



“Additive Manufacturing per la produzione dei componenti metallici dalla concezione del prodotto mediante l’ottimizzazione topologica alla sua finitura passando per le tecniche generative disponibili”

Prof. Luca Iuliano

Politecnico di Torino

*Dipartimento di Ingegneria Gestionale
e della Produzione (DIGEP)*



POLITECNICO
DI TORINO

marzo 14:00 - 18:00

10
giovedì Progettiamo additivo!
Aspetti di prodotto,

processo e gestione per le
tecnologie additive

Torino

AM @ Politecnico di Torino



Prof. Luca Iuliano
Full Professor

Department of Management and Production Engineering

AMTech
Research Group

Politecnico di Torino

CAD/CAE/CAM
and 3D scanning systems



Advanced
CNC machining and
additive manufacturing



Prof. Paolo Fino
Full
Professor

Applied Science and Technology Department

Politecnico di Torino

DISAT
Research Group

Material Science
and Technology



TEAM di Ricerca

- 13 ricercatori strutturati;
- 18 assegnisti di ricerca/dottorandi



POLITECNICO DI TORINO



Luca Iuliano
Full Professor



Eleonora Atzeni
Assistant Professor



Paolo Minetola
Associate Professor



Alessandro Salmi
Assistant Professor



Manuela Galati
Research fellow

Politecnico di Torino
Department of Management and Production Engineering



20
ING
VENT'ANNI DI
INGEGNERIA



Andrea Gatto
Full Professor



Elena Bassoli
Associate Professor



Lucia Denti
Postdoctoral fellow

Modena & Reggio Emilia University
Department of Mechanical and Civil Engineering

Primo Articolo AM Metalli:

*Ippolito R., Iuliano L., Gatto A., 1996,
"Edm tooling by solid freeform fabrication and
electroplating techniques"
Proceeding of 7th Solid Freeform Fabrication
Symposium, Austin 12-14 august, Texas, USA, pp.
199-206.*

Smart Factory Cluster

Projet 4 "High Performance Manufacturing"

WP6

High performance solutions for additive manufacturing and
for micro/nano systems, fabrication of costumized lines for
mems devices testing



L. Iuliano: Politecnico di Torino DIGEP
P. Fino, F. Pirri: Politecnico di Torino DISAT



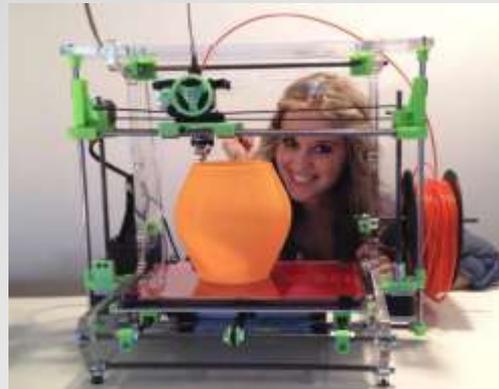
SPEA S.p.A. Volpiano (To)

Fabbricazione Additiva *Additive Manufacturing*

Si tratta di una tecnologia innovativa che rende possibile la produzione, in poche ore e senza l'uso di utensili, di oggetti di geometria comunque complessa, direttamente dal modello matematico dell'oggetto realizzato su di un sistema CAD 3D.

LA FANTASIA E LE ILLUSIONI

«Trappole Low-Cost» con prestazioni mediocri in termini di tolleranze, rugosità e prestazioni meccaniche;



Investimento anche inferiore a € 1.000,00 con l'illusione di produrre elementi funzionali;

LA REALTA'

Sistemi industriali con volumi di lavoro fino al metro cubo, in grado di funzionare in modalità senza presidio e di assicurare adeguate prestazioni in termini di tolleranze dimensionali, rugosità superficiali e caratteristiche meccaniche;

Materiali definitivi

Listini adeguati alle prestazioni

Evoluzione dell'Additive Manufacturing

1984 – Brevetto US No 4.575.330 per SLA

1987 – La *Prototipazione Rapida* è una realtà commerciale

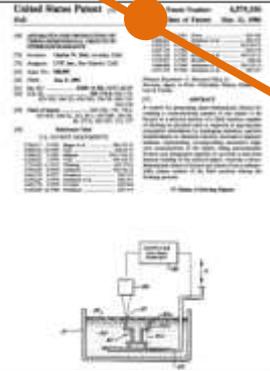
1990 – *Rapid Casting*: anime per fonderia in sabbia prodotte con tecnologia additiva

1995 – *Rapid Tooling*: inserti per stampi prodotti con tecnologia additiva

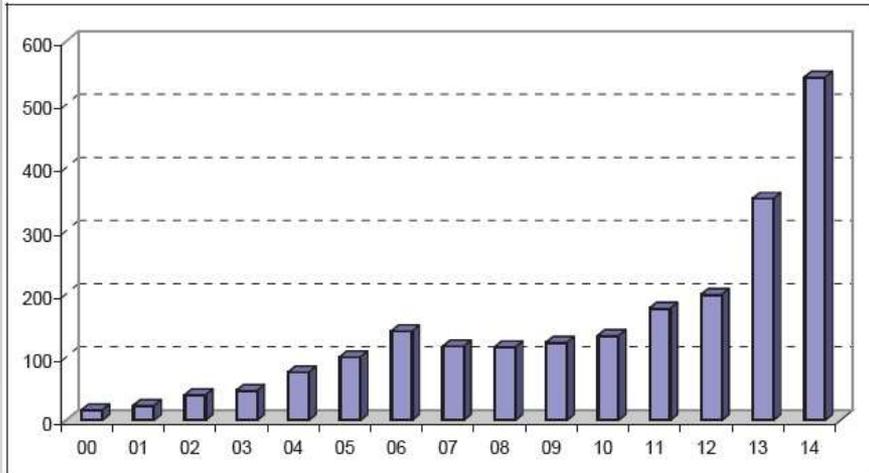
2000 – *Additive Manufacturing*: componenti finali prodotti con tecnologia additiva

