

Prof. Rachele Bertolini

- Professoressa associata presso l'Università degli Studi di Padova.
- Membro associato del CIRP.
- Editor della rivista *Precision Engineering* dal 2021.
- Iscritta all'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Rovigo dal 2020.



rachele.bertolini@unipd.it



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

**Additive Manufacturing: tecnologie,
progettazione e applicazioni**

Prof. R. Bertolini

Dove siamo

Padova – Net Shape Forming Lab (600 sqm)

Test meccanici sui materiali

Analisi metallografiche

Metrologia Industriale

Impianti pilota
(forgiatura, stampaggio a caldo lamiera, tube forming)



Rovigo – TE.SI Lab (1000 sqm)

Sistemi industriali lavorazione polimeri

Reologia materiali polimerici

Additive Manufacturing

Micro manufacturing

Tomografia

Lavorazioni meccaniche



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Additive Manufacturing: tecnologie,
progettazione e applicazioni

Prof. R. Bertolini

Sistemi e attrezzature

- Tornio-fresa CNC Mori Seiki® NL 1500
- Centro di lavoro per micro lavorazioni a 5-assi, KUGLER® Micromaster 5x
- Micro-elettroerosione a filo (foratura, taglio, fresatura) SARIX® SX-200
- Stampante laser a letto di polvere Sisma MYSINT100
- Stampante a deposizione di energia diretta Manudirect MLD5
- Profilometro ottico SENSOFAR™ Plu Neox (res 1 micron)
- Macchina di misura a controllo di coordinate ZEISS Prismo VAST 7
- Macchina di misura multi-sensore Werth Video Check IP 400
- Microscopio a scansione elettronica (SEM) FEI® QUANTA 400 SM attrezzato con sonde EDX e EBSD
- Tomografo computerizzato metrologico NICON X-Tek MCT225
- Pressa idraulica da 5 t per prove meccaniche MTS 322
- Durometro a caldo Instron Wilson Rockwell 2000
- Tribometri con possibilità di prove in temperatura
- Two-photon polymerization machine, Nanoscribe, 3D Photonic Professional GT



Introduzione all' Additive Manufacturing



<https://app.wooclap.com/events/PFFSNBP/questions/6ab3ec052b125f4347f42021>



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

**Additive Manufacturing: tecnologie,
progettazione e applicazioni**

Prof. R. Bertolini

Definizione di Additive Manufacturing (AM)

“Additive Manufacturing (AM) si riferisce a processi per fare oggetti tridimensionali, strato per strato, in modo additivo, in opposizione al metodo sottrattivo di asportazione di truciolo”

- Da International Committee F42 for Additive Manufacturing Technologies, ASTM -



Introduzione all' Additive Manufacturing

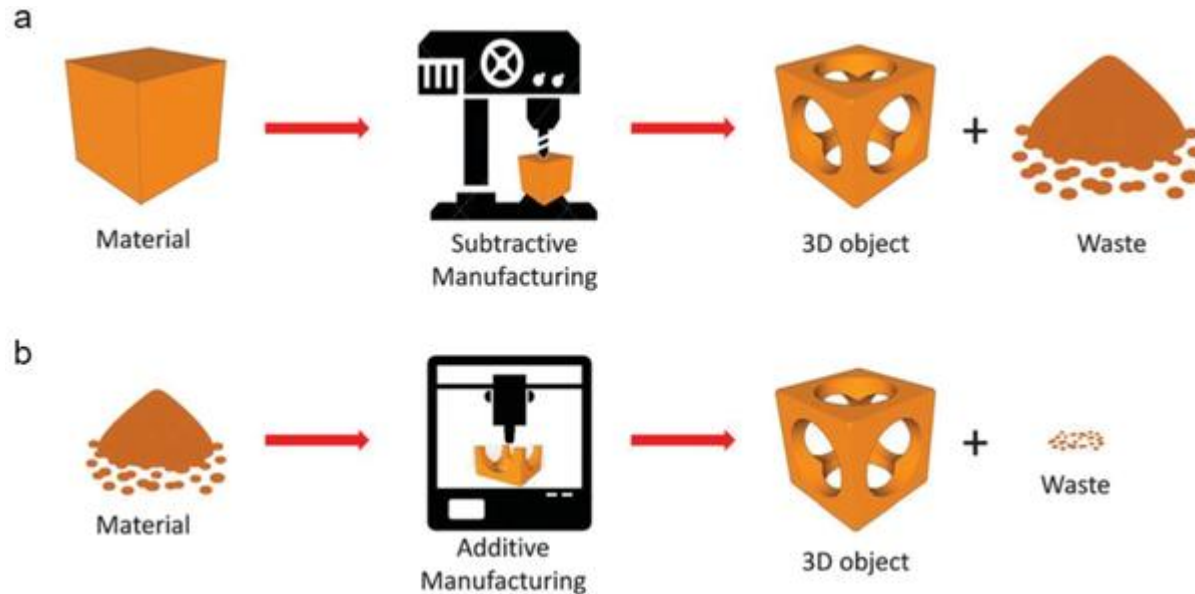
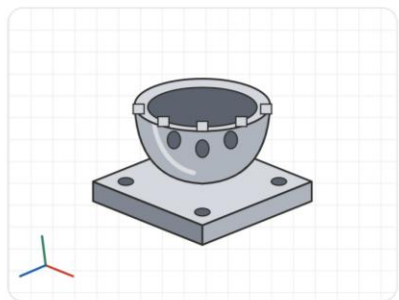


Image: Chen et al., Adv. Funct. Mater. 2020

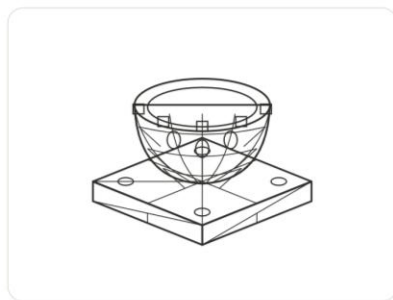
- **Manifattura sottrattiva:** il componente viene ottenuto rimuovendo materiale da un blocco pieno, con produzione di trucioli e vincoli legati all'accessibilità degli utensili.
- **Manifattura additiva:** il componente viene costruito strato dopo strato, consentendo geometrie complesse e riducendo gli scarti; possono essere necessari supporti e operazioni di finitura.

