



POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Gestionale

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale

Tesi di Laurea Magistrale

**Analisi dell'influenza della riprogettazione per
additive manufacturing sulla sostenibilità
tecnologica, economica e ambientale**

Relatori:

Prof. Paolo Claudio Priarone
Prof. Alessandro Salmi

Candidato:

Lorenzo Garda

Dicembre 2019

INDICE

INDICE DELLE FIGURE	3
INDICE DELLE TABELLE	6
GLOSSARIO DEI TERMINI	7
CAPITOLO 1 - INTRODUZIONE	8
1.1 ORIGINI	8
1.2 L'ADDITIVE MANUFACTURING OGGI	10
1.3 VANTAGGI DELL'ADDITIVE	13
1.4 SETTORI MAGGIORMENTE ATTIVI	15
<i>Automobilistico</i>	15
<i>Aerospaziale</i>	18
<i>Medico</i>	19
<i>Beni generici</i>	21
<i>Architettura</i>	23
1.5 TIPOLOGIE DI PROCESSO	24
<i>Powder Bed Fusion (PBF)</i>	24
1.6 FASI DI PROGETTAZIONE DI UN COMPONENTE METALLICO	25
<i>Topology optimization (TO)</i>	26
<i>Definizione del design finale</i>	27
CAPITOLO 2 - METODOLOGIA	28
2.1 ELECTRON BEAM MELTING (EBM)	28
<i>Hot Isostatic Pressing (HIP)</i>	30
<i>Arcam A2x</i>	30
2.2 SELECTIVE LASER MELTING (SLM)	32
<i>Stress Relieve</i>	33
<i>EOS M400</i>	33
2.3 MATERIALI	34
<i>Processo di atomizzazione</i>	35
Atomizzazione a gas	35
Atomizzazione al plasma	36
Materiali selezionati	37
<i>Ti6Al4V</i>	37
<i>AlSi10Mg</i>	38
2.4 ANALISI DEI FLUSSI DI MATERIALE	39
2.5 MODELLO ENERGETICO	44
<i>Approccio CM</i>	45
Material production	45
Manufacturing	45
Equazione completa approccio CM	46
<i>Approccio AM</i>	46
Material production	46
Manufacturing	47
Equazione completa approccio AM	48
<i>Dati</i>	48
2.6 MODELLO COSTI	50
<i>Approccio CM</i>	51
Indirect cost of the machining	51
Labour cost of the machining	51
Material purchase cost	52
Processing cost	52
Equazione completa approccio CM	52

<i>Approccio AM</i>	52
Indirect cost of the additive process	52
Labour cost of the additive process	52
Material purchase cost.....	52
Processing cost.....	53
Equazione completa approccio AM	53
<i>Dati</i>	53
2.7 MODELLO EMISSIONI DI CO₂	55
<i>Approccio CM</i>	56
Material production	56
Manufacturing	57
Equazione completa approccio CM.....	57
<i>Approccio AM</i>	57
Material production	57
Manufacturing	57
Equazioni complete approccio AM	58
<i>Dati</i>	58
CAPITOLO 3 - CASO DI STUDIO	60
3.1 OGGETTO IN ESAME	60
<i>N Yoke</i>	61
<i>Steering</i>	64
<i>Pedana</i>	66
3.2 IMPLEMENTAZIONE DEI MODELLI	68
<i>Energia</i>	68
<i>Costi</i>	71
<i>Emissioni</i>	73
3.3 CONCLUSIONI	76
BIBLIOGRAFIA	78

INDICE DELLE FIGURE

FIGURA 1 CHARLES HULL	8
FIGURA 2 PARTICOLARE DEL BREVETTO DI HULL [2]	9
FIGURA 3 SCHEMA DI FUNZIONAMENTO DELLA STEREOLOGRAFIA [3]	9
FIGURA 4 PREVISIONI DI CRESCITA DELL'AM ENTRO IL 2023 [6]	11
FIGURA 5 PREVISIONI DI CRESCITA DELL'AM ENTRO IL 2035 [7]	11
FIGURA 6 PREVISIONI PER L'AM IN RELAZIONE AI COSTI E ALLA VELOCITÀ DI PRODUZIONE [6]	12
FIGURA 7 QUOTE DI MERCATO DELLE AZIENDE NELL'INDUSTRY [4]	12
FIGURA 8 ESEMPIO DI UN PRODOTTO REALIZZATO IN METALLO Ti6Al4V [8]	13
FIGURA 9 ANDAMENTO DEI COSTI IN RELAZIONE ALLA COMPLESSITÀ GEOMETRICA	14
FIGURA 10 QUOTE DEI SETTORI MAGGIORMENTE ATTIVI NEL CAMPO DELL'AM [4]	15
FIGURA 11 ESEMPI DI PEZZI DESTINATI ALL'AUTOMOTIVE	16
FIGURA 12 PROGETTAZIONE PER AM. INTEGRAZIONE DI PARTI E RIDUZIONE DEL PESO [4]	17
FIGURA 13 COMPONENTE METALLICO REALIZZATO DALLA SCUDERIA FERRARI [9]	18
FIGURA 14 ESEMPI DI PEZZI DESTINATI AL SETTORE AEROSPAZIALE	18
FIGURA 15 PALETTA DI UNA TURBINA REALIZZATA IN Ti6Al4V TRAMITE EBM DA AVIOAERO [10]	19
FIGURA 16 ESEMPI DI PARTI DESTINATE AL SETTORE MEDICO	19
FIGURA 17 PROTESI PER L'ANCA REALIZZATA DA EOS IN Ti6Al4V [11]	20
FIGURA 18 PARTICOLARE DI RIPRODUZIONE DI PARTI ANATOMICHE TRAMITE TECNOLOGIA AM	20
FIGURA 19 PARTICOLARE DI RIPRODUZIONE DI PARTI ANATOMICHE TRAMITE TECNOLOGIA AM	21
FIGURA 20 ESEMPI DI PRODOTTI DESTINATI AL SETTORE GIOIELLIERO	21
FIGURA 21 ESEMPI DI PRODOTTI DI DESIGN REALIZZATI TRAMITE AM	22
FIGURA 22 ESEMPI DI PRODOTTI DI MODA REALIZZATI MEDIANTE AM	22
FIGURA 23 ESEMPI DI PRODOTTI ALIMENTARI REALIZZATI MEDIANTE AM	22
FIGURA 24 MODELLO DI SCARPA REALIZZATA DA REEBOK TRAMITE AM [12]	23
FIGURA 25 ESEMPI DI PLASTICI REALIZZATI TRAMITE AM	23
FIGURA 26 SCHEMA DI FUNZIONAMENTO DEL PROCESSO PBF	25
FIGURA 27 ILLUSTRAZIONE DELLE FASI DI PROGETTAZIONE DI UN COMPONENTE METALLICO	25
FIGURA 28 ESEMPIO DI OTTIMIZZAZIONE TOPOLOGICA	26
FIGURA 29 SCHEMA DI FUNZIONAMENTO DI UNA STAMPANTE EBM [15]	28
FIGURA 30. SCHEMA DI FUNZIONAMENTO DELL'HIP [18]	30
FIGURA 31 ARCAM A2X [15]	31
FIGURA 32 SCHEMA DI FUNZIONAMENTO DELLA TECNOLOGIA SLM [20]	32
FIGURA 33 EOS M400 [22]	33
FIGURA 34 ESEMPIO DI POLVERE METALLICA Ti6Al4V [16]	34
FIGURA 35 SCHEMA DI FUNZIONAMENTO DEL PROCESSO DI ATOMIZZAZIONE A GAS [24]	35
FIGURA 36 DISTRIBUZIONE DELLE DIMENSIONI DI POLVERE A BASE DI TITANIO [25]	36
FIGURA 37 SCHEMA DI FUNZIONAMENTO DEL PROCESSO DI ATOMIZZAZIONE AL PLASMA [23]	36
FIGURA 38 COMPOSIZIONE CHIMICA Ti6Al4V [26]	37
FIGURA 39 RIDUTTORE DI UN'AUTO DA CORSA REALIZZATO MEDIANTE EBM [16]	38
FIGURA 40 COMPOSIZIONE CHIMICA AlSi10Mg [26]	38
FIGURA 41 ANALISI DEI FLUSSI DI MATERIALI CM (A SINISTRA) E AM GENERICO (A DESTRA)	40
FIGURA 42 LEGENDA FLUSSI DI MATERIALI	41
FIGURA 43 ANALISI FLUSSI DI MATERIALI TRA CM (SINISTRA) E EBM (DESTRA)	42
FIGURA 44 ANALISI FLUSSI DI MATERIALI TRA CM (SINISTRA) E SLM (DESTRA)	43
FIGURA 45 PROTOTIPO DEL VEICOLO ELETTRICO PROGETTATO DAL TEAM PACE	60
FIGURA 46 RAPPRESENTAZIONE DEL COMPONENTE "N-YOKE" PRIMA DELL'OTTIMIZZAZIONE TOPOLOGICA	61
FIGURA 47 RAPPRESENTAZIONE DEL COMPONENTE "N-YOKE" DOPO L'OTTIMIZZAZIONE TOPOLOGICA	62
FIGURA 48 DEFINIZIONE DELLE MISURE PER IL COMPONENTE "N-YOKE"	62
FIGURA 49 DEFINIZIONE DEL VOLUME E DELLA SUPERFICIE PER IL COMPONENTE "N-YOKE"	63
FIGURA 50 RAPPRESENTAZIONE DEL COMPONENTE "STEERING" PRIMA DELL'OTTIMIZZAZIONE TOPOLOGICA	64
FIGURA 51 RAPPRESENTAZIONE DEL COMPONENTE "STEERING" DOPO L'OTTIMIZZAZIONE TOPOLOGICA	64

FIGURA 52 DEFINIZIONE DELLE MISURE PER IL COMPONENTE “STEERING”	64
FIGURA 53 DEFINIZIONE DEL VOLUME E DELLA SUPERFICIE PER IL COMPONENTE “STEERING”	65
FIGURA 54 RAPPRESENTAZIONE DELLA PEDANA PRIMA DELL’OTTIMIZZAZIONE TOPOLOGICA.....	66
FIGURA 55 RAPPRESENTAZIONE DELLA PEDANA DOPO L’OTTIMIZZAZIONE TOPOLOGICA	66
FIGURA 56 DEFINIZIONE DELLE MISURE DELLA PEDANA.....	67
FIGURA 57 DEFINIZIONE DELLA SUPERFICIE E DEL VOLUME DELLA PEDANA.....	67
FIGURA 58 DOMANDA ENERGETICA PER L’N-YOKE	69
FIGURA 59 DOMANDA ENERGETICA PER LO STEERING	70
FIGURA 60 DOMANDA ENERGETICA PER LA PEDANA	70
FIGURA 61 COSTO RELATIVO ALLA PRODUZIONE DI N-YOKE.....	72
FIGURA 62 COSTO RELATIVO ALLA PRODUZIONE DELLO STEERING.....	72
FIGURA 63 COSTO RELATIVO ALLA PRODUZIONE DELLA PEDANA	73
FIGURA 64 EMISSIONI RELATIVE ALLA PRODUZIONE DELL’N-YOKE.....	74
FIGURA 65 EMISSIONI RELATIVE ALLA PRODUZIONE DELLO STEERING	75
FIGURA 66 EMISSIONI RELATIVE ALLA PRODUZIONE DELLA PEDANA.....	75

INDICE DELLE TABELLE

TABELLA 1 TASSI DI CRESCITA ANNUALI DELL'AM [4].....	10
TABELLA 2 CARATTERISTICHE ARCAM A2X [15]	31
TABELLA 3 PRINCIPALI DIFFERENZE TRA EBM E SLM [17]	32
TABELLA 4 CARATTERISTICHE EOS M400 [22]	34
TABELLA 5 LEGHE ATTUALMENTE DISPONIBILI PER LE TECNOLOGIE SLM E EBM [4]	35
TABELLA 6 NOMENCLATURA MASSE FLUSSO DI MATERIALI	39
TABELLA 7 NOMENCLATURA DEGLI INPUT PER LE EQUAZIONI ENERGETICHE	44
TABELLA 8 DATI RELATIVI ALLE EQUAZIONI ENERGETICHE, APPROCCIO CM	48
TABELLA 9 PARAMETRI DI PROCESSO PER LE OPERAZIONI DI SGROSSATURA E FINITURA.....	49
TABELLA 10 DATI RELATIVI ALLE EQUAZIONI ENERGETICHE, APPROCCIO AM	49
TABELLA 11 NOMENCLATURA DEGLI INPUT PER LE EQUAZIONI ECONOMICHE	50
TABELLA 12 DATI RELATIVI ALLE EQUAZIONI ECONOMICHE, APPROCCIO CM	54
TABELLA 13 DATI RELATIVI ALLE EQUAZIONI ECONOMICHE, APPROCCIO AM.....	54
TABELLA 14 NOMENCLATURA DEGLI INPUT PER LE EQUAZIONI DELLE EMISSIONI	55
TABELLA 15 DATI RELATIVI ALLE EQUAZIONI DELLE EMISSIONI, APPROCCIO CM	58
TABELLA 16 DATI RELATIVI ALLE EQUAZIONI DELLE EMISSIONI, APPROCCIO AM.....	59
TABELLA 17 DENSITÀ DELLE LEGHE CONSIDERATE	61
TABELLA 18 MASSE FINALI DEL COMPONENTE N-YOKE.....	63
TABELLA 19 MASSE FINALI DEL COMPONENTE "STEERING"	65
TABELLA 20 MASSE FINALI DELLA PEDANA	68
TABELLA 21 TEMPI DI STAMPA DEI COMPONENTI	68
TABELLA 22 DOMANDA ENERGETICA PER LA REALIZZAZIONE DEI COMPONENTI.....	69
TABELLA 23 COSTI SOSTENUTI PER REALIZZARE I COMPONENTI.....	71
TABELLA 24 EMISSIONI RILASCIATE PER LA REALIZZAZIONE DEI COMPONENTI	74

GLOSSARIO DEI TERMINI

AM	Additive Manufacturing
PBF	Powder Bed Fusion
ISO	International Organization for Standardization
BCG	Boston Consulting Group
CAD	Computer Aided Design
CNC	Computer Numerical Control
TO	Topology Optimization
TAC	Tomography Axial Computed
3D	Three Dimensional
ASTM	American Society for Testing and Material
D4-PBF	Design for Powder Bed Fusion
FEA	Finite Element Analysis
EBM	Electron Beam Melting
SLM	Selective Laser Melting
EoL	End of Life
CM	Conventional Machining
HIP	Hot Isostatic Pressing
STL	Standard Triangulation Language
PACE	Partners for the Advancement of Collaborative Engineering Education
SEC	Specific Energy Consumption
MRR	Material Removal Rate
CES	Carbon Emission Signature

CAPITOLO 1 - INTRODUZIONE

L'obiettivo di questo capitolo introduttivo è quello di cominciare definendo l'argomento principale del presente lavoro di tesi, l'additive manufacturing. Dopo un breve cenno storico si andrà a mostrare quanto questo processo produttivo si è affermato nel tempo e in quali settori è attualmente adottato. Successivamente, si procederà elencando i tipi principali di tecnologie additive ad oggi utilizzate, focalizzandosi poi su quella scelta per questo lavoro di tesi, la Powder Bed Fusion, dove i principali processi saranno poi analizzati in maniera approfondita nel capitolo successivo. Infine, la parte conclusiva del capitolo sarà dedicata per mostrare il processo svolto per la progettazione di un componente metallico. In particolare, in questa parte sarà descritto il processo di ottimizzazione topologica, utilizzato poi nel caso di studio.

1.1 ORIGINI

L'International Organization for Standardization (ISO), universalmente riconosciuta come la più importante organizzazione a livello mondiale per la definizione di norme tecniche, definisce l'additive manufacturing (AM) come [1]: *“Un processo di unione di materiali adibito alla creazione di parti a partire da modelli 3D computerizzati, tipicamente uno strato sopra l'altro, in contrasto con la produzione sottrattiva e le metodologie di produzione di tipo formative”*.

Con il termine “additive manufacturing” ci si riferisce pertanto ad una famiglia di tecnologie di produzione aventi come principio di funzionamento la stratificazione progressiva di materiale, al fine di ottenere un oggetto tangibile tridimensionale. Questa tipologia di produzione potrebbe sembrare piuttosto recente per la maggior parte delle persone, ma in verità le sue origini risalgono al 1986, anno in cui fu depositato il primo brevetto dall'ingegnere americano Charles Hull (Figura 1).

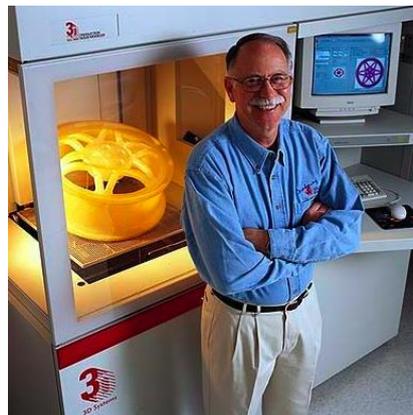


Figura 1 Charles Hull

Egli, che può dunque essere considerato il padre di quella che anni dopo sarà definita fabbricazione additiva, realizzò l'idea nel 1983 durante l'utilizzo di raggi UV per indurire vernici come la laccatura. Lo stesso Hull coniò successivamente il termine "stereolitografia" nel proprio brevetto, intitolato *“Apparatus for Production of Three-Dimensional Objects by Stereolithography”* (in Figura 2 se ne può apprezzare un frammento), datato 11 marzo 1986.

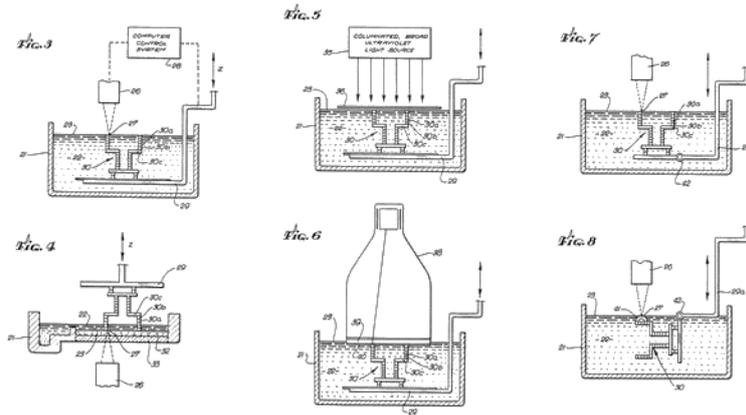
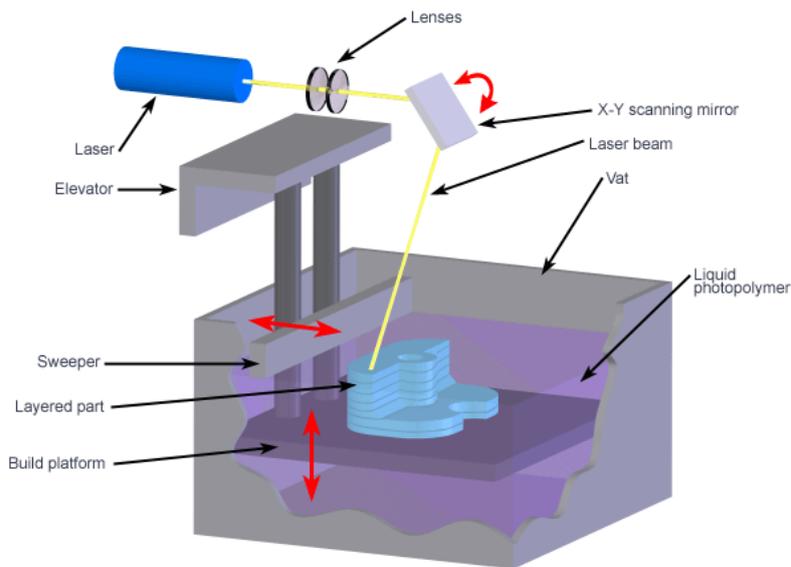


Figura 2 Particolare del brevetto di Hull [2]

In tale lavoro, egli definì la stereolitografia come una metodologia produttiva destinata alla creazione di oggetti solidi da successivi strati induriti di polimero liquido fotosensibile colpito da luce ultravioletta (Figura 3). Nel brevetto di Hull, una luce concentrata ultravioletta è focalizzata su una superficie di una vasca piena di polimero liquido fotopolimero. La luce, mossa da un computer, disegna ogni strato dell'oggetto sulla superficie liquida, che si indurisce e si polimerizza.



Copyright © 2008 CustomPartNet

Figura 3 Schema di funzionamento della stereolitografia [3]

A partire dalla sua invenzione, l'AM ha iniziato a diffondersi, grazie alla ricerca e allo sviluppo di nuove tecnologie e di una gamma di materiali sempre più ampia. Questa nuova realtà migliorandosi nel tempo ha permesso di contrarre tempi e costi di sviluppo dei prodotti in tutte le fasi del processo di progettazione e, a seguito di progressivi e costanti affinamenti, potrebbe diventare altrettanto fondamentale nella fase di produzione, anche grazie alla disponibilità di materiali via via più performanti e compatibili con esigenze di basso costo e velocità di produzione.

1.2 L'ADDITIVE MANUFACTURING OGGI

Oggi, dopo circa trent'anni dalla realizzazione del primo macchinario, la fabbricazione additiva ha conosciuto uno sviluppo notevole, sia nell'ambito delle tipologie di produzione, sia per la gamma di materiali, che si sta ampliando sempre di più, grazie agli investimenti in innovazione da parte dei grandi attori operanti in questo settore. In particolare, negli ultimi anni la sua crescita sul mercato è stata esponenziale, risultando uno dei pochi settori che, complessivamente, durante la recente crisi ha saputo rialzarsi e crescere considerevolmente, come si può notare in Tabella 1, nella quale è riportato il tasso annuale di crescita di questo settore dal 1989 fino al 2018, evidenziando in rosso gli anni in cui il tasso di crescita è risultato negativo.

Tabella 1 Tassi di crescita annuali dell'AM [4]

Anno	Tasso di crescita
1989	+153.2%
1990	+25.6%
1991	+32.7%
1992	+18.5%
1993	+28.1%
1994	+99.7%
1995	+48.8%
1996	+42.6%
1997	+7.5%
1998	+4.6%
1999	+13.9%
2000	+11.5%
2001	-10.5%
2002	-10%
2003	+9.2%
2004	+33.3%
2005	+14.8%
2006	+21.7%
2007	+16%
2008	+3.7%
2009	-9.8%
2010	+24.1%
2011	+29.4%
2012	+32.7%
2013	+33.4%
2014	+35.2%
2015	+25.9%
2016	+17.4%
2017	+21%
2018	+19.1%

Questo dimostra come molte aziende abbiano recepito l'importanza di muoversi in direzione di questo paradigma emergente. Alcune grandi multinazionali hanno infatti iniziato progetti ambiziosi per riuscire ad appropriarsi di un grande ritorno economico grazie allo sviluppo di tale tecnologia. General Electric, ad esempio, ha acquisito due compagnie leader nella fabbricazione additiva dei metalli, mentre aziende come BMW, Google e Nikon stanno spostando gran parte dei loro investimenti verso startup emergenti nella Silicon Valley, che stanno investendo moltissimo in ricerca e sviluppo per sviluppare nuove tecnologie AM per i polimeri [5]. Come si può osservare in Figura 4, infatti, le previsioni per questa tecnologia innovativa sembrano essere estremamente positive per il futuro.

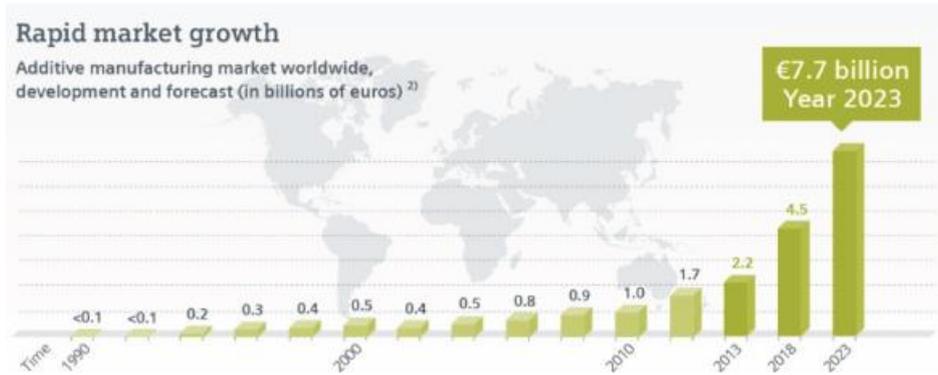


Figura 4 Previsioni di crescita dell'AM entro il 2023 [6]

In particolare, secondo la Boston Consulting Group, rinomata compagnia di consulenza strategica celebre inoltre per aver ideato la matrice BCG negli anni '70, con una crescita attuale, questa tecnologia potrebbe arrivare nel 2035 a essere un mercato da oltre 350 miliardi di \$, ovvero circa 314 miliardi di € (Figura 5), pari all'1.5% del mercato manifatturiero [5].

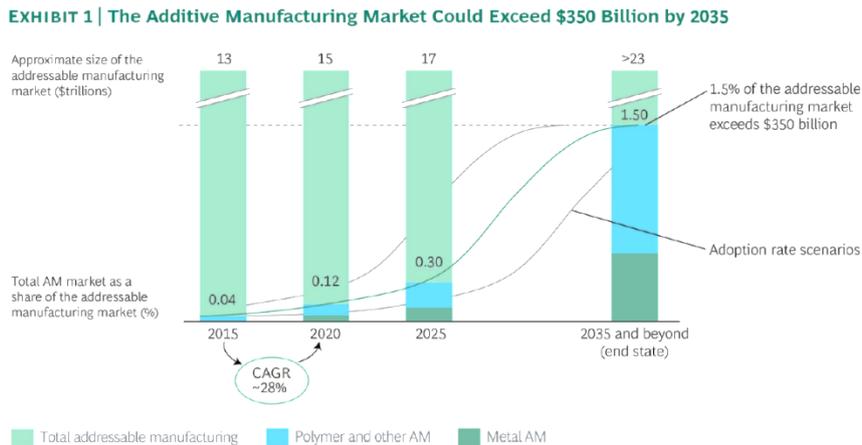


Figura 5 Previsioni di crescita dell'AM entro il 2035 [7]

Questo trend progressivo porterà ad un utilizzo sempre più marcato della tecnologia AM per i metalli e soprattutto anche per i polimeri, grazie ad un continuo aumento delle efficienze, sviluppo di nuovi materiali e abbattimento dei costi (Figura 6).

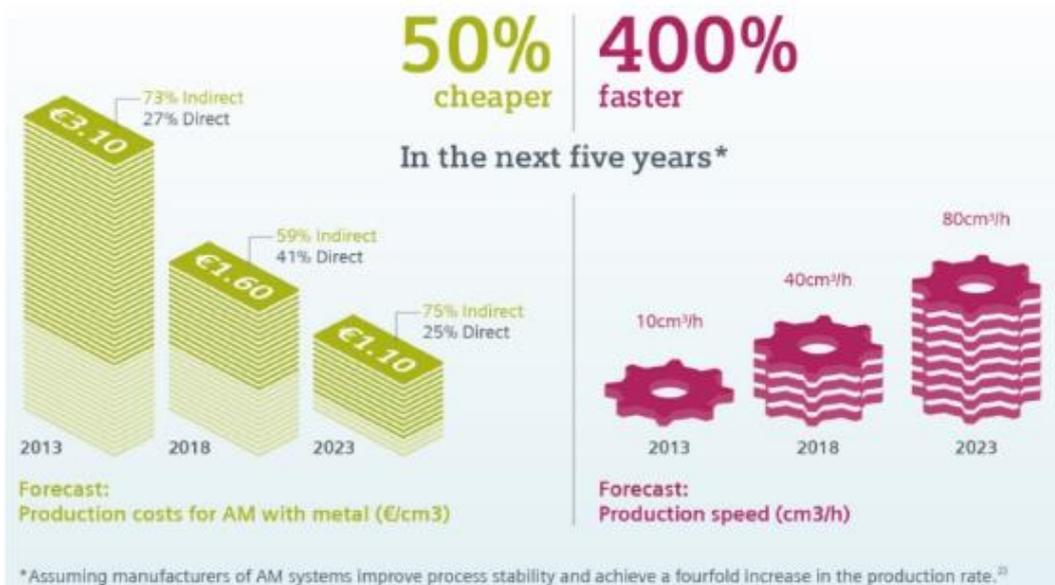


Figura 6 Previsioni per l'AM in relazione ai costi e alla velocità di produzione [6]

Secondo il report annuale redatto da Wohlers, nel 2017 la struttura delle quote di mercato del settore AM era suddivisa come rappresentato in Figura 7.

