



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA MECCANICA

Tesi di laurea magistrale

in

Tecnologie Speciali M

**L'ADDITIVE MANUFACTURING IN AMBITO
INDUSTRIALE: DA UNA PANORAMICA DI MERCATO AD
UN CASO STUDIO REALE**

Relatore:

Prof. Alessandro Fortunato

Candidato:

Leonardo Dal Re

Correlatori:

Prof. Erica Liverani

Prof. Alessandro Ascari

Michele Francioso

Sessione V

Anno Accademico 2022/2023

Abstract

Il presente studio offre una panoramica esaustiva dello stato attuale dell'Additive Manufacturing (AM) nei settori industriali, con enfasi finale sul caso studio dell'azienda TetraPak®. L'obiettivo principale è indagare il panorama attuale del mondo dell'AM e proiettarne possibili sviluppi futuri, sottolineando l'importanza della corretta conoscenza e implementazione della tecnologia. Attraverso una revisione bibliografica, viene analizzato il mercato attuale dell'AM, evidenziando le tendenze, le sfide e le opportunità che caratterizzano questo settore in continua evoluzione. Si esplorano le diverse tecnologie, i materiali e le applicazioni dell'AM, con particolare attenzione alle sue implicazioni nell'industria manifatturiera. Parte fondamentale di questa ricerca è rappresentato dal caso studio di Tetra Pak, dove ho personalmente partecipato attivamente a un progetto sperimentale. Attraverso la progettazione e la realizzazione di prototipi in alluminio mediante tecnologie additive, si è dimostrato e confermato il potenziale rivoluzionario dell'AM nel campo dell'industrial machining e del prototyping. Si evidenzia come l'AM possa apportare significativi miglioramenti in termini di efficienza, flessibilità e personalizzazione nei processi produttivi, ma emerge chiaramente la necessità di una profonda comprensione e corretta integrazione della tecnologia all'interno dei processi industriali esistenti. In conclusione, questa ricerca offre una visione chiara e approfondita dello stato dell'arte dell'AM nei settori industriali, con un caso studio concreto che illustra le sfide e le opportunità legate all'implementazione di questa tecnologia.

Parole chiave: Additive Manufacturing, alluminio, macchine industriali, prototipazione

Indice

1.	ADDITIVE MANUFACTURING IN AMBITO INDUSTRIALE.....	3
1.1	INTRODUZIONE AL MERCATO.....	3
1.2	PANORAMICA TECNOLOGICA.....	13
1.2.1	<i>Macchine e processi.....</i>	15
1.2.2	<i>Materiali.....</i>	20
1.2.3	<i>Infrastruttura Digitale.....</i>	27
1.2.4	<i>Campi di applicazione.....</i>	31
1.3	APPLICAZIONI ATTUALI.....	36
1.3.1	<i>Trasporti.....</i>	36
1.3.1.1	<i>Aerospace.....</i>	37
1.3.1.2	<i>Automotive.....</i>	38
1.3.1.3	<i>Sostenibilità nell'automotive e nell'aerospace.....</i>	40
1.3.2	<i>Utensili per macchine.....</i>	43
1.3.3	<i>Medicina e salute.....</i>	43
1.3.4	<i>Edilizia.....</i>	44
1.3.5	<i>Energia.....</i>	44
1.3.6	<i>Elettronica.....</i>	45
1.3.7	<i>Beni di consumo.....</i>	45
1.3.8	<i>Cibo.....</i>	47
1.3.9	<i>Riparazioni e ricambistica.....</i>	47
1.3.10	<i>Prototipazione.....</i>	48
1.4	SVILUPPI ATTUALI.....	49
1.4.1	<i>Tecnologie ibride additive e sottrattive.....</i>	49
1.4.2	<i>Design.....</i>	49
1.4.3	<i>Preelaborazione.....</i>	52
1.4.4	<i>Multimateriale.....</i>	54
1.4.5	<i>Stampa a grande scala.....</i>	55
1.4.6	<i>Nuovi materiali possibili.....</i>	55
1.4.7	<i>Biostampa.....</i>	56
1.4.8	<i>Automazione.....</i>	56
1.4.9	<i>Sostenibilità.....</i>	56

1.5	SFIDE ATTUALI	58
1.5.1	<i>Velocità e tempi</i>	58
1.5.2	<i>Costi</i>	59
1.5.3	<i>Certificazioni</i>	59
1.5.4	<i>Conoscenze diffuse</i>	60
1.5.5	<i>Materiali</i>	61
1.5.6	<i>Caratteristiche meccaniche</i>	62
1.5.7	<i>Fine vita dei prodotti AM</i>	62
1.5.8	<i>Proprietà intellettuale</i>	62
1.6	PROSPETTIVE FUTURE E CONCLUSIONI	63
2.	ATTIVITÀ SPERIMENTALE	68
2.1	IL MATERIALE.....	69
2.2	IL PROCESSO LPBF.....	71
2.3	STAZIONE DI STAMPA 3D	72
2.4	CASO STUDIO: MANIFOLD PER TETRAPAK.....	73
2.4.1	<i>Periodo di apprendimento di nTop</i>	76
2.4.2	<i>Ottimizzazione e validazione lattice structure</i>	77
2.4.3	<i>Ideazione sistemi di bloccaggio tra i componenti</i>	86
2.4.4	<i>Produzione componenti</i>	90
3.	BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA	96

Indice delle figure

Figura 1: Distribuzione geografica delle installazioni globali di sistemi industriali AM (fonte: Wohlers Report 2023)	3
Figura 2: Alcuni esempi di formati di pasta prodotti da BluRhapsody	5
Figura 3: Tendenze di pubblicazione anno per anno dei documenti di ricerca sull'AM (Additive Manufacturing), derivato dal database di Scopus per il periodo 2000-2023.....	11
Figura 4: Posizione comparativa di diversi paesi e territori in termini di documenti di ricerca pubblicati sull'Additive Manufacturing (AM), derivato dal database di Scopus per il periodo 2000-2023.....	13
Figura 5: Tendenze nella pubblicazione di nuovi IPF relativi a tutte le tecnologie AM, nel periodo 2001-2020 (fonte: EPO)	14
Figura 6: Illustrazione dei quattro settori tecnologici dell'AM (fonte: EPO).....	15
Figura 7: Tendenze nelle pubblicazioni di IPF relativi a Macchine e Processi AM, nel periodo 2001-2020 (fonte: EPO)	20
Figura 8: Consumo annuale in tonnellate di polveri metalliche per AM, nel periodo 2019-2021 e previsioni fino al 2026 (fonte: Ampower).....	25
Figura 9: Tendenze nelle pubblicazioni di IPF relativi ai Materiali AM, nel periodo 2001-2020 (fonte: EPO)	27
Figura 10: Tendenze nelle pubblicazioni di IPF relativi a Infrastruttura Digitale AM, nel periodo 2001-2020 (fonte: EPO)	30
Figura 11: Distribuzione di documenti di ricerca sull'AM (Additive Manufacturing) tra diverse aree di studio, derivato dal database di Scopus per il periodo 2000-2023.....	31
Figura 12: Tendenze nelle pubblicazioni di IPF relativi ai Campi Applicativi AM, nel periodo 2001-2020 (fonte: EPO)	36
Figura 13: Disco freno in ceramica-alluminio dopo il processo di finitura e	39
Figura 14: Obiettivi di Sviluppo Sostenibile facenti parte dell'Agenda 2030.....	40
Figura 15: Le scarpe adidas Y-3 Runner 4D II.....	46
Figura 16: Montatura in titanio stampata in 3D del marchio "Hoet".....	47
Figura 17: Composizione chimica della polvere di AlSi10Mg.....	69
Figura 18: Componente manifold	74
Figura 19: Assieme di manifold e piastra.....	74
Figura 20: Componente piastra	75
Figura 21: Cellula elementare di giroide	78
Figura 22: Dettaglio della parte di giroide più vicina al plenum di uscita del manifold che confronta la precedente giroide (rosa) con quella ottimizzata (verde). Si notano i bordi "smussati" e la forma meno a cuspidi della giroide ottimizzata rispetto a quella precedente	79

Figura 23: Blocco di nTop che, tra gli altri comandi, controlla anche la generazione della rampa usata per la definizione dello spessore di parete della giroide: la rampa impone che nei punti con tensioni minori o uguali a 120 Mpa la parete abbia spessore 2.7 mm, mentre nei punti con tensioni maggiori o uguali a 200 Mpa lo spessore sia 3.4 mm.....	81
Figura 24: Punti in cui la tensione di Von Mises rientra nel range evidenziato	83
Figura 25: a) volume del manifold comprensivo anche della giroide interna b) volume interno del manifold se non fosse presente la giroide c) regione occupata dal fluido	83
Figura 26: Condizioni al contorno della simulazione CFD.....	84
Figura 27: Sezione mediana della mesh relativa al fluido.....	84
Figura 28: Andamento delle cadute di pressione al variare della velocità di ingresso del fluido nel manifold, per la precedente giroide (“Giroide 7”) e quella ottimizzata (“Giroide 15”)	85
Figura 29: Soluzione composta da cunei e slitte, 8 componenti.	87
Figura 30:: Soluzione composta da due camme, 4 componenti.	87
Figura 31: Soluzione composta da guide e perni, 2 componenti.....	88
Figura 32: Soluzione finale adottata per l'unione dei due componenti.....	89
Figura 33: A sinistra la sezione di uno degli ugelli in cui si evidenzia il piccolo foro verticale per alloggiare la termocoppia, a destra invece il foro sulla piastra coassiale al foro dell'ugello (con una superficie interna dentata per permettere idealmente una maggiore sicurezza nel fissaggio della termocoppia).....	90
Figura 34: A) componenti estratti dalla macchina e inseriti in una apposita camera sigillata per rimuovere la polvere in eccesso B) componenti dopo un'accurata pulizia e raccolta della polvere in eccesso	91
Figura 35: Alcuni dettagli in cui si evidenziano anche i supporti che ancorano i componenti alla piattaforma di stampa A) dettaglio di alcuni supporti relativi al componente “piastra” B) dettaglio di alcuni supporti relativi al componente “manifold” C) componenti alloggiati nel forno per il trattamento termico D) piattaforma di stampa montata su macchina EDM per rimuovere i componenti da essa E) dettaglio della vista inferiore del componente “manifold” rimosso dalla piattaforma, si nota la geometria costruttiva dei supporti.....	92
Figura 36: Componenti finiti A) manifold, versione con sistema di bloccaggio e senza B) manifold e piastra con e senza sistema di bloccaggio vicini al rispettivo componente complementare C)eD) dettaglio faccia inferiore di piastra e manifold, si notano in generale le zone in cui erano ancorati i supporti.....	93
Figura 37: Dettagli del sezionamento del manifold finito A) manifold nella macchina EDM durante il primo taglio B) manifold nella macchina EDM durante il secondo taglio C) sezione mediana del manifold, dopo sabbiatura D) dettaglio del plenum di ingresso del manifold D) dettaglio del plenum di uscita del manifold e del canale di un ugello, si nota anche il piccolo foro verticale per alloggiare la termocoppia.....	94
Figura 38: Dettagli della struttura a giroide del manifold A) sezione completa dell'interno del manifold, dal canale di ingresso agli ugelli di uscita B) dettaglio di uno degli ugelli di uscita C)eD) dettaglio del plenum di uscita, si notano i bordi arrotondati e l'ampia curvatura della parte di giroide che affaccia sul plenum.....	95

1. Additive Manufacturing in ambito industriale

1.1 Introduzione al mercato

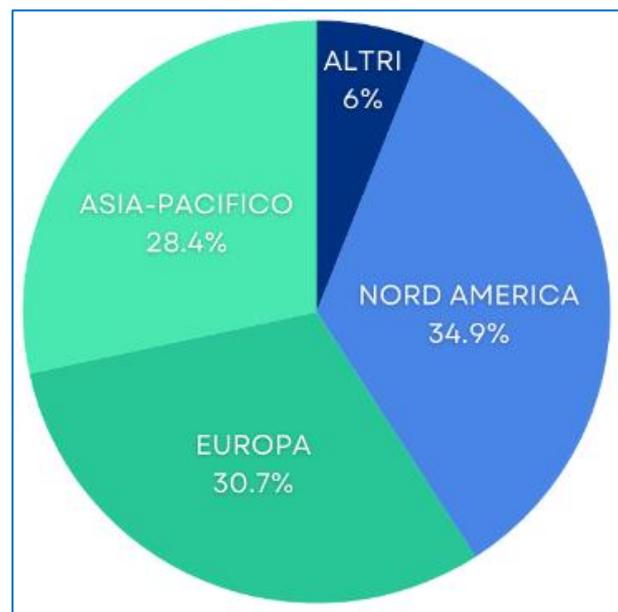


Figura 1: Distribuzione geografica delle installazioni globali di sistemi industriali AM
(fonte: Wohlers Report 2023)

L'uso dell'additive manufacturing (AM) varia tra diverse regioni: circa il 34,9% di tutti i sistemi industriali AM installati nel mondo si trova in Nord America, l'Europa segue con il 30,7%, la regione Asia-Pacifico rappresenta il 28,4% delle installazioni e il restante 6% dei sistemi è distribuito tra America Centrale, America del Sud, Medio Oriente e Africa. Interessante notare che rispetto al 2019, la quota di sistemi AM installati nelle regioni Nord America e Asia-Pacifico è diminuita di alcuni punti percentuali, mentre la quota di sistemi AM installati in Europa e nelle altre regioni è aumentata nello stesso periodo.

A livello di paese, gli Stati Uniti mantengono il predominio sul mercato dell'AM, rappresentando il 33% delle installazioni totali, mentre la Cina, con

il 10% delle installazioni, detiene il secondo posto per maggior numero di installazioni, seguita dalla Germania con l'8,5% e dal Giappone con l'8,2%. In Europa, anche Italia (4,7%), Regno Unito (3,5%) e Francia (3,4%) hanno quote significative.

Il mercato mondiale dell'Additive Manufacturing (AM) continua a crescere sempre di più, spinto dai notevoli vantaggi che offre rispetto ai più tradizionali sistemi di produzione industriale. Infatti, diverse ricerche recenti (nonostante considerino periodi temporali di riferimento, aree geografiche e settori interni della tecnologia diversi) indicano uno sviluppo molto significativo del mercato dell'AM, con un tasso di crescita annuo composto (Compound Annual Growth Rate, CAGR) previsto dell'18,2% fino al 2026. La dimensione globale del mercato dell'AM, stimata a 13,89 miliardi di dollari nel 2021, dovrebbe salire a circa 76,20 miliardi di dollari entro il 2030, con un CAGR previsto del 20,9% dal 2022 al 2030. La tendenza sicuramente crescente del mercato dell'AM è sicuramente anche testimoniata dai progressi ed applicazioni più o meno recenti:

- miglioramenti nel “bioprinting”, con successi nel campo della stampa di organi e tessuti umani funzionali. L'AM ha trasformato il settore delle protesi e degli impianti ortopedici, offrendo soluzioni personalizzate per migliorare la mobilità e il comfort dei pazienti
- degni di nota sono anche i casi studio che illustrano l'utilizzo dell'AM da parte di Boeing, con una riduzione del 25% dei tempi di produzione degli aeromobili, e di GE, con la produzione di ugelli di carburante che ha portato a notevoli risparmi di carburante per le compagnie aeree
- BMW ha dimostrato diversi successi nella produzione additiva di parti metalliche per automobili, come staffe per tetti convertibili e rotaie di guida, integrando l'AM nella propria catena di approvvigionamento
- altri casi studio evidenziano la costruzione di interi edifici tramite stampa 3D, evidenziando il potenziale dell'AM nel settore dell'architettura e dell'edilizia in generale
- BluRhapsody, azienda nata dalla collaborazione tra Barilla e la società olandese di ricerca scientifica TNO, sta attivamente producendo e vendendo formati di pasta stampati in 3D con forme altrimenti impossibili da produrre con i metodi tradizionali



Figura 2: Alcuni esempi di formati di pasta prodotti da BluRhapsody

Questi esempi sottolineano l'impatto rivoluzionario dell'AM in settori estremamente diversi tra loro, dall'assistenza sanitaria fino all'edilizia, evidenziando il suo ruolo fondamentale nelle applicazioni industriali reali e aprendo nuove prospettive per l'innovazione tecnologica futura.

Il potenziale delle tecnologie AM è considerevole, permette la produzione diretta di parti complesse con geometrie altrimenti impossibili da ottenere attraverso processi convenzionali. Inoltre, poiché la soddisfazione del cliente rappresenta una vera sfida nel mondo della produzione, e l'AM offre quasi infinite possibilità per la personalizzazione dei prodotti, rispondendo così alle crescenti esigenze complesse dei clienti e del mercato, le tecnologie additive sono considerate molto influenti quando si tratta di personalizzare i prodotti: i risultati di un'indagine somministrata nel 2022 ad un campione composto da 34 aziende dell'industria dell'AM, attive tra Europa, Regno Unito e Stati Uniti d'America in vari settori industriali (Manifatturiero, Ingegneria, Sanitario, Elettrico e Automobilistico) indicano che il 67,6% conferma che la personalizzazione massiva permessa dall'AM, che consente loro di creare un prodotto su misura creato appositamente per soddisfare le esigenze uniche di ciascun cliente, aumenta notevolmente la soddisfazione del cliente stesso. In questa nuova era industriale l'integrazione delle tecnologie dell'informazione all'interno degli ambienti di produzione è cruciale per realizzare una sostenuta competitività economica; altri studi hanno indagato le possibili sinergie tra i metodi di produzione convenzionali e l'AM, alla ricerca dell'ottimizzazione dei costi operativi e della creazione di

valore aggiunto nella fase di produzione: hanno condotto un'analisi economica riguardante l'implementazione dell'AM in alcune aziende, riscontrando, per esempio, la possibilità di ridurre i costi operativi di produzione di una specifica parte dell'82% utilizzando lo stampaggio ad iniezione basato su forme ottenute tramite AM, e una riduzione del tempo di produzione (per gli stampi) del 66% utilizzando la tecnologia DLP (Digital Light Processing) per volumi di produzione bassi o medi, aumentando così la velocità della catena di processi e rendendola più flessibile. L'additive manufacturing può quindi essere, e viene tutt'ora, impiegato per aumentare la redditività delle aziende.

Un altro contesto dove la manifattura additiva può concretamente contribuire a migliorare le performance aziendali è all'interno dello sviluppo e dell'ottimizzazione dei prodotti, attraverso il cosiddetto "bridge manufacturing". Il "bridge manufacturing" (nel senso di "bridge-to-manufacturing", cioè "ponte-alla-produzione") può essere infatti visto come un tipico approccio all'uso dell'AM all'interno di un contesto aziendale: è un metodo utilizzato per il testing di mercato nonché per orientare la produzione di parti verso un design e un'elaborazione efficienti prima del loro lancio nella produzione di massa. Questo metodo è comunemente usato quando la produzione e la costruzione delle parti sono costose, complesse e richiedono molto tempo. Di seguito un elenco dei quattro passaggi chiave che definiscono la struttura del "bridge manufacturing":

1. Produzione limitata

Il primo passo nella Bridge Manufacturing consiste nella produzione di una piccola e limitata quantità del prototipo finale. Ciò è molto più conveniente rispetto ai metodi tradizionali di produzione poiché le macchine additive non richiedono attrezzature: la produzione a breve termine è più conveniente con l'additive quando si producono basse quantità di una parte.

2. Test di mercato

Con il prodotto in mano, le aziende possono testare il loro progetto sul mercato e questo consente loro non solo di raccogliere fondi per la successiva produzione massiva, ma anche di creare aspettativa attorno al loro prodotto e ricevere riscontri e opinioni sul loro prodotto. Il processo offre l'opportunità di prevedere come i loro clienti accoglieranno il loro prodotto.

3. Modifiche al design

Con i risultati del test di mercato e il riscontro dei clienti, l'azienda può apportare modifiche finali al design. Nuovi prototipi possono essere

progettati e prodotti rapidamente con la tecnologia additiva; alcune aziende potrebbero ripetere i primi due passaggi prima di passare alla produzione di massa mentre altre, sicure del loro design originale, potrebbero passare direttamente al passaggio finale e portare il loro prodotto alla produzione di massa.

4. Produzione di massa

Ora che l'azienda ha raccolto e sfruttato le opinioni del mercato e i fondi ricavati dalle prevendite, e il loro design è stato aggiornato o convalidato, possono procedere con la produzione di massa. Con il completamento del processo di "bridge-to-manufacturing", le aziende possono finalmente portare il loro prodotto sul mercato attraverso la produzione di massa utilizzando i metodi di produzione più convenzionali, ancora tendenzialmente più convenienti per la produzione di massa rispetto alla manifattura additiva.

Nonostante sia un metodo più indicato per le aziende di medie e piccole dimensioni, che spesso non dispongono del capitale necessario per investire nei metodi tradizionali di produzione per la prototipazione e i test di mercato, il "bridge manufacturing" tramite l'AM viene utilizzato anche da grandi e rinomate aziende produttrici: per esempio Caterpillar, che ne ha sfruttato i vantaggi per creare un nuovo filtro dell'olio e assiami di cablaggio prima di essere pronti alla produzione di massa.

In un recente paper di ricerca, l'uso del bridge manufacturing è stato esplorato attraverso un'indagine sul processo di progettazione e produzione delle protezioni facciali per il COVID-19 tramite l'uso di AM su larga scala come ponte alla produzione: i ricercatori hanno scoperto che l'uso dell'AM come processo di bridge manufacturing, attraverso l'ottimizzazione delle fasi di progettazione e produzione, ha aiutato a ottenere velocità di produzione 20 volte più rapide. Nello specifico, il bridge manufacturing è stato utilizzato inizialmente per ottimizzare il design trovando la quantità minima di materiale che può essere utilizzata per produrre le maschere facciali, riducendo i costi del materiale e rimuovendo eventuale materiale non necessario. In secondo luogo, è stata realizzata un'ottimizzazione del percorso utensile, assicurandosi che ogni movimento che la testa di stampa facesse fosse utile e contribuisse al deposito di materiale, ottenendo risparmi sui consumi energetici e sui tempi di produzione. Inoltre, è stato scoperto che il bridge manufacturing era anche favorevole per la fase di produzione minimizzando il rischio di prodotti difettosi e fallimenti di stampa.

Con tutti i vantaggi che l'AM offre ad un'azienda, la produzione su richiesta rappresenta un cambiamento cruciale che ha un impatto molto rilevante e positivo sui modelli di business delle aziende; per quest'ultime l'eccesso di produzione e i costi degli inventari implicano anche costi dello spazio fisico occupato e affittato, assicurazione e tasse: la manifattura additiva aiuta fortemente a risparmiare sui costi dell'inventario ed a eliminare l'eccesso di produzione.

Inoltre, dal punto di vista della sostenibilità, l'adozione dell'AM nei processi produttivi genera meno rifiuti rispetto ai metodi convenzionali, e quindi l'implementazione dell'AM all'interno degli ambienti aziendali ha il potenziale per creare soluzioni innovative in tal senso, costringendo le aziende a riconsiderare i loro modelli di business e a cambiarli per essere più orientati al prodotto. L'AM ridurrà significativamente gli sprechi anche e soprattutto in quei settori in cui i materiali richiedono enormi quantità di energia e sostanze chimiche tossiche; infatti, uno studio condotto dal progetto europeo MERLIN, che aveva come obiettivo quello di ridurre l'impatto ambientale del trasporto aereo utilizzando tecniche di produzione additiva nella fabbricazione di motori aeronautici civili, ha sviluppato tecniche che hanno portato ad un utilizzo di quasi il 100% del materiale, nessun uso di sostanze chimiche tossiche e un azzeramento anche dei costi di "tooling" tradizionali. Grazie alla maggiore libertà di progettazione tipica dell'AM, questi risultati riducono inoltre anche drasticamente le emissioni lungo l'intero ciclo di vita dei componenti: la riduzione del peso e il miglioramento delle prestazioni dei componenti porteranno a un minore consumo di carburante e a minori emissioni generali.

Per quanto riguarda le supply chain aziendali, l'AM potrebbe avere implicazioni di vasta portata anche su questa sezione delle aziende che a sua volta ne influenza d'effetto molte altre, come la relazione con i clienti, l'evasione degli ordini e la domanda, lo sviluppo dei prodotti e la gestione dei resi, nonché l'ambiente: la tecnologia additiva aiuta ad accorciare le catene di approvvigionamento delle aziende anche attraverso parti di ricambio e produzione interna. Ricerche precedenti hanno evidenziato l'impatto favorevole dell'introduzione dell'AM nelle aziende: localizzando le parti di ricambio prodotte tramite AM più vicino al punto di assemblaggio, riducendo così drasticamente il trasporto e il commercio internazionale, passando dalla globalizzazione alla localizzazione e portando quindi a catene di approvvigionamento sempre più corte. In un'altra ricerca, che sottolinea l'impatto dell'AM sui modelli di business sostenibili, si cita come la tecnologia additiva stia apportando un cambiamento dirompente all'interno del

panorama aziendale mondiale, digitalizzando l'intera catena di progettazione e produzione, riducendo il numero di aziende coinvolte e ottimizzando la logistica. Le catene di approvvigionamento accorciate hanno un impatto positivo sull'ambiente grazie alla riduzione delle emissioni di CO₂ derivanti dal trasporto e dalla logistica, e inoltre, la digitalizzazione di queste ultime riduce i bisogni di materiali e spostamenti.

Un altro cambiamento sostenibile che potrebbe influenzare i modelli di business delle aziende nell'adozione dell'AM è la strategia di riciclo a ciclo chiuso. Il bisogno nell'esplorare questo lato sostenibile dell'industria deriva dalla letteratura, che ha evidenziato le potenziali applicazioni delle tecniche AM per raggiungere un pieno controllo a ciclo chiuso all'interno degli ambienti industriali, al fine di aumentare le performance delle aziende stesse. Chiudere il ciclo con l'additive manufacturing può essere realizzato attraverso varie fasi e su diverse scale, ma il recupero di valore più vantaggioso è ovviamente il riciclo del materiale non utilizzato durante i processi di produzione: per quanto riguarda le polveri metalliche utilizzate per i processi AM all'interno dell'azienda, il materiale riciclato può arrivare al 98%. La tecnologia AM ha dimostrato anche di aumentare il potenziale di recupero del valore derivato dai rifiuti, comportando solo una minima perdita di qualità, come per esempio nel caso di aziende di riciclaggio specializzate, che trasformano il PLA derivato dalla lavorazione del mais in materiale riciclato che può essere poi riutilizzato come materiale di input nella produzione, abilitando quindi una strategia a ciclo chiuso per quanto riguarda il materiale. Inoltre, l'uso dell'AM per i servizi di riparazione promuove l'adozione di modelli di business sostenibili, generando una maggiore redditività, e quindi ricavi. Come nel caso, ancora una volta, di Caterpillar che ha utilizzato il "cold spraying" nella riparazione e, secondo gli studi, l'azienda è riuscita a riutilizzare in media il 94% dei suoi prodotti a fine vita: l'azienda ha utilizzato questa tecnologia AM nella riconversione dei suoi motori Diesel sostituendo le parti difettose con una miscela di parti nuove e rigenerate. Questa innovativa tecnica di riparazione AM ha migliorato i margini di profitto dell'azienda portando dal 40% al 25% la percentuale di componenti inutilizzati in ciascun nuovo motore, causando minori scarti e sprechi, ed evidenziando il ruolo dell'AM nella creazione di soluzioni innovative che incentivano le aziende a ripensare i loro modelli di business plasmandoli in modo più sostenibile ed efficiente dal punto di vista dei costi.

L'implementazione delle tecnologie digitali AM nell'industria 4.0 rimane comunque impegnativa e richiede nuove competenze ingegneristiche e manageriali adattate al fine di cogliere i vantaggi di questa nuova tecnologia.

Ciò trova riscontro con le scoperte di un'altra ricerca, basata su di un'intervista condotta a quattro PMI internazionali operanti nell'industria additiva, che dimostra come tali PMI trovano difficile integrare l'AM senza nuove conoscenze, competenze tecnologiche, know-how e formazione e trovando barriere come competenze nel software di progettazione e modellazione, processi e macchine, qualità, materiali e cybersecurity.

Un altro ostacolo all'implementazione dell'AM è la qualità superficiale degli oggetti prodotti con alcune tra le tecnologie additive, e anche caratteristiche indesiderate come vuoti non intenzionali. In alcuni studi precedenti è emerso come le sfide riguardanti il miglioramento della qualità rappresentano un sostanziale svantaggio per l'uso dell'additive: si nota che la qualità generale delle componenti prodotte con tale tecnologia sono influenzate da numerosi fattori come i parametri di progettazione, la complessità intrinseca del componente da produrre, così come anche dalle impostazioni della macchina, e se questi fattori non vengono affrontati correttamente potrebbero causare problemi alle industrie che si affidano alle tecnologie additive.

Ciò detto, l'im maturità relativa dell'AM, connessa alla mancanza di una adeguata e completa standardizzazione, rappresenta uno dei principali e reali ostacoli per farla diventare una tecnologia "mainstream" e per implementarla all'interno di molti più ambienti industriali. Gli standard relativi all'additive manufacturing sono pilastri importanti che possono essere utilizzati per promuovere la conoscenza tecnica tra le aziende e incoraggiarle ad adottare tale tecnologia: la crescente dipendenza dagli standard delle aziende operanti nei settori industriali altamente regolamentati, è un fattore cruciale affinché i prodotti fabbricati con AM soddisfino degli standard rigorosi al fine di stabilire fiducia tra le aziende adottanti tale tecnologia. Ad oggi, però, la maggior parte delle aziende che adottano l'AM non seguono alcuno standard specifico; la standardizzazione è una grande sfida per l'implementazione dell'AM all'interno dei contesti industriali, e la difficoltà di creare linee guida e standard da poter seguire è associata a molteplici fattori, come le diverse applicazioni e materiali utilizzabili e le difformità nei molti e differenti processi che compongono il mondo dell'additive manufacturing.

Infatti, nel periodo dal 2000 al 2020, periodo in cui sostanzialmente si sono iniziate ad utilizzare maggiormente le tecnologie additive, il panorama di quest'ultime è cambiato significativamente: l'uso dei processi di produzione additiva si è evoluto dalla pura prototipazione alla produzione di oggetti funzionali finiti e ciò si riflette anche nelle attività di ricerca correlate e nelle pubblicazioni. Dopo il 2013 si è registrato un aumento enorme di

quest'ultime: l'80% delle pubblicazioni scientifiche relative alla AM sono state scritte nel periodo successivo al 2011, e, per dare un'idea, le prime tecnologie additive erano emerse già negli anni 80...

