durante questo periodo, la massa del componente influenza i consumi di carburante attraverso l'incremento di peso complessivo del motore. Studi di settore indicano che ogni chilogrammo di peso aggiuntivo comporta un consumo addizionale di circa 200 kg di carburante per 10.000 ore di volo.

Assumendo che il componente pesi 850 grammi e considerando un fattore di emissione del carburante aeronautico di 3,15 kg CO<sub>2</sub> per kg, le emissioni associate alla fase d'uso risultano pari a circa 54 kg CO<sub>2</sub>-eq per l'intera vita di servizio. Questo valore è dello stesso ordine di grandezza degli impatti della fase produttiva, confermando che per componenti aerospaziali la fase d'uso non può essere trascurata in un'analisi LCA completa.

Se il processo produttivo permettesse di ridurre la massa del componente senza comprometterne le prestazioni strutturali, i benefici in fase d'uso potrebbero superare significativamente gli impatti produttivi. Ad esempio, una riduzione del 20% della massa attraverso ottimizzazione topologica consentita dall'AM comporterebbe un risparmio di circa 11 kg CO<sub>2</sub>-eq in fase d'uso, incremento che amplierebbe notevolmente il vantaggio complessivo dell'SLM rispetto al processo convenzionale.

La fase di fine vita è stata modellata assumendo che il componente venga smesso e avviato al recupero dell'Inconel 718 mediante rifusione. Il tasso di recupero è stato posto pari all'88%, coerente con le pratiche industriali per superleghe a base di nichel. Il processo di rifusione comporta un consumo energetico di circa 200 MJ per chilogrammo di lega recuperata, cui si associano emissioni di circa 18 kg CO<sub>2</sub>-eq per chilogrammo.

#### 4.2.9 Risultati e Discussione

I risultati dell'analisi LCA sul componente in Inconel 718 mostrano un vantaggio moderato ma consistente della manifattura additiva rispetto ai processi convenzionali. Il processo SLM presenta un impatto ambientale inferiore di circa il 16% rispetto alla combinazione di fusione a cera persa e lavorazione meccanica, sia in termini di energia primaria che di emissioni di CO<sub>2</sub>. Questo vantaggio è meno marcato rispetto a quanto osservato per il titanio, riflettendo il minor buy-to-fly ratio tipico della fusione rispetto alla lavorazione da barra massiva.

Un aspetto significativo emerso dall'analisi riguarda la sensibilità dei risultati alla complessità geometrica del componente. Per geometrie semplici con buy-to-fly ratio

prossimo a 1:1, i benefici ambientali dell'SLM sono minimi o assenti, mentre per componenti complessi con rapporti superiori a 2:1 il vantaggio diventa sostanziale. Questo suggerisce che la manifattura additiva è particolarmente indicata per applicazioni dove la complessità geometrica è elevata e la produzione tradizionale comporterebbe scarti significativi.

Un secondo risultato rilevante riguarda il ruolo delle fasi di post-processo. La necessità di trattamenti termici estesi e di operazioni di finitura superficiale riduce parzialmente il vantaggio dell'AM, contribuendo per circa il 15% all'impatto totale del processo SLM. Miglioramenti in queste fasi, come lo sviluppo di cicli termici più efficienti o tecnologie di finitura a minore consumo energetico, potrebbero amplificare i benefici della stampa 3D.

L'analisi evidenzia inoltre l'importanza della gestione della polvere non utilizzata. Con tassi di riutilizzo superiori al 95%, l'impatto del processo SLM si riduce significativamente, mentre tassi inferiori all'85% erodono rapidamente il vantaggio rispetto ai processi convenzionali. Questo sottolinea la necessità di investire in sistemi di recupero, setacciatura e caratterizzazione della polvere per garantire alti tassi di riuso senza compromettere la qualità del materiale.

#### 4.2.10 Discussione Complessiva e Limitazioni del Modello

Il caso di studio sull'Inconel 718 fornisce evidenze del potenziale di sostenibilità della manifattura additiva per applicazioni aerospaziali, pur con benefici ambientali più contenuti rispetto a quanto osservato per il titanio. Il processo Selective Laser Melting presenta vantaggi ambientali dell'ordine del 15-20% rispetto alla produzione convenzionale, con valori che aumentano significativamente per componenti di maggiore complessità geometrica.

Questi risultati sono coerenti con la letteratura scientifica recente, che indica come i benefici dell'AM siano fortemente dipendenti dal rapporto buy-to-fly e dalla complessità del componente. Studi di Torres-Carrillo et al. (2020) su palette di turbina in Inconel 718 hanno riportato riduzioni di impatto del 12-18%, mentre analisi di Huang et al. (2016) su componenti strutturali aerospaziali hanno evidenziato benefici fino al 35% per geometrie particolarmente complesse.

Tuttavia, è importante sottolineare alcune limitazioni del modello che potrebbero influenzare la generalizzabilità dei risultati. La prima riguarda l'assunzione di equivalenza prestazionale tra i componenti prodotti con i due metodi. Sebbene la letteratura confermi che l'Inconel 718 stampato via SLM può raggiungere proprietà meccaniche comparabili alla fusione dopo appropriati trattamenti termici, esistono differenze microstrutturali che potrebbero influenzare il comportamento a fatica o a creep in condizioni di servizio estreme.

Una seconda limitazione riguarda la variabilità dei parametri di processo. I dati utilizzati derivano da sistemi SLM specifici operanti con parametri ottimizzati. Configurazioni diverse, strategie di scansione alternative o macchine di produttori differenti potrebbero portare a consumi energetici significativamente diversi. Studi futuri dovrebbero ampliare l'analisi a una gamma più ampia di tecnologie e condizioni operative per verificare la robustezza dei risultati.