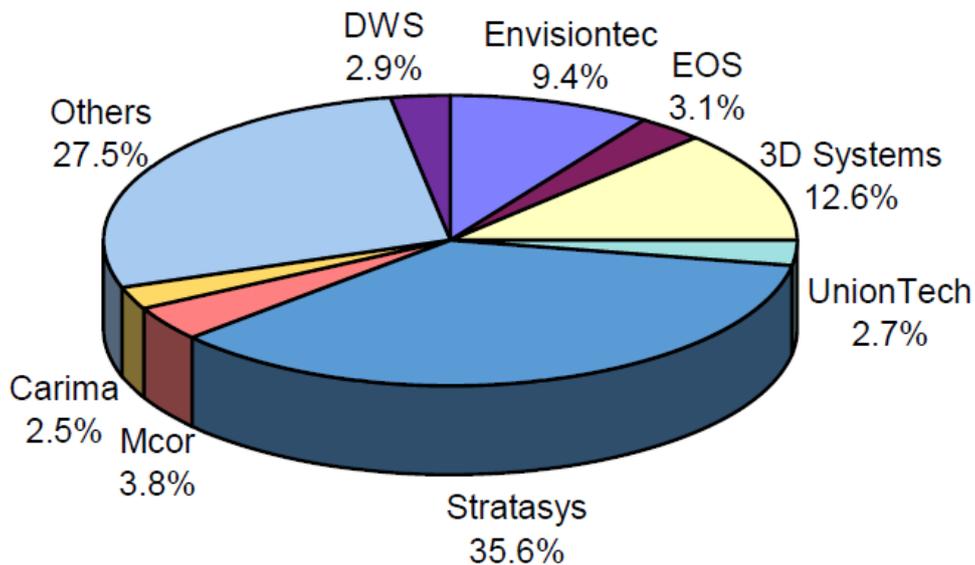


Figura 7 Quote di mercato delle aziende nell'industry [4]

Come si può notare, a dominare il mercato è l'azienda Stratasys con una quota di mercato considerevole (35.6%) [4]. Tale azienda americana è specializzata per lo più nel segmento Fused deposition modelling, ovvero la deposizione di materiale mediante estrusione. Il materiale è plastico, tipicamente ABS, usato per la realizzazione di prototipi.

1.3 VANTAGGI DELL'ADDITIVE

Il motivo del suo successo è piuttosto evidente. Si tratta di una tecnologia innovativa che rende possibile la produzione, in poche ore e senza l'uso di utensili, di oggetti di geometria comunque complessa, direttamente dal modello matematico dell'oggetto realizzato su di un sistema CAD 3D al computer.

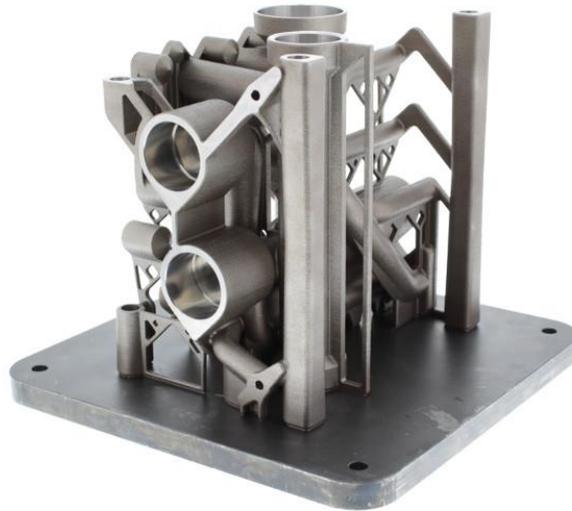


Figura 8 Esempio di un prodotto realizzato in metallo Ti6Al4V [8]

Come si può notare dalla Figura 8, uno dei grandi vantaggi, oltre alla realizzazione di parti con geometrie complesse difficilmente realizzabili mediante processi tradizionali, è la possibilità di integrare più parti insieme, in modo tale da stampare un unico pezzo tutto integrato. Qui di seguito sono riportati i vantaggi di prodotto e processo nell'utilizzo di tale tecnologia, dopodiché saranno presentati gli svantaggi che essa attualmente possiede.

Vantaggi di processo:

- Una sola macchina;
- Forme illimitate;
- Assenza di attrezzature;
- Un solo step produttivo;
- Minimo intervento dell'operatore;
- Tempi e costi legati solo alle dimensioni e non alla complessità geometrica;
- Meno sprechi.

Vantaggi di prodotto:

- Libertà di progettazione;
- Strutture leggere;
- Parti integrate;
- Design ergonomico;
- Personalizzazione.

Svantaggi di processo:

- Volumi di lavoro limitati;
- Dimensioni dei pezzi limitate dalle dimensioni della macchina;
- Velocità di costruzione limitate;
- Ogni macchina può lavorare con un numero limitato di materiali.

Svantaggi di prodotto:

- Necessità di strutture di supporto;
- Finitura superficiale scarsa;
- Numero limitato di materiali;
- Costo dei materiali.

Ad oggi questi rappresentano i pregi e i difetti di tale tecnologia. I problemi principali attualmente risultano essere la gamma ridotta di materiali ed il loro relativo costo. Ma estremamente importante è anche il limite dettato dalla dimensione della macchina, questo rende difficile la stampa di pezzi di grandi dimensioni e necessita spesso soluzioni ad hoc. Per i metalli inoltre è difficile prevedere la possibilità di realizzare pezzi di grandi dimensioni, in quanto si tratterebbe di dover stampare pezzi che arriverebbero ad avere pesi elevatissimi e probabilmente non sopportabili dal macchinario.

Il vantaggio principale dell'utilizzo di un processo AM rispetto ad uno tradizionale può essere spiegato con l'ausilio della Figura 9.

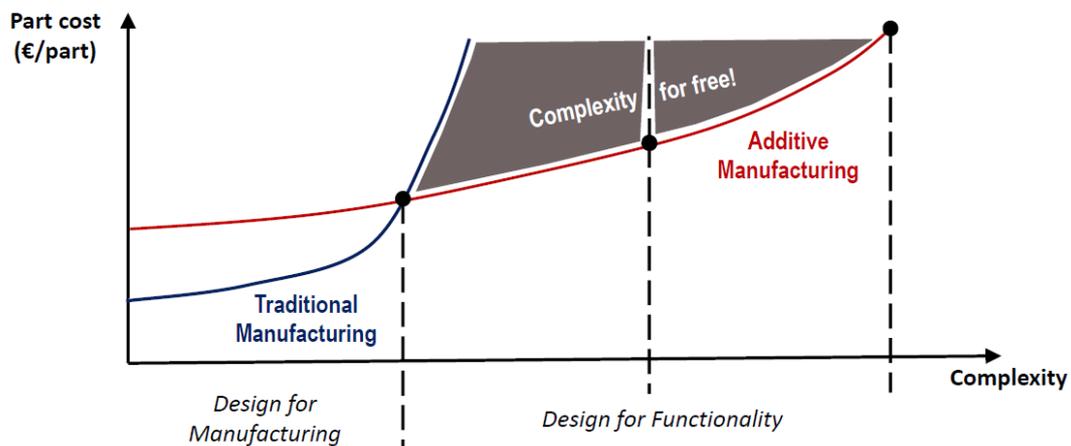


Figura 9 Andamento dei costi in relazione alla complessità geometrica

Nell'asse delle ordinate è espresso il costo (in Euro €) rispetto ad una parte prodotta, mentre sulle ascisse è rappresentato il livello di complessità del pezzo da produrre. Come si può notare, con una complessità bassa l'approccio AM risulta essere più costoso di un approccio tradizionale e ben consolidato nel tempo. Ma man mano che la complessità aumenta, per un processo convenzionale i costi aumentano notevolmente in maniera esponenziale fino a diventare sconveniente per via tradizionale, mentre per un processo AM il costo aumenta ma in maniera assai ridotta, in quanto il pezzo deve solamente essere prodotto via computer e poi stampato dal macchinario. Dunque, il vantaggio dell'utilizzo di una tecnica AM rispetto ad una tradizionale si ottiene a partire dal punto di intersezione, da lì in poi risulta conveniente utilizzare un approccio additive

poiché la complessità ha raggiunto un livello tale che è preferibile realizzare il componente mediante un programma CAD 3D e stamparlo con uno dei macchinari.

L'AM è inoltre considerata una tecnologia "green" per l'ambiente rispetto ai metodi tradizionali di produzione, questo grazie ad una riduzione degli sprechi durante la produzione e per via del consumo energetico. Inoltre, l'AM pone le basi per la ricerca e lo sviluppo di materiali con caratteristiche sempre migliori, difficilmente realizzabili mediante metodi tradizionali e questo avrà un impatto positivo sulla sostenibilità dei prodotti [1].

1.4 SETTORI MAGGIORMENTE ATTIVI

Nel corso di questi anni moltissimi settori hanno abbracciato il concetto di AM, rendendo dunque questa tecnologia molto versatile per moltissimi tipi di applicazione. In questa sezione saranno presentati alcuni dei settori più attivi. La Figura 10 mostra come è frammentato l'AM nei diversi settori in cui è sfruttato.

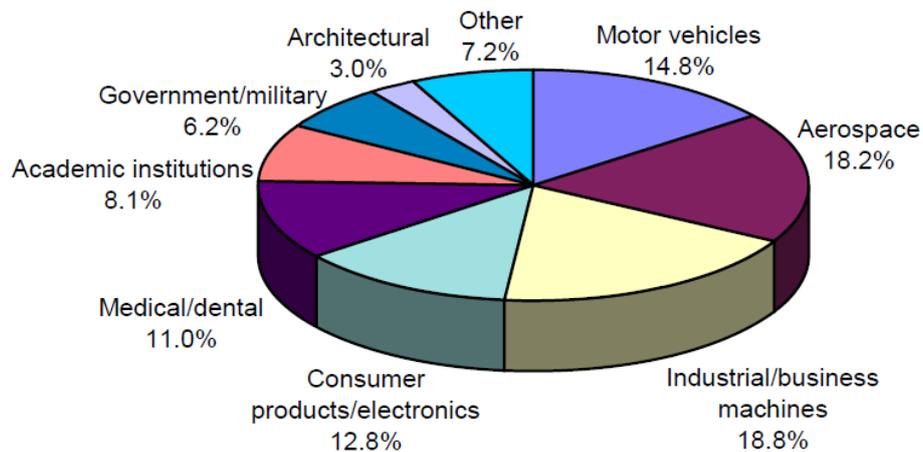


Figura 10 Quote dei settori maggiormente attivi nel campo dell'AM [4]

I dati provengono dal report annuale redatto da Wohlers. Essi mostrano come il settore leader risulta essere quello industriale, che comprende apparecchiature informatiche, quali ad esempio componenti per PC, e manifatturiere, come ad esempio macchine CNC e robot. Come si può notare vi sono settori con percentuali molto importanti, come quello aerospaziale, automobilistico, ospedaliero e elettronico/beni di consumo, ma le applicazioni sono molteplici. La categoria "altro" include molte tipologie di industries, come ad esempio quella petrolifera, all'industria navale, etc.

Automobilistico

Il settore automobilistico è stato uno dei primi ad adottare questa tecnologia, a partire dagli anni '90, focalizzandosi principalmente sulla produzione di prototipi a partire da materiali polimerici. Tuttavia, nel tempo è aumentata sempre più la richiesta di "personalizzazione" del prodotto, incrementando dunque l'attenzione verso l'AM, che risulta in grado di soddisfare tale requisito. Ad oggi, il settore automobilistico corrisponde a circa il 14.8 % dell'AM, in base ai dati reperiti dal report annuale di Wohlers, piazzandosi dunque come il terzo settore più sfruttato da parte dell'AM (in Figura 11 si possono apprezzare alcune applicazioni).



Design for Additive Manufacturing – Alessandro Salmi, Eleonora Atzeni (Politecnico di Torino)

Figura 11 Esempi di pezzi destinati all'automotive

Nell'automotive la produzione di parti definitive è focalizzata principalmente sulla produzione di componenti il più possibile integrabili tra loro: passando da una produzione tradizionale a una per fabbricazione additiva, in genere si riprogetta il pezzo su CAD 3D in modo tale da sfruttare i vantaggi offerti da questa tecnologia. Dunque, l'approccio sarebbe quello di riprogettare il pezzo in modo tale da consolidare insieme un certo numero di parti in un unico componente (Figura 12). Inoltre, il pezzo potrebbe essere riprogettato in modo tale da ridurre il peso e migliorare le performance attraverso l'utilizzo dell'ottimizzazione topologica (Topology optimization TO). La TO, spiegata dettagliatamente nella parte conclusiva di questo primo capitolo, sfrutta un software che, a partire da input definiti dall'operatore, quali materiali e vincoli stringenti che il pezzo deve rispettare (ad esempio carichi che deve sopportare, etc), riprogetta il pezzo in modo tale da ridurre la massa, ma allo stesso tempo rispettando i vincoli predefiniti dall'operatore, garantendo dunque le performance prefissate e, contemporaneamente, rendendo il pezzo più leggero. La TO sarà comunque definita nel Paragrafo 1.6 e, essendo un lavoro di tesi che cerca di studiare la sostenibilità dell'AM, si può dunque capire quanto fondamentale sia l'utilizzo dell'ottimizzazione topologica per lo studio in questione, grazie appunto alla possibilità di ottenere pezzi più leggeri e dunque ottimizzare il materiale utilizzato per la produzione. Nella Figura 12 si può dunque apprezzare il confronto di tecnologie tradizionali rispetto all'AM per la realizzazione di un componente di un'autovettura [1]. Si può notare come l'AM abbia permesso l'integrazione di nove componenti in uno solo e, inoltre, sfruttando la TO il peso del componente si è ridotto notevolmente, passando da 2.29 kg a soli 0.88 kg. E' importante sottolineare l'importanza di una riduzione di peso di componenti posti sopra a veicoli: pezzi più leggeri permettono al veicolo (automobili, vetture da corsa, aerei, etc) di essere più leggero e dunque di ridurre i consumi e aumentarne l'autonomia, in poche parole avere un impatto meno gravoso sull'ambiente e più efficiente dal punto di vista dello sfruttamento delle risorse produttive.

Standard Process



Total weight: 2.29 kg

Quantity of parts: 9

Additive Process



Total weight: 0.88 kg (-61%)

Quantity of parts: 1 (-89%)

Figura 12 Progettazione per AM. Integrazione di parti e riduzione del peso [4]

Essendo un settore molto improntato verso l'innovazione, grazie ad esso moltissimi investimenti in ricerca e sviluppo sono allocati ogni anno, dunque nel tempo sempre più materiali potranno essere disponibili per l'additive manufacturing, aumentando così la qualità dei prodotti. Inoltre, la richiesta sempre più assidua di ottenere veicoli eco-efficienti e più leggeri porterà i produttori di automobili a muoversi sempre più verso questo paradigma, ampliando dunque l'utilizzo dell'AM in questo settore. Sicuramente ad oggi i limiti dell'utilizzo di questo approccio rispetto ad uno tradizionale sono notevoli, in particolare perché il settore automotive è un settore caratterizzato da grandi volumi di produzione e economie di scala che permettono ai produttori di offrire prezzi competitivi. Oggi l'additive è un processo lento e costoso, che si apprezza meglio nel caso di volumi produttivi limitati e pezzi caratterizzati da una forte personalizzazione. Inoltre, come già citato nel Paragrafo 1.3 in relazione agli svantaggi del processo, i volumi di lavoro sono limitati. Attraverso tale tecnologia non è possibile realizzare pezzi di elevate dimensioni, se non dividendo il pezzo in più parti e poi integrarle tra loro, ma questo dipende dalla situazione, non sempre è una via percorribile. Da questa descrizione dell'approccio additive nell'automotive si può già intuire che la scelta dell'utilizzo di questo approccio rispetto ad uno tradizionale dipende anche da quale segmento di mercato ci si vuole posizionare. L'additive può essere un'ottima idea nel caso in cui si voglia realizzare un veicolo di alta gamma destinato a clienti con alta disponibilità, disposti a pagare un prezzo elevato per ottenere un veicolo che complessivamente possiede caratteristiche migliori rispetto ad uno ottenuto mediante processo tradizionale.

Nell'ambito delle competizioni automobilistiche, Formula 1 in primis, l'AM è ormai diventata determinante per la realizzazione di componenti e la ricerca di soluzioni sempre più efficienti è ritenuta fondamentale per le scuderie. Qui, infatti, una riduzione di peso anche minima è fondamentale per la macchina e per le sue prestazioni. In Figura 13 è mostrato un componente con più parti integrate appartenenti ad un motore per un veicolo della Scuderia Ferrari.

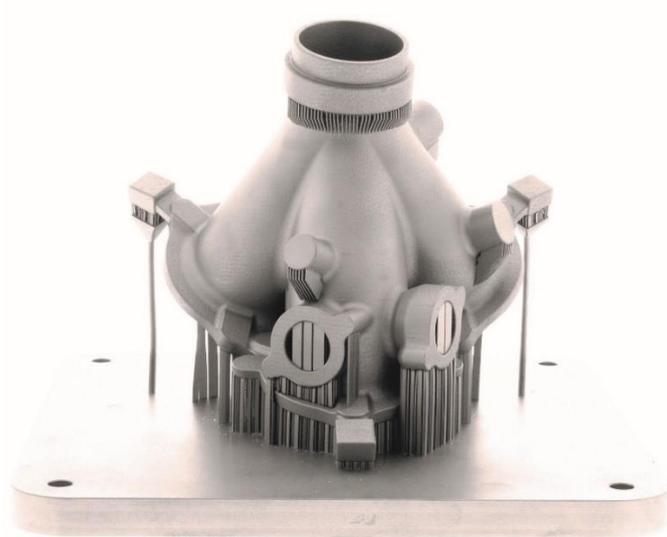


Figura 13 Componente metallico realizzato dalla Scuderia Ferrari [9]

Aerospaziale

Il settore aerospaziale è tipicamente caratterizzato da bassi volumi di produzione rispetto a altri settori, quali ad esempio quello automobilistico o la produzione di beni di consumo. Per tali ragioni, l'AM è ampiamente utilizzato, anche grazie alla possibilità di realizzare strutture più leggere con l'obiettivo di ridurre i costi del carburante. I componenti prodotti (alcuni visibili in Figura 14) sono in genere caratterizzati da geometrie complesse e realizzati in materiali come titanio o leghe di alluminio.



Design for Additive Manufacturing – Alessandro Salmi, Eleonora Atzeni (Politecnico di Torino)

Figura 14 Esempi di pezzi destinati al settore aerospaziale

L'AM in questo settore si sta muovendo molto velocemente, principalmente nella realizzazione di parti in metallo per parti del motore e per interni. Secondo alcune previsioni, entro il 2030, l'AM sarà utilizzato per

realizzare circa il 20% delle parti del motore oggi prodotte mediante processi convenzionali [5]. Inoltre, un forte incremento vi sarà anche per la realizzazione di interni. Ad esempio, si stima che nel 2025, il 5-10% di un sedile aereo sarà realizzato via AM. Se si includessero anche i droni in questo settore, si stima che, sempre entro il 2025, questo mercato avrà un'impennata fino a raggiungere un valore di circa 700 milioni di dollari, grazie agli investimenti nel campo militare.

Degno di nota il caso dell'Avio Aero, compagnia italiana appartenente al gruppo di General Electric. Essa attualmente è leader del settore nella realizzazione di palette per turbine (Figura 15). Nel suo stabilimento nel torinese, mediante 31 stampanti Arcam A2x, produce un elevato numero di palette con una lega a base di Titanio, ottenendo un processo produttivo più snello e pezzi più leggeri da poter installare negli aerei.



Figura 15 Paletta di una turbina realizzata in Ti6Al4V tramite EBM da AvioAero [10]

Medico

Esso risulta uno dei settori con il più grande utilizzo dell'AM, al quinto posto con circa l'11% del totale [4]. La possibilità di personalizzare un prodotto, caratteristica chiave dell'AM, è un enorme vantaggio per questo settore. Infatti, sfruttando tale proprietà, si è in grado di realizzare pezzi unici che possono essere utilizzati nell'ambito ospedaliero e dentale mediante l'utilizzo di materiali molto resistenti e leggeri (Figura 16).



Design for Additive Manufacturing – Alessandro Salmi, Eleonora Atzeni (Politecnico di Torino)

Figura 16 Esempi di parti destinate al settore medico

Facendo riferimento alla Figura 16, si capisce subito che la possibilità di ottenere un oggetto riproducibile in maniera esatta il pezzo da impiantare in un paziente è un grande risultato, tenendo inoltre in considerazione il fatto che le proprietà meccaniche del prodotto ottenuto sarebbero migliori di quelle ottenute mediante procedimenti convenzionali, tutto questo a vantaggio del paziente, che può quindi beneficiare di prodotti con ottime caratteristiche meccaniche e con una vita più lunga, ottenendo dunque un benessere maggiore. Un esempio è rappresentato dalla Figura 17 sottostante, rappresentante la protesi di un'anca.



Figura 17 Protesi per l'anca realizzata da EOS in Ti6Al4V [11]

Uno dei risultati più importanti per l'AM si è raggiunto proprio con la realizzazione di tali protesi. Esse, grazie allo sviluppo e al miglioramento continuo della tecnologia AM per i metalli, possono oggi essere realizzate a partire da polvere metallica utilizzando leghe particolari, la Ti6Al4V in primis, ottenendo un prodotto leggero e con caratteristiche meccaniche superiori a quelle che si otterrebbero realizzando tale prodotto mediante processi convenzionali. Il risultato è dunque una protesi più leggera e con una vita utile più lunga, pari a circa 15-16 anni, rispetto ai 10 anni di una protesi realizzata tramite una tecnologia tradizionale, aumentando notevolmente il benessere dei pazienti. Il processo di stampa che utilizza polvere metallica è definito Powder bed fusion, descritto nel Paragrafo 1.5.

L'utilizzo dell'AM in campo ospedaliero non è limitato solamente ai metalli, anche i polimeri sono ampiamente utilizzati, in particolare nell'ambito della preparazione di interventi chirurgici (Figure 18 e 19).



Figura 18 Particolare di riproduzione di parti anatomiche tramite tecnologia AM

A partire da scansioni (ad esempio tramite TAC) di una determinata area del corpo, questa può successivamente essere riprodotta tridimensionalmente in maniera estremamente accurata, garantendo una replica fedele della struttura ossea e dei vasi sanguigni, permettendo così ai medici di avere in anticipo una visione globale e nitida della situazione del paziente, in modo tale da riuscire a pianificare al meglio l'intervento che egli necessita.

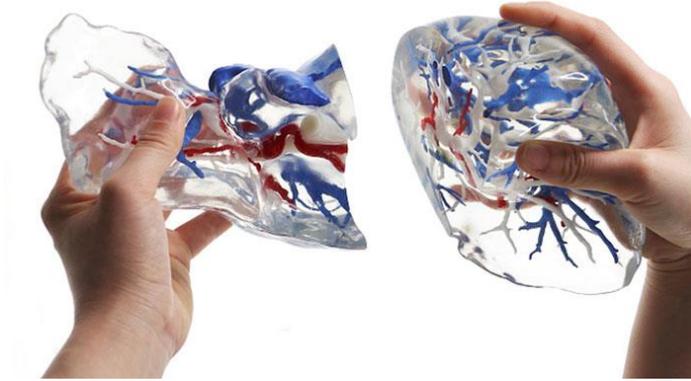


Figura 19 Particolare di riproduzione di parti anatomiche tramite tecnologia AM

Questo potrebbe garantire una maggior percentuale di successo di molte tipologie di interventi, traducendosi dunque in un miglioramento della qualità della vita per tutti. Infine, seppur oggi è già presente ma non ancora ad un livello accettabile, il trend verso il futuro sarà quello di riuscire ad utilizzare la fabbricazione additiva per realizzare medicinali, tessuti e organi, traducendosi anch'esso in un auspicabile effetto positivo per chiunque.

Beni generici

Sotto questa categoria ricadono molte categorie, la gioielleria (Figura 20), componenti e oggetti di design (Figura 21), l'industria della moda (Figura 22), fino ad arrivare a quella alimentare (Figura 23).



Design for Additive Manufacturing – Alessandro Salmi, Eleonora Atzeni (Politecnico di Torino)

Figura 20 Esempi di prodotti destinati al settore gioielliero



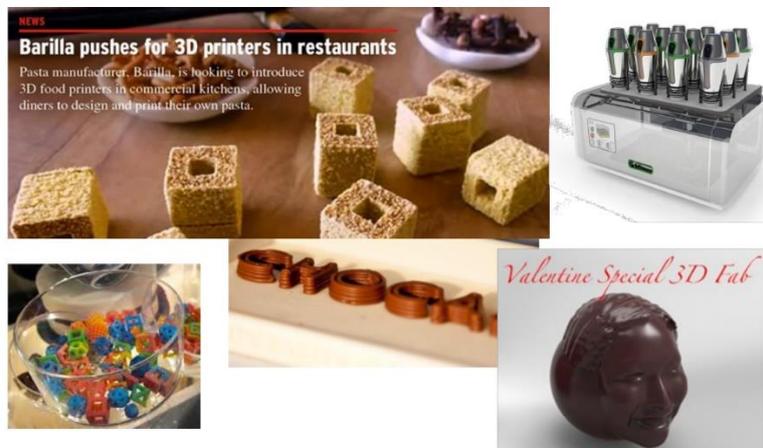
Design for Additive Manufacturing – Alessandro Salmi, Eleonora Atzeni (Politecnico di Torino)

Figura 21 Esempi di prodotti di design realizzati tramite AM



Design for Additive Manufacturing – Alessandro Salmi, Eleonora Atzeni (Politecnico di Torino)

Figura 22 Esempi di prodotti di moda realizzati mediante AM



Design for Additive Manufacturing – Alessandro Salmi, Eleonora Atzeni (Politecnico di Torino)

Figura 23 Esempi di prodotti alimentari realizzati mediante AM

Questi settori sfruttano l'AM grazie all'evidente possibilità di realizzare forme complesse, in modo tale da ottenere prodotti unici e pregiati, destinati ad una clientela disposta a pagare un prezzo elevato pur di possedere un oggetto di alta gamma in tiratura limitata. E' un settore che attrae molta clientela e che sta avendo un certo successo nel mondo. Inoltre, anche molti brand di abbigliamento sportivo si stanno affacciando all'AM, in particolare nella realizzazione di scarpe utilizzando polimeri, investendo dunque anch'essi in ricerca e sviluppo per ottenere materiali sempre più performanti per l'industria calzaturiera e, inoltre, realizzando oggetti con forme sempre più creative. Un esempio di scarpa realizzata in 3D è mostrato in Figura 24, rappresentante una scarpa prodotta dalla Reebok.