Catena di processo della manifattura additiva



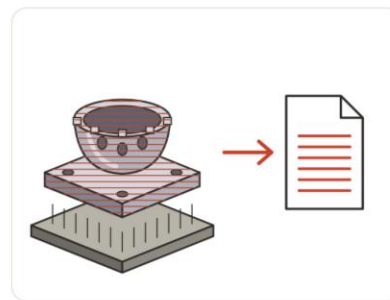
① CAD

Modellazione 3D del componente



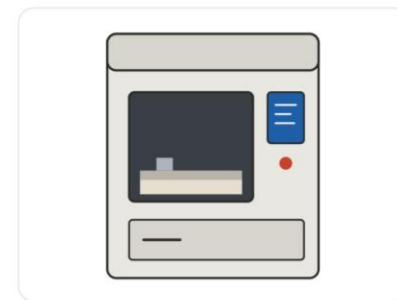
② Conversione STL

Tassellazione della superficie in triangoli



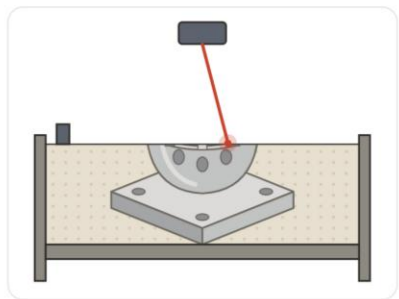
③ Trasferimento file

Slicing, supporti e invio del job alla macchina



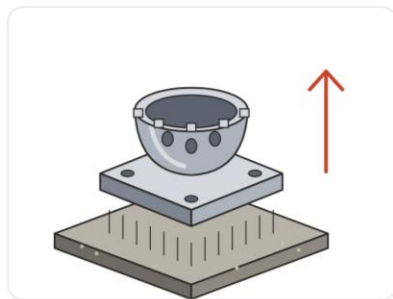
④ Setup della macchina

Impostazione parametri di processo



⑤ Costruzione

Fabbricazione del pezzo strato per strato



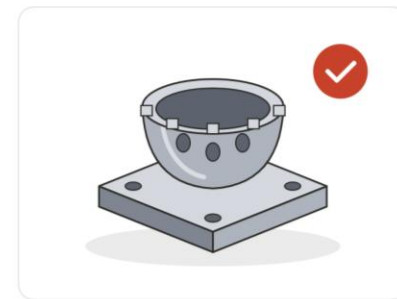
⑥ Rimozione del pezzo

Estrazione dalla camera e depolverizzazione



⑦ Post-processo

Rimozione supporti, trattamenti termici, finitura



⑧ Applicazione

Messa in servizio del componente finito



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

**Additive Manufacturing: tecnologie,
progettazione e applicazioni**

Prof. R. Bertolini

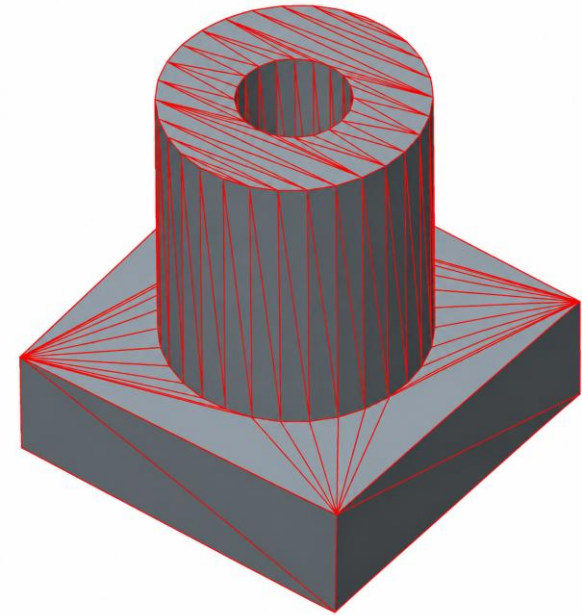
Catena di processo della manifattura additiva

1. CAD

Il processo AM generico inizia dal modello CAD tridimensionale.

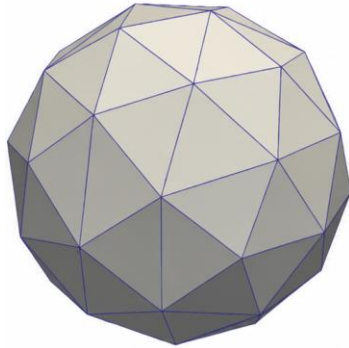
2. Conversione ad STL

- Il termine STL deriva da STereoLithography, ossia stereolitografia.
- Il formato STL descrive un modello CAD esclusivamente attraverso la sua geometria.
- La conversione elimina le informazioni di costruzione e la cronologia di modellazione, approssimando le superfici del modello mediante una serie di faccette triangolari.
- Nella maggior parte dei software CAD è possibile impostare la dimensione minima dei triangoli, con l'obiettivo di ottenere una rappresentazione in cui le singole faccette non siano visivamente distinguibili sulla superficie.

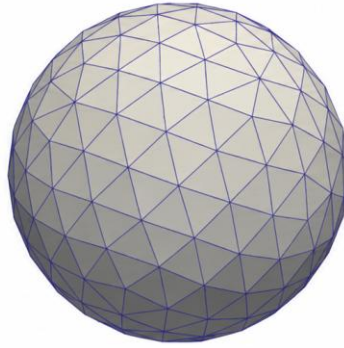


Catena di processo della manifattura additiva

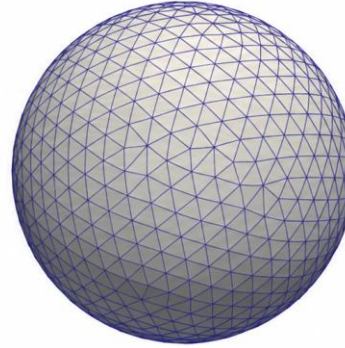
STL (96 triangoli)



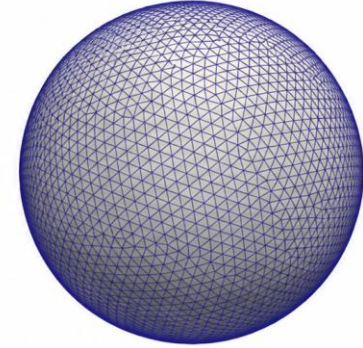
STL (448 triangoli)



STL (1920 triangoli)



STL (7936 triangoli)



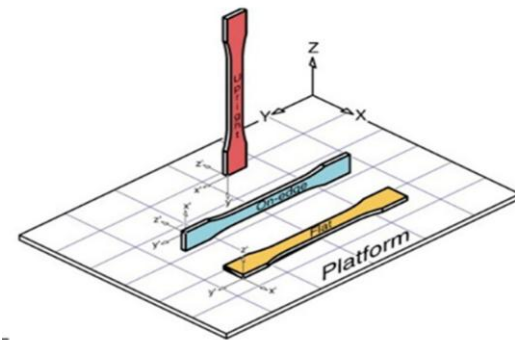
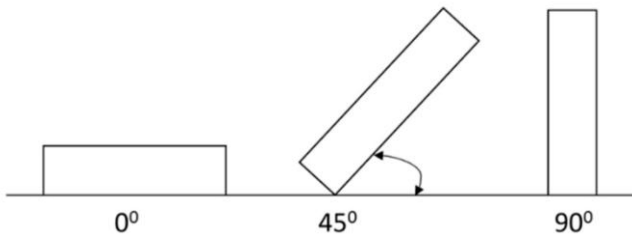
Diverse rappresentazioni di una geometria sferica.

- **Accuratezza e validità del modello:** un maggior numero di triangoli migliora la fedeltà geometrica, ma aumenta le dimensioni del file.
- Il numero di triangoli scelto rappresenta un compromesso tra l'accuratezza desiderata e le dimensioni del file STL

Catena di processo della manifattura additiva

3. Trasferimento alla macchina AM e manipolazione del file STL

- Il software del sistema AM dispone di strumenti di visualizzazione che consentono all'utente di visualizzare e manipolare il modello del componente.
- L'utente può modificare la posizione e l'orientamento del componente per realizzarlo in una posizione specifica all'interno del volume di costruzione.
- È comune produrre più componenti contemporaneamente nello stesso ciclo di costruzione.
- Può trattarsi di più copie dello stesso componente oppure di componenti diversi, definiti da file STL distinti.



Catena di processo della manifattura additiva

Nesting

- Il nesting consiste nel definire la posizione e l'orientamento di uno o più componenti all'interno del volume di costruzione della macchina.

