

ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

---

**SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA**

*CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA GESTIONALE*

**TESI DI LAUREA MAGISTRALE**

in Sistemi Integrati di Lavorazione

**Valutazione primaria degli impatti ambientali nel  
processo Arburg Plastic Freeforming**

**CANDIDATO**

Giovanni Fumelli

**RELATORE**

Prof. Giampaolo Campana

**CORRELATORI**

Ing. Mattia Mele

Prof. Ing. Maurizio Fiorini

Anno Accademico [2018/2019]

Terza Sessione



# SOMMARIO

INDICE DEGLI ACRONIMI .....	
INDICE DELLE FIGURE .....	
INTRODUZIONE.....	
<b>CAPITOLO I: L'ADDITIVE MANUFACTURING.....</b>	<b>1</b>
1.1 CARATTERI GENERALI .....	1
1.2 PRINCIPALI VANTAGGI DELLE TECNOLOGIE .....	2
1.3 IL WORKFLOW.....	4
1.3.1 Preparazione del modello digitale del processo .....	8
1.4 LE TECNOLOGIE .....	9
1.4.1 Stereolitografia SLA .....	10
1.4.2 Selective Laser Sintering (SLS).....	13
1.4.3 Selective Laser Melting (SLM).....	15
1.4.4 Fused Deposition Modeling (FDM).....	16
1.4.5 Laminate Object Manufacturing (LOM) .....	18
<b>CAPITOLO II: L'AZIENDA ARBURG .....</b>	<b>20</b>
2.1 AZIENDA ARBURG .....	20
2.2 LA GAMMA DI PRODOTTI ARBURG .....	21
2.2.1 Presse ALLAROUNDER .....	21
2.2.2 Robotica.....	22
2.2.3 Progetti personalizzati.....	22
2.2.4 Freeformer: caratteristiche generali.....	23
2.3 TECNICHE DEL PROCESSO ARBURG: STAMPAGGIO AD INIEZIONE .....	23
2.4 ARBURG PLASTIC FREEFORMER APF .....	26
2.4.1 Proprietà dei materiali .....	28
2.4.2 Il principio di funzionamento .....	28
2.4.3 Risultati ottenibili.....	30
<b>CAPITOLO III: LCT E SVILUPPO SOSTENIBILE.....</b>	<b>32</b>
3.1 I CONCETTI DI SOSTENIBILITÀ E DI SVILUPPO SOSTENIBILE .....	32
3.2 TRIPLE BOTTOM LINE (TBL).....	34
3.3 IL LIFE CYCLE THINKING (LCT).....	36
3.4 TECNICHE IMPLEMENTATE NELL'OTTICA LIFE CYCLE THINKING.....	37
3.4.1 Strumenti informativi sulle prestazioni del prodotto .....	38
3.4.2 Eco-Design ed Eco-Progettazione .....	39
3.4.3 Strumenti di analisi.....	39
3.5 LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA).....	40
3.5.1 FASE I: Definizione degli scopi e degli obiettivi dello studio.....	42
3.5.2 FASE II: Life Cycle Inventory (LCI).....	44
3.5.3 FASE III: Life Cycle Impact Assesment (LCIA).....	45
3.5.4 FASE IV: Interpretazione dei risultati.....	50
3.6 SVILUPPI FUTURI E PRINCIPALI LIMITI.....	51
<b>CAPITOLO IV: LCA DEL PROCESSO ARBURG .....</b>	<b>53</b>
4.1 CARATTERI GENERALI .....	53
4.2 DEFINIZIONE DEL METODO: LCA PROCESS.....	54
4.2.1 Introduzione al processo .....	55
4.2.2 Scopo, obiettivi e confini dell'analisi .....	55
4.2.3 Analisi di inventario LCI .....	59
4.2.4 LCIA: Life Cycle Impact Assessment.....	65
4.2.5 Discussione dei risultati.....	65

<b>CAPITOLO V: CASE STUDY</b> .....	<b>67</b>
<b>5.1 APPLICAZIONE AD UN PRODOTTO</b> .....	67
<b>5.2 SCOPO, OBIETTIVI E CONFINI DELL'ANALISI</b> .....	68
<b>5.3 ANALISI DI INVENTARIO LCI</b> .....	69
<b>5.4 LCIA: LIFE CYCLE IMPACT ASSESSMENT</b> .....	78
<b>5.4 CONFRONTO DEGLI IMPATTI DI LAVORAZIONE NEL CASO SI UTILIZZINO MATERIALI DIFFERENTI: PLA VS ABS</b> .....	82
<b>5.5 RISULTATI OTTENUTI</b> .....	85
<b>5.6 DISCUSSIONE DEI RISULTATI</b> .....	86
<i>Considerazioni sul parametro temporale del processo tc</i> .....	87
<i>Considerazioni sulle logiche di trasporto</i> .....	88
<i>Considerazioni sul consumabile</i> .....	89
<i>Considerazioni sui due materiali</i> .....	89
<b>CONCLUSIONI</b> .....	91
<b>APPENDIX A1</b> .....	<b>94</b>
<b>APPENDIX A11</b> .....	<b>96</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>103</b>
<b>SITOGRAFIA</b> .....	<b>107</b>

# INDICE DEGLI ACRONIMI

**ADP** - Stratospheric Ozone Depletion  
**AM** - Additive Manufacturing  
**APF** - ARBURG Plastic Freeforming  
**B-REP** - Boundary Representation  
**CAD** - Computer Aided Design  
**DF** – Digital Fabrication  
**EOFP** - Photochemical Ozone Formation. Ecosystems  
**EOFP** - Photochemical Ozone Formation. Human Health  
**EPD** - Environmental Product Declaration)  
**FDM** - Fused Deposition Modeling  
**FEP** - Freshwater Eutrophication  
**FETP** - Freshwater ecotoxicity  
**FFF** - Fused Filament Fabbriation  
**FFP** - Fossil depletion  
**GWP** - global warming potential  
**HTP** - human toxicity potential  
**HTPc** - Human toxicity. cancer  
**HTPnc** - Human toxicity. non-cancer  
**IRP** - Ionizing Radiation  
**ISO** - International Organization for Standardization.  
**LCA** – Life Cycle Assessment  
**LCC** – Life Cycle Costing  
**LCI** – Life Cycle Inventory  
**LCIA** – Life Cycle Impact Assessment  
**LCT** – Life Cycle Thinking  
**LOM** - Laminate Object Manufacturing  
**LOP** - Land use  
**MEP** - Marine Eutrophication  
**METP** - Marine ecotoxicity  
**PLA** – Acido polilatticoABS (acrilonitrile-butadiene-stirene)  
**RP** - Rapid Prototyping  
**SLA** - StereoLithography Apparatus  
**SLM** - Selective Laser Melting  
**SLS** - Selective Laser Sintering  
**SOP** - Metal depletion  
**STL** - Standard Triangulation Language  
**TAP** - Terrestrial Acidification  
**TETP** - Terrestrial ecotoxicity  
**WCP** - Freshwater Consumption

# INDICE DELLE FIGURE

FIGURA 1 - SUBTRACTIVE (A) VS ADDITIVE MANUFACTURING (B).....	4
FIGURA 2 - ELEMENTO TRIANGOLARE NELLA RAPPRESENTAZIONE STL.) .....	5
FIGURA 3 - SCHEMA GENERALE DELLE PRINCIPALI TECNOLOGIE DI ADDITIVE MANUFACTURING.....	9
FIGURA 4 - SCHEMA FUNZIONAMENTO DELLA TECNOLOGIA SLA.....	11
FIGURA 5 - SCHEMA TECNOLOGIA SLS. ....	13
FIGURA 6 - SCHEMA TECNOLOGIA FDM. ....	16
FIGURA 7 - PRINCIPALI TECNOLOGIE ADDITIVE MANUFACTURING E PRINCIPALI CARATTERISTICHE.....	19
FIGURA 8 - IMMAGINA TRATTA DALL'CATALOGO ARBURG. ....	20
FIGURA 9 - TECNOLOGIA ALLROUNDER. IMMAGINA TRATTA DALL'CATALOGO ARBURG. ....	21
FIGURA 10 - TECNOLOGIA ROBOTICA ARBURG. IMMAGINA TRATTA DALL'CATALOGO ARBURG.....	22
FIGURA 11 - DIAGRAMMA SCHEMATIC PROCESSO STAMPAGGIO.....	24
FIGURA 12 - ESEMPIO DI MECCANISMO DI STAMPAGGIO AD INIEZIONE.....	25
FIGURA 13 - TECNOLOGIA ARBURG FREEFORMING. IMMAGINA TRATTA DALL'CATALOGO ARBURG.....	27
FIGURA 14 - FUNZIONAMENTO ARBURG PLASTIC FREEFORMER. ....	29
FIGURA 15 - CATEGORIE D'IMPATTO ANALIZZATE NEL LIFE CYCLE THINKING. ....	33
FIGURA 16 - TRIPLE BOTTOM LINE .....	35
FIGURA 17 - ESEMPIO DI ETICHETTATURA AMBIENTALE TIPO I – ISO 14024 .....	39
FIGURA 18 - ESEMPIO DI ETICHETTATURA AMBIENTALE TIPO II - ISO 14021 .....	39
FIGURA 19 - ESEMPIO DI ETICHETTATURA AMBIENTALE TIPO III - ISO 14025 .....	39
FIGURA 20 - TABELLA RIASSUNTIVA DELLE TIPOLOGIE DI ETICHETTE .....	39
FIGURA 21- FASI COSTITUTIVE LCA, ANALISI DEL CICLO DI VITA.....	42
FIGURA 22 - FASI DELLA VALUTAZIONE DEL CICLO DI VITA.....	45
FIGURA 23 - ESEMPIO PROCESSO DI RILEVAZIONE DELL'INDICATORE DI CATEGORIA, BEN ISO 14044 .....	47
FIGURA 24 - CLASSIFICAZIONE DEI TERMINI UTILIZZATI DALLO STANDARD ISO, BEN ISO 14044 .....	47
FIGURA 25 - PANORAMICA DELLA STRUTTURA DEL MODELLO ReCiPe, ReCiPe 2016 v1.1 .....	49
FIGURA 26 - PREVISIONE DEI RICAIVI DALL'IMPIEGO DI TECNOLOGIE AM NEL SETTORE AUTOMOTIVE .....	54
FIGURA 27 - MAIN FRAMEWORK ARBURG PROCESS .....	58
FIGURA 28 - DIMENSIONI FISICHE APF .....	60
FIGURA 29 - ESEMPIO DI BoM ARBUR FOR PLASTICA FREEFORMER .....	61
FIGURA 30 - COMPOSIZIONE DEI KIT COSTITUTIVI APF.....	62
FIGURA 31 - RAPPRESENTAZIONE SOFTWARE DELLA LAVORAZIONE .....	68
FIGURA 32 - ESEMPI DI METODI DI CALCOLO DEL VOLUME .....	71
FIGURA 33 - DISTRIBUZIONE PESI IN FUNZIONE DEI KIT APF.....	72
FIGURA 34 - PESO APF IN RELAZIONE AI KIT COSTITUTIVI.....	72
FIGURA 35 - ESEMPIO SCOMPOSIZIONE COMPONENTI IT .....	73
FIGURA 36 - MATERIALI COSTITUTIVI DELLA MACCHINA, SUDDIVISA PER KIT COSTITUTIVI.....	75
FIGURA 37 - GRAFICO A TORTA: DISTRIBUZIONE PERCENTUALE DEI MATERIALI (IN KG).....	76
FIGURA 38 - PARAMETRIZZAZIONE LCI.....	78

FIGURA 39 - COMPOSIZIONE PERCENTUALE DEGLI INDICI MIDPOINT LCIA DEI PROCESSI .....	79
FIGURA 40 - COMPOSIZIONE PERCENTUALE DEGLI INDICI MIDPOINT LCIA DEI PROCESSI.....	79
FIGURA 41 - CONTRIBUTIONS TO ReCiPe 2016 v1.1 ENDPOINT .....	81
FIGURA 42 - INDICATORI EP IN TERMINI ASSOLUTI: HUMAN HEALTH .....	83
FIGURA 43 - INDICATORI EP IN TERMINI ASSOLUTI: ECOSYSTEM QUALITY .....	83
FIGURA 44 - INDICATORI EP IN TERMINI ASSOLUTI: RESOURCE SCARCITY .....	83
FIGURA 45 - EP HUMAN HEALT PER LA PRODUZIONE DI UNA MASHERINA IN MATERIALE PLA ED ABS .....	84
FIGURA 46 - EP RESOURCE SCARCITY PER LA PRODUZIONE DI UNA MASHERINA IN MATERIALE PLA ED ABS .....	85
FIGURA 47 - ReCiPe 2016 V1.1 ENDPOINT (H) INDICATORS, PLA PRODUCT.....	86
FIGURA 48 - ReCiPe 2016 V1.1 ENDPOINT (H) INDICATORS, ABS PRODUCT .....	86

# INTRODUZIONE

Con il seguente elaborato si vogliono indagare le principali tematiche connesse al tema ambientale in funzione del processo di lavorazione additivo della macchina *Arburg Plastic Freeformer* (APF).

L'obiettivo di tale studio è infatti quello di implementare un modello risolutivo di valutazione degli impatti ambientali legati al processo additivo APF. Tale modello viene elaborato seguendo i principi della filosofia del *Life Cycle Thinking* (LCT), attraverso lo strumento di valutazione delle problematiche ambientali del *Life Cycle Assessment* (LCA).

Il corpo centrale dell'elaborato viene suddiviso in cinque capitoli.

Il *primo capitolo* si apre con una descrizione delle tecniche di additive manufacturing ad oggi disponibili sul mercato, fornendone una descrizione di carattere generale relativamente alle dinamiche di funzionamento e trattando i principali vantaggi derivanti l'utilizzo di queste tecnologie.

Il *secondo capitolo* è dedicato all'Azienda tedesca Arburg, di cui si descrivono le principali tecnologie additive offerte prestando particolare attenzione alla macchina *Arburg Plastic FreeFormer*. Di quest'ultima tecnologia vengono analizzate nel dettaglio il principio di funzionamento e le proprietà di processo, cogliendone le similarità con le tecnologie di stampaggio a iniezione.

Nel *terzo capitolo* si espone la filosofia di pensiero dell'*Life Cycle Thinking* e se ne descrivono i principali strumenti operativi. L'approccio dell'LCA viene descritto introducendone le fasi costitutive che lo compongono, secondo gli standard ISO, e illustrando come vengono generalmente calcolati gli impatti ambientali in relazione ai corrispettivi indicatori.

Gli strumenti descritti all'interno di questo capitolo sono trattati attraverso una review della letteratura scientifica ad oggi disponibile: si ritiene che queste tematiche siano caratterizzate da una forte interdisciplinarietà e rivestano un ruolo chiave nel panorama industriale odierno.

Il *quarto capitolo* è dedicato alla presentazione del modello di valutazione degli impatti ambientali legati al processo APF. Si illustrano i caratteri generali della lavorazione e la definizione del metodo LCA, stabilendo in modo chiaro lo scopo, gli obiettivi, i confini dell'analisi ed il metodo di risoluzione.

Il *quinto capitolo* è dedicato al caso di studio, ovvero all'applicazione della metodologia di analisi LCA, con lo scopo di valutare gli impatti ambientali connessi alla produzione di una mascherina dotata di respiratore in materiale plastico PLA (Acido Polilattico), attraverso tecnologia APF (*Plastic Arburg FreeFormer*) Arburg.

Per validare la dinamica comparativa dello studio, questo sarà sottoposto ad un'analisi che vuole confrontare la stessa lavorazione impiegando però due materiali plastici differenti: PLA vs ABS. Vengono poi presentati e commentati i risultati dello studio condotto, attraverso due step applicativi: MidPoint (MP) ed EndPoint (EP), calcolati mediante ReciPe v.1.1 in una prospettiva gerarchica (MidPoint, EndPoint: H).

Infine, seguono considerazioni sui risultati ottenuti dallo studio.



# Capitolo I: L'Additive Manufacturing

In questo capitolo si introducono i principali concetti e le generalità relative all'ambito scientifico delle tecnologie additive con lo scopo di illustrarne le principali logiche di funzionamento.

## 1.1 Caratteri generali

Le tecnologie additive (Additive Manufacturing - AM) sono di recente comparsa se confrontate alle lavorazioni meccaniche 'tradizionali'. Quest'ultime, che hanno caratterizzato la produzione industriale per decenni, sono caratterizzate da un processo di lavorazione che consente di ottenere l'oggetto desiderato attraverso la deformazione plastica di materiale (tra queste: lo stampaggio, l'estrusione, laminazione, ecc).

L'Additive Manufacturing, è al giorno d'oggi una tecnologia in forte espansione ed il suo impiego, in tutti i campi della produzione industriale, risulta sempre più radicato (Yosofi et al 2018). Questa tecnica viene impiegata nei settori aziendali più disparati: dall'edilizia al food, dal design alla prototipazione rapida, dal settore medico a quello domestico (Erwin Rauch, Marco UnterHofer, Patrick Dallasega 2017). La manifattura additiva si diversifica dalle lavorazioni meccaniche tradizionali poiché, a differenza di queste, consente di costruire oggetti attraverso la deposizione di strati successivi di materiale (slicing).

Riferendosi ad un piano cartesiano, consideriamo la deposizione di materiale convenzionalmente lungo l'asse verticale Z (asse delle ordinate).

Il processo di Slicing consiste nell'aggiunta di strati di materiale che andranno a costituire le sezioni piane (Layers) che compongono l'oggetto. L'accorpamento dei diversi layers, uno sull'altro, rappresenta la costituzione tridimensionale dell'oggetto. Il grado di finitura del prodotto dipenderà quindi dallo spessore dello strato, influenzato a sua volta dalla tipologia di materiale scelto per la fabbricazione e dai parametri di processo impostati (Bansal et al. 2020).

Questi scenari si distanziano notevolmente da quelli che sono stati per anni gli approcci classici alla lavorazione meccanica ("Traditional vs Additive Manufacturing Supply Chain

Configurations: A Comparative Case Study”, Jimo et al. 2019), tanto da poter definire le tecnologie additive come una classe di tecnologie a sé stanti ed indipendenti.

La deposizione di materiale che caratterizza le tecnologie di Additive Manufacturing si differenzia dai processi di asportazione truciolo, di solidificazione delle polveri ed anche dalle tecniche di colata, in quanto cambia drasticamente l’influenza dei supporti nei confronti del processo di lavorazione. Il processo potrebbe così coinvolgere una quantità minore di materiale, conseguenza diretta della possibilità di non utilizzare supporti (“Geometric consideration of support structures in part overhang fabrications by electron beam additive manufacturing”, Bo Cheng, Kevin Chou, 2015). L’eliminazione dello stampo dai processi risulta essere un vantaggio in termini di materiale impiegato, di programmazione necessaria e tempo di lavorazione (questo diminuisce notevolmente); quanto appena affermato impatta dunque considerevolmente sia sull’efficienza sia sulla sostenibilità dell’intero processo. Il funzionamento di queste tecnologie, è supportato dalla digitalizzazione del processo e da un’automazione in continua via di sviluppo.

Il recente avvento dell’AM ha permesso al settore delle lavorazioni meccaniche di fare un salto su di un gradino tecnologico-innovativo superiore, aprendo ampi scenari e presentando al contesto odierno tanto una sfida quanto un’opportunità.

## **1.2 Principali vantaggi delle tecnologie**

La letteratura scientifica ha proposto differenti vantaggi derivanti l’adozione di tecnologie additive:

1. *Semplificazione della supply chain.* Le lavorazioni additive sono in grado di snellire i processi dell’intera supply chain, rendendo superflue determinate attività che prima invece caratterizzavano il processo. Lo studio nel settore del automotive relazionato ai processi AM condotto da Mia Delic e Daniel R. Eyers (*The effect of additive manufacturing adoption on supply chain flexibility and performance: An empirical analysis from the automotive industry, 2020*) fornisce un contributo di come l’adozione della produzione additiva sia in grado di supportare la flessibilità richiesta della catena di approvvigionamento e, a sua volta, di migliorare le prestazioni del sistema di approvvigionamento nel contesto automobilistico.

2. *Minima quantità di scarto di lavorazione*, che si traduce in uno spreco minore sia per quanto riguarda il materiale utilizzato sia per quanto concerne un minore utilizzo di energia necessaria per la produzione degli oggetti (Frketic et al. 2017).
3. *La possibilità di realizzare oggetti altamente personalizzati e complessi*, senza dover ricorrere a stampi e/o attrezzature che richiederebbero ulteriori investimenti. Attraverso la lavorazione additiva è possibile realizzare forme che non sarebbero ottenibili diversamente, impattando in modo positivo sulla condizione sociale degli individui (Huang et al. 2012).
4. *Gli automatismi del processo* risultano essere un punto di forza della lavorazione additiva, la quale procede senza l'ausilio di un operatore dedicato (Frketic et al 2017).

I benefici derivanti dall'impiego delle lavorazioni additive sono numerosi e nello scenario produttivo attuale questi rispondono perfettamente alle richieste del mercato: una riduzione dei costi, dei tempi ed una diminuzione degli scarti di produzione. Lo contesto odierno è inoltre caratterizzato da una domanda altamente mutevole, caratterizzata da una richiesta di volumi sempre minore ed un aumento di complessità dei prodotti conseguente ad una richiesta di personalizzazione di questi sempre più spinta. Al paradigma produttivo della "Mass Production", che fino una decina di anni fa si affermava senza rivali, ad oggi si sta affiancando quello della "Mass Customization", caratterizzato appunto da un ciclo di vita dei prodotti sempre più breve e complesso, in cui il livello di personalizzazione è determinato dal grado di coinvolgimento del consumatore nel processo di produzione (*Company-customer interaction in mass customization*, Jost et al.2020).

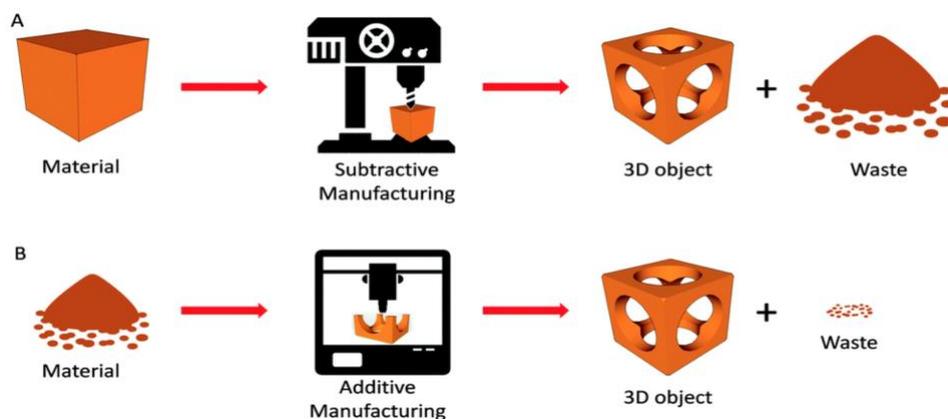


Figura 1– Subtractive (A) vs Additive Manufacturing (B). (Da “Stampa 3D di leghe metalliche” di M.Sortino)

Nei successivi paragrafi si descrivono alcune delle caratteristiche generali dei processi additivi e le principali tecnologie ad oggi disponibili sul mercato.

### 1.3 Il workflow

Si Analizzano ora alcune caratteristiche generali dei processi di AM. Sebbene ad oggi siano numerose le tipologie di macchine e di processi che permettono di effettuare lavorazioni additive, l’iter produttivo di cui queste si avvalgono rimane pressoché identico, ed è possibile suddividerlo nei seguenti step:

1. **Preparazione del modello digitale del prodotto.** Questa prima fase di modellazione digitale viene generalmente ottenuta tramite l’utilizzo di sistemi CAD (Computer Aided Design). Questa fase del processo risulta molto importante in quanto vede l’integrazione di differenti processi tecnologici. I sistemi di programmazione computerizzati *CAM-CAD*, utilizzano una rappresentazione matematica del solido attraverso la definizione delle equazioni di superficie, *Boundary representation B-REP* (Giampaolo Campana, Mattia Mele 2019). Ogni materiale che si andrà a lavorare vanterà caratteristiche proprie, sarà dunque necessario affiancare a questa fase anche l’attività di progettazione digitale del processo.
  
2. **Conversione del modello in formato STL.** La conversione del file CAD in formato STL (acronimo di Standard Triangulation Language), consente di approssimare le

superfici esterne dell'oggetto che si desidera realizzare tramite la discretizzazione di elementi triangolari, tenendo presente che l'approssimazione potrebbe risultare affetta da errore (Houtilainen et al. 2014); questo concetto permette di eliminare eventuali imperfezioni di disegno che impatterebbero negativamente sul risultato finale. Ogni triangolo conterrà le informazioni in funzione delle 9 variabili (X,Y,Z) rispettivamente contenute dai tre vertici ( $v_1, v_2, v_3$ ) lungo le direzioni del versore uscente dalla superficie (G. Campana, M. Mele, 2019). Il file in formato STL conterrà le informazioni nei nodi dei triangoli; tale file potrà poi essere soggetto ad ulteriori conversioni. Il numero di triangoli necessari per l'approssimazione risulta direttamente proporzionale alla complessità dell'oggetto che si desidera realizzare ed all'entità della risoluzione richiesta. L'approssimazione appena descritta concretizza la costruzione della mesh (scomposizione della superficie in modelli elementari). La possibilità di infittire la mesh, utilizzando quindi una maggiore triangolazione, è da tenere presente nella fase di impostazione dei parametri di processo, in funzione dell'oggetto e del processo di lavorazione che si intende perseguire. L'effetto legato alla dimensione degli elementi e la tecnica adattativa di ri-mesh nella simulazione numerica incidono notevolmente sulle dinamiche del processo (Suresh et al. 2014).



Figura 2 Elemento triangolare nella rappresentazione STL. (Da "Sistemi integrati di lavorazione" di G. Campana, M. Mele)

Ovviamente, nella risoluzione dei problemi B-REP la triangolazione porta ad avere delle approssimazioni della reale superficie del componente, questo significa che tanto più la costruzione della mesh sarà discretizzata (tanto più il dominio sarà infinitesimale) tanto più l'approssimazione della superficie sarà rappresentativa della realtà.

Altro parametro da tenere in considerazione, in questa fase, è quello della corda massima, definito come “massima distanza tra la discretizzazione angolare e le superfici matematiche, demandando al software la creazione dell’STL tramite l’utilizzo del minor numero di triangoli necessario a soddisfare tale vincolo” (G. Campana, M.Mele, 2019,).

Infine, le superfici ottenute dovranno poi soddisfare la condizione di Manifold, secondo la quale una superficie, (anche composta) si definisce Manifold se per ogni suo punto P è possibile individuare una sfera di raggio  $r$  sufficientemente piccolo affinché la sua intersezione con la superficie risulti omeomorfica ad una circonferenza (G. Campana, M.Mele, 2019).

3. **Trasferimento del file alla macchina e settaggio della macchina.** Il formato STL svolge il compito fondamentale di interfaccia tra il modello CAD di partenza ed il software della macchina che svolgerà la lavorazione. Il software interno della macchina lo converte, in un secondo momento, in un formato specifico e provvede alla sua suddivisione in strati di uguale spessore che rappresentano i veri e propri layers di stampa. Le modalità di conversione del file possono fondarsi su differenti criteri (Yin Z.W. 2011). La fase di modellazione e la stratificazione dell’oggetto risultano passaggi fondamentali in quanto ogni errore ed ogni approssimazione non corretta si rispecchierà sull’accuratezza e sulle proprietà fisiche dei prodotti finali e, conseguentemente, sul tempo necessario per produrli. In questa fase occorre poi definire i parametri di processo (temperatura, caratteristiche fisiche del materiale, velocità di movimento degli organi della macchina ecc.) necessari a definire in modo univoco il comportamento della macchina durante la lavorazione, aspetti critici relativamente ai requisiti qualitativi che si desidera attribuire al prodotto.
  
4. **Costruzione dell’oggetto.** In questa fase avviene la costruzione vera e propria dell’oggetto attraverso la sovrapposizione di strati consecutivi lungo il piano cartesiano XY. La deposizione dello strato avviene con una stratificazione che va a costruire in un primo momento il perimetro dell’oggetto (contouring), successivamente si procede con il riempimento dello strato (G. Campana, M. Mele, 2019). Risulta chiaro come la

velocità con cui il materiale viene depositato e la porzione di quantità che il canale mette a disposizione, influenzino in modo direttamente proporzionale il tempo relativo ai percorsi di riempimento.

Alcune tecnologie permettono l'utilizzo di più canali di trasformazione, integrando durante la lavorazione il movimento di questi alla possibilità di far lavorare più canali contemporaneamente. Per canale attivo si intende un canale che sta depositando materiale, mentre per canale passivo uno che sta procedendo con il processo di lavorazione ma che non sta depositando materiale. La fase di costruzione dell'oggetto risulta essere estremamente automatizzata e non necessita di supervisione, presenta la possibilità di essere effettuata da remoto. I vari processi attraverso i quali il materiale viene depositato per comporre l'oggetto sono correlati alla tecnologia impiegata, di cui in seguito se ne descriveranno le principali tipologie.

5. **Rimozione del prodotto.** Terminata la costruzione, l'oggetto deve essere rimosso dall'area di lavoro della macchina. Questa operazione può risultare critica soprattutto quando si tratta di oggetti di piccole dimensioni con numerosi dettagli; risulta dunque necessario prestare molta attenzione a tale momento così da non compromettere la qualità dell'oggetto. Determinate lavorazioni necessitano di un tempo da far intercorrere tra l'estrazione del prodotto e la sua rimozione, tale tempo è legato a necessità di tipo termico e/o chimico. In questa fase vengono solitamente impiegate opportune attrezzature manuali e/o robotizzate (*Automatic Support Removal for Additive Manufacturing Post Processing*, Nelaturi et al. 2019). Aspetto fondamentale dell'impiego delle tecnologie è la possibilità, durante la fase di rimozione del pezzo finale, di recuperare il materiale non trasformato, facilitando le politiche di riciclo e ri-utilizzo dello stesso.
6. **Post-processing.** Una volta rimosso il pezzo dal piano di lavoro, generalmente questo necessita di ulteriori operazioni che ne perfezionino le caratteristiche geometriche e fisiche. Lo studio condotto da Xian-zhe Ran et al. 2018, legato all'influenza della fase di post processo nella produzione additiva di acciaio AerMet100, mostra la capacità del materiale di modificare le proprie caratteristiche meccaniche di trazione e resistenza attraverso trattamenti termici. Tra questi i più comuni sono: rimozione delle strutture ausiliarie (qualora presenti), pulizia e finitura delle superfici del pezzo ed eventuali

trattamenti termici, fisici o chimici opportuni.

7. **Applicazione.** Spesso queste tecnologie sono abbreviate anche l'acronimo RP: Prototipazione Rapida (Rapid Prototyping), per il largo impiego dei suddetti processi nel campo della prototipazione.

Dobbiamo ora precisare che le operazioni sopraelencate sono riferite alla digitalizzazione del modello del prodotto. Tutte le fasi devono essere affiancate da una modellizzazione digitale del processo.

### **1.3.1 Preparazione del modello digitale del processo**

Una volta costituito l'oggetto STL, tutte le fasi sopracitate vengono parallelizzate con la costruzione digitale di quello che rappresenterà il contesto di lavorazione. La definizione delle geometrie, delle posizioni e l'orientazione degli oggetti vengono rappresentati digitalmente, risulta dunque fondamentale definire l'area di lavoro ed i relativi assi cartesiani di riferimento. Vengono inoltre impostati i parametri di processo, nonché i vincoli e le condizioni di contorno della lavorazione, stabilendo i comandi che il calcolatore numerico della macchina andrà ad impartire. Nel caso di approcci di tipo simulativo assume grande rilevanza la possibilità di poter iterare il calcolo, modificando geometrie ed orientazioni all'interno del piano di lavoro, aggiustando i parametri di processo prima di avviare la lavorazione additiva vera e propria. Ogni materiale che andrà a comporre l'oggetto presenterà differenti proprietà fisiche, quindi specifici piani di lavoro e orientazioni, questo si traduce in una criticità nella progettazione del processo additivo: si vorrà ricercare la maggiore efficienza, economicità, sostenibilità e risolutezza. Le cose si complicano ulteriormente nel caso in cui siano simultaneamente più di uno i materiali utilizzati per la lavorazione. Il processo in cui differenti modelli vengono relazionati al piano di lavoro prende il nome di nesting (annidamento). Il progettista sarà chiamato a tenere massima attenzione.

## 1.4 Le tecnologie

Esistono differenti processi additivi per la costruzione di oggetti tridimensionali, di seguito saranno descritte le principali tecnologie che consentono questo tipo di lavorazioni.