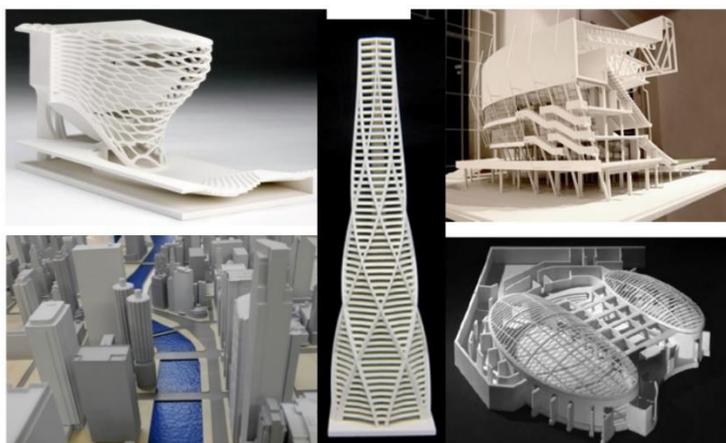


Figura 24 Modello di scarpa realizzata da Reebok tramite AM [12]

Anche in questo caso, il trend futuro sarà quello di ampliare la gamma di materiali offerta, commisurata al fatto che l'efficienza produttiva aumenterà, garantendo una contrazione dei tempi di produzione e anche dei costi dei materiali. Tuttavia, un possibile fattore di rischio potrebbe essere dato dalle norme vigenti, è importante che i prodotti offerti soddisfino sempre i requisiti di qualità e salute imposti dalle normative.

Architettura

L'AM è utilizzato anche nella realizzazione di prototipi per rappresentare progetti architettonici. La creazione di plastici mediante AM permette una riduzione notevole di tempi e garantisce risultati precisi e un elevato grado di integrazione di parti. Si possono realizzare così forme molto complesse mediante l'utilizzo di materiali plastici. In figura 25 sono rappresentati alcuni esempi di plastici realizzati mediante la fabbricazione additiva.



Design for Additive Manufacturing – Alessandro Salmi, Eleonora Atzeni (Politecnico di Torino)

Figura 25 Esempi di plastici realizzati tramite AM

1.5 TIPOLOGIE DI PROCESSO

La gamma di processi e materiali ad oggi disponibili nell'ambito dell'AM può generare confusione. Questo poiché molti dei produttori di sistemi AM hanno attribuito nomi personalizzati a propri processi e materiali per differenziarsi dai vari competitors del settore. Questa tendenza genera un po' di disordine, in quanto alla fine queste "differenze" sono molto sottili. Fortunatamente, il settore ha adottato degli standard per raggruppare i processi di AM e i materiali, categorizzandoli all'interno di famiglie [4].

In particolare, nel Gennaio del 2012, l'organismo di normazione statunitense, l'ASTM International, ha approvato una lista di categorie di processi di AM, che risulta essere la seguente:

- *Material extrusion* – processo di AM nel quale il materiale è selettivamente erogato attraverso un ugello;
- *Material jetting* – processo di AM nel quale gocce di materiale sono selettivamente depositate;
- *Binder jetting* – processo di AM nel quale un agente legante liquido è selettivamente depositato per legarsi con la polvere dei materiali;
- *Sheet lamination* – processo di AM nel quale lamine di materiale sono legate tra di loro per formare una parte;
- *Vat photopolymerization* – processo di AM nel quale un fotopolimero liquido è selettivamente trattato da un polimero fotoattivabile;
- *Powder bed fusion* – processo di AM in cui si sfrutta energia termica per fondere selettivamente aree collocate su un letto di polvere;
- *Directed energy deposition* – processo di AM nel quale si sfrutta energia termica per fondere materiali depositati.

Queste sette macrocategorie a loro volta sono formate da varie tecniche produttive che rientrano sotto la propria famiglia di appartenenza. Nel presente lavoro di tesi ci si concentrerà unicamente sulla famiglia definita "Powder bed fusion".

Powder Bed Fusion (PBF)

Questo processo è caratterizzato dalla fusione di polvere di materiale, tipicamente metallico, mediante energia termica. Nella figura sottostante (Figura 26) si può osservare un semplice esempio generico che ne illustra il funzionamento: un fascio, che può essere laser o di elettroni, è indirizzato verso il letto di polvere. Una volta arrivato a contatto con la superficie, tutta l'energia cinetica è convertita in calore, facendo così fondere la polvere in superficie nelle aree desiderate. È importante sottolineare che per la creazione di parti metalliche si rende necessaria la presenza di supporti per garantire un fissaggio dei pezzi stampati al piano di lavoro e per sostenere alcune superfici del componente da realizzare. I gradienti termici all'interno della camera di costruzione sono piuttosto alti, il che può portare a stress termici e a deformazioni se i supporti sono assenti. Il piano di lavoro sul quale giace il letto di polvere è spesso in quanto svolge la funzione di dissipatore di calore e previene la deformazione del pezzo durante lo stampaggio. Essendo un processo che lavora ad alte temperature, stress termici e distorsioni da calore sono problemi rilevanti per tutte le tipologie di materiali. Il pezzo, una volta stampato, è soffiato mediante polvere dello stesso materiale per non generare impurità. La polvere potrebbe essere poi riutilizzata per un'altra stampa, ma dipende dal tipo di materiale. Infatti, elevate temperature possono cambiare la natura chimica della polvere. Nel caso di polimeri questo cambiamento può essere molto elevato, mentre nel caso di alcuni tipi di metalli, questi cambiamenti sono piccoli e dunque considerati trascurabili.

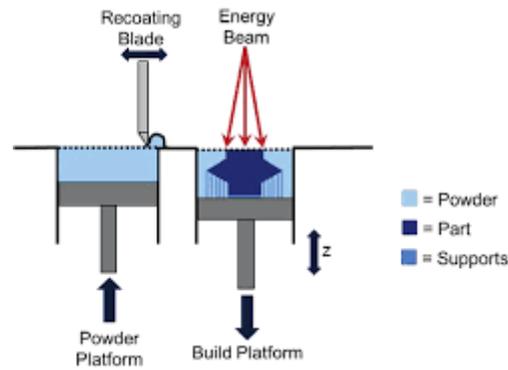
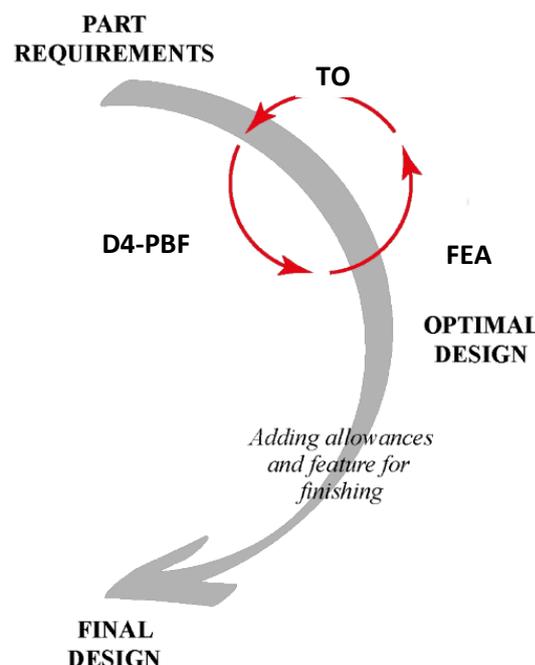


Figura 26 Schema di funzionamento del processo PBF

Il processo PBF è particolarmente competitivo ed utilizzato nel caso di parti geometricamente complesse con un volume di produzione medio-basso. Questi processi basati sulla produzione di parti metalliche stanno acquisendo sempre più popolarità nell’industry, in particolare nel settore aerospaziale e medico, grazie alla possibilità di realizzare geometrie particolari e alle ottime proprietà meccaniche delle parti prodotte. Si sta investendo moltissimo in questa tecnologia, infatti il futuro per la tecnologia PBF appare luminoso: è lecito aspettarsi che i tempi di produzione si riusciranno a ridurre sempre di più, e allo stesso tempo la gamma di materiali si espanderà ancora, garantendo ai processi PBF di rimanere sempre una delle tecnologie AM più utilizzate [13].

1.6 FASI DI PROGETTAZIONE DI UN COMPONENTE METALLICO

Il generico processo che si svolge dalla progettazione di un componente metallico fino alla definizione del design finale può essere riassunto dalla Figura 27.



Design for Additive Manufacturing – Alessandro Salmi, Eleonora Atzeni (Politecnico di Torino)

Figura 27 Illustrazione delle fasi di progettazione di un componente metallico

La prima fase del processo coincide con la definizione dei requisiti che dovrà soddisfare il componente, quali ad esempio specifiche tecniche, geometriche e di prodotto. Una volta definite tali caratteristiche, si può procedere integrando questa fase con un processo iterativo, utile per sfruttare al massimo i benefici dell'AM. Questo processo iterativo è composto da tre fasi: l'ottimizzazione topologica TO, la progettazione per la tecnologia Powder bed fusion PBF e l'analisi degli elementi finiti FEA, ora analizzati nel dettaglio prima di proseguire con la descrizione del processo rappresentato in Figura 27.

Topology optimization (TO)

L'ottimizzazione topologica è un approccio matematico molto utilizzato nella realizzazione di parti metalliche, impiegato per ottimizzare il materiale destinato alla realizzazione di un pezzo e, dunque, per ottenere parti più leggere. Esso opera in questo modo: a partire dal componente disegnato in formato CAD con un materiale specifico selezionato, si procede definendo uno spazio di progettazione, ovvero la parte del componente che sarà rielaborata dal software, inserendo inoltre carichi e vincoli che il pezzo dovrà sopportare e soddisfare. Definiti tutti i vincoli e gli obiettivi da raggiungere, il software di ottimizzazione topologica rilascerà un design modificato del pezzo, con una riduzione del peso. Un esempio è riportato in Figura 28.

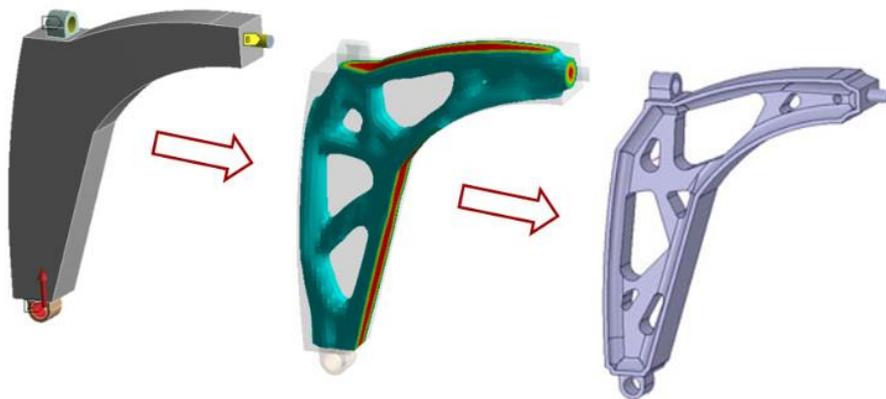


Figura 28 Esempio di ottimizzazione topologica

Il risultato, dunque, è una struttura più snella, che allo stesso tempo rispetta tutti i requisiti definiti dall'operatore. Quello che si ottiene dall'ottimizzazione topologica, però, è spesso una struttura complessa, talvolta con parti disconnesse tra loro. Il pezzo potrebbe allora richiedere alcune modifiche di progettazione (D4-PBF), al fine di ottenere un componente adatto alla produzione via AM, in particolare per PBF nel caso di metalli. Inoltre, è importante che il design del pezzo soddisfi le regole di progettazione delle tecnologie PBF, così da garantire un risultato efficiente. Completata questa fase, è necessario un ulteriore step per convalidare la geometria ottimizzata dell'oggetto, tenendo sempre in considerazione i vincoli e i carichi definiti in precedenza. Perciò, sarà eseguita un'ulteriore analisi sul componente riprogettato, con l'ausilio inoltre di software relativi all'analisi di elementi finiti [14]. Un'ulteriore ottimizzazione potrà essere eseguita sul pezzo riprogettato, in modo tale da vedere se vi sono ulteriori margini di miglioramento, per migliorarne le performance e per ridistribuirne le tensioni. Alla fine di questo processo si otterrà come risultato un design ottimale.

Definizione del design finale

Una volta ottenuto il design ottimo, facendo sempre riferimento alla Figura 27, si può procedere verso lo step successivo, ovvero la creazione del design finale. Per arrivare a definire il design definitivo che sarà messo in stampa occorre aggiungere del sovrametallo, che sarà poi eliminato tramite operazioni di finitura a valle dei trattamenti termici eseguiti sul pezzo. Il design finale sarà dunque di dimensioni maggiori del risultato finale, e la parte in eccesso sarà rimossa nell'ultima fase del suo step produttivo, in modo tale da migliorare la qualità della superficie del componente prodotto. Nel prossimo capitolo sarà analizzato dettagliatamente il processo produttivo del componente, riprendendo e estendendo i concetti riportati in questo paragrafo.

CAPITOLO 2 - METODOLOGIA

In questo capitolo, di carattere teorico, l'obiettivo è quello di iniziare a gettare le basi utilizzate successivamente durante l'analisi del caso di studio. Per far ciò è necessario definire quali materiali e quali processi produttivi saranno inclusi nello studio. La struttura del capitolo seguirà questa logica: il primo passo sarà quello di definire le principali tecniche PBF, l'Electron Beam Melting EBM ed il Selective Laser Melting SLM, con riferimento ai due macchinari selezionati per le successive analisi, l'Arcam A2x e la Eos M400. In seguito, sarà affrontato il discorso dei materiali, in particolare le leghe attualmente disponibili e il relativo processo di atomizzazione per ottenerne la polvere, per poi arrivare a definire i due materiali più utilizzati nell'ambito dell'AM dei metalli e perciò selezionati per questo lavoro di tesi, Ti6Al4V e AlSi10Mg. Una volta definiti processi e materiali, ci si concentrerà sull'analisi dei flussi di materiali, dalla produzione del materiale grezzo fino alla fine del ciclo vitale dell'oggetto (End of Life EoL). Questa analisi sarà eseguita confrontando i processi AM rispetto alle produzioni convenzionali CM selezionate per questo lavoro. Una volta definito il ciclo di vita del prodotto, si potranno fare considerazioni energetiche, economiche e ambientali applicando modelli teorici ottenuti dalla letteratura e da ricerche approfondite. Tutto questo sarà utile per poi applicarlo al caso reale, analizzato nel capitolo successivo.

2.1 ELECTRON BEAM MELTING (EBM)

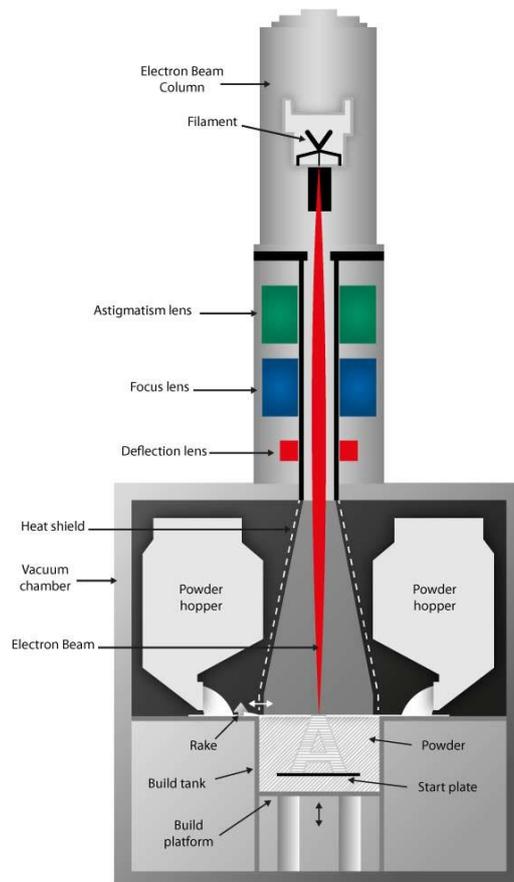


Figura 29 Schema di funzionamento di una stampante EBM [15]

Il processo EBM, di cui si può apprezzare la logica in Figura 29, è un procedimento mediante il quale una sorgente di energia, composta da un fascio opportunamente concentrato e accelerato di elettroni, colpisce determinate aree distese su un letto di polvere metallica, provocandone la fusione completa. Gli elettroni sono generati da un filamento in tungsteno e un sistema di lenti ne provoca l'accelerazione del fascio, portandolo a raggiungere una velocità massima di 8000 m/s [16]. L'impatto del fascio concentrato sul letto di polvere determina una conversione di tale energia in calore, causando la fusione dell'area di polvere colpita a seguito di tale quantità di calore rilasciata sul materiale metallico. La tecnologia EBM permette di produrre pezzi finiti e privi di vuoti, con caratteristiche meccaniche paragonabili a componenti realizzati mediante tecnologie tradizionali. Il metodo di produzione, inoltre, prevede il posizionamento sottovuoto degli strati di polvere del materiale da fondere. L'operare sottovuoto, e quindi in assenza di aria, permette anche di lavorare su materiali che altrimenti reagirebbero immediatamente con l'ossigeno producendo composti indesiderati [17].

Il letto di polvere metallica è mantenuto a temperature piuttosto alte (oltre 870 K), dunque i tempi di raffreddamento sono decisamente molto maggiori rispetto alla tecnologia SLM. Tuttavia, lavorare a temperature così elevate permette di ottenere parti con minori tensioni residue, il che significa che tale tecnologia EBM richiede una minore quantità di supporti rispetto alla tecnologia laser SLM. Ciò comporta dunque un minore tempo di costruzione, minori scarti e riduce inoltre il tempo di post-processamento per eliminare gli stress residui e rimuovere i supporti [4]. Tuttavia, ad oggi uno dei principali limiti di questa tecnologia è la gamma piuttosto ristretta di materiali disponibili rispetto al SLM, anche a causa del fatto che molti materiali non sono in grado di resistere alle alte temperature con il quale questo macchinario lavora. Il processo EBM può essere utilizzato per lavorare con materiali fragili, che in genere non potrebbero essere processati con l'SLM. Questo è possibile grazie al lungo tempo di raffreddamento, riducendo notevolmente il rischio di rotture. Qui di seguito sono riassunti i principali vantaggi e svantaggi di questa tecnologia:

Vantaggi:

- Capacità di lavorare materiali fragili;
- Processo relativamente veloce;
- Minori supporti.

Svantaggi:

- Pochi materiali disponibili;
- Qualità della superficie medio-bassa;
- Tempi di raffreddamento elevati.

La tecnica EBM è stata sviluppata dall'azienda svedese Arcam. La strategia di business di questa azienda è focalizzata principalmente in ambiti ortopedici e in ambito aerospaziale. Le analisi di tale lavoro di tesi saranno affrontate in relazione al macchinario in dotazione da parte del Politecnico di Torino, ovvero l'Arcam A2x, attualmente top di gamma dell'azienda svedese nell'ambito della fabbricazione additiva mediante fascio di elettroni.

Hot Isostatic Pressing (HIP)

L'hot isostatic pressing rappresenta il trattamento termico necessario da effettuare sui pezzi prodotti mediante EBM, in modo tale da eliminare gli stress residui causati da una lavorazione ad alta temperatura. Questo trattamento è eseguito una volta rimossi i supporti dal pezzo e, successivamente ad esso, il pezzo privo di tensioni residue può essere ulteriormente lavorato eliminandone i sovrametalli e permettendo dunque successivamente di rifinire la superficie del pezzo, in modo tale da destinarlo alla vera e propria fase d'uso. Questa tecnica è usata in particolar modo per ridurre la porosità dei metalli e incrementare la densità nel caso di materiali ceramici. Ciò aumenta così la resilienza e la lavorabilità del materiale stesso. Il funzionamento di tale processo è rappresentato in Figura 30.

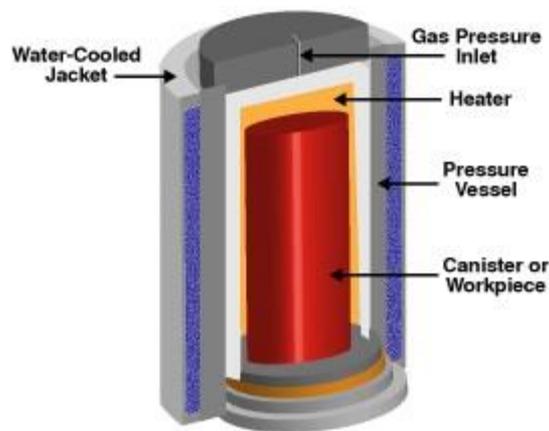


Figura 30. Schema di funzionamento dell'HIP [18]

Il processo consiste nel posizionare il componente in un ambiente gassoso posto ad elevata temperatura ed elevata pressione isostatica. Il gas utilizzato è tipicamente l'argon, ovvero un gas inerte che non reagisce chimicamente con il materiale e dunque non va a modificare le proprie caratteristiche e prestazioni future. Il termine isostatico deriva dal fatto che la pressione agisce uniformemente su tutte le superfici dell'oggetto. Il gas inerte è portato ad una pressione tra i 50.7 MPa e i 310 MPa, in base al materiale dell'oggetto da lavorare. La temperatura anch'essa è selezionata in funzione al materiale, essa varia tra i 482°C e i 1320°C. A seguito di questo processo sono eliminate le microporosità del pezzo, riducendo inoltre le microfessure generate dalla stampa e si consolida la polvere metallica, migliorando dunque le performance del pezzo prodotto [19].

Arcam A2x

Il modello A2x dell'azienda svedese leader del segmento EBM rappresenta il top di gamma attualmente sul mercato per la produzione di materiali a base di titanio. Grazie alle sue caratteristiche permette di realizzare componenti destinati in particolar modo ad uso ospedaliero, ad esempio la realizzazione di protesi per le anche mediante materiali più resistenti e duraturi, e aeronautico, come ad esempio la realizzazione delle palette delle turbine, di cui l'italiana AvioAero è leader del settore, con una dotazione di 31 A2x nel proprio stabilimento nel torinese. In tale macchinario, la camera di lavoro è tenuta a temperature molto elevate, fino a 1100°C. Ciò la rende dunque molto utile per la produzione di materiali a base di TiAl e leghe di Nickel. Inoltre, l'Arcam A2x è adatta per la ricerca e sviluppo di nuovi materiali alfofondenti. Il processo può portare ad una potenza di elettroni fino a 3000W e mantenere una velocità di stampa che permette la fusione simultanea di più aree contemporaneamente, riducendo dunque i tempi di produzione [15]. Il sistema di

vuoto, inoltre, è stato progettato per mantenere il vuoto ad un livello di $1 \cdot 10^{-5}$ mBar attraverso l'intero ciclo di produzione. Questo, insieme all'elevata temperatura, riduce notevolmente gli stress residui ed incrementa le proprietà del materiale. In Figura 31 è presentato il macchinario, mentre in Tabella 2 sono evidenziate le sue principali caratteristiche tecniche [16].



Figura 31 Arcam A2x [15]

Tabella 2 Caratteristiche Arcam A2x [15]

Max. build size	200 x 200 x 380 mm
Max beam power	3000 W
Cathode type	Tungsten filament
Min. Beam diameter	250 μ m
Max. EB translation speed	8000 m/s
Power supply	3x400 V, 32 A, 7 kW
Size	1850 x 900 x 2200 mm (W x D x H)
Weight	1700 kg
CAD interface	STL
Scan speed	55-80 cm ³ /h

2.2 SELECTIVE LASER MELTING (SLM)

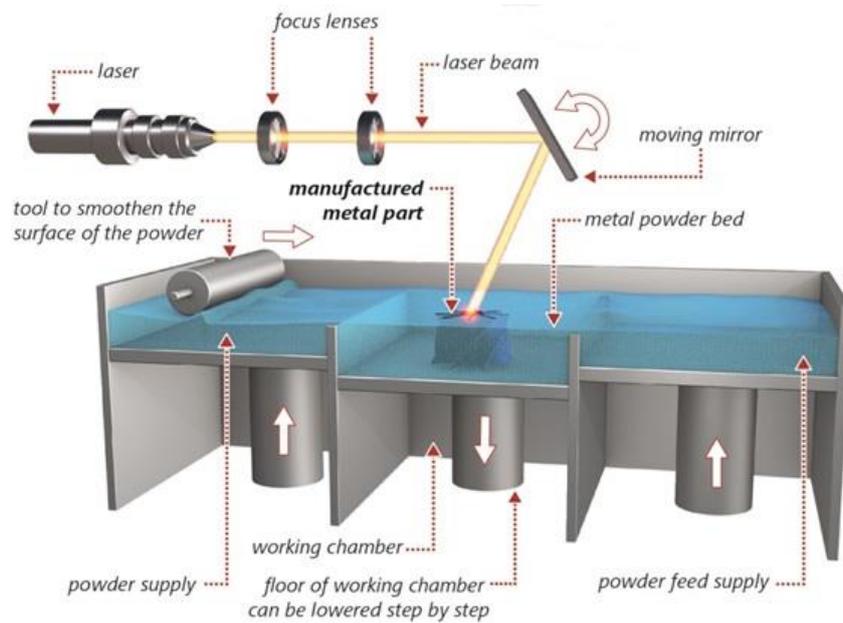


Figura 32 Schema di funzionamento della tecnologia SLM [20]

Come suggerisce il nome, il processo Selective Laser Melting (SLM) (Figura 32) utilizza un fascio laser che, attraverso un sistema di lenti e specchi, è indirizzato sul letto di polvere, andando a fondere le aree colpite. L'intero processo si svolge all'interno di una camera mantenuta chiusa, tipicamente riempita con un gas inerte, come ad esempio N₂ o Ar, in base alla reattività della polvere del metallo usato. Inoltre, durante il processo la camera di lavoro è mantenuta in condizioni di sovrappressione. La presenza di un gas inerte e la condizione di sovrappressione permette di minimizzare la contaminazione di ossigeno durante il processo [21].

Il processo SLM è ritenuto essere il più versatile nell'ambito dell'AM, poiché esso è in grado di lavorare con un'ampia gamma di materiali, quali ad esempio leghe di Alluminio, Titanio, Ferro, Nichel, Cobalto, Rame, etc. Inoltre, attraverso questa tecnologia si è in grado di produrre materiali amorfi, grazie all'alta velocità di raffreddamento di questi ultimi durante il processo. Il processo non è molto diverso dalla tecnologia EBM, tuttavia sussistono talune differenze, evidenziate nella (Tabella 3).

Tabella 3 Principali differenze tra EBM e SLM [17]

	EBM	SLM
Caratteristiche		
Sorgente	Fascio di elettroni	Fascio laser
Atmosfera	Vuoto	Gas inerte
Assorbimento energetico	Conduttività limitata	Assorbimento limitato
Pre-riscaldamento polvere	Utilizzo fascio di elettroni	Utilizzo raggi infrarossi
Velocità di stampa	Molto veloce	Limitata
Costi energetici	Moderati	Alti
Qualità della superficie	Medio-bassa	Medio-alta
Materiali	Metalli	Polimeri, metalli e ceramici

Questo tipo di processo possiede alcuni vantaggi e svantaggi, evidenziati qui di seguito:

Vantaggi:

- Ampia gamma di materiali disponibili;
- Più economica rispetto ad altri processi PBF;
- Qualità della superficie maggiore rispetto ad altri processi PBF.

Svantaggi:

- Processo relativamente lento (si può aumentarne la velocità inserendo altri fasci laser);
- Dimensioni ristrette dei pezzi (i volumi di lavoro sono piccoli);
- Alto consumo energetico;
- Alti costi iniziali;

Per questo tipo di tecnologia, la società tedesca EOS GmbH risulta essere leader del settore.

Stress Relieve

Il trattamento termico nel caso di utilizzo di una tecnologia SLM non è sempre eseguito, ma se si effettua è perché tale procedimento può migliorare le performance del pezzo e dunque garantirebbe una maggiore resilienza e compattezza della polvere metallica. Tipicamente il pezzo, una volta stampato e privato dei supporti, è inserito in un forno a vuoto, ad elevata temperatura per un predeterminato numero di ore, al fine di eliminare gli stress residui e garantire caratteristiche più performanti. Le temperature raggiunte nel forno possono arrivare intorno ai 1000°C, in base alla lega metallica da processare.

EOS M400

Il macchinario M400 è uno dei più venduti da parte dell'azienda tedesca EOS, grazie anche ad una camera di lavoro con un volume piuttosto ampio nel caso di produzione di metalli, essendo di 400 x 400 x 400 mm. Inoltre, un'ampia gamma di materiali può essere processata attraverso questo macchinario, il che lo rende molto versatile e ottimo per molteplici tipologie di produzioni. Tuttavia, le sue dimensioni sono piuttosto elevate, dunque è essenziale la presenza di molto spazio per la sua installazione. In Figura 33 è possibile apprezzare il macchinario, mentre in Tabella 4 sono riportate le principali caratteristiche tecniche.

