

POLITECNICO DI TORINO

Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale

Tesi di Laurea Magistrale

***ADDITIVE MANUFACTURING: IDENTIFICAZIONE E MODELLIZZAZIONE DEL
PARADIGMA TECNOLOGICO***



Relatore

Chiar.mo Prof. Marco CANTAMESSA

Candidato

Francesco Paolo Bruno

Anno Accademico 2020/2021

Indice

Introduzione.....	4
1. Le origini della stampa 3D.....	6
2. Classificazione e tipologie di stampa 3D.....	8
2.1 Classificazione.....	8
2.2 Tipologie di stampa 3D.....	12
3. Settori di applicazione della stampa 3D.....	28
3.1 Settore nautico.....	30
3.2 Settore aerospace.....	32
3.3 Industria materie plastiche.....	33
3.4 Settore automotive.....	36
3.5 Settore sanitario.....	38
3.6 Settore orafa.....	40
3.7 Elettronica di consumo.....	42
3.8 Architettura.....	43
3.9 Settore alimentare.....	45
4. Principali trends, fattori di mercato e attuale livello di diffusione della tecnologia..	48
4.1 Livello di sviluppo del mercato.....	48
4.2 Modello di Abernathy e Utterback.....	53

5. Metodologia.....	61
5.1 Raccolta ambiti applicativi dell'AM.....	63
5.2 Indicatori di performance.....	67
5.3 Caratteristiche tecniche delle stampanti.....	68
5.4 Razionalizzazione caratteristiche tecniche.....	73
5.5 Modello scheda di valutazione del singolo caso d'uso.....	76
5.6 Analisi risultati.....	81
6. Conclusioni.....	86
Appendici.....	87
Appendice 1 – Lista Lista degli ambiti di applicazione dell'AM.....	87
Appendice 2 – Valutazione delle tecnologie di AM per use case.....	92
Sitografia.....	116
Bibliografia.....	118
References.....	119

Introduzione

Negli ultimi anni si è sentito parlare sempre più spesso di stampanti 3D, sia in ambito industriale che domestico. Questi macchinari, infatti, oltre ad essere utilizzati per la produzione di diversi dispositivi in molteplici industries, sono stati accostati, soprattutto nell'ultimo decennio, all'interesse anche di appassionati che, per mera curiosità, hanno deciso di approfondire la conoscenza di questa tecnologia.

Eppure la stampa 3D nasce nel 1982, quando l'inventore Chuck Hull realizzò il primo esempio di stereolitografia, una tecnica che permette di lavorare dati digitali e trasformarli in oggetti tridimensionali.

Previsioni future vedono il mercato della stampa 3D, o Additive Manufacturing (AM), aggirarsi a valori di circa 37 MLD \$ ¹.

L'aspetto forse ancor più interessante è che tale tecnologia si presta, per natura, a molteplici verticali di applicazione, spaziando dai settori nautico, aerospace, industria manifatturiera, automotive, a settori quali elettronica di consumo, architettura, gioielleria e settore orafa, interessando anche l'ambito alimentare (e.g. carni realizzate tramite stampa 3D), e molti altri ancora.

L'obiettivo di questo lavoro è quello di comprendere, in prima analisi, l'impatto che tale tecnologia ha avuto nei differenti verticali di applicazione, a seguito della sua diffusione. Verranno quindi descritte le diverse tipologie di stampanti 3D ad oggi esistenti; in secondo luogo, si cercherà di capire se esiste in particolare una tecnologia di AM, tra quelle presenti sul mercato, in grado di diffondersi come dominant design in uno o più settori industriali, dove può al contempo avere, in assoluto, maggior impatto rispetto alle altre tecnologie. Questo perché, come detto, data la flessibilità e l'operatività della stampa 3D e i diversi modelli tecnologici sino ad oggi progettati, è possibile utilizzare il 3D printing (in tutte le sue varianti) in contesti anche molto differenti tra loro, e non è detto che ci sia un unico settore di riferimento per la tecnologia in questione.

¹ Fonte - Statista, Global 3D printing products and services market size from 2020 to 2026.

Il progetto, oltre a valutare l'impatto che la tecnologia della stampa 3D ha avuto nei vari settori industriali, mira anche a definire un modello, di più alto livello, in grado di poter analizzare il valore che una nuova e potenziale tecnologia può avere una volta che è stata scoperta. In effetti, nel momento in cui, a fronte di ingenti investimenti in R&S e/o finanziamenti pubblici/privati, viene studiata e sviluppata una nuova tecnologia, indipendentemente dal suo ambito di applicazione, risulta non immediato e di non facile lettura (soprattutto se all'inizio del ciclo di vita della tecnologia) comprendere se e in quale settore la stessa può creare maggior valore e soppiantare le tecnologie più obsolete. Dal punto di vista della letteratura scientifica ci sono diversi modelli (dei quali verrà analizzato più avanti nell'elaborato uno tra i più accettati) che cercano di rispondere a tale quesito, seppure da una prospettiva meramente teorica. Al contrario, l'obiettivo di questo lavoro è quello di porre le basi per un approccio più concreto e pragmatico che possa delineare, in fase preliminare, il potenziale di una nuova tecnologia, nel momento in cui questa si affaccia prematuramente sul mercato.

Pertanto, il documento si divide in una prima parte di approfondimento sulla tecnologia della stampa 3D, dove se ne studiano le meccaniche di funzionamento e le varie tipologie di stampanti ad ora esistenti; in questa parte verranno anche analizzati gli attuali settori industriali in cui trova applicazione la tecnologia. In seguito, verrà prima analizzato l'attuale livello di diffusione della stampa 3D, secondo uno dei modelli maggiormente accettati dalla letteratura scientifica; quindi, verrà proposto un nuovo modello che, come detto, cercherà di astrarre dalla pura teoria lo studio della tecnologia per portarlo ad un livello più specifico e di dettaglio, in grado di definire, tra le differenti versioni di stampanti 3D, quella che possa diventare il design emergente e avere maggiore sviluppo nei settori industriali.

Quest'ultimo passaggio avverrà tramite l'analisi della correlazione degli aspetti tecnologici e strutturali delle stampanti 3D (che saranno stati a questo punto già valutati e descritti) con i diversi verticali di applicazione, definendo un punteggio finale, per ogni stampante, che possa classificare, in base al settore industriale di riferimento, il potenziale valore aggiunto di ciascuna di esse.

Questa metodologia riprende, modificandone in parte le logiche di funzionamento, il metodo del Quality Function Deployment (QFD), che, nella sua forma originale, permette di trasformare le necessità dei clienti nelle caratteristiche ingegneristiche del prodotto e/o del processo.

1. Le origini della stampa 3D

La stampa 3D ha subito, nel corso degli anni, un'importante evoluzione tecnica al punto che, attualmente, esistono diverse versioni della tecnologia.

Come detto, la prima forma di 3D printing in assoluto risale al 1982, quando l'ingegnere Chuck Hull commercializzò la prima stampante 3D, la *stereolitografia*. In seguito, nel 1985, Hull depositò il primo brevetto, fondando quella che oggi è una delle principali aziende di AM, 3DSystems.

Altri modelli di stampanti 3D sono stati sviluppati negli anni a venire. Il primo modello successivo a quello di Hull fu la così detta *Selective Laser Sintering*, o sinterizzazione (SLS), realizzata ad opera degli ingegneri Carl Deckard, Joe Beaman e Paul Forderhase. La differenza principale rispetto alla tecnologia proposta da Hull risiedeva nel tipo di materiale utilizzato, il Nylon, che sostituiva le resine adoperate nella stereolitografia.

Nel 1988 è la volta del terzo modello, la *Fused Deposition Modeling* (FDM), realizzata dall'ingegnere Crump. La tecnologia consiste nella realizzazione di oggetti tridimensionali tramite una pistola per la colla a caldo, la quale, spostandosi su tre assi (tanti quanti le dimensioni reali, lunghezza, larghezza e altezza) deposita del materiale fuso.

Qualche anno dopo, nel 1993, l'Institute of Technology di Boston (MIT), deposita il brevetto per la quarta tipologia di stampante 3D, nota come *Three Dimensional Printing*. Si trattava della tecnologia di stampante 3D in grado di riprodurre degli oggetti reali col più grande grado di fedeltà, rispetto ai modelli all'ora sviluppati.

Un'ulteriore evoluzione avviene nel 1995 quando viene realizzata, ad opera di alcuni ricercatori del Fraunhofer Institute, la tecnologia del *Selective Laser Melting* (SLM). Tale modello permetteva la creazione di oggetti con una densità pari al 98%, la più alta mai raggiunta.

La stessa densità con la quale venivano realizzati gli oggetti fu ulteriormente incrementata quando, nel 2002, venne realizzata l'*Electron Beam Melting*, la quale, sfruttando una sorgente di elevata energia (come quella generata da un fascio accelerato di elettroni), porta alla fusione completa del materiale; così facendo, è possibile ottenere oggetti con densità pari al 99,98%.

L'ultima importante modifica apportata al 3D printing risale al 2005, anno in cui viene concepita la tecnologia del *Paper 3D Laminated Printing*, grazie all'azienda Mcor Technologies, con sede in Irlanda. Questo processo consiste nell'accatastare fogli di carta sui quali poter stampare.

Negli anni successivi si assiste alla commercializzazione delle prime stampanti a basso costo, grazie allo sviluppo delle competenze tecniche di AM, alle prime economie di scala e ad una diffusione sempre maggiore di grafici 3D. Inoltre, un aspetto che va sottolineato, riguarda la natura del settore del 3D printing il quale, essendo Opensource, permette la condivisione sul network di un numero elevato di lavori e progetti propri di diversi designer e sviluppatori, favorendo l'evoluzione e il progresso della tecnologia.

In generale, si può affermare che il settore della stampa 3D sia in continua evoluzione, e i diversi verticali di applicazione favoriscono modelli sempre più evoluti dal punto di vista tecnologico, garantendo allo stesso tempo un maggior livelli di diffusione delle stampanti.

Di seguito è presente una tabella che riassume i principali inventori delle varie tecnologie di stampa 3D, ordinati per pubblicazioni di brevetti ².

Tecnologia	Stereolitografia SL	Sinterizzazione Selettiva SS	Material Deposition MD	Jet Prototyping (injection) JP	Laminated Manufacturing (cutting) LM
Inventori	Charles W. Hull	Carl R. Deckard	Scott S. Crump	Emanuel M. Sachs; John S. Haggerty; Michael J. Cima; Paul A. Williams	Feygin, Michael; Pak, Sung Sik
Brevetto	Method and apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography	Method and apparatus for producing parts by selective sintering	Apparatus and method for creating three-dimensional objects	Three-dimensional printing techniques	Forming integral objects from laminations - Apparatus for forming an integral object from laminations
Centro di sviluppo	3D Systems	University of Texas	Stratasys, Inc.	Massachusetts Inst. Technology	Helisys, Inc.
Richiesta di brevettazione	08.08.1984	17.10.1986	30.10.1989	08.12.1989	05.10.1988
Pubblicazione del brevetto	12.02.1986	21.04.1988	01.05.1991	09.06.1991	18.04.1996
Principio di funzionamento	Fotopolimerizzazione di una resina fotosensibile con luce UV	Sinterizzazione selettiva di polvere (fusione – solidificazione con laser)	Deposito di materiale, mediante ugello, in stato plastico (riscaldato da resistenza elettrica)	Iniezione di legante e inchiostro colorato su un letto di materiale in polvere	Taglio e incollaggio di lamiere con geometria determinata per ogni strato

Tabella 1 – Principali inventori della stampa 3D.

² Fonte - World Intellectual Property Organization (WIPO).

2. Classificazione e tipologie di stampa 3D

Le stampanti 3D permettono la lavorazione di pezzi dalla geometria altamente complessa i quali, altrimenti, sarebbero stati realizzati, attraverso i processi tradizionali, con un forte aumento dei costi di produzione e delle limitazioni al design finale.

I vantaggi derivanti dall'utilizzo di AM dipendono dal settore di applicazione, ma in genere riguardano la possibilità di ottenere pezzi finali leggeri, compositi, a costi inferiori e con un minor numero di errori in fase di assemblaggio. Come conseguenza, anche i processi produttivi risultano essere snelliti, più efficienti e sostenibili.

In questa parte dell'elaborato verranno analizzate sia le diverse normative tramite le quali viene definita la stampa 3D, sia le diverse tecnologie di 3D printing e il loro funzionamento, considerando i tipi di materiali lavorati e le loro caratteristiche tecniche.

2.1 Classificazione

Come detto sopra, quindi, sussistono diverse soluzioni tecniche di 3D printing che a loro volta, grazie alle svariate sfaccettature tecnologiche, permettono la creazione di modelli di stampa diversi tra loro. Per completezza di informazione vengono ora elencati gli altri modelli derivanti dalle suddette invenzioni.

L'evoluzione del lavoro di Hull basato sulla fotopolimerizzazione, ha dato origine ai processi di seguito indicati[1]:

- i) Solid Creation System (SCS), sviluppata da Sony Corporation, JSR Corporation e D-MEC Corporation nel 1990.
- ii) Solid Object Ultraviolet Laser Printer (SOUP), sviluppata da CMET Inc. nel 1990.
- iii) Solid Ground Curing (SGC), sviluppata da Cubital Ltd. nel 1991.
- iv) Inkjet Rapid Prototyping (IRP), sviluppata da Object Geometries Ltd. nel 2000, nota col nome di Polyjet.

La sinterizzazione è alla base del lavoro di Deckard, l'evoluzione di questo studio ha dato origine ai seguenti processi [2]:

- i) Direct Metal Laser Sintering (DMLS), il cui materiale di base è costituito da polveri metalliche che non vengono completamente fuse tra loro, ma le minuscole particelle che le compongono, ossia i grani, sono uniti tra loro mediante sinterizzazione.
- ii) Selective Laser Melting (SLM), nel quale si può parlare di fusione e non di sinterizzazione in quanto la polvere metallica viene completamente fusa in un unicum.

L'evoluzione del lavoro di Crump basato sulla modellazione a deposizione fusa, ha dato ai seguenti processi [3]:

- i) Metal Deposition (MD), si basa sull'utilizzo di un materiale di riempimento metallico (getto di polvere o filo) che tramite un ugello e seguendo il percorso segnato da un particolare codice, detto codice G, viene depositato nel file stl.
- ii) Fused Filament Fabrication (FFF), nome della comunità RepRap, una comunità aperta su RepRap.org, fondata da Adrian Bowyer all'Università di Bath nel 2004.

L'evoluzione del lavoro di Boeman e del suo team sull'iniezione di legante o materiale di base, ha permesso la crescita dei seguenti processi [4]:

- i) MultiJet Modeling System (MJM), sviluppata da 3D Systems Inc. nel 1999, con più testine parallele che si muovono lungo un asse.
- ii) ModelMaker e Pattern Master, di Solidscape, con un'unica testina di stampa che si muove lungo due assi.
- iii) ProMetal, divisione di Extrude Hone Corporation, processo che dopo aver legato insieme polveri di acciaio ed infiltrato successivamente bronzo fuso produce un elemento costituito per il 40% di acciaio e per il 60% di bronzo.

Inoltre, esistono anche altri processi realizzati tramite l'integrazione di più tecnologie, tra quelle sopra elencate, come nel caso del *Polyjet Modeling* (PJM), il quale è combinazione di stereolitografia e iniezione.

Per quanto riguarda la standardizzazione della tecnologia, è importante il contributo apportato da diversi gruppi e organizzazioni del lavoro, che riconoscono i seguenti standard [5]: l'ISO/TC 261, Additive Manufacturing; l'ASTM Committee F42, sulle tecnologie dell'Additive Manufacturing; il CEN/TC 438, Additive Manufacturing; l'AEN/CTN 116, Sistemas industriales automatizados.

Ancora, la norma ISO 52900 definisce l'AM come segue [6]: “Processi di fabbricazione che utilizzano una tecnica additiva mediante la quale strati o unità successivi sono costruiti per formare un modello”.

Da un punto di vista di processo, esistono differenti classificazioni accettate dalla letteratura accademica, ma ciascuna di esse, singolarmente, non ingloba tutti i tipi di processi di AM ad oggi esistenti. I parametri di classificazione possono variare in base al tipo di apparecchiatura utilizzata, al processo stesso o alla trasformazione dei materiali.

La norma ISO ha proposto, nel suo progetto del 2010 [7], i seguenti processi:

1. Stereolitografia.
2. Sinterizzazione laser.
3. Fusione laser.
4. Modellazione/produzione su strati fusi.
5. Modellazione multijet.
6. Modellazione polijet.
7. Stampa 3D.
8. Laminazione su strati.
9. Sinterizzazione su maschere.
10. Elaborazione digitale della luce.

In generale, un processo di additive manufacturing è di sua natura un processo di produzione; come conseguenza, ai fini della classificazione, devono essere analizzati quattro elementi [8]:

- 1) Materiale.
- 2) Energia.
- 3) Macchina e utensile.
- 4) Tecnologia (know-how).

Per quanto riguarda il materiale, i processi di AM possono essere classificati sia in base alla divisione di solido, liquido, polveri, ecc.. sia in base alle qualità tecniche del materiale stesso e, dunque, alle capacità delle stampanti di lavorare con materiali metallici e non.

Lato energia, vengono valutate e le modalità di trasmissione e il tipo di energia, suddividendola in calore, luce UV ed energia chimica. La trasmissione può avvenire tramite laser, resistenza elettrica o fascio di elettroni.

Le macchine vengono distinte in stampanti più piccole, adatte all'ufficio e quelle industriali mentre gli utensili in vasche e recipienti per liquidi o polveri fotosensibili, ugelli di deposizione o estrusione e iniettori.

Infine, la tecnologia viene classificata in base alla sua disponibilità sul mercato o se si tratta di un'opzione presente solo nei centri di R&S.

2.2 Tipologie di stampa 3D

I processi di AM attualmente esistenti, in combinazione con l'impiego di sistemi computerizzati durante le fasi di progettazione, fabbricazione e simulazione di un prodotto, permettono il raggiungimento di elevatissimi livelli di precisione e affidabilità. Ad oggi, è possibile estrarre, modellare, fondere e legare i materiali di base dei vari componenti. Le tecnologie di tipo additivo sfruttano il principio di dispersione-accumulazione [9] (fig. 1).

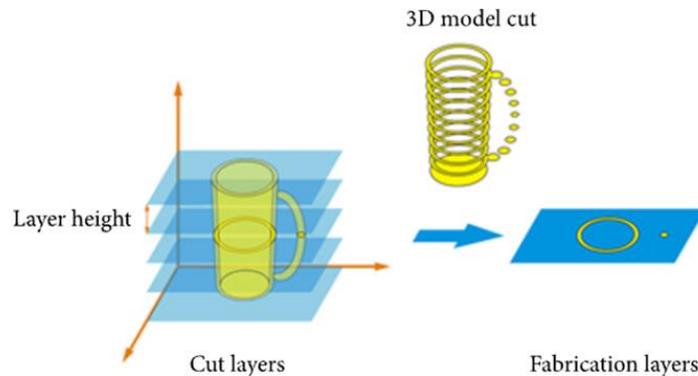


Figura 1 – Principio di dispersione-accumulazione.

Questi processi permettono la solidificazione del materiale allo stato solido, liquido o in polvere realizzando così strati successivi in uno spazio predeterminato. Il processo prende il nome di *Material Increase Manufacturing* (MIM).

Come è emerso nel corso dell'elaborato, esistono molteplici versioni della tecnologia di stampa 3D (SLA, SLS, FDM, ecc..). Poiché l'obiettivo di questo lavoro è trovare, attraverso un modello di tipo predittivo, la tipologia di stampa 3D in grado di diventare dominant design, verranno di seguito analizzate le principali tecnologie diffuse sul mercato:

- Stereolitografia.
- Selective Laser Sintering.
- Fused Deposition Modeling.
- Selective Deposition Lamintion.
- Three Dimensional Printing.
- Iniezione di resina (proiezione) e fotopolimerizzazione a luce ultravioletta.

Tre di queste, la stereolitografia (SLA), la Selective Laser Sintering (SLS) e la Fused Deposition Modeling (FDM), saranno oggetto di analisi del modello; pertanto, verranno analizzate più in dettaglio. Le altre tecnologie, al contrario, sono più recenti e meno diffuse delle prime, di conseguenza non faranno parte della metodologia di valutazione del modello finale.

2.2.1 Stereolitografia

Il processo di stereolitografia consente la solidificazione del materiale in ogni suo punto attraverso il meccanismo di fotopolimerizzazione laser, in uno spazio a due dimensioni (piano XY). Successivamente la piattaforma ottenuta muovendosi in altezza lungo il piano Z, realizza una serie di strati che si sovrappongono l'uno sopra l'altro. Questa tecnologia facente parte di quelle di produzione additiva utilizza le "resine", materiali termoindurenti e reattivi alla luce e che vengono pertanto colpite da una fonte di energia concentrata (come un fascio laser o proiettore). La resina polimerizzata così trattata si trasforma in plastica dura (fig. 2). Questo processo si basa sullo sfruttamento della lunghezza d'onda del fascio di energia che colpisce le resine. Ogni determinata lunghezza d'onda crea brevi catene molecolari in grado di polimerizzare i monomeri e gli oligomeri in elementi solidi che possono essere sia rigidi che flessibili.

Le varie parti ottenute vengono sottoposte ad un lavaggio con utilizzo di alcool isopropilico (IPA), al fine di eliminare tracce superflue di resina, e successivamente sono sottoposte ad un processo di fotopolimerizzazione post-stampa che conferisce loro una più alta stabilità e durezza.



Figura 2 - Rappresentazione grafica dei meccanismi di base della stampa 3D stereolitografica.

2.2.2 Vantaggi della tecnologia SLA

I prodotti ottenuti con la stereolitografia oltre a differenziarsi da tutte le altre tecnologie di stampa 3D per maggiore risoluzione e precisione, dettagli più accurati e finiture delle superfici più lisce, presentano il notevole vantaggio della versatilità. Il mercato delle materie prime occorrenti, peraltro, offre formulazioni di resina per la stereolitografia particolarmente innovative, in grado di competere a pari livelli con quelle delle termoplastiche standard, ingegneristiche ed in industriali, grazie ad una vasta gamma di proprietà ottiche, meccaniche e termiche.

La tecnica utilizzata nella stampa 3D che consiste nel realizzare le parti uno strato alla volta, fa sì che i prodotti ottenuti possano presentare diversa robustezza sulla base delle scelte operate nel processo di stampa in relazione alle differenti proprietà sugli assi X, Y e Z. La forza della stampa SLA sta nel fatto di creare parti altamente isotropiche a differenza dell'FDM, i cui processi sono caratterizzati per essere anisotropici (a causa delle differenze fra uno strato e l'altro generate dal processo di stampa).

Il processo per l'ottenimento di parti isotropiche si basa su un numero di fattori che vengono utilizzati in maniera rigorosa con l'integrazione della chimica dei materiali nel processo di stampa. Durante la stampa, i componenti della resina formano legami covalenti, che consentono la creazione, strato dopo strato, di una parte che rimane in uno stato di semi-reazione detto "grezzo". Allo stato grezzo, la resina consente di trattenere gruppi polimerici in grado di creare legami fra uno strato e l'altro, e di conferire alla parte l'adeguata isotropia e impermeabilità nonché la polimerizzazione finale. A livello molecolare, non c'è differenza fra i piani X, Y o Z.

Si ottengono quindi parti con una prestazione meccanica prevedibile indispensabile per applicazioni quali dime e fissaggi, adeguati per il consumatore finale e per la prototipazione funzionale (fig. 3 e 4).

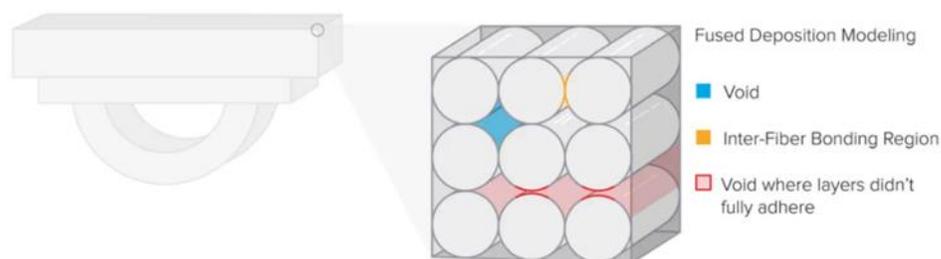


Figura 3 - Le stampanti 3D FDM formano strati depositando linee di PLA o ABS. Questo processo fa sì che gli strati non siano uniti con la stessa forza delle linee stesse (estrusione del filamento); vi sono vuoti tra le linee arrotondate ed è possibile che gli strati non aderiscano completamente l'uno all'altro.

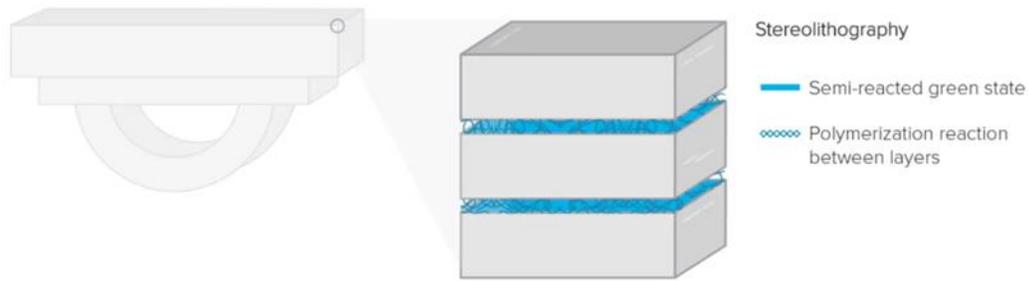


Figura 4 - Nelle stampanti SLA, non vi è alcuna differenza tra l'asse Z e il piano XY in termini di legami chimici; ogni parte stampata su una macchina SLA è una rete continua di polimeri.

La caratteristica della isotropia conferisce alle parti stampate con la stereolitografia una grande forza direzionale e resistenza da opporre agli impatti in cui le parti vengono sottoposte nel processo di fabbricazione.

Altro vantaggio della SLA è l'impermeabilità che risulta particolarmente importante nelle applicazioni ingegneristiche e nelle fabbricazioni nelle quali il flusso d'aria o liquido deve essere controllato e prevedibile. E le parti stampate con la stereolitografia rispondono a queste caratteristiche in quanto sono continue, sia che si stiano producendo geometrie con dettagli solidi o canali interni. L'impermeabilità della stereolitografia, a servizio degli ingegneri e progettisti che operano in più campi, risulta particolarmente indicata nella risoluzione di problemi connessi al flusso d'aria e di fluidi per l'industria automobilistica, per la ricerca biomedica, nonché per la validazione di progetti di parti per prodotti di consumo quali apparecchi elettrodomestici. OXO si avvale per l'appunto dell'impermeabilità della stampa SLA per creare prototipi funzionali robusti per prodotti con flusso d'aria o di fluidi quali ad esempio le caffettiere.

Come già fatto presente sopra, la stampa SLA offre alta accuratezza e precisione, elementi particolarmente richiesti nei settori odontoiatrici e in quelli della fabbricazione per creare ripetutamente componenti precisi e accurati. Per far sì che i componenti rispondano a detti requisiti è necessario un controllo puntuale e particolareggiato di numerosi fattori. L'accuratezza della stampa 3D SLA si situa a metà strada tra la lavorazione meccanica e quella di alta precisione, al punto da presentare la più elevata tolleranza fra le tecnologie di stampa 3D disponibili sul mercato.

Inoltre la stereolitografia, nel procedimento di stampa usa la luce e non il calore e quindi ad una temperatura vicina alla temperatura ambiente, aspetto questo che consente una migliore accuratezza al contrario delle tecnologie basate sulle termoplastiche che fondono il materiale grezzo. La

temperatura più bassa utilizzata permette alle parti prodotte di non essere soggette a dilatazione termica e al restringimento degli artefatti.

Ancora, la qualità di superficie è ideale per applicazioni che richiedono una finitura impeccabile, le parti possono essere facilmente levigate, lucidate e verniciate consentendo una riduzione dei tempi occorrenti nella post-elaborazione. Un'azienda leader quale la Gillette usa da tempo la stampa 3D SLA sulla sua piattaforma Razor Maker per creare quali manici di rasoi da offrire al consumatore finale. Nella stampante 3D per definire la risoluzione viene usato lo spessore dello strato sull'asse Z, sulle stampanti 3D SLA la risoluzione può essere regolata fra 25 e 300 micron, con un bilanciamento fra velocità e qualità.

Comparando le stampanti SLA con quelle FDM, si può rilevare che queste ultime stampano tipicamente gli strati sull'asse Z a uno spessore compreso fra 100 e 300 micron. Ciò nonostante, una parte stampata a 100 micron da una stampante FDM ha un aspetto molto diverso da quella realizzata sempre a 100 micron con una stampante SLA. Questo perché, le stampe si presentano con le pareti più esterne dritte, e l'ultimo strato stampato interagisce perfettamente con quello precedente, creando una finitura più liscia e priva, quasi interamente, dell'effetto scala che si registra al contrario nelle stampe FDM nelle quali gli strati risultano chiaramente visibili

Il dettaglio più piccolo possibile è anche molto più raffinato nella stereolitografia, data una dimensione del punto laser di 85 micron in comparazione con i 250-800 micron degli apparecchi FDM. Le resine per la stereolitografia posseggono una vasta gamma di formulazioni: si possono usare materiali morbidi o duri, integrati con vetro o ceramica per rinforzarne l'uso o dotati anche di proprietà meccaniche quali elevata temperatura di distorsione termica o resistenza all'impatto. Sussistono poi materiali specifici come quelli per dentiere, quelli che si accostano ai materiali finali per la prototipazione, formulati per resistere a test approfonditi e a funzionare sotto stress. A volte è questa combinazione di versatilità e funzionalità a spingere le aziende ad usare la stereolitografia. Quando si scopre uno specifico materiale funzionale per un'applicazione specifica, è facile scoprire altre possibilità di utilizzo per il materiale in questione e quindi la stampante diventa uno strumento imprescindibile per sfruttare le diverse capacità di quel materiale e degli altri sul mercato. Ad esempio, Group presso l'Advanced Manufacturing Centre (AMRC) dell'Università di Sheffield numerosi ingegneri del Design e Prototyping Group utilizzano 12 stampanti 3D SLA e una vasta gamma di

materiali ingegneristici per lavorare sui più svariati progetti di ricerca con partner industriali quali Boeing, Rolls Royce, BAE Systems ed Airbus.

Per concludere, è possibile riassumere i vantaggi della tecnologia SLA in:

- Isotropia;
- Impermeabilità;
- Accuratezza e precisione;
- Versatilità dei materiali.

2.2.3 Selective Laser Sintering

L'altra importante tecnologia da analizzare in ambito di stampa 3D è la *Selective Laser Sintering (SLS)* o Sinterizzazione Laser Selettiva che usa un laser ad alta potenza per sinterizzare piccole particelle di polvere di polimero e trasformarle in una struttura solida basata su un modello 3D. E' una tecnologia di produzione additiva

La stampa 3D SLS, negli anni scorsi, è stata utilizzata spesso dagli addetti ai lavori e dalle aziende nello sviluppo dei prodotti. Le caratteristiche che la rendono interessante sono costituite da un basso costo per unità prodotta, da un' alta produttività e dalla varietà di materiali testati che consentono una serie di applicazioni, dalla prototipazione rapida fino alla produzione in piccoli lotti, ponte o su misura. Recentemente sempre più aziende utilizzano la stampa SLS grazie alle innovazioni in termini di meccanica, materiali e software che l'hanno resa accessibile a una vasta gamma di attività e non più solo alla portata di pochi settori altamente tecnologici.

Il processo di stampaggio comprende diverse fasi: la progettazione e preparazione del file, la preparazione della stampante, la stampa, il recupero delle parti e post-elaborazione, e infine la post-elaborazione addizionale.

Nella la prima fase viene usato un software CAD o vengono direttamente scansionati in 3D i dati inerenti alla progettazione del modello, per poi essere esportati in un file 3D stampabile, formato STL. Ogni stampante SLS è dotata di un software per specificare le impostazioni di stampa, orientare e disporre i modelli, stimare i tempi di stampa e suddividere il modello digitale in strati ai fini della stampa. Ad impostazione avvenuta e interamente completata, il software di preparazione della stampa invia le istruzioni alla stampante via wireless o mediante un cavo di connessione.

La preparazione della stampante richiede per lo più attività manuali (fase 2), che una volta completate consentono il passaggio alla stampa vera e propria (fase 3). Il processo di stampa a sua volta si divide in tre fasi:

- 1) Stampa: un sottile strato di polvere viene depositato sulla piattaforma all'interno della camera di stampa, la polvere viene riscaldata preliminarmente dalla stampante fino al raggiungimento di una temperatura di poco inferiore al punto di fusione del materiale grezzo. Il laser, a questo punto, aumenta la temperatura di aree specifiche del letto di polvere, e traccia il modello per realizzare una parte solida.

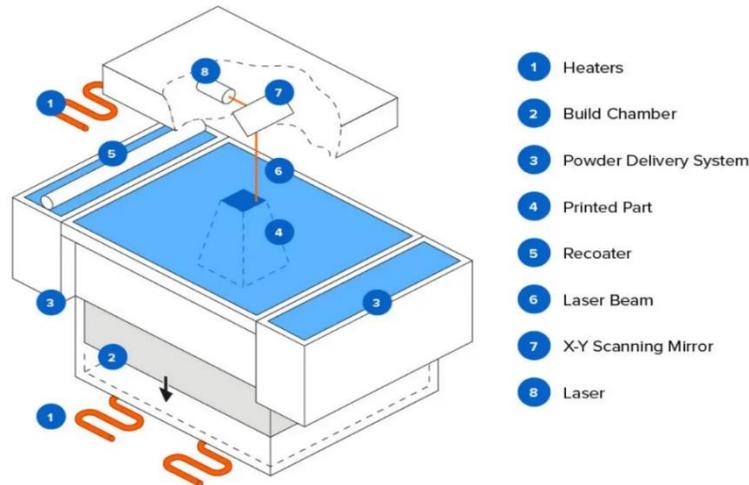


Figura 5 - Schema del processo di sinterizzazione laser selettiva.

Il laser scansiona una sezione incrociata del modello 3D, riscaldando la polvere appena al di sotto o giusto al punto di fusione del materiale consentendo così la fusione assieme di particelle in maniera meccanica, in modo da creare parti solide. La polvere non fusa svolge la funzione di sostegno delle parti durante la stampa eliminando la necessità di altre apposite strutture di supporto. La piattaforma si abbassa di un livello all'interno della camera di stampa, di solito intorno ai 50-200 micron, e il processo si ripete per ogni strato, fino al completamento delle parti.

2) Raffreddamento: al completamento della stampa, è necessario che la camera di stampa si raffreddi leggermente all'interno dell'alloggiamento di stampa e successivamente al di fuori della stampante per far sì che vengano garantite proprietà meccaniche ottimali e che si evitino la deformazione delle parti.

3) Post-elaborazione: le parti completate una volta rimosse dalla camera di stampa, devono essere separate e pulite dalla polvere in eccesso. La polvere può essere riciclata e le parti stampate vengono sottoposte ad un processo di post-elaborazione con sabbiatura o lucidatura.

Come già indicato, grazie alla polvere non fusa che svolge una funzione di sostegno durante il processo di stampa, non vi è la necessità di altre strutture di supporto. Questo rende la sinterizzazione laser selettiva particolarmente indicata per geometrie complesse, come dettagli interni, sottosquadri, pareti sottili e dettagli in negativo.

La produzione di stampe 3D SLS, a seconda della complessità delle parti, delle dimensioni e dell'intensità, può necessitare da poche ore a diversi giorni di lavoro.

Una volta terminata una stampa, prima di procedere con l'inserimento nel relativo alloggiamento di una nuova stampa, è necessario lasciar raffreddare leggermente la camera di stampa al fine garantire proprietà meccaniche ottimali ed evitare deformazioni delle parti. Per ottenere questo leggero raffreddamento può occorrere anche un tempo pari alla metà di quello occorso nel processo di stampa.

La quarta fase (recupero delle parti e post-elaborazione) richiede meno tempo e minore manodopera rispetto ad altri processi di stampa 3D. Grazie all'assenza di strutture di supporto si realizza facilmente con risultati uniformi per lotti di parti.