La letteratura scientifica ad oggi disponibile, tende a classificare le tecnologie in base ai materiali impiegati per la lavorazione e le modalità con cui questi vengono trattati. Sebbene sia possibile dividere le varie tecnologie secondo diversi criteri, una suddivisione interessante è quella che si effettua sulla base delle caratteristiche della materia prima impiegata per effettuare la lavorazione, ovvero in base allo stato iniziale del materiale: polvere, liquido o solido. Attraverso il grafo seguente se ne riassumono le principali tipologie.

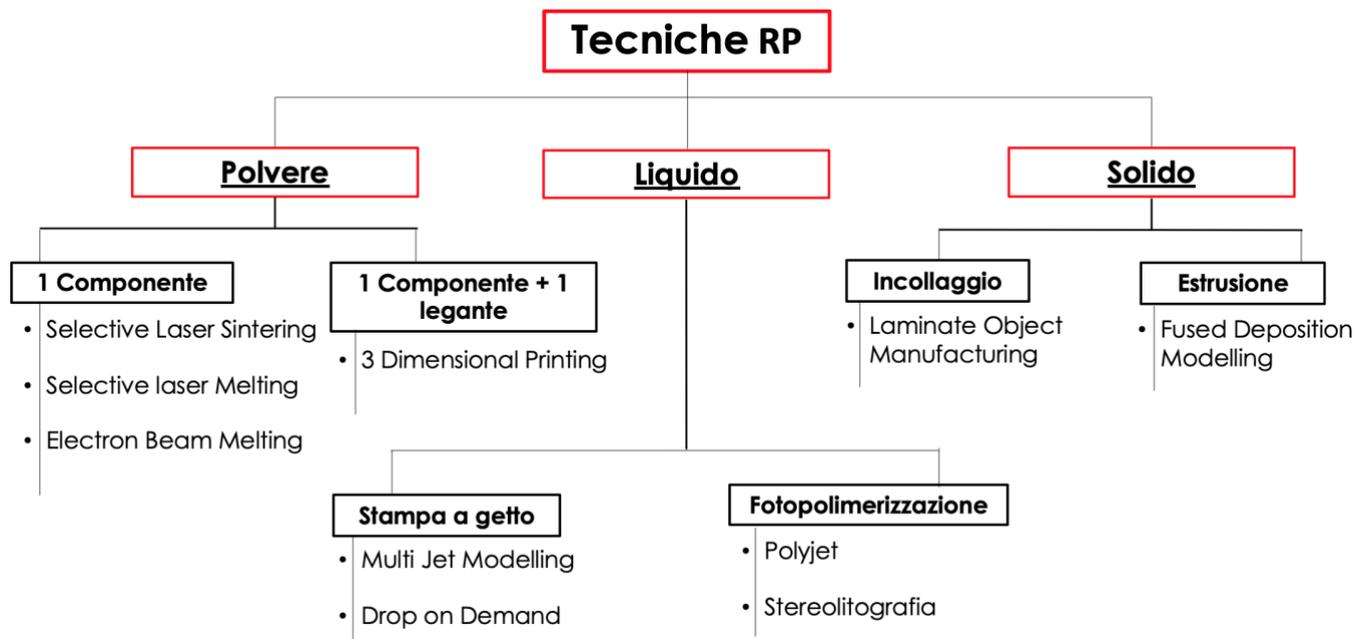


Figura 3 - Schema generale delle principali tecnologie di Additive Manufacturing.

Grazie a questa suddivisione, è possibile identificare sei principali processi di fabbricazione all'interno dei quali sono contenute tutte le tecnologie ad oggi disponibili, in seguito tratteremo le specifiche dei processi additivi più rilevanti in ambito industriale.

### 1.4.1 Stereolitografia SLA

La Stereolitografia è la prima tecnologia additiva sviluppata, brevettata nel 1984 da Charles Hull. Il brevetto parte dal descrivere quelli che sono i comportamenti di una vasca piena di polimero colpito da una radiazione ultravioletta.

Tale processo si fonda infatti sulle proprietà di un liquido fotopolimerico che, una volta colpito da radiazioni ultraviolette, è in grado di modificare la sua struttura e le proprie caratteristiche. La radiazione luminosa colpisce dunque un agglomerato di monomeri e oligomeri all'interno di una vasca (Polymer Vat), questi sono in grado di creare legami covalenti, andando a costituire un polimero termoidurente (G. Campana, M. Mele, 2019). Durante il processo di cura (quando il fotopolimero è sottoposto alla radiazione) la resina polimerica è in grado di sviluppare radicali, questi si presentano in due differenti tipologie con proprie caratteristiche:

- Fotopolimerizzazione radicalica: la catena polimerica si sviluppa con il conseguirsi di radicali liberi, tipico delle resine in acrilato. Questo tipo di propagazione contraddistingue un processo di formazione di materiale rapido rispetto ad altri tipi di radicali, peccando però con la possibilità di incorrere in difetti qualitativi.
- Fotopolimerizzazione Cationica: in questo caso la funzione dei monomeri è quella di assorbire carica rendendoli reattivi. La reattività dei monomeri propaga l'aggregazione di altri monomeri, andando a costruire il polimero. Questa tipologia di fotopolimerizzazione allunga i tempi di costruzione del polimero rispetto la tipologia precedentemente illustrata, portando con sé una maggiore precisione geometrica e qualitativa. Tipico delle resine epossidiche.

L'impatto della radiazione luminosa e la stretta necessità processuale di quest'ultima impone dei vincoli per quelle che sono le caratteristiche del materiale: spesso le resine polimeriche che devono essere sottoposte a fotopolimerizzazione possono contenere al loro interno altri elementi, necessari a conferire le caratteristiche fisico-chimiche desiderate al prodotto (Hardy et al. 2018).

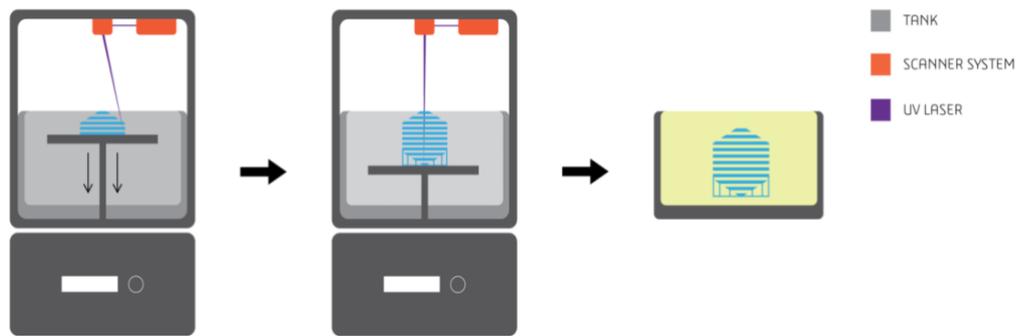


Figura 4 Schema funzionamento della tecnologia SLA. (Da <https://www.cyant.co> – Stereolithography Apparatus)

La radiazione luminosa viene indirizzata tramite dei specchi sul materiale polimerico seguendo i percorsi di Slicing.

Le fasi che descrivono il processo di fotopolimerizzazione stereografica dei vari strati di materiale si compone quindi di 3 momenti:

- Polimerizzare i contorni delle figure di ogni layer (contouring);
- Polimerizzare l'area interna alle figure (hatching);
- Garantire l'adesione di ogni layer sul precedente.

I vincoli progettuali di questa lavorazione si manifestano anche nel significato di adesione, per garantire adesione è necessario che la cura dello strato termini nello strato precedentemente formato. Dopo il processo di cura il materiale solidifica, solidificando perde di volume creando delle tensioni negli strati precedenti con conseguente distorsione del pezzo, questo problema si risolve applicando percorsi appositi come Wave o Star-Wave (G.Campana, M. Mele, 2019). Devono essere tenute in conto anche le tensioni interne del materiale che possono dare vita al fenomeno dell'arricciamento (curling). Queste tensioni impongono un vincolo quindi sulla sezione minima ottenibile tramite processo additivo. Altro limite riguarda la necessità dello strato di materiale di avere un supporto sottostante che eviti lo sprofondamento di materiale, viene appunto utilizzata una piattaforma mobile il cui movimento deve essere solidale con quello della vasca di resina polimerica. Possono essere necessarie geometrie ausiliarie.

Al termine del processo di fabbricazione parte la fase di post-process, dove il componente potrebbe necessitare di lavaggio con specifici solventi. Potrebbero verificarsi delle zone non

del tutto fotopolimerizzate, con conseguente rischio di mancata adesione. Possono risultare essenziali anche processi di post-curing, quei processi che vedono l'esposizione del componente a raggi della stessa lunghezza d'onda della radiazione, così da meglio consolidare il processo di fotopolimerizzazione. Questi procedimenti avvengono solitamente in specifici forni.

Definite quelle che sono le generalità sulla stereolitografia è opportuno contraddistinguere due tipologie di architetture. Da un lato troviamo architetture di tipo top down, dove un sistema galvanometrico, al di sopra della vasca contenente il fotopolimero, permette al laser di percorrere la superficie libera del layer. Una volta completata la geometria la piattaforma di appoggio si abbassa di un'altezza pari allo spessore del layer, ri-garantendo il percorso del laser sul nuovo layer. Possono essere associati anche degli organi chiamati *wiper* dediti alla movimentazione della resina nella superficie libera di lavoro. Di contro a queste incontriamo architetture di tipo Bottom up, nelle quali il laser si trova al di sotto della vasca della resina liquida. Nella parte sottostante della vasca è presente una lastra che consente alla radiazione l'attraversamento, andando a polimerizzare il materiale proprio sulla lastra. La piattaforma è in grado poi di sollevarsi per consentire la formazione di un nuovo layer. Per garantire il distacco del pezzo dal fondo della vasca può essere attuato un movimento meccanico laterale di andata e ritorno della vasca prima del sollevamento della piattaforma. Il sollevamento della piattaforma sarà di uno spessore uguale all'altezza del layer. Le differenze tra le due architetture sono riscontrabili nell'articolo di *O. Santoliquido, P. Colombo e A. Ortona*, dove i due modelli vengono confrontati in relazione alla produzione additiva di componenti ceramici (*"Additive Manufacturing of ceramic components by Digital Light Processing: A comparison between the "bottom-up" and the "top-down" approaches"*, 2019).

Solitamente l'emissione della radiazione avviene per mezzo di una sorgente laser nel campo dell'ultravioletto (UV).

I processi additivi che prevedono la sinterizzazione del materiale a partire da una vasca di polveri sono solitamente classificati come "fusione in letto di polveri".

L'aggregazione delle particelle pulviscolari può avvenire tramite sinterizzazione allo stato solido, tramite legame chimico, tramite sinterizzazione per fusione localizzata o attraverso il procedimento di rifusione completa. Successivamente saranno analizzati i modelli SLS e SLM, riconducibili a questa macrofamiglia.

### 1.4.2 Selective Laser Sintering (SLS)

La standardizzazione processuale delle lavorazioni additive rintracciabile in letteratura (*“Standardization in additive manufacturing: activities carried out by international organizations and projects”* M. D. Monzón & Z. Ortega & A. Martínez & F. Ortega) definisce tale tecnologia AM fondata sull’incidenza di una sorgente laser impattante su di un materiale pulviscolare, scatenando il fenomeno della sinterizzazione tramite processi di fusione. Il funzionamento di tale tecnologia si basa sugli stessi meccanismi analizzati nella fotopolimerizzazione. Lo schema procedurale si compone di più vasche contenenti materiali pulviscolari, solo una di queste vasche contribuirà alla formazione di materiale, le restanti vasche gestiscono il movimento delle polveri garantendo la presenza costante di materiale nella vasca di sinterizzazione. Il materiale pulviscolare viene pre-riscaldato prima della lavorazione, così che l’intero processo necessiti di una quantità minore di energia.

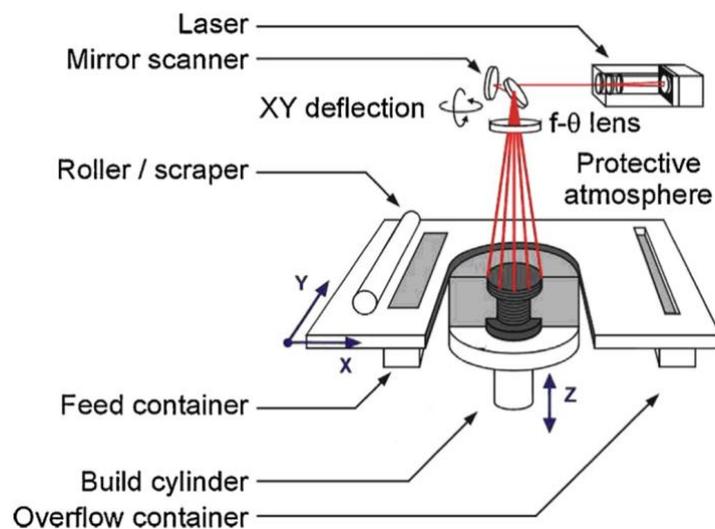


Figura 5 Schema tecnologia SLS. (Da K.Shahzad et al. - *“Additive manufacturing of zirconia parts by indirect selective laser sintering”*).

Il processo di sinterizzazione è garantito da una sorgente laser ad alta potenza incidente su di un sistema di specchi.

Anche in questo caso quando viene costruito il layer, dopo che il laser ha seguito i percorsi di sinterizzazione, la piattaforma di appoggio si abbassa di un'altezza pari al layer, permettendo al materiale di fluire nuovamente nella vasca dove avviene la costruzione additiva, grazie

all'aiuto di alcuni rulli contro-rotanti dediti a spianare le particelle pulviscolari ed inizializzare così la formazione del nuovo layer. I vari strati dovranno poi garantire adesione.

I parametri di processo sono sostanzialmente gli stessi analizzati nella stereolitografia, passando però da una fusione localizzata ad una rifusione completa (G. Campana, M. Mele, 2019), impartendo migliori proprietà meccaniche a scapito di possibili imprecisioni dimensionali-geometriche. Variabili influenti di tale lavorazione sono presentate nello studio di Barak Ali et al., 2019: questo individua temperatura della camera di produzione, velocità di scansione laser e concentrazione di lattosio monoidrato, materiale protagonista dello specifico caso di studio.

La distanza tra le passate parallele viene solitamente posta minore della larghezza della singola passata a differenza di quello che avveniva nella SLA. Risulterà quindi maggiore l'adesione tra gli strati in quanto la sovrapposizione delle passate consente alle zone interessate di fondersi e solidificarsi più volte. In questa tipologia di lavorazione assume grande rilevanza la gestione delle dinamiche di nesting.

Terminata la fase di costruzione dell'oggetto sarà necessario raffreddare la camera prima di effettuare l'estrazione. Il procedimento di raffreddamento può avvenire a temperatura ambiente, o applicando meccanismi di raffreddamento che ne riducono le tempistiche migliorando le qualità meccaniche a discapito, come detto, dell'accuratezza dimensionale. Estratto il pezzo, questo subisce un processo di aspirazioni delle polveri, queste possono anche essere ri-utilizzate se gli standard granulometrici lo consentono.

Tale processo, lavorando con polveri molto sottili, vede l'oggetto solidificare con polvere non fusa, compromettendo il grado di finitura. A questo scopo possono essere presenti fasi di post processo relative alle lavorazioni di asportazione. Sistemi di rivestimento quali vernici riescono a superare questo limite. Come nella SLA non è possibile costruire solidi cavi privi di aperture. L'applicazione di trattamenti di post processo (quali *microwave treatment*) possono comportare miglioramenti delle caratteristiche meccaniche dell'oggetto (Zhang et al., 2020).

Il processo risulta estremamente critico per quei componenti massivi con forte cambi di sezione, che tendono a concentrare le deformazioni durante il raffreddamento.

### 1.4.3 Selective Laser Melting (SLM)

La tecnologia conosciuta come *Selective Laser Melting* costruisce l'oggetto a partire da particelle pulviscolari metalliche. Questo metodo è conosciuto anche come DMP (*Direct Metal Printing*). La progettazione del componente e lo schema di funzionamento segue quello del SLS. Cerchiamo di analizzare quindi quelli che sono gli scostamenti dalla tecnologia additiva precedentemente presentata.

La differenza più sostanziale rispetto il modello precedente risiede nel materiale utilizzato per la lavorazione: in questo caso si vogliono realizzare parti in metallo a partire da un letto di polveri metalliche fuse per mezzo di un laser ad alta potenza.

Il materiale in forma metallica e non pulviscolare presenta una temperatura di fusione ben più alta rispetto i materiali polimerici (G. Campana, M. Mele, 2019) questo fa sì che il preriscaldamento risulti un'operazione molto più complessa. Questo fenomeno si traduce con la presenza di tensioni molto più elevate dovute al ritiro del materiale durante la solidificazione ed il raffreddamento. Per evitare situazioni di questo tipo si utilizzano dei supporti che fungono da ancoraggi delle zone a sbalzo sulla piattaforma (emerge il fenomeno del *nestling* bi-dimensionale).

Il materiale metallico sinterizzato presenta una conduttività termica maggiore delle polveri. La bassa velocità di scansione laser permette all'oggetto di presentare maggiore accuratezza geometrica e migliore omogeneità chimica (Zhao et al. 2020).

Al termine del processo l'oggetto metallico costruito si troverà attaccato alla piattaforma, nella sua rimozione è opportuno prestare molta attenzione in quanto le forti tensioni che si sono venute a creare potrebbero liberarsi comportando importanti deformazioni sull'oggetto. Il superamento di questo problema avviene attraverso un ciclo termico a cui viene sottoposta la piattaforma e tutti i pezzi ad essa connessa. Questa operazione è detta *ricottura di distensione*. Infine, con tecniche di taglio viene rimosso il pezzo dalla piattaforma, quest'ultima dovrà subire dei controlli qualitativi così da garantire la conformità con gli standard di processo prima di intraprendere una nuova lavorazione.

Anche in questo caso al termine del processo potrebbe risultare necessario effettuare dei trattamenti termici o chimici sul pezzo ottenuto, in base a quelle che sono le caratteristiche meccaniche e chimiche che l'oggetto dovrà presentare.

#### 1.4.4 Fused Deposition Modeling (FDM)

Definiamo ora il modello FDM, definito come *Fused Deposition Modeling* (FDM) o anche *Fused Filament Fabrication* (FFF), proprio per la costituzione di un filamento polimerico utilizzato come materiale additivo. Questa tecnologia si presenta oggi in larga diffusione ed impiego, l'approccio estrusivo basato sul trattamento termico del filamento polimerico allo stato viscoso permette un impiego di grande duttilità di tale tecnologia (Daminabo et al., 2020). I materiali utilizzati più comunemente sono i polimeri ed in misura minore le paste ceramiche.

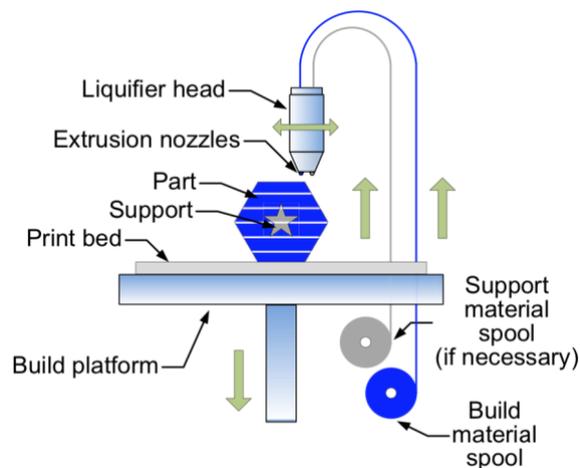


Figura 6 Schema tecnologia FDM. (Da F.Ning et al. - "Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling").

Il filamento polimerico è raccolto in bobine ed entra direttamente nella parte superiore della carcassa dell'estrusore. Il funzionamento dell'estrusore è garantito da due ruote dentate, all'interno delle quali passa il filamento. Una delle due ruote è collegata direttamente al motore elettrico. Quest'ultimo impartisce il movimento, la seconda ruota invece (folle) permette il posizionamento del filo. Lo scorrimento del filo è garantito proprio dalle dentellature delle ruote. Il filamento raggiunge poi una resistenza elettrica in grado di produrre calore, innalzando la temperatura del filamento polimerico al di sopra della temperatura di fusione. La liquefazione del polimero associata alla gravità ed alla pressione esercitata dal filamento permette al materiale di raggiungere l'ugello, il quale diametro si presenterà di misura minore rispetto il diametro del filamento iniziale (G. Campana, M. Mele, 2019). Per evitare che il calore prodotto dalla resistenza si propaghi sulle ruote dentate, impedendo a queste di esercitare pressione sul filamento, si interpone al di sopra delle resistenze un isolante.

La deposizione di materiale avviene secondo i percorsi di slicing, relazionando il movimento dell'estrusore a quello del sistema portante. L'estrusore infatti essendo montato su di un supporto è solidale con questo, libero di muoversi lungo l'asse X del piano cartesiano. Tale supporto è fissato alle estremità delle strutture di supporto libere, capaci di muoversi lungo l'asse Y. L'integrazione di questi moti definisce la posizione del canale di trasformazione (estrusore). I moti, associati alla capacità della piattaforma (su cui l'oggetto viene costruito) di traslare lungo l'asse Z, permettono alla lavorazione di costruire percorsi geometrici complessi. La piattaforma si abbasserà grazie ad una vite di manovra dopo la composizione di ogni layer, di un'altezza pari all'altezza del layer. Come possiamo intuire sono molte le variabili del sistema: spessore dello strato, temperatura del letto, velocità e percentuale di riempimento (Rajakar et al., 2019) sono i fattori che vengono utilizzati per modellare la parametrizzazione di processo. La piattaforma dovrà inoltre garantire al primo layer di fissarsi sulla superficie, considerando anche quello che sarà il processo di solidificazione (particolare attenzione ai ritiri per solidificazione). In alcuni casi si ricorre al riscaldamento della piattaforma per garantire maggiore adesione tra i diversi layer.

Come per le altre tecnologie è possibile utilizzare più estrusori durante il processo, questa tecnica non mira però ad una riduzione dei tempi, bensì alla possibilità di lavorare simultaneamente con più materiali. La possibilità di lavorare contemporaneamente più materiale consente la produzione di oggetti composti da parti da riempire e assemblare dopo la fabbricazione, o fabbricati e riempiti in un singolo processo (Melocchi et al. 2020).

È necessario soffermarsi sulle dinamiche di fuoriuscita di materiale plastico dall'ugello. Il materiale fuoriesce con diametro ( $D_n$ ) uguale a quello dell'ugello, mantenendo costante anche l'altezza del layer. Questo si traduce in un contatto tra i layer in un unico punto, garantendo adesione limitata. Proprio per questo viene impostata l'altezza del layer minore del diametro  $D_n$ , permettendo la fuoriuscita di una quantità maggiore di materiale che andrà a spalmarsi sulla superficie, imprimendo una pressione, così da garantire un'adesione migliore. In questo modo la larghezza della traccia di adesione risulterà maggiore del diametro dell'ugello  $D_n$ .

Altre considerazioni di carattere termico sono importanti. La temperatura influenza direttamente la viscosità del materiale e quindi la bontà della sua deposizione durante il processo. La quantità di materiale uscente dall'ugello sarà proporzionale alla velocità di rotazione delle ruote dentate che trascinano il filo verso la zona di deposizione. La scelta di tale velocità deve essere relazionata alla velocità di avanzamento dell'ugello. Una velocità di

avanzamento troppo elevata rispetto la velocità di rotazione delle ruote potrebbe portare ad una deposizione di materiale insufficiente per la costruzione dell'oggetto. Proprio per la relazione che intercorre tra velocità di avanzamento dell'ugello, velocità di rotazione delle ruote e temperatura del fluido possiamo affermare che la tecnica FDM si presenta come quella più lenta in termini di tempo. Per questo motivo spesso si utilizzano tecniche di riempimento dei layers che mirano ad una riduzione delle tempistiche.

Anche in questo caso sarà necessario far raffreddare il pezzo constatandone il ritiro, con il rischio di cadere in difetti da raffreddamento dovuti alle tensioni interne.

Al termine del processo il pezzo deve essere estratto dalla piattaforma, e successivamente potrebbero essere necessarie operazioni di pulizia e rimozione dei supporti (possono essere anche idrosolubili).

#### **1.4.5 Laminate Object Manufacturing (LOM)**

Questa tecnologia si basa sulla sovrapposizione di fogli di materiale allo stato solido incollati uno sull'altro. Tale tecnica additiva risulta molto apprezzata per i risultati estetici ed il basso costo dei materiali di consumo.

Un laser a CO<sub>2</sub> ritaglia sul foglio il profilo del layer (sezioni piane) e frammenta in piccoli cubi il materiale di scarto secondo un percorso reticolare. I materiali più comunemente utilizzati sono fogli di carta con rivestimento termoplastico su uno dei due lati. Inizialmente il foglio viene fatto aderire al substrato con un rullo riscaldato, dopodichè il laser traccia le dimensioni dell'oggetto che si intende realizzare. Completato il livello, viene fatto aderire lo strato con quello precedentemente formato, la piattaforma andrà ad abbassarsi permettendo al nuovo livello di trovarsi in posizione di lavorazione. Esistono due approcci relativamente a questa tecnologia:

- **Bond The Form:** il materiale viene steso in posizione, incollato tramite una pressatura con rullo riscaldato e successivamente tagliato dalla sorgente laser. I cubi di materiale di scarto vengono lasciati in posizione così da fungere da supporto e rimossi solo in fase di post processo.

- Form The Bond: il materiale adesivo viene tagliato tramite lama fredda su di un supporto che in seguito viene utilizzato per applicare il profilo tagliato sul pezzo in costruzione. Questo approccio permette di generare parti cave dotate di canali interni con percorsi complessi.

Additive Manufacturing (AM) Processes														
Process	Laser Based AM Processes					Extrusion Thermal	Material Jetting	Material Adhesion	Electron Beam					
	Laser Melting		Laser Polymerization											
Process Schematic														
Name Material	SLS	Green	DMD	Green	SLA	Blue	FDM	Red	3DP	Green	LOM	Red	EBM	Green
	SLM	Green	LENS	Green	SGC	Blue	Robocasting	Red	IJP	Blue	SFP	Red		
	DMLS	Green	SLC	Green	LTP	Blue			MJM	Blue				
			LPD	Green	BIS	Blue			BPM	Blue				
					HIS	Blue			Thermojet	Blue				
Bulk Material Type		Powder	Green	Liquid	Blue	Solid	Red							

Figura 7 Principali tecnologie Additive Manufacturing e principali caratteristiche. (Da S. Singh et al - "Material issues in additive manufacturing: A review").

Dopo aver trattato il tema della produzione additiva, le sue dinamiche e le principali tecnologie implementate nel tempo, accosteremo questi principi ad un'azienda connessa al settore delle lavorazioni additive. Presenteremo infatti l'azienda ARBURG ed i suoi sistemi di lavorazione. Proprio su uno di questi ci soffermeremo per uno studio di sostenibilità ambientale LCA.

## Capitolo II: L'Azienda Arburg

Dopo un'introduzione di carattere generale sulla compagnia Arburg, il presente capitolo proseguirà con la descrizione delle tecnologie additive da essa offerte, prestando particolare attenzione alla macchina *Plastic Arburg FreeFormer*. Quest'ultima sarà successivamente sottoposta ad uno studio LCA.

### 2.1 Azienda Arburg

Arburg è una compagnia tedesca dedicata al settore delle lavorazioni industriali, alla robotica ed ai processi di stampaggio, la cui sede principale si trova nella città di Loburg in Germania. Con svariate filiali in tutto mondo e numerosissimi punti commerciali, Arburg riesce a servire circa 100 paesi. All'eccellenza dei prodotti venduti, l'azienda affianca una minuziosa consulenza tecnico-applicativa sia nel momento precedente alla vendita sia in quello post-vendita, mettendo a disposizione di ogni cliente, su scala mondiale, la competenza acquisita in decenni di ricerca e sviluppo.

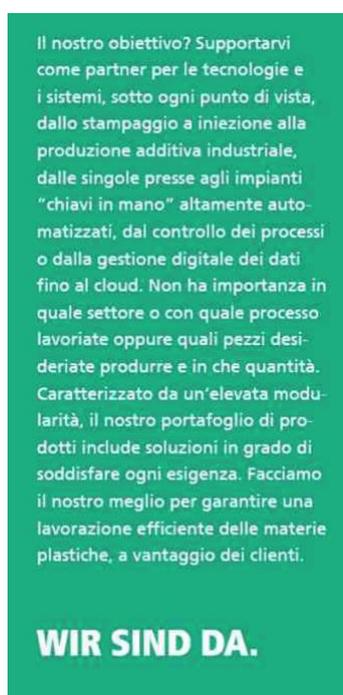


Figura 8 Immagina tratta dall'Catalogo ARBURG. <https://www.arburg.com/it/it/lazienda/portafoglio/>

## 2.2 La gamma di prodotti Arburg

I prodotti realizzati da Arburg si impongono di soddisfare un grande numero di clienti con necessità sempre più personalizzate. Presentiamo ora i principali prodotti dell'azienda, soffermandoci particolarmente sulla tecnologia ARBURG Freeformer, protagonista di tutto l'elaborato.

### 2.2.1 Presse ALLROUNDER

Questa tipologia di macchina presenta come modello base la Golden Electric. Queste apparecchiature fondano il loro funzionamento su dei motori servoelettrici raffreddati a liquido. Tali tecnologie sono caratterizzate dalla modalità di stampaggio ad iniezione e dalla presenza di un'architettura modulare che garantisce la possibilità di presentare più versioni di tale tecnologia, in funzione delle effettive necessità richieste dalla lavorazione. La possibilità di adattare le differenti presse ALLROUNDER in relazione alle specifiche del processo consentono, ai potenziali clienti, di lavorare le geometrie più complesse utilizzando materiali dalle caratteristiche fisico e/o chimiche molto differenti.

ALLROUNDER ARBURG permette quindi di eseguire quelle che sono le principali lavorazioni di stampaggio ad iniezione.

Altra innovazione garantita da prodotti di questo tipo è l'opportunità di poter configurare enti robotici per lavorare a fianco della macchina.

Tutte le varianti di presse offerte da Arburg possono essere implementate con attrezzature ausiliare e periferiche, in grado di far procedere la lavorazione nelle direzioni imposte dai limiti e dai vincoli fisico-chimici. Estrema rilevanza del concetto di modularità, tema estremamente prezioso e centrale nella mentalità Arburg.



Figura 9 Tecnologia ALLROUNDER. Immagina tratta dall'Catalogo ARBURG. <https://www.arburg.com/>

## 2.2.2 Robotica

“Produttività e affidabilità, ecco ciò che conta. Per questo le presse Allrounder e i sistemi robot Arburg lavorano in perfetta sinergia sulla base di esigenze specifiche, in modo preciso, rapido e sicuro, con soluzioni complete integrate al 100% (...)”<sup>1</sup>

La possibilità di parallelizzazione dei sistemi di stampaggio a componenti robotici permette una produzione estremamente efficiente e precisa; i sistemi robotici ARBURG possono affiancare le presse ALLROUNDER, precedentemente presentate. I sistemi-Robot sono garantiti per quanto riguarda la sicurezza di integrazione, sia dal punto di vista meccanico che elettrico. Questi sistemi integrati, supportati da una corretta manutenzione, permettono di rendere il processo estremamente efficiente ed automatizzato, impattando positivamente sulla redditività dell’operazione.



*Figura 10 Tecnologia Robotica Arburg. Immagina tratta dall’Catalogo ARBURG. <https://www.arburg.com/>*

## 2.2.3 Progetti personalizzati

Il servizio offerto da ARBURG non si limita alla costruzione di stampanti ad iniezione, robotica ed alla loro integrazione, bensì è contraddistinto dall’opportunità di gestirne l’intero processo di produzione. Si possono dunque integrare le tecniche di stampaggio ad iniezione non solo alla robotica, ma anche alle singole fasi del processo. Al fine di garantire questo servizio, il cliente si impegna a presentare un progetto con tutte le specifiche di lavorazione ad ARBURG stessa.

<sup>1</sup> Citazione tratta da Catalogo ufficiale – Arburg. <https://www.arburg.com/it/it/lazienda/portafoglio/>

La compagnia si adopera a garantire la fattibilità delle operazioni e a gestire l'intero progetto, impegnandosi così dalla progettazione fino alla messa in servizio, grazie al lavoro di team di esperti con presenza su territorio internazionale.

#### **2.2.4 Freeformer: caratteristiche generali**

“Con il nostro processo brevettato per la produzione additiva industriale, reinterpretiamo completamente la lavorazione delle materie plastiche. Sulla base di un sistema aperto messo a punto da ARBURG per la realizzazione di componenti tecnici perfettamente funzionali secondo il modello additivo, il freeformer produce in modo efficiente e flessibile direttamente da dati 3D CAD, utilizzando granulati standard qualificati e stratificando piccole gocce di materiale plastico.”<sup>2</sup>

Prima di addentrarci nelle dinamiche di funzionamento del Freeformer Arburg è opportuno offrire una panoramica di riferimento sui processi di stampaggio ad iniezione, in quanto questa logica è quella che contraddistingue la tecnologia Arburg Plastic Freeforming (APF).