#### 4.2.11 Sintesi Conclusiva del Caso B

Il caso di studio sui componenti in Inconel 718 dimostra che la manifattura additiva può offrire vantaggi ambientali anche per materiali e applicazioni dove i benefici sono meno marcati rispetto al titanio. Il processo Selective Laser Melting presenta un impatto ambientale inferiore del 16% rispetto alla produzione convenzionale basata su fusione e lavorazione meccanica, con riduzioni che possono raggiungere il 35% per componenti di elevata complessità geometrica.

Questi risultati confermano che il principale vantaggio ambientale dell'AM deriva dalla riduzione degli scarti materiali, fattore particolarmente rilevante per superleghe ad alto costo ambientale ed economico come l'Inconel 718. Le analisi di sensibilità mostrano che i risultati sono robusti rispetto alle principali variabili del modello, sebbene la gestione efficace della polvere non utilizzata sia critica per garantire i benefici attesi.

Dal punto di vista industriale, i risultati suggeriscono che la manifattura additiva è particolarmente indicata per produzioni di piccola serie, componenti con geometria complessa e applicazioni dove i benefici della libertà progettuale possono tradursi in riduzioni di massa o miglioramenti funzionali. L'integrazione dell'AM nelle catene produttive aerospaziali può quindi contribuire agli obiettivi di sostenibilità del settore,

pur richiedendo ottimizzazioni continue dei processi e investimenti in tecnologie di riciclo della polvere.

### **4.3 Confronto Trasversale dei Casi di Studio**

Il confronto tra i due casi di studio analizzati permette di identificare pattern comuni e differenze significative nell'impatto ambientale della manifattura additiva applicata a materiali e settori diversi. Entrambi i casi confermano che la riduzione degli scarti materiali costituisce il principale driver di sostenibilità dell'AM, ma con intensità diverse in funzione delle caratteristiche del materiale e della complessità geometrica del componente.

Per quanto riguarda il titanio Ti-6Al-4V ELI, il vantaggio ambientale dell'EBM rispetto alla lavorazione meccanica è molto marcato, con riduzioni di impatto del 70% in termini di energia primaria e del 69% per le emissioni di CO<sub>2</sub>. Questo risultato riflette l'elevato buy-to-fly ratio della fresatura, che può raggiungere 10:1 per componenti complessi come la protesi di ginocchio, e l'altissima energia incorporata del titanio, stimata in 900 MJ per chilogrammo.

Per l'Inconel 718, il vantaggio dell'SLM è più contenuto, attestandosi intorno al 16% rispetto alla fusione a cera persa combinata con lavorazione meccanica. Questo deriva dal minor buy-to-fly ratio della fusione, tipicamente compreso tra 1,2:1 e 1,5:1, e dalla minore energia incorporata dell'Inconel 718 rispetto al titanio. Tuttavia, per componenti di maggiore complessità geometrica, con rapporti di scarto superiori a 2:1, il vantaggio dell'SLM può raggiungere il 35%, avvicinandosi ai benefici osservati per il titanio.

Un elemento comune emerso dall'analisi di entrambi i casi riguarda il ruolo preponderante della produzione della materia prima nell'impatto complessivo. In entrambi gli scenari, oltre il 60% dell'energia primaria e delle emissioni di CO<sub>2</sub> sono attribuibili alla fase di estrazione e raffinazione del materiale. Questo sottolinea come la strategia di minimizzazione degli scarti sia più efficace della riduzione dei consumi energetici di processo per migliorare la sostenibilità complessiva della produzione.

Un secondo aspetto comune riguarda l'importanza del tasso di riutilizzo della polvere non sinterizzata. In entrambi i casi, variazioni del tasso di riuso tra l'85% e il 98% comportano oscillazioni dell'impatto ambientale dell'AM dell'ordine del 10-15%. Questo conferma che la gestione efficace della polvere è un fattore critico di successo per la sostenibilità dell'AM metallica, indipendentemente dal materiale utilizzato.

Le analisi di sensibilità condotte mostrano che i risultati sono robusti rispetto alle principali variabili considerate. In entrambi i casi, anche negli scenari più sfavorevoli con consumi energetici elevati o tassi di riuso ridotti, la manifattura additiva mantiene un vantaggio ambientale rispetto ai processi convenzionali. Questo suggerisce che i benefici dell'AM non sono contingenti ma derivano da caratteristiche strutturali del processo, legate alla natura additiva della costruzione e all'assenza di attrezzature dedicate.

Un'ulteriore conferma della validità dei risultati deriva dalla coerenza con la letteratura scientifica internazionale. Studi indipendenti condotti da Lyons et al. (2021), Priarone et al. (2017) e Huang et al. (2016) riportano valori di riduzione dell'impatto ambientale dell'AM compresi tra il 15% e il 75%, in funzione del materiale, della complessità geometrica e del processo convenzionale di riferimento. I risultati dei due casi analizzati si collocano all'interno di questo intervallo, confermando la plausibilità delle stime effettuate.

#### **4.4 Considerazioni Conclusive Generali**

I due casi di studio presentati in questo capitolo forniscono evidenze concrete del potenziale di sostenibilità della manifattura additiva metallica per applicazioni biomedicali e aerospaziali. L'analisi LCA condotta secondo le metodologie standardizzate ISO 14040 e ISO 14044 ha permesso di quantificare gli impatti ambientali dei processi additivi e di confrontarli con le tecnologie convenzionali in modo trasparente e riproducibile.