La fase di pulitura delle parti, di separazione e di eliminazione delle polveri in eccesso è un processo manuale che, solitamente, viene svolto presso una postazione dedicata alla pulizia con l'utilizzo di aria compressa o di una granigliatrice.

Un altro vantaggio della SLS è quello di offrire un minor spreco con un adeguato riciclaggio della materia avanzata dal processo di stampa. La polvere in eccesso rimanente dopo il recupero della parte viene filtrata per rimuovere le particelle più grandi e può essere nuovamente utilizzata. Tuttavia la polvere recuperata potrebbe aver subito un processo di degradazione a causa delle elevate temperature alle quali comunque è stata esposta, per questo motivo viene miscelata con materiale nuovo prima di essere utilizzata in lavori di stampa successivi.

In virtù di quanto ora esposto, nel settore della SLS vengono offerti dispositivi separati per il riciclaggio, lo stoccaggio e la miscelatura della polvere.

L'ultima fase di sabbatura e lucidatura delle parti è resa necessaria dalla finitura solitamente granulosa delle stampe 3D SLS che, una volta rese più lisce, possono essere verniciate a spruzzo, laccate, placcate al fine di ottenere parti non solo di diverso colore ma anche con finiture e proprietà diverse quali l'impermeabilità (rivestimento) e la conduttività (galvanizzazione).

2.2.4 Vantaggi della tecnologia SLS

Sulla base di quanto dettagliato sinora, i motivi che spingono gli ingegneri e i produttori a scegliere la sinterizzazione laser selettiva risiedono nella libertà di progettazione, nella elevata produttività e rendimento, nonché nel minor costo per unità prodotta e nei materiali testati per l'utilizzo finale. Inoltre la possibilità offerta dalla SLS di non necessitare di strutture di supporto, la rende preferibile ad altri i processi di produzione additiva. La stereolitografia (SLA) e la modellazione a deposizione fusa (FDM), ad esempio, richiedono specifiche strutture di supporto per poter realizzare design con elementi sporgenti. Al contrario, la stampa 3D SLS consente di stampare con facilità design complessi con elementi sporgenti, geometrie intricate, parti a incastro, canali interni e altro e questo aspetto la rende più utilizzabile da parte degli ingegneri che di solito progettano le parti pensando alle capacità del processo di fabbricazione finale. Per questo processo noto anche come progettazione per la fabbricazione (ing. "design for manufacturing", DFM), elementi realizzati in funzione della fabbricazione finale di un prodotto risulta più utile di quella produzione additiva utilizzata solo per la prototipazione che è limitata a parti e design e che successivamente saranno riprodotti da strumenti di fabbricazione convenzionali nelle varie fasi di produzione.

La sinterizzazione laser selettiva sta diventando un metodo di produzione rapido e sempre più accessibile per un numero crescente di applicazioni per utilizzo finale, e può potenzialmente offrire nuove possibilità di progettazione e ingegneria. Le stampanti 3D SLS permettono di produrre elementi complessi ad un costo contenuto rispetto a quelli prodotti con i processi tradizionali, consentono di compattare in un'unica parte assemblaggi complessi che normalmente richiederebbero diverse parti rendendo il prodotto finale più forte perché privo di giunture che potrebbero presentarsi deboli. Il lavoro dei designer, in tal modo, è particolarmente agevolato in quanto consente agli stessi di progettare direttamente un prodotto finito con meno fasi di realizzazione e una riduzione nei tempi e nei costi di assemblaggio

La sinterizzazione laser selettiva consente di realizzare progetti leggeri, che utilizzano strutture reticolari complesse e impossibili da produrre con i metodi tradizionali, il design generativo potrà sfruttare tutto il suo potenziale. La stampa SLS è la tecnologia di produzione additiva più rapida per creare prototipi funzionali duraturi e parti per l'utilizzo finale, grazie alla velocità di scansione dei laser in grado di fondere la polvere in maniera decisamente superiore anche per precisione, rispetto ai metodi di deposito dei livelli utilizzati in altri processi come la modellazione a deposizione fusa

industriale. Più parti possono essere disposte assieme per massimizzare lo spazio di stampa in ciascuna macchina. Gli operatori usano il software per ottimizzare ciascuna stampa, in modo da ottenere la migliore produttività possibile e lasciare il minimo spazio necessario tra le parti. Anche i materiali utilizzati concorrono alla grande funzionalità e versatilità della stampa 3D, il nylon e i suoi composti, ad esempio, sono termoplastiche testate di alta qualità. Le parti in nylon realizzate con la sinterizzazione laser hanno quasi il 100% di densità, e posseggono proprietà meccaniche non da meno rispetto a quelle create con metodi di produzione tradizionali come lo stampaggio a iniezione. Le comuni plastiche utilizzate nello stampaggio a iniezione possono essere sostituite ottimamente dal nylon nella sinterizzazione laser selettiva, il nylon si presenta nella stampa SLS come materiale di grande qualità negli accoppiamenti a scatto e giunture meccaniche al punto da offrire un prodotto superiore a quelli realizzati con altra tecnologia di produzione additiva. Le parti realizzate con altre tecnologie additive nel tempo diventano fragili e si degradano, al contrario la stampa SLS risulta ideale per le applicazioni funzionali che richiedono parti in plastica più durature. Per quanto riguarda i costi va detto che una stampante 3D SLS rappresenta un investimento iniziale cospicuo ed ovviamente nel calcolo del costo per unità bisogna includere i costi di proprietà dell'attrezzatura, i materiali e la manodopera. Tuttavia, tutti i vantaggi sopra indicati consentono un recupero dell'investimento iniziale in tempi anche più veloce rispetto a quelli occorrenti per le macchine più piccole. La stampa SLS da banco riduce significativamente la barriera di ingresso, nonché il costo per unità per la maggior parte delle applicazioni, al punto che l'eventuale esternalizzazione della produzione di tali servizi risulta utile solo quando l'azienda ricorre alla stampa 3D occasionalmente, comportando l'esternalizzazione costi superiori e tempi di consegna più lunghi. Infatti avere tra i propri macchinari una stampante 3D per un'azienda consente una velocizzazione della produzione rispetto ai metodi tradizionali, ed anche rispetto alla esternalizzazione quando si tratta di realizzare parti che richiedono una o addirittura più settimane. Inoltre, la sinterizzazione laser selettiva consente agli ingegneri di realizzare prototipi delle parti nelle fasi iniziali del ciclo di progettazione e poi, senza dovere cambiare macchina e materiali, produrre parti per l'utilizzo finale. Al contrario dei processi di fabbricazione tradizionali che richiedono una lavorazione lunga e costosa, la stampa 3D SLS risulta veloce, con costi più contenuti e prototipi delle parti e degli assemblaggi che possono essere testati e modificati con facilità nel giro di pochi giorni. Ovviamente tutto questo riduce in maniera decisiva il tempo di sviluppo dei prodotti.

Quanto appena detto può essere riassunto nei seguenti vantaggi:

- Libertà di progettazione;
- Alti livelli di produttività e rendimento;
- Materiali testati per l'utilizzo finale;
- Costo per unità e cicli di sviluppo dei prodotti ridotti.

2.2.5 Fused Deposition Modeling

La terza tecnologia analizzata nel dettaglio è la Fused Deposition Modeling (FDM) o Fabbricazione per Fusione di Filamento (FFF), tecnica che lavora su un principio “additivo” rilasciando il materiale su strati. Il meccanismo è basato su un filamento plastico che viene srotolato da una spirale e fornisce il materiale da un ugello di estrusione da cui si può avviare e fermare il flusso.

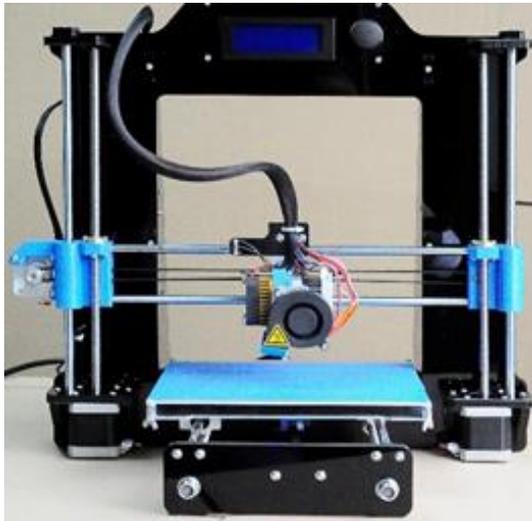


Figura 6 - FDM Printer.

La tecnologia FDM è indicata per stampanti 3D specializzate e materiali termoplastici di produzione che permettono la costruzione di parti resistenti, durevoli e dimensionalmente stabili con elevata accuratezza e ripetibilità rispetto alle altre tecnologia della sua stessa categoria.

Nella tecnologia FDM l'ugello viene riscaldato per consentire di sciogliere il materiale e può essere spostato sia in direzione orizzontale che verticale da un meccanismo di controllo numerico, controllato direttamente da un software CAM (computer-aided manufacturing, fig. 6). Quando inizia il processo di stampa, la materia prima viene estrusa sotto forma di un sottile filamento attraverso l'ugello

riscaldato, depositata nella parte inferiore della piattaforma della stampante, dove si solidifica. I successivi processi di estrusione e deposito della materia nella parte inferiore consentono la realizzazione dell'oggetto dal livello più basso, strato per strato. La maggior parte delle stampanti che usano la tecnologia di modellazione a deposizione fusa stampa prima i bordi esterni, poi i bordi interni e infine e infine l'interno.

2.2.6 Vantaggi della tecnologia FDM

La tecnologia FDM permette di utilizzare materiali durevoli con ottime proprietà meccaniche e le cui parti prodotte sono di elevata qualità. I materiali termoplastici utilizzati in FDM sono adatti per prototipi funzionali dettagliati, strumenti di produzione durevoli e parti di produzione a basso volume.

I vantaggi sono:

- Costi più bassi;
- Facilità d'uso;
- Ampia gamma di materiali;
- Velocità di produzione;
- Accessibilità.

2.2.7 Selective Deposition Lamination

La SDL, Selective Deposition Lamination è stata progettata nel 2003 dall'ingegnere MacCormack, e consiste nel rilasciare un adesivo nell'area di lavoro, che ricalca sia il modello da realizzare che i supporti dello stesso; in seguito, una lama definisce i contorni dello strato (fig. 7). Lo spessore finale totale è pari sia a quello dell'adesivo che della carta utilizzata [10].

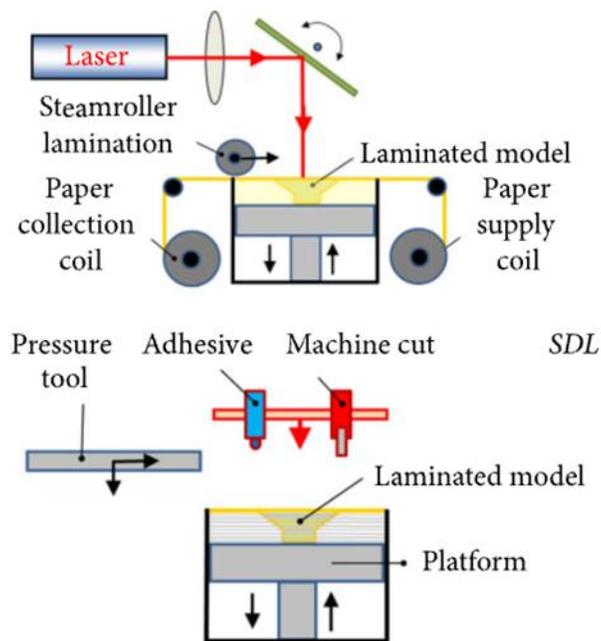


Figura 7 – SDL.

Lo spessore massimo lavorabile è di 0,165 mm, con una dimensione massima degli oggetti pari a 170 x 220 x 145 mm.

I materiali lavorati riguardano fogli di PVC aventi le seguenti caratteristiche [11]:

- resistenza alla trazione: 40-50 Mpa;
- allungamento a rottura: 30-100%;
- modulo flessionale: 1200 -200 Mpa;
- deformazione sotto carico: 45-55°C.

I pezzi finali risultano avere una qualità medio/alta, con un costo di attrezzatura medio.

2.2.8 Three Dimensional Printing – Glue Injection

La tecnologia funziona sfruttando un letto di materiale plastico in polvere, sul quale viene aggiunto un agglutinato, tramite il supporto di un ugello, per fondere la polvere nella dimensione e forma dell'oggetto finale da realizzare (fig. 8). La geometria dell'oggetto viene conferita lavorando il materiale plastico in polvere tramite l'ausilio di un rullo. L'operazione finale, oltre a quella dell'indurimento dell'oggetto fuso, consiste anche nella rimozione delle polveri in eccesso [12].

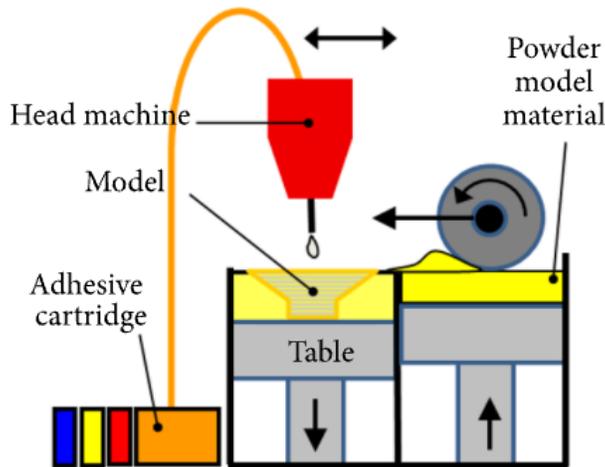


Figura 8 – TDP.

Lo spessore dello strato è compreso tra 0,013 mm e 0,076 mm, potendo lavorare materiali come ceramica, metallo e polimeri.

Le proprietà del materiale principale zp150-Z-Bond sono [13]:

- modulo di trazione: 10 – 20 Mpa;
- resistenza alla trazione: 14 Mpa;
- allungamento a rottura: 0,2%;
- modulo flessionale: 7,2 Mpa;
- resistenza alla flessione: 31 Mpa;
- deformazione sotto carico: 112°C.

La tecnologia permette di non utilizzare supporti, con pezzi che hanno un'ottima qualità estetica.

2.2.9 Iniezione di resina (proiezione) e fotopolimerizzazione a luce ultravioletta

Questo modello di stampa 3D ricorda in parte la tecnologia SLA, ma si differenzia per il metodo di rilascio delle resine. In questo caso, infatti, le resine vengono depositate tramite nebulizzazione, per mezzo di migliaia di iniettori (fig. 9); in seguito la resina viene indurita, come nel processo stereolitografico, a contatto con della luce UV [14].

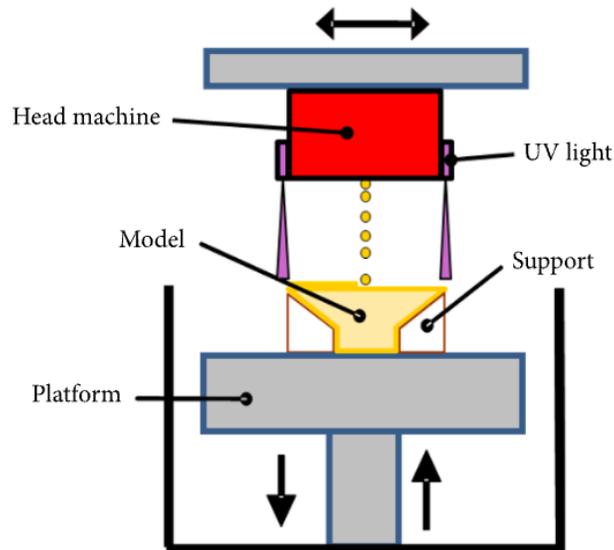


Figura 9 - Iniezione di resina (proiezione) e fotopolimerizzazione a luce ultravioletta.

Lo strato ha uno spessore minimo possibile di 0,017 mm. La caratteristica importante della tecnologia riguarda la possibilità di lavorare una vasta gamma di materiali, tra cui resine traslucide, polipropilene, ABS e resine elastiche [15]. Le loro proprietà sono:

- modulo di trazione: 2500 Mpa;
- resistenza a trazione: 58 Mpa;
- allungamento a rottura: 10-25%;
- modulo flessionale: 2700 Mpa;
- resistenza alla flessione: 93 Mpa;
- deformazione sotto carico: 48°C.

È possibile ottenere parti trasparenti con buona finitura superficiale. Il costo è medio alto.

3. Settori di applicazione della stampa 3D

Dopo l'ampia analisi delle origini della stampa 3D e della rapida evoluzione delle tecnologie sviluppate ed adottate per la sua applicazione, possiamo ora ad esaminare più diffusamente i principali campi di impiego nei vari settori economici dove tale tecnologia trova più frequente utilizzo.

Per la sua duttilità di impiego la stampa 3D sta letteralmente rivoluzionando interi processi produttivi: essendo in grado di approcciare trasversalmente un ampio spettro di applicazioni essa sta gradualmente trovando sbocchi e campi di impiego in segmenti di mercato che sino a poco tempo fa sarebbero stati considerati irraggiungibili o incompatibili.

Infatti grazie all'utilizzo abbinato dei software di progettazione e scansione 3D con le tecnologie di stampa 3D è attualmente possibile ottimizzare interi processi produttivi offrendo al mercato soluzioni integrate ed efficienti per la realizzazione di manufatti, prodotti finiti/semilavorati e prototipi, con notevole risparmio di tempo, minori costi oltre che un più elevato grado di precisione ed accuratezza rispetto alle tradizionali tecniche di produzione. Data l'elevata velocità di stampa 3D, paragonabile a quella ad iniezione, è ormai normalmente impiegata da designer nel campo aerospaziale o del settore automobilistico per la creazione di componentistica pronta per l'uso, con significative economie di costi e tempi, in alternativa alle tradizionali tecniche mediante modelli per fusione.

Anche nel settore sanitario e della ricerca è ormai adottata la tecnologia di stampa 3D per la produzione di svariati presidi chirurgici sofisticati, permettendo tecniche di intervento più evolute e meno invasive con tempi di recupero dei pazienti molto più rapidi.

Nell'ambito didattico la stampa 3D è utilizzata abitualmente nel corso di progetti di ricerca per la realizzazione di componentistiche personalizzate che diversamente avrebbero richiesto interventi esterni, certamente più onerosi.

Una proiezione sul potenziale del settore può derivare dai dati del mercato mondiale dei prodotti e dei servizi di stampa 3D, “valutato intorno ai 12,6 MLD \$ nel 2020”³ [16] (fig. 10). Tra il 2020 e il 2023, “l'industria dovrebbe crescere ad un tasso annuo composto di circa il 17%”⁴ [17]. Nel 2020, “il caso

³ Fonte – Statista, Global 3D printing products and services market size from 2020 to 2026.

⁴ Fonte – Statista, Projected global additive manufacturing market growth between 2020 and 2026.

d'uso più diffuso della stampa 3D è stato la prototipazione, con il 68% degli intervistati che ha citato questo scopo per la stampa 3D. Tra gli intervistati, il 59% degli intervistati ha affermato di aver utilizzato la stampa 3D per il proof of concept, mentre il 49% ha utilizzato la tecnologia per la produzione”⁵ [18] (fig. 11).

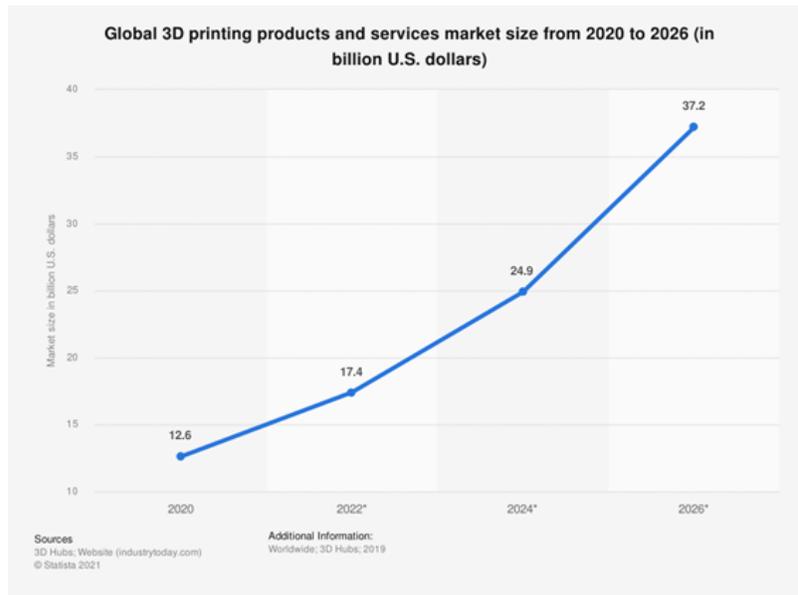


Figura 10 – Dimensione del mercato della stampa 3D e dei servizi associati, 2020 – 2026.

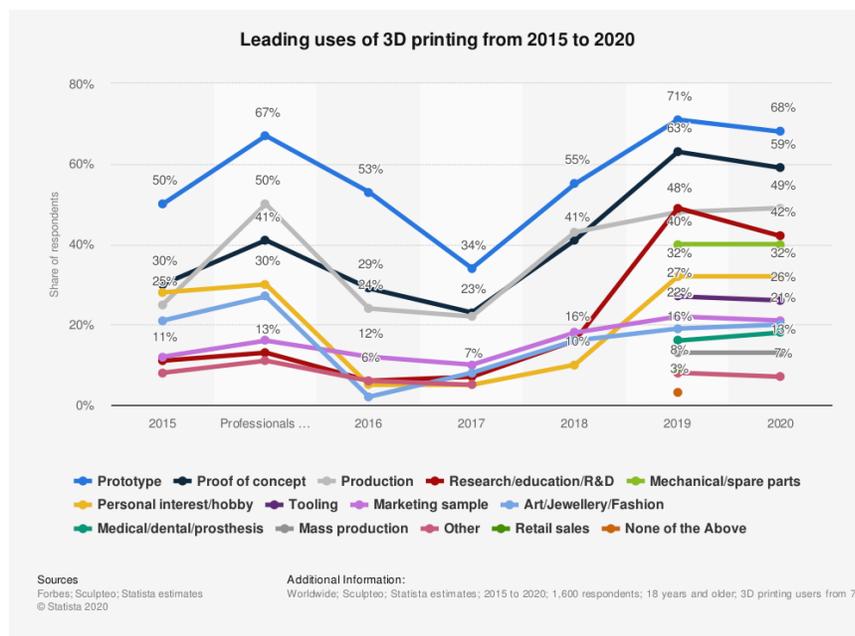


Figura 11 – Principali usi della stampa 3D, 2015 – 2020.

⁵ Fonte – Statista, Leading uses of 3D printing from 2015 to 2020.

3.1 Settore nautico

Il settore nautico è allo stato attuale il settore che presenta probabilmente il maggior potenziale nell'utilizzo della tecnologia di stampa 3D in considerazione dei continui e costanti aggiornamenti dei progetti attinenti le componentistiche industriali utilizzate nella cantieristica.

3.1.2 La più grande nave al mondo stampata in 3D

A conferma delle ampie capacità di impiego della stampa 3D nel settore nautico può essere significativo il caso di alcuni ricercatori dell'Università del Maine (USA) che sono stati in grado di progettare e realizzare con stampante 3D il componente nautico al momento più grande al mondo.



Figura 12 – 3Dirigo.



Figura 13 – 3Dirigo.

Si tratta della 3Dirigo (fig. 12 e 13), per la cui realizzazione è stata utilizzata una stampante 3D di grande formato prodotta dall' "UMaine Advanced Structures and Composites Center". Il citato componente ha una lunghezza di 7,62 metri ed un peso di 2,2 tonnellate.

Il progetto è stato insignito di ben 3 World Records:

1. per il componente solido più grande stampato in 3D,
2. per la più grande imbarcazione stampata in 3D,
3. per l'utilizzo di stampante 3D di grandi dimensioni

Possiamo ritenere tale evento quale uno dei più promettenti nell'utilizzo della cosiddetta "produzione additiva" applicata al settore cantieristico. Come già riportato il settore nautico risulta particolarmente sensibile ai processi di "additive manufacturing" mediante l'utilizzo di stampanti 3D di grandi dimensioni, che consentono la produzione di unità componentistiche di grandi dimensioni che non

richiedono, quindi, successive e complesse fasi di assemblaggio o post-processing, con notevoli economie di costi e tempi di realizzazione sensibilmente più contenuti. L'Università del Maine, nell'occasione, rappresenta forse il soggetto/istituzione più rappresentativo in questo scenario per lo sviluppo di progetti che prevedono l'adozione di materiali compositi.

Si tratta di iniziativa sostenuta dal governo statunitense che, a maggio 2019, ha assegnato uno stanziamento di ben 20 MLN \$ all'Oak Ridge National Laboratory (ORNL), partner dell'Università del Maine, per sviluppare un progetto di produzione additiva di stampa 3D con utilizzo di contenenti fibre di legno.



Figura 14 – Stampante 3D usata dall'UMaine.

Per la realizzazione del componente navale precedentemente citato è stata utilizzata una stampante 3D di grandi dimensioni denominata Ingersoll Machine Tools avente un volume di stampa di 30 x 6,70 x 3 metri (lunghezza, larghezza e altezza) e una velocità di 227 chili all'ora. Presenta una testina di stampa fissata su impalcatura mobile su rotaie per gli spostamenti longitudinali. E' stata progettata con lo scopo di utilizzare materie prime di origine biologica, in particolare cellulosa di legno. La finalità dichiarata della stampante 3D è quella di un utilizzo in ambito della prototipazione rapida e realizzazioni di applicazioni in campo civile, militare e infrastrutturale.

Il tempo di realizzazione dell'imbarcazione è stato di sole 72 ore. Altro progetto intrapreso con tecnica di stampa 3D dall'Università del Maine, in collaborazione con il Combat Capabilities Development Command (CCDC), riguardava un rifugio per comunicazioni della lunghezza di 3,6 metri, ad uso militare.

3.2 Settore aerospace

Il settore dell'Aerospace può essere distinto in due sezioni principali:

1. l'aerospaziale, che si riferisce prevalentemente ad un ambito civile e riguarda la produzione, vendita ed erogazione di servizi connessi ad aeromobili commerciali;
2. la difesa, orientata invece a soddisfare un tipo di esigenza riguardante la salvaguardia dei confini nazionali di terra, mare ed aria, con armamenti e servizi militari appositi.

Da una analisi settoriale della Deloitte US è emerso che i maggiori fattori di sviluppo di questa branca sono da attribuire proprio dalla crescente domanda di velivoli commerciali e dal notevole incremento degli stanziamenti pubblici nel campo della difesa.

Essenziale dunque sembra il contributo del settore dell'industria aerospaziale e della difesa (A&D) allo sviluppo ed integrazione di molti altri settori economici che sinergicamente hanno collaborato all'ideazione di nuovi materiali e processi di produzione all'avanguardia, capaci di fornire soluzioni a maggior valore aggiunto in termini di resistenza, leggerezza e durabilità rispetto alle tradizionali manifatture. In tale contesto spicca il ricorso alle tecnologie dell'Additive Manufacturing.

Numericamente è stato calcolato che il settore dell'A&D ha rappresentato, per l'anno 2015, ben il 16% del fatturato globale del settore relativo alla stampa 3D, che ammonta a 4,9 MLD \$ ⁶. Tale contributo deriva evidentemente da un percorso iniziato molti decenni or sono e precisamente da quando alcune compagnie aerospaziali, già dal 1989, cominciavano a ricorrere alla stampa 3D per la produzione di componenti strutturali che via via nel tempo si sono dimostrate sempre più sofisticate ed affidabili segnando segnato continui e crescenti tassi di sviluppo.

I vantaggi della tecnologia in stampa 3D si rivelano particolarmente importanti e strategici nell'industria aerospaziale: infatti tale utilizzo consente di accorciare l'intero processo di produzione, dalla fase della progettazione e design concettuale a quella di produzione vera e propria, con la possibilità di interventi di revisione e modifiche per minimizzare i rischi connessi al lancio del prodotto ed inoltre riducendo sensibilmente i tempi del "time to market". Peraltro, in linea generale, non sussistono limiti significativi alla sua potenzialità di impiego potendo essere applicata a progetti

⁶ Fonte – HUBS, Aerospace 3D printing applications.

di complessità evoluta, con livelli di finitura di massima precisione, senza che ciò possa comportare incrementi nei costi di produzione.

Infatti alle tradizionali fasi di lavorazione quali fusione, forgiatura, fresatura, tornitura, saldatura ecc si sostituisce l'intervento della stampa 3D che, dato il maggior spettro di azione in termini di geometrie realizzabili e dunque di design innovativi praticabili, permette l'ottenimento di singoli componenti complessi con l'impiego di materiali plastici, metallici e composti, senza comprometterne le proprietà, come quelli utilizzati dall'industria aerospaziale quali il Titanium Ti6Al4V e Inconel 718, normalmente di difficile modellazione.

Non più quindi una moltitudine di pezzi da assemblare, ma componenti complessi singoli, dal minor peso specifico e dunque in ultima analisi più rispondenti alle esigenze commerciali delle compagnie aeree poiché un minor peso corrisponde un minor consumo di carburante, minori emissioni di CO₂, cioè minori costi di gestione e maggiore competitività sul mercato in termini di tariffe aeree.

Da ultimo non va trascurato anche l'aspetto dei costi connessi alla gestione del magazzino dei ricambi potendo procedere con sufficiente facilità, sempre mediante la 3D on-site, alla produzione on-demand dei ricambi richiesti, ovviando a possibili ritardi nei canali distributivi e/o da esigenze di spedizionieri.

3.3 Industria materie plastiche

Anche nel settore della lavorazione delle materie plastiche l'utilizzo della stampa 3D è diventato ormai uno strumento ormai insostituibile. Basti pensare alle caratteristiche originarie del processo di produzione: progettazione e realizzazione di prototipi occorrenti per la formazione di casseformi nelle quali gli stampatori ad iniezione potevano procedere alla realizzazione dei vari componenti le quali necessitavano normalmente di ulteriori fasi di lavorazione per le finiture e l'assemblaggio.

Tutto questo è stato gradualmente sostituito con l'ausilio della tecnologia 3D impiegata inizialmente per la fase della progettazione per la prototipazione e l'iterazione del design alla quale si è aggiunta successivamente quella della stampa 3D e della quale l'industria delle materie plastiche non può più fare a meno dati i vantaggi offerti rispetto alle tecniche tradizionali. La Grand View Research, Inc., rinomata società statunitense di ricerche di mercato e consulenza con sede a San Francisco nello Stato

della California, ha dichiarato che “il mercato globale delle materie plastiche stampate in 3D dovrebbe raggiungere 1,98 MLD \$ entro il 2025”⁷ [19].

Attualmente il settore dispone di sistemi di stampa 3D evoluti, estremamente più veloci rispetto alle precedenti tecnologie industriali con immediati benefici sui costi unitari ed in grado di migliorare qualitativamente i prodotti realizzati con combinazioni di parti in polimero con fibre di carbonio, tecnica che conferisce al manufatto una maggiore resistenza ed al contempo un minor peso.

L'utilizzo dei polimeri nella stampa 3D ha consentito di ovviare all'impiego di materiali metallici per la produzione di pezzi unici, maschere, attrezzature ed una moltitudine di strumenti industriali.. Un significativo esempio di tale conversione è quello della Volkswagen Autoeuropa che con il ricorso all'utilizzo della stampa 3D ha ottenuto sensibili riduzioni nei tempi di sviluppo degli utensili, ridottisi di oltre il 90%, riuscendo altresì a migliorarne l'ergonomia ed a velocizzare le attività di restyling/modifica.

Come già riportato in precedenza, anche nel settore delle materie plastiche, ed in particolare dei polimeri, la tecnologia di stampa 3D permette ai progettisti di testare, anticipatamente all'avvio delle fasi di produzione, le qualità estetiche e funzionali del prototipo

I materiali più comunemente utilizzati in questo ambito risultano essere:

- ABS, normalmente impiegata con la cosiddetta tecnologia FFF, in sostituzione di materiali metallici, e trova impiego nel comparto della carrozzeria auto, elettrodomestici, custodie per smartphone ecc. Si tratta di una termoplastica flessibile e resistente agli urti, capace di resistere a temperature da -20°C a 80°C.
- Carbonio. Impiegato quale componente di materiali base quali PLA, PETG, Nylon, ABS la fibra di carbonio permette di migliorare il grado di resistenza del componente realizzato a stampa 3D.

⁷ Fonte – Selltek, La stampa 3D per l'Industria delle Materie Plastiche.

- PEEK, tecnopolimero con ottime proprietà meccaniche e resistenza chimica, biocompatibile, si offre ad un vasto campo applicativo, da quello industriale/meccanico a quello protesico medicale.
- Poliammide: utilizzato nella tecnologia di stampa 3D FDM. Presenta caratteristiche di rigidità, stabilità, flessibilità e resistenza agli urti. Essendo inoltre un materiale biocompatibile, è utilizzato per prodotti utilizzati nell'industria alimentare. E' impiegato anche per produzioni di ingranaggi, stampi a iniezione, protesi mediche ecc
- Carbon PA. È un polimero a base di poliammide rinforzato con fibra di carbonio. Normalmente utilizzato in applicazioni meccaniche di alto livello per il grado di elevata resistenza all'abrasione e agli agenti chimici, costituisce un cosiddetto “*metal replacement*”.
- Polipropilene: si tratta di un materiale termoplastico utilizzato prevalentemente per la produzione di utensili professionali monouso ed in genere di oggetti monouso di uso quotidiano. Presenta anch'esso una elevato grado di resistenza all'abrasione e una buona resilienza.
- L'High Reusability PA 12 costituisce un particolare materiale impiegato nella stampa 3D per la produzione di parti funzionali ad alta densità. Data la forte resistenza chimica ad oli, grassi, idrocarburi alifatici e alcali trova impiego prevalente in applicazioni che richiedono chiusure a tenuta stagna.
- Il PA12 di HP: materiale termoplastico combinato con perle di vetro al 40% dalle alte proprietà meccaniche e di rigidità. Trova applicazione nella produzione di custodie e contenitori, attrezzature e utensili.
- HP 3D High Reusability PA 11: materiale termoplastico simile al PA12 precedentemente descritto che, senza sacrificare significativamente le caratteristiche di resistenza chimica ed al calore vanta un minor impatto ambientale per un utilizzo più contenuto di carbonio. Trova applicazione per prototipi funzionali soggetti a carichi importanti, componenti per interni automobilistici, produzioni mobili a lungo termine (come cerniere), protesi, solette, articoli sportivi ecc. e serie di parti. un'eccellente resistenza chimica e proprietà meccaniche ottimali che le consentono di resistere agli urti. Può essere impiegato per la produzione di, attacchi a scatto e molto altro.

3.4 Settore automotive

E' uno dei settori a maggior impatto della tecnologia di stampa 3D, come sostenuto da Wohlers Associates, Inc. - Colorado, società di consulenza indipendente e strategica sui nuovi sviluppi e tendenze nello sviluppo dei prodotti e nella produzione additiva, che in un suo report del 2015 individuava nell'industria automotive, un mercato della stampa 3D costituito per il 16,1% dagli autoveicoli ⁸. Inizialmente utilizzata dai progettisti essenzialmente per la creazione di prototipi, la tecnologia a stampa 3D, per i vantaggi in termini di riduzione di costi e minori tempi di consegna, ha rapidamente segnato rapidi avanzamenti per trapiandare il campo della produzione di veicoli seppure limitatamente al segmento di fascia alta, ovverosia con produzioni in termini di pezzi di minori dimensioni .

3.4.1 Light Cocoon, l'auto stampata in 3D

Il primo autoveicolo sviluppato e realizzato con tecnologia a stampa 3D è la concept car Light Cocoon (fig. 15), proposto dalla EDAG Group al Motorshow di Ginevra del 2015 e presentato come “un progetto che combina la potenza della stampa 3D e le pratiche biomimetiche per portare la leggerezza a livelli estremi” [20]. L'esperimento punta ad nuovo concept di progettazione che distingue la struttura portante, estremamente leggera e prodotta a mezzo di stampa 3D, dall'involucro esterno, da personalizzare secondo le preferenze del mercato.

Si tratta dunque di un cambiamento sostanziale del paradigma di costruzione sin ora utilizzato dove la struttura esterna metallica è essa stessa una componente essenziale richiesta per sopportare i requisiti di carico. Diversamente il nuovo concetto introdotto con la tecnologia 3D ha concentrato esclusivamente sulla struttura scheletrica interna il compito di resistere alle forze cui il veicolo è soggetto e assegnando all'involucro esterno essenzialmente funzioni estetiche.