#### **2.3 Tecniche del processo Arburg: stampaggio ad iniezione**

Tale processo combina le caratteristiche di produzione legate al basso costo di fabbricazione, semplicità di progettazione e flessibilità di selezione dei materiali, con quei processi di stampaggio ad iniezione di materiali plastici, impartendo libertà di progettazione e fabbricazione rapida, offrendo così una tecnica di lavorazione economica per componenti relativamente complessi (Dehghan-Manshadi et al. 2020).

La tecnica dello stampaggio è un processo di produzione industriale in cui il materiale plastico viene fuso ed iniettato ad elevata pressione all'interno dello stampo chiuso, solo successivamente aperto al fine da garantire il raffreddamento dell'oggetto.

I meccanismi di stampaggio a fusione derivano dai concetti legati alle tecniche di pressofusione. Uno stampo è in grado di produrre forme diverse, grazie ai suoi vantaggi economici legati alle grandi serie e agli alti tassi di produzione (Lòpez et al., 2016).

<sup>2</sup> Citazione tratta da Catalogo ufficiale - Arburg

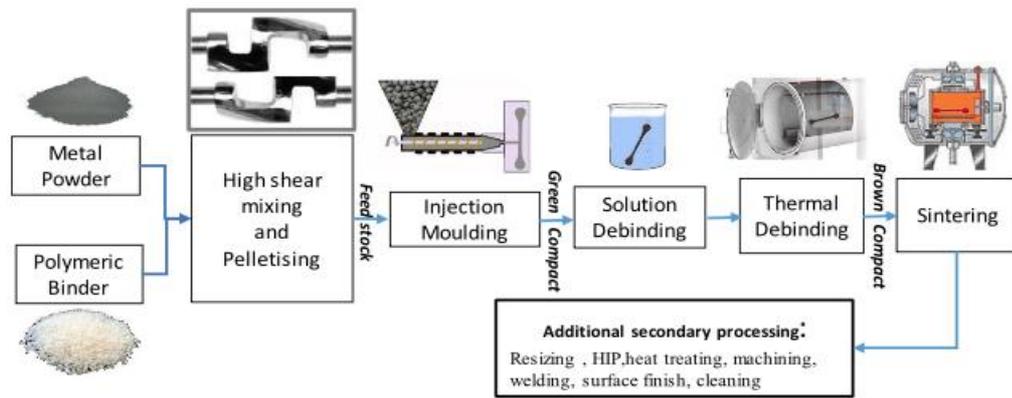


Figura 11 Diagramma schematic processo stampaggio “Metal injection moulding of surgical tools, biomaterials and medical devices: A review”, Dehghan-Manshadi, 2020

Per la produzione di componenti viene utilizzato quindi materiale plastico o metallico, uno stampo ed una macchina ad iniezione in grado di condurre il materiale fuso all'interno dello stampo.

Durante la fase di riscaldamento, il pellet, materiale plastico, viene caricato nella tramoggia, il cui compito è proprio quello di contenere il materiale in preparazione alla lavorazione. Il materiale viene poi movimentato per gravità attraverso la gola della tramoggia all'interno del cilindro di plastificazione.

Ogni parte è prodotta per mezzo di un ciclo di iniezione composto da tre fasi fondamentali: riempimento, confezionamento e raffreddamento (oltre ad altri movimenti meccanici come apertura dello stampo, espulsione della parte, chiusura dello stampo, materiale di fusione trasportato fino l'unità di iniezione).

All'interno del cilindro di plastificazione, la rotazione della vite fa avanzare il materiale verso l'estremità di scarico di quest'ultima: il materiale plastico viene trascinato dalla rotazione della vite di plastificazione e fuso all'interno del cilindro.

Nel cilindro di plastificazione il materiale viene riscaldato da elementi elettrici a fascia e, ove applicabile, dall'attrito derivante l'avvitatura: la fascia del riscaldatore elettrico all'interno del cilindro e l'azione di taglio della vite rotante provocano la fusione del materiale. (Elsheikhi et al., 2016)

Il polimero viene introdotto nello stampo durante la fase di riempimento. I parametri che controllano questa fase sono la velocità di iniezione e la temperatura di iniezione. Come vedremo infatti sono tali variabili a modellare il processo: il grado di finitura e l'omogeneità chimica del prodotto dipendono proprio dai parametri di processo impostati.

Durante la fase di riempimento, il polimero inizia a restringersi, è necessario quindi continuare a introdurre materiale nello stampo così da occupare tutta la geometria dello stampo.

Quando lo stampo è completamente riempito, la vite rimane ferma per qualche tempo per mantenere la plastica nello stampo in uno stato di tensione; questo fenomeno viene definito *hold time*.

La fase di raffreddamento è quella necessaria per raggiungere la temperatura di espulsione del pezzo. In questo caso, la temperatura dello stampo e il tempo di raffreddamento sono i parametri fondamentali atti a controllare tale dinamica (Lòpez et al., 2016).

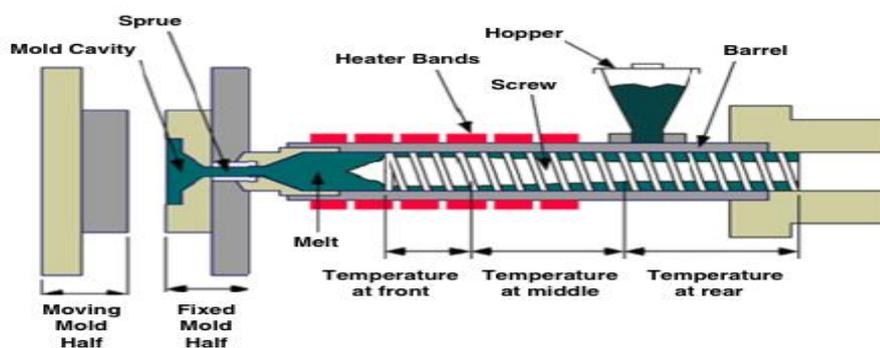


Figura 12 Esempio di meccanismo di stampaggio ad iniezione (Elsheikhi et al., 2016)

Quando il materiale nello stampo si è sufficientemente raffreddato così da mantenere la sua forma, lo stampo si apre e la parte viene espulsa dallo stampo. Lo stampo si chiude e il ciclo ricomincia (Elsheikhi et al., 2016).

Nell'iniezione convenzionale, le sbavature, i getti o i segni di caduta e la deformazione della parte (deformazione) sono considerati difetti inaccettabili. Al fine di controllare tali imprecisioni, è necessario conoscere l'influenza dei parametri di iniezione sulla qualità della parte.

Una volta definite le logiche di funzionamento del processo di stampaggio ad iniezione, possiamo traslare tali concetti in funzione del Freeformer Arburg, vedremo appunto che questo fonda il suo funzionamento proprio sui meccanismi che contraddistinguono la tecnica dello stampaggio ad iniezione.

## 2.4 Arburg Plastic Freeformer APF

Vediamo di seguito le caratteristiche principali del sistema tecnologico additivo proposto da ARBURG, analizzandone le dinamiche che accostano tale tecnologia a quella dello stampaggio ad iniezione, trattando poi in modo più approfondito le relative dinamiche di funzionamento.

La prima peculiarità del Freeformer ARBURG riguarda il materiale trattato. La macchina infatti è in grado di lavorare materiali granulati standard, di differenti tipologie, a patto che i granulati seguano le qualificazioni standardizzate delle materie plastiche; non si necessita dunque di materiali preconfezionati come resine, polveri o matasse. Oltre la lavorazione di materiali plastici la APF è in grado di lavorare anche materiali di diversa composizione quali i metalli (Spiller et al., 2018)

La standardizzazione qualitativa del materiale plastico è in funzione anche dell'applicabilità processuale del progetto; cercando di standardizzare i materiali in modo da permetterne la riproducibilità: da questo punto di vista il software ARBURG è in continua espansione. Oltre ai materiali standard più comuni, il freeformer è in grado di lavorare materiali speciali come gli elastomeri termoplastici (TPE), il polipropilene parzialmente cristallino, i biopolimeri, i materiali con ritardante di fiamma ed il polilattato ad uso medicale.

Altra caratteristica della macchina è il sistema aperto offerto da Arburg, grazie al quale la progettazione della lavorazione può non seguire le modalità standard preimpostate; il progettista può modificare i parametri di processo ed adattarli alle proprie esigenze, costituendo uno scenario di possibilità molto vasto. È inoltre possibile lavorare materiale modificato, ovvero materiale che ha subito modifiche alla sua struttura iniziale, così da impartire all'oggetto le caratteristiche desiderate; grazie a questa possibilità la tecnologia è largamente impiegata in differenti settori, dall'industria manifatturiera al settore del food, fino a quello medicale (*“Prospetto Freeformer, produzione additiva secondo un'approccio all'insegna della libertà”*, Arburg Company, 2018).

In ultimo, occorre citare la possibilità di effettuare la lavorazione utilizzando più canali di trasformazione (estrusori). Questo permette l'utilizzo simultaneo di più materiali realizzando dunque oggetti con differenti proprietà fisiche-chimiche.



Figura 13 Tecnologia Arburg Freeforming. Immagina tratta dall'Catalogo ARBURG. <https://www.arburg.com/>

Lo studio redatto da Q. Spiller J. Fleischer rappresenta uno dei primi contributi legati ai processi Arburg rintracciabile in letteratura scientifica (*Additive manufacturing of metal components with the ARBURG plastic freeforming process, 2018*). Tale elaborato pone l'attenzione sull'applicazione di tale processo alla lavorazione di materiale metallico. Lo studio contribuisce proprio ad evidenziare le possibilità legate all'utilizzo di tecnologie additive basate sui meccanismi di stampaggio ad iniezione, quali, ad esempio, la possibilità di fabbricare l'oggetto senza necessitare di utensili.

Il funzionamento della macchina Arburg Plastic Freeforming (APF) si basa, come già detto, sui principi delle tecnologie additive di stampaggio ad iniezione. In contrasto a questi però, l'oggetto finale è costruito attraverso la deposizione di materiale plastico in strati (layers), l'accorpamento degli strati andrà poi a costituire il componente tridimensionale. La novità della macchina è relativa al canale di trasformazione: degli ugelli permettono la fuoriuscita di piccolissime gocce di materiale plastico che solidificandosi risultano in grado di produrre oggetti tridimensionali.

Vediamo ora le dinamiche di funzionamento del processo e dei materiali utilizzati.

Possiamo affermare che la tecnologia APF fonda i suoi meccanismi sulle logiche dello stampaggio ad iniezione, pianificando la lavorazione in ottica additiva.

### **2.4.1 Proprietà dei materiali**

Come già accennato, il materiale utilizzato deve essere qualitativamente standardizzato, al fine di garantire la riproducibilità dei processi, facilitando i programmi di lavorazione e predefinendone determinati aspetti. Tra i materiali standardizzati implementati sui software ARBURG troviamo l'ABS (Terluran GP35), il PA10 (Grilamid TR XE 4010), il policarbonato (Makrolon 2805), il TPE-U (Elastollan C78 A15) e il polipropilene Braskern CP393). A questi si aggiungono ulteriori plastiche speciali come PLLA per uso medico (*“Prospetto Freeformer, produzione additiva secondo un approccio all'insegna della libertà”*, Arburg Company, 2018)

Importante caratteristica ARBURG è il sistema aperto che assicura che ciascuna fase del progetto di lavorazione possa essere ri-elaborata e modificata secondo necessità specifiche. La possibilità di lavorare sulle caratteristiche delle gocce, e quindi sul processo di formazione del layer fa sì che le strutture ottenibili possano essere altamente complesse e personalizzate. È proprio la dimensione delle gocce associata ai moti di lavorazione a conferire le caratteristiche meccaniche all'oggetto in funzione della densità di compattamento; maggiore sarà la densità di compattamento, tanto più la loro struttura sarà compatta in una direzione.

### **2.4.2 Il principio di funzionamento**

L'oggetto che si vuole produrre deve essere caricato in formato CAD-CAM all'interno del software di elaborazione della macchina, impostandone i parametri di processo. Come si può osservare nella Figura 11, la macchina è dotata di un pannello video di bordo dotato di schermo multi-touch.

Un'unità di raccolta del materiale mantiene il granulato plastico (standardizzato) all'interno di una tramoggia per essere preparato alla lavorazione, per poi indirizzarlo, attraverso dei servomotori, verso una vite di plastificazione, esattamente come avviene nello stampaggio ad iniezione. La vite di plastificazione fonde il materiale plastico trascinandolo con sé fino a raggiungere il canale di iniezione; qui un pistone permette la fuoriuscita dal puntale dell'ugello (lungo l'asse convenzionale Z) di piccolissime gocce di materiale fuso che viene depositato secondo i percorsi di slicing desiderati; gli elementi piezoelettrici ad alta frequenza consentono alla goccia di depositarsi rispettando il dosaggio impostato.

I percorsi seguiti dalla lavorazione compongono prima il perimetro del layer e successivamente si dedicano alla fase di riempimento. L'iniezione delle gocce di materiale è garantita

dall'oscillare ciclicamente del pistone situato nella parte superiore del canale di trasformazione. Durante lo scarico dei getti si possono verificare difetti o porosità sul supporto del pezzo. La dimensione delle goccioline e la temperatura di quest'ultime, che dipende dalla temperatura della testa di scarico e dalla temperatura dell'area di lavoro, possono influenzare notevolmente tali difetti di fabbricazione. Quando le temperature sono troppo basse, la gocciolina non scorre e quindi non può collegarsi correttamente alle goccioline già scaricate (Spiller et al., 2018).

All'interno della camera di produzione, dove viene concretamente prodotto il pezzo, sono presenti sistemi di ventilazione per gestire la termoregolazione dell'ambiente. Altro sistema ausiliario presente nella camera di produzione è il sistema di aspirazione che assicura che il processo di stampaggio non produca emissioni. Il materiale depositato non necessita di leganti per garantire l'adesione, assicurata invece dal materiale circostante, evitando così difetti di malformazione.

Il processo additivo avviene su una piattaforma di lavoro capace di muoversi lungo la direzione convenzionale Y del piano cartesiano, il movimento lungo l'asse X avviene invece per mezzo del braccio meccanico dell'estrusore. La combinazione dei moti della macchina permette alla lavorazione di eseguire i percorsi di deposizione di materiale più complessi.

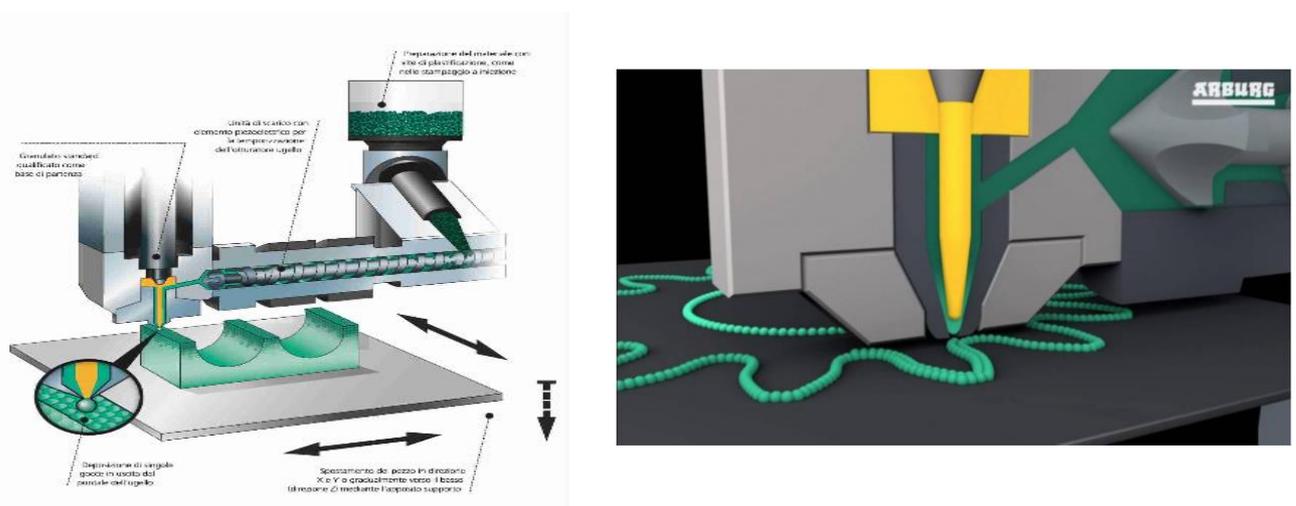


Figura 14 Funzionamento Arburg Plastic Freeformer - (“Prospetto Freeformer, produzione additiva secondo un approccio all’insegna della libertà”, Arburg Company, 2018).

Il Freeformer offre la possibilità di lavorare con più estrusori contemporaneamente. Sebbene lo sforzo progettuale necessario sarà più elevato, si offre la possibilità di utilizzare materiali

differenti durante la lavorazione in modo da consentire la produzione di oggetti dalle geometrie complesse e flessibili.

La complessità dei percorsi di lavorazione e l'impiego di più canali di trasformazione necessita di un'attenta supervisione, in particolar modo per quanto riguarda l'elaborazione digitale.

ARBURG all'oggi presenta due versioni della tecnologia Freeformer. Il Freeformer 300-3X, dotato di tre canali di trasformazione, offre molte varianti per quanto riguarda l'implementazione delle tecnologie di lavorazione. Dotato di una camera di produzione più grande rispetto l'altra; è una delle poche macchine in grado di fabbricare un componente rigido/morbido con determinati valori di resistenza meccanica alle sollecitazioni.

L'altro modello presentato è il Freeformer 200-2X, comprensivo di due canali di trasformazione, dalle prestazioni qualitative molto elevate ma più limitate rispetto la tipologia citata precedentemente.

### **2.3.3 Risultati ottenibili**

I sistemi Freeformer sono in grado di conferire elevate proprietà meccaniche ai pezzi ottenuti e di effettuare lavorazioni di estrema precisione. Come accennato, le tecnologie Freeformer sono largamente impiegate negli ambiti industriali più svariati; tra questi uno degli impieghi più innovativi è quello associato al campo medico, grazie all'utilizzo del TPE, resistente e compatto. Anche il settore delle lavorazioni meccaniche e dei processi affidabili vede in questa tecnologia un possibile vantaggio per quanto riguarda la produzione di componentistica altamente specializzata. La grande personalizzazione che possono assumere gli oggetti rende la macchina di estremo contenuto tecnologico, capace di realizzare componenti che non sarebbe possibile effettuare diversamente.

Di seguito si riportano alcuni dei vantaggi derivanti dall'utilizzo di una macchina ARBURG Freeformer.

- Varietà di materiali, non sono necessari materiali preconfezionati e non è previsto nessun vincolo con i fornitori per l'approvvigionamento;
- Impiego di materiali originari (importante per la certificazione FDA e per la resistenza all'invecchiamento);
- Lavorazione di compound specifici;

- Combinazione di materiali e colori e possibilità di realizzare il materiale rigido/morbido resistente alle sollecitazioni;
- Processo a emissione zero e senza residui;
- Elevata qualità dei pezzi garantita dalle piccolissime gocce di materiale che si stratificano e solidificano andando a comporre l'oggetto.

I processi APF sopradescritti vantano un campo di indagine estremamente vasto, facendo sì che l'applicabilità delle suddette tecniche sia consona a diversi settori. Tra gli impieghi più recenti ed innovativi, occorre citare le lavorazioni additive che hanno permesso di sviluppare prototipi prettamente legati all'ambito medico. Proprio nell'ospedale Rizzoli di Bologna è avvenuto il primo trapianto di vertebra costruita attraverso processi additivi.

## Capitolo III: LCT e Sviluppo Sostenibile

All'interno di questo capitolo si presenta la filosofia del *Life Cycle Thinking*, partendo dai concetti di Sostenibilità e di Sviluppo sostenibile. Verranno descritte le principali caratteristiche e gli strumenti legati allo sviluppo sostenibile. Seguirà un'analisi dettagliata dello strumento di analisi LCA, rispetto al quale poi verrà declinato un caso di studio.

### 3.1 I concetti di Sostenibilità e di Sviluppo sostenibile

Il concetto di sostenibilità è stato un tema che per molti anni è risultato controverso e carico di incertezza; in relazione al progresso tecnico scientifico che negli ultimi decenni ha travolto lo scenario produttivo mondiale, il tema della sostenibilità ha assunto un significato sempre più preponderante e meritevole di attenzione.

Il concetto di "sostenibilità" nasce da quello più generale di "Sviluppo Sostenibile", apparso nel Rapporto Brundtland del 1987.

"Lo Sviluppo Sostenibile (...) è piuttosto un processo di cambiamento tale per cui lo sfruttamento delle risorse, la direzione degli investimenti, l'orientamento dello sviluppo tecnologico e i cambiamenti istituzionali siano resi coerenti con i bisogni futuri oltre che con gli attuali" [Brundtland, 1987].

*(Definizione di Sviluppo Sostenibile, Rapporto di Brundtland, 1987)*

Affinché un modello di sviluppo possa essere definito "sostenibile", deve essere in grado di soddisfare le esigenze del presente senza compromettere la possibilità delle future generazioni di soddisfare le proprie. L'assunto principale è che le risorse naturali sono limitate, ed i principi alla base di uno sviluppo sostenibile sono:

- 1) Garantire un accesso continuo e duraturo alle risorse; in altre parole: la velocità di prelievo deve risultare uguale, o minore, alla velocità di rigenerazione delle risorse.

- 2) Evitare danni permanenti all'ambiente: la velocità di produzione dei rifiuti deve essere uguale, o minore, alla capacità di assorbimento degli ecosistemi in cui gli stessi rifiuti vengono immessi.

In questa ottica il progresso tecnologico viene rapportato all'esigenza di preservare la pluralità di bisogni degli individui, sotto ogni punto di vista, indirizzando le mentalità delle comunità verso il miglioramento delle condizioni di vita degli individui presenti e futuri, nel rispetto dell'ambiente e dei popoli che maggiormente necessitano di assistenza e crescita economica. Il rispetto dell'ambiente, la riduzione delle emissioni, le condizioni di vita e di lavoro accettabili per tutti gli individui, il rispetto dei diritti di questi ultimi e la corretta gestione delle risorse globali limitate e rinnovabili sono infatti temi fortemente correlati tra loro. L'applicabilità dei sistemi di sostenibilità, nei più svariati aspetti della socialità, fa sì che il modello non si limiti a sole considerazioni di tema ambientale, ma debba considerare anche il rispetto di temi sociali, legislativi ed economici.

All'interno di questo elaborato consideriamo la tematica della sostenibilità principalmente nei confronti di tre aspetti: quello economico, quello ambientale e quello sociale.



*Figura 15 Categorie d'impatto analizzate nel Life Cycle Thinking.*

Vediamo più nel dettaglio i singoli aspetti.

Aspetto Ecologico: questa categoria fa riferimento a tutte quelle attività che mirano all'utilizzo di risorse o processi in grado di influenzare la capacità dell'ambiente di riprodurre e mantenere le proprie riserve. Dall'inquinamento in termini di CO<sub>2</sub> equivalente al sistema di acque reflue, dall'eco-tossicità di sostanze chimiche all'emissione di polveri fini nocive per l'uomo. La possibilità di riciclaggio di materiali e di smaltimenti sostenibili sono considerati all'interno della categoria. Vediamo alcuni aspetti prettamente legati al tema ambientale:

- Tutela del suolo;
- Tutela delle acque;

- Protezione delle risorse;
- Risparmio energetico ed efficienza energetica;
- Valorizzazione dei rifiuti;
- Conservazione della biodiversità;
- Riciclaggio.

Aspetto Sociale. Lo scopo cardine di questa categoria è quello di garantire il benessere degli individui dal punto di vista dei diritti riconosciuti, nel rispetto degli ambienti della comunità con il fine ultimo di allineare il progresso tecnologico-scientifico con quelle che sono le condizioni di vita innegabili e che devono essere garantite a tutti gli individui. I valori universali a cui si riferisce questo aspetto sono:

- Reddito;
- Sicurezza sociale;
- Tutela del lavoro;
- Equilibrio tra la sfera del lavoro privato e non;
- Collaborazione tra generazioni;
- Tutela della salute;
- Formazione, aggiornamento;
- Impegno sociale.

Aspetto Economico. All'interno di questa ultima classe, l'attenzione viene posta sugli aspetti che determinano la redditività della popolazione, contrastando la povertà e stimolando la crescita economica dei paesi in cui questa risulta essere più lenta.

### **3.2 Triple Bottom Line (TBL)**

Per completare il “quadro” connesso allo sviluppo sostenibile e sottolineare ancora di più l'importanza della ricerca di equilibrio tra risultati economici, ambientali e sociali, occorre trattare il concetto di *Triple Bottom Line* (TBL), introdotto da John Elkington nel 1994 e da lui sviluppato ne “*Cannibals with Forks: the Triple Bottom Line of 21st Century Business*” del 1998. La logica TBL accoglie e amplia lo spettro di valori e criteri usati per misurare non solo il successo economico di un'azienda ma anche quello sociale ed ambientale. Secondo tale prospettiva, un'azienda che desidera intraprendere una crescita nel lungo periodo deve tenere

in considerazione obiettivi di naturale sociale (garantire equità e pari opportunità), obiettivi di naturale ambientale e di natura economica.

Le aziende devono operare in modo prudente e responsabile e prendersi cura della salute e della sicurezza dei dipendenti e della qualità della vita della comunità esterna (C. Gimenez et al). In questa visione, la sostenibilità non è considerata un costo, ma una vera e propria fonte di vantaggio competitivo.

Attraverso il quadro TBL si estende dunque il concetto di sviluppo sostenibile come definito del rapporto di Brundtland nel 1987, ampliandolo alla considerazione delle prestazioni sociali e ambientali, oltre a quelle finanziarie; la logica del TBN risulta essere uno strumento importante per aziende che intendano supportare gli obiettivi di sostenibilità (TF Slaper e TJ Hall, 2011).

Lo slogan che descrive gli obiettivi della logica LTB è infatti “People, Planet and Profit”, motivo per cui è anche chiamata 3P. *People* fa riferimento al capitale umano, in quanto la consapevolezza raggiunta è che il benessere dell’azienda sia fortemente connesso e dipendente da quello dei lavoratori e di tutti gli stakeholder. *Planet* fa riferimento invece al capitale naturale, cercando di spingere all’implementazione di politiche di sviluppo sostenibili; infine *Profit* fa riferimento al valore economico creato.

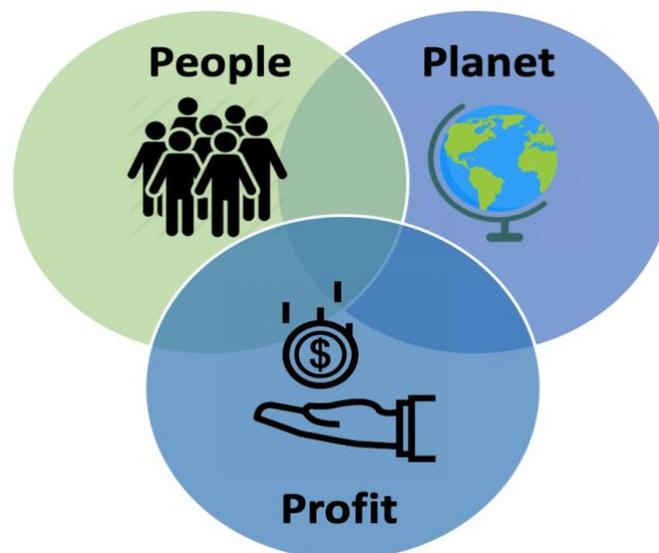


Figura 16 Triple Bottom Line

### **3.3 Il Life Cycle Thinking (LCT)**

Introdotta il tema della sostenibilità e dello sviluppo sostenibile, al fine di comporre un quadro il più esaustivo possibile non si può prescindere dalla trattazione del concetto di Life Cycle Thinking (LCT): filosofia che estende il concetto di sostenibilità ad ogni fase del ciclo di vita di un prodotto o processo, a partire dall'estrazione delle materie prime necessarie per la produzione di un bene o servizio, fino alla sua distribuzione agli utenti finali, considerando anche i processi di manutenzione e di riciclaggio dei materiali. Il LCT nasce dalla consapevolezza che qualsiasi prodotto ha un impatto sull'ambiente, in ogni fase del suo ciclo di vita.

Gli obiettivi di questa filosofia sono dunque quelli di mirare ad una riduzione del consumo di risorse e di emissioni nell'ambiente necessarie per la produzione di un prodotto/servizio.

L'interesse nei confronti di questi temi, ad oggi, ha portato le aziende a riprogettare e riconfigurare i propri modelli e sistemi di produzione in funzione del contributo sostenibile di questi. In un contesto aziendale, dunque, approcciarsi ad un nuovo prodotto significa considerarne gli impatti sulle tre macro-categorie sopracitate; le aziende che aderiscono alla filosofia del LCT dimostrano un approccio di pensiero a 360 gradi, considerano gli impatti sociali e ambientali strettamente connessi al valore economico dei propri prodotti e servizi. L'approccio classico alla progettazione del processo assume nuove forme con il modello della filosofia del Life Cycle Thinking.

Per poter valutare l'effettivo impatto di una determinata attività, gli approcci di sviluppo sostenibile pongono il focus su tutto il ciclo di vita dell'oggetto in analisi. Per un prodotto, ad esempio, verranno prese in considerazione tutte le fasi che compongono la sua realizzazione, dall'estrazione del materiale alla sua trasformazione, al trasporto, al packaging; considerando anche il processo utilizzato per la lavorazione ed i rispettivi consumi ed emissioni in ambiente, le attività a supporto della lavorazione e lo smaltimento di materiali ed attrezzature.

Il Life Cycle Thinking considera quindi ogni contributo lungo tutto il ciclo di vita del prodotto. Dinamiche di questo tipo, in cui vengono prese in analisi tutte le fasi del processo di vita dell'oggetto, sono definite "From Cradle To Grave" (dalla culla alla tomba), cioè

dall'estrazione delle materie prime necessarie fino al loro ritorno sotto forma di rifiuti nella fase finale.

Risulta chiaro come la metodologia appena descritta impatti su diversi ambiti aziendali; un'analisi approfondita dello sviluppo sostenibile permette di evidenziare le problematiche e le inefficienze da cui poter trarre possibilità di miglioramento. Le compagnie sono così in grado di correggere difetti riscontrabili lungo tutta la catena e che impattano negativamente sull'ambiente, sulla comunità e sulla società. L'eliminazione delle inefficienze che si possono riscontrare si traducono direttamente in un risparmio monetario. Infatti, il raggiungimento dello "sviluppo sostenibile" richiede l'utilizzo di metodi e strumenti atti a sostenere le aziende a quantificare e confrontare gli impatti ambientali derivanti dalla fornitura di beni e servizi (...) Tutte le attività o i processi nella vita di un prodotto comportano impatti ambientali dovuti al consumo di risorse, alle emissioni di sostanze nell'ambiente naturale ecc. (G. Rebitzer et al., 2004).

Altro vantaggio derivante l'implementazione delle filosofie di sviluppo sostenibile è la possibilità da parte delle compagnie di farsi apprezzare dai clienti per i propri approcci sostenibili, creando nel brand un'icona di impegno ecologico e sostenibile. Impegnarsi nello sviluppo di metodologie di Life Cycle Thinking consente infatti di creare valore per tutti i portatori di interesse dell'azienda. Il cliente che riconosce nell'azienda una mentalità che si accosta allo sviluppo sostenibile associa a quel Brand un valore aggiunto, migliorando la notorietà della compagnia. Tutti questi aspetti fanno sì che l'approccio Life Cycle Thinking possa essere paragonato ad una strategia di tipo Win-Win: quella in cui vincono tutti ed i cui benefici sono tangibili per ogni portatore di interesse.

### **3.4 Tecniche implementate nell'ottica Life Cycle Thinking**

L'applicabilità degli strumenti relativi allo sviluppo sostenibile presentano diverse configurazioni. Tra queste si citano: tecniche di riconoscimento quali la certificazione del produttore o di enti esterni, strumenti di analisi atti ad identificare quantitativamente gli impatti di prodotti e lavorazioni, dinamiche di cooperazione di più attori volti al mantenimento di standard qualitativi e prestazionali.

Dopo aver citato le principali tecniche relative alla filosofia Life Cycle Thinking ci soffermeremo su una minuziosa analisi della tecnica di studio LCA (Life Cycle Assessment).

### 3.4.1 Strumenti informativi sulle prestazioni del prodotto

Negli ultimi anni nei Paesi dell'Unione Europea è cresciuta l'attenzione anche verso le etichette e le differenti dichiarazioni ambientali, siano esse obbligatorie o volontarie; queste hanno lo scopo di rendere maggiormente consapevole il consumatore riguardo le prestazioni del prodotto.

