

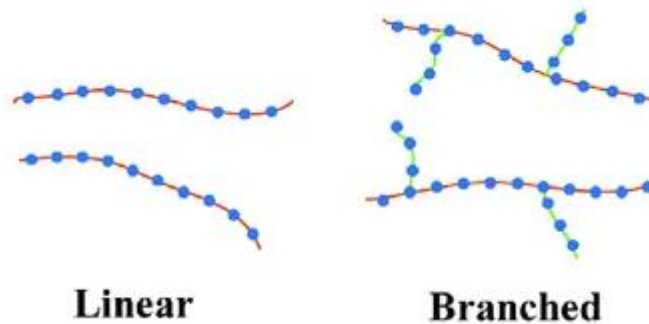
Introduzione ai polimeri

- La plastica, dalla parola greca plastikos, significa "può essere modellata e modellata".
- Sono suddivisi in tre macro-categorie: termoplastici , termoindurenti e gomme.
- I termoplastici sono commercialmente i più importanti dei tre tipi, costituenti circa il 70% del tonnelloaggio di tutti i polimeri sintetici prodotti.
- Termoindurenti e gli elastomeri condividono il restante 30% circa in modo uniforme, con un leggero vantaggio per i primi.
- I polimeri termoplastici comuni includono polietilene, cloruro di polivinile, polipropilene, polistirene e nylon.
- Esempi di polimeri termoindurenti sono fenolici, epossidici e certi poliesteri.
- L'esempio più comune fornito per gli elastomeri è naturale gomma da cancellare; tuttavia, le gomme sintetiche superano il tonnelloaggio della gomma naturale.



Introduzione ai polimeri

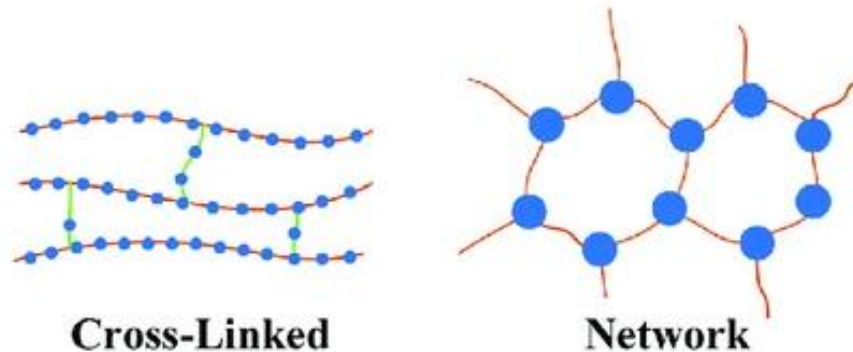
- **Lineari:** monomeri disposti secondo catene lineari. Tra le catene dei polimeri lineari vi possono essere numerosi legami di tipo Van der Waals. Tra i polimeri lineari di maggior impiego comune che presentano strutture lineari vi sono il polietilene, il cloruro di polivinile, il polistirene, il polimetilmetacrilato, il nylon ed i fluorocarburi.
- **Ramificati:** possiedono catene lineari ramificate. I rami, da considerarsi parte delle molecole della catena principale, sono generati da reazioni laterali che avvengono durante la sintesi del polimero. Con la formazione delle ramificazioni si riducono le capacità di impacchettamento della catena, per cui la densità del polimero diminuisce.



↑ Ramificazioni = resistenza ↗
↑ Ramificazioni = densità ↘

Introduzione ai polimeri

- **Reticolati (cross-linked):** catene collegate da legami covalenti sintesi, sia con una reazione chimica non reversibile che viene normalmente effettuata ad elevata temperatura.
 - Spesso questi legami incrociati si ottengono mediante aggiunte di atomi o molecole che si legano alla catena principale con legami covalenti.
 - Numerose gomme ed elastomeri possiedono questa struttura che viene prodotta dalla vulcanizzazione della gomma
- **Polimeri a rete (network):** reti 3d di tre legami covalenti attivi come i termoindurenti epossidici e fenolici



Introduzione ai polimeri

- **Polimeri termoplastici:** Sono polimeri lineari nelle quali le catene sono tenute insieme da legami di Van der Waals e da legami ad idrogeno. Se si somministra sufficiente energia termica, le catene si staccano l'una dall'altra ed il materiale fonde.



- **Polimeri termoindurenti.** Possiedono una struttura reticolata che impedisce alle catene di staccarsi le une dalle altre anche ad alta temperatura. Pertanto se riscaldati non fondono ma bruciano.

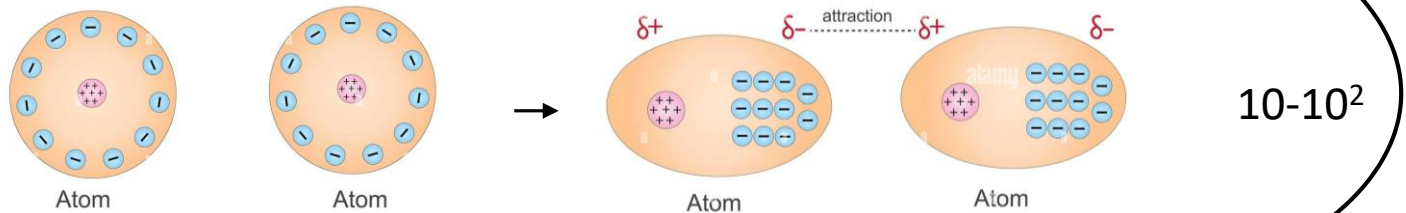


- **Elastomeri.** Materiali capaci di subire deformazioni rilevanti sotto l'azione di sforzi relativamente piccoli, e di recuperare la forma e le dimensioni originali non appena lo sforzo viene rimosso.

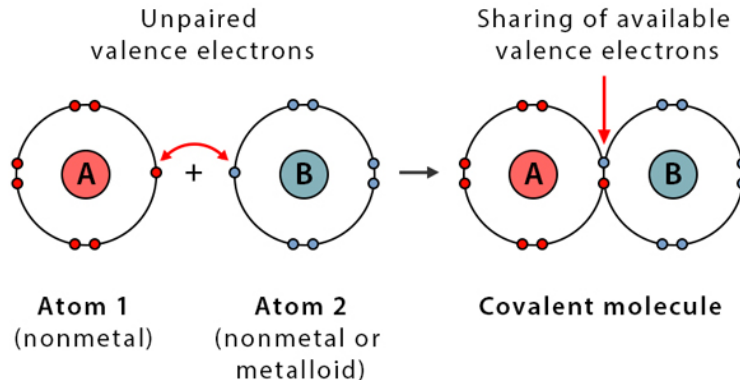
Introduzione ai polimeri

E (energia di legame): quantità di energia necessaria per la dissociazione (distruzione) del legame chimico tra due atomi [kcal/mole]

-Forze intermolecolari di legami di Van Der Waals: $E(*) = 0.5 - 10 \frac{\text{Kcal}}{\text{mole}}$