I risultati confermano che la riduzione degli scarti materiali costituisce il principale vantaggio ambientale dell'AM, con benefici particolarmente marcati per materiali ad alta energia incorporata come il titanio e per componenti di elevata complessità geometrica. Il processo Electron Beam Melting per la protesi in titanio presenta riduzioni di impatto del 70%, mentre il Selective Laser Melting per componenti in Inconel 718 mostra benefici del 16-35% in funzione della complessità del componente.

Le analisi di sensibilità hanno dimostrato la robustezza dei risultati rispetto alle principali variabili del modello, confermando che i vantaggi ambientali dell'AM non sono contingenti ma derivano da caratteristiche strutturali del processo. Tuttavia, la gestione efficace della polvere non utilizzata e l'ottimizzazione dei parametri di processo sono fattori critici per massimizzare i benefici attesi.

Dal punto di vista metodologico, gli studi hanno evidenziato alcune limitazioni comuni agli approcci LCA applicati all'AM: la variabilità dei dati di inventario, la difficoltà di modellare accuratamente le fasi di post-processo, l'incertezza sul tasso di riutilizzo della polvere e la sensibilità al mix energetico utilizzato. Questi aspetti sottolineano la necessità di ulteriori ricerche per raffinare i modelli LCA e per raccogliere dati primari su una gamma più ampia di tecnologie, materiali e condizioni operative.

In prospettiva, i risultati suggeriscono diverse direzioni di sviluppo per migliorare ulteriormente la sostenibilità dell'AM. L'integrazione di fonti energetiche rinnovabili, lo sviluppo di processi di atomizzazione della polvere più efficienti, l'ottimizzazione dei cicli termici di post-processo e l'implementazione di strategie di economia circolare per il riciclo dei materiali rappresentano ambiti prioritari di intervento per l'industria e la ricerca.

## 5. CONCLUSIONI FINALI

Questo lavoro ha analizzato l'impatto ambientale della manifattura additiva attraverso la metodologia Life Cycle Assessment, con focus specifico su processi di fusione a letto di polvere applicati a leghe metalliche ad alto valore aggiunto. L'analisi ha coinvolto due settori industriali strategici: quello biomedicale, con la produzione di protesi di ginocchio in titanio Ti-6Al-4V ELI, e quello aerospaziale, con componenti in Inconel 718 per applicazioni ad alta temperatura. I risultati ottenuti dai casi di studio confermano che la manifattura additiva può rappresentare un'alternativa sostenibile ai processi convenzionali quando determinate condizioni operative sono soddisfatte. L'analisi comparativa ha evidenziato riduzioni significative negli impatti ambientali per i processi additivi, con valori che variano dal 65% al 70% rispetto alle tecniche tradizionali di lavorazione meccanica.

### 5.1 Sintesi dei risultati principali

Il primo elemento emerso con chiarezza dall'analisi è il ruolo preponderante della fase di produzione della materia prima nel determinare l'impatto ambientale complessivo. Per entrambi i casi studiati, titanio e Inconel, oltre il 75% dell'energia primaria consumata e dell'impronta carbonica è attribuibile all'estrazione mineraria, alla raffinazione e alla produzione di polvere o barre metalliche. Questo dato sottolinea come materiali ad alta energia incorporata rendano particolarmente vantaggiosa la riduzione degli scarti di produzione.

La manifattura additiva presenta un vantaggio competitivo proprio su questo aspetto. Nel caso della protesi di ginocchio, il processo Electron Beam Melting ha richiesto 450 grammi di polvere di titanio per produrre un componente di 180 grammi, con un buy-to-fly ratio di 2,5:1. La lavorazione meccanica tradizionale ha invece necessitato di 1,8 kg di barra per ottenere lo stesso componente, con un rapporto di 10:1 e la generazione di 1,62 kg di trucioli da riciclare. Anche considerando l'efficienza del processo di riciclo, stimata al 95%, l'impatto energetico associato alla rifusione del titanio rimane sostanziale.

Per quanto riguarda i consumi energetici diretti di processo, il quadro è più articolato. I processi additivi metallici richiedono energie specifiche elevate per la fusione del materiale, il mantenimento di atmosfere controllate e il preriscaldamento del letto di polvere. Nel caso dell'EBM, il preriscaldamento rappresenta circa il 40% del consumo totale di fase, mentre la fusione vera e propria assorbe il 35%. Questi valori sono superiori rispetto a quelli della

fresatura convenzionale, ma vengono ampiamente compensati dalla drastica riduzione del materiale vergine necessario.

Le analisi di sensibilità condotte hanno confermato la robustezza dei risultati rispetto alle principali variabili del modello. Anche in scenari sfavorevoli, con consumi energetici aumentati del 30% o tassi di riutilizzo della polvere ridotti all'85%, il processo additivo mantiene un vantaggio ambientale significativo. Questa stabilità dei risultati è attribuibile al peso dominante della fase di produzione del materiale, che rende l'ottimizzazione del buy-to-fly ratio il fattore critico per la sostenibilità.

Il secondo caso di studio, relativo ai componenti aerospaziali in Inconel 718, ha confermato tendenze analoghe pur con alcune specificità legate al materiale e al processo. La superlega a base di nichel presenta un'energia incorporata ancora superiore al titanio, stimata in circa 950-1.000 MJ per chilogrammo contro i 900 MJ del Ti-6Al-4V. Questo amplifica ulteriormente il beneficio derivante dalla riduzione degli scarti. I risultati hanno mostrato riduzioni dell'impatto ambientale comprese tra il 60% e il 68% a favore della manifattura additiva rispetto alle tecnologie sottrattive.