Secondo la norma UNI 14020 è possibile suddividere le etichette in tre principali marchi ambientali:

- **TIPO I (ISO 14024):** questa prima categoria raggruppa le etichette ed impronte sottoposte a certificazione esterna. Tra queste citiamo la più nota: l'Eco-label UE, definita come il marchio dell'unione Europea atto a garantire la certificazione del prodotto per quanto riguarda la sostenibilità di questo sotto ogni punto di vista, lungo tutto il suo intero ciclo produttivo, mantenendo elevati standard prestazionali.
- **TIPO II (ISO 14021):** etichette rilasciate dal produttore relativamente ai propri prodotti (si basano dunque su autodichiarazioni del fabbricante). Queste non sono soggette a convalidazione esterna da parte di terze parti. Spesso si riferiscono alla composizione dei materiali, definendone la quantità di materiale di riciclo impiegato, molto utilizzate nel settore degli imballaggi e del packaging più in generale.
- **TIPO III (ISO 14025):** fanno riferimento a questa tipologia le dichiarazioni relative alla quantificazione dei potenziali impatti ambientali associati al ciclo di vita del prodotto. Il Sistema EPD, gestito a livello internazionale dallo *Swedish Environmental Management Council* (SEMC) è l'applicazione più conosciuta di questa categoria di marchi. L'EPD fornisce informazioni trasparenti sull'intero ciclo di produzione dell'oggetto, certificandone l'approccio sostenibile. Anche considerazioni sull'impatto di CO<sub>2</sub> equivalente di ogni prodotto sono certificate in etichette di questo tipo.

<b>Tipologie di etichette</b>		
<b>Prima categoria</b>	<b>Seconda categoria</b>	<b>Terza categoria</b>
 <p><i>Figura 17 Esempio di etichettatura ambientale tipo I – ISO 14024</i></p>	 <p><i>Figura 18 Esempio di etichettatura ambientale tipo II - ISO 14021</i></p>	 <p><i>Figura 19 Esempio di etichettatura ambientale tipo III - ISO 14025</i></p>

*Figura 20 Tabella riassuntiva delle tipologie di etichette*

### **3.4.2 Eco-Design ed Eco-Progettazione**

Le metodologie di Eco-Design ed Eco-Progettazione permettono di considerare fin dalle fasi di implementazione di un nuovo prodotto e di progettazione del processo tutti quegli aspetti legati alla sostenibilità.

I materiali utilizzati e le tecnologie adottate sono analizzati prendendo in considerazione indici ambientali, focalizzandosi sulla vita del prodotto, sulla sua riusabilità e sul relativo smaltimento. La dinamica comparativa applicabile su materiali e processi permette di individuare il corretto equilibrio tra prestazioni e implementazione sostenibile. La fattibilità non è assicurata solo dalla componente economica e processuale, bensì dalla loro iterazione con la sfera del sostenibile.

Tra i numerosi obiettivi che si pone l'Eco-Design e l'Eco-Progettazione, i principali sono: abbattimento degli impatti ambientali, valorizzazione del rifiuto, miglioramento dell'imballaggio. Oltre all'impegno dal punto di vista della sostenibilità, questi obiettivi necessitano di essere supportati da un efficiente sistema informativo in grado di garantire la cooperazione e la condivisione di dati.

### **3.4.3 Strumenti di analisi**

Tra gli strumenti di analisi citeremo i tre principali strumenti utilizzati per implementare studi di tipo sostenibile su prodotti e processi, ognuno dei quali si relaziona alla propria sfera di interesse, quella ambientale, sociale ed economica. Queste tipologie di studi si focalizzano

ognuna su di un determinato aspetto, indagandone gli impatti attraverso metodologie sempre più diffuse nello scenario aziendale.

Le tre tecniche prendono il nome di LCA (*Life Cycle Assessment*), S-LCA (*Social Life Cycle Assessment*) ed LCC (*Life Cycle Costing*). L'analisi LCC si focalizza sulla stima dei costi ed il suo scopo è dunque quello di minimizzare la somma dei costi associati ad ogni fase del ciclo di vita del prodotto, al fine di conseguire benefici economici sia al produttore che agli utenti finale. La metodologia S-LCA, come suggerito dal nome, si concentra invece sullo studio degli impatti sociali del ciclo di vita del prodotto. La tecnica LCA si impone invece di indagare le problematiche ambientali connesse all'utilizzo di un determinato prodotto/processo.

La convergenza di questi tre elementi di analisi in un unico strumento applicativo costituisce il Lyfe Cycle Sustainability Assessment (LCSA), il quale riporta in modo globale la valutazione della sostenibilità di un prodotto/processo/servizio sotto tutte le sfere della sostenibilità. L'obiettivo è la creazione di uno strumento completo che misuri tutte le dimensioni della sostenibilità, il cui output possa essere presentato e comprensibile anche ai non esperti del settore e della metodologia (da Finkbeiner et al., 2010).

Questo elaborato si propone di analizzare la tecnica LCA e di applicarla ad un caso studio: il processo di fabbricazione di un oggetto attraverso tecniche additive con Freeformer Arburg. Vedremo nel dettaglio come si compone uno studio LCA, mostrandone le fasi principali e i criteri di funzionamento.

### **3.5 Life Cycle Assessment (LCA)**

Lo strumento principale per effettuare un'analisi operativa e valutativa del ciclo di vita di un prodotto o di un servizio è il Life Cycle Assesment (conosciuto con l'acronimo LCA); Quest'ultimo è definito dalla SETAC (*Society of Environmental Toxicology and Chemistry*) nel 1993 come un *“procedimento oggettivo di valutazione di carichi energetici ed ambientali relativi ad un processo o un'attività, effettuato attraverso l'identificazione dell'energia e dei materiali usati e dei rifiuti rilasciati nell'ambiente. La valutazione include l'intero ciclo di vita del processo o attività, comprendendo l'estrazione e il trattamento delle materie prime, la*

*fabbricazione, il trasporto, la distribuzione, il riuso, il riciclo e lo smaltimento finale*”<sup>3</sup> (SETAC. (1993). A Conceptual Framework for Life Cycle Assessment, workshop record, Sandestin, Florida).

Al giorno d’oggi sono sempre di più le aziende che effettuano analisi LCA, a causa dell’esigenza sempre crescente di monitorare dal punto di vista ambientale i processi connessi ai prodotti. Uno studio di questo tipo ha lo scopo di migliorare la comprensione degli impatti ambientali ed economici dell’oggetto preso in esame; questa diagnosi permette alle aziende di identificare quelle che possono essere le opportune modifiche da effettuare al fine di ricavare benefici non solo ambientali ma anche economici. LCA consente di effettuare un’analisi oggettiva di valutazione e quantificazione dei carichi energetici ed ambientali associati a tutto il ciclo di vita di un prodotto o servizio.

Tali dinamiche permettono di effettuare uno studio completo e dettagliato del prodotto considerandone tutti le singole attività connesse al suo ciclo di vita, partendo da quelle più a valle come la progettazione/sviluppo del prodotto, passando per l’estrazione delle risorse, considerando i processi di produzione, fino all’impiego vero e proprio dell’oggetto, concludendo con le fasi di fine vita (raccolta, riutilizzo, riciclaggio smaltimenti rifiuti ecc).

Occorre infatti prestare molta attenzione fin dalle prime fasi di vita di un prodotto. Si pensi ad esempio alla progettazione di una automobile: solo prestando molta attenzione durante lo sviluppo di essa si possono riscontrare benefici in termini di meno consumo di carburante necessario e minori emissioni per chilometro durante la fase di utilizzo, ed una maggiore possibilità di riciclaggio nel suo fine vita. (G. Rebitzer et al.)

Lo scopo di studi LCA è quello di ricavare l’incidenza degli indicatori associati ai potenziali impatti ambientali connessi ad un singolo prodotto e/o servizio, così da supportare l’identificazione di opportunità legate alla prevenzione delle problematiche ambientali.

Affinché l’analisi sia estesa all’intero ciclo di vita, occorre considerare il prodotto come un insieme di operazioni e di flussi in ingresso e in uscita caratterizzanti tutte le fasi del processo, dalla progettazione iniziale fino allo smaltimento finale. Tutte le attività necessarie alla produzione di un prodotto comportano infatti impatti ambientali dovuti al consumo di risorse e

alle emissioni di sostanze. La figura 14, presenta uno schema semplificato del concetto di “vita di un prodotto” qualsiasi.

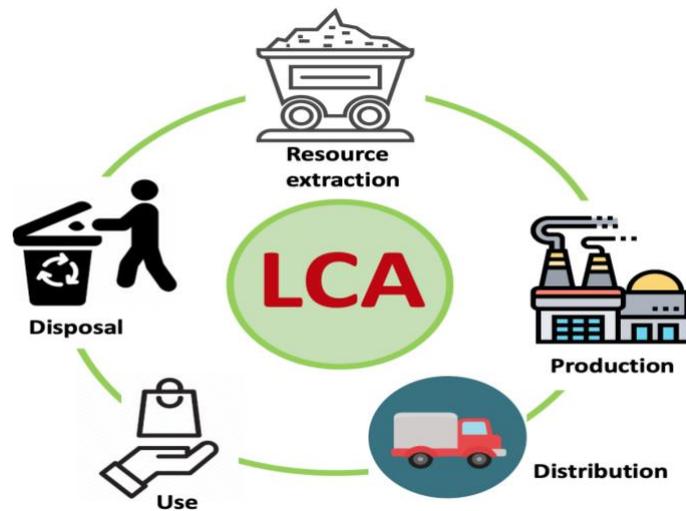


Figura 21 Fasi costitutive LCA, Analisi del ciclo di vita.

A questa prima panoramica sui caratteri generali, sui principali obiettivi e caratteristiche dello strumento LCA, seguiranno un approfondimento delle principali quattro fasi che generalmente compongono l'analisi. Il riferimento di quanto segue è rappresentato dalle norme EN ISO (*International Organization for Standardization*) 14040/14044; occorre ricordare che ad oggi esistono diversi approcci per effettuare analisi di questo tipo.

### 3.5.1 FASE I: Definizione degli scopi e degli obiettivi dello studio.

Identificare gli strumenti necessari ed il campo di applicazione, accompagnando questi con le motivazioni che hanno spinto a realizzare tale analisi. La norma UNI EN ISO 14040 descrive il sistema prodotto come: *insieme di unità di processo, connesse tra loro per quanto riguarda materia ed energia, che perseguono uno o più funzioni definite*. Definire l'oggetto dello studio significa specificare nel dettaglio aspetti come:

- Applicazione prevista;
- Pubblico previsto, a chi lo studio si rivolge;
- Eventuali comparazioni necessarie allo studio.

Sempre la norma UNI EN ISO 14044:2006, riporta che *“nel definire gli obiettivi di un LCA, deve essere chiaramente descritto quale sia l'applicazione prevista, le motivazioni che inducono a realizzare lo studio, il tipo di pubblico a cui è destinato, cioè a quali persone si*

*intendono comunicare i dati dello studio e se i risultati sono destinati ad essere usati per effettuare asserzioni comparative destinate alla divulgazione al pubblico.”*

Una volta definiti gli obiettivi dello studio è opportuno relazionarsi con quelle che sono le unità funzionali prese in considerazione; a tal fine, occorre specificare nel modo più puntuale possibile le unità e le funzioni coinvolte nello studio, affinché risultino compatibili con gli obiettivi dell'analisi. Essendo proprio le unità funzionali a doversi relazionare con i flussi di input/output per la quantificazione degli impatti, le scelte relative all'inclusione o all'esclusione di eventuali unità funzionali devono essere motivate. Tutto ciò che rientra nei confini del sistema deve essere quantificato in termini di flussi equivalenti, è quindi necessario effettuare anche considerazioni sui limiti ed i confini del sistema motivando sia la scelta delle unità considerate sia di quelle che si è deciso omettere.

Lo strumento di visualizzazione grafica è di grande supporto in questa prima fase, attraverso la mappatura delle varie unità funzionali e dei rispettivi flussi di input/output, è possibile avere un quadro più chiaro sul sistema preso in esame, stabilendo in modo univoco i contributi di ogni attore all'interno del sistema. La mappatura dei flussi dovrà necessariamente partire dai dati disponibili dalla compagnia e, man mano che lo studio viene implementato, una quantità sempre maggiore di informazioni e dati risulteranno disponibili al progettista. Tra gli input ed output occorre considerare quei parametri che meglio descrivono il comportamento del sistema. Ci si relaziona quindi al concetto di massa o di energia equivalente. Se l'applicabilità dello studio è relazionata a dinamiche comparative, l'analisi di sensibilità finale dei dati di input e output deve includere i criteri di significatività di massa, energia e ambiente in modo che tutti gli input che contribuiscono alla costituzione del prodotto, seppur riferite a parametri differenti, siano inclusi nello studio. Implementare queste tipologie di analisi per la comparazione di sistemi è molto frequente, ricordarsi però che i differenti flussi devono essere relazionati sempre alle stesse unità funzionali.

I flussi devono essere modellati come flussi elementari ed il sistema deve essere descritto in modo sufficientemente dettagliato. I flussi saranno riferiti a processi di produzione del materiale, alla sua trasformazione e smaltimento, considerando il quantitativo di emissioni possibili, il consumo energetico e le attività di movimentazione. Emerge quanto la qualità dei dati sia di fondamentale importanza, devono garantire copertura legata al tempo, copertura geografica, completezza, riproducibilità e coerenza.

I modelli LCA presentano poi degli indicatori che permettono di relazionare i flussi di input/output mappati lungo lo studio del ciclo di vita del prodotto con gli impatti che questo ha sull'ambiente.

I dati omessi o mancanti devono essere documentati, deve essere precisato quali dati non sono stati reperiti o in che misura questi possano influire negativamente sul modello. L'allocazione dei prodotti può avvenire in differenti modalità, laddove non si disponga dei dati necessari è possibile considerare la scomposizione dei singoli flussi così da poterne quantificare i sottosistemi.

### **3.5.2 FASE II: Life Cycle Inventory (LCI)**

Questa seconda fase, conosciuta anche come analisi di inventario, costituisce la parte centrale per quanto riguarda il reperimento dei dati necessari alla valutazione dell'impatto, permettendo di quantificare in modo più o meno puntuale i flussi in entrata ed uscita di un sistema-prodotto. La raccolta dati deve avvenire nel modo più oggettivo possibile; essi costituiranno le fondamenta per lo studio dell'impatto ambientale della fase successiva (3). In questa fase vengono ricercati i dati, suddivisibili in tre categorie: i dati primari sono quelli raccolti direttamente su campo, i dati secondari sono quelli estraibili dalla letteratura scientifica e dalle banche dati ad oggi disponibili, ed infine i terziari, che sono ricavati da stime o coefficienti tecnici e dunque tramite estrapolazione attraverso calcoli matematici. Risulta necessario esplicitare quali sono le metodologie di calcolo atte ad identificare i flow del sistema. Tenzialmente, eccetto particolari necessità, le metodologie di quantizzazione dei flussi una volta implementate devono essere portate avanti lungo tutta l'analisi.

Per l'allocazione dei flussi si devono considerare i singoli contributi del sistema produttivo. La somma degli input e degli output allocati in un processo unitario deve essere uguale agli input e agli output del processo unitario precedente. La raccolta dati risulterà tanto più affidabile quanto più sarà precisa la quantificazione degli input e degli output, ciò significa che l'esatto calcolo degli impatti ambientali presuppone la conoscenza di tutte le singole attività. Le metodologie di allocazione devono essere esplicitate, ed il livello di aggregazione deve essere relazionato con l'obiettivo dello studio. L'analisi di inventario considera anche le sovrapposizioni e combinazioni dei singoli flussi, considerando gli impatti non solo dei singoli attori ma anche della loro interazione. Le tematiche legate allo smaltimento dei rifiuti devono essere soggette a riflessioni riguardo quelli che possono essere i possibili percorsi di fine vita.

Inoltre, occorre tenere in considerazione che alcuni materiali possano condividere sistemi con altri. Grande attenzione deve essere tenuta nelle eventuali fasi di riciclo e sul calcolo dei flussi di sistemi ad anello aperto o ad anello chiuso. Al termine della raccolta dati si procede con l'interpretazione dei risultati, osservando il sistema nel suo insieme di contributi.



Figura 22 Fasi della valutazione del ciclo di vita

Più nel dettaglio, la serie di norme ISO 14040 trattano le tematiche inerenti alle procedure che permettono l'implementazione di uno studio LCA completo per qualsiasi tipo di prodotto, evidenziando requisiti generali applicabili indipendentemente dalla natura del prodotto oggetto dello studio. All'interno della normativa LCA viene definito tale approccio come: *“compilazione e valutazione attraverso tutti il ciclo di vita dei flussi in entrata e in uscita, nonché i potenziali impatti ambientali, di un sistema di prodotto”*. L'aspetto più innovativo introdotto da questa analisi è proprio quello di considerare tutte le fasi di un processo considerandone anche le correlazioni e le dipendenze.

### 3.5.3 FASE III: Life Cycle Impact Assesment (LCIA)

In questa fase, attraverso l'elaborazione dei dati raccolti precedentemente, si effettua una valutazione delle ricadute ambientali generate dai prodotti, a causa del consumo di risorse e di rilasci nell'ambiente. L'obiettivo è quello di stimare l'impatto ambientale (secondo precisi parametri) dei flussi di materiale e di energia consumati ed individuati durante la fase precedente di analisi di inventario, in modo da evidenziare, quantificare e valutare gli effetti ambientali dei sistemi esaminati. Necessariamente questa fase deve risultare allineata con l'obiettivo dello studio e con la fase di LCI precedente.

In questa fase avviene la vera e propria decodifica dei flussi di input/output precedentemente raccolti grazie all'applicazione di metodologie analitiche. I flow vengono tradotti in indicatori caratteristici al tema ambientale, quantificandone gli impatti.

Esistono differenti tecniche di LCIA che permettono i suddetti processi, e diversi database dai quali attingere i dati necessari. Una volta determinate quali sono le categorie di impatto, gli indicatori di categoria ed i modelli di caratterizzazione, rispetto queste si implementa lo studio. La scelta delle categorie di impatto deve riflettere una serie completa di questioni ambientali relative al sistema del prodotto oggetto di studio, tenendo conto dell'obiettivo e della portata. È necessario esplicitare il modello di caratterizzazione ed i meccanismi ambientali che legano i risultati della fase di inventario con l'indicatore di categoria. Deve essere descritta l'adeguatezza del modello di caratterizzazione utilizzato per estrapolare l'indicatore di categoria nel contesto di studio. I modelli di caratterizzazione devono essere seguiti lungo tutta la fase LCIA. Il modello descrive la totalità dei processi ambientali legati alla caratterizzazione degli impatti. Per ogni categoria di impatto l'applicazione LCA prevede:

- Identificazione degli EndPoint di categoria;
- Definizione dell'indicatore di categoria per determinati EndPoint;
- Identificazione dei risultati LCI appropriati che possono essere assegnati alla categoria di impatto, tenendo conto dell'indicatore di categoria scelto e degli EndPoint identificati;
- Identificazione del modello di caratterizzazione e dei fattori di caratterizzazione.

Identificata la categoria di impatto ed i rispettivi indicatori di impatto, è possibile associare questi alle categorie di EndPoint. La *figura 4* mostra un esempio relativo all'estrapolazione di un indicatore di categoria e la tabella sottostante riporta esempi relativi ad i termini associati agli indicatori.

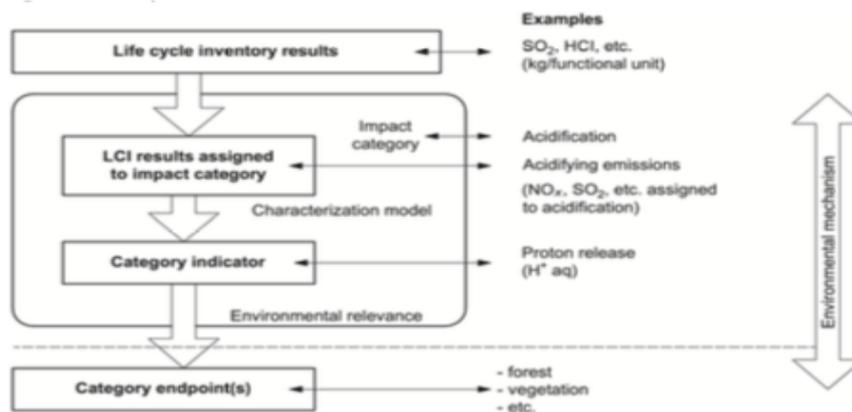


Figura 23 Esempio processo di rilevazione dell'indicatore di categoria, BEN ISO 14044

Term	Example
Impact category	Climate change
LCI results	Amount of a greenhouse gas per functional unit
Characterization model	Baseline model of 100 years of the Intergovernmental Panel on Climate Change
Category indicator	Infrared radiative forcing (W/m <sup>2</sup> )
Characterization factor	Global warming potential (GWP <sub>100</sub> ) for each greenhouse gas (kg CO <sub>2</sub> -equivalents/kg gas)
Category indicator result	Kilograms of CO <sub>2</sub> -equivalents per functional unit
Category endpoints	Coral reefs, forests, crops
Environmental relevance	Infrared radiative forcing is a proxy for potential effects on the climate, depending on the integrated atmospheric heat adsorption caused by emissions and the distribution over time of the heat absorption

Figura 24 Classificazione dei termini utilizzati dallo standard ISO, BEN ISO 14044

Grazie agli standard internazionali è oggi possibile quantificare in modo univoco i flussi del sistema che si vuole analizzare. Le categorie di impatto dovrebbero rappresentare gli impatti aggregati degli input ed output del sistema-prodotto sugli Endpoint attraverso gli indicatori di categoria. La rilevanza ambientale dell'indicatore di categoria o del modello di caratterizzazione dovrebbe essere chiaramente indicata nei seguenti termini:

- a) la capacità dell'indicatore di categoria di riflettere le conseguenze dei risultati LCI sugli Endpoint di categoria (almeno qualitativamente);
- b) l'aggiunta di dati o informazioni ambientali al modello di caratterizzazione rispetto agli Endpoint di categoria.

Definiamo ora con il termine caratterizzazione il concetto di calcolo dei risultati riferiti all'indicatore, attraverso il processo di conversione dei risultati ottenuti in fase di LCI, in unità comuni e la successiva aggregazione dei risultati convertiti all'interno della stessa categoria di

impatto. Tutte le metodologie di calcolo devono essere esplicitate, così come le modalità di approssimazione adottate e le omissioni. Altri calcoli che possono essere ulteriormente tenuti in considerazione sono quelli legati ai concetti di ponderazione e normalizzazione; quest'ultima dinamica si dedica alla comprensione dell'entità relativa di ciascun risultato in funzione dell'indicatore del sistema del prodotto analizzato, rapportando così ad un sistema di riferimento i risultati ottenuti per ciascun impatto ambientale. Si riporta di seguito un elenco di alcune delle principali categorie di impatto indagate durante l'implementazione di uno studio LCA (tutte quelle che seguono sono standardizzate a livello mondiale dall'ente IPCC - *Intergovernmental Panel On Climate Change*).

- *Climate Change (GWP)*: considera l'emissione in ambiente dei gas serra sviluppati durante le attività del sistema. Tale categoria esprime il quantitativo di forzante radiativo di ciascun gas serra;
- *Ozone Depletion (ODS)*: focalizzazione sui danni arrecati allo strato d'ozono e alla sua riduzione;
- *Human Toxicity (HTP)*: considera gli impatti associati ai danni arrecabili alla salute umana (non include determinante sostanze inorganiche);
- *Particulate Matter/Respiratory inorganic (PMFP)*: valuta l'impatto sulla salute umana di polveri sottili, primarie e secondarie;
- *Ionising Radiation (IRP)*: concentra l'attenzione sulle radiazioni ionizzanti e sui relativi impatti nei confronti dell'individuo e dell'ecosistema;
- *Photochemical Ozone Formation (EOPF)*: pone l'attenzione sui danni causati dall'ozono per via fotochimica;
- *Acidification (TAP)*: indaga gli impatti legati all'acidificazione provocata dalle emissioni gas che finiscono per depositarsi al suolo e nei fondali marini.
- *Eutrophication*: tale categoria considera le conseguenze generate dai derivati dei macro-nutrienti azoto e fosforo presenti in forme biodisponibile e che impattano sui sistemi acquatici e terrestri;
- *Ecotoxicity*: esprime i contributi degli effetti tossici sugli ecosistemi. Si fondano sul rischio e sulle conseguenze derivanti l'applicazione della sostanza d'analisi;
- *Resource Depletion*: indaga l'esaurimento delle risorse ambientali e pone la sua attenzione sulle applicazioni di sorgenti rinnovabili.

*(ReCiPe 2016 v1.1 A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level*

*Report I: Characterization M.A.J. Huijbregts)*

Come già detto in precedenza esistono differenti metodologie di valutazione degli impatti: presentiamo ora le logiche di funzionamento di uno dei modelli implementati nel 2008, conosciuto come modello ReCiPe, definito grazie alla cooperazione tra *RIVM Radboud University Nijmegen, Leiden University e Prè Sustainability*, sarà proprio questo approccio ad essere applicato al nostro caso di studio. Tale metodologia prevede l'allineamento dei flussi di input/output agli indicatori di categoria attraverso due separati step:

- 18 indicatori MidPoint;
- 3 indicatori EndPoint.

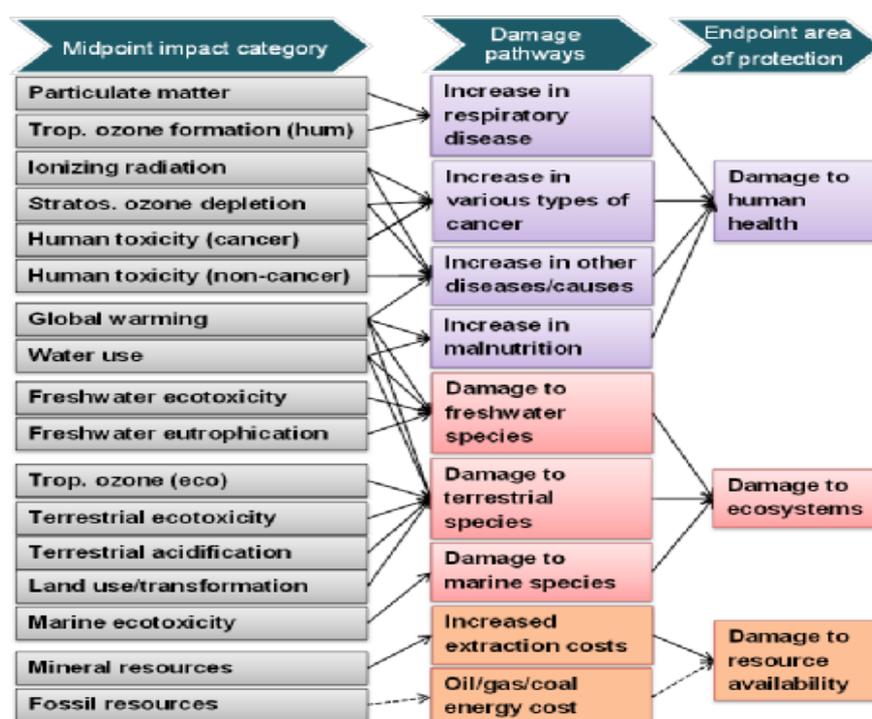


Figura 25 Panoramica della struttura del modello ReCiPe, ReCiPe 2016 v1.1 A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level

Dopo aver visualizzato i flussi con i MidPoint di categoria, si è in grado di constatare gli impatti ambientali del sistema, composto dai contributi delle singole problematiche ambientali. La conversione dei MidPoint in macro-categorie simili per quanto riguarda il fine applicativo dell'indagine, permette di estrapolare gli EndPoint di categoria, indicatori che raggruppano tutte le tematiche ambientali all'interno di tre voci distinte:

- *Damage to human health*: espresso anche come *DALY (Disability adjusted Life Years)*, considera la diminuzione delle aspettative di vita a causa di morte prematura o di disabilità permanenti.
- *Damage to ecosystem*: danno espresso come *Potentially Disappeared Fraction (PDF)*, ovvero la percentuale di specie a rischio di estinzione.
- *Damage to resource availability*: questa dimensione è legata al surplus energetico in megajoule.

Le tre dimensioni sopra riportate sono quelle attraverso cui vengono presentati i risultati dello studio ai fini di individuare gli impatti sull'ambiente. L'applicazione di tali prospettive deve prendere in considerazione una serie di temi influenti come il tempo, la stima della corretta gestione del rifiuto ed il futuro sviluppo tecnologico. La metodologia di applicazione si fonda su tre modelli differenti:

- 1) *Individualist*: più ottimistico e di breve termine, la tecnologia può evitare problemi in futuro.
- 2) *Hierarchist*: solitamente considerato il modello predefinito per implementazioni di tipo tecnico-scientifico.
- 3) *Egalitarian*: a lungo termine e basato sul principio di precauzione.

*(ReCiPe 2016 v1.1 A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level  
Report I: Characterization M.A.J. Huijbregts)*

### **3.5.4 FASE IV: Interpretazione dei risultati**

In quest'ultima fase, dopo aver verificato la validità dello studio, si è in grado di trarre conclusioni sul sistema analizzato. I risultati relativi agli impatti ambientali sono di supporto ai decisori nella fase di progettazione e di implementazione di determinati prodotti-processi. L'applicazione di tali studi non si limita al solo tracciamento degli impatti nelle logiche sistemiche, bensì presenta la possibilità di comprendere eventuali punti di debolezza dei processi, consentendo alle compagnie di migliorarsi in termini qualitativi e quantitativi. Elaborati di questa specie comportano una forte elaborazione dei risultati, in quanto la fase di LCI e di LCIA sono fasi estremamente delicate nelle quali è inevitabile ricorrere in stime ed approssimazioni.

Tecniche di questo tipo assumono grande valenza all'interno di dinamiche di studio comparative.

### **3.6 Sviluppi futuri e principali limiti**

I modelli analizzati presentano vantaggi prettamente legati alle opportunità di visualizzare gli impatti ambientali e di poterli associare a dei flussi elementari, è opportuno considerare che queste analisi sono anche soggette a stringenti limiti. Tra questi occorre sottolineare l'eventuale difficoltà di indagine e di rilevamento dei flussi e la possibile differenza che gli impatti presentano in termini di incidenza in funzione dell'area geografica considerata. Un altro aspetto critico è rappresentato dalla necessità di utilizzare banche dati, che in alcuni casi possono essere non disponibili oppure non sufficientemente accurate.

Altro limite deriva dal fatto che uno studio LCA aumenta la propria utilità al diminuire dei tempi d'esecuzione e dei costi relativi, facendo della tempestività di scelta un valore aggiunto; contemporaneamente la completezza dello studio migliora con l'aumentare del tempo d'esecuzione, sostenendo quindi dei costi dedicati all'attuazione. Esistono teorie contrastanti su quale debba essere il soggetto a cui riferire l'analisi. La letteratura propone l'applicabilità del modello al solo prodotto, scomponibile nelle sue singole attività visualizzabili ed allocabili già dalle fasi di estrazione di materiale, e non applicabile ai processi. Altra corrente vuole invece rendere protagonista il processo, eliminando così la fase di allocazione sul prodotto, il quale causa impatti differenti in funzione della zona geografica considerata. I grandi limiti del modello sono riscontrabili quindi nella soggettività insita nelle fasi di reperimento dati. Occorre sottolineare che uno studio LCA, non determina in modo assoluto quale sia il prodotto migliore, ma si limita a fornire informazioni che possono essere impiegate per prendere decisioni di maggiore consapevolezza.

Unitamente alla spinta verso uno sviluppo più sostenibile, uno studio LCA può avvantaggiare e favorire anche lo sviluppo di nuove opportunità commerciali, diventando uno strumento indispensabile all'interno della "cassetta degli attrezzi" della maggior parte delle organizzazioni. La valutazione del ciclo di vita (LCA) è un potente strumento per quantificare, valutare, confrontare e migliorare beni e servizi in termini di potenziali impatti ambientali. L'LCA sostiene quindi l'identificazione di opportunità per la prevenzione dell'inquinamento e per ridurre il consumo di risorse attraverso analisi sistematiche. (G. Rebitzer et al., 2004)

Unitamente alla spinta verso uno sviluppo più sostenibile, uno studio LCA può avvantaggiare e favorire anche lo sviluppo di nuove sfide commerciali. La valutazione del ciclo di vita (LCA) è un potente strumento atto a quantificare, valutare, confrontare e migliorare beni e servizi in termini di potenziali impatti ambientali. LLCA sostiene quindi l'identificazione di opportunità per la prevenzione dell'inquinamento e per ridurre il consumo di risorse attraverso analisi sistematiche.

Dopo aver presentato le fasi necessarie per l'implementazione di uno studio LCA, si proseguirà il seguente elaborato declinando questa metodologia di valutazione dell'impatto ambientale per il processo di lavorazione additiva con *ARBURG Plastic Freeformer*.