La disposizione dei componenti influenza:

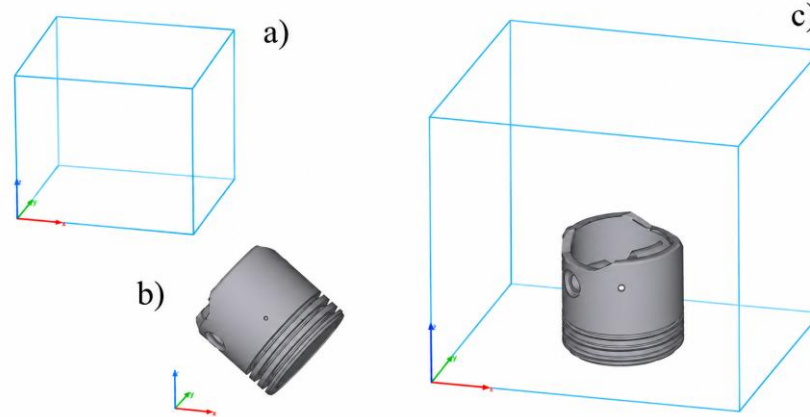
- Qualità del prodotto: proprietà meccaniche, accuratezza geometrica e finitura superficiale.
- Consumo di materiale: quantità di supporti necessari.
- Tempi di produzione: altezza complessiva della costruzione e numero di strati.
- Produttività: numero di componenti realizzabili nello stesso ciclo.

Obiettivo: ottimizzare l'utilizzo dello spazio disponibile, conciliando requisiti qualitativi, tempi e costi di produzione.

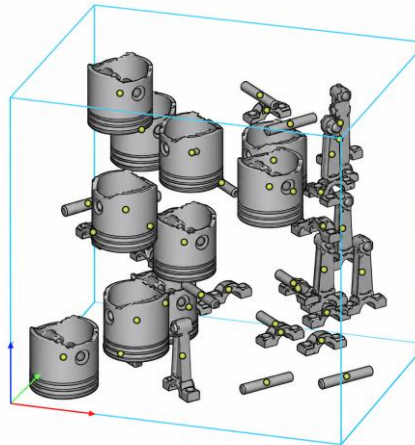


Catena di processo della manifattura additiva

Nesting



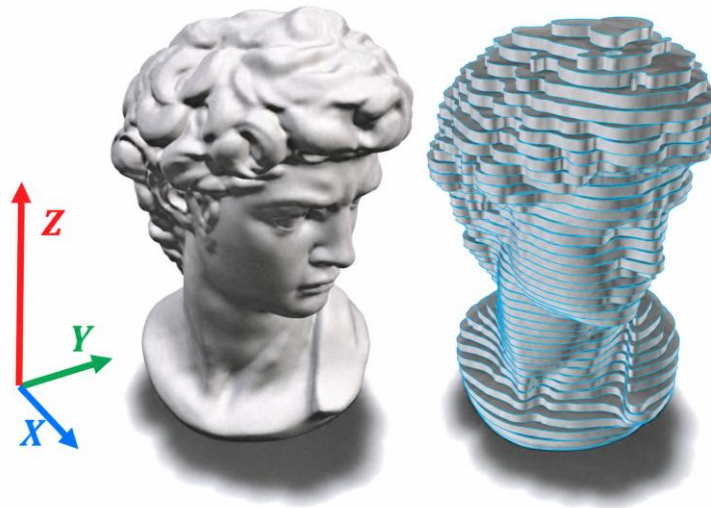
a) Modello digitale dell'area di lavoro, b) modello digitale del prodotto e c) modello digitale del prodotto nell'area di lavoro.



Esempio del modello digitale di un processo di LPBF con più componenti nell'area di lavoro.

Catena di processo della manifattura additiva

Slicing

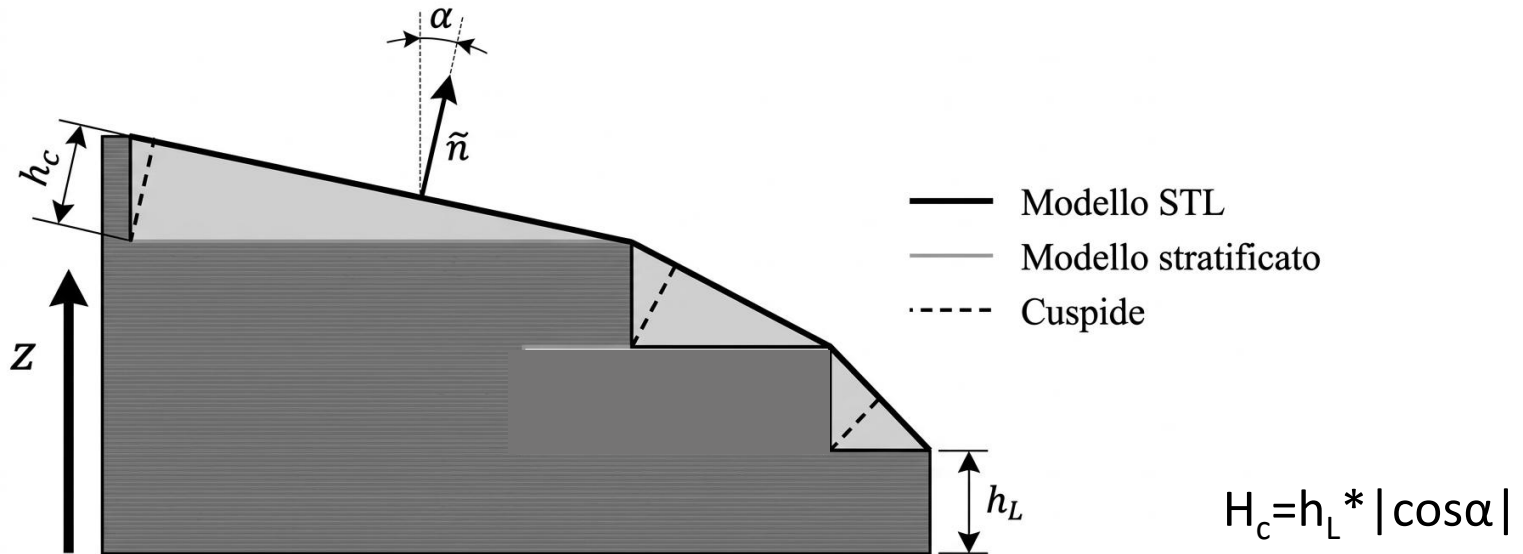


Esempio di slicing di un modello 3d.

- La geometria del prodotto è ottenuta tramite la sovrapposizione di strati piani di materiale detti layers generati in sequenza.
- Convenzionalmente il sistema di riferimento delle macchine da additive è scelto indicando con la Z la direzione lungo la quale avviene la stratificazione.
- L'area di lavoro sarà suddivisa tramite una serie di piani normali a Z e distanziati pari a una quantità pari all'altezza del layer (*slicing*).
- Lo slicing induce un ulteriore fattore di approssimazione del modello digitale.

Catena di processo della manifattura additiva

Slicing



Cuspidi tra modello stratificato e geometria STL.

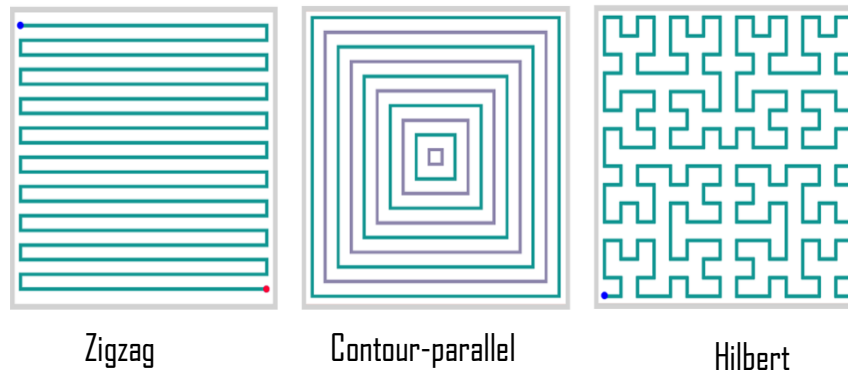
$\alpha \neq 0^\circ, 90^\circ$

- Le features piane che richiedono un dettaglio elevato (fori) sono, laddove possibile, realizzate nel piano XY.
- Oltre all'accuratezza, l'altezza del layer influenza direttamente il tempo di costruzione del modello con ripercussione sui costi e consumi energetici.

