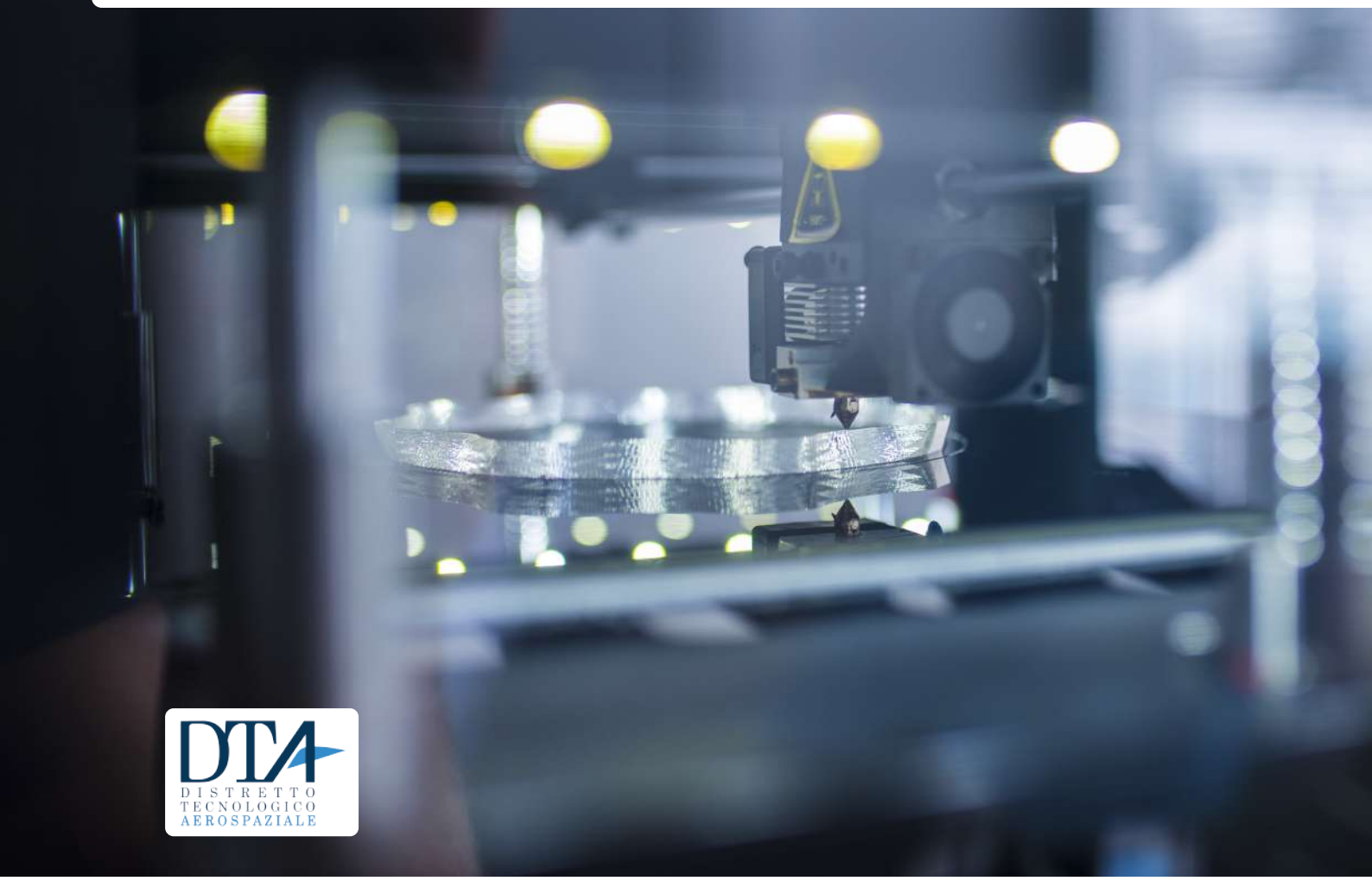
Avviso MIUR n. 1735 del 13/07/2017 - PROGETTI DI RICERCA INDUSTRIALE E SVILUPPO SPERIMENTALE
NELLE 12 AREE DI SPECIALIZZAZIONE INDIVIDUATE DAL PNR 2015-2020

UNIONE EUROPEA
Fondi Strutturali e di Investimento Europeo

Ministero dell'Istruzione dell'Università e della Ricerca

PON RICERCA E INNOVAZIONE



DTA DISTRETTO TECNOLOGICO AEROSPAZIALE

Progetto di Ricerca e sviluppo - SIADD

Soluzioni innovative per la qualità e la sostenibilità della manifattura additiva

RISULTATI E PROSPETTIVE DI SVILUPPO

Codice ARS01_00806

Questa pubblicazione rientra tra le azioni di promozione e diffusione dei risultati, così come previsto dal Reg. (CE) n.1828/2006 sezione I, ” del progetto “Soluzioni Innovative per la qualità e la sostenibilità dei processi di ADDitive manufacturing, acronimo SIADD”, Obiettivo realizzativo 8 “Valutazione, trasferimento tecnologico e disseminazione”, finanziato a valere sull’Avviso MUR approvato con D.D. del 13 luglio 2017 n. 1735 per la presentazione di Progetti di Ricerca Industriale e Sviluppo sperimentale nelle 12 Aree di Specializzazione individuate nel PNR 2015-2020. Area “Fabbrica Intelligente” Cod. ARS01_00806.

© Copyright

Tutti i diritti sono riservati.

È vietata qualsiasi riproduzione, totale o parziale, dei contenuti inseriti nella presente pubblicazione con qualsiasi mezzo, supporto o rete telematica, a scopo di lucro, o comunque a fini di profitto.
Sono consentite le citazioni a scopo scientifico purché accompagnate dai riferimenti alla presente pubblicazione.
Il Distretto Tecnologico Aerospaziale scarl e gli autori non si assumono alcuna responsabilità per l’attualità, la correttezza, la completezza o la qualità delle informazioni fornite.
In nessun caso il Distretto Tecnologico Aerospaziale scarl e gli altri autori saranno responsabili per danni diretti o indiretti derivati dall’uso dei contenuti di questa pubblicazione.

Il Distretto Tecnologico Aerospaziale ringrazia:

- i propri soci e i partner, pubblici e privati, che hanno contribuito alla ideazione e realizzazione del progetto "***Soluzioni Innovative per la qualità e la sostenibilità dei processi di ADDitive manufacturing, acronimo SIADD***" e al raggiungimento dei risultati tecnico-scientifici discussi in questa pubblicazione:

  CNR – STIIMA, Sistemi e tecnologie industriali intelligenti per il manifatturiero avanzato

  ELFIM Srl

  ENEA - Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile

  ENGINSOFT Spa

  GE AVIO Srl

  HB Technology Srl

  NOVOTECH Srl - Aerospace Advanced Technology

  Politecnico di Bari

  Politecnico di Milano

  UKE - Università Kore di Enna

  Università del Salento, Dipartimento di ingegneria dell'innovazione

  UMBRAGROUP S.p.A

- il responsabile scientifico del progetto di ricerca *prof. Antonio Domenico Ludovico;*

- i responsabili scientifici degli obiettivi realizzativi:
  prof.ssa Sabina Luisa Campanelli, prof.ssa Bianca Maria Colosimo, prof. Antonio Del Prete, prof.ssa Teresa Primo, prof. Luigi Maria Galantucci, prof. Roberto Spina, prof. Michele Dassisti;

- l' Esperti Tecnico Scientifico *prof. Raffaele Cioffi;*

- *Manuela Matarrese e Francesca Amatulli del DTA* che hanno gestito il progetto con grande diligenza e impegno, ma soprattutto con tanta pazienza e disponibilità;

- I dipendenti, i ricercatori, i collaboratori e gli assegnisti dei partner e i tanti giovani che hanno partecipato al progetto.

Prefazione

Il progetto SIADD proposto in risposta all'Avviso MUR n. 1735 del 13/07/2017 "PROGETTI DI RICERCA INDUSTRIALE E SVILUPPO SPERIMENTALE NELLE 12 AREE DI SPECIALIZZAZIONE INDIVIDUATE DAL PNR 2015-2020, e realizzato dal DTA e dai 12 partners industriali e scientifici coinvolti, lascia dietro di se una serie di importanti e pregevoli risultati che vanno al di là degli obiettivi realizzativi in esso previsti. SIADD è un'ulteriore testimonianza dell'importanza e dell'efficacia della relazione pubblico privata nel settore della ricerca e sviluppo; della strategicità della collaborazione tra Grandi Imprese e PMI per favorire una crescita delle capacità tecnologiche di queste ultime e di un conseguente avvicinamento al mercato dei loro prodotti e servizi; della consistenza di un sistema territoriale capace di raccogliere le sue eccellenze per nuove sfide scientifiche ed industriali, oltrechè della sua capcità di aprirsi a collaborazioni su reti lunghe coinvolgendo nuove competenze e professionalità da cui lasciarsi contaminare. Ancora una volta le nostre energie impegnate nalla progettazione e management del progetto, nella sua realizzazione e disseminazione dei risultati, hanno favorito il consolidamento di un sistema di relazioni compatto per affrontare le sfide che il contesto produttivo e scientifico devono oggi affrontare, irrobustendo l'intessitura sistemica che dalla nostra nascita ad oggi abbiamo sviluppato creando gradualmente una buona pratica a supporto dello sviluppo regionale e del suo livello di competitività riconoscibile e riconosciuta a livello nazionale ed internazionale.
I primi anni del Distretto Tecnologico Aerospaziale (DTA) sono infatti stati dedicati ad attività di ricerca e sviluppo tecnologico, alta formazione e formazione continua, iniziative di networking e disseminazione, che hanno permesso di generare nuove competenze e realizzare nuovi laboratori e infrastrutture di ricerca, in un'ottica collaborativa tra mondo industriale e accademico.
Il patrimonio costruito ha posto le basi delle 5 proposte progettuali presentate in risposta all' Avviso MUR sopra citato: esse si focalizzano sulle nuove specializzazioni tecnico-scientifiche per le quali la strategia di medio-lungo periodo fa leva su uno sforzo che esce fuori dal perimetro distrettuale/societario allargando la partecipazione alle iniziative del DTA ai diversi stakeholder regionali e nazionali.

SIADD (Codice ARS01_00806, area di specializzazione "*fabbrica intelligente*"), insieme ai progetti:

- ***Rpasinair:*** Integrazione dei Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto nello spazio aereo non segregato, (Codice ARS01_00820, area di specializzazione "*aerospazio*"),
- ***CLOSE*** to the Earth: studio e sviluppo sperimentale di satelliti VLEO, con particolare riferimento ai propulsori e alle missioni di osservazione della terra che tali satelliti potranno compiere (Codice ARS01_00141, area di specializzazione "*aerospazio*");
- ***Flet 4.0*** : Gestione ottimizzata di flotte di motori attraverso la manutenzione intelligente I4.0 (Codice ARS01_00820, area di specializzazione "*fabbrica intelligente*"),
- ***Tebaka:*** (Acquisizione della conoscenza di base di fenomeni sul territorio, con particolare riferimento alle condizioni proprie del ciclo di vita annuale delle colture agricole di grano, vite ed olivo e delle variabili significative del territorio/ambiente correlate) (Codice ARS01_00815, area di specializzazione "*agrifood*"),

implementa la strategia evolutiva del Distretto: giungere alla dimostrazione di servizi, prodotti e processi manufatturieri innovativi, fondamentali per le imprese per proporsi al mercato internazionale con nuovi prodotti, servizi e soluzioni per essere industrie del futuro: creative e inclusive, digitali e rispettose dell'ambiente.

Giuseppe Acierno, Presidente del Distretto Tecnologico Aerospaziale

SIADD, mediante un'ampia attività di ricerca e sperimentazione, ha permesso di studiare, mettere a punto e sperimentare nuove metodologie e tecnologie finalizzate a ridurre in maniera significativa le difettosità inevitabilmente generate dai processi di Additive Manufacturing (AM), attraverso la implementazione di soluzioni innovative per il monitoraggio del processo produttivo, la creazione di un significativo alleggerimento delle strutture metalliche, l'approfondimento delle singole fasi dei processi produttivi con focus sul design dei materiali simulando anche la fabbricazione di parti complesse, la investigazione circa la possibilità di realizzare strutture composite e sostenibili dal punto di vista della producibilità, lo studio della sostenibilità manifatturiera con la valutazione sia della potenzialità economica dei processi AM oggetto di studio, che la relazione costi/benefici delle stesse tecnologie ed infine fornendo un modello possibile di business per la valutazione dell'impatto tecnologico.

Nell'ambito del progetto SIADD sono state anche messe a punto nuove metodologie di gestione dei processi a valle della produzione additiva, tenendo in considerazione la particolare tecnica utilizzata, con l'obiettivo di fornire strumenti in grado di ottimizzare tali processi, nell'ottica del raggiungimento dei requisiti tecnologici previsti e del contenimento dei tempi e dei costi.

L'investimento complessivo per SIADD è stato di oltre 7 Milioni di Euro, di cui più del 50% dei costi è stato sostenuto dai proponenti del progetto.

Oltre ai risultati diretti, tra cui si annoverano, a titolo esemplificativo:

- nuove soluzioni per il monitoraggio del processo additive e prodotti stampati;
- nuove metodologie di incollaggio strutturale fra elementi in PEEK realizzati con Automated Fibre Placement ed elementi in metallo realizzati con Stampa 3D;
- nuove metodologie per l'ottimizzazione topologica per il design di componenti realizzati mediante AM;
- nuove metodologie per l'ottimizzazione strutturale di parti additive mediante ottimizzazione topologica e ottimizzazione di strutture reticolari (strutture lattice);
- provini prototipali per la realizzazione di strutture lattix alleggerite mediante tecnologia AM metallica e leghe di alluminio AlSi10Mg;
- nuove metodologie e algoritmi per la simulazione numerica di strutture lattice e di strutture composite con fibra ad angolo per ottenere un risparmio computazionale rispetto all'analisi 3D;
- sistema di monitoraggio delle performance di sostenibilità e protocollo di misura;
- Nuova metodologia di identificazione automatica di difetti con tomografia X in provini realizzati mediante tecnologie additive;
- strumenti numerici di calcolo per la simulazione del comportamento meccanico di strutture realizzate per AM

è stata effettuata una prima valutazione dell'impatto generato dal progetto in termini di ricadute occupazionali e di rafforzamento e ampliamento delle competenze tecnico scientifiche. Oltre a numerose tesi di laurea e di dottorato, SIADD ha generato un'ampia produzione scientifica (sono stati censiti oltre 50 articoli e pubblicazioni, di cui alcuni riportati in appendice) e ha permesso l'attivazione di oltre 30 nuovi contratti tra assegni di ricerca e collaborazioni a progetto, oltre che numerose tesi di laurea e di dottorato.

Il consolidamento delle relazioni tra i partner, oltre che gli importanti traguardi raggiunti in termini di conoscenze, competenze e capacità produttive, pone le basi per lo sfruttamento industriale dei risultati e l'espressione di nuova progettualità che permetterà di raggiungere obiettivi sempre più ambiziosi.

Antonio Domenico Ludovico, Responsabile Scientifico del progetto SIADD

Sommario

Introduzione **8**
L'Additive Manufacturing (AM) 9
L'AM in ambito spaziale 11
Perché SIADD 11
Sezione I - Sintesi dei risultati raggiunti **13**
Premessa 13
Strumenti digitali di ottimizzazione di prodotto 14
Dati virtuali da simulazione di prodotto e processo 19
I dati reali acquisiti da sensorizzazione in-situ 25
Aspetti di sostenibilità ambientale, economica ed organizzativa dei processi AM 31
Sezione II - Settori produttivi beneficiari delle soluzioni proposte **35**
Sezione III – Il Mercato dell'additive manifacturing **41**
Introduzione 41
Applicazioni della tecnologia AM 42
Applicazioni nel settore aerospaziale 43
Potenziali ricadute sulla catena del valore e sulle funzioni aziendali 43
Fattori che influenzano la crescita del mercato AM nel settore aerospaziale 44
Il mercato AM con particolare focus sul settore aerospaziale 47
Bibliografia **51**
Appendice **53**
La produzione scientifica SIADD 53

Introduzione

L'evoluzione delle tecnologie cosiddette trasformative, in particolare quelle digitali, ha cambiato radicalmente il modo in cui operano gli impianti di produzione. I macchinari industriali stanno diventando sempre più interconnessi, aprendo la strada alle fabbriche del futuro, note anche come fabbriche intelligenti, ovvero la risposta alle crescenti esigenze e sfide che l'industria manifatturiera deve affrontare. D'altro canto, il mercato impone alle imprese di avere un atteggiamento sempre più flessibile e versatile, in quanto per essere competitivi occorre fornire ai propri clienti dei prodotti sempre più personalizzati, che richiedono un elevato grado di precisione nella pianificazione e nell'utilizzo delle risorse a disposizione. In parallelo si prevede un aumento dell'efficienza, della produttività e della qualità e, allo stesso tempo, una riduzione al minimo dei costi di produzione allo scopo di garantire la sopravvivenza delle imprese.

In questo contesto, il progetto SIADD è strettamente connesso al concetto di "Fabbrica Intelligente", poiché fonda l'attività di ricerca e sviluppo sperimentale in ambito manifattura sostenibile, andando a studiare, analizzare ed implementare un sistema olistico di monitoraggio delle fasi di processo. Pertanto l' obiettivo è la messa a punto di tecniche di manifattura predittiva, basate sulla connessione tra dati virtuali e dati fisici, estrapolati direttamente dai processi di fabbricazione di AM (Additive Manufacturing), che rappresentano l'elemento portante del progetto SIADD.

SIADD in sintesi

Bando: Avviso MUR n. 1735 del 13/07/2017 "PROGETTI DI RICERCA INDUSTRIALE E SVILUPPO SPERIMENTALE NELLE 12 AREE DI SPECIALIZZAZIONE INDIVIDUATE DAL PNR 2015-2020

Progetto: *Soluzioni Innovative per la qualità e la sostenibilità dei processi di ADDitive manufacturing - SIADD*

Partner di progetto: DTA scarl (capofila), CNR, ELFIM Srl, ENEA, ENGINSOFT Spa, GE AVIO Srl, HB Technology Srl, NOVOTECH Srl, Politecnico di Bari, Politecnico di Milano, UKE - Università Kore di Enna, Università del Salento, UMBRAGROUP S.p.A

Responsabile Scientifico: prof. Antonio Domenico Ludovico, Politecnico di Bari

Budget: 7,6 MLEUR

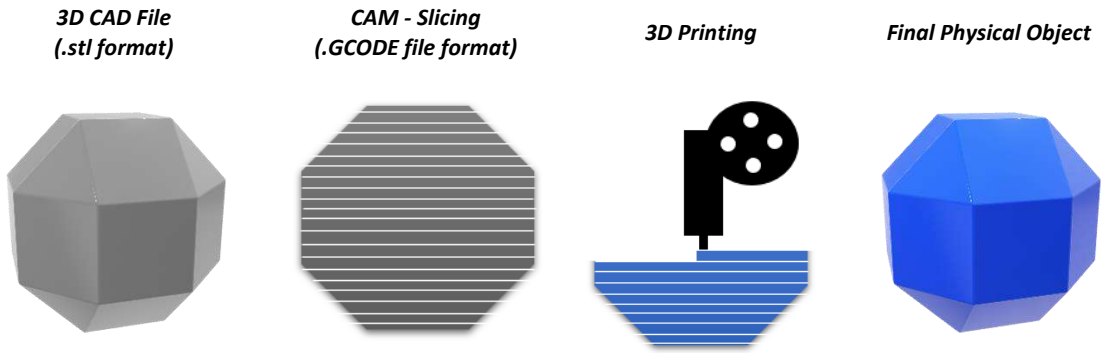
Contributo pubblico: ≈ 50% del budget

Data di inizio: 1 luglio 2019

Durata: 42 mesi

L'Additive Manufacturing (AM)

L'AM è una delle tecnologie chiave per la transizione verso le fabbriche intelligenti, in quanto si tratta di un metodo di produzione digitale e ripetibile. A tal proposito, secondo la definizione fornita dall'*American Society for Testing and Materials* (ASTM F2792, 2013), la tecnologia della "stampa 3D", anche denominata Manifattura Additiva, è un processo di fabbricazione di parti fisiche tridimensionali, che si contrappone ai processi di produzione tradizionali di tipo sottrattivo, in quanto è basato sull'unione di strati, mediante sovrapposizione, a partire da un modello digitale CAD/CAM. Nella figura sottostante si riporta il principio di funzionamento di un tipico processo di stampa 3D.



Principio di funzionamento generale del processo di stampa 3D

In generale, un qualsivoglia particolare viene progettato utilizzando un software di disegnazione assistita da computer (CAD 3D Model), successivamente il file del modello viene processato da un software di *slicing*, che lo trasforma in istruzioni sotto forma di un codice noto come codice geometrico (GCODE). Più in dettaglio, lo *slicing* è una delle fasi principali del processo dal momento che consente di passare da un modello tridimensionale di un oggetto alla sua versione "affettata" (*slicing* appunto), in modo da creare il G-code. Il formato del file GCODE varia in base alla specifica tecnologia AM e contiene anche le istruzioni per gestire eventuali variabili ambientali (es. temperatura della camera e del piano di stampa; potenza di ventilazione, ecc.). Utilizzando il file GCODE viene eseguito il processo di stampa e viene generato l'oggetto fisico. Il codice viene inviato alla macchina di stampa 3D per produrre il componente finale, strato dopo strato. In ultimo, viene eseguito un processo di raffreddamento controllato, prima che la parte possa essere staccata dalla piastra su cui viene costruita. Per la stampa 3D di particolari in metallo, in molti casi, prima del distacco della parte dalla piastra di costruzione viene eseguito anche un post-processing, come ad esempio un trattamento termico specifico.

E' evidente che il processo si presta, grazie alla sua apparente semplicità, ad una diffusione ampia nel mondo dell'industria, in quanto la tecnologia di AM può coniugare un buon grado di precisione e la specificità della manifattura artigianale con la produzione massiva dei processi industriali. In generale, i vantaggi della tecnologia in esame sono indubbi:

- possibilità di gestire particolari aventi geometrie anche molto complesse, come ad esempio strutture reticolari, impossibili da produrre con processi di fresatura e fusione;
- possibilità di produrre componenti senza procedure di assemblaggio, poiché il processo produttivo è continuo e la parte viene prodotta *one shot* ;
- riduzione del materiale di scarto rispetto ai classici processi produttivi ;
- riduzione del consumo di energia rispetto ai processi tradizionali.