2011 – 49.000 macchine installate
(in totale dal 1984)

2014 – 543 macchine per
metallo (+55% in un anno)



Il Mercato dell'Additive Manufacturing Metallo



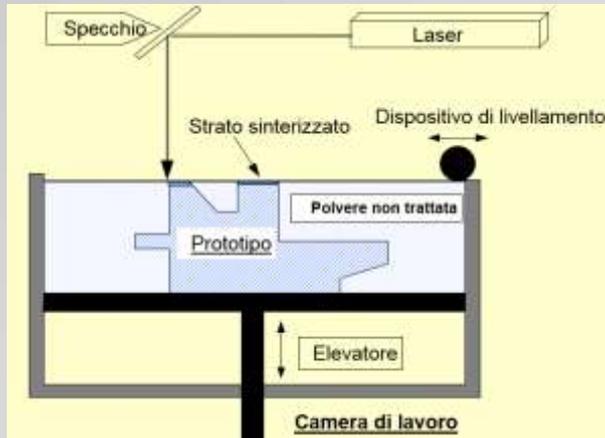
Source: Wohlers Associates, Inc.

- Nel 2014 è stata stimata la vendita globale di 543 sistemi;
- + 55% rispetto al 2013;
- Negli anni precedenti: 352 nel 2013, 199 nel 2012 e 180 nel 2011

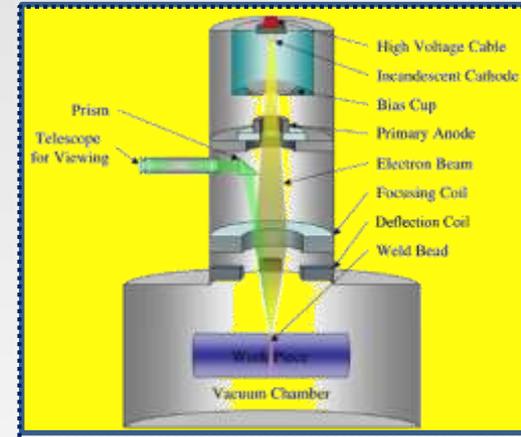
- **Attualmente oltre il 90% dei sistemi di AM per metalli è basato sulla tecnologia a letto di polvere;**
- **Settori di riferimento:**
 - **Aerospazio**
 - **Racing;**
 - **Biomedicale**



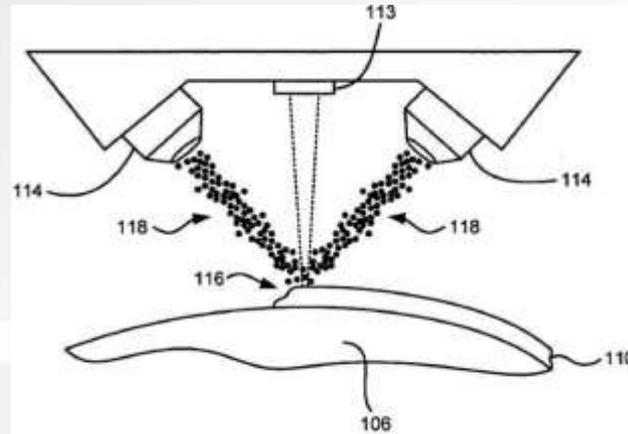
CLASSIFICAZIONE DELLE TECNICHE DI AM PER I METALLI



Letto di polvere con sorgente laser



Letto di polvere con fascio di elettroni



Deposizione di polvere con sorgente laser

LETTO DI POLVERE CON SORGENTE LASER - PRODUTTORI

Volumi di lavoro fino a 800x400x500 mm



3D Systems (USA)



Renishaw (UK)



EOS (D)



SLM (D)



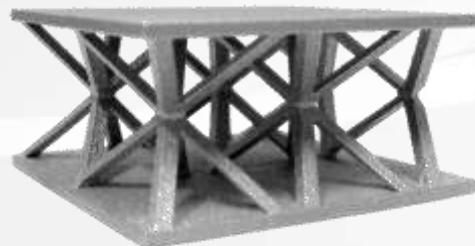
Trumpf Sisma (D-I)



Concept Laser (D)

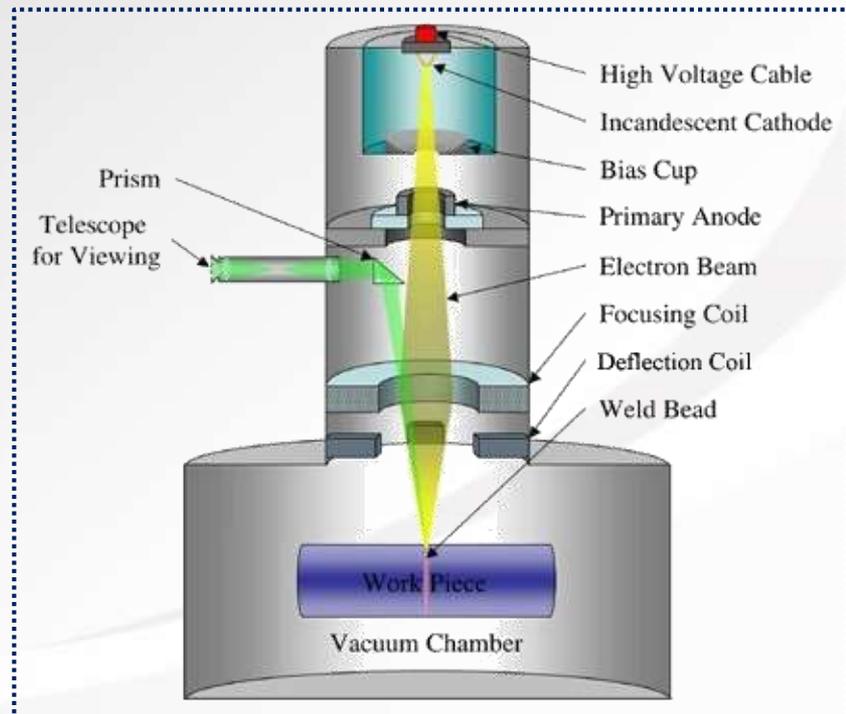
LETTO DI POLVERE CON SORGENTE LASER - MATERIALI