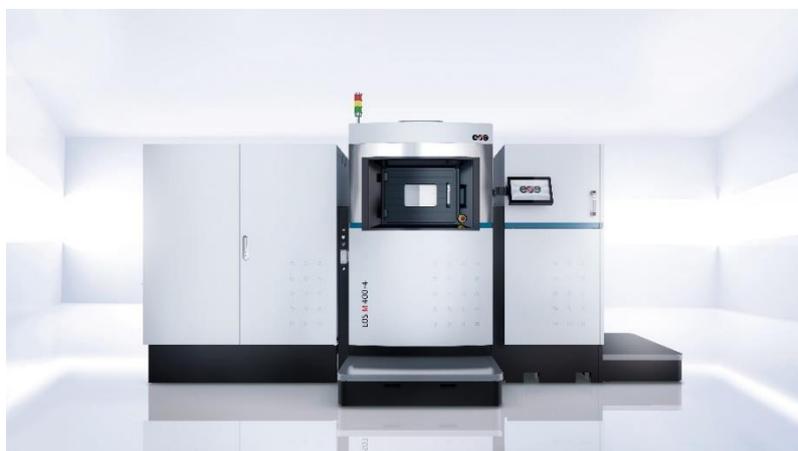


Figura 33 Eos M400 [22]

Tabella 4 Caratteristiche EOS M400 [22]

Max. build size	400 x 400 x 400 mm
Laser type	Yb-fiber laser; 1kW
Scan speed	Max. 7 m/s
Power consumption	Max 20.2 kW / typical 16.2 kW
Dimensions	4.181 x 1.613 x 2.355 mm
Weight	4635 kg
CAD interface	STL
Power supply	50 A

2.3 MATERIALI

L'utilizzo delle polveri metalliche (Figura 34) è risultato determinante per il successo dell'AM nell'ambito dei metalli, grazie al loro utilizzo nei processi PBF.



Figura 34 Esempio di polvere metallica Ti6Al4V [16]

Attualmente la sfida più importante deriva dalla scelta limitata di materiali, così come illustrato nella Tabella 5. Soltanto un numero limitato di leghe è disponibile al momento per i processi PBF, e per di più non tutte soddisfano i requisiti degli utenti finali, ovvero non sono adatte per la formazione di pezzi finiti destinabili alla fase d'uso, ma più per la realizzazione di prototipi. A questo bisogna inoltre aggiungere l'alto prezzo delle polveri, che varia tra 70€ e 500€ in base alla lega e al fornitore. Tale prezzo è influenzato anche dall'extra processo richiesto, ovvero l'atomizzazione per creare la polvere, e da un mark-up spesso applicato dai fornitori di tecnologie AM. L'utilizzo sempre più ampio dei processi PBF ha portato ad un aumento della domanda di polvere, spingendo i clienti a cercare forniture direttamente dai produttori di tale risorsa, che tuttavia al momento faticano a stare dietro a questo progressivo aumento di domanda [1]. Come si può facilmente immaginare, questa situazione ha attirato l'attenzione di un numero sempre più crescente di fornitori, quali ad esempio Alcoa, AP&C, ATI Speciality Materials, Carpenter Technology, Erasteel, GKN Powders, H.C. Starck, LPW, NanoSteel, Sandvik Materials Technology, etc [4].

Tabella 5 Leghe attualmente disponibili per le tecnologie SLM e EBM [4]

Tecnologia	Leghe
SLM	Al-Si, Co-Cr, IN718, IN625, Hast.X, Fe18Ni9Co, 17-4PH, 316L, PH1 steel, GP1 stainless steel, CX steel, Ti-6Al-4V
EBM	Ti-6Al-4V, Ti, Co-Cr- IN718

Processo di atomizzazione

Il processo di atomizzazione è un meccanismo utilizzato per ottenere polvere metallica a seguito della fusione di un filo o di una barra di metallo. Tipicamente l'atomizzazione può essere di due tipologie: a gas (Figura 35) o al plasma (Figura 37) [23]. Il processo si svolge all'interno di una camera di lavoro verticale in condizioni di vuoto, per evitare la presenza di ossigeno che potrebbe deteriorare le proprietà dell'output del processo [17]. Il suo costo energetico è piuttosto elevato, e bisognerà tenerne conto durante l'analisi del ciclo vita del pezzo.

Atomizzazione a gas

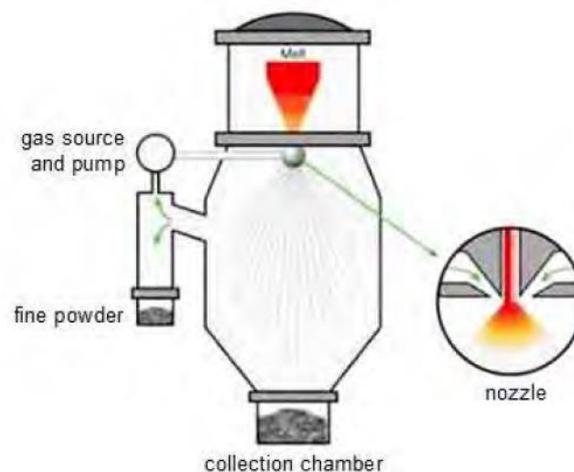


Figura 35 Schema di funzionamento del processo di atomizzazione a gas [24]

Si tratta del metodo più comunemente utilizzato per la produzione di polvere metallica. Il metallo è fuso all'interno di una camera in condizioni di vuoto, e durante il processo è riempita di gas per forzare la lega fusa attraverso un ugello dove aria ad alta velocità, N, He o Ar gas colpisce il fuso che scorre e lo spezza. La polvere prodotta è per lo più sferica e le dimensioni variano da 0 a 500 micron, in base al materiale lavorato. Questo metodo è principalmente utilizzato per leghe di Ni, Co e Fe, disponibile anche per leghe Ti e Al. Nel grafico sottostante (Figura 36) è evidenziata una distribuzione delle dimensioni delle polveri di Titanio [4].

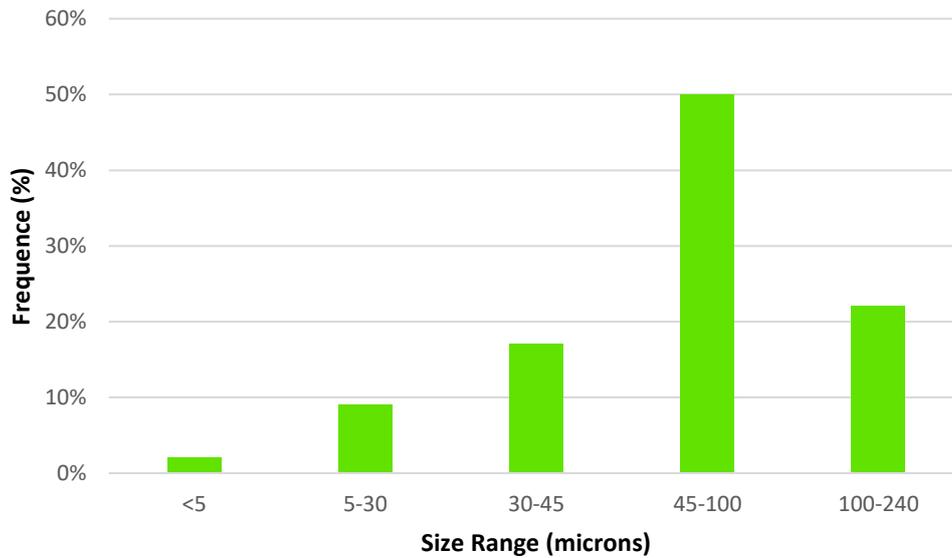


Figura 36 Distribuzione delle dimensioni di polvere a base di Titanio [25]

Atomizzazione al plasma

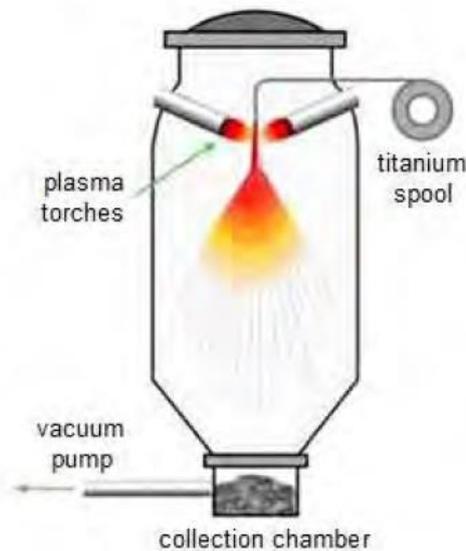


Figura 37 Schema di funzionamento del processo di atomizzazione al plasma [23]

Si tratta di una tecnica di atomizzazione relativamente nuova, ma che sta portando interessanti risultati, grazie alla sua precisione. Attraverso questo meccanismo (Figura 37) la materia prima è fusa da una torcia al plasma. Le polveri cadono lungo la camera verticale e sono raccolte alla base. Attraverso questo meccanismo si riesce ad ottenere una polvere metallica di alta qualità ed estremamente sferica, le cui dimensioni variano da 0 a 200 micron. Questo procedimento è però limitato a leghe che possono essere trasformate in un filo di alimentazione.

Materiali selezionati

Il prossimo passo è quello di definire e spiegare le caratteristiche principali dei due materiali scelti per questo lavoro, Ti6Al4V e AISi10Mg.

Ti6Al4V

La lega Ti6Al4V è una lega a base di Titanio dotata da un elevata percentuale di durezza, un basso peso e ottima resistenza alla corrosione, garantendogli dunque un ampio spazio per l'utilizzo di molteplici applicazioni, dove in genere è richiesto un elevato livello di accuratezza ed elevate performance. Infatti, tale materiale è utilizzato principalmente per applicazioni mediche, per l'industria aerospaziale e il settore automotive principalmente, anche grazie alla sua elevata temperatura di fusione (circa 1600°C). Le sue ottime caratteristiche hanno fatto sì che tale lega abbia rimpiazzato in poco tempo molti materiali e via via il suo utilizzo è sempre maggiore. Infatti, con il Ti6Al4V si è permesso di ottenere componenti più leggeri e più resistenti, garantendo una fase d'uso più ampia del prodotto e dunque una vita più lunga dell'oggetto, con performance più elevate. Le sue specifiche chimiche sono rappresentate in Figura 38.

Chemical composition of Ti6Al4V

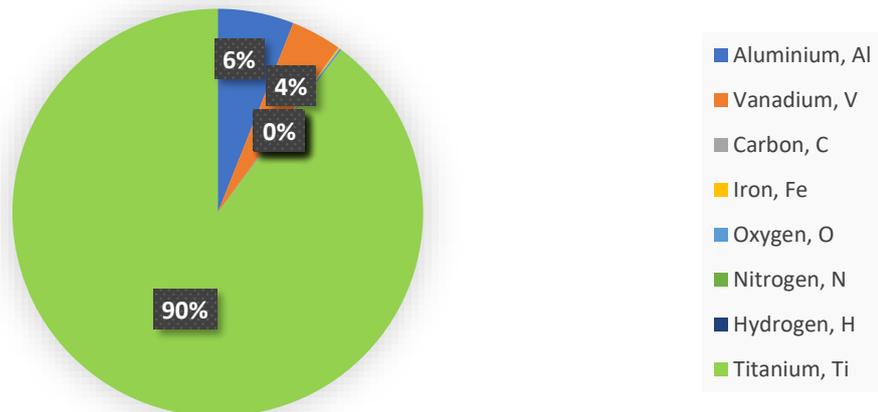


Figura 38 Composizione chimica Ti6Al4V [26]

Le parti prodotte mediante polvere di Ti6Al4V hanno una microstruttura migliore rispetto a processi di fonderia utilizzando la stessa lega, garantendo quindi caratteristiche e performance migliori se utilizzate nei processi di AM. La densità apprezzabile sul risultato finale è infatti maggiore nel caso di processi AM. In Figura 39 si può osservare un riduttore di un'auto da corsa realizzato utilizzando Ti6Al4V mediante tecnologia EBM. Infatti, in tale settore, questo materiale è sempre più utilizzato in quanto permette riduzioni di peso e maggiori caratteristiche meccaniche, garantendo dunque migliori performance e potenzialmente migliori risultati sportivi. Essendo un materiale con caratteristiche e proprietà ottime, ha un costo piuttosto elevato. La sua polvere, infatti, costa all'incirca sui 175 €/kg.



Figura 39 Riduttore di un'auto da corsa realizzato mediante EBM [16]

AlSi10Mg

L'AlSi10Mg è anch'essa una lega con ottime proprietà meccaniche e termiche, garantendo anch'essa un peso contenuto del prodotto finale. Grazie a queste caratteristiche, essa trova ampio spazio nel settore automotive, aerospaziale e anche dell'automazione. Le sue specifiche chimiche sono rappresentate in Figura 40.

Chemical composition of AlSi10Mg

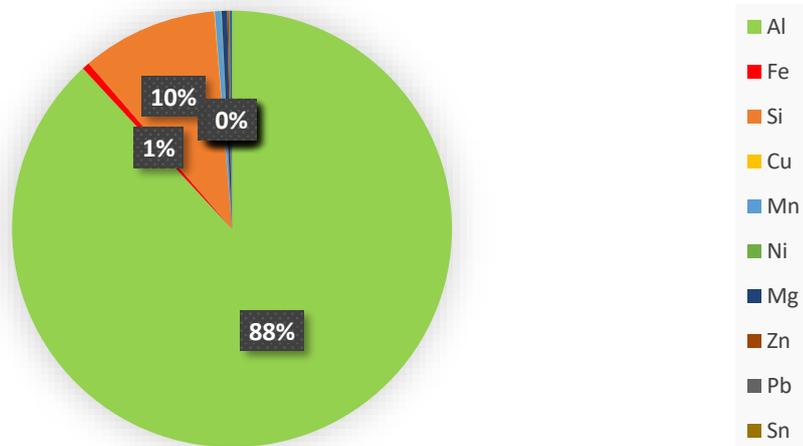


Figura 40 Composizione chimica AlSi10Mg [26]

Tuttavia, il principale limite di questa lega è la propria temperatura di fusione, tra i 549 e i 604°C, il che rende questo materiale non adatto ad essere lavorato tramite tecnologia EBM, in quanto lo strato di polvere è tenuto intorno ai 750°C e dunque il materiale fonderebbe subito. Per tale ragione, la lega AlSi10Mg non sarà utilizzata nel caso di processo EBM, ma solamente nel caso dell'SLM, a differenza del Ti6Al4V che sarà studiato confrontandolo in entrambi i processi AM.

2.4 ANALISI DEI FLUSSI DI MATERIALE

In questa sezione saranno presentati e discussi molteplici modelli, aventi il compito di delineare in maniera dettagliata il ciclo vita di un determinato componente, prodotto per via convenzionale CM, o mediante additive manufacturing AM. Una volta definito il ciclo di vita del prodotto, si andranno in seguito a definire le equazioni per entrambi gli approcci, in modo tale da modellizzare al meglio l'impatto economico, energetico e in termini di emissioni per la produzione del pezzo, evidenziando dunque le differenze che intercorrono nel caso di utilizzo di un processo produttivo rispetto ad un altro. Per avere un'analisi il più possibile omogenea, è importante considerare tutto ciò che entra all'interno del ciclo vita di un prodotto, dalla culla alla tomba. Per quest'analisi, però, è importante sottolineare che sono stati trascurati i trasporti, in quanto non rilevanti ai fini dell'analisi. Infatti, essi avrebbero solamente traslato di un fattore ϵ i risultati di ciascun approccio, senza andare a modificare le considerazioni finali. L'approccio convenzionale è stato definito in maniera generica CM e con esso ci si può riferire a molteplici tipologie di produzione, quali ad esempio fonderia, asportazione di truciolo, etc. Per quanto riguarda invece l'AM, ci si focalizzerà su due tipologie di produzione per metalli, l'Electron Beam Melting (EBM) ed il Selective Laser Melting (SLM), che hanno un processo del tutto simile ai fini della rappresentazione del flusso di materiale, ma ciò che li differenzia principalmente è il trattamento termico eseguito post-stampa del pezzo. Nel caso di EBM si effettua un trattamento termico definito Hot Isostatic Pressing (HIP), mentre nell'SLM si effettua un trattamento termico definito Stress Relieve. Le due tipologie di produzione via AM e i loro rispettivi trattamenti termici sono discussi all'inizio di tale capitolo. Le masse che entrano in gioco all'interno di quest'analisi di flussi di materiali sono definite nella Tabella 6. I materiali utilizzati per entrambi gli approcci sono stati il Ti6Al4V ed il AISi10Mg.

Tabella 6 Nomenclatura masse flusso di materiali

Name	Description	Unit of measure
m_m^{CM}	mass of raw material for the machined-based approach	kg
m_m^{AM}	mass of raw material for the AM-based approach	kg
m_w^{WP}	mass of the material wastes for the machined-based approach	kg
m_w^{PP}	mass of the material wastes for the AM-based approach	kg
m_{wp}	mass of the workpiece produced	kg
m_{pwd}	mass of powder needed for the AM-based approach	kg
m_c	mass of the exceeding material removed from the workpiece in the form of chips	kg
m_w	mass of the material losses during the process	kg
m_p^{CM}	mass of component produced by the machined-based approach	kg
m_p^{AM}	mass of the component produced by the AM-based approach	kg
m_s	mass of the support structures	kg
m_a	mass of the machining allowance	kg

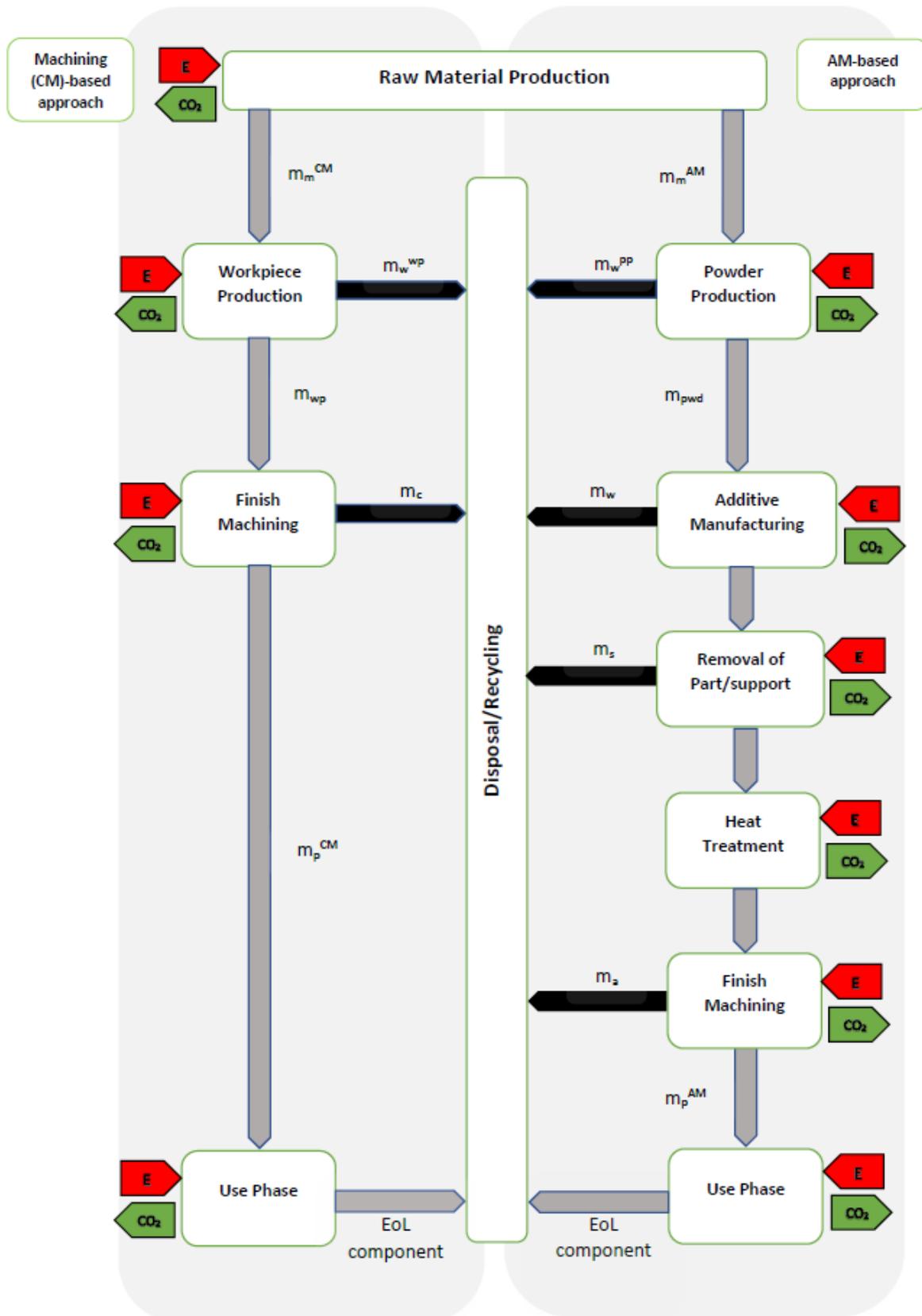


Figura 41 Analisi dei flussi di materiali CM (a sinistra) e AM generico (a destra)

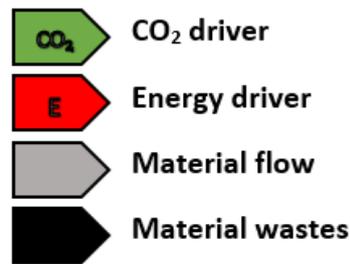


Figura 42 Legenda flussi di materiali

Nella Figura 41 è rappresentato il flusso di materiale che si ottiene mediante un approccio convenzionale CM (a sinistra) e mediante un approccio AM (a destra). Questo è l'approccio generico, mentre nelle successive figure (Figura 43 e 44), saranno riportati i diversi flussi di materiale nel caso specifico di EBM e SLM, sempre confrontati rispetto ad un processo produttivo tradizionale. Infine, in Figura 42 è riportata la legenda esplicativa dei simboli utilizzati.

Il processo parte dalla produzione di un materiale grezzo, necessario ad entrambi i processi. Tale materiale può essere prodotto per via primaria o secondaria (ed esempio riciclo).

Dal punto di vista dell'approccio CM, la massa grezza m_m^{CM} arriva e viene processata per realizzare il pezzo, ottenendo così il componente di massa m_{wp} , e rilasciando del materiale di scarto m_w^{wp} . Il pezzo ottenuto sarà a sua volta processato mediante operazioni di finitura, migliorandone la superficie, ma allo stesso tempo producendo degli scarti sottoforma di chips, m_c , ottenendo così il pezzo finale di massa m_p^{CM} , destinato alla fase d'uso. Una volta ultimato il suo ciclo di vita (End of Life EoL), una certa percentuale di esso potrà essere riciclata per lavorazioni future.

Per quanto riguarda invece l'approccio AM, il processo è arricchito da diverse fasi, ora analizzate. A partire dalla produzione di materiale grezzo, una certa quantità m_m^{AM} di materiale entra all'interno del processo. La prima fase consiste nella formazione di polvere, dunque un processo di atomizzazione, con l'obiettivo di ottenere una quantità di polvere m_{pwd} da inserire all'interno del macchinario per stampare il componente. Durante la fase di atomizzazione si producono degli scarti, denominati m_w^{pp} , che in queste analisi saranno trascurati, in quanto impattano in maniera infinitesimale sui risultati. La polvere è dunque inserita all'interno del macchinario e si procede alla realizzazione del pezzo, mediante EBM o SLM. All'interno del processo di stampa, si avranno anche qui degli scarti, rappresentati da m_w , ma anch'esso sarà trascurato nelle analisi, in quanto ci si porrà nelle condizioni di riempimento completo (full build) del macchinario, così facendo il suo impatto risulta veramente molto piccolo, dunque trascurabile. Finita la stampa, il componente è prelevato da un operatore e passa alla fase successiva, ovvero la rimozione dei supporti m_s . Ultimata questa procedura, il pezzo, che durante il processo ha subito un elevato stress termico a causa delle elevate temperature di lavoro della stampante, è sottoposto ad un trattamento termico (HIP per l'EBM e Stress Relieve per l'SLM), in modo tale da eliminare gli stress residui. Ultimata questa fase, il componente è destinato a operazioni di finitura, in modo tale da eliminare i sovrametalli m_a , ottenendo così il pezzo finale di massa m_p^{AM} , destinato alla fase d'uso. Anche secondo la logica AM, una volta ultimato il ciclo di vita, una certa percentuale del materiale potrà essere riciclata per nuove lavorazioni.

Per completezza, in Figura 43 è riportata l'analisi dei flussi di materiale prendendo come tecnologia AM l'Electron Beam Melting EBM, mentre in Figura 44 è riportata la stessa analisi dei flussi, ma questa volta prendendo come riferimento la tecnologia Selective Laser Melting SLM. A seguito di queste considerazioni, si può passare a definire i modelli delle equazioni che serviranno successivamente per effettuare le analisi di sostenibilità.