Le tecnologie di stampa 3D richiedono ulteriori attività di sviluppo sperimentale, che possano, da un lato, fornire prodotti aventi performance meccaniche comparabili con quelle di componenti in materiale metallico e composito utilizzati per strutture primarie; dall'altro, introdurre metodologie e procedure che possano innalzare

il livello di efficienza e qualità dei prodotti finiti, senza trascurare la necessità di ridurre oltremodo i tempi di produzione.
Per comprendere meglio questi concetti, si ritiene importante precisare che il mondo della stampa 3D è molto più complesso di quanto si pensi e, soprattutto negli ultimi 10 anni, ha subito una notevole accelerazione.

La tecnologia della stampa 3D muove i primi passi nel 1980, quando Hideo Kodama deposita la prima domanda di brevetto, introducendo per la prima volta un sistema di prototipazione rapida di fotopolimeri che utilizza la luce UV per indurire il materiale. L'idea però non verrà mai commercializzata.
Successivamente, nel 1983, Charles W. Hull propone il primo concreto sviluppo tecnologico per il settore, ovvero inventa la stereolitografia (SLA) e crea la prima parte stampata in 3D. Hull coniò il termine stereolitografia nella sua domanda di brevetto dell'8 agosto 1984, intitolata *"Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography"*.
Il brevetto statunitense US4575330 A arrivò più tardi, l'11 marzo 1986. Hull definì la stereolitografia come un metodo e un apparato per realizzare oggetti solidi, stampando in successione strati sottili di materiale. In seguito, la SLA è stata ampiamente utilizzata per attività di prototipazione rapida e, più in generale, per attività di produzione. Nel 1986 Hull co-fondò 3D Systems e l'anno successivo diede vita alla prima stampante 3D, la stampante per stereolitografia (SLA) SLA-1.
Successivamente, nel 1988, Carl Deckard brevettò la tecnologia di sinterizzazione laser selettiva (SLS), una tecnica di stampa 3D comunemente impiegata per realizzare oggetti metallici, in cui granelli di polvere vengono fusi insieme localmente da un laser.
Più tardi, nel 1989 Scott Crump deposita un brevetto per la modellazione a deposizione fusa (Fused Deposition Method - FDM). Questa è stata, in ordine cronologico, la terza delle principali tecnologie di stampa 3D: si basa sull'estrusione di materiale termoplastico riscaldato attraverso un ugello posto sulla testina di stampa, sempre controllato da computer, per costruire i diversi strati della parte. Scott Crump sarebbe poi diventato il co-fondatore di Stratasys, Inc.
Sempre in quell'anno Hans Langer fonda EOS GmbH (Germania) e diventa leader nel settore della stampa basata sulla tecnologia della sinterizzazione. Passano circa una decina di anni e, nel 1997, AeroMat introduce il primo processo di fabbricazione di componenti metallici stampati in 3D, utilizzando la produzione additiva laser (LAM), che impiega laser ad alta potenza per fondere leghe di titanio in polvere.
Nel 2005, il Dr. Adrian Bowyer inventa il concetto open source RepRap, per creare un processo di stampa 3D autoreplicante. Questo sviluppo aprirà le porte alla creazione di diverse nuove stampanti 3D.
Nel 2008 "Darwin" diventa la prima stampante 3D disponibile in commercio, progettata secondo il concetto RepRap e, sempre in quell'anno, Shapeways lancia il primo servizio di stampa 3D che consente agli utenti di inviare i propri file per la fabbricazione personalizzata.

Nonostante si sia partiti con la tecnologia AM agli inizi degli anni '80, solo tra il 2010 e il 2015 si comincia a parlare di scalabilità, infatti aziende come la Local Motors, una startup di Phoenix (Arizona), espone la Strati al Salone di Detroit, una delle prime auto stampate in 3D. Sempre in quel periodo, non si può non citare un altro dei passi in avanti per la tecnologia della stampa 3D, registrato grazie all'ingresso nel settore da parte di Markforged, con la stampante 3D in grado di usare metodi come Fused Filament Fabrication (FFF) e Continuous Fiber Reinforcement (CFR), che permettono di costruire particolari in modo più rapido e accurato, introducendo diverse opzioni in termini di materiali. La tecnologia CFR, proprietà di Markforged, ha aggiunto resistenza alle parti e ha dato la possibilità di realizzare componenti in materiale composito in grado, talvolta, anche di sostituire particolari in metallo.

L’AM in ambito spaziale

All’inizio l’AM è stata utilizzata con lo scopo di realizzare prototipi unici dei componenti desiderati, per poi passare ad una produzione massiva grazie alla filiera produttiva tradizionale ma, quando scade il brevetto di Carl Deckard, relativo al processo SLS, si registra un nuovo passo in avanti per l’espansione del settore: la NASA porta nello spazio la prima stampante 3D.
A tal proposito, un settore che trarrà grandi benefici dalla tecnologia AM è proprio quello aerospaziale, in quanto quasi tutti i componenti che operano nello spazio sono realizzati su misura (custom), quindi in condizioni ideali per questa tecnologia di produzione.
L’Industria spaziale ha iniziato a utilizzare l'AM in una varietà di applicazioni, in generale, per due motivi: in primo luogo, sono possibili risparmi di massa dal 40% al 90% [1] e la massa è direttamente correlata al costo (poiché veicoli spaziali più massicci richiedono ovviamente più carburante e spinta); in secondo luogo, l’AM può produrre parti complesse molto più velocemente rispetto ai processi di produzione tradizionale, riducendo i tempi di fabbricazione da un anno a soli 4 mesi [2].
La NASA e l’ESA hanno condotto diverse ricerche su come utilizzare l'AM in una varietà di applicazioni legate allo spazio, ovvero dall'utilizzo per stampare i sistemi di propulsione CubeSat [3], alla stampa di ceramiche [4], all'utilizzo del Laser Engineered Net Shaping (LENS) [5] con la regolite lunare e marziana [6] (con il termine regolite si indica il suolo lunare, ma anche quello marziano), alla potenziale stampa di un intero veicolo spaziale in orbita [7].
Nonostante le diverse applicazioni sopra citate, l’AM nell'industria spaziale non è ancora utilizzata in maniera massiva e ciò è dovuto principalmente alla difficoltà di modellare il processo di produzione e di prevedere, con opportuni fattori di sicurezza, le proprietà delle parti stampate. Questo porta ad una mancanza di standardizzazione e quindi ad un uso limitato nell'industria spaziale.

Perché SIADD

Negli ultimi anni sono stati compiuti numerosi sforzi per caratterizzare e modellare le proprietà delle parti realizzate con AM, ma si tratta di un processo non semplice ed in forte evoluzione, in quanto esiste una variabilità intrinseca nella natura della tecnologia che rende complessa la modellazione.
La variabilità proviene da molte fonti e si stanno compiendo sforzi significativi per modellare e prevedere le proprietà del materiale.
Tale variabilità rappresenta una delle sfide principali affrontate nell’ambito del progetto SIADD. Inoltre volendo integrare l'AM in una fabbrica intelligente, oltre lo scarso livello di connettività e tracciabilità, le aziende incontrano difficoltà non banali nello stabilire un flusso di lavoro AM automatizzato e sicuro, basato su principi di sostenibilità. Senza tenere presente questi fattori nella fase iniziale, i produttori che cercano di rendere l’AM una parte delle loro fabbriche intelligenti fanno fatica a dimensionare l'uso della tecnologia, man mano che le loro operazioni crescono. I risultati relativi alla costruzione di un modello interpretativo delle tecnologie e fondativo del nuovo livello di intelligenza, che permette di migliorare le prestazioni dei processi di AM, sono oggigiorno oggetto di studio in molte diverse direzioni (qualità, stabilità, produttività, efficienza e, quindi, sostenibilità).
A partire da queste considerazioni, il progetto SIADD ha tra i suoi obiettivi primari quello di combinare nel nuovo livello di “intelligenza” della fabbrica (quello della sensorizzazione diffusa e del trattamento di grandi quantità di dati) la fusione tra:

- gli strumenti digitali di ottimizzazione di prodotto ;
- i dati virtuali provenienti da simulazione di prodotto e processo ;
- i dati reali acquisiti da sensorizzazione in-situ ;
- aspetti di sostenibilità ambientale, economica ed organizzativa dei processi AM.

Per tali finalità, per le tecnologie considerate nell'ambito del progetto SIADD è stato definito un modello tecnologico a supporto della progettazione del *sensing system*, orientato alla misurazione online dei parametri principali di processo e finalizzato a creare dei database da utilizzare per la predicibilità dei processi stessi.
Infatti, il progetto nasce per superare uno dei principali ostacoli alla diffusione industriale delle tecnologie di fabbricazione additiva, ossia la scarsa stabilità e ripetibilità della deposizione, andando ad integrare, in fase di processo, degli opportuni sistemi di acquisizione dati. L'esigenza di approfondire e migliorare il livello di conoscenze e specializzazione in ambito AM deriva anche dal fatto che, mentre in una fase iniziale di sviluppo della tecnologia, il principale svantaggio era rappresentato dagli alti costi di produzione che scoraggiavano un suo uso massiccio in contesti industriali, ormai con la scadenza dei brevetti e la disponibilità di progetti open source, ci sono oltre 180 produttori di sistemi di stampa 3D in tutto il mondo, quindi le imprese sono pronte per integrare queste tecnologie nei loro flussi produttivi. Per questi motivi l'AM può essere considerata una delle più importanti tecnologie abilitanti della quarta rivoluzione industriale [8].

Sezione I - Sintesi dei risultati raggiunti

Premessa

Il progetto SIADD - *"Soluzioni Innovative per la qualità e la sostenibilità dei processi di ADDitive manufacturing"* affronta alcune delle più importanti sfide previste dai programmi nazionali e comunitari di R&D (Programma Nazionale della Ricerca (PNR 2015-2020), strategico Europeo di Ricerca e Innovazione e Horizon 2020 (H2020)), occupandosi dello sviluppo e del potenziamento delle tecnologie emergenti in ottica smart manufacturing e l'interesse dedicato alla sostenibilità manifatturiera nell'intera catena di produzione.
L'AM è indicata tra le tecnologie abilitanti di Industria 4.0, insieme ai big data, alla sensorizzazione dei macchinari e alla digitalizzazione di processo: tutti elementi fondanti del progetto SIADD.
Coerentemente con la visione di Industria 4.0, il progetto ha puntato al superamento di una delle principali barriere alla diffusione industriale delle tecnologie di fabbricazione additiva, ossia la scarsa stabilità e ripetibilità della deposizione, grazie all'integrazione nelle piattaforme SLM e DED di sistemi di acquisizione dati.
Più precisamente, nel corso del progetto sono state sviluppate soluzioni di acquisizione di dati online, per trarre vantaggio dalla grande mole di informazioni disponibili layer-by-layer, attraverso algoritmi di data mining e tecniche innovative di monitoraggio di processo, mirate a seguire in tempo reale l'evoluzione della stampa 3D ed identificare le condizioni reali di processo (ad esempio fornendo un rilevamento dell'insorgenza di difetti).
Le ricerche e le sperimentazioni condotte in SIADD sono state focalizzate su:

- Ottimizzazione dei trattamenti termici su palette turbina in TiAl realizzate mediante Electron Beam Melting;
- Monitoraggio in-situ di processi Laser SLM;
- Monitoraggio in-situ di processi Laser (DLMD);
- Sviluppo di metodologie progettuali per la realizzazione di componenti metallici in Architectured Materials;
- Sviluppo di componenti con processi di AM (AFP/CFF) per materiali compositi;
- Sviluppo di processi per riduzione pesi e incremento delle prestazioni in ambiti marini ed aeronautici;
- Analisi della sostenibilità ambientale, economica ed organizzativa dei processi in ambito SLM/DMDL/EBM/CF-APP

Al termine del progetto (dicembre 2022), sono stati rilasciati oltre 70 deliverables consistenti in studi e ricerche,progettazione prototipale di provini, applicativi software, report sulle sperimentazioni di nuove metodologie e processi, test case, etc.
Nella presente sezione vengono illustrati solo alcuni dei principali risultati raggiunti in cui confluiscono i contributi dati dai vari partner nello sviluppo di una o più attività progettuali e dei relativi deliverables.
Tali risultati vengono raggruppati per le 4 macrocategorie individuate:

1. strumenti digitali di ottimizzazione di prodotto;
2. dati virtuali da simulazione di prodotto e processo;
3. dati reali acquisiti da sensorizzazione in-situ;
4. analisi della sostenibilità ambientale, economica ed organizzativa dei processi AM.

Per ciascun risultato illustrato, vengono riportati i riferimenti al progetto in termini di:
- linea di ricerca o Obiettivo Realizzativo (in sigla OR);
- le specifiche attività condotte, i partners che vi hanno preso parte e i codici dei relativi deliverables.

Strumenti digitali di ottimizzazione di prodotto

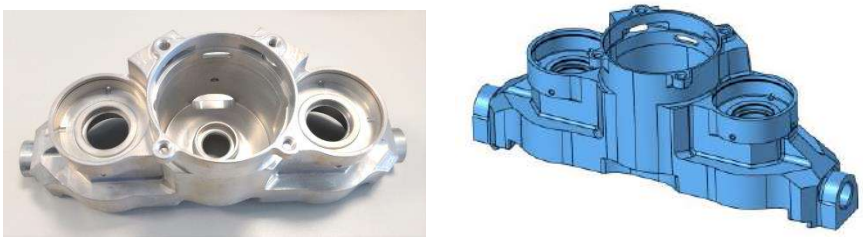
Riferimenti al progetto SIADD
Linea di ricerca OR 4 - *Sviluppo di metodologie progettuali per la realizzazione di componenti metallici in Architectured Materials (AMat)*, coordinato **dal prof. Antonio del Prete**, con il supporto della prof.ssa Teresa Primo, dall'Università del Salento.
Attività 4.1. *Definizione dei requisiti ed individuazione delle specifiche*, Umbra Group (responsabile attività), con il contributo di POLIBA, UNISALENTO, POLIMI, ENEA, ENGINSOFT, HBT, deliverables **D4.1.**
Attività 4.8 . *Test case ed analisi di sostenibilità*, HBT (resp attività), POLIBA, ENGINSOFT, UMBRA, POLIMI, deliverables **D4.8.1, D 4.8.2**

Oggigiorno le imprese appartenenti al settore dei trasporti, in particolare quelle operanti in ambito aeronautica ed aerospazio, pongono tra le principali sfide, in materia di fabbricazione di componenti, quella di poter costruire elementi strutturali primari che abbiano elevati rapporti di rigidezza/peso e resistenza/peso, ma che allo stesso tempo conservino quelle caratteristiche prestazionali necessarie per un utilizzo in sicurezza.
E' evidente che questo tipo di ottimizzazione non può prescindere dal puntare anche a ridurre i tempi e i costi di fabbricazione, senza tralasciare l'esigenza di orientarsi verso processi a basso impatto ambientale. Ciò premesso, è noto che la realizzazione di componenti con processi additivi presenta dei vincoli intrinsechi legati alle caratteristiche tecnologiche (per esempio, presenza di geometrie in sottosquadro, pareti sottili, etc.). Nasce così l'esigenza di mettere a punto strumenti digitali avanzati, insieme con opportune metodologie di progettazione, in grado di effettuare ottimizzazioni topologiche, a supporto dell'introduzione di processi di AM.
Per comprendere meglio l'importanza di questo concetto pensiamo, ad esempio, a quanto può costare lanciare un razzo cargo nello spazio e come è cambiato questo costo nel corso degli anni.
Facendo riferimento ai dati resi disponibili nel report ***"The Cost of Space Flight"*** prodotto dal Center for Strategic and International Studies, se diamo uno sguardo al costo per chilogrammo dei lanci spaziali in tutto il mondo dal 1960 ad oggi, oltre a vedere chiaramente che il XX secolo è stato caratterizzato dalla competizione tra i due avversari della Guerra Fredda, l'Unione Sovietica e gli Stati Uniti, si nota che la corsa allo spazio ha portato a grandi progressi tecnologici, ma che queste innovazioni hanno avuto anche un costo molto alto.
Negli anni '60 la NASA ha dichiarato di aver speso 28 miliardi di dollari per far atterrare gli astronauti sulla luna, un costo che oggi equivale a circa 288 miliardi di dollari tenendo conto dell'inflazione. Negli ultimi due decenni, le cosiddette "startup spaziali" hanno dimostrato di poter competere con i principali player aerospaziali, quali Boeing e Lockheed Martin, anche perché oggi il lancio di un razzo SpaceX può costare anche il 97% in meno rispetto ad un viaggio del Soyuz russo negli anni '60.

E' quindi evidente l'importanza, anche strategica, che ricopre il risparmio di 1 solo Kg di struttura nel settore spaziale. A tal proposito, si riportano di seguito alcuni test case grazie ai quali il lettore può comprendere le potenzialità offerte da questa tecnologia di fabbricazione.

Test case 1 – Corpo attuatore (o housing) appartenente ad un sistema elettromeccanico di potenziale impiego nel settore spaziale (Figura 1.1)

Il prodotto oggetto di studio è stato pensato per poter essere utilizzato in una vasta gamma di applicazioni, tra cui la movimentazione di strumentazione accessoria installata a bordo della navicella spaziale, come per esempio l'estrazione di un'antenna o apparecchiatura simile. L'housing è attualmente in lega di Alluminio e, dovendo contenere alcuni dispositivi di attuazione, richiede un elevato grado di affidabilità con tolleranze abbastanza strette, attualmente realizzate con processi di fabbricazione tradizionali. Il componente viene oggi realizzato per asportazione di truciolo, in quanto si parte da un blocco pieno del materiale indicato e si procede con lavorazioni successive di fresatura, foratura, tornitura, etc. fino ad arrivare al particolare finito. Il processo produttivo, a seconda dell'applicazione, può prevedere anche trattamenti termici, come la tempra o il rinvenimento.



(a) (b)

Figura 1.1 - Corpo attuatore (housing): oggetto di studio (a) e modello CAD (b)

Una volta individuato il componente oggetto di studio, sono state elaborate le specifiche necessarie per configurare il problema di ottimizzazione, andando a schematizzare il setup strutturale e gli spazi di design e non-design, ovviamente tenendo in considerazione i massimi ingombri ammissibili.
Dopo la definizione e l'analisi dei requisiti, si è passati alla revisione del progetto in ottica AM ed alla sua fabbricazione. In Figura 1.2 si riportano alcune immagini del particolare riprodotto con tecnologia AM, post-lavorazioni meccaniche, che hanno interessato principalmente le sedi di alloggiamento dei cuscinetti ed i *rod* di collegamento del particolare in oggetto, oltre ad una rifinitura delle sedi cilindriche dei motori elettrici.

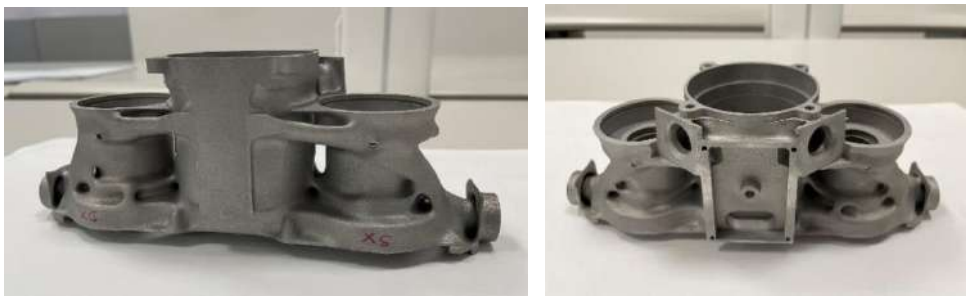


Figura 1.2 – Viste housing prodotto in AM

Il risultato dell'attività di ricerca ha mostrato come, nella realizzazione in AM, le fasi di lavorazione sono ridotte; inoltre, già a partire dal materiale di partenza, la quantità è molto inferiore, essendo necessaria solo poco più della quantità finale della massa del particolare. Per quanto riguarda i consumi energetici, per la lavorazione convenzionale, vengono ricavati dal consumo energetico della macchina e dai tempi totali di lavorazione; mentre per la lavorazione additiva, sono richiesti: produzione polveri; stampa SLM; rimozione supporti; trattamento termico (stress relieved); finitura.

	Lavorazione convenzionale	Lavorazione AM
Caso studio corpo attuatore (housing)		
Volume materiale raw	1.237 dm^3	326 dm^3
Materiale	Al7075 densità: 2.81 g/cm^3	AlSi10, densità 2.67 g/cm^3
Massa materie raw	3,5 kg	0,870 kg
Masse recuperabili in loco	0 kg	0,232 kg
Massa part.	0,535 kg	0,507 kg
Tempi lavorazione tot.	29,5 ore	26 ore
materiale waste tot.	85% (2.965kg)	15% (131g)
Consumo energetico richiesto per produzione	6.5 MJ	5.76 MJ

Tabella 1.1: Confronto lavorazioni convenzionale e AM, caso di studio "corpo attuatore (housing)" 4.8.2

Con l'AM è stato possibile da un lato ridurre e semplificare le fasi del processo di produzione; dall'altro ridurre lo scarto di materie prime per la mancanza di operazioni di asporto di truciolo, restando solo le operazioni di finitura, che interessano una minima quantità di materiale. Tutto ciò implica una notevole riduzione dell'impatto ambientale.

Test case 2 – Particolare strutturale in Acciaio PH13-8Mo

Approccio simile al *test case 1* è stato applicato ad un particolare strutturale in Acciaio PH 13-8Mo, realizzato attualmente per asporto di materiale (processo tradizionale).

	Lavorazione convenzionale	Lavorazione AM
Caso studio "particolare in Acciaio PH13-8 Mo		
nr. di componenti del particolare	5	2
Tempo di lavorazione complessivo	16 ore	11 ore
Peso tot.	45g	42g
Fasi di assemblaggio	5	2
Materiale di scarto	37g	18g

Tabella 1.2: Confronto lavorazioni convenzionale e AM, caso di studio "particolare in Acciaio PH13-8Mo"

Il risultato conseguito è nel complesso molto positivo, principalmente perché è stato semplificato il processo di fabbricazione, in quanto si è passati da nr. 5 sub-componenti a nr. 2 soli sub-componenti nella realizzazione in AM, anche se è necessario effettuare opportune lavorazioni di tornitura e finitura post produzione, in modo da poter procedere con l'installazione.