- Lega di alluminio AlSi10Mg;
- Cobalto Cromo biomedicale;
- Cobalto Cromo motorsport e aerospazio;
- Acciaio per stampi;
- Acciaio inox;
- Lega di titanio Ti6Al4V;
- Inconel IN625;
- Inconel 718
- Leghe Au.



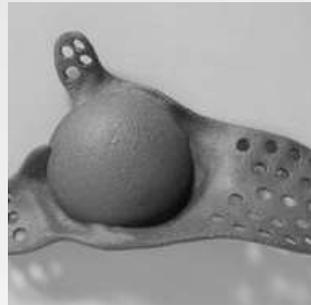
LETTO DI POLVERE CON EBM – ARCAM (Svezia)

Volume di lavoro fino a $\phi 350 \times 380$ mm



LETTO DI POLVERE CON EBM – ARCAM (Svezia)

- Cobalto Cromo biomedicale;
- Cobalto Cromo motorsport e aerospazio;
- Lega di titanio Ti6Al4V;
- Lega di titanio Ti6Al4V ELI;
- Titanio Grado 2
- TiAl (Intermetallico)

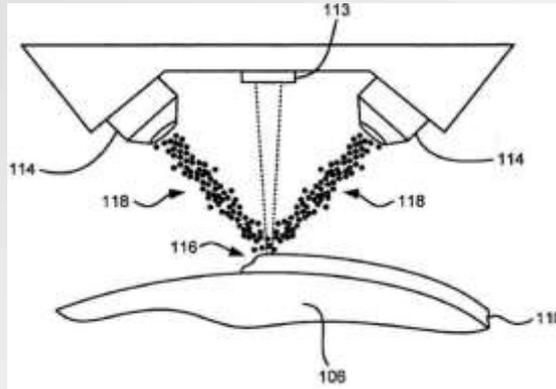


DEPOSIZIONE DI POLVERE CON SORGENTE LASER - PRODUTTORI

Volumi di lavoro superiori a 1 m³



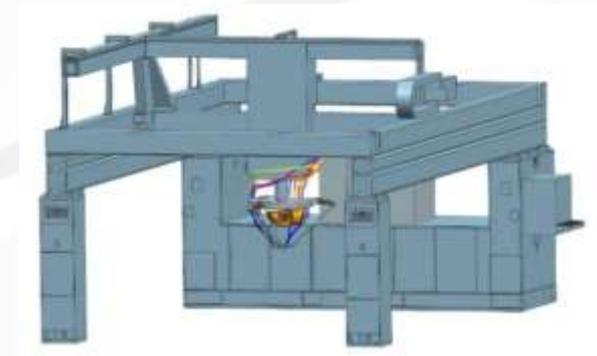
LENS (USA)



DGM Mori Seiki (Giappone)



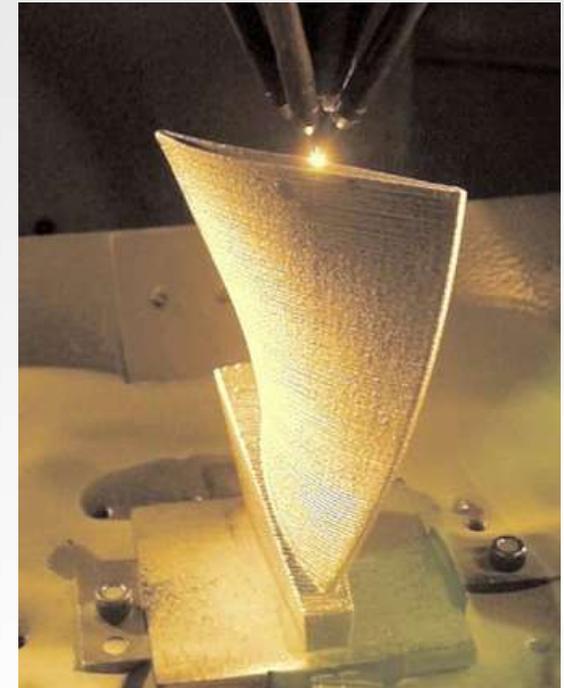
POM (USA)



Prima Industrie (Italia)