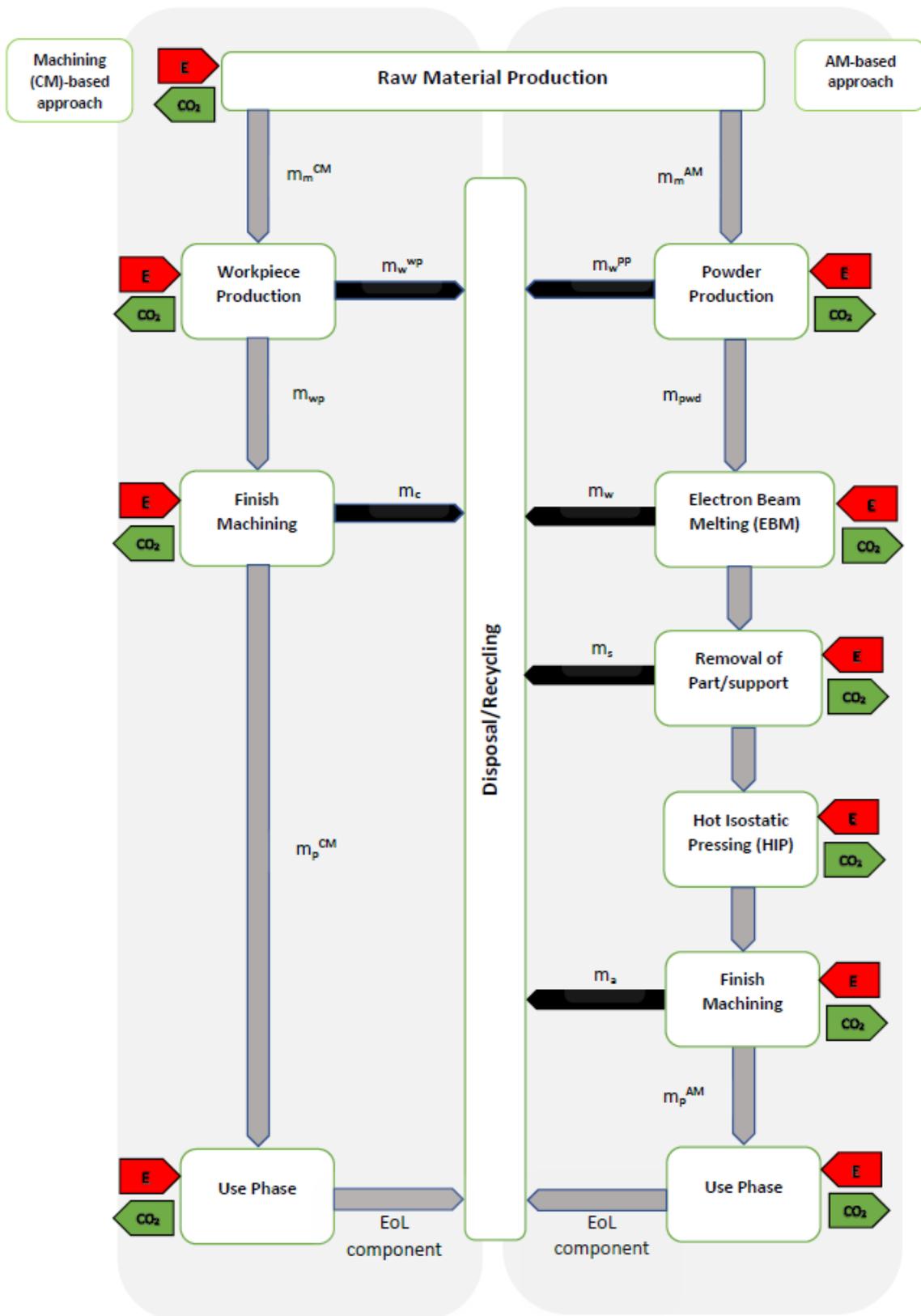


Figura 43 Analisi flussi di materiali tra CM (sinistra) e EBM (destra)

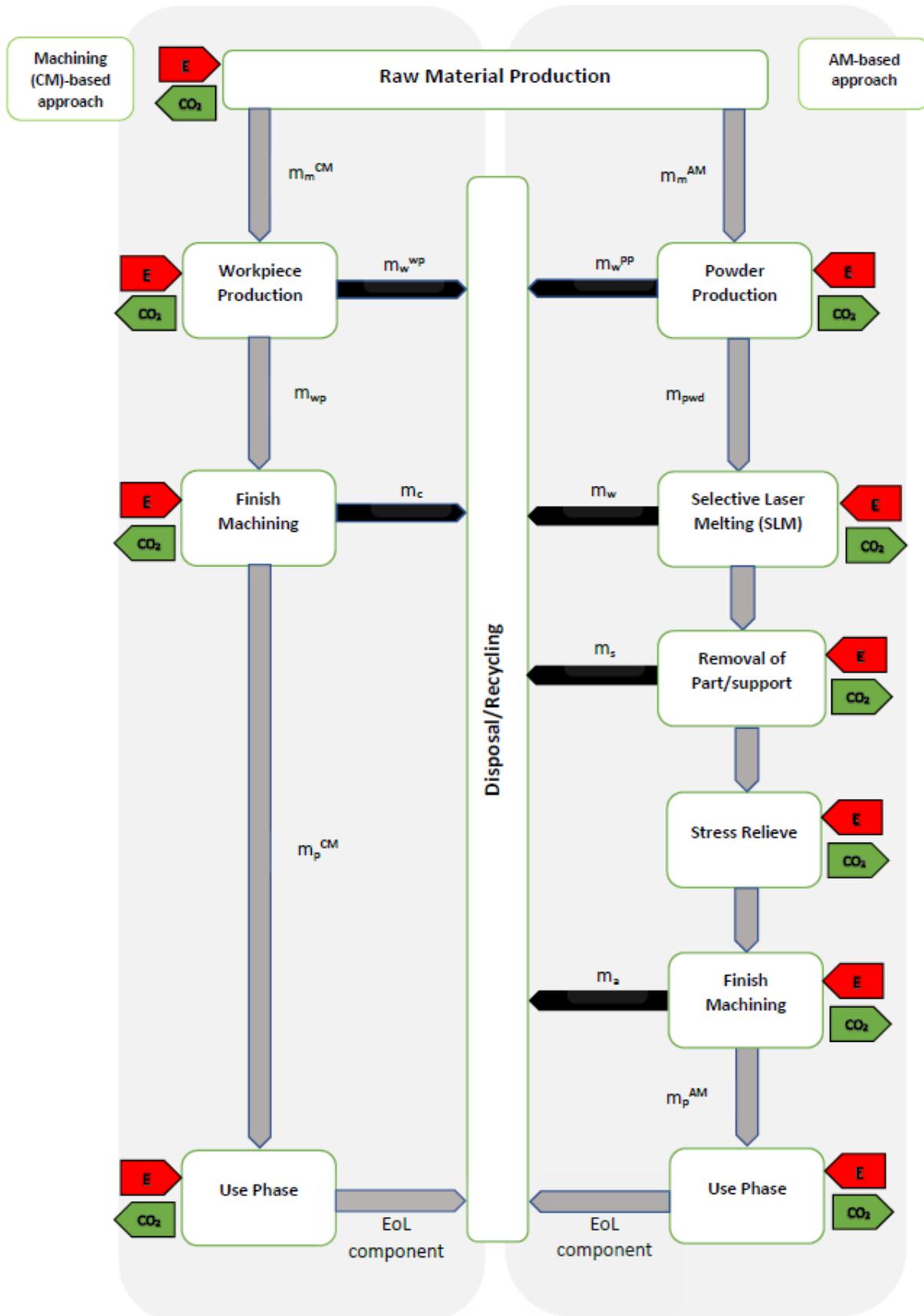


Figura 44 Analisi flussi di materiali tra CM (sinistra) e SLM (destra)

2.5 MODELLO ENERGETICO

La prima analisi riguarda il calcolo del fabbisogno energetico necessario per la realizzazione di un determinato componente, confrontando un approccio tradizionale rispetto ad un approccio AM. Per ottenere tale risultato sono state realizzate equazioni empiriche [27], che cercano di modellizzare al meglio l'analisi, influenzata da diversi fattori, espressi nel dettaglio nella Tabella 7.

Tabella 7 Nomenclatura degli input per le equazioni energetiche

Name	Description	Unit of measure
Y_{WF}	Input/output material ratio for workpiece forming	-
Y_{AM}	Input/output material ratio for powder atomization	-
E_{CM}	Energy demand for CM throughout the whole life cycle	MJ/part
E_{AM}	Energy demand for AM throughout the whole life cycle	MJ/part
E_{MT}	Electric energy consumption of the machine tool	kWh
H	Primary to secondary energy conversion factor	-
E_E	Embodied energy of the material	MJ/kg
E_F	Energy demand for forming the workpiece for CM	MJ/kg
E_A	Energy demand for metal powder atomization for AM	MJ/kg
P_{stb}^{AM}	Standby power of the AM machine	kW
t_s^{AM}	Standby time for the AM machine	h
SEC^{AM}	Specific energy consumption of the AM machine during deposition	kWh/kg of deposited material
E_{tool_i}	Embodied energy of the cutting tool i	MJ/kg
t_c	Cutting time	h
T_i	Tool life	h
E_{gas}	Embodied primary energy of the support gas	MJ/m ³
q_{gas}	Consumption of the support gas during the job deposition	m ³
E_{SEP}	Primary energy for separating the part from the build plate and for the support removal	MJ/kg
E_{HT}	Specific primary energy for the heat treatment	MJ/kg
E_{lub}	Embodied energy of the cutting fluid	MJ/kg
q_L	Consumption rate of the cutting fluid	kg/h
E_{FM}	Energy for finish machining	MJ/kg

P_{stb}^M	Standby power of the machine tool	kW
t_s^M	Standby time of the machine tool	h
SEC_i^M	Specific energy consumption of the machine tool when cutting	kWh/kg of removed material
t_{tc_i}	Time for tool change	h

Per spiegare dettagliatamente ciò che influenza l'analisi, si è preferito suddividere le equazioni risultanti in diverse parti relative alle rispettive fasi del processo, in modo tale da spiegarle singolarmente.

Approccio CM

Material production

Per valutare l'impatto energetico necessario per la produzione del materiale bisogna considerare due fattori energetici, il primo denominato "Embodied Energy", E_E , ovvero l'energia impiegata per la realizzazione, utilizzo e smaltimento del materiale, tenendo inoltre conto della riciclabilità del materiale stesso. Il secondo termine, E_F , rappresenta l'energia richiesta per la formazione del pezzo. Tali fattori dovranno poi essere moltiplicati per la quantità di materiale iniziale nel processo, espressa in Figura 41 come m_m^{CM} , ma che può anche essere vista come rappresentato nell'equazione (1):

$$m_m^{CM} = y_{WF} \cdot m_{wp} = y_{WF} \cdot (m_p^{CM} + m_c) \quad (1)$$

L'equazione rappresentante il consumo energetico relativo alla "Material Production" risulta quindi essere (2):

$$E_{MAT}^{CM} = y_{MF} \cdot (m_p^{CM} + m_c) \cdot (E_E + E_F) \quad (2)$$

Manufacturing

L'equazione rappresentante il fabbisogno energetico richiesto per la produzione del componente è espressa da (3):

$$E_{MFG}^{CM} = \frac{3.6}{\eta} \cdot E_{MT} + \sum_{i=1}^n (E_{tool_i} \cdot \frac{t_{c_i}}{T_i}) + E_{lub} \cdot q_L \cdot t_c \quad (3)$$

Dove il rapporto $\frac{3.6}{\eta}$ rappresenta un fattore di conversione applicato per correggere la domanda di energia elettrica della macchina utensile, espressa come E_{MT} . A questo si aggiungono i contributi energetici E_{tool_i} , ovvero l'embodied energy dell'i-esimo utensile da taglio durante il suo tempo di utilizzo, infine E_{lub} , che indica l'embodied energy del refrigerante utilizzato, calcolato rispetto al tasso q_L e al tempo di utilizzo t_c . L'espressione di E_{MT} può a sua volta essere estesa come segue (4):

$$E_{MT} = P_{stb}^M \cdot t_s^M + \sum_{i=1}^n (SEC_i^M \cdot m_{c_i} + P_{stb}^M \cdot t_{c_i} \cdot \frac{t_{c_i}}{T_i}) \quad (4)$$

In tale espressione (4) si tiene dunque conto della potenza in standby della macchina utensile, P_{stb}^M , ed il suo consumo energetico SEC_i^M durante l'utilizzo.

Equazione completa approccio CM

Per ottenere l'equazione completa è necessario sommare (2) e (3), ricavando così l'espressione (5) sottostante:

$$E_{CM} = y_{MF} \cdot (m_p^{CM} + m_c) \cdot (E_E + E_F) + \frac{3.6}{\eta} \cdot E_{MT} + \sum_{i=1}^n (E_{tool_i} \cdot \frac{t_{c_i}}{T_i}) + E_{lub} \cdot q_L \cdot t_c \quad (5)$$

Sostituendo (4) in (5) ottengo l'equazione (6), che rappresenta la domanda di energia necessaria per la produzione di un pezzo realizzato mediante un processo convenzionale:

$$E_{CM} = y_{MF} \cdot (m_p^{CM} + m_c) \cdot (E_E + E_F) + \frac{3.6}{\eta} \cdot [P_{stb}^M \cdot t_s^M + \sum_{i=1}^n (SEC_i^M \cdot m_{c_i} + P_{stb}^M \cdot t_{c_i} \cdot \frac{t_{c_i}}{T_i})] + \sum_{i=1}^n (E_{tool_i} \cdot \frac{t_{c_i}}{T_i}) + E_{lub} \cdot q_L \cdot t_c \quad (6)$$

Approccio AM

Material production

Per valutare l'impatto energetico nel caso della produzione del materiale, con l'approccio AM bisogna considerare, oltre all'embodied energy E_E del materiale stesso, anche l'energia richiesta per l'atomizzazione del materiale E_A , processo che porta alla creazione di polvere metallica, utilizzata nei processi EBM e SLM. Per E_E anche in questo caso bisogna tenere conto della riciclabilità del materiale. Tali contributi energetici andranno moltiplicati con la massa iniziale di materiale che entra nel processo (Figura 41), indicata come segue (7):

$$m_m^{AM} = y_{GA} \cdot m_{pwd} = y_{GA} \cdot (m_p^{AM} + m_s + m_a + m_w + m_w^{pp}) \quad (7)$$

Come già annunciato ad inizio capitolo, per tale analisi i valori di m_w e m_w^{pp} sono stati trascurati, sotto l'ipotesi che l'efficienza del flusso di materiale sia prossima a 1. L'espressione può dunque essere semplificata in questa maniera (8):

$$m_m^{AM} = y_{GA} \cdot (m_p^{AM} + m_s + m_a) \quad (8)$$

O in alternativa può anche essere riscritta come in (9), tenendo conto di un fattore k che si va a moltiplicare per la massa ottenuta mediante approccio tradizionale, m_p^{CM} . Questo fattore k è un valore adimensionale, di valore compreso tra 0 e 1, rappresentante la riduzione di peso del pezzo riprogettato per AM rispetto ad un processo convenzionale CM.

$$m_m^{AM} = y_{GA} \cdot (k \cdot m_p^{CM} + m_s + m_a) \quad (9)$$

L'espressione relativa alla domanda di energia per la produzione di materiale è dunque esprimibile come (10), o in alternativa (11):

$$E_{MAT}^{AM} = y_{GA} \cdot (m_p^{AM} + m_s + m_a) \cdot (E_E + E_A) \quad (10)$$

Oppure

$$E_{MAT}^{AM} = y_{GA} \cdot (k \cdot m_p^{CM} + m_s + m_a) \cdot (E_E + E_A) \quad (11)$$

Manufacturing

Per il calcolo della domanda energetica durante il processo di manufacturing, anche nell'approccio AM bisogna integrare la formula con il fattore di correzione $\frac{3.6}{\eta}$, che si va a moltiplicare per la potenza in standby della stampante ed il proprio consumo di energia specifica SEC^{AM} durante il processo di stampa. Per completare l'equazione si aggiungono inoltre altre componenti energetiche, relative al gas di supporto all'interno della macchina (E_{gas}), o componenti energetiche che si hanno successivamente alla realizzazione del pezzo, come E_{SEP} , che rappresenta l'energia necessaria per la rimozione dei supporti, E_{HT} , che indica l'energia necessaria per il trattamento termico post-stampa (HIP nel caso di EBM, o Stress relieve nel caso di SLM) e infine E_{FM} , ovvero l'energia necessaria per le operazioni di finitura. Aggregando tutte queste componenti si ottiene l'espressione (12), o in alternativa (13), includendo il fattore k .

$$E_{MFG}^{AM} = \frac{3.6}{\eta} \cdot (P_{stb}^{AM} \cdot t_s^{AM} + SEC^{AM} \cdot m_{pwd}) + E_{gas} \cdot q_{gas} + E_{SEP} \cdot m_s + E_{HT} \cdot (m_p^{AM} + m_a) + E_{FM} \cdot m_a \quad (12)$$

Oppure

$$E_{MFG}^{AM} = \frac{3.6}{\eta} \cdot (P_{stb}^{AM} \cdot t_s^{AM} + SEC^{AM} \cdot m_{pwd}) + E_{gas} \cdot q_{gas} + E_{SEP} \cdot m_s + E_{HT} \cdot (k \cdot m_p^{CM} + m_a) + E_{FM} \cdot m_a \quad (13)$$

Equazione completa approccio AM

Per ottenere l'equazione completa è necessario sommare le espressioni (10) e (12), o in alternativa (11) e (13), ottenendo così (14) e (15), utili per le successive analisi.

$$E_{AM} = y_{GA} \cdot (m_p^{AM} + m_s + m_a) \cdot (E_E + E_A) + \frac{3.6}{\eta} \cdot (P_{stb}^{AM} \cdot t_s^{AM} + SEC^{AM} \cdot m_{pwa}) + E_{gas} \cdot q_{gas} + E_{SEP} \cdot m_s + E_{HT} \cdot (m_p^{AM} + m_a) + E_{FM} \cdot m_a \quad (14)$$

Oppure

$$E_{AM} = y_{GA} \cdot (k \cdot m_p^{CM} + m_s + m_a) \cdot (E_E + E_A) + \frac{3.6}{\eta} \cdot (P_{stb}^{AM} \cdot t_s^{AM} + SEC^{AM} \cdot m_{pwa}) + E_{gas} \cdot q_{gas} + E_{SEP} \cdot m_s + E_{HT} \cdot (k \cdot m_p^{CM} + m_a) + E_{FM} \cdot m_a \quad (15)$$

Dati

Una volta definite le espressioni definitive, riguardanti il fabbisogno energetico per la realizzazione del componente, si procede definendo i dati che entreranno all'interno di questa analisi di sostenibilità. I dati sono stati ottenuti dalla letteratura, da casi di studio reali, mentre alcuni derivano da assunzioni specifiche per il caso in esame. Nella Tabella 8 e 9 sono mostrati i valori che entreranno all'interno dell'analisi, nel caso di approccio CM e approccio AM, rispettivamente.

Tabella 8 Dati relativi alle equazioni energetiche, approccio CM

Name	Unit of measure	Ti6Al4V	AlSi10Mg	AISI4340
y_{MF}	-	1.25 [26]	1.25 [26]	1.25 [26]
E_F	MJ/kg	14.5 [28]	11.2 [29]	32.35 [26]
P_{stb}^M	kW	2.2 [27]	2.2 [27]	2.2 [27]
t_s^M	H	0.5 [27]	0.5 [27]	0.5 [27]
SEC_i^M	kWh/kg of removed material	9.9 [30]	8.7 [31]	9.9
T_i	H	0.5 [27]	0.5 [27]	0.5 [27]
E_{tool_i}	MJ/kg	400 [27]	400 [27]	400 [27]
E_{lub}	MJ/kg	1.37 [32]	1.37 [32]	1.37 [32]
q_L	kg/h	0.233 [33]	0.233 [33]	0.233 [33]

In riferimento alla Tabella 8, i dati in questione provengono da casi di studio o da assunzioni effettuate in relazione al caso specifico affrontato nel capitolo successivo. Per tutti i materiali sono stati espressi i dati relativi ad essi. Alcuni valori sono tuttavia comuni, come ad esempio y_{MF} , che può essere inteso come un valore di efficienza per la realizzazione della barra di materiale che sarà utilizzato per il processo, è espresso come un rapporto tra la massa in ingresso e la massa in uscita. Nel caso di approccio tradizionale, si lavora a caldo per realizzare la barra di materiale, ciò comporta strati di ossido che necessitano di essere asportati. Dunque, per ottenere 1 kg di materiale in uscita saranno necessari 1.25 kg di materiale in ingresso. Per l'embodied energy destinata al forming sono stati considerati valori pari a 14.5 MJ/kg per la lega Ti6Al4V [28], 11.2 MJ/kg per l'AlSi10Mg [29] e 32.35 per l'AISI4340 [26]. La fase di standby è stata ipotizzata in 30 minuti,

con una potenza dei macchinari pari a 2.2 kW in questa fase [27]. Come valori del SEC sono stati considerati valori assunti da precedenti casi di studio, relativi alle tre leghe considerate [30] [31]. Per la lega AISI4340 è stato ipotizzato un valore analogo al Ti6Al4V. La vita utile dell'utensile è stata posta pari a 30 minuti, mentre l'embodied energy degli utensili utilizzati è stata stabilita pari a 400 MJ/kg [27]. Infine, per l'embodied energy del refrigerante è stato assunto un valore pari a 1.37 MJ/kg [32], mentre per il valore di q_L si è preso un valore pari a 0.233 kg/h [33], per tutte e tre le leghe. Per analisi successive sarà opportuno definire il Material Removal Rate MRR per ogni processo, utile per ricavare il tempo di lavorazione del pezzo. MRR è funzione di alcuni parametri, ovvero la velocità di taglio, la profondità di passata assiale, la profondità di passata radiale e il feed. Per questo lavoro sono stati considerati due processi, la sgrossatura (roughing) e la finitura (finishing). I risultati considerati per questo studio sono espressi in Tabella 9 e saranno utilizzati nel prossimo capitolo.

Tabella 9 Parametri di processo per le operazioni di sgrossatura e finitura

Process parameter	Unit of measure	Roughing	Finishing
Cutting speed	m/min	200 [31]	25 [31]
Depth of cut	mm	1.5 [31]	0.25 [31]
Feed	mm/rev	0.3 [31]	0.15 [31]
MRR	cm ³ /min	90 [31]	9.4 [31]

Tabella 10 Dati relativi alle equazioni energetiche, approccio AM

Name	Unit of measure	SLM		EBM
		Ti6Al4V	AlSi10Mg	Ti6Al4V
y_{GA}	-	1.05 [26]	1.05 [26]	1.05 [26]
E_E	MJ/kg	207.42 [30]	40.47 [29]	207.42 [30]
E_A	MJ/kg	70 [30]	8.1 [29]	70 [30]
η	-	0.36 [27]	0.36 [27]	0.36 [27]
P_{stb}^{AM}	kW	0.82 [33]	0.82 [33]	0.82 [33]
t_s^{AM}	h	1	1	1
SEC^{AM}	kWh/kg of deposited material	70.5	70.5	59.96 [34]
E_{gas}	MJ/m ³	1.1 [33]	1.1 [33]	1.1 [33]
q_{gas}	m ³	1 [33]	1 [33]	1 [33]
E_{SEP}	MJ/kg	37 [35]	37 [35]	37 [35]
E_{HT}	MJ/kg	122 [35]	1.53 [36]	122 [35]
E_{FM}	MJ/kg	19.45 [37]	5.1 [29]	19.45 [37]

Analizzando invece i dati relativi all'AM, riportati in Tabella 10, si può notare come l' y_{GA} presenti un valore minore rispetto all'approccio convenzionale, indicando dunque che l'efficienza del processo di atomizzazione è maggiore, poiché per ottenere 1 kg di metallo in uscita, bisogna avere come input 1.05 kg di materiale, a differenza di 1.25 kg visto nel caso precedente. In questo caso bisognerà considerare dunque l'energia richiesta per il processo di atomizzazione, più alta nel caso di utilizzo del Ti6Al4V anche a causa della sua maggiore temperatura di fusione, che dunque richiede intuitivamente maggiore energia per essere processato e atomizzato. Analogamente, anche l'Embodied Energy E_E presenterà valori superiori nel caso del Ti6Al4V [26]. Per il processo AM è stato ipotizzato un tempo di setup di 1 ora, valore ragionevolmente

più alto rispetto ai processi tradizionali. Inoltre, la potenza in standby del macchinario oscilla tipicamente tra valori compresi tra 0.36 e 2 kW [33]. Ipotizzando dunque 1 h di setup, si avrebbe un intervallo compreso tra 0.36 e 2 kWh. Qui è importante distinguere quanti pezzi saranno prodotti all'interno del volume macchina, poiché nel caso di realizzazione di un unico pezzo, questo quantitativo sarà allocato interamente all'oggetto prodotto, mentre se sul volume di lavoro si riuscissero a realizzare più parti contemporaneamente, allora si potrebbe spalmare tale valore sul numero di componenti realizzati. Per questo lavoro è stato ipotizzato un valore medio di 0.82 kW, per entrambi i processi produttivi SLM e EBM. Analogamente, per quanto riguarda l'SLM il *SEC* presenta un range esteso, compreso tra 23 kWh/kg di materiale depositato (con un deposition rate di 0.078 kg/h) e 118 kWh/kg di materiale depositato (con un deposition rate di 0.028 kg/h) [33]. Per un'analisi di prima approssimazione è stato preso come riferimento un valor medio, pari a 70.5 kWh/kg di materiale depositato, corrispondenti ad un deposition rate di circa 0.053 kg/h. Per l'approccio EBM è stato considerato invece un SEC pari a 59.96 MJ/kg [34]. Il gas utilizzato nel processo risulta essere l'Argon. Un consumo medio di 1 m³ è stato assunto, a fronte di un embodied energy (primaria) dell'Argon pari a 1.1 MJ/m³ [33]. La rimozione del componente dal piano di lavoro, e la rimozione dei supporti stessi comporta altresì un dispendio energetico, soprattutto se non è l'operatore ad eseguirlo, ma operazioni specifiche, come ad esempio il wire-Electrical Discharge Machining. In questo caso, per il titanio è stato assunto un valore pari a 37 MJ/kg [35]. Per l'alluminio invece tale valore può essere trascurato nel caso di rimozioni manuali da parte dell'operatore, altrimenti deve essere incluso nello studio. In tale lavoro si è deciso di assumere lo stesso valore anche per la lega di alluminio. Successivamente alla rimozione dei supporti si procede al trattamento termico. Il trattamento termico relativo al Ti6Al4V comporta un fabbisogno energetico di circa 122 MJ/kg [35], mentre per l'AlSi10Mg si è deciso di utilizzare una proxy, l'acciaio 316L, ottenendo un valore pari a 1.53 MJ/kg [36]. Infine, la rimozione dei sovrametalli richiede altresì un dispendio energetico, maggiore nel caso di utilizzo di polvere di titanio.

2.6 MODELLO COSTI

Il passo successivo riguarda la definizione dei costi totali per la realizzazione del componente. Le voci che entrano all'interno di tale analisi sono rappresentate in Tabella 11 [27].

Tabella 11 Nomenclatura degli input per le equazioni economiche

Name	Description	Unit of measure
C_{tot}^{CM}	Total cost for CM approach	€
C_{tot}^{AM}	Total cost for AM approach	€
C_{ind}^{CM}	Indirect cost rate for CM	€/h
C_{ind}^{AM}	Indirect cost rate for AM	€/h
t_{idle}^{CM}	Idle time for CM process	h
t_{idle}^{AM}	Idle time for AM process	h
t_{mach}	Total machining time	h
t_{build}	Total build time	h
C_{op}^{CM}	Labour charge rate for the machine tool operator	€/h
C_{op}^{AM}	Labour charge rate for the AM machine operator	€/h
γ^{CM}	Rate of employment of the machine tool operator, $\gamma^{CM} \leq 1$	-
γ^{AM}	Rate of employment of the AM machine operator, $\gamma^{AM} \leq 1$	-
C_{wp}	Purchase cost of the workpiece	€/kg
C_{pwd}	Purchase cost of the powder	€/kg

C_{EE}	Cost of the electric energy	€/kWh
E_{MT}	Electric energy consumption of the machine tool	kWh
E_{idle}^{AM}	Electric energy consumption of the AM machine when idling	kWh
SEC^{AM}	Specific energy consumption of the AM machine during deposition	kWh/kg
C_{Tool}	Cost of the cutting tool	€/kg
C_{Lub}	Cost for the lubricoolant	€/kg
C_{gas}	Cost of the support gas	€/m ³
q_{gas}	Consumption of the gas	m ³
C_{SEP}	Cost for the removal of part/support structures	€/kg
C_{HT}	Specific cost for the heat treatment	€/kg
C_{FM}	Cost for the finish machining operations	€/kg

Anche in questo caso, l'approccio è stato quello di suddividere in diverse funzioni l'equazione finale, in modo tale da spiegare nel dettaglio le singole fasi del processo. Il costo totale sarà dunque una somma di quattro voci differenti, relativi ai costi indiretti, del lavoro, del materiale e del processo.