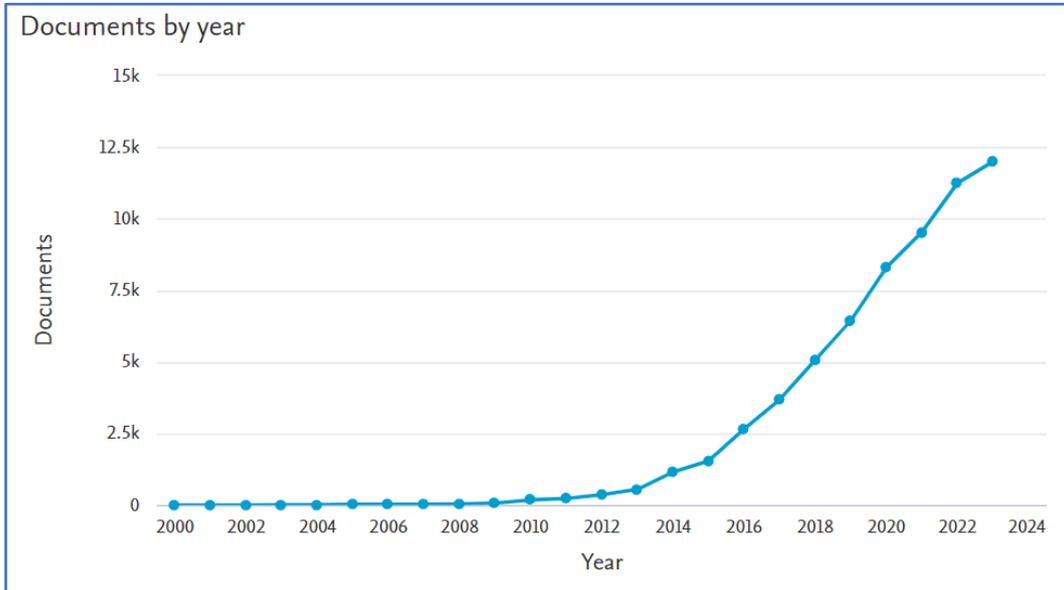


Figura 3: Tendenze di pubblicazione anno per anno dei documenti di ricerca sull'AM (Additive Manufacturing), derivato dal database di Scopus per il periodo 2000-2023

Si osserva un aumento della varietà di macchine diverse, più veloci e affidabili; tuttavia, come detto, rimangono alcune barriere nel cammino verso l'integrazione completa nella produzione industriale. Numerose nuove aree di ricerca si sono sviluppate in questo campo, ad esempio, nell'ambito del pre e post processing, dell'AM ibrido e dei processi di monitoraggio. Gli sviluppi attuali nell'ambito dei processi AM, come la stampa multimateriale, aprono nuove opportunità. Inoltre, anche la ricerca nel campo dei materiali ad alte prestazioni e dei biomateriali favorisce il passaggio dal prototipo all'applicazione industriale. Un ostacolo che però rimane tale per una più ampia adozione industriale dell'AM sono attualmente i costi elevati dei materiali e delle macchine, specialmente nell'ambito della stampa dei metalli. La principale tendenza riscontrata per quanto riguarda i materiali è stata una maggiore diversificazione dei materiali AM disponibili, con sviluppi recenti in tutte le classi di materiali: un'importante area di ricerca sono i compositi e i materiali ibridi e, sulla base di ciò, è emerso un nuovo segmento e nel 2019 sono state lanciate sul mercato le prime stampanti commerciali capaci di utilizzare materiali rinforzati con fibre. Gli sviluppi nei processi e nei materiali hanno innescato anche un conseguente sviluppo e una ricerca

sostanziali nel campo dei processi digitali: includendo strumenti di supporto per la creazione di strutture lattice¹ (“a traliccio” o “reticolari”), per l’ottimizzazione topologica e la progettazione generativa, ma anche strumenti di supporto per il “reverse engineering” e l’elaborazione dei dati di scansione 3D. Come già detto, la mancanza di conoscenza è ancora una ragione importante per cui il potenziale dell’AM non è ancora completamente sfruttato e gli esperti collegano questa mancanza di conoscenza al periodo relativamente breve da cui questa tecnologia viene utilizzata e vedono un’opportunità per colmare questa lacuna attraverso abilitatori tecnologici come l’IA e il machine learning. Inoltre, gli strumenti della process chain digitale aiutano a sfruttare ulteriormente il potenziale dell’AM, ad esempio attraverso l’uso dell’ottimizzazione topologica. Una barriera per fornire un migliore supporto in generale, consentendo così un uso più ampio dell’AM, è causata dall’evoluzione continua dei processi e dei materiali, che influisce sulla idoneità o meno del supporto progettuale erogabile. Mentre gli strumenti esistenti, spesso integrati nel software proprietario, facilitano la progettazione dei dettagli e la produzione, il supporto per la fase di progettazione concettuale è scarso. Ed è proprio in questa fase concettuale della progettazione che il supporto avrebbe un effetto considerevolmente positivo, poiché i potenziali dell’AM (ad esempio, la progettazione leggera o l’integrazione funzionale di più elementi in un’unica parte) possono essere implementati molto efficacemente in questo stadio. Attualmente, l’intero settore è investito da una spinta tecnologica (*PUSH*) che si concretizza in nuovi materiali, macchine e processi, ma le pratiche lavorative e le esigenze dei progettisti, visti come veri e propri abilitatori per una migliore progettazione additiva e quindi una sua maggiore diffusione (*PULL*), non sono attualmente sufficientemente indagate.

¹ strutture ottenute ripetendo una cella elementare, costituita da travi o superfici che si adattano insieme seguendo un modello regolare oppure stocastico, fino al riempimento completo di una porzione desiderata di un componente

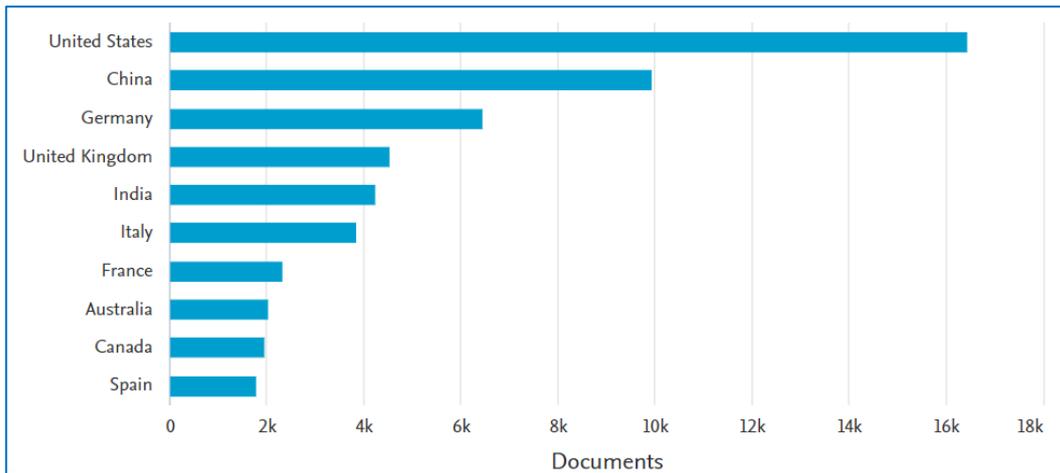


Figura 4: Posizione comparativa di diversi paesi e territori in termini di documenti di ricerca pubblicati sull'Additive Manufacturing (AM), derivato dal database di Scopus per il periodo 2000-2023

1.2 Panoramica tecnologica

In questa sezione è presentata una panoramica delle diverse tecnologie additive disponibili (secondo lo standard [ISO/ASTM52900:2021](#)), le loro caratteristiche, i materiali utilizzati, i processi di produzione, le applicazioni e le sfide associate. Sostanzialmente, si tratta di una rappresentazione delle diverse opzioni e metodologie disponibili nell'ambito della produzione additiva.

L'AM è una tecnologia che abbraccia diverse discipline, incorporando una vasta gamma di competenze tecniche. Al suo nucleo, c'è un processo di produzione digitale che inizia con una rappresentazione digitale del prodotto desiderato e prosegue con un utilizzo consistente delle risorse digitali. Questo comporta il lavoro con file digitali e l'istruzione delle macchine operatrici per operare in modo che trasformino il design in un oggetto fisico. Considerando la natura complicata dell'AM, tutti gli aspetti che contribuiscono a plasmare la realtà del mondo additive devono essere presi in considerazione nel delineare il panorama delle tecnologie AM, che si può dire comprenda quattro blocchi tecnologici costituenti: "Macchine e Processi", "Materiali" e "Infrastruttura Digitale", che insieme costituiscono appunto le tecnologie fondanti e che rendono fisicamente possibile la manifattura additiva, e il quarto blocco "Campi Applicativi" che rappresenta le applicazioni specifiche dell'AM nei vari settori industriali.

Verranno analizzati questi quattro blocchi della tecnologia additiva seguendo un'analisi condotta dall'Ufficio Europeo dei Brevetti (European Patent Office, EPO) che ha osservato la variazione, nel periodo dal 2001 al 2020, del numero di brevetti IPF² relativi ad ogni blocco, in modo da vedere l'evoluzione della tecnologia nel panorama mondiale e per poter dare così un'idea di come sia la tendenza generale per quello specifico blocco tecnologico. In questa tesi si è deciso di dare particolare enfasi proprio all'andamento del numero di brevetti in ogni settore poiché lo si ritiene essere un dato che rende molto bene l'idea di come stia evolvendo l'innovazione e la ricerca nel campo dell'additive manufacturing.

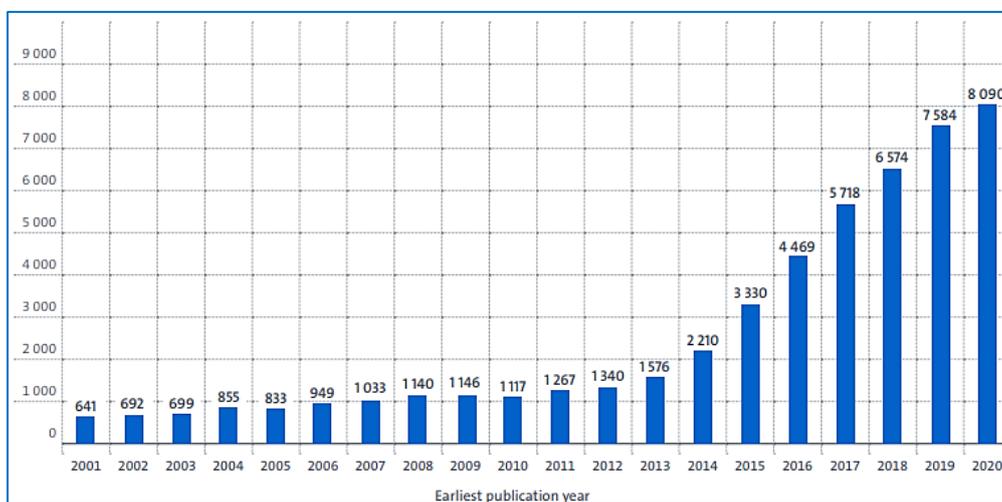


Figura 5: Tendenze nella pubblicazione di nuovi IPF relativi a tutte le tecnologie AM, nel periodo 2001-2020 (fonte: EPO)

Per quanto riguarda il settore dei “Materiali” si specifica che gli aspetti compositivi delle invenzioni brevettate sono stati considerati, e questo si applica a tutti i tipi di materiale. Cioè, ad esempio, se un prodotto brevettato è realizzato con una lega metallica, viene considerato rilevante, ai fini del suo

² Le Famiglie di Brevetti Internazionali (International Patent Families, IPF) sono utilizzate come metrica per misurare le attività di richieste di brevetto nelle diverse categorie delle tecnologie AM. Ogni IPF copre un'invenzione unica e include domande di brevetto rivolte ad almeno due paesi. Più specificamente, un IPF è un insieme di domande per la stessa invenzione che include una domanda di brevetto internazionale pubblicata, una domanda di brevetto pubblicata presso un ufficio brevetti regionale o presso due o più uffici brevetti nazionali. È un indicatore affidabile dell'attività inventiva perché fornisce un grado di controllo sulla qualità del brevetto rappresentando solo invenzioni per le quali l'inventore considera il valore sufficiente per cercare protezione a livello internazionale.

conteggio come brevetto relativo alla categoria “Materiali”, solo se la composizione stessa della lega è parte integrante dell'invenzione, ovvero se è riflessa nella classificazione del brevetto. Al contrario, se, ad esempio, un impianto medico di nuova generazione utilizza una lega metallica ordinaria, il materiale non sarà riflesso nella classificazione del brevetto e quindi non sarà considerato per quel gruppo di materiali nella mappatura dei brevetti. In sostanza, la presenza di un materiale nella mappatura dei vari brevetti dipende dall'importanza e dall'innovazione posta dalla composizione specifica del materiale nell'invenzione brevettata.

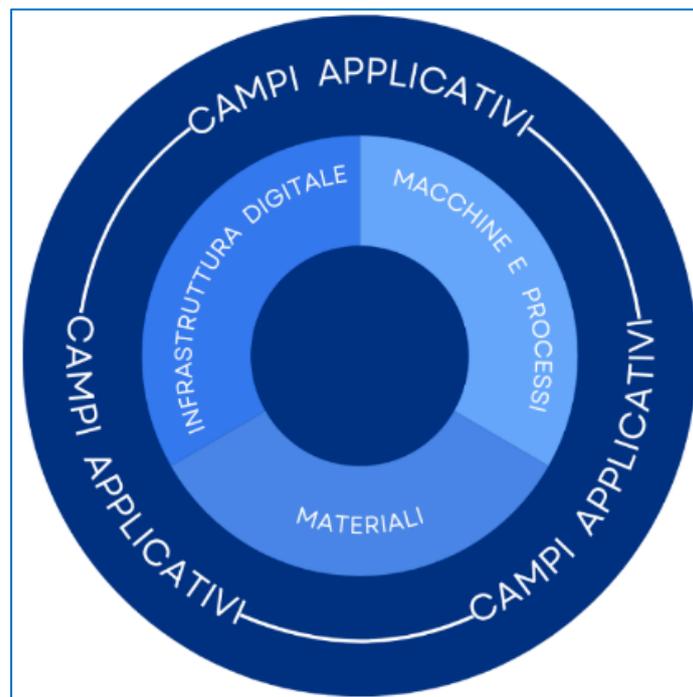


Figura 6: Illustrazione dei quattro settori tecnologici dell'AM
(fonte: EPO)

1.2.1 Macchine e processi

Questa sezione si riferisce principalmente alle macchine che trasformano il design digitale in prodotto reale, alla fonte di energia utilizzata per plasmare o modellare il materiale, ma anche ad altri dispositivi secondari

sviluppati per le diverse tecniche di manifattura additiva. In generale, questa sezione copre tutte le tecniche AM descritte nello standard [ISO/ASTM52900:2021](#), ovvero Binder Jetting (BJT), Direct Energy Deposition (DED), Material Extrusion (MEX), Material Jetting (MJT), Powder Bed Fusion (PBF), Sheet Lamination (SHL) e Vat Photopolymerization (VPP):

- **Binder Jetting (BJT)**: questa tecnica prevede il deposito di un agente legante liquido su un letto di materiale in polvere per legare selettivamente le particelle e creare un oggetto solido
- **Direct Energy Deposition (DED)**: utilizza fonti di energia termica focalizzata (laser o fasci di elettroni) per fondere materiali mentre questi vengono depositati strato dopo strato
- **Material Extrusion (MEX)**: fonde ed estrude un filamento, che viene depositato selettivamente attraverso un ugello
- **Material Jetting (MJT)**: coinvolge lo spruzzo selettivo di goccioline di materiale che vengono poi solidificate strato dopo strato
- **Powder Bed Fusion (PBF)**: utilizza una fonte termica ad alta energia (laser o fascio di elettroni), per fondere selettivamente regioni di un letto di polvere
- **Sheet Lamination (SHL)**: coinvolge la stratificazione e l'unione di fogli di materiale per formare una parte
- **Vat Photopolymerization (VPP)**: utilizza una vasca di resina polimerica fotosensibile liquida e una fonte luminosa per curare selettivamente e solidificare strato dopo strato la resina

Praticamente tutti i sistemi AM rientrano in una di queste categorie citate, e secondo lo standard ISO/ASTM52900:2021 ogni processo AM differisce dagli altri in diversi aspetti:

- **Materiale e stato del materiale**: si riferisce ai tipi di materiale utilizzati nel processo AM e al loro stato fisico, ovvero la natura del materiale di alimentazione. Si discrimina ad esempio tra processi basati su polveri (binder jetting, powder bed fusion), processi basati su filamenti (Material Extrusion), processi basati su liquidi (Material Jetting, Vat Photopolymerization) e processi basati su fogli (Sheet Lamination)
- **Fonte di energia**: si concentra sul tipo di energia utilizzata per modellare o solidificare il materiale. Le fonti di energia tipiche sono

laser, fasci di elettroni, ultrasuoni, LED o lampade a infrarossi. A seconda della tecnica e del materiale, una o più fonti di energia vengono utilizzate per la finalizzazione della forma del materiale

- **Strategia di stratificazione:** si riferisce al metodo con cui il materiale viene depositato e costruito strato dopo strato. Si differenzia tra processi che utilizzano un letto di polvere e legano o fondono selettivamente la polvere (binder jetting, powder bed fusion), processi che estrudono o depositano materiale in un percorso continuo (material extrusion, material jetting, direct energy deposition) e processi che legano e impilano fogli di materiale (sheet lamination)
- **Strutture di supporto:** affronta la necessità della presenza o meno di strutture di supporto durante il processo di stampa per fornire stabilità a caratteristiche sporgenti o garantire un ancoraggio stabile al componente intero. Si differenzia principalmente tra processi che utilizzano materiali sacrificabili (come supporti solubili nel material jetting oppure nel vat photopolymerization) e processi che richiedono strutture o supporti aggiuntivi (binder jetting, powder bed fusion e material extrusion)

Gli sviluppi nella fotopolimerizzazione in vasca (VPP) hanno costantemente dominato il panorama dell'AM. Essendo stato il primo processo AM brevettato e commercializzato, nel periodo tra il 2001 e il 2020 il numero di brevetti relativi a questa tecnologia totalizzava quasi 13.000. Questo tipo di sistemi AM sono utilizzati principalmente per produrre parti ad alta risoluzione ad un costo ragionevole.

La fusione su letto di polvere (PBF) è emersa come la seconda tecnica AM più diffusa, gradualmente riducendo il divario con la fotopolimerizzazione in vasca (VPP) e raggiungendo un totale annuale di quasi 1.700 brevetti nel 2020. Questa tecnologia additiva può essere utilizzata per una vasta gamma di polimeri e metalli, ma è ancora considerata relativamente complessa e con costi operativi e di materie prime elevati rispetto ad altri sistemi additivi. Tuttavia, poiché spesso è in grado di produrre una qualità superficiale accettabile con le proprietà meccaniche desiderate necessarie per le applicazioni finali, le aziende stanno investendo in questa tecnologia puntando sulla riduzione dei tempi e dei costi di produzione.

L'estrusione di materiale (MEX), segue come la terza tecnologia AM più innovata nel periodo 2001-2020, vantando oltre 7.500 brevetti nel corso di due decenni e oltre 1.400 brevetti nel solo 2020. Il primo processo commerciale è stato introdotto già nel 1991, e questa tecnologia viene ora utilizzata per una vasta gamma di materiali di base, come polimeri termoplastici, ceramiche, calcestruzzo, materiali compositi, cioccolato e anche cellule viventi sospese in idrogel. Sviluppi più recenti si concentrano anche sui metalli, come ad esempio il sistema sviluppato dai ricercatori del MIT chiamato "LMP" (Liquid Metal Printing) che prevede il deposito di una massa di alluminio fuso in un letto di perle di vetro: in questo modo il processo è molto più veloce delle normali tecnologie additive (a scapito per ora di una scarsa precisione dimensionale e superficiale) e, poiché il materiale rimane fluido durante tutto il processo di stampa, si limitano le anisotropie tipiche dell'additive. I sistemi a estrusione di materiale (MEX), anche chiamati "a filamento fuso", sono molto versatili, accessibili e user-friendly e trovano applicazioni che li rendono ampiamente accessibili e facili da utilizzare. Sono utilizzati in vari settori, tra cui la produzione di mobili, l'elettronica, l'industria alimentare e l'edilizia. Non sorprende quindi che sia attualmente considerato il metodo additivo più utilizzato e popolare del settore, anche prima della fotopolimerizzazione in vasca (VPP).

La laminazione a fogli (SHL) e la deposizione di energia diretta (DED) seguono queste prime tre tecnologie con circa 5.000 e 4.500 IPF totali, rispettivamente. I sistemi di deposizione di energia diretta (DED) utilizzano polvere o fili metallici come materia prima per produrre parti metalliche di piccole o grandi dimensioni. Questa tecnologia offre proprietà uniche: può depositare più di un materiale creando contemporaneamente componenti multimateriale con diverse proprietà strutturali, può produrre strati curvi, rendendolo adatto per lavori di riparazione o l'aggiunta di caratteristiche specifiche ad oggetti esistenti, e permette anche di non utilizzare supporti durante la creazione del componente. La laminazione a fogli (SHL), invece, è un processo in cui fogli di materiale come carta, fogli di metallo o di vetroresina, vengono uniti insieme per creare un oggetto. Sono in corso innovazioni per migliorare la finitura superficiale e la texture della laminazione a fogli (SHL), nonché metodi per integrare elementi funzionali nei prodotti ottenuti con questa tecnologia, come sensori incorporati o componenti elettronici, ma anche per espandere la gamma e le proprietà meccaniche dei materiali esistenti.

Mentre il binder jetting (BJT) e il material jetting (MJT) avevano inizialmente entrambi aree di sviluppo molto piccole, il binder jetting (BJT) ha registrato una crescita sostanziale, diventando la quarta tipologia di tecnologia additiva più grande per il numero di IPF pubblicati nel 2020, e invece gli sviluppi del material jetting (MJT) sono più o meno costanti dal 2017. Il material jetting (MJT) utilizza tipicamente fotopolimeri e sostanze simili alla cera (è infatti una tecnologia spesso utilizzata per creare modelli o stampi per processi di colata a cera persa), tuttavia, gli sviluppi più recenti hanno portato alla sperimentazione anche con i metalli. Il binder jetting (BJT) e il material jetting (MJT) sono tecniche AM che utilizzano teste di stampa a getto d'inchiostro, ma con una differenza sostanziale tra le due tecnologie: nel BJT il materiale spruzzato funge da agente legante per solidificare il materiale di alimentazione e creare il prodotto desiderato, mentre nel MJT il materiale dispensato costituisce direttamente il materiale da costruzione principale del componente stesso. Il binder jetting (BJT) è una tecnica di stampa relativamente veloce ed economica rispetto ad altri processi AM, ed è anche altamente versatile, poiché può produrre sia oggetti piccoli che grandi.

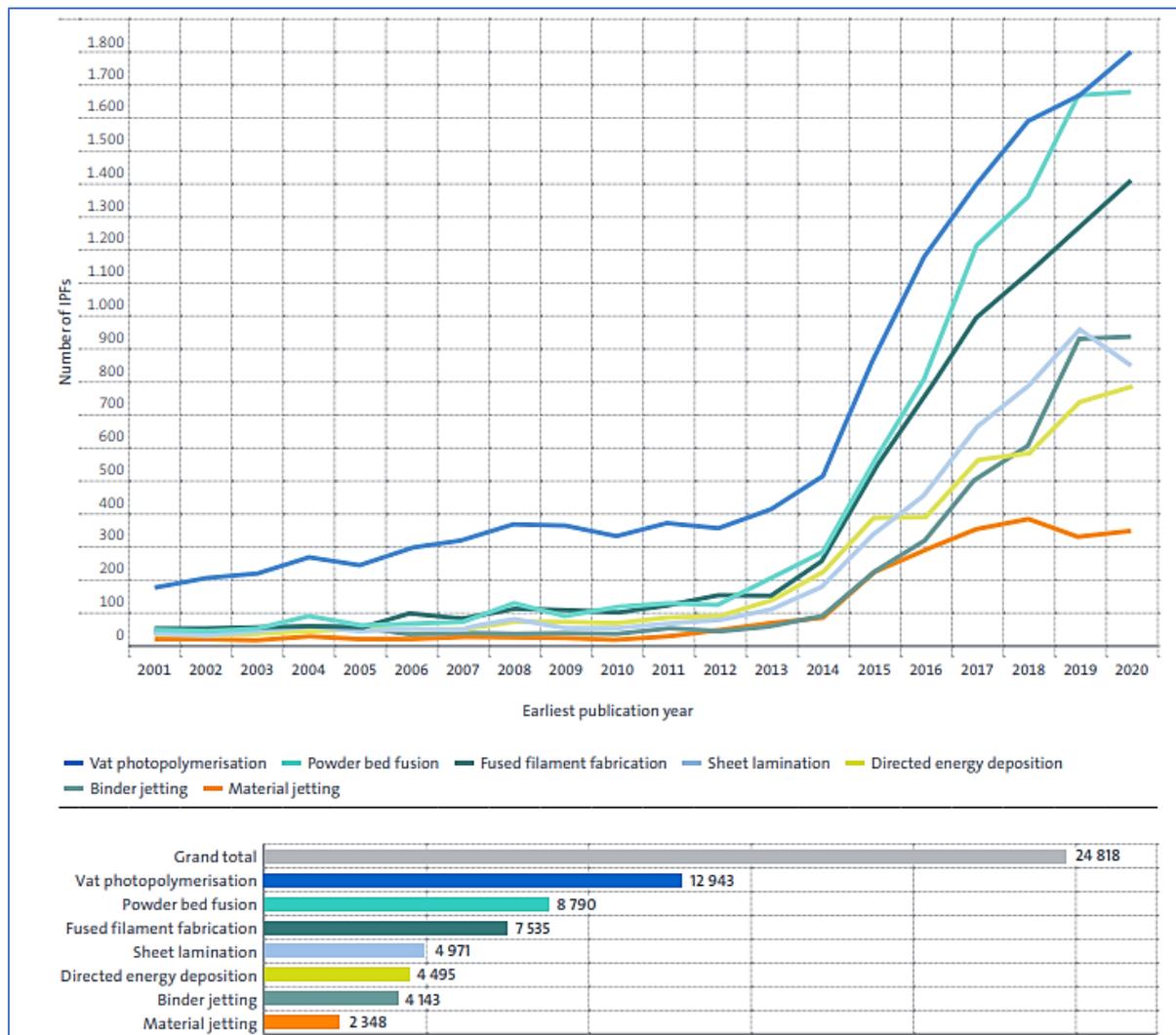


Figura 7: Tendenze nelle pubblicazioni di IPF relativi a Macchine e Processi AM, nel periodo 2001-2020 (fonte: EPO)

1.2.2 Materiali

I materiali nell'additive manufacturing possono variare a seconda del processo specifico, delle proprietà desiderate dell'oggetto finale e dei requisiti dell'applicazione specifica. Spesso sono prodotti come solidi, sotto forma di polvere, in fili o lastre, oppure come liquido o miscela in sospensione, e differiscono nelle loro proprietà meccaniche, termiche, chimiche, ottiche o elettriche, a seconda dell'applicazione e dei requisiti specifici. I materiali per AM includono i materiali principali (quelli che costituiscono sostanzialmente il componente nel suo stato finito), ma anche materiali di supporto e ausiliari.

I materiali principali, chiamati anche “di costruzione” o “primari”, sono appunto i principali utilizzati per creare il componente desiderato e, costituendo la maggior parte della parte stampata, ne forniscono le sue caratteristiche principali di resistenza, durata e funzionalità generale.

Le strutture di supporto, fatte con materiali ausiliari oppure anche con gli stessi materiali principali, sono strutture temporanee utilizzate per fornire stabilità e prevenire deformazioni o crolli durante il processo di stampa. Queste strutture sono necessarie quando si stampano oggetti con sporgenze, geometrie complesse o caratteristiche intricate che altrimenti sarebbero non supportate e non correttamente riproducibili durante il processo di costruzione. I materiali ausiliari hanno spesso proprietà diverse dai materiali principali, come ad esempio la solubilità in acqua o la fragilità: il materiale ausiliario specifico utilizzato dipende dalla tecnica di AM specifica e dal materiale principale in uso.

Si ricorda che i materiali utilizzati nelle tecnologie additive continuano ad espandersi con il progresso della ricerca e dello sviluppo, consentendo l'uso di nuovi materiali con proprietà e capacità uniche. Ciò detto, in questa panoramica si utilizza una classificazione che distingue tra i cinque tipi attualmente più comuni di materiali utilizzati nell'additive manufacturing: *polimeri, metalli, ceramiche, cementi, e biomateriali*.

- **Polimeri:** Vari tipi di polimeri e plastiche sono ampiamente utilizzati nell'AM, e questi includono (ABS), acido polilattico (PLA), poliammide (nylon, PA), polietilene tereftalato glicol-modificato (PETG), polipropilene (PP) e molti altri. I materiali a base di polimeri sono spesso utilizzati nei processi basati su filamenti come la Material Extrusion (MEX). In questa categoria si considerano anche la modifica delle composizioni principali, è inclusa anche la produzione e la modifica di fibre o tessuti artificiali e sono stati considerati anche materiali fotosensibili. La selezione dei polimeri per scopi di AM è determinata principalmente dal tipo di tecnologia AM: per i metodi di estrusione del materiale (MEX) è possibile utilizzare una gamma di polimeri termoplastici (le miscele basate su PLA, PC e stirene sono le più comunemente usate in questo campo), mentre acrilati, resine epossidiche e poliuretani sono le resine preferite per le tecniche di fotopolimerizzazione (VPP) e binder jetting (MJT). Nella tecnologia di fusione su letto di polvere, vengono solitamente utilizzate resine di poliammide (ad es. PA6, PA12), così come altri materiali polimerici più avanzati come PEEK o TPU. Queste miscele di polimeri sono solitamente appositamente sviluppate per l'uso in AM e per questo sono quindi oggetto di molte ricerche, anche perché i prodotti finali creati attualmente presentano alcuni svantaggi rispetto a

quelli prodotti con metodi di produzione tradizionali, specialmente per quanto riguarda la stabilità dimensionale, le proprietà meccaniche, la porosità, e la risoluzione

- **Metalli**: fusione su letto di polvere (PBF), deposizione di energia diretta (DED) e binder jetting (BJT) sono tutte tecnologie additive che possono lavorare con i metalli. I materiali metallici più comuni includono acciaio inossidabile, alluminio, titanio, leghe di nichel, leghe di cobalto-cromo e metalli preziosi come oro e argento. Si considerano anche i metalli puri, i composti di leghe metalliche e anche combinazioni di metalli e non metalli, come ad esempio i cermeti³, o i compositi a matrice metallica. Sono stati sviluppati diversi tipi di polvere metallica per l'AM: acciai, in particolare acciai inossidabili e acciai per utensili, leghe di alluminio per applicazioni aerospaziali, leghe a base di nichel e cobalto per parti di turbine stressate termicamente, leghe di titanio per impianti medicali, leghe di rame per dissipatori e scambiatori di calore e leghe di metalli nobili per gioielli. L'ottimizzazione e lo studio dei materiali metallici si concentra principalmente su due aspetti distinti: il perfezionamento delle composizioni delle leghe per migliorare l'interazione tra la lega in polvere e il fascio di energia, e l'ottimizzazione della reologia della polvere, in particolare la morfologia della polvere, la dimensione delle particelle, la distribuzione delle dimensioni e la fluidità, per semplificare e velocizzare la deposizione di strati uniformi di polvere e controllare meglio la densità del prodotto finale. Inoltre, le parti metalliche prodotte in modo additivo presentano una microstruttura diversa dalle parti prodotte mediante tecniche convenzionali come colata, forgiatura o stampaggio ad iniezione. Ciò significa che trattamenti termici più specifici sono attualmente in fase di sviluppo per adattare le proprietà delle parti finali AM ai requisiti specifici dell'applicazione finale

- **Ceramiche**: comprendono ossidi, non ossidi e compositi a base di ceramica. Le ceramiche sono utilizzate nell'AM per applicazioni che richiedono resistenza alle alte temperature, inerzia chimica o specifiche proprietà elettriche. Materiali come allumina, zirconia, silice e idrossiapatite sono comunemente utilizzati nei processi di produzione additiva. Sono state incluse anche le miscele del vetro. Nel campo della ceramica, la Sinterizzazione Laser Selettiva (SLS) è la tecnica più comunemente utilizzata. Il materiale ceramico più comune nell'AM è la zirconia (ZrO_2), utilizzata in

³ dall'inglese cermets (abbr. di (ceramic metals), i materiali derivanti dall'unione di un metallo o di una lega metallica con una sostanza di natura ceramica

ambito medicale per creare denti, corone e altri oggetti dentali su misura. In alternativa, l'allumina (Al_2O_3) può essere impiegata per questi scopi. Il carburo di silicio (SiC) è il materiale ceramico non ossidico più comunemente utilizzato dalle tecnologie additive ed è principalmente impiegato in componenti di turbine esposte ad elevate temperature

- **Biomateriali:** hanno un ruolo significativo nelle applicazioni biomediche, dove vengono utilizzati materiali biocompatibili e riassorbibili per creare impianti, impalcature tissutali e dispositivi medici. Questo settore include solo materiali per i tessuti molli e le impalcature, ovvero culture cellulari vive, polipeptidi e polisaccaridi. I materiali e i prodotti coinvolti devono avere determinate proprietà meccaniche, di degradazione o di stabilità. Devono anche interagire in modo appropriato con proteine, cellule e tessuti, e a volte anche favorire il rilascio di farmaci. Le composizioni biocompatibili utilizzate per la produzione additiva dei tessuti sono chiamate "bio-inchiostri" e comprendono materiali che imitano i componenti naturali della matrice cellulare. Nei materiali idrogel, le cellule destinate a formare il nuovo tessuto fanno spesso parte del bio-inchiostro e la tecnologia additiva consente di stampare questi gel nelle forme più complesse

- **Cementi:** sono alla base di quest'ultima categoria di materiali, che comprende anche composizioni di cementi, calcestruzzi o pietra artificiale. Con la tecnologia del Binder Jetting (BJT), un materiale reattivo come il cemento Portland, in soluzione acquosa di carbonato di litio, può essere depositato su uno strato di sabbia come legante. La tecnologia MEX con calcestruzzo umido presenta diverse sfide come la regolazione del pompaggio e delle proprietà del calcestruzzo fresco, per ottenere una lavorabilità ed una finestra temporale sufficiente per l'estrusione nonché garantire il pieno sviluppo delle sue proprietà strutturali e di resistenza. Tali proprietà sono di fondamentale importanza quando si considera la complessità e le notevoli dimensioni degli oggetti AM prodotti in questo settore.