Catena di processo della manifattura additiva:

4. Setup della macchina

- Tutte le macchine AM prevedono almeno alcuni parametri di configurazione specifici del processo.
- Alcune macchine sono progettate per utilizzare soltanto uno o due materiali, senza possibilità di modificare lo spessore degli strati o altri parametri di costruzione.
- Nei sistemi più complessi, le impostazioni predefinite e le configurazioni precedentemente salvate consentono di velocizzare la preparazione del processo e ridurre il rischio di errori.



Catena di processo della manifattura additiva

5. Preparazione della costruzione

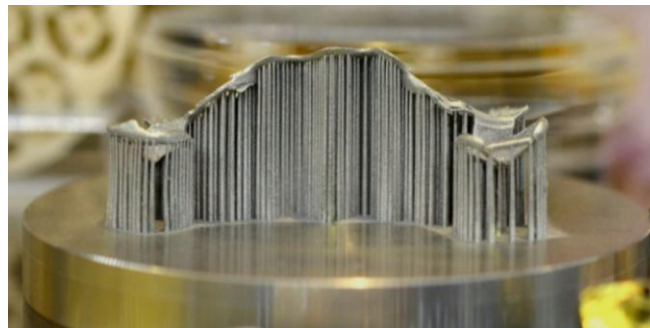
- Le fasi iniziali del processo AM sono operazioni semiautomatizzate che possono richiedere un intervento significativo dell'operatore in termini di controllo, interazione e decisioni.
- Una volta completate queste fasi, si passa alla costruzione controllata dal computer.
- Tutte le macchine AM seguono una sequenza analoga per la realizzazione degli strati, che comprende la regolazione in altezza della piattaforma, la deposizione del materiale e la formazione della sezione trasversale di ciascuno strato.
- Il ciclo viene ripetuto fino al completamento della costruzione o all'esaurimento del materiale di alimentazione.



Catena di processo della manifattura additiva

6. Rimozione e pulizia

- I componenti prodotti dalle macchine AM dovrebbero essere pronti all'uso.
- Tuttavia, spesso richiedono ancora operazioni significative di finitura manuale prima di poter essere utilizzati. Il componente deve essere separato dalla piattaforma su cui è stato costruito oppure estratto dal materiale in eccesso che lo circonda.
- Alcuni processi AM impiegano un materiale aggiuntivo, diverso da quello del componente, per realizzare le strutture di supporto (materiale di supporto secondario).



Catena di processo della manifattura additiva

7. Post process

- Il post-processo comprende le operazioni di finitura necessarie per rendere i componenti idonei all'applicazione prevista.
- Può includere lavorazioni abrasive, come la lucidatura o la carteggiatura, oppure l'applicazione di rivestimenti.



Catena di processo della manifattura additiva

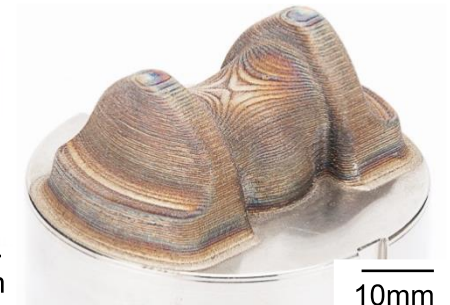
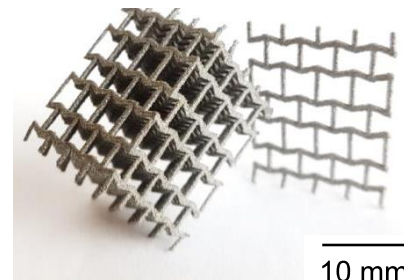
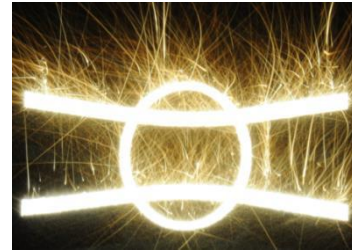
8. Applicazione

- Dopo le operazioni di post-processo, i componenti sono pronti all'uso.
- Sebbene siano realizzati con materiali simili a quelli impiegati in altri processi produttivi, i componenti possono presentare un comportamento non conforme alle specifiche standard del materiale.
- Alcuni processi AM possono generare piccoli vuoti o bolle intrappolate all'interno dei componenti, che possono causare cedimenti sotto carico meccanico.
- Alcuni processi AM possono alterare il materiale o determinarne un consolidamento incompleto. Nei polimeri, la storia termica può causare degradazione, limitare l'adesione tra strati e, nei materiali semicristallini, influenzare la cristallizzazione.



Caratteristiche dell'Additive Manufacturing AM

- Da modello 3D -> catena di processo ridotta
- Fabbricazione strato per strato
- “Complexity for free”
- Produzione «senza scarto»
- Time to market ridotto
- Customizzazione



Applicazioni

Il principio fisico di fabbricazione consente di realizzare quasi qualsiasi geometria se si tiene conto delle:

- Specifiche del materiale
- Regole per la stampa additiva

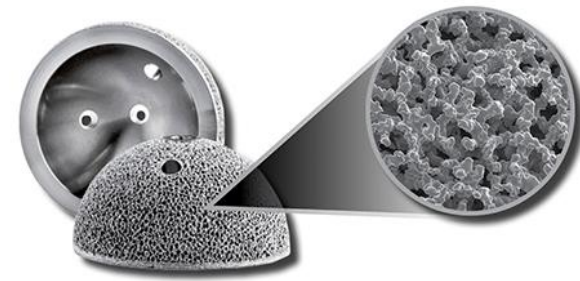
Possibili applicazioni:

- Componenti alleggeriti
- Impianti ortopedici personalizzati
- Componenti ottimizzati topologicamente
- Scambiatori di calore

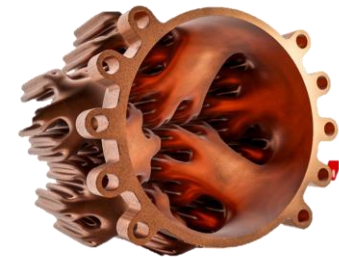
- Impossibile da realizzare con tecnologie convenzionali
- Efficiente uso delle risorse per componenti a funzionalità avanzata