Di particolare interesse è stata anche la fase di revisione progettuale delle molle cilindriche elicoidali, la cui funzione è equivalente alla funzione della wave spring, della parte realizzata con tecnologie convenzionali.

In definitiva, quella dell'AM è sicuramente una strada percorribile per la realizzazione di molte parti meccaniche, perché vengono notevolmente ridotti e semplificati i processi di produzione; inoltre lo scarto di materie prime si riduce grazie all'assenza di lavorazioni per asporto di truciolo, restando principalmente solo le operazioni di finitura, nelle quali il materiale asportato è davvero minimo. Tutto ciò implica una notevole riduzione in termini di impiego di macchinari, lavorazioni ed energia, con un conseguente minore impatto ambientale.

Test case 3 – Inserto per ricircolazione su una vite a ricircolo di sfere

Il *test case 3* si riferisce allo studio relativo alla realizzazione di un inserto per la ricircolazione, una delle parti costituenti una vite a ricircolo di sfere. Si tratta di componenti che hanno la peculiarità di essere realizzabili soltanto per mezzo di stampa additiva, per i quali non è percorribile la strada di una lavorazione convenzionale, causa dell'eccessiva complessità. Pertanto questo caso si differenzia da quelli precedenti che riprogettano componenti ottenuti con lavorazioni convenzionali. L'inserto per ricircolo in esame (Figura 1.3a) ha la funzione di garantire la corretta ricircolazione delle sfere durante il funzionamento della vite, infatti si colloca all'interno dell'assieme (Figura 1.3b)

Figura 1.3a – Inserto per ricircolo

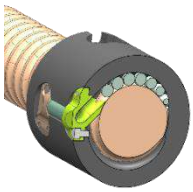


Figura 1.3b – Sezione vite a ricircolo di sfere

A partire dalla configurazione baseline del componente si è giunti alla definizione di due geometrie ottimizzate, il cui progetto è stato guidato da due obiettivi principali: riduzione del peso e massimizzazione delle frequenze naturali, a parità di performance strutturali e funzionali.

Nel corso del progetto sono state sperimentate delle funzioni software che hanno permesso di valutare la producibilità dei componenti realizzati con tecnologia AM. Sono stati anche usati dei tool digitali, che hanno consentito di ottenere indicazioni sul miglior orientamento, nonché le aree critiche del componente in fase di stampa. A tal proposito sono stati usati dei tools che consentono di simulare la generazione dei supporti necessari in fase di stampa ad evitare deformazioni dovute al raffreddamento del componente, nonché a supportare il componente stesso. Sono stati utilizzati strumenti digitali avanzati per simulare lo slicing del componente, attraverso cui si può intervenire su diversi parametri, quali: numero di layer concentrici; percentuale di riempimento; spessore di ogni livello; temperatura estrusore; temperatura piano; supporti; velocità di stampa. I componenti sono stati stampati con la tecnologia SLM e il risultato del lavoro di stampa, a seguito di ottimizzazione topologica, incluso la versione con struttura in lattice, è riportato nelle Figure 1.4a e 1.4b.

Figura 1.4a – Inserto per riciclo (ottimizzazione topologica)

Figura 1.4b– Inserto per riciclo (ottimizzazione topologica, struttura lattice)

La Tabella 1.3 riporta il confronto dei lavori di stampa, a seguito di ottimizzazione topologica, anche rispetto alla versione con struttura in lattice, per due diverse condizioni di carico tipiche.

Design	Layout	Massa [kg]	Max Stress [MPa] Caso A	Max Stress [MPa] Caso B	F_1 [Hz]
Baseline		0,219	304	601	10320
Ibrido		-44%	-9%	+2%	-13%
Lattice libero		-33%	+116%	-8%	-12%
Ottimizzazione Topologica		-43%	+5%	+6%	-13%

Tabella 1.3: Confronto stampa ottimizzata dell'inserto per riciclo, incluso versione con struttura in lattice

A valle della produzione tramite AM, al fine di verificare e validare il progetto, i due inserti sono stati assemblati in una reale vite a ricircolo di sfere. Nello specifico, è stata predisposta una chiocciola con circuiti separati, in modo da montare su ognuno di essi una coppia di inserti. L'assieme vite e chiocciola è stato quindi montato sul banco prova predisposto per le attività di test che ha permesso di rilevare che l'inserto prossimo alla termocoppia ha mantenuto una temperatura conforme a quella della chiocciola.

Test case 4 – Housing motore elettrico

In ultimo, è stata effettuata una analisi di ottimizzazione relativa all'housing di un motore elettrico, in termini di peso e capacità di scambio termico, ponendo i seguenti obiettivi:

1. Riduzione massa a parità di performance strutturali, funzionali e frequenze naturali in linea con la configurazione baseline;
2. Riduzione perdite di carico durante il funzionamento dello scambiatore, riduzione peso e minimizzazione punti caldi.

La Tabella 1.4 riassume i risultati più significativi ottenuti.

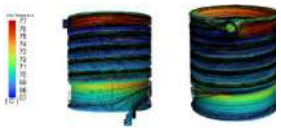
Design	Layout	Massa [kg]	Max Stress [MPa] Caso A	Max Stress [MPa] Caso B	Th. Eff. [%]	T max [°C]
Baseline		4.034	5.7	5.7	0.95	91
Ottimizzazione strutturale		-12%	-0.6%	-1%	-	-
Ottimizzazione scambio termico		-1.5%	-	-	0.966	77
Ottimizzazione combinata (strutturale + termica)		-13.5%	-0.6%	-1%	0.966	77

Tabella 4: Sintesi dei risultati ottenuti sul componente Housing motore elettrico

Le analisi eseguite nel corso del progetto SIADD sul caso di studio hanno mostrato come il componente possa essere ottimizzato sotto due punti di vista, con risultati soddisfacenti in funzione degli obiettivi prefissati.

Dati virtuali da simulazione di prodotto e processo

Riferimenti al progetto SIADD

Linea di ricerca OR 1 - *Ottimizzazione trattamenti termici su palette turbina in TiAl realizzate mediante Electron Beam Melting***,** coordinata dalla **prof.ssa Sabina Luisa Campanelli**, Politecnico di Bari.
Attività 1.1 *Definizione dei requisiti e delle specifiche e realizzazione dei campioni*, GE Avio, deliverable **D1.1.1, D1.1.2**
Attività 1.2 *Studio preliminare del trattamento HIP/Quench*, Ge Avio, deliverable **D1.2.1**
Attività 1.3 *Caratterizzazione dei campioni sottoposti a trattamenti successivi*, Poliba (responsabile attività), ENEA, POLIMI, GE AVIO, deliverable **D1.3.1, D1.3.2.**
Attività 1.4 Simulazione numerica del processo termico, modellazione del componente realizzato in EBM e correlazione con i risultati sperimentali, KORE (responsabile attività), ENGINSOFT, GE Avio, deliverable **D1.4.1, D1.4.1**
Attività: 1.5 *Ottimizzazione ciclo produttivo con combinazione dei due trattamenti in un solo processo***, GE Avio, D1.5.1**
Attività: 1.6 *Caratterizzazione dei campioni con il nuovo ciclo, Poliba (responsabile attività),* **ENEA, POLIMI, UNISALENTO, D1.6.1, D1.6.2, D1.6.3**
Attività 1.7 *Analisi di sostenibilità manifatturiera del processo di trattamento termico e identificazione del "sensing system", POLIBA(responsabile attività)* GE avio, deliverable **D1.7.1.**

Linea di ricerca OR5: *Sviluppo di componenti in materiali composito con processi di AM (AFP/CFF)* coordinata dal prof. **Roberto Spina**, Politecnico di Bari.
Attività 5.1 *Definizione dei requisiti ed individuazione delle specifiche*, NOVOTECH (responsabile attività), ENEA, ENGINSOFT, CNR, POLIBA, KORE, UMBRA, ELFIM, deliverable **D5.1**
Attività 5.6 *Validazione numerico sperimentale,* KORE (responsabile attività), CNR, ENGINSOFT, POLIBA, ELFIM, deliverable **D5.6.1, D5.6.2**

Linea di ricerca OR6: *Sviluppo di processi per riduzione pesi e incremento delle prestazioni,* coordinata dal **prof. Luigi Maria Galantucci**, Politecnico di Bari
Attività 6.1 Definizione dei requisiti ed individuazione delle specifiche, UMBRA (responsabile attività) ENEA, ENGINSOFT, HB TECHNOLOGY, ITIA-CNR, NOVOTECH, POLIBA, deliverable **D6.1**
Attività 6.7 *Analisi numerico sperimentale*, ENGINSOFT (responsabile attività), KORE, NOVOTECH, UMBRA, UNISALENTO, deliverable **D6.7**
Attività 6.8 *Test case ed analisi di sostenibilità*, UMBRA (responsabile attività), HB TECHNOLOGY, NOVOTECH, ENGINSOFT, ENEA, deliverable **D6.8.1**

In generale, per portare sul mercato un prodotto competitivo è opportuno che il metodo di fabbricazione con cui viene realizzato sia ripetibile e sostenibile, sia dal punto di vista economico che ambientale. Infatti, per soddisfare le aspettative dei clienti è necessario che il produttore sia in grado di misurare la qualità del manufatto durante il processo di produzione e quindi riesca a rispettare uno standard elevato di processo. In quest'ottica, avere a disposizione strumenti di simulazione di prodotto e di processo, soprattutto in un settore in forte crescita, quale l'AM, rappresenta senza dubbio un vantaggio competitivo significativo per il produttore. La simulazione offre gli strumenti per esaminare le parti individualmente e prendere le decisioni opportune, in tempo per evitare sprechi, sia in termini di materiale che di tempo. A partire da queste considerazioni, si può affermare che gli obiettivi principali della simulazione nella produzione additiva sono:

- **Progettazione funzionale:** occorre principalmente generare un design che soddisfi i requisiti funzionali della parte da produrre.
- **Generazione di una struttura reticolare:** molte delle parti prodotte tramite AM hanno una struttura reticolare invece di un continuum completo. Uno degli obiettivi della simulazione in AM è generare una struttura reticolare ottimizzata per migliorare la capacità di resistere ai carichi di esercizio.
- **Caratterizzazione del materiale:** al fine di controllare le performance della parte è opportuno catturare il processo di trasformazione di fase del materiale attraverso la modellazione di materiali con approccio multiscala. Prevedere con un alto livello di confidenza il comportamento del componente vuol dire ridurre il numero di campioni necessari per i test di verifica e validazione del progetto.
- **Ottimizzazione del processo produttivo e della quantità di materiale impiegato**: in fase di fabbricazione possono svilupparsi tensioni residue e distorsioni indesiderate. È necessario comprendere e monitorare con precisione questi cambiamenti fisici per ridurre al minimo il divario tra le specifiche delle parti progettate e

prodotte. Inoltre, è importante applicare tecniche di ottimizzazione topologica per ridurre al minimo necessario il quantitativo di materiale con cui produrre la parte.

- **Valutare le prestazioni in servizio:** valutare come si comporterà la parte fabbricata sotto carichi di servizio reali relativi a rigidezza, fatica, ecc.

1) **Ottimizzazione trattamenti termici su palette turbina in TiAl realizzate mediante processo Electron Beam Melting (EBM);**
2) **Sviluppo di componenti in materiali composito con processi di AM (AFP/CFF);**
3) **Sviluppo di processi per riduzione pesi e incremento delle prestazioni.**

Nell'ambito dell'area di interesse ***1 "Ottimizzazione trattamenti termici su palette turbina in TiAl realizzate mediante processo Electron Beam Melting (EBM)"*** è stato condotto uno studio numerico-sperimentale su nuovi trattamenti termici di HIP/Quench, mirato ad approfondire le condizioni di processo e le relative implicazioni sul prodotto, in modo da sviluppare la capacità di ridurre i difetti che si possono creare in fase di fabbricazione delle parti, incrementando le proprietà meccaniche e riducendo tempi e costi di lavorazione.
Sono stati sottoposti a trattamenti componenti aeronautici, quali delle pale di turbina, realizzate in TiAl (Alluminuro di Titanio) nei più recenti impianti di HIPPING, ovvero dei sistemi che promettono di combinare alte pressioni e raffreddamenti controllati, dando risultati uguali o migliori in termini di microstruttura e proprietà meccaniche, rispetto a processi separati, abitualmente utilizzati.
Nel corso del progetto sono state prodotte delle pale di turbina e diversi set di provini che sono stati utilizzati per test meccanici e metallografici, con l'obiettivo di verificare che il nuovo trattamento combinato di Hip-Quench riuscisse ad eliminare o ridurre in termini di dimensione e di numerosità difetti quali porosità, fenomeno presente di seguito al trattamento termico convenzionale. I risultati ottenuti sui provini prodotti con il trattamento oggetto di studio sono stati confrontati con campioni di riferimento sottoposti a trattamenti termici convenzionali. A supporto di tali verifiche sono state effettuate delle analisi CT Scan preliminari e test metallografici.
Sempre nell'ambito dell'attività di caratterizzazione del processo Hip/Quench, è stato modellato il comportamento del ciclo di Pressatura Isostatica a Caldo (HIP).
Per quanto riguarda la fase di test per la verifica e validazione dei provini sottoposti al trattamento combinato di HIP/Quench, sono stati effettuati test di trazione a temperatura ambiente ed alta temperatura (fino a 850°C) ed analisi metallografiche al fine di analizzarne e valutarne la porosità. A tale scopo, è stato necessario mettere a punto una metodologia d'indagine per effettuare un'analisi sulla distribuzione delle porosità, attraverso l'implementazione di opportuni algoritmi di analisi dell'immagine ed è stato implementato un set-up costruito ad-hoc per effettuare i test statici alle diverse temperature. Dai risultati della mappatura dei difetti ed individuazione cluster pre- e post- trattamento sull'intera sezione, si evince che l'impatto del nuovo trattamento termico è notevole.
I risultati ottenuti hanno rivelato l'impatto positivo (chiusura dei pori) del nuovo trattamento termico di HIP/Quench, condotto su scala di laboratorio, sulla quasi totalità (a meno dei difetti affioranti) di difetti presenti nei provini TiAl as-build. Per quanto riguarda i test meccanici ad alta temperatura è risultato che all'aumentare della temperatura di esecuzione dei test è stata riscontrata una riduzione dello sforzo di snervamento del materiale e un aumento dell'allungamento a rottura.

Nell'area di interesse ***2 "Sviluppo di componenti in materiali composito con processi di AM (AFP/CFF)***", per poter sfruttare a pieno il potenziale della tecnologia AM, sono stati esaminati e sviluppati strumenti di simulazione del processo in grado di prevedere e mitigare la deformazione delle parti prodotte, quindi predire l'impatto che possono avere le decisioni prese in fase di progettazione sul processo di produzione e quindi sul prodotto finito, prima di effettuare il lavoro di stampa.

Dal momento che diversi difetti derivanti dal processo, quali ad esempio il restringimento delle parti, i pori, le microfratture, il distacco e i difetti indotti da stress (deformazioni e distorsioni), rimangono delle carenze in parte irrisolte, la necessità di sviluppare delle tecniche di modellazione numerica e previsione delle condizioni termo-meccaniche generate nei processi AM è un elemento fondamentale per comprendere i meccanismi intrinsechi della tecnologia, in modo da evitare di fabbricare parti di scarsa qualità.

Nel corso del progetto SIADD, dopo aver condotto uno studio dello stato dell'arte e l'analisi critica delle tecnologie utilizzate per simulare e/o rappresentare numericamente i materiali impiegati ed i prodotti realizzati con i processi di AM (AFP/CFF), i partner industriali hanno identificato dei benchmark utili a valutare le prestazioni dei processi proposti rispetto ai processi tradizionali, tenendo conto che, per piccoli componenti a geometria molto complessa, la tecnologia FFF (Filament Fiber Fabbrication) può utilizzare macchine di fabbricazione con volumi di lavoro limitati e sistemi di deposizione layer by layer 2D, mentre la tecnologia Automated Fiber Placement (AFP) non ha limitazioni sul volume di lavoro, ma vincoli sulla complessità geometrica del prodotto.

Successivamente sono state definite le specifiche dei materiali compositi da utilizzare ed è stato identificato il codice numerico di simulazione mesoscala da utilizzare sulla base sia delle competenze ed esperienze pregressa dei partner, che sulla flessibilità dell'integrazione con software multiscala.

Dopo questa fase si è passati alla simulazione numerica del processo produttivo, che ha fornito informazioni molto utili per comprendere la fisica del problema e quindi supportare l'utente nella definizione dei parametri di deposizione, sia per la tecnica FFF che AFP. Questa attività è stata condotta mediante un approccio numerico-sperimentale, impiegando due diversi tipi di solutore: un solutore lineare (caratteristiche elastiche-lineari costanti per il materiale e regime di piccoli spostamenti per il provino durante il caricamento); un solutore incrementale-iterativo per valutare l'effetto delle grandi deformazioni sul risultato finale. Questi concetti sono stati approfonditi ulteriormente attraverso alcuni casi applicativi, in particolare se consideriamo un componente massivo, che ben si adatta alla tecnologia FFF, è indubbio che realizzare pareti di elevato spessore oltre ad avere un costo elevato e richiedere più tempo di lavorazione, può presentare un maggior numero di difetti rispetto ad un componente con meno strati (Figura 1.4).

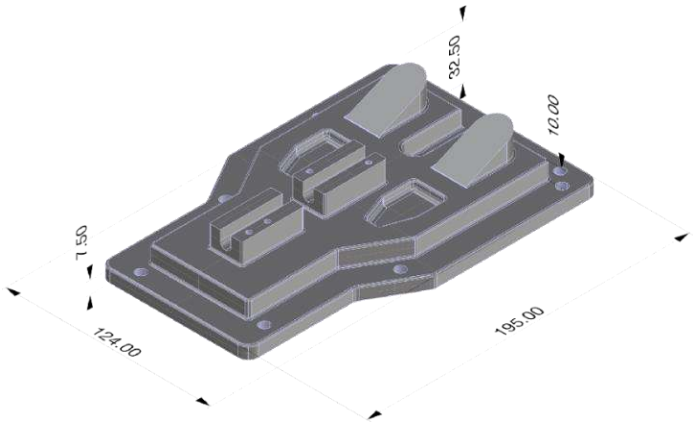


Figura 1.4 – Componente massivo

L'attività numerica condotta nel corso del progetto ha permesso di stimare la risposta in termini di distribuzioni degli spostamenti del componente e di tensioni agenti sul materiale costituente il test case (Figure 1.5 e 1.6).

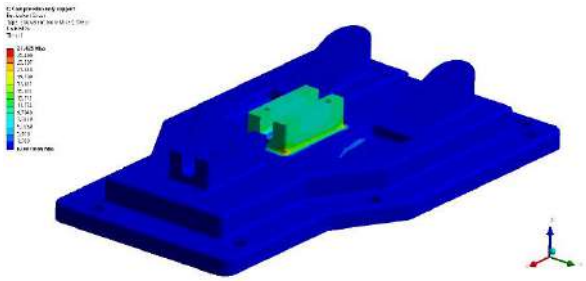


Figura 1.5 - Distribuzione degli stress di Von Mises

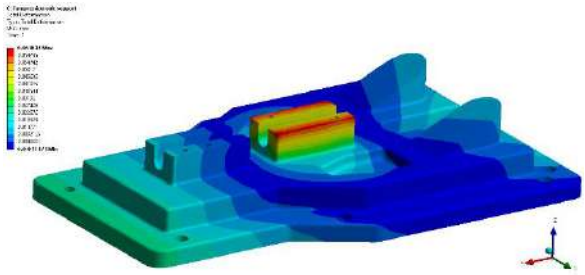


Figura 1.6 - Distribuzione degli spostamenti

Al fine di catturare il comportamento del componente sono stati utilizzati diversi metodi di omogeneizzazione, tra cui l'omogeneizzazione a campo intero e i metodi semi-analitici come l'omogeneizzazione media archiviata (MFH). I risultati ottenuti hanno mostrato che il comportamento delle materie plastiche rinforzate con fibre corte e lunghe può essere rappresentato con un buon grado di precisione, coprendo un'ampia gamma di prestazioni dei materiali come termo-elasticità, termo-elasto-plasticità e termo-visco-elasticità.

Con riferimento all'area di interesse ***3 "Sviluppo di processi per riduzione pesi e incremento delle prestazioni",*** è stata investigata la possibilità di realizzare strutture ibride, ovvero multimateriale, analizzando la soluzione anche dal punto di vista della sostenibilità di processo. Più in dettaglio è stata esaminata ed elaborata una strategia di costruzione di strutture composite, topologicamente ottimizzate, formate da parti alleggerite, in materiale metallico, rivestite di uno skin in materiale composito fibrorinforzato, entrambi realizzati tramite tecnologie AM. Sono state analizzate in dettaglio le caratteristiche di adesione all'interfaccia tra materiale metallico e composito tramite un approccio numerico-sperimentale, in modo da comprendere il comportamento di tali strutture in termini di caratteristiche meccaniche e di endurance, il tutto finalizzato ad assicurare prestazioni ottimali per applicazioni strategiche in campo principalmente marino e aeronautico.
Progettare pannelli multimateriale costituiti da "skins" in materiale composito e il "lattice core" non è semplice, sia dal punto di vista pratico-tecnologico sia puramente teorico-numerico, anche perché in letteratura si trovano molti risultati sperimentali di prove a taglio e/o a compressione di questo tipo di pannelli sandwich [9-10], ma quasi nessun modello teorico ed in particolar modo nessun modello per l'interfaccia; quest'ultima fortemente condizionata dal tipo di approccio tecnologico con cui viene assemblato il pannello sandwich.
Sono stati sviluppati diversi test case e tra questi si presenta di seguito quello relativo ad uno stelo per attuatore elettromeccanico, applicato ad un carrello di atterraggio per il settore aeronautico (Figura 1.7). Più in dettaglio è stata realizzata una struttura composita alleggerita, in materiale metallico, con tecnologia SLM "Selective Laser Melting" rivestito di uno skin in materiale composito (PEEK rinforzato con fibre di carbonio), realizzato con tecnologia AFP ''Automated Fiber Placement''. Il progetto ha previsto che la cavità interna e i terminali fossero ottenuti attraverso la stampa di un componente unico, ovvero senza giunzioni successive. Facendo riferimento alla Figura 1.7, la parte indicata in arancione è la superficie sulla quale applicare lo skin in materiale composito. La boccola antirotazione scorre assialmente lungo lo stelo e ne impedisce la rotazione. Essa è stata riprogettata a sezione ellittica, così come lo stelo, con una miglioria resa possibile grazie all'utilizzo di processi AM, irrealizzabile con tecniche tradizionali La sezione ellittica, applicata anche all'interno del componente, ha restituito dei benefici anche in termini di peso.