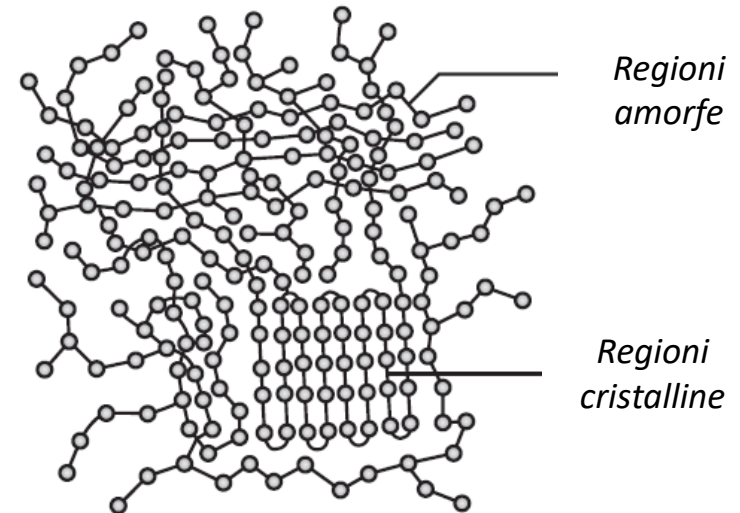


-Forze intramolecolari di legami covalenti: $E(*) = 50 - 200 \frac{\text{Kcal}}{\text{mole}}$



Struttura dei polimeri: cristallinità

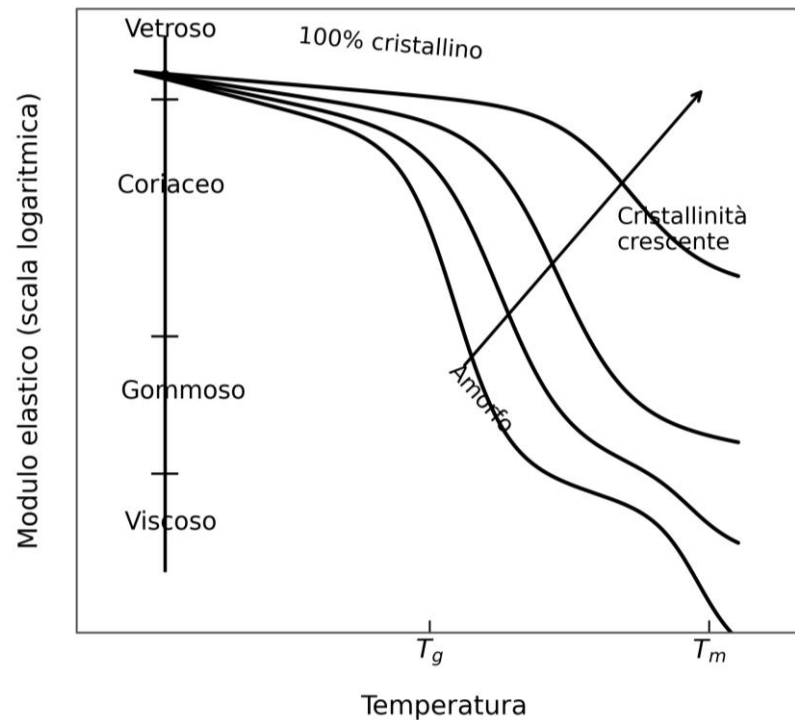
- **Polimeri amorfi.** Non possiedono un ordine a lungo raggio.
- Esempi di polimeri amorfi: polimetilmetacrilato, policarbonato e polistirene
- **Polimeri cristallini.** lunghi segmenti di catene lineari polimeriche sono orientati in maniera regolare l'una rispetto all'altra con discontinuità solo occasionale all'estremità della catena e ciò ha un effetto trascurabile.
- Le regioni cristalline vengono denominate **cristalliti**
- **La cristallinità** viene conferita attraverso la velocità di solidificazione durante il raffreddamento
- **La ramificazione** interferisce con l'aumentare della cristallinità
- Nessun polimero può essere cristallino al 100%



Regioni amorfe e cristalline in un polimero.

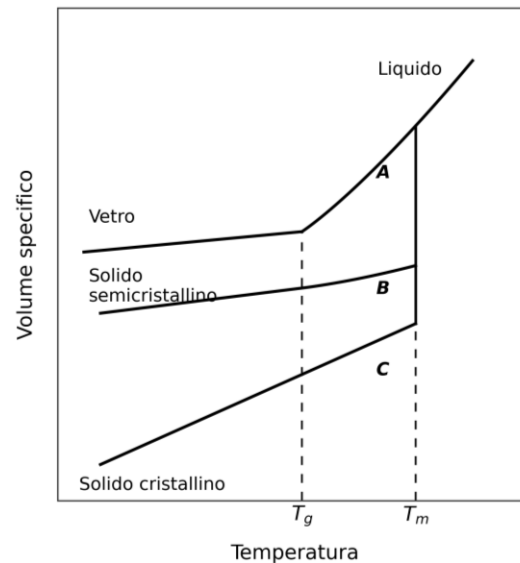
Struttura dei polimeri: cristallinità

- All'aumentare della cristallinità i polimeri diventano più duri e resistenti ai solventi ed al calore;
- All'aumentare della cristallinità i polimeri diventano più densi;
- La cristallinità influenza le proprietà ottiche (polimeri amorfi -> trasparenti);



Struttura dei polimeri: temp di transizione vetrosa

- Per il **materiale cristallino** (curva C) si nota una discontinuità nel volume specifico in corrispondenza al raggiungimento della temperatura di fusione (T_m).
- Per il materiale **totalmente amorfo** (curva A) la curva è continua, ma si rileva sperimentalmente una leggera diminuzione di pendenza in concomitanza della temperatura di transizione vetrosa (T_g).
- Per il **polimero semicristallino** (curva B) il comportamento risulta intermedio tra questi estremi, in quanto per esso si possono osservare i fenomeni relativi sia alla fusione che alla transizione vetrosa;



Struttura dei polimeri: temp di transizione vetrosa

Materiale	T_g (°C)	T_m (°C)
Nylon 6,6	57	265
Policarbonato	150	265
Poliestere	73	265
Polietilene		
Alta densità	-90	137
Bassa densità	-110	115
Polimetilmetacrilato	105	-
Polipropilene	-14	176
Polistirene	100	239
Politetrafluoroetilene (Teflon)	-90	327
Cloruro di polivinile	87	212
Gomma	-73	-