I polimeri, sotto forma di polvere, resina o filamenti, costituiscono il segmento più ampio del mercato dei materiali. Esiste una vasta e continuamente crescente gamma di polimeri disponibili, nonostante comunque le opzioni disponibili siano ancora relativamente più limitate rispetto ai metodi di produzione convenzionali. I materiali polimerici per l'AM possono essere scelti in base a vari fattori come la resistenza alla trazione, la rigidità, la biocompatibilità o l'aspetto visivo. I polimeri termoplastici sono un tipo di polimeri che diventano malleabili e plasmabili quando riscaldati per poi ritornare rigidi durante il raffreddamento. Possono essere riscaldati più e più volte senza subire una degradazione significativa e

sono ampiamente utilizzati nei processi additivi, sottoforma di filamenti, nelle tecnologie basate sul material extrusion (MEX). I fotopolimeri, invece, sono polimeri sensibili alla luce che subiscono una reazione chimica di polimerizzazione quando esposti a specifiche lunghezze d'onda della luce, tipicamente quelle della luce ultravioletta (UV). Sono comunemente utilizzati nelle tecniche AM basate sulla fotopolimerizzazione in vasca (VPP). I polimeri specifici per AM tendono ancora ad essere più costosi rispetto alle loro controparti utilizzate nella manifattura convenzionale, e questo a causa di diversi fattori: la produzione di materie prime per AM viene tipicamente effettuata in volumi limitati, il che aumenta i costi rispetto ai polimeri convenzionali prodotti in massa, inoltre, il trattamento dei polimeri per AM è più complesso rispetto al trattamento riservato ai polimeri destinati ad usi più convenzionali. Recentemente, c'è un crescente interesse nello sviluppo di polimeri per le tecnologie additive che siano più sostenibili, con migliorata resistenza chimica e proprietà meccaniche avanzate, riflesso dell'attenzione dell'industria in generale nel creare parti più durevoli e ad alte prestazioni.

Per quanto riguarda i biomateriali, questi vantano in totale oltre 3.600 brevetti e costituiscono un settore estremamente dinamico e in costante sviluppo, con progressi mirati a migliorare la biocompatibilità, la funzionalità e la personalizzazione: già prima del 2013 costituivano la seconda categoria più ampia in termini di brevetti. I biomateriali possono essere utilizzati in diverse applicazioni mediche, come la riparazione di tessuti/organi, somministrazione di farmaci, medicina clinica, ingegneria dei tessuti e impianti di protesi specificamente progettati per ogni paziente. Tuttavia, mentre alcuni materiali sono più maturi in termini di prontezza tecnologica, altri sono ancora in fase esplorativa; per esempio, i biomateriali più avanzati, come impalcature specifiche per tessuti, idrogel bio-stampabili e ceramiche bioattive, sono ancora in fase di sviluppo e stentano a sfociare nel settore commerciale. Gli inchiostri biologici composti da colture cellulari viventi consentono la stampa diretta di cellule, consentendo la creazione di strutture tridimensionali complesse con l'obiettivo di produrre tessuti funzionali per il trapianto di organi e l'ingegneria tissutale. I ricercatori stanno ancora esplorando varie tecniche e formulazioni specifiche per migliorare la vitalità cellulare, migliorare la risoluzione di stampa e ottimizzare le proprietà meccaniche e biologiche degli inchiostri biologici. Gli avanzamenti in corso nella scienza dei materiali, nelle tecniche di bio-stampa e negli approcci dell'ingegneria tissutale stanno spingendo in avanti il settore, e aumentano le collaborazioni tra accademici, industria e professionisti medici per tradurre queste tecnologie in applicazioni pratiche.

Il mercato dei metalli per l'additive manufacturing, nonostante rappresenti ancora una limitata parte del panorama generale di ricerca sui materiali specifici per le tecnologie additive, è cresciuto anche più rapidamente rispetto al mercato dei polimeri: metalli e leghe metalliche hanno registrato una crescita molto rapida nell'ultimo decennio, superando complessivamente oltre le 2.500 IPF e la gamma di metalli e leghe, come acciai, titanio, nichel, cobalto, alluminio, rame o oro, continua a crescere. Il mercato delle polveri metalliche e delle leghe nell'AM è attualmente il secondo più grande dopo i polimeri e sta vivendo una crescita significativa, frutto anche di una concorrenza che si è andata sempre più ad intensificare: la società di consulenza "Ampower" nel 2022 prevedeva un aumento delle vendite di oltre il 30% nei successivi quattro anni, con una previsione di domanda di polvere metallica per AM che dovrebbe salire a circa 22.500 tonnellate nel 2026, partendo dalle 5.600 tonnellate del 2021. Poiché le polveri metalliche stanno diventando sempre più una merce ottenibile da molti produttori con una qualità molto buona, si sono osservati prezzi in calo per alcuni materiali, il che favorirà ulteriormente l'espansione della stampa AM in questo settore. Inoltre, l'emergere di un sempre più massiccio riciclo delle polveri rappresenta un'altra significativa innovazione recente nell'AM metallico, contribuendo alla sostenibilità e alla convenienza economica nell'industria.

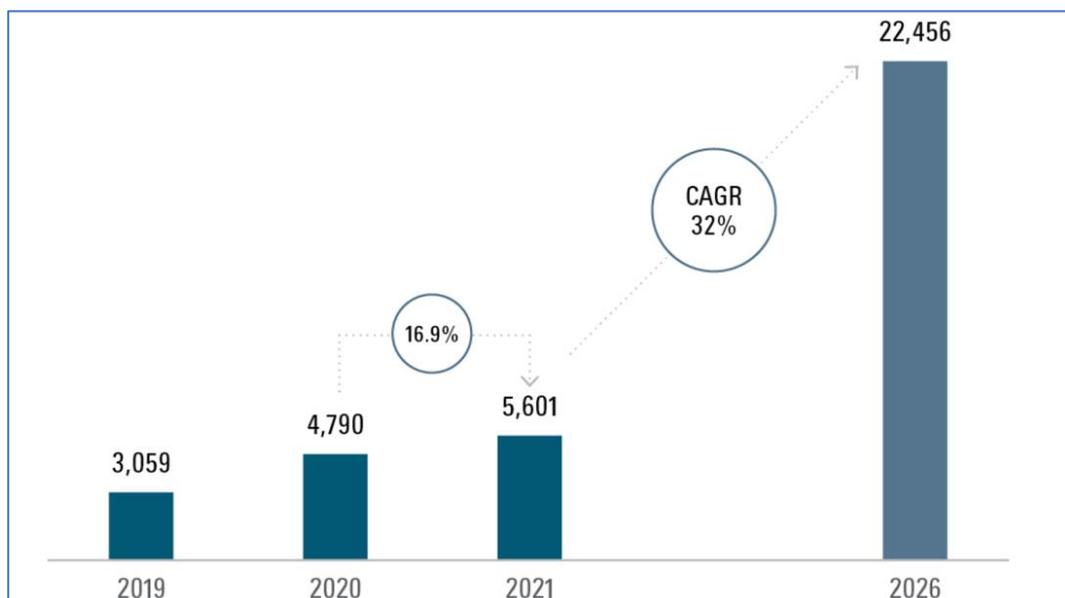


Figura 8: Consumo annuale in tonnellate di polveri metalliche per AM, nel periodo 2019-2021 e previsioni fino al 2026 (fonte: Ampower)

Infine, ceramiche, vetri e cementi rappresentano i campi di materiali più limitatamente sviluppati, ognuno con meno di 1.500 IPF. In particolare, entrambi i settori sembrano aver raggiunto una fase stagnante successiva ad una forte crescita tra il 2013 e il 2018. Nonostante ciò, polveri ceramiche sono utilizzate nell'industria aerospaziale, automobilistica, biomedicale ed elettronica, grazie alle loro proprietà tipiche quali la resistenza alle alte temperature, la resistenza all'usura e la stabilità chimica. L'utilizzo del vetro in AM, d'altra parte, consente di fabbricare strutture complesse con elevata trasparenza e proprietà ottiche uniche. Sviluppi recenti stanno esplorando nuove formulazioni di ceramiche e vetro che mostrano una migliorata stampabilità, consentendo una risoluzione più fine e un miglior controllo sulle strutture prodotte. I materiali a base di cemento, d'altro canto, sono particolarmente utili nelle applicazioni legate alla costruzione, consentendo la produzione rapida ed efficiente di componenti architettonici, facciate di edifici e persino intere case. Le miscele di calcestruzzo vengono ottimizzate per le tecnologie additive per garantire che il materiale fluisca uniformemente attraverso l'ugello della stampante mantenendo al contempo la sua integrità strutturale e la sua resistenza. Sviluppi recenti stanno esplorando nuove formulazioni di cemento con migliorata lavorabilità, tempi di presa e proprietà meccaniche. Inoltre, si stanno compiendo sforzi per incorporare additivi sostenibili ed ecologici nelle miscele, come materiali riciclati o leganti alternativi, al fine di ridurre l'impatto ambientale del settore.

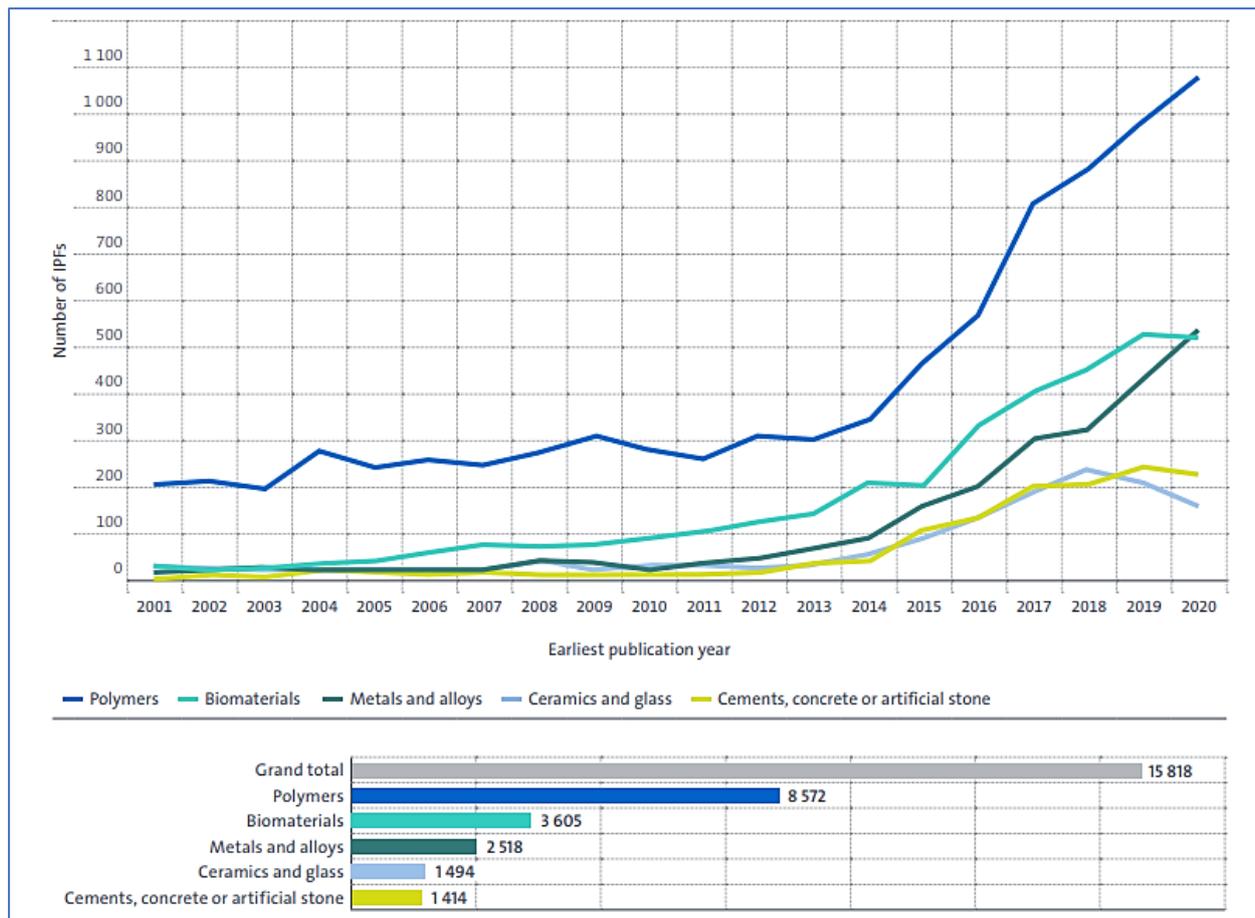


Figura 9: Tendenze nelle pubblicazioni di IPF relativi ai Materiali AM, nel periodo 2001-2020 (fonte: EPO)

1.2.3 Infrastruttura Digitale

L'additive manufacturing si basa pesantemente su di una infrastruttura digitale per tutta la durata dell'intero processo, dalla progettazione alla produzione. Comprende non solo la progettazione digitale del prodotto da costruire, ma anche il monitoraggio e il controllo del processo di stampa e della macchina da stampa. Ogni processo di manifattura additiva parte da una rappresentazione digitale di un prodotto: il software specifico CAD viene utilizzato per creare modelli digitali 3D degli oggetti da stampare definendo la geometria, le dimensioni e altre specifiche della parte desiderata.

Il progetto digitale viene poi diviso in strati attraverso un software di slicing (letteralmente "affettamento") che prende il modello digitale 3D e lo converte in un insieme di istruzioni comprensibili dalla specifica macchina. Questo processo implica il taglio del modello in sottili strati orizzontali (nell'ordine

delle decine o centinaia di micron, a seconda della richiesta data dalla tecnologia additiva specifica che si utilizzerà per la produzione e di altre caratteristiche che si vogliono conferire al progetto) e la generazione del percorso degli strumenti, che determinano il movimento e il deposito di materiale per ogni strato. Il software di slicing consente anche di regolare molteplici parametri come lo spessore dello strato, la densità di riempimento, le strutture di supporto e la velocità di stampa.

Mentre l'oggetto viene prodotto, il processo di stampa può essere monitorato e controllato. Il software di controllo della macchina gestisce la stampante 3D: interpreta i dati e coordina i movimenti del dispositivo di stampa e della piattaforma o degli altri strumenti essenziali al funzionamento della tecnologia specifica e controlla parametri critici come la velocità di deposito e il posizionamento delle diverse parti motorizzate del sistema di stampa.

Un altro aspetto del carattere digitale dell'AM è la possibilità di produrre in remoto rispetto al luogo di progettazione. Infatti, diversi servizi digitali legati al processo AM stanno emergendo con l'avanzamento della tecnologia: la manifattura additiva consente la produzione on-demand e la produzione decentralizzata o addirittura remota. Gli aspetti digitali entrano in gioco nella gestione degli inventari digitali (come già precedentemente detto grandemente più economici e fruibili di quelli tradizionali composti da componenti e pezzi reali), dove i modelli virtuali delle parti possono essere memorizzati, organizzati e accessibili quando necessario. Uscendo per un attimo dall'ambito puramente industriale dell'additive manufacturing, stanno anche emergendo sempre più piattaforme di distribuzione digitale che facilitano la condivisione, la vendita e il download di progetti realizzabili tramite AM. Di conseguenza, sia per i privati hobbisti che in modo anche maggiore per le aziende che si dotano di tecnologie additive, la cybersecurity diventa essenziale anche per la salvaguardia dei file di dati utilizzati per la progettazione e produzione.

Nonostante sia il settore più piccolo tra i quattro blocchi tecnologici dell'AM, le tecnologie digitali hanno mostrato la crescita più rapida dal 2013. Questo aumento è principalmente attribuibile alle nuove invenzioni nel controllo e monitoraggio dei processi additivi, come l'integrazione di sensori avanzati e tecnologie di controllo tramite IA, che garantiscono l'accuratezza, la qualità e l'affidabilità del processo di stampa. Questi sistemi forniscono un feedback in tempo reale, consentendo agli operatori di monitorare vari parametri come temperatura, pressione, flusso del materiale, difetti o deviazioni dal modello digitale e, ovviamente, il progresso del processo. Monitorando continuamente queste variabili, i sistemi di controllo possono rilevare

anomalie o deviazioni dalle specifiche desiderate, consentendo regolazioni o interventi tempestivi. Questa capacità è vitale per mantenere una qualità di stampa costante e ridurre al minimo difetti o errori. Negli anni 2019 e 2020 si è vista la pubblicazione di oltre 3.000 IPF riguardanti il settore del controllo dei processi, riflettendo la natura estremamente dinamica di questo campo. Questa tendenza è guidata da diversi fattori: man mano che la tecnologia AM evolve e viene adottata in più settori, la necessità di sistemi di controllo affidabili diventa sempre più cruciale; in secondo luogo, l'integrazione delle tecnologie e della connettività digitali hanno permesso la raccolta e l'analisi di grandi quantità di dati, consentendo una migliore comprensione del processo di stampa e, conseguentemente, una sua ottimizzazione; inoltre, la capacità di monitorare e controllare i sistemi AM a distanza offre anche una maggiore flessibilità ed efficienza, da sempre uno dei punti di forza delle tecnologie additive; ed infine, la richiesta di garanzia di qualità e certificazioni stringenti nell'AM, in particolare in settori come l'aerospaziale e medicale, ha alimentato lo sviluppo di sistemi di controllo e monitoraggio sempre più sofisticati per soddisfare i rigidi standard dei settori sopracitati.

Nel dominio delle tecnologie digitali, l'elaborazione delle immagini, il CAD e i metodi aziendali costituiscono campi tecnologici relativamente piccoli, con meno di 2.000 IPF ciascuno. Tra questi tre, il CAD, fondamentale per creare e progettare modelli 3D stampabili, mostra la crescita più rapida, con quasi 300 IPF nel 2020. L'importanza del CAD risiede inoltre nella sua capacità di razionalizzare il processo di progettazione, consentendo iterazioni rapide, personalizzazione e ottimizzazione delle parti. Sviluppi recenti si concentrano su algoritmi di progettazione generativa che utilizzano anche l'intelligenza artificiale e tecniche di ottimizzazione per generare soluzioni progettuali basate su determinati criteri prestazionali. Questo approccio consente la creazione di strutture altamente efficienti e leggere, riducendo l'uso di materiali e i costi di produzione, pur mantenendo, e in alcuni casi migliorando, la resistenza del componente. Un'altra area di ricerca e sviluppo è l'integrazione del software CAD con strumenti di simulazione che aiutino ad ottimizzare l'orientamento delle parti, la selezione del materiale e le strategie di supporto, risultando in tassi di successo di stampa migliorati e una maggiore qualità complessiva. Man mano che sempre più professionisti con background diversi adottano la produzione additiva diventa fondamentale la necessità di strumenti CAD intuitivi che facilitino la creazione e la modifica dei progetti, e per questo i software CAD stanno diventando sempre più user-friendly e accessibili a un'ampia gamma di utenti in vari settori. Al contrario, lo sviluppo dell'elaborazione delle immagini e dei metodi aziendali ha mostrato un dinamismo comparativamente inferiore dal

2013, evidenziando quindi i diversi tassi di innovazione all'interno dei diversi aspetti delle tecnologie digitali. L'elaborazione delle immagini è necessaria per tradurre file digitali, come immagini mediche, ad esempio, in un formato di file utile per l'additive manufacturing. Questo processo è cruciale per un flusso di lavoro AM efficiente, preciso ed ampiamente utilizzabile.

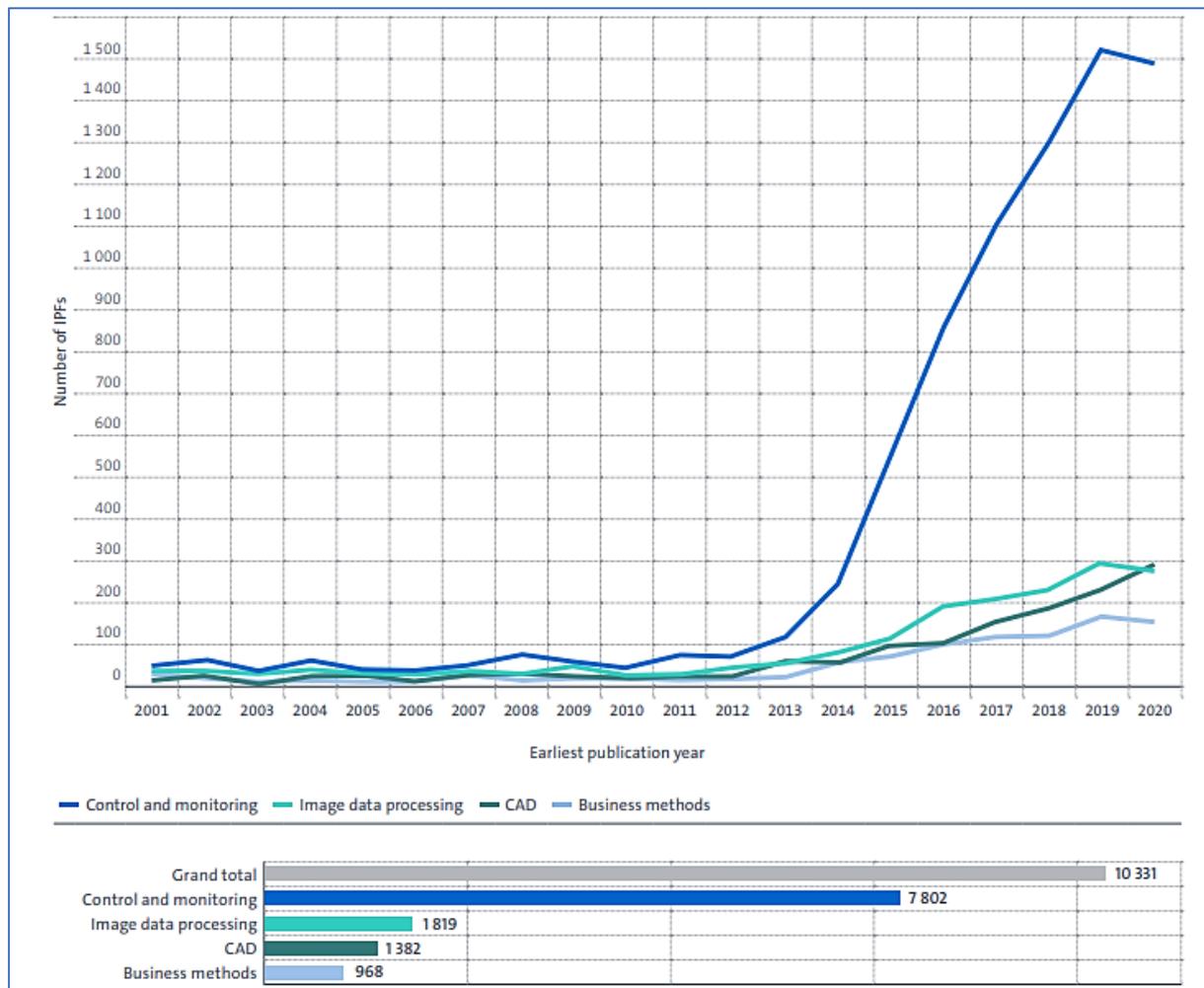


Figura 10: Tendenze nelle pubblicazioni di IPF relativi a Infrastruttura Digitale AM, nel periodo 2001-2020 (fonte: EPO)

1.2.4 Campi di applicazione

Nel tempo, le aree di applicazione per la tecnologia additiva hanno subito una notevole evoluzione, guidata dai progressi tecnologici e dalle possibilità in continua espansione. Inizialmente, l'AM veniva utilizzata unicamente per la prototipazione rapida, consentendo agli ingegneri di convalidare e iterare rapidamente i progetti. Tuttavia, attualmente il suo potenziale si è esteso ben oltre la sola prototipazione, portando a una vasta gamma di applicazioni: con il maturare delle tecnologie AM e il miglioramento dei materiali e dei processi, le industrie stanno iniziando a adottare l'AM anche per i prodotti finali. Settori particolarmente indicati per l'applicazione delle tecnologie additive sono l'aerospaziale, l'automobilistico e il medicale, dove geometrie complesse, strutture leggere ed alta capacità di personalizzazione vengono altamente apprezzate. Il settore medico negli ultimi anni ha assistito a significativi progressi attraverso l'AM, con impianti personalizzati, protesi ed aiuti chirurgici diventati ormai una realtà. L'impatto dell'AM si è diffuso anche nel mercato dei consumatori: dai gioielli personalizzati e la moda, alla decorazione domestica e le creazioni artistiche, l'AM trasforma agilmente i design concettuali in oggetti fisici. Inoltre, con il continuo avanzamento della tecnologia AM, dei nuovi materiali e anche delle capacità multimateriali si sono ampliate ulteriormente la gamma di applicazioni disponibili.

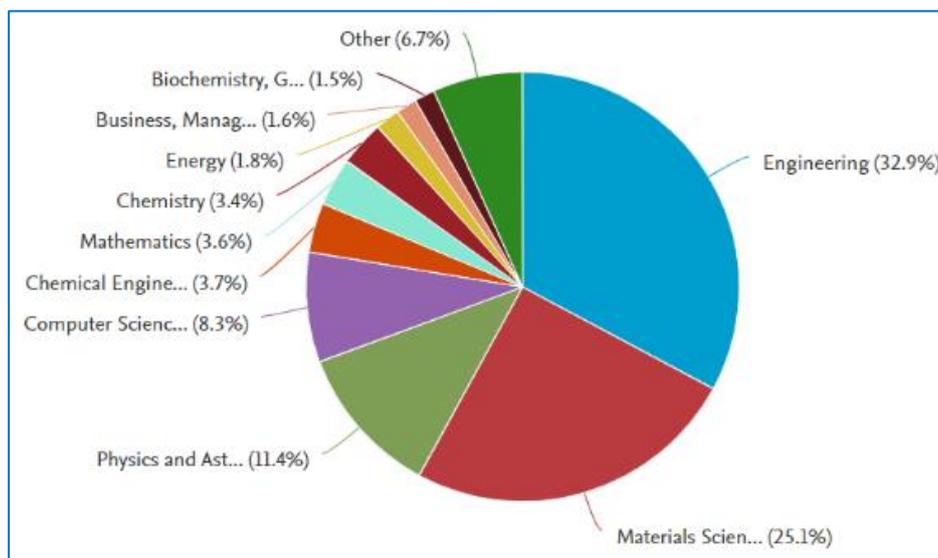


Figura 11: Distribuzione di documenti di ricerca sull'AM (Additive Manufacturing) tra diverse aree di studio, derivato dal database di Scopus per il periodo 2000-2023

Per riflettere queste possibilità e tenere conto anche degli ultimi sviluppi, sono stati identificati dieci diversi settori applicativi: trasporti, utensili per macchine, medicina e salute, edilizia, energia, elettronica, beni di consumo, cibo, riparazioni, prototipazione.

Di questi dieci sono personalmente riuscito a recuperare i dati relativi ai brevetti solo di otto di questi dieci settori, verranno quindi trattati con maggiore esautività per questa ragione:

1. Trasporti
2. Utensili per macchine
3. Medicina e Salute
4. Edilizia
5. Energia
6. Elettronica
7. Beni di consumo
8. Cibo

Attualmente il settore alimentare rappresenta il campo di applicazione più limitato dell'additive manufacturing, con solo 264 brevetti presentati tra il 2001 e il 2020. L'additive manufacturing consente creazioni uniche e visivamente accattivanti che mescolano vari materiali alimentari, inclusi zucchero e impasti vari, che sono difficili da ottenere attraverso metodi di produzione tradizionali. La tecnologia additiva è utilizzata per produrre integratori nutrizionali personalizzati, adattando la composizione e il dosaggio di vitamine, minerali e altri nutrienti in base alle esigenze individuali. Ciò consente un'integrazione precisa e mirata per requisiti dietetici specifici. Nonostante il potenziale dell'AM nell'industria alimentare, ci sono diverse sfide tecnologiche che i ricercatori stanno al momento affrontando, come l'identificazione di materiali alimentari adatti che siano sicuri per il consumo e che possano essere elaborati da stampanti 3D mantenendo sempre le loro proprietà durante la stampa e la successiva conservazione. Ottenere un'alta risoluzione e velocità di stampa mantenendo gli alti standard di sicurezza alimentare è un'altra sfida a sé e oltre alle sfide tecniche, l'accettazione e la fiducia dei consumatori sono fondamentali per l'adozione diffusa di cibi stampati in 3D.

Il settore della salute e medicina sta emergendo come il campo di applicazione più grande, con quasi 10.000 IPF nell'arco di 20 anni. La sanità è riconosciuta come una delle industrie più significative per le tecnologie additive, e il suo ruolo continua a espandersi. Con i continui progressi nelle

tecnologie e nei materiali dell'AM, l'assistenza ai pazienti è sempre più influenzata da essa: secondo "Research and Markets" il mercato dell'AM nel settore sanitario era proiettato a crescere da 2,08 miliardi di dollari nel 2021 a 5,59 miliardi di dollari entro il 2027, con un tasso di crescita annuo di circa il 18%. Attualmente la stampa 3D viene utilizzata in una moltitudine di applicazioni mediche, come lo sviluppo di strumenti chirurgici, guide per trapani, protesi e repliche specifiche personalizzate per i singoli pazienti di ossa, organi e vasi sanguigni.

Detto ciò, bisogna però anche notare che negli ultimi anni il settore dei trasporti ha rappresentato un degno sfidante per il settore medicale per aggiudicarsi il primato nel campo delle applicazioni dell'AM: nel 2020, il settore dei trasporti ha quasi raggiunto il settore della salute con 1.366 IPF, contro i 1.453 IPF del settore medicale, per un totale di 7.177 IPF tra il 2001 e il 2020. La tecnologia additiva non è una nuova arrivata nel settore dei trasporti: come già detto, le aziende aerospaziali utilizzano l'AM per produrre parti leggere e complesse, migliorando l'efficienza del carburante e riducendo le emissioni, mentre i produttori automobilistici sfruttano l'AM per la prototipazione rapida, ma anche per ottenere strutture leggere e parti finali personalizzate. Inoltre, il settore dei trasporti trae vantaggio dall'AM anche nella gestione della supply chain, consentendo la produzione su richiesta, riducendo i costi di inventario e facilitando la disponibilità di pezzi di ricambio. I costi elevati di produzione iniziali, le opzioni limitate di materiali e la necessità di standard e certificazioni a livello industriale rappresentano purtroppo ancora ostacoli alla diffusa implementazione dell'AM nei trasporti. D'altro canto, le tendenze recenti mirano ad affrontare queste sfide: gli avanzamenti continui nelle tecnologie AM, come la stampa multimateriale, ampliano il campo di applicazione e migliorano la qualità e le prestazioni delle parti e la ricerca si concentra anche sullo sviluppo di materiali e processi sostenibili, oltre che sull'ottimizzazione dell'automazione e delle tecniche di postelaborazione. Gli utensili per macchine, con circa 7.000 IPF, e il settore dell'energia sono altri due robusti domini applicativi per l'AM. Questi settori hanno registrato una crescita significativa dal 2013, anche se la loro dinamica di crescita si è rallentata negli ultimi anni.

Il settore degli "utensili per macchine" spesso coinvolge la realizzazione di geometrie complesse e bassi volumi di produzione, rendendo quindi l'additive manufacturing una scelta ottimale. Una delle applicazioni più radicate della stampa 3D negli utensili per macchine è la produzione dei modelli principali per la creazione di stampi: qualsiasi tecnologia AM può essere impiegata per generare questi modelli principali. Inoltre, l'AM

consente l'integrazione di canali di raffreddamento all'interno degli utensili, consentendo una dissipazione molto efficiente del calore. Questi canali riducono i tempi di ciclo, aumentano la durata degli utensili e migliorano la qualità delle parti. Esempi di utensili che traggono vantaggio dall'AM includono attrezzature di fissaggio, dime, nonché guide per foratura e taglio. I recenti progressi nella stampa multimateriale consentono la produzione di utensili con funzionalità integrate, come l'integrazione di sensori elettronici o la presenza di proprietà resistenti al calore. Le tecnologie AM metalliche, come la fusione su letto di polvere (PBF) e la deposizione di energia diretta (DED), vengono utilizzate per creare componenti di utensili ad alte prestazioni con durata e precisione incrementate.