DEPOSIZIONE DI POLVERE CON SORGENTE LASER - PRODUTTORI

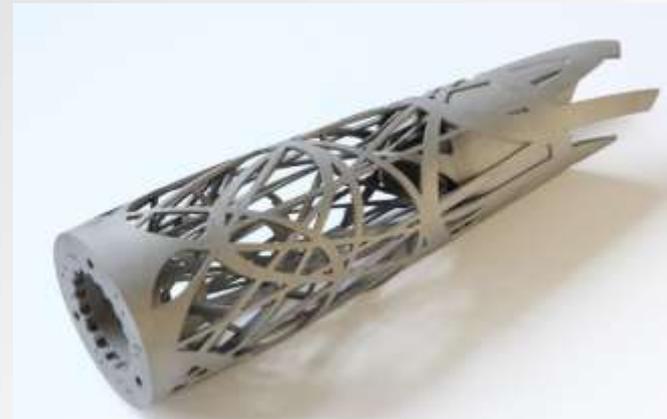
- Lega di alluminio;
- Cobalto Cromo biomedicale;
- Cobalto Cromo motorsport e aerospazio;
- Acciaio per stampi;
- Acciaio inox;
- Lega di titanio Ti6Al4V;
- Inconel IN625;
- Inconel 718
-



I vantaggi della Fabbricazione Additiva

PROCESSO

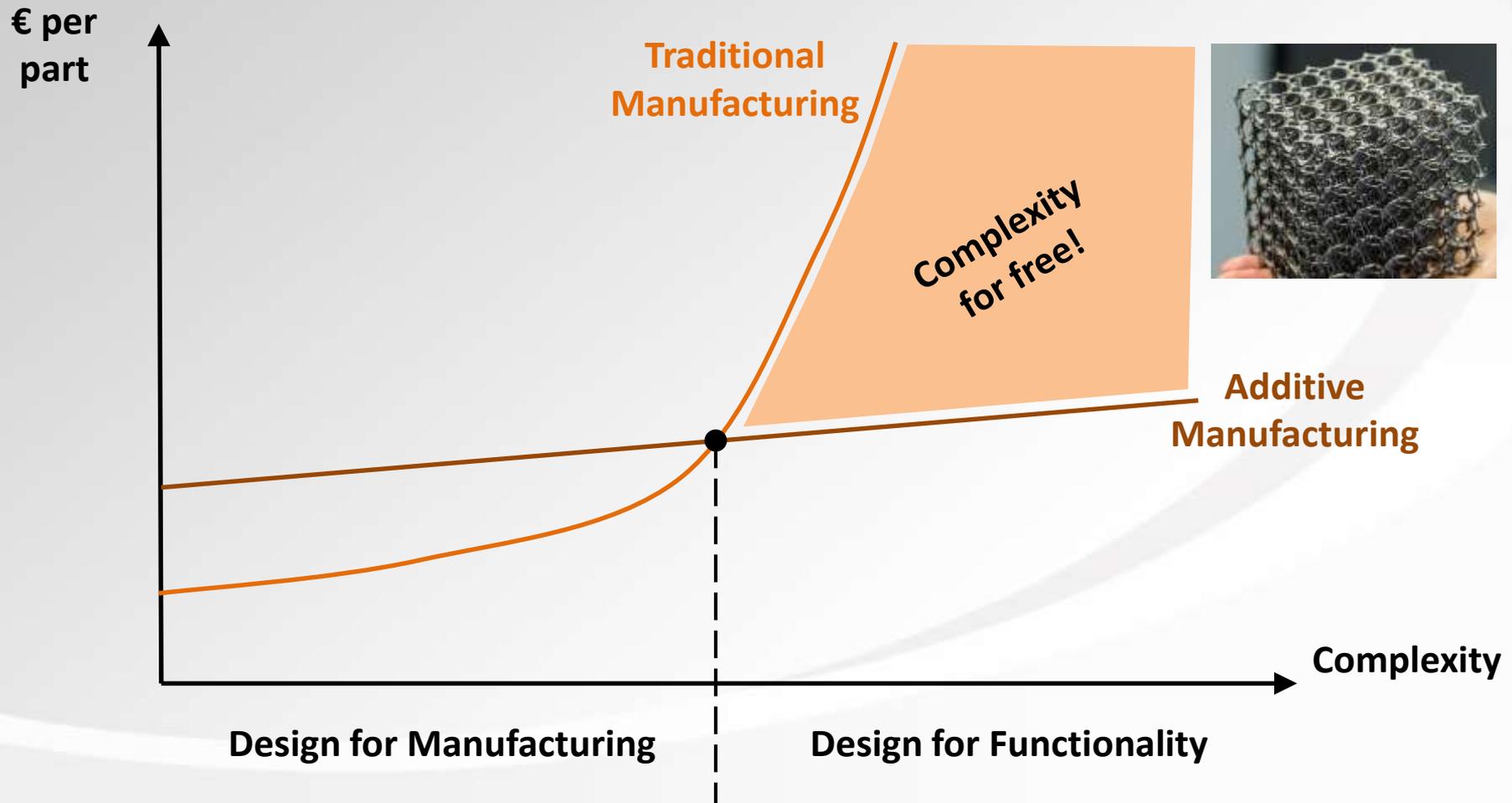
- Una sola macchina, forma illimitate
- Assenza di attrezzature
- Assenza di dispositivi di bloccaggio
- Sottosquadri ammessi
- Un solo step produttivo
- Minimo intervento dell'operatore
- Tempi e costi legati solo alle dimensioni e non alla complessità geometrica



PRODOTTO

- Libertà di progettazione
- Strutture leggere
(*forme cave complesse*)
- Parti integrate
- Design ergonomico
- Personalizzazione
- Struttura metallurgica

Costi in funzione della complessità geometrica



Gli svantaggi della Fabbricazione Additiva

PROCESSI a LETTO di POLVERE

- Macchine nate per produrre prototipi
- Volumi di lavoro limitati
- Velocità di costruzione limitate
- Carenze sul controllo di processo on-line