L'idea progettuale è stata sviluppata intorno ad una struttura cava a spirale (fig. 16) sulla quale sono stati assemblati elementi in alluminio di vario spessore, che assicurassero comunque i requisiti di stabilità richiesti, che ha permesso una riduzione del peso complessivo del 25% con conseguenti benefici in termini di consumi. Con tale iniziativa si è voluto dimostrare come “i progressi nella

⁸ Fonte - Selltek , La stampa 3D nel settore automotive.

stampa 3D sono stati essenziali per rompere con le convenzioni di design tradizionali e adottare l'approccio biomimetico" [21].



Figura 15 – Modello dell'auto Light Cocoon.



Figura 16 – Struttura portante dell'auto.

L'involucro esterno della Light Cocoon, sovrapposto alla scocca interna stampata in 3D, è realizzata in tessuto leggero Texapore SOFTSHELL O2+, un tipo di tessuto jersey di poliestere a tre strati, impermeabile e resistente agli agenti atmosferici. Il veicolo è integrato inoltre da un sistema di illuminazione a led posto internamente allo stesso involucro esterno che rende ancor più evidente la trama della struttura scheletrica di sostegno.

Si è voluto riportare, con questa breve descrizione, le notevoli prerogative offerte dalla stampa 3D per l'industria automobilistica sia sotto il profilo del risparmio nei costi che di maggiori prestazioni raggiungibili se paragonate con la tradizionale produzione CNC evidentemente più costosa e lunga, particolarmente in presenza di produzioni corpi complessi specie se soggetti ad assemblaggio.

Difatti il ricorso alla tecnologia 3D, come è stato più volte ricordato, permette un significativo risparmio nei tempi di prototipazione così come nelle fasi della produzione, riducendo all'essenziale l'utilizzo dei materiali necessari ed evitando la produzione di scarti. Inoltre appare del tutto evidente la formidabile flessibilità della suddetta tecnologia particolarmente nella fase di sviluppo di nuovi modelli potendo intervenire con estrema velocità nelle iterazioni e modifiche che dovessero rendersi necessarie durante il percorso di valutazione del modello prima di passare alla fase di produzione vera e propria, fornendo ai costruttori un potente strumento di efficiente interazione con le esigenze del mercato.

Ulteriori considerazioni a favore della tecnologia 3D possono essere riferite alla tutela della proprietà intellettuale atteso che l'intero processo di progettazione e prototipazione, essendo sviluppato all'interno della stessa unità produttiva, difficilmente si presta a fughe di informazioni.

3.5 Settore sanitario

Il settore sanitario, ed in particolare quello protesico, sta attraversando ormai da tempo un processo irreversibile di specializzazione e personalizzazione derivante per un verso dall'approccio sempre più empatico nel rapporto fra medici e pazienti e dall'altro dall'introduzione di tecnologie più sofisticate in grado di adattare ciascun intervento ad ogni specifica esigenza, e dunque a ciascun individuo, diversamente dai protocolli precedentemente adottati, delineati prevalentemente per categorie terapeutiche.

In tale processo evolutivo la stampa 3D ha rappresentato un fattore essenziale di aiuto e di spinta, che trova sempre più applicazione in numerosi ambiti di intervento potendo assicurare presidi medici più confortevoli e personalizzati per i pazienti, specialmente in presenza di eventi di maggiore complessità, elevando in generale gli standard curativi a livelli mai raggiunti in passato.

Grazie infatti alla tecnologia 3D ed all'utilizzo di modelli di riferimento visivi e tattili, personalizzati con i dati biometrici del paziente acquisiti ad esempio da TAC e/o risonanze magnetiche, che agevolano l'interazione di equipe mediche nella comprensione e definizione della cura più appropriata, sono ormai possibili modalità di pianificazione preoperatorie, simulazione visiva intraoperatoria delle fasi di intervento con verifica della compatibilità e adattabilità delle attrezzature e dei presidi medici necessari, riducendo notevolmente i rischi di intervento e abbreviando la successiva fase di guarigione del paziente.

Ulteriore elemento di aiuto in questo ambito applicativo proviene dalla ricerca di nuovi materiali biocompatibili ed alla loro facile utilizzabilità con mediante la stampa 3D che hanno reso possibile il perfetto dimensionamento delle protesi e lo sviluppo di tecniche innovative e strumenti chirurgici capaci di migliorare le performances cliniche nella fase dell'intervento operatorio, agevolando i chirurghi a migliorare l'accuratezza della prestazione specie se di particolare complessità.

La relativa semplicità di utilizzo della tecnologia di stampa 3D abbinata ai costi contenuti e alla rapidità di produzione ad essa connessi hanno indotto sempre più i produttori di attrezzature e presidi sanitari verso tale tipologia di sviluppo operativo tanto che ad oggi oltre il 90% delle 50 migliori

aziende di dispositivi medici ⁹ usa la stampa 3D per creare prototipi accurati di dispositivi medici, nonché dime e fissaggi per semplificare le prove.

Altro fattore di spinta nell'utilizzo della tecnica in argomento è senza dubbio la possibilità di un suo utilizzo in-house (cosiddetta stampa 3D SLA desktop) al fine di poter seguire direttamente le fasi di prototipazione e le successive fasi di iterazione sino al raggiungimento del dispositivo finale, senza più la necessità di ricorrere ad officine esterne, con notevoli risparmi di tempo.

In figura 17 un esempio di modello anatomico di una mano realizzata con il ricorso all'utilizzo della stampa 3D.



Figura 17 - Modello anatomico di una mano, con tanto di "pelle" realizzata con un materiale per la stampa 3D elastico.

Nella sperimentazione sino ora utilizzata è stato possibile verificare una generalizzata riduzione dell'80-90% dei tempi di realizzazione in-house dei prototipi.

In generale nelle tecniche di produzione tradizionali le protesi semplici vengono realizzate seguendo criteri economicistici di natura industriale ovvero sulla base di una classificazione per gamma di dimensione e conseguentemente non permettono una perfetta adattabilità alle esigenze dei pazienti arto lesi che sono obbligati ad accontentarsi del modello più rispondente alla propria menomazione. Nei casi più complessi, ovvero per i dispositivi bionici “on demand” si incorre in un problema di

⁹ Fonte – Formlabs, Nuovi dispositivi e strumenti medici

costi che rende tale soluzione appannaggio solamente di categorie benestanti escludendo una vasta fascia di pazienti. Tale fenomeno trova maggiore criticità per il segmento dei bambini atteso che i presidi protesici sono naturalmente soggetti a continui adattamenti e modifiche in relazione alla crescita degli stessi soggetti destinatari.

Si comprende dunque perché, anche nel settore sanitario, si è sviluppato un sempre maggiore interesse verso le nuove frontiere tecnologiche ed in particolare per il sempre maggior utilizzo di tecniche di stampa 3D con le quale i protesisti riescono a recuperare una maggiore libertà di progettazione per superare gli ostacoli e le limitazioni esistenti fra cui quelle economiche dei richiedenti.

Sono altresì nate strutture di volontariato, come “e-NABLE”, con il fine di creare un canale per soddisfare la domanda di protesi pediatriche realizzate con tecnica di stampa 3D, gratuitamente o a costi molto contenuti, e le successive sostituzioni in funzione della crescita dei bambini destinatari. Anche presso il MIT (Massachusetts Institute of Technology) sono state avviate iniziative di sviluppo applicativo della tecnologia di stampa 3D finalizzate al settore della produzione di protesi adattive, finalizzati alla progettazione di device di ultima generazione con alloggiamenti conformati ai monconi dei pazienti.

La combinazione dei vari elementi descritti, duttilità nell’utilizzo in abbinamento a design evoluti e complessi, relativa economicità dei materiali utilizzabili, velocità di realizzazione e di modifica dei prototipi, ha reso l’impiego della stampa 3D una validissima alternativa alle tecniche tradizionali e acquisirà senza dubbio un ruolo sempre più significativo nel settore sanitario.

3.6 Settore orafa

Anche il settore della gioielleria è stato positivamente contaminato dalle tecniche digitali avendone apprezzato gli aspetti di utilizzabilità in abbinamento alle tecniche che tradizionalmente vengono impiegate per la produzione di prodotti di oreficeria, nelle quali prevalgono la lavorazione a mano e la cosiddetta fusione a cera persa.

Si tratta di attività che storicamente si basano sull’esperienza e competenza tecnica spesso tramandate di generazioni in generazioni e dove il margine di errore deve essere estremamente contenuto in considerazione del valore dei materiali impiegati. Ed è proprio su questo aspetto che trova un valido elemento di supporto il ricorso alle tecniche digitali (design e stampa 3D) che aprono nuovi orizzonti in termini di possibilità di maggiori personalizzazioni e varianti da offrire alla clientela.

Il metodo tradizionale di produzione prevede la realizzazione di un modello in cera, equivalente al prodotto finito da realizzare, che viene inserito in uno stampo nel quale viene successivamente effettuata la colata del materiale prezioso che va a sostituirsi alla cera, la quale sciogliendosi fuoriusce dallo stampo. Segue dunque la fase di finitura e lucidatura dell'oggetto.

L'utilizzo delle tecniche digitali consente di sostituire l'intera fase di produzione del calco con la progettazione digitale dello stesso, utilizzando appositi software grafici (CAD od equivalenti) e la successiva stampa del modello con stampante 3D. Il processo continua poi con lo stesso procedimento descritto della cera a perdere.

Si comprende bene dunque come le tecniche digitali si prestino a risultati molto più raffinati e precisi, seppure riferiti a oggetti con maggiore difficoltà e complessità, dato l'ausilio del supporto tecnologico e con un minor impiego di tempo richiesto per la prototipazione. E' altresì possibile archiviare i vari design dei modelli per eventuali riproduzioni o modifiche successive.

Inoltre con l'ausilio delle tecniche digitali si aprono scenari di mercato molto più estesi atteso che in precedenza l'offerta di prodotti personalizzati poteva essere riferita prevalentemente ad una più ristretta fascia di clientele in grado di potersi permettere un maggior impegno di spesa richiesto dalle tecniche artigianali adottate. La possibilità di poter condividere il progetto personalizzato prima ancora della sua realizzazione, di visionarne il modello avendo l'opportunità di modifiche ed implementazioni lasciano intuire quale potenzialità si potrebbero profilare in questo settore per le tecniche digitali.

I gioiellieri, d'altro canto, possono sfruttare tale possibilità quale servizio aggiuntivo all'offerta base con il risultato di fidelizzare saldamente le relazioni con la propria clientela con creazioni esclusive e non replicabili pur senza sopportare particolari sacrifici economici.

Discorso differente, invece, deve farsi per quanto attiene ai canali di produzione in serie, che normalmente risultano essere a minor valore aggiunto.

Per questi ultimi infatti gli impegni di spesa in investimenti riferibili al processo di stampa 3D su larga scala abbinata ad una ancora diffusa percezione di diffidenza verso tali tecniche innovative, nonostante il grande potenziale sviluppabile, rendono ancora modesto il processo di conversione che attualmente relegano tale segmento ad una frazione relativamente contenuta del mercato.

In prospettiva, tuttavia, è facilmente prevedibile che con un ulteriore affinamento delle tecniche digitali applicate ed un maggiore contenimento dei relativi costi di accesso, il mercato della gioielleria in stampa 3D potrà evolvere in maniera molto più significativa.

3.7 Elettronica di consumo

Il mercato dell'elettronica di consumo è generalmente caratterizzato da scenari in rapida evoluzione e necessita, conseguentemente, di capacità di adattamento ed orientamento dei processi produttivi alle esigenze del consumatore. Appare pertanto immediata la necessità di poter intervenire efficacemente sul time-to-market e sulla supply chain al fine di mantenere/conseguire un vantaggio competitivo sul mercato di destinazione finale.

Per tali ragioni lo strumento delle tecniche digitali e della stampa 3D rappresentano fattori di particolare importanza per il settore industriale data la versatilità d'uso sia in contesi di maggiore semplicità che complessità oltre che per i ridotti cicli di sviluppo richiesti in fase di progettazione originaria o di iterazioni e modifiche su prototipi già in uso.

Come noto le tecniche di produzione tradizionale applicate a prodotti personalizzati richiedono significativi costi di manodopera che invece con l'ausilio del digitale possono essere contenuti specie in presenza di geometrie particolarmente complesse.

I cicli tradizionali, solitamente, passano attraverso cinque fasi di sviluppo tra 10 e 100 prototipi per ciclo e ogni modello può costare fino a 1.500 \$¹⁰.

Diversamente la stampa 3D, come si è avuto modo di esprimere, non necessita di complesse fasi di realizzazione e dunque riesce a co

ntenere fortemente l'impiego di materiale, rendendo conseguentemente l'intero processo di produzione più sostenibile ed efficiente. Al contempo può costituire strumento di condivisione con i rivenditori nella convalida dei design per i prototipi da immettere in produzione ovvero per le implementazioni relative a produzioni già in commercio.

¹⁰ Fonte – Selltek, La stampa 3D per il settore dell'elettronica di consumo.

Va inoltre considerato come, indirettamente, l'utilizzo della tecnologia digitale contribuisce altresì a ridurre i costi di magazzinaggio di materie, costi amministrativi di inventariazione ed altresì ottimizzare la gestione della supply chain verso i rivenditori.

Quantitativamente, comunque, al momento la stampa 3D nell'elettronica di consumo è ancora in una fase emergente, seppure alcuni settori si siano orientati verso tali tecniche innovative che dunque sembrano possano avere un imminente sviluppo. Secondo Opportunities for 3D Printing in the Electronics Industry di SmarTech Publishing, “la tecnologia ha iniziato ad essere maggiormente diffusa nel settore elettronico nel 2015, dopo essere stata utilizzata per anni nella ricerca e nello sviluppo. La stampa 3D elettronica potrà generare 428 MLN \$ di fatturato entro il 2022, e potenzialmente potrebbe raggiungere 2,8 MLD \$ entro il 2025”¹¹ [22].

3.8 Architettura

La stampa 3D da tempo viene utilizzata nel campo dell'architettura e dell'edilizia ed è in continua espansione in quanto rende più agevole il lavoro dei professionisti del settore, in tutto il mondo. All'origine, per i vari architetti ed ingegneri, la stampa 3D si è presentata come un valido strumento per modelli concettuali e di presentazione per clienti e investitori. Ad oggi sono emerse molte altre possibilità di applicazioni che la stampa 3D può offrire ai progetti di un architetto.

La produzione additiva viene quindi ora utilizzata non solo nelle fasi di progettazione, ma anche nella creazione di strutture su grande scala come abitazioni stampate in 3D, edifici, ponti, infrastrutture, infissi, pareti e tanto altro.

Fino a pochi anni fa, l'idea di poter costruire una casa o un edificio con il minimo lavoro umano e l'utilizzo prevalente della robotica poteva apparire un'idea non solo avveniristica ma inverosimile, impossibile. Si riteneva che anche qualora fosse diventata fattibile, la realizzazione sarebbe avvenuta a costi molto elevati; ad oggi, grazie allo sviluppo delle tecnologie, la realtà si presenta completamente diversa rispetto al pensiero precedente. La costruzione di edifici con stampa 3D risulta molto più economica rispetto ai sistemi tradizionali, oltre che presentarsi più ecologica e rispettosa dell'ambiente.

¹¹ Fonte – DE247, The State of Electronic 3D Printing.

3.8.1 Il progetto Housing 05 made in Italy

Nella foto sotto riportata viene presentata una 3D Housing 05 ossia una casa stampata in opera con tecnologia 3D in Italia. E' stata ideata e progettata dall'architetto Massimiliano Locatelli, dello studio milanese CLS Architetti, in collaborazione con Italcementi, Arup e Cybe, ed è stata presentata a Milano, in piazza Beccaria.



Figura 18 – 3D Housing 05.

3D HOUSING 05 “è una casa progettata con un nuovo linguaggio architettonico che deriva una tecnologia rivoluzionaria. Il progetto è connotato dalla libertà, i vincoli tradizionali scompaiono e il materiale può essere facilmente modellato. Tale libertà delinea un nuovo rapporto tra committente e architetto” [23]. La casa così realizzata che ha un impatto certamente rivoluzionario rispetto alla tradizione e all’idea di casa insita in ognuno di noi, presenta vantaggi quali basso impatto ambientale durante la costruzione, possibilità nel tempo di essere demolita, polverizzata e ricostruita con lo stesso materiale in quanto realizzata con parti stampate con una speciale miscela di polveri cementizie, inerti e leganti. I materiali utilizzati possono essere a km zero poiché gli inerti possono derivare dalle terre locali, realizzando un notevole impatto con le cromie del contesto nelle quali si fondono.

Inoltre la casa può essere facilmente ampliata, rialzata, raddoppiata e persino traslocata ad impatto zero grazie alla tecnologia usata in modo innovativo. La riduzione dei costi di costruzione, la velocità nella sua realizzazione aprono infinite possibilità e offrono soluzioni per garantire una casa a 1,2 miliardi di persone che nel mondo non hanno una sistemazione adeguata, per costruire rapidamente unità abitative nei luoghi delle emergenze, ed anche la possibilità di costruire velocemente ed a costi contenuti unità abitative in luoghi esotici per coloro che aspirano ad una vita più a contatto con una natura non contaminata.

“La casa è composta da una zona giorno, una zona notte, una cucina, un bagno e un tetto vivibile. Gli interni sono stati progettati citando gli archetipi del passato in dialogo con il linguaggio 3D. La miscela di cemento, materiale base delle costruzioni, si confronta con materiali altrettanto forti e senza tempo, l’ottone dei serramenti, il marmo dei sanitari, l’intonaco liscio come una delle possibili finiture delle pareti, le lastre di ottone lucido per una cucina industriale rivisitata. La stratificazione del cemento genera un pattern, superficie su cui all’esterno il verde si arrampica spontaneamente fino al tetto che diventa un orto in città. Il progetto nasce dal desiderio di riflettere sul nostro futuro per migliorare la qualità della vita attraverso la rivoluzione della tecnologia” [24].

3.9 Settore alimentare

La stampa 3D sta raggiungendo settori inaspettati come quello alimentare, dove la tecnologia delle macchine impiegate, evolutasi nel tempo, consente di creare un piatto non solo estremamente raffinato ed elegante nel design ma anche dalle proprietà nutritive equilibrate. La stampa 3D in questo campo permette di allargare i confini oltre quelli tradizionali ed indica un nuovo modo di cucinare e di mangiare.

La materia prima utilizzata dalla la stampa 3D per il cibo, e costituita da composti viscosi, che richiedono una pre-lavorazione particolare, ma che consentono agli chef di progettare al computer i propri piatti per vederli poi estrusi e pronti da servire in tavola, magari previa cottura in forno.

I vantaggi offerti da questa tecnologia risiedono principalmente nella possibilità di operare una personalizzazione dei cibi che risponda alle esigenze del destinatario finale, sia in termini di forma che di nutrienti. Possono quindi risultare utili sia alla cucina gourmet o molecolare, che a quella che ha a cuore lo stato di salute del consumatore finale, come ad esempio nel caso di allergie, problemi di deglutizione e esigenze alimentari particolari richieste da alcune patologie.

La stampa 3D per il cibo si apre a sviluppi futuri che possono interessare la cucina di casa nostra, quella di un ristorante, fino a quelle degli ospedali. Per non contare poi l’importanza che può rivestire nelle navi spaziali, dove l’alimentazione è uno dei principali problemi da risolvere per consentire agli astronauti di mantenere uno stato di salute perfetto. Tramite la stampa 3D gli astronauti possono ricevere un'alimentazione sana e corretta, e magari anche gustosa, nei lunghi viaggi verso altri pianeti lontani.

Nelle stampanti 3D alimentari, il materiale viscoso che ne costituisce la materia prima viene depositato uno strato sopra l'altro fino a ottenere il prodotto finale che arriverà nel piatto.

Nel 2015 fu operato un primo esperimento di stampa 3D alimentare, e riguardò una pizza. La macchina utilizzata, dopo aver preparato l'impasto, lo estrudeva, condiva e inviava al forno. Questo esperimento oggi si è evoluto dando origine a dozzine di dispositivi per stampa alimentare immesse sul mercato, che consentono di realizzare cibi dalle forme originali e rispondenti ad esigenze creative. Inoltre, l'utilizzo di dispositivi per stampa 3D alimentare consente un notevole risparmio negli scarti di materia prima.

Gli alimenti che possono essere stampati in 3D sono quelli più pastosi, come puree, alcuni tipi di formaggi, mousse di vari tipi come quella al cioccolato, carne liofilizzata reidratata, in definitiva tutti quegli impasti che una volta estrusi dalla macchina mantengono la forma che gli è stata data.

Questi dispositivi, pur essendo utili per ottenere design complessi e per rispondere ad esigenze alimentari come indicato sopra, non forniscono un cibo già cotto. Questo, a secondo dei casi, potrà essere consumato crudo oppure prima cotto in un forno o alla griglia.

Ad oggi le stampanti 3D per alimenti rispondono, prevalentemente, alle esigenze delle cucine professionali di grandi chef che le impiegano nella realizzazione di piatti gourmet e nella cucina molecolare, nonché alle esigenze di panettieri che grazie alla stampa 3D riescono a creare nuovi prodotti di panificazione con forme particolari. Le stampanti 3D vengono anche usate da aziende che le realizzano carne di origine vegetale, e da quelle che creano pasti sfiziosi per persone che non possono mangiare cibi solidi, come gli anziani o coloro che hanno subito interventi chirurgici alla gola e all'apparato digerente.

La principale differenza tra un cibo elaborato coi metodi tradizionali e uno stampato 3D sta nella presentazione del prodotto finito, in quanto la stampa 3D offre la possibilità di creare forme e geometrie difficili da riprodurre a mano, o che altrimenti richiederebbero un tempo di lavorazione superiore.

Quindi il principale vantaggio dell'utilizzo di una stampante 3D in cucina consiste nella possibilità di personalizzare i pasti, non solo nella forma ma anche nel contenuto dei diversi nutrienti, come vitamine e anche calorie, partendo da un impasto base formulato sulle necessità della persona che dovrà mangiarlo. Il cibo non tradizionale potrebbe offrire una presentazione più appetitosa a prodotti

visivamente non accettabili dai consumatori Occidentali come particolari piante, o l'utilizzo di fonti di proteine alternative quali gli insetti, o ancora il cibo sintetico realizzato con carne creata in provetta. Altro vantaggio è costituito dalla facilità di riproduzione delle ricette: usando una determinata materia prima e impostando la stampa dal file digitale, si otterranno piatti con le stesse caratteristiche nutritive, ottenendo, grazie alla riproducibilità e alla precisione nello stampare il cibo, offre la possibilità di evitare sprechi alimentari, con l'utilizzo solo delle giuste dosi.

Infine, va considerato l'aspetto della sicurezza alimentare: durante la stampa 3D del cibo non avviene alcuna manipolazione da parte dell'uomo, quindi si riduce drasticamente il pericolo di contaminazione del cibo.

4. Principali trends, fattori di mercato e attuale livello di diffusione della tecnologia

Questa parte dell'elaborato verte sull'analisi dei principali indicatori di mercato della stampa 3D, al fine di inquadrare l'attuale livello di diffusione e di utilizzo della tecnologia. Lo studio è posto in termini di:

- valore attuale e futuro del mercato della stampa 3D, a livello globale;
- livello delle vendite dei prodotti di 3D printing, suddiviso per settore industriale;
- capacità d'utilizzo della tecnologia dei principali Paesi fruitori dell'AM;
- suddivisione delle aziende produttrici di stampanti 3D, per regione;
- numero di brevetti attualmente pubblicati dai principali attori di mercato;
- numero di dispositivi di stampa 3D diffusi a livello globale, suddivisi per contesto di applicazione;
- distribuzione degli investimenti di stampa 3D a livello globale, per ambito di applicazione;
- fattori che limitano la diffusione della stampa 3D;
- principali scopi di utilizzo della stampa 3D.

4.1 Livello di sviluppo del mercato

Negli ultimi dieci anni, la produzione additiva è cresciuta notevolmente ed è divenuta sempre più popolare nel mercato, conquistando industrie. Questa tendenza dovrebbe durare nel tempo, si stima che il mercato globale della produzione additiva dovrebbe crescere di quasi il 24% tra il 2023 e il 2025 [25] (fig. 19), il mercato della stampa 3D dovrebbe quasi triplicare tra il 2020 e il 2026 [26] (fig. 20). Nello specifico, tra il 2020 e il 2023, il mercato globale della produzione additiva dovrebbe crescere di circa il 17% all'anno. Attualmente il mercato dei materiali per la stampa 3D è dominato dalle materie plastiche, ma si prevede che i materiali metallici forniranno stimolo per una ulteriore

crescita del mercato, così come si ritiene che la tecnologia 3D avrà un impatto dirompente nell'industria manifatturiera globale.

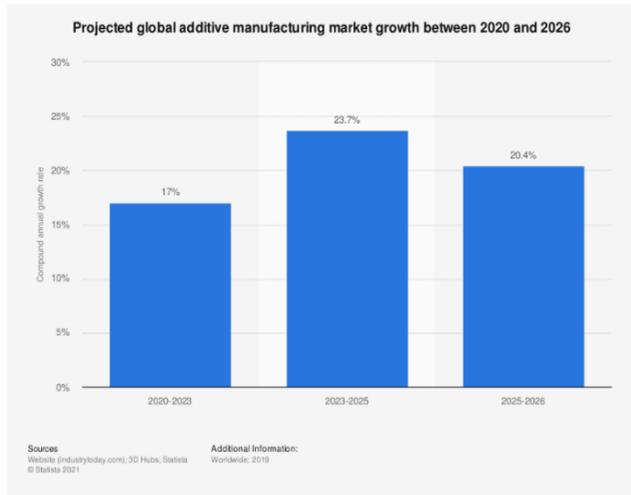


Figura 19 – Crescita prevista del mercato della stampa 3D, fino al 2026.

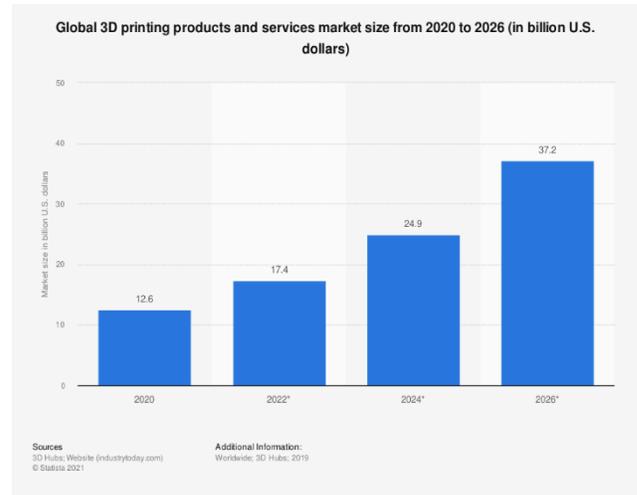


Figura 20 – Valore di mercato dei prodotti e servizi di stampa 3D, dal 2020 al 2026.

Si prevede che entro il 2030, il mercato mondiale della produzione additiva dovrebbe essere in grado di passare dalla prototipazione alla produzione di massa di parti, entro quel termine anche quando le tecnologie di AM dovrebbero consentire alle imprese di produrre prodotti finiti su larga scala.

Poiché nell'era del 3D printing, non è più necessario utilizzare saldatrici per fondere lamiere d'acciaio o utilizzare tagliatrici per fresare componenti, come avviene per le stampanti 3D industriali, si assisterà ad un aumento dell'impiego del 3D printing in un numero sempre maggiore di settori di applicazione. Tutto ciò sarà in grado di stimolare la crescita dei ricavi dell'industria, con la produzione di componenti per utensili e modelli per fusioni metalliche che rappresentano i settori più promettenti.

Il mercato mondiale dei prodotti e dei servizi di stampa 3D è stato valutato intorno ai 12,6 MLD \$ nel 2020, e poiché la stampa 3D è in grado di utilizzare molti materiali per una vasta gamma di applicazioni, si assisterà ad una crescita sempre maggiore di nuovi materiali e applicazioni. Materiali e applicazioni che entreranno in un'ampia gamma di settori, favorendo ancor più la crescita e lo sviluppo del mercato. Nel 2019, alle vendite nel mercato mondiale dell' AM hanno contribuito per circa il 20% l'industria automobilistica, per un altro 20% l'industria manifatturiera, e per il 18% l'industria aerospaziale globale [27] (fig. 21).

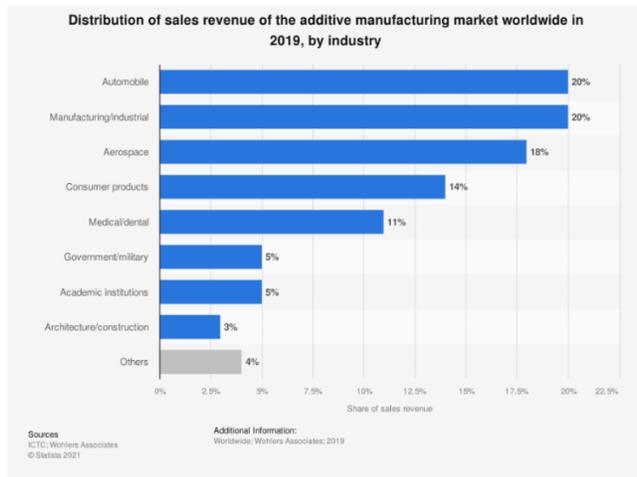


Figura 21 – Suddivisione delle vendite nel mercato globale dell’AM, per settore industriale.

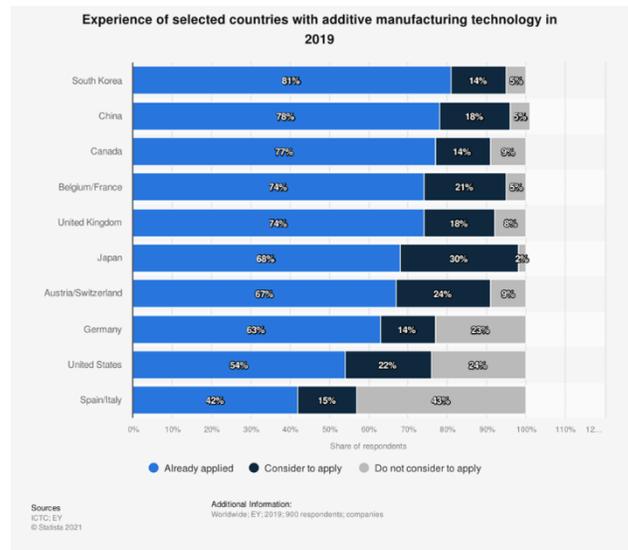


Figura 22 – Livello di applicazione della stampa 3D per i principali Paesi fruitori della tecnologia.

Nel 2019, l’81% delle aziende coreane intervistate ha applicato la tecnologia di 3D printing nelle proprie attività e il 14% di queste aziende stava considerando di farlo. Risultati simili si registrano nella Cina dove il 78% delle aziende cinesi intervistate ha già applicato la tecnologia additiva e il 18% sta considerando di applicarlane nelle proprie attività. Di seguito si trovano il Canada (77%), Francia, Belgio e Regno Unito, tutte e tre con una percentuale di applicazione della stampa 3D pari al 74%. Ancora più indietro si trovano gli Stati Uniti, con una percentuale pari al 54%¹² [28] (fig. 22). Dalla figura 23, inoltre, si può osservare che nel 2019, oltre la metà di tutte le aziende produttrici di stampanti 3D si trovavano in Europa, seguite dagli USA che nello stesso anno ospitavano circa il 32% delle aziende produttrici nel mondo, e quindi dall’Asia con una quota del 13%¹³ [29].

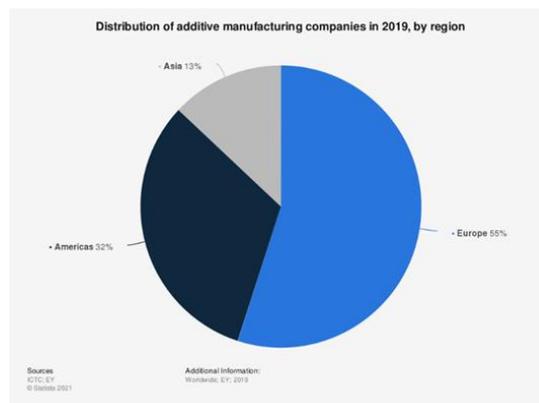


Figura 23 – Suddivisione geografica delle principali aziende operanti nel settore.

¹² Fonte – Statista, Experience of selected countries with additive manufacturing technology in 2019.

¹³ Fonte – Statista, Distribution of additive manufacturing companies in 2019, by region.

Nel 2016 Geeral Electric è diventata la più grande proprietaria di famiglie attive di brevetti per la produzione tramite AM e ha mantenuto questa posizione fino al 2019 [30] (fig. 24), con circa 992 brevetti di proprietà dell'azienda americana ¹⁴, relegando al secondo posto la società HP Inc. Statistica basata sui dati forniti da PatentSight. Si prevede, inoltre, che il numero di dispositivi di stampa 3D crescerà a oltre 2,7 MLN entro il 2030, con un incremento di oltre 2 MLN rispetto al 2020. I dispositivi di stampa 3D e di AM a fini progettuali rappresentano la quota maggiore del mercato nel 2020 con 550.000 dispositivi, seguiti dai contesti manifatturieri ¹⁵ [31] (fig. 25).

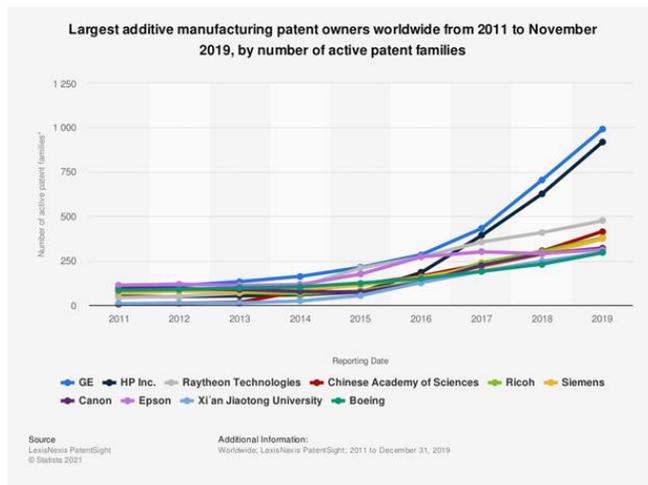


Figura 24 – Numero di brevetti per aziende.

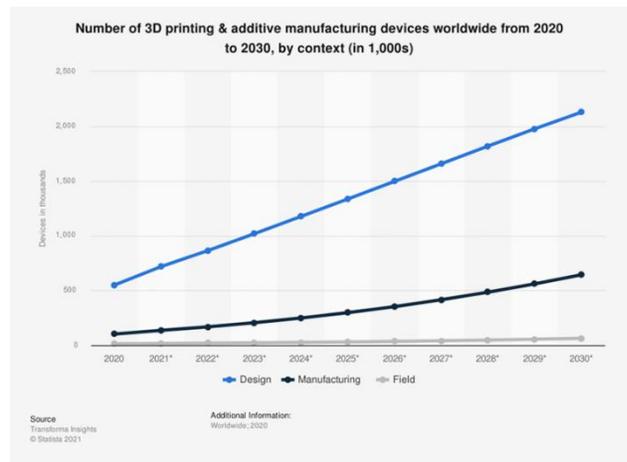


Figura 25 – Numero di dispositivi di stampa 3D diffusi a livello globale, suddivisi per contesto di applicazione.

Nel 2019, gli investimenti complessivi nella tecnologia di stampa 3D (fig.26) hanno interessato per oltre il 50% i produttori di stampanti 3D [32], per il 19% le piattaforme di divulgazione di servizi associati al 3D printing, e per il 13% i fornitori di software per le stampanti ¹⁶.

Infine i limiti della tecnologia (fig. 27), per la maggior parte degli utenti di stampa 3D intervistati nel febbraio 2021 risiedono nei costi elevati di questa tecnologia che impedisce loro di utilizzarla maggiormente, sino ad arrivare al 29% degli intervistati che ha lamentato una scarsa qualità delle parti stampate al punto da non consentirne più l'uso ¹⁷ [33].

¹⁴ Fonte – Statista, Largest additive manufacturing patent owners worldwide from 2011 to November 2019, by number of active patent families.