Il settore energetico ha da tempo iniziato ad utilizzare l'AM per riparare parti usurate e danneggiate e per creare prototipi, ma gli sviluppi recenti hanno comunque ampliato il suo potenziale: con la tendenza globale che si sposta verso un futuro più sostenibile, l'AM viene sfruttata per migliorare l'uso delle tecnologie rinnovabili, come le turbine eoliche e le batterie. Il settore dell'energia trova l'AM favorevole per la sua capacità di ridurre gli inventari fisici e accelerare la produzione: consente la creazione di parti di ricambio su richiesta e facilita la gestione digitale degli inventari, fornendo una maggiore flessibilità ed efficienza. Questi progressi nell'AM stanno consentendo al settore dell'energia di ottimizzare le sue operazioni, migliorare la sostenibilità e proseguire l'innovazione nelle tecnologie rinnovabili.

In contrasto, l'industria dell'elettronica, che era al pari degli utensili per macchine e del settore energetico un decennio fa, non ha sperimentato la stessa dinamica di crescita nei depositi di IPF relativi all'AM, con poco meno di 2.000 IPF tra il 2001 e il 2020. Si stanno però compiendo progressi graduali verso un'applicazione sempre più industriale nell'ambito elettronico: le applicazioni dell'elettronica stampata in 3D sono diverse e in espansione, spaziando dai motori elettrici alle antenne per i voli spaziali. Aziende e istituti di ricerca stanno esplorando l'incorporazione di componenti elettronici nello specifico processo AM, consentendo una maggiore flessibilità nella personalizzazione del prodotto e l'integrazione di elementi funzionali. Con il maturare della tecnologia, ci si aspetta che il mercato dell'elettronica stampata in 3D cresca, con un significativo potenziale in aree come schede circuito e chip.

Nonostante i beni di consumo e l'edilizia rimangano settori di applicazione relativamente piccoli per le tecnologie additive, hanno comunque mostrato una forte crescita negli ultimi anni: entrambi i settori hanno registrato un

aumento notevole, passando nel 2013 da meno di 25 IPF a 230 IPF, per quanto riguarda i beni di consumo, e a 163 IPF per l'edilizia nel 2020.

Nella categoria dei beni di consumo l'additive manufacturing viene utilizzato per produrre una vasta gamma di prodotti destinati ai consumatori, tra cui occhiali, calzature, moda, gioielli ed attrezzature sportive. Molte aziende adottano l'AM per la sua capacità di accelerare il tempo di commercializzazione e creare forme geometriche complesse e uniche, rendendo i prodotti più leggeri e resistenti. Inoltre, l'AM consente la personalizzazione nel mercato di massa dei consumatori. Utilizzando anche la scansione 3D, i vari produttori possono sviluppare prodotti estremamente personalizzati per ciascun cliente, come scarponi da sci o caschi stampati in 3D, che calzino e si adattino perfettamente ad ogni specifica persona.

L'uso delle tecnologie AM nell'industria dell'edilizia ha registrato significativi progressi negli ultimi anni e si è assistito ad una crescita dei sistemi e servizi dedicati che guidano l'espansione delle capacità di produzione con la tecnologia additiva: le aziende possono ora produrre con successo strutture a più piani, ponti ed altre applicazioni a grande scala. Ma, in questo settore forse anche più che in altri, lo sviluppo di standard gioca un ruolo cruciale nel favorire l'adozione di queste tecnologie da parte di una fetta sempre più consistente del settore, e la pubblicazione, nel 2023, dello standard ISO/ASTM 52939 ha segnato un importante traguardo per il raggiungimento di questo scopo: esso definisce i requisiti necessari per la produzione e la consegna di strutture di alta qualità costruite con tecnologia additiva per applicazioni residenziali o infrastrutturali. Attualmente, l'innovazione e la ricerca nella costruzione additiva di edifici si concentra sull'ottimizzazione e sulla flessibilità di progettazione, sulla riduzione dei tempi di costruzione e sull'aumento della sostenibilità nei progetti edilizi.

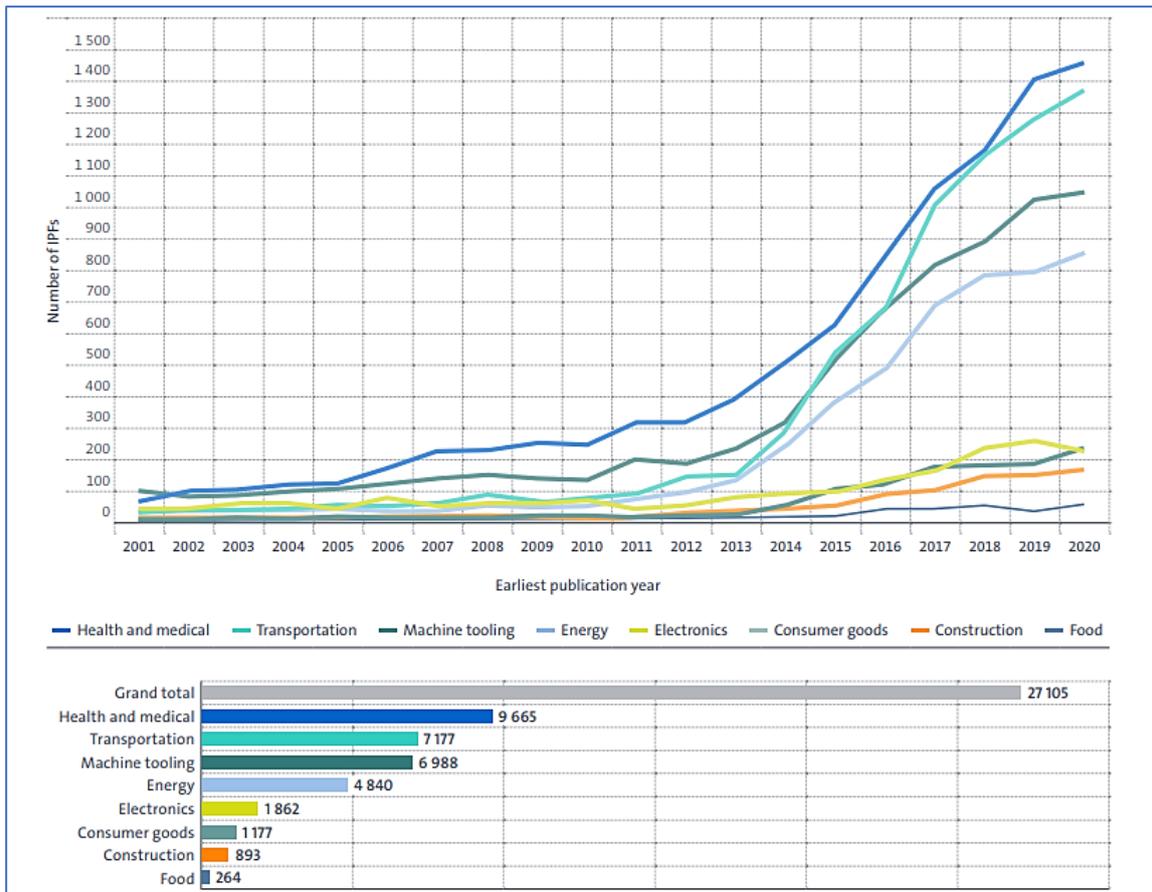


Figura 12: Tendenze nelle pubblicazioni di IPF relativi ai Campi Applicativi AM, nel periodo 2001-2020 (fonte: EPO)

1.3 Applicazioni attuali

In questa sezione si cerca di dare, per ogni settore produttivo precedentemente enunciato, uno sguardo generale su quelli che sono i principali esempi di applicazione delle tecnologie additive nel campo specifico e i motivi specifici di adozione di determinati processi in quel particolare settore.

1.3.1 Trasporti

Per quanto riguarda i trasporti, specificatamente nel settore aerospaziale, l'AM è utilizzato per produrre geometrie leggere e complesse che con i tradizionali processi di lavorazione meccanica sarebbero altrimenti irrealizzabili. Componenti dei motori aerei, come ugelli del carburante e pale delle turbine, vengono ottenuti utilizzando materiali ad alte prestazioni, risultando anche in una maggiore efficienza di carburante e riduzione delle emissioni. Nell'industria automobilistica, l'AM viene impiegato per

prototipazione, l'attrezzaggio e produzione anche di parti finali, includendo componenti interni, accessori per veicoli personalizzati e persino elementi strutturali come telai e staffe. L'AM in generale consente l'ottimizzazione del design, la riduzione del peso e l'integrazione funzionale, migliorando le prestazioni e l'efficienza energetica. Inoltre, l'AM trova applicazioni anche nel settore ferroviario per la produzione di componenti leggeri e durevoli, come interni dei treni, strutture dei sedili e anche pezzi di ricambio personalizzati. Nel settore navale, l'AM è utilizzato per la prototipazione di componenti complessi, la produzione rapida di pezzi di ricambio e persino la creazione di strutture navali leggere e progettate su misura

1.3.1.1 Aerospace

Le tecniche di AM sono utilizzate in modo piuttosto prominente per le applicazioni aerospaziali, data la loro capacità unica di produrre parti altamente specifiche e complesse e, poiché la maggior parte dei componenti aerospaziali richiede volumi limitati come numero di parti complessive da produrre, questo si rivela nuovamente perfettamente compatibile con le tecniche di AM. Nell'ultimo decennio, infatti, l'utilizzo dell'AM nel settore aerospaziale è aumentato enormemente. I componenti fabbricati tramite AM per le applicazioni aerospaziali sono principalmente divisi in due categorie, metallici e non metallici, di cui il primo è utilizzato per le parti critiche mentre il secondo è utilizzato per parti relativamente meno critiche. Negli anni '90, Boeing e Bell Helicopter hanno iniziato a utilizzare componenti AM non metallici per parti non strutturali e, ad oggi, Boeing ha utilizzato più di diecimila parti AM in aeromobili militari e commerciali. I materiali particolarmente avanzati che vengono utilizzati nella produzione della maggior parte dei componenti aerospaziali, di solito presentano difficoltà nella lavorazione, fabbricazione, pianificazione dei percorsi degli utensili, ecc., se viene adottata una modalità di produzione tradizionale. Ciò porta anche ad un aumento dei costi e dei tempi necessari per soddisfare le esigenze di design, funzioni e geometrie complicate: tutto ciò è superabile utilizzando tecniche di produzione additiva. Inoltre, i rapporti buy-to-fly⁴ per le parti destinate ad uso aerospaziale sono piuttosto elevati, il che a sua volta porta a grandi quantità di spreco di materiale. Anche in questo, la produzione additiva ha dalla sua l'intrinseca capacità nel risparmio di materiale e può

⁴ Il rapporto "buy-to-fly" indica in generale il rapporto tra la massa del volume grezzo di partenza e la massa del volume finale della parte

essere facilmente utilizzata per affrontare questo problema. In più, è un dato di fatto che in generale il costo di un componente diminuisce con l'aumento del volume di produzione. Tuttavia, a causa del numero limitato di parti da fabbricare in questo settore, come discusso in precedenza, i metodi tradizionali non sono economici per il settore aerospaziale. Le tecniche di produzione additiva sono invece particolarmente indicate per applicazioni in cui sono richieste un numero limitato di parti altamente personalizzate. I componenti aerospaziali poi sono generalmente caratterizzati da requisiti geometrici difficili da soddisfare; diverse parti hanno funzionalità integrate tra di loro e se viene utilizzata, ad esempio, una lavorazione CNC per ottenere tali parti, il tempo richiesto è piuttosto elevato ed è seguito anche da un considerevole spreco di materiale. Le tecniche di produzione additiva, invece, hanno la capacità unica di affrontare con successo le questioni legate a funzionalità integrata e complessità delle parti. Infine, al giorno d'oggi c'è l'urgente necessità di ridurre le emissioni e migliorare l'efficienza del carburante nell'industria aerospaziale. Una soluzione può essere quella di fabbricare parti in leghe leggere senza compromettere gli aspetti relativi alla sicurezza, ma ciò significa che queste parti dovrebbero possedere rapporti resistenza-peso il più elevati possibile. Inoltre, questioni come la sensibilità all'ambiente chimico aggressivo, alla corrosione, all'usura, alle variazioni di temperatura, ecc. devono essere affrontate in modo efficace: la tecnologia di produzione additiva offre la giusta soluzione per la maggior parte di questi problemi.

1.3.1.2 Automotive

L'industria automobilistica è uno dei settori industriali più competitivi in cui sono richiesti nuovi design e minore time-to-market possibile. Oggi il peso ridotto, la sicurezza e l'estetica dei veicoli giocano un ruolo fondamentale. La riduzione del tempo di sviluppo, l'alleggerimento dei componenti, la riduzione al minimo degli sprechi di materiale e dei costi di produzione sono integrati per la maggior parte dei processi additivi, rendendoli quindi altamente compatibili con le applicazioni automobilistiche. Iterazioni progettuali in più fasi sono necessarie per migliorare l'aspetto e le prestazioni di un veicolo e agevolarne i design, e questo è un compito costoso, tedioso e difficile in cui le tecniche di AM, data la loro intrinseca maggiore flessibilità e limitate restrizioni rispetto ai processi di produzione convenzionali, emergono come scelta valida. Inoltre, il ridotto tempo di produzione tipico delle tecnologie additive ha un impatto positivo anche sulla reattività del mercato. Tutte queste caratteristiche rendono le tecniche di AM altamente adatte per le applicazioni automobilistiche: giganti del settore come General

Motors le utilizzano da oltre due decenni per molteplici applicazioni di prototipazione, progettazione e produzione. La creazione di utensili specifici per le lavorazioni richieste è un'altra applicazione dell'additive manufacturing ampiamente utilizzata da aziende come, ad esempio, BMW per fabbricare strumenti portatili per fissare targhe, paraurti e modanature. Un altro esempio di marchio impegnato nella sperimentazione con le tecnologie additive è rappresentato da Ceramic Disc Technology: hanno introdotto una nuova generazione di dischi freno, per la Dodge Challenger Hellcat, che utilizza strutture lattice per ottimizzare le prestazioni riducendo così il peso del disco del 62% e ottenendo anche una conducibilità termica cinque volte superiore rispetto a un disco freno standard in ghisa.

Oltre ai componenti per i veicoli commerciali, ovviamente i veicoli speciali come quelli per il motorsport richiedono l'uso di componenti in materiali particolarmente avanzati e leggeri: queste parti hanno forme intricate e vengono fabbricate in numeri limitati e sono quindi un'altra applicazione perfetta per la tecnologia additiva.

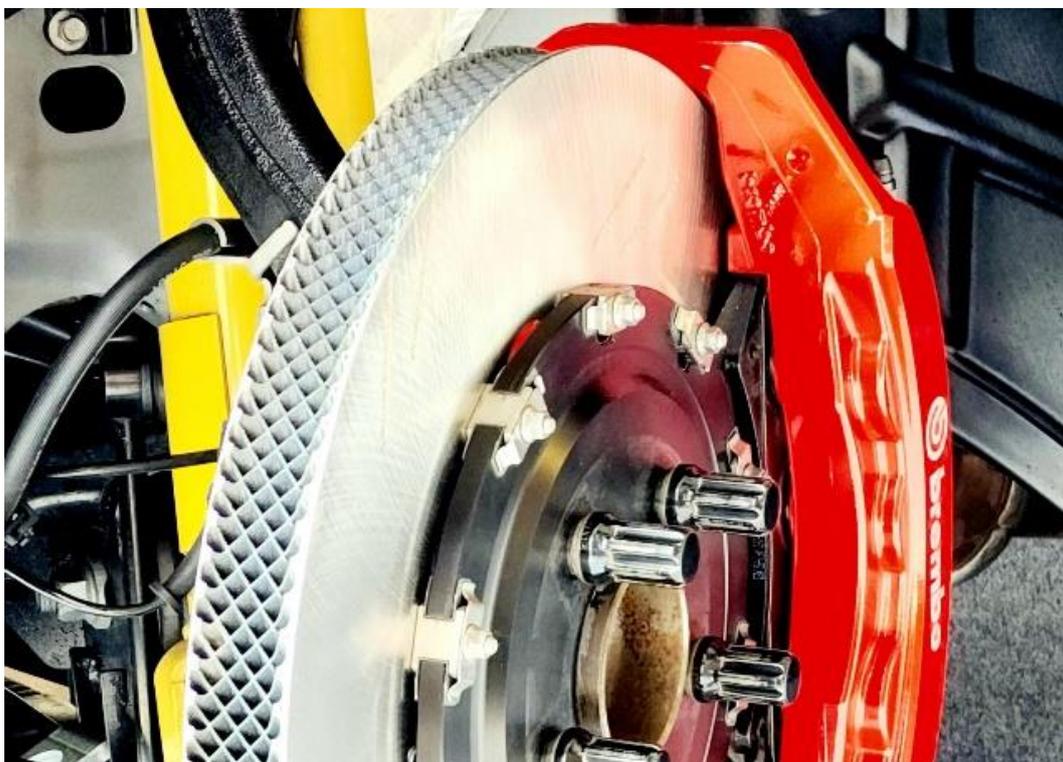


Figura 13: Disco freno in ceramica-alluminio dopo il processo di finitura e

1.3.1.3 Sostenibilità nell'automotive e nell'aerospaziale



Figura 14: Obiettivi di Sviluppo Sostenibile facenti parte dell'Agenda 2030

La Figura 14 elenca tutti gli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (Sustainable Development Goals, SDG)⁵. Il ruolo delle tecnologie AM nel raggiungimento degli SDG numero 7, 8, 9, 11, 12 e 13, è concreto e viene discusso in questa sezione.

L'SDG 7 sottolinea l'importanza dell'espansione della disponibilità di elettricità e di altre fonti di energia per migliorare le comunità e le vite delle persone cercando al contempo di raggiungere una migliore efficienza energetica e il progresso delle fonti di energia pulita per gestire le risorse per lo sviluppo in modo sostenibile. Basandosi sugli studi della Commissione Mondiale sull'Ambiente e lo Sviluppo, settori come l'aerospaziale, la produzione di energia e l'automotive devono adottare tecnologie sostenibili per raggiungere tali obiettivi. Questo richiede anche una transizione verso metodi di produzione più efficienti e sostenibili che riducano gli sprechi di materiali, le emissioni di gas serra, l'estrazione di risorse naturali e il danneggiamento degli ecosistemi. La stampa 3D e le tecnologie AM possono ridurre il consumo complessivo di energia primaria e le emissioni di CO₂ per

⁵ Sono una serie di 17 obiettivi interconnessi, definiti dall'Organizzazione delle Nazioni Unite. Sono conosciuti anche come *Agenda 2030*, dal nome del documento che porta per titolo *Trasformare il nostro mondo*. *L'Agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile*, che riconosce lo stretto legame tra il benessere umano, la salute dei sistemi naturali e la presenza di sfide comuni per tutti i paesi

tutti i settori considerati⁶. Inoltre, le automobili più leggere, richiedendo meno energia per funzionare, ridurranno anche i costi per l'utente.

L'SDG 8 enfatizza il valore dell'espansione economica e dei livelli elevati di produttività economica nella creazione di posti di lavoro ben retribuiti e di alta qualità, oltre all'efficienza delle risorse nel consumo e nella produzione. Si fa anche promotore dell'abolizione del lavoro forzato, della tratta di esseri umani, del lavoro minorile e dell'istituzione dei diritti del lavoro e di luoghi di lavoro sani e sicuri. L'additive manufacturing consente ai progettisti di ottenere elevati livelli di precisione riducendo i costi, il che si prevede aumenterà la sua disponibilità nelle applicazioni aerospaziali. Le tecniche di produzione più efficienti possono ridurre la durata e le spese di produzione e trasporto fino al punto in cui notevoli vantaggi economici e finanziari possono essere distribuiti lungo l'intera value chain⁷, o "catena del valore". L'aumento del numero di veicoli prodotti dovrebbe infatti guidare anche la crescita economica generale.

L'SDG 9 mira a promuovere azioni per costruire infrastrutture resilienti, incoraggiare un'industrializzazione sostenibile ed equa, e promuovere l'innovazione. L'importanza della crescita economica come fattore principale che influisce sull'ambiente è ampiamente riconosciuta, portando a una rivalutazione del suo ruolo centrale nei nostri modelli economici. Nei paesi sviluppati, un aumento della ricchezza materiale non si traduce necessariamente in livelli più alti di benessere e standard di vita. È essenziale distinguere e riconoscere aspetti essenziali del benessere, della soddisfazione della vita e della prosperità al di là della semplice misurazione della quantità di prodotti e servizi generati dall'economia. Le aziende sono interessate all'additive manufacturing per migliorare le loro catene di approvvigionamento, aumentare la flessibilità ed instaurare metodi di creazione di prodotti più innovativi. L'investimento crescente nelle tecnologie additive, unito al riconoscimento del loro potenziale come alternativa valida alla produzione tradizionale, ha suscitato un forte desiderio di una collaborazione più stretta all'interno della rete per promuoverne l'adozione diffusa. Inoltre, i benefici dell'AM si estendono oltre il suo impatto

⁶ Nel 2018 si prevedeva una diminuzione del 9-35% nel consumo complessivo di energia e dell'8-19% nelle concentrazioni di CO₂ nel 2025

⁷ La *value chain* è la totalità di attività realizzate da un'azienda per aggiungere valore a un prodotto e creare così il proprio vantaggio competitivo. Comprende tutte le fasi della realizzazione di un prodotto, dalla sua idea alle fasi di progettazione e produzione, fino alla distribuzione e ai servizi post-vendita per i clienti: ogni passaggio aggiunge valore al prodotto offerto e va a determinare il vantaggio competitivo dell'impresa

sul mercato globale e hanno un significativo potenziale per la protezione ambientale e l'avanzamento di un'economia globalmente sostenibile.

L' SDG **11** contempla il raggiungimento di un'urbanizzazione sostenibile. Attualmente, circa 193 paesi supportano l'iniziativa mondiale per promuovere città che siano sia sostenibili che resilienti. Questa iniziativa mira a creare città e insediamenti umani sicuri, inclusivi, sostenibili e resilienti entro il 2030 e l'additive manufacturing offre diversi vantaggi che possono contribuire al raggiungimento degli obiettivi prefissati. Innanzitutto, è possibile produrre le parti necessarie in modo più efficiente, utilizzando solo la quantità esatta di materiale necessaria e questo riduce gli sprechi di materie prime, contribuendo a una gestione più sostenibile delle risorse. Inoltre, l'additive manufacturing consente la produzione di componenti e prodotti direttamente sul luogo di utilizzo, evitando la necessità di trasporto di merci su lunghe distanze riducendo così le emissioni associate al trasporto e alla logistica, contribuendo a una urbanizzazione più sostenibile. Con l'evoluzione della tecnologia additiva, sono stati sviluppati materiali più sostenibili, come bioplastiche e materiali riciclati: utilizzando questi materiali, è possibile ridurre l'impatto ambientale associato alla produzione e all'utilizzo dei veicoli anche nei contesti urbani. Infine, l'AM può essere utilizzata anche per riparare e riciclare componenti danneggiati di auto o aerei, prolungandone la durata utile e riducendo la quantità di rifiuti prodotti, contribuendo così ad una gestione più sostenibile delle risorse e dei rifiuti.

L'SDG **12** si concentra sull'istituzione di comportamenti di consumo e produzione sostenibili, cruciali per mantenere gli standard di vita delle generazioni presenti e future. Il consumo e la produzione incontrollati sono al centro dei tre problemi principali del nostro periodo storico: cambiamenti climatici, distruzione della biodiversità e inquinamento. Questi problemi, insieme all'inquinamento ambientale risultante, influenzano negativamente il benessere. È tecnicamente possibile reintegrare e riutilizzare polimeri spesso utilizzati nel mercato automobilistico.

L'SDG **13** considera l'obiettivo di limitare l'aumento della temperatura globale a meno di 2°C, poiché un aumento superiore avrebbe gravi conseguenze per l'intera comunità. La temperatura globale media è già aumentata di più di 1°C rispetto ai livelli preindustriali a causa delle crescenti emissioni di gas serra. Questo aumento di temperatura ha causato disastri climatici estremi sempre più frequenti e un aumento del livello del mare. Il ruolo dell'AM nell'industria

automobilistica e aerospaziale porterebbe a riduzioni nelle emissioni di CO₂ fino al 75%, diminuendo quindi sostanzialmente il contributo dell'industria automobilistica e aerospaziale al riscaldamento globale. Inoltre, la tecnologia additiva consente anche il riutilizzo del 95-98% del materiale grezzo e può portare a una riduzione fino del 40% dello spreco di materiale.

1.3.2 Utensili per macchine

L'AM sta trovando sempre più applicazioni nel tooling per macchine e per l'industria in generale. Viene utilizzato per creare componenti di utensili complessi e leggeri, come maschere, attrezzature e stampi, che possono essere personalizzati per specifiche esigenze di produzione, riducendo i tempi di produzione e i costi. Uno dei grandi valori aggiunti dell'AM nel campo delle attrezzature per i macchinari tradizionali è la possibilità di produrre utensili con canali di raffreddamento interni intricati e geometrie di utensili ottimizzate che migliorano le prestazioni e l'efficienza degli utensili stessi

1.3.3 Medicina e salute

La tecnologia additiva ha compiuto progressi significativi nel settore della salute e della medicina, rivoluzionando l'assistenza ai pazienti e la qualità dei trattamenti possibili. Gli impianti personalizzati, come gli impianti cranici, gli impianti ortopedici, le corone dentali e gli apparecchi acustici, vengono ora prodotti con geometrie precise e specifiche del singolo paziente, migliorando adattamento e funzionalità: nel campo delle protesi, l'AM consente design personalizzati e leggeri, migliorando il comfort e la mobilità degli utilizzatori. Inoltre, le tecniche di biostampa mostrano promesse nell'ingegneria dei tessuti organici, con la capacità di creare organi artificiali, innesti cutanei e persino vasi sanguigni funzionali. Inoltre, l'AM gioca un ruolo vitale nella creazione di strumenti e aiuti chirurgici specifici per ogni paziente, garantendo precisione ed efficienza durante le procedure. Il settore medico è uno dei settori in cui è richiesto il più alto livello di personalizzazione e complessità in volumi ridotti a causa della domanda di prodotti specifici per il paziente e per questo l'ambito medico è da sempre uno dei più indicati per poter applicare processi di tecnologia additiva.

1.3.4 Edilizia

Questo è un settore si sta sviluppando come nuovo campo di applicazione dell'AM: stampanti di grande scala possono depositare cemento, o altri materiali da costruzione, strato dopo strato, consentendo la creazione di geometrie complesse e design architettonici estremamente personalizzati. Inoltre, l'AM viene utilizzata per fabbricare componenti e moduli prefabbricati diminuendo fortemente i tempi di costruzione, riducendo gli sprechi e razionalizzando i costi. Si sta conducendo una ricerca continua nell'industria dell'edilizia per esplorare appieno l'AM, e decine di gruppi di ricerca nel mondo hanno segnalato il loro coinvolgimento in varie attività di ricerca e sviluppo. Nell'industria dell'edilizia, l'AM offre diversi benefici che includono principalmente la possibilità di ottimizzare la topologia, di ridurre la manodopera necessaria, di garantire flessibilità di progettazione e di permettere una riduzione degli scarti e del tempo di costruzione. A causa delle limitazioni sulla dimensione dei modelli ottenuti tramite additive manufacturing, una conclusione generale è che sia difficile sviluppare edifici di medie e grandi dimensioni utilizzando queste tecniche. Tuttavia, alcuni progetti hanno già dimostrato la possibilità di utilizzare macchine additive di grande scala che consentano la stampa di edifici completi: ad esempio, nel 2014 la WinSun (azienda architettonica cinese) utilizzando tecniche additive ha costruito gruppi di case (da 200 m² ciascuno) in un giorno: questo progetto fu un'eccellente dimostrazione dell'applicazione dell'AM per stampare edifici completi e da quel periodo sono stati completati diversi progetti simili e molti altri sono in fase di sviluppo.

1.3.5 Energia

In questo settore le applicazioni variano dalla prototipazione alle parti destinate all'uso finale. Un'applicazione importante è relativa alla realizzazione di parti con geometrie complesse per componenti di turbine a gas, consentendo un'efficienza e una performance nettamente migliorate. Inoltre, l'AM viene utilizzato per la produzione di parti personalizzate per sistemi di energia rinnovabile, come turbine eoliche e pannelli solari, consentendo una migliore resa energetica e ottimizzazione complessiva. Il settore energetico sta anche esplorando l'AM per la produzione di strutture leggere e scambiatori di calore ottimizzati, contribuendo a ridurre il peso e aumentare l'efficienza energetica di vari sistemi energetici.

1.3.6 Elettronica

L'AM consente la produzione di componenti complessi, leggeri e miniaturizzati come antenne, connettori e alloggiamenti di sensori con geometrie intricate difficili, o anche impossibili, da ottenere con i metodi di produzione tradizionali. Inoltre, la tecnologia additiva consente l'integrazione di circuiti, tracce conduttive e persino sensori direttamente nelle parti stampate in 3D, consentendo lo sviluppo ulteriore di dispositivi elettronici innovativi e oggetti intelligenti.

1.3.7 Beni di consumo

L'additive manufacturing ha trovato ampie applicazioni nel settore dei beni di consumo, rivoluzionando settori come calzature, attrezzature sportive, gioielli, mobili e altro ancora. Diverse parti di lavatrici e componenti elettronici sono altri esempi di beni di consumo in cui la AM è stata implementata con successo. Nell'industria delle calzature, l'AM consente la produzione di scarpe su misura con design intricati e/o prestazioni ottimizzate. Un esempio simile è rappresentato dalle solette personalizzate prodotte da Podoactiva in Spagna: l'azienda utilizza un approccio clinico per acquisire i dati dal cliente, prima che inizi la produzione, e poi le solette sono prodotte utilizzando la tecnologia Multi Jet Fusion di HP, così come materiali e metodi di produzione convenzionali. Anche colossi come Nike, Under Armour, adidas, New Balance and Reebok hanno annunciato anni fa piani per produrre massivamente solette stampate in 3D per garantire opzioni di personalizzazione o per permettere caratteristiche meccaniche senza precedenti: l'additive manufacturing è combinato con altri metodi di produzione, producendo così le parti più critiche e altamente personalizzate del prodotto e lasciando le altre parti ai processi più tradizionali.



Figura 15: Le scarpe adidas Y-3 Runner 4D II

Man mano che i costi diminuiscono, l'additive manufacturing è destinata a comparire anche in prodotti per i consumatori più convenzionali. Attualmente, nei segmenti a maggiore volume di parti prodotte dell'industria dell'elettronica di consumo, ad esempio, lo stampaggio ad iniezione rimane ancora il modo più pratico per produrre efficientemente parti in plastica. Ma nel vasto segmento del medio volume produttivo, le tecniche di produzione additiva hanno cominciato a imporsi: utilizzando l'additive invece dello stampaggio ad iniezione, alcuni produttori di elettronica sono in grado di ottimizzare il design e la produzione del prodotto, garantirsi la flessibilità e, senza necessità di attrezzature tipiche delle lavorazioni tradizionali, raggiungere il punto di pareggio che con lo stampaggio ad iniezione raggiungerebbero a volumi superiori alle 10.000 unità. Il settore del commercio al dettaglio si riferisce principalmente al mercato dei beni di consumo e l'AM è un candidato ideale per prodotti personalizzati su misura: la chiave del successo dell'AM nel settore al dettaglio è principalmente la possibilità di poter meglio assecondare le aspettative e le richieste del consumatore. I produttori di attrezzature sportive sfruttano l'AM per creare prodotti leggeri e altamente personalizzabili mentre, nel mondo della gioielleria, l'AM consente design intricati e unici, dando agli artigiani il potere di dare vita alle loro visioni più creative. Nell'industria della moda, in particolare nel design, l'additive manufacturing ha dato un vantaggio evidente ai professionisti: offre libertà di design per creare modelli complessi e intricati altrimenti impossibili da ottenere.