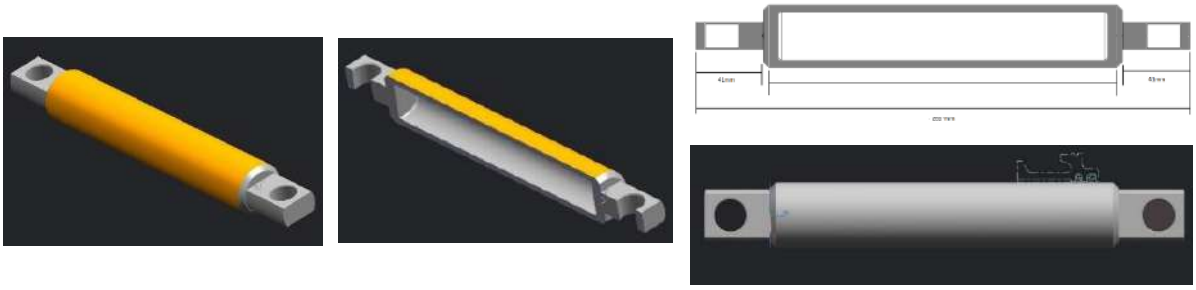


Figura 1.7 – Corpo stelo ellittico

Dal punto di vista funzionale, la riprogettazione del componente in ottica AM ha tenuto conto del fatto che lo stelo è vincolato ad un attuatore elettromeccanico e ad un terminale mobile posto in uno dei due fori alle estremità. La riprogettazione del componente in ottica AM è stata effettuata a partire da fase di caratterizzazione numerico-sperimentale a livello coupon, che ha avuto come obiettivo la generazione di un modello agli elementi finiti per descrivere il comportamento in termini di delaminazione all'interfaccia dei due layers adiacenti, incollati tra loro tramite uno strato adesivo, rappresentato con una legge costitutiva di coesione bilineare.

Dopo la fase di progettazione, si è passati alla fase di realizzazione del "core" metallico in AlSi10Mg con tecnologia SLM (Selective Laser Melting) e prima di procedere ai test di verifica e validazione dello stesso, è stata effettuata una analisi dimensionale dello stelo tramite l'utilizzo di una attrezzatura prototipale, messa a punto proprio per automatizzare le operazioni di acquisizione 3D di precisione da effettuare sulle parti realizzate nel progetto. Lo strumento utilizzato per fare le scansioni è uno scanner a luce strutturata di colore blu (Figura 1.8), composta da due ottiche che inquadrano la stessa regione da due punti di vista differenti e da un proiettore, posto alla stessa distanza fra le due ottiche, dal quale vengono emesse le frange durante la fase di acquisizione.

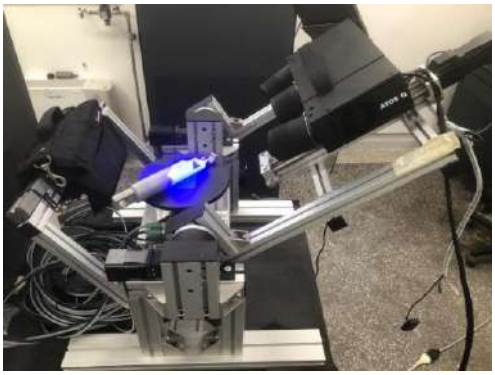


Figura 1.8 - Prototipo del sistema di acquisizione a luce strutturata montato sulla cinematica autocostruita

Le scansioni effettuate hanno permesso di realizzare dei gemelli digitali sui quali è stato possibile prendere tutte le misure dimensionali. Dal Reverse Engineering dello stelo sezionato è stato quindi possibile recuperare tutte le informazioni dimensionali di interesse

Si è proceduto quindi alla realizzazione del rivestimento "skin" in materiale composito CF/PEEKK con tecnologia AFP (Automated Fiber Placement) e per incrementare le prestazioni meccaniche della parte in PEEK rinforzato con fibra di carbonio, la stessa è stata sottoposta ad un ciclo di consolidamento sotto vuoto in forno. Con questo trattamento è stata ridotta la porosità residua del materiale, eliminando eventuali micro vuoti che potrebbero venire generati durante la laminazione AM-AFP. Dopo un raffreddamento controllato per ottenere le massime percentuali di cristallinità della matrice in PEEK, il componente è stato estratto e sottoposto alle operazioni di pulitura, verifica dimensionale e rifilatura.

Per l'incollaggio metallo/PEEK è stato utilizzato un adesivo epossidico, essendo questa tipologia di adesivo quella che ha dato i migliori risultati nella campagna di test sull'efficacia di diverse tipologie d'adesivo. L'adesivo è stato

deposto sia sull'intera superficie dello stelo in AlSiMg10 che doveva essere rivestita dal tubo in composito, sia sull'intera superficie interna di quest'ultimo, in modo da evitare che rimanessero delle zone vuote a causa dell'asportazione di parte dell'adesivo durante l'inserimento dello stelo nel tubo per scorrimento assiale. Opportune dime sono state utilizzate sia per garantire l'allineamento dei due raggi della sezione dello stelo con quelli della sezione del tubo, che per garantire la centratura degli assi delle due parti.

Figura 1.9 – Stelo assemblato

Dopo la produzione, sono state effettuate nuovamente le opportune verifiche dimensionali del componente assemblato e si è passati alla fase di test sperimentale.

La prova di verifica statica è stata ipotizzata al fine di verificare il comportamento del rivestimento e del sistema di incollaggio, tramite l'applicazione di un carico torcente senza scorrimento, tra lo stelo e la sede di alloggiamento guarnizioni. Al termine, la prova ha evidenziato una deformazione plastica del sistema: stelo + incollaggio + rivestimento. Tali deformazioni, evidenziate come segni di indentatura e principi di delaminazione sul rivestimento hanno inevitabilmente compromesso la funzionalità del sistema stesso. Le prove di verifica sono state pertanto concluse con la prova senza strisciamento, in quanto la prova eseguita con il solo carico torcente agente sullo stelo rivestito ha portato ad una deformazione plastica del rivestimento, compromettendone la funzionalità.

Futuri sviluppi di ricerca indagheranno gli effetti dell'incollaggio andando a comparare i risultati ottenuti nella presente attività con un rivestimento in PEEK fibrorinforzato con Carbonio, depositato direttamente sullo stelo tramite tecnologia AFP. Verranno inoltre indagati i limiti tecnologici dell'AFP, andando a verificare il massimo grado di tensionamento del nastro in composito ottenibile tramite deposizione diretta.

I dati reali acquisiti da sensorizzazione in-situ

Riferimenti al progetto SIADD

Linea di ricerca OR2: *Monitoraggio in-situ SLM*, coordinata dalla **prof. ssa Bianca Maria Colosimo**, Politecnico di Milano.
Attività 2.1 *Definizione dei requisiti ed individuazione delle specifiche*, HB T (responsabile attività) POLIBA, POLIMI, ENEA, deliverable **D2.1.1.**
Attività 2.3, *Prove sperimentali e sviluppo di algoritmi e strategie di monitoraggio*, POLIMI (responsabile attività) UNISALENTO, POLIBA, ENEA, HBT, deliverable **D2.3.1, D2.3.2** .
Attività 2.4 *Prove di caratterizzazione e correlazione con i risultati in situ*, POLIBA (responsabile attività), ENEA, POLIMI, deliverable **D 2.4.1.**
Attività 2.7 *Test Case ed analisi di sostenibilità*, HBT (responsabile attività), POLIMI, POLIBA, deliverable **D2.7.**

Linea di ricerca OR3: *Monitoraggio in-situ DMLD*, coordinata dalla **prof. ssa Sabina Luisa Campanelli**, Politecnico di Bari.
Attività: 3.1 *Definizione dei requisiti ed individuazione delle specifiche*, ELFIM (responsabile attività), POLIBA, POLIMI, deliverable **D3.1.1, D3.1.2.**
Attività: 3.2 *Valutazione preliminare dei sistemi per il monitoraggio e correzione*, POLIBA (responsabile attività), POLIMI, ELFIM, deliverable **D3.2.1, D3.2.2.**
Attività: 3.3 *Prove sperimentali e sviluppo di algoritmi e strategie di monitoraggio e correzione*, POLIBA (responsabile attività), POLIMI, ENEA, UNISALENTO, ELFIM, deliverable **D3.3.1, D3.3.2.**
Attività: 3.5 *Prove di caratterizzazione e correlazione con i risultati in situ*, POLIBA (resp), POLIMI, ENEA, deliverable **D3.5.1.**
Attività: 3.7 *Sensorizzazione macchina industriale*, ELFIM (responsabile attività), POLIBA, POLIMI, deliverable **D 3.7.1.**
Attività: 3.8 *Test Case ed analisi di sostenibilità*, ELFIM (responsabile attività), POLIBA, POLIMI, deliverable **D3.8.1, D3.8.2.**

Sulla base di esigenze espresse dai partner industriali di progetto, la tematica è stata applicata a due tecnologie laser additive di metallo: la tecnologia di fusione su letto di polvere basata (Laser Powder Bed Fusion – L-PBF) e la tecnologia di deposizione laser di polveri (Direct Metal Laser Deposition -DMLD). Più in dettaglio, a causa dell'elevato numero di fattori che influenzano questi processi, per garantire elevati standard qualitativi dei prodotti, ovvero evitare che le parti presentino deviazioni dimensionali, geometriche e altre tipologie di difetti non accettabili, l'implementazione di sistemi di monitoraggio in-situ ha assunto sempre maggiore importanza nell'industria manifatturiera.
Partendo dai possibili difetti di processo noti, uno degli scopi principali degli strumenti di monitoraggio analizzati nel corso del progetto ha riguardato l'identificazione delle cosiddette "firme di processo", al fine di correlarle a specifici difetti. In questo contesto, gli strumenti di monitoraggio in situ possono potenzialmente rilevare l'insorgenza di difetti durante la lavorazione ottimizzando consumi energetici e tempo di produzione, dando la possibilità di regolare il processo senza interruzioni.
Gli stessi strumenti possono essere implementati per una attività di monitoraggio in tempo reale più avanzato, in grado di rilevare e classificare automaticamente le anomalie che si verificano durante il processo, fondamentali per l'adeguamento del processo in tempo reale [11]. Nonostante i numerosi approcci di monitoraggio già riportati in letteratura, la complessità dei processi che fanno parte della tecnologia L-PBF rende la ricerca in questo campo sempre più impegnativa per l'implementazione industriale, infatti diverse sono le problematiche da affrontare, ovvero:

- implementazione di opportune regole d'allarme in fase di produzione (online) basate su analisi statistica, a partire dai dati acquisiti attraverso sensori;
- trattamento in tempo reale di grandi quantità di dati in formati differenti;
- sviluppo di sistemi di in-situ damage detection, atti a migliorare la modalità di rilevazione e la tipologia di difetto;
- sviluppo di sistemi di correlazione delle informazioni acquisite in-situ con le misure effettuate sul prodotto finale.

Nell'ambito del progetto SIADD sono state studiate e sviluppate tecniche di monitoraggio statistico di processo, applicate ai segnali acquisiti in-situ per progettare e definire opportune regole di rilevamento del danno. Sono stati messi a punto degli strumenti SW per il trattamento di grandi quantità di dati acquisiti in situ e l'estrazione di informazioni utili.

Le attività sono partite con la definizione delle specifiche in termini di prodotti da realizzare, materiali da stampare e soglie di accettabilità associate alle diverse tipologie di difetti sulla base dalle esigenze identificate dall'end user, partner di progetto.
Uno dei test case più rappresentativi analizzato in fase di progetto è rappresentato da una guida d'onda, ovvero un componente ampiamente usato nel settore spazio, avente la funzione di costringere un'onda elettromagnetica a seguire un determinato percorso, anziché propagarsi liberamente nello spazio circostante (Figura 1.10).

Figura 1.10 – Guida d'Onda

Si tratta di fatto di una linea di alimentazione elettromagnetica utilizzata per segnali ad alta frequenza, che conduce energia a microonde con una perdita inferiore rispetto ai cavi coassiali ed è utilizzata nelle comunicazioni a microonde, nei radar e in altre applicazioni ad alta frequenza. In termini di vincoli dimensionali, la propagazione è libera (onda viaggiante) lungo la guida, mentre nella direzione trasversale si formano onde stazionarie. Dal punto di vista costruttivo in genere è un profilato a sezione circolare o rettangolare, realizzato con un materiale metallico che sia un buon conduttore. La guida d'onda deve avere una certa sezione trasversale minima, relativa alla lunghezza d'onda del segnale per funzionare correttamente. Se la lunghezza d'onda del segnale è troppo lunga (la frequenza è troppo bassa) rispetto alla sezione trasversale della guida d'onda, i campi elettromagnetici non possono propagarsi. La tecnologia di produzione tradizionale prevede la realizzazione di tali guide mediante la saldatura e/o bullonatura dei vari segmenti.
Questa modalità costruttiva, oltre l'onerosità, introduce, da un punto di vista puramente funzionale, anche inevitabili "perdite" di segnale. Teoricamente si può affermare che il passaggio all'AM di una guida d'onda, ma più in generale di qualsiasi componentistica RF, rappresenta un'opportunità di miglioramento sia in termini di costi di produzione, sia in termini di trasmissione di segnale. Tuttavia, i limiti tecnologici indotti dai processi additivi, intesi come tolleranze dimensionali e finitura superficiale ottenibili vanno opportunamente analizzati in modo da poter gestire eventuali fenomeni indesiderati. Queste apparenti semplici osservazioni, evidenziano l'importanza che riveste il poter controllare già in fase di processo i fattori che determinano la qualità del prodotto.
Va sottolineato che questa famiglia di componentistica rende il controllo ex-post un processo estremamente complicato e l'unico metodo di misurazione, attualmente disponibile, è rappresentato dall'uso della tomografia. Ciò nonostante, la tomografia oltre ad avere un costo elevato, che in buona parte rischierebbe di assorbire i benefici della produzione additiva, rappresenta un extra flusso di processo che agisce negativamente sui vantaggi della stampa 3D.
Attraverso il monitoraggio di processo, ci si pone l'obiettivo di definire un modello di validazione geometrico volto alla realizzazione di guide d'onda con tecnologia AM che possa introdurre le seguenti migliorie:

- Riduzione della complessità di assemblaggio della struttura;
- Riduzione del peso del prodotto finale per l'eliminazione delle giunzioni;
- Riduzione dei tempi di produzione;
- Miglioramento performance (riduzione perdite).

Le guide d'onda in oggetto avevano un campo di applicazione nel range di funzionamento compreso tra i 7 ed i 10 GHz. Dal punto di vista dimensionale è stato considerato un volume di dimensioni pari a ca. [mm] 100 x 50 x 50 . I parametri principali oggetto del monitoraggio sono stati: caratteristiche dimensionali della cava interna; rugosità superficiale; spigoli interni al condotto. Il materiale delle polveri identificate per la produzione è l' AlSi10Mg.
La prima fase dello studio ha riguardato il rilevamento in-situ e real-time di distorsioni geometriche durante la fabbricazione di pareti sottili inclinate. In particolare, per questo caso studio, è stato studiato l'effetto di due fattori: lo spessore della parete e la strategia di scansione sull'insorgere dei difetti. La seconda fase dello studio ha riguardato la valutazione dimensionale e geometrica in-situ e real-time di strutture a geometria complessa fabbricate sempre mediante processo L-PBF.

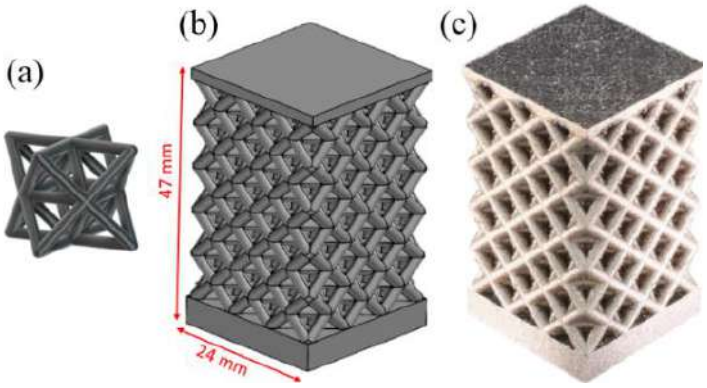


Figura 1.11 – (a) Cella unitaria elementare octet; (b) Modello CAD creato in ambiente nTopology; (c) Campione ottenuto.

In particolare, per quest'ultima è stato studiato l'effetto della geometria sull'insorgere di difetti quali: distorsioni geometriche e deviazioni dimensionali. Il tipo di geometria complessa studiata è una struttura lattice (Figura 1.11). Successivamente si è passati alla definizione della tipologia e delle specifiche dei sensori per l'acquisizione in-situ di dati e segnali utili al riconoscimento in-linea di difetti (sensori co-assiali e off-axis). Sulla base di queste informazioni sono stati sviluppati gli strumenti SW e le metodologie per il monitoraggio in-situ del processo, estraendo e caratterizzando le cosiddette "firme di processo", a partire dai dati acquisiti in-situ (immagini ad alta risoluzione, video ad alta velocità, immagini e video nel range dell'infrarosso, segnali da fotodiodi ad alta frequenza, etc.).
Una volta acquisite le immagini, queste sono state opportunamente elaborate attraverso l'applicazione di specifici algoritmi per la correzione prospettica, per il thresholding e la segmentazione al fine di consentire l'estrazione dei contorni. A partire dai contorni rilevati, che descrivono la sezione dei provini, sono stati poi estratti opportuni indicatori di processo in grado di identificare l'insorgenza di distorsioni geometriche e aree sopraelevate o le stesse sezioni sono state utilizzate per altre tipologie di analisi come confronti 2D e 3D rispetto al modello nominale. In definitiva il metodo di monitoraggio è stato validato a partire da geometrie semplici e l'errore riscontrato è stato nell'ordine del centesimo di millimetro. Lo stesso metodo di monitoraggio è stato applicato anche alle strutture lattice per l'individuazione di deviazioni dimensionali e geometriche. In questo caso sono stati utilizzati strumenti di confronto 2D e 3D tra l'output del monitoraggio e le sezioni corrispondenti sul modello CAD. Le deviazioni assolute medie ottenute per ciascun layer sono stati quindi raccolte in un grafico che ne riporta l'andamento lungo tutta l'altezza del provino.
Dai contorni dei singoli layer è stato anche possibile ottenere un modello 3D da confrontare con il modello CAD della struttura. Tale confronto può essere effettuato o al completamento del processo o in process anche solo su una parte della struttura (Figura 1.12 – 1.13).

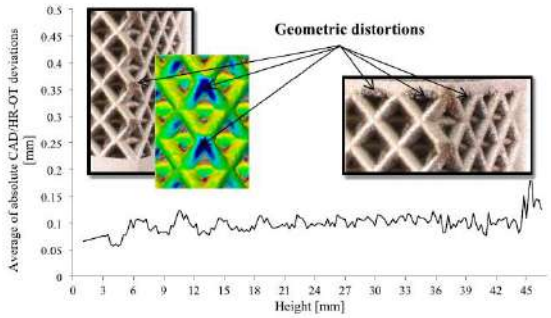


Figura 1-12 - Deviazione media assoluta raccolta per ogni layer per tutta l'altezza del provino [12].

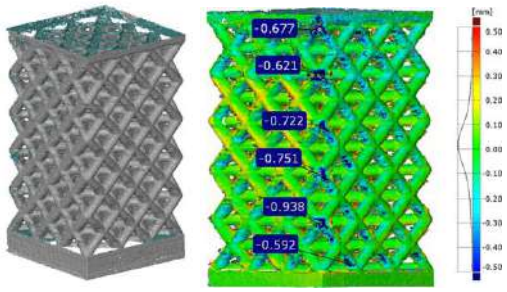


Figura 1.13 - Modello 3D ricostruito sulla base dei contorni dei singoli layer e confronto 3D con il modello CAD [12].

Considerando ancora le pareti inclinate, dai modelli 3D sono state estratte anche altre informazioni dopo aver sezionato il modello in tante sezioni spaziate del valore dell'altezza del layer. In questo modo è stato possibile confrontare direttamente gli indici rilevati in-process con quelli rilevati offline.
La validazione tramite scansioni effettuate offline è stata eseguita anche per la struttura lattice.
Un secondo studio ha riguardato l'identificazione di condizioni instabili di processo in L-PBF mediante l'analisi delle emissioni di plume (parziale vaporizzazione del materiale durante la fusione e possibile emissione di plasma) come firma di processo.
I due metodi possono essere utilizzati in modo complementare per tenere sotto controllo la stabilità e qualità del processo e segnalare in modo tempestivo e robusto l'insorgenza di condizioni che possono portare a difetti e non conformità nella parte prodotta. In generale, dai diversi test condotti si può affermare che l'hot spot è un fenomeno "sparso e clusterizzato nello spazio"; quando si verifica un hot spot, rimane nella stessa posizione per un po' di tempo. Invece, le scintille si verificano in modo casuale nel dominio temporale.