# Capitolo IV: LCA del processo Arburg

## 4.1 Caratteri generali

Nel seguente capitolo ci dedicheremo all'applicazione della metodologia di analisi di LCA in funzione della realizzazione di un'oggetto tridimensionale tramite lavorazione additiva. Al termine dell'analisi sarà proposta una panoramica su quelli che sono gli impatti ambientali connessi alla lavorazione additiva ARBURG Plastic Freeforming (per i dettagli sull'azienda Arburg si rimanda al capitolo II dell'elaborato). La macchina soggetta ad analisi è presente nei laboratori della facoltà di Ingegneria di Bologna. Lo studio condotto viene presentato seguendo le fasi costitutive connesse alla stesura di una analisi LCA, definendone le effettive modalità di reperimento dati e di estrapolazione degli indici di impatto. La rilevanza dello studio è legata all'incertezza degli impatti ambientali connessi all'utilizzo di una tecnologia di recente avvento, la cui applicazione al giorno d'oggi rimane tema di dibattito e sviluppo. Il mercato della manifattura additiva nell'ultimo decennio ha constatato una notevole crescita (Bandyopadhyay et al., 2020). Il grafico di Figura 26 mostra il crescente impiego di tecnologie additive nel settore automotive nel corso degli ultimi due anni e la previsione di crescita connessa ai prossimi dieci, evidenziando il tipo di materiale impiegato nel processo additivo. L'elaborazione di tali dati è stata condotta dalla compagnia *SmarTech Publishing*, la quale ha deciso di rapportare la crescita delle tecnologie additive al fatturato del corrispettivo segmento di mercato.

Per la presentazione dell'analisi condotta ci dedichiamo a definire, in un primo momento, il modello applicativo, successivamente utilizzeremo tale modello in relazione ad un caso di studio.

Obiettivo dell'elaborato è prettamente legato all'elaborazione di un metodo di indagine connesso al tema ambientale, il quale sarà applicato concretamente su di un processo di lavorazione.

Lo studio si fonda sulle fasi costitutive di una analisi LCA.

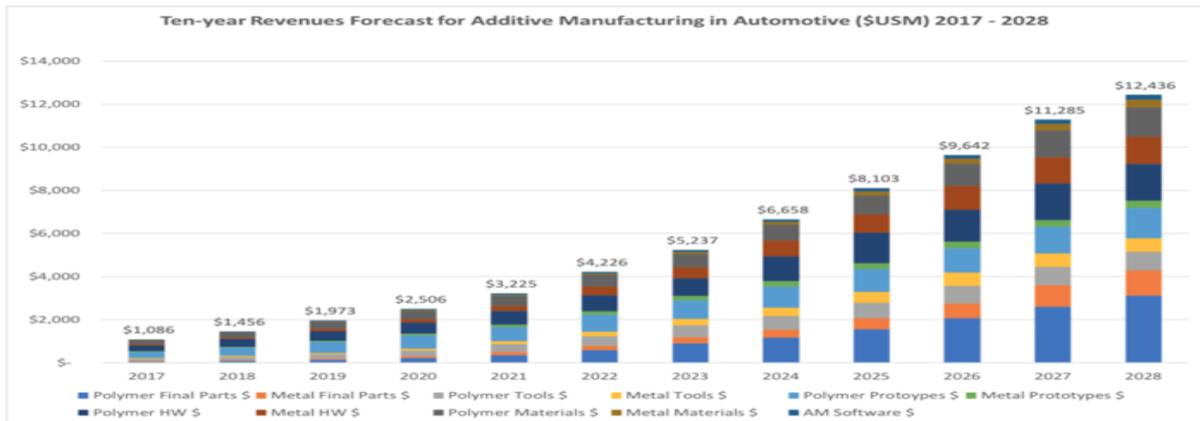


Figura 26 Previsione dei ricavi dall'impiego di tecnologie AM nel settore automotive (Fonte: <https://www.3dprintingcreative.it/automotive-additive-manufacturing-in-crescita-continua/>)

## 4.2 Definizione del metodo: LCA process

Ci dedichiamo ora alla definizione del metodo di studio con cui verrà condotta l'analisi. L'idea è quella di approcciare ai meccanismi di analisi LCA così da valutare gli impatti ambientali generati dal processo additivo Arburg Plastic Freeforming (APF).

Quanto affermato nel paragrafo precedente mostra la rilevanza di una corretta analisi e valutazione di quelle che possono essere le conseguenze ambientali derivanti l'adozione di tecnologie additive.

Per l'implementazione dell'analisi ci si è basati su dati direttamente riconducibili alla casa produttrice ARBURG, dati estrapolati attraverso calcolo empirico e dati ricavati dai cataloghi commerciali online. L'analisi prende spunto dall'elaborato *"Life cycle impact assessment of desktop stereolithography"* (Mele et al., 2020).

La valutazione degli impatti, come definito dalla norma ISO 14044 descritta nei capitoli precedenti, seguirà le fasi costitutive di un LCA: si passerà da una fase di inventario LCI ad una seguente di assegnazione e di valutazione degli impatti, LCIA.

L'elaborato prende in considerazione tutti gli attori che compaiono nel processo, allocando i contributi di ciascuno in funzione della lavorazione che si intende eseguire e valutandone gli impatti ambientali.

Per quanto riguarda la fase di allocazione, si dovrà tener presente che gli attori che compongono il sistema si relazioneranno a parametri differenti: emerge la necessità di modellare il sistema in funzione dell'unità di prodotto.

### **4.2.1 Introduzione al processo**

Il funzionamento della macchina, come esplicitato nei capitoli precedenti, si basa sulla deposizione di piccolissime gocce di materiale plastico, strato dopo strato, andando a comporre l'oggetto su di una piattaforma di costruzione. Il materiale plastico utilizzato per la lavorazione si trova inizialmente in forma granulare, pellet.

La lavorazione procede con l'estrusione di materiale plastico, riscaldato grazie ad un cilindro ed una vite plastificatrice e depositato grazie al meccanismo composto da un ugello in grado di far fluire materiale: è proprio tale meccanismo che, unitamente al parametro legato alla velocità di avanzamento, definisce la portata di materiale del processo. Il materiale plastico viene depositato sotto forma di piccolissime gocce, la quale sovrapposizione è in grado di conferire aderenza.

Tutta la deposizione di materiale necessita di una lastra di *ABS (acrilonitrile-butadiene-stirene)*, che garantisce al primo layer di adagiarsi nel modo corretto sulla superficie, consentendo aderenza e permettendo una rimozione che non vada ad intaccare la qualità della lavorazione.

Il sistema da analizzare comprende quindi:

- La macchina dedicata alla lavorazione additiva (APF) ARBURG Plastic Freeformer;
- Materiale consumato durante la lavorazione: materiale plastico;
- Consumabili legati alla lavorazione, lastra di ABS 240mmx250mmx1mm.

### **4.2.2 Scopo, obiettivi e confini dell'analisi**

Definiamo gli obiettivi e gli scopi dello studio, il campo di applicazione ed il framework principale di riferimento.

Si ritiene necessario precisare che l'implementazione della metodologia LCA vuole, nel nostro caso, definire una panoramica sulla composizione della macchina e sui relativi impatti ambientali.

La valenza di studi LCA è legata proprio all'utilizzo di questo come strumento di supporto per l'implementazione di un qualsiasi prodotto/processo. La quantificazione esatta e realistica dei flussi di input-output dei processi è riconoscibile però al solo produttore, solitamente dopo la commercializzazione del prodotto. Questo fa sì che le analisi di sostenibilità ex-ante si fondino

su stime, costituendo così il paradosso della metodologia LCA (Giesen et al., 2020). In questo elaborato verrà portata avanti una metodologia di analisi LCA sulla base dei dati disponibili.

Gli intenti dello studio condotto sono quelli di quantificare gli impatti ambientali attraverso una analisi di inventario dedicata al tracciamento dei flussi di input/output, così da estrapolare una panoramica per quanto riguarda l'impatto ambientale del processo additivo Arburg. Ovviamente i vari contributi dovranno essere allocati secondo un fattore comune, quale potrebbe essere la massa dell'oggetto da costruire o il tempo stesso di costruzione.

Si tiene a sottolineare che l'obiettivo dello studio non è quello di fornire una valutazione puntuale ed estremamente affidabile delle problematiche ambientali coerentemente subordinate alla produzione additiva, bensì di individuare e comprendere quelle che sono le relazioni che intercorrono tra i processi che contraddistinguono la tecnologia e le tematiche prettamente legate al tema della sostenibilità attraverso l'implementazione di un modello di riferimento.

L'analisi seguirà un percorso "*Craddle to Gate*", vengono prese in considerazione tutte le fasi del processo, dall'estrazione della materia prima alla costituzione del prodotto in uscita dai cancelli dell'azienda. Lo scopo del processo è quello di trasformare il materiale plastico nell'oggetto tridimensionale progettato, attraverso deposizione di materiale sotto forma di layers.

Gli attori che modellano il sistema Arburg sono quindi:

- APF, macchinario Arburg Plastic Freeformer;
- Materiale plastico utilizzato per la lavorazione;
- Consumabili.

Per tenere conto delle implicazioni effettive della geometria e dell'orientamento della costruzione, ogni parte da produrre è costituita da un array di dimensioni singole come indicato nell'equazione seguente:

$$P = [m_p, m_s, t_c] \quad (1)$$

Dove:

- $m_p$  rappresenta la massa della parte,
- $m_s$  la massa dei supporti,
- $t_c$  il tempo di costruzione necessario per completare l'oggetto.

Questi dati possono essere estratti dal software connesso al calcolatore di bordo, CAM, rendendo la fase di programmazione estremamente integrata.

In Figura 21 è riassunto tutto il framework di riferimento attraverso il quale è possibile visualizzare i processi protagonisti ai quali andranno relazionati i vari flussi.

Il processo risulta così composto dalle fasi: costruzione dell'oggetto, produzione e smaltimento del materiale costitutivo della macchina, produzione e smaltimento del consumabile e da tutti i sottosistemi che modellano la produzione, trasporto e trasferimento degli elementi coinvolti nella lavorazione.

La mappatura del sistema e l'individuazione degli attori protagonisti consente la definizione dei processi base ai quali fare riferimento durante la fase di individuazione dei flussi.

Si ricorda che il framework di riferimento vuole essere una rappresentazione grafica del sistema, rapportabile quindi alla produzione di oggetti di diversa forma e diverso materiale.

L'obiettivo è proprio quello di creare uno strumento di supporto in grado di quantificare gli impatti in funzione delle caratteristiche della lavorazione che si vuole eseguire, proprio per questo definiremo un modello univoco di valutazione delle problematiche ambientali per Arburg Plastic Freeformer.

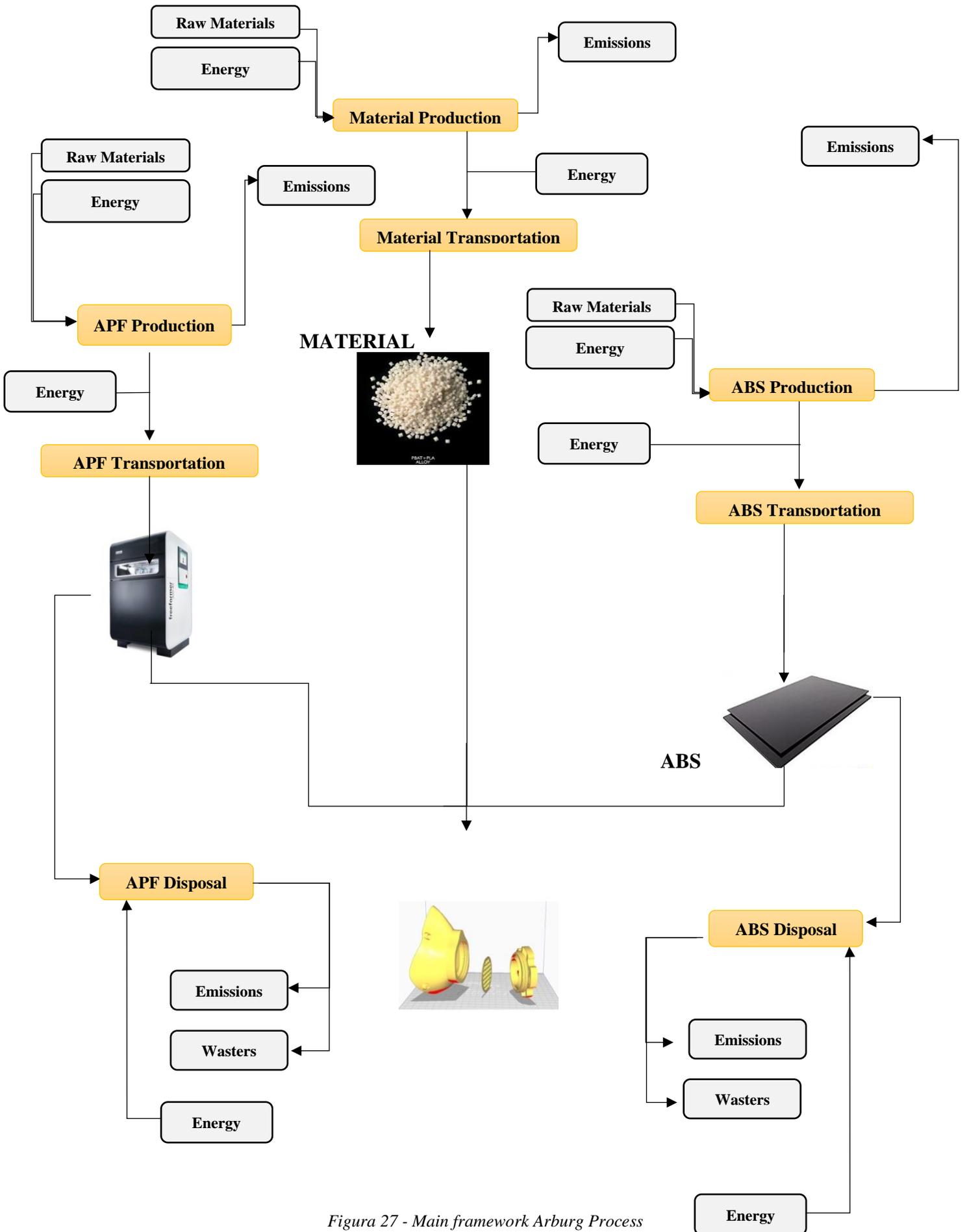


Figura 27 - Main framework Arburg Process

### 4.2.3 Analisi di inventario LCI

Una volta definiti gli obiettivi dello studio, i confini dell'analisi, gli attori coinvolti ed i processi cardine, giunge il momento di popolare il database. L'analisi di inventario si impone di indagare ed estrapolare tutte quelle informazioni necessarie alla corretta mappatura del sistema.

Nella fase di LCI si vanno a ricercare i flussi di input/output in relazione ai processi considerati; tali flussi verranno poi allocati in funzione dell'unità di prodotto.

Il meccanismo di allocazione presume l'utilizzo di fattori moltiplicativi coerenti con il soggetto a cui questi vengono rapportati.

La determinazione dei flussi di input ed output avviene attraverso i dati provenienti dal Database Ecoinvent 3.5 (Wernet et al., 2016). Il software GaBi by Thinkstep è stato utilizzato per il calcolo degli indici nella fase di Life Cycle Impact Assessment (LCIA), secondo la metodologia ReCiPe 2016 v1.1 (Uijbregts et al., 2017).

Al termine della fase di inventario sono presentate le metodologie di reperimento dati, di allocazione e di rilevamento dei flussi di input/output in funzione degli attori presenti nel sistema.

In tale fase si ricercano i dati ed i flussi dei processi in funzione dei soggetti del sistema: APF, materiale plastico e consumabili.

Essendo tale fase estremamente soggetta a distorsioni, dovute alla difficoltà di quantificare le fasi del ciclo di vita, è opportuno tenere traccia di tutte le dinamiche che hanno permesso di mappare i flussi di input/output.

#### *Arburg Plastic Freeformer*

Per quanto riguarda la macchina APF, la fase di inventario è risultata quella che maggiormente ha creato perplessità e dubbi, il limitato accesso ai dati ha fatto emergere l'esigenza di ricorrere a metodologie alternative di elaborazione dati atte a risolvere tale problematica.

Lo studio della APF parte proprio dalla *BoM (Bill Of Materials)* presente nel catalogo ricambi: questa fornisce un elenco di tutti i codici che compongono la macchina, classificati per sottogruppi funzionali o kit di riferimento. Il limite del documento è rappresentato proprio dalle scarse informazioni chimico-fisiche dei singoli codici, infatti, solo di alcuni elementi vengono riportate le informazioni inerenti a materiale costitutivo e/o dimensioni fisiche.

Sono indagati tutti i processi di fabbricazione, trasferimento e smaltimento della macchina.

Il modello prevede la scomposizione della APF nei suoi componenti unitari, andandone ad estrapolare il peso, così da poter riportare poi il peso rilevato della macchina con quello dichiarato dalla compagnia.

Come già accennato in precedenza, gli unici dati forniti dalla compagnia Arburg sono quelli legati alla bolla di acquisto ed al catalogo ricambi contenuti nel CD Arburg della macchina.

Per quanto riguarda l'APF questa si rapporterà al il tempo di costruzione  $t_c$ , così da mostrare il reale contributo della macchina sulla singola lavorazione in termini ambientali, tenendo in considerazione le fasi di produzione, trasporto e smaltimento.

Anche il processo di deposizione di materiale vero e proprio, quello per cui l'oggetto si va concretamente a costruire, generando un dispendio energetico, viene allocato nei confronti del tempo di costruzione  $t_c$ .

Di seguito in figura riportiamo informazioni relative alla tecnologia Arburg Plastic Freeformer 2k 3A.

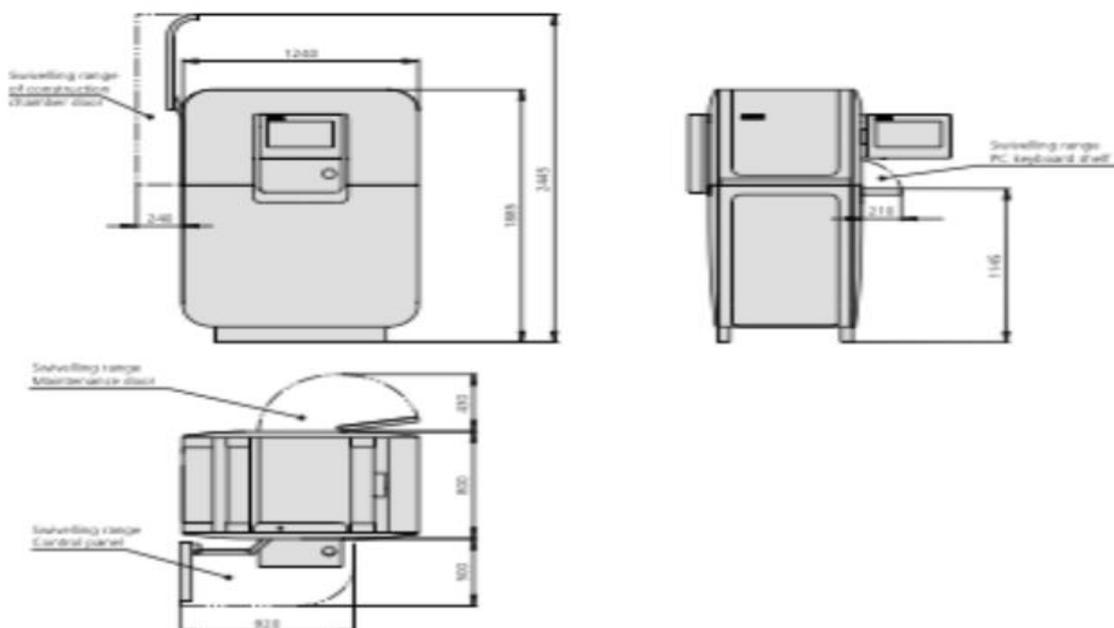


Figura 28 - Dimensioni fisiche APF, Operating manual for machine no. 750016, Freeformer-2K3A, Arburg Company

La figura 29 mostra un esempio della distinta base fornita dal catalogo Arburg.

321442 Kit, custodia camera di produzione (1/2)

Pagina 24

Senza la nostra autorizzazione è vietato riprodurre o copiare questo disegno e neppure lo si può mettere a disposizione di terzi

321442 Kit, custodia camera di produzione (1/2)

N° pos.	N° rif.	Denominazione	Qua. Pg.	N° pos.	N° rif.	Denominazione	Qua. Pg.
1	321442	Kit, custodia camera di produzione (1/2)	1	24	57832	Vite a testa piana M4x6	1
2	321540	Fissaggio frontale	1	25	91858	Fascetta D=4	1
3	321527	Set leve 450-580mm	1	26	406	Disco D=4,319	4
4	913	Vite a testa cilindrica M5x16	2	27	255401	Interruttore di sicurezza	1
5	324300	Cuscinetto radente 480x30	2	28	317023	Collega a spina 8P L=1800	1
6	51012	Vite a testa piana M5x8	66	29	255095	Elemento d'azionamento	1
7	388	Dado esagonale M5	2	30	320059	Supporto 45x27	1
8	324338	Pannello di copertura 822x100	1				
9	321541	Barra stabil con sezione ovale L=570	1				
10	324670	Pannello copertura 614x30	1				
11	324343	Pannello di copertura 622x100	1				
12	321488	Pannello copertura 52x51 L=483	2				
13	321445	Plastra di tenuta 243x199x12	2				
14	321528	Garnitura base	1				
15	1449	Vite a testa cilindrica M4x35	12				
16	321485	Pannello copertura 136x57 L=404	1				
17	321484	Pannello copertura 565x179x24	1				
18	321479	Pannello copertura 559x177x22	1				
19	120914	Dispositivo di serraggio	2				
20	4153	Vite a testa cilindrica M4x8	12				
21	316935	Plastra di metallo 28x25	2				
22	321487	Pannello copertura 564x69	1				
23	324333	Pannello copertura 187x75 L=616	1				

Pagina 25

Figura 29 Esempio di BoM Arburg for Plastica Freeformer

Si è deciso di partire proprio dalla BoM fornita da Arburg così da ricostruire, grazie all'ausilio di banche dati ed osservazione diretta della macchina, tutti i contributi dei singoli kit che compongono la APF.

La stima degli impatti dei sottogruppi fonda i suoi principi sull'individuazione del peso di ogni componente così da ricavare il peso complessivo dei kit e della APF, valore poi relazionato al peso dichiarato da Arburg stessa.

Il catalogo Arburg è costituito da 1495 elementi riconducibili a 614 codici.

La BoM scompone la macchina nei suoi sottogruppi costitutivi:

KIT	n° Codici	n° Componenti
SET UTENSILI	36	46
FRAME PREASSEMBLED	40	158
TELAIO TAVOLO SUPPL.	18	53
KIT ROTAZIONE MONITOR	38	69
KIT CUSTODIA CAMERA PROD.	91	330
PROTEZIONE COMPL. SPORTELLO	19	49
KIT RISCALDAMENTO 1500W	31	69
HOUSING OF HOT AIR GENERATOR	28	56
PROTEZIONE COMPLETA	15	28
KIT AZIONAMENTO DOS.	43	92
KIT AZIONAMENTO INIEZIONE	58	140
TRAMOGGIA GRANULATO 0,3	24	40
KIT FOR DRYING THE GRANULES	7	9
KIT SUPPORTO P GIUNTO	7	8
MODULO CILINDRO TERMOPLAST.	18	22
UNITA' DI SCARICO	26	45
PUNTALE UGELLO	2	10
TERMOREGOLATORE	33	54
KIT TUBI FLESSIBILI	17	55
TRASMISSIONE CORSA ASSE	27	96
SERVO AXES	14	35
KIT POMPA PER VUOTO	12	25
KIT VACUUM HOSES	10	10

*Figura 30 Composizione dei Kit costitutivi APF*

Successivamente, si è indagato il peso dei 614 codici, pesando i singoli elementi (ove possibile), raccogliendo informazioni da cataloghi online ed estrapolando dalle misure fornite dal catalogo Arburg, relazionandoci poi al concetto di peso specifico del materiale.

Tale fase fa emergere la necessità di ricorrere a tecniche di approssimazione e di stima che saranno successivamente presentate.

Una volta giunti alla determinazione del peso della macchina, scomposto nelle sue componenti in funzione dei materiali costitutivi, si è in grado di rilevare tutti i flussi di input/output legati ai processi che coinvolgono l'APF.

Occorre però considerare quelle che sono le dinamiche di allocazione in grado da rendere l'impatto ambientale della macchina riferito alla singola lavorazione.

Oltre all'analisi fisica dei materiali costitutivi della macchina, ovvero gli impatti relativi a produzione e smaltimento della APF, si deve anche tenere presente il trasporto della macchina dagli stabilimenti di Arburg locati nella città di Loburg, fino all'Università di Bologna.

A questo scopo, si è considerata la distanza di 663 km tra il punto di origine e quello di destinazione, supponendo che il trasferimento avvenga per mezzo di un camion (data

l'economicità della scelta rispetto il trasporto aereo). Considerazioni sul packaging vengono omesse in quanto l'involucro protettivo è considerato trascurabile dato il modestissimo peso nei confronti dell'attrezzatura APF.

Supponiamo che l'APF sia in grado di lavorare per 2000 ore all'anno con un rendimento del 75%; di conseguenza le ore effettive di attività all'anno della macchina risultano 1500.

Le ore di funzionamento spalmate lungo tutto il ciclo di vita della macchina sono quindi:

$$T = 1500h \times 5 \text{ anni} = 7500 \text{ ore}$$

Il fattore di allocazione riferito alla macchina è un parametro temporale, che definiamo come  $a_{APF}$ :

$$a_{APFC} = \frac{t_c}{T},$$

dove  $t_c$  rappresenta il tempo necessario per la costruzione dell'oggetto che si vuole realizzare.

Gli impatti relativi alla produzione, trasporto e smaltimento della macchina sono rapporti al fattore di allocazione  $a_{APF}$ .

### *Materiale plastico*

Per quanto riguarda il materiale plastico trattato verrà considerata la fase di produzione e trasferimento di questo.

Essendo il contesto Arburg un sistema aperto per quanto riguarda la metodologia progettuale prettamente legata al materiale plastico utilizzato, ed essendo quindi il reperimento di materiale un'attività limitata alla sola standardizzazione qualitativa, si è ritenuto opportuno considerare il trasferimento di materiale plastico dalla sede italiana di Arburg, locata nel milanese, fino ai laboratori della facoltà di Ingegneria di Bologna (*Plesso di Via Terracini*).

Il materiale deve essere allocato in funzione della effettiva massa di materiale plastico utilizzato durante la lavorazione, considerando anche il contributo dei supporti, in caso questi fossero presenti.

Il fattore di allocazione risulta essere quindi la massa totale  $m_{tot}$ :

$$m_{tot} = m_p + m_s$$

Dove  $m_p$  rappresenta la massa della parte ed  $m_s$  la massa dei supporti.

### *Consumabile*

L'intera lavorazione necessita di consumabili necessari per il corretto funzionamento della lavorazione. Le piccole gocce di materiale deposte dalla punta dell'ugello si adagiano su di una piastra di ABS di dimensioni 240x 250x1 mm; quest'ultima garantisce l'adesione del primo layer di materiale, consentendo quindi la buona condotta della lavorazione.

Al termine della lavorazione l'oggetto realizzato viene rimosso dalla lastra in ABS, la quale sarà smaltita attraverso inceneritore.

Si è considerato trascurabile il trasporto della lastra, poiché oggetto di facile rinvenimento sul mercato, ipotizzando che il plesso ingegneristico di Via Terracini abbia sempre a disposizione tali materiali.

Essendo tale attore considerato come una sorta di costo fisso, paghiamo l'impatto di tale soggetto ad ogni lavorazione, il fattore di allocazione sarà 1: l'impatto è associato alla sola massa della lastra  $m_l$ .

### *Contributo energetico*

Tale contributo deve essere tenuto in considerazione: l'interazione dei tre soggetti avviene per mezzo di consumo di energia.

Tale fase genera come flusso in uscita una massa di materiale plastico trasformato, tale processo genera impatti ambientali principalmente dal punto di vista del consumo elettrico necessario alla lavorazione.

Si presume che le potenziali emissioni volatili siano evitate grazie alla caratteristica di copertura ed isolamento garantita dalla camera di produzione. Il consumo di energia considerato per la lavorazione è quello fornito dal catalogo tecnico della macchina: 1,6 kWh (Operating manual for machine no. 750016, Freeformer-2K3A, Arburg Company). Il consumo energetico è così calcolato moltiplicando il consumo stimato per il tempo di lavorazione dell'oggetto  $t_c$ .

Viene considerato un consumo a bassa tensione all'interno del dataset Ecoinvent per il mercato italiano dell'elettricità.

#### **4.2.4 LCIA: Life Cycle Impact Assessment**

In questa sezione sono rappresentati gli indicatori *MidPoint (MP)* ed *EndPoint (EP)* calcolati mediante ReciPe v.1.1 in una prospettiva gerarchica (MidPoint, EnPoint: H).

Si procede con l'assegnazione degli impatti ambientali rispetto i flussi individuati nella fase di inventario. La metodologia prevede l'individuazione dei processi, all'interno del Dataset Ecoinvent 3.5, così da relazionare i pesi dei materiali con le relative problematiche connesse al tema ambientale.

L'individuazione degli impatti deve però tener conto dei fattori di allocazione individuati: ogni sottosistema deve essere rapportato al parametro che meglio interpreta l'effettiva problematica ambientale.

Attraverso la metodologia, che prevede due step applicativi, legati a MidPoint (MP) ed EndPoint (EP), si è in grado di fornire la composizione assoluta e percentuale delle diverse fasi LC correlate agli indici ambientali di riferimento.

#### **4.2.5 Discussione dei risultati**

Il modello applicato vede quindi il sistema fondato sul contributo di tre principali attori: APF, materiale plastico e lastra consumabile in materiale ABS: A questi faranno riferimento i processi base del sistema. Notiamo che la fase più critica è quella legata alla analisi di inventario della APF, fase soggetta a stime ed approssimazioni.

Il contributo dei consumabili si afferma come una sorta di costo fisso, il suo impatto presenterà gli stessi valori di flussi ad ogni lavorazione, ciò che cambia sarà il suo contributo in termini percentuali sul totale degli impatti.

La presentazione del modello permette di valutare la sostenibilità di diversi prodotti, modificando solo i dati di input legati alle caratteristiche degli enti protagonisti del sistema.

L'applicabilità del modello diventa particolarmente interessante all'interno di dinamiche comparative.

# Capitolo V: Case Study

Si applica ora il modello risolutivo ad un caso di studio, ripercorrendo le fasi costitutive di un'analisi LCA. Verranno presentati i risultati relativi all'applicazione del metodo sulla produzione di un oggetto, mostrando poi la possibilità di effettuare analisi comparative.

L'università di Bologna collabora con Arburg in quanto si dedica allo studio delle dinamiche della tecnologia APF dell'azienda tedesca. Questa però tende a non esternalizzare i suoi dati più critici, tale aspetto mostra l'esigenza di dover indagare quelle caratteristiche della macchina di cui non si hanno determinate informazioni.

## 5.1 Applicazione ad un prodotto

Come anticipato in precedenza il modello presentato è relazionato alla produzione di un prodotto. Questo si traduce nella possibilità di rapportare il modello implementato a differenti oggetti, modificando solamente i parametri dei processi in input del sistema. Applichiamo ora il nostro modello alla realizzazione di un oggetto attraverso APF.

### *Oggetto da realizzare*

L'output ultimo del processo di lavorazione è rappresentato dall'oggetto tridimensionale che si desidera realizzare. Data l'attuale emergenza sanitaria si è deciso di fabbricare attraverso APF una mascherina protettiva munita di filtro per la respirazione. Le informazioni relative al modello CAD della mascherina sono state ricavate dal forum *Makerbot Thingiverse* (<https://www.thingiverse.com>), piattaforma dove gli utenti condividono le proprie esperienze nei confronti dei processi additivi.

Il modello della mascherina (<https://www.thingiverse.com/thing:4245757>) è stato caricato sul software di simulazione del processo della APF, così da calcolare i tempi necessari alla lavorazione ed il volume di materiale depositato necessario alla costruzione dell'oggetto.