Figura 16: Montatura in titanio stampata in 3D del marchio "Hoet"

1.3.8 Cibo

L'AM viene utilizzata per creare design alimentari intricati e personalizzati, come sculture di cioccolato, decorazioni per torte e dolci con geometrie complesse. Inoltre, la tecnologia di stampa 3D sta consentendo lo sviluppo di nutrizione personalizzata, dove prodotti alimentari su misura, come snack ricchi di nutrienti o integratori alimentari, possono essere prodotti per soddisfare le esigenze e le preferenze dietetiche individuali. Ad esempio, il marchio Redefine Meat produce "Alt-Steak", un'alternativa alla carne animale di cui ne replica l'aspetto, la texture ed il sapore: utilizza proteine del pisello e della soia, grassi vegetali, coloranti e insaporitori naturali, con il risultato di contenere più fibre, meno grassi e nessuna traccia di colesterolo, pur mantenendo lo stesso valore proteico della vera carne. Una ricerca interna dell'azienda ha anche evidenziato come la produzione di questo prodotto alimentare comporti un risparmio del 90% di acqua ed emissioni di CO₂ e del 95% dell'utilizzo di terra, rispetto al prodotto di origine animale.

1.3.9 Riparazioni e ricambistica

La tecnologia additiva può essere utilizzata, ad esempio, anche per la riparazione dei componenti del motore degli aeromobili, oltre anche alla produzione di parti per essi. I pezzi aerospaziali come le pale della turbina, i

blisk⁸ e così via sono molto costosi a causa dei materiali ad alte prestazioni utilizzati per fabbricarli e l'usura di questi pezzi è un fenomeno comune a causa delle estreme condizioni che devono affrontare. È sempre meglio quindi riparare questi pezzi anziché sostituirli completamente poiché quest'ultima opzione comporta costi maggiori di produzione e di materiale. Tradizionalmente, la saldatura veniva utilizzata per riparare questi pezzi, ma le temperature più elevate che accompagnano qualsiasi processo di saldatura portano allo sviluppo di tensioni residue. Alcune tecniche di saldatura avanzate, come la saldatura a fascio di elettroni o la saldatura al plasma, possono talvolta sostituire la saldatura convenzionale per eliminare il problema delle tensioni residue dovute all'apporto di calore eccessivo, ma queste sono tecnologie molto costose. L'AM, invece, aggiungendo materiale in modo stratificato, offre nuove opportunità per riparare i componenti metallici ad alte prestazioni. Le tecniche ibride di AM possono anche riparare con successo i pezzi aerospaziali danneggiati.

1.3.10 Prototipazione

I modelli prototipali svolgono un ruolo vitale nello sviluppo di qualsiasi nuovo prodotto e forniscono un riferimento facile per le informazioni sulle "3F" (form, fit, function cioè "aspetto, conformità, funzione") di qualsiasi componente ingegneristico: in questo caso la "funzione" si riferisce alla valutazione delle prestazioni, la "conformità" si riferisce alla conformità con le tolleranze dimensionali predefinite e l'"aspetto" si riferisce alla forma della parte. Ottenere i livelli desiderati di aspetto, conformità e funzione porta ad ottenere livelli soddisfacenti, rispettivamente, nella forma, nel processo e nelle prestazioni. Per convalidare qualsiasi progetto, è sempre necessario un prototipo e ottenere modelli o prototipi per una visualizzazione realistica del progetto è da sempre una delle prime applicazioni della tecnologia additiva.

⁸ Il termine è una fusione dei termini inglesi blade ("paletta") e disk ("disco"): con il termine blisk viene indicata in campo aeronautico una tecnologia costruttiva secondo la quale le palette ed il disco di uno stadio rotorico di una turbina a gas sono ottenuti per fusione in un unico assieme, o lavorati da un unico pezzo di metallo

1.4 Sviluppi attuali

1.4.1 Tecnologie ibride additive e sottrattive

I processi che combinano, anche sequenzialmente, la tecnologia additiva con i processi sottrattivi sono chiamati processi di Produzione Additiva Ibrida (Hybrid Additive Manufacturing, HAM).

I processi HAM sono generalmente classificati in due gruppi:

- processi in cui le lavorazioni non additive sono utilizzate in una fase di postelaborazione
- processi che integrano la produzione additiva e le fasi di lavorazione tradizionali in una sequenza progettata per produrre parti che sono impossibili, o molto difficili, da ottenere mediante un singolo processo additivo o sottrattivo

I secondi consentono di ottenere la geometria, le dimensioni e la finitura superficiale richieste ad aree che sarebbero altrimenti inaccessibili quando il componente è completamente finito, è quindi necessario che questi processi siano integrati in una singola macchina e che l'intero processo sia completamente integrato in un unico ambiente CAD/CAM/CAE. Nello specifico è importante anche la presenza di moduli CAM creati ad hoc per la previsione della geometria generata dalla produzione additiva, poiché l'accuratezza nella geometria considerata come punto di partenza per la lavorazione sottrattiva è cruciale per evitare collisioni tra l'utensile ed il pezzo in lavorazione: la simulazione dei processi integrati, generando le traiettorie degli strumenti AM e SM (Subtractive Manufacturing), permette di evitare possibili collisioni e di ottimizzare il processo. È inoltre essenziale lo sviluppo diffuso di Digital Twin dei prodotti, delle macchine e dei processi, il cui obiettivo principale è la simulazione avanzata, per poter garantire il progresso delle tecnologie ibride di lavorazione. Attualmente, i processi ibridi additivi/sottrattivi realizzabili a livello industriale sono focalizzati sulla produzione di parti metalliche ad alto valore aggiunto, principalmente combinando la DED e la fresatura-tornitura-rettifica CNC.

1.4.2 Design

Attualmente si possono dividere le scelte applicate per guidare il design di componenti prodotti tramite additive manufacturing in due macrocategorie: (1) decisioni finalizzate all'ottimizzazione della geometria per incrementare la funzionalità, dove la geometria ottimizzata ha una complessità che può essere prodotta efficientemente solo dalle tecnologie

AM, e (2) scelte finalizzate all'ottimizzazione della geometria per scopi di produzione e ispezione efficienti anche in termini di costo.

- (1) Il design per il miglioramento della funzionalità è direttamente legato alla geometria complessa, come strutture lattice o design basati sulla scansione tridimensionale: le forme risultanti sono spesso difficili o costose da produrre con metodi di produzione convenzionali. L'Ottimizzazione Topologica (OT) è uno dei nuovi metodi di supporto alla progettazione additiva più conosciuto e si concentra sull'ottimizzazione della geometria con obiettivi e vincoli predefiniti: i metodi OT classici si concentrano sulla distribuzione del materiale all'interno di un volume definito per ottenere il rapporto massa/rigidità o massa/resistenza più basso. Sono stati sviluppati metodi OT che tengono conto anche di altri obiettivi (ad esempio, grande deformazione, orientamento ottimale della parte, comportamento a risonanza definito e alta resistenza contro il carico di punta) e vincoli (produzione veloce, costi minimi di postelaborazione, ecc.). Altre strategie e metodi di progettazione, come il Design Generativo e le strategie di riempimento a lattice, stanno emergendo.

La capacità di creare caratteristiche all'interno di un prodotto, generalmente inarrivabili con i processi di produzione tradizionali, consente nuove funzionalità, ad esempio, per il trasporto interno di un fluido. La ricerca si concentra sulla progettazione e convalida di canali di raffreddamento, determinazione delle caratteristiche interne minime stampabili (pareti, geometria del canale) e anche impostazioni specifiche di processo che comportano livelli di porosità tali da permettere il trasporto di materia attraverso le feature stampate.

I processi AM permettono anche di ridefinire il modo in cui i progettisti pensano alla suddivisione dei prodotti in parti: per l'AM, i vincoli per la produzione, l'assemblaggio o l'ispezione sono diversi da quelli delle tecnologie convenzionali. L'unione di più parti in un assemblaggio unico viene spesso applicato poiché riduce i costi di assemblaggio e potrebbe anche comportare vantaggi aggiuntivi (riduzione degli stress, aumento della durata del prodotto, ecc.).

Poiché la funzionalità delle parti dipende anche dal materiale utilizzato, la locale deposizione e il controllo di questi materiali aprono nuove opportunità per la progettazione del prodotto. I processi AM multimateriali e ibridi consentono la produzione di oggetti e caratteristiche altrimenti impossibili da ottenere.

(2) Per quanto riguarda invece il design volto ad una produzione e ispezione efficienti, questo integra le linee guida relative alla fase di preparazione del lavoro all'interno della fase di progettazione della parte, per migliorare la sinergia tra queste due fasi. Questo tipo di progettazione delle parti è generalmente suddiviso in quattro fasi principali: preelaborazione, produzione, postelaborazione, qualificazione e certificazione. Durante la fase di preelaborazione, la parte viene posizionata e orientata nel volume di costruzione, vengono scelti e posizionati i supporti, viene applicato il taglio e vengono definiti i parametri del processo (spessore dello strato, strategia e impostazioni di scansione, potenza del laser, velocità di scansione, ecc.). Un'ampia parte di lavoro è focalizzata sull'applicazione di tecniche OT per la definizione di strutture leggere finalizzate, questa volta, anche ad ottenere una minima necessità di supporti. In generale, l'orientamento della parte è un problema di ottimizzazione multi-criterio, poiché è collegato a molte caratteristiche di qualità, ad esempio, la qualità della parte (forma, precisione dimensionale, qualità superficiale), il tempo e i costi di costruzione, i requisiti di supporto e l'accessibilità delle strutture di supporto: oltre il 55% delle regole di progettazione per le principali tecnologie AM sono, direttamente o indirettamente, legate all'orientamento della parte all'interno del volume di costruzione. Anche se molte ricerche sono dirette alla definizione delle impostazioni di processo per i processi AM, relativamente poco lavoro è stato concentrato sulla relazione tra ottimizzazione combinata della geometria del prodotto e impostazioni del processo.

Per tutte le varianti dei processi di AM sono state sviluppate regole di progettazione che definiscono le caratteristiche dei componenti che possono essere realizzati e queste regole sono principalmente utilizzate per la definizione della geometria in un processo di design che però rimane manuale. Sono stati però sviluppati database di caratteristiche AM applicabili, e tramite ciò è possibile una definizione automatizzata della geometria principalmente focalizzata sui metodi basati sull'analisi della topologia del pezzo e che tengono conto di vincoli come angoli acuti, angoli tollerabili per le superfici rivolte verso il basso, dimensioni minime dei fori e dimensioni minime delle strutture di supporto. Inoltre, la ricerca si è concentrata su metodi automatizzati per l'analisi della produzione che faciliterebbero fortemente questa fase fondamentale del processo di design.

Mentre molti metodi di progettazione tengono conto della produzione, sono rari i metodi che considerano anche la postproduzione, i test e la qualificazione. I metodi di progettazione del prodotto, che si concentrano anche sulla postelaborazione, hanno principalmente considerato questioni come l'accessibilità per la rimozione dei supporti oppure la stabilità e l'annullamento delle possibilità di collisione del pezzo durante la finitura delle superfici funzionali. Poiché la produzione di parti per applicazioni critiche è in aumento, i test e le certificazioni diventano sempre più importanti. Per i bassi volumi di produzione, come quelli tipici dell'AM, i test non distruttivi sono la norma, ma questi metodi di test hanno requisiti specifici per il prodotto da testare (nella tomografia computerizzata, ad esempio, la dimensione minima dei pori che possono essere rilevati è direttamente proporzionale dallo spessore della parte).

1.4.3 Preelaborazione

La preparazione del lavoro si occupa delle azioni per garantire che il design ottimale del prodotto sia realizzato sia dal punto di vista tecnico che economico. Include compiti come il nesting bidimensionale e tridimensionale e l'orientamento delle parti, la progettazione delle strutture di supporto, le strategie di slicing e scansione e la selezione delle impostazioni di processo ottimali. Le strategie di ottimizzazione nella preparazione del lavoro dipendono fortemente dal design del prodotto e dal processo scelto, interagiscono direttamente con le altre fasi di produzione e definiscono congiuntamente le caratteristiche della parte e le fasi di postelaborazione necessarie. Pertanto, la ricerca che affronta la preparazione del lavoro per l'AM si concentra sulla comprensione e l'ottimizzazione delle fasi di preelaborazione, nonché sullo sviluppo di strumenti di simulazione rapidi e accurati per la pianificazione del processo sia a livello di prodotto che di lavorazione vera e propria.

Diversi formati file sono stati sviluppati per la rappresentazione di informazioni sulle parti che fossero indipendenti dal fornitore del CAD sul quale il modello 3D era stato creato: il formato file *Standard Tessellation Language* (STL) è ancora di fatto lo standard per il trasferimento dei dati geometrici al software di gestione della macchina AM. Definisce le geometrie tramite tassellazione delle superfici del modello utilizzando triangoli ed è applicabile per progetti monocromatici e monomateriali. I formati *3D Manufacturing Format* (3MF) e *Additive Manufacturing Format* (AMF) sono formati più recenti in grado di gestire caratteristiche AM più avanzate come texture, multicolore, multimateriale e gradienti di materiale/colore. Tuttavia,

nessuno dei due ha raggiunto un livello di penetrazione nell'industria tale da sostituire lo STL, ma sembra che il 3MF abbia un migliore supporto dall'industria.

Per alcuni processi AM, è disponibile un certo livello funzionale di supporto naturale insito nel processo stesso, come ad esempio i processi a letto di polvere. In molti casi, però, sono richieste comunque strutture di supporto o per la geometria progettata o per il processo AM scelto, e queste influenzano la qualità del prodotto, l'utilizzo di materiale, il tempo di lavoro totale e il costo. Ad esempio, nella fusione laser in letto polvere (LPBF) dei metalli, sono richieste strutture di supporto che siano termicamente conduttive per ridurre l'accumulo di tensioni termiche, e anche rigide per supportare i sottosquadri e le sporgenze e vincolare la parte durante la produzione o durante le lavorazioni successive (fresatura o trattamento termico). La ricerca sull'ottimizzazione delle strutture di supporto si concentra sulla riduzione del tempo di stampa, dei costi e dello sforzo di postelaborazione e, al tempo stesso, le strategie di orientamento delle parti si concentrano sulla riduzione del volume dei supporti, del tempo di stampa e sulla localizzazione dei supporti sulle superficie non estetiche del prodotto. Proprio per questi motivi, infine, sono state condotte anche molte ricerche per ottimizzare la geometria del prodotto al fine di ridurre il più possibile la necessità di strutture di supporto.

L'orientamento delle parti nello spazio di costruzione influisce sulla qualità della superficie e della forma, nonché sulle caratteristiche di costruzione come costi, tempo, utilizzo del volume di costruzione e idoneità per la postelaborazione. Inoltre, nei processi basati su letto di polvere, l'orientamento corretto della parte rispetto al movimento del raschiatore può ridurre le forze sulla parte stampata e aumentare il successo del processo. Pertanto, l'orientamento delle parti è considerato un problema di ottimizzazione multi-obiettivo e sono state proposte molte strategie di soluzione.

A seconda del tipo di processo additivo, possono essere individuate e modificate molte impostazioni: per l'AM metallico, ad esempio, la quantità di energia per fondere localmente il materiale è tra i parametri di processo più importanti. Nei processi LPBF, il laser viene utilizzato per fornire una dose di energia per sinterizzare/fondere localmente le particelle di polvere: per data velocità di processo una quantità definita di energia trasforma così la polvere in materiale consolidato con una relativa microstruttura e proprietà meccaniche e con alcuni stress residui. Sebbene ci siano varie definizioni legate alla densità di energia volumetrica, superficiale o lineare, la

quantità di energia è tipicamente espressa come Densità di Energia Volumetrica (VED)⁹ ed il suo valore ottimale dipende dal materiale utilizzato e dalle condizioni locali, come la posizione all'interno del pezzo e la geometria locale della parte. La VED è tipicamente impostata per un numero finito di regioni della parte (ad esempio nucleo, superficie superiore, superficie laterale/contorni, supporti e strutture lattice).

Nella maggior parte dei processi AM, le parti di una costruzione vengono suddivise in strati planari da produrre sequenzialmente. Per ciascuno strato (piano), viene definito un modello. Il controller interpreta i modelli e definisce comandi che garantiscono che il laser o la testa di stampa solidifichino localmente il materiale. La progettazione di questi "modelli di pattern" ha un impatto sulla precisione di stampa, sulla velocità, sul costo, sulle proprietà meccaniche del componente e sullo stress residuo. Per i processi AM che depositano materiale solo dove richiesto, come ad esempio la Deposizione Diretta di Energia (DED), la ricerca si concentra su algoritmi di slicing e modelli di pattern più avanzati: per esempio un gruppo di ricerca ha sviluppato una strategia per minimizzare la ruvidità superficiale attraverso un cambio di orientazione di scansione intermedia nella costruzione della parte. Infine, come ultimo esempio, la parte può anche essere divisa in sezioni "interne" e "superficiali", e possono essere utilizzate diverse impostazioni di slicing per le diverse regioni in modo da ottimizzare tempi e costi per sezioni con diversa rilevanza funzionale/estetica.

1.4.4 Multimateriale

La creazione di oggetti con una varietà di materiali e qualità è resa possibile dall'AM multimateriale: diventata più popolare recentemente permette lo sviluppo di prodotti più complessi e utili. La tecnologia PolyJet utilizzata da Stratasys consente la stampa di materiali con diverse proprietà meccaniche, texture e colori. Utilizzando la tecnologia DLS (digital light synthesis) di Carbon, si possono creare strutture complesse a partire da elastomeri, polimeri rigidi e materiali flessibili. La stampante HP MJF (multi-jet fusion) può stampare su una vasta gamma di materiali, tra cui plastica, ceramica e metalli. Fino a otto metalli diversi possono essere stampati contemporaneamente utilizzando la tecnologia SPJ (single pass jetting) di Desktop Metal. Il programma Material Alliance di Ultimaker fornisce ai clienti un'ampia varietà di materiali per la stampa multimateriale, tra cui

⁹ $VED = \frac{\text{Potenza Laser (W)}}{\text{Velocità di Scansione} \left(\frac{\text{mm}}{\text{s}}\right) * \text{Distanza di Scansione (mm)} * \text{Spessore Strato (mm)}}$

termoplastici, compositi ed elastomeri. L'AM multimateriale sarà sempre più utilizzata in modi più complessi e innovativi con l'avanzamento della tecnologia.

1.4.5 Stampa a grande scala

I recenti progressi nell'AM hanno portato all'introduzione di macchine con volumi di costruzione sempre più elevati e che consentono quindi di produrre oggetti sempre più grandi e complesse, tra cui componenti edilizi, parti di aerei e persino interi veicoli, grazie ai miglioramenti nella tecnologia e nel software. Nuovi compositi, metalli e polimeri ad alta resistenza sono tra lo spettro aumentato di materiali che l'AM offre attualmente per la stampa a grande scala. La gestione delle operazioni di stampa, postelaborazione e controllo qualità comporta l'uso di bracci robotici e altre tecnologie automatizzate: numerosi settori, dall'edilizia e l'architettura all'aerospaziale e all'automobilistico, possono beneficiare dalla produzione additiva a grande scala.

1.4.6 Nuovi materiali possibili

L'introduzione di nuovi materiali e il miglioramento di quelli esistenti hanno ampliato le possibilità della stampa 3D, con metalli, polimeri, ceramiche e compositi utilizzati come materiali stampabili. Il metallo in particolare ha visto una crescita significativa grazie a nuove polveri metalliche e processi innovativi. Sono in sviluppo nuovi materiali “bio-based” e riciclabili che possono essere utilizzati e riciclati al termine del loro ciclo di vita. La capacità di stampare con una varietà più ampia di materiali sta abilitando la creazione di parti più complesse e funzionali con una gamma di proprietà uniche. Ora che la tecnologia AM può lavorare con materiali specifici per le alte temperature come metalli e ceramiche, sono possibili nuove applicazioni nelle industrie aerospaziali e automobilistiche. Nuove leghe di acciaio, titanio e nichel ad alta temperatura, che possono resistere a temperature fino a 1500 °C, vengono impiegate in pale di turbine e sistemi di scarico per applicazioni energetiche e aerospaziali, mentre i materiali ceramici sviluppati per l'AM possono resistere a temperature fino anche a 1700 °C. I polimeri ad alta temperatura, tra cui PEEK e PPS, possono invece resistere a temperature fino a 300 °C e trovano applicazioni nella produzione di parti automobilistiche e aerospaziali.

1.4.7 Biostampa

Gli avanzamenti nella biostampa consentono la produzione di tessuti e organi stampati in 3D a partire da cellule viventi, il che ha il potenziale per rivoluzionare l'industria medica: nuovi materiali di stampa, più adatti per l'uso con tessuti vivi e cellule, vengono costantemente creati dai ricercatori. Ad esempio, gli idrogel derivati da materiali organici come il collagene vengono impiegati come substrati di stampa poiché le loro caratteristiche sono strettamente analoghe a quelle dei tessuti reali. Le macchine adatte per la biostampa stanno diventando sempre più sofisticate ed in grado di produrre strutture complesse con maggiore precisione. I ricercatori stanno cercando di migliorare i tassi di sopravvivenza delle cellule durante e dopo il processo di biostampa: questo comporta la creazione di nuove procedure di coltura cellulare e l'ottimizzazione delle variabili di stampa, tra cui temperatura, umidità e pressione. Attualmente la biostampa è stata utilizzata per generare una grande varietà di tessuti, tra cui pelle, cartilagine, osso e tessuto epatico, ma un giorno potrebbero essere prodotti anche organi funzionali più complessi ed articolati come cuore e polmoni.

1.4.8 Automazione

Con l'uso di robot e intelligenza artificiale, l'AM sta diventando sempre più automatizzata, riducendo l'errore umano e aumentando la velocità e l'efficienza del processo produttivo: questi nuovi sistemi possono caricare e scaricare le parti, posizionarle e orientarle per la stampa, e svolgere altri compiti come ispezione e controllo qualità. L'intelligenza artificiale viene utilizzata invece per ottimizzare il processo AM: gli algoritmi di apprendimento possono analizzare i dati delle costruzioni precedenti e utilizzare tali informazioni per ottimizzare i parametri di stampa, riducendo gli sprechi e migliorando la qualità. Gli avanzamenti nella tecnologia dei sensori stanno consentendo il monitoraggio in tempo reale dei processi AM. Man mano che l'automazione avanza, si prevede che l'AM diventerà un aspetto sempre più cruciale in numerosi settori, che vanno dall'aerospaziale e automobilistico ai dispositivi medici e agli articoli di consumo.

1.4.9 Sostenibilità

A causa del suo ridotto utilizzo di materiali e della minima generazione di rifiuti rispetto alle tecniche di produzione tradizionali, l'AM sta progressivamente evolvendo in un'opzione sempre più ecologicamente sostenibile. I ricercatori stanno approfondendo l'utilizzo di materiali riciclati nell'AM, come plastiche riciclate, metalli e vari altri materiali e si stanno

anche sviluppando attivamente materiali biodegradabili concepiti specificamente per le applicazioni AM. Vengono sviluppate nuove tecnologie di stampa che utilizzano meno energia, come ad esempio la tecnologia di Cold Spraying che impiega aria compressa per depositare ad altissima velocità polvere metallica, eliminando la necessità di alte temperature o leganti chimici. Inoltre, l'AM consente una produzione locale, riducendo significativamente le emissioni di trasporto associate al trasporto di merci in diverse località. Gli addetti al settore mirano sempre più a minimizzare i rifiuti di materiali, ottimizzare i progetti per un'economia circolare e trarre ispirazione dalla natura attraverso la biomimesi, creando componenti e prodotti più sostenibili. Le questioni di sostenibilità probabilmente diventeranno più cruciali con l'avanzare della tecnologia e la AM giocherà probabilmente un ruolo significativo nel ridurre l'impatto ambientale della produzione e favorire questo metodo produttivo rispetto a quelli tradizionali.

1.5 Sfide attuali

L'additive manufacturing è già la tecnologia standard per la prototipazione e lo sviluppo di prodotti. Tuttavia, possiede anche un enorme potenziale per la produzione di parti destinate all'uso finale. Diverse sfide legate all'innovazione stanno venendo affrontate per favorirne l'adozione diffusa anche per questa seconda finalità.

1.5.1 Velocità e tempi

Affinché l'AM diventi un metodo comune di produzione di parti destinate all'uso finale, i sistemi devono anzitutto diventare significativamente più veloci, il che contribuirà a ridurre il costo di produzione per parte: il tempo di realizzazione di una parte da parte dei vari processi industriali è un contribuente importante al costo della parte stessa, e lo è ancor di più per una tecnologia come l'additive manufacturing che al tempo fisico di realizzazione della parte deve aggiungere anche le fasi di pre e post elaborazione, estremamente variabili e legati al processo scelto, ai componenti prodotti, ai materiali utilizzati e alle condizioni di contorno. I sistemi AM devono anche essere capaci di aumentare la propria capacità produttiva per favorire l'adozione diffusa della tecnologia e ciò può essere raggiunto non solo attraverso velocità operative più elevate, ma anche con volumi di costruzione più grandi, posizionamento ottimizzato delle parti e processi automatizzati di rimozione dei pezzi prodotti. Ad esempio, le tecniche di produzione in continua, come l'utilizzo di un nastro trasportatore come strato di base per la costruzione dei componenti, possono migliorare le possibilità produttive e consentire la produzione di molte più copie di una parte o anche di parti estremamente lunghe.

Il tempo necessario per la preelaborazione e postelaborazione dell'AM è spesso sottovalutato: la postelaborazione delle parti AM, che include ad esempio la rimozione delle strutture di supporto, le operazioni di finitura e i trattamenti termici necessari o meno al termine della produzione del componente, possono rappresentare una parte significativa del costo totale di una parte prodotta tramite AM. I processi di postelaborazione richiedono tempo e necessitano di attrezzature e competenze specializzate poiché la maggior parte delle parti prodotte additivamente richiede strutture di supporto durante il processo di stampa per prevenire le deformazioni e la loro rimozione può non essere insignificante: questi passaggi di pulizia possono coinvolgere solventi o tecniche abrasive e possono richiedere molto tempo.

Inoltre, l'AM può produrre parti che non sono perfettamente accurate dal punto di vista dimensionale, e che vanno quindi corrette tramite asportazione di truciolo, o che richiedano comunque una successiva lavorazione per asportazione di truciolo per ottenere le tolleranze richieste. I recenti progressi nei metodi di postelaborazione su misura per l'AM hanno notevolmente migliorato la qualità e la funzionalità dei componenti stampati. Trattamenti termici controllati, finalizzati soprattutto al rilassamento delle tensioni residue, sono comunemente impiegati nell'AM metallico per migliorare le proprietà meccaniche e migliorare l'integrità del materiale. Inoltre, anche la fase iniziale di preelaborazione, specialmente per la produzione con bassi volumi, può essere particolarmente gravosa, influenzando la redditività complessiva dell'AM.

1.5.2 Costi

Il costo delle macchine additive industriali e dei materiali rimane significativo: sia le macchine che i materiali stanno diventando più economici, ma rimangono comunque relativamente costosi, specialmente se confrontati con i metodi di produzione convenzionali e, in particolare, i costi dei materiali influenzano direttamente i costi di produzione quando aumentano i volumi produttivi delle parti. Inoltre, l'attrezzatura delle tecnologie additive spesso si basa su materiali specifici del fornitore e software di controllo, con un'integrazione limitata tra le diverse macchine o con i sistemi di controllo generali della produzione dell'impianto.

1.5.3 Certificazioni

I processi di certificazione associati all'AM pongono un altro sostanziale ostacolo alla sua adozione diffusa poiché sempre più industrie richiedono il rispetto di specifici standard e regolamenti per garantire la qualità, la sicurezza e la conformità delle parti utilizzate. Pertanto, lo sviluppo di standard internazionali riguardanti l'applicazione delle tecnologie AM nei diversi settori industriali avrà sicuramente un impatto significativo per favorire una sempre maggiore adozione delle tecnologie AM¹⁰.

¹⁰ Secondo il sito web del comitato tecnico sull'additive manufacturing ISO/TC 261 dell'Organizzazione Internazionale per la Standardizzazione (ISO), al momento in cui questo testo viene redatto esistono 27 standard pubblicati e 32 standard in fase di sviluppo (si veda <https://committee.iso.org/home/tc261>)

1.5.4 Conoscenze diffuse

Tuttavia, al netto degli ostacoli “tecnici” che concorrono a limitare la diffusione sempre maggiore dell’AM nel panorama industriale, il principale ostacolo “non tecnico” all’adozione dell’AM è che i produttori faticano ancora a capire come l’AM possa giovare loro: spesso in primis gli ingegneri che si occupano della progettazione non conoscono a pieno le capacità dei sistemi additivi e non sanno quindi come progettare efficacemente per l’AM. I veri vantaggi emergeranno quando i progettisti sfrutteranno a pieno le capacità uniche già ampiamente citate dell’AM, come la possibilità di combinare più funzionalità in un singolo componente, la capacità di ridurre il numero complessivo di parti di un assieme o l’opportunità di conferire ai componenti caratteristiche altrimenti impossibili da ottenere, e non solamente cambiando la tecnologia produttiva di un componente esistente dalla produzione convenzionale all’AM. Secondo, infatti, un recente sondaggio condotto da Materialise¹¹, uno dei leader globali nelle soluzioni di stampa 3D, i due principali ostacoli all’adozione dell’AM, ancor prima delle considerazioni tecniche di velocità e costo, sono la difficoltà nel reclutare personale competente ed esperto e la mancanza di esperienza e conoscenza all’interno dell’azienda. L’indagine rivela appunto che le aziende manifatturiere sono spesso familiari con i vantaggi unici che le tecnologie additive permettono, ma incontrano grossi ostacoli nel momento in cui adottano la tecnologia e cercano di aumentare la produzione. Secondo l’indagine, le aziende riconoscono la tecnologia additiva come una attuale tendenza di produzione e stanno adottando un approccio più strategico all’uso dell’AM per produrre anche prodotti finali, ma la mancanza di competenze e di personale qualificato per integrare questa tecnologia con i processi produttivi esistenti rallenterebbe un’adozione più diffusa. Una tendenza degli ultimi anni per l’industria dell’additive manufacturing è stata quella di convincere le aziende dei vantaggi unici dell’AM: questo focus sul “perché?” virerà sempre più sul “come?”, poiché i produttori sono ormai familiari con i vantaggi, ma mancano di conoscenze e competenze per adottare e aumentare con successo la tecnologia. In termini di percentuali specifiche per il sondaggio considerato, risulta che la principale sfida per le aziende che hanno adottato l’additive manufacturing, o che stanno considerando di farlo, è la difficoltà nel reclutare una forza lavoro esperta

¹¹ Indagine commissionata da Materialise, condotta da B2B International tra 327 produttori negli Stati Uniti, in Germania e in Giappone. I partecipanti includono aziende che utilizzano la stampa 3D (59%), che stanno considerando di farlo (31%) o che hanno scartato la tecnologia (9%).

(36%) e successivamente la mancanza di esperienza e conoscenza all'interno dell'azienda (33%). Altre sfide includono la velocità per la produzione su larga scala (23%) e le difficoltà nell'integrare l'AM con le tecnologie di produzione esistenti (20%). Anche il costo viene indicato come ostacolo, sia quello operativo (25%) che il costo dell'attrezzatura (25%). Il mercato dell'AM è ancora in fase di sviluppo e rimane fortemente orientato alla ricerca e sviluppo: da un'indagine del 2023 emerge che ancora molti produttori di sistemi AM spendono oltre il 30% del loro fatturato annuo in R&S¹². Sebbene l'AM non sostituirà interamente, almeno attualmente, la produzione convenzionale, è considerata una tecnologia complementare: è adatta per la produzione di parti particolari, costose o personalizzate, ma la produzione convenzionale è più efficiente per altri componenti. Si prevede che il costo delle parti AM diminuirà in futuro, ma rimarrà comunque più costoso della sua controparte tradizionale per grandi volumi produttivi o per prodotti di basso valore e con forme semplici.

1.5.5 Materiali

I materiali che possono essere utilizzati in AM sono ancora limitati e nonostante la varietà dei materiali sia in continua espansione, attualmente ci sono molti meno materiali disponibili per AM rispetto alle tecniche di produzione tradizionali poiché non tutti i materiali sono compatibili con tutti i processi AM. Questo è dovuto al fatto che l'AM utilizza frequentemente materiali che sono in forma di polvere, filamento o resina, che devono essere adeguatamente selezionati e pronti per l'uso prima di essere impiegati nel processo di stampa. Alcuni materiali possono richiedere temperature di stampa più elevate o macchinari specializzati e altri non sono sufficientemente resistenti per gestire particolari stress, o sono troppo fragili o flessibili per usi specifici. Materiali ad alte prestazioni potrebbero essere difficili da ottenere o offerti solo da pochi fornitori selezionati e questo può aumentare il costo di questi materiali, rendendo i componenti prodotti in AM più costosi. Alcuni materiali potrebbero non essere disponibili nella forma o nel grado richiesto per AM, potrebbero non rispondere bene a specifici metodi di postelaborazione come la sabbiatura, la verniciatura o la rivestitura.