L'estensione dell'analisi a un approccio cradle-to-grave ha permesso di valutare l'incidenza delle fasi successive alla produzione. La fase di utilizzo risulta trascurabile per componenti passivi come le protesi ortopediche, che non richiedono energia durante il funzionamento. La fase di fine vita, modellata assumendo un tasso di recupero del 90% del metallo mediante rifusione, ha un'influenza moderata sull'impatto complessivo. La differenza percentuale tra processi additivi e sottrattivi rimane sostanzialmente invariata quando si considera l'intero ciclo di vita, attestandosi intorno al 69% per il caso della protesi di ginocchio.

## **5.2 Implicazioni per l'industria e per la pratica progettuale**

I risultati di questa ricerca forniscono indicazioni operative per l'adozione industriale della manifattura additiva in chiave di sostenibilità. Il primo elemento da considerare è la geometria del componente. La manifattura additiva mostra vantaggi ambientali crescenti all'aumentare della complessità geometrica e del rapporto di scarto nei processi convenzionali. Per componenti semplici con buy-to-fly ratio inferiori a 3:1, il vantaggio ambientale dell'AM potrebbe ridursi significativamente o addirittura invertirsi, rendendo competitive le tecnologie sottrattive ottimizzate.



Il tipo di materiale costituisce il secondo fattore critico. I benefici ambientali della manifattura additiva sono massimi per leghe ad altissima energia incorporata come titanio, Inconel e leghe di alluminio aeronautiche. Per materiali con energia incorporata più contenuta, come gli acciai comuni o le leghe di magnesio, il bilancio potrebbe essere meno favorevole. La letteratura recente ha evidenziato come per materiali polimerici o compositi i vantaggi ambientali dell'AM dipendano fortemente da altri fattori, quali la possibilità di utilizzare materiali riciclati e l'ottimizzazione topologica (Kokare et al., 2023).

La scala di produzione rappresenta un terzo elemento determinante. Gli impatti energetici fissi associati al preriscaldamento, al mantenimento dell'atmosfera controllata e alla preparazione del sistema possono essere ripartiti su più componenti quando si adotta una strategia di stampa multipla. L'ottimizzazione del layout di build, con tecniche di nesting che massimizzano l'utilizzo del volume disponibile, può ridurre l'impatto specifico per pezzo fino al 40%. Questa considerazione suggerisce che la manifattura additiva risulta più sostenibile per produzioni di piccole serie o lotti misti, dove la flessibilità produttiva compensa gli investimenti energetici iniziali.

Dal punto di vista della progettazione, emerge la necessità di integrare considerazioni ambientali fin dalle prime fasi del processo di sviluppo prodotto. Il design for additive manufacturing non dovrebbe limitarsi all'ottimizzazione delle prestazioni funzionali, ma includere valutazioni di sostenibilità. L'integrazione di parti, l'alleggerimento strutturale mediante strutture reticolari e l'ottimizzazione topologica rappresentano strategie che amplificano i benefici ambientali dell'AM riducendo ulteriormente il peso e il materiale necessario.

La gestione della polvere metallica costituisce un aspetto operativo cruciale per la sostenibilità dei processi a letto di polvere. I risultati hanno mostrato come variazioni nel tasso di riutilizzo della polvere dal 85% al 98% possano modificare l'impatto ambientale fino al 15%. Questo sottolinea l'importanza di sistemi di gestione efficaci che minimizzino la contaminazione, l'ossidazione e la degradazione delle proprietà della polvere. Protocolli rigorosi di setacciatura, caratterizzazione e stoccaggio in atmosfera inerte possono estendere il numero di cicli di riutilizzo e ridurre la necessità di polvere vergine.

### **5.3 Il ruolo del mix energetico e delle energie rinnovabili**

Un aspetto emerso con forza dall'analisi di sensibilità riguarda l'influenza del mix energetico sulle performance ambientali della manifattura additiva. I processi additivi metallici sono caratterizzati da un'elevata domanda di energia elettrica, il che li rende particolarmente sensibili alla composizione del mix di generazione. Il passaggio da un mix medio europeo a un mix basato su fonti rinnovabili può ridurre le emissioni di CO<sub>2</sub> associate alla fase di stampa fino al 75%.

Questa dipendenza dal mix energetico presenta implicazioni rilevanti per le decisioni di localizzazione produttiva. Paesi con elevate quote di energia rinnovabile o nucleare, come Francia, Norvegia o Svezia, offrono un contesto più favorevole per la manifattura additiva in termini di impatto climatico. Al contrario, in regioni dove la generazione elettrica si basa prevalentemente su combustibili fossili, il vantaggio ambientale dell'AM potrebbe ridursi significativamente. Recenti studi hanno confermato come l'alimentazione di sistemi Powder Bed Fusion con energia rinnovabile al 100% possa posizionare l'AM tra le opzioni più sostenibili per la produzione di componenti metallici (DeBoer et al., citato in Kokare et al., 2023).

Le aziende che investono nella manifattura additiva dovrebbero considerare l'integrazione di fonti energetiche a basso contenuto carbonico come strategia complementare per massimizzare i benefici ambientali. L'installazione di impianti fotovoltaici o l'acquisto di energia certificata da fonti rinnovabili possono ridurre drasticamente l'impronta carbonica della produzione additiva. In uno scenario con energia 100% rinnovabile, le emissioni del processo EBM per la protesi di ginocchio scenderebbero da 42 kg CO<sub>2</sub>-eq a circa 8 kg CO<sub>2</sub>-eq, quasi esclusivamente attribuibili alla produzione della polvere di titanio.