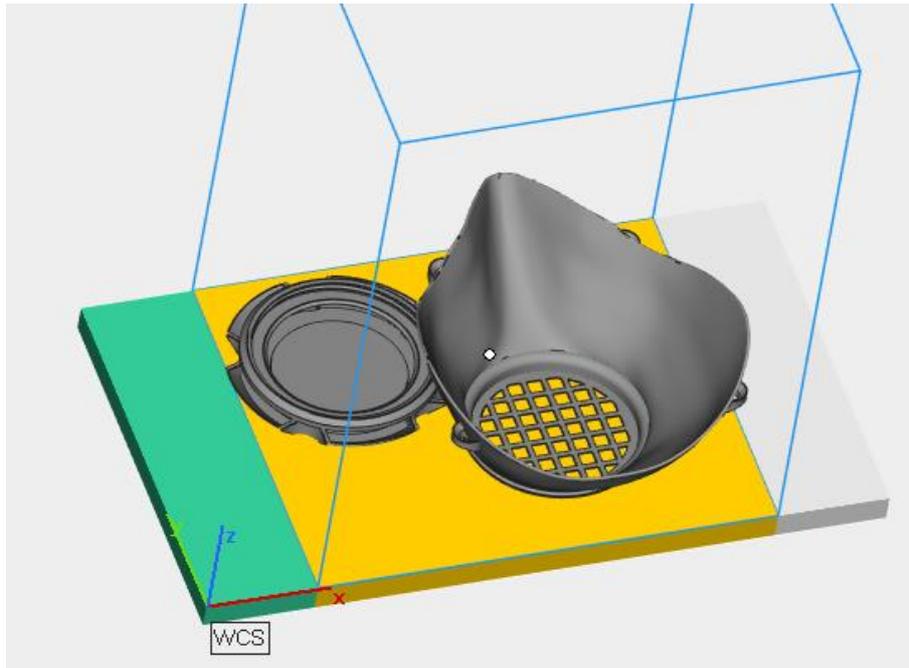


Figura 31 Rappresentazione software della lavorazione

Il calcolatore software della APF mostra i seguenti dati:

- Tempo impiegato per la lavorazione: 2 h e 46 minuti;
- Volume della mascherina:  $24825 \text{ mm}^3$ ;
- Nessuna esigenza di supporti.

Considerando un peso specifico di  $1,25 \text{ g/mm}^3$  per il materiale PLA, ricaviamo un peso di 0,031kg.

## 5.2 Scopo, obiettivi e confini dell'analisi

L'analisi seguirà un percorso "Cradle to Gate", ovvero dalla culla al cancello, più precisamente viene considerata come vita utile allo studio quella che parte dall'estrazione di materiale e arriva fino alla costituzione del prodotto in uscita dai cancelli dell'azienda proprietaria.

Gli attori protagonisti del sistema rispetto i quali modellare i singoli processi risultano essere: la macchina APF, il materiale plastico lavorato e la piastra di supporto di materiale ABS.

In fig. 27 è già stato presentato il framework di riferimento, indicante i confini ed i limiti del sistema.

L'intento è quello di valutare gli impatti ambientali legati alla produzione di una mascherina in materiale PLA considerando tutte le fasi legate al ciclo di vita dei soggetti presenti nel sistema, comparando poi tale oggetto ad uno identico costituito però da materiale plastico ABS.

### 5.3 Analisi di inventario LCI

Come introdotto dall'equazione (1), si è deciso di modellare lo studio rapportandosi a parametri relativi al concetto di massa e di tempo. Presentiamo ora la fase di LCI declinata in funzione dei soggetti che compaiono nel framework di riferimento.

#### *Arburg Plastic Freeformer (APF)*

In questa fase si indagano i flussi di input/output associati alla produzione, trasferimento e smaltimento della macchina APF.

L'osservazione della macchina e lo studio della *BoM* hanno permesso di individuare quelli che sono i materiali che compongono i singoli kit della macchina, nonché l'APF stessa:

- Acciaio strutturale: lo scheletro e l'architettura della macchina sono composti da acciaio strutturale, così come tutta la componentistica di minuteria. A questi componenti abbiamo associato un peso specifico di  $7,89 \text{ g/mm}^3$  ;
- Policarbonato (PC): la custodia della macchina è costituita da pannelli di policarbonato: peso specifico  $2 \text{ g/mm}^3$ ;
- Raccordi e Tubi: questo raggruppamento nasce dall'esigenza di raggruppare quei componenti composti prevalentemente da gomme siliconiche:  $1,15 \text{ g/mm}^3$ ;
- Lastre (vetro e alluminio): acciaio e alluminio sono stati raggruppati in quanto entrambi i materiali si presentano sotto forma di lastre.
- Piastre Termoisolanti;
- Componenti elettronici: tutta la componentistica elettrica ed elettronica è stata inserita in questa categoria. Sono stati indagati cataloghi online per comprenderne le caratteristiche.

Si è deciso di scomporre poi ciascun componente elettronico nei suoi sottoinsiemi costitutivi (andando a considerare tutti i materiali che compongono il componente), così da rendere la stima il più verosimile possibile;

- Gomma: tutti i materiali polimerici vengono raccolti in questo ambito, quali gomma e nylon, peso specifico considerato  $1,15 \text{ g/mm}^3$ ;
- Altri componenti: tra questi inseriamo quei componenti inseriti nel pacchetto Arburg necessari al funzionamento della macchina, quali set di leve e cacciaviti. Si è deciso di tralasciare questa categoria di codici, o almeno si è considerato solo quei componenti più rilevanti, in quanto il loro peso è risultato essere poco influente rispetto il peso complessivo dichiarato dalla macchina.

Individuati i materiali principali costitutivi della macchina, si è proseguito con l'extrapolazione dei pesi dei singoli componenti.

Nel caso di componenti la cui dimensione è tracciata nella BoM, si è calcolato il peso riferendoci alle misure fornite e al concetto di peso specifico; così è avvenuto per gran parte dei pannelli in policarbonato, elementi strutturali, lastre e piastre termoisolanti.

Tutti i codici relativi alla minuteria, (viti, bulloni, rondelle ecc) sono stati ricavati dal catalogo online Screwerk (<https://de.screwerk.com/it/shop/detail/stm/STM320800200S.html>).

La tabella di figura 32 mostra le dinamiche che hanno permesso l'individuazione del volume dei componenti e la conversione di questi in termini di massa, attraverso il concetto di peso specifico.

CODICE	COMPONENTE	PESO SPECIFICO		VOLUME	PESO [kg]
		$[\frac{g}{mm^3}]$	FORMULA VOLUME		
12204	Vite a testa cilindrica M6x65		catalogo	catalogo	0,0157
321203	Supporto 616x117	7,89	61,6x11,7x1,5	1081,08	8,53
323478	Supporto 40x18 L=40	7,89	(4x0,4+1,8x0,4)x4	28,48	0,225
324681	Supporto 123x73 L=1386	7,89	(12,3x0,4+7,3x0,4)x138,6	1086,624	8,573
330231	Supporto 40x30x1,5	7,89	4x3x0,15	1,8	0,0142
322143	Supporto 87x84 L=106	7,89	foglio Calcolo	95	0,752
51012	Vite a testa piana M5x8		catalogo	catalogo	0,00286
324538	Barra 724x115x30	7,89	72,4x11,5x3	2497,8	19,7
217939	Cuscinetto radente 60x30		catalogo	catalogo	0,007
98864	Vite a testa cilindrica M8x20		catalogo	catalogo	0,008
234993	Ralla 12x24		catalogo	catalogo	0,0023
318783	Piastra di base 280x170x25	7,89	28x17x2,5	1190	9
231843	Rondella D=12,5/24	7,89	(1,2)^2x0,2x3,14- (0,625)^2x0,2x3,14	0,66	0,0052
62418	Vite calibrata M10		catalogo	catalogo	0,0045
547	Vite a testa cilindrica M10x30		catalogo	catalogo	0,0011

*Figura 32 Esempi di metodi di calcolo del volume*

La stima dei pesi di tutti i codici permette di creare una visione d'insieme sui materiali costitutivi della APF, accorpando tutti i kit o sottogruppi in un'unica unità funzionale.

Dopo aver infatti stimato il peso di tutti i singoli componenti, e dopo aver moltiplicato il peso del singolo codice per il quantitativo di riferimento associato a quel codice, siamo in grado di ricostruire il peso complessivo della macchina e di rapportarlo al peso dichiarato dalla compagnia proprietaria della tecnologia (Operating manual for machine no. 750016, Freeformer-2K3A, Arburg Company).

Effettuata una valutazione di tutti i componenti della macchina, per quanto riguarda il peso ed il materiale costitutivo, si è risultati in grado di ricostruire il quadro generale associato ad APF:

KIT	PESO	UNIT° MISURA
SET UTENSILI	26,42	kg
FRAME PREASSEMBLED	222,9	kg
TELAIO TAVOLO SUPPL.	46,194	kg
KIT ROTAZIONE MONITOR	31,3532	kg
KIT CUSTODIA CAMERA PROD.	130,267	kg
PROTEZIONE COMPL. SPORTELLO	31,2651	kg
KIT RISCALDAMENTO 1500W	18,81	kg
HOUSING OF HOT AIR GENERATOR	15,344	kg
PROTEZIONE COMPLETA	70,9918	kg
KIT AZIONAMENTO DOS.	25,24	kg
KIT AZIONAMENTO INIEZIONE	16,31	kg
TRAMOGGIA GRANULATO 0,3	4,8	kg
KIT FOR DRYING THE GRANULES	2	kg
KIT SUPPORTO P GIUNTO	0,7	kg
MODULO CILINDRO TERMOPLAST.	3,36	kg
UNITA' DI SCARICO	12,8	kg
PUNTALE UGELLO	0,08	kg
TERMOREGOLATORE	12,9	kg
KIT TUBI FLESSIBILI	2,873	kg
TRASMISSIONE CORSA ASSE	38,33	kg
SERVO AXES	2,46	kg
KIT POMPA PER VUOTO	8,435	kg
KIT VACUUM HOSES	2	kg

Figura 33 Distribuzione Pesì in funzione dei kit APF

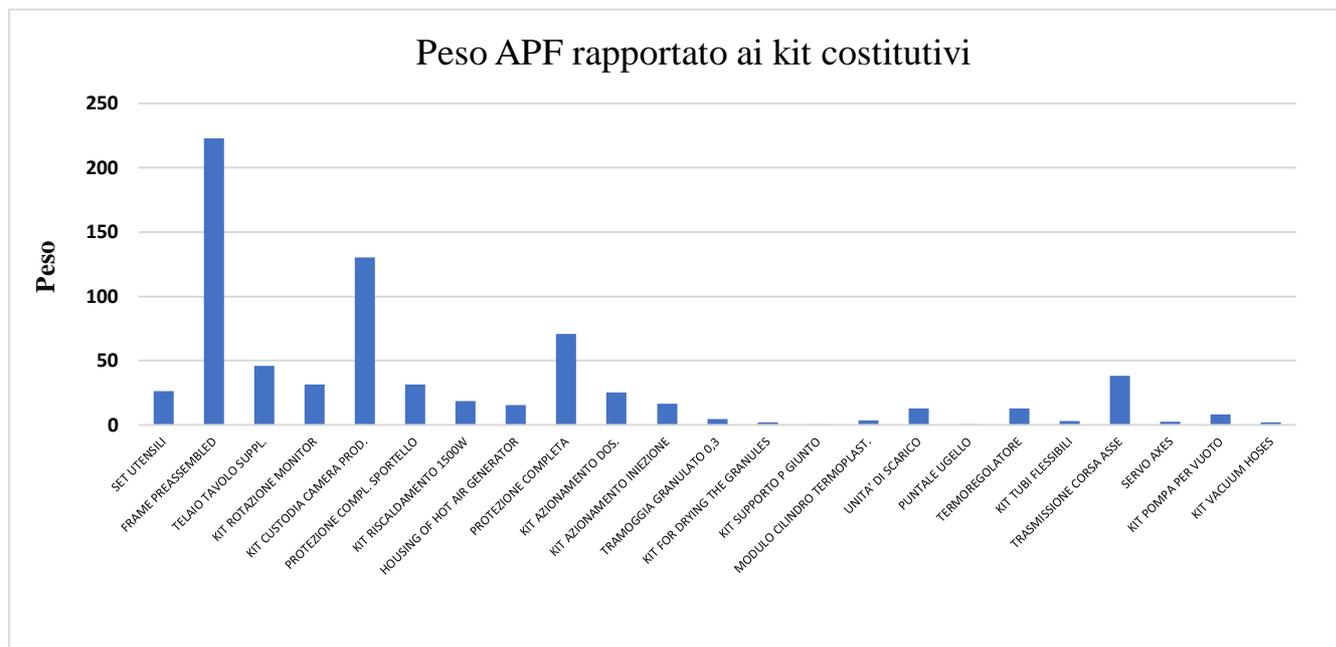


Figura 34 Peso APF in relazione ai kit costitutivi

La tabella di Figura 33 riassume i pesi della macchina in riferimento ad ogni sottocategoria costitutiva, la cui somma riporta un peso complessivo della APF pari a 725,8 kg, a fronte dei 750 kg dichiarati dalla compagnia. La tecnica di comparazione tra il peso rilevato ed il peso dichiarato della macchina è riscontrabile in letteratura (Mele et al., 2020). Nell'implementazione dell'analisi degli impatti saranno considerati circa dieci kg in meno rispetto quelli individuati, in quanto questi sono associabili a materiali ausiliari, di difficile interpretazione e in ogni caso con un peso di circa l'1% rispetto il peso totale individuato.

Essendo l'errore intorno al 3% del totale, possiamo considerare la stima come realistica, in quanto, torniamo a sottolineare, questo elaborato non si pone come obiettivo la ricerca del valore puntuale degli impatti ambientali, tanto più si vuole offrire una panoramica sul sistema Arburg Plastic Freeformer e delle connesse problematiche ambientali.

Notiamo in Fig. 34 che i kit maggiormente pesanti sono quelli che contengono al loro interno i codici relativi al telaio ed alla custodia di protezione della macchina.

Occorre inoltre precisare che per l'implementazione della successiva fase di LCIA si è deciso di scomporre il contributo derivante l'impiego di piastre termoisolanti nel contributo fondato sull'impiego di fibra di vetro ed in parte di vetro temprato.

Come già detto tutti i componenti elettrici ed elettronici rintracciati sono poi stati decomposti ulteriormente, così da proporre una stima del reale impatto del componente (per quanto concerne la sua produzione). Nella tabella seguente, se ne presenta un esempio:

IT Production	3,754 kg
Circuit board fabrication	0,006 kg
Cable production	0,04 kg
PC production	1,92 kg
steel production	0,86 kg
Copper production	0,07 kg
rubber production	0,058 kg
Glass Production	0,8 kg

*Figura 35 Esempio scomposizione componenti IT*

Individuare il set di materiali che compongono la macchina è fondamentale: gli impatti saranno calcolati proprio in funzione dei contributi dei singoli materiali coerentemente con le loro fasi di produzione, trasferimento e smaltimento.

Avendo precedentemente presentato i materiali che compariranno in questa analisi, di seguito si espone attraverso delle rappresentazioni grafiche, la percentuale di ciascun materiale all'interno dei kit della APF.

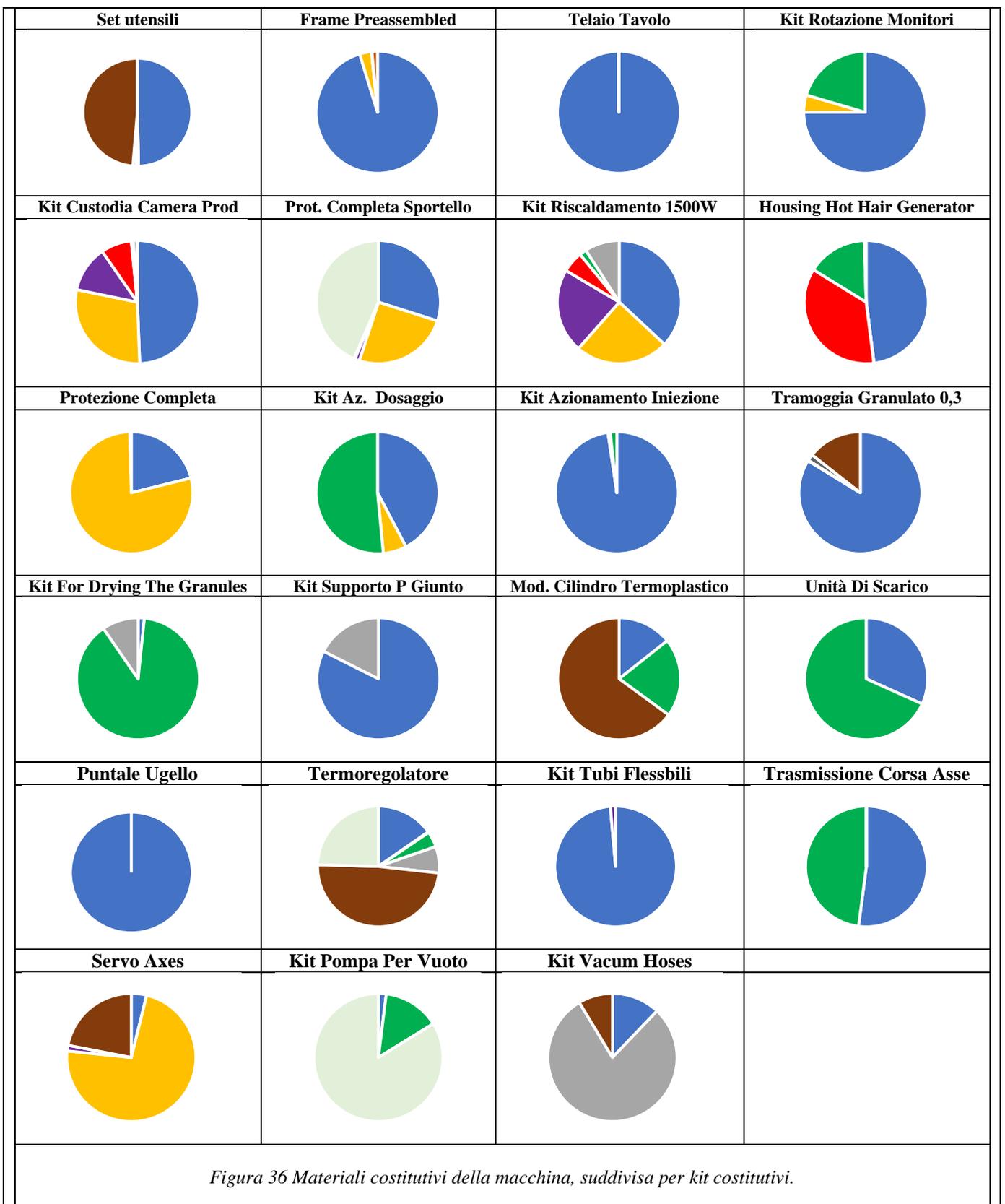


Figura 36 Materiali costitutivi della macchina, suddivisa per kit costitutivi.



Analogamente si è in grado di mettere in evidenza le informazioni relative ai materiali dell'intera macchina APF, di cui si riporta attraverso il grafico a torta di figura 37:

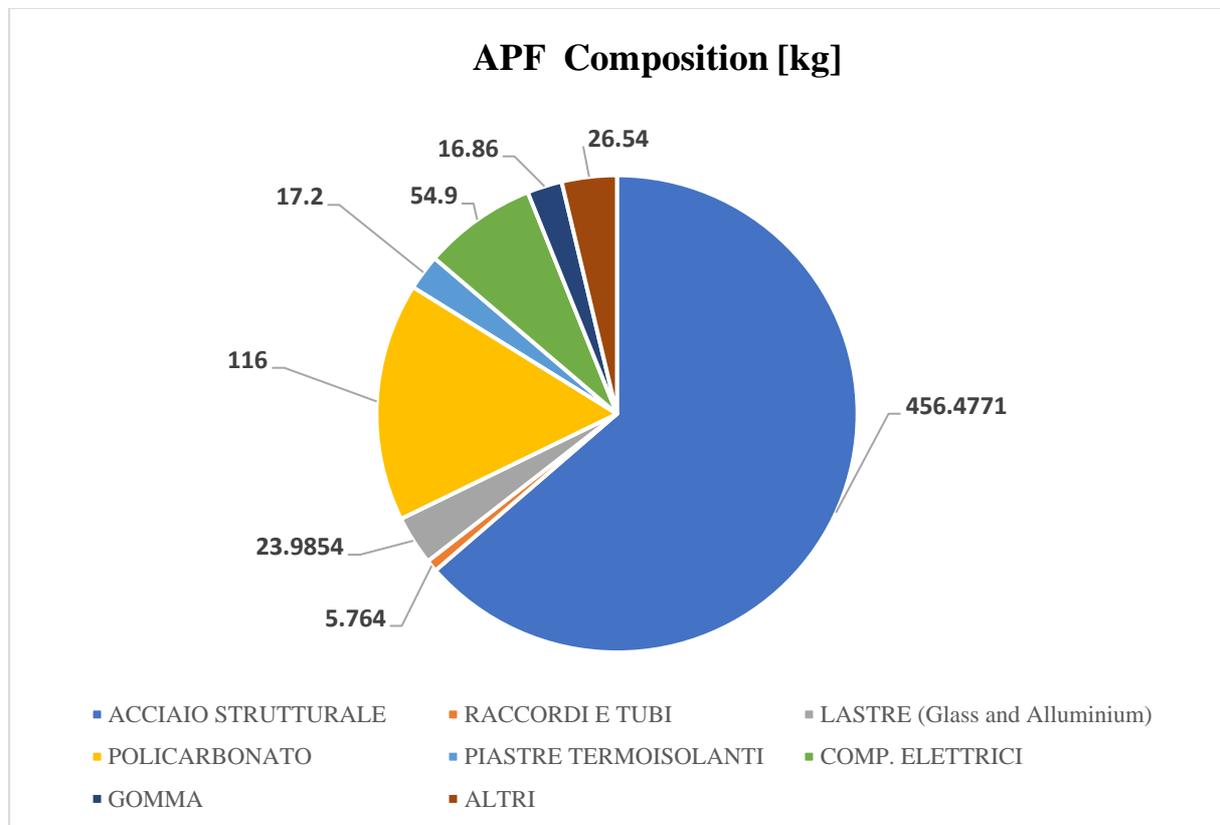


Figura 37 Grafico a torta: distribuzione percentuale dei materiali (in Kg) all'interno della macchina

Come mostrato all'interno del grafico riportato precedentemente, la macchina è composta principalmente da acciaio strutturale (*steel*), oltre una buona quota che supera i cento kg di polycarbonato (PC), principalmente rintracciabile nella custodia della APF.

Una volta giunti alla determinazione del peso della macchina, scomposto nelle sue componenti in funzione dei materiali costitutivi, si è in grado di associare gli impatti ambientali alla APF. Occorre però considerare quelle che sono le dinamiche di allocazione in grado di relazionare i flussi di input/output alla singola lavorazione.

L'appendice A1 riassume i set di dati utilizzati per la fase di LCI prettamente legata alla APF.

## *Materiale Plastico*

Gli impatti associati all'utilizzo di materiale plastico sono riconducibili alla sua produzione e trasferimento. Il materiale utilizzato per la lavorazione è *l'acido polilattico (PLA)*, sostanza plastica estremamente rigida, con temperatura di fusione relativamente bassa. Tale sostanza vanta i benefici connessi all'utilizzo di un materiale estremamente biodegradabile.

Il sistema aperto Arburg suggerisce considerazioni riguardo il materiale trattato: la sostanza plastica è reperibile in qualsiasi punto commerciale, a patto che il materiale sia qualitativamente standardizzato.

Si è deciso così di stabilire come luogo di provenienza del materiale la sede italiana della compagnia Arburg, locata a Bettola-Zelofoamagno MI. Il trasporto anche in questo caso avviene per mezzo di camion.

Essendo il materiale plastico contenuto in buste di capienza minima di 5 kg, fino a raggiungere capienze di 25 kg, si è deciso di considerare un valore che si aggira intorno ai 20 kg di materiale acquistato per ogni spedizione.

Lo studio trascura l'impatto del packaging del prodotto, poiché considerato trascurabile rispetto i venti kg di PLA trasferito.

Anche per quanto riguarda il materiale plastico è opportuno richiamare il concetto di allocazione. I kg di materiale acquistati andranno relazionati alla massa del prodotto desiderato, comprensivo anche della massa dei supporti in caso questi fossero presenti.

Nel nostro caso il fattore di allocazione legato al materiale PLA sarà uguale alla massa della parte che si intende realizzare  $m_p$ , data l'assenza di strutture di supporto.

## *Consumabili*

Viene tenuto in considerazione il contributo relativo all'utilizzo della lastra di ABS, consumabile all'interno del processo, da trattare alla stregua di un costo fisso. Paghiamo l'impatto ambientale di una lastra di ABS durante ogni ciclo di lavorazione.

Allocare la lastra presuppone considerare il consumo di una di queste durante la lavorazione.

Sarà quindi relazionata solo al concetto di massa, quella riferita alla lastra:  $m_l$ .

## Costruzione dell'oggetto

Il contributo derivante l'utilizzo di energia elettrica è calcolabile moltiplicando il consumo energetico della macchina di 1,6 kWh per il tempo necessario alla lavorazione  $t_c$ .

Nell'appendice A1 si riportano tutti i calcoli relativi alla fase di LCI. L'appendice A11 considera la scomposizione della macchina nei suoi sottosistemi durante la fase di inventario.

La tabella di figura 38 riassume le scelte di parametrizzazione effettuate per l'analisi di sostenibilità.

Sub System	LC phases	Product Parameter	Allocation factor
APF LC	(production, transportation and disposal)	$M_{tot}$ [kg]	$a_{sla}$
Material LC	(Production and transportation)	$M_{tot}$ [kg]	$m_p$
3D printing	3D Printing	$t_{lav}$ [h]	$W \times t_c$
Support Removal	Support Removal	$M_s$ [kg]	$m_l$

Figura 38 Parametrizzazione LCI

## 5.4 LCIA: Life Cycle Impact Assessment

In questa sezione sono rappresentati gli indicatori *MidPoint (MP)* calcolati mediante ReciPe v.1.1 in una prospettiva gerarchica (MidPoint H).

I risultati del LCA sono presentati in funzione del parametro di riferimento. All'interno dell'appendice A1 sono riportati i valori calcolati dei flussi di input/output individuati nella fase di inventario.

Si riporta all'interno dell'istogramma di Figura 39 la composizione degli indici MidPoint in relazione ai processi chiave individuati nell'analisi, in fig 40 invece si rapportano gli indicatori MP in funzione dei parametri di allocazione.

## Visualization Midpoint

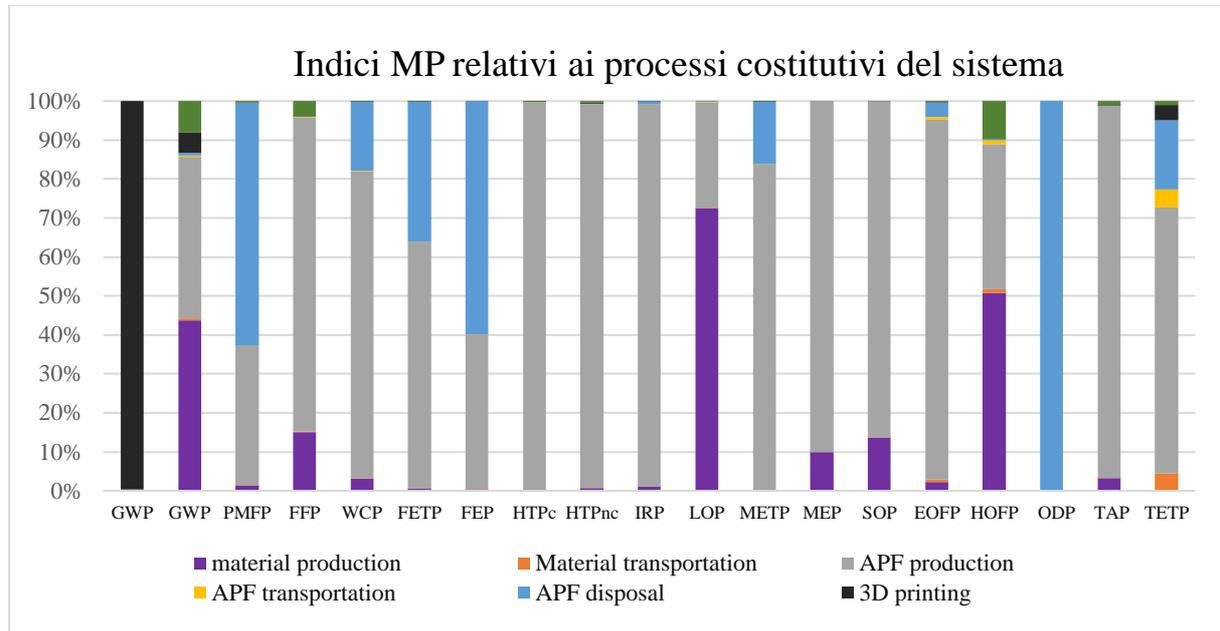


Figura 39 Composizione percentuale degli indici MidPoint LCIA dei processi

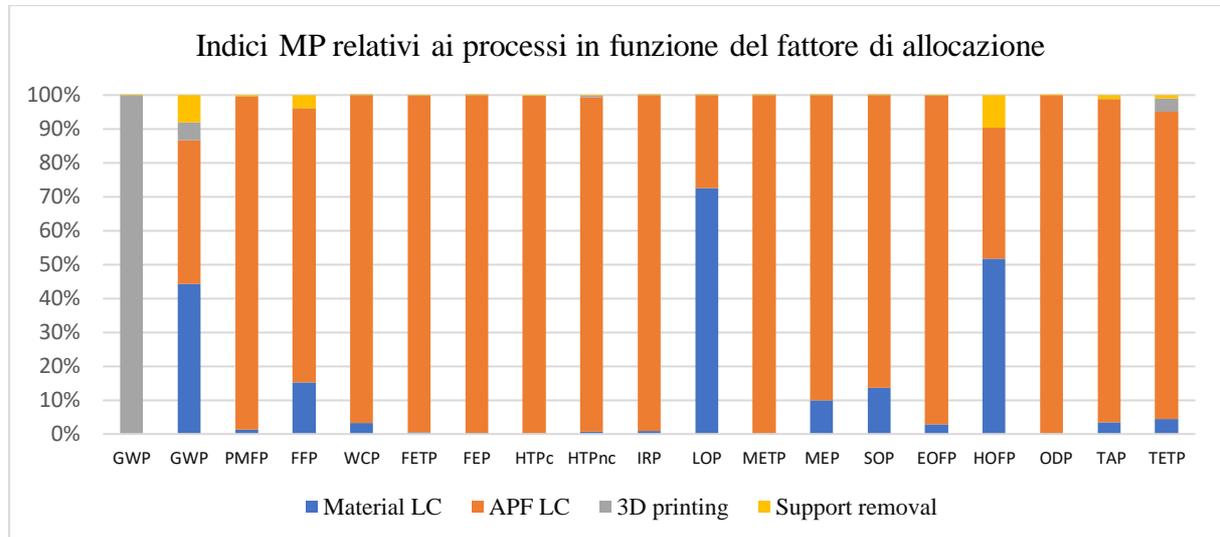


Figura 40 composizione percentuale degli indici MidPoint LCIA dei processi in funzione del fattore d'allocazione

I grafici sopra riportati mostrano la percentuale riferita alle categorie di impatto ambientale in funzione dei processi base della macchina. Si noti come i processi legati al soggetto APF sono quelli che in percentuale maggiore impattano sul sistema, in particolare la fase di produzione della macchina ne costituisce il maggiore contributo.

Migliorare l'aspetto legato alla vita attesa della macchina permetterebbe di ridurre quindi gli impatti totali. L'indicatore GWP è influenzato unicamente dal processo di deposizione di materiale, guidato quindi esclusivamente dal consumo energetico connesso alla lavorazione. Di seguito si verrà presentata la fase di individuazione degli EP.

I risultati fino ora presentati sono parametrizzati sulle proprietà specifiche del prodotto da realizzare, più in particolare sulla modellazione del prodotto in materiale PLA. L'individuazione del modello risolutivo di riferimento permette di applicare lo studio su qualsiasi parte si desideri fabbricare.

### *Visualization EndPoint*

Risulta necessario ora soffermarsi sulla presentazione degli indici di LCIA gerarchici di EndPoint (EP) relazionati al processo di lavorazione additiva necessaria alla costruzione di una mascherina di materiale PLA.

Gli EP considerati saranno cinque:

- Human Health;
- Ecosystem Quality: terrestrial;
- Ecosystem Quality: freshwater
- Ecosystem Quality Marine;
- Resources Scarcity.

Ricordiamo che gli indici di *EndPoint (EP)* sono calcolati mediante ReCiPe v.1.1 in una prospettiva gerarchica (EndPoint H).