Temperatura di transizione vetrosa e fusione per alcuni polimeri



Classificazione dei processi P-AM

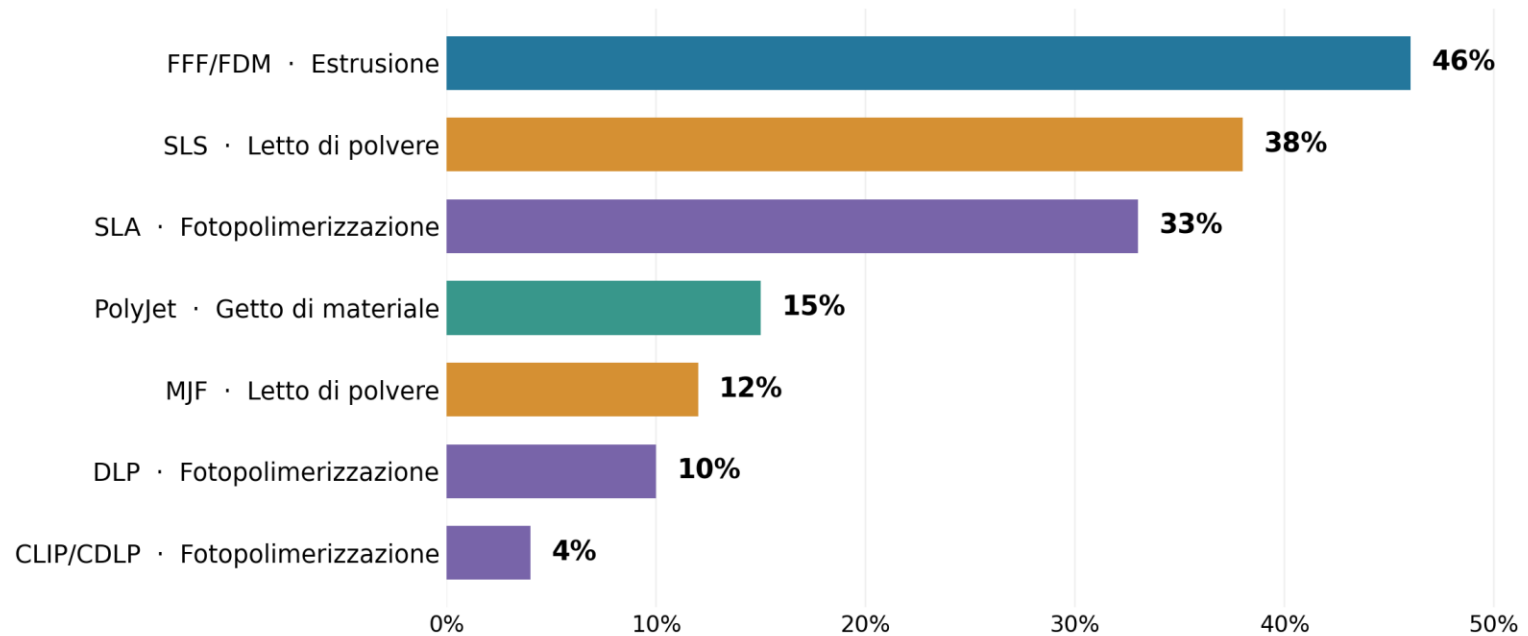
Famiglia di processo	Esempi per i polimeri
Fotopolimerizzazione in vasca – VPP	SLA, DLP, MSLA/LCD
Estrusione di materiale – MEX	FFF/FDM
Getto di materiale – MJT	PolyJet, MultiJet Printing
Fusione a letto di polvere – PBF	SLS
Laminazione di fogli – SHL	Fogli polimerici uniti mediante incollaggio



Diffusione delle tecnologie P-AM

Utilizzo delle tecnologie AM per polimeri

Indagine Sculpteo 2018 · Dati storici · Campione "All Users"



Risposte multiple: le percentuali non rappresentano quote di mercato e non sommano al 100%.

Selezione delle tecnologie per polimeri; laminazione di fogli: dato non disponibile.

Le percentuali delle tecnologie della stessa famiglia non possono essere sommate.

Fonte: Sculpteo, The State of 3D Printing 2018, p. 20 · sculpteo.com/media/ebook/State_of_3DP_2018.pdf



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Additive Manufacturing: tecnologie, progettazione e applicazioni

Prof. R. Bertolini

Polymer Additive Manufacturing (P-AM)



<https://app.wooclap.com/XUKCUHD?from=instruction-slide>



Stereolitografia (SLA)

Stereolitografia (SLA): tecnologia additiva basata sulla fotopolimerizzazione selettiva di una resina liquida contenuta in una vasca (*Vat Photopolymerization*).

Principio di funzionamento: un laser ultravioletto (UV) innesca la polimerizzazione, solidificando localmente la resina.

Costruzione strato per strato: il laser segue le geometrie definite durante lo *slicing*, realizzando le sezioni successive del componente.

Configurazioni della macchina: si distinguono architetture *top-down* e *bottom-up*, caratterizzate da differenti modalità costruttive e vincoli di processo.



Stereolitografia (SLA)

$$H(x, y, z) = H(x, y, 0) \exp(z/D_p)$$

D_p = lunghezza di penetrazione. Dipende dalla trasparenza della resina rispetto al laser.

$$C_D = D_p \ln(\text{rad}(2/\pi) * P_L / W_0 v_s E_c)$$

C_D = massima profondità di penetrazione.

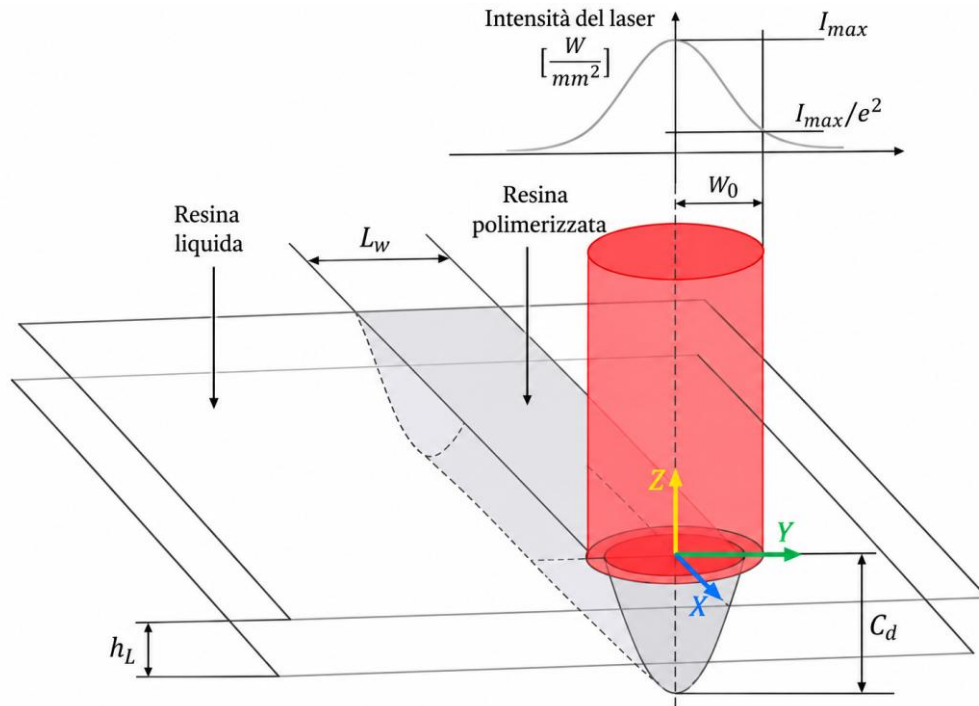
E_c = esposizione critica. Valore minimo dell'esposizione al quale ha luogo la fotopolimerizzazione della resina.