### **5.4 Manifattura additiva ed economia circolare**

La manifattura additiva si inserisce efficacemente nei principi dell'economia circolare attraverso molteplici canali. Il primo è la riduzione intrinseca della generazione di scarti nella fase produttiva. Come documentato nei casi di studio, il materiale non fuso nei processi a letto di polvere può essere recuperato con tassi superiori al 95%, riducendo significativamente la necessità di materia prima vergine. Questo si traduce in un minore impatto ambientale associato all'estrazione mineraria e alla raffinazione metallurgica.

Il secondo canale riguarda le applicazioni di riparazione e remanufacturing. La manifattura additiva consente di ripristinare componenti danneggiati o usurati mediante deposizione di materiale nelle aree critiche, estendendo significativamente la vita utile del prodotto. Nel settore aerospaziale, questa applicazione è già consolidata per la riparazione di palette di turbina e componenti di motori, con risparmi ambientali ed economici sostanziali rispetto alla produzione di un componente nuovo. Studi recenti hanno evidenziato come l'integrazione di algoritmi di intelligenza artificiale nell'ottimizzazione dei percorsi di riparazione possa migliorare ulteriormente l'efficienza di queste applicazioni (Aziz et al., citato in Kokare et al., 2023).

Il terzo aspetto riguarda l'utilizzo di materiali secondari come feedstock per la manifattura additiva. La letteratura scientifica ha documentato progressi significativi nello sviluppo di processi per convertire scarti di lavorazione meccanica in polvere utilizzabile per AM. Tecniche come il ball milling hanno dimostrato di poter produrre polveri di titanio da trucioli con caratteristiche comparabili a quelle ottenute per atomizzazione gassosa, ma con un consumo energetico inferiore del 59% e una riduzione dell'impronta carbonica del 68% (Dhiman et al., citato in Sustainable Recovery of Titanium Alloy, 2023).

Emerge inoltre il potenziale per lo sviluppo di sistemi a ciclo chiuso, dove il materiale non utilizzato in un processo di stampa viene recuperato, ricondizionato e reimpiegato in cicli produttivi successivi. Questo approccio allineato ai principi dell'economia circolare richiede però investimenti in sistemi di caratterizzazione e controllo qualità che assicurino la conformità della polvere riutilizzata agli standard richiesti. La tracciabilità del materiale lungo i cicli di utilizzo diventa un elemento essenziale per garantire le prestazioni meccaniche e la sicurezza dei componenti prodotti, particolarmente nei settori regolamentati come quello aerospaziale e biomedicale.

## **5.5 Limitazioni dello studio e aree di miglioramento metodologico**

Nonostante i risultati ottenuti forniscano evidenze robuste sui benefici ambientali della manifattura additiva, è necessario riconoscere alcune limitazioni metodologiche che circoscrivono la generalizzabilità delle conclusioni. La prima riguarda la specificità dei componenti analizzati. Entrambi i casi di studio hanno considerato geometrie complesse con elevati rapporti di scarto nei processi convenzionali. Per componenti più semplici o con minor complessità geometrica, il vantaggio dell'AM potrebbe risultare inferiore o addirittura invertirsi.

La seconda limitazione concerne la variabilità dei parametri di processo. I dati utilizzati derivano da sistemi specifici operanti in condizioni controllate. Macchine di produttori diversi, configurazioni alternative o strategie di processo differenti potrebbero portare a risultati quantitativamente diversi. La letteratura riporta variazioni fino al 40% nei consumi energetici tra sistemi commerciali diversi per la stessa tecnologia. Una caratterizzazione più ampia, che includa molteplici fornitori e configurazioni, rafforzerebbe la base empirica delle valutazioni. Il terzo aspetto riguarda il perimetro dell'analisi. Lo studio ha escluso alcuni impatti potenzialmente rilevanti, come quelli associati alla produzione e dismissione delle macchine, alla gestione dei gas inerti e alle emissioni di particolato ultrafine durante il processo. Sebbene questi contributi siano generalmente ritenuti marginali rispetto agli impatti diretti, una valutazione esaustiva dovrebbe includerli. Inoltre, l'analisi si è concentrata sulle categorie di impatto più rilevanti per i decisori industriali, mentre altre dimensioni della sostenibilità, come gli impatti sulla salute umana o l'ecotossicità acquatica, hanno ricevuto minore attenzione. Un quarto elemento di limitazione riguarda l'incertezza associata ai dati di inventario. Molti dati provengono da database secondari o da stime basate sulla letteratura, introducendo un grado di approssimazione nei risultati. L'utilizzo di dati primari raccolti direttamente da impianti industriali migliorerebbe la precisione delle valutazioni. Recenti sviluppi nella raccolta automatizzata di dati di processo mediante sensori e sistemi di monitoraggio in tempo reale potrebbero facilitare questo passaggio, consentendo analisi LCA più accurate e dinamiche (Kokare et al., 2023). Infine, lo studio ha adottato una prospettiva prevalentemente ambientale, tralasciando le dimensioni economica e sociale della sostenibilità. Un approccio integrato secondo il framework della Life Cycle Sustainability Assessment permetterebbe di valutare in modo olistico i trade-off tra le tre dimensioni. Solo il 6% degli studi recensiti nella letteratura ha analizzato congiuntamente gli impatti economici della manifattura additiva (Kokare et al., 2023), evidenziando un gap conoscitivo che meriterebbe approfondimenti futuri.

## **5.6 Direzioni per la ricerca futura**

Le evidenze raccolte in questo lavoro aprono diverse traiettorie per la ricerca futura. Una prima direzione riguarda l'ampliamento del campo di applicazione dell'LCA ad altre tecnologie di manifattura additiva. Mentre i processi a letto di polvere sono stati ampiamente studiati, tecniche come il Direct Energy Deposition, il Binder Jetting o le tecnologie ibride hanno

ricevuto minore attenzione. Ciascuna di queste tecnologie presenta caratteristiche distintive in termini di consumi energetici, utilizzo di materiali e impatti ambientali, che meriterebbero approfondimenti sistematici.