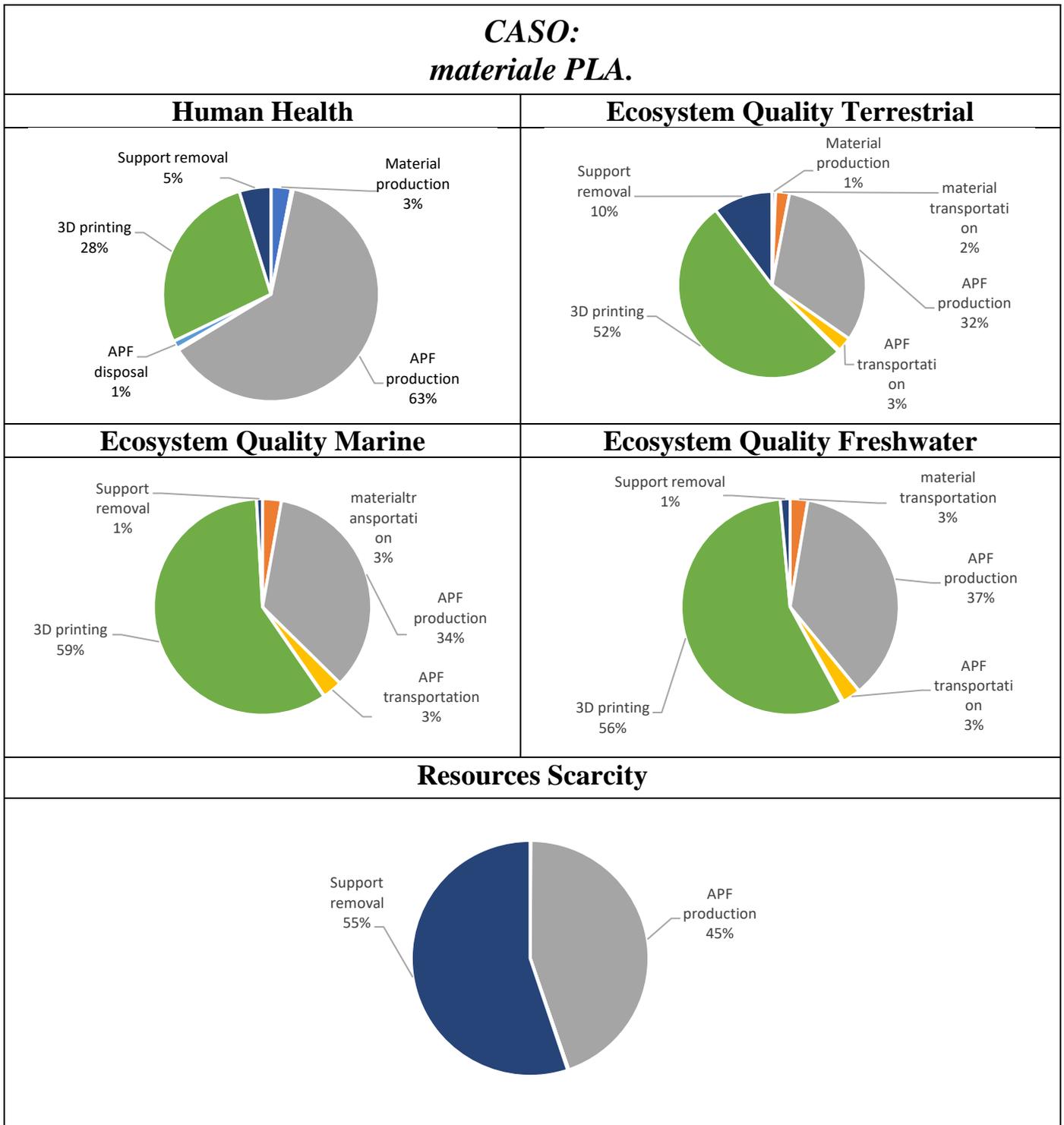


Figura 41 Contributions to ReCiPe 2016 v1.1 EndPont (H) indicators: a) Human Health; b) Resource scarcity; c) Ecosystem quality: terrestrial; d) Ecosystem quality: freshwater; e) Ecosystem quality: marine: produzione di una mascherina in materiale PLA.

La presentazione degli EP di categoria sarà successivamente discussa.

Applichiamo ora il modello risolutivo implementato per una lavorazione identica eccetto che per il materiale plastico utilizzato per la costruzione dell'oggetto.

## 5.4 Confronto degli impatti di lavorazione nel caso si utilizzino materiali differenti: PLA vs ABS

Lo studio di LCA presentato, dedito alla comprensione degli impatti ambientali della tecnologia Arburg, è stato poi implementato in funzione di due tipologie di lavorazione; entrambe si dedicano alla realizzazione di una mascherina munita di filtro respiratore, ma si differenziano in funzione di quello che è il materiale plastico costitutivo: PLA per il primo caso, quello già presentato nel case study, ed ABS per il secondo caso analizzato.

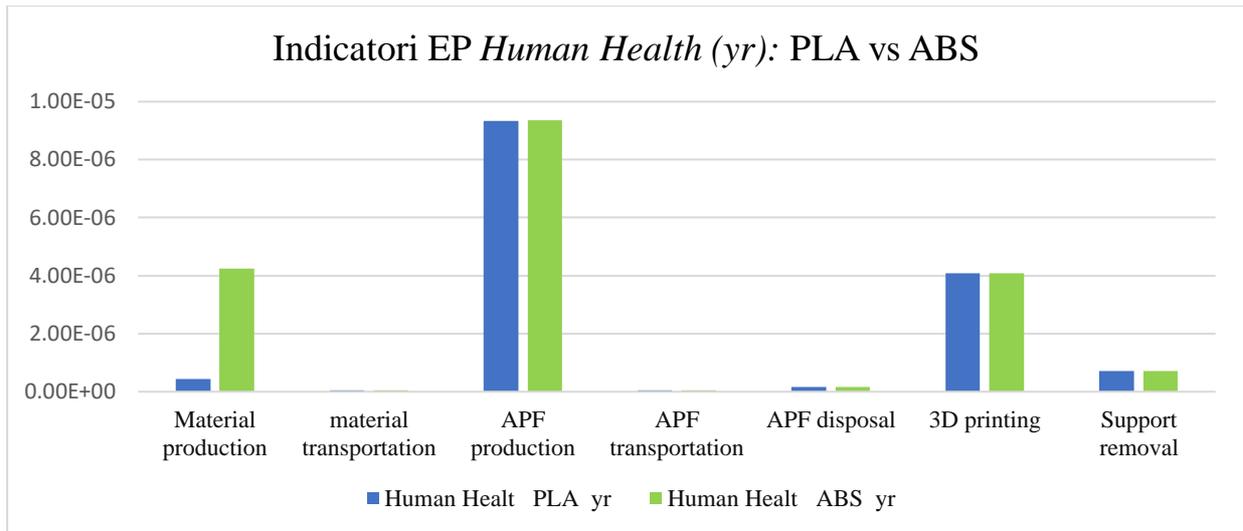
Il modello di riferimento presentato nel capitolo IV è utilizzato come metodologia di analisi per entrambi i materiali.

I parametri di processo utilizzati sono pressochè gli stessi, considerando però il peso specifico dell'ABS:  $1,07 \text{ g/mm}^3$ , comportando così un peso di 0,026kg dell'oggetto mascherina.

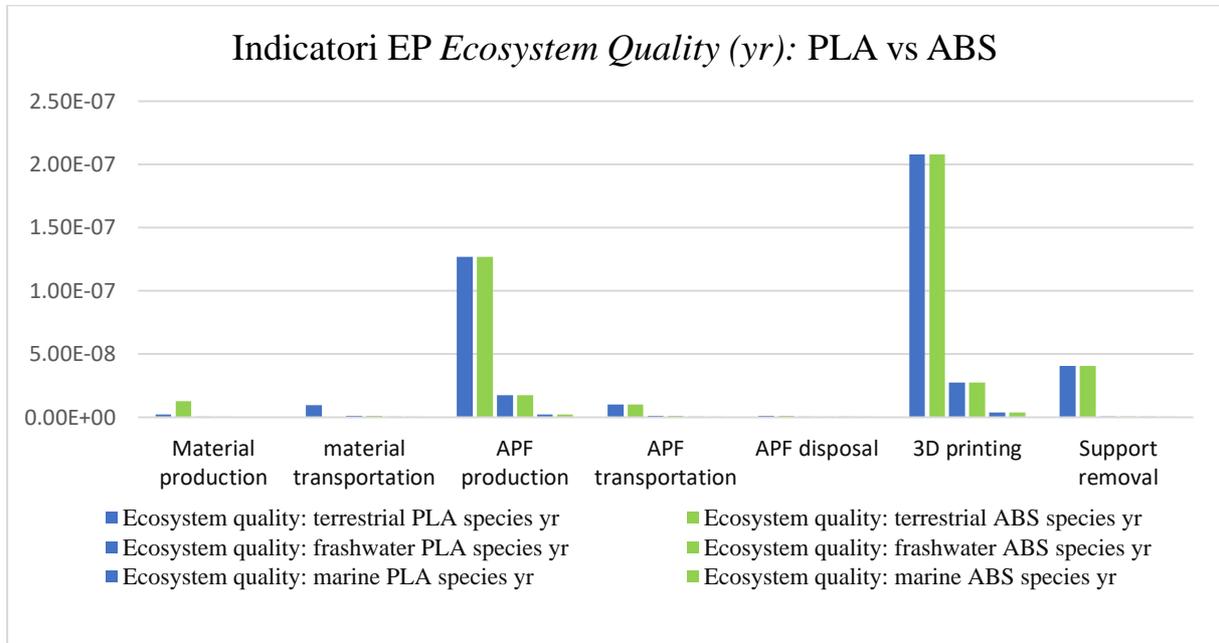
Avendo a disposizione un modello analitico di riferimento per la valutazione degli impatti, basterà modificare i valori coerentemente con i parametri del nuovo materiale utilizzato così da ricavare i contributi in termini di problematiche ambientali.

Mostriamo ora in Fig. 42, 43, 44 gli EP delle tre macro-categorie di impatto individuate in funzione dei due materiali, PLA ed ABS, presentando i risultati in termini assoluti.

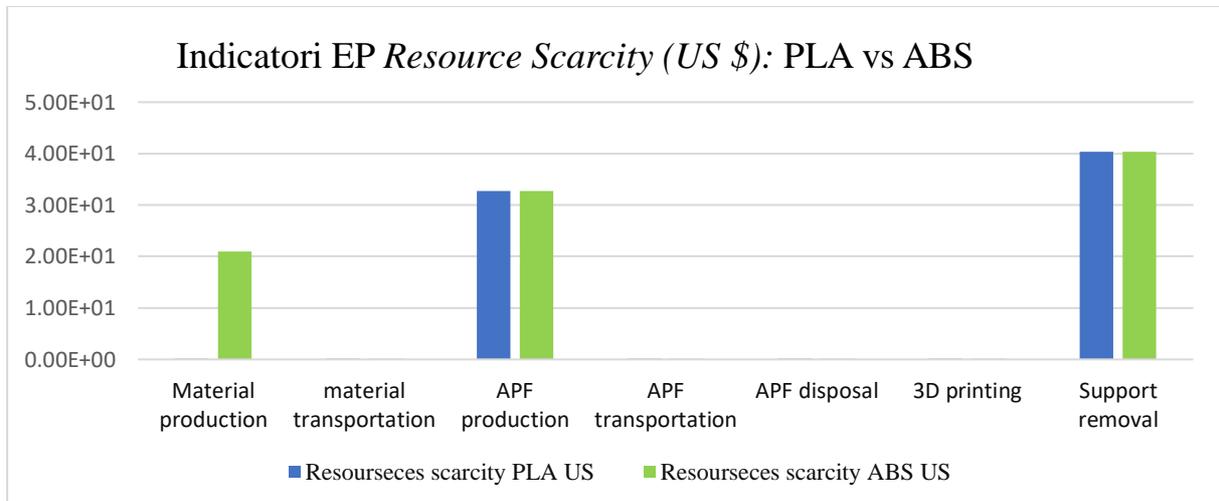
Gli EP riferiti alle categorie ecosistemiche per i due differenti materiali sono molto simili in termini di composizione degli impatti, diverso è per i restanti due ambiti (*Human Health e Resources Scarcity*), dove l'utilizzo di materiale PLA od ABS mostrano degli scostamenti in termini di problematiche ambientali legate alla fase di produzione del materiale plastico.



*Figura 42 Indicatori EP in termini assoluti: Human Health*



*Figura 43 Indicatori EP in termini assoluti: Ecosystem Quality*



*Figura 44 Indicatori EP in termini assoluti: Resource Scarcity*

Dai grafici in Fig 42,43,44 emerge che gli EP mantengono la loro composizione più o meno per tutti i processi del sistema, fatta eccezione per quei processi connessi alla produzione di materiale plastico: tale fase risulta molto più impattante nel caso di fabbricazione in materiale ABS rispetto la configurazione in PLA, esclusivamente per quanto riguarda la categoria di impatto legata al danno sull'uomo e all'utilizzo di risorsa scarsa.

Il fatto che gran parte dei processi impattino allo stesso modo rispetto le due configurazioni è riconducibile al parametro di allocazione considerato.

Le modifiche progettuali apportate al prodotto influenzano direttamente i flussi dei processi, la cui allocazione è effettuata direttamente sui parametri relativi al materiale trattato, nel nostro caso  $m_p$ .

Andiamo così a considerare gli EP in funzione di ciascuna categoria di impatto, constatando le divergenze connesse all'utilizzo dei due materiali.

Per ambedue le casistiche si ottiene una scarsa incidenza percentuale legata alle problematiche ambientali dell'ecosistema: *Terrestrial, Freshwater, Marine*. I tre aspetti delle dinamiche ecosistemiche non sono particolarmente incidenti sul totale degli impatti.

Diverso è per l'indicatore inerente al danno recato all'uomo, in questo caso l'impatto legato alla produzione del materiale passa dal 3% per il PLA al 23% per l'ABS.

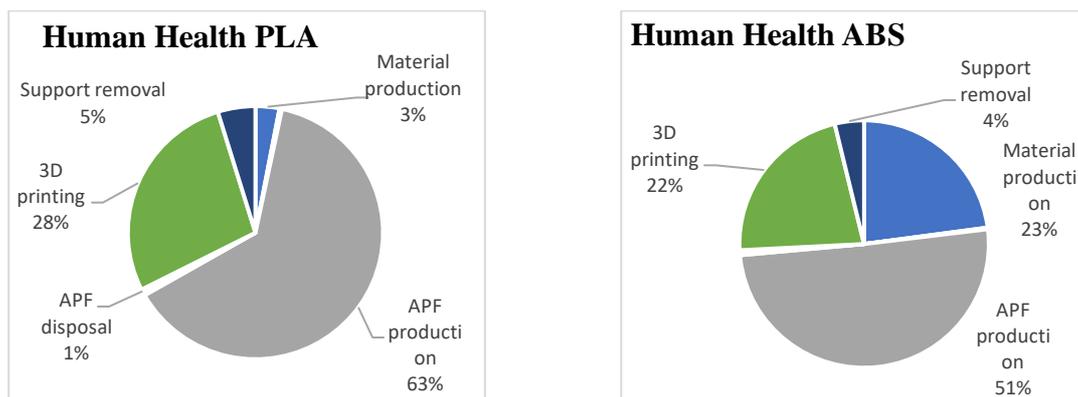


Figura 45 EP Human Healt per la produzione di una masherina in materiale PLA ed ABS

Ancora più significativa è la percentuale di impatti riferiti all'indicatore legato al danno generato dall'utilizzo della risorsa scarsa; se per il PLA risultava essere praticamente

ininfluente il contributo relativo alla produzione di materiale plastico, per il materiale in ABS passa ad una quota del 22 %.

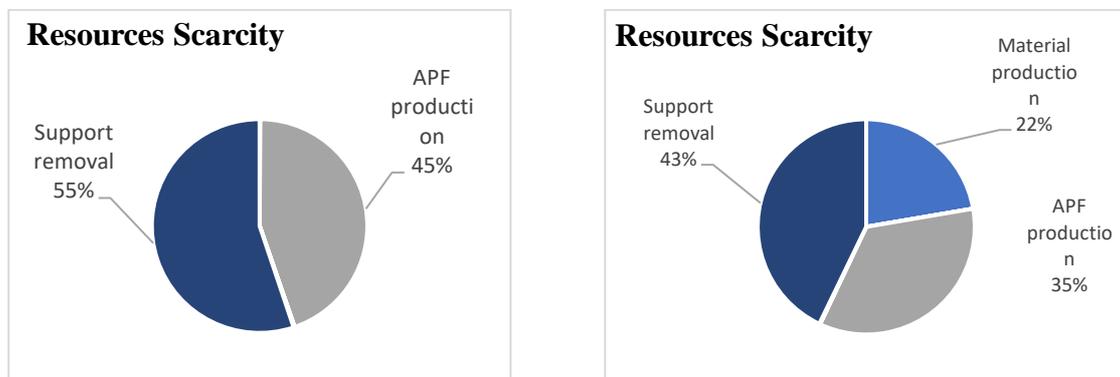


Figura 46 EP Resource Scarcity per la produzione di una masherina in materiale PLA ed ABS

Emerge attraverso questo indicatore (*Resource Scarcity*) l'elevata incidenza in termini di impatti percentuali sulla salute umana nel processo di produzione del materiale plastico. Per entrambi i materiali rimangono molto influenti i processi legati alla produzione della macchina APF.

## 5.5 Risultati ottenuti

In figura 47 e 48 vengono riportati gli indicatori assoluti EP per ciascuna fase del sistema. La rappresentazione grafica degli EP permette di constatare una percentuale significativa di impatti legati al processo di deposizione di materiale inteso come contributo elettrico; questo impatta notevolmente sulle problematiche legate alla qualità dell'ecosistema (*terrestrial, freshwater, marine*) a prescindere del materiale trattato. Per quanto riguarda invece le problematiche legate alla salute umana, il processo di produzione della APF risulta estremamente impattante.

La categoria di EP legata al danno conseguente l'utilizzo di risorse scarse (*Resources Scarcity*) si basa sul contributo fornito dagli impatti connessi alla produzione della macchina, sul contributo del consumabile e, nel caso in cui la lavorazione prevedesse materiale ABS, una quota intorno al 20% degli impatti è attribuibile alla produzione di materiale.

I processi di smaltimento di materiale e le logiche di trasporto non risultano essere ecologicamente problematiche in nessuna delle due casistiche analizzate.

La prevalenza di impatti legati al consumo energetico atto a garantire la lavorazione, unitamente al grande contributo di impatti forniti dalla fase di produzione della macchina, si traducono in una preponderante significatività del parametro di allocazione legato al tempo di lavorazione  $t_c$ .

Nel prossimo paragrafo si presentano le considerazioni legate ai risultati dell'analisi.

	Human Healt	Ecosystem quality: terrestrial	Ecosystem quality: frashwater	Ecosystem quality: marine	Resourceces scarcity
PROCESS	yr	species yr	species yr	species yr	US
Material production	4,47E-07	2,47E-09	1,62E-13	3,75E-17	7,49E-02
materialtransportation	4,56E-08	9,52E-09	1,27E-09	1,80E-10	3,01E-03
APF production	9,35E-06	1,27E-07	1,76E-08	2,22E-09	3,27E+01
APF transportation	4,79E-08	1,00E-08	1,33E-09	1,89E-10	3,17E-03
APF disposal	7,16E-08	1,05E-09	1,29E-10	5,21E-12	9,31E-04
3D printing	4,08E-06	2,08E-07	2,73E-08	3,76E-09	1,05E-01
Support removal	7,02422E-07	4,0784E-08	7,04776E-10	5,67342E-11	40,33337795

*Figura 47 ReCiPe 2016 V1.1 EndPoint (H) indicators, PLA product*

	Human Healt	Ecosystem quality: terrestrial	Ecosystem quality: frashwater	Ecosystem quality: marine	Resourceces scarcity
PROCESS	yr	species yr	species yr	species yr	US
Material production	4,24E-06	1,29E-08	1,22E-10	5,39E-15	2,10E+01
materialtransportation	3,82E-08	7,99E-09	1,06E-09	1,51E-10	2,52E-03
APF production	9,35E-06	1,27E-07	1,76E-08	2,22E-09	3,27E+01
APF transportation	4,79E-08	1,00E-08	1,33E-09	1,89E-10	3,17E-03
APF disposal	7,16E-08	1,05E-09	1,29E-10	5,21E-12	9,31E-04
3D printing	4,08E-06	2,08E-07	2,73E-08	3,76E-09	1,05E-01
Support removal	7,02422E-07	4,0784E-08	7,04776E-10	5,67342E-11	40,33337795

*Figura 48 ReCiPe 2016 V1.1 EndPoint (H) indicators, ABS product*

## 5.6 Discussione dei risultati

Lo studio LCA condotto sui prodotti ha permesso di esplicitare i contributi legati agli impatti ambientali declinati in funzione dei processi e degli attori presenti nel sistema. Ci dedichiamo ora alle possibili considerazioni sui risultati ottenuti.

## Considerazioni sul parametro temporale del processo $t_c$

Il processo di consumo elettrico legato alla fase di deposizione di materiale risulta essere il processo che, assieme alle attività legate alla produzione della APF, maggiormente impatta sulle problematiche ambientali del sistema. Gli indicatori EP relativi al danno recato all'ecosistema (*Ecosystem Quality*) nel processo di consumo elettrico sono compresi tra il 51% ed il 59 % degli impatti totali; si aggirano intorno al 25% (media delle due configurazioni, PLA vs ABS) per la categoria di danno alla salute umana.

Per entrambe le lavorazioni (PLA vs ABS) l'impatto percentuale del processo di consumo elettrico risulta essere pressoché lo stesso. Il contributo così elevato di tale attività è associabile al parametro di processo  $t_c$ , tempo necessario affinché si completi la lavorazione.

Le 2 ore e 46 minuti necessari per la lavorazione sono anche il parametro utilizzato per estrapolare il fattore di allocazione prettamente legato alla macchina APF ( $a_{APF}$ ).

Il processo di produzione della APF è estremamente influente, per tutte e cinque le categorie presenta valori che vanno dal 32 al 63 % del totale degli impatti.

La combinazione delle attività di consumo elettrico e produzione APF, entrambe relazionate al parametro temporale  $t_c$ , fanno di quest'ultimo l'attore del sistema su cui focalizzare maggiormente l'attenzione per quanto riguarda le possibili migliorie.

L'incidenza del parametro temporale consente di valutare l'ipotesi di riduzione del tempo necessario alla lavorazione: questo è possibile facendo leva sulle variabili strettamente legate alla fase di deposizione di materiale e di progettazione del processo.

Nei capitoli precedenti si sono analizzate le dinamiche costitutive del processo additivo: la portata di materiale depositata durante il processo dipende dalla velocità di corsa dell'ugello e dalla porzione di materiale che fuoriesce da quest'ultimo per il movimento oscillatorio del pistone.

Le tempistiche di costruzione dell'oggetto sono influenzate prevalentemente da tali parametri. Lavorando quindi su tali elementi, associati ad una corretta pianificazione del piano di lavoro e dell'orientazione degli oggetti è possibile ridurre il tempo di lavorazione  $t_c$ , diminuendo così la percentuale di impatti ambientali legati al consumo elettrico e alla produzione della macchina APF.

È anche possibile ragionare in termini di riempimento, cercando di impartire precisione estrema nella fase di deposizione di materiale costituente il perimetro dell'oggetto, e velocizzando il processo di riempimento del layer.

C'è anche da sottolineare che la stima pessimistica legata alla vita attesa della macchina, pari a cinque anni, contribuisce ad accrescere, in termini di significatività, il parametro temporale  $t_c$ , in quanto questo è rapportato direttamente alla vita attesa della macchina. Una stima di vita attesa della macchina più longeva permetterebbe di limitare gli impatti ambientali percentuali riferiti alla produzione dell'APF. Altra stima pessimistica è connessa al rendimento della APF.

Le considerazioni legate al parametro temporale sono quindi quelle che più opportunamente presentano possibilità di miglioramento dal punto di vista ambientale.

Si può affermare che migliorare gli impatti ambientali della macchina significa lavorare sulla diminuzione del tempo necessario alla lavorazione, attraverso, quindi, politiche di progettazione e di parametrizzazione estremamente focalizzate sul più rapido ed efficiente processo additivo.

### Considerazioni sulle logiche di trasporto

Per quanto riguarda il trasporto di materiale plastico e il trasporto della APF, questi non risultano essere processi particolarmente critici dal punto di vista ambientale. Il reperimento di materiale plastico (PLA o ABS) dalla sede di Milano, associato al sistema aperto offerto dalla compagnia Arburg (nel quale la standardizzazione qualitativa del materiale rappresenta l'unico vincolo processuale), fa sì che la percentuale delle problematiche ambientali prettamente legate alle fasi di trasporto siano contenute.

Anche il trasferimento della tecnologia dal polo Arburg tedesco all'Università di Bologna (valore sempre intorno al 3% del totale dei contributi) non presenta dinamiche particolarmente impattanti dal punto di vista ambientale.

## Considerazioni sul consumabile

Il contributo della lastra in ABS, consumabile del processo, rappresenta una sorta di costo fisso del sistema. Paghiamo l'impatto ambientale legato alla produzione e smaltimento del consumabile ad ogni lavorazione. L'indicatore EP associato ai danni derivanti l'adozione di risorse scarse gode di una percentuale importante di impatti legati alla fase di post processo, dove il soggetto d'analisi è appunto il consumabile di lavorazione (55% per il PLA, 43% per l'ABS).

Gli altri indicatori EP non sono particolarmente influenzati da tale fase.

Le migliorie implementabili sono quelle che vedono l'applicazione di un materiale ecologicamente più sostenibile, garantendo le proprietà fisico chimiche necessarie alla corretta gestione della lavorazione; come dimostra proprio lo studio, il materiale ABS presenta problematiche ambientali non trascurabili.

## Considerazioni sui due materiali

L'analisi comparativa dei materiali utilizzati per la lavorazione permette di constatare una minore quota percentuale di impatti nel caso in cui la lavorazione avvenga con materiale PLA. I benefici derivanti l'utilizzo di materiale PLA rispetto molti altri polimeri (Giesen et al., 2016) sono riscontrabili da una minore quota percentuale di impatti legati alla salute umana e all'adozione di risorse scarse. L'utilizzo di materiali provenienti da fonti rinnovabili consente una maggiore salvaguardia ambientale, con la possibilità di ridurre il quantitativo di emissioni in ambiente e cercando di valorizzare il più possibile la fase di smaltimento (Tang et al., 2020).

Si precisa infine che tale elaborato si focalizza su un tema estremamente delicato: il tema ambientale. Tutto lo studio si fonda sulla consapevolezza che la ricerca di una sostenibilità ambientale dei processi sia alla base di ogni tipo di applicazione, creando valore non per la singola impresa, bensì sullo scenario collettivo comune.

Proprio quest'ultima considerazione permette di concludere che il materiale plastico ABS presenta delle problematiche ambientali ben più impattanti rispetto l'acido polilattico.

I vantaggi derivanti l'utilizzo di materiali derivati da fonti rinnovabili sono riscontrabili nei risultati di questo elaborato.

Tale risultato non va interpretato come spinta promotrice connessa alla lavorazione presentata, bensì come un modello analitico in grado di supportare le scelte progettuali legate al tema ambientale. Ogni applicazione può essere così sostenuta da uno strumento di stima degli impatti ambientali associati al processo additivo Arburg.

Lo studio possiede valenza pratica se utilizzato in dinamiche comparative, come mostrato all'interno del caso studio applicato su due materiali plastici. Principale limite dell'analisi è legato alla reperibilità dei dati inerenti alle dimensioni e ai materiali dei kit costitutivi della macchina, una maggiore conoscenza sulle dinamiche Arburg permetterebbe una stima più precisa degli impatti ambientali.

## Conclusioni

L'elaborato proposto vuole indagare le tematiche di impatto ambientale connesse alle lavorazioni additive emergenti in campo industriale. La valenza dello studio si fonda proprio sull'implementazione di un modello analitico di calcolo degli impatti ambientali legati alla tecnologia additiva Arburg Plastic Freeformer (APF).

L'elaborazione del modello risolutivo di calcolo si fonda sui principi del Life Cycle Thinking e più specificatamente sul modello LCA. Il metodo proposto permette di quantificare numericamente gli impatti associati a differenti lavorazioni su macchinario APF, offrendosi come strumento di supporto alle fasi di progettazione.

La poca documentazione nell'ambito delle tecnologie additive e delle connesse problematiche ambientali spinge tale elaborato ad assumere valenza documentale in quanto fornisce informazioni legate ad un processo ad alto contenuto tecnologico e con limitate testimonianze scientifiche.

Il contributo in ambito scientifico associato a tale documento risiede nel modello di indagine proposto, in grado di stimare i danni provocati da una tecnologia per quanto concerne il tema della sostenibilità ambientale.

La definizione del modello ha permesso di considerare l'intero sistema scomposto nelle sue unità funzionali, andandone a quantificare gli impatti.

Il modello, una volta definito, è stato applicato ad un caso di studio così da visualizzarne i risultati. Tali risultati sono presentati attraverso due step applicativi: MidPoint (MP) ed EndPoint (EP), calcolati mediante ReciPe v.1.1 in una prospettiva gerarchica (MidPoint, EnPoint: H).

L'applicazione di questo metodo ad un prodotto consente di confrontare tutte le fasi del ciclo di vita, sottolineando i contributi più critici a livello di EP.

Viene ulteriormente proposta una analisi comparativa legata alla possibilità di effettuare la lavorazione con due materiali differenti: PLA vs ABS.

I risultati ottenuti dallo studio mostrano come tale metodo sia in grado di indirizzare, attraverso appunto studi comparativi, le scelte di progettazione in funzione della sostenibilità del sistema.

I risultati hanno inoltre mostrato una grande rilevanza, in termini di impatti ambientali, di quello che è il processo di costruzione dell'oggetto inteso come consumo elettrico. Assieme a questo, altro processo estremamente rilevante, è quello connesso alla fase di produzione della APF. Tali considerazioni fanno del parametro temporale, inteso come tempo di lavorazione, la variabile protagonista di possibili migliorie.