W_0 = raggio del laser.

P_L = potenza del laser.

$$L_w = W_0 * \text{rad}(2 * C_D / D_p)$$

L_w = larghezza del tracciato di materiale polimerizzato.



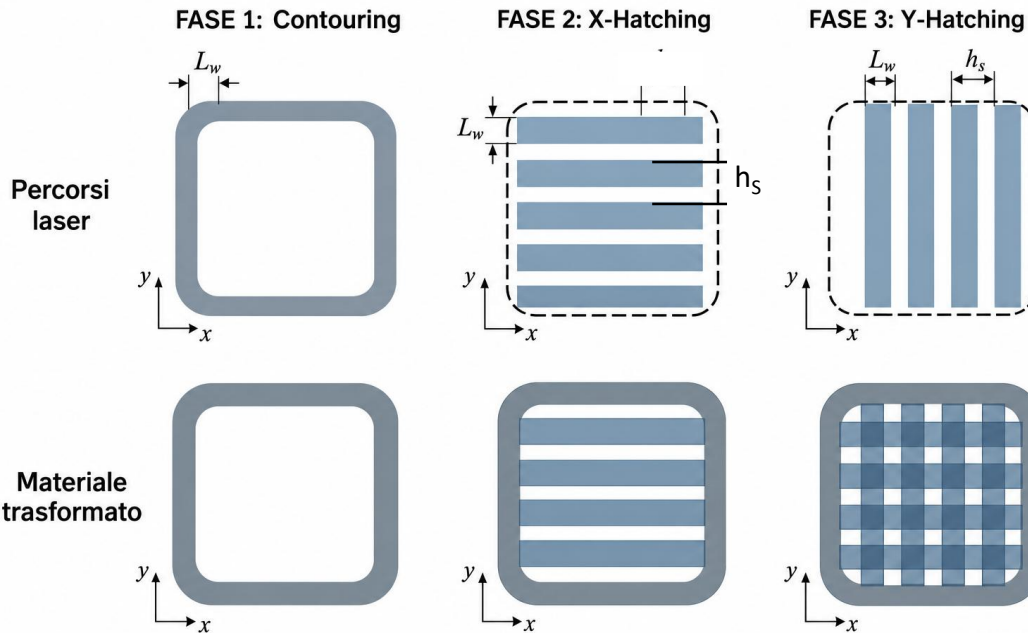
Schema del processo SLA.

SLA: adesione e ritiro

- La costruzione di ogni strato richiede la polimerizzazione del contorno (contouring) e dell'area interna (hatching).
- Per garantire l'adesione, la profondità di cura deve penetrare nello strato precedente, almeno nelle zone di collegamento.
- La reticolazione comporta un ritiro volumetrico della resina, che genera tensioni nel materiale già solidificato.
- Le tensioni residue possono provocare distorsioni, particolarmente rilevanti nei componenti con sezioni sottili.
- I percorsi di scansione influenzano la distribuzione delle tensioni: opportune strategie di riempimento ne limitano gli effetti.



Strategia di riempimento WEAVE

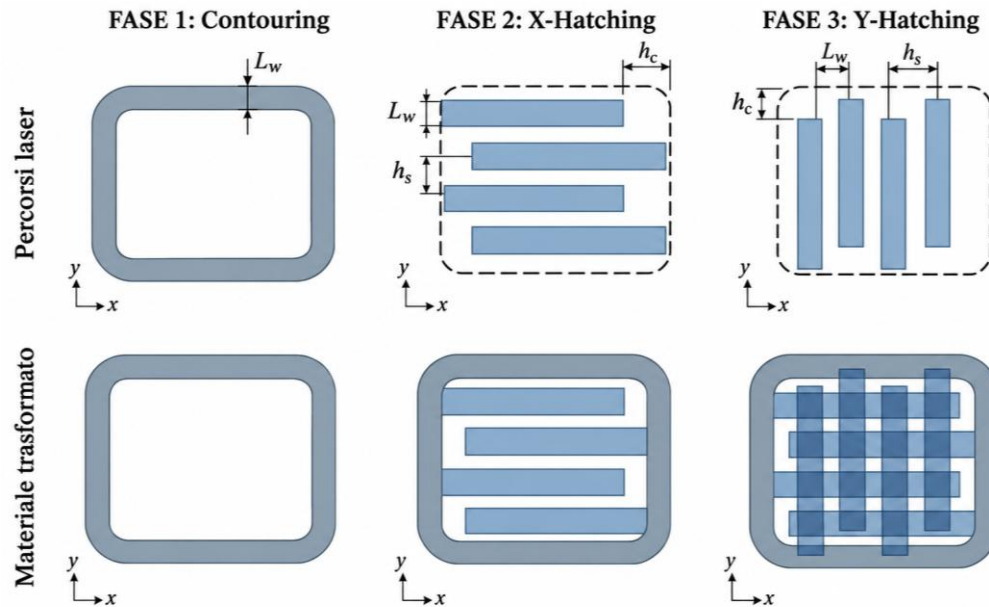


Strategia di
riempimento
WEAVE.

- Le passate sono distanziate di una quantità h_s , detta spaziatura di riempimento.
- La profondità di cura della singola passata C_d è impostata minore o uguale allo spessore dello strato h_L .
- Agli incroci delle passate, la doppia esposizione aumenta la profondità di cura, C_{d*} . Impostando $C_{d*} > h_L$, si ottiene l'adesione allo strato precedente solo nelle zone di incrocio, limitando i vincoli al ritiro.
- Rimangono possibili deformazioni dei contorni e accumuli di tensione lungo Z.

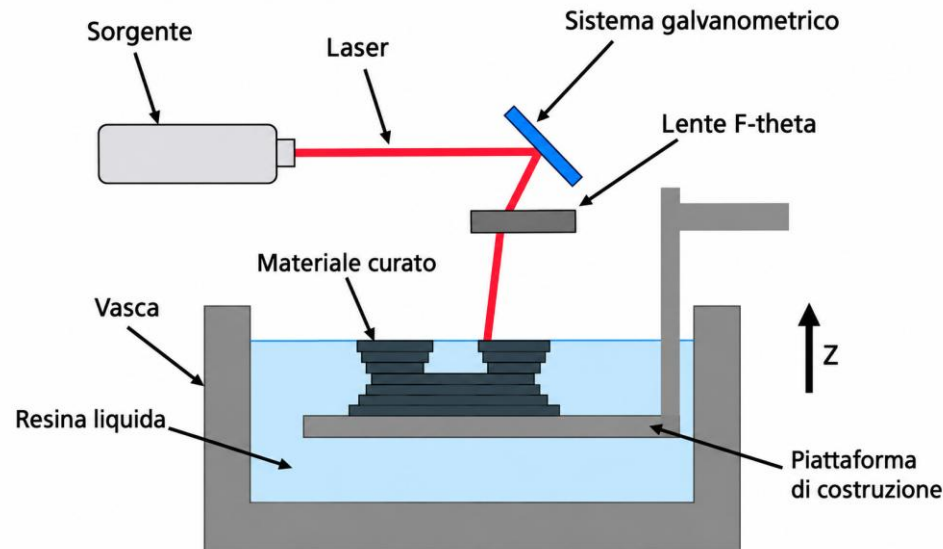
Strategia di riempimento STAR-WEAVE

Strategia di
riempimento STAR-
WEAVE.