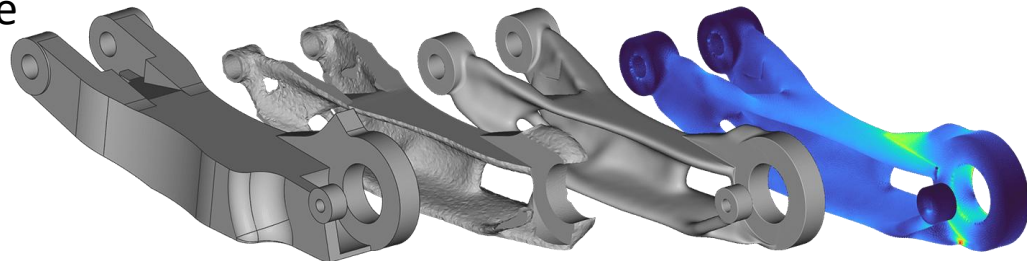
Lattice - Materialise



Coppa acetabolare

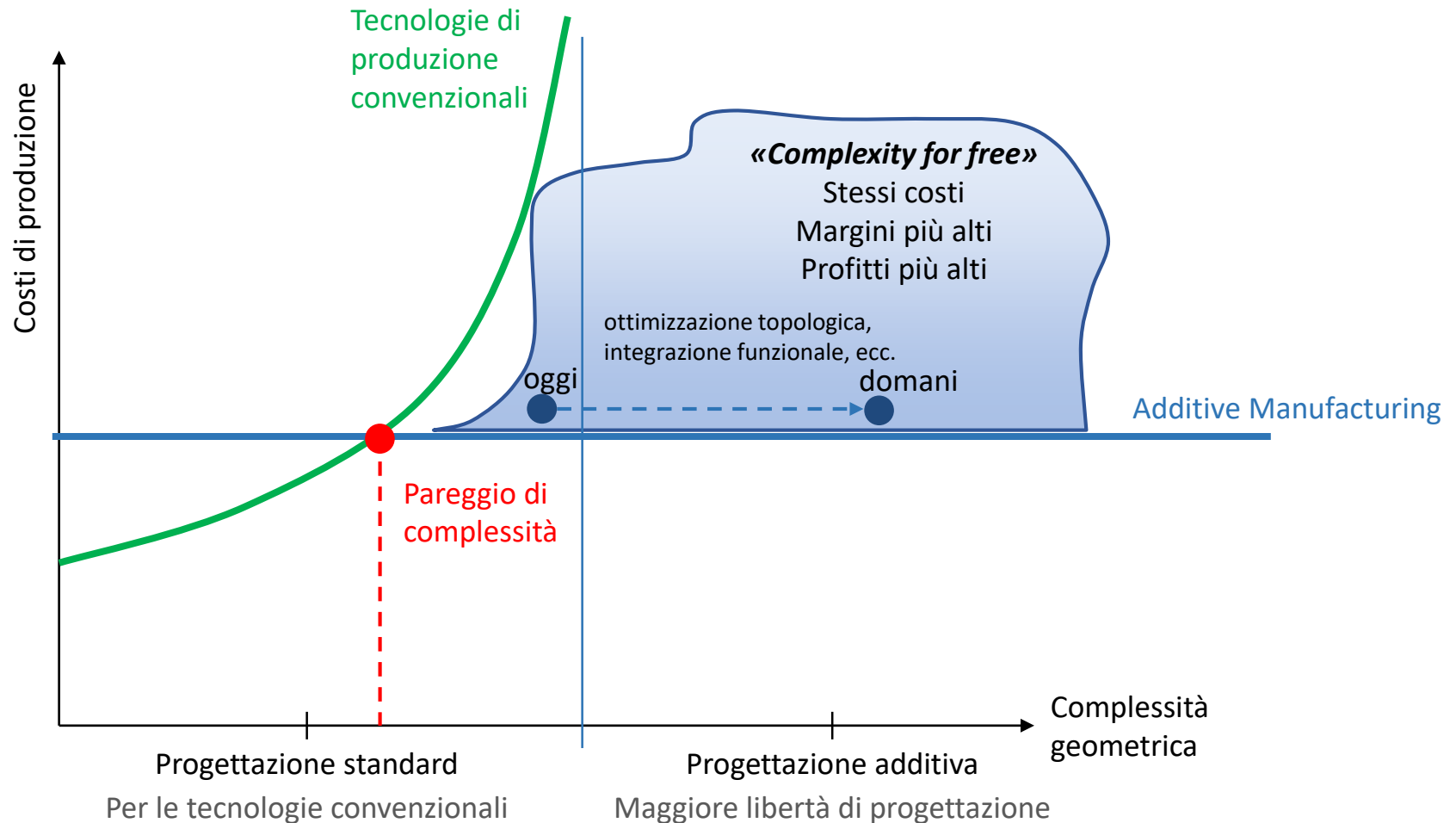


Scambiatore di calore – Leap71



Ottimizzazione Topologica - nTop

«Complexity for free»



Limiti della manifattura additiva

- **Dimensioni dei componenti**
- **Volumi di produzione:** generalmente adatta alla produzione di pezzi singoli o di piccole serie, mentre risulta poco indicata per la produzione di massa. Per componenti di piccole dimensioni sono già possibili volumi fino a 25.000 pezzi all'anno.
- **Scelta dei materiali:** i metalli non saldabili non possono essere lavorati mediante AM, mentre le leghe difficilmente saldabili richiedono approcci specifici.
- **Proprietà dei materiali:** i componenti prodotti mediante AM presentano anisotropia; anche raggiungendo densità del 99,99%, possono permanere porosità residue; le proprietà meccaniche sono superiori a quelle dei componenti ottenuti per fusione, ma generalmente inferiori a quelle dei componenti ottenuti per deformazione plastica.

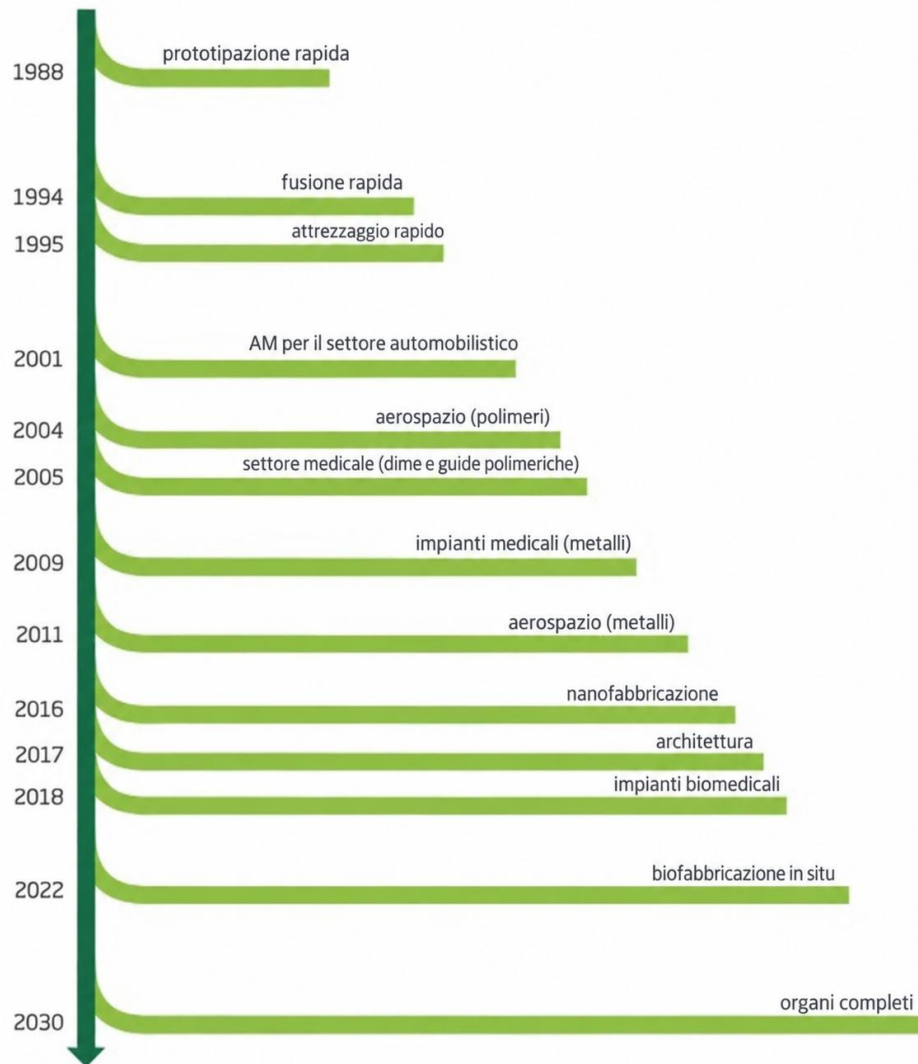


Breve storia

- **1984:** *Charles W. Hull* (***fondatore di 3D System***) brevettò una attrezzatura per realizzare oggetti tridimensionali per *Stereolitografia* (SLA).
- **1986:** *Deckard and Beaman* brevettarono l'attrezzatura di *Selective Laser Sintering* (SLS).
- **1989:** *Scott Crump* (***fondatore di Stratasys***) brevettò il processo di *Fused Deposition Modelling* (FDM).
- **Beginning '90:** *Solid Ground Curing* (SGC), *Laminated Object Manufacturing* (LOM).
- **1997:** *Electron Beam Melting* (EBM).
- **2009:** *Organovo*[®] stampò il primo vaso sanguigno da utilizzare nella ricerca medica e nella scoperta di farmaci .