PRODOTTO

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

Applicazioni

1. Elementi progettati per essere realizzati con le tecnologie convenzionali:
 - prototipi;
 - ricambi;
2. Elementi che necessitano una **progettazione dedicata** per la fabbricazione additiva:
 - Pezzi definitivi;
 - Stampi con canali conformali

Limitata disponibilità di strumenti di progettazione CAD/CAE 3D dedicati

Applicazioni

Elementi progettati per essere realizzati con le tecnologie convenzionali

Ricambi



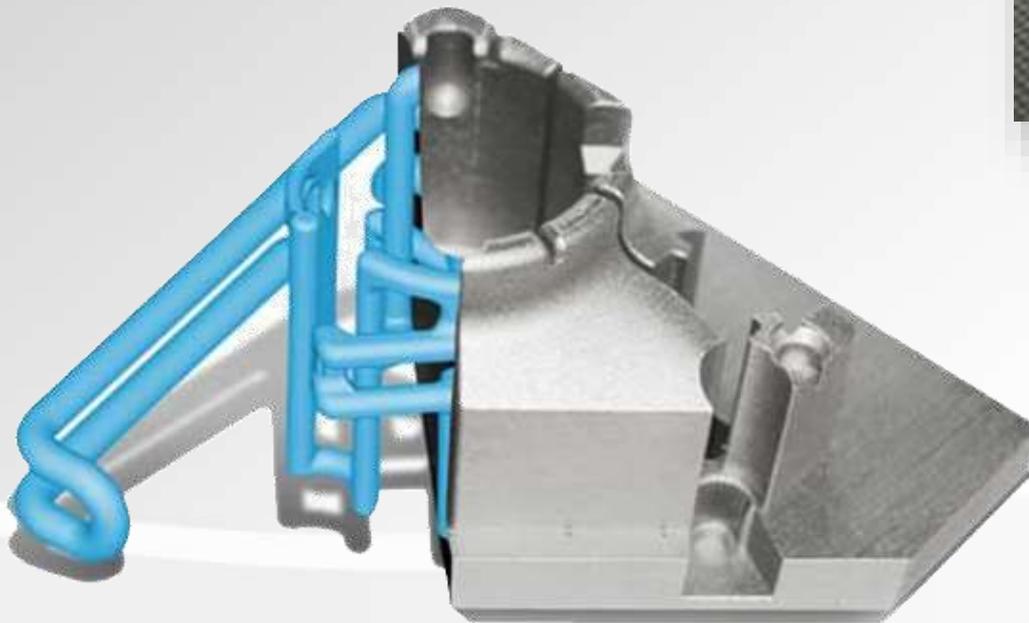
Prototipi

La progettazione per la fabbricazione additiva (DFAM)

- I principi della **progettazione per la fabbricazione additiva** (Design For Additive Manufacturing – DFAM) e le modifiche rispetto ai processi di produzione tradizionali sono già stati delineati da diversi ricercatori (Hague *et al.*, 2003; Iuliano *et al.* 2004, Becker *et al.*, 2005).
- Lo **scopo** del DFAM è **“la massimizzazione delle prestazioni de prodotto attraverso una sintesi delle forme, dimensioni, strutture gerarchiche e composizione del materiale soggetta al potenziale delle tecnologie additive”**.
- Per perseguire tali obiettivi i **progettisti** devono considerare che:
 - la FA consente di avere sottosquadri, spessore di parete variabile e canali profondi e di geometria complessa;
 - attraverso la FA è possibile produrre componenti con complessità geometrica illimitata, che ammette forme contorte e svergolate, fori ciechi e filettature/viti con un elevato rapporto resistenza/peso;
 - La FA consente la riduzione del numero di parti: è possibile produrre direttamente un assemblato come unico componente integrando giunti e cerniere.

Applicazioni

Elementi che necessitano una **progettazione dedicata** per la fabbricazione additiva



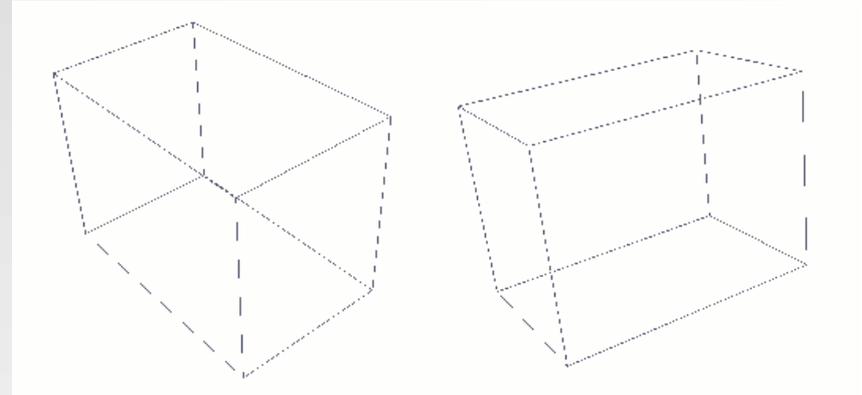
Pezzi finali

Stampi con canali di raffreddamento conformali

Design For Additive Manufacturing

Il DFAM può essere finalizzato:

- Minimizzare il peso;
- Massimizzare le prestazioni meccaniche;
- Ottimizzare il comportamento dinamico;
- Ottimizzare le prestazioni termiche;
- Ridurre il numero di componenti;
- Integrazioni di funzioni in un unico elemento