- È una modifica della WEAVE finalizzata a ridurre e distribuire meglio le tensioni residue.
- Ogni passata di riempimento è collegata al contorno a una sola estremità; all'altra rimane un piccolo tratto non polimerizzato.
- L'estremità libera permette una contrazione meno vincolata; le estremità collegate e libere vengono alternate tra le passate. Tra strati successivi, i percorsi sono sfalsati di $h_s/2$ lungo X e Y, evitando l'allineamento verticale delle zone di collegamento.
- La regolazione della spaziatura h_s e dello spessore h_l permette di migliorare l'uniformità delle proprietà.

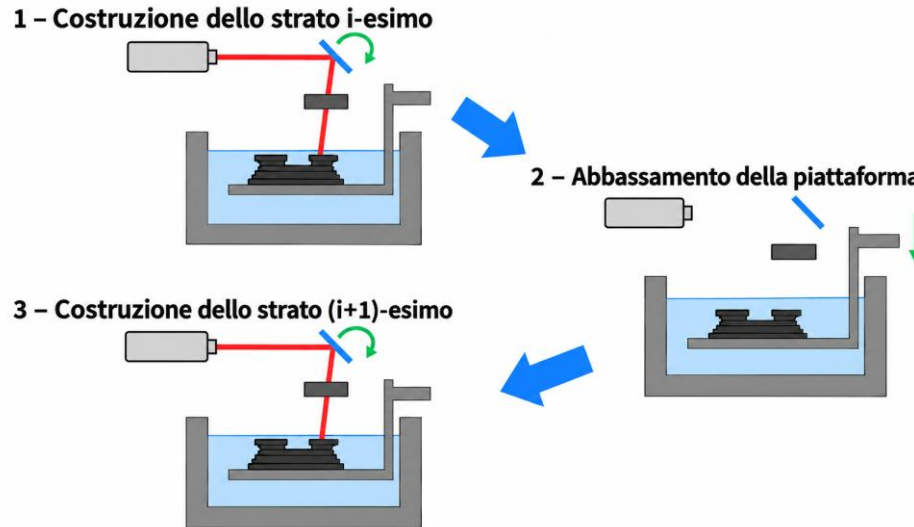
SLA – Architettura top-down



Schema dell'architettura Top-down.

- **Formazione dello strato:** il laser, guidato dal sistema galvanometrico, scansiona la superficie della resina liquida, solidificandola selettivamente.
- **Preparazione dello strato successivo:** completata la scansione, il laser si spegne e la piattaforma si abbassa di una distanza pari allo spessore dello strato, permettendo alla resina di ricoprire il pezzo.

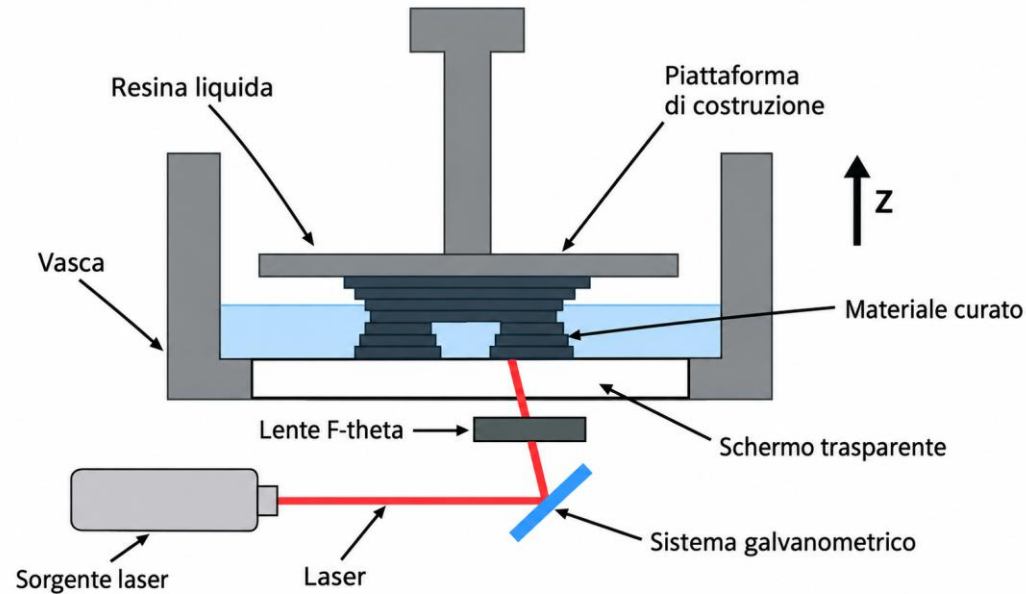
SLA – Architettura top-down



Schema del funzionamento del processo top-down.

- Distribuzione della resina: l'elevata viscosità richiede un **wiper** per stendere uniformemente ogni nuovo strato; il rabbocco compensa il ritiro del materiale, mantenendo il livello del liquido.
- Piattaforma di costruzione: i fori riducono le turbolenze durante l'abbassamento, mentre la rugosità favorisce l'adesione del pezzo. Lo spessore dello strato deve essere un multiplo dello spostamento minimo della piattaforma.