¹⁵ Fonte – Statista, Number of 3D printing & additive manufacturing devices worldwide from 2020 to 2030, by context.

¹⁶ Fonte – Statista, Distribution of 3D printing investments globally in 2019, by application.

¹⁷ Fonte – Statista, Which factors prevent you from using 3D printing more?

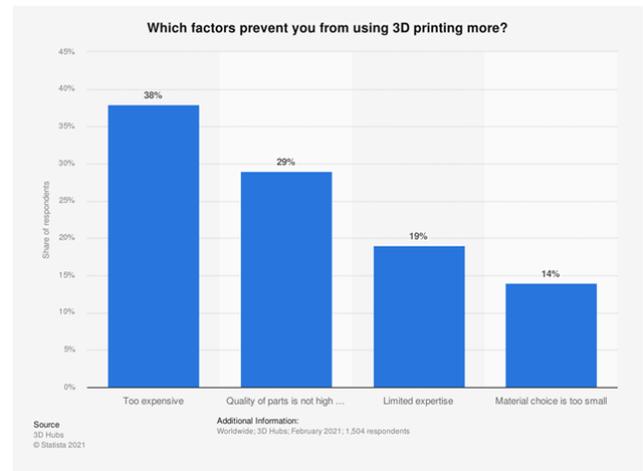
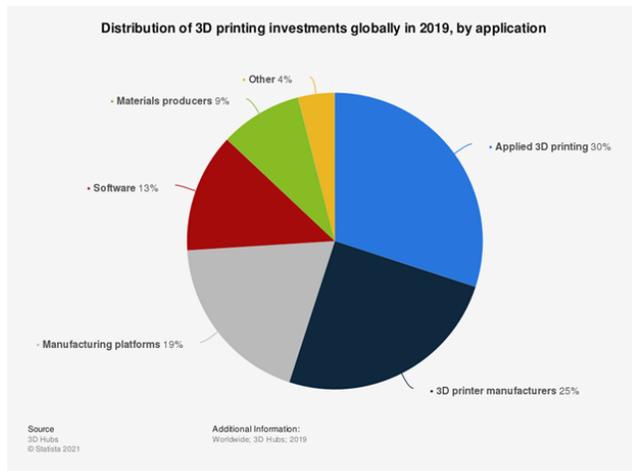


Figura 26 – Distribuzione degli investimenti per ambito di applicazione.

Figura 27 – Principali limiti all'utilizzo della stampa 3D.

Mentre dal lato dei benefici, sempre nel 2021, il 36% degli intervistati ha indicato come scopo prioritario per l'utilizzo della stampa 3D l'accelerazione dello sviluppo dei prodotti (fig. 28), ed un altro 20% si è focalizzato sullo sviluppo di prodotti personalizzati e in serie limitata¹⁸ [34].

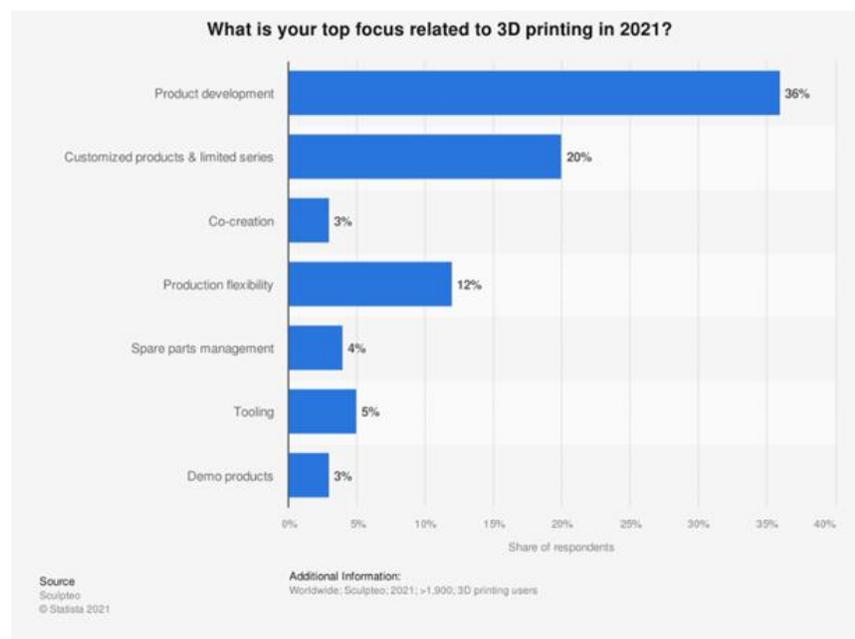


Figura 28 – Principali scopi di utilizzo della stampa 3D.

¹⁸ Fonte – Statista, What is your top focus related to 3D printing in 2021?

Modello di Abernathy e Utterback

Come accennato all'inizio del capitolo, l'obiettivo di questa parte dell'elaborato è, tra gli altri, quello di analizzare l'attuale livello di diffusione della stampa 3D, sfruttando i dati di mercato precedentemente descritti. Per poter fare ciò, verrà utilizzato il così detto modello di Abernathy e Utterback, uno dei principali modelli accettati dalla letteratura scientifica. Questo modello si basa principalmente su 4 curve, che descrivono 4 aspetti differenti, ma tutti inerenti al tasso di innovazione di una tecnologia. Le curve in esame rappresentano rispettivamente:

- Performance;
- Vendite;
- Numero di imprese operanti nel settore;
- Tasso di innovazione della tecnologia, dato dal numero di brevetti per quella determinata tecnologia.

Le curve devono essere lette e analizzate l'una in relazione alle altre, al fine di poter stimare, seppure in maniera approssimativa, il livello di diffusione di una tecnologia. Le prime 2 curve, quelle di performance (o curve ad S) e delle vendite, permettono di definire 3 fasi tipiche del ciclo di vita di un prodotto:

- 1) Incubazione o fase fluida;
- 2) Diffusione o fase di transizione;
- 3) Maturità o fase specifica.

Durante il periodo di incubazione, vengono effettuati ingenti investimenti in R&S da parte delle aziende e delle università, al fine di approfondire un nuovo principio tecnologico. Questa fase è caratterizzata da performance della tecnologia emergente relativamente inferiori rispetto al paradigma tecnologico già presente sul mercato; molto spesso, in questa fase, le imprese non sono in grado di garantire una produzione su vasta scala dei nuovi prodotti, o perché la tecnologia non è sufficientemente nota, o perché i costi di produzione sono ancora troppo alti per sostenere una produzione di massa, o perché l'ecosistema di cui necessita la nuova tecnologia per crescere (sistemi complementari, legislazione, ecc.) non è ancora sufficientemente predisposto ad accoglierla. Nella

seconda fase, quella di transizione, la tecnologia è stata studiata abbastanza da permettere una sua diffusione iniziale. In questo caso, le vendite iniziano ad aumentare e si assiste alla produzione su vasta scala del nuovo prodotto. La vecchia tecnologia già presente sul mercato, ormai obsoleta, viene soppiantata dalla nuova. Nell'ultima fase, quella di maturità, la nuova tecnologia non presenta più margini di miglioramento e le vendite si stabilizzano, al punto che un nuovo paradigma può essere scoperto e può dare inizio ad un nuovo ciclo.

Il modello di Abernathy e Utterback, aggiungendo le informazioni inerenti al numero di imprese operanti nel settore e al numero di brevetti per la tecnologia, prende in esame una quarta fase – tra il periodo di incubazione e quello di diffusione – definita come fase fluida. Durante questa fase, si assiste ad un ingente dispiegamento di risorse, finanziarie e non, da parte delle imprese, al fine di comprendere la migliore struttura tecnica possibile del prodotto emergente che possa garantire allo stesso tempo le prestazioni massime per la nuova tecnologia e i minimi costi di produzione. Durante questa fase, viene sviluppato un numero ingente di brevetti, in quanto l'obiettivo delle imprese è quello di arrivare per prime alla migliore soluzione tecnica; d'altro canto, questo si tramuta in un ingente sforzo economico e le imprese che non riescono a sostenere tale impiego di risorse finanziarie escono dal mercato per lasciare spazio alle concorrenti. Di conseguenza, alla fine della fase fluida, si assiste ad un numero ridotto di imprese che sono in grado di sviluppare, su larga scala, la nuova tecnologia.

Considerando, dunque, le informazioni di mercato raccolte, inerenti alla tecnologia della stampa 3D, è possibile ora tracciare, seppure in maniera approssimata, le curve del modello, per poter trarre delle prime conclusioni sul livello di diffusione del 3D printing.

4.2.1 Performance

La prima curva analizzata è la curva delle performance, o curva ad S, che indica il livello di avanzamento di una tecnologia. Può essere misurata in diversi modi, considerando ad esempio il livello di investimenti fatti nella tecnologia e il relativo tasso di incremento delle performance nel tempo; altresì, può essere misurata come il numero di dispositivi presenti nel mercato, che indicano il livello di diffusione della tecnologia. È questo il metodo usato nel caso in esame. Dalla figura 29 è possibile infatti osservare, secondo proiezioni basate su serie storiche¹⁹, che entro il 2030, il numero

¹⁹ Fonte – Statista, Number of 3D printing & additive manufacturing devices worldwide from 2020 to 2030, by context.

di dispositivi di stampa 3D presenti sul mercato sarà più che triplicato rispetto a quello attuale (2.837.000 vs. 871.000). Certamente, questo è un fattore importante che denota un forte livello di diffusione della tecnologia (già a partire dagli anni '20), dovuto a delle curve di apprendimento che favoriranno l'acquisizione delle competenze tecniche della tecnologia e la conseguente crescita dei dispositivi sul mercato.

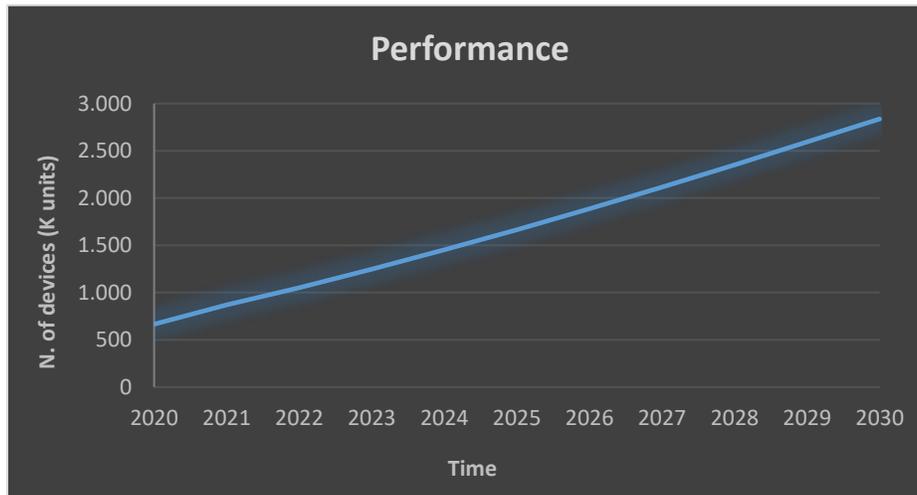


Figura 29 - Numero di dispositivi attesi sul mercato.

4.2.2 Vendite

Il secondo parametro in esame è il valore di mercato della tecnologia, in questo caso misurato come vendite associate sia ai servizi che ai prodotti di stampa 3D. Anche in questo caso (fig. 30) è possibile osservare una crescita esponenziale attesa²⁰, che si aggira attorno ad un valore di 90 MLD \$, previsti entro la fine del 2030.

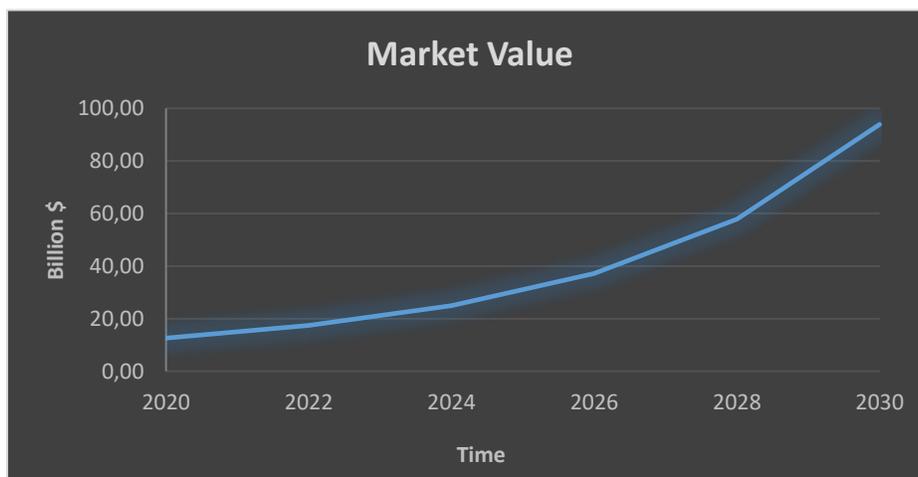


Figura 30 - Valore di mercato dei prodotti e servizi di stampa 3D, dal 2020 al 2030.

²⁰ Fonte – Statista, Statista, Global 3D printing products and services market size from 2020 to 2026.

I valori delle vendite associati agli ultimi quattro anni della serie (2026 – 2030) sono stati ricavati seguendo un tasso di crescita medio derivato dal tasso di crescita dei primi 6 anni (2020 – 2026), dei quali era possibile avere abbastanza dati per poter effettuare con maggiore precisione una stima delle vendite attese. L'andamento atteso delle vendite nei prossimi anni rispecchia, come era previsto, quello della diffusione dei dispositivi di stampa 3D osservato nella curva precedente. Già queste due prime curve mostrano come la tecnologia, con ogni probabilità, si trovi nella così detta fase di transizione, nella quale si assiste ad una crescente diffusione della tecnologia, favorita da economie di scala e di apprendimento che fanno sì che l'AM possa essere implementato in diversi processi aziendali. Quello che ancora non è definito è sia l'ambito di applicazione principale della tecnologia sia il modello di stampa 3D che, più degli altri, può essere utilizzato maggiormente.

4.2.3 Numero di imprese nel settore

La terza curva del modello ci dà un'indicazione del livello di apprendimento della tecnologia da parte delle imprese in quanto, maggiore è il numero delle organizzazioni che hanno a che fare con la tecnologia, maggiore è sia la diffusione della stessa sia la sua facilità d'utilizzo e la comprensione delle competenze specifiche necessarie. Di conseguenza, un numero basso di imprese, denota una scarsa padronanza della tecnologia e la sua corrispondente fase di incubazione primordiale; viceversa, un numero crescente di imprese è indice di maggiore esperienza e facilità d'utilizzo dei sistemi di produzione basati sull'AM. Dalla figura seguente, possiamo osservare il numero di imprese operanti nel mercato della stampa 3D, a partire dalla sua nascita che, come detto, è possibile far risalire al 1983, quando Chuck Hull realizzò il primo esempio commerciale di prototipazione rapida.

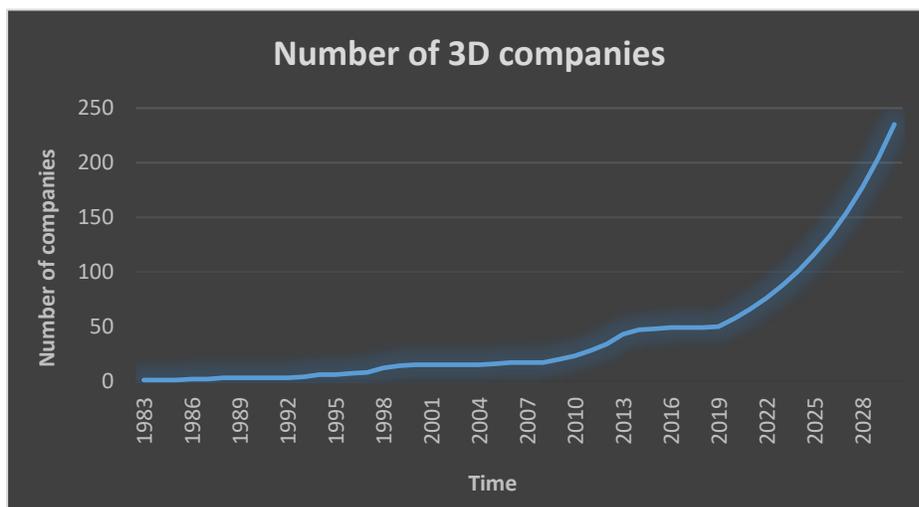


Figura 31 – N. delle principali aziende di stampa 3D attuali e attese, presenti nel settore.

Le imprese in esame non sono le uniche operanti a livello globale; in realtà è ben più grande il numero di attori presenti nel settore. Per semplicità sia d'espressione che di raccolta dati, sono state considerate solo quelle che sono ritenute ad oggi le principali aziende a livello globale, ovvero le aziende in grado di influenzare notevolmente (grazie alle proprie capacità produttive e finanziarie) il livello di diffusione dell'AM. Come era lecito attendersi, il numero di imprese fino ai primi anni 2000 era relativamente basso in quanto era questa la fase primordiale della tecnologia, in cui si dovevano ancora studiare nel dettaglio i requisiti tecnici minimi di funzionamento delle stampanti 3D e capire anche il fine ultimo della tecnologia. In seguito, si è assistito ad un incremento notevole degli attori di 3D printing ²¹ e, in previsione, questo numero potrebbe attestarsi, entro la fine del 2030, a valori 4 volte pari a quelli attuali. Anche in questo caso, il numero di aziende atteso nei prossimi 10 anni è stato ricavato dalle serie storiche degli anni precedenti, ottenendo così una stima del tasso di crescita relativo.

Di seguito, sono mostrate le principali aziende di 3D printing considerate in questa analisi:

- Stanley Black & Decker – New Britain, Connecticut, USA (Manufactured by Sindoh – South Korea).
- 3D Systems – Rock Hill, South Carolina, USA.
- Stratasys – Minneapolis, Minnesota, US.
- Renishaw plc – Wotton-under-Edge, Gloucestershire, UK.
- Solidscape – Wilton, New Hampshire.
- ZYYX – Gothenburg, Sweden.
- Sindoh – Seoul, South Korea.
- Arcam – European Union (EU), Nordic Countries, Scandinavia.
- CRP Group – Modena, Italy.

²¹ Fonte – Wikipedia, Category:3D printer companies; Wikipedia, List of 3D printer manufacturers.

- envisionTEC – Gladbeck, Germany.
- HP Inc. – Palo Alto, California, USA.
- Objet Geometries – Rehovot, HaMerkaz, Israel.
- Sciaky, Inc. – Chicago, Illinois, USA.
- Voxeljet – Friedberg, Germany.
- Y Soft – Brno, Jihomoravsky kraj, Czech Republic.
- Mcor Technologies Ltd – Dunleer, Ireland.
- SLM Solutions Group AG – Lübeck, Germany.
- MakerBot – New York City, New York, USA.
- Magicfirm Europe – Gothenburg, Sweden.
- Prusa i3 – Shenzhen, Guangdong, China.
- Kikai Labs – Buenos Aires, Argentina.
- Made In Space, Inc. – Mountain View, California.
- Ultimaker – Geldermalsen, Netherlands.
- Aleph Objects – Loveland, Colorado, USA – (Lulzbot printers).
- Formlabs – Somerville, Massachusetts, USA.
- Printbot – Lincoln, California, USA.
- Solidoodle – New York City, New York, USA (Closed).
- Velleman – Belgium.
- 3DLT – Covington, Kentucky, United States.
- Airwolf 3D – Costa Mesa, California, USA.
- Geeetech – Shenzhen, China.

- Hyrel 3D – Norcross, Georgia, USA.
- Materialise NV – Leuven, Belgium.
- Prusa Research – Czech Republic.
- AIO Robotics – Los Angeles, California.
- AstroPrint – San Diego, California, United States.
- Carbon – Redwood City, California, USA.
- Fusion3 – Greensboro, North Carolina, USA.
- Kudo3d – Dublin, California.
- M3D – Fulton, Maryland, USA.
- Markforged – Massachusetts, United States.
- Robo3D – San Diego, California, USA.
- Threeding – Sofia, Grad Sofiya, Bulgaria.
- 3YOURMIND – Berlin, GermanY.
- Creality – Shenzhen, China.
- Limbitless Solutions – Orlando, Florida, United States.
- Zortrax – Olsztyn, Poland.
- Desktop Metal – Burlington, Massachusetts.
- Cellink – Boston, Massachusetts, USA.
- 3D makeR Technologies – Barranquilla, Colombia.

4.2.4 Numero di brevetti

Infine, viene analizzata la curva del tasso di innovazione della tecnologia, dato dal numero di brevetti pubblicati in merito alla stessa. Coerentemente con la curva precedente, un numero minore di brevetti denota un basso livello di conoscenza della tecnologia; viceversa, un maggior numero di brevetti denota una conoscenza approfondita e un tasso di miglioramento e di innovazione dei sistemi di AM. Come è possibile vedere dalla figura 32, il numero di brevetti sviluppati dalle aziende ²² segue lo stesso andamento esponenziale della curva precedente, mostrando effettivamente una forte correlazione tra numero di imprese e relativa conoscenza tecnologica.

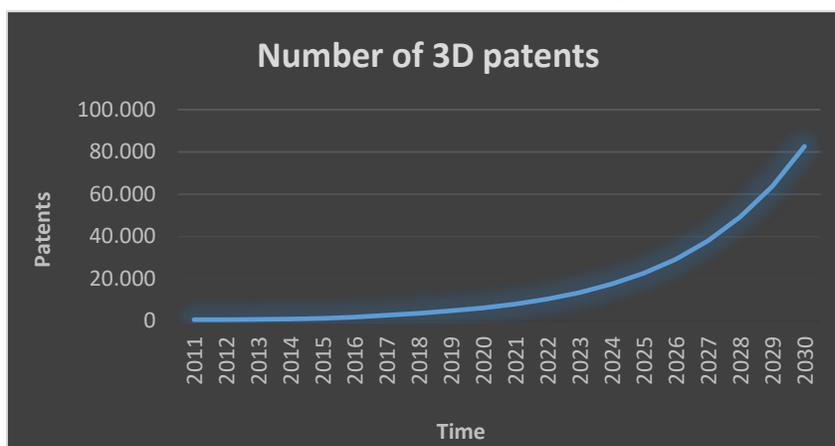


Figura 32 – N. di brevetti attuali e attesi sviluppati dalle aziende di stampa 3D.

È lecito attendersi, infatti, che un'azienda abbia più possibilità di sopravvivere nel contesto competitivo se ha a disposizione una propria conoscenza tecnica unica, sulla quale poter sviluppare la propria tecnologia. Di conseguenza, il numero di imprese e di brevetti seguono, in proporzione, lo stesso andamento. Come per le stime delle altre curve, il numero di brevetti atteso dal 2020 in poi (anno a partire dal quale termina la serie storica dei brevetti), è stato ricavato in base all'andamento dei patents negli anni precedenti. Comparando le 4 curve assieme, è possibile osservare che, in ognuna di esse, si assiste ad una crescita esponenziale a partire dagli inizi degli anni '20. Questo indica che probabilmente è stata da poco superata la fase di incubazione della tecnologia; il livello di conoscenza della stessa è abbastanza approfondito da garantire, seppur con alti e bassi, una graduale diffusione dei dispositivi di stampa 3D.

²² Fonte – Statista, Statista, Largest additive manufacturing patent owners worldwide from 2011 to November 2019, by number of active patent families.

5.0 Metodologia

Come anticipato nell'abstract di questo lavoro, l'obiettivo dell'elaborato è quello di trovare una tecnologia di stampa 3D in grado di diventare predominante tra quelle attualmente esistenti.

Il contesto nel quale viene portato avanti il progetto vede l'AM largamente diffusa in diversi settori industriali. Quindi, come evidenziato dal modello di Abernathy e Utterback, ci si trova nella fase in cui sono presenti diverse iniziative di 3D printing, differenti per caratteristiche tecniche e tipo di processo. Questo, da un lato porta alla possibilità di analizzare un numero elevato di applicazioni, potendo così avere un ampio spettro di confronto, al fine di determinare la tecnologia migliore; dall'altro, crea maggiori difficoltà di valutazione, in quanto la varietà di casi d'uso dell'AM, di per sé, rappresenta un limite alla scelta del modello tecnico ideale, al punto che potrebbe anche non esistere effettivamente una tecnologia predominante.

Per poter ovviare a queste difficoltà, si adopererà un metodo di valutazione che pone l'attenzione sulle necessità degli stakeholder nei singoli settori industriali, sulle quali verranno ribaltate le prestazioni tecniche delle diverse stampanti 3D; il risultato atteso è quello di "matchare" le esigenze dei settori industriali con la stampante che più si avvicina, da un punto di vista tecnico, ai needs industriali.

Per poter far ciò, verranno raccolte, tramite ricerca secondaria (riviste, pubblicazioni scientifiche, report di settore, ecc..) le iniziative in cui si fa utilizzo dell'AM. In seguito, si adopererà una scrematura delle iniziative, analizzando solo quelle che si ritengono essere le più idonee per la diffusione della tecnologia di 3D printing, a livello industriale. Questa scrematura è doverosa, in quanto è lecito attendersi che ci siano soluzioni di 3D printing realizzate appositamente per scopi precisi, come progettazione di parti altamente sofisticate (e.g. missioni spaziali); va da sé che non è possibile ritenere queste tecnologie in grado di diffondersi per una produzione di massa.

Di conseguenza, il resto dell'analisi avverrà sui casi d'uso ritenuti d'interesse per il diffondersi del 3D printing in ambito industriale.

Dopo aver valutato l'adeguatezza della tecnologia in base agli ambiti d'utilizzo, verrà fatta una valutazione tecnica delle singole stampanti, adattata ai casi d'uso, per verificare se esista, come detto, una tecnologia migliore delle altre. Come accennato nell'introduzione dell'elaborato, questo passaggio avverrà sulla falsa riga del *Quality Function Deployment* (QFD). In particolare, dopo aver

valutato i singoli casi d'uso dell'AM, verranno valutate le esigenze dei diversi industries dal punto di vista tecnico delle stampanti. Il QFD può essere utile in questo senso in quanto permette di tradurre le necessità dei clienti in specifiche di prodotto. Le prime (esigenze del cliente) sono rappresentate dagli indicatori di performance che valutano l'importanza della stampa 3D nei singoli settori industriali, tramite l'analisi dei casi d'uso; le seconde (specifiche di prodotto) sono rappresentate dalle caratteristiche tecniche delle stampanti.

Per concludere, il modello proposto si articola nelle seguenti fasi:

- Raccolta iniziative: verranno quindi elencati gli ambiti di utilizzo della stampa 3D, tramite lo studio di diversi articoli scientifici e di settore, paper, pubblicazioni, ecc.. raccolti nel corso dell'elaborato.
- Scrematura delle iniziative in casi d'uso: a questo punto verranno analizzati unicamente gli scenari adatti al tipo di studio portato avanti, ovvero quelli che possono permettere la diffusione a livello industriale del 3D printing.
- Valutazione degli indicatori di performance: in questa fase verranno analizzati i parametri (m) in base ai quali misurare la rilevanza delle stampanti 3D nei singoli casi d'uso. Come risultato si avrà un vettore riga, uguale per ogni settore industriale, nel quale ciascun indicatore verrà pesato in base alla sua rilevanza nel singolo caso d'uso. La scala utilizzata per pesare il singolo indicatore di performance col caso d'uso sarà di tipo qualitativo, e sarà caratterizzata da valori compresi tra 1 e 10 (dove 1 sta per correlazione nulla e 10 per correlazione massima).
- Definizione delle caratteristiche tecniche: a questo punto, si elencheranno quantitativamente quelle che sono le caratteristiche tecniche (n) per le singole stampanti (s), al fine di descrivere le prestazioni operative di ogni stampante.
- Razionalizzazione caratteristiche tecniche: dopo aver elencato quantitativamente le prestazioni operative delle singole stampanti, queste verranno correlate alla singola tecnologia di AM tramite tre range di riferimento. Per valori della caratteristica tecnica appartenenti ad un range basso, verrà corrisposto il valore 1; per un range medio 3; infine, per un range alto 9. E.g., se la caratteristica in questione è la velocità di stampa, verrà assegnato valore 1 alle stampanti la cui prestazione è compresa tra 0 mm/h e 30 mm/h, 3 a quelle la cui prestazione è compresa tra 31 mm/h e 60 mm/h e 9 per velocità superiori a 61 mm/h. Si otterrà dunque una

matrice n (caratteristiche tecniche) \times s (stampanti) riempita con i suddetti valori di correlazione.

- Valutazione delle tecnologie di AM in relazione agli indicatori di performance: infine, in questa fase, si otterrà una matrice m (indicatori di performance) \times s (stampanti), per ogni caso d'uso, tramite la quale sarà possibile valutare l'adeguatezza del singolo modello di stampante (grazie alla valutazione delle caratteristiche tecniche per ogni stampante precedentemente effettuata) in relazione agli indicatori di performance dello use case. Le stampanti verranno correlate ai singoli indicatori, in questo caso, tramite il prodotto scalare delle caratteristiche tecniche e gli indicatori di performance. Ogni indicatore di performance verrà correlato solo con le caratteristiche tecniche che maggiormente lo impattano. In altri termini, il prodotto della caratteristica tecnica per l'indicatore di performance verrà pesato in base al grado di correlazione esistente tra i due parametri, al fine di mantenere una valutazione il più oggettiva possibile, senza distorcere i risultati finali.

Le tecnologie in esame, come detto nel capitolo 2, sono quelle che ad oggi vengono maggiormente utilizzate in ambito industriale: Fused Deposition Modelling (FDM), Stereolithography (SLA) e Selective Laser Sintering (SLS). Di conseguenza, lo scopo del confronto è quello di trovare, se esiste, una tecnologia tra le tre proposte che sia migliore delle altre, in termini di adattamento e applicazione ai vari settori industriali.

5.1 Raccolta ambiti applicativi dell'AM

Come accennato nel paragrafo precedente, questa parte dell'elaborato mira a raccogliere i differenti casi d'utilizzo della stampa 3D nei diversi settori industriali. La ricerca non si è limitata ad un settore in particolare, in quanto è probabile che settori nei quali la tecnologia è usata solo in parte marginale possano favorire, negli anni a venire, la diffusione della tecnologia stessa, benché altre forme di 3D printing possono attualmente essere maggiormente impiegate in altri contesti.

Va fatta un'importante precisazione. Le iniziative raccolte non considerano tutti gli attuali casi d'uso della tecnologia, i quali, come è lecito attendersi, sono in numero ben più grande delle iniziative stesse considerate nel corso dell'elaborato. Piuttosto, l'obiettivo è stato quello di raccogliere il maggior numero di iniziative rappresentative di tutti gli utilizzi che, ad oggi, vengono fatti della stampa 3D. Pertanto, se, come verrà spiegato più avanti nell'elaborato, le iniziative raccolte in ambito sanitario

sono 23, in realtà gli utilizzi delle tecniche di AM in tale contesto sono ben maggiori. Allo stesso tempo, però, ha senso ritenere che da queste 23 iniziative si diffondano tutti gli altri utilizzi della tecnologia, nelle loro diverse sfaccettature. Quindi, si è cercato di ottenere una matrice comune degli ambiti di applicazione dell'AM nei diversi settori industriali, partendo dai quali, in seguito, si diffonde la totalità delle applicazioni globali della tecnologia.

Va fatta poi una seconda considerazione. Il principale limite della raccolta riguarda il fatto che molti degli ambiti di utilizzo analizzati sono in una fase primordiale; di conseguenza, risulta complicato valutare l'importanza che le diverse tecnologie di 3D printing possono avere in tali contesti. Ciò nonostante, si è cercato comunque di valutare la forma ideale di AM anche nei contesti in cui la tecnologia è appena emersa.

La ricerca è stata improntata tramite lo studio oculato di:

- report di settore;
- pubblicazioni;
- articoli di riviste scientifiche;
- siti di aziende esperte di AM;
- report di osservatori;
- blog di esperti.

Il lavoro è stato svolto nell'ottica di ottenere un numero di informazioni provenienti da contesti differenziati, al fine di osservare come la stampa 3D si possa adattare alle esigenze dei diversi stakeholder. A tal proposito, le iniziative raccolte vengono poste sia in termini di utilizzo dell'AM, sia dalla prospettiva di imprese che hanno ottenuto finanziamenti al fine di realizzare progetti che vedono il 3D printing al centro del loro sviluppo, e pertanto ancora non operativo.

Le iniziative raccolte in totale sono 75. Nell'appendice 1 è possibile osservarle nel loro insieme. Nella tabella seguente, invece, vengono riassunte per settore industriale.

Settore	Numero di iniziative
Navale	9
Ristrutturazione archeologica	1
Aerospace & Defense	11
Dentale	5
Manifattura	1
Automotive	8
Sanità	23
Elettronica di consumo	5
Architettura	2
Alimentare	9
Orafo	1

Tabella 2 – Iniziative raccolte, per settore industriale.

Il settore sanitario è quello in cui l'AM trova maggiore impiego, seguito da quello aerospaziale e della difesa, dal settore navale e alimentare. Questo non dovrebbe sorprendere, in quanto la stampa 3D si presta, per le proprie caratteristiche, alla realizzazione di diversi modelli, di dimensioni non troppo grandi, utilizzati soprattutto nel settore sanitario e aerospaziale, come protesi (nel primo caso) e componentistica per propulsori aerei (nel secondo caso).

5.1.2 Scrematura iniziative in casi d'uso

In questa parte del modello, si cercherà di razionalizzare le iniziative raccolte nei casi d'uso in cui è possibile valutare la rilevanza delle tre tecnologie in questione. Infatti, come accennato nella descrizione della metodologia, molte delle iniziative raccolte non si prestano ai tre modelli di stampa 3D in quanto, per lo scopo finale dell'iniziativa, sono state sviluppate tecnologie di 3D printing ad hoc, e che quindi difficilmente possono diffondersi come dominant design per una produzione di massa.

Di seguito, è possibile osservare i casi d’uso delle diverse iniziative precedentemente raccolte.

Settore	Use case	Numero di iniziative
Navale	componentistica di struttura per droni	1
Navale	manutenzione e pezzi di ricambio imbarcazioni	2
Navale	componentistica dei sistemi di drenaggio delle imbarcazioni	1
Ristrutturazione archeologica	riproduzione di modelli tramite l'analisi di fotogrammi	1
Aerospace & Defense	componentistica del sistema di carburazione dei propulsori	1
Aerospace & Defense	produzione di sistemi di supporto per componenti motore	1
Aerospace & Defense	componentistica di struttura per gli aeromobili	2
Aerospace & Defense	componentistica di parti costituenti i propulsori	1
Aerospace & Defense	manutenzione e pezzi di ricambio ISS	1
Dentale	riproduzione di stampi dentali	3
Dentale	riproduzione di protesi dentali	1
Dentale	riproduzione di guide chirurgiche per interventi di odontoiatria	1
Manifattura	realizzazione di utensili manifatturieri	1
Automotive	riproduzione di modelli per auto	2
Automotive	personalizzazione di parti auto	1
Automotive	componentistica di struttura per auto	2
Automotive	componentistica e pezzi di ricambio auto	2
Sanità	riproduzione di apparecchi acustici	3
Sanità	riproduzione di protesi	8
Sanità	realizzazione di strumenti medici	1
Sanità	riproduzione di calchi in gesso	1
Sanità	riproduzione di lenti ottiche	1
Elettronica di consumo	micro-componentistica per parti elettroniche	2
Elettronica di consumo	riproduzione di sensori	1
Elettronica di consumo	riproduzione di lenti ottiche	1
Alimentare	riproduzione di alimenti	3
Orafo	riproduzione di stampi per gioielli	1

Tabella 3 – Use case, per settore industriale

Delle 75 iniziative originali, sono rimasti 46 casi d’uso, dei quali, nei passaggi successivi, bisognerà valutare l’adeguatezza delle tre stampanti (FDM, SLA, SLS), dal punto di vista degli indicatori di performance e delle caratteristiche tecniche.

Si noti come molti dei casi d’uso sono comuni a più settori; ciò nonostante, la specificità del settore determina la stampante migliore per quel contesto industriale. Inoltre, alcune iniziative sono di carattere generale e rispondono alle necessità di più casi d’uso. Questo è dovuto al fatto che l’analisi in questione non è impostata meramente secondo un’ottica tecnica, altrimenti non sarebbe stato possibile rendere i risultati leggibili anche ai meno esperti, come gli stakeholder di settore.