¹² Wohlers Associates, 2023

1.5.6 Caratteristiche meccaniche

L'approccio strato per strato impiegato in AM introduce discontinuità e variazioni nell'adesione tra gli strati, influenzando la resistenza complessiva del prodotto e le proprietà meccaniche. Inoltre, l'AM mostra inconsistenze nella resistenza meccanica quando cambia l'orientamento di costruzione, conferendo alle parti prodotte un'intrinseca anisotropia che può essere anche sfruttata positivamente in sede di design e preelaborazione. Infatti, il controllo sull'anisotropia nell'AM è ottenibile modificando fattori come l'orientamento dei componenti e i parametri di stampa.

1.5.7 Fine vita dei prodotti AM

Nonostante l'additive manufacturing sia un processo intrinsecamente povero di scarti e sprechi, e quindi già tendenzialmente più sostenibile di altri metodi di produzione convenzionali, alcuni prodotti realizzati con AM sono difficili da riciclare o smaltire in modo sostenibile perché il loro design di fine vita è trascurato (si pensi per esempio al caso di componenti composti da più materiali diversi tra loro). I progettisti dovranno sempre più provare a creare prodotti tenendo conto degli effetti ambientali e del potenziale di riciclo durante tutto il ciclo di vita del prodotto.

1.5.8 Proprietà intellettuale

Infine, l'AM ha l'enorme potenziale per causare scompiglio nelle catene di approvvigionamento e nei processi di produzione consolidati, sollevando anche preoccupazioni riguardo ai diritti di proprietà intellettuale e alla contraffazione. Man mano che l'AM diventa più accessibile e diffusa, la salvaguardia dei diritti di proprietà intellettuale emergerà sempre più come una sfida urgente. La natura digitale dei modelli 3D rende la riproduzione e la distribuzione un compito semplice, che apre la porta alla replicazione non autorizzata di disegni protetti. La complessità sorge nel brevettare questi disegni, poiché definire i confini della protezione può rivelarsi difficile. Un'altra preoccupazione sorge dalla capacità di poter ingegnerizzare al contrario ("reverse engineering") i prodotti esistenti utilizzando tecniche di scansione 3D, consentendo di copiare e riprodurre componenti senza il permesso dei proprietari. A causa della natura relativamente nuova ed in rapido sviluppo dell'AM, non esistono ancora leggi e regolamenti stabiliti che affrontano specificamente le sfide uniche poste da questa tecnologia.

1.6 Prospettive future e conclusioni

La capacità di produrre componenti complessi, la libertà creativa, e l'eliminazione degli sprechi di materia prima sono solo alcuni dei numerosi vantaggi della tecnologia additiva che ne rendono grande l'adattabilità per le applicazioni in vari settori. Tuttavia, ci sono molte sfide già citate che limitano le applicazioni su larga scala dell'AM e richiedono ulteriori ricerche nel campo della tecnologia. Un punto fondamentale da tenere sempre in considerazione è che, in generale, il tempo di costruzione per la maggior parte delle tecniche di AM è, e probabilmente sarà, sempre superiore rispetto ai metodi di produzione tradizionali come la fusione, stampaggio ad iniezione, estrusione, ecc. La riduzione complessiva del tempo di produzione compensa l'aver tempi di costruzione più lunghi per poche parti, ma questo non è più vero se si considera di produrre su larga scala.

Le parti prodotte tramite additive manufacturing possono soffrire di diversi difetti come ad esempio minore resistenza meccanica, anisotropia e porosità: questi limitano le possibilità d'uso dell'AM, soprattutto dove è richiesta una elevata resistenza meccanica e strutturale, e per ovviare a questo problema molta ricerca è in corso nel settore e ci sono stati comunque considerevoli progressi a riguardo.

È necessaria, inoltre, una ricerca che affronti il legame tra i costi di produzione e le caratteristiche del progetto, per consentire una previsione precoce dei costi e una conseguente ottimizzazione del design. Inoltre, i metodi per la certificazione delle parti prodotte tramite AM sono considerati il prossimo passo necessario per l'integrazione sempre maggiore dell'AM in settori come l'aerospaziale, l'automobilistico e il biomedicale. Anche se l'impatto che le scelte di design hanno sul successo di una stampa è noto, mancano ancora metodi per prevedere il potenziale di certificazione in funzione del design del prodotto.

Altri argomenti da affrontare includono metodi basati sull'intelligenza artificiale (IA), sul machine learning e sul sensing in tempo reale (acustico, termico, ottico, tra gli altri) per la previsione e l'ottimizzazione dei parametri e del design, la previsione della fattibilità e il monitoraggio della qualità. Se venisse effettivamente realizzato un monitoraggio in tempo reale a ciclo chiuso per il controllo di qualità, ciò potrebbe avere un effetto molto marcato sulla riproducibilità della qualità dei pezzi e sulle geometrie che possono

essere prodotte utilizzando l'AM, allentando ulteriormente i vincoli di progettazione. La libertà di progettazione delle parti verrà ulteriormente utilizzata per ottimizzare le fasi di lavorazione successive, mentre i software focalizzati sulla preelaborazione supporteranno i progettisti nel bilanciare meglio gli effetti spesso opposti legati alla progettazione e alla preelaborazione stessa: un'ottimizzazione globale di quest'ultima fase aiuterebbe a migliorare l'efficienza dei processi AM nella loro interezza.

Alcune delle principali sfide nella fase di progettazione sono le seguenti: minimizzare le strutture di supporto, ridurre il volume di materiale, minimizzare il tempo di produzione, validare le proprietà finali del materiale e della parte a seconda delle strategie di produzione, selezionare delle strategie di realizzazione del design così come delle strategie di ispezione e verifica.

Tuttavia, ciò che ci si aspetta davvero, soprattutto per l'AM relativa ai metalli, è che le catene del valore basate sull'AM diventino sistemi di produzione efficienti e affidabili, rispetto agli standard industriali: sono stati fatti molti progressi riguardanti soprattutto l'aumento dell'efficienza di produzione, la riduzione dei costi e l'ottimizzazione del controllo di macchina. Molte nuove tecnologie AM potrebbero fornire interessanti catene del valore basate sull'AM, accoppiando però tali tecnologie ad impianti di produzione convenzionali.

Una delle tendenze future sarà sicuramente una sempre maggiore sperimentazione verso l'integrazione di processi additivi e convenzionali in una sola macchina di produzione ibrida, in cui i diversi processi si svolgono contestualmente. L'AM ibrido dovrebbe andare oltre, per esempio, il semplice inserimento di una testa di cladding laser all'interno di una fresatrice CNC: il processo ibrido sarà più redditizio se i vari processi combinati (additivi, sottrattivi, finitura, trattamento superficiale, texturing, trattamenti termici...) sono basati sulla stessa tecnologia. Il laser, in tal senso, offre possibilità uniche poiché è una fonte di energia che può essere usata sia per la produzione additiva che sottrattiva, per la formatura, per la lucidatura, la testurizzazione e per i trattamenti termici.

Ancora oggi, la sfida più importante per le tecnologie AM è quella di produrre parti che, al termine del processo di trasformazione, abbiano lo stesso materiale e proprietà simili rispetto ai materiali ottenuti con tecnologie di produzione convenzionali, in termini di performance tecniche ed economiche. Vi è anche un enorme potenziale nei materiali progettati per l'AM, ma la sfida fondamentale è dimostrare che il materiale AM soddisfa le

esigenze dell'applicazione, seguendo eventuali requisiti e standard di qualità. Un'ulteriore questione fondamentale sarà quella di fornire strumenti di modellazione e simulazione agli ingegneri responsabili della preparazione dei processi, che siano accoppiati anche alla progettazione delle parti: è una sfida particolarmente complicata quando si considera la combinazione ibrida delle tecnologie additive con le altre tecnologie lungo tutta la value chain e quando si considera anche l'integrazione dei trattamenti post processo in questi strumenti di modellazione e simulazione.

L'accoppiamento dei difetti fisici ai parametri di processo e al controllo di questi parametri è di notevole importanza per consentire un vero e proprio sistema di controllo a ciclo chiuso efficiente. Pertanto, le tecniche di metrologia e controllo qualità aiuteranno a comprendere più nel dettaglio queste relazioni tra difetti e parametri di processo per un determinato materiale e per un determinato insieme di requisiti. Un database comune per accedere a queste relazioni tra difetti e parametri di processo consentirebbe il miglioramento delle capacità al fine di aumentare globalmente il livello di competenze delle aziende e quindi anche di rendere i consumatori finali più fiduciosi nelle prestazioni delle parti ottenute tramite AM. Questo obiettivo è ovviamente molto difficile da raggiungere a causa della competizione industriale e della proprietà intellettuale: un'idea potrebbe però essere quella di creare un sistema di royalties per ricompensare coloro che condividono le loro conoscenze. Inoltre, in un approccio coerente, c'è bisogno anche di standard relativi alla metrologia e al controllo qualità specifici per l'AM.

Un'altra questione molto importante è la riservatezza: le tecnologie blockchain possono essere integrate più ampiamente per certificare che sia stato realizzato il processo corretto e per evitare riproduzioni illegali.

La fine vita dei prodotti ottenuti tramite additive manufacturing deve essere considerata fin dall'inizio in termini di riciclabilità, integrando magari la possibilità di smontaggio, di riconversione e di riciclaggio dei materiali, con una visione globale di economia circolare, con centri di produzione decentralizzati situati vicino al luogo di utilizzo dei prodotti: la sfida è quella di essere in grado di sottolineare le capacità delle infrastrutture basate su AM di tener conto e controllare aspetti specifici dell'intero ciclo di vita di un prodotto.

2. Attività sperimentale

L'attività sperimentale è stata focalizzata sulla realizzazione di un prototipo ottenuto con tecnologia LPBF e si è svolta in collaborazione con BI-REX, il centro di competenze dell'Emilia-Romagna: consorzio di aziende ed università all'avanguardia nel settore dell'Industria 4.0 e Big Data.

Il progetto a cui ho partecipato aveva come obiettivo la progettazione e la produzione di un prototipo di un componente chiave per Tetra Pak, azienda leader mondiale nel settore del packaging. Il prototipo doveva garantire una capacità di resistenza fino ad una pressione massima di 100bar, e, contemporaneamente, doveva garantire una tollerabile caduta di pressione in uscita per potersi integrare perfettamente nel processo produttivo del settore del packaging. La scelta dell'AM come metodo produttivo per lo sviluppo di un prototipo, come già enunciato nella sezione precedente di questo scritto, è un caso tipico dell'applicazione della tecnologia additiva in ambito industriale: in questo modo si utilizzano perfettamente ed integralmente i vantaggi più tipici dell'AM (libertà di progettazione e sperimentazione, facilità ed economicità di iterazione, risparmio di materiale, ecc.) e se ne accettano gli inconvenienti (tempi di produzione e costo dei materiali maggiori, mancanza di una completa standardizzazione, ecc.) poiché non influiscono significativamente sulla produzione di quel tipo di prodotto.

Durante l'attività, non solo ho acquisito competenze nella tecnologia LPBF, specificatamente con la macchina SISMA MYSINT300, ma ho anche imparato ad utilizzare una serie di software specifici, come "nTop" e "Magics", che hanno arricchito la mia esperienza e ampliato le mie competenze tecniche. Ho avuto l'opportunità di lavorare direttamente con SISMA MYSINT300, monitorando il processo di stampa e gestendo anche il suo pre e post processing.

2.1 Il materiale

Il materiale selezionato per la realizzazione del componente è AlSi10Mg e la scelta del materiale non era oggetto di ulteriori considerazioni poiché ampiamente riconosciuto come uno dei materiali tipici dell'additive manufacturing LPBF per molte applicazioni industriali.

AlSi10Mg è infatti ampiamente utilizzato nell'ambito dell'additive manufacturing per diverse ragioni: è una lega di alluminio che offre un'ottima combinazione di leggerezza, resistenza meccanica e resistenza alla corrosione, rendendola adatta a una vasta gamma di impieghi. Grazie alle sue proprietà, l'AlSi10Mg è comunemente impiegato nella produzione di componenti per il settore aerospaziale, automotive, medicale, dell'automazione industriale e anche dei beni di consumo.

Studi condotti da istituti come il Fraunhofer Institute for Laser Technology (ILT) in Germania e il National Institute of Standards and Technology (NIST) negli Stati Uniti hanno evidenziato le notevoli prestazioni dei componenti prodotti con questa lega tramite processi additivi. Inoltre, rapporti tecnici di aziende leader nel settore dell'AM, come EOS GmbH e GE Additive, confermano la popolarità e l'efficacia dell'AlSi10Mg nelle applicazioni industriali.

Chemical composition	
Al – Aluminium	balance
Si – Silicon	9.0÷11.0%
Mg – Magnesium	0.20÷0.45%
Fe – Iron	≤ 0.55%
Mn – Manganese	≤ 0.45%
Ti – Titanium	≤ 0.15%
Cu – Copper	≤ 0.10%
Zn – Zinc	≤ 0.10%
Ni – Nickel	≤ 0.05%
C – Carbon	≤ 0.05%

Figura 17: Composizione chimica della polvere di AlSi10Mg

L'alta conducibilità termica e l'elevata resistenza alla fatica dell'AlSi10Mg lo rendono adatto per parti sottoposte a carichi dinamici e temperature variabili, come turbine, componenti strutturali di macchine e dispositivi di dissipazione del calore. La sua disponibilità come materiale certificato e la sua capacità di adattarsi a una varietà di processi di stampa 3D ne fanno una scelta preferita per ingegneri e progettisti che cercano soluzioni innovative e performanti nell'ambito dell'Additive Manufacturing.

La composizione della lega AlSi10Mg è prossima all'equilibrio eutettico e questo le fornisce una notevole fluidità e riduce l'intervallo di temperatura di solidificazione. Il processo LPBF, vista l'interazione tra il raggio laser e la polvera metallica, determina un'augmentata velocità di raffreddamento che impedisce la crescita dei grani e la segregazione degli elementi nella lega, portando così alla formazione di una microstruttura fine non ottenibile tramite un processo di fusione tradizionale: parti in lega AlSi10Mg prodotte attraverso LPBF presentano quindi caratteristiche di resistenza superiori rispetto a quelle della stessa lega ottenuta mediante fusione tradizionale. Inoltre, la presenza di silicio migliora la fluidità del metallo fuso, aumentando la bagnabilità del substrato solido, e facilitando quindi il processo LPBF, mentre la presenza di magnesio permette la precipitazione di Mg₂Si durante il trattamento termico, causando il rafforzamento della matrice. La lega AlSi10Mg, infatti, può essere sottoposta a diverse modalità di trattamento termico al fine di adattarne le proprietà alle specifiche applicazioni: in questo caso specifico, dopo la stampa i componenti sono stati trattati termicamente con una strategia che è consistita nel portare e mantenere i pezzi a 160°C per 4 ore e poi farli raffreddare a temperatura ambiente.

La polvere di AlSi10Mg era composta di particelle aventi diametro tra i 20 µm ed i 60 µm e lo spessore di layer utilizzato per produrre i componenti additive è stato scelto pari a 30 µm per gli strati relativi al componente, e a 60 µm per gli strati relativi ai supporti.

Per quanto riguarda il gas di schermatura, è stato usato azoto in atmosfera con ossigeno residuo < 0,3 %.

2.2 Il processo LPBF

Il processo Laser Powder Bed Fusion (LPBF) si basa sulla tecnologia di deposizione di polvere metallica tramite l'uso di un ricopritore ("recoater") e di un raggio laser ad alta energia per fondere selettivamente strati sottili successivi di polvere, consentendo la costruzione tridimensionale di componenti complessi.

Una macchina costruita per questo tipo di processo è costituita da cinque elementi principali:

1. **Camera di costruzione:** è l'area protetta dove avviene il processo di fusione ed è sigillata per mantenere le condizioni di atmosfera controllata e per prevenire contaminazioni esterne
2. **Cilindro di costruzione:** è il cilindro all'interno del quale, durante il processo, si abbassa la piattaforma di costruzione ("build platform") che è la base su cui vengono depositati e solidificati gli strati di polvere metallica fusa. Alla fine del processo i componenti si troveranno completamente all'interno del cilindro, sommersi dalla polvere metallica inutilizzata
3. **Cilindro di alimentazione:** è il cilindro serbatoio che contiene tutta la polvere che può essere utilizzata in una specifica stampa, ad ogni strato la base di questo cilindro si solleva di una distanza pari a quella di uno strato (più una percentuale di sicurezza) per fornire la quantità di polvere necessaria a costruire lo strato stesso
4. **Ricopritore:** è un meccanismo mobile che si sposta alternativamente sopra la superficie della piattaforma di costruzione, muovendo con sé un raschietto che distribuisce la polvere metallica in modo uniforme per preparare lo strato successivo
5. **Zona recupero polveri:** è la zona in cui si raccolgono gli eccessi di polvere derivanti dal movimento del ricopritore e dalla necessaria sovralimentazione di polvere

Il processo LPBF inizia con la preparazione di uno strato uniforme di polvere metallica sulla superficie di una piattaforma di lavoro: l'ottenimento di un buon primo strato è condizione assolutamente necessaria per la buona riuscita del processo additivo, poiché fornisce il materiale di base per la costruzione del componente desiderato. Successivamente, il raggio laser viene focalizzato sulla superficie dello strato del letto di polvere e

movimentato secondo i dati digitali provenienti da un modello CAD tridimensionale del componente da fabbricare. Il laser, controllato da un sistema di scansione computerizzato, viene utilizzato per fondere selettivamente la polvere metallica in corrispondenza delle posizioni specificate dal modello CAD. Quando il laser colpisce la polvere, questa si riscalda rapidamente, al di sopra del suo punto di fusione, causando quindi la fusione locale delle particelle metalliche di quello strato e di altri sottostanti. A seguito del raffreddamento, le particelle fuse si solidificano, creando uno strato solido che si lega saldamente agli strati sottostanti. Una volta che uno strato è stato completato, la piattaforma di costruzione si abbassa di un'altezza pari allo spessore di un layer, e il processo ricomincia: questo ciclo di deposizione strato per strato continua fino a quando l'intero componente è stato fabbricato.

2.3 Stazione di stampa 3D

La macchina LPBF utilizzata per questo progetto è stata la SISMA MySint 300.

Il suo volume di costruzione ha dimensioni di $\varnothing 300 \times 400$ mm, consentendo la produzione di componenti di dimensioni significative, e utilizza un laser a fibra da 500 W in grado di fondere polveri metalliche con un diametro di particelle compreso tra i 20 e 60 micron. Con una velocità di scansione del laser fino a 10 m/s e uno spessore di strato variabile da 20 a 100 micron, la macchina assicura una buona produttività mantenendo comunque elevati standard di qualità. Supporta l'utilizzo di una vasta gamma di materiali metallici, come ad esempio acciaio inossidabile, leghe di alluminio, titanio, leghe di nichel e cromo cobalto.

2.4 Caso studio: manifold per TetraPak

Il progetto è consistito nell'ultimare lo sviluppo di un componente prototipale "manifold", e del componente "piastra" che si interfaccia ad esso, per TetraPak®. Il "manifold" è un condotto sagomato in cui scorre della colla che va mantenuta riscaldata ad una certa temperatura per garantirne la corretta viscosità, mentre la "piastra" è il componente che si interfaccia al primo e che ne completa la funzionalità permettendo l'alloggiamento anche di altri componenti funzionali all'assieme. Il progetto è nato con l'intento di regolarizzare, nel tempo e tra gli ugelli, la quantità di colla erogata dal manifold. Sono state precedentemente presentate all'azienda altre due soluzioni prototipali, che sono però state scartate per limitazioni fluidodinamiche e strutturali: quest'ultima soluzione mira appunto a risolvere direttamente le criticità rilevate rispetto alle perdite di pressione e alla resistenza meccanica del componente. La maggior parte del lavoro è stata quindi relativa all'ottimizzazione della geometria interna del manifold per permettergli soddisfare i requisiti resistenziali e di minimizzazione delle perdite di carico. Al fine di mantenere una temperatura costante della colla, e quindi assicurarne una certa fluidità, già dalla precedente iterazione del prototipo del manifold è prevista la presenza di due riscaldatori siliconici, posizionati sulla superficie superiore ed inferiore del componente, e di tre riscaldatori elicoidali, posizionati invece attorno a ciascun ugello. I riscaldatori siliconici sono mantenuti in posizione mediante due solette metalliche sagomate, che copiano perfettamente la superficie superiore e inferiore del manifold, e su cui vengono semplicemente applicati dei morsetti per mantenere l'assieme aderente al manifold stesso.

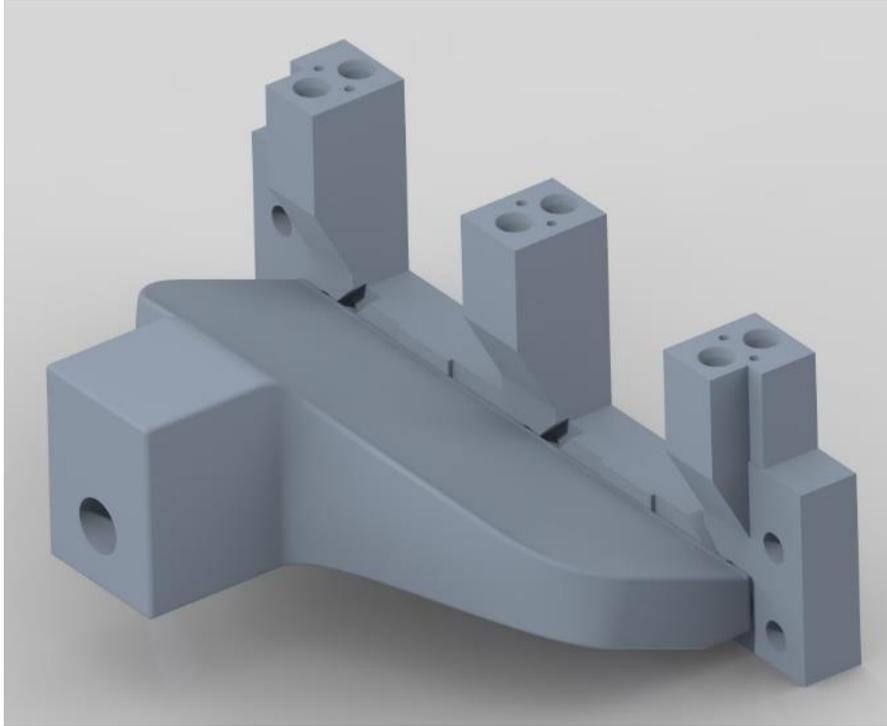


Figura 18: Assieme di manifold e piastra

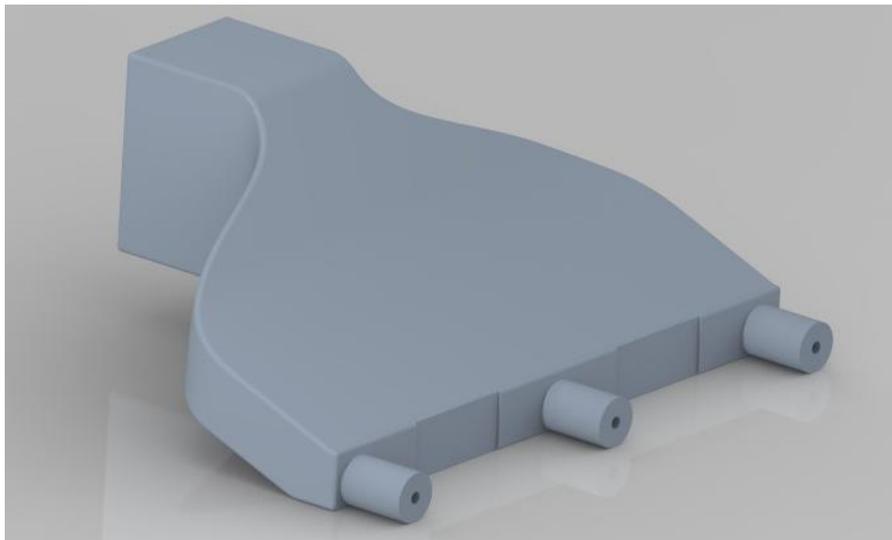


Figura 19: Componente manifold

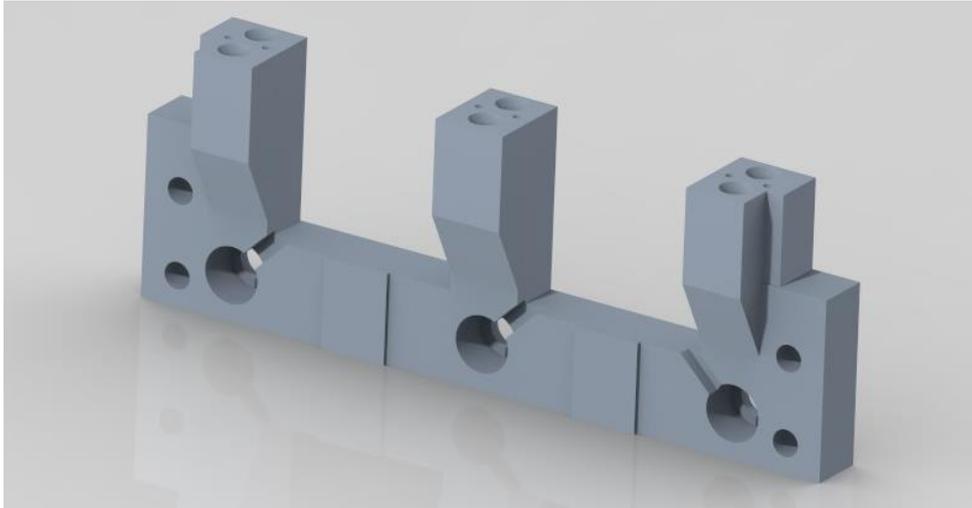


Figura 20: Componente piastra

Avendo quindi già alcuni requisiti e componenti fissati dalle precedenti versioni del prototipo, gli obiettivi per la progettazione del nuovo prototipo sono stati:

- Mantenimento della geometria
- Minimizzazione delle perdite di carico
- Mantenimento dei limiti tensionali derivanti dalla pressione

I passaggi da me seguiti per lo svolgimento dell'attività possono invece essere riassunti come di seguito:

- Periodo di apprendimento di nTop
- Ottimizzazione e validazione (FEA e CFD) lattice structure interna
- Ideazione sistemi di bloccaggio relativo tra i due componenti
- Produzione componenti

Durante l'attività, ho sfruttato software come "nTop" e "Magics" per completare la progettazione del componente, ottimizzato per la produzione additiva, e per preparare il file di stampa. Nello specifico, "nTop" ha consentito la creazione e la simulazione strutturale della struttura lattice che riempie il volume di spazio interno al componente. Invece, per preparare i componenti alla stampa 3D, ho utilizzato "Magics", che offre funzionalità avanzate di preparazione dei file CAD e di gestione dei dati per la stampa.

2.4.1 Periodo di apprendimento di nTop

Ho dedicato parecchio tempo a comprendere i principi fondamentali del programma poiché si tratta di un software avanzato per la progettazione generativa e l'ottimizzazione topologica, sostanzialmente diverso da qualsiasi altro programma di modellazione 3D che avessi mai usato precedentemente. Consente la creazione di geometrie complesse e ottimizzate per la produzione additiva integrando potenti funzionalità di simulazione e analisi: facilita la progettazione di componenti leggeri, efficienti e ad alte prestazioni. La particolarità più rilevante di nTop è il fatto che lavori mediante corpi impliciti, cioè una rappresentazione matematica avanzata molto utile per modellare geometrie complesse: basandosi su funzioni matematiche, tali corpi consentono una definizione flessibile e precisa delle forme, semplificando e velocizzando il processo di progettazione e analisi, e alleggerendo fortemente il carico computazionale che il computer deve sostenere.

Utilizzando la piattaforma di e-learning specifica del software, ho dedicato a questa fase circa quattro settimane, nelle quali ho seguito i videocorsi esplicativi e ho eseguito alcune esercitazioni per fissare e testare le nozioni che stavo apprendendo. La caratteristica che per prima si nota del software è la modalità di lavoro “a blocchi”: il file creato ha la possibilità, con i giusti accorgimenti consigliati dalla software house, di essere un file completamente automatizzabile con cui l'utente si va ad interfacciare semplicemente inserendo degli input ed ottenendo determinati output. Il programma, infatti, funziona utilizzando dei blocchi come strumento per la generazione, l'importazione, la modifica e l'esportazione delle forme solide, e questo consente all'utente anche di creare un proprio workflow attraverso una serie di blocchi ed esportare poi questa serie di blocchi come un unico blocco “custom” riutilizzabile in altri progetti. Personalmente ritengo che nTop sia più indicato per la modifica e l'elaborazione dei componenti in ottica di un Design for Additive Manufacturing, piuttosto che per la creazione totale di componenti da zero come si fa normalmente con i CAD, vista la sua grande differenza e maggiore “complessità” in questo senso rispetto ai software CAD più tradizionali. Tuttavia, grazie proprio al sistema di progettazione a blocchi che contraddistingue il software, oltre alla creazione di geometrie specifiche per l'additive manufacturing e alla simulazione delle geometrie stesse per la validazione del progetto, nTop permette di creare processi personalizzati e riutilizzabili, ad esempio, per automatizzare i compiti di progettazione ripetitivi.

2.4.2 Ottimizzazione e validazione lattice structure

Il compito principale svolto su nTop è stato quello di ottenere una struttura lattice interna al componente che fosse abbastanza resistente da sopportare la pressione operativa massima pari a 100bar, e che al tempo stesso fosse anche abbastanza snella da non occupare un eccessivo volume interno e non causare quindi notevoli perdite di carico: andavano quindi ottimizzati due parametri inversamente proporzionali tra loro. La lattice structure ha il compito di garantire una maggiore rigidità al componente, evitando possibili deformazioni durante l'utilizzo, e di permettere un più omogeneo riscaldamento e mescolamento del fluido che fluisce al suo interno. Si sfruttano quindi il più possibile le libertà progettuali e di design che l'AM offre; infatti, la produzione di componenti con queste tipologie di strutture "reticolari" è possibile proprio grazie all'uso dell'additive manufacturing, poiché altrimenti ottenere geometrie simili all'interno del componente, sfruttando tecnologie tradizionali di produzione, sarebbe impossibile.

Dall'inizio del progetto è stata scelta una struttura che si basa su di una forma geometrica chiamata "giroide": una giroide è una superficie matematica generata dalla rotazione completa di una curva chiusa attorno a un asse parallelo alla direzione di spostamento della curva stessa. Questa tipologia di lattice structure presenta una forma tridimensionale simmetrica che si sviluppa come una struttura tubolare ed è quindi una struttura particolarmente rilevante nell'ambito fluidodinamico, in quanto la loro geometria consente di gestire in maniera efficiente il flusso di fluidi.

Una peculiarità della giroide risiede nella sua capacità di minimizzare la resistenza al flusso e della possibilità, grazie al suo tipico sviluppo, di isolare perfettamente due volumi di fluido che scorrono perpendicolari l'uno con l'altro al suo interno: è quindi una struttura particolarmente adatta anche a componenti come scambiatori di calore e dissipatori. Questa seconda caratteristica tipica della giroide non era comunque di interesse nel nostro caso specifico in quanto la giroide si sarebbe dovuta interfacciare con un solo fluido.

In ottica di riduzione delle perdite di carico, erano già state cambiate le dimensioni della cella elementare della giroide, rendendone i canali più grandi e facendo sì che la cella fosse più lunga nella direzione prevalente di scorrimento della colla: questa nuova cella, infatti, ha dimensioni 30x15x15mm, rispetto alla precedente versione che invece era 7x7x7mm. La giroide generata da questa cella elementare, però, nonostante si prevedeva

avrebbe soddisfatto i limiti relativi alle cadute di pressione, non resisteva agli sforzi tensionali indotti dalla pressione massima possibile all'interno del componente, e la sua morfologia andava quindi ottimizzata per garantire la solidità strutturale.