SLA – Architettura bottom up

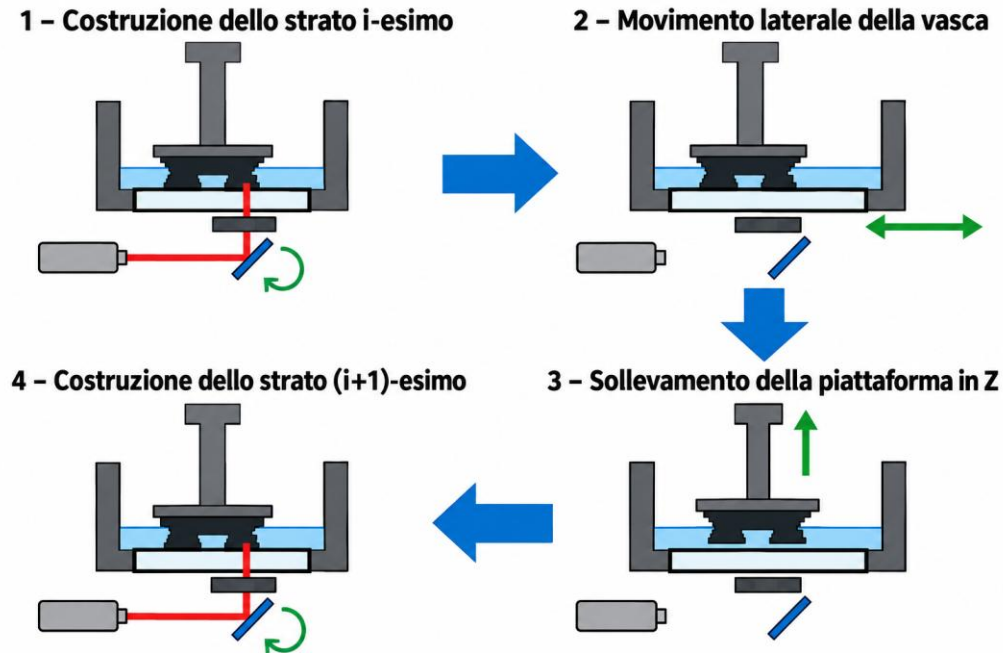


Schema dell'architettura bottom-up.

Configurazione bottom-up: il laser attraversa il fondo trasparente della vasca e polimerizza la resina dal basso; la piattaforma si solleva progressivamente.

Distacco dello strato: il fondo presenta materiali a bassa adesione, come FEP o PTFE; movimenti aggiuntivi della vasca possono favorire la separazione.

SLA – Architettura bottom up



Schema dei movimenti nella strategia bottom-up.

Vantaggi: lo spessore dello strato è determinato dal movimento della piattaforma, semplificando il ricoprimento e il controllo del livello della resina.

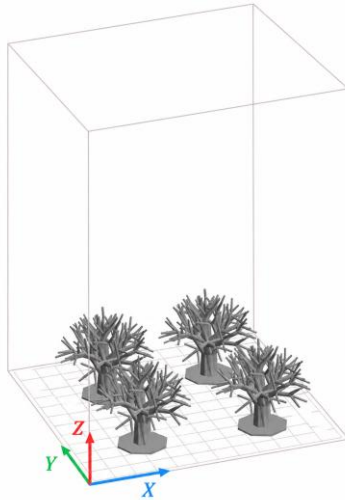
Criticità: le forze di distacco aumentano con l'area dello strato e possono deformare il componente o separarlo dalla piattaforma; occorre quindi limitare l'area delle sezioni durante la costruzione.

Stereolitografia SLA – Post lavorazioni

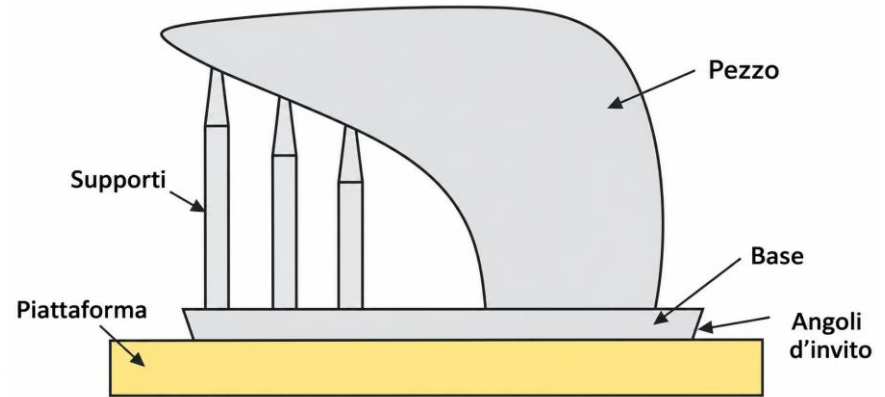
- Una volta completato il processo di costruzione, i pezzi prodotti tramite stereolitografia risultano ricoperti da un sottile strato di resina liquida;
- **Lavaggio:** rimozione della resina liquida residua mediante solventi, generalmente alcol isopropilico (IPA). Il tempo di immersione deve essere controllato per evitare il rammollimento del componente.
- **Post-cura:** esposizione ai raggi UV in ambiente riscaldato per completare la reticolazione del materiale, ancora allo “stato verde”, e migliorarne le proprietà meccaniche.
- **Controllo dei parametri:** tempo e temperatura di post-cura devono bilanciare proprietà meccaniche e accuratezza dimensionale, limitando ritiri, tensioni interne, deformazioni e cricche.



Stereolitografia SLA – Criteri progettuali



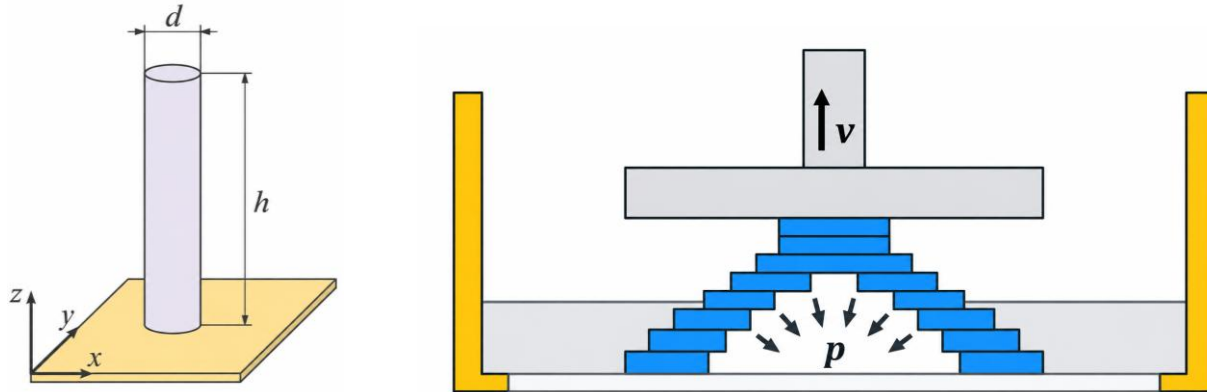
Esempio di nesting in un processo di stereolitografia.



Schema di supporti trabecolari nell'SLA.

- **Ancoraggio alla piattaforma:** i componenti devono rimanere solidali alla piattaforma durante la stampa; la loro disposizione (*nesting*) avviene sul piano XY.
- **Strutture di supporto:** sostengono il pezzo durante la costruzione e presentano sezioni ridotte nei punti di contatto per facilitarne la rimozione.
- **Base di appoggio:** migliora l'adesione alla piattaforma ed è dotata di inviti per agevolare l'inserimento dell'utensile e il distacco finale.