5.2 Indicatori di performance

Nella sezione seguente vengono elencati gli indicatori di performance, uguali per tutti i casi d'uso, in base ai quali misurare la rilevanza delle stampanti 3D. Gli indicatori sono stati scelti in maniera tale da considerare i needs industriali, evitando volutamente un'analisi tecnica troppo approfondita, la quale viene invece ripresa nei paragrafi successivi tramite la descrizione e successiva valutazione delle caratteristiche tecniche delle tre tecnologie.

Di conseguenza, i parametri scelti sono i seguenti:

- Scalabilità. Questo parametro indica il grado con cui le stampanti sono in grado di adattarsi alla produzione industriale dei singoli use case, facilitando una produzione di massa e in serie. Pertanto, dipende da tante variabili come il livello di inserimento delle stampanti all'interno della filiera di produzione, il grado di adattamento ai diversi processi produttivi, ecc..
- Facilità d'utilizzo. Questo parametro indica il livello di istruzione e formazione che i dipendenti devono avere al fine di poter utilizzare una stampante 3D. Infatti, nel momento in cui le tecnologie di 3D printing vanno a sostituire i processi tradizionali, non è detto che gli attori operanti nel settore siano in grado, sin da subito, di comprendere le dinamiche di funzionamento delle stampanti e possono necessitare, pertanto, di più tempo per poter adattare i processi alla nuova tecnologia.
- Integrabilità. Questo indicatore misura il grado con cui una stampante 3D può sostituire del tutto, da un punto di vista tecnico, i processi tradizionali. È lecito attendersi che ci siano stampanti che non permettono la completa sostituzione di alcuni processi produttivi, i quali, al contrario, seppure più dispendiosi in termini di consumo di risorse e tempo, portano a risultati migliori della produzione additiva.
- Precisione. Questo parametro indica il livello di dettaglio con cui è possibile lavorare un pezzo, espresso in funzione della finitura superficiale e della dimensione del pezzo lavorato.

Come detto, ciascuno di questi indicatori verrà poi pesato in base al singolo caso d'uso, in quanto ci possono essere dei contesti in cui ha più senso garantire una produzione rapida e veloce, a scapito della qualità. Di conseguenza, ad esempio, in questi casi è lecito attendersi che i parametri della scalabilità e dell'integrabilità saranno più importanti della qualità della lavorazione.

5.3 Caratteristiche tecniche delle stampanti

Gli indicatori di performance chiave delle tre tecnologie di stampa 3D sono quelli che rispecchiano le capacità tecniche di ogni modello di stampa, in maniera tale da poter ottenere, sin da subito, una prima valutazione quantitativa delle diverse tipologie.

Nello specifico, i key performance indicator sono:

- Velocità di stampa;
- Dimensione massima del materiale lavorato;
- Economicità;
- Numero di materiali lavorabili;
- Qualità di lavorazione.

Il primo parametro in analisi è la velocità di stampa. Per poterlo definire, però, vanno considerate due principali variabili che influenzano i tempi di lavorazione dei pezzi, e che cambiano da stampante a stampante. In particolare vanno considerati i tempi di configurazione del macchinario e la velocità di stampa vera e propria. Inoltre, indipendentemente dalla tecnologia, bisogna impostare il file CAD e la stampante. In seguito bisogna caricare il serbatoio con il materiale di stampa. L'impostazione del file CAD dipende dalla capacità delle stampanti di poter lavorare pezzi dalla geometria più o meno complessa. Per quanto riguarda la velocità di stampa vera e propria, essa dipende dal tipo di lavoro necessario.

Per quanto riguarda le dimensioni massime dei pezzi stampati, queste dipendono dal tipo di processo, dai materiali lavorati, dalle loro proprietà meccaniche e dalla complessità geometrica del pezzo.

L'economicità delle varie stampanti è funzione, oltre che del prezzo di listino, anche di altre variabili quali costi di proprietà e materiali. I costi di proprietà dipendono spesso dal quantitativo di materiale lavorato, in senso inverso. All'aumentare dei volumi di produzione, diminuiscono i costi di proprietà del macchinario, in quanto è più rilevante la parte di ammortamento dell'investimento.

Le materie prime di consumo incidono anch'esse sul costo di utilizzo del macchinario, e dipendono spesso dai volumi di produzione. Considerando poi anche i supporti necessari per la lavorazione dei pezzi, i costi aumentano ulteriormente.

I materiali lavorabili variano da stampante a stampante e saranno analizzati nel dettaglio nei prossimi paragrafi. Infine, per quanto riguarda la qualità dei pezzi lavorati, questa dipende dal processo di stampa 3D, il quale produce una parte strato dopo strato; con ciascuno strato vi è la possibilità di creare imprecisioni. Il processo che consente di formare gli strati incide sulla qualità della superficie, sul livello di precisione e sulla precisione di ciascuno strato e, di conseguenza, sulla qualità della stampa in generale.

5.3.1 Prestazioni tecniche della tecnologia di stampa SLA

La SLA permette la progettazione di parti e prototipi ad alta precisione; inoltre può lavorare un'ampia gamma di materiali con ottima finitura superficiale.

Lo spessore dello strato è compreso in un range tra 0,1 mm e 0,2 mm, con una precisione di +/- 0,15 mm. I pezzi che possono essere lavorati hanno una dimensione massima di 2100 x 700 x 800 mm [35].

Possono essere utilizzati i seguenti materiali [36]: resine epossidiche-acriliche, come Poly1500, PP, TuskXC2700T / Tusk2700W, Tusk SolidGrey3000, Flex70B, NeXt, Protogen White, Xtreme, WaterClear.

Le proprietà del materiale NeXt sono [37]:

- modulo di trazione: 2370 -2490 Mpa;
- resistenza a trazione: 31-35 Mpa;
- allungamento a rottura: 8-10%;
- modulo flessionale: 2415 -252 525 Mpa;
- resistenza alla flessione: 68-71 Mpa;
- resistenza all'urto: 47 -52 J/m;
- deformazione sotto carico: 48-57°C.

Per quanto riguarda la velocità di stampa, bisogna per prima cosa considerare che la stereolitografia presenta poche limitazioni di design, e anche l'impostazione delle loro stampanti è molto semplice e intuitiva, bastando inoltre pochi secondi per cambiare materiale. Ciò nonostante, la SLA è la tipologia di stampa più lenta tra quelle analizzate, con valori massimi raggiungibili di 28 mm/h.

Per quanto riguarda i costi di proprietà, le stampanti di tipo SLA permettono lavorazioni più precise e minori volumi di produzione rispetto alle FDM, avendo come conseguenza costi leggermente superiori delle seconde, variando tra i 3.300 € e i 10.000 €. Il costo dei materiali, invece è compreso tra 135 €/L e 170 €/L.

Nella stampa 3D SLA, la resina liquida è polimerizzata da un laser ad alta precisione che forma gli strati, il quale è in grado di ottenere dettagli molto più raffinati ed è molto più affidabile nell'ottenere risultati di alta qualità in modo continuativo. Come risultato, la stampa 3D SLA è conosciuta per i suoi particolari precisi, la finitura superficiale liscia, l'assoluta precisione delle parti e l'accuratezza.

5.3.2 Prestazioni tecniche della tecnologia di stampa SLS

Le parti prodotte tramite stampa 3D SLS hanno caratteristiche meccaniche eccellenti, con una resistenza simile a quella delle parti create a iniezione.

Lo spessore dello strato corrisponde a valori di 0,8 mm, con una precisione di +/- 0,3 mm. I pezzi che possono essere lavorati hanno una dimensione massima di 700 x 380 x 580 mm [38].

Possono essere utilizzati i seguenti materiali [39]: poliammide (PA), poliammide riempita con vetro (PA-GF), alumide, PA 2241 FR, TPU 92A-1.

Le proprietà del materiale PA sono [40]:

- modulo di trazione: 1650 Mpa;
- resistenza a trazione: 22 Mpa;
- allungamento a rottura: 20%;
- modulo flessionale: 1500 Mpa;
- resistenza alla flessione: 50 – 80 Mpa;
- resistenza all'urto: 53 J/m;
- deformazione sotto carico: 86°C.

La presenza delle polveri come supporto fa sì che si possano realizzare pezzi con sbalzi o fori interni con relativa facilità, a scapito però dei costi medio alti della tecnologia che si aggirano attorno a valori superiori ai 10.000 €, per i costi di proprietà, e valori di 90 €/Kg per quanto riguarda i materiali.

La velocità di stampa è funzione anzitutto delle poche limitazioni di design, dovute al fatto che le parti SLS, come detto, non richiedono supporti, in quanto sono sostenute dalla polvere circostante; la

preparazione dei progetti è semplice, in quanto il software aiuta ad ottimizzare i volumi di stampa. Anche per le impostazioni delle stampanti SLS, non è richiesto un grande sforzo.

Il processo di stampa 3D SLS è invece più lungo, in quanto il macchinario deve riscaldarsi e le parti devono poi raffreddarsi dopo la stampa. Tuttavia questo processo consente di unire contemporaneamente più parti in una singola stampa e quindi in maniera più efficiente per produrre grandi lotti. Come conseguenza, la velocità di stampa massima raggiungibile è di 48 mm/h.

5.3.3 Prestazioni tecniche della tecnologia di stampa FDM

Le stampanti 3D FDM non creano parti solide ma usano strutture interne per riempire rapidamente lo spazio in un modello. Inoltre, usano anche strati più spessi, facendo sì che il livello di dettaglio sia inferiore. La FDM risulta quindi ideale per parti grezze ma meno efficace per parti complesse.

Lo spessore dello strato è compreso in un range tra 0,13 mm e 0,25 mm per i materiali ABSi e PC, aumentando al valore di 0,25 mm per il materiale PPSU, con una precisione di +/- 0,35 mm. I pezzi che possono essere lavorati hanno una dimensione massima di 914 x 610 x 914 mm [41].

Possono essere utilizzati i seguenti materiali termoplastici [42]: ABS, ABSi, ABS-M30, ABS-ESD7, PC-ABS, PC-ISO e ULTEM 9085.

Le proprietà dell'ABS sono [43]:

- modulo di trazione: 1627 Mpa;
- resistenza alla trazione: 22 Mpa;
- allungamento a rottura: 6%;
- modulo flessionale: 1834 Mpa;
- resistenza alla flessione: 41 Mpa;
- resistenza all'urto: 107 J/m;
- deformazione sotto carico: 76-90°C.

La stampa FDM è quella che presenta più restrizioni di design, di conseguenza l'ottimizzazione dei modelli CAD risulta essere la più lunga. D'altro canto, l'impostazione delle stampanti FDM è molto

semplice, e questo non richiede molto tempo, potendo inoltre cambiare materiale rapidamente. Inoltre, essendo stata progettata per lavorare grossi lotti di produzione, la velocità di stampa massima è la più elevata delle 3 tecnologie, pari a 100 mm/h.

In genere, le stampanti FDM sono le più economiche, presentando i costi di proprietà più bassi, i quali variano tra i 2.000 € e gli 8.000 €. I costi dei materiali si aggirano in un range compreso tra 80 €/Kg e 160 €/Kg.

Le stampanti 3D FDM formano strati depositando linee di plastica fusa. Con questo processo, la risoluzione della parte viene definita dalla dimensione dell'ugello di estrusione e si creano dei vuoti fra le linee arrotondate quando queste sono depositate. Come risultato gli strati potrebbero non aderire completamente l'uno all'altro, restando in generale chiaramente visibili sulla superficie; inoltre il processo non è in grado di riprodurre i dettagli complessi che le altre tecnologie offrono.

5.4 Razionalizzazione caratteristiche tecniche

Nella tabella seguente e nel grafico successivo è ora possibile osservare, secondo due punti di vista differenti, i valori puntuali delle caratteristiche tecniche, per ogni stampante, descritte nel paragrafo precedente. La tabella dà una rappresentazione statica e diretta delle prestazioni delle diverse tecnologie; il grafico seguente, invece, permette un confronto più immediato delle stampanti, dando un'idea, già in via preliminare, di quale sia quella ideale. Va detto, però, che benché possa sembrare sin da subito che ci sia una stampante migliore delle altre, ci possono essere delle caratteristiche tecniche di una singola tecnologia che la rendono più adatta a determinati casi d'uso, nonostante, nel complesso, non risulti essere la migliore.

Per questo motivo, l'adeguatezza delle stampanti verrà valutata non solo tramite l'analisi tecnica delle loro caratteristiche, ma anche tramite, come detto, gli indicatori di performance dei singoli casi d'uso.

	FDM	SLA	SLS	
Velocità di stampa (mm/h)		100	28	48
Dimensione massima del materiale lavorato (dm ³)		509,59156	1176	154,28
Economicità (€)		17000	21900	19000
Numero di materiali lavorabili (#)		7	9	5
Qualità di lavorazione (tolleranza, mm)		0,35	0,15	0,3

Tabella 4 – Valori puntuali delle performance tecniche delle stampanti.

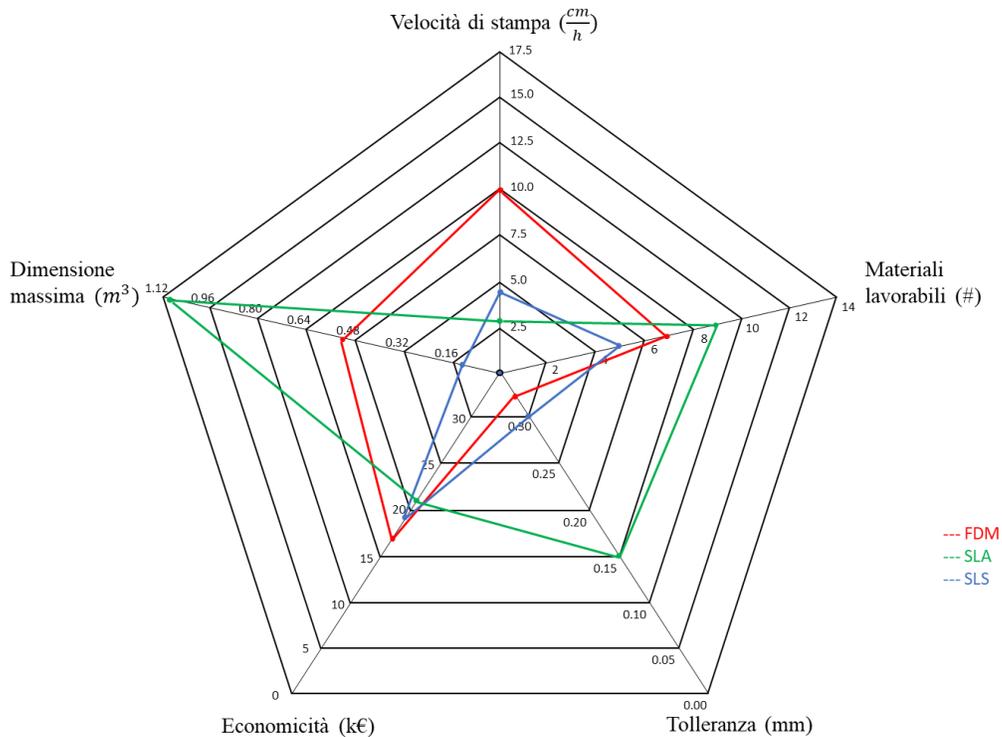


Figura 33 – Performance tecniche delle stampanti.

Il passaggio successivo consiste nell'associare, secondo una scala ordinale, ciascuna caratteristica tecnica alla singola stampante dando un valore basso (1), medio (3) o alto (9), nel seguente modo:

- Velocità di stampa:
 - 1) Da 0 a 30 (mm/h), valore 1.
 - 2) Da 31 a 60 (mm/h), valore 3.
 - 3) Oltre 61 (mm/h), valore 9.
- Dimensione massima del materiale lavorato:
 - 1) Da 0 a 300 (dm³), valore 1.
 - 2) Da 301 a 600 (dm³), valore 3.
 - 3) Oltre 601 (dm³), valore 9.
- Economicità:
 - 1) Oltre 20.001 €, valore 1.

- 2) Da 18.001 € a 20.000 €, valore 3.
- 3) Sotto 18.000 €, valore 9.
- Numero di materiali lavorabili:
 - 1) Da 1 a 5, valore 1.
 - 2) Da 6 a 8, valore 3.
 - 3) Oltre 9, valore 9.
- Qualità di lavorazione (tolleranza):
 - 1) Oltre 0,35 (mm), valore 1.
 - 2) Da 0,20 a 0,34 (mm), valore 3.
 - 3) Sotto 0,20 (mm), valore 9.

Di conseguenza, la matrice n x s ottenuta è la seguente:

	FDM	SLA	SLS
Velocità di stampa	9	1	3
Dimensione massima del materiale lavorato	3	9	1
Economicità	9	1	3
Tipologia di materiali lavorabili	3	9	1
Qualità di lavorazione (tolleranza)	1	9	3

Tabella 5 – Razionalizzazione caratteristiche tecniche.

5.5 Modello scheda di valutazione del singolo caso d'uso

La valutazione dell'importanza delle tre tecnologie per use case avverrà secondo lo schema seguente. Per ogni caso d'uso sarà possibile osservare la rilevanza degli indicatori di performance, pesati per quello use case, la matrice di correlazione indicatori di performance e stampanti (m x s), con relativo punteggio normalizzato della stampante migliore, e un grafico sul quale sono riportati i risultati raccolti per ogni tecnologia.

Nella seguente sezione è riportata la valutazione delle tre tecnologie nel caso della realizzazione di stampi per gioielli. Nell'appendice 2, invece, è possibile osservare le valutazioni dei restanti casi d'uso, per le quali si è seguito lo stesso ragionamento applicato nel caso del settore orafa, di seguito mostrato.

Come detto, per prima cosa, si deve valutare la rilevanza degli indicatori di performance nel singolo use case; questa operazione avviene pesando gli indicatori stessi, tramite una scala ordinale, di tipo qualitativo, i cui valori sono compresi tra 1 e 10 (dove 1 sta per correlazione minima dell'indicatore con lo use case e 10 sta per correlazione massima). Le scelte fatte per pesare gli indicatori col caso d'uso derivano dallo studio del settore industriale, a seguito del quale, si è cercato di far corrispondere un valore oggettivo dell'indicatore stesso allo use case.

Nel caso della realizzazione di stampi per gioielli, il peso di ciascun indicatore di performance è mostrato nella tabella seguente:

	ORAFO
Scalabilità	3
Facilità d'utilizzo	4
Integrabilità	7
Precisione	10

Tabella 6 – Peso degli indicatori di performance nel settore orafa.

Il settore orafa è uno di quei settori in cui, evidentemente, non è fondamentale garantire una produzione di massa dei gioielli, in quanto, il valore del prodotto, e di conseguenza l'incremento di prezzo che il cliente è disposto a pagare, risiede nella qualità del pezzo finale. Come conseguenza, non è tanto importante fare in modo che sia possibile realizzare una produzione in serie di gioielli, piuttosto il focus è sulla pregevolezza e finezza del prodotto. Questo fa sì che si abbia una correlazione medio/bassa degli indicatori di performance quali la scalabilità e la facilità d'utilizzo delle stampanti 3D, a vantaggio, invece, degli altri indicatori quali integrabilità e precisione. Di quest'ultimi due, il più importante è sicuramente la precisione (motivo per cui c'è una correlazione massima con lo use case), ma per poterla garantire è necessario che le stampanti possano implementare e/o sostituire le attuali tecniche di produzione di gioielli; pertanto, anche l'indicatore dell'integrabilità gioca un ruolo importante nello use case.

Volendo rappresentare graficamente quanto detto, si ottiene una figura come quella seguente.

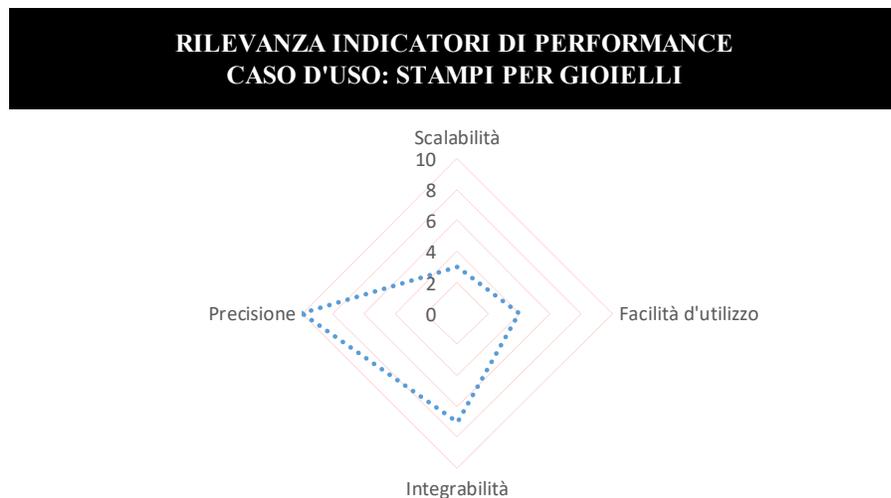


Figura 34 – Rilevanza indicatori di performance nel caso della realizzazione di stampi per gioielli.

Dopo aver pesato gli indicatori di performance in relazione allo use case, è necessario valutare l'adeguatezza delle tecnologie di 3D printing all'interno del caso d'uso. Per poter far ciò si parte dalla matrice $n \times s$, che, come detto, mette in relazione la "forza" delle caratteristiche tecniche con le singole tecnologie di stampa. Ovviamente, questa matrice è unica e non dipende dal caso d'uso; pertanto sarà la stessa anche nelle altre valutazioni. Si ricorda che tale matrice è stata descritta nel paragrafo precedente (*Razionalizzazione caratteristiche tecniche*).

Quindi si procede con l'effettuare il prodotto scalare tra i pesi di ciascun indicatore di performance nel singolo caso d'uso con il vettore caratteristiche tecniche (presente nella matrice $n \times s$), come mostrato nelle figure seguenti.

	ORAFO
Scalabilità	3
Facilità d'utilizzo	4
Integrabilità	7
Precisione	10

Figura 35 – Peso degli indicatori di performance nel settore orafo.

	FDM	SLA	SLS
Velocità di stampa	9	1	3
Dimensione massima del materiale lavorato	3	9	1
Economicità	9	1	3
Tipologia di materiali lavorabili	3	9	1
Qualità di lavorazione (tolleranza)	1	9	3

Figura 36 – Matrice $n \times s$.

Va fatta un'importante precisazione. Al fine di ottenere una valutazione il più oggettiva possibile, e anche per poter comparare in maniera equa le diverse tecnologie di AM, non è stato semplicemente effettuato il prodotto di ciascun indicatore di performance pesato con ciascuna caratteristica tecnica. Piuttosto, si è operato al fine di moltiplicare, e quindi determinare una relazione tra l'indicatore di performance ed esclusivamente quelle caratteristiche tecniche che si sono ritenute essere correlate all'indicatore stesso. Questo vuol dire che, ad esempio, l'indicatore della *scalabilità* non è stato moltiplicato con tutte e cinque le caratteristiche tecniche, ma solo con quelle con le quali ha senso stabilire una relazione.

Di conseguenza, si è deciso di moltiplicare (e quindi mettere in relazione tra di loro), gli indicatori di performance con le caratteristiche tecniche come segue:

- *Scalabilità* con *velocità di stampa*, *dimensione massima del materiale lavorato* ed *economicità*;
- *Facilità d'utilizzo* con *dimensione massima del materiale lavorato* e *tipologie di materiali lavorabili*;
- *Integrabilità* con *economicità* e *tipologia di materiali lavorabili*;
- *Precisione* con *dimensione massima del materiale lavorato* e *qualità di lavorazione*.

Per la prima correlazione si è ritenuto che le variabili quali la velocità di stampa, la dimensione dei pezzi e il costo delle stampanti fossero quelle più rilevanti per stabilire il grado di produzione in serie o su larga scala delle stampanti 3D. Quindi, è logico ritenere che maggiori sono velocità e dimensione del pezzo e contestualmente minore è il costo delle stampanti, più è facile garantire una produzione di massa.

Per quanto riguarda la facilità d'utilizzo si è pensato che, in generale, una dimensione più grande del pezzo lavorato, insieme alla possibilità di trasformare un range più ampio di materiali, semplifica la comprensione della macchina la quale, si può adattare più facilmente a diverse condizioni di lavoro. Al contrario, se il pezzo lavorato fosse di piccole dimensioni, o non fosse possibile operare con più materiali diversi, sarebbero richiesti livelli più alti di specializzazione tecnica e delle competenze più approfondite per poter usare la stampante.

Seguendo la stessa logica si è costruita anche la relazione tra integrabilità e tipologie di materiali lavorabili. In questo caso va aggiunta poi la condizione di economicità per cui, logicamente, meno costosa è una stampante, più facilmente la si può integrare nei processi esistenti.

Infine, l'accoppiamento tra l'indicatore di precisione e la dimensione massima del pezzo insieme alla qualità della lavorazione risulta forse il più intuitivo, e viene quindi lasciata al lettore la sua interpretazione.

Seguendo dunque questa logica, è stato poi possibile ottenere la matrice m x s che evidenzia l'adeguatezza delle stampanti nel singolo caso d'uso, in questo caso quello della stampa per gioielli. Questo avviene tramite la correlazione degli indicatori di performance (m) e le stampanti (s), come mostrato nella tabella seguente.

	FDM	SLA	SLS
Scalabilità	63	33	21
Facilità d'utilizzo	24	72	8
Integrabilità	84	70	28
Precisione	40	180	40
TOT	211	355	97
Normalized score	0,59	1,00	0,27

Tabella 7 – Adeguatezza delle stampanti 3D nel settore orafa.

Secondo le correlazioni enunciate in precedenza tra gli indicatori di performance e le caratteristiche tecniche, si ottiene nel caso della stampa FDM, ad esempio, il punteggio seguente:

- Scalabilità = $3 \cdot (9+3+9) = 63$;
- Facilità d'utilizzo = $4 \cdot (3+3) = 24$;
- Integrabilità = $7 \cdot (9+3) = 84$;
- Precisione = $10 \cdot (1+4) = 40$.

Con la stessa logica sono stati ottenuti i punteggi delle altre due stampanti (SLA e SLS). Quindi è stato conteggiato il punteggio totale per tutte le tecnologie, e per ultimo sono stati normalizzati i punteggi finali dividendoli per quello della stampante che ha totalizzato il valore massimo; di conseguenza, per ogni use case, ci sarà sempre una e solo una stampante che avrà come valore normalizzato 1.

Il passaggio finale consiste nell'inserire in un grafico i risultati ottenuti, per avere un impatto visivo di quale sia la stampante migliore per ogni caso d'uso. Nel settore orafa, il modello di stampa migliore si è rivelata essere la SLA.

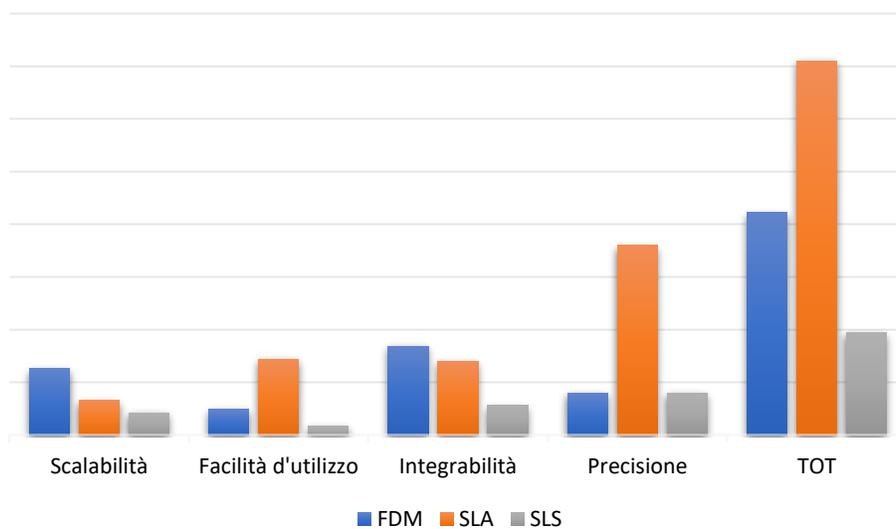


Figura 37 – Graduatoria stampanti 3D nel settore orafa.

Le stesse dinamiche valutative sono state seguite per l'analisi degli altri casi d'uso, mostrati nell'appendice 2.

5.6 Analisi risultati

Nella figura 38 è possibile osservare, in prima analisi, l'adeguatezza in termini assoluti – ottenuta come somma assoluta degli indicatori di performance (apprezzabili, per caso d'uso, nell'appendice 2) – delle tecnologie di AM esaminate, nei singoli casi d'uso.

Rilevanza assoluta della tecnologia nei singoli casi d'uso

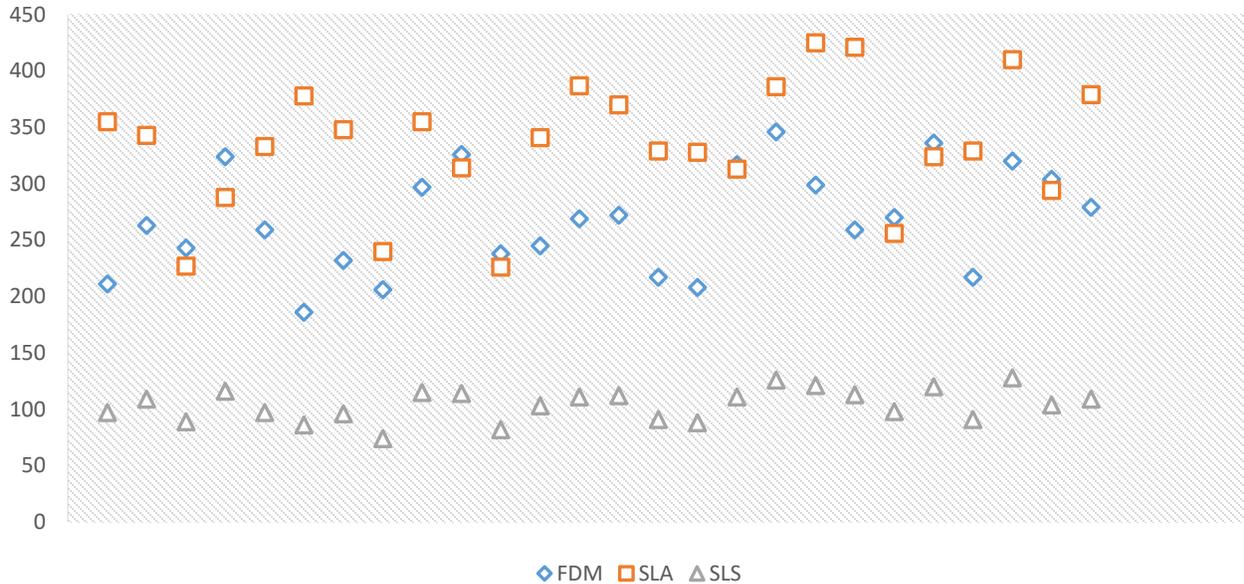


Figura 38 – Rilevanza assoluta della tecnologia nei singoli casi d'uso.

Ciò che salta subito all'occhio è che la tecnologia di stampa SLS non è risultata determinante in alcun caso esaminato.

Per quanto la valutazione del modello si basa, in parte, su delle considerazioni qualitative, e pertanto si potrebbe ritenere lecita la presenza di un margine d'errore nell'analisi, va detto che l'esclusione della tecnologia SLS da tutti gli use case rende, con ogni probabilità, lo stesso modello di stampa inferiore, sia da un punto di vista tecnico, che di corrispondenza ai needs industriali, alle altre due tecnologie di produzione additiva; pertanto, l'analisi proseguirà esclusivamente sulle tecniche FDM e SLS.

Proprio queste ultime due si contendono il resto degli use case. Dallo studio effettuato risulta che la tecnologia SLS è leggermente più impattante della FDM, almeno in prima battuta. Ciò nonostante ci sono dei singoli casi in cui, invece, la seconda ha maggiore rilevanza della prima.

Per capire in quale contesto le due tecnologie si sono distinte al di sopra delle altre, è possibile osservare la figura 39, in cui vengono mostrate entrambe le tecnologie a confronto, nei singoli casi d'uso.

Adeguatezza delle tecnologie FDM e SLA, per caso d'uso

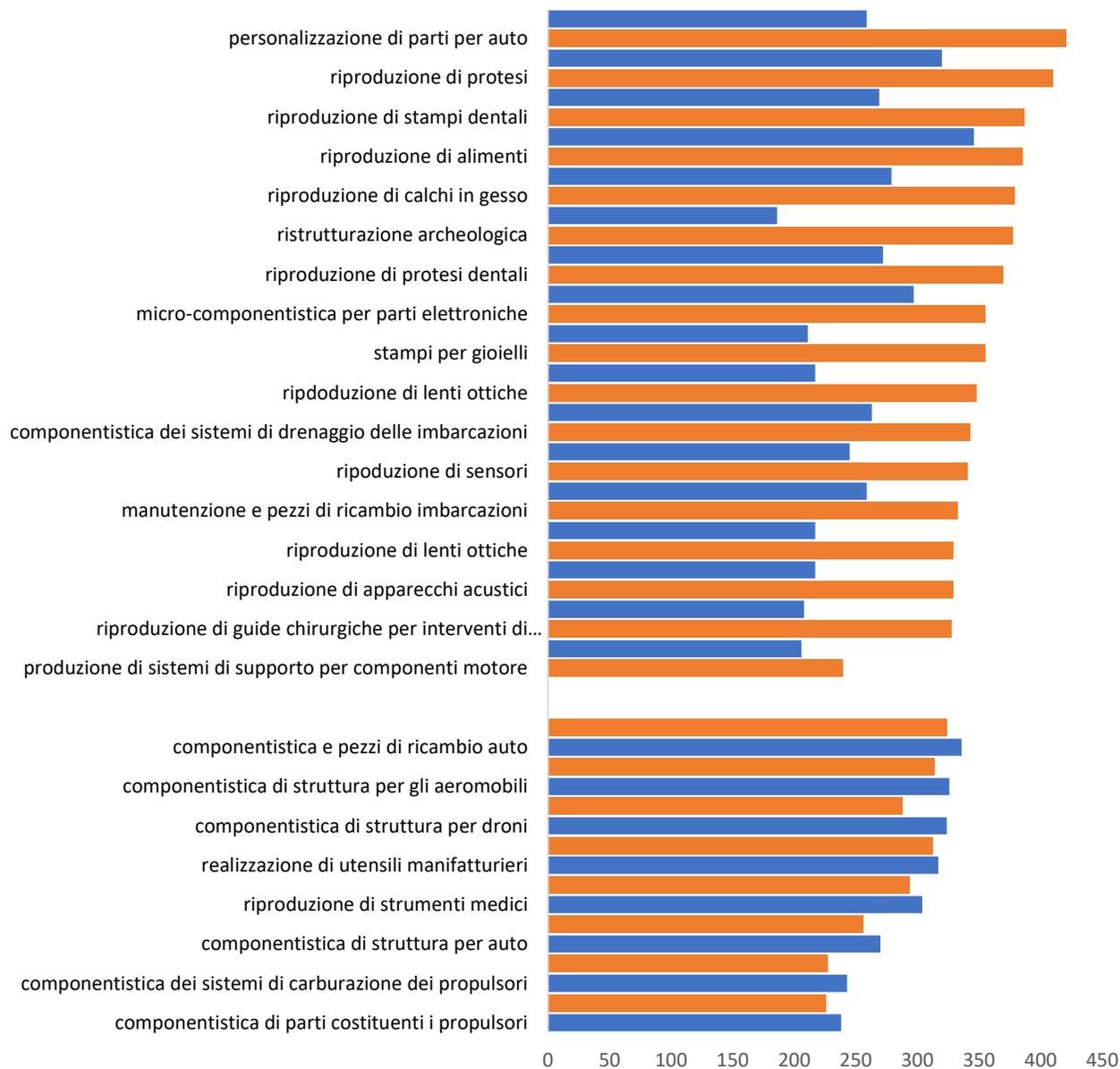


Figura 39 – Adeguatezza delle tecnologie FDM e SLA, per caso d'uso.

In blu sono rappresentati i valori di rilevanza della tecnologia FDM, in arancione quelli della tecnologia SLA. Per quanto entrambe le tecnologie si alternino (con una prevalenza più che doppia della SLA sulla FDM negli use case), risulta chiaro che la differenza assoluta tra le due tecnologie è, in proporzione, molto minore nei casi in cui prevale l’FDM sulla SLA; viceversa, aumenta considerevolmente nei casi in cui è la SLA a impattare maggiormente.