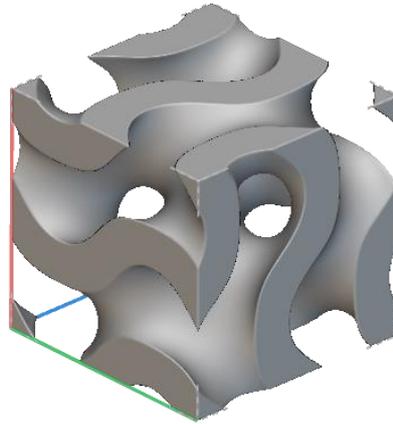


Figura 21: Cella elementare di giroide

Per ottenere un componente manifold completo era necessario unire la giroide interna con il guscio esterno generato da CAD: all'inizio del file di nTop sono quindi stati importati tutti i volumi di riferimento generati con Creo e sono stati convertiti in corpi impliciti per renderli modificabili con nTop. I volumi generati con Creo erano sostanzialmente il volume esterno del manifold e il volume interno che sarebbe poi diventato la struttura lattice. Dal volume interno sono stati poi sottratti anche i volumi relativi ai plenum di ingresso, che ha lo scopo di permettere una corretta diffusione del fluido attraverso i canali della giroide, e di uscita, che invece permette al fluido passato attraverso la giroide di ricongiungersi prima degli ugelli per garantire una portata uniforme all'uscita di quest'ultimi. Per generare la struttura a giroide è stato necessario fornire al programma un volume solido che potesse poi convertire in questa struttura, selezionare la cella elementare della lattice structure che andava ripetuta periodicamente fino a coprire tutto il volume desiderato, e lo spessore delle pareti della struttura. Dalle simulazioni strutturali risultava che la giroide raggiungesse tensioni di molto superiori ai 200 Mpa con una pressione applicata all'interno del componente pari a 100 bar e l'obiettivo finale era ottenere una struttura che avesse ovunque tensioni inferiori ai 200 MPa. Ho deciso di modificare il processo attraverso il quale veniva generata la giroide per permettere alla parte di quest'ultima più prossima agli ugelli di non venire troncata di netto, e quindi generare spigoli vivi con conseguenti concentrazione degli sforzi, durante

l'operazione booleana che guida la creazione della giroide. Per fare questo ho dovuto modificare sia il blocco che si occupava di generare la giroide e sia il volume solido che sarebbe servito come dominio di generazione della giroide: in questo modo gli spigoli vivi della giroide dal lato degli ugelli sono stati smussati e si è limitata la concentrazione di tensioni in quei punti. Inoltre, con Creo ho modificato iterativamente anche il plenum di uscita in modo che la forma risultante della giroide in quella zona fosse la meno acuta possibile per meglio distribuire le tensioni su tutta l'altezza disponibile e, invece, da nTop ho aumentato il raggio del raccordo tra le superfici della giroide e le superfici interne del guscio stesso per rafforzare anche questa zona di collegamento tra i due corpi. Queste ultime due modifiche, cioè la modifica della forma del plenum di uscita e l'aumento del raggio di raccordo tra giroide e guscio del manifold, sono state fatte iterativamente fino a che non si è raggiunto il massimo di riduzione possibile delle tensioni operando solo su questi due parametri: ho proceduto in questo modo poiché aumentare subito lo spessore delle pareti avrebbe comportato sicuramente un aumento delle perdite di carico e volevo quindi prima sfruttare al massimo i vantaggi derivanti dall'ottimizzazione di plenum e raccordo.

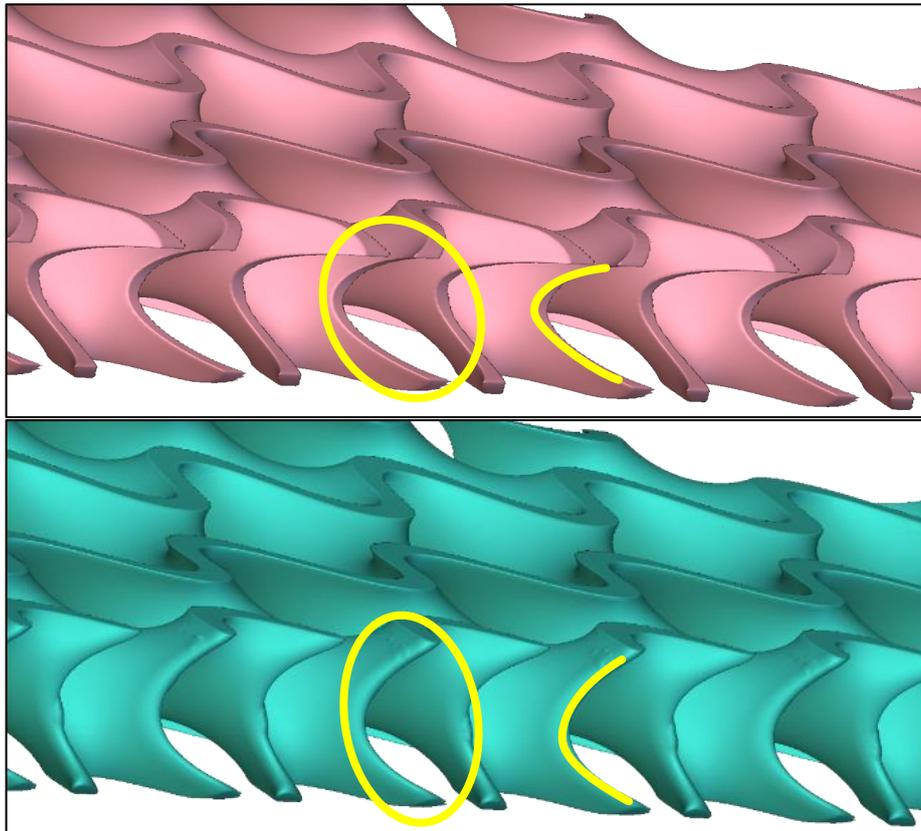


Figura 22: Dettaglio della parte di giroide più vicina al plenum di uscita del manifold che confronta la precedente giroide (rosa) con quella ottimizzata (verde). Si notano i bordi "smussati" e la forma meno acuta a cuspide della giroide ottimizzata rispetto a quella precedente

Raggiunto questo punto di ottimo si è notato che le tensioni massime erano localizzate solamente nella zona più terminale della giroide, proprio cioè sulle superfici arrotondate frutto della generazione del plenum e si è quindi deciso di ispessire le pareti della giroide solo in quei punti in cui la tensione superasse un certo limite, in modo da ottenere un aumento della resistenza in quei punti senza però poi andare a compromettere la portata in tutti i condotti della giroide. Per riuscire a modificare localmente la topologia della giroide solo in alcuni punti specifici della struttura si è utilizzata una peculiarità di nTop che permette di inserire un campo scalare come valore di input del parametro relativo allo spessore della giroide da generare: questo è una delle applicazioni con cui il software permette di fare “field-driven design”, e cioè un design guidato da caratteristiche specifiche di un campo scalare o vettoriale. Il campo scalare in questione è quello ottenuto dalla mappa puntuale degli stress di Von Mises derivanti dalla simulazione strutturale del componente: in questa mappa puntuale ad ogni punto nello spazio tridimensionale è associato un valore della tensione di Von Mises in quel punto specifico, per ottenere continuità tra un punto e l'altro bisogna interpolare tutti questi punti nello spazio 3D e nTop permette di farlo creando così un campo. La creazione dei campi partendo da mappe di punti è controllata da due parametri di controllo, cioè come viene effettuata l'interpolazione e come l'estrapolazione, e per entrambi questi parametri si è deciso di attenersi ai valori suggeriti da nTop per casistiche analoghe alla nostra e quindi si è scelto di impostare:

- nessuna estrapolazione, poiché non interessava creare un campo al di fuori del volume delineato dalla mappa di punti
- interpolazione baricentrica, per avere valori del campo che dovunque fossero pari ad un'interpolazione lineare dei tre punti (tetraedro) della mappa più vicini

Avendo così creato un campo continuo di valori nel volume tridimensionale occupato da manifold, si è proceduto con il blocco “rampa”, vera chiave di volta di questo processo, ad impostare un input variabile al parametro di controllo dello spessore di parete della giroide da generare; infatti, questo blocco, nel nostro caso, per ogni punto nello spazio permette di associare determinati valori di tensione di Von Mises a determinati valore di spessore di parete della giroide: in questo modo si possono assegnare valori di spessore minore ai punti meno stressati e, viceversa, maggiore spessore ai punti più stressati, e così effettivamente ridistribuire la massa in modo più efficiente nei punti in cui è richiesta una maggiore robustezza. Inoltre, questo procedimento consente anche di non intaccare in modo significativo la

caduta di pressione all'interno della giroide, poiché la stragrande maggioranza delle superfici dei condotti saranno insensibili all'aumento di spessore, visto che la stragrande maggioranza dei punti della giroide subiscono valori di tensione di molto inferiore al valore limite e non saranno quindi influenzati dall'aumento di spessore localizzato causato dal blocco "rampa". La scelta dei parametri di input (tensioni di Von Mises) e output (spessore di parete) di questo blocco è stata obiettivo di molte iterazioni finalizzate al trovare la combinazione ottimale di spessore per ogni tensione, considerando anche che più una zona stressata veniva ispessita, meno era stressata, e più quindi le tensioni aumentavano sulle zone che venivano alleggerite: è stato quindi un altro problema di ottimizzazione di parametri inversamente proporzionali tra loro: la natura algoritmica di nTop ha permesso di iterare senza troppe complicazioni il processo di ottimizzazione della massa attraverso il blocco rampa, semplicemente variando i valori del range di tensioni da prendere come input ed i corrispondenti valori di output relativi allo spessore di parete.

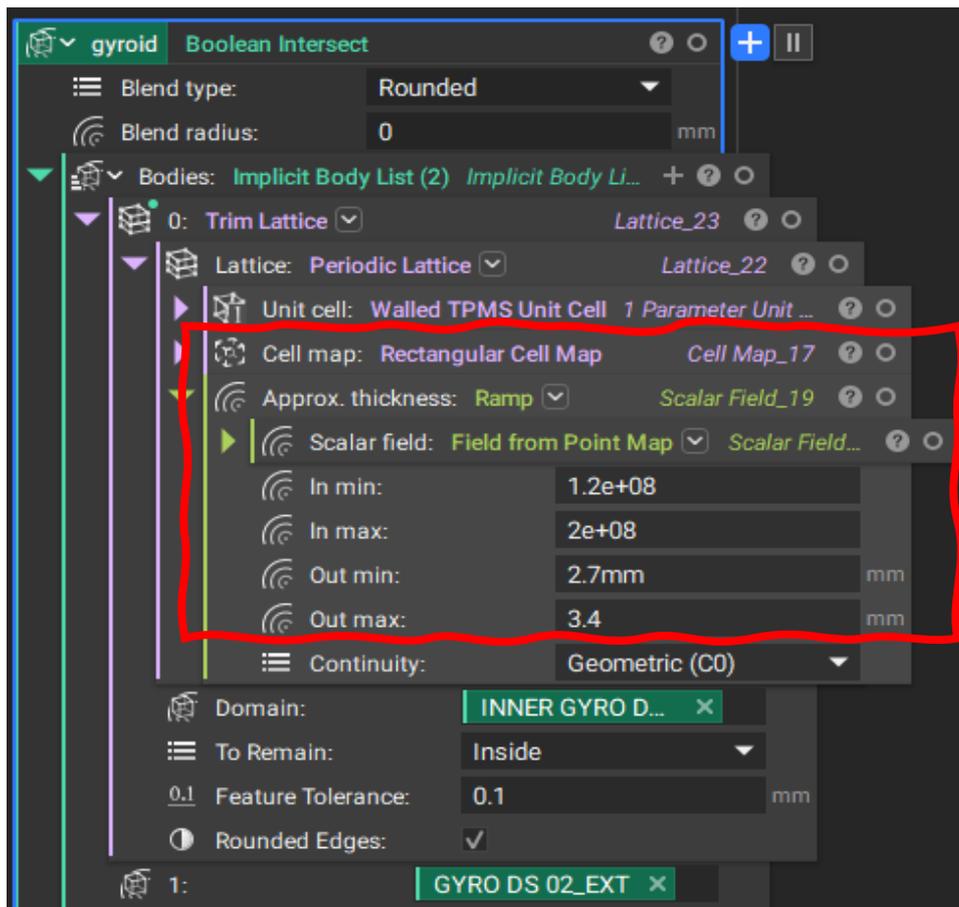


Figura 23: Blocco di nTop che, tra gli altri comandi, controlla anche la generazione della rampa usata per la definizione dello spessore di parete della giroide: la rampa impone che nei punti con tensioni minori o uguali a 120 Mpa la parete abbia spessore 2.7 mm, mentre nei punti con tensioni maggiori o uguali a 200 Mpa lo spessore sia 3.4 mm

Una volta ottenuto il corpo implicito costituito dall'unione booleana tra giroide e manifold si è passati alla creazione della mesh superficiale tetraedrica che, dopo la trasformazione in mesh volumetrica, avrebbe poi reso possibile la simulazione strutturale del componente e quindi le sue modifiche iterative e, infine, la sua validazione finale. La creazione delle diverse mesh mira ad ottenere una rappresentazione discretizzata fedele delle forme del componente, che sia però costituita dal minor numero possibile di elementi per non aumentare il carico computazionale del computer. Dalla mesh superficiale si è passati poi alla generazione di una mesh volumetrica ed infine ad una mesh che fosse utilizzabile dalla successiva analisi agli elementi finiti (FEA); quest'ultimo tipo di mesh in nTop è chiamato "FE Mesh" e può essere o *lineare* o *quadratica*:

- *lineare* implica che i nodi della mesh siano presenti solo sui vertici di ogni elemento della mesh
- *quadratica* implica che i nodi della mesh sono presenti sia sui vertici di ogni elemento della mesh che anche sui punti medi di ogni bordo di un elemento della mesh

Si intuisce quindi che una mesh quadratica avrà molti più punti in cui viene svolto il calcolo per ottenere la simulazione strutturale, e sarà quindi sia più precisa che anche più lenta e pesante dal punto di vista del carico computazionale per il computer. Si è deciso quindi di svolgere inizialmente tutte le simulazioni usando mesh lineari per poi, e una volta ottenuto un componente che avesse tensioni abbondantemente inferiori ai 200Mpa (si è scelto 150Mpa come valore di riferimento), utilizzare una mesh quadratica e continuare il processo di ottimizzazione dai nuovi e più attendibili valori di tensione ottenuti dalle simulazioni quadratiche. Il risultato finale di tutte le ottimizzazioni sulla giroide è stato un componente che presentava tensioni ovunque inferiori a 190Mpa. A seguito della validazione strutturale della giroide è seguita anche una simulazione CFD, tramite il software STAR-CCM+ di Siemens, per verificare che la soluzione trovata migliorasse le perdite di carico rispetto alla precedente versione del componente. Per fare ciò si è proceduto ad esportare come STL la mesh superficiale corrispondente al componente nel suo stato finale dell'ottimizzazione strutturale questa mesh superficiale è stata usata, tramite un'operazione di sottrazione booleana con il volume interno del manifold senza la giroide, per ottenere la parte di volume occupata dal fluido (Figura 25). Con il volume occupato dal fluido nel manifold si farà poi la mesh volumetrica corrispondente, sulla quale verrà effettuata la simulazione.

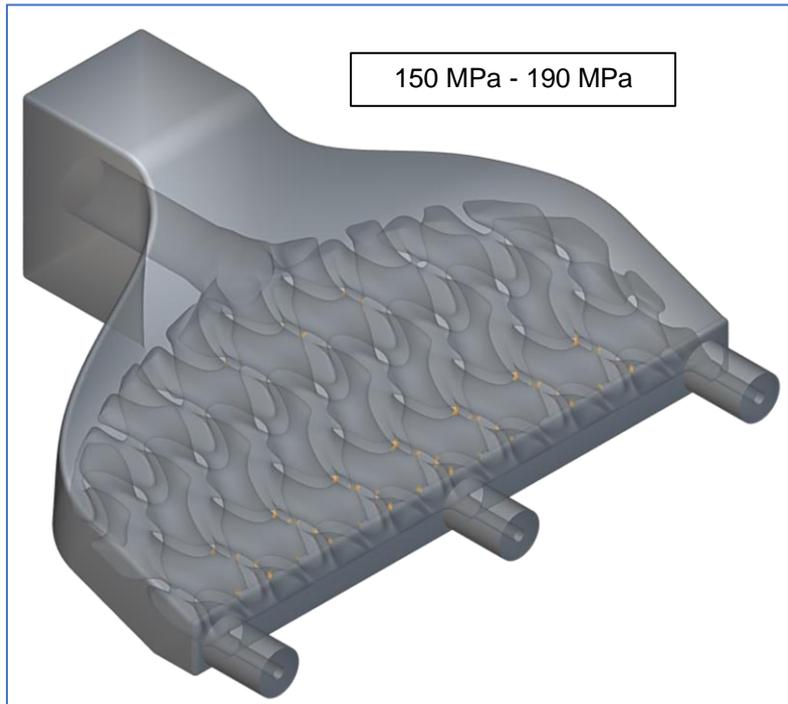


Figura 24: Punti in cui la tensione di Von Mises rientra nel range evidenziato

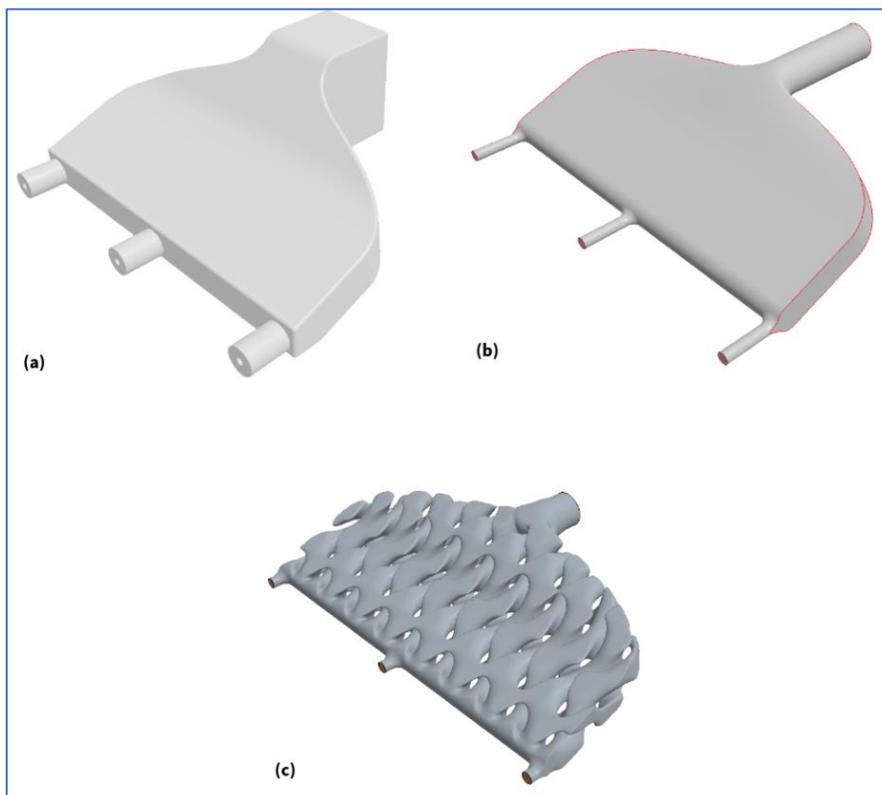


Figura 25: a) volume del manifold comprensivo anche della giroide interna b) volume interno del manifold se non fosse presente la giroide c) regione occupata dal fluido

Successivamente sono stati inseriti i dettagli fisici del fluido in questione, ed è stato quindi definito come liquido laminare con determinati valori costanti di densità e viscosità dinamica. Una volta generata la mesh volumetrica del fluido si è passati a definire le condizioni al contorno della simulazione indicando l'ingresso della colla come un "velocity inlet", l'uscita dai tre ugelli come un "pressure outlet" e le pareti della giroide come "wall": la simulazione poi è consistita nel simulare l'andamento delle perdite di carico all'uscita del manifold per diversi valori di velocità di ingresso del fluido nel manifold stesso, considerando che in generale all'aumentare della velocità le perdite aumentano di conseguenza.

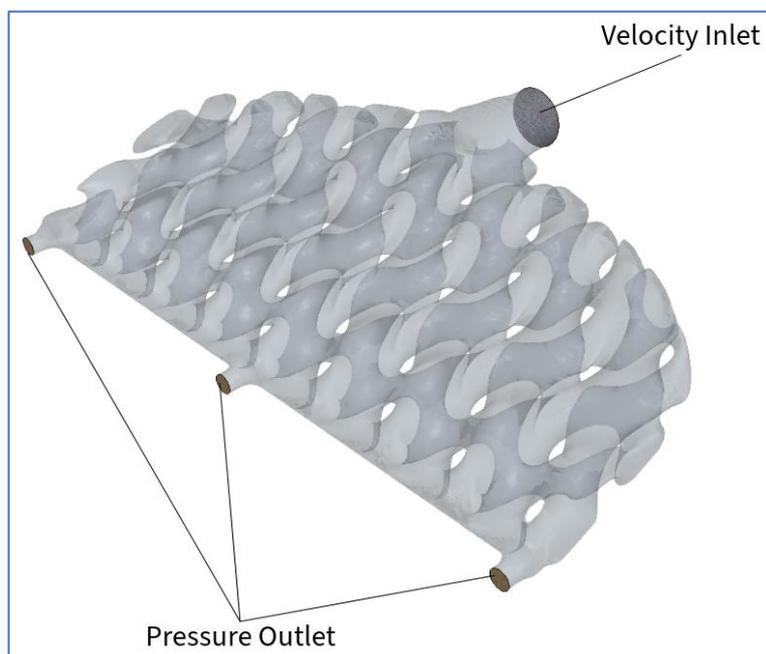


Figura 26: Condizioni al contorno della simulazione CFD

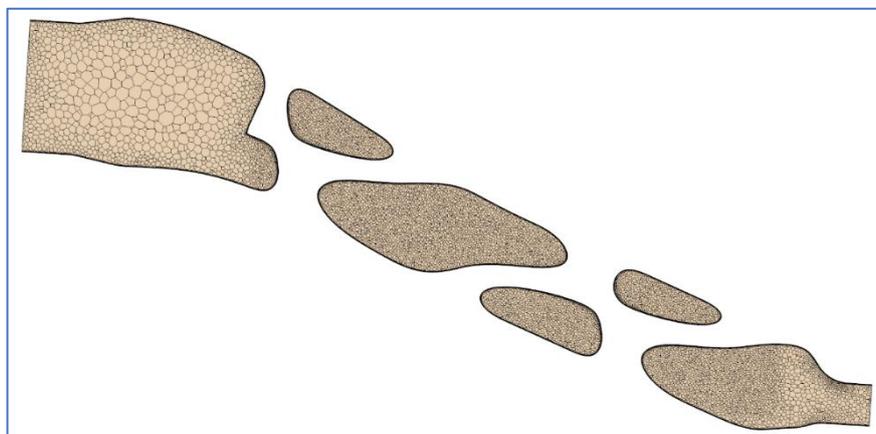


Figura 27: Sezione mediana della mesh relativa al fluido

Per ogni velocità del fluido in ingresso il software calcola la caduta di pressione tra ingresso e uscita e, una volta che il calcolo è arrivato a convergenza, salva il risultato: una volta finita la simulazione si possono plottare i valori di caduta di pressione per ogni velocità di ingresso e compararli con quelli ottenuti con la versione precedente del manifold. Si nota che le perdite di carico di questa giroide risultano essere sostanzialmente la metà di quelle introdotte dalla giroide presente nella versione precedente del manifold, permettendo quindi una portata maggiore in uscita dai tre ugelli.

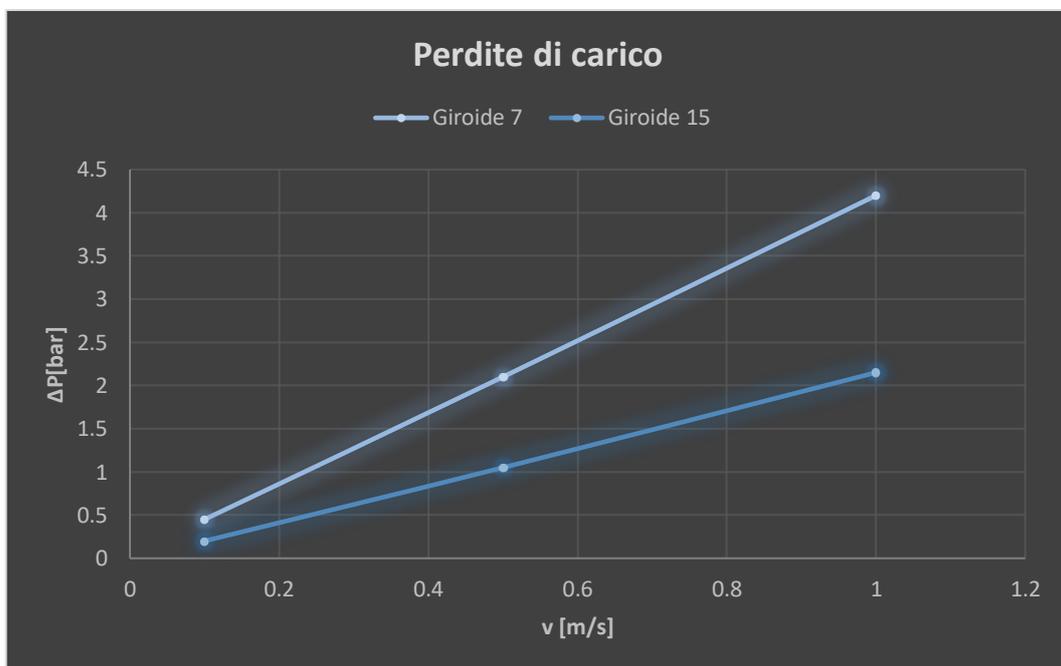


Figura 28: Andamento delle cadute di pressione al variare della velocità di ingresso del fluido nel manifold, per la precedente giroide (“Giroide 7”) e quella ottimizzata (“Giroide 15”)

Verificato la giroide ottenuta con nTop soddisfacesse anche se simulazioni fluidodinamiche, si è anche deciso di creare un file alleggerito con solo i blocchi essenziali alla generazione di quella specifica giroide e mesh per poter eventualmente creare più velocemente nuove iterazioni del prototipo.

2.4.3 Ideazione sistemi di bloccaggio tra i componenti

Con il design della giroide interna verificato dalle simulazioni, si è passati alla fase di modifica di alcune feature esterne del componente. Era infatti da ideare un sistema che permettesse una salda unione tra il componente “manifold” e l’altro componente “piastra” a cui il manifold doveva essere fissato, e un modo per fissare una termocoppia per ogni uscita degli ugelli del manifold.

Per l’unione dei due componenti sono state ideate tre soluzioni a complessità crescente, ma che rendessero sempre minore il numero di componenti utilizzati. Nel prototipo stampato è però stato deciso di non usare una di queste tre soluzioni, ma di usarne una che sfruttava meno i vantaggi della manifattura additiva ma che fosse molto più immediata da produrre ed utilizzare e non richiedesse test aggiuntivi per assicurarne il corretto funzionamento. I vincoli imponevano che le superfici superiore e inferiore del manifold dovessero rimanere libere poiché su quelle zone sarebbero stati posizionati dei riscaldatori siliconici a fogli, con le relative zeppe metalliche, che hanno il compito di mantenere caldo il componente per garantire una certa fluidità al fluido che vi scorre internamente. Inoltre, il sistema doveva essere facile e veloce da utilizzare vista la natura prototipale del progetto e quindi prevedendo differenti iterazioni del manifold da dover testare.

La prima soluzione consisteva nell’utilizzare un sistema di cunei su slitte movimentati attraverso una vite e bloccati da un controdado. L’idea è stata quella di ottenere un sistema concettualmente semplice, ma che sfruttasse comunque i vantaggi tipici dell’additive manufacturing: le slitte dal lato della piastra, le sedi dei cunei sul manifold e le sedi filettate per le viti sarebbero state infatti ricavate integralmente con i componenti stessi. I cunei, e le loro sedi sul manifold, erano pensati per conferire un leggero schiacciamento del manifold contro la piastra per assicurarli l’uno all’altro. Considerando due viti, due dadi e due cunei per il sistema, e considerando anche il manifold e la piastra, il numero totale dei componenti considerati per questa prima soluzione è pari a otto.

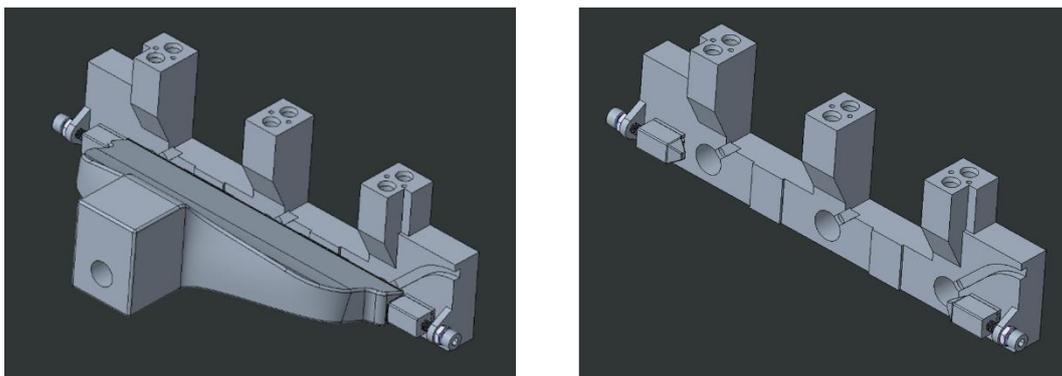


Figura 29: Soluzione composta da cunei e slitte, 8 componenti.

La seconda soluzione invece, utilizzando due camme i cui perni sarebbero stati integrali con il manifold, avrebbe permesso di portare il numero di componenti necessari da otto a quattro. Il profilo della camma è stato disegnato considerando di ottenere una corsa più omogenea possibile e di consentire un bloccaggio all'ulteriore movimento delle camme stesse al raggiungimento della corsa prestabilita. Anche in questo caso la forma delle camme, e delle relative sedi, era pensata per generare un leggero schiacciamento tra i due componenti.

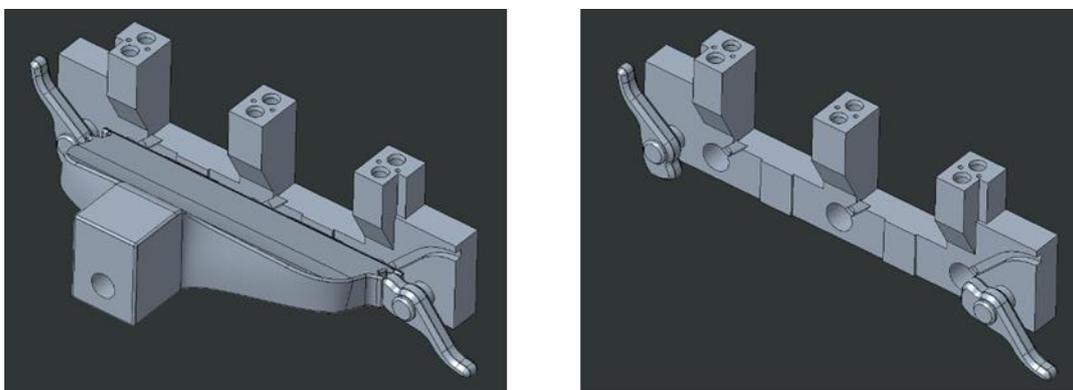


Figura 30: Soluzione composta da due camme, 4 componenti.

Infine, con la terza soluzione sarebbe stato possibile ridurre fino a due il numero di componenti utilizzati: l'idea era di ricavare integralmente al manifold dei perni che si sarebbero dovuti impegnare e scorrere su delle guide, ricavate integralmente invece sulla piastra, che avrebbero anche permesso il bloccaggio del manifold stesso, una volta raggiunta la posizione corretta e terminata la corsa disponibile. Il blocco ricavato sulle guide, come

nelle precedenti soluzioni, avrebbe generato un certo schiacciamento tra i due componenti.