Stereolitografia SLA – Criteri progettuali

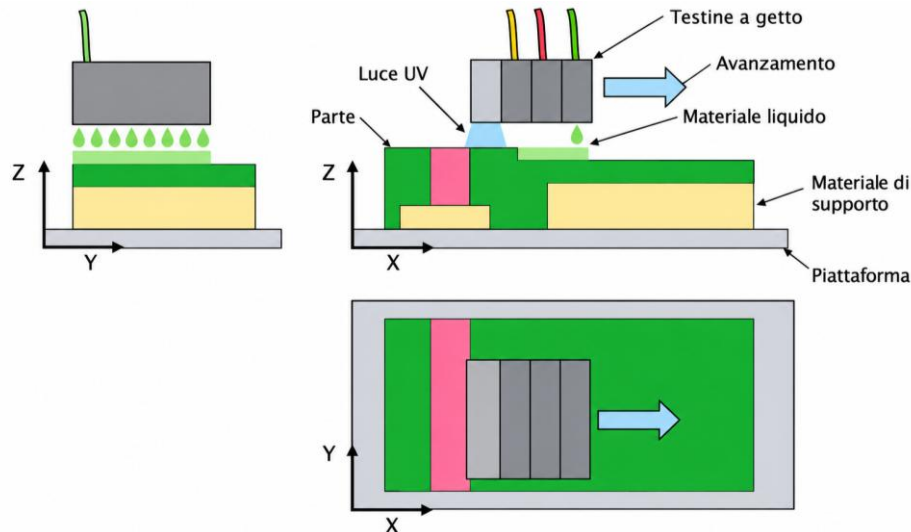


Perno verticale a) e b) schema di una cup nel processo di SLA bottom up.

- **Geometrie snelle:** gli elementi che si sviluppano lungo la direzione di stratificazione sono maggiormente soggetti a distorsioni.
- **Impossibilità di realizzare geometrie cave e prive di aperture.**
- **Dettagli e rilievi:** le dimensioni minime realizzabili dipendono dallo spessore degli strati, dall'accuratezza del laser e dall'orientamento del pezzo.
- **Effetto ventosa (cup) nel bottom-up:** le cavità possono generare una depressione durante il distacco dal fondo della vasca, causando flessione verso l'interno, deformazioni o fratture delle pareti.

Material Jetting (MJ)

- Denominazioni commerciali: **PolyJet, Objet, MultiJet Printing e MultiJet Modelling.**
- Una testina con numerosi ugelli allineati deposita selettivamente gocce di resina fotopolimerica, in modo analogo alla stampa a getto d'inchiostro. La testina si muove perpendicolarmente all'allineamento degli ugelli, realizzando la geometria di ciascuno strato mediante una o più passate.
- Una lampada UV solidale alla testina induce la fotopolimerizzazione del materiale appena depositato. Completato lo strato, la piattaforma si abbassa per consentire la deposizione del successivo.
- Si impiega un materiale di supporto rimovibile, ad esempio simil-cera o idrosolubile.



Processo di MJ.

Material Jetting (MJ)

- Stampa multimateriale e multicolore: consente di combinare zone rigide e flessibili nello stesso componente e riprodurre colori e texture.
- Elevato dettaglio e buona finitura superficiale, grazie alle piccole dimensioni delle gocce e agli strati sottili.
- Realizzazione di digital materials: combinazione di due o più materiali presenti nelle testine a getto.
- Riduzione dei tempi di costruzione -> realizzazione di parti di dimensione non trascurabile.
- Supporti e finitura: le superfici a contatto con il supporto risultano generalmente opache (matte), mentre quelle esposte all'aria sono lucide (glossy).
- Accuratezza: strati sottili e polimerizzazione uniforme tramite lampada UV mitigano le tensioni interne e le distorsioni.
- Progettazione multimateriale: occorre definire nel modello CAD i volumi associati ai diversi materiali e garantire la continuità geometrica alle loro interfacce.



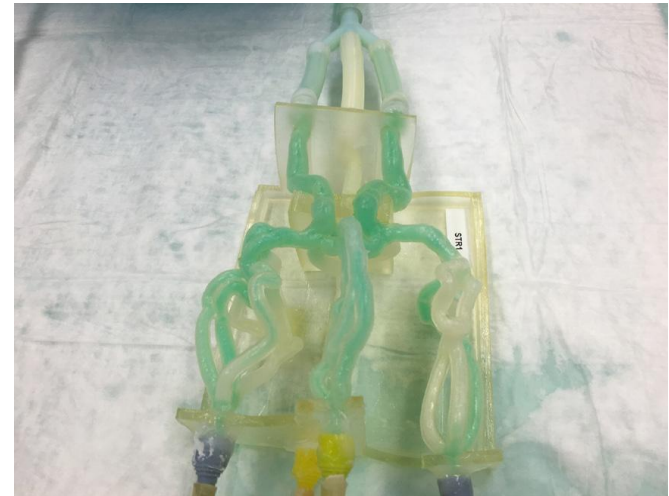
Material Jetting (MJ)



Applicazioni MJ



Prototipo di pompa dell'acqua presso Volvo Construction Equipment, stampato in 3D con tecnologia PolyJet.



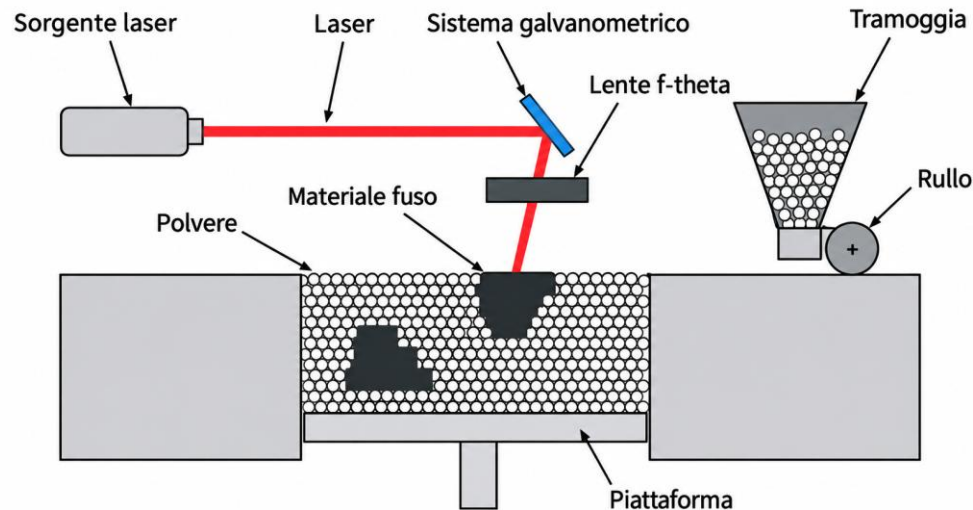
Il Jacobs Institute stampa in 3D modelli vascolari utilizzando il materiale Agilus30 e la tecnologia PolyJet.