Approccio CM

Indirect cost of the machining

All'interno dei costi indiretti sono stati considerati spese generali, come materiali di consumo, manutenzione e costi di acquisto dei macchinari. Questi costi sono stati poi allocati per l'intera durata del processo di lavorazione del pezzo, includendo anche i tempi di inattività t_{idle}^{CM} . L'espressione relativa ai costi indiretti diviene dunque (16):

$$C_{IndTot}^{CM} = C_{Ind}^{CM} \cdot (t_{idle}^{CM} + t_{mach}) \quad (16)$$

Labour cost of the machining

I costi del lavoro sono stati ottenuti moltiplicando C_{op}^{CM} , ovvero la remunerazione oraria dell'operatore, per i tempi di lavorazione già espressi in (16), includendo inoltre un fattore γ^{CM} , indicante il tasso di impiego dell'operatore della macchina utensile. La funzione (17) diviene:

$$C_{opTot}^{CM} = C_{op}^{CM} \cdot (t_{idle}^{CM} + \gamma^{CM} \cdot t_{mach}) \quad (17)$$

Material purchase cost

Per valutare i costi d'acquisto del materiale è stato moltiplicato il costo C_{wp} del materiale per la quantità di materiale m_{wp} , ottenendo l'equazione (18):

$$C_{purTot}^{CM} = C_{wp} \cdot m_{wp} \quad (18)$$

Processing cost

L'ultima voce di costo tiene conto di diversi fattori, quali il costo dell'energia elettrica C_{EE} , moltiplicato per la domanda di energia elettrica E_{MT} della macchina utensile, il costo C_{Tool} dello strumento di taglio e il costo C_{Lub} del refrigerante. Sommando questi contributi si ottiene la funzione (19):

$$C_{protTot}^{CM} = C_{EE} \cdot E_{MT} + C_{Tool} + C_{Lub} \quad (19)$$

Equazione completa approccio CM

Per ottenere l'equazione completa è necessario sommare le quattro voci di costo appena definite, ottenendo così l'equazione di costo totale (20) relativa all'approccio CM:

$$C_{tot}^{CM} = C_{Ind}^{CM} \cdot (t_{idle}^{CM} + t_{mach}) + C_{op}^{CM} \cdot (t_{idle}^{CM} + \gamma^{CM} \cdot t_{mach}) + C_{wp} \cdot m_{wp} + C_{EE} \cdot E_{MT} + C_{Tool} + C_{Lub} \quad (20)$$

Approccio AM

Indirect cost of the additive process

Analogamente al caso CM, all'interno di questa voce di costo si considerano spese generali, amministrative, di manutenzione e di acquisto del macchinario. Questa voce andrà poi moltiplicata per i tempi di lavorazione del pezzo, includendo i tempi di inattività. Si ottiene così l'espressione (21):

$$C_{IndTot}^{AM} = C_{Ind}^{AM} \cdot (t_{idle}^{AM} + t_{build}) \quad (21)$$

Labour cost of the additive process

Anche in questo caso l'approccio è analogo, includendo gli stessi fattori, ma riferiti alla produzione AM. L'espressione (22) che ne deriva è:

$$C_{opTot}^{AM} = C_{op}^{AM} \cdot (t_{idle}^{AM} + \gamma^{AM} \cdot t_{build}) \quad (22)$$

Material purchase cost

Per il costo di acquisto del materiale bisogna moltiplicare il costo della polvere metallica per la quantità di polvere m_{pwd} , ottenendo così l'espressione (23):

$$C_{purTot}^{AM} = C_{pwd} \cdot m_{pwd} \quad (23)$$

Processing cost

Per valutare il costo del processo AM bisogna includere diverse voci di costo. La prima è rappresentata dal costo C_{EE} dell'energia elettrica, moltiplicata per il consumo di energia elettrica del macchinario durante l'inattività e il consumo di energia specifica del macchinario durante la deposizione di materiale, moltiplicato a sua volta per la massa di polvere che entra nel processo. La seconda voce di costo C_{gas} è relativa al gas di supporto che è inserito nel macchinario, moltiplicato per la quantità di gas utilizzata. Una terza voce C_{SEP} è relativa alla separazione dei supporti dal pezzo, seguita poi da C_{HT} , che rappresentano i costi che si hanno per effettuare il trattamento termico del pezzo una volta rimossi i supporti. L'ultima voce, C_{FM} , è relativa alle operazioni di finitura che si effettuano alla fine del processo per eliminare i sovrametalli. Sommando questi contributi si ottiene l'espressione (24), o in alternativa (25), includendo il fattore k .

$$C_{proTot}^{AM} = C_{EE} \cdot (E_{idle}^{AM} + SEC^{AM} \cdot m_{pwd}) + C_{gas} \cdot q_{gas} + C_{SEP} \cdot m_s + C_{HT} \cdot (m_p^{AM} + m_A) + C_{FM} \cdot m_a \quad (24)$$

Oppure

$$C_{proTot}^{AM} = C_{EE} \cdot (E_{idle}^{AM} + SEC^{AM} \cdot m_{pwd}) + C_{gas} \cdot q_{gas} + C_{SEP} \cdot m_s + C_{HT} \cdot (k \cdot m_p^{CM} + m_A) + C_{FM} \cdot m_a \quad (25)$$

Equazione completa approccio AM

Analogamente al caso CM, le due equazioni complete (26) e (27) si ottengono sommando i vari contributi precedentemente analizzati.

$$C_{tot}^{AM} = C_{Ind}^{AM} \cdot (t_{idle}^{AM} + t_{build}) + C_{op}^{AM} \cdot (t_{idle}^{AM} + \gamma^{AM} \cdot t_{build}) + C_{pwd} \cdot m_{pwd} + C_{EE} \cdot (E_{idle}^{AM} + SEC^{AM} \cdot m_{pwd}) + C_{gas} \cdot q_{gas} + C_{SEP} \cdot m_s + C_{HT} \cdot (m_p^{AM} + m_A) + C_{FM} \cdot m_a \quad (26)$$

Oppure

$$C_{tot}^{AM} = C_{Ind}^{AM} \cdot (t_{idle}^{AM} + t_{build}) + C_{op}^{AM} \cdot (t_{idle}^{AM} + \gamma^{AM} \cdot t_{build}) + C_{pwd} \cdot m_{pwd} + C_{EE} \cdot (E_{idle}^{AM} + SEC^{AM} \cdot m_{pwd}) + C_{gas} \cdot q_{gas} + C_{SEP} \cdot m_s + C_{HT} \cdot (k \cdot m_p^{CM} + m_A) + C_{FM} \cdot m_a \quad (27)$$

Dati

Una volta definite le espressioni definitive, riguardanti i costi totali per la realizzazione del componente, si procede definendo i dati che entreranno all'interno di questa analisi di sostenibilità. I dati sono stati ottenuti

dalla letteratura, da casi di studio reali, mentre alcuni derivano da assunzioni specifiche per il caso di studio in esame. Nella Tabella 12 e 13 sono mostrati i valori che entreranno all'interno dell'analisi, nel caso di approccio CM e approccio AM, rispettivamente. In aggiunta, altri dati da inserire nelle equazioni sono riportati in Tabella 8 e 10.

Tabella 12 Dati relativi alle equazioni economiche, approccio CM

Name	Unit of measure	Ti6Al4V	AlSi10Mg	AISI4340
C_{Ind}^{CM}	€/h	12.86 [27]	12.86 [27]	12.86 [27]
t_{idle}^{CM}	h	0.5 [27]	0.5 [27]	0.5 [27]
C_{op}^{CM}	€/h	21.66 [27]	21.66 [27]	21.66 [27]
γ^{CM}	-	0.1	0.1	0.1
C_{wp}	€/kg	28 [30]	3.5 [26]	0.828 [26]
C_{EE}	€/kWh	0.15 [27]	0.15 [27]	0.15 [27]
C_{Lub}	€/kg	0.93 [32]	0.93 [32]	0.93 [32]
C_{Tool}	€/tool	25 [32]	25 [32]	25 [32]
T_i	h	0.5 [27]	0.5 [27]	0.5 [27]
q_L	kg/h	0.233 [33]	0.233 [33]	0.233 [33]

Per la valutazione dei costi indiretti relativi al machining si è fatto riferimento a [27]. Inoltre, per coerenza con quanto definito nel modello energetico, si è stabilito un idle time di 30 minuti. Per quanto riguarda il costo dell'operatore, si è assunto uno stipendio annuale di circa 35k€/y, basato su 1616 ore lavorative all'anno, ottenendo dunque una retribuzione oraria pari a 21.66 €/h [27]. Più complessa invece la determinazione di γ , in quanto bisogna distinguere una quota parte di impiego dell'operatore pari al 100% durante il setup, mentre durante il processo esso si limita solamente a operazioni di supervisione. Per quest'analisi si è deciso di applicare un valor medio pari al 10%. Per il costo del workpiece, nel caso della polvere di AlSi10Mg si è fatto riferimento ad una proxy, ovvero la lega Al7075T6, il cui costo medio risulta essere circa 3.5 €/kg, in base ai dati del CES Selector [26]. Come costo dell'energia si è deciso di prendere 0.15 €/kWh, valore che include le tasse [27].

Tabella 13 Dati relativi alle equazioni economiche, approccio AM

Name	Unit of measure	SLM		EBM
		Ti6Al4V	AlSi10Mg	Ti6Al4V
C_{Ind}^{AM}	€/h	29.6 [38]	29.6 [38]	60 [38]
t_{idle}^{AM}	h	1	1	1
C_{op}^{AM}	€/h	21.66 [27]	21.66 [27]	21.66 [27]
γ^{AM}	-	0.05	0.05	0.05
C_{pwd}	€/kg	175 [30]	70	175 [30]
C_{EE}	€/kWh	0.15 [27]	0.15 [27]	0.15 [27]
E_{idle}^{AM}	kWh	0.82 [33]	0.82 [33]	0.82 [33]
C_{gas}	€/m ³	2.14 [33]	2.14 [33]	2.14 [33]
C_{SEP}	€/kg	34.85 [35]	9.5 [33]	34.85 [35]
C_{HT}	€/kg	10.86 [35]	0.5 [36]	10.86 [35]
C_{FM}	€/kg	31.3 [30]	31.3 [30]	31.3 [30]

Con riferimento alla Tabella 13, si procede ora con la definizione dei dati energetici relativi al processo di AM. I costi indiretti del processo di additive seguono la logica indicata da Baumer [38]. I valori sono stati ottenuti assumendo: (i) costi amministrativi e di produzione pari a 5.46 €/h, (ii) un ammortamento del macchinario in 8 anni a tassi costanti, (iii) un tempo di utilizzo annuale di 5000 h/y, (iv) costi di manutenzione e consumi pari al 6% del valore del macchinario. Seguendo questa logica, sono stati definiti dunque i due costi indiretti, più elevati nel caso della tecnologia EBM, in quanto il macchinario Arcam A2x presenta un costo pari a circa 1,500,000 €, mentre l'EOS M400 si colloca intorno ai 650,000 €. Il tempo di idle è stato fissato ad 1 ora, coerentemente con quanto indicato nel modello energetico. Il costo dell'operatore è analogo al caso precedente, fissato dunque a 21.66 €/h. Invece, anche in questo caso per il parametro γ bisogna procedere facendo un'assunzione quantomeno realistica. Nel caso di AM, l'operatore svolge un ruolo abbastanza marginale, limitato perlopiù a funzione di supervisione. Per questo motivo si è deciso di assumere un valore pari a 5%, minore rispetto ad un processo tradizionale, dove la presenza dell'operatore è maggiore. I costi per le due polveri metalliche sono logicamente differenti, dove la polvere di Titanio presenta un costo superiore (circa 175 €/kg) rispetto alla lega di Alluminio (circa 70 €/kg), ricavato da precedenti casi di studio; il rapporto tra questi due costi non è lo stesso rapporto che si ha sulla diversa resistenza tra i due materiali, inoltre il processamento con il titanio è tipicamente più lento. Il valore dell' E_{idle}^{AM} rispecchia quanto detto precedentemente rispetto a P_{stb}^{AM} , il valore è stato assunto pari a 0.82 kW, moltiplicato a sua volta per il tempo di idle, ottenendo dunque un E_{idle}^{AM} pari a 0.82 kWh. Per quanto riguarda il gas di supporto, si è assunto un prezzo medio dell'Argon pari a 2.14 €/m³ [33]. I costi di separazione del pezzo post stampa sono risultati pari a 34.85 €/kg nel caso del Ti6Al4V per l'EBM [35], mentre per l'AlSi10Mg è stato utilizzato come proxy l'acciaio 316L, arrivando ad ottenere un valore di 9.5 €/kg [33]. Il costo del trattamento termico nel caso di Ti6Al4V è risultato pari a 10.86 €/kg [35], mentre per l'AlSi10Mg, come nel caso dell' E_{HT} , è stata presa come riferimento la proxy dell'acciaio 316L, ottenendo un valore pari a 0.5 €/kg [36]. Infine, per le operazioni di finitura è stato considerato un costo pari a 31.3 €/kg [30].

2.7 MODELLO EMISSIONI DI CO₂

Per valutare le emissioni di CO₂ durante la produzione di un certo componente si farà riferimento sempre allo schema dei flussi di materiale visti in precedenza (Figura 41). Il procedimento è il medesimo, ma in questo caso bisognerà considerare anche l'aspetto della potenziale riciclabilità di un materiale. Dunque, bisognerà introdurre un fattore r , che indica la percentuale di materiale riciclato alla fine della propria EoL. Tutto il beneficio della riciclabilità del materiale è allocato alla fine del proprio ciclo di vita EoL.

Nella Tabella 14 sono presentate le variabili di questa analisi [27].

Tabella 14 Nomenclatura degli input per le equazioni delle emissioni

Name	Description	Unit of measure
CO_2^{CM}	Total CO ₂ emissions for the CM approach	kgCO ₂ /kg
CO_2^{AM}	Total CO ₂ emissions for the AM approach	kgCO ₂ /kg
E_V	Energy demand for the primary production of the material	MJ/kg
r	Material recyclability	-

E_R	Energy demand for the secondary production (recycling) of the material	MJ/kg
CO_{2E}	CO ₂ emissions of the material	kgCO ₂ /kg
CO_{2V}	CO ₂ emissions for the primary production of the material	kgCO ₂ /kg
CO_{2R}	CO ₂ emissions for the secondary production (recycling) of the material	kgCO ₂ /kg
CO_{2F}	CO ₂ emissions for forming the workpiece for CM	kgCO ₂ /kg
CO_{2A}	CO ₂ emissions for metal powder atomization for AM	kgCO ₂ /kg
CO_{2tool_i}	Carbon footprint of the cutting tool i	kgCO ₂ /kg
CO_{2lub}	Carbon footprint of the cutting fluid	kgCO ₂ /kg
CO_{2gas}	Carbon footprint of the gas	kgCO ₂ /kg
CO_{2SEP}	Carbon footprint for the separation of part/support	kgCO ₂ /kg
CES	Carbon emission signature of the electric grid [27]	kgCO ₂ /kWh
CO_{2HT}	Carbon footprint of the heat treatment	kgCO ₂ /kg
CO_{2FM}	Carbon footprint of the finish machining	kgCO ₂ /kg

Una volta definita la percentuale di riciclabilità r , si può introdurre un'equazione (28) che definisce l'Embodied energy in questo modo [28]:

$$E_E = E_V - r \cdot (E_V - E_R) \quad (28)$$

Dove quindi E_E è funzione dell'energia primaria E_V richiesta per la produzione, e dal fattore r moltiplicato per differenza tra E_V e E_R , ovvero l'energia richiesta per la produzione secondaria (o il riciclo) del materiale. La stessa formula è stata utilizzata per ricavare l'embodied energy utilizzata nei modelli energetici. Analogamente, la formula che definisce le emissioni relative all'embodied energy risulta essere (29) [28]:

$$CO_{2E} = CO_{2V} - r \cdot (CO_{2V} - CO_{2R}) \quad (29)$$

Approccio CM

Material production

Per estrarre la funzione esplicativa delle emissioni relative alla produzione di materiale, bisogna ricollegarsi all'equazione (2) nel caso dell'energia, ma in questo caso al posto di considerare il dispendio energetico E_E

ed E_F , si farà riferimento alle rispettive emissioni CO_{2E} e CO_{2F} . Riscrivendo m_m^{CM} seguendo la logica dell'equazione (1), si ricava la funzione (30):

$$CO_{2MAT}^{CM} = y_{MF} \cdot (m_p^{CM} + m_c) \cdot (CO_{2E} + CO_{2F}) \quad (30)$$

Manufacturing

Le emissioni prodotte durante il processo di produzione del pezzo sono in linea con le equazioni energetiche, in particolare la (3), ricavando così l'espressione (31):

$$CO_2^{MFG} = CES \cdot E_{MT} + \sum_{i=1}^n (CO_{2tool_i} \cdot \frac{t_{c_i}}{T_i}) + CO_{2lub} \cdot q_L \cdot t_c \quad (31)$$

Equazione completa approccio CM

Per ottenere l'equazione completa bisogna procedere sommando le equazioni (30) e (31). Inoltre, sostituendo (29) in (30) e (4) in (31) si ottiene così l'equazione completa (32) relativa alle emissioni di CO_2 nel caso di approccio CM:

$$CO_2^{CM} = y_{MF} \cdot (m_p^{CM} + m_c) \cdot [CO_{2V} - r \cdot (CO_{2V} - CO_{2R}) + CO_{2F}] + CES \cdot [P_{stb}^M \cdot t_s^M + \sum_{i=1}^n (SEC_i^M \cdot m_{c_i} + P_{stb}^M \cdot t_{c_i} \cdot \frac{t_{c_i}}{T_i})] + \sum_{i=1}^n (CO_{2tool_i} \cdot \frac{t_{c_i}}{T_i}) + CO_{2lub} \cdot q_L \cdot t_c \quad (32)$$

Approccio AM

Material production

Analogamente a quanto detto nel caso CM, per l'espressione (33) o (34) relativa alle emissioni durante la produzione del materiale, si fa riferimento alle equazioni energetiche, in particolare alla (8) e alla (10), o in alternativa alla (9) e alla (11) se si decidesse di utilizzare il fattore k .

$$CO_{2MAT}^{AM} = y_{GA} \cdot (m_p^{AM} + m_s + m_a) \cdot (CO_{2E} + CO_{2A}) \quad (33)$$

Oppure

$$CO_{2MAT}^{AM} = y_{GA} \cdot (k \cdot m_p^{CM} + m_s + m_a) \cdot (CO_{2E} + CO_{2A}) \quad (34)$$

Manufacturing

Per il calcolo delle emissioni durante la produzione del componente, ci si rimanda all'equazione (12) o in alternativa (13). Sostituendo le energie con le relative emissioni si ottengono le equazioni (35) e (36):

$$CO_{2MFG}^{AM} = CES \cdot (P_{stb}^{AM} \cdot t_s^{AM} + SEC^{AM} \cdot m_{pwd}) + CO_{2gas} \cdot q_{gas} + CO_{2SEP} \cdot m_s + CO_{2HT} \cdot (m_p^{AM} + m_a) + CO_{2FM} \cdot m_a \quad (35)$$

Oppure

$$CO_{2MFG}^{AM} = CES \cdot (P_{stb}^{AM} \cdot t_s^{AM} + SEC^{AM} \cdot m_{pwd}) + CO_{2gas} \cdot q_{gas} + CO_{2SEP} \cdot m_s + CO_{2HT} \cdot (k \cdot m_p^{CM} + m_a) + CO_{2FM} \cdot m_a \quad (36)$$

Equazioni complete approccio AM

Sommando le equazioni (33) e (35), o in alternativa (34) e (36) si ottengono le equazioni complete (37) e (38) delle emissioni mediante l'approccio AM. Sostituendo (29) all'interno di esse si avrà l'equazione completa.

$$CO_2^{AM} = y_{GA} \cdot (m_p^{AM} + m_s + m_a) \cdot (CO_{2V} - r \cdot (CO_{2V} - CO_{2R}) + CO_{2A}) + CES \cdot (P_{stb}^{AM} \cdot t_s^{AM} + SEC^{AM} \cdot m_{pwd}) + CO_{2gas} \cdot q_{gas} + CO_{2SEP} \cdot m_s + CO_{2HT} \cdot (m_p^{AM} + m_a) + CO_{2FM} \cdot m_a \quad (37)$$

Oppure

$$CO_2^{AM} = y_{GA} \cdot (k \cdot m_p^{CM} + m_s + m_a) \cdot (CO_{2V} - r \cdot (CO_{2V} - CO_{2R}) + CO_{2A}) + CES \cdot (P_{stb}^{AM} \cdot t_s^{AM} + SEC^{AM} \cdot m_{pwd}) + CO_{2gas} \cdot q_{gas} + CO_{2SEP} \cdot m_s + CO_{2HT} \cdot (k \cdot m_p^{CM} + m_a) + CO_{2FM} \cdot m_a \quad (38)$$

Dati

Una volta definite le espressioni definitive, riguardanti le emissioni totali per la realizzazione del componente, si procede definendo i dati che entreranno all'interno di questa analisi di sostenibilità. I dati sono stati ottenuti dalla letteratura, da casi di studio reali, mentre alcuni derivano da assunzioni specifiche per il caso di studio in esame. Nelle Tabelle 15 e 16 sono mostrati i valori che entreranno all'interno dell'analisi, nel caso di approccio CM e approccio AM, rispettivamente. In aggiunta, altri dati utili per definire tali equazioni rappresentanti le emissioni sono riportati in Tabella 8 e in Tabella 10.

Tabella 15 Dati relativi alle equazioni delle emissioni, approccio CM

Name	Unit of measure	Ti6Al4V	AlSi10Mg	AlSi4340
r	-	0.8 [34]	0.95 [31]	0.8
CO_{2E}	kgCO ₂ /kg	13.5 [28]	13.2 [29]	2.375 [26]
CO_{2V}	kgCO ₂ /kg	46.5 [28]	12.1 [29]	2.49 [26]
CO_{2R}	kgCO ₂ /kg	5.2 [28]	2.6 [29]	0.6695 [26]
CO_{2F}	kgCO ₂ /kg	1.2 [28]	0.8 [29]	0.322[26]
CES	kgCO ₂ /kWh	0.447 [27]	0.447 [27]	0.447 [27]
CO_{2tool_i}	kgCO ₂ /kg	47.3 [27]	47.3 [27]	47.3 [27]
CO_{2lub}	kgCO ₂ /kg	0.11 [32]	0.11 [32]	0.11 [32]

I dati relativi ai processi convenzionali (tabella Y), mostrano come la percentuale di riciclabilità a fine vita del prodotto sia superiore nel caso di AlSi10Mg (circa 95%) rispetto al Ti6Al4V (circa 80%) e all'AlSi4340 (ipotizzando un 80%), tutto questo si ripercuote anche nel caso dell'AM, a breve analizzato. I valori assunti per le rispettive emissioni CO_{2E} , CO_{2V} , CO_{2R} , CO_{2F} , CO_{2tool} derivano da casi di studio effettuati presso il Politecnico di Torino [29] [28], mentre per l'AlSi4340 i valori provengono dal CES Selector. Il valore del CES è stato stabilito pari a 0.447 kgCO₂/kWh, rappresentante una media Europea di tale valore, come anche il rendimento posto pari a 0.36 [27]. Le emissioni degli utensili impiegati nel processo sono state assunte pari a 47.3 kgCO₂/kg [27], mentre quelle del refrigerante risultano pari a 0.11 kgCO₂/kg [32].

Tabella 16 Dati relativi alle equazioni delle emissioni, approccio AM

Name	Unit of measure	SLM		EBM
		Ti6Al4V	AlSi10Mg	Ti6Al4V
<i>r</i>	-	0.8 [34]	0.95 [31]	0.8 [34]
CO_{2E}	kgCO ₂ /kg	13.5 [28]	13.2 [29]	13.5 [28]
CO_{2V}	kgCO ₂ /kg	46.5 [28]	12.1 [29]	46.5 [28]
CO_{2R}	kgCO ₂ /kg	5.2 [28]	2.6 [29]	5.2 [28]
CO_{2A}	kgCO ₂ /kg	3.8 [28]	0.5 [29]	3.8 [28]
<i>CES</i>	kgCO ₂ /kWh	0.447 [27]	0.447 [27]	0.447 [27]
CO_{2gas}	kgCO ₂ /kg	0.19	0.19	0.19
CO_{2SEP}	kgCO ₂ /kg	6.28	6.28	6.28
CO_{2HT}	kgCO ₂ /kg	20.72	0.26	20.72
CO_{2FM}	kgCO ₂ /kg	1.46 [37]	0.4 [29]	1.46 [37]

Anche i dati relativi all'AM (tabella Y) sono stati ricavati dai casi di studio citati precedentemente [29] [28]. Il tutto è stato arricchito con l'aggiunta delle emissioni del gas, delle emissioni in riferimento alla separazione del pezzo e le emissioni causate dal trattamento termico. Tali valori risultano di difficile approssimazione, in quanto contribuiscono marginalmente al risultato e tipicamente non sono inclusi negli studi. Per ottenere tali valori si è deciso di seguire un approccio quantomeno coerente con quanto definito finora. Assumendo che l'energia consumata sia elettrica, si procede moltiplicando l'energia primaria per l'efficienza, posta pari a 0.36 [27], ottenendo dunque un'energia elettrica minore rispetto a quella primaria. I risultati ottenuti sono a loro volta moltiplicati per il fattore CES, ottenendo così una stima ragionevole dei fattori considerati. Infine, le emissioni relative alle operazioni di finitura sono risultate pari a 1.46 kgCO₂/kg per il Ti6Al4V e 0.4 kgCO₂/kg per l'AlSi10Mg [37][29].

CAPITOLO 3 - CASO DI STUDIO

In questa sezione conclusiva del progetto di tesi saranno applicati i modelli teorici, analizzati in maniera approfondita nel capitolo precedente. Questi saranno implementati all'interno di un caso di studio specifico, in particolare su tre componenti facenti parte di un veicolo elettrico. Nella prima fase saranno definiti e discussi i tre oggetti, arrivando a stabilire le masse di questi, utili per le analisi successive. Determinati tutti i dati necessari da inserire nelle equazioni, si procederà implementando i modelli teorici, in modo tale da arrivare a ottenere importanti risultati, che saranno successivamente discussi.

3.1 OGGETTO IN ESAME

L'oggetto del caso di studio risulta essere un prototipo realizzato dal team studentesco PACE. Il team ha progettato e sviluppato un prototipo di veicolo destinato alla mobilità di persone all'interno di centri urbani molto estesi. Inoltre, si tratta di un veicolo elettrico. In Figura 45 è mostrato l'oggetto nella sua interezza.



Figura 45 Prototipo del veicolo elettrico progettato dal team PACE

Il target prefissato dal team è il raggiungimento di un peso massimo inferiore a 25 kg, sfruttando i vantaggi dell'AM con la realizzazione di pezzi più leggeri. Nel presente caso di studio sono stati presi in esame tre componenti dell'oggetto, di seguito analizzati. Essi sono stati ottimizzati mediante l'ottimizzazione topologica, riducendone il peso, ma allo stesso tempo garantendo i vincoli di progettazione predefiniti. I tre componenti selezionati sono stati i seguenti:

- Dispositivo di sterzata (Steering);
- Mozzo ruota più braccetto di sterzo (N Yoke);
- Pedana.

I pezzi sono stati riprogettati sfruttando il software di ottimizzazione topologica *Inspire*, della società *Altair*. Mediante il processo di TO sono state ottenute tre geometrie differenti dagli originali. Queste geometrie sono state poi importate in software relativi all’STL per poter poi successivamente essere stampate. Dagli STL dei tre componenti sono state ricavate informazioni relative al volume dei tre componenti, dunque per ottenere la massa dei pezzi riprogettati si è sfruttata la seguente relazione (39):

$$Volume = \frac{massa}{densità} \quad (39)$$

Come valori di densità si è fatto nuovamente riferimento al CES Selector, in Tabella 17 sono riportati i valori utilizzati per ottenere la massa. Per quest’analisi si è deciso di includere una terza lega nel caso di tecnologie convenzionali, la lega AISI4340 più realistica nel caso di realizzazione dei pezzi mediante approccio convenzionale.

Tabella 17 Densità delle leghe considerate

	Unit of measure	Ti6Al4V	AlSi10Mg	AISI4340
Densità	kg/mm ³	$4.42 \cdot 10^{-6}$	$2.67 \cdot 10^{-6}$	$7.85 \cdot 10^{-6}$

N Yoke

In Figura 46 si può apprezzare il design del pezzo realizzato mediante processo tradizionale e senza l’ausilio dell’ottimizzazione topologica. Definiti i vincoli che esso deve sopportare, il software *Inspire* ha rilasciato come output il design del componente finale, in modo tale da ridurre la massa e dunque la quantità di materiale utilizzato. In Figura 47 è mostrato il risultato finale del componente riprogettato e ottimizzato topologicamente, mentre in Figura 48 sono riportate le dimensioni del pezzo.