Nel primo studio sono state formulate le seguenti ipotesi comuni sulla struttura spaziale e temporale degli eventi naturali in primo piano e degli eventi anomali: 1) gli eventi naturali in primo piano sono sparsi e casuali nel dominio spazio-temporale; 2) l'evento anomalo è sparso raggruppato spazialmente e temporalmente coerente. Inoltre, è stata sviluppata una procedura di stima efficiente e ricorsiva per rilevare e localizzare l'evento anomalo in tempo reale, ovvero non appena viene registrato un nuovo frame video. Per segnalare un allarme automatico al verificarsi di un evento anomalo, è stato proposto un metodo che consiste nel combinare il modello di regressione spazio-temporale penalizzato con un test del rapporto di verosimiglianza (LRT) per il rilevamento delle modifiche, il monitoraggio del processo e la localizzazione delle anomalie. Il metodo proposto ha mostrato di rilevare correttamente tutti gli eventi hot-spot. In definitiva, il primo metodo proposto – identificazione in-situ di hot-spot mediante modello di regressione spazio-temporale – si è dimostrato non solo più efficace nell'identificare quando e dove un hot-spot si è verificato durante la stampa L-PBF di componenti dalla geometria complessa rispetto a metodi benchmark da letteratura, ma anche più efficiente dal punto di vista computazione. Ciò si traduce in un'elevata reattività del metodo nel riconoscere l'insorgenza di difetti dovuti ad una errata dissipazione termica a valle della fusione, che può essere driver di difetti geometrici, superficiali e volumetrici. Il metodo richiede una ridotta fase di training, principalmente orientata al tuning dei parametri del modello, il quale si basa su alcune ipotesi circa la natura dell'evento anomalo e della natura della firma di processo. Maggiori dettagli sul metodo, sulla sensibilità ai parametri di tuning e sulle sue prestazioni in presenza di dati simulati possono essere trovati in 0[13].
Il secondo metodo proposto – identificazione di instabilità di processo mediante analisi della dominanza statistica parziale in video-frame delle emissioni di plume – presenta diversi vantaggi per il monitoraggio in-linea di processi additivi:

- efficienza computazionale: il dato complesso in forma di video viene sintetizzato in forma di curva (ecdf), e la carta di controllo si basa su una statistica univariata che può essere stimata in tempo reale;
- flessibilità: il metodo è facilmente applicabile a video acquisiti durante la stampa di qualsiasi geometria, indipendentemente dalle impostazioni e dai parametri di processo;
- estendibilità: può essere facilmente esteso a diverse tipologie di dati in ingresso, e.g., immagini e video nel visibile, video a colori, video ad alta velocità, etc.

L'analisi su dati simulati presentata in [14] ha inoltre evidenziato i benefici del metodo rispetto a metodi competitor, e l'elevata efficacia nell'identificare stati fuori controllo dovuti a instabilità di processo anche in presenza di firma di processo tempo-varianti come quelle legate alle emissioni di plume in L-PBF. Lo studio ha evidenziato come l'emissione di plume possa essere una firma di processo utile a identificare deviazioni da un comportamento stabile e in-controllo. A valle di questa attività sono state condotte prove sperimentali di caratterizzazione sui provini e test case prodotti con tecniche non distruttive e di ispezione, attraverso tomografica a raggi X. I risultati delle misure sono stati messi in correlazione con i risultati ottenuti dalle analisi in-situ. Infine gli strumenti sviluppati sono stati testati e validati su test case identificati.
Sempre nell'ambito della presente tematica, è stato analizzato un ulteriore test case rappresentato da un componente metallico appartenente ad una pompa ad ingranaggi (Figura 1.14). Questo test case è stato prodotto mediante il processo DMLD.

Figura 1.14 - Componente della pompa ad ingranaggi

Attualmente la pompa in questione è prodotta mediante le tradizionali tecniche sottrattive di lavorazione. Questo però comporta un elevato numero di step per arrivare al prodotto finito. I materiali utilizzati sono acciaio inox Aisi 304 e Aisi 420B per la struttura, mentre gli ingranaggi per il funzionamento sono in una lega rame-stagno-nichel. I componenti che costituiscono la pompa sono riportati in Figura 1.15.

1. Corpo pompa (Aisi 304);
2. Boccola (Lega di rame CW307G);
3. Perno ingranaggio folle (Aisi 420B);
4. Coperchio corpo pompa (Aisi 304);
5. Perno di aggancio (Aisi 304);
6. Perno fisso (Aisi 304) ;
7. Vite di fissaggio del perno per l'ingranaggio folle (Aisi 304);
8. Pomello pompa (Aisi 304);
9. Ingranaggi per il funzionamento (lega rame-stagno-nichel).

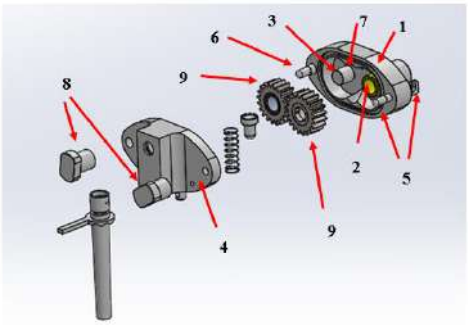


Figura 1.15 - Vista esplosa della pompa secondo la numerazione elencata sopra

Nell'ambito del progetto SIADD è stata ridisegnata una geometria che comportasse un alleggerimento di tutto l'assieme dei componenti e che aiutasse anche a rendere l'assemblaggio più funzionale e rapido. Per quanto riguarda il corpo pompa si è passati da una geometria forata con gli alloggiamenti per le viti di fissaggio (perno di aggancio e perno fisso) ad una geometria che non presenta fori, ma ha le viti integrate andando così ad eliminare questa parte dal ciclo di produzione. Nella geometria ottimizzata sono state incluse le superfici sulle

quali ruotano gli ingranaggi, che comprendono boccola e perno per l'ingranaggio folle, in questo modo è stato possibile chiudere un altro foro presente sul corpo pompa e di non utilizzare più la vite di fissaggio per il perno dell'ingranaggio folle.

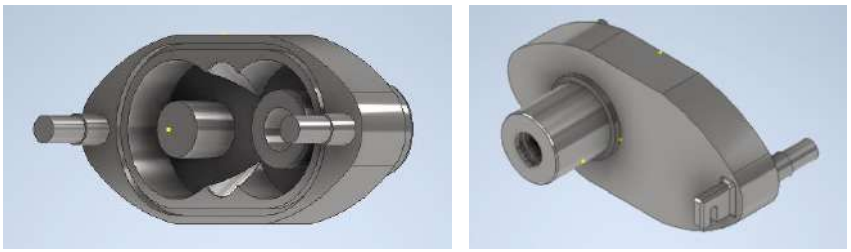


Figura 1.16 - Corpo pompa ottenuto tramite deposizione DLMD

In termini di riduzione di peso tra il prodotto in esame ottenuto con le lavorazioni tradizionali e quello con DLMD, si può affermare che il grezzo ha un peso pari a circa 2.814Kg contro 1.518Kg (AM), mentre il finito ha un peso di 1.945Kg contro 1.416Kg (AM). La riduzione di materiale grezzo è pari al 46%, mentre la riduzione del finito è pari al 27%. Inoltre con le lavorazioni tradizionali la pompa è composta da molti più componenti rispetto al redesign in ottica AM. La pompa verrà realizzata in acciaio Inox Aisi 316L, un materiale resistente alla corrosione. Questo materiale è relativamente costoso ed è per questo motivo che, fermo restando i vantaggi di sopra, verrà utilizzato nel processo AM. Prima di realizzare il componente sono state effettuate delle analisi metallografiche sui provini prodotti con polvere di AISI 316L. In questo modo si sono potuti individuare i parametri di processo ottimali per ottenere tracce con caratteristiche geometriche appropriate. Successivamente l'analisi metallografica è stata utile ad individuare le irregolarità geometriche e la difettosità interna dei componenti prodotti. Ad esempio, si è potuto escludere la strategia di deposizione a spirale per la realizzazione dei cilindri pieni, dato l'insorgere di un'accentuata porosità d'intercorsa e mancanza di fusione nella parte centrale dei campioni. Ad essa si è preferita una strategia di contornatura esterna e raster interno, che ha mostrato una minore presenza di difetti. A seguito di questo studio preliminare e tenendo conto dei risultati ottenuti sulle geometrie semplici, sono state selezionate e progettate le strategie di deposizione per il componente finale. Un elemento cruciale della progettazione del tool path è stata la riduzione al minimo delle interruzioni del percorso laser, cercando di ottenere un percorso continuo e quanto più omogeneo possibile. Ciò è dato dall'elevato range di potenza a cui lavorava il laser industriale, che avrebbe comportato rampe eccessive per entrare in un regime stazionario di processo. Infine, dopo la realizzazione, il componente realizzato è stato scansionato con scanner 3D. Si riporta in Figura 1.17 la ricostruzione 3D che si è ottenuta. Il particolare è stato lasciato grezzo in alcuni sue parti per mettere in risalto il processo additivo con cui è stato creato.

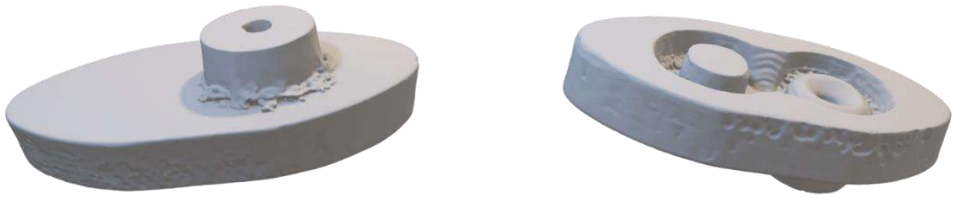


Figura 1.17 - Scansione del corpo pompa mediante scanner 3D

Aspetti di sostenibilità ambientale, economica ed organizzativa dei processi AM

Riferimenti al progetto SIADD

Linea di ricerca **OR7:** *Analisi di sostenibilità manifatturiera ed organizzativa dei processi AM*, coordinata dal prof. **Michele Dassisti,** Politecnico di Bari
Attività 7.1 *Valutazione delle potenzialità di impatto economico delle soluzioni tecnologiche per i processi SLM, DMLD, EBM e CFF-AFP*, POLIBA, deliverable **D7.1**
Attività 7.2 *Analisi degli scenari di sviluppo del business in ambito SLM/DMDL/EBM/CF-APP*, CNR, deliverable **D7.2**

Linea di ricerca OR 1 *Ottimizzazione trattamenti termici su palette turbina in TiAl realizzate mediante Electron Beam Melting***,** coordinata dalla **prof.ssa Sabina Luisa Campanelli**, Politecnico di Bari
Attività 1.7 *Analisi di sostenibilità manifatturiera del processo di trattamento termico e identificazione del "sensing system*", POLIBA (responsabile attività), GE AVIO, deliverable **D1.7**

Linea di ricerca OR2 *Monitoraggio in-situ SLM***,** coordinata dalla **prof. ssa Bianca Maria Colosimo**, Politecnico di Milano
Attività 2.7 *Test Case ed analisi di sostenibilità*, HBT (responsabile attività) , POLIMI, POLIBA, deliverable **D2.7**

In questa sezione si riportano i risultati dell'analisi effettuata in SIADD relativa all'impatto energetico dei trattamenti termici atti a garantire specifiche caratteristiche e proprietà ai componenti prodotti con tecnologie AM. La trattazione è stata svolta su diversi materiali e tecnologie, in maniera tale da poter confrontare le differenti soluzioni e comprendere al meglio i fenomeni che si manifestano in questo tipo di lavorazioni su componenti AM metallici.
Come precedentemente descritto, le tecnologie AM adoperano differenti fonti energetiche per lavorare le materie prime e formare gli strati. I notevoli vantaggi dell'AM, come la sua flessibilità, possono contribuire al miglioramento degli aspetti ambientali durante le fasi di produzione e l'intero ciclo di vita del prodotto.
In quest'ottica è stata svolta una ricerca bibliografica per determinare i consumi energetici delle diverse tecnologie. Kellens et al. hanno determinato i range di consumo energetico di numerose tecnologie AM, elaborando dati al variare del materiale e dei parametri di processo utilizzati [15].
Baumers et al. hanno elaborato dei consumi energetici delle tecnologie AM espresse in funzione della quantità di prodotto. Gli autori hanno tenuto in considerazione anche gli effetti delle fasi di stand-by che caratterizzano alcune tecnologie.
In base agli studi riportati, sono stati vagliati i valori di consumo energetico (MJ/Kg) per le tecnologie AM oggetto di studio, ovvero: SLM/L-PBF = 80; EBM=70; WAAM =20.
Si è dunque passati alla modellazione del forno industriale tipicamente usato per i trattamenti termici, a partire da una attenta analisi dei dati relativi a forni industriali elettrici disponibili in commercio, ricavati da schede tecniche e manuali messi a disposizione dalle aziende produttrici. Sono stati poi analizzati alcuni casi applicativi e si è evinto come il consumo energetico di alcuni trattamenti particolarmente intensivi possa essere comparato, se non superiore, a quello allocabile alla produzione AM dei componenti stessi. Ovviamente tale analisi è intrinsecamente legata alle dimensioni e geometrie dei componenti prodotti. Tali fattori influenzano, però, in primo luogo il consumo energetico relativo alla produzione AM, ma impattano anche sui relativi trattamenti termici, soprattutto dal punto di vista della durata. Infatti, componenti di dimensioni maggiori o con geometrie più compatte richiederanno trattamenti termici più duraturi, che permettano un riscaldamento omogeneo di tutto il materiale.
Per validare l'analisi energetica effettuata sui dati bibliografici, è stata ideata una strumentazione di lettura e registrazione dei consumi energetici denominata "sensing system". Il dispositivo è stato sviluppato per il rilevamento in-situ dei consumi energetici delle diverse tecnologie AM analizzate nelle diverse linee del

progetto. Nel caso in esame, è stato progettato per un sistema utile a valutare i consumi energetici del ciclo di HIPQ.
Nell'ambito della valutazione di sostenibilità, è stata altresì focalizzata l'attenzione sul componente guida d'onda svergolata mostrato in figura 1.18. Il componente in alluminio (AlSi10Mg) ha un volume totale di 74 cm3. Il processo preso in esame ha riguardato la produzione di 2 componenti identici. Tale valore sarà indispensabile per calcolare il consumo energetico specifico del sistema SLM.

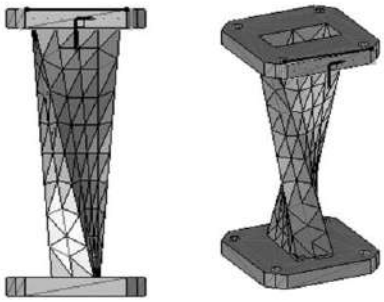


Figura 1.18 - Guida d'onda svergolata

La prima fase dell'analisi di sostenibilità ha riguardato l'analisi dei tempi di produzione dei componenti.

Da questa analisi si è messo in evidenza come il 48% del tempo di lavorazione sia speso per azioni ausiliare indispensabili, ma distinte dall'effettiva lavorazione laser. Questi hanno un considerevole impatto sul consumo energetico del sistema SLM, dato che durante questi tempi la strumentazione ha un determinato consumo di standby non trascurabile.

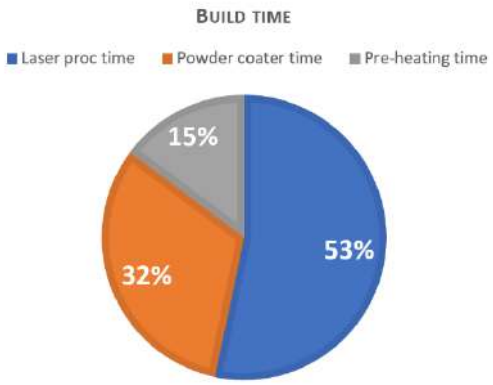


Figura 1.19 - Composizione percentuale dei tempi di processamento della guida d'onda

I campioni prodotti vengo sottoposti ad una serie di operazioni post-process per migliorarne le proprietà. Questi subiscono un ciclo termico che ne migliora le proprietà meccaniche. A cui segue un processo di sabbiatura per migliorarne la finitura superficiale. A queste si aggiunge un'operazione di setacciatura delle polveri per il riutilizzo, che è stato comunque incluso nel ciclo di produzione. In sintesi, il 58% del tempo totale viene dedicato alla fabbricazione della parte, mentre il restante 42% viene allocato alle operazioni di post-process.
Prendendo in considerazione i consumi energetici totali della produzione e una massa di materiale processata pari a 0,198 Kg, è possibile ricavare il consumo specifico del sistema. Nel caso preso in esame il consumo specifico totale risulta di 694 MJ/kg se si considerano i consumi complessivi, che scende a 419 MJ/Kg se si prendono in considerazione solo i consumi allocabili ai tempi di processamento (laser funzionante). Successivamente ci si è avvalsi di informazioni ricavate da schede tecniche e di misurazioni in loco per avere uno schema delle potenze e delle energie in gioco. Il consumo di energia elettrica attribuibile alla produzione SLM si compone come mostrato in Figura 1.20. Il 68% del carico energetico è attribuito al sistema SLM, considerato come somma dei

periodi di attività (45%) e periodi di standby (23%). Il restante 32% del carico energetico e invece allocabile al chiller e al deumidificatore presenti sulla macchina SLM e che sono in funzione sia nelle fasi di produzione che in quelle di preparative.

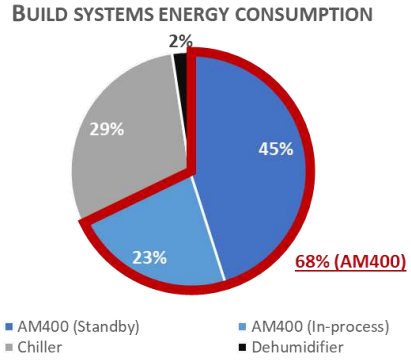


Figura 1.20 – Composizione percentuale dei carichi energetici della produzione SLM

I consumi allocabili alle operazioni di post-process vedono un forte impatto del trattamento termico, infatti è stato stimato che il 77% dei carichi è attribuibile al forno industriale per un ciclo costituito da rampa di riscaldamento, mantenimento a temperatura di trattamento e raffreddamento in aria. Una quota minore del consumo del sistema di sabbiatura, dato soprattutto dalla breve durata dell'operazione. Quote poco rilevanti sono invece attribuibili alle operazioni di setacciatura delle polveri di scarto. Pertanto, si può concludere che le operazioni di post-process hanno un impatto energetico non trascurabile rispetto al consumo globale. Queste sono correlate con le proprietà meccaniche e di finitura superficiale che si vuole dare al componente, migliori proprietà richiederanno lavorazioni più intense e durature e conseguentemente un consumo energetico maggiore. D'altro canto, il consumo energetico attribuibile alla sola produzione SLM è notevole. Una quota parte non marginale riguarda operazioni ausiliare a quelle di produzione laser. In un'ottica di miglioramento delle prestazioni energetiche della produzione SLM si dovrebbe puntare a diminuire la durata di tali operazioni ausiliare. Si potrebbe altresì investire in una produzione SLM più performante (e probabilmente più energivora), che però possa tagliare i costi delle operazioni post-process.

In ultimo, sempre nell'ambito dell'attività condotta nella macro-tematica della sostenibilità ambientale ed economica è stata effettuata una azione di ascolto dei partner di progetto circa le opportunità di business tramite le tecnologie AM, di cui si riporta di seguito il risultato.

Tra i nuovi modelli di business che risultano anche in letteratura, particolarmente interessanti sono i processi ibridi (produzione tradizionale svolta congiuntamente con la produzione additiva per ridurre i tempi di sviluppo, ridurre i costi logistici, ...) che vedono applicazioni variegate di AM in funzione degli scenari di produzione in cui l'efficienza unica delle tecnologie AM può creare valore aggiunto per i clienti. Si è quindi svolta una analisi delle realtà locali di alcuni territori di riferimento per comprendere le dinamiche di applicazione di queste tecnologie e la loro pervasività, mediante questionario strutturato appositamente progettato, che è stato utilizzato per intervistare i partner tecnologici del progetto SIADD, quali riferimenti esperti, per avere una visione affidabile dele dinamiche e le opportunità di applicazione di queste tecnologie [18].

È stata realizzata pertanto una focalizzazione nelle interviste sui processi additivi e sottrattivi (processi ibridi) per comprendere come le tecnologie dell'Additive Manufacturing possano condurre a nuovi modelli di business. Le interviste sono state suddivise in 3 macrocategorie: BM attuale dell'azienda; sostenibilità dei processi; BM del futuro.

Da questa analisi si è evinto che le tecnologie di AM risultano sempre di più in grado di portare ad una riduzione dei pesi dei componenti basata su due opportunità: possibilità di alleggerimento della parte metallica da un lato ed il rinforzo strutturale dall'altro (prevalentemente in materiale composito). Le tecnologie AM permettono di migliorare le problematiche dei processi, consentendo la lavorazione dei prodotti in maniera più funzionale (ad esempio, le soluzioni di creazione di prodotti con due o più materiali).

Si è evinto dall'analisi delle interviste l'opportunità di rivedere i piani di formazione e di inserimento del personale per poter essere più competitivi nello scenario nazionale ed ancor più internazionale. Anche per alcune tipologie di processi come, ad esempio, di verniciatura, l'azienda è riuscita ad affrontare numerosi vincoli tramite la tecnologia HP Multi Jet Fusion. L'AM permette di testare direttamente una soluzione progettuale innovativa dei prodotti già in produzione, ovvero consentire rapide modifiche delle attrezzature/componenti di produzione per accelerare le fasi di manutenzione/revamping. Le tecnologie di AM offrono nuove opportunità di sviluppo prodotto e a conseguenti cambiamenti dei modi organizzare la produzione, portando anche un notevole incremento del time-to-market che a sua volta porterà ad un sempre più solido background di competenza che potrà permettere alle imprese di affrontare con sicurezza le stesse problematiche in futuro..

Dal punto di vista tecnologico, si sono riconosciute quelle caratteristiche comuni dell'AM, indipendentemente dalla tecnologia adottata, che consentono di realizzare forme e geometrie complesse non ottenibili con i metodi sottrattivi tradizionali, permettendo così di aprire nuovi scenari di produzione come la rapidità di realizzazione prodotti (ad esempio la velocità di deposizione; il near-net-shape manufacturing); facilitando l'adozione di materiali differenti, con particolare riguardo ai bio-materiali, alla produzione on-demand, alla personalizzazione delle geometrie e delle proprietà meccaniche dei componenti.

Le tecnologie di AM possono consentire funzionalità uniche come add-on su parti prodotte con metodi di produzione tradizionali, possibilità di realizzazione indipendente dal luogo fisico della impresa con significativi vantaggi di sostenibilità anche sulla supply-chain, flessibilità realizzative tali da consentire processi ibridi (mix di tecnologie additive con tecnologie di fabbricazione tradizionali), fit-for-smartness poiché consentono la naturale interazione con sistemi industriali della Industria 4.0.

Uno dei vantaggi delle tecnologie additive è anche la riparazione di componenti di prodotti ad alto valore aggiunto facilitandone la manutenzione e quindi l'allungamento della vita utile dei componenti. Una prospettiva che è risultata promettente, da questo studio, per le tecnologie di AM consiste nel mix di tecnologie additive con tecnologie di fabbricazione tradizionali (processi ibridi).