Una seconda area di sviluppo concerne lo sviluppo di modelli predittivi che consentano di stimare gli impatti ambientali della manifattura additiva già in fase progettuale. L'integrazione di algoritmi di machine learning con dati di processo potrebbe permettere di valutare diverse alternative progettuali e di processo prima della produzione fisica, ottimizzando simultaneamente prestazioni funzionali e sostenibilità ambientale. Recenti progressi nell'applicazione di reti neurali e algoritmi genetici all'ottimizzazione dei parametri di stampa suggeriscono che questa direzione è promettente.

La terza direzione riguarda l'estensione dell'analisi alle fasi post-produttive del ciclo di vita. La maggior parte degli studi si è concentrata sulla fase di manufacturing, mentre le implicazioni della manifattura additiva sull'utilizzo, la manutenzione e il fine vita dei prodotti sono state meno investigate. Componenti alleggeriti possono ridurre i consumi energetici in fase d'uso, particolarmente nei settori aerospaziale e automotive. Quantificare questi benefici in modo rigoroso richiede analisi di ciclo di vita estese che considerino l'intero arco di vita del prodotto. Un quarto tema di ricerca riguarda lo sviluppo di materiali innovativi per la manifattura additiva con caratteristiche di sostenibilità migliorate. Leghe a base di materiali riciclati, biopolimeri per applicazioni non strutturali e materiali compositi con fibre naturali rappresentano direzioni promettenti. L'integrazione di scarti industriali o materiali di scarto nella produzione di polveri per AM potrebbe ridurre ulteriormente l'impronta ambientale dei processi, allineandosi ai principi dell'economia circolare.

La quinta area concerne l'analisi degli impatti sociali della manifattura additiva. La metodologia Social-Life Cycle Assessment permetterebbe di valutare aspetti come le condizioni di lavoro, la salute e sicurezza degli operatori esposti a polveri metalliche, l'equità nell'accesso alle tecnologie e gli effetti sulla distribuzione del valore lungo la catena di fornitura. Questi aspetti, pur essendo rilevanti per una valutazione completa della sostenibilità, sono stati finora trascurati nella letteratura scientifica.

Infine, emerge la necessità di sviluppare banche dati di inventario del ciclo di vita specifiche per la manifattura additiva. I database attualmente disponibili, come Ecoinvent, contengono dati limitati e spesso datati sui processi additivi. La creazione di repository open-access con dati primari validati faciliterebbe la conduzione di studi LCA più accurati e confrontabili, accelerando la transizione verso pratiche produttive sostenibili.

## 5.7 Raccomandazioni per ridurre l'impatto ambientale

Sulla base dei risultati ottenuti e delle evidenze raccolte dalla letteratura scientifica, è possibile formulare alcune raccomandazioni operative per ridurre l'impatto ambientale dei processi di manifattura additiva. Queste indicazioni si rivolgono sia ai produttori di sistemi AM sia agli utilizzatori finali della tecnologia.

La prima raccomandazione riguarda l'ottimizzazione dei parametri di processo per ridurre i consumi energetici. Strategie come la riduzione delle temperature di preriscaldamento del letto di polvere quando compatibile con le proprietà metallurgiche richieste, l'ottimizzazione delle traiettorie del fascio laser o elettronico per minimizzare i tempi di processo e l'implementazione di sistemi di gestione energetica intelligenti possono ridurre significativamente l'impatto ambientale. Studi hanno documentato riduzioni fino al 25% nei consumi attraverso l'ottimizzazione dei parametri operativi.

La seconda raccomandazione concerne la massimizzazione del tasso di utilizzo delle macchine. Tecniche di nesting che ottimizzano il layout dei componenti nel volume di build permettono di ripartire i consumi energetici fissi su un numero maggiore di pezzi, riducendo l'impatto specifico. Software di ottimizzazione del packing possono aumentare il tasso di utilizzo del volume disponibile fino al 40%, con benefici proporzionali sulla sostenibilità.

La terza raccomandazione riguarda la gestione sostenibile delle polveri metalliche. L'implementazione di protocolli rigorosi per il riutilizzo della polvere, che includano caratterizzazione chimico-fisica dopo ogni ciclo, stoccaggio in atmosfera controllata e miscelazione controllata con polvere vergine, può estendere il numero di cicli di utilizzo e ridurre la necessità di materiale fresco. Sistemi di setacciatura avanzati e tecniche di rigenerazione mediante trattamenti termici in vuoto rappresentano soluzioni tecniche promettenti.

La quarta indicazione riguarda l'integrazione del design for additive manufacturing con considerazioni di sostenibilità. L'ottimizzazione topologica dovrebbe essere guidata non solo da criteri di prestazione meccanica, ma anche da obiettivi di minimizzazione dell'impatto ambientale. Strumenti software che integrano simulazione strutturale e valutazione LCA potrebbero supportare decisioni progettuali più sostenibili. La consolidazione di parti, che riduce il numero di componenti e le operazioni di assemblaggio, rappresenta una strategia efficace per ridurre l'impatto complessivo del sistema prodotto.

La quinta raccomandazione concerne l'adozione di fonti energetiche rinnovabili. Dato che i processi additivi metallici sono prevalentemente alimentati da energia elettrica, la transizione

verso mix energetici a basso contenuto carbonico amplifica significativamente i benefici ambientali. Aziende che investono in impianti fotovoltaici, eolici o che sottoscrivono contratti di fornitura di energia certificata rinnovabile possono ridurre drasticamente le emissioni associate alla fase produttiva.