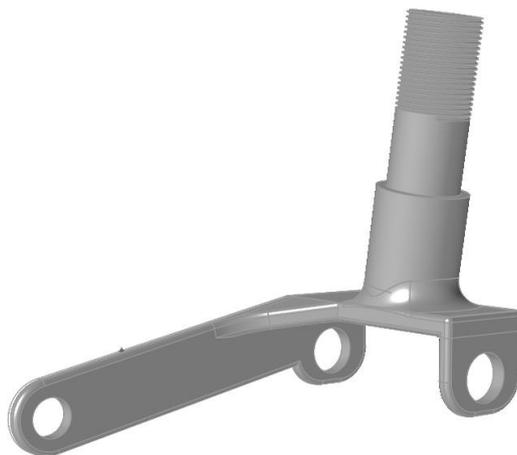


Figura 46 Rappresentazione del componente “N-yoke” prima dell’ottimizzazione topologica



Figura 47 Rappresentazione del componente "N-yoke" dopo l'ottimizzazione topologica

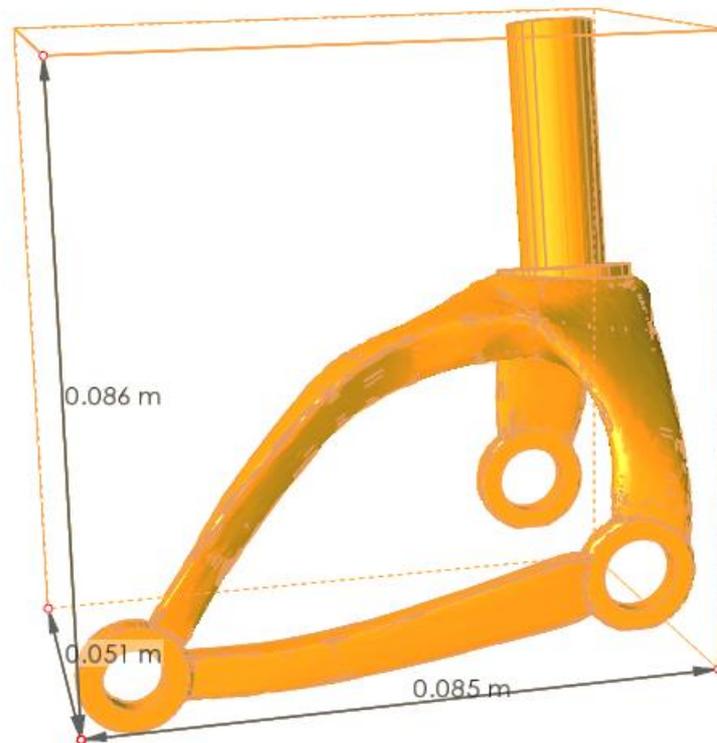


Figura 48 Definizione delle misure per il componente "N-yoke"

Per la definizione della massa del componente si è sfruttata la relazione (39). A partire dal volume del componente, visibile in Figura 49, è stato possibile determinarne la massa di uno specifico materiale utilizzato. Inoltre, il software ha stimato la massa dei supporti necessari per la realizzazione del pezzo, mentre per i sovrametalli è stato assunto 1 mm uniforme su tutte le superfici considerate, in prossimità dei fori e del cilindro. In Tabella 18 sono riportati i valori ottenuti, considerando anche l'approccio CM.

▼ Part Pages

Part List | **Part Info** | Part Fixing Info | Build Time Estimation | Scenes

Part name: N-yoke [Rename] [Next]

Dimensions

	Min	Max	Delta	
X	1364,418	1450,330	85,912	mm
Y	-294,277	-209,086	85,192	mm
Z	1884,873	1936,278	51,405	mm

Mesh info

# Triangles	45784	# Points	22872
# Marked	0	# Invisible	0

Properties

Volume	17996,418	mm ³	[Update]
Surface	8499,045	mm ²	<input checked="" type="checkbox"/> Automatic

Status [Not changed] **Z Compensated** [No]

Figura 49 Definizione del volume e della superficie per il componente "N-yoke"

Tabella 18 Masse finali del componente N-yoke

	Traditional approach			EBM		SLM	
	Ti6Al4V	AlSi10Mg	AlSi4340	Ti6Al4V	Ti6Al4V	AlSi10Mg	
m_1 [kg]	0.095	0.058	0.17	0.08	0.08	0.05	
m_s [kg]				0.04	0.04	0.04	
m_a [kg]				0.018	0.018	0.011	
m_w^{PP} [kg]				0.0069	0.0069	0.00505	
m_{pwd} [kg]				0.1449	0.1449	0.10605	
m_w^{WP} [kg]	0,026125	0,01595	0,04675				
m_c [kg]	0,0095	0,0058	0,017				
m_{wp} [kg]	0,130625	0,07975	0,23375				

Questi dati saranno fondamentali per l'implementazione dei modelli, così come anche il tempo di stampa dei componenti, definito più avanti, una volta definiti tutti i componenti. Si può apprezzare una riduzione di peso nel passaggio da approccio tradizionale a additive, seppur non marcata, in quanto il componente è piuttosto piccolo e leggero, dunque non è possibile vedere grandi variazioni della massa. Nel caso di approccio tradizionale, è stato preso come riferimento per questo pezzo un processo di fresatura, considerando inoltre l'80% di rimozione degli scarti tramite grossatura e il restante 20% tramite finitura.

Steering

Anche in questo caso, in Figura 50 è riportato il design del componente realizzato per via convenzionale, mentre in Figura 51 è visibile il risultato post ottimizzazione topologica tramite *Inspire*, mentre in Figura 52 sono evidenziate le dimensioni di questo componente.

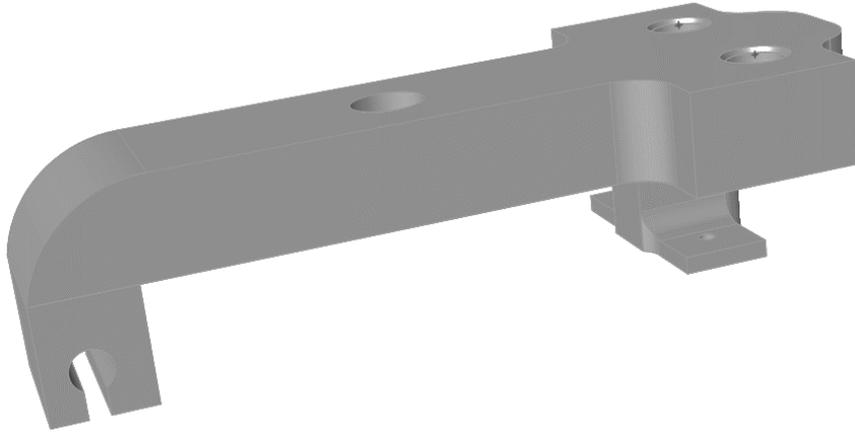


Figura 50 Rappresentazione del componente "Steering" prima dell'ottimizzazione topologica

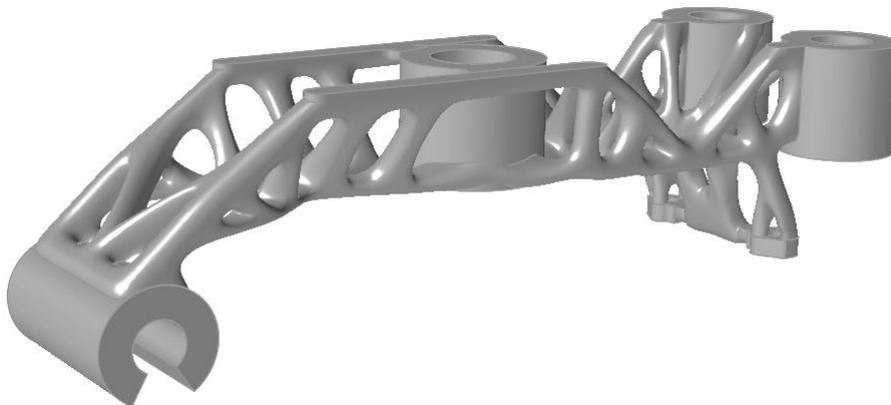


Figura 51 Rappresentazione del componente "Steering" dopo l'ottimizzazione topologica

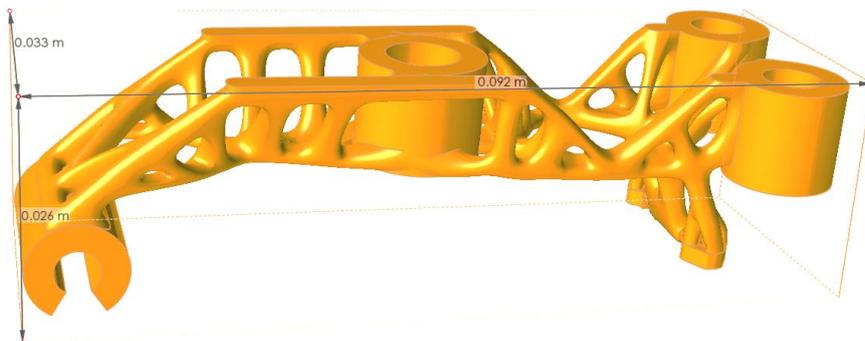


Figura 52 Definizione delle misure per il componente "Steering"

Seguendo una logica analoga al caso precedente, a partire dal volume del componente riprogettato (Figura 53) si è determinata la massa finale. I supporti di questo pezzo risultano dalle analisi pari a circa 3340 mm^3 di volume, dunque tramite la densità è stata ricavata la massa di questi. Per i sovrametalli, si è deciso di applicarli in prossimità dei cilindri presenti nel componente, applicando anche in questo caso 1 mm uniforme. I risultati sono riportati in Tabella 19.

▼ Part Pages ⇨ ×

Part List | **Part Info** | Part Fixing Info | Build Time Estimation | Scenes

Part name:

Dimensions

	Min	Max	Delta	
X	1114,857	1148,168	33,311	mm
Y	-337,972	-246,064	91,908	mm
Z	1882,151	1908,301	26,150	mm

Mesh info

# Triangles	165492	# Points	82646
# Marked	0	# Invisible	0

Properties

Volume	8561,495	mm ³	<input type="button" value="Update"/>
Surface	8732,989	mm ²	<input checked="" type="checkbox"/> Automatic

Status: Z Compensated:

Figura 53 Definizione del volume e della superficie per il componente "Steering"

Tabella 19 Masse finali del componente "Steering"

	Traditional approach			EBM	SLM	
	Ti6Al4V	AlSi10Mg	AlSi4340		Ti6Al4V	AlSi10Mg
m_z [kg]	0.13	0.082	0.24	0.038	0.038	0.029
m_s [kg]				0.015	0.015	0.009
m_a [kg]				0.017	0.017	0.001
m_w^{pp} [kg]				0,0035	0,0035	0,00195
m_{pwd} [kg]				0,0735	0,0735	0,04095
m_w^{wp} [kg]	0,03575	0,02255	0,066			
m_c [kg]	0,013	0,0082	0,024			
m_{wp} [kg]	0,17875	0,11275	0,33			

Come si può notare, l'ausilio dell'ottimizzazione topologica ha permesso una visibile riduzione di peso in entrambe le tipologie di leghe. Nel caso di approccio tradizionale, è stato preso come riferimento per questo

pezzo un processo di fresatura, considerando inoltre l'80% di rimozione degli scarti tramite sgrossatura e il restante 20% tramite finitura.

Pedana

La pedana è il componente più voluminoso dell'intero veicolo, dunque la sua riprogettazione risulta complessa in quanto le sue dimensioni non sempre sono riproducibili mediante un macchinario di AM. Infatti, questo è uno dei principali limiti attuali dell'AM, il volume di lavoro non è elevato, dunque la produzione di componenti voluminosi è complessa, spesso richiede soluzioni ad hoc. In Figura 54 è mostrata la struttura della pedana ottenuta per via convenzionale, mentre in Figura 55 si può apprezzare la struttura finale del componente. Infine, in Figura 56 sono evidenziate le dimensioni del pezzo. Dimensioni del genere sono infatti difficilmente riproducibili in un unico pezzo, talvolta richiede la realizzazione di più parti successivamente integrate e assemblate tra di loro.



Figura 54 Rappresentazione della pedana prima dell'ottimizzazione topologica

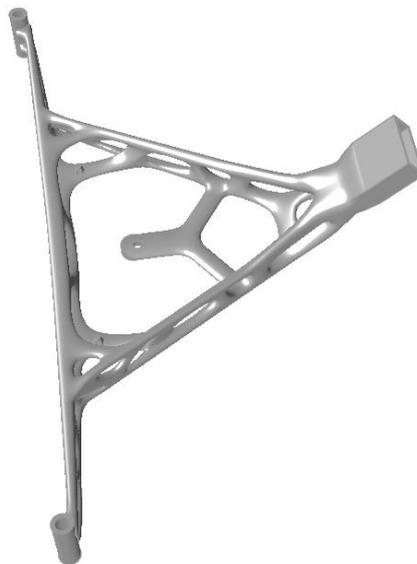


Figura 55 Rappresentazione della pedana dopo l'ottimizzazione topologica

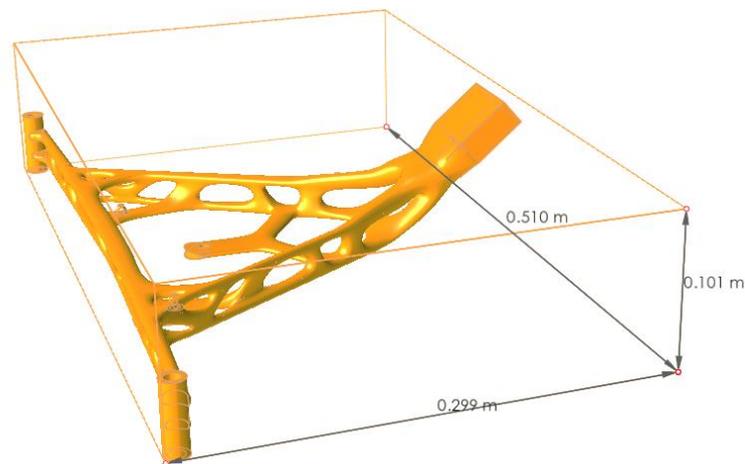


Figura 56 Definizione delle misure della pedana

Come si può facilmente intuire, la pedana risulta essere un componente piuttosto pesante per il veicolo, dunque una grande riduzione di peso comporterebbe benefici non trascurabili sul veicolo stesso. In Figura 57 si può osservare l'output mostrante il volume del componente, dal quale si è potuta ricavare la massa finale nei diversi casi. Anche in questo caso sono stati applicati sovrametalli di 1 mm costanti su tutta la superficie in prossimità di cilindri all'interno del pezzo. I supporti, invece, sono stati calcolati dal software. I dati relativi alle masse sono riportati in Tabella 20.

▼ Part Pages

Part List | Part Info | Part Fixing Info | Build Time Estimation | Scenes

Part name: Supporto_pedana [Rename] [Next]

Dimensions

	Min	Max	Delta	
X	876,255	1386,258	510,003	mm
Y	-510,994	-211,733	299,261	mm
Z	1891,276	1992,510	101,234	mm

Mesh info

# Triangles	1891722	# Points	945789
# Marked	0	# Invisible	0

Properties

Volume	256658,661	mm ³	[Update]
Surface	105303,762	mm ²	<input checked="" type="checkbox"/> Automatic

Status: Not changed | Z Compensated: No

Figura 57 Definizione della superficie e del volume della pedana

Tabella 20 Masse finali della pedana

	Traditional approach			EBM		SLM
	Ti6Al4V	AlSi10Mg	AlSi4340	Ti6Al4V	Ti6Al4V	AlSi10Mg
m_3 [kg]	1.9	1.15	3.38	1,13	1,13	0,69
m_s [kg]				1,17	1,17	0,7
m_a [kg]				0,034	0,034	0,02
m_w^{PP} [kg]				0,1167	0,1167	0,0705
m_{pvd} [kg]				2,4507	2,4507	1,4805
m_w^{WP} [kg]	0,5225	0,31625	0,9295			
m_c [kg]	0,19	0,115	0,338			
m_{wp} [kg]	2,6125	1,58125	4,6475			

In questo caso si può osservare maggiormente una notevole riduzione di peso, che garantirebbe al componente notevoli benefici durante la propria fase d'uso, come ad esempio una maggiore autonomia del veicolo. Una massa elevata di supporti è una conseguenza delle elevate dimensioni del pezzo. La pedana, infatti, date le sue misure piuttosto elevate, è realizzabile nel macchinario solamente tramite un'unica configurazione, ovvero posizionandola in diagonale sul piano di lavoro. Questo comporta dunque un elevato quantitativo di supporti per riuscire a realizzare il pezzo, aumentando dunque di conseguenza la massa di materiale utilizzato e le ore di lavorazione e, naturalmente, anche il costo. Nel caso di approccio tradizionale, è stato preso come riferimento per questo pezzo un processo di fresatura e successivamente di saldatura, ipotizzando per quest'ultima l'utilizzo di una saldatrice con potenza di targa pari a 4 kW.

Nella tabella sottostante (Tabella 21) sono riportati i tempi di stampa dei vari componenti, dati che saranno utili nell'implementazione dei modelli nel paragrafo successivo.

Tabella 21 Tempi di stampa dei componenti

Total Time (h)	EBM		SLM
	Ti6Al4V	Ti6Al4V	AlSi10Mg
N Yoke	1.73	3.62	1.17
Steering	0.88	1.84	0.55
Pedana	29.18	48.23	13.15

3.2 IMPLEMENTAZIONE DEI MODELLI

Definiti tutti i fattori che interessano l'analisi in questione, si procede implementando i modelli ottenuti nel precedente capitolo. Si seguirà un approccio coerente con quanto fatto finora, ovvero modellizzando prima le equazioni energetiche, per poi passare a quelle relative ai costi e, per concludere, a quelle relative alle emissioni. I dati utilizzati sono dunque in larga parte esplicitati nel capitolo 2, mentre i restanti relativi agli oggetti specifici sono stati definiti all'inizio di questo capitolo. Saranno dunque confrontati approcci additive rispetto ad approcci tradizionali.

Energia

Le equazioni utilizzate per rappresentare il comportamento energetico sono (6) per definire l'approccio CM e (14) per definire l'approccio AM. Per semplicità, si riportano nuovamente le equazioni qui di seguito:

$$E_{CM} = y_{MF} \cdot (m_p^{CM} + m_c) \cdot (E_E + E_F) + \frac{3.6}{\eta} \cdot [P_{stb}^M \cdot t_s^M + \sum_{i=1}^n (SEC_i^M \cdot m_{c_i} + P_{stb}^M \cdot t_{c_i} \cdot \frac{t_{c_i}}{T_i})] + \sum_{i=1}^n (E_{tool_i} \cdot \frac{t_{c_i}}{T_i}) + E_{lub} \cdot q_L \cdot t_c \quad (6)$$

$$E_{AM} = y_{GA} \cdot (m_p^{AM} + m_s + m_a) \cdot (E_E + E_A) + \frac{3.6}{\eta} \cdot (P_{stb}^{AM} \cdot t_s^{AM} + SEC^{AM} \cdot m_{pwa}) + E_{gas} \cdot q_{gas} + E_{SEP} \cdot m_s + E_{HT} \cdot (m_p^{AM} + m_a) + E_{FM} \cdot m_a \quad (14)$$

Inserendo i valori all'interno dei modelli energetici si è in grado di ottenere un valore di energia, E_{CM} e E_{AM} , che rappresenta la domanda di energia necessaria per la realizzazione dei componenti in esame. In Tabella 21 sono riportati i valori ottenuti dall'analisi.

Tabella 22 Domanda energetica per la realizzazione dei componenti

Part	Name	Unit	Traditional approach			EBM	SLM	
			Ti6Al4V	AlSi10Mg	AISI4340	Ti6Al4V	Ti6Al4V	AlSi10Mg
1	Energy	MJ/part	41	15.7	23.4	146.0	159.7	87.3
2	Energy	MJ/part	52	17.6	28.5	79.3	86.6	39.2
3	Energy	MJ/part	623.5	116.6	270.5	2274.6	2520.6	1102.3

Osservando i risultati ottenuti dai modelli energetici si può notare come l'utilizzo della lega Ti6Al4V comporti una maggiore domanda energetica, imputabile in particolar modo alla maggiore Embodied Energy della lega in questione, rispetto alle altre due considerate. Nelle figure sottostanti (Figure 58, 59 e 60) è possibile vedere inoltre come sono suddivisi i valori energetici riportati nella Tabella 21 lungo le varie fasi del processo, considerando i tre componenti. Sono riportati tutti i casi fin qui analizzati. Bisogna altresì dichiarare che per un confronto più realistico, il benchmark più significativo per l'approccio tradizionale è quello relativo alla lega AISI4340, in tutti e tre i pezzi considerati.

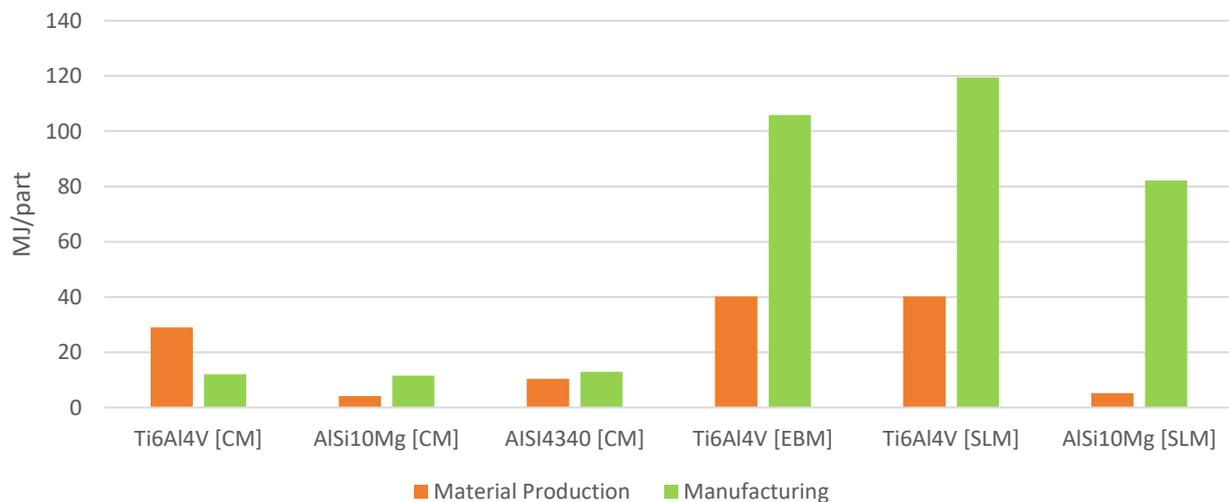


Figura 58 Domanda energetica per l'N-yoke

In Figura 58 si può notare una vistosa differenza di domanda energetica tra i due approcci. In particolare, l'AlSi10Mg evidenzia un fabbisogno energetico piuttosto modesto. La lega di titanio nell'approccio tradizionale presenta una domanda elevata, imputabile a domande energetiche estremamente elevate per tale materiale. Tale considerazione si ripercuote anche analizzando il processo AM, dove il Ti6Al4V presenta una domanda di energia estremamente più elevata, in entrambe le fasi. L'AlSi10Mg richiede un quantitativo energetico minore nella fase di Material Production, grazie ad un Embodied Energy del materiale piuttosto ridotta rispetto al Ti6Al4V.

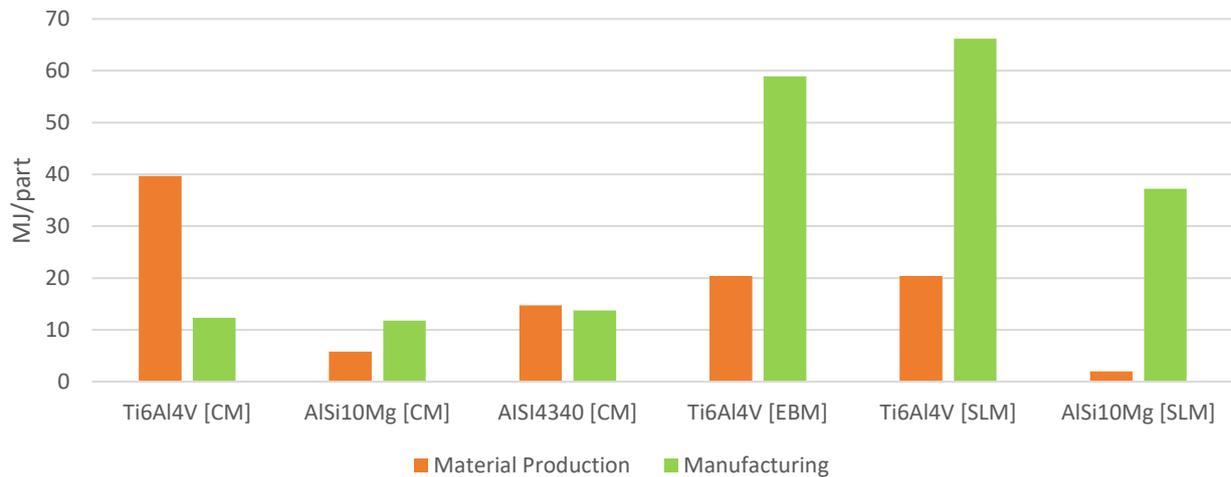


Figura 59 Domanda energetica per lo Steering

Le considerazioni fatte nella figura precedente per l'N-yoke valgono anche per lo Steering, analizzato qui in Figura 59. In questo caso si può vedere come l'utilizzo della lega AlSi10Mg, grazie all'ottimizzazione topologica e alla riduzione del peso, determini un dispendio energetico ridotto nella fase di Material Production per la tecnica SLM, evidenziando dunque uno dei vantaggi già precedentemente discussi, ovvero la possibilità tramite AM di poter lavorare con meno materiale, che dunque richiede meno energia per essere lavorato. Questo vantaggio si vede bene confrontando il Ti6Al4V nei due processi. Riducendo il peso sarà richiesto un quantitativo energetico minore, rispetto al caso convenzionale.

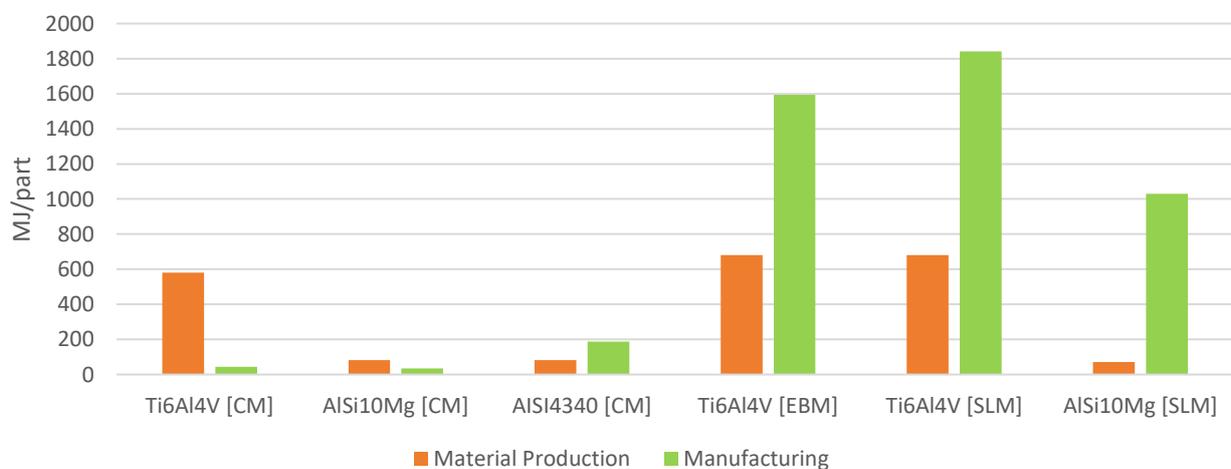


Figura 60 Domanda energetica per la pedana

La pedana, analizzata in Figura 60, presenta dei valori energetici estremamente più elevati, considerate le sue grandi dimensioni. Il Ti6Al4V presenta indubbiamente dei valori superiori di domanda energetica, causati dall'elevata Embodied Energy che si ripercuote sulla massa di materiale richiesta per la realizzazione del pezzo, che in questo caso è piuttosto elevata. L'AlSi10Mg, invece, richiedendo una massa minore di materiale e, avendo un Embodied Energy molto modesta rispetto all'altra lega considerata, richiede un quantitativo energetico assai inferiore, specialmente nella fase di produzione del materiale, mentre nella seconda fase presenta anch'essa valori complessivamente elevati, in confronto all'approccio tradizionale, in particolare all'AISI4340.