In prima analisi, dunque, la stereolitografia sembrerebbe creare maggiore valore della fused deposition modeling, sia in termini di indicatori di performance (misura dell’adattamento della tecnologia ai differenti needs industriali), sia da un punto di vista tecnico.

Per approfondire ulteriormente l’analisi, è possibile evidenziare l’influenza che entrambe le tecnologie hanno avuto, invece, per settore industriale, come mostrato in figura 40.

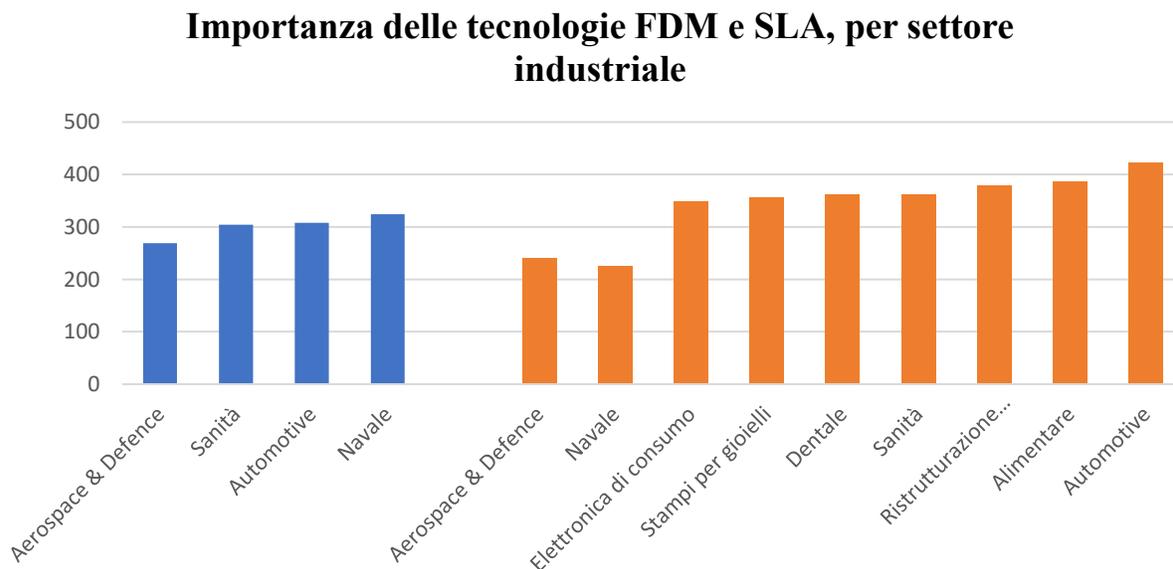


Figura 40 – Importanza delle tecnologie FDM e SLA, per settore industriale.

Come confermato dai risultati delle analisi precedenti, la tecnologia SLS, non solo ha avuto un’influenza maggiore in più settori industriali rispetto alla FDM, ma là dove risulta inferiore nei confronti della seconda, è comunque caratterizzata da una differenza minima, cosa che invece non accade nel caso opposto (ovvero nelle situazioni in cui la FDM è inferiore alla SLA).

Se poi si vedono i singoli use case in cui una tecnologia ha avuto maggior influenza dell’altra, si nota una certa congruenza tra la singola iniziativa e il settore di appartenenza. In effetti, i casi in cui la fused deposition modeling si è rivelata essere la migliore sono tutti riconducibili a settori in cui è fondamentale la produzione su larga scala e la capacità di adattarsi e integrarsi ai sistemi industriali,

in termini di volumi di produzione, a svantaggio invece di una maggiore precisione e cura al dettaglio delle parti lavorate.

Al contrario, la tecnologia SLA tende a creare maggior valore nei settori in cui è richiesta maggiore cura ai particolari, in termini anche di numero di materiali potenzialmente lavorabili. Infatti, in questi settori, spesso è richiesto non solo di ottenere un risultato preciso e accurato, ma anche di dover lavorare con dei materiali particolari ai quali solo la stereolitografia è in grado di adattarsi. Tutto questo va a scapito, spesso, della capacità di poter produrre in serie grandi lotti, come invece è possibile fare tramite la FDM. Va anche detto però, che i settori ai quali la stereolitografia si adatta meglio, come quello della sanità, dell'elettronica di consumo, della ristrutturazione archeologica o dell'alimentare non richiedono grossi volumi di produzione tanto quanto è richiesto per i settori navale, aerospace e in parte automotive, come accade per la FDM.

A conferma di quanto detto, è possibile osservare il grafico seguente, che mette in relazione la rilevanza media delle tecnologie con i singoli indicatori di performance, usati per valutare l'importanza del modello di stampa 3D nei singoli use case.

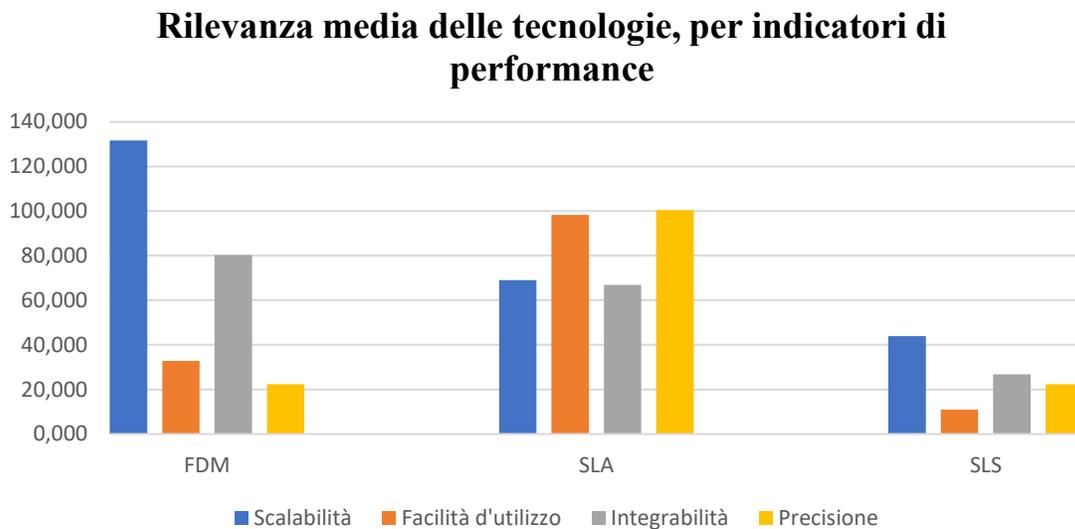


Figura 41 – Rilevanza media delle tecnologie, per indicatori di performance.

La tecnologia SLS risulta essere quella meno influente, come evidenziato anche dal primo grafico. Guardando invece alla FDM, è possibile osservare come la scalabilità e l'integrabilità abbiano avuto maggiore importanza della SLA, e questo giustifica, evidentemente, i casi d'uso in cui è richiesto alla

produzione additiva di favorire grandi volumi di produzione, come accade nei settori maggiormente industriali (navale, aerospace e in parte automotive).

La SLA, invece, è nettamente migliore per quanto riguarda gli altri due indicatori di performance (facilità d'utilizzo e precisione), ma anche nei casi in cui perde il confronto, si mantiene su livelli abbastanza alti.

Questo porta ad un'importante considerazione finale. La SLA si presta maggiormente ai settori in cui è richiesta una precisione chirurgica (come quello della sanità, dentale, orafo, ecc.), ma è comunque rilevante anche per gli altri settori industriali. Infatti, la capacità, tra le altre, di poter lavorare i pezzi con dimensioni più grandi, tra tutte le tecnologie attualmente esistenti, la rende molto competitiva anche negli altri industries. A differenza della stereolitografia, la FDM risulterebbe poco competitiva nei settori in cui si è rivelata meno impattante della SLA, in quanto non è una tecnologia propriamente precisa, come la seconda.

6. Conclusioni

Il lavoro condotto ha permesso di analizzare sia l'importanza delle tecnologie di produzione additiva nei settori in cui trova applicazione, sia la tecnologia che maggiormente si adatta agli stessi, e quindi quella che ha più probabilità di diffondersi come design dominante.

Per poter far ciò sono state raccolte le iniziative in cui trova spazio ogni forma di additive manufacturing, e poi sono state scremate in base ai casi d'uso in cui ha senso ritenere che la tecnologia della stampa 3D si possa diffondere a livello industriale.

Quindi, per ciascuna iniziativa, è stata valutata l'adeguatezza di tre forme diverse di 3D printing, ovvero quello che attualmente sono maggiormente diffuse.

Dai risultati finali, è emerso che potenzialmente la tecnologia nota come stereolitografia possa essere il dominant design futuro. In generale, è difficile affermare che la tecnologia SLA sia la migliore in assoluto, ma è sicuramente quella che si adatta meglio ai vari settori industriali, e in particolare in quelli della sanità (incluso il settore dentale), dei gioielli, dell'arte, dell'alimentare, dell'elettronica di consumo e per la customizzazione di alcuni componenti per le auto.

D'altro canto, la FDM risulta più adatta ai settori maggiormente labor intensive, dove non è richiesta un'elevata qualità delle lavorazioni. Tuttavia, anche in questi settori, la stereolitografia si adatta particolarmente bene.

È più probabile, dunque, che negli anni a venire la SLA si possa affermare come dominant design tra le tecnologie di produzione additiva.

Appendici

Appendice 1 – Lista degli ambiti di applicazione dell’AM

Company/Institute	Industry	Descrizione
Università del Maine	Navale	L'Università del Maine, negli Stati Uniti, ha creato la più grande nave stampata in 3D al mondo. La nave si chiama 3D Cargo ed è stata realizzata tramite una tecnologia di AM progettata direttamente dall'Università stessa, in particolare dall'Umaine Advanced Structures and Composites Center. L'imbarcazione è lunga 7,62 metri per un peso di 2,2 tonnellate.
Università del Maine	Militare	L'Università del Maine, US, oltre ad aver realizzato la più grande imbarcazione al mondo stampata in 3D, ha collaborato anche con il Combat Capabilities Development Command (CCDC), per progettare un rifugio per comunicazioni stampato in 3D, al fine di permettere rapidamente il dispiego di sistemi di rifugio militari.
Oak Ridge National Laboratory (ORNL)	Navale	Il partner dell'Università del Maine, l'Oak Ridge National Laboratory (ORNL), è stato finanziato con una somma pari a 20 MLN \$ per sviluppare un progetto basato sulla tecnologia di produzione additiva usando come materiali fibre di legno.
YAM-Marine Technology	Navale	Nel 2014, in Italia, è stato realizzato il primo prototipo di barca stampata attraverso AM. Il nome del progetto è Livrea 26 ed è stato concepito dal General Manager di YAM-Marine Technology, Francesco Belvisi, e dal designer Daniele Cevola.
Marina militare americana e britannica	Navale	Le marine militari degli Stati Uniti e del Regno Unito hanno iniziato a portare a bordo delle navi alcune stampanti 3D al fine di realizzare in loco componenti per droni, per missioni che variano dall'individuazione di mine esplosive e relativa distruzione, a interventi umanitari.
-	Ristrutturazione archeologica	Tramite la tecnologia di stampa 3D, è possibile inserire diversi fotogrammi di reperti archeologici trovati nelle profondità marine, all'interno di software specifici e all'avanguardia ottenendo dei modelli tridimensionali dei relitti; infatti, a partire da una serie di immagini, è possibile riprodurre modelli 3D ricostruendo le diverse posizioni di uno scatto.
US Navy	Navale	La marina militare americana ha realizzato un sottomarino stampato in 3D in 4 settimane, riducendo il tempo di realizzazione medio di 3 - 5 mesi. Il sottomarino è stato realizzato in materiale composito e fibre di carbonio.
Ben Ainslie Racing	Navale	Il Ben Ainslie Racing è un team di ricerca britannico che ha utilizzato la stampa 3D per realizzare alcuni pezzi di ricambio per la loro imbarcazione, riducendo il suo peso e migliorandone le performance. Questo ha permesso un'ingente riduzione dei costi di fabbricazione.
International Submarine Engineering (ISE)	Navale	L'azienda Canadese ISE sfrutta l'AM per realizzare un serbatoio di zavorra in titanio, per ridurre della metà il tempo di produzione e i costi di processo per la mappatura del fondale artico.
Naval Sea Systems Command (NAVSEA)	Navale	Si tratta del più grande sistema della Marina statunitense che costruisce, acquista ed effettua manutenzione di navi e sottomarini. Nel 2018 ha stampato in 3D un prototipo di DSO, un componente che permette la rimozione e il drenaggio dell'acqua da una linea di vapore su una portaerei.
Rotterdam Additive Manufacturing Lab (RAMLAB)	Navale	In questo caso, la tecnologia di 3D printing, viene utilizzata per riparare rapidamente navi danneggiate, presso il porto di Rotterdam, il quale ha aperto il proprio laboratorio di manutenzione (RAMLAB). Tramite una coppia di bracci robotici a sei assi vengono realizzate in 3D parti metalliche industriali.
US Airforce	Aerospace	L'Airforce americana ha realizzato in Giappone, presso la base Yokota Air, tramite AM, due componenti per modificare le maschere antigas di emissione standard nei sistemi di ossigeno degli aeromobili. Il costo dei singoli componenti è stato di soli 75 centesimi ciascuno.
General Electric	Aerospace	L'azienda americana ha ideato, con l'ausilio della stampa 3D, degli ugelli per l'immissione del carburante nei motori LEAP, riducendo il peso degli stessi del 25% e le parti utilizzate da 18 a 1. Come conseguenza, è stata incrementata di cinque volte la vita utile del sistema di immissione.
NASA	Aerospace	L'agenzia spaziale americana ha iniziato a utilizzare il 3D printing per la realizzazione di surrogati, come sistema di supporto per le componenti dei motori dei jet; inoltre, tramite la produzione additiva, sono state prodotte anche staffe metalliche a basso volume per complessi sistemi salvavita sulle pareti interne degli aerei. Ancora, la tecnologia viene utilizzata anche per componenti aerospaziali che si basano sull'estetica piuttosto che sulla funzione, come le maniglie delle porte e involucri leggeri per il controllo delle ruote.

Airbus	Aerospace	Gli ingegneri della divisione Defense and Space di Airbus sono stati impegnati nella realizzazione di staffe geometriche all'interno di satelliti, per collegare quest'ultimi con riflettori e dispositivi di alimentazione. La sfida è stata superata tramite il ricorso a particolari tecniche di 3D printing che hanno permesso di lavorare materiali complessi, quali il titanio, ottenendo risparmi superiori al 20%, rispetto alle consuete tecniche di fabbricazione, e riducendo di 300 g il peso finale del pezzo.
Boeing	Aerospace	L'azienda ha realizzato nel 2019 la sua prima antenna satellitare in metallo, stampata in 3D, su commissione della compagnia israeliana Spacecom, la quale, nell'agosto dell'anno successivo ha lanciato con successo il satellite AMOS 17. L'azienda americana, tramite l'applicazione di tecniche di AM, è riuscita a sostituire parti di grandi dimensioni con una sola parte stampata in 3D, riducendo sia il peso complessivo dell'antenna, sia i tempi di produzione.
Boeing	Aerospace	L'azienda americana beneficia della stampa 3D anche per i suoi motori. Infatti, la tecnologia è stata utilizzata per la realizzazione dei motori GE9X, per la cui produzione sono stati stampati oltre 300 parti, riducendo il peso del motore e rendendolo il più efficiente al mondo; i risultati ottenuti hanno permesso una riduzione del 12% del consumo di carburante e del 10% dei costi di realizzazione.
Airbus	Aerospace	Nel 2019, l'azienda francese ha stampato la prima parte in titanio per un velivolo di produzione seriale. L'Airbus A350 XWB, ad esempio, contiene più di 1.000 parti stampate in 3D e sta collaborando con l'OEM svizzero Liebherr-Aerospace per la fornitura di ulteriori parti stampate in 3D. Sempre Airbus si sta impegnando per la produzione, tramite AM, di parti metalliche e composite che si trasformeranno in una porta polimerica in fibra di carbonio.
Airbus	Aerospace	Airbus è impegnata anche nella realizzazione di droni e auto self-driving. A tal proposito, l'azienda francese ha firmato da poco una joint venture con Local Motors Industries, una start-up americana, con sede a San Francisco, per la progettazione di due diversi tipi di veicoli elettrici per il decollo e l'atterraggio verticale (eVTOL).
NASA	Aerospace	La Nasa, in collaborazione con la società di San Francisco, Made in Space, sta impiegando la stampa 3D per la realizzazione di parti di ricambio per la Stazione Spaziale Internazionale (ISS). Tra queste, sono state realizzate parti polimeriche come un dispositivo per contenere un monitor di flusso d'aria, una copertura per sensori di radiazioni e un gancio di traino che collega due satelliti liberi nella ISS.
NASA	Aerospace	La Nasa e Made in Space hanno firmato un accordo, dal valore di 73,7 MLN \$ per sviluppare la prima forma di stampa 3D orbitale, dal nome Archinaut, ovvero una piattaforma progettata per la realizzazione di grandi strutture per lo spazio, nello spazio. L'obiettivo è quello di stampare delle ali solari di 10 metri e lanciarle nello spazio entro il 2022.
-	Dentale	Tramite l'AM è possibile realizzare stampi personalizzati di vari dispositivi dentali, come ponti, corone, ecc.. colando del materiale liquido in uno stampo.
-	Dentale	La stampa 3D può essere adoperata per la produzione di modelli ad arco completo, tramite stampi rimovibili, permettendo ai dentisti di pianificare, ad esempio, i restauri della protesi. Il processo prevede l'elaborazione di specifici file CAD, presi direttamente dalla bocca del paziente, per poi essere riprodotti tramite resine rigide.
Invisalign	Dentale	L'azienda usa il 3D printing per la creazione di allineatori dentali, tramite i quali vengono riprodotti modelli accurati dei denti di un paziente. In questo caso, l'oggetto stampato in 3D non è il prodotto finale, ma viene utilizzato per creare il prodotto finale.
-	Dentale	La stampa 3D viene utilizzata anche per la produzione diretta, senza ulteriori fasi intermedie. È questo il caso, ad esempio, di protesi intere, composte da telai in plastica rimovibili dotati di set completi di denti.
-	Dentale	Un altro campo di applicazione è quello delle guide chirurgiche stampate in 3D per facilitare le operazioni di chirurgia dentale. Negli interventi di odontoiatria, tali guide vengono usate, ad esempio, per assicurarsi che gli impianti siano posizionati esattamente nel punto desiderato della bocca del paziente.
-	Automotive	La stampa 3D viene adoperata per la realizzazione di modelli in scala, al fine di analizzare nel dettaglio progetti e concetti di nuovi veicoli. Inoltre, gli stessi modelli, vengono utilizzati anche per il collaudo aerodinamico di nuovi veicoli.
-	Automotive/Manifattura	Diversi utensili di termoforatura, impugnature, maschere e infissi possono essere realizzati tramite AM. Questo permette alle case automobilistiche di progettare campioni e utensili a costi ridotti, eliminando perdite future di produzione.
.	Automotive	La produzione additiva viene implementata dalle imprese di auto per adattare le parti a veicoli specifici, permettendo la customizzazione dell'auto, soprattutto quando questo permette un miglioramento sostanziale delle prestazioni del veicolo.

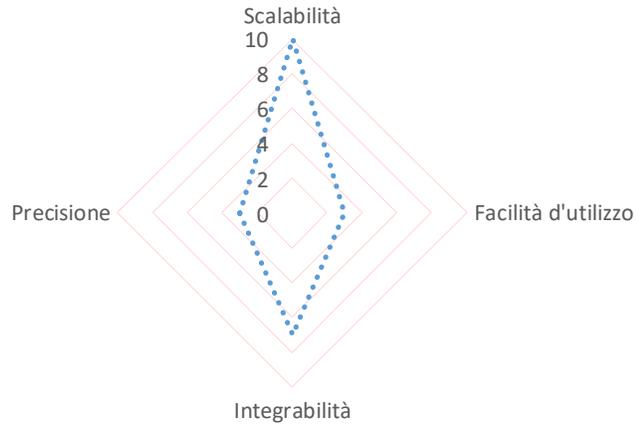
Jaguar	Automotive	Jaguar ha utilizzato la scansione 3D per ricreare il classico modello XKSS del 1957. La riproduzione completa ha richiesto 18 mesi.
Volkswagen	Automotive	Volkswagen ha riprogettato per le proprie auto un supporto per le finestre anteriori che pesa il 74% in meno rispetto alla parte originale.
Audi	Automotive	Nel 2017, AUDI ha inaugurato un centro di stampa 3D a Ingolstadt, in Baviera, Germania e collabora con SLM Solutions Group AG, azienda specializzata nella produzione di additivi metallici, per la produzione di prototipi e pezzi di ricambio.
Rolls Royce	Automotive	La casa automobilistica inglese Rolls Royce ha impiegato la stampa 3D per aumentare il numero di auto prodotte, stampando in 3D 10.000 componenti per il modello Phantom.
Porsche	Automotive	La casa automobilistica tedesca Porsche sta sfruttando la tecnologia di stampa 3D per creare ricambi per le sue auto, combinando la tecnologia di stampa SLM per parti in metallo e la SLS per parti in plastica e attrezzature.
EDAG	Automotive	L'AM è stata utilizzata, tra gli altri, per la realizzazione del telaio di un'auto, dal nome Light Cocoon, il cui progetto è stato incentrato sulla leggerezza delle parti meccaniche. Il veicolo adopera la stampa 3D per ottenere parti portanti più robuste e allo stesso tempo meno pesanti, separando la struttura ossea interna del telaio dalla pelle esterna. Il progetto è stato sviluppato attorno ad una struttura cava a spirale, che permette di assemblare profili in alluminio di diversi spessori. Il peso finale è stato ridotto del 25%.
Materialize	Sanità	L'azienda, impegnata nella produzione di apparecchi acustici, ha realizzato, nel 2000 il Rapid Shell Modeling, o RSM, per la scansione, modellazione e stampa di impianti auditivi. Il processo richiede meno di una giornata.
Widex	Sanità	L'azienda danese ha fabbricato il più piccolo apparecchio acustico al mondo, tramite l'ausilio della tecnologia CAMISHA (Computer Aided Manufacturing of Individual Shell For Hearing Aids).
Starkey	Sanità	L'azienda Starkey produce il 98% degli apparecchi acustici utilizzando stampanti stereolitografiche (SLA), mentre per complicati fattori di forma, il restante 2% non è prodotto utilizzando il 3D printing.
-	Sanità	Ampio utilizzo della stampa 3D viene fatto per la realizzazione di protesi. Tramite l'AM è possibile personalizzarle in base ai gusti individuali, riducendo tempi e costi.
Easton La Chapelle	Sanità	Si tratta di un ragazzo di 17 anni che, volendo aiutare una bambina di 9 anni la cui famiglia non poteva permettersi di comprare una protesi dal valore di 80.000 \$, realizzò la prima protesi stampata in 3D. Il processo sfruttava la tecnologia EEG (elettroencefalografia), per poter far sì che la protesi venisse controllata tramite le onde cerebrali. Il costo finale fu di soli 500 \$.
e-NABLE	Sanità	Si tratta di una rete di volontari, composta da insegnanti, studenti, ingegneri, scienziati, professionisti medici e designer, che utilizzano la stampa 3D per creare mani e braccia per coloro che necessitano di un dispositivo di assistenza agli arti superiori.
NotImpossible	Sanità	NotImpossible fornisce soluzioni a basso costo creando o modificando soluzioni accessibili, come la stampa 3D, su una piattaforma fa da te open-source e costruisce dispositivi per aiutare le vittime di guerra o i portatori di handicap.
4WEB	Sanità	L'azienda, operata nel campo delle protesi, nel 2014 ha stampato e impiantato oltre 3.000 sistemi di traliccio spinale.
3D Slicer	Sanità	3D Slicer è un pacchetto software libero open source per la visualizzazione e l'elaborazione di immagini mediche che può essere applicato alla stampa 3D. Si tratta di una piattaforma software che permette di analizzare e visualizzare immagini mediche e svolgere ricerche. Il software supporta l'imaging multimodalità, tra cui la risonanza magnetica (MRI), la tomografia computerizzata (CT), l'ultrasonografia (US), la medicina nucleare e la microscopia.
-	Sanità	Oltre alla possibilità di risparmiare tempo e denaro, le stampanti 3D sono in grado di indurre diverse proprietà desiderabili negli impianti medici. Queste proprietà possono includere strutture interne complesse, elementi personalizzati e farmaci che potrebbero favorire il processo di guarigione.
Università di Tecnologia di Lodz	Sanità	Il Dott. Marcin Elgalal, il Prof. Bogdan Walkowiak e il Prof. Marcin Kozakiewicz hanno fondato il Laboratorio di Impianti Medici Individuali nel Technopark di Lodz. Hanno quindi potuto realizzare impianti craniofacciali, utilizzando anche una rete in titanio stampata in 3D per ricostruire il suolo orbitale.
Ospedale Universitario di Bialystok	Sanità	In questa struttura, è avvenuta la ricostruzione ossea della mandibola di un paziente nel Reparto di Chirurgia Maxillo-Facciale e Plastica.
Ospedale WAM di Lodz	Sanità	Una protesi ossea mandibolare è stata impiantata all'ospedale WAM di Lodz.
Università tecnologica di Varsavia	Sanità	L'applicazione di impianti stampati in 3D per animali storpi è diventata molto più popolare. Secondo un comunicato stampa di 3DS, solo in un anno, circa 10.000 cani affetti da lesioni o degenerazione dei legamenti posteriori hanno ricevuto degli impianti in Europa e negli Stati Uniti. In Polonia, le protesi degli arti dei cani vengono fabbricate e impiantate presso l'Università tecnologica di Varsavia.

Centro per l'udito e la parola di Kajetany	Sanità	Un altro scopo del 3D printing, applicato alla medicina, è quello di realizzare modelli 3D di organi o apparati del corpo umano, a fine didattico, come avviene presso il Centro per l'udito e la parola di Kajetany, in Polonia.
-	Sanità	Con la stampa 3D è possibile stampare una grande varietà di dispositivi medici, come, tra gli altri, uno stetoscopio a basso costo di alta qualità sviluppato per gli ospedali poveri della Striscia di Gaza (progetto open source), un verricello stampato in 3D utilizzato nella laserterapia endovenosa (EVLT) per il trattamento della rimozione delle vene varicose, presentato dalla società polacca Zortrax, un simulatore di percezione multisensoriale (SPPS), sviluppato dal Centro per l'udito e la parola di Kajetany, Polonia, e delle montature in vetro che si possono ordinare o stampare in 3D.
-	Sanità	L'FDA ha approvato la commercializzazione del dispositivo in titanio stampato in 3D Fast-Forward Bone Tether Plate, che facilita la chirurgia meno invasiva del piede ed elimina la necessità di perforare l'osso, per il trattamento degli arti inferiori.
Fucco	Sanità	La ditta polacca sfrutta il 3D printing per la produzione di calchi in gesso, leggeri e resistenti.
Parsee	Sanità	Un'azienda polacca ha presentato il progetto di occhiali Parsee che potrebbero aiutare le persone ipovedenti. Gli occhiali sono costituiti da una cornice stampata in 3D dotata di telecamera IP (protocollo internet) con pulsante fotografico, cuffia e batteria che consente all'utente di riconoscere e dare un senso al mondo che lo circonda.
-	Sanità	Un altro campo applicativo della produzione additiva è quello del bioprinting. È stata proposta l'importante applicazione cosiddetta lab-on-the-chip, ovvero un modello tissutale biostampato 3D ad alta produttività per la ricerca, la scoperta di farmaci e la tossicologia. La start-up svedese Cellink, in collaborazione con la società americana RoosterBio sta cercando di capire come utilizzare le cellule staminali per la biostampa, ottenendo buoni risultati, ad esempio, nella realizzazione di organi solidi cavi e complessi come il fegato, reni e orecchie.
Istituto di Medicina Rigenerativa di Wake Forest	Sanità	Presso l'Istituto di Medicina Rigenerativa di Wake Forest è stato applicato il 3D printing per produrre tessuti di organi come il cuore e il rene. Inoltre, presso lo stesso ente, è stata recentemente annunciata la costruzione di una stampante integrata organo-tessuto (ITOP) in grado di produrre strutture di tessuto stabili a misura d'uomo.
3D Organovo	Sanità	3D Organovo è una delle aziende più attive in campo di biostampa. Organovo ha stampato tessuti epatici e renali. Sulla base del tessuto epatico costituito da epatociti umani primari, cellule stellate e cellule endoteliali, che si trovano nel fegato umano nativo, hanno sviluppato il loro lab-on-chip, chiamato exVive3D Liver Model, che mira a test farmacologici stabili per almeno 42 giorni e molto più efficaci rispetto ai normali sistemi di coltura di cellule epatiche 2D offerti dall'industria.
Biopen	Sanità	Simile ad una biostampante, è il dispositivo chiamato Biopen che permette ai chirurghi di riparare ossa e cartilagine danneggiate "attingendo" nuove cellule direttamente sull'osso nel bel mezzo di un intervento chirurgico.
-	Gioielleria	Con la stampa 3D, i gioiellieri si servono di un software CAD per creare i design in formato digitale e di una stampante 3D per produrre i modelli che successivamente potranno essere colati nello stampo. Dopo aver effettuato la combustione del modello positivo, il processo seguito è identico a quello della fusione tradizionale. Grazie alle tecniche digitali è possibile ridurre la manodopera, e il design è facile da conservare, modificare e ricreare a seconda delle necessità.
-	Elettronica di consumo	Esempi di applicazione della stampa 3D per l'elettronica di consumo riguardano la produzione diretta di antenne, interconnessioni, circuiti stampati e sensori. La PBC, prototipazione di schede a circuiti stampati multistrato è una prima forma di applicazione della stampa 3D elettronica.
Optomec	Elettronica di consumo	Optomec è un'azienda attiva nell'uso della produzione additiva per dispositivi elettronici. Alcuni casi d'uso sono la soluzione Aerosol Jet, prodotta in serie nello stabilimento LITE-ON Mobile Mechanical SBC in Cina che stampa vari tipi di elettronica conforme su diversi dispositivi di consumo, o sensori di riempimento capacitivo, nonché la stampa di elementi riscaldanti su vetro. Un altro esempio di utilizzo della tecnologia da parte dell'azienda riguarda la produzione di sensori su delle turbine al fine di monitorare lo stato di salute in tempo reale e garantire una manutenzione just-in-time delle stesse.
Nano Dimension	Elettronica di consumo	Nano Dimension è un'altra importante azienda leader di settore, che sfrutta la sua stampante 3D DragonFly per la prototipazione rapida di schede e circuiti elettronici.
Voxel8	Elettronica di consumo	Voxel8 ha fornito soluzioni per la produzione di PCB e circuiti flessografici. Il sistema di stampa dell'azienda utilizza una disposizione a due ugelli per stampare sia il filamento di acido polilattico che l'inchiostro argento conduttivo per creare elettronica incorporata.
Luxexcel	Elettronica di consumo	Luxexcel è specializzata nella stampa 3D di lenti ottiche per occhiali, ma ha anche testato circuiti elettronici stampati per creare occhiali intelligenti e altri prodotti.

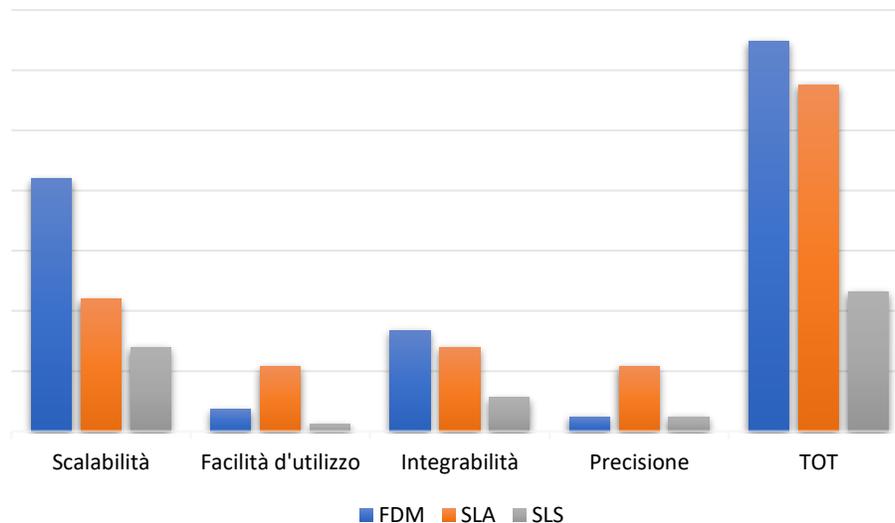
University of Southern California	Architettura	Il Dr. Behrokh Khoshnevis, dell'University of Southern California negli Stati Uniti, ha ideato Contour Crafting, un processo di stampa 3D che consente di fabbricare rapidamente strutture di grandi dimensioni, strato per strato. Il processo riduce i costi di costruzione di una struttura riducendo al minimo le ore lavorative necessarie per realizzarla e aumenta anche la velocità con cui la casa può essere immessa sul mercato, abbassando i costi di finanziamento, consentendo di realizzare più rapidamente un profitto per il costruttore. Il processo è inoltre molto più sicuro per i lavoratori edili rispetto alle tecniche tradizionali di costruzione, il che ridurrebbe i costi assicurativi per le imprese edili.
CLS Architetti	Architettura	3D Housing 05 è la prima casa stampata in opera con tecnologia 3D in Italia. Ideata e progettata dall'architetto Massimiliano Locatelli, dello studio milanese CLS Architetti, in collaborazione con Italcementi, Arup e Cybe, è stata presentata a Milano, in piazza Beccaria. La casa, che ha avuto basso impatto ambientale durante la costruzione, è stata stampata con una speciale miscela di polveri cementizie, inerti e leganti e può, nel tempo, essere demolita, polverizzata e ricostruita con lo stesso materiale.
US Army	Alimentare	La stampa 3D è stata usata dall'esercito americano per la produzione di cibi su richiesta sul campo di battaglia. I cibi possono essere personalizzati in base alle esigenze nutrizionali ed energetiche dei soldati. L'US Army intendeva anche creare un'unità compatta 3D in grado di trasformare materiali vegetali da foraggio (come corteccia e bacche) in cibo commestibile.
NASA	Alimentare	La NASA ha finanziato Systems and Materials Research Corporation (SMRC) per studiare la possibilità e l'applicazione della stampa 3D per la produzione di alimenti durante missioni spaziali di lunga durata. La NASA utilizza la stampa 3D anche per soddisfare i requisiti di sicurezza alimentare, stabilità nutrizionale e accettabilità dei pasti per le missioni extra-terrestri, allo scopo di utilizzare il minor numero possibile di veicoli spaziali.
PERFORMANCE	Alimentare	L'Unione Europea (UE) ha finanziato il progetto PERFORMANCE, che mira a progettare un metodo di produzione automatizzato e offrire alimenti personalizzati e testurizzati utilizzando la tecnologia di stampa 3D. Gli scienziati del progetto hanno creato alimenti di simulazione, come piselli e gnocchi, imitandone il sapore e la consistenza. L'obiettivo è quello di venire in contro alle esigenze delle persone anziane e poter facilitare loro la deglutizione di cibi più duri e difficilmente digeribili.
3D Systems	Alimentare	L'azienda 3D Systems, in collaborazione con Hershey (azienda leader nella produzione di cioccolato e dessert), ha sviluppato una stampante per cioccolato basata sull'estrusione chiamata Cocoljet, in grado di stampare varie forme di cioccolato.
Università di Exeter	Alimentare	La prima stampante commerciale di cioccolato, ChocCreator, è stata progettata dagli scienziati dell'Università di Exeter, in Inghilterra.
Università di Waterloo	Alimentare	Quattro studenti di Chocolateering 3D dell'Università di Waterloo hanno costruito stampanti laser selettive a basso costo basate su sinterizzazione per creare strutture di cioccolato 3D utilizzando del cacao.
CandyFab	Alimentare	Il progetto CandyFab è stato il primo, nel 2007, a realizzare strutture dimensionali 3D utilizzando dello zucchero e ha introdotto una stampante selettiva basata sulla sinterizzazione, CandyFab. Hanno creato una tecnologia SHASAM (Selective Hot Air Sintering and Melting), in cui una fonte di calore mirata è stata utilizzata per fondere le particelle insieme, creando così strutture complesse.
3D Systems	Alimentare	Il 3D Systems ChefJet Pro è in grado di stampare dolci o decorazioni alimentari gustose e accattivanti utilizzando vari tipi di materiali alimentari tra cui zucchero, cioccolato e formaggio. Con questo sistema sono stati creati alimenti come dolci ad incastro, varie sculture di zucchero e torte nuziali intere. Inoltre, lo ChefJet Pro, dotato di quattro testine di stampa, è stato in grado di creare strutture multicolori, come decorazioni da cocktail.
GumLab	Alimentare	Il progetto GumLab, fondato da due studenti londinesi, ha permesso di realizzare una stampante 3D, GumJet, per stampare una gomma da masticare. La stampante, basata sull'estrusione e dotata di piattaforma cartesiana, è stata in grado di stampare resina di gomma e aromatizzarla strato per strato. Tramite questa stampante 3D è possibile riprodurre gomme al gusto di succo di frutta, cocco ed estratti vegetali, consentendone la produzione con sensazioni e sapori diversi.