Breve storia



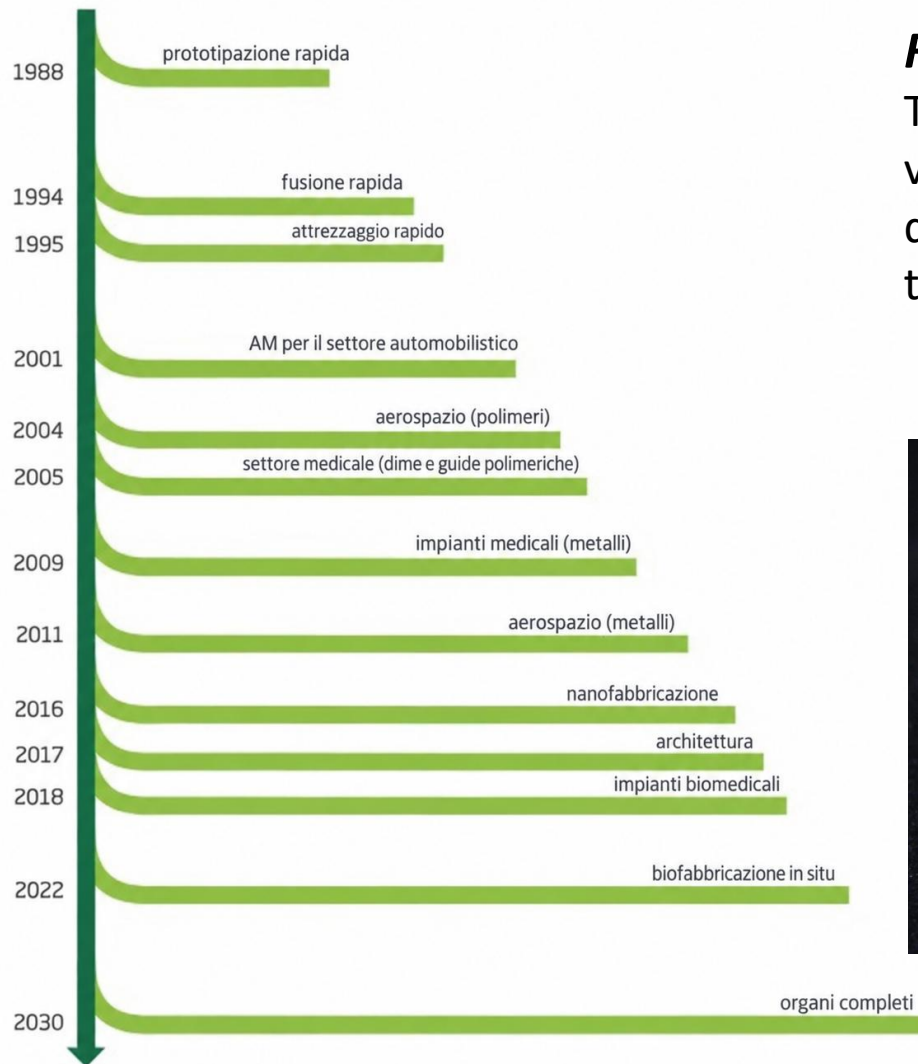
Cronologia delle applicazioni AM

La cronologia presenta gli sviluppi e le applicazioni AM passati, presenti e potenzialmente futuri.
(per gentile concessione di Graham Tromans)

1988-1994	prototipazione rapida
1994	fonderia rapida (rapid casting)
1995	realizzazione rapida di attrezzature
2001	AM per il settore automobilistico
2004	aerospazio (polimeri)
2005	settore medicale (dime e guide polimeriche)
2009	impianti medicali (metalli)
2011	aerospazio (metalli)
2013-2016	nanofabbricazione
2013-2017	architettura
2013-2018	impianti biomedicali
2013-2022	biofabbricazione in situ
2013-2032	organi completi