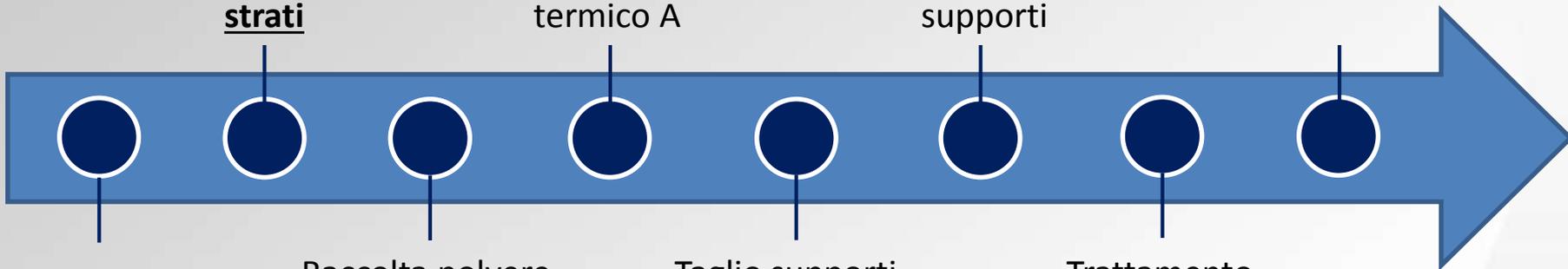
Ciclo di Fabbricazione Completo

Fabbricazione a strati

Tattamento termico A

Rimozione supporti

Finitura

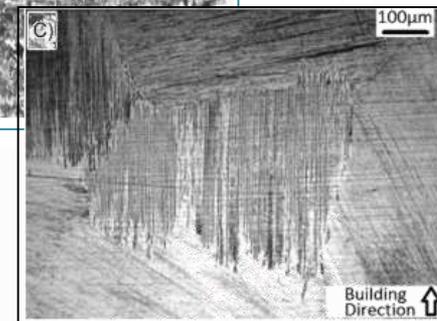
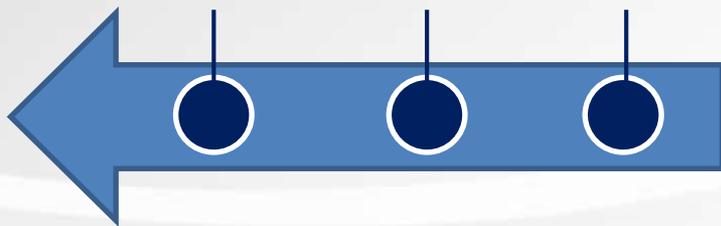


Raccolta polvere in eccesso

Taglio supporti dalla piattaforma

Trattamento termico B

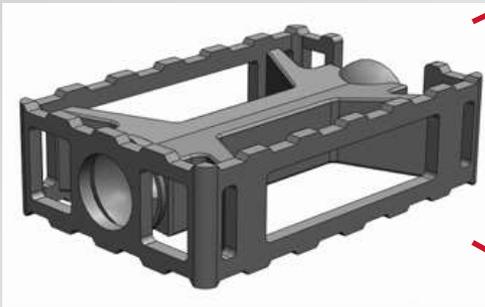
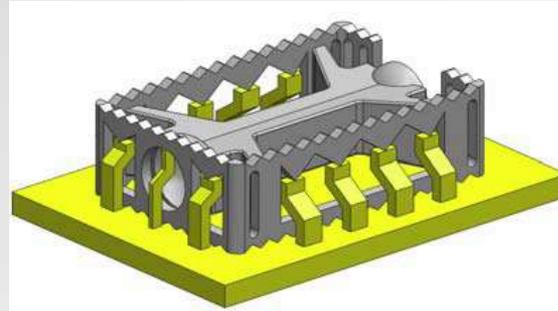
Gestione della polvere



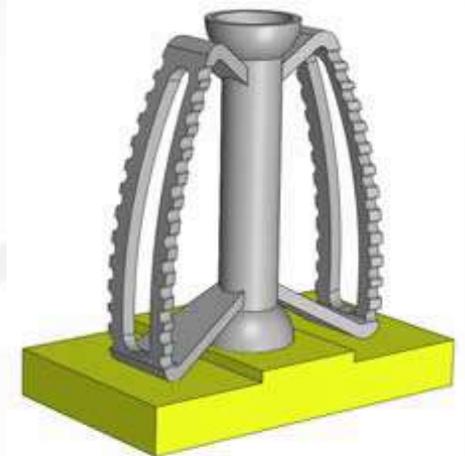
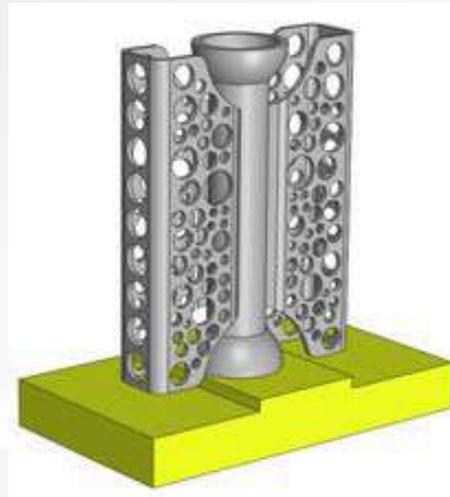
Posizionamento dei Supporti