Appendice 2 – Valutazione delle tecnologie di AM per use case

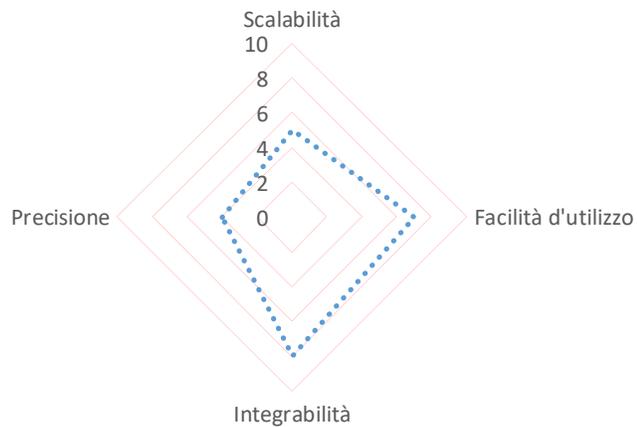
RILEVANZA INDICATORI DI PERFORMANCE CASO D'USO: COMPONENTISTICA DI STRUTTURA PER DRONI



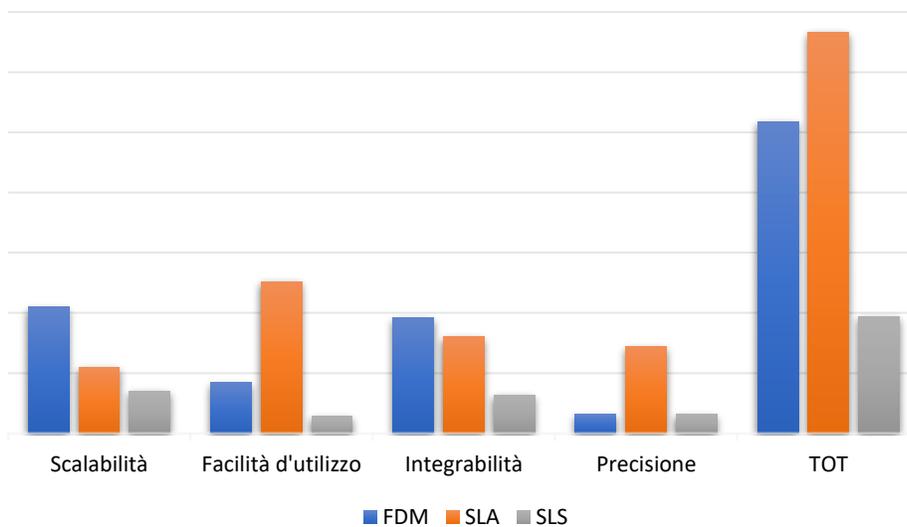
	FDM	SLA	SLS
Scalabilità	210	110	70
Facilità d'utilizzo	18	54	6
Integrabilità	84	70	28
Precisione	12	54	12
TOT	324	288	116
Normalized score	1,00	0,89	0,36



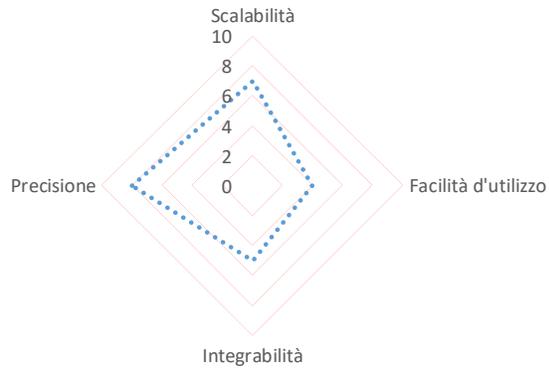
RILEVANZA INDICATORI DI PERFORMANCE CASO D'USO: MANUTENZIONE E PEZZI DI RICAMBIO IMBARCAZIONI



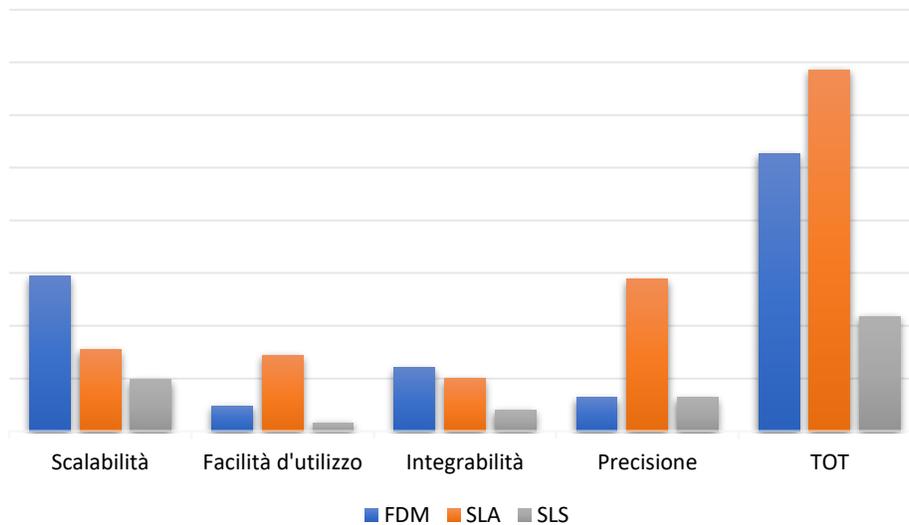
	FDM	SLA	SLS
Scalabilità	105	55	35
Facilità d'utilizzo	42	126	14
Integrabilità	96	80	32
Precisione	16	72	16
TOT	259	333	97
Normalized score	0,78	1,00	0,29



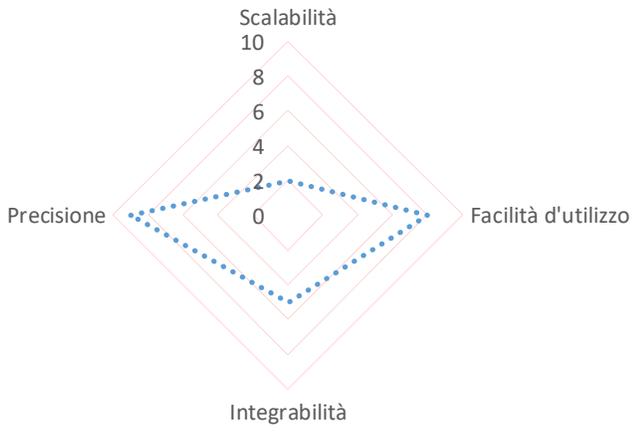
RILEVANZA INDICATORI DI PERFORMANCE
CASO D'USO: COMPONENTISTICA DEI SISTEMI DI DRENAGGIO DELLE IMBARCAZIONI



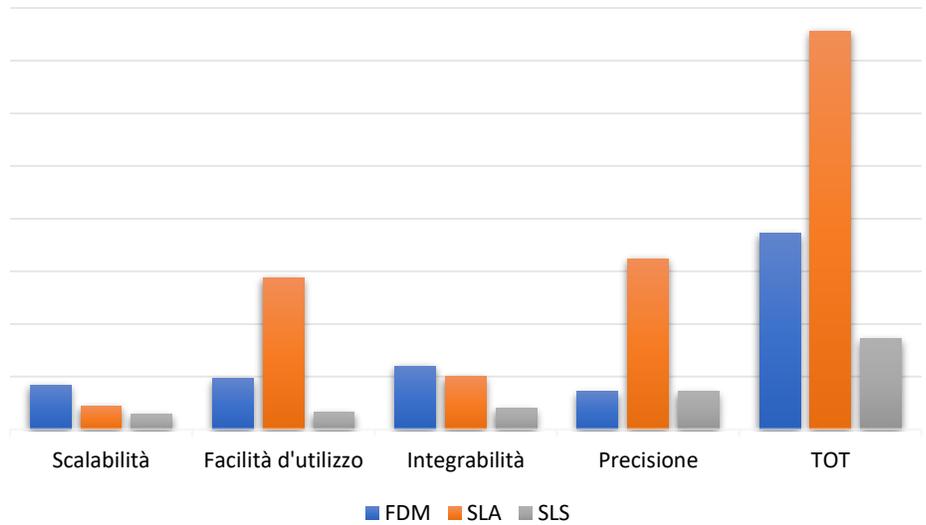
	FDM	SLA	SLS
Scalabilità	147	77	49
Facilità d'utilizzo	24	72	8
Integrabilità	60	50	20
Precisione	32	144	32
TOT	263	343	109
Normalized score	0,77	1,00	0,32



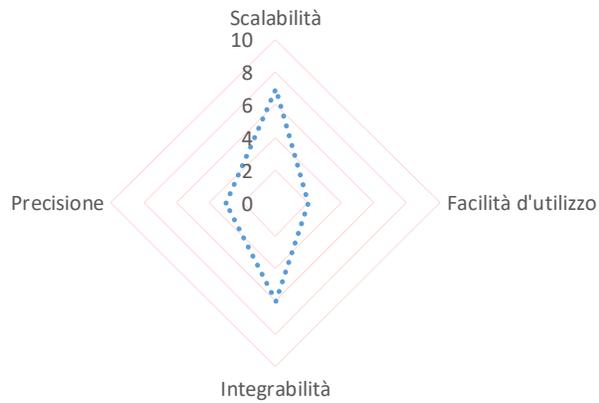
RILEVANZA INDICATORI DI PERFORMANCE CASO D'USO: RISTRUTTURAZIONE ARCHEOLOGICA



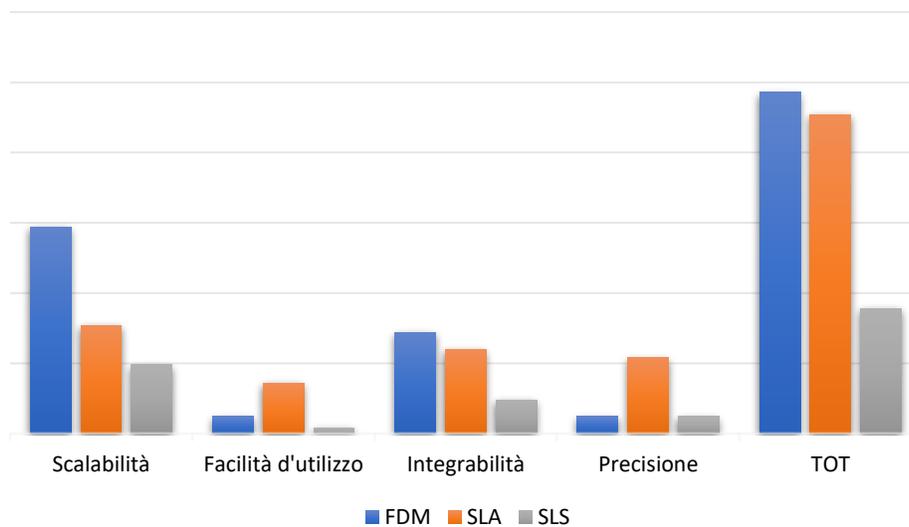
	FDM	SLA	SLS
Scalabilità	42	22	14
Facilità d'utilizzo	48	144	16
Integrabilità	60	50	20
Precisione	36	162	36
TOT	186	378	86
Normalized score	0,49	1,00	0,23



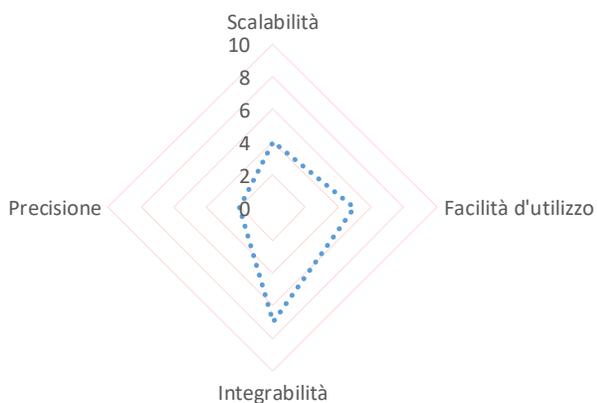
RILEVANZA INDICATORI DI PERFORMANCE CASO D'USO: COMPONENTISTICA DEI SISTEMI DI CARBURAZIONE DEI PROPULSORI



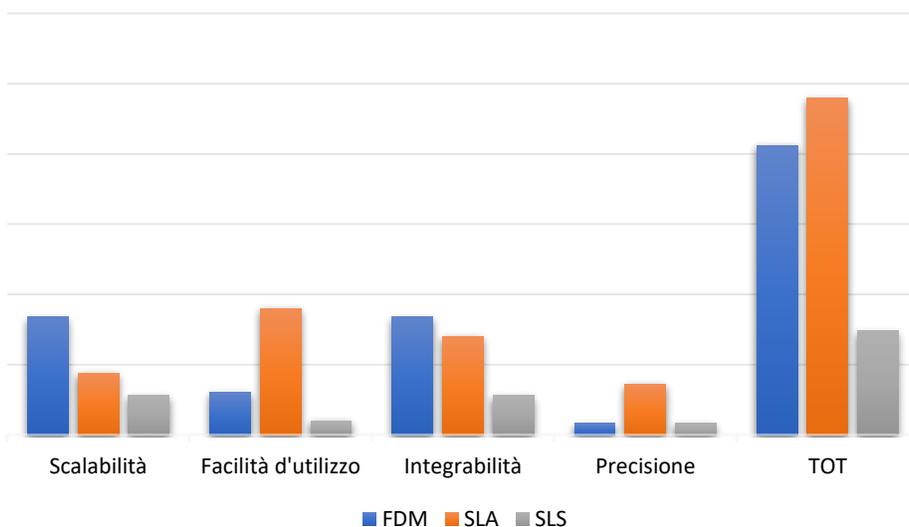
	FDM	SLA	SLS
Scalabilità	147	77	49
Facilità d'utilizzo	12	36	4
Integrabilità	72	60	24
Precisione	12	54	12
TOT	243	227	89
Normalized score	1,00	0,93	0,37



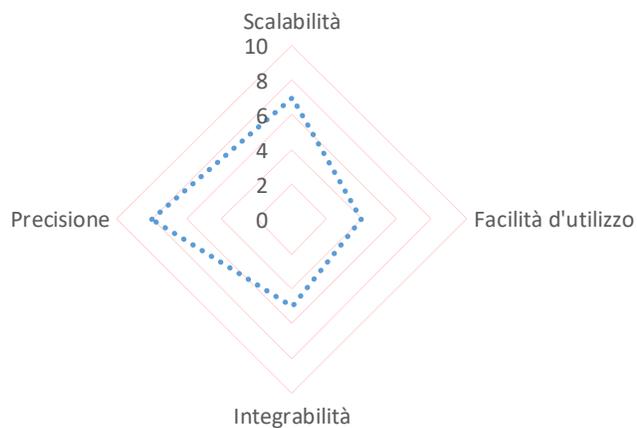
RILEVANZA INDICATORI DI PERFORMANCE CASO D'USO: PRODUZIONE DI SISTEMI DI SUPPORTO PER COMPONENTI MOTORE



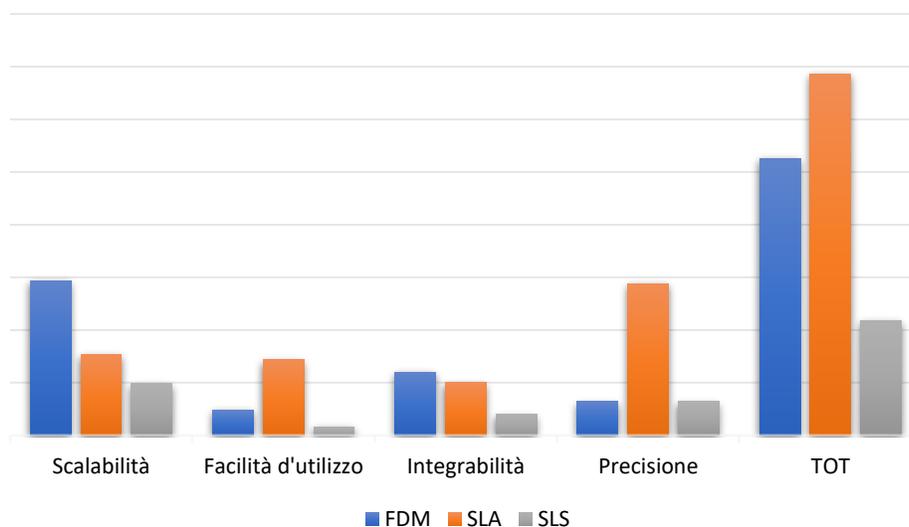
	FDM	SLA	SLS
Scalabilità	84	44	28
Facilità d'utilizzo	30	90	10
Integrabilità	84	70	28
Precisione	8	36	8
TOT	206	240	74
Normalized score	0,86	1,00	0,31



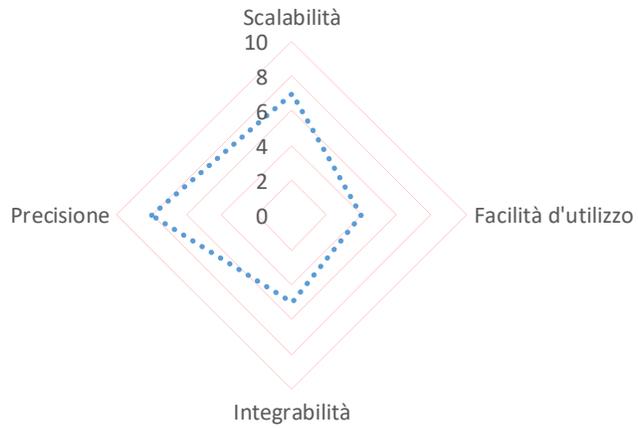
RILEVANZA INDICATORI DI PERFORMANCE CASO D'USO: COMPONENTISTICA DI STRUTTURA PER GLI AEROMOBILI



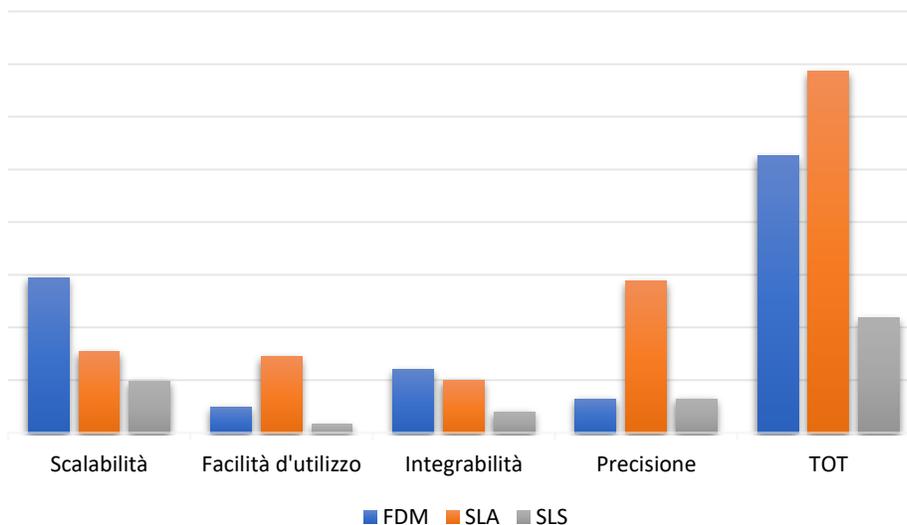
	FDM	SLA	SLS
Scalabilità	168	88	56
Facilità d'utilizzo	30	90	10
Integrabilità	120	100	40
Precisione	8	36	8
TOT	326	314	114
Normalized score	1,00	0,96	0,35



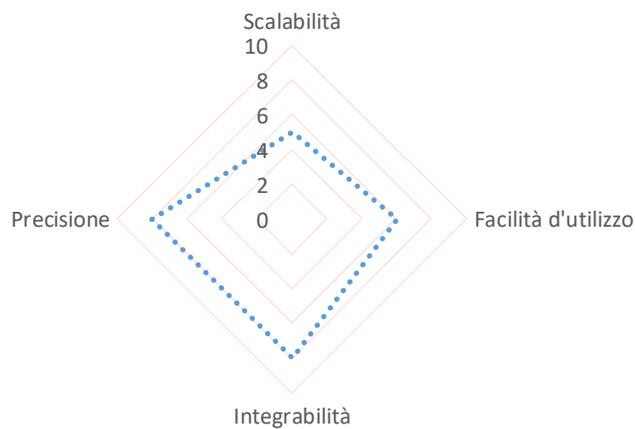
RILEVANZA INDICATORI DI PERFORMANCE CASO D'USO: COMPONENTISTICA DI PARTI COSTITUENTI I PROPULSORI



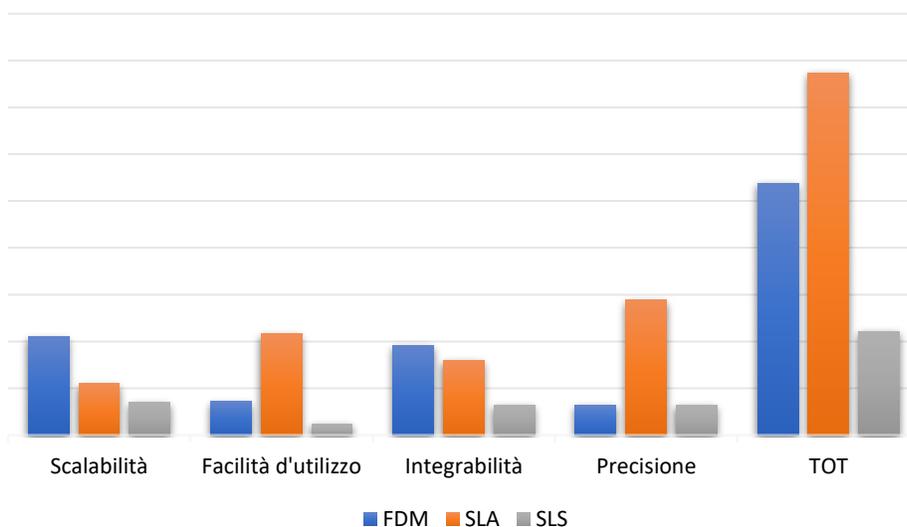
	FDM	SLA	SLS
Scalabilità	126	66	42
Facilità d'utilizzo	24	72	8
Integrabilità	84	70	28
Precisione	4	18	4
TOT	238	226	82
Normalized score	1,00	0,95	0,34



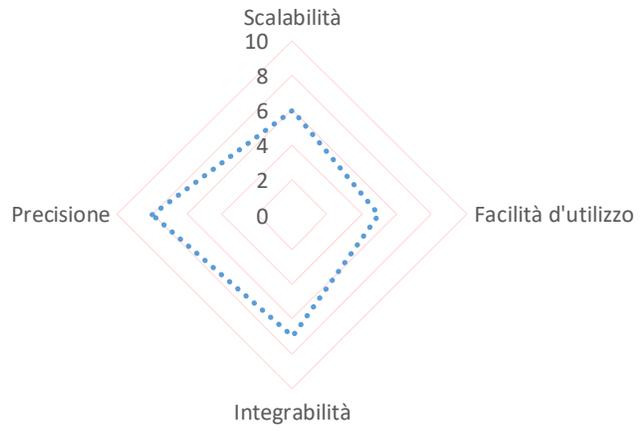
RILEVANZA INDICATORI DI PERFORMANCE CASO D'USO: RIPRODUZIONE DI STAMPI DENTALI



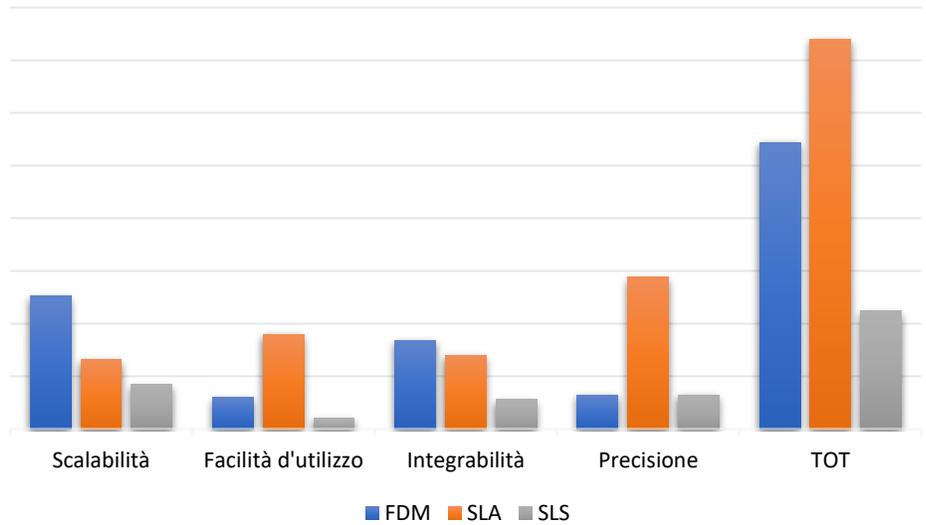
	FDM	SLA	SLS
Scalabilità	105	55	35
Facilità d'utilizzo	36	108	12
Integrabilità	96	80	32
Precisione	32	144	32
TOT	269	387	111
Normalized score	0,70	1,00	0,29



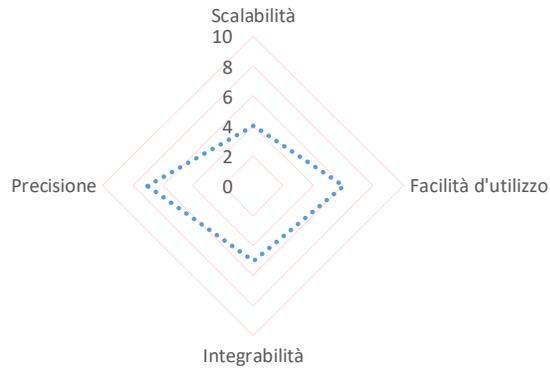
RILEVANZA INDICATORI DI PERFORMANCE CASO D'USO: RIPRODUZIONE DI PROTESI DENTALI



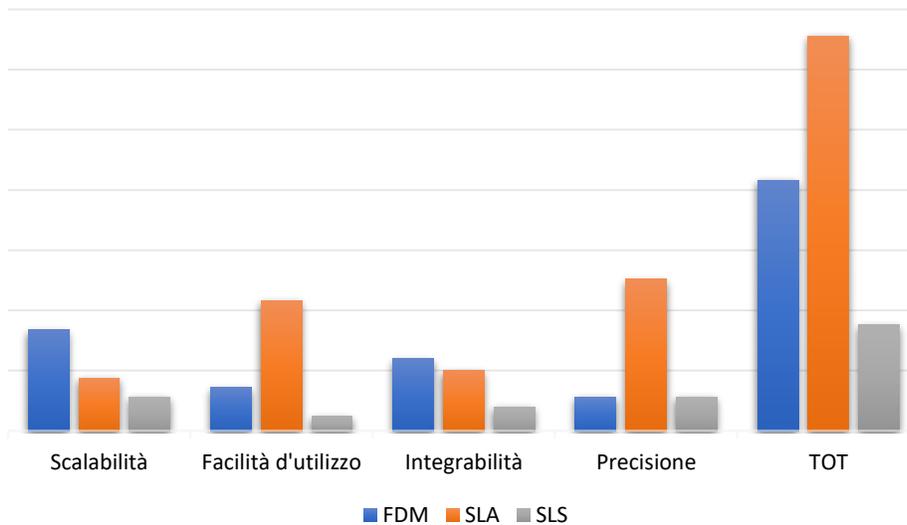
	FDM	SLA	SLS
Scalabilità	126	66	42
Facilità d'utilizzo	30	90	10
Integrabilità	84	70	28
Precisione	32	144	32
TOT	272	370	112
Normalized score	0,74	1,00	0,30



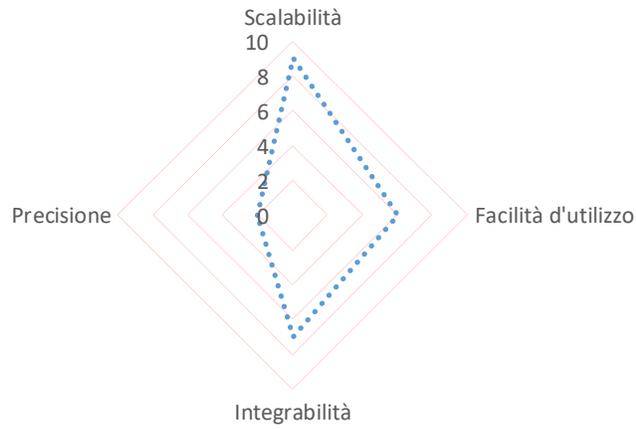
**RILEVANZA INDICATORI DI PERFORMANCE
CASO D'USO: RIPRODUZIONE DI GUIDE CHIRURGICHE PER INTERVENTI DI ODONTOIATRIA**



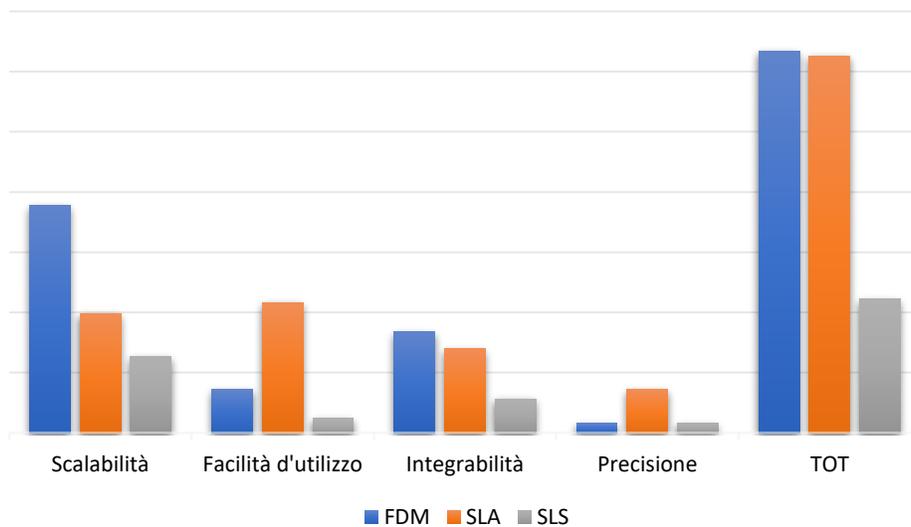
	FDM	SLA	SLS
Scalabilità	84	44	28
Facilità d'utilizzo	36	108	12
Integrabilità	60	50	20
Precisione	28	126	28
TOT	208	328	88
Normalized score	0,63	1,00	0,27



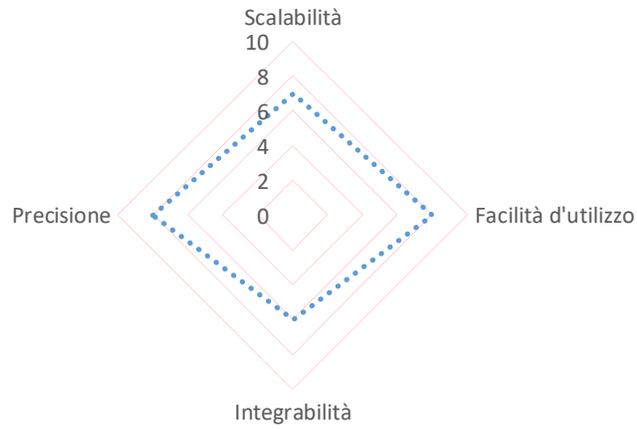
RILEVANZA INDICATORI DI PERFORMANCE CASO D'USO: REALIZZAZIONE DI UTENSILI MANIFATTURIERI



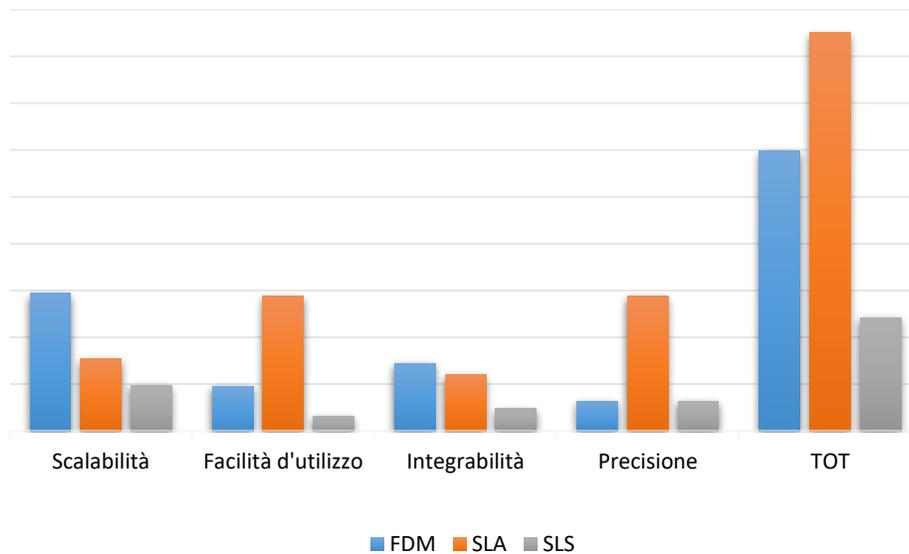
	FDM	SLA	SLS
Scalabilità	189	99	63
Facilità d'utilizzo	36	108	12
Integrabilità	84	70	28
Precisione	8	36	8
TOT	317	313	111
Normalized score	1,00	0,99	0,35



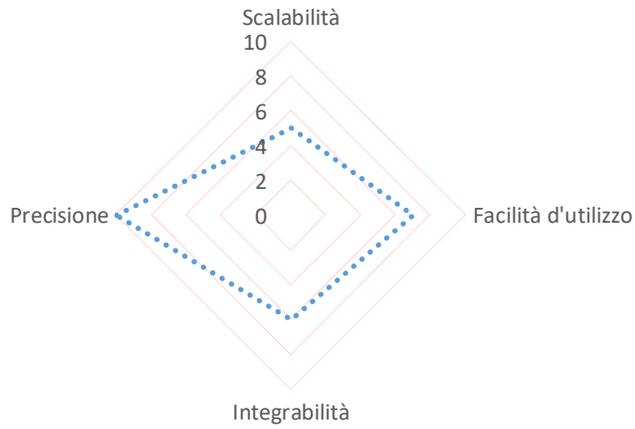
RILEVANZA INDICATORI DI PERFORMANCE CASO D'USO: RIPRODUZIONE DI MODELLI PER AUTO



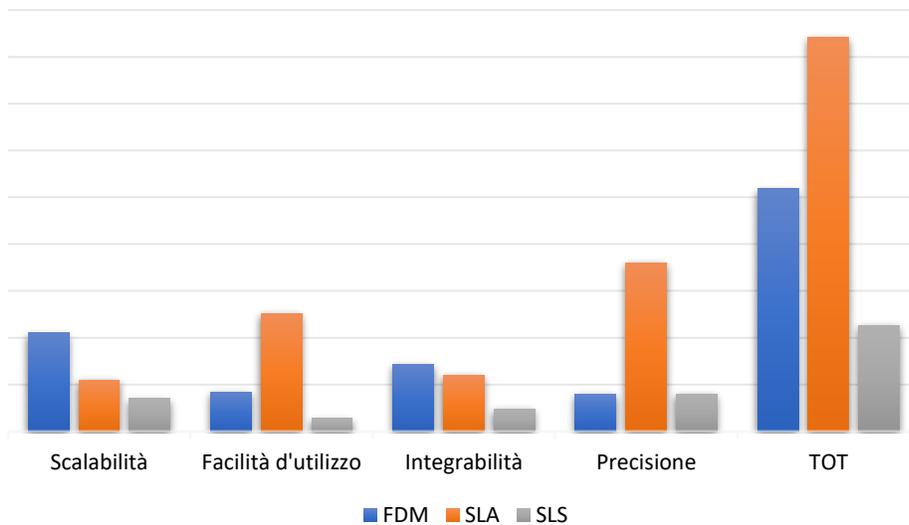
	FDM	SLA	SLS
Scalabilità	147	77	49
Facilità d'utilizzo	48	144	16
Integrabilità	72	60	24
Precisione	32	144	32
TOT	299	425	121
Normalized score	0,70	1,00	0,28