Sezione II - Settori produttivi beneficiari delle soluzioni proposte

Nell'ambito di questa sezione verranno identificati i ***"Key Exploitable Results",*** ovvero come i risultati presentati nella precedente sezione possono essere utilizzati per creare ricadute economiche e potenzialmente incremento occupazionale per i partner di progetto.

Invenzioni	Conoscenza
Prototipi	Tecnologie
Servizi	Processi
	Relazioni

L'idea è quindi quella di mettere in risalto le innovazioni emerse dal progetto, chi sono gli innovatori e cosa serve al prodotto/processo/servizio per arrivare sul mercato.
Dal punto di vista tecnologico, si sono riconosciute quelle caratteristiche comuni dell'AM, indipendentemente dalla tecnologia adottata, che consentono di realizzare forme e geometrie complesse non ottenibili con i metodi sottrattivi tradizionali.
Più in dettaglio, l'AM permette di aprire nuovi scenari di produzione come:

- realizzazione rapida di prodotti (ad esempio la velocità di deposizione; il near-net-shape manufacturing);
- adozione di materiali differenti, con particolare riguardo ai bio-materiali;
- produzione on-demand;
- personalizzazione delle geometrie e delle proprietà meccaniche dei componenti;
- funzionalità uniche come add-on su parti prodotte con metodi di produzione tradizionali;
- possibilità di realizzazione di componenti indipendente dal luogo fisico della impresa con significativi vantaggi di sostenibilità anche sulla supply-chain;
- flessibilità realizzative tali da consentire processi ibridi (mix di tecnologie additive con tecnologie di fabbricazione tradizionali);
- fit-for-smartness poiché consentono la naturale interazione con sistemi industriali della Industria 4.0;
- riparazione di componenti di prodotti ad alto valore aggiunto facilitandone la manutenzione e quindi l'allungamento della vita utile dei componenti.

Strumenti digitali di ottimizzazione di prodotto

Prodotto: Corpo Attuatore Meccanico (Housing)

<table>
<tr>
<td rowspan="2">Partner di progetto
- Poliba
- ENEA
- EnginSoft
- UniKore
- HB-T
- Unisalento
- Umbra</td>
<td>Attuale processo o metodo
- Processi per asportazione di truciolo
- Trattamenti termici</td>
<td rowspan="2">Proposta di valore dell’innovazione
- Elevato grado di affidabilità del componente
- Tolleranze stringenti
- Alleggerimento a parità di prestazioni meccaniche</td>
<td>Nuovo processo o metodo
- Stampa Selective Laser Melting (SLM)</td>
<td rowspan="2">Settore di applicazione
Aziende che realizzano parti per i settori:
- Aeronautica
- Spazio
- Nautica
- Energia
(es. movimentazione strumentazione accessoria)</td>
</tr>
<tr>
<td>Risorse
- Alluminio</td>
<td>Maturità tecnologica
TRL 6</td>
</tr>
<tr>
<td colspan="3">Aree di ulteriore sviluppo
- Studiare ulteriori lavorazioni meccaniche di finitura
- Incrementare le performance meccaniche</td>
<td colspan="2">Vantaggi dell’innovazione proposta
- Fasi di lavorazione ridotte
- Minore consumo energetico
- Minore quantità di materiale di scarto</td>
</tr>
</table>

Prodotto: Particolare strutturale in acciaio

<table>
<tr>
<td rowspan="2">Partner di progetto
- Poliba
- ENEA
- EnginSoft
- UniKore
- HB-T
- Unisalento
- Umbra</td>
<td>Attuale processo o metodo
- Processi per asportazione di truciolo</td>
<td rowspan="2">Proposta di valore dell’innovazione
- Elevato grado di affidabilità del componente
- Tolleranze stringenti
- Riduzione numero di componenti</td>
<td>Nuovo processo o metodo
- Stampa Selective Laser Melting (SLM)</td>
<td rowspan="2">Settore di applicazione
Aziende che realizzano parti per i settori:
- Aeronautica
- Spazio
- Nautica
- Energia</td>
</tr>
<tr>
<td>Risorse
- Acciaio PH13-8Mo</td>
<td>Maturità tecnologica
TRL 6</td>
</tr>
<tr>
<td colspan="3">Aree di ulteriore sviluppo
- Studiare ulteriori lavorazioni meccaniche di finitura
- Incrementare le performance meccaniche</td>
<td colspan="2">Vantaggi dell’innovazione proposta
- Diminuzione numero pezzi per componenti
- Diminuzione tempo di lavorazione meccanica
- Minore quantità di materiale di scarto</td>
</tr>
</table>

Prodotto: Inserto per ricircolazione

<table>
<tr>
<td rowspan="2">Partner di progetto
- Poliba
- ENEA
- EnginSoft
- UniKore
- HB-T
- Unisalento
- Umbra</td>
<td>Attuale processo o metodo
- Processi per asportazione di truciolo</td>
<td rowspan="2">Proposta di valore dell’innovazione
- Elevato grado di affidabilità del componente
- Elevata precisione dell'azione meccanica
- Tolleranze minime da rispettare
- Componente complesso realizzabile solo mediante processo di AM</td>
<td>Nuovo processo o metodo
- Stampa Selective Laser Melting (SLM)</td>
<td rowspan="2">Settore di applicazione
Aziende che realizzano parti per i settori:
- Aeronautica
- Spazio
- Nautica
- Energia

(es. Inserto per ricircolazione su una vite a ricircolo di sfere)</td>
</tr>
<tr>
<td>Risorse
Acciaio</td>
<td>Maturità tecnologica
TRL 6</td>
</tr>
<tr>
<td colspan="3">Aree di ulteriore sviluppo
- Incrementare le performance termiche del componente</td>
<td colspan="2">Vantaggi dell’innovazione proposta
- Aumento delle performance dinamiche
- Gestione termica del componente</td>
</tr>
</table>

Prodotto: Housing motore elettrico

<table>
<tr>
<td rowspan="2">Partner di progetto
- Poliba
- ENEA
- EnginSoft
- UNIKore
- HB-T
- Unisalento
- Umbra</td>
<td>Attuale processo o metodo
- Processi per asportazione di truciolo</td>
<td rowspan="2">Proposta di valore dell’innovazione
- Elevato grado di affidabilità del componente
- Tolleranze minime da rispettare
- Componente complesso realizzabile solo mediante processo di AM</td>
<td>Nuovo processo o metodo
- Stampa Selective Laser Melting (SLM)</td>
<td rowspan="2">Settore di applicazione
Aziende che realizzano parti per i settori:
- Aeronautica
- Spazio
- Nautica
- Energia
(es. prodotto per trasmissioni di azioni meccaniche in navicelle spaziali)</td>
</tr>
<tr>
<td>Risorse
- Acciaio</td>
<td>Maturità tecnologica
TRL 6</td>
</tr>
<tr>
<td colspan="3">Aree di ulteriore sviluppo
- Studiare ulteriori lavorazioni meccaniche di finitura
- Incrementare le performance meccaniche</td>
<td colspan="2">Vantaggi dell’innovazione proposta
- Riduzione della massa del pezzo
- Aumento delle performance della gestione termica</td>
</tr>
</table>

Dati virtuali da simulazione di prodotto e processo

Metodo per l'ottimizzazione dei trattamenti termici

<table>
<tr>
<td rowspan="2">Partner di progetto
- Avio Aero
- Poliba
- EnginSoft</td>
<td>Attuale processo o metodo
- Trattamento termico superficiale</td>
<td rowspan="2">Proposta di valore dell'innovazione
- Incrementate le proprietà meccaniche
- Ridotti i tempi di progettazione e successivi costi di lavorazione</td>
<td>Nuovo processo o metodo
- Stampa Selective Laser Melting (SLM)
- HIP/Quench</td>
<td rowspan="2">Settore di applicazione
Aziende che realizzano parti per i settori:
- Aeronautica
- Spazio
- Nautica
- Energia
(es. prodotti o accessori in lega leggera di titanio per applicazioni aerospaziali)</td>
</tr>
<tr>
<td>Risorse
- Metodo numerico-sperimentale</td>
<td>Maturità tecnologica
TRL 4</td>
</tr>
<tr>
<td colspan="3">Aree di ulteriore sviluppo
- Approfondire la dinamica combinata di Pressatura Isostatica a Caldo (HIP) e tempra (Quenching) per prodotti realizzati in AM</td>
<td colspan="2">Vantaggi dell'innovazione proposta
- Riduzione dei difetti che si possono creare in fase di fabbricazione di parti
- Riduzione delle porosità</td>
</tr>
</table>

Metodo per lo sviluppo di componenti in materiale composito

<table>
<tr>
<td rowspan="2">Partner di progetto
- Novotech
- Umbra
- EnginSoft
- Elfim
- UniKore
- ENEA
- CNR
- Poliba</td>
<td>Attuale processo o metodo
- Modelli agli elementi finiti</td>
<td rowspan="2">Proposta di valore dell'innovazione
- Mitigare le deformazioni delle parti di un componente
- Tecniche di modellazione numerica e previsione delle condizioni termo-meccaniche</td>
<td>Nuovo processo o metodo
Procedura algoritmica innovativa</td>
<td rowspan="2">Settore di applicazione
Aziende che realizzano parti per i settori:
- Aeronautica
- Spazio
- Nautica
- Energia
(es. Strutture a guscio
Strutture "bulk")</td>
</tr>
<tr>
<td>- Risorse</td>
<td>Maturità tecnologica
TRL 6</td>
</tr>
<tr>
<td colspan="3">Aree di ulteriore sviluppo
- Approfondire le tecniche di omogeneizzazione
- Approfondire le tecniche di modellazione mesoscala</td>
<td colspan="2">Vantaggi dell'innovazione proposta
- Riduzione dei difetti derivanti del processo di AFM</td>
</tr>
</table>

Metodo per l'incremento delle prestazioni di prodotti

<table>
<tr>
<td>Partner di progetto
- Umbra
- Poliba
- UniKore
- ENEA
- CNR
- EnginSoft</td>
<td>Attuale processo o metodo
- Nessuno

Risorse
- Stampa SLM
- PEEK
- Automatic Fiber Placement (AFM)</td>
<td colspan="2">Proposta di valore dell'innovazione
- Mitigazione del comportamento di delaminazione di interfaccia</td>
<td>Nuovo processo o metodo
Metodo agli elementi finiti

Maturità tecnologica
TRL 5</td>
<td>Settore di applicazione
Aziende che realizzano parti per i settori:
- Aeronautica
- Spazio
- Nautica
- Energia

es. strutture aerospaziali multimateriali (pannelli o "gusci")</td>
</tr>
<tr>
<td colspan="3">Aree di ulteriore sviluppo
- Approfondire gli studi di adesione tra materiali</td>
<td colspan="3">Vantaggi dell'innovazione proposta
- Metodo che permette di ottenere forme complesse ed "ad hoc"</td>
</tr>
</table>

Prodotto attuatore elettromeccanico

<table>
<tr>
<td>Partner di progetto
- Umbra
- Poliba
- UniKore
- ENEA
- CNR
- EnginSoft</td>
<td>Attuale processo o metodo
- Nessuno

Risorse
- AlSiMg10</td>
<td colspan="2">Proposta di valore dell'innovazione
- Componente meccanico con forma ad hoc e funzionalità superiori</td>
<td>Nuovo processo o metodo
- Stampa SLM
- Automatic Fiber Placement (AFM)

Maturità tecnologica
TRL 5</td>
<td>Settore di applicazione
Aziende che realizzano parti per i settori:
- Aeronautica
- Spazio
- Nautica
- Energia
es. trasmissioni di azioni meccaniche in navicelle spaziali</td>
</tr>
<tr>
<td colspan="3">Aree di ulteriore sviluppo
- Incrementare le performance meccaniche
- Componente di difficile certificazione aerospaziale</td>
<td colspan="3">Vantaggi dell'innovazione proposta
- Riduzione di peso e incremento di prestazioni funzionali</td>
</tr>
</table>

Metodo per l'acquisizione di forme tridimensionali

Partner di progetto
- Umbra
- Poliba
- UniKore
- ENEA
- CNR
- EnginSoft

Attuale processo o metodo
- Scanner a luce strutturata fisso o comunque con limitati gradi di libertà

Risorse
- Scanner a luce strutturata
- Ottiche
- Cinematismi e automazione

Proposta di valore dell'innovazione
- Recupero tutte le informazioni dimensionali di interesse di un componente
- Semplice rilevazione dei possibili sottosquadra di componenti geometricamente complessi

Nuovo processo o metodo
- Tavolo rotante digitalizzato tramite luce strutturata in movimento da CNC a 3 assi

Maturità tecnologica

TRL 5

Settore di applicazione

Aziende che realizzano parti per i settori:
- Aeronautica
- Spazio
- Nautica
- Energia

Aree di ulteriore sviluppo
- Approfondire i temi della sensoristica innovativa e nuove forme di cinematismo per incrementare il numero di gradi di libertà del prototipo

Vantaggi dell'innovazione proposta
- Automatizzazione delle operazioni di acquisizione 3D di forme e misure
- Realizzazione di gemelli digitali

Dati reali acquisiti da sensorizzazione in-situ

Metodo per l'acquisizione di dati reali in-situ

Partner di progetto
- Poliba
- Elfim
- ENEA
- EnginSoft
- Unisalento
- UniKore
- Polimi

Attuale processo o metodo

Risorse
- Sensoristica ottica
- Sensoristica di segnale

Proposta di valore dell'innovazione
- Garantire elevati standard qualitativi dei prodotti
- Evitare parti con deviazioni dimensionali, geometriche e altre tipologie di difetti non accettabili

Nuovo processo o metodo
- Monitoraggio statistico di segnali acquisiti in-situ

Maturità tecnologica

TRL 5

Settore di applicazione

Aziende che realizzano parti per i settori:
- Aeronautica
- Spazio
- Nautica
- Energia

Aree di ulteriore sviluppo
- Trattamento in tempo reale di grandi quantità di dati in formati differenti
- Sviluppo di sistemi di in-situ damage detection, per migliorare la modalità di rilevazione e la tipologia di difetto
- Sviluppo di sistemi di correlazione delle informazioni acquisite in-situ con le misure effettuate sul prodotto finale.

Vantaggi dell'innovazione proposta
- Controllare in fase di produzione i fattori che determinano la qualità del prodotto

Sezione III – Il Mercato dell'additive manifacturing

Introduzione

L'Additive Manufacturing (AM), più popolarmente conosciuta come 'stampa 3D', è ritenuta da molte ricerche e imprenditori essere alla base di una nuova rivoluzione manifatturiera. L'Additive Manufacturing (traduzione letterale: produzione additiva) comprende una vasta gamma di tecnologie relative ai processi di produzione che stanno emergendo per offrire la prospettiva di personalizzazione di massa su richiesta e una produzione più localizzata, flessibile e sostenibile. L'adozione e l'implementazione di queste tecnologie potrebbero stravolgere l'organizzazione della produzione e i modi in cui le aziende acquisiscono valore.
Mentre la stampa 3D è comunemente usata per indicare le macchine utilizzate principalmente dagli utenti domestici, additive manufacturing è il termine accettato in ambito industriale. I due termini sono spesso usati indifferentemente ed entrambi si riferiscono ad un processo di giunzione dei materiali per creare oggetti a partire da dati di un modello digitale 3D, di solito strato su strato, al contrario delle metodologie di produzione sottrattive. A differenza dei processi di produzione tradizionali (subtractive manufacturing), che realizzano oggetti rimuovendo parti di materiale dal pieno, l'additive manufacturing costruisce un nuovo oggetto (componenti, semilavorati o prodotti finiti) a partire da modelli digitali 3D attraverso la deposizione di strati successivi di materiale. Tale principio di produzione aumenta notevolmente la libertà di progettazione, rendendo possibile creare delle geometrie di prodotto complesse che sarebbero molto difficili se non impossibili da realizzare con processi di produzione standard.
La possibilità di stampare su carta è ormai da decenni nella nostra pratica quotidiana, mentre, al contrario, la possibilità di stampare un oggetto (in plastica, metallo, ceramica, cera, gesso, ecc.) a partire da un disegno digitale CAD (*Computer-Aided Design*) appartiene per ora all'esperienza di un numero significativamente più basso di operatori. L'analogia tra le stampanti tradizionali e queste nuove tecnologie giustifica l'uso del termine stampa 3D come sostanziale sinonimo di manifattura additiva.
L'AM non riguarda una singola tecnologia, ma identifica una serie di tecnologie, ciascuna attualmente testata e sviluppata fino a diversi livelli di maturità tecnologica, che offrono la possibilità di utilizzare diversi materiali per la fabbricazione di prodotti finiti di qualità diverse. Queste tecnologie differiscono in base a quattro fattori principali:

- lo stato fisico della materia prima utilizzata, per cui si distinguono processi AM a base solida, a base liquida e in polvere,
- la fonte di energia,
- il processo di formazione degli strati,
- la forma del prodotto finale.

Questi fattori hanno un impatto sulla qualità della superficie finale, sulla precisione delle dimensioni, sulle proprietà meccaniche del prodotto finale e sui tempi e costi di produzione complessivi. La **Errore. L'origine r iferimento non è stata trovata.** mostra una delle possibili classificazioni delle tecnologie AM.
L'Additive Manufacturing è ritenuta da molte ricerche e imprenditori essere alla base di una nuova rivoluzione manifatturiera. L'Additive Manufacturing, come abbiamo visto nelle precedenti sezioni, comprende una vasta gamma di tecnologie relative ai processi di produzione che stanno emergendo per offrire la prospettiva di personalizzazione di massa su richiesta e una produzione più localizzata, flessibile e sostenibile. L'adozione e l'implementazione di queste tecnologie potrebbero stravolgere l'organizzazione della produzione e i modi in cui le aziende acquisiscono valore.

Mentre la stampa 3D è comunemente usata per indicare le macchine utilizzate principalmente dagli utenti domestici, additive manufacturing è il termine accettato in ambito industriale. I due termini sono spesso usati indifferentemente ed entrambi si riferiscono ad un processo di giunzione dei materiali per creare oggetti a partire da dati di un modello digitale 3D, di solito strato su strato, al contrario delle metodologie di produzione sottrattive.

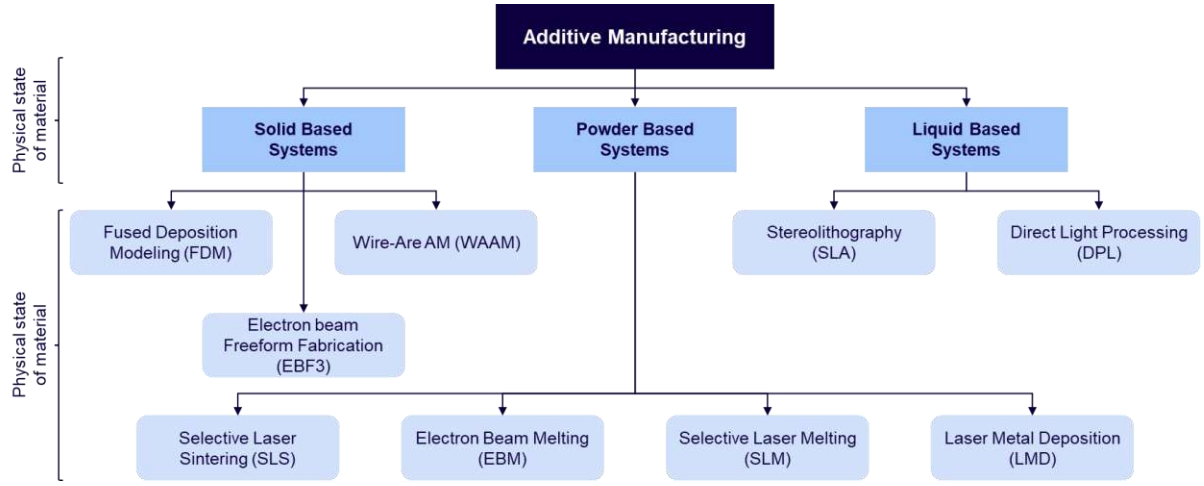


Figura 3.1: Classificazione di additive manufacturing *(Fonte: Ishgaq, K. and Asad, M., 2022)*

La possibilità di stampare su carta è ormai da decenni nella nostra pratica quotidiana, mentre, al contrario, la possibilità di stampare un oggetto (in plastica, metallo, ceramica, cera, gesso, ecc.) a partire da un disegno digitale CAD (*Computer-Aided Design*) appartiene per ora all'esperienza di un numero significativamente più basso di operatori. L'analogia tra le stampanti tradizionali e queste nuove tecnologie giustifica l'uso del termine stampa 3D come sostanziale sinonimo di manifattura additiva.

Applicazioni della tecnologia AM

Le tecnologie AM sono diffuse in misura significativa in diversi settori della manifattura, come quello del trasporto, aerospaziale, medico e automobilistico.
Nel 2017 il settore della produzione di macchine industriali era quello con la quota di mercato dell'AM più alta con il 19% seguito dal settore aerospaziale con 18% e il settore dell'automotive con 15%.
Come riportato nella Figura 3.2, nel 2019 i settori dell'industria manufatturiera e dell'automotive avevano la quota maggiore di ricavi di vendita del mercato AM. Il settore aerospaziale continua ad essere uno dei principali contributori del mercato con una quota a livello globale pari a circa il 18%.