Costi

Le equazioni utilizzate per questa seconda fase risultano essere (20) e (26), rispettivamente nel caso di approccio tradizionale e additive. Qui di seguito sono riportate le due espressioni:

$$C_{tot}^{CM} = C_{Ind}^{CM} \cdot (t_{idle}^{CM} + t_{mach}) + C_{op}^{CM} \cdot (t_{idle}^{CM} + \gamma^{CM} \cdot t_{mach}) + C_{wp} \cdot m_{wp} + C_{EE} \cdot E_{MT} + C_{Tool} + C_{Lub} \quad (20)$$

$$C_{tot}^{AM} = C_{Ind}^{AM} \cdot (t_{idle}^{AM} + t_{build}) + C_{op}^{AM} \cdot (t_{idle}^{AM} + \gamma^{AM} \cdot t_{build}) + C_{pwd} \cdot m_{pwd} + C_{EE} \cdot (E_{idle}^{AM} + SEC^{AM} \cdot m_{pwd}) + C_{gas} \cdot q_{gas} + C_{SEP} \cdot m_s + C_{HT} \cdot (m_p^{AM} + m_A) + C_{FM} \cdot m_a \quad (26)$$

Inserendo i valori all'interno dei modelli di costo si è in grado di ottenere un valore espresso in termini di €/pezzo, C_{tot}^{CM} e C_{tot}^{AM} , che rappresenta il costo complessivo. In Tabella 22 sono riportati i valori ottenuti dall'analisi.

Tabella 23 Costi sostenuti per realizzare i componenti

Part	Name	Unit	Traditional approach			EBM	SLM	
			Ti6Al4V	AlSi10Mg	AISI4340	Ti6Al4V	Ti6Al4V	AlSi10Mg
1	Cost	€/part	21.2	17.8	17.7	217.7	193.3	98.2
2	Cost	€/part	22.5	17.9	17.8	151.9	124.7	73.6
3	Cost	€/part	92.5	24.7	23.4	2349.9	2020.8	578.3

In questa seconda analisi si può notare una notevole differenza tra i due tipi di processi. Infatti, l'approccio AM risulta estremamente più caro rispetto a processi tradizionali consolidati negli anni. Il grande limite è dato da elevate ore di lavorazione e dal costo ad oggi elevato della polvere metallica, a causa anche di una domanda molto più grande dell'offerta. Nelle Figure 61, 62 e 63 sono riportate le analisi relative ai tre componenti, suddividendo le varie fasi del processo.

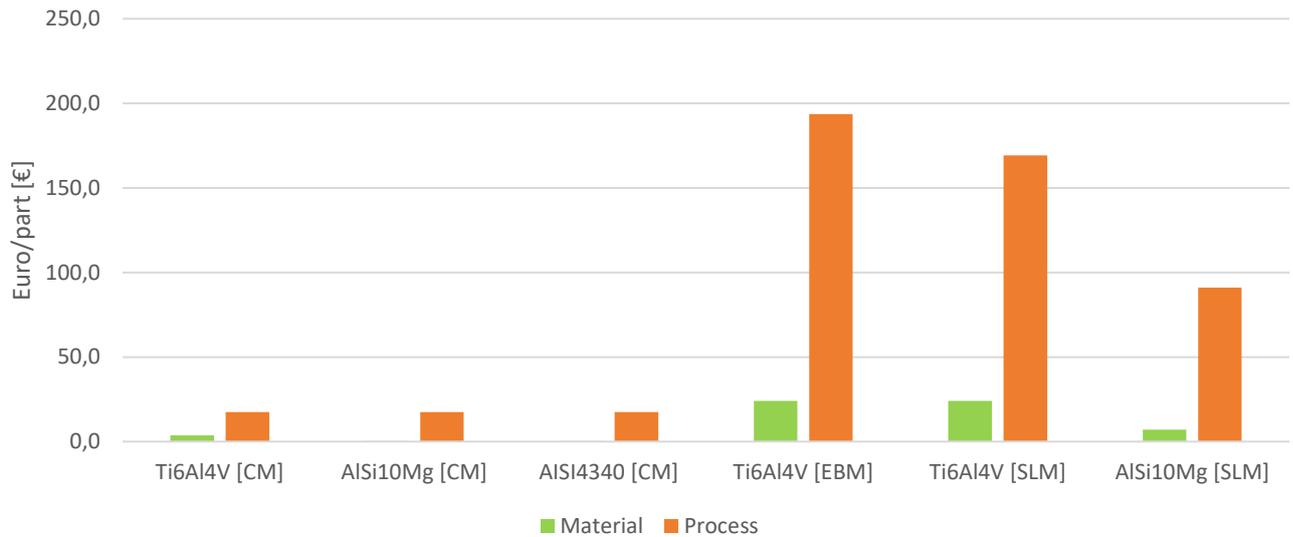


Figura 61 Costo relativo alla produzione di N-yoke

La differenza tra i due processi è piuttosto evidente in questa figura. L'additive è molto più caro, in questo caso a causa di tempi di stampa elevati e, soprattutto nel caso del Ti6Al4V, un costo del materiale notevole. Le elevate ore di lavorazione si ripercuotono infatti sul costo indiretto del processo di additive e sul costo del lavoro durante il processo. Inoltre, la tecnologia EBM presenta costi ben maggiori rispetto alla tecnologia SLM, imputabili ad un maggiore valori di costo indiretto del processo additive, a causa di macchinari molto più costosi. Chiudono l'analisi un costo del materiale ad oggi ancora elevato e un costo del processo rilevante per la realizzazione del pezzo.

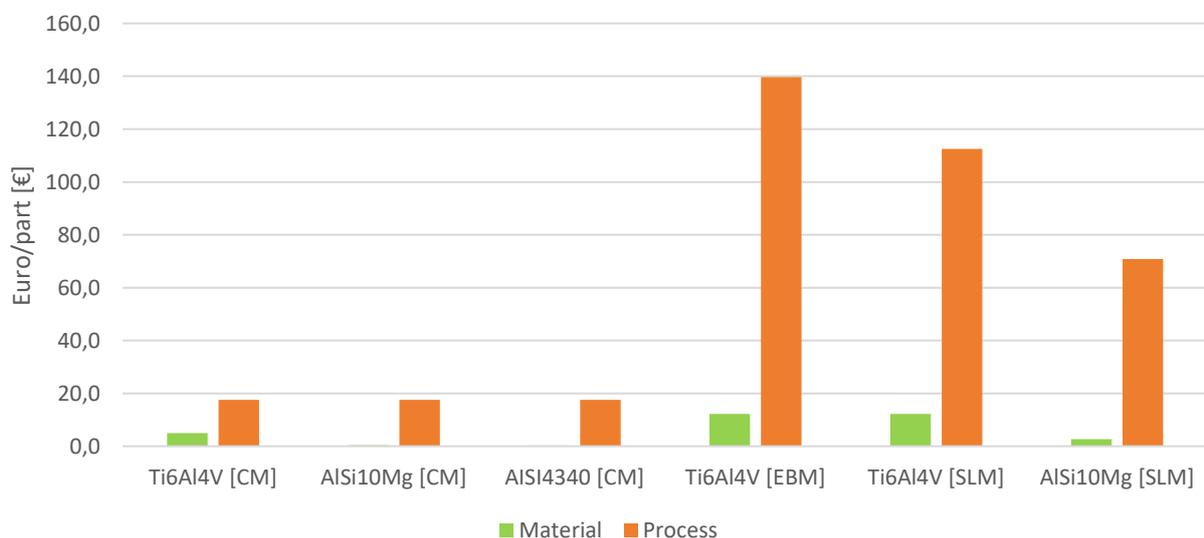


Figura 62 Costo relativo alla produzione dello Steering

Anche in questo caso valgono le considerazioni fatte per il componente N-yoke. Le elevate ore di lavorazione comportano un costo indiretto del processo additive sostanzioso, seguito da elevati costi per la fase di processamento e per il costo del lavoro. Per i processi tradizionali, invece, i costi sono decisamente più modesti, grazie a basse ore di lavorazione e costi dei materiali ridotti.

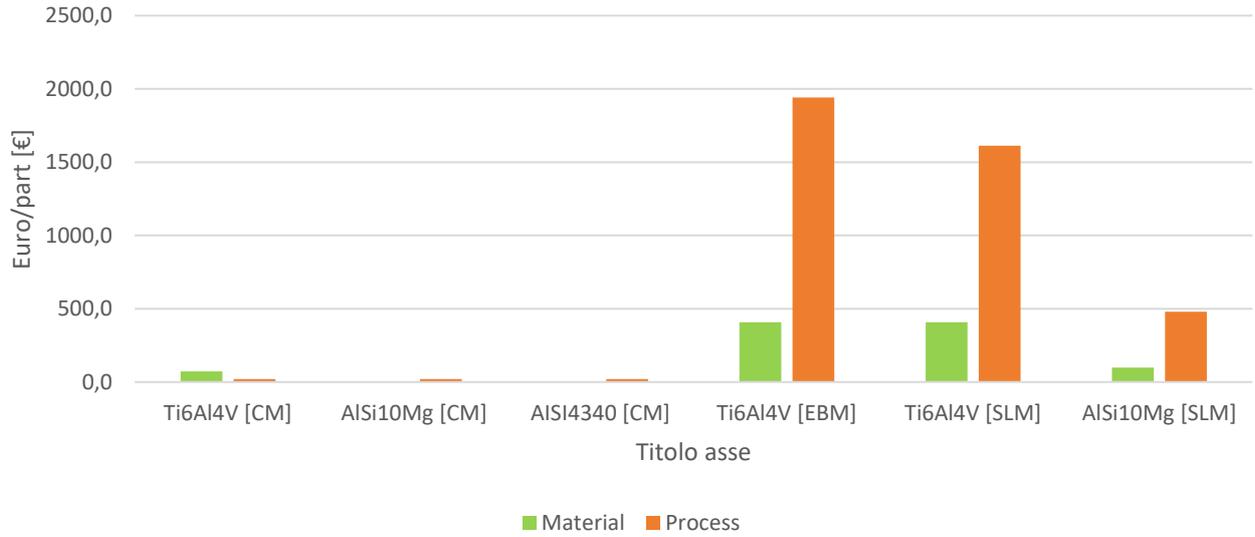


Figura 63 Costo relativo alla produzione della pedana

Per la pedana la voce di costo principale è rappresentata dai costi indiretti del processo di AM, in quanto essendo un componente che richiede un numero elevatissimo di ore per la realizzazione (300 ore), comporta dei costi elevatissimi, che rendono la realizzazione del pezzo sconveniente per AM, a meno che non ci si voglia riferire ad un mercato dove la clientela è disposta a spendere qualcosa in più per un pezzo prodotto in scala ridotta che possiede ottime caratteristiche meccaniche.

Emissioni

Le equazioni utilizzate per questa seconda fase risultano essere (32) e (37), rispettivamente nel caso di approccio tradizionale e additive. Qui di seguito sono riportate le due espressioni:

$$CO_2^{CM} = y_{MF} \cdot (m_p^{CM} + m_c) \cdot [CO_{2V} - r \cdot (CO_{2V} - CO_{2R}) + CO_{2F}] + CES \cdot [P_{stb}^M \cdot t_s^M + \sum_{i=1}^n (SEC_i^M \cdot m_{c_i} + P_{stb}^M \cdot t_{c_i} \cdot \frac{t_{c_i}}{T_i})] + \sum_{i=1}^n (CO_{2tool_i} \cdot \frac{t_{c_i}}{T_i}) + CO_{2lub} \cdot q_L \cdot t_c \quad (32)$$

$$CO_2^{AM} = y_{GA} \cdot (m_p^{AM} + m_s + m_a) \cdot (CO_{2V} - r \cdot (CO_{2V} - CO_{2R}) + CO_{2A}) + CES \cdot (P_{stb}^{AM} \cdot t_s^{AM} + SEC^{AM} \cdot m_{pwd}) + CO_{2gas} \cdot q_{gas} + CO_{2SEP} \cdot m_s + CO_{2HT} \cdot (m_p^{AM} + m_a) + CO_{2FM} \cdot m_a \quad (37)$$

Inserendo i valori all'interno dei modelli di riferimento, si è in grado di ottenere un valore espresso in termini di $kgCO_2/kg$, CO_2^{CM} e CO_2^{AM} , che rappresenta le emissioni complessive. In Tabella 23 sono riportati i valori ottenuti dall'analisi.

Tabella 24 Emissioni rilasciate per la realizzazione dei componenti

Part	Name	Unit	Traditional approach			EBM	SLM	
			Ti6Al4V	AlSi10Mg	AlSi4340	Ti6Al4V	Ti6Al4V	AlSi10Mg
1	Emission	kgCO ₂ /kg	2.5	0.8	0.9	9.2	9.9	4.5
2	Emission	kgCO ₂ /kg	3.2	1	1	5.1	5.4	2.1
3	Emission	kgCO ₂ /kg	40.5	7.7	8.8	137.3	148.3	55.0

Le emissioni nel caso di approcci tradizionali risultano essere ridotte, grazie a minori valori di Embodied Energy, che portano come conseguenza un minore impatto ambientale. Per quanto riguarda l'AM, i primi due componenti, di piccole dimensioni, presentano valori di emissioni superiori all'approccio tradizionale, con una differenza tra di loro non troppo elevata. Questa differenza cresce al crescere della dimensione del componente da realizzare, come si può notare nel caso della pedana. Infatti, per la pedana realizzata tramite lega di Ti6Al4V mediante AM le emissioni risultano essere quasi il triplo rispetto all'utilizzo della lega AlSi10Mg. Nelle successive figure saranno analizzate le emissioni nelle varie fasi dei diversi componenti.

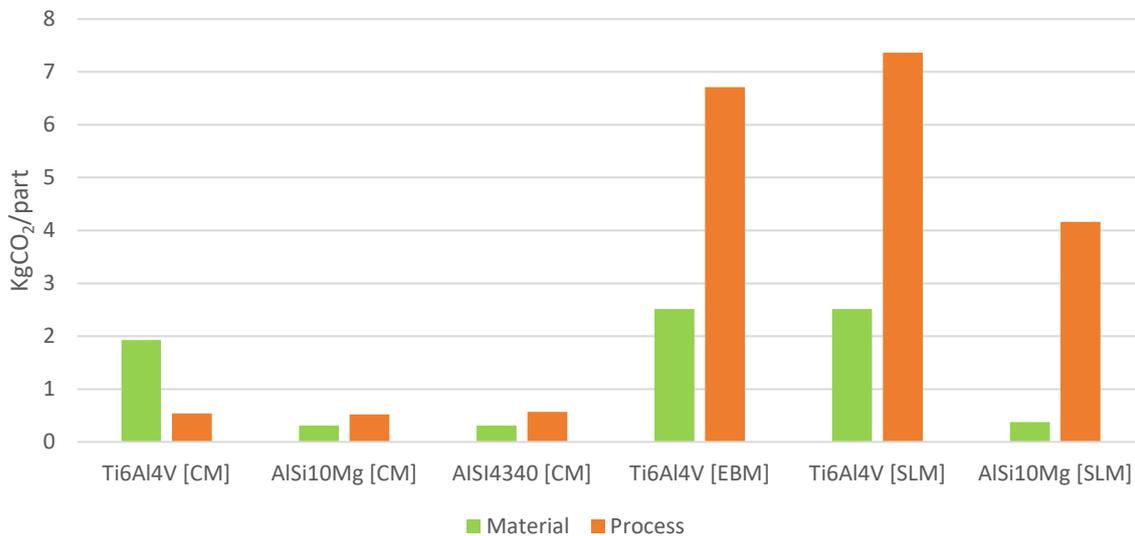


Figura 64 Emissioni relative alla produzione dell'N-yoke

In Figura 64, relativa al componente N-Yoke, cade subito all'occhio l'elevato quantitativo di emissioni durante la fase di manufacturing nel caso di approccio AM. Ciò è in linea con quanto detto finora, tenendo in considerazione inoltre che le emissioni relative alla produzione del materiale sono piuttosto ridotte grazie anche alla riciclabilità del materiale, superiore nel caso dell'AlSi10Mg rispetto alla lega Ti6Al4V.

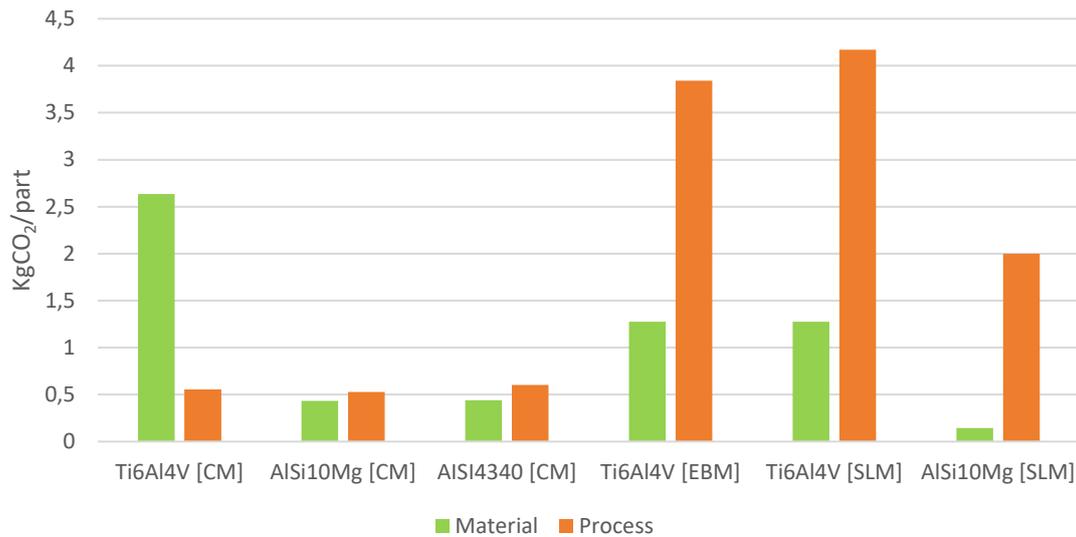


Figura 65 Emissioni relative alla produzione dello Steering

In figura 65 è riportata l'analisi per il componente Steering e, anche per esso, le conclusioni sono le medesime: le emissioni nella fase di material production sono ridotte grazie alla riciclabilità del materiale, mentre le emissioni nel manufacturing vero e proprio sono ancora una voce piuttosto consistente.

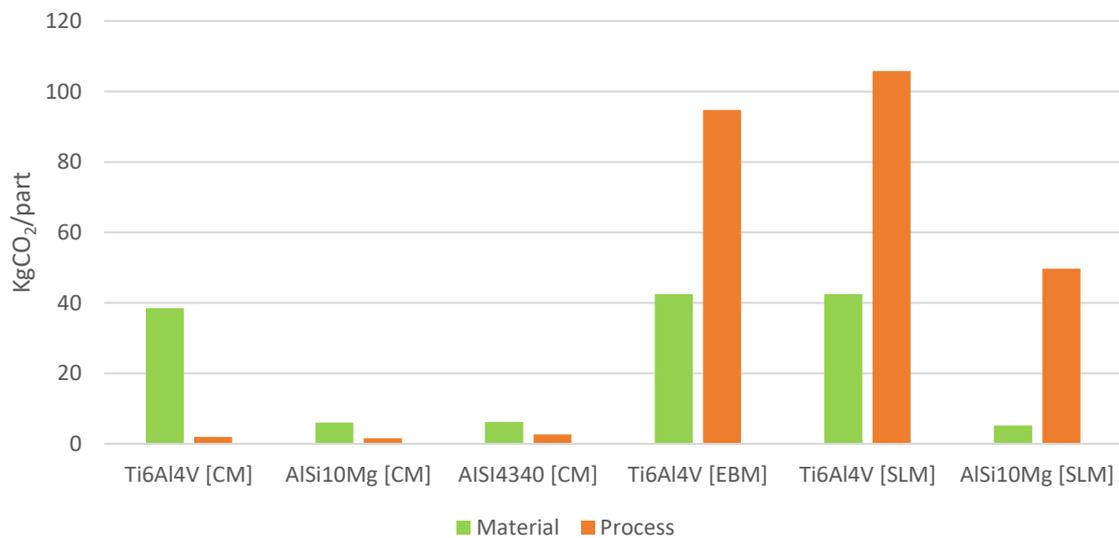


Figura 66 Emissioni relative alla produzione della pedana

In riferimento alla Figura 66 si può notare come per la pedana le emissioni siano notevolmente più elevate, a causa delle dimensioni maggiori e dunque di un processo più corposo. In generale l'AlSi10Mg comporta delle emissioni ridotte, grazie anche all'uso in questo caso di un minore quantitativo di materiale, che porta sicuramente un alleggerimento del processo.

3.3 CONCLUSIONI

Questi casi di studio hanno permesso di applicare una metodologia di analisi per la valutazione dell'impatto economico e ambientale delle tecnologie di fabbricazione additiva. L'additive manufacturing risulta essere di potenziale interesse per la riduzione dell'impatto ambientale, poiché consente di realizzare un prodotto più leggero, con caratteristiche meccaniche analoghe o superiori rispetto ad uno realizzato per processi convenzionali, garantendo una qualità del prodotto soddisfacente e con un bilancio ambientale positivo nell'arco del ciclo di vita di un prodotto. Se si considera un componente destinato ad un veicolo, la realizzazione di pezzi più leggeri porta ad un minor peso del mezzo, che si traduce conseguentemente in maggiore autonomia e minori consumi. Inoltre, leghe come il Ti6Al4V e l'AlSi10Mg presentano caratteristiche meccaniche di interesse in molteplici ambiti applicativi. Pertanto, si intuisce l'importanza di questa tecnologia nella lavorazione di leghe sempre più specifiche, che permettano caratteristiche meccaniche eccellenti, aumentando la qualità e la prestazione dei prodotti. Un suo grande vantaggio si ottiene quando la complessità del pezzo da realizzare è elevata.

A fronte di questi vantaggi, è stato possibile evidenziare alcuni limiti di tale tecnologia. In particolare, durante il processo produttivo di un componente, l'AM comporta tipicamente consumi specifici, emissioni e costi superiori rispetto a tecnologie convenzionali, rendendo tale tecnologia sconveniente in determinati contesti, come nel caso della pedana, a meno che, come detto in precedenza, non si voglia creare un prodotto di una fascia medio-alta destinato ad una clientela alto-spendente. Infine, le leghe disponibili destinate a tale tecnologia in questo momento sono relativamente poche.

I margini di miglioramento per l'AM possono essere molteplici, in particolare in merito allo sviluppo di nuovi materiali e alla riduzione dei costi di produzione. Le attività di ricerca del presente lavoro di tesi ambiscono a contribuire allo sviluppo e all'applicazione di metodologie di supporto decisionale per la pianificazione e l'ottimizzazione di processi di produzione sostenibile, all'interno dei quali l'integrazione di fabbricazione additiva e processi convenzionali può risultare un elemento imprescindibile di innovazione.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Ålgårdh, J., Strondl, A., Karlsson, S., Farre, S., Joshi, S. Andersson, J., ..., Ågren, J. (2017). State of the art for Additive Manufacturing of Metals, Vinnova.
- [2] 3. Systems. [Online]. Available: <https://www.3dsystems.com/our-story>.
- [3] CustomPart. [Online]. Available: <https://www.custompartnet.com/wu/stereolithography>.
- [4] Wohlers, T., Campbell, I., Diegel, O., Kowen, J., Fidan, I., Bourell, D. (2017). Wohlers report.
- [5] Küpper, D., Heising, W., Corman, G., Wolfgang, M., Knizek, C., Lukic, V. (2017). Get Ready for Industrialized Additive Manufacturing.
- [6] Siemens. [Online]. Available: <https://new.siemens.com/global/en/company/stories/home.html>.
- [7] B. C. Group. [Online]. Available: <https://www.bcg.com/>.
- [8] Simufact. [Online]. Available: <https://www.simufact.com/>.
- [9] Renishaw. [Online]. Available: <https://www.renishaw.it/it/additive-in-formula-1-tecnologia-del-future--43777>.
- [10] AvioAero. [Online]. Available: <https://www.avioaero.com/ita/>.
- [11] EOS. [Online]. Available: <https://www.eos.info/en>.
- [12] Reebok. [Online]. Available: <http://www.reebok.com>.
- [13] Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2010). Additive Manufacturing Technologies - Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing, Springer, 141.
- [14] Salmi, A., Calignano, F., Galati, M., Atzeni, E. (2018). An integrated design methodology for components produced by laser powder bed fusion (L-PBF) process,» Virtual and Physical Prototyping.
- [15] Arcam, «<http://www.arcam.com/wp-content/uploads/arcam-a2x.pdf>,» [Online].
- [16] Arcam, «<http://www.arcam.com/wp-content/uploads/arcamebm-corp-brochure-fnlv3.pdf>,» [Online].
- [17] Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2010). Additive Manufacturing Technologies - Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing, Springer.
- [18] M. P. I. Federation. [Online]. Available: <https://www.mpif.org/>.
- [19] Wikipedia, «https://en.wikipedia.org/wiki/Hot_isostatic_pressing,» [Online].
- [20] Empa. [Online]. Available: <https://www.empa.ch/web/coating-competence-center/selective-laser-melting>.
- [21] Gokuldoss, P. K., Kolla, S., Eckert, J. (2017). Additive manufacturing processes: selective laser melting, electron beam melting and binder jetting - selection guidelines, Juergen Stampfl.

- [22] EOS, «https://www.eos.info/systems_solutions/metal/systems_equipment/eos_m_400,» [Online].
- [23] L. Technology, «http://www.aita3d.it/wp-content/uploads/dlm_uploads/2018/04/LPW.pdf,» [Online].
- [24] L. Technology. [Online]. Available: http://www.aita3d.it/wpcontent/uploads/dlm_uploads/2018/04/LPW.pdf.
- [25] Csiro. [Online]. Available: <https://www.csiro.au/>.
- [26] C. Selector. [Online].
- [27] Priarone, P. C., Compatelli, G., Montevocchi, F., Venturini, G., Settineri, L. (2019). A modelling framework for comparing the environmental and economic performance of WAAM-based integrated manufacturing and machining.
- [28] Priarone, P. C., & Ingarao, G. (2017). Towards criteria for sustainable process selection: On the modelling of pure subtractive versus additive/subtractive integrated manufacturing approaches. *Journal of Cleaner Production*.
- [29] Priarone, P. C., Lunetto, V., Atzeni, E., Salmi, A. (2018). Laser powder bed fusion (L-PBF) additive manufacturing: on the correlation between design choices and process sustainability. *Procedia CIRP*.
- [30] Priarone, P. C., Robiglio, M., Ingarao, G., Settineri, L. (2017). Assessment of cost and energy requirements of electron beam melting (EBM) and machining processes.
- [31] Ingarao, G., Priarone, P. C., Deng, Y., Paraskevas, D. (2017). Environmental modelling of alluminium based components manufacturing routes: additive manufacturing versus machining versus forming. *Journal of cleaner production*.
- [32] Priarone, P. C., Robiglio, M., & Settineri, L. (2018). On the concurrent optimization of environmental and economic targets for machining. *Journal of Cleaner Production*.
- [33] Priarone, P. C., Ingarao, G., Settineri, L., di Lorenzo, R. (2019). Energy and cost wise decision support tools for the manufacturing approach selection. *AITEM*.
- [34] Priarone, P. C., Ingarao, G., di Lorenzo, R., Settineri, L. (2016). Influence of material-related Aspects of additive and subtractive Ti-6Al-4V manufacturing on energy demand and carbon dioxide emissions.
- [35] Laureijs, R. E., Roca, J. B., Narra, S. P., Montgomery, C., Beuth, J. L. (2017). Metal additive manufacturing: cost competitive beyond low volumes. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*.
- [36] Kamps, T., Lutter-Guenther, M., Seidel, C., Gutowski, T., Reinhart, G. (2018). Cost and energy efficient manufacture of gears by laser beam melting. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*.
- [37] Priarone, P. C., Ingarao, G., Lunetto, V., di Lorenzo, R., Settineri, L. (2018). The role of re-design for additive manufacturing on the process environmental performance. *Procedia CIRP*.
- [38] Baumers, M. (2012). Economic aspects of Additive Manufacturing: benefits, costs and energy consumption.