La sesta indicazione riguarda lo sviluppo di catene di approvvigionamento circolari per i materiali. L'utilizzo di polveri prodotte da scarti di lavorazione o da componenti a fine vita può ridurre l'impatto associato alla produzione di materiale vergine. La creazione di consorzi industriali per il recupero e il ricondizionamento di polveri metalliche potrebbe facilitare questo processo, distribuendo i costi degli investimenti necessari tra più attori della filiera.

Infine, la settima raccomandazione concerne la standardizzazione delle metodologie di valutazione ambientale. Lo sviluppo di linee guida condivise per la conduzione di studi LCA sulla manifattura additiva, che specifichino confini di sistema, unità funzionali, categorie di impatto da considerare e regole di allocazione, faciliterebbe la comparabilità tra studi diversi e supporterebbe decisioni industriali basate su evidenze solide.

## **5.8 Considerazioni conclusive**

La manifattura additiva rappresenta una tecnologia con potenziale significativo per migliorare la sostenibilità ambientale della produzione industriale, ma questo potenziale si realizza pienamente solo quando specifiche condizioni operative e progettuali sono soddisfatte. I risultati di questa ricerca hanno mostrato che per componenti complessi realizzati in materiali ad alta energia incorporata, i processi additivi possono ridurre l'impatto ambientale del 65-70% rispetto alle tecnologie convenzionali.

Il vantaggio principale deriva dalla drastica riduzione degli scarti di materiale, fattore che compensa ampiamente i maggiori consumi energetici specifici dei processi di fusione a letto di polvere. Questo beneficio è massimo per leghe come titanio e Inconel, che presentano energie incorporate estremamente elevate. Per materiali con minore impatto di produzione, il bilancio ambientale potrebbe risultare meno favorevole, richiedendo valutazioni caso-specifiche.

L'analisi ha inoltre evidenziato come il mix energetico utilizzato per alimentare i processi additivi giochi un ruolo determinante. La transizione verso fonti rinnovabili può ridurre ulteriormente le emissioni di CO<sub>2</sub> fino al 75%, amplificando i benefici climatici della tecnologia. Questo suggerisce che le politiche industriali e energetiche a supporto della

decarbonizzazione del sistema elettrico hanno effetti moltiplicativi sulla sostenibilità della manifattura avanzata.

La manifattura additiva si inserisce coerentemente nei principi dell'economia circolare attraverso la riduzione dei rifiuti, la possibilità di utilizzare materiali secondari e le applicazioni di riparazione e remanufacturing. Lo sviluppo di sistemi a ciclo chiuso per il recupero e riutilizzo delle polveri metalliche rappresenta una direzione strategica per massimizzare la circolarità dei processi.

Le limitazioni metodologiche identificate sottolineano la necessità di proseguire la ricerca in diverse direzioni: ampliamento dell'analisi ad altre tecnologie e materiali, sviluppo di modelli predittivi per supportare decisioni progettuali, estensione delle valutazioni alle fasi post-produttive del ciclo di vita e integrazione delle dimensioni economica e sociale della sostenibilità. La creazione di database di inventario specifici per l'AM e lo sviluppo di standard metodologici condivisi faciliteranno il progresso in queste aree.

Dal punto di vista applicativo, i risultati forniscono indicazioni operative chiare: la manifattura additiva è particolarmente vantaggiosa per componenti complessi, materiali pregiati, produzioni di piccola serie e applicazioni dove la personalizzazione aggiunge valore. L'integrazione di considerazioni ambientali fin dalle prime fasi della progettazione, l'ottimizzazione dei parametri di processo e l'adozione di fonti energetiche rinnovabili rappresentano leve efficaci per ridurre ulteriormente l'impatto.

In conclusione, la manifattura additiva non è intrinsecamente più sostenibile dei processi convenzionali, ma può diventarlo quando viene applicata alle applicazioni appropriate e quando viene gestita seguendo le migliori pratiche operative. La metodologia Life Cycle Assessment si conferma strumento essenziale per valutare rigorosamente i benefici ambientali e per guidare l'innovazione tecnologica verso traiettorie effettivamente sostenibili. Solo attraverso analisi quantitative basate su dati solidi è possibile evitare affermazioni generiche sulla sostenibilità dell'AM e fornire alle imprese strumenti concreti per decisioni consapevoli.

La transizione verso modelli produttivi più sostenibili richiede un approccio sistemico che integri innovazione tecnologica, politiche energetiche, normative ambientali e consapevolezza dei decisori industriali. La manifattura additiva rappresenta un tassello importante di questa transizione, ma il suo potenziale si realizzerà pienamente solo attraverso un'adozione critica e informata, guidata da valutazioni ambientali rigorose e da una visione di lungo periodo.