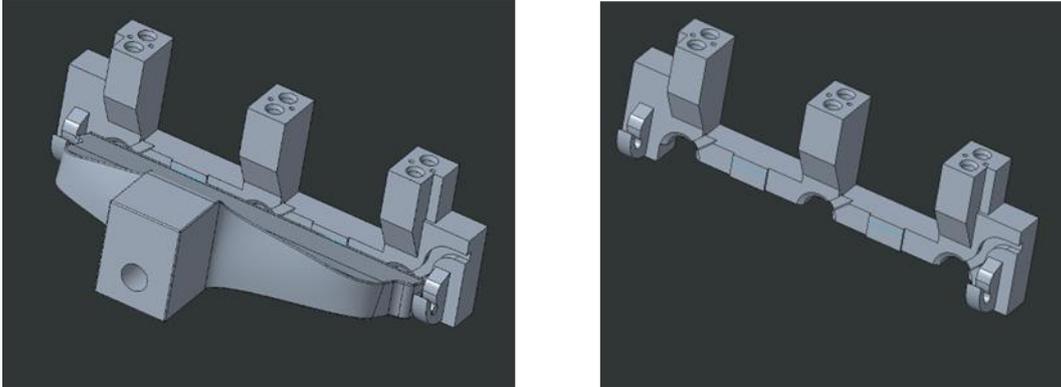


Figura 31: Soluzione composta da guide e perni, 2 componenti.

La soluzione che è stata invece concretamente adottata sul prototipo è consistita in due viti M5 avvitate in due fori sul manifold e bloccate poi da due dadi autobloccanti, in modo da prevenire lo svitamento in esercizio. Sulla piastra, invece, sono ricavati degli scassi per permettere alle teste delle viti di rimanere sotto alla superficie della piastra stessa e non interferire né con le lavorazioni successive all'additive né al resto dei componenti che in esercizio si sarebbero dovuti accoppiare con la piastra. È una soluzione sicuramente molto più rapida da implementare e che non necessita di sperimentazioni ulteriori per garantirne un corretto funzionamento, ma altrettanto sicuramente non sfrutta a pieno le potenzialità che la tecnologia additiva permette: è stata scelta comunque come soluzione vista la natura prototipale del progetto e visti anche gli ulteriori test sperimentali che il manifold dovrà subire per validare realmente il suo design e la giroide interna.

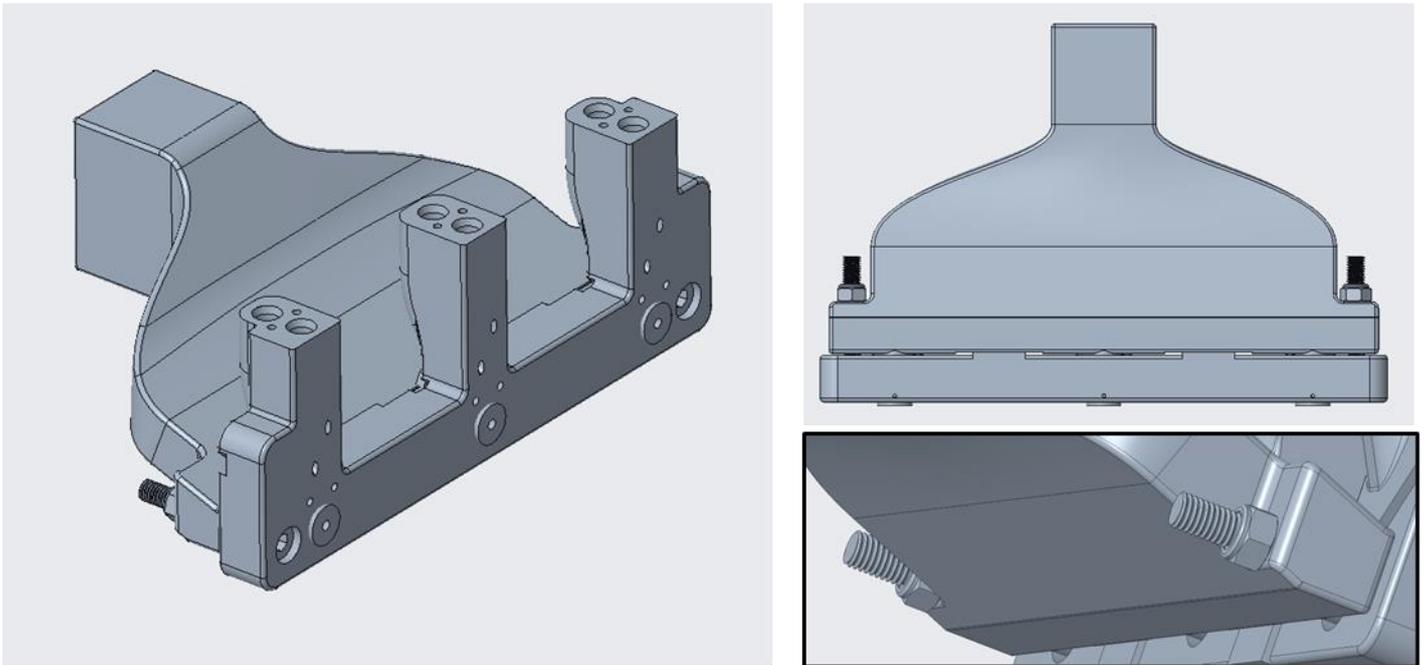


Figura 32: Soluzione finale adottata per l'unione dei due componenti

Per quanto riguarda l'integrazione delle termocoppie, invece, si è ricavato direttamente dalla stampa del componente un foro per ogni ugello (perpendicolare all'asse dell'ugello stesso) con un diametro che fosse leggermente più grande del diametro della termocoppia, in modo da garantire un agevole inserimento dello strumento, ma che garantisse anche la sua ritenuta grazie alla elevata rugosità superficiale intrinseca alla tecnologia LPBF. Si era pensato anche di adottare un profilo dentato per il foro corrispondente nella piastra in modo da incrementare le possibilità di mantenere in sede la termocoppia, ma questa soluzione non è stata adottata poiché la coassialità tra i due fori dei diversi componenti è una specifica molto complicata da mantenere, viste anche le successive lavorazioni per asportazione di truciolo a cui i componenti dovranno essere sottoposti.

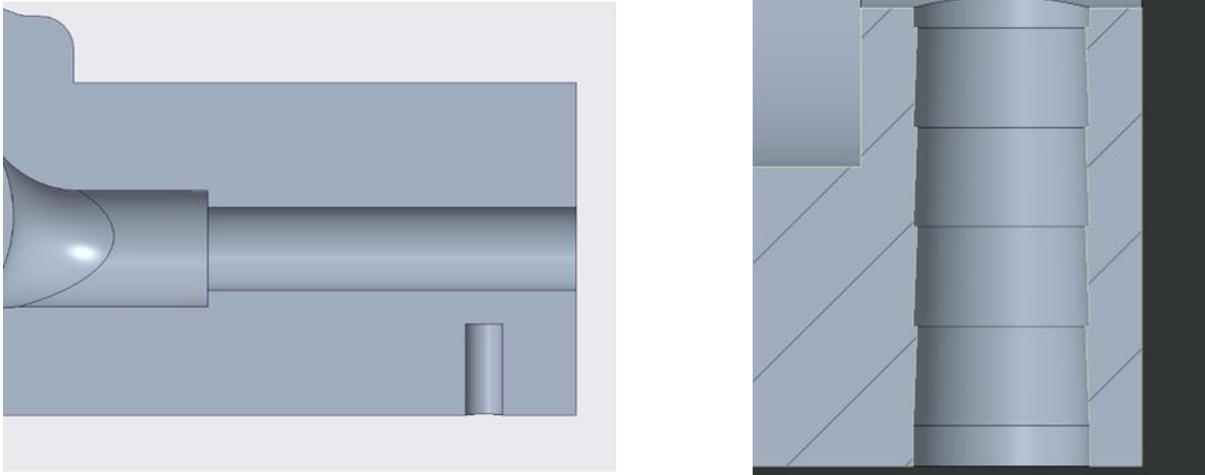


Figura 33: A sinistra la sezione di uno degli ugelli in cui si evidenzia il piccolo foro verticale per alloggiare la termocoppia, a destra invece il foro sulla piastra coassiale al foro dell'ugello (con una superficie interna dentata per permettere idealmente una maggiore sicurezza nel fissaggio della termocoppia)

2.4.4 Produzione componenti

La preparazione finale dei componenti alla stampa, e quindi il posizionamento dei supporti e l'orientamento dei componenti sul piano di stampa, è stata completata utilizzando "Magics" di Materialise: software avanzato per la preparazione e la gestione dei dati per la stampa 3D, progettato per la preparazione dei file CAD, l'ottimizzazione della geometria, la riparazione di errori, la gestione dei dati e molto altro ancora; offre inoltre funzionalità avanzate come la riparazione automatica di difetti geometrici, la creazione di strutture di supporto ottimizzate e la gestione efficiente delle piattaforme di produzione.

La prima iterazione di stampa è purtroppo però fallita, probabilmente a causa di un non ottimale orientamento dei componenti all'interno della superficie della build platform che ha causato un eccessivo accumulo di stress termici all'interno della struttura di uno dei componenti, che, a loro volta, hanno causato la rottura dei supporti che ancoravano la parte inferiore del componente con la superficie base della piattaforma di stampa. Una volta che il componente non è stato più fisicamente vincolato alla piattaforma si è deformato e staccato dalla piattaforma stessa andando inevitabilmente a collidere con il recoater durante la sua normale traiettoria operativa. Questo

urto imprevisto ha fortunatamente attivato il sistema di protezione della macchina (Sisma MYSINT₃₀₀) che ha interrotto tutte le operazioni e sospeso la stampa. È stato quindi poi necessario sostituire il recoater danneggiato, che era ormai andato in pezzi dopo il continuo e non previsto strisciamento continuo contro i layer già prodotti, pulire la macchina e approntarla nuovamente per un successivo tentativo di stampa. È stata così evidenziata la criticità dell'AM relativa all'importanza della fase di preelaborazione: questa parte del processo è fondamentale per permettere una produzione efficiente, e soprattutto di successo, dei componenti. Le competenze tecniche specifiche per questa fase permettono di prendere decisioni di successo riguardo il posizionamento e l'orientamento dei pezzi all'interno del volume di stampa, la scelta e la posizione dei supporti, le strategie di slicing e scansione e l'impostazione dei corretti parametri di processo.

Per il secondo tentativo di stampa, sempre tramite Magics, i componenti sono stati posizionati in modo da rendere il più graduale possibile l'aumento di superficie dei layer lavorati e quindi si è proceduto aumentando l'angolo tra la superficie inferiore del componente e quella della piattaforma di stampa, posizionando pertanto in modo più "sghembo" i componenti; è stata aumentata anche la superficie dedicata alla generazione dei supporti, in modo da crearne in maggior numero nei punti in cui precedentemente era avvenuto il distacco dalla platform. Non sono stati modificati però i parametri relativi alla macchina e al processo di scansione poiché già testati con successo nelle iterazioni precedenti del prototipo.

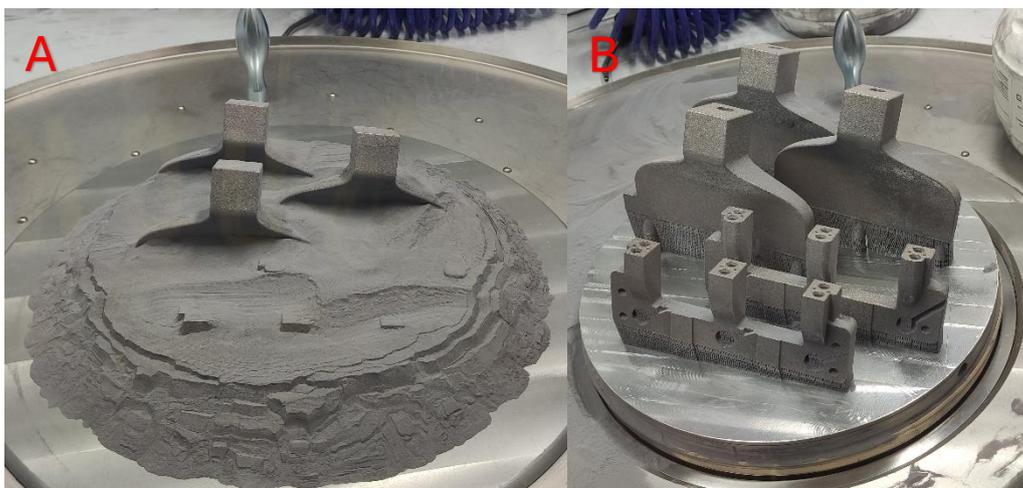


Figura 34: A) componenti estratti dalla macchina e inseriti in una apposita camera sigillata per rimuovere la polvere in eccesso B) componenti dopo un'accurata pulizia e raccolta della polvere in eccesso

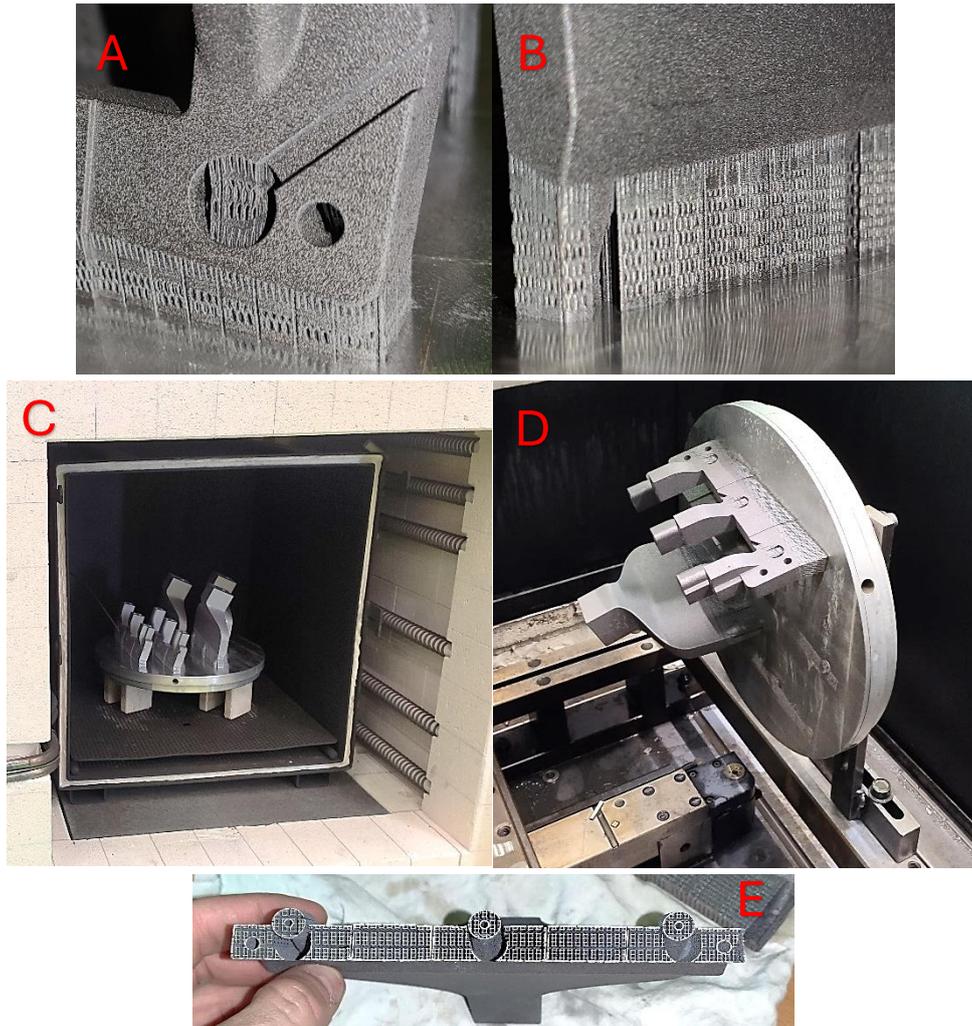


Figura 35: Alcuni dettagli in cui si evidenziano anche i supporti che ancorano i componenti alla piattaforma di stampa A) dettaglio di alcuni supporti relativi al componente “piastra” B) dettaglio di alcuni supporti relativi al componente “manifold” C) componenti alloggiati nel forno per il trattamento termico D) piattaforma di stampa montata su macchina EDM per rimuovere i componenti da essa E) dettaglio della vista inferiore del componente “manifold” rimosso dalla piattaforma, si nota la geometria costruttiva dei supporti

La seconda stampa è andata a buon fine e, dopo aver rimosso i pezzi dalla macchina e aver terminato le operazioni di pulizia dalla polvere, si è quindi proceduto alla rimozione dei supporti, ad un trattamento termico volto ad ottimizzare le proprietà meccaniche ed infine ad un'ulteriore pulizia superficiale dei componenti per rimuovere quanto più possibile le tracce della presenza di supporti.

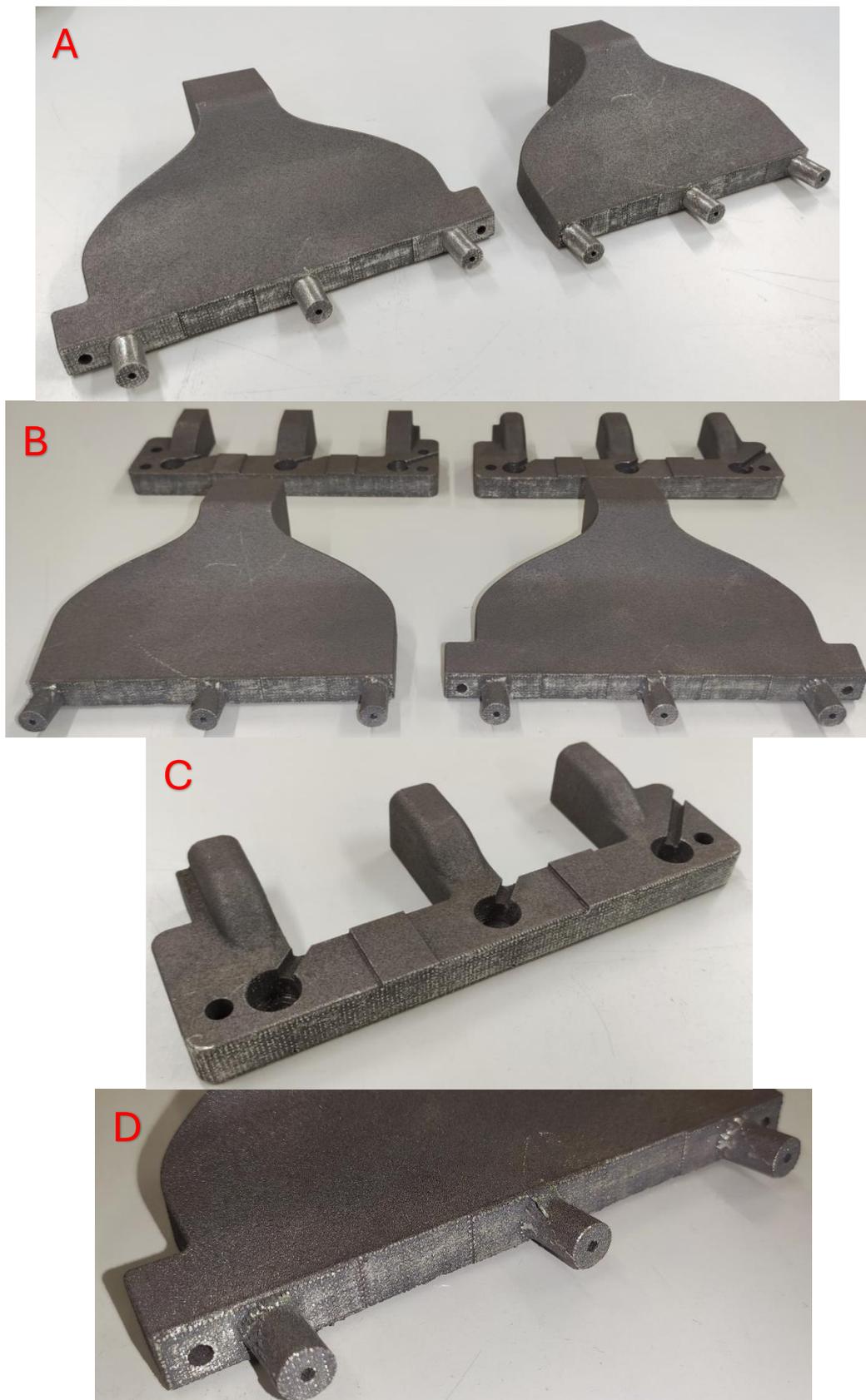


Figura 36: Componenti finiti A) manifold, versione con sistema di bloccaggio e senza B) manifold e piastra con e senza sistema di bloccaggio vicini al rispettivo componente complementare C)eD) dettaglio faccia inferiore di piastra e manifold, si notano in generale le zone in cui erano ancorati i supporti

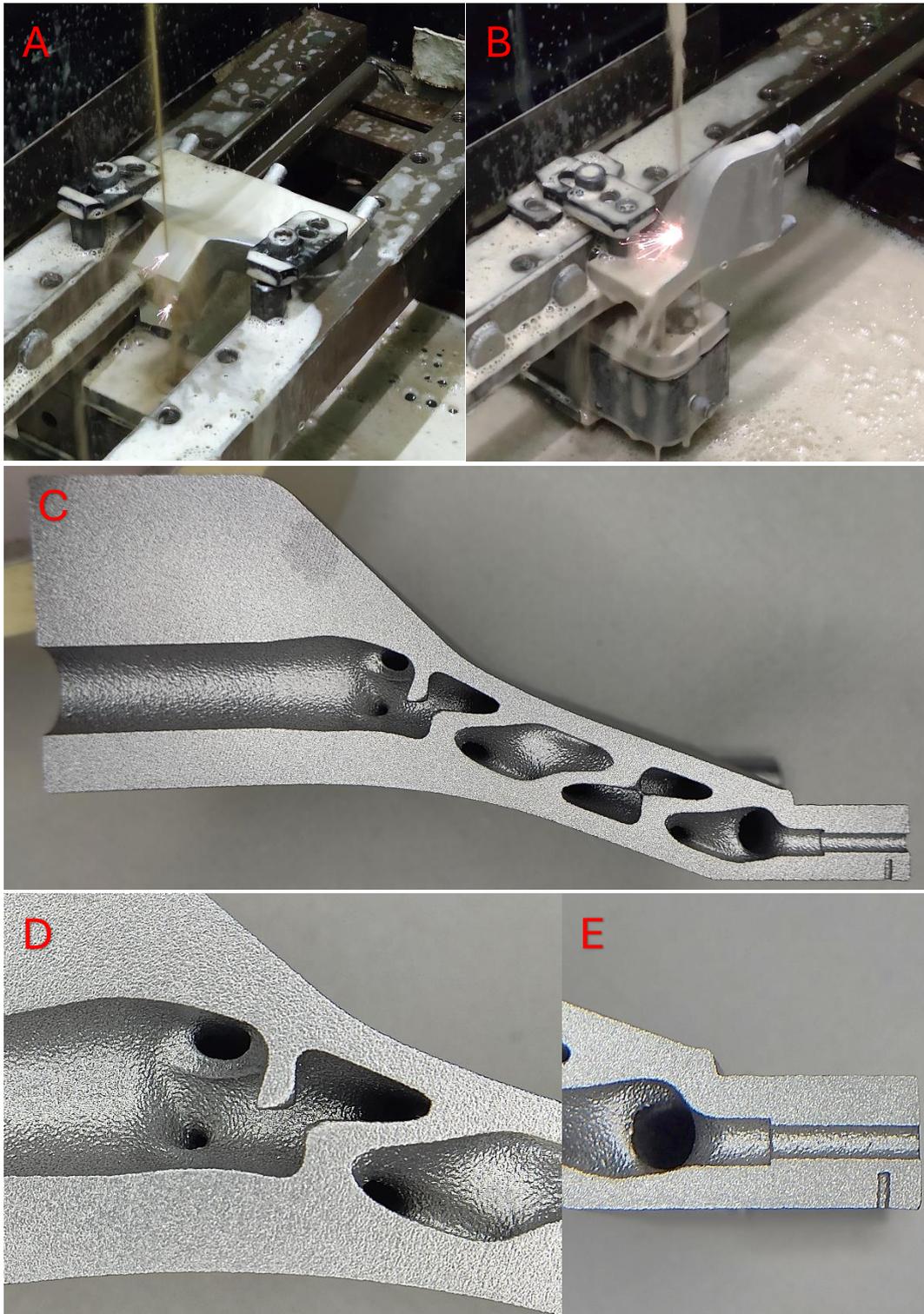


Figura 37: Dettagli del sezionamento del manifold finito A) manifold nella macchina EDM durante il primo taglio B) manifold nella macchina EDM durante il secondo taglio C) sezione mediana del manifold, dopo sabbatura D) dettaglio del plenum di ingresso del manifold D) dettaglio del plenum di uscita del manifold e del canale di un ugello, si nota anche il piccolo foro verticale per alloggiare la termocoppia

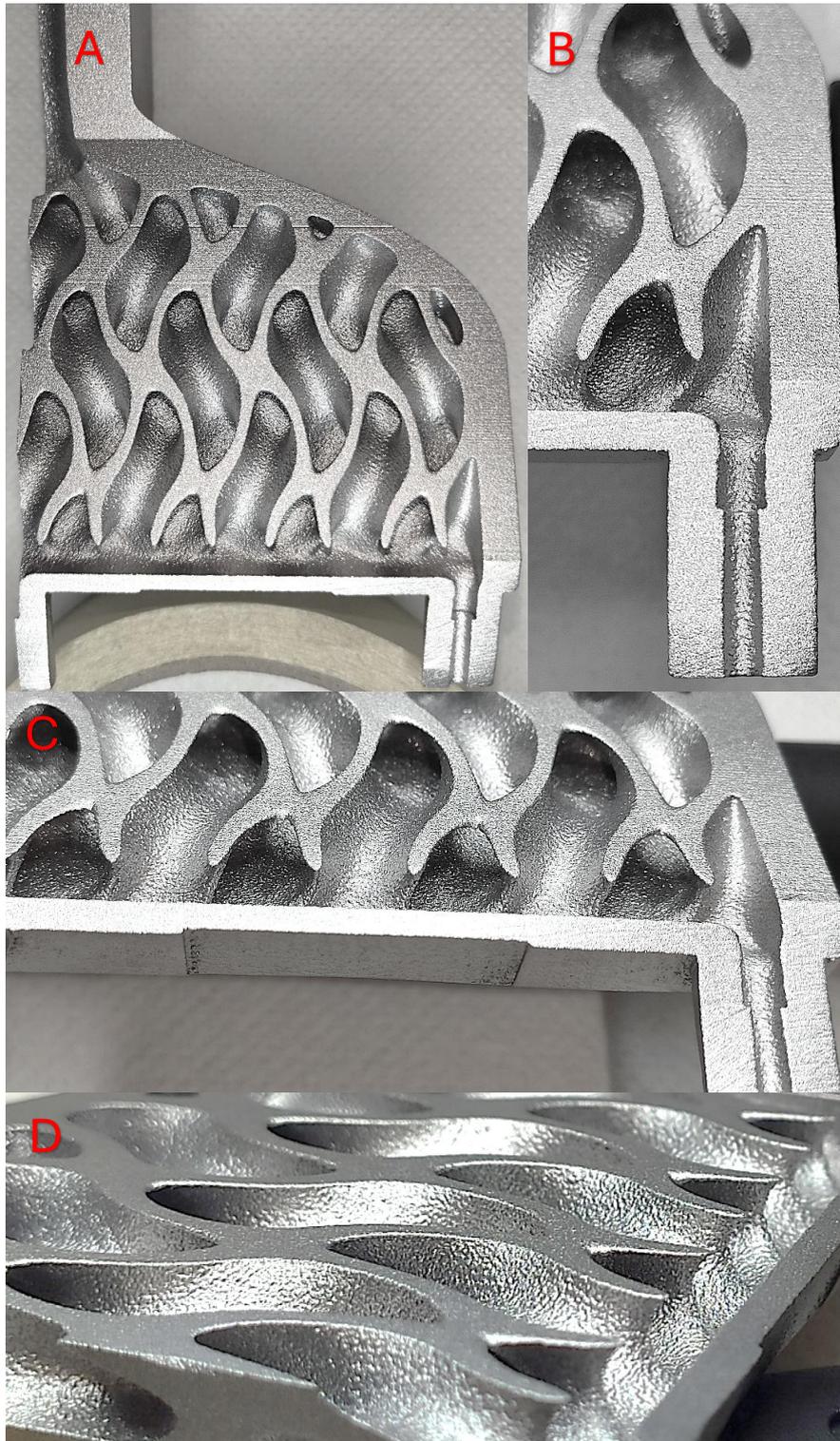


Figura 38: Dettagli della struttura a giroide del manifold A) sezione completa dell'interno del manifold, dal canale di ingresso agli ugelli di uscita B) dettaglio di uno degli ugelli di uscita C)eD) dettaglio del plenum di uscita, si notano i bordi arrotondati e l'ampia curvatura della parte di giroide che affaccia sul plenum

3. Bibliografia e sitografia

- <https://cordis.europa.eu/article/id/90779-additive-manufacturing-gets-a-boost/it>
- Wohlers Associates, “Wohlers report 2023: 3D Printing and Additive Manufacturing, Global State of the Industry”;
<https://wohlersassociates.com/product/wr2023/>
- Kumar Kanishka, Bappa Acherjee, *Revolutionizing manufacturing: A comprehensive overview of additive manufacturing processes, materials, developments, and challenges*, Journal of Manufacturing Processes, Volume 107, 2023, Pages 574-619, ISSN 1526-6125,
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612523009726>
- Alain Bernard, Jean-Pierre Kruth, Jian Cao, Gisela Lanza, Stefania Bruschi, Marion Merklein, Tom Vaneker, Michael Schmidt, John W. Sutherland, Alkan Donmez, Eraldo J. da Silva, *Vision on metal additive manufacturing: Developments, challenges and future trends*, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Volume 47, 2023, Pages 18-58, ISSN 1755-5817,
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1755581723001256>
- The-Digital-Factory-Report 2019, <https://www.thedigitalfactory.com/articles>
- Frédéric Cavallo, Judy Ceulemans, Benoit Gasner, Miguel Godino Martinez, Muzio Grilli, Yann Ménière, José Luis Meseguer Mayoral, Vasiliki Papanikolaou, Boyan Radev, Ilja Rudyk, Matthias Rungger, Karin Terzić, Heidi Van den Bulcke (EPO), *Innovation trends in additive manufacturing: Patents in 3D printing technologies*, European Patent Office, Munich, Germany, © EPO 2023, ISBN 978-3-89605-354-1
- M.A. Rabalo, E.M. Rubio, B. Agustina, A.M. Camacho, *Hybrid additive and subtractive manufacturing: evolution of the concept and last trends in research and industry*, Procedia CIRP, Volume 118, 2023, Pages 741-746, ISSN 2212-8271,
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827123003542>
- <https://committee.iso.org/home/tc261>
- [ISO/ASTM52900:2021](https://www.iso.org/standard/72900.html), *Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary*, 2021
- Abdul Hai Alami, Abdul Ghani Olabi, Adnan Alashkar, Shamma Alasad, Haya Aljaghoub, Hegazy Rezk, Mohammad Ali Abdelkareem, *Additive manufacturing in the aerospace and automotive industries: Recent trends and role in achieving sustainable development goals*, Ain Shams Engineering Journal, Volume 14, Issue 11, 2023, 102516, ISSN 2090-4479,
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447923004057>

- Schmitt, P., Zorn, S., Gericke, K. (2021) “*Additive Manufacturing Research Landscape: A Literature Review*”, in *Proceedings of the International Conference on Engineering Design (ICED21)*, Gothenburg, Sweden, 16-20 August 2021.
DOI:10.1017/pds.2021.34
- Srivastava, M., Rathee, S., *Additive manufacturing: recent trends, applications and future outlooks. Prog Addit Manuf* 7, 261–287 (2022),
<https://doi.org/10.1007/s40964-021-00229-8>
- Badr Elhazmiri, Nida Naveed, Muhammad Naveed Anwar, Mir Irfan Ul Haq, *The role of additive manufacturing in industry 4.0: An exploration of different business models*, Sustainable Operations and Computers, Volume 3, 2022, Pages 317-329, ISSN 2666-4127,
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666412722000186>
- <https://www.sbs.com.au/food/article/would-you-eat-a-steak-from-a-3d-printer/pl3bk7ski>