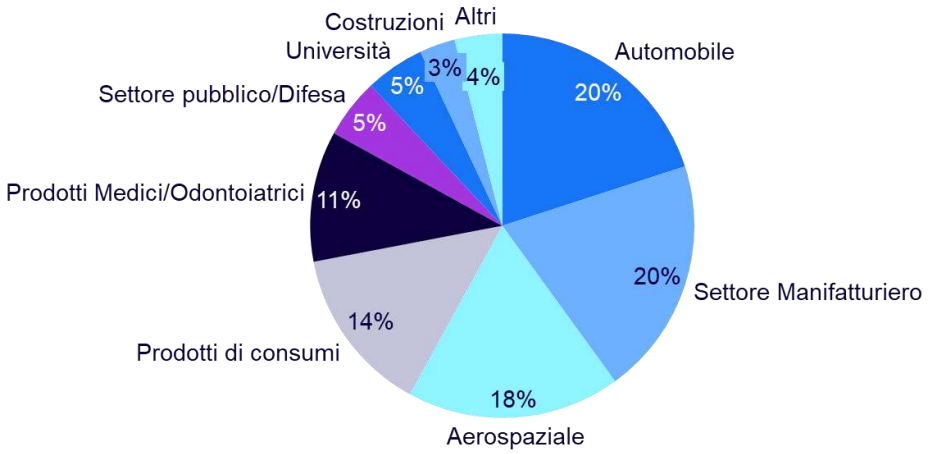


Figura 3.2 Quota dei ricavi delle vendite del mercato globale della AM per settore per il 2019
(fonte dati: ICTC; Wohlers Associates)

Applicazioni nel settore aerospaziale

L'interesse dell'industria aerospaziale per la tecnologia AM deriva dalle specifiche caratteristiche del settore, dove componenti di aeromobili leggeri con forme uniche sono molto richiesti. Il processo AM consente infatti ai produttori del settore aerospaziale di:

- Eliminare le fasi di produzione, ad eccezione della pianificazione del processo, sia per il processo AM utilizzato che per i processi a valle,
- Aumentare l'efficienza in termini di costi e di carburante per gli aeromobili attivi,
- Ridurre il consumo di energia riducendo al minimo lo spreco di materie prime e l'impatto ambientale di ciascun aeromobile,
- Ridurre i tempi di consegna degli aeromobili.

Pertanto, l'adozione della tecnologia AM tra le aziende manufatturiere ha portato a una significativa crescita del mercato aerospaziale AM globale. Al contempo, i nuovi sviluppi e le innovazioni nella scienza dei materiali e nella tecnologia AM dovrebbero affrontare e superare i limiti che attualmente ostacolano la diffusione dell'AM, ampliando così le recenti e potenziali applicazioni di questa tecnologia (Tabella 3.1) nel settore aerospaziale.

Tabella 3.*1*: Applicazioni AM recenti e previste per l'industria aerospaziale e spaziale

	Applicazioni Recenti	Applicazioni Potenziali
Industria Aerospaziale	• Prototipazione e modellazione di concetti • Fabbricazione di pezzi di ricambio • Fabbricazione di componenti aerospaziali a basso volume con geometria complessa	• Integrazione di componenti elettronici elaborati AM su componenti aerospaziali • Fabbricazione delle ali dell'intero aeromobile indipendentemente dalla limitazione delle dimensioni • Produzione di parti del motore di forma più complessa, ottenendo al contempo un consolidamento dei componenti migliorato • Riparare la produzione di parti sul campo di battaglia

Potenziali ricadute sulla catena del valore e sulle funzioni aziendali

Le persone tendono a sopravvalutare l'impatto a breve termine delle tecnologie e a sottovalutare significativamente l'impatto a lungo termine. Tuttavia, attualmente vi è molta incertezza sull'impatto a lungo termine dell'AM sulle catene di valore tradizionali delle aziende manufatturiere. L'impatto, comunque, è probabile che sia graduale in un primo momento, per poi accelerare quando i costi inizieranno a convergere con quelli dei metodi di produzione tradizionali.

Per quanto riguarda la produzione e la distribuzione, alcune cose sembrano chiare. I vantaggi della produzione nei paesi a basso costo probabilmente diminuiranno. Emergeranno nuovi impianti incentrati sul cliente, che consentiranno la finitura dei prodotti in base alla domanda locale e ridurranno significativamente la necessità di trasporto a lunga distanza di prodotti finiti.

Parallelamente ai cambiamenti nella capacità di produzione, si verificheranno innovazioni altrettanto drammatiche nelle funzioni aziendali e nella loro importanza relativa nella catena del valore. La Figura 3.3 illustra le principali ricadute dell'adozione della tecnologia AM sulla catena del valore e sulle funzioni delle aziende manufatturiere.

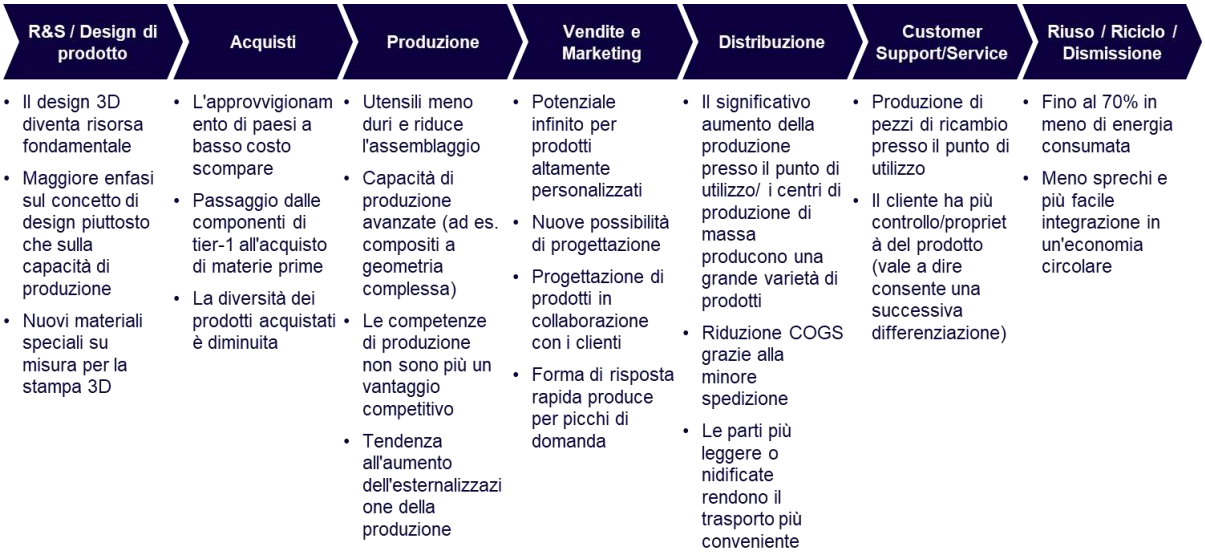


Figura 3.3 L'impatto dell'AM sulla catena del valore e sulle funzioni aziendali (Fonte: McKinsey)

Fattori che influenzano la crescita del mercato AM nel settore aerospaziale

Fattori che promuovono l'adozione

Rispetto ai metodi di produzione tradizionali, l'additive manufacturing offre enormi vantaggi. L'industria aerospaziale, e più specificamente lo spazio, è un settore che potrebbe trarre vantaggio dall'introduzione dell'AM nel processo di produzione. L'industria spaziale, infatti, è caratterizzata da prodotti complessi in volumi ridotti, che si abbinano perfettamente all'AM. Alcune caratteristiche chiave che differenziano l'AM dalla produzione convenzionale nell'ambito delle applicazioni nel settore aerospaziale includono:

- **Maggiore efficienza nei costi e nell'utilizzo dei materiali:** i componenti utilizzati nell'industria aerospaziale sono generalmente prodotti utilizzando materie prime relativamente costose. Dopo la produzione, il riciclaggio degli scarti e dei rottami è costoso e richiede uno sforzo significativo. Un vantaggio offerto dall'adozione delle tecnologie AM è la riduzione del numero di componenti necessari per fabbricare i prodotti e una diminuzione della quantità di rifiuti di materie prime, che incidono gravemente sui costi di produzione nei processi sottrattivi. Un esempio è l'azienda statunitense Lockheed Martin Space System, che ha utilizzato un sistema di fili a fascio di elettroni (EBAM) per fabbricare un serbatoio di propellente satellitare in titanio. Nonostante non sia ancora stata impiegata in servizio, è previsto che l'uso di questa tecnologia possa potenzialmente ridurre i costi e i tempi di produzione, rispettivamente, del 55% e dell'80%.
- **Time to market ridotto:** il processo AM consente alle aziende aerospaziali di costruire prototipi veloci e con un elevato livello di funzionalità potenzialmente riducendo il tempo di commercializzazione approssimativamente da 4-12 mesi a 3-6 settimane e accelerando così la competitività delle imprese.
- **Geometrie più complesse**: l'approccio strato su strato del processo AM consente la fabbricazione di componenti aerospaziali con geometrie complesse, che sono quasi impossibili o altamente impegnative da fabbricare utilizzando un approccio convenzionale in una singola fase di lavorazione.
- **Assenza della fase di montaggio:** Tradizionalmente, la produzione richiede un approccio in più fasi in cui è necessario prima fabbricare ogni componente del prodotto e poi assemblarli per ottenere il prodotto finito. L'approccio della AM unisce produzione e assemblaggio in un unico passaggio, rendendo la catena di fabbricazione più efficiente.
- **Maggiore personalizzazione:** il processo AM consente infine una maggiore flessibilità nel collaudo e nella progettazione di prodotti lavorati con elevato grado di personalizzazione grazie alla maggiore rapidità e

facilità di modifica della creazione di prototipi, riducendo le incertezze e i rischi che le aziende aerospaziali devono affrontare. Questa flessibilità può essere ottenuta modificando ripetutamente i file del software di progettazione, quindi è possibile condurre più iterazioni di progettazione senza alterazioni relativamente costose.

Oltre a ciò, l'adozione della fabbricazione additiva offre numerosi *vantaggi ambientali, sociali e di governance (ESG)* nel settore aerospaziale, che meritano una menzione a parte.

Uno dei principali benefici è la riduzione dell'impatto ambientale complessivo. Il processo AM consente di creare componenti aerospaziali con un peso inferiore senza compromettere le prestazioni meccaniche, riducendo la massa totale degli aeromobili di circa il 40% - 90%. Questa riduzione di peso si traduce in un minor consumo di carburante durante il volo, con conseguente riduzione delle emissioni di CO2. Inoltre, la flessibilità offerta dalla fabbricazione additiva consente di progettare e produrre componenti ottimizzati, riducendo gli sprechi di materiale e l'utilizzo di risorse. Ciò contribuisce a una diminuzione dell'impronta ambientale sia durante il processo di produzione che durante l'utilizzo degli aeromobili.

Oltre agli impatti ambientali, l'adozione di tecnologie AM presenta un impatto positivo sulla dimensione sociale. Il processo AM può consentire, infatti, la produzione locale di componenti, riducendo la dipendenza da fornitori esterni e promuovendo l'occupazione locale. Inoltre, la flessibilità del processo permette di realizzare componenti personalizzati e complessi, aprendo la strada a nuove opportunità di innovazione e design nel settore aerospaziale. Questo a sua volta stimola la creazione di posti di lavoro qualificati e promuove l'economia locale.

Dal punto di vista della governance, l'implementazione di processi AM richiede una gestione efficace delle risorse, dei materiali e dei dati. Le aziende che investono in questa tecnologia devono garantire una buona governance dei processi di produzione e mantenere alti standard di qualità e sicurezza. Inoltre, l'utilizzo della fabbricazione additiva richiede una pianificazione e un controllo accurati per garantire la conformità alle normative e alle regolamentazioni del settore aerospaziale.

Complessivamente, l'investimento nella fabbricazione additiva nel settore aerospaziale offre un ampio spettro di vantaggi ESG. Riducendo l'impatto ambientale, promuovendo l'occupazione locale e migliorando la governance aziendale, questa tecnologia si configura come una scelta sostenibile e responsabile che contribuisce a un futuro più verde ed efficiente per l'industria aerospaziale.

Fattori che ostacolano l'adozione

Nonostante il generale ottimismo sulle potenzialità e i benefici per l'industria manifatturiera dell'AM, ci sono ancora grandi sfide da superare prima che questa tecnologia possa essere adottata su larga scala. Attualmente il processo AM presenta risultati comparativamente inferiori nella fabbricazione di grandi componenti aerospaziali rispetto ai metodi produttivi tradizionale e le aziende del settore stanno compiendo sforzi di ricerca e sviluppo per superare queste limitazioni. La rapida innovazione sta portando a importanti miglioramenti nelle prestazioni delle tecnologie AM. Le ultime generazioni di macchine stanno superando molti dei limiti percepiti dei loro predecessori, ad esempio consentendo la produzione di parti sporgenti senza la necessità di elaborate strutture di supporto stampate o creando parti più resistenti controllando l'allineamento dei rinforzi in fibra utilizzando campi magnetici. La gamma di materiali disponibili per i sistemi AM continua ad espandersi, comprese le leghe di alluminio ad alta resistenza e i polimeri di grado medicale.

Le principali limitazioni all'utilizzo della AM sono riportate di seguito ed includono:

- **Alti costi delle materie prime:** Questo è il principale ostacolo a un uso più diffuso dell'AM nel settore aerospaziale. Sebbene l'AM offra benefici in termini di efficienza nell'uso dei materiali, le materie prime utilizzate nel processo AM sono significativamente più costose rispetto a quelle utilizzate nei processi di

produzione tradizionali. Si stima che il costo del materiale per la produzione additiva costi dieci volte di più rispetto alla produzione tradizionale.

- **Gamma limitata di opzioni nei materiali:** fino ad ora pochissimi sistemi AM sono in grado di stampare con materiali diversi. Superare questa limitazione può comportare una notevole flessibilità progettuale consentendo ai progettisti di utilizzare materiali diversi con proprietà meccaniche specifiche. Un secondo limite riguarda il fatto che anche i comuni materiali tecnici sono molto più costosi se forniti in una forma adatta alla lavorazione con apparecchiature AM. I polimeri devono essere sviluppati appositamente per le macchine AM, un processo lungo e complesso. E la lavorazione aggiuntiva richiesta per convertire le leghe metalliche in una forma di polvere adatta alle macchine AM aumenta notevolmente il loro costo. Inoltre, non un numero sufficiente di materiali AM disponibili, in particolare i polimeri, è stato completamente certificato per applicazioni critiche per l'uso finale.
- **Scala di produzione limitata:** In molti settori, AM è stato ampiamente accettato come il modo più rapido ed economico per produrre prototipi funzionali durante lo sviluppo e il test del prodotto. La maggior parte delle attuali macchine AM sono pertanto realizzate per la prototipazione piuttosto che per la produzione in serie ed è difficile raggiungere un livello di produzione su larga scala. I macchinari di nuova generazione devono continuare a ridurre i costi di produzione, aggiungendo allo stesso tempo le capacità necessarie per supportare la produzione industriale, come la velocità di fabbricazione, la gestione della stabilità dei processi, il controllo della qualità durante il processo, cambi più rapidi, maggiore affidabilità e facilità di manutenzione e riparazione. La bassa velocità e il volume di costruzione limitato disponibili nella maggior parte delle macchine AM limitano la gamma di possibili applicazioni. Recentemente vengono utilizzate anche in una gamma crescente di applicazioni "indirette", tra cui utensili, pezzi di ricambio e attrezzature per macchine di produzione convenzionali.
- **Dimensioni limitate:** il processo AM consente di fabbricare componenti e prodotti finiti di dimensioni limitate rispetto alle richieste delle aziende produttrici aerospaziali.
- **Integrazione con il processo di produzione.** Le macchine per l'AM si sono anche dimostrate difficili da integrare nei flussi di lavoro di produzione. Una cella di produzione AM industriale può richiedere all'utente di combinare apparecchiature di produzione, post-elaborazione e movimentazione materiali di fornitori diversi
- **Mancanza di conoscenza del design AM:** C'è ancora un significativo divario di competenze a livello mondiale quando si tratta di progettazione di prodotti per l'AM. Catturare il pieno potenziale della tecnologia spesso richiede di ripensare completamente il modo in cui i prodotti sono progettati, dato che l'AM consente una libertà di progettazione quasi completa. Il design dei prodotti può essere calibrato per eliminare l'utilizzo di materiali non necessari e le strutture interne o organiche possono essere incorporate, superando così i limiti della tradizionale fresatura o dello stampaggio a iniezione.
- **Mancanza di assistenza all'utilizzo delle macchina.** Gli utenti industriali lamentano che i fornitori di apparecchiature attualmente non forniscono un elevato livello di supporto tecnico oltre a quello necessario per l'installazione e la messa in servizio dell'apparecchiatura. Gli utenti vorrebbero più aiuto per perfezionare i progetti dei componenti per adattarli a processi di produzione specifici, ad esempio, o per trovare modi per migliorare la qualità, l'affidabilità e la produttività delle macchine una volta avviata la produzione.
- **Mancanza di qualifiche e certificazioni per componenti aerospaziali di fabbricazione AM:** i componenti aerospaziali di fabbricazione additiva dovrebbero soddisfare rigorosi requisiti di sicurezza, in particolare i componenti aerospaziali mission-critical come le pale delle turbine e le parti del motore. Per questo motivo, i componenti aerospaziali di fabbricazione additiva sono strettamente obbligati a garantire le qualifiche e le certificazioni sviluppate dalle autorità aeronautiche. Tuttavia, le qualifiche e le certificazioni dei componenti

aerospaziali di fabbricazione additiva sono limitate da diversi fattori, che influenzano in modo significativo l'adozione di questa tecnologia nel settore aerospaziale.

- **Sicurezza informatica e protezione IP limitate:** i macchinari AM della generazione attuale sono vulnerabili a due problemi di sicurezza particolarmente importanti. Il primo è la protezione dei progetti originali, inclusa l'identificazione delle parti, in particolare se le parti sono progettate in modo da renderle replicabili dopo la vendita del prodotto. Il secondo è proteggere i dati dagli attacchi informatici, i cui rischi sono aumentati da una più stretta integrazione con fornitori e clienti.

Il mercato AM con particolare focus sul settore aerospaziale

Panoramica del mercato globale

Il mercato globale del processo AM si trova in una fase di forte espansione con tassi di crescita osservati considerevole. Nel 2020 i ricavi totali per mercato dell'AM, che comprendono le entrate per i servizi AM, i materiali d'uso, i software e le attrezzature utilizzate nel processo AM, erano pari a oltre 13,4 miliardi di dollari, registrando un aumento del 22% rispetto al 2019 in cui il valore totale del mercato era stimato intorno ai 10,4 miliardi di dollari. Nei prossimi anni si prevede che il mercato crescerà ulteriormente con un CAGR di circa il 17% tra il 2020 e il 2023 (Figura 3.4) e con tassi ancora superiori per il periodo 2023-2025. Tra i settori di applicazione del processo AM, l'industria aerospaziale è uno dei settori con il più alto potenziale di mercato ed una crescita annua attesa pari ad un tasso di crescita medio del 12,7% (CAGR) fino al 2030.

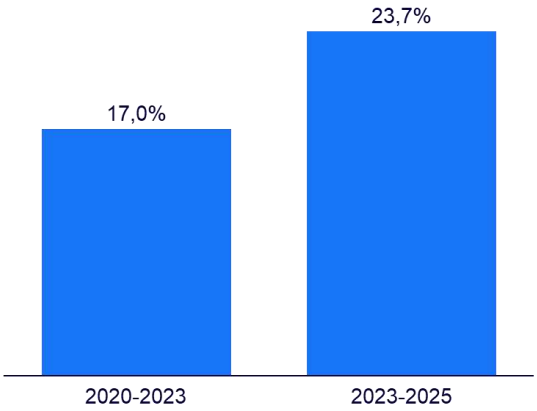


Figura 3.4: Previsioni di crescita del mercato globale dell'AM (fonte dati: Statista)

Si prevede che il numero di dispositivi per la stampa 3D e la produzione additiva crescerà fino a oltre 2,8 milioni di unità entro il 2030, con un aumento di circa due milioni rispetto al 2021.
I dispositivi per la stampa 3D e la produzione additiva per scopi di progettazione costituiscono la quota maggiore del mercato nel 2020 con 550mila dispositivi, seguiti dalle applicazioni nel contesto produttivo e sul campo (Figura 3.5).

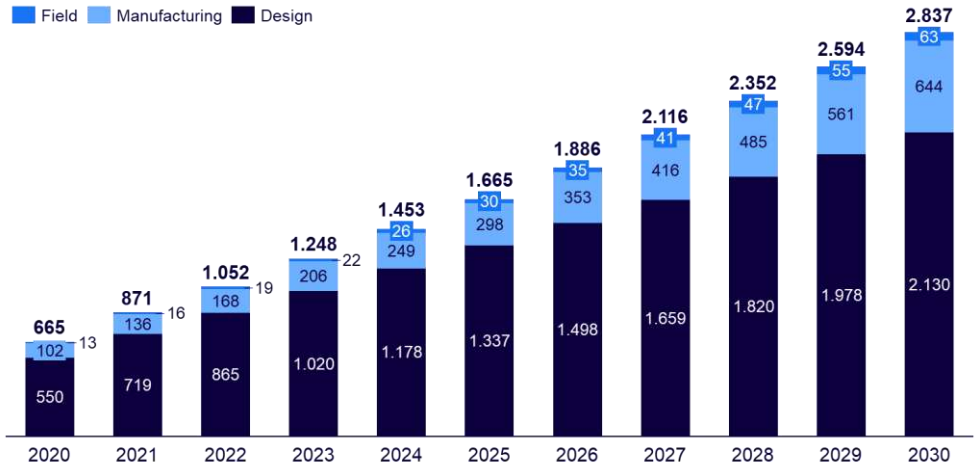


Figura 1.5: Previsioni di crescita del numero di dispositivi di stampa 3D e AM a livello globale, per applicazione (in migliaia di unità) (fonte dati: Transforma Insights)

Le previsioni positive riguardanti il potenziale del mercato globale aerospaziale AM si basano principalmente sul fatto che questo è influenzato in modo significativo dall'adozione e dagli sviluppi innovativi della tecnologia AM e della scienza dei materiali.
I principali driver del mercato AM globale per l'industria aerospaziale sono il tema della sostenibilità con l'obiettivo di ridurre le emissioni inquinanti e il potenziale efficientamento dei costi nel processo produttivo richiesti dai principali player del settore aerospaziale. Il miglioramento dell'efficienza nei componenti aerospaziali critici, ad esempio le pale delle turbine e parti del motore, offerto dal processo AM è anche un driver notevole che influenza il mercato AM.

Industria aerospaziale nel mercato AM: dati storici

Negli ultimi anni, l'industria aerospaziale è diventata uno dei settori principali del mercato AM, costituendo il 18% dei ricavi totali a livello globale nel 2019. Nello stesso anno, il fatturato globale dell'industria aerospaziale AM è stato stimato in un valore di circa 1,9 miliardi di dollari.
Alcune delle principali sottocategorie di ricavi dell'AM, compresi i servizi, i software, le attrezzature e i materiali AM, sono in continua crescita dopo la crisi finanziaria mondiale del 2008. Il segmento delle attrezzature riguarda le macchine per stampanti 3D e gli scanner, mentre il segmento dei materiali comprende materiali metallici e non metallici e riguarda il mercato globale dei componenti aerospaziali lavorati tramite AM. Più di 20.000 componenti aerospaziali non metallici AM sono stati registrati come installati negli aerei fino al 2018.