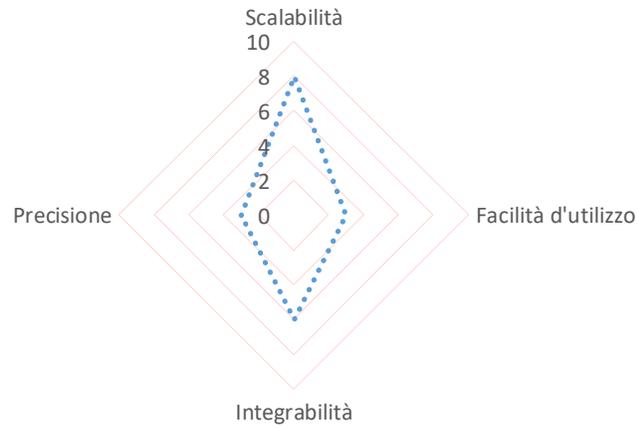
RILEVANZA INDICATORI DI PERFORMANCE CASO D'USO: PERSONALIZZAZIONE DI PARTI PER AUTO



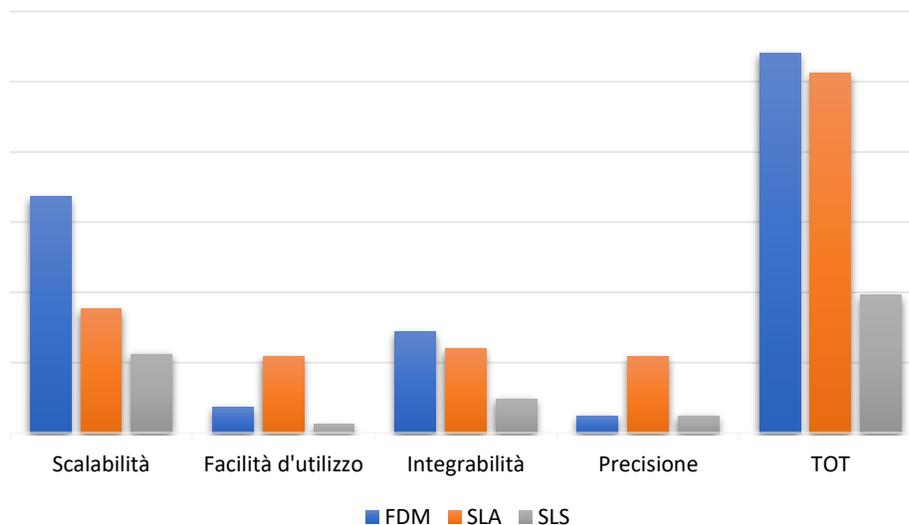
	FDM	SLA	SLS
Scalabilità	105	55	35
Facilità d'utilizzo	42	126	14
Integrabilità	72	60	24
Precisione	40	180	40
TOT	259	421	113
Normalized score	0,62	1,00	0,27



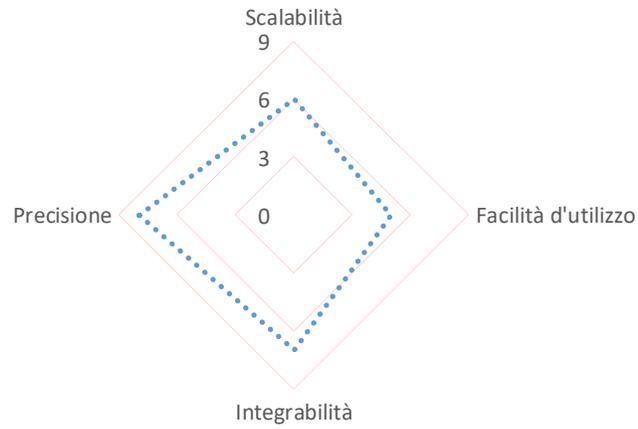
RILEVANZA INDICATORI DI PERFORMANCE CASO D'USO: COMPONENTISTICA DI STRUTTURA PER AUTO



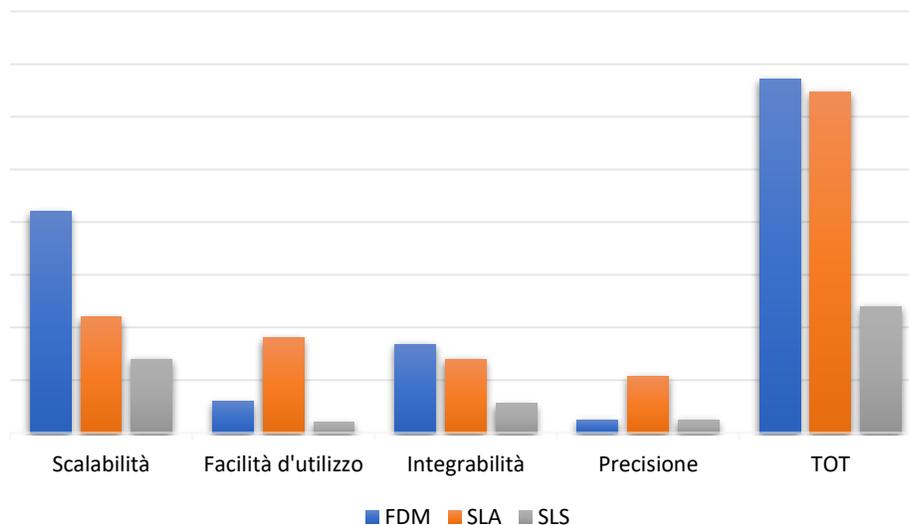
	FDM	SLA	SLS
Scalabilità	168	88	56
Facilità d'utilizzo	18	54	6
Integrabilità	72	60	24
Precisione	12	54	12
TOT	270	256	98
Normalized score	1,00	0,95	0,36



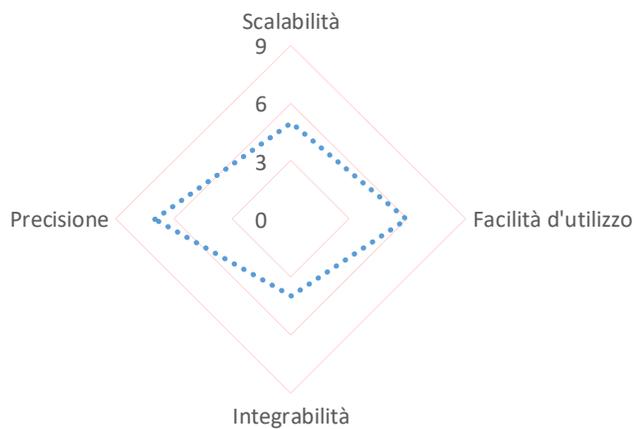
RILEVANZA INDICATORI DI PERFORMANCE CASO D'USO: COMPONENTISTICA E PEZZI DI RICAMBIO AUTO



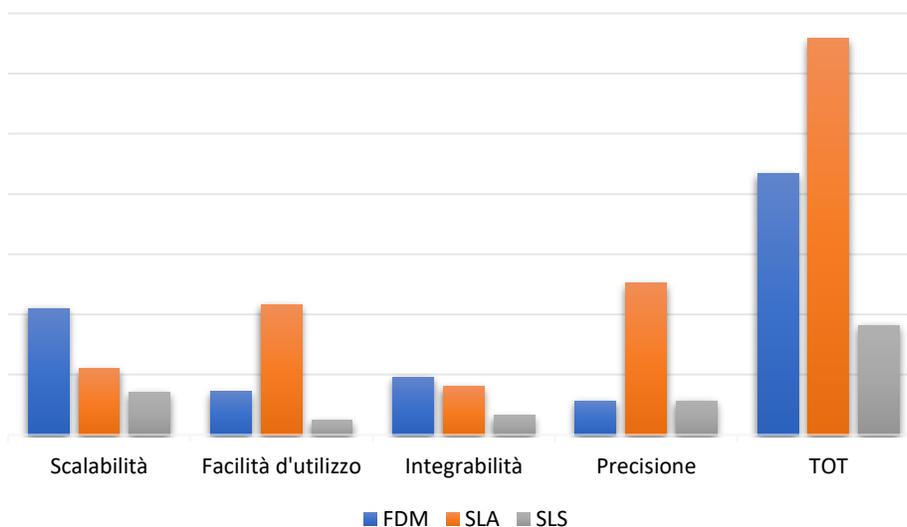
	FDM	SLA	SLS
Scalabilità	210	110	70
Facilità d'utilizzo	30	90	10
Integrabilità	84	70	28
Precisione	12	54	12
TOT	336	324	120
Normalized score	1,00	0,96	0,36



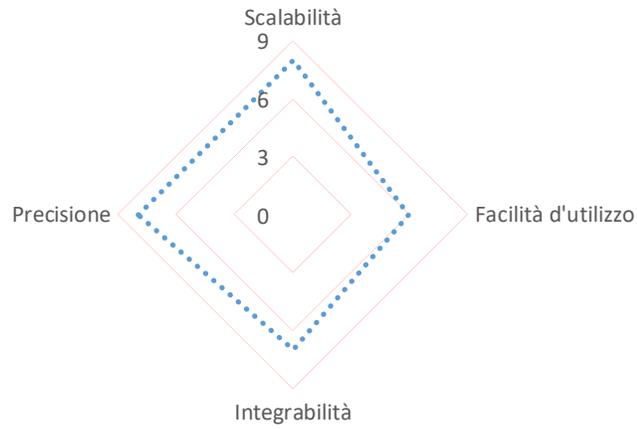
RILEVANZA INDICATORI DI PERFORMANCE CASO D'USO: RIPRODUZIONE DI APPARECCHI ACUSTICI



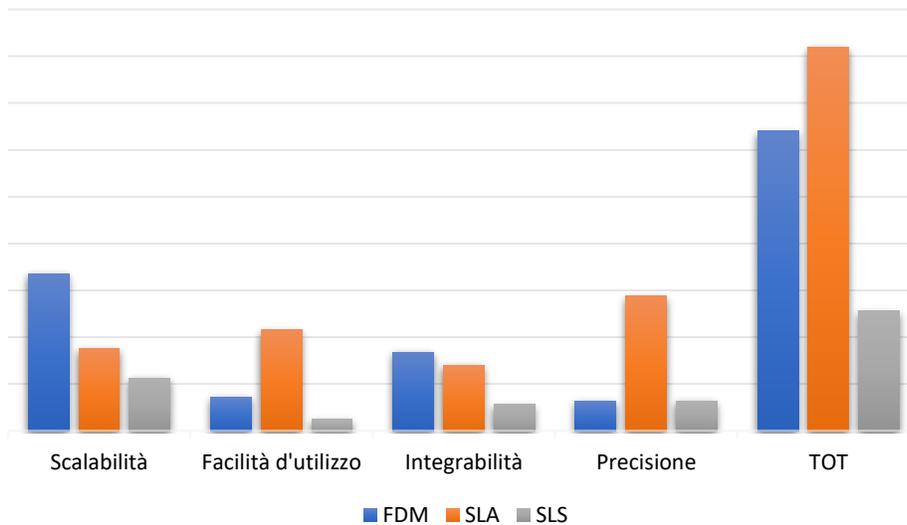
	FDM	SLA	SLS
Scalabilità	105	55	35
Facilità d'utilizzo	36	108	12
Integrabilità	48	40	16
Precisione	28	126	28
TOT	217	329	91
Normalized score	0,66	1,00	0,28



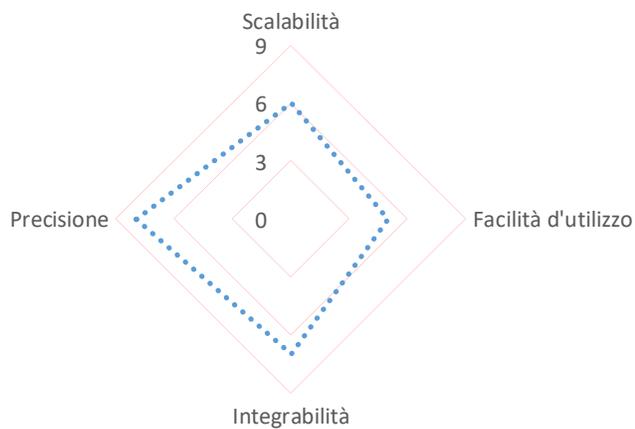
RILEVANZA INDICATORI DI PERFORMANCE CASO D'USO: RIPRODUZIONE DI PROTESI



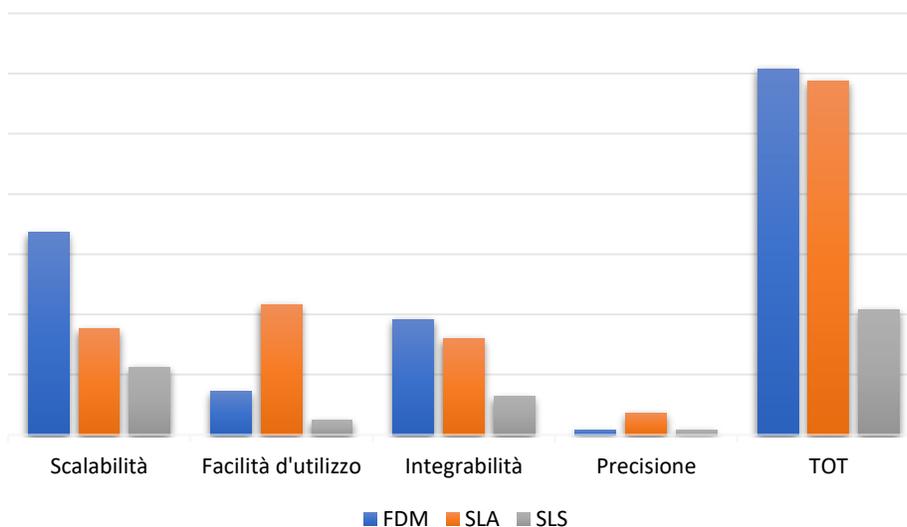
	FDM	SLA	SLS
Scalabilità	168	88	56
Facilità d'utilizzo	36	108	12
Integrabilità	84	70	28
Precisione	32	144	32
TOT	320	410	128
Normalized score	0,78	1,00	0,31



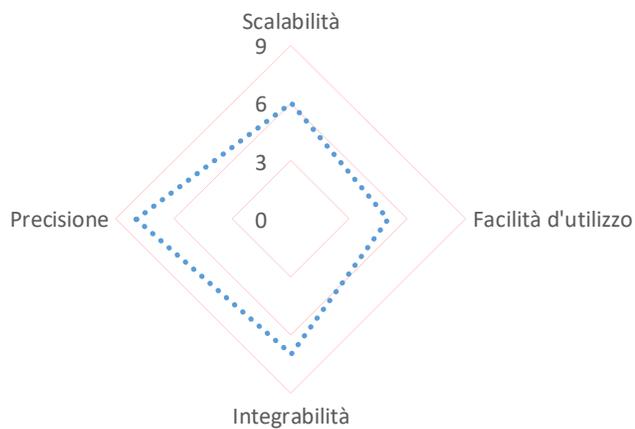
RILEVANZA INDICATORI DI PERFORMANCE CASO D'USO: RIPRODUZIONE DI STRUMENTI MEDICI



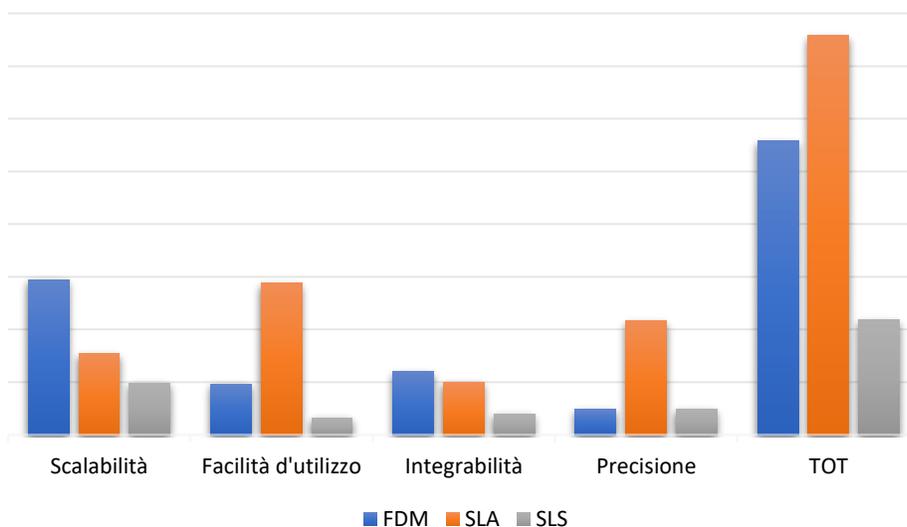
	FDM	SLA	SLS
Scalabilità	168	88	56
Facilità d'utilizzo	36	108	12
Integrabilità	96	80	32
Precisione	4	18	4
TOT	304	294	104
Normalized score	1,00	0,97	0,34



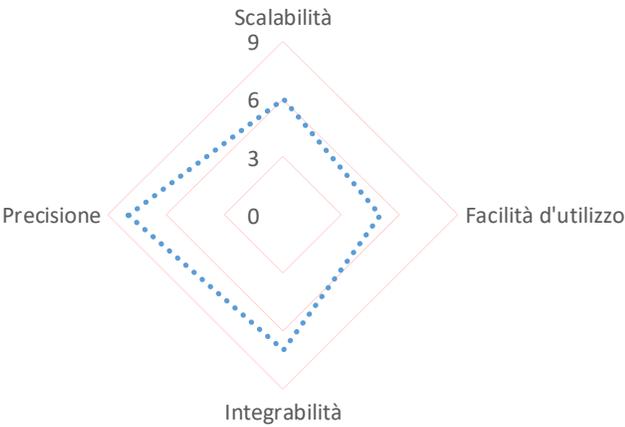
RILEVANZA INDICATORI DI PERFORMANCE CASO D'USO: RIPRODUZIONE DI CALCHI IN GESSO



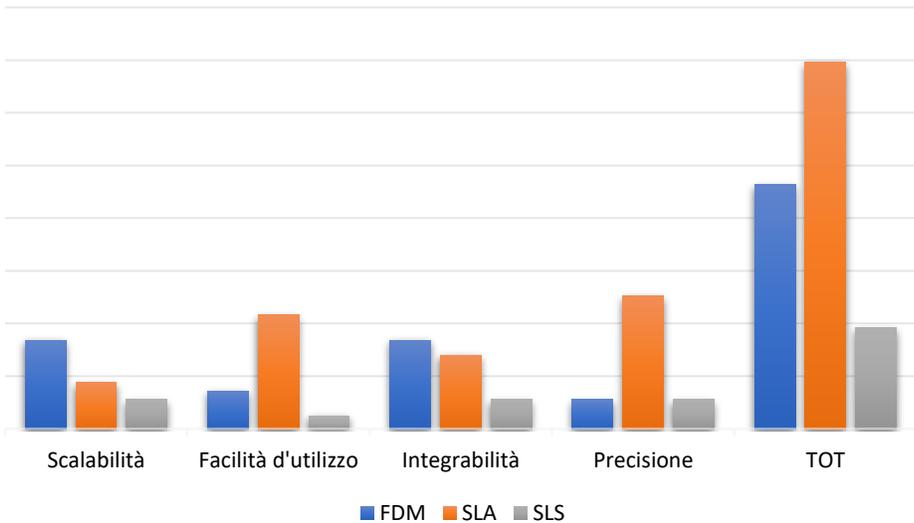
	FDM	SLA	SLS
Scalabilità	147	77	49
Facilità d'utilizzo	48	144	16
Integrabilità	60	50	20
Precisione	24	108	24
TOT	279	379	109
Normalized score	0,74	1,00	0,29



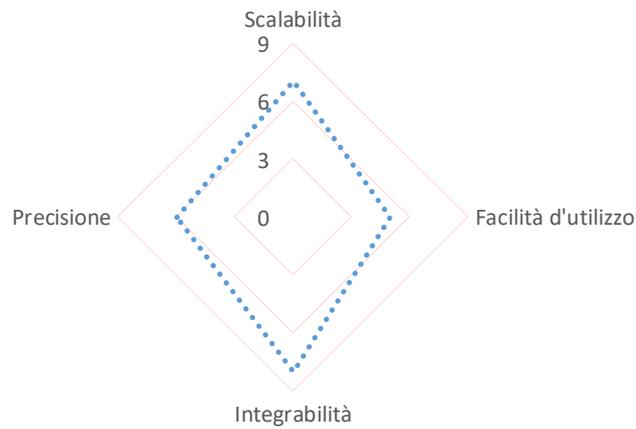
RILEVANZA INDICATORI DI PERFORMANCE CASO D'USO: RIPRODUZIONE DI LENTI OTTICHE



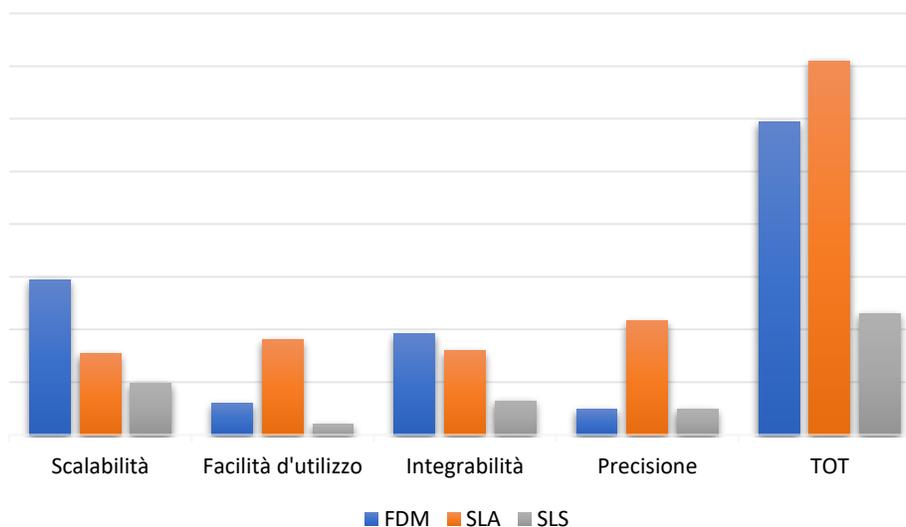
	FDM	SLA	SLS
Scalabilità	84	44	28
Facilità d'utilizzo	36	108	12
Integrabilità	84	70	28
Precisione	28	126	28
TOT	232	348	96
Normalized score	0,67	1,00	0,28



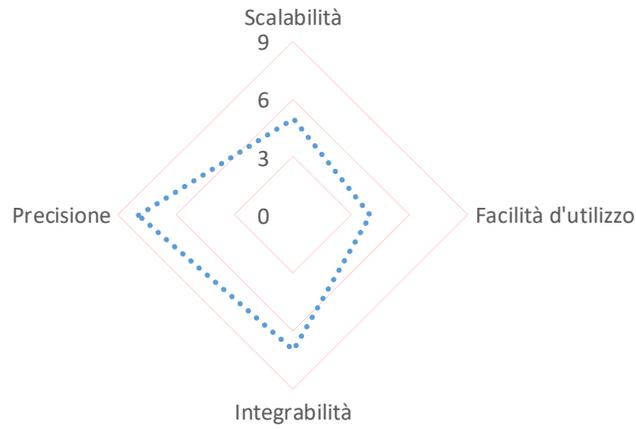
RILEVANZA INDICATORI DI PERFORMANCE CASO D'USO: MICRO-COMPONENTISTICA PER PARTI ELETTRONICHE



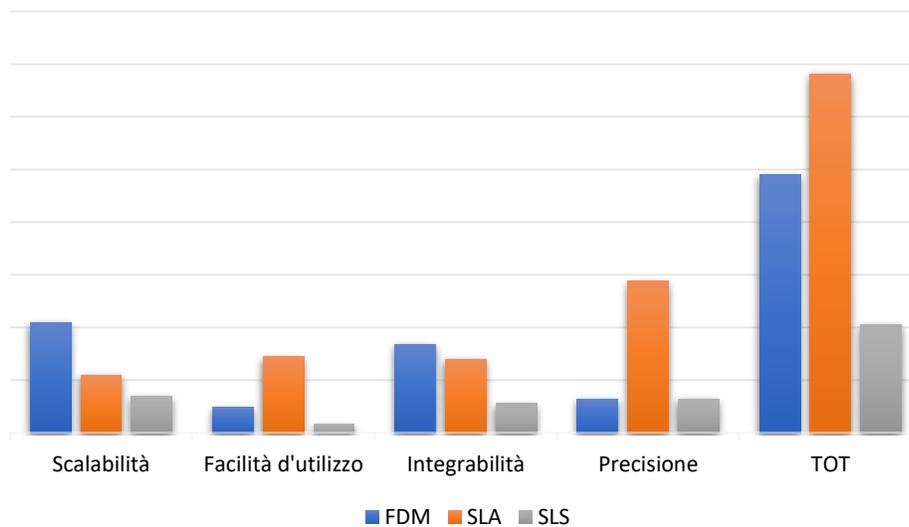
	FDM	SLA	SLS
Scalabilità	147	77	49
Facilità d'utilizzo	30	90	10
Integrabilità	96	80	32
Precisione	24	108	24
TOT	297	355	115
Normalized score	0,84	1,00	0,32



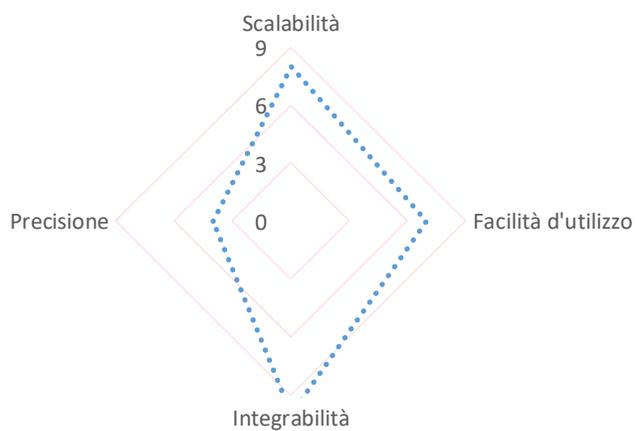
RILEVANZA INDICATORI DI PERFORMANCE CASO D'USO: RIPRODUZIONE DI SENSORI



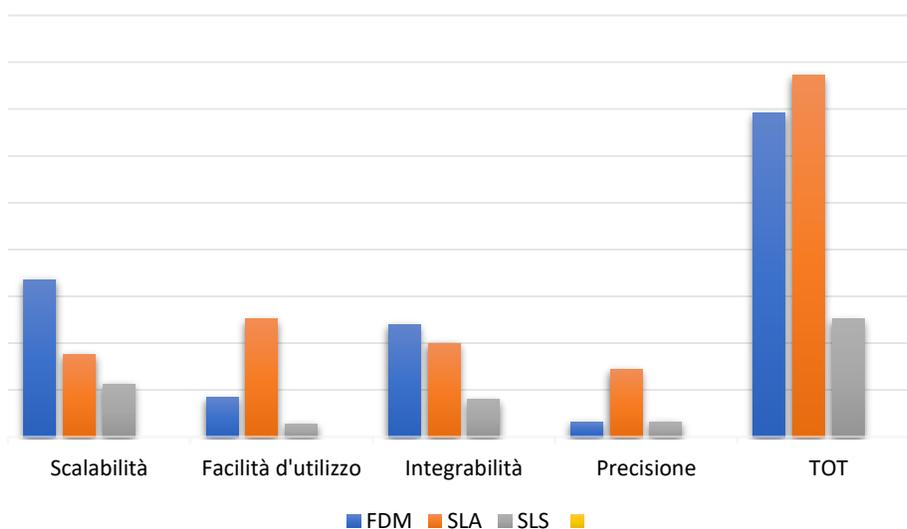
	FDM	SLA	SLS
Scalabilità	105	55	35
Facilità d'utilizzo	24	72	8
Integrabilità	84	70	28
Precisione	32	144	32
TOT	245	341	103
Normalized score	0,72	1,00	0,30



RILEVANZA INDICATORI DI PERFORMANCE CASO D'USO: RIPRODUZIONE DI ALIMENTI



	FDM	SLA	SLS
Scalabilità	168	88	56
Facilità d'utilizzo	42	126	14
Integrabilità	120	100	40
Precisione	16	72	16
TOT	346	386	126
Normalized score	0,90	1,00	0,33



Sitografia

7. Fused Deposition Modeling – FDM, in <https://prototek.it/fused-deposition-modeling-fdm/>
8. La guida definitiva alla stampa 3D stereolitografica (SLA), in <https://formlabs.com/it/blog/guida-definitiva-stampa-3d-stereolitografia-sla/>
9. Settori di applicazione della Stampa 3D in Italia e nel Mondo, in <https://www.selltek.it/settore-stampa-3d/>
10. La stampa 3D per il settore nautico, in <https://www.selltek.it/la-stampa-3d-per-il-settore-nautico-2/>
11. University of Maine creates the world’s largest 3D printed boat, in <https://www.3dnatives.com/en/3d-printed-boat-university-of-maine-161020195/#!>
12. La stampa 3D per il settore Aerospace & Difesa, in <https://www.selltek.it/stampa-3d-aerospace-difesa/>
13. Aerospace 3D printing applications, in <https://www.hubs.com/knowledge-base/aerospace-3d-printing-applications/#intro>
14. 3D Printing Plastics Market Report Growth & Trends, in <https://www.grandviewresearch.com/press-release/global-3d-printing-plastics-market>
15. La stampa 3D per l’Industria delle Materie Plastiche, in <https://www.selltek.it/la-stampa-3d-per-lindustria-delle-materie-plastiche/>
16. La stampa 3D nel settore automotive, in <https://www.selltek.it/la-stampa-3d-nel-settore-automotive/>
17. EDAG’s Light Cocoon Is A Metamorphosis for Car Design, in <https://www.digitalengineering247.com/article/edags-light-cocoon-is-a-metamorphosis-for-car-design>
18. 5 casi di utilizzo innovativi della stampa 3D nel settore medico, in <https://formlabs.com/it/blog/stampa-3d-medicina-settore-sanitario/>

19. Come la stampa 3D sta sconvolgendo il settore da 280 miliardi di dollari della gioielleria, in <https://formlabs.com/it/blog/3d-printed-jewelry/>
20. La stampa 3D per il settore dell'elettronica di consumo, in <https://www.selltek.it/la-stampa-3d-per-il-settore-dellelettronica-di-consumo/>
21. The State of Electronic 3D Printing, in <https://www.digitalengineering247.com/article/state-electronic-3d-printing>
22. La stampa 3D per l'architettura, in <https://www.selltek.it/la-stampa-3d-per-larchitettura/>
23. Stampanti 3D per il cibo del futuro: come funzionano e cosa possono fare, in <https://www.fastweb.it/smartphone-e-gadget/stampanti-3d-per-il-cibo-come-funzionano-scenari-futuri/>
24. Statista, Global 3D printing products and services market size from 2020 to 2026, in <https://www.statista.com/statistics/315386/global-market-for-3d-printers/>
25. Statista, Projected global additive manufacturing market growth between 2020 and 2026, in <https://www.statista.com/statistics/284863/additive-manufacturing-projected-global-market-size/>
26. Statista, Leading uses of 3D printing from 2015 to 2020, in <https://www.statista.com/statistics/560271/worldwide-survey-3d-printing-uses/>
27. Statista, Distribution of sales revenue of the additive manufacturing market worldwide in 2019, by industry, in <https://www.statista.com/statistics/1268618/share-sales-revenue-of-additive-manufacturing-by-industry/>
28. Statista, Experience of selected countries with additive manufacturing technology in 2019, in <https://www.statista.com/statistics/1268735/experience-of-countries-with-additive-manufacturing-technology/>
29. Statista, Distribution of additive manufacturing companies in 2019, by region, in <https://www.statista.com/statistics/1268724/additive-manufacturing-companies-region/>
30. Statista, Largest additive manufacturing patent owners worldwide from 2011 to November 2019, by number of active patent families, in <https://www.statista.com/statistics/1032553/worldwide-additive-manufacturing-patent-owners-trend/>

31. Statista, Number of 3D printing & additive manufacturing devices worldwide from 2020 to 2030, by context, in <https://www-statista-com.ezproxy.biblio.polito.it/statistics/1259618/3d-printing-and-additive-manufacturing-devices-worldwide/>
32. Statista, Distribution of 3D printing investments globally in 2019, by application, in <https://www-statista-com.ezproxy.biblio.polito.it/statistics/1268864/investments-in-3d-printing-worldwide-by-application/>
33. Statista, Which factors prevent you from using 3D printing more?, in <https://www-statista-com.ezproxy.biblio.polito.it/statistics/1268844/barriers-to-implementing-3d-printing-more/>
34. Statista, What is your top focus related to 3D printing in 2021?, in <https://www-statista-com.ezproxy.biblio.polito.it/statistics/559749/worldwide-survey-3d-printing-top-priorities/>
35. Category:3D printer companies, in https://en.wikipedia.org/wiki/Category:3D_printer_companies
36. List of 3D printer manufacturers, in https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_3D_printer_manufacturers#0%E2%80%93

Bibliografia

37. Mariano Jiménez, Luis Romero, Iris A. Domínguez, María del Mar Espinosa, Manuel Domínguez, “Additive Manufacturing Technologies: An Overview about 3D Printing Methods and Future Prospects”, *Complexity in Manufacturing Processes and Systems 2019*, 31 pages, 2019.
38. Grand View Research, “3D Printing Plastics Market Size, Share & Trends Analysis Report By Type (Photopolymers, ABS & ASA, Polyamide/Nylon, PLA), By Form (Filament, Ink, Powder), By End-user, By Region, And Segment Forecasts, 2020 – 2027”, 145 pages, 2020.
39. Management of Innovation and Product Development - Integrating Business and Technological Perspectives, by Marco Cantamessa, Francesca Montagna.

References

- 1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12-13-14-15-35-36-37-38-39-40-41-41-43. Mariano Jiménez, Luis Romero, Iris A. Domínguez, María del Mar Espinosa, Manuel Domínguez, “Additive Manufacturing Technologies: An Overview about 3D Printing Methods and Future Prospects”, *Complexity in Manufacturing Processes and Systems 2019*, 31 pages, 2019.
- 16-26. Statista Research Department, “Global 3D printing products and services market size from 2020 to 2026”, 2021.
- 17-25. Statista Research Department, “Projected global additive manufacturing market growth between 2020 and 2026”, 2021.
18. Thomas Alsop, Statista, “Leading uses of 3D printing from 2015 to 2020”, 2020.
19. Grand View Research, “3D Printing Plastics Market Size, Share & Trends Analysis Report By Type (Photopolymers, ABS & ASA, Polyamide/Nylon, PLA), By Form (Filament, Ink, Powder), By End-user, By Region, And Segment Forecasts, 2020 – 2027”, 145 pages, 2020.
- 20-21. Beth Stackpole, “EDAG’s Light Cocoon Is A Metamorphosis for Car Design”, 2015.
22. Brian Albright, “the State of Electronic 3D Printing”, 2017.
- 23-24. Massimiliano Locatelli, Milano Design Week, 2018.
27. Statista Research Department, “Distribution of sales revenue of the additive manufacturing market worldwide in 2019, by industry”, 2021.
28. Statista Research Department, “Experience of selected countries with additive manufacturing technology in 2019”, 2021.
29. Statista Research Department, “Distribution of additive manufacturing companies in 2019, by region”, 2021.
30. Nils-Gerrit Wunsch, Statista, “Largest additive manufacturing patent owners worldwide from 2011 to November 2019, by number of active patent families”, 2021.

31. Arne Holst, Statista, “Number of 3D printing & additive manufacturing devices worldwide from 2020 to 2030, by context”, 2021.
32. Statista Research Department, “Distribution of 3D printing investments globally in 2019, by application”, 2021.
33. Statista Research Department, “Which factors prevent you from using 3D printing more?”, 2021.
34. Thomas Alsop, Statista, “What is your top focus related to 3D printing in 2021?”, 2021.