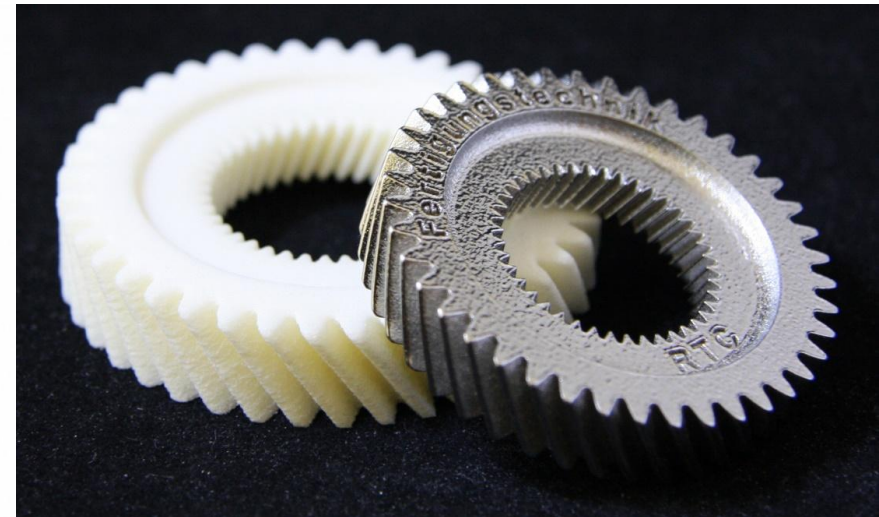


Sviluppo dei processi AM

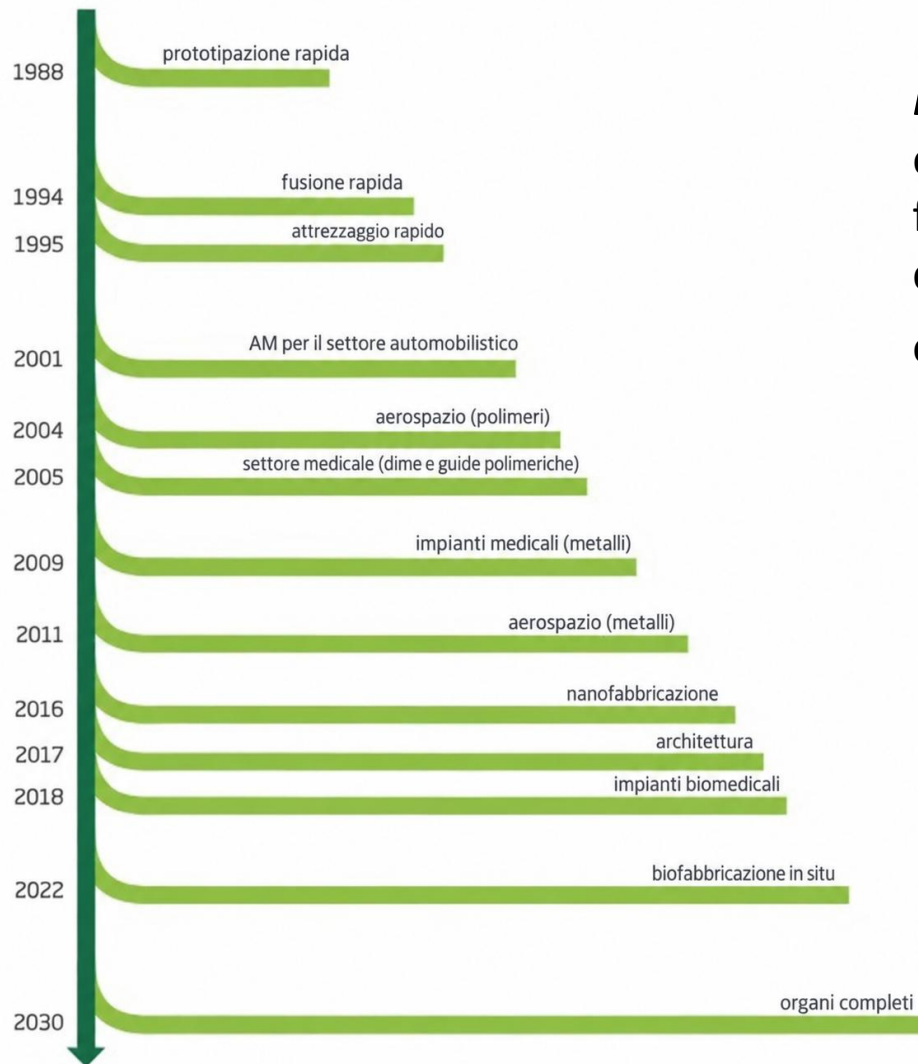


Rapid Prototyping (RP)

Tecnologie usate per fabbricare velocemente un modello di un pezzo fisico o di un assemblato usando dati CAD 3D. Prime tecnologie AM, anche dette stampaggio 3D.



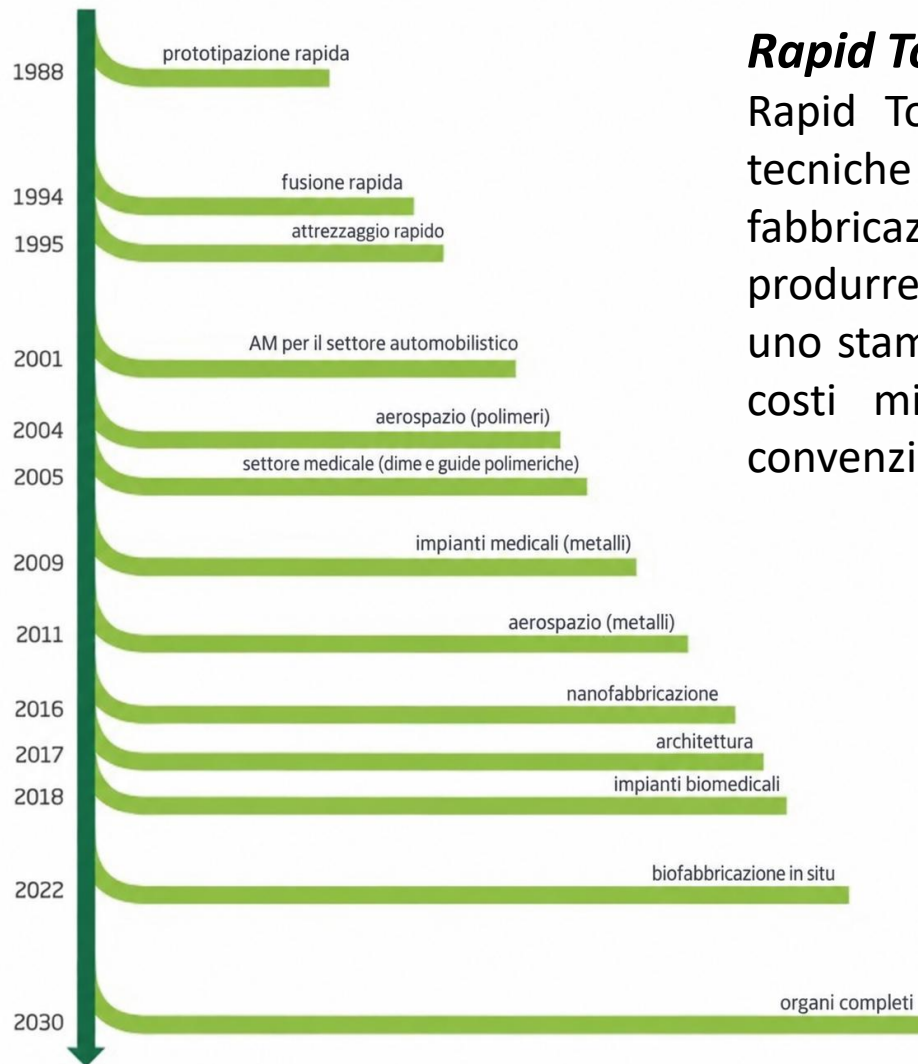
Sviluppo dei processi AM



Rapid Casting: si realizzano, ad esempio, modelli sacrificabili oppure forme e anime per fonderia: il componente metallico finale viene poi ottenuto mediante colata.