# APPENDIX A1

## Life Cycle Inventory of the machine APF

PROCESS	DATASET	UNIT	LOCATION	REFERENCE AMMOUNT
steel production	steel production. electric. low-alloyed	kg	RoW	$m \times a_{APF}$
Polycarbonate production	polycarbonate production	kg	RoW	$m \times a_{APF}$
Polystyrene Production	polystyrene production. expandable	kg	RoW	$m \times a_{APF}$
Rubber production	synthetic rubber production	kg	RoW	$m \times a_{APF}$
Circuit board fabrication	integrated circuit production. logic type	kg	GLO	$m \times a_{APF}$
Cable production	cable production. unspecified	kg	GLO	$m \times a_{APF}$
Copper production	copper production. primary	kg	RoW	$m \times a_{APF}$
Glass production	flat glass production. uncoated ecoinvent	kg	RoW	$m \times a_{APF}$
Termoisolant production	Glass production and fiberglass production	kg	RoW	$m \times a_{APF}$
Silicone production	silicone product production	kg	GLO	$m \times a_{APF}$
HDPE production	polyethylene production. high density. Granulate	kg	RoW	$m \times a_{APF}$
Alluminium Production	Aluminium production	kg	RoW	$m \times a_{APF}$
steel manufacturing	metal working. average for steel product manufacturing	kg	RoW	$m \times a_{APF}$
Injection moulding	injection moulding	kg	RoW	$m \times a_{APF}$
Alluminium manufacturing	metal working. average for aluminium product manufacturing	kg	RoW	$m \times a_{APF}$
Injection moulding	injection moulding	kg	RoW	$m \times a_{APF}$
steel disposal	alluminium disposal	kg	RoW	$m \times a_{APF}$
Plastic Incineration (generic)	treatment of waste plastic. mixture. municipal incineration	kg	RoW	$m \times a_{APF}$
Electronics disposal	treatment of waste electric and electronic equipment. shredding	kg	GLO	$m \times a_{APF}$
PS Disposal	treatment of waste expanded polystyrene. municipal incineration	kg	RoW	$m \times a_{APF}$
Plastic Incineration (generic)	treatment of waste plastic. mixture. municipal incineration	kg	RoW	$m \times a_{APF}$
Glass disposal	treatment of municipal solid waste. Incineration	kg	IT	$m \times a_{APF}$
Waste incineration (generic)	treatment of municipal solid waste. Incineration	kg	IT	$m \times a_{APF}$
Alluminium disposal	treatment of waste aluminium. sanitary landfill	kg	RoW	$m \times a_{APF}$

### Life Cycle Inventory of the Material: PLA

PROCESS	DATASET	UNIT	LOCATION	REFERENCE AMMOUNT
PLA production	Poly lactide Production	kg	RoW	$m \times m_p$
lorry transportation	market for transport. freight. lorry. unspecified	kg	RER	$m \times m_p$

### Life Cycle Inventory of the Material: ABS

PROCESS	DATASET	UNIT	LOCATION	REFERENCE AMMOUNT
PLA production	Acrylonitrile Butadiene styrene ABS production	kg	RoW	$m \times m_p$
lorry transportation	market for transport. freight. lorry. unspecified	kg	RER	$m \times m_p$

### Life Cycle inventory of the Consumable: ABS

PROCESS	DATASET	UNIT	LOCATION	REFERENCE AMMOUNT
ABS production	Acrylonitrile Butadiene styrene ABS production	kg	RoW:	$m_l$
Plastic incineration (generic)	treatment of waste plastic. mixture. municipal incineration	kg	RoW:	$m_l$

## APPENDIX A11

### Life Cycle Inventory of the APF in function of the kit

	PROCESS	AMOUNT [kg]	DATASET
Set Utensili Production	steel production	13,1237	steel production. electric. low-alloyed
	Polycarbonate production	0,033	polycarbonate production
	IT Production	1,2	IT set utensili
	Polystirene Production	5,89	polystyrene production. expandable
	Rubber production	0,157	synthetic rubber production
Set Utensili Disposal	steel disposal	13,1237	Alluminium disposal
	Plastic Incineration (generic)	0,033	treatment of waste plastic. mixture. municipal incineration
	Electronics disposal	1,2	treatment of waste electric and electronic equipment. Shredding
	PS Disposal	5,89	treatment of waste expanded polystyrene. municipal incineration
	Plastic Incineration (generic)	0,157	treatment of waste plastic. mixture. municipal incineration
Set Utensili Manufacturing	steel manufacturing	13,1237	metal working. average for steel product manufacturing
	Injection moulding	0,033	injection moulding
IT Set utensili	Circuit board fabrication	0,003	integrated circuit production. logic type
	Cable production	0,02	cable production. Unspecified
	Copper production	0,01	copper production. primary
	Steel production	0,125	steel production. electric. low-alloyed
	Alluminium production	0,02	Aluminium production
	rubber production	0,01	synthetic rubber production
Frame Preassembled Production	steel production	212,453	steel production. electric. low-alloyed
	Polycarbonate production	6,9615	polycarbonate production
	Polystirene production	2,94	polystyrene production. expandable
	Rubber production	0,2	synthetic rubber production
Frame Preassembled Disposal	steel disposal	212,453	Alluminium disposal
	Plastic Incineration (generic)	6,9615	treatment of waste plastic. mixture. municipal incineration
	PS Disposal	2,94	treatment of waste expanded polystyrene. municipal incineration
	Plastic Incineration (generic)	0,2	treatment of waste plastic. mixture. municipal incineration
Frame Preassembled Manufacturing	steel manufacturing	212,453	metal working. average for steel product manufacturing
	Injection moulding	6,9615	injection moulding
Telaio Tavolo Production	steel production	46,186	steel production. electric. low-alloyed
	Rubber production	0,008	synthetic rubber production
Telaio Tavolo Disposal	steel disposal	46,186	Alluminium disposal
	Plastic Incineration (generic)	0,008	treatment of waste plastic. mixture. municipal incineration
T. tavolo manufacturing	steel manufacturing	46,186	metal working. average for steel product manufacturing
Rotazione Monitor production	steel production	23,515	steel production. electric. low-alloyed
	Polycarbonate production	1,4372	polycarbonate production
	IT Production	3,69	IT Kit rotazione monitor

rotazione Monitor Disposal	steel disposal	23,515	Alluminium disposal
	Plastic Incineration (generic	1,4372	treatment of waste plastic. mixture. municipal incineration
	Electronics disposal	3,754	treatment of waste electric and electronic equipment. Shredding
Rotazione Monitor Manufacturing	steel manufacturing	23,515	metal working. average for steel product manufacturing
	Injection moulding	1,4372	injection moulding
Rotazione Monitor IT	Circuit board fabrication	0,002	integrated circuit production. logic type
	Cable production	0,03	cable production. unspecified
	PC production	1,92	polycarbonate production
	steel production	0,86	steel production. electric. low-alloyed
	Copper production	0,02	copper production. primary
	rubber production	0,058	synthetic rubber production
	Glass Production	0,8	flat glass production. uncoated
Custodia camera production	steel production	61,568	steel production. electric. low-alloyed
	Polycarbonate production	36	polycarbonate production
	Silicone production	1,1921	silicone product production
	Glass production	15,1274	flat glass production. uncoated
	Termoisolant production	10	Fiberglass and glass production
	IT production	0,1379	IT Custodia Camera
	Rubber production	0,2	synthetic rubber production
Custodia camera Disposal	structural steel disposal	61,568	Alluminium disposal
	Plastic Incineration (generic)	36	treatment of waste plastic. mixture. municipal incineration
	Plastic Incineration (generic)	1,1921	treatment of waste plastic. mixture. municipal incineration
	Glass disposal	15,1274	treatment of municipal solid waste. Incineration
	Waste incineration (generic)	2	treatment of municipal solid waste. incineration
	Electronics disposal	0,6379	treatment of waste electric and electronic equipment. shredding
	Plastic Incineration (generic)	0,2	treatment of waste plastic. mixture. municipal incineration
Custodia camera Manufacturing	steel manufacturing	61,568	metal working. average for steel product manufacturing
	injection moulding	36	injection moulding
Custodia camera IT	Cable production	0,0385	cable production. unspecified
	rubber production	0,0214	synthetic rubber production
	Steel production	0,059	steel production. electric. low-alloyed
	Copper production	0,019	copper production. primary
Protezione sportello Production	steel production	9,364	steel production. electric. low-alloyed
	Polycarbonate production	7,829	polycarbonate production
	Glass Production	13,61	flat glass production. uncoated
	IT production	0,075	IT Protezione Sportello
	Rubber production	0,3771	synthetic rubber production
Protezione sportello disposal	steel disposal	9,364	Alluminium disposal
	Plastic Incineration (generic	7,829	treatment of waste plastic. mixture. municipal incineration
	Glass disposal	0	treatment of municipal solid waste. incineration
	Electronics disposal	0,077	treatment of waste electric and electronic equipment. Shredding
	Plastic Incineration (generic)	0,3771	treatment of waste plastic. mixture. municipal incineration

Protezione sportello manufacturing	steel manufacturing	9,364	metal working. average for steel product manufacturing
	injection moulding	7,829	injection moulding
Protezione sportello IT	Circuit board fabrication	0,002	integrated circuit production. logic type
	Alluminium production	0,035	aluminium production. primary. ingo
	Glass Production	0,024	flat glass production. uncoated ecoinvent
	Copper production	0,014	copper production. primary
Kit Riscaldamento Production	steel production	6,688	steel production. electric. low-alloyed
	Polycarbonate production	4,4056	polycarbonate production
	Silicone production	1,635	silicone product production
	Termoisolant production	1	Fiberglass and glass production
	IT production	0,2376	Kit Riscaldamento IT
Kit Riscaldamento disposal	Glass production	4	flat glass production. uncoated
	structural steel disposal	6,688	Alluminium disposal
	Plastic Incineration (generic)	4,4056	treatment of waste plastic. mixture. municipal incineration
	Plastic Incineration (generic)	1,635	treatment of waste plastic. mixture. municipal incineration
	Waste Inciniration (generic)	1,5	treatment of municipal solid waste. incineration
	Electronics disposal	0,3376	treatment of waste electric and electronic equipment. shredding
Kit Riscaldamento manufacturing	steel manufacturing	6,688	metal working. average for steel product manufacturing
	injection moulding	4,4056	injection moulding
Kit Riscaldamento IT	Cable production	0,0916	cable production. unspecified
	Copper production	0,049	copper production. primary
	rubber production	0,071	synthetic rubber production
	Alluminium production	0,026	aluminium production. primary. ingot
HOHAG Production	steel production	7,452	steel production. electric. low-alloyed
	Termoisolant production	1,5	Fiberglass and glass production
	IT production	1,646	HOHAG IT
	Rubber production	0,0103	synthetic rubber production
HOHAG disposal	structural steel disposal	7,452	Alluminium disposal
	Waste Incineration (generic)	1,2	treatment of municipal solid waste. incineration
	Electronics disposal	2,448	treatment of waste electric and electronic equipment. shredding
	Plastic Incineration (generic)	0,0103	treatment of waste plastic. mixture. municipal incineration
HOHAG manufacturing	steel manufacturing	7,452	metal working. average for steel product manufacturing
HOHAG IT	Cable production	0,18	cable production. unspecified
	Copper production	0,28	copper production. primary
	Steel production	0,842	steel production. electric. low-alloyed
	PC production	0,137	polycarbonate production
	rubber production	0,203	synthetic rubber production
	Circuit board fabrication	0,004	integrated circuit production. logic type
Prot completa Production	steel production	15,012	teel production. electric. low-alloyed
	Polycarbonate production	55,7022	polycarbonate production
Prot completa disposal	steel disposal	15,012	Alluminium disposal
	Plastic Incineration (generic)	55,7022	treatment of waste plastic. mixture. municipal incineration

Prot completa	steel manufacturing	15,012	metal working. average for steel product manufacturing
Azionamento dosaggio Production	steel production	10,69	steel production. electric. low-alloyed
	Polycarbonate production	1,55	polycarbonate production
	IT production	12,905	Azionamento Dosaggio IT
azionamento dosaggio disposal	steel disposal	10,69	Alluminium disposal
	Plastic Incineration (generic)	1,55	treatment of waste plastic. mixture. municipal incineration
	Electronics disposal	12,989	treatment of waste electric and electronic equipment. shredding
azionamento dosaggio manufacturing	steel manufacturing	10,69	metal working. average for steel product manufacturing
	injection moulding	1,55	injection moulding
IT	Cable production	0,09	cable production. unspecified
	Copper production	0,178	copper production. primary
	Steel production	7,3	steel production. electric. low-alloyed
	rubber production	0,134	synthetic rubber production
	Circuit board fabrication	0,003	integrated circuit production. logic type
	Alluminium production	3,9	aluminium production. primary. ingot
	PC production	1,3	polycarbonate production
Azionamento Iniezione production	steel production	15,93	steel production. electric. low-alloyed
	Silicone production	0,284	silicone product production
	Rubber production	0,0964	synthetic rubber production
Azionamento Iniezione disposal	structural steel disposal	15,93	Alluminium disposal
	Plastic Incineration (generic)	0,284	treatment of waste plastic. mixture. municipal incineration
	Plastic Incineration (generic)	0,0964	treatment of waste plastic. mixture. municipal incineration
Azionamento Iniezione M.	steel manufacturing	15,93	metal working. average for steel product manufacturing
Tramoggia Granulato Production	steel production	4,6108	steel production. electric. low-alloyed
	Silicone production	0,3928	silicone product production
	IT production	1,204	Tramoggia Granulato IT
	Rubber production	0,0074	synthetic rubber production
Tramoggia Granulato disposal	structural steel disposal	4,6108	Alluminium disposal
	Plastic Incineration (generic)	0,3928	treatment of waste plastic. mixture. municipal incineration
	Electronics disposal	1,204	treatment of waste electric and electronic equipment. shredding
	Plastic Incineration (generic)	0,0074	treatment of waste plastic. mixture. municipal incineration
Tramoggia Granulato M.	steel manufacturing	4,6108	metal working. average for steel product manufacturing
	Cable production	0,025	cable production. unspecified
	Steel production	0,764	steel production. electric. low-alloyed
	Circuit board fabrication	0,003	integrated circuit production. logic type
	rubber production	0,131	synthetic rubber production ecoinvent
	Copper production	0,043	copper production. primary
	PC production	0,238	polycarbonate production
Termoplastici Production	steel production	0,4798	steel production. electric. low-alloyed
	IT production	0,563	Termoplastici IT
	steel production	2,18	steel production. electric. low-alloyed
	steel disposal	0,4798	Alluminium disposal

Termoplastici disposal	Electronics disposal	0,669	treatment of waste electric and electronic equipment. shredding
	steel disposal	2,18	Alluminium disposal
Termoplastici Manufacturing	steel manufacturing	0,4798	polycarbonate production
	steel manufacturing	2,18	metal working. average for steel product manufacturing
Termoplastici IT	Cable production	0,087	cable production. unspecified
	Circuit board fabrication	0,003	integrated circuit production. logic type
	Copper production	0,056	copper production. primary
	PC production	0,245	polycarbonate production
	rubber production	0,172	synthetic rubber production
Unità Scarico Production	steel production	4,058	steel production. electric. low-alloyed
	IT production	5,686	Unità scarico IT
Unità Scarico disposal	steel disposal	4,058	Alluminium disposal
	Electronics disposal	5,791	treatment of waste electric and electronic equipment. shredding
Unità Scarico M.	steel transformation	4,058	metal working. average for steel product manufacturing
Unità Scarico IT	Cable production	0,034	cable production. unspecified
	Steel production	3,1	steel production. electric. low-alloyed
	Copper production	0,098	copper production. primary
	rubber production	0,031	synthetic rubber production
	PC production	1,3	polycarbonate production
	Alluminium production	1,12	aluminium production. primary. ingot
	Circuit board fabrication	0,003	integrated circuit production. logic type
Puntale Ugello P.	steel production	0,016	steel production. electric. low-alloyed
Puntale Ugello D.	structural steel disposal	0,016	Alluminium disposal
Puntale Ugello M.	steel manufacturing	0,016	metal working. average for steel product manufacturing
Termoregolatore Production	steel production	1,976	steel production. electric. low-alloyed
	Silicone production	0,9171	silicone product production
	Alluminium Production	3,177	aluminium production. primary. ingot
	IT production	0,345	Termoregolatore IT
	pump production	4	steel production. electric. low-alloyed
	Rubber production	0,271	synthetic rubber production
Termoregolatore disposal	HDPE production	0,998	polyethylene production. high density. granulate
	steel disposal	1,976	Alluminium disposal
	Plastic Incineration (generic)	0,9171	treatment of waste plastic. mixture. municipal incineration
	Alluminium disposal	3,177	treatment of waste aluminium. sanitary landfill
	Electronics disposal	0,545	treatment of waste electric and electronic equipment. shredding
	Plastic Incineration (generic)	0,271	treatment of waste plastic. mixture. municipal incineration
	Pump disposal	4	Alluminium disposal
	PS Disposal	0,998	treatment of waste expanded polystyrene. municipal incineration
Termoregolatore manufacturing	steel manufacturing	1,976	metal working. average for steel product manufacturing
	Alluminium manufacturing	3,177	metal working. average for aluminium product manufacturing
	Pump transformation	4	metal working. average for steel product manufacturing
	injection moulding	0,998	injection moulding

Termoregolatore IT	Cable production	0,028	cable production. unspecified
	Copper production	0,033	copper production. primary
	rubber production	0,097	synthetic rubber production
	Alluminium production	0,187	aluminium production. primary. ingot
Trasmissione corsa Production	steel production	2,833	steel production. electric. low-alloyed
	Rubber production	0,04	synthetic rubber production
Trasmissione corsa disposal	structural steel disposal	2,833	Alluminium disposal
	Plastic Incineration (generic)	0,04	treatment of waste plastic. mixture. municipal incineration
Trasmissione corsa M.	steel manufacturing	2,833	metal working. average for steel product manufacturing
Tubi Flessibili production	steel production	19,953	steel production. electric. low-alloyed
	IT production	10,419	Tubi flessibili IT
	Neodymio production	0,0084	null process
Tubi Flessibili disposal	steel disposal	19,953	Alluminium disposal
	Electronics disposal	10,626	treatment of waste electric and electronic equipment. shredding
	Neodymio disposal	0,0084	null process
Tubi Flessibili M.	steel manufacturing	19,953	metal working. average for steel product manufacturing
Tubi Flessibili IT	Cable production	0,24	cable production. unspecified
	Copper production	0,121	copper production. primary
	Steel production	8,73	steel production. electric. low-alloyed
	rubber production	0,345	synthetic rubber production
	PC production	0,98	polycarbonate production
	Circuit board fabrication	0,003	integrated circuit production. logic type
Servo Axes production	structural steel production	0,0938	steel production. electric. low-alloyed
	Polycarbonate production	1,7922	polycarbonate production
	Rubber production	0,0353	synthetic rubber production
	Alluminium Production	0,54	aluminium production. primary. ingot
servo Axes disposal	structural steel disposal	0,0938	Alluminium disposal
	Plastic Incineration (generic)	1,7922	treatment of waste plastic. mixture. municipal incineration
	Plastic Incineration (generic)	0,0353	treatment of waste plastic. mixture. municipal incineration
	Alluminium disposal	0,54	treatment of waste aluminium. sanitary landfill
servo Axes Manufacturing	steel manufacturing	0,0938	metal working. average for steel product manufacturing
	injection moulding	1,7922	injection moulding
	Alluminium manufacturing	0,54	metal working. average for aluminium product manufacturing
Kit Pompa Production	steel production	0,164	steel production. electric. low-alloyed
	Alluminium Production	7,071	aluminium production. primary.
	IT production	0,81	Kit Pompa IT
kit Pompa disposal	structural steel disposal	0,164	Alluminium disposal
	Alluminium disposal	7,071	treatment of waste aluminium. sanitary landfill
	Electronics disposal	0,81	treatment of waste electric and electronic equipment. shredding
kit Pompa Manufacturing	steel manufacturing	0,164	metal working. average for steel product manufacturing
	Alluminium manufacturing	7,071	metal working. average for aluminium product manufacturing

kit Pompa IT	Cable production	0,101	cable production. unspecified
	Steel production	0,198	steel production. electric. low-alloyed
	Copper production	0,086	copper production
	rubber production	0,138	synthetic rubber production
	PC production	0,287	polycarbonate production
Vacum Hoses Production	steel production	0,2478	steel production. electric. low-alloyed
	Silicone production	1,627	silicone product production
vacum Hoses disposal	structural steel disposal	0,2478	Alluminium disposal
	Plastic Inceneration (Generic)	1,627	treatment of waste plastic. mixture. municipal incineration
vacum Hoses M.	steel manufacturing	0,2478	metal working. average for steel product manufacturing

## BIBLIOGRAFIA

Framework to combine technical, economic and environmental points of view of additive manufacturing processes” Mazyar Yosofi\*, Olivier Kerbrat, Pascal Mognol 2018

“Standardization in additive manufacturing: activities carried out by international organizations and projects” M. D. Monzón & Z. Ortega & A. Martínez & F. Ortega)

“Industry sector analysis for the application of additive manufacturing in smart and distributed manufacturing systems” *Erwin Rauch, Marco UnterHofer, Patrick Dallasega* 2017

“Microstructural characterization, applications and process study of various additive manufacturing process: A review”. Gagan Bansal†, Desh Bandhu Singh, Harpreet Singh Virk, Abhinav Devrani, Abhishek Bhandari (Department of Mechanical Engineering, Graphic Era Deemed to be University, Dehradun, India) 2020

“Traditional vs Additive Manufacturing Supply Chain Configurations: A Comparative Case Study” Ajeseun Jimo, Christos Braziotis, Helen Rogers and Kulwant Pawara Nottingham (University Business School, Jubilee Campus, Nottingham, NG8 1BB, UK Technische Hochschule Nürnberg, Bahnhofstraße 87, 90402 Nürnberg, Deutschland, Germany) 2019

Geometric consideration of support structures in part overhang fabrications by electron beam additive manufacturing”, Bo Cheng, Kevin Chou, 2015 (Department of Mechanical Engineering, The University of Alabama, Tuscaloosa, AL35487, United States), 2015

“Additive manufacturing and its societal impact: a literature review” Samuel H. Huang & Peng Liu & Abhiram Mokasdar & Liang Hou, 2012

“The effect of additive manufacturing adoption on supply chain flexibility and performance: An empirical analysis from the automotive industry” Mia Delic,\*, Daniel R. Eyers (University of Zagreb, Faculty of Economics and Business, Zagreb, Croatia bLogistics Systems Dynamics Group, Cardiff Business School, Cardiff University, Cardiff, UK), 2020

“Company-customer interaction in mass customization” Peter-J.Jost, Theresa Süsler (Chair of Organization Theory, WHU – Otto Beisheim School of Management, Burgplatz 2, D-56179, Vallendar, Germany), 2020

G. Campana, M. Mele. “Sistemi integrati di lavorazione”; Ed. Esculapio (2019).

“Effect of mesh parameters in finite element simulation of single point incremental sheet forming process” Kurra Suresh, Srinivasa Prakash Regalla (Department of Mechanical Engineering, Birla Institute of Technology and Science pilani-Hyderabad campus, Hyderabad, India), 2014

“Automated manufacturing and processing of fiber-reinforced polymer(FRP) composites: An additive review of contemporary and modern techniques for advanced materials manufacturing” Jolie Frketic, Tarik Dickens,\*, (Subramanian Ramakrishnanba High Performance Materials Institute, Florida A&M University-Florida State University College of Engineering, 2525 Pottsdamer St., Tallahassee, FL 32310, United States bDepartment of Chemical and Biomedical Engineering, Florida A&M University-Florida State University College of Engineering, 2525 Pottsdamer St., Tallahassee, FL 32310, United States), 2017

“Direct generation of extended STL file from unorganized point data” Yin Z.W.\*(School of Mechanical Engineering of Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China), 2011

“Automatic Support Removal for Additive Manufacturing Post Processing” Saigopal Nelaturi Morad Behandish Amir M.Mirzendehtdel Johande Kleer, 2019

“Effects of post homogeneity heat treatment processes on microstructure evolution behavior and tensile mechanical properties of laser additive manufactured ultrahigh-strength AerMet100 steel “ Xian-zhe Rana., Dong Liua, , Jia Lia,\*, Xiao Liuc, Hua-ming Wanga, Xu Chenga, Bei He, Hai-bo Tanga, (National Engineering

Laboratory of Additive Manufacturing for Large Metallic Components, 37 Xueyuan Road, Beijing 100191, China  
Engineering Research Center of Ministry of Education on Laser Direct Manufacturing for Large Metallic Component, 37 Xueyuan Road, Beijing 100191, China  
School of Materials Science and Engineering, Beihang University, 37 Xueyuan Road, Beijing 100191, China)

“Life cycle impact assessment of desktop stereolithography” Mattia Mele\*, Giampaolo Campana, Giulia D’Avino (University of Bologna, Department of Mechanical Engineering, Viale Risorgimento 2, 40136, Bologna, BO, Italy), 2020

“Investigating the limits of resin-based luting composite photopolymerization through various thicknesses of indirect restorative materials” C.M.F. Hardya,b,c,\*, S. Bebelmanc, G. Leloupa,b,c,d, M.A. Hadise,W.M. Paline, J.G. Leprincea (School of Dental Medicine and Stomatology, at Cliniques Universitaires Saint-Luc, Université catholique de Louvain, Belgium  
Advanced Drug Delivery and Biomaterials (ADDB), Louvain Drug Research Institute (LDRI), Université catholique de Louvain, Brussels, Belgium  
Bio- and Soft- Matter (BSMA), Institute of Condensed Matter and Nanoscience (IMCN), Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, Belgium  
CRIBIO (Center for Research and Engineering on Biomaterials), Brussels, Belgium  
Biomaterials Unit, University of Birmingham, College of Medical and Dental Sciences, Institute of Clinical Sciences, School of Dentistry, 5 Mill Pool Way, Birmingham B5 7EG, UK), 2018

I.Gibson, D.Rosen, B.Stucker, Additive Manufacturing Technologies - 3D Printing, Rapid Prototyping and Direct Digital Manufacturing, Editore: Springer, (2015).

“Additive Manufacturing of ceramic components by Digital Light Processing: A comparison between the “bottom-up” and the “top-down” approaches”, Oscar Santoliquidoa,\*, Paolo Colombob,c, Alberto Ortona (MEMTi, SUPSI-DTI, Via Cantonale 2C, CH-6928, Manno, Switzerland  
Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università di Padova, 35131, Padova, Italy  
Department of Materials Science and Engineering, The Pennsylvania State University, University Park, PA, 16802, USA), 2019

“Understanding the effects of formulation and process variables on the printlets quality manufactured by selective laser sintering 3D printing” Sogra F. Barakh Alia, Eman M. Mohameda,b, Tanil Ozkanc, Mathew A. Kuttolamadomd, Mansoor A. Khana, Amir Asadid, Ziyaur Rahmana,\*, Alma Lerma Rangel (College of Pharmacy, Texas A&M Health Science Center, Texas A&M University, College Station, TX 77843, USA  
Department of Pharmaceutics, Faculty of Pharmacy, Beni-Suef University, Beni-Suef 62514, Egypt  
Dover Precision Components, Woodlands, TX, USA  
Dept. of Engineering Technology & Industrial Distribution, College of Engineering, Texas A&M University, College Station, TX 77843, USA), 2019

“Effect of microwave treatment on bending properties of carbon nanotube/wood plastic composites by selective laser sintering” Yunhe Zhanga,†, Yanhong Cuia, Sian Wang, Xiwang Zhaoa, Fanming Wang, Gaohui (Wuba College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin, PR China  
School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, PR China), 2020

Zhao R, Gao J, Liao H, Fenineche N, Coddet C, Selective laser melting of elemental powder blends for fabrication of homogeneous bulk material of near-eutectic Ni<sub>3</sub>Al-20Sn composition, Additive Manufacturing (2020), doi:<https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101261>

K.Shahzad et al., 2014 “Additive manufacturing of zirconia parts by indirect selective laser sintering”, Journal of the European Ceramic Society, 34, pp 81–89.

“Analisi dello stato tensionale a flessione di strutture reticolari stampate con tecnologia SLM (Selective Laser Melting) tramite test meccanici e correlazione di immagini”. Alberto Nicolini Alessandro Fortunato, Erica Liverani, Paolo Proli. Ottobre 2019.

L.Kechagias, 2007, “An experimental investigation of the surface roughness of parts produced by LOM process”, Rapid Prototyping Journal, 13, pp. 17-22.

“Fused deposition modeling-based additive manufacturing (3D printing): techniques for polymer material systems” S.C. Daminaboa, S. Goela,b,c, S.A. Grammatikosd, H.Y. Nezhada,\*\*, V.K. Thakura,b,\* (a Enhanced Composites and Structures Center, School of Aerospace, Transport and Manufacturing, Cranfield University, Bedfordshire, MK43 0AL, UK  
b Department of Mechanical Engineering, School of Engineering, Shiv Nadar University, Uttar

Pradesh, 2013  
14, Indian School of Engineering, London South Bank University, 103 Borough Road, London, SE1 0AA, UK  
Department of Sustainable Composites, Department of Manufacturing and Civil Engineering, Norwegian University of Science and Technology, Gjøvik, 2815, Norway), 2020

3D printing by fused deposition modeling of single- and multi-compartment hollow system for oral delivery  
Alice Melocchi, Marco Ubaldi, Alessandra Maroni, Anastasia Foppoli, Luca Palugan, Lucia Zema\*, Andrea Gazzaniga  
Sezione di Tecnologia e Legislazione Farmaceutiche “Maria Edvige Sangalli”, Dipartimento di Scienze Farmaceutiche, Università degli Studi di Milano, via G. Colombo 71, 20133 Milano, Italy, 2020

“Selection of Best Printing Parameters of Fused Deposition Modeling using VIKORS”  
J. Raykara,†, D.M. D’Addona  
B. Y. (Patil College of Engineering and Technology, Kolhapur 416006, India)  
Fraunhofer Joint Laboratory of Excellence on Advanced Production Technology (FH J\_ LEAPT), Dept. of Chemical, Materials and Industrial Production Engineering, University of Naples Federico II, Piazzale Tecchio 80, 80125 Naples, Italy), 2019

F. Ning, et al., 2015, “Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling”, *Composites Part B Engineering*, 80, pp 369–378

S. Singh et al., 2017, “Material issues in additive manufacturing: A review”, *Journal of Manufacturing Processes* 25, pp 185-200.

“Metal injection moulding of surgical tools, biomaterials and medical devices: A review”  
Ali Dehghan-Manshadi\*, Peng Yub, Matthew Dargusch, David St John, Ma Qian, a, (\*a Queensland Centre for Advanced Materials Processing and Manufacturing (AMPAM), School of Mechanical and Mining Engineering, The University of Queensland, St Lucia, QLD 4072, Australia)  
Department of Materials Science and Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, PR China  
Centre for Additive Manufacturing, School of Engineering, RMIT University, Melbourne, VIC 3000, Australia), 2020

“Injection moulding parameters influence on weight quality of complex parts by means of DOE application: Case study”  
A. López, J. Aisab, A. Martínez,†, D. Mercadob  
TIIP – Research Group, Integrated in I3A Institute, EINA – Universidad de Zaragoza, C/Maria de Luna 3. Edif., 50018 Zaragoza, Spain  
Mechanical Engineering Dpt., TIIP – Research Group, Integrated in I3A Institute, EINA – Universidad de Zaragoza, C/Maria de Luna 3, 50018 Zaragoza, Spain, 2016

Review of Recent Developments in Injection Molding Process for Polymeric Materials  
SA Elsheikhi, University of Benghazi, Benghazi, Libya  
KY Benyounis, Dublin City University, Dublin, Ireland, 2016

“Additive manufacturing of metal components with the ARBURG plastic freeforming process”  
Quirin Spiller\*, Jürgen Fleischer (1) Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Institute of Production Science, Kaiserstraße 12, 76131 Karlsruhe, Germany, 2018

“Prospetto Freeformer, produzione additiva secondo un approccio all’insegna della libertà”, Arburg Company, 2018

Brundtland G. H. (a cura di), *Il futuro di noi tutti*, rapporto della Commissione mondiale per l’ambiente e lo sviluppo, Bompiani, Milano, (1988).

G. Rebitzer et al., 2004, “Life cycle assessment Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications”, *Environment International* 30, 5, pp 701-720.

ISO, 2006. ISO 14040. Environment management – Life Cycle Assessment – Principles and framework. International Organization of Standardization. Geneva, Switzerland.

ISO 2006 ISO 14044. Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines. International Organization of Standardization. Geneva, Switzerland.

SETAC. (1993). A Conceptual Framework for Life Cycle Assessment, workshop record, Sandestin, Florida

ReCiPe 2016 v1.1 A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level Report I: Characterization M.A.J. Huijbregts (author), Radboud University Nijmegen Z.J.N. Steinmann (author), Radboud University Nijmegen P.M.F. Elshout (author), Radboud University Nijmegen G. Stam (author), Radboud University Nijmegen F. Verones (author), NTNU Trondheim M.D.M. Vieira (author), Radboud University Nijmegen, Pré Consultants A. Hollander (author), RIVM M. Zijp (author), RIVM R. van Zelm (author), Radboud University Nijmegen National Institute for Public Health and the Environment, 2016

Cannibals with forks: the triple bottom line of 21st century business Elkington, John; Rowlands, Jan H. Alternatives Journal; Waterloo, 1998

C. Gimenez et al. (2012) “Sustainable operations: Their impact on the triple bottom line”, International Journal of Production Economics, Volume 140, pp 149-159.

TF Slaper, TJ Hall, (2011). “The Triple Bottom Line: What Is It and How Does It Work?”, Indiana business review, Mit.edu.

Operating manual for machine no. 750016, Freeformer-2K3A, Arburg Company

Recent developments in metal additive manufacturing Amit Bandyopadhyay, Yanning Zhang and Susmita Bose, 2020

Theecoinvent database version 3 (part II): analyzing LCA results and comparison to version 2, Bernhard Steubing, Gregor Wernet, Jürgen Reinhard, Christian Bauer & Emilia Moreno-Ruiz *The International Journal of Life Cycle Assessment* volume 21, pages 1269–1281 (2016)

A critical view on the current application of LCA for new technologies and recommendations for improved practice Coen van der Giesen\*, Stefano Cucurachia, Jeroen Guineea, Gert Jan Kramerb, Arnold Tukker a Institute of Environmental Sciences (CML), Leiden University, Einsteinweg 2, 2333 CC, Leiden, the Netherlands b Copernicus Institute of Sustainable Development, Utrecht University, Princetonlaan 8a, 3584 CB, Utrecht, the Netherlands, 2016

Advanced progress in recycling municipal and construction solid wastes for manufacturing sustainable construction materials ZhuoTanga, Wengui Lia,\*, Vivian W. Y. Tamb, Caihong Xue a School of Civil and Environmental Engineering, University of Technology Sydney, NSW 2007, Australia b School of Built Environment, Western Sydney University, NSW, 2751, Australia, 2020

EN ISO 14020:2001 Environmental labels and declarations - General principles (ISO 14020:2000), 2001

UNI EN ISO 14021:2016 Etichette e dichiarazioni ambientali - Asserzioni ambientali auto-dichiarate (etichettatura ambientale di Tipo II), 2016

NI EN ISO 14025:2010 Etichette e dichiarazioni ambientali - Dichiarazioni ambientali di Tipo III - Principi e procedure, 2010

## SITOGRAFIA

Sito ufficiale dell'azienda Arburg, (visita aprile 2020) - <https://www.arburg.com/it/it/lazienda/portafoglio/>

Sito ufficiale Screwerk, (visita aprile 2020) - <https://de.screwerk.com/it>

Stampe 3D di leghe metalliche, (visita marzo 2020) - <https://www.ialweb.it/resources/evlive/sharing3fvg/17-02-17Sortino.pdf>

ISPA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale), sezione LCA - <http://www.isprambiente.gov.it/it/certificazioni/ipp/lca>

*Quantifying sustainability* (visita aprile 2020) - <https://www.pre-sustainability.com/recipe>

*National Institute for Public Health and the Environment* (visita aprile 2020) - <https://www.rivm.nl/en/life-cycle-assessment-lca/recipe>

<https://www.thingiverse.com/thing:4245757> Covid\_Mask