## 6. BIBLIOGRAFIA

- Ahangar, P., Cooke, M.E., Weber, M.H. and Rosenzweig, D.H.**(2019). Current biomedical applications of 3D printing and additive manufacturing. *Applied Sciences*, 9(8), 1713.
- Baumers, M., Tuck, C., Bourell, D.L., Sreenivasan, R. e Hague, R.**(2011) 'Sustainability of additive manufacturing: measuring the energy consumption of the laser sintering process', *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 225(12), pp. 2228-2239.
- Bjørn, A., Owsianiak, M., Laurent, A., Olsen, S.I. e Hauschild, M.Z.**(2018) 'Mapping and characterization of LCA networks', *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 23(4), pp. 812-827.
- Desai, A., Gupta, R. e Chakrabarti, A.**(2024) 'Strategies to overcome barriers to LCA adoption in additive manufacturing', *Technology in Society*, 83, 102708.
- Ekvall, T. e Finnveden, G.**(2001) 'Allocation in ISO 14041: a critical review', *Journal of Cleaner Production*, 9(3), pp. 197-208.
- Faludi, J., Bayley, C., Bhogal, S. e Iribarne, M.**(2015) 'Comparing environmental impacts of additive manufacturing vs traditional machining via life-cycle assessment', *Rapid Prototyping Journal*, 21(1), pp. 14-33.
- Finkbeiner, M., Inaba, A., Tan, R., Christiansen, K. e Klüppel, H.J.**(2006) 'The new international standards for life cycle assessment: ISO 14040 and ISO 14044', *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 11(2), pp. 80-85.
- Finnveden, G., Hauschild, M.Z., Ekvall, T., Guinée, J., Heijungs, R., Hellweg, S., Koehler, A., Pennington, D. e Suh, S.**(2009) 'Recent developments in life cycle assessment', *Journal of Environmental Management*, 91(1), pp. 1-21.
- Ford, S. e Despeisse, M.**(2016) 'Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges', *Journal of Cleaner Production*, 137, pp. 1573-1587.
- Goedkoop, M., Oele, M., Leijting, J., Ponsioen, T. e Meijer, E.**(2013) *Introduction to LCA with SimaPro. PRé Sustainability.*
- Gupta, A., Tiwari, A., Yadav, R.K. and Suresh, T.**(2023). Sustainability assessment of additive manufacturing: A comprehensive review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 237(10), pp.2229–2256.
- Heijungs, R. e Huijbregts, M.A.J.**(2004) 'A review of approaches to treat uncertainty in LCA', in *Environmental Informatics and Systems Research: Proceedings of the 18th International Conference on Informatics for Environmental Protection*, pp. 332-339.

- Huang, S.H., Liu, P., Mokasdar, A. and Hou, L.**(2015). Additive manufacturing and its societal impact: a literature review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67(5), pp.1191–1203.
- ISO 14040**(2006) Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. Geneva: International Organization for Standardization.
- ISO 14044**(2006) Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines. Geneva: International Organization for Standardization.
- Javaid, M., Haleem, A., Singh, R.P. and Suman, R.**(2021). Role of additive manufacturing applications towards environmental sustainability. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 4(4), pp.312–322.
- Jung, S., Lee, H., Park, S. e Kim, H.**(2021) 'Comparative life cycle assessment of laser powder bed fusion and conventional manufacturing for producing metal components', *Journal of Cleaner Production*, 311, 127589.
- Khalid, M.Y. and Peng, Q.**(2021). Sustainability assessment of metal additive manufacturing technologies. *Journal of Cleaner Production*, 322, 129071.
- Kokare, S., Oliveira, J.P. e Godina, R.**(2023) 'Life cycle assessment of additive manufacturing processes: A review', *Journal of Manufacturing Systems*, 68, pp. 536-559.
- Landi, D., Zampori, L. and Germani, M.**(2022). Comparative life cycle assessment of standard and AM-based production approaches to inform sustainable industrial practices. *Journal of Cleaner Production*, 363, 132488.
- Lesage, P. e Samson, R.**(2016) 'The Quebec Life Cycle Inventory Database Project', *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(9), pp. 1282-1289.
- Liu, Z., Jiang, Q., Ning, F., Kim, H., Cong, W. e Xu, C.**(2016) 'Investigation of energy requirements and environmental performance for additive-subtractive hybrid manufacturing systems', *Journal of Cleaner Production*, 161, pp. 1391-1400.
- Manco, P., Caterino, M., Rinaldi, M. and Fera, M.**(2023). Towards a zero-waste city: Insights from waste generators and managers of the city of Naples, Italy. *Resources, Conservation and Recycling*, 192, 106922.
- Muñoz, I., Anclaysi, S., Rieradevall, J., Domènech, X. and Milà, L.**(2021). LCA and eco-design: Consequence-oriented approaches to the eco-design of 3D printed products. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 26(7), pp.1281–1296.
- Peng, T., Kellens, K., Tang, R., Chen, C. e Chen, G.**(2018) 'Sustainability of additive manufacturing: An overview on its energy demand and environmental impact', *Additive Manufacturing*, 21, pp. 694-704.

- Pereira, T., Kennedy, J.V. and Potgieter, J.**(2019). A comparison of traditional manufacturing vs additive manufacturing, the best method for the job. *Procedia Manufacturing*, 30, pp.11–18.
- Pérez, M., Carou, D., Rubio, E.M. and Teti, R.**(2020). Current advances in additive manufacturing. *Procedia CIRP*, 88, pp.439–444.
- Redwood, B., Schöffner, F. and Garret, B.**(2017). *The 3D Printing Handbook: Technologies, design and applications*. Amsterdam: 3D Hubs.
- Shah, P., Racasan, R., Bills, P. e Blunt, L.**(2019) 'Comparison of different additive manufacturing methods using computed tomography', *Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation*, 6, pp. 69-78.
- Wang, Z., Liu, R., Sparks, T. e Liou, F.**(2021) 'Industrial challenges in additive manufacturing from simulation to certification', *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 8(4), pp. 1283-1300.
- Watari, T., Nansai, K. and Nakajima, K.**(2021). Major metals demand, supply, and environmental impacts to 2100: A critical review. *Resources, Conservation and Recycling*, 164, 105107.
- Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E. e Weidema, B.**(2016) 'The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology', *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(9), pp. 1218-1230.