Orientamento pezzo

Necessari



Non necessari



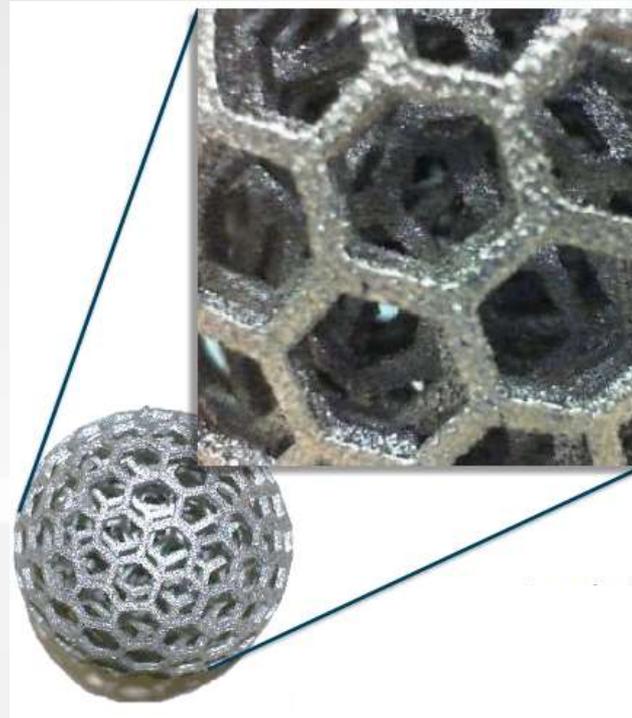
Finitura dei Componenti

Finitura necessaria per migliorare:

- Aspetto estetico
- Tolleranze dimensionali
- Rugosità superficiale
- Funzionalità
- Resistenza a fatica



Aluminum SLS Surface Finish



Finitura dei Componenti

- Pallinatura per chiudere le porosità superficiali
- Sovrametalli compresi tra (0.1-0.5) mm
- Scelta dei fissaggi sui CNC
- Definizione percorsi utensile per la finitura



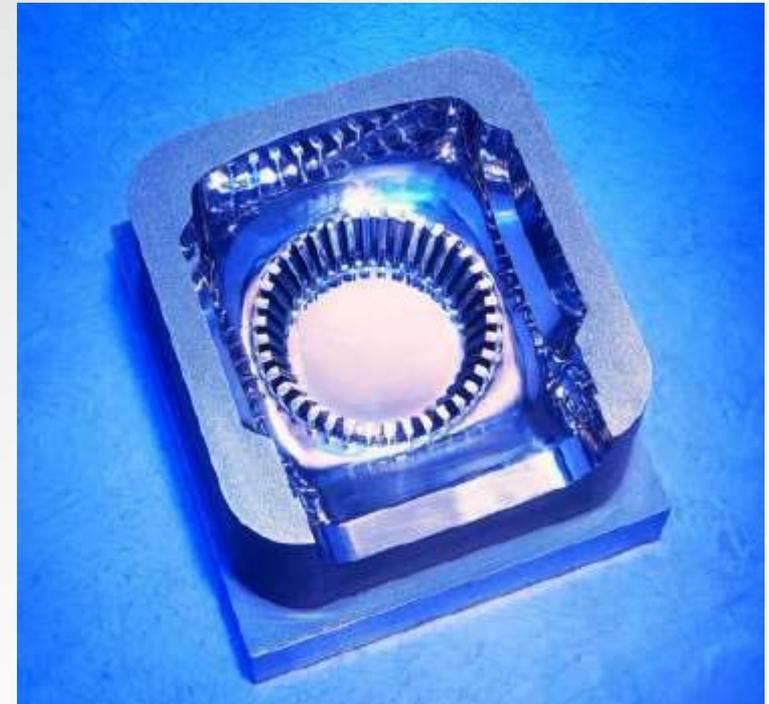
- 50% tempo di produzione
- 70% peso



Micro shot-peening

Miglioramento qualità superficie:

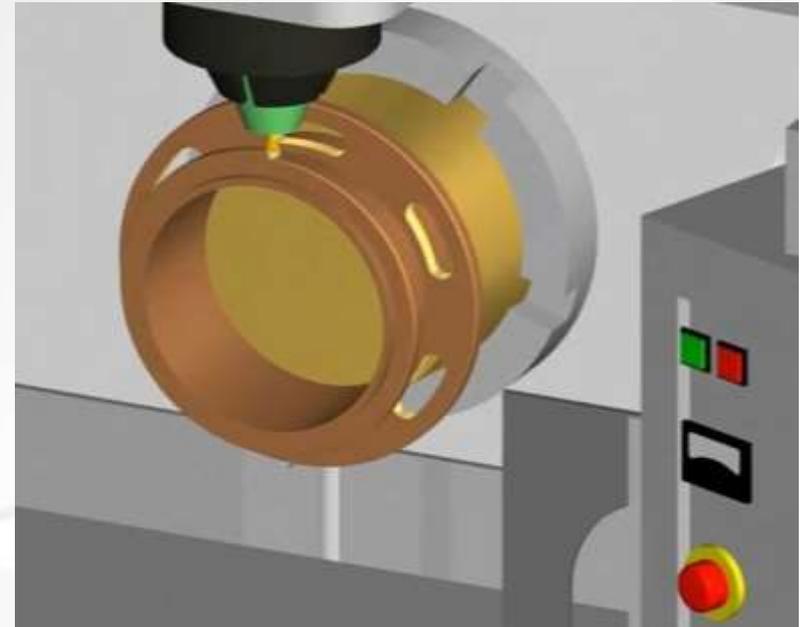
- Sufficiente per le parti dove non sono previsti accoppiamenti;
- Insufficiente in caso di accoppiamenti o di inserti per stampi



La pallinatura è la base per la rettificatura e la lucidatura manuale

Lavorazioni Meccaniche

- La maggior parte dei componenti in AM necessita di finitura alle macchine utensili;
- Le lavorazioni CNC necessitano del percorso utensile e possono rappresentare un collo di bottiglia per piccoli lotti;
- Non sono ancora disponibili CAM dedicati alla finitura dei componenti in AM;