Sviluppo dei processi AM

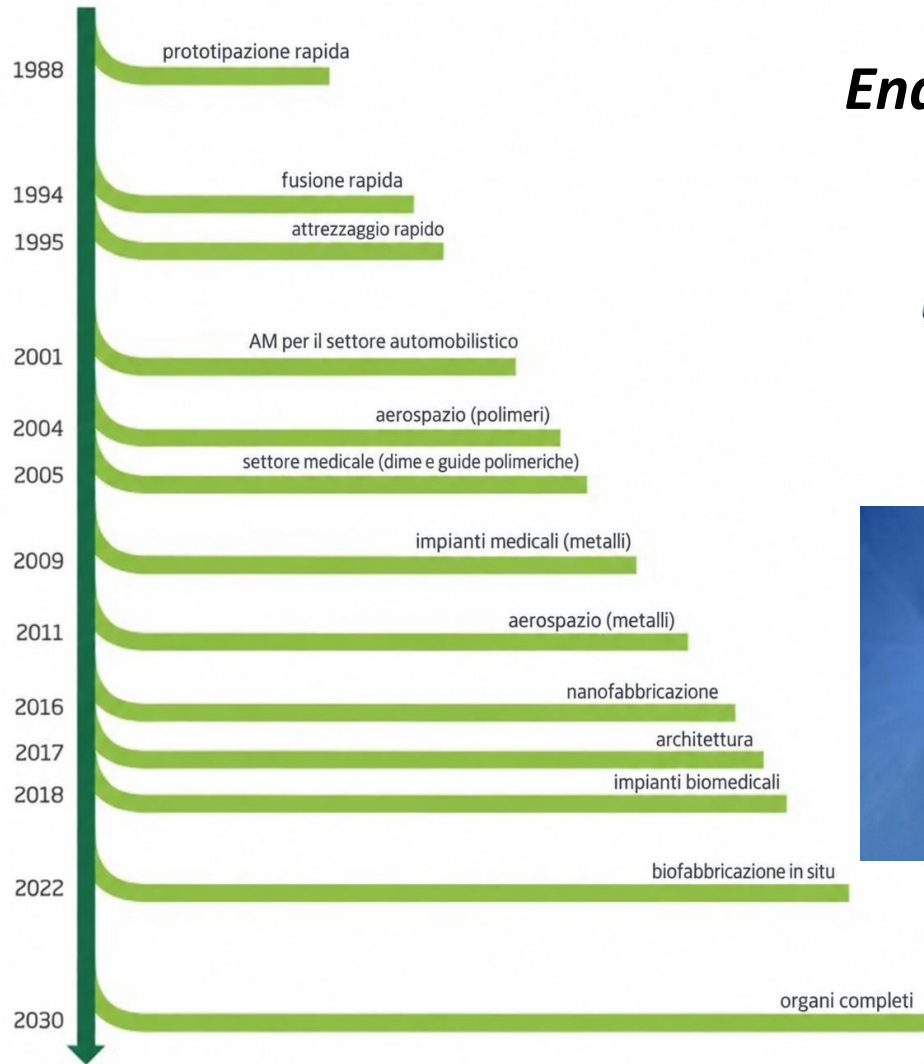


Rapid Tooling

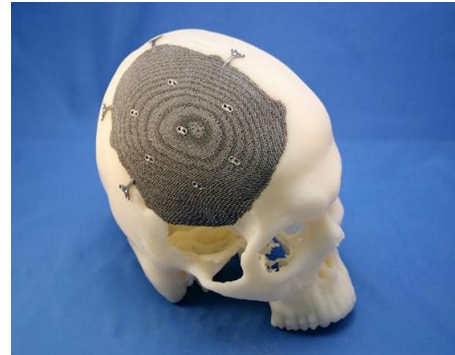
Rapid Tooling (RT) è un processo risultato di tecniche RP combinate con tecnologie di fabbricazione di utensili convenzionali per produrre velocemente un utensile (tipicamente uno stampo) da dati CAD 3D in meno tempo e a costi minori rispetto che con le tecnologie convenzionali.



Sviluppo dei processi AM

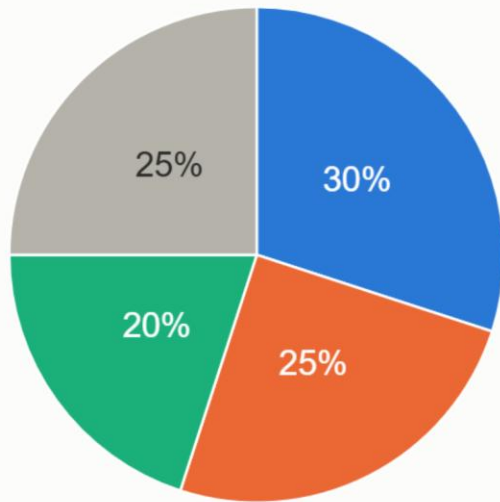


End-use products



Sviluppo dei processi AM

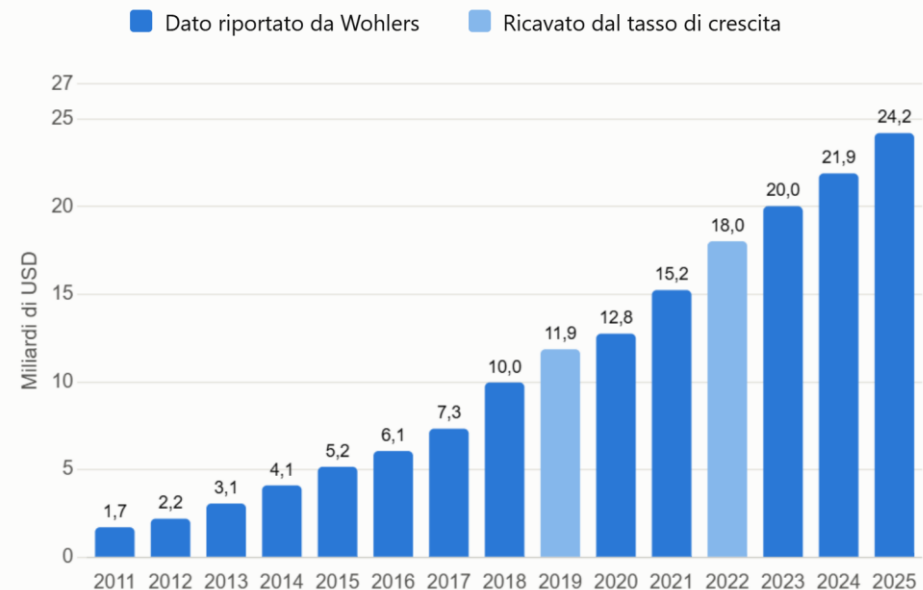
■ Aerospace 30% ■ Automotive 25% ■ Healthcare / biomedicale 20%
■ Consumer e altro (incl. oil & gas) 25%



Fonte: Fact.MR, Additive Manufacturing Market (agg. marzo 2026), quote per applicazione 2025

- Applicazione nei settori ad alto valore aggiunto
- Tasso di crescita del 20% in più ogni anno

- Mercato in rapida espansione
- Previsioni di crescita soprattutto in Cina



Fonte: Wohlers Report, edizioni 2012–2026 (Wohlers Associates / ASTM International). Ricavi globali di prodotti e servizi AM.

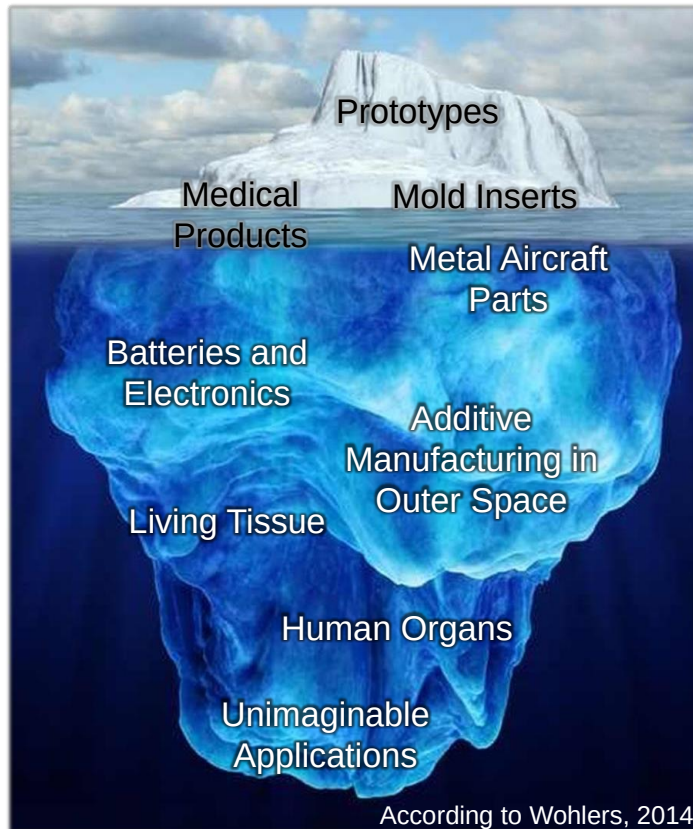


UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

**Additive Manufacturing: tecnologie,
progettazione e applicazioni**

Prof. R. Bertolini

Prodotti AM già industrializzati



LEAP engine fuel
nozzle



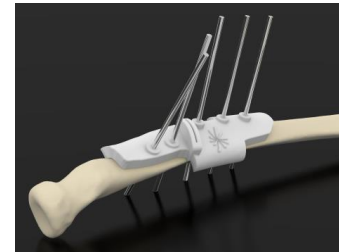
GE Aviation

Dental Prostheses
Cobalt-Chromium



EOS

Drill guide
PA12



Materialise

Tool insert for injection molding
Tool Steel



Jell Group

Stereotactic platform for surgery
PA12



FHC, Inc.



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

**Additive Manufacturing: tecnologie,
progettazione e applicazioni**

Prof. R. Bertolini

Esempi nel campo civile



Esempi nel campo civile

Il primo ponte al mondo stampato in 3D è ad Amsterdam!



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

**Additive Manufacturing: tecnologie,
progettazione e applicazioni**

Prof. R. Bertolini