Industria aerospaziale nel mercato AM: previsioni al 2030

SI prevede che il mercato AM globale raggiungerà i 76 mld USD entro il 2030, crescendo con un CAGR del 20,8% per il periodo dal 2022 al 2030. Tale crescita può essere in parte attribuita alla diffusione dell'AM nelle applicazioni aerospaziali, che si prevede porteranno il mercato AM globale aerospaziale a triplicare tra il 2014 e il 2023. Il fattore principale alla base di questa crescita è associato ai benefici che comporta l'adozione del processo AM, come la riduzione del consumo di carburante e del peso,
Oltre alla classificazione per servizi, materiali, software e attrezzature, il mercato AM globale aerospaziale può essere suddiviso anche nei segmenti relativi alle componenti fisiche dei velivoli, applicazione, regione, tipo di materiale e tecnologia.

- **Piattaforme**: sulla base della piattaforma, il mercato AM globale aerospaziale comprende veicoli aerei senza equipaggio, veicoli spaziali e per l'aviazione commerciale. Il mercato aeronautico ha dominato il

mercato nel 2019. Tuttavia, si prevede che la sottocategoria dei veicoli aerei senza equipaggio registrerà il CAGR più elevato nel mercato AM entro il 2025.

- **Applicazioni**: le principali applicazioni dell'AM nel settore aerospaziale sono il motore, le componenti strutturali dei velivoli e altro. La categoria dei motori ha dominato il mercato AM fino al 2019 e si prevede che mostrerà ancora il CAGR più elevato fino al 2025. Nella situazione attuale, si prevede che lo sforzo compiuto dalle società aerospaziali per sviluppare motori aeronautici sia un fattore importante per la crescita del mercato AM.
- **Tipo di materiale**: Sulla base del materiale utilizzato nel processo AM, il mercato può essere classificato in leghe metalliche, plastica, gomma e altri materiali. Il segmento delle leghe metalliche ha dominato il mercato AM con una quota di mercato del 58,25% nel 2018 e si prevede che avrà ancora il CAGR più elevato entro il 2025.
- **Tecnologia**: considerando la tecnologia AM utilizzata nei processi produttivi, le sottocategorie del mercato possono essere individuate nella modellazione a deposizione fusa, sinterizzazione laser, stampa 3D, fusione a fascio di elettroni e stereolitografia. Tra queste sottocategorie, la stampa 3D dovrebbe mostrare il CAGR più elevato grazie alla capacità di questa tecnologia di produrre materiali leggeri ed efficaci per tutto il periodo di previsione.

Principali attori e dinamiche competitive

Nel 2019, l'Europa ha dominato il mercato AM registrando una quota di mercato del 55% (Figura 3.6). Anche se in percentuale minore il mercato si è sviluppato anche in America ed Asia con una quota rispettivamente di 32% e 13%. In Europa, sono attive alcuni dei principali società aerospaziali e costruttori di attrezzature AM al servizio delle società aerospaziali, come Concept Laser GmbH I (Germania), EOS (Germania), Arcam AB (Svezia), SLM Solution Group AG (Germania) e CRP Technology SRL (Italia). Al contempo, negli USA operano 3D Systems e Stratasys Ltd., due dei più grandi proprietari di brevetti AM a livello globale.

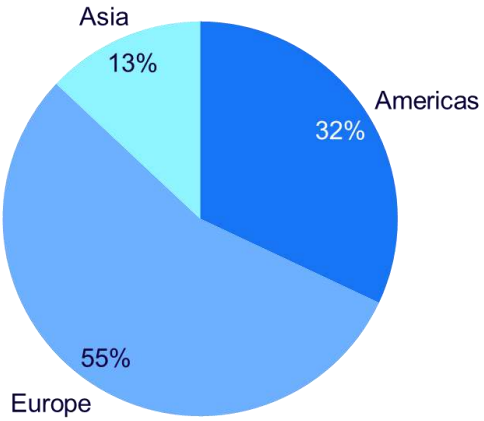


Figura 3.6: Distribuzione delle aziende operative nel mercato AM nel 2019, per regione (fonte dati: Statista)

Il panorama del mercato AM globale è vario. Nel mercato della stampa di materie plastiche, attori più grandi e integrati coprono l'intera catena del valore, dalla fornitura di materiali alla produzione di stampanti fino alla fornitura di servizi di stampa. Diversi hanno aggiunto servizi aggiuntivi effettuando delle acquisizioni mirate. Nel mercato della stampa di metallo, invece, gli attori sono relativamente più piccoli e si concentrano maggiormente su alcune fasi della catena del valore, ad esempio le attrezzature per la stampa o i servizi aggiuntivi di stampa. Visti gli investimenti necessari per sviluppare le macchine di nuova generazione, molti di questi player minori sono alla ricerca di capitali. Di conseguenza, è in corso una fase di consolidamento nel mercato.

Nel frattempo, oltre alle attività tradizionali di materiali, stampa e servizi, iniziano a sorgere operatori di nicchia in rapida crescita. Queste aziende basano i loro interi modelli di business sull'AM, idealmente combinati con modelli di vendita e servizi digitali. Ad esempio, Align Technology, con il suo prodotto Invisalign, fornisce un'alternativa agli apparecchi dentali in metallo. Ci sono esempi simili di Sonova per gli apparecchi acustici in-ear, Mykita per gli occhiali e Shapeways per il crowd design di prodotti di consumo.
Nonostante l'evoluzione del mercato, si denotano ancora pochi tentativi di una corsa verso un'unica tecnologia, poiché, a causa di fattori tra cui le variazioni di costo e dei materiali disponibili, le tecnologie esistenti servono a scopi diversi. Per esplorare il potenziale dell'AM, i produttori hanno quindi spesso bisogno di accedere a più di una tecnologia, che possono ottenere tramite fornitori di servizi specializzati che offrono tutte le tecnologie chiave. Questo quadro può cambiare, tuttavia, se i nuovi entranti aumenteranno notevolmente le prestazioni migliorando una tecnologia esistente o creandone una completamente nuova.

Bibliografia

[1] Altıparmak, S. C. and Xiao, B. (2021). “A market assessment of additive manufacturing potential for the aerospace industry”. *Journal of Manufacturing Processes*, 68(A): 728-738.

[2] Atzeni, E. and Salmi, A. (2012). “Economics of additive manufacturing for end-usable metal parts”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 62: 1147–1155.

[3] Bromberger, J. and Kelly, R. (2017). “Additive manufacturing: A long-term game changer for manufacturers”. Retrieved from https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/additive-manufacturing-a-long-term-game-changer-for-manufacturers

[4] Dordlofva, C., Lindwall, A. and Törlind, P. (2016). ”Opportunities and Challenges for Additive Manufacturing in Space Applications”.

[5] Ford, S., Mortara, L. and Minshall, S. (2016). “The emergence of Additive Manufacturing: Introduction to the special issue”. *Technological Forecasting and Social Change*, 102(4):156-159.

[6] ICTC (2019). “Canada’s Additive manufacturing Ecosystem”.

[7] Iritino, G. (2023). “Produzione sostenibile con la stampa 3D”. Retrieved from https://tech4future.info/processi-produttivi-sostenibilita-stampa-3d/

[8] Ishfaq, K. And Asad, M. (2022). “Opportunities and challenges in additive manufacturing used in space sector: A comprehensive review”. *Rapid Prototyping Journal*, 28(10): 2027-2042.

[9] PwC (2018). “Beyond prototyping: accelerating the business case for 3D printing”. Retrieved from Statista.

[10] Rayna, T. and Striukova, L. (2016). “From rapid prototyping to home fabrication: How 3D printing is changing business model innovation”. *Technological Forecasting and Social Change*, 102: 214-224.

[11] Sheppard, B. et al. (2014). “Factory of the future.” McKinsey and Co.

[12] Statista (2021). “Additive manufacturing & 3D printing worldwide”.

[13] Transforma Insights. (2021). “Number of 3D printing & additive manufacturing devices worldwide from 2020 to 2030, by context”. Retrieved from https://www.statista.com/statistics/1259618/3d-printing-and-additive-manufacturing-devices-worldwide/

[14] Weller, C., Kleer, R. and Piller, F. T. (2015). ”Economic implications of 3D printing: Market structure models in light of additive manufacturing revisited”. *International Journal of Production economics*, 164: 43-56.

[15] Wohlers Associates (2019). “Wohlers Report 2019. 3D Printing and Additive Manufacturing: State of the industry”.

[16] T. Ghidini. An overview of current am activities at the european space agency (2013). URL http://www.3d-printing-additive manufacturing.com/media/downloads/52-d1-12-20-c-tommaso-ghidini-esa.pdf

[17] A.K. Misra, J.E. Grady, R. Carter. Additive manufacturing of aerospace propulsion components (2015). URL https://ntrs.nasa.gov

[18] W.M. Marshall, M. Zemba, C. Shemelya, R. Wicker, D. Espalin, E. MacDonald, C. Keif, A. Kwas, in AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference (NASA, 2015)

[19] M.C. Halbig, M. Singh. Additive manufacturing of sic-based ceramics and ceramic matrix composites (2015). URL https://ntrs.nasa.gov

[20] W.E. Frazier, Journal of Materials Engineering and Performance 23(6), 1917 (2014). DOI 10.1007/s11665-014-0958-z. URL https://doi.org/10.1007/ s11665-014-0958-z

[21] V.K. Ball, L.B. Roberson, G.W. O'Connor, S. Trigwell, S. Bose, A. Bandyopadhyay, Rapid Prototyping Journal 18(6), 451 (2012)

[22] N.R. Council, 3D Printing in Space (The National Academies Press, Washington, DC, 2014). DOI 10.17226/18871. URL https://www.nap.edu/catalog/ 18871/3d-printing-in-space

[23] Economist, 2017 - https://www.economist.com/briefing/2017/07/01/3d-printing-transforms-the-economics-of-manufacturing

[24] E. Carrera, "Theories and Finite Elements for Multilayered Plates and Shells: A Unified Compact Formulation with Numerical Assessment and Benchmarking," *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 10, no. 3. 2003. doi: 10.1007/BF02736224

[25] M. F. Kanninen, "An augmented double cantilever beam model for studying crack propagation and arrest," *Int J Fract*, vol. 9, no. 1, 1973, doi: 10.1007/BF00035958

[26] L. Scime and J. Beuth, "Anomaly detection and classification in a laser powder bed additive manufacturing process using a trained computer vision algorithm," Additive Manufacturing, vol. 19, pp. 114–126, 2018, doi: 10.1016/j.addma.2017.11.009

[27] M. G. Guerra, M. Lafirenza, V. Errico, and A. Angelastro, "In-process dimensional and geometrical characterization of laser-powder bed fusion lattice structures through high-resolution optical tomography," Opt Laser Technol, vol. 162, no. January, p. 109252, 2023, doi: 10.1016/j.optlastec.2023.109252

[28] Yan, H., Grasso, M., Paynabar, K., Colosimo, B.M., (2021), Real-time detection of clustered events in video-imaging data with applications to additive manufacturing, IISE Transactions, 1-28, DOI: 10.1080/24725854.2021.1882013

[29] Tsiamyrtzis, P., Grasso, M., Colosimo, B.M. (2022). Image based Statistical Process Monitoring via Partial First Order Stochastic Dominance, Quality Engineering, 34(1), 2022

[30] K. Kellens, M. Baumers, T.G. Gutowski, W. Flanagan, R. Lifset, J.R. Duflou, Environmental Dimensions of Additive Manufacturing: Mapping Application Domains and Their Environmental Implications: Environmental Dimensions of Additive Manufacturing, J. Ind. Ecol. 21 (2017) S49–S68. https://doi.org/10.1111/jiec.12629

[31] M. Baumers, C. Tuck, R. Wildman, I. Ashcroft, R. Hague, ENERGY INPUTS TO ADDITIVE MANUFACTURING: DOES CAPACITY UTILIZATION MATTER?, (n.d.).

[32] M. Baumers, C. Tuck, R. Hague, I. Ashcroft, R. Wildman, A COMPARATIVE STUDY OF METALLIC ADDITIVE MANUFACTURING POWER CONSUMPTION, (n.d.).

[33] Daniel R. Eyers, & Andrew T. Potter. (2017). Industrial Additive Manufacturing: A manufacturing systems perspective. Computers in Industry, 92-93, 208–218

Appendice

La produzione scientifica SIADD

- Teresa Primo, Alessia Begher, Antonio Del Prete, "*Process parameters influence on structural performances of SLM and EBM lattice structure*", XV Convegno AITEM, Milano 2021.
- Alessandra Pirinu, Teresa Primo, Antonio Del Prete, Francesco Willem Panella, Fabio De Pascalis, «*Mechanical behaviour of AlSi10Mg lattice structures manufactured by Selective Laser Melting*», The International Journal of Advanced Manufacturing Technology https://doi.org/10.1007/s00170-022-10390-1.
- Francesco Willem Panella, Alessandra Pirinu, Teresa Primo, Antonio Del Prete, Andrea Saponaro, G. Di Luna, «Mechanical characterization of samples in Ti6Al4V or AlSi10Mg alloys manufactured through additive technology», 51° convegno AIAS 2022.
- M.G. Guerra, M. Lafirenza, V. Errico, A. Angelastro. "*In-process dimensional and geometrical characterization of laser-powder bed fusion lattice structures through high-resolution optical tomography*", Optics and Laser Technology, accepted.
- Paola Leo, Teresa Primo, Antonio Del Prete, Michele Nacucchi, «*AlSi10Mg processed by Selective Laser Melting: microstructure sensitivity to close values of the heat input*», MDPI – Metals, in progress.
- Teresa Primo, Antonio Del Prete, Alessandra Pirinu, Francesco Willem Panella, Fabio De Pascalis, «*Mechanical behaviour of Ti6Al4V lattice structures elements manufactured by Electron Beam Melting (EBM)*», The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, in progress.
- Teresa Primo, Antonio Del Prete, Maurizio Calabrese, Alessandra Pirinu, Francesco Willem Panella, «*Tensile and compressive behaviour of AlSi10Mg lattice structures manufactured by Selective Laser Melting»,* in progress.
- Maurizio Calabrese, Teresa Primo, Antonio Del Prete, «*Mechanical characterization of machining fixture for aeronautical thin-walled components designed using DFAM methodologies and manufactured by SLM technology»,* in progress.
- Maurizio Calabrese, Teresa Primo, Antonio Del Prete, «*Study of the potential offered by lattice structures achievable with modern additive manufacturing technologies for the realization of parts characterized by multi-material*», in progress.
- Antonio Del Prete, Teresa Primo, Alessandra Pirinu, Francesco Willem Panella, «*Experimental and numerical AlSi10Mg lattice structures manufactured by Selective Laser Melting»,* in progress.
- Francesco Willem Panella, Teresa Primo, Antonio Del Prete, Alessandra Pirinu, «Experimental and numerical *Ti6Al4V* lattice *structures manufactured by Electron Beam Melting»,* in progress.
- Claudia Pagano (CNR-STIIMA), Vito Basile (CNR-STIIMA), Rossella Surace (CNR-STIIMA), Roberto Terzi (ENEA), Monica Schioppa (ENEA), Barbara Palazzo (ENEA), Irene Fassi (CNR-STIIMA). "Carbon/Peek/Zirconia Hybrid Composite For High-Performance Applications". Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference Volume 8, 2022, Article number V008T08A015.
- Marco Mazzarisi, Vito Errico, Angelo Angelastro, Michele Dassisti, Sabina Luisa Campanelli (Politecnico di Bari), Fania Palano (ENEA). "Coupled optical and thermal monitoring of thick-walled cylindrical components fabricated by Laser Metal Deposition". Procedings 1ST INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING MANUFACTURE, Porto, Portugal, 5-6 May 2022.
- Roberto Spina, Maria Grazia Guerra (Politecnico di Bari), , Silvia Di Rosa, Giulio Morandina (Enginsoft). "Heliyon - Homogenization simulation of material extruded lattice structures". In fase di pubblicazione

- Maffia Simone, Furlan Valentina, Previtali Barbara, Coaxial and synchronous monitoring of molten pool height, area, and temperature in laser metal deposition , under submission
- Simone Donadello, Valentina Furlana, Ali Gökhan Demir, Barbara Previtali, Interplay between powder catchment efficiency and layer height in self-stabilized laser metal deposition, Optics and Lasers in Engineering, 149, 2022,
- Mauro Murera, Valentina Furlan, Giovanni Formica, Simone Morganti, Barbara Previtali, Ferdinando Auricchio, Numerical simulation of particles flow in Laser Metal Deposition technology comparing Eulerian-Eulerian and Lagrangian-Eulerian approaches, Journal of Manufacturing Processes, 68, Part A, 2021, 186-197
- Mazzarisi, M., Errico, V., Angelastro A., Campanelli S.L., Influence of standoff distance and laser defocusing distance on Direct Laser Metal Deposition of a Nickel-based superalloy, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022.
- Selicati, V., Mazzarisi, M., Lovecchio, F.S., Guerra, M.G., Campanelli, S.L., Dassisti, M., A monitoring framework based on exergetic analysis for sustainability assessment of direct laser metal deposition process, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 118(11-12), pp. 3641–3656.
- Errico, V., Fusco, A., Campanelli, S.L. Effect of DED coating and DED + Laser scanning on surface performance of L-PBF stainless steel parts, Surface and Coatings Technology, 2022, 429, 127965.
- M. Mazzarisi, S.L. Campanelli, A. Angelastro, F. Palano, M. Dassisti, (2021) “In situ monitoring of direct laser metal deposition of a nickel-based superalloy using infrared thermography”, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, ISSN: 0268-3768, doi: 10.1007/s00170-020-06344-0.
- Errico, V., Campanelli, S.L., Angelastro, A., Dassisti M., Mazzarisi, M., Bonserio, C., Coaxial monitoring of aisi 316l thin walls fabricated by direct metal laser deposition, Materials, 2021, 14(3),673, pp. 1-17
- Errico, V., Posa, P, Mazzarisi, M., Angelastro, A., Campanelli, S.L., Effects of Laser-Deposited Maraging Steel on L-PBF 316L Component, Metals, 2022, 12(10), 1669
- M Mazzarisi, A Angelastro, M Latte, T Colucci, F Palano, SL Campanelli, Thermal monitoring of laser metal deposition strategies using infrared thermography, Journal of Manufacturing Processes, 2023, 85, 594-611
- M.G. Guerra, V. Errico, A. Fusco, F. Lavecchia, S. L. Campanelli, L. M. Galantucci. “High Resolution-Optical Tomography for in-process layerwise monitoring of a Laser-Powder Bed Fusion technology” - Additive Manufacturing. vol. 55, pp. 102850. (2022)
- M.G. Guerra, M. Lafirenza, V. Errico, A. Angelastro. “In-process dimensional and geometrical characterization of laser-powder bed fusion lattice structures through high-resolution optical tomography” - Optics and Laser Technology. vol. 162, pp. 109252. (2023)
- B. Previtali et Al., Laser Metal Deposition as a means for repairing, hybrid, and additive manufacturing, LANE Conference, September 2022, Furth, Germany
- B. Previtali, Advances in Laser Metal Deposition for manufacturing of free-form and large-scale components, AMCTurchey, 6-8 September 2022, Aydin, Turchey.
- M. Mazzarisi, F. Palano, V. Errico, A. Angelastro, M. Dassisti, S.L. Campanelli, Coupled optical and thermal monitoring of thick-walled cylindrical components fabricated by Laser Metal Deposition, 1ST International Conference on Engineering Manufacture, EM2022, FEUP, Porto – Portugal 5-6 May 2022 EM2022, FEUP, Porto – Portugal 5-6 May 2022
- M. Latte, M.G. Guerra, M. Mazzarisi,, A. Angelastro, S. L. Campanelli, L. M. Galantucci, In process monitoring of geometrical characteristics in Laser Metal Deposition: a comparative study, submitted to ESAFORM 2023, 19-21 April 2023 / Kraków, Poland.

Il **Distretto Tecnologico Aerospaziale (DTA)** è una società privata no-profit che opera per il consolidamento e lo sviluppo del sistema aerospaziale regionale e nazionale. Nel corso degli anni, attraverso: la progettazione ed il management di progetti di ricerca e sviluppo, interventi di formazione continua ed alta formazione; l'erogazione di servizi di ingegneria; la realizzazione di attività di orientamento per le scuole; la realizzazione di nuove infrastrutture di ricerca, ha favorito la creazione di nuova occupazione, di nuove competenze, di nuovi investimenti industriali costruendo una robusta rete di collaborazioni industriali e accademiche. Il DTA ha ricevuto diversi attestati quale best practice per le politiche di innovazione sui territori e attualmente partecipa con protagonismo a reti di eccellenza nazionali e internazionali.

Arthur D. Little è in prima linea nell'innovazione dal 1886. Siamo un leader riconosciuto nel coniugare strategia, innovazione e trasformazione nelle industrie ad alta intensità tecnologica e convergenti. Accompagniamo i nostri clienti all'interno di ecosistemi aziendali in continua evoluzione per scoprire nuove opportunità di crescita. Supportiamo i nostri clienti a sviluppare capacità di innovazione e trasformare le loro organizzazioni. I nostri consulenti hanno una grande esperienza verticale di settore combinata con un'eccellente conoscenza delle principali tendenze e dinamiche di mercato. Arthur D. Little è presente nei più importanti business center del mondo. Siamo orgogliosi di servire la maggior parte delle aziende Fortune 1000, oltre ad altre aziende leader e organizzazioni del settore pubblico.

BALTA è una startup innovativa nata per lo sviluppo, la produzione e la commercializzazione di prodotti e servizi ingegneristici ad alto valore tecnologico applicati al settore dei trasporti, con particolare attenzione alle soluzioni che prevedono l'implementazione dei principi su cui si basa l'economia circolare e che mirano al raggiungimento della neutralità climatica. BALTA si propone come partner tecnologico strategico per PMI e grandi imprese che intendono essere all'avanguardia nell'ambito del proprio business, fornendo supporto tecnico-scientifico in materia di project management, progettazione, produzione, verifica e validazione di nuovi prodotti.

A cura di:

Giuseppe Acierno, Michele Giannuzzi, Manuela Matarrese, DTA scarl
Marco Barile, Balta srl
Andrea Visentin, Alessandro Cairoli, A D Little