Sostenibilità

La Fabbricazione Additiva migliora la sostenibilità economica e ambientale:

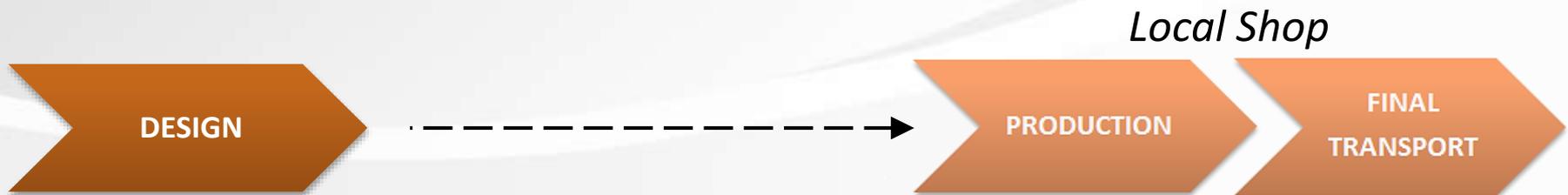
- Ridotto consumo di materie prime
- Efficienza del prodotto ottimizzata
- Componenti alleggeriti
- Ridotto impiego di attrezzature
- Investimenti e scorte ridotti
- *Supply chain* efficiente e nuovi modelli di vendita al dettaglio (*Semplificati e con tempi di consegna ridotti*)



Supply Chain – Produzione su richiesta



- Logica *pull*
- Produzione distribuita
- Assenza di magazzini
- Produzione al punto di consegna, minori *lead times*



Conclusioni

- La fabbricazione additiva riduce **i tempi e i costi** di sviluppo prodotto dalla fase di progettazione a quella di produzione anche perché non occorrono investimenti per la produzione delle attrezzature.
- Tuttavia il vantaggio va oltre il solo risparmio per le attrezzature grazie alla libertà delle forme e alla possibilità di **iniziare la produzione immediatamente** dopo la progettazione.
- L'analisi dei costi evidenzia come a oggi l'incidenza principale sul costo del pezzo nella fabbricazione additiva sia imputabile alla macchina;
- Non appena le tecnologie additive si diffonderanno ulteriormente e diventeranno processi produttivi comuni, sarà logico supporre una **diminuzione del costo dei macchinari** e di conseguenza, nel prossimo futuro, il punto di pareggio si sposterà verso volumi produttivi maggiori di quelli attuali

Conclusioni

- La convenienza nell'adozione della fabbricazione additiva è evidente se la **libertà delle forme** viene capitalizzata attraverso un'opportuna **progettazione (DFAM)**, in maniera tale da sfruttare a pieno le potenzialità della tecnologia additiva.
- La sinergia con l'analisi CAE consente di riprogettare un componente **ottimizzando il rapporto resistenza/peso** con l'ottica di diminuire il peso e la quantità di materiale utilizzato, rispettando nel contempo i requisiti funzionali.
- Tecnologia **"GREEN"** da integrare con le tecnologie convenzionali;
- Necessità di una **"nuova logistica"** interna ed esterna;
- Necessità di **"formazione specialistica"** del personale.

Prossimi sviluppi

Parametro	Trend	Aspetti principali
Volume di lavoro		<ul style="list-style-type: none">• I limiti sull'affidabilità del processo conterranno l'aumento di volume della camera
Velocità di costruzione		<ul style="list-style-type: none">• Ottimizzazione della strategia di costruzione (spessori degli strati diversi)• Parallelizzazione del processo (erogazione polvere e fusione)• Maggiore stabilità di processo (sistemi di monitoraggio on-line)
Costi delle macchine		<ul style="list-style-type: none">• L'aggiunta di dispositivi elettronici per il controllo di processo e di qualità, così come il numero di laser alza il prezzo della macchina, in parte compensato da un'economia di scala
Costi dei materiali		<ul style="list-style-type: none">• I prezzi della polvere fissati dai fornitori di sistemi FA non riflettono i costi di produzione• Con l'aumento del volume di mercato, i produttori di polveri metalliche venderanno direttamente ai clienti finali
Manodopera		<ul style="list-style-type: none">• Sistemi più affidabili ridurranno la manutenzione• Sistemi automatici per la rimozione di polvere in eccesso

MASTER UNIVERSITARIO DI II LIVELLO IN “ADDITIVE MANUFACTURING”

INSEGNAMENTO	ORE	Ore Azienda	CFU
Progettazione per l'additive manufacturing	64	10	7
Materiali per l'additive manufacturing	44	10	5
Sistemi di l'additive manufacturing	60		6
Sensori per il controllo di sistemi di additive manufacturing	36	10	4
Intergrazione dei sistemi di additive manufacturing con i processi convenzionali	40		4
Sistemi di validazione dei prodotti realizzati con additive manufacturing	36	10	4
Programmazione e gestione della produzione integrata con i sistemi di additive manufacturing	16	10	2
La supply chain integrata con i sistemi di additive manufacturing	16	10	2
La piattaforma ICT dell'azienda che integra l'additive manufacturing con i processi convenzionali	16	10	2
Formazione manageriale (Skillab)	72	10	8
Project work		720	22
Totale	400	800	66



Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica: Orientamento in Fabbricazione Additiva

Titolo	CFU	SSD
Progettazione finalizzata alla FA con elementi di ottimizzazione topologica	10	ING-IND 13, ING-IND 14
Tecniche di FA e integrazione con i processi convenzionali	10	ING-IND 16
Materiali per FA e trattamenti termici	8	ING-IND 22



Progetto di Formazione - FONDIMPRESA