Selective Laser Sintering (SLS)

- **Processi laser:** utilizzati per polveri polimeriche e metalliche, richiedono soluzioni tecnologiche differenti in funzione delle proprietà del materiale.
- **Terminologia:** le denominazioni tradizionali SLS e SLM sono comunemente associate, rispettivamente, a polimeri e metalli, ma non identificano necessariamente meccanismi di consolidamento diversi; LPBF indica i processi PBF con sorgente laser.
- Il processo di sinterizzazione selettiva tramite laser (**selective laser sintering, SLS**), noto anche come polymer laser sintering (PLs) o polymer Power Bed Fusion (pPBF), prevede la sinterizzazione localizzata di materiale allo stato pulviscolare all'interno di una vasca.
- **Materiale di partenza:** polveri con granulometria generalmente compresa tra 20 e 80 μm , contenute in una vasca.
- **Consolidamento:** il laser riscalda selettivamente la polvere, provocando una fusione localizzata o completa in funzione del materiale e dei parametri di processo.



SLS– schema del processo



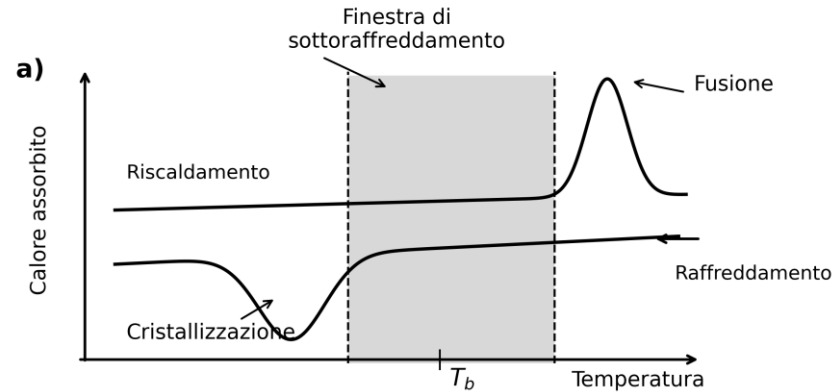
Schema del processo di SLS.

Sistema laser: generalmente a CO₂, guidato da un sistema galvanometrico e focalizzato tramite una lente f-theta.

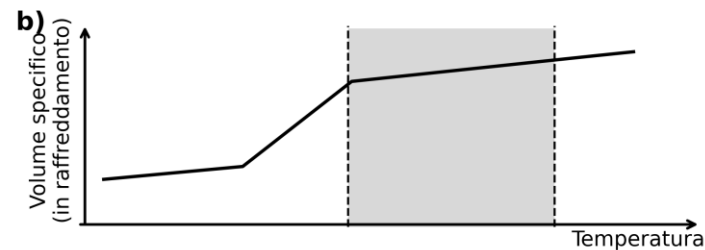
Consolidamento selettivo: il laser scansiona il letto di polvere seguendo le geometrie definite dallo *slicing*, formando uno strato del componente.

Deposizione del nuovo strato: la piattaforma si abbassa dello spessore di uno strato; una tramoggia distribuisce nuova polvere, uniformata da un rullo controrotante. Il ciclo si ripete fino al completamento del pezzo.

SLS – meccanismi del processo



a) Andamento al variare della temperatura del calore assorbito.



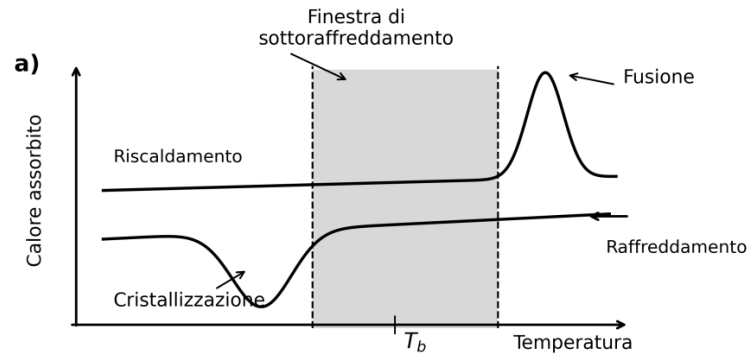
b) Andamento al variare del volume specifico del materiale.

Materiali polimerici: nei termoplastici semicristallini coesistono regioni ordinate e amorfe; nei polimeri amorfi manca un ordinamento cristallino delle catene.

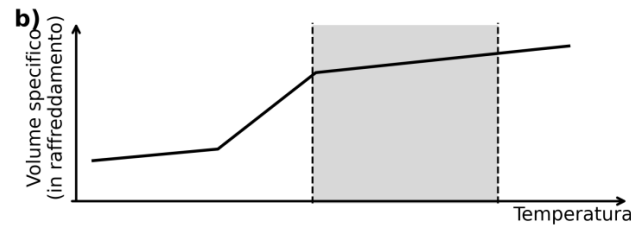
Finestra di sottoraffreddamento: intervallo tra cristallizzazione e fusione dei polimeri semicristallini, individuabile mediante analisi DSC.

Preriscaldamento: il letto di polvere viene mantenuto a una temperatura T_b interna a questa finestra, riducendo l'energia che il laser deve fornire per fondere il materiale.

SLS – meccanismi del processo



a) Andamento al variare della temperatura del calore assorbito.



b) Andamento al variare del volume specifico del materiale.

Controllo di ritiri e deformazioni: dopo il passaggio del laser, il materiale rimane in uno stato non completamente solidificato fino al termine della costruzione, ritardando la cristallizzazione e favorendo l'unione tra gli strati.

Raffreddamento finale: al termine della stampa si interrompe il riscaldamento e si completa la solidificazione durante il ritorno alla temperatura ambiente.

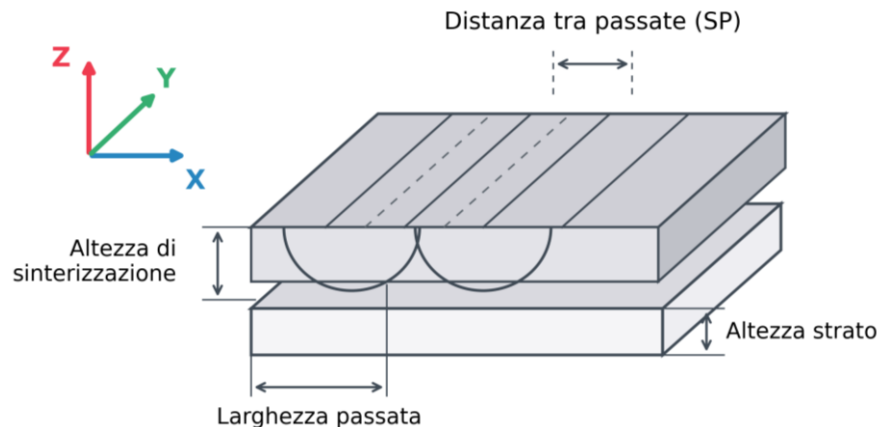
Materiali utilizzati: si preferiscono polimeri semicristallini con un'adeguata finestra termica, soprattutto PA11 e PA12; tra i materiali ad alte prestazioni rientra il PEEK.

SLS – parametri di processo

- La densità di energia, o **numero di Andrews**, dipende da potenza del laser (P), velocità di scansione (v_s) e distanza tra le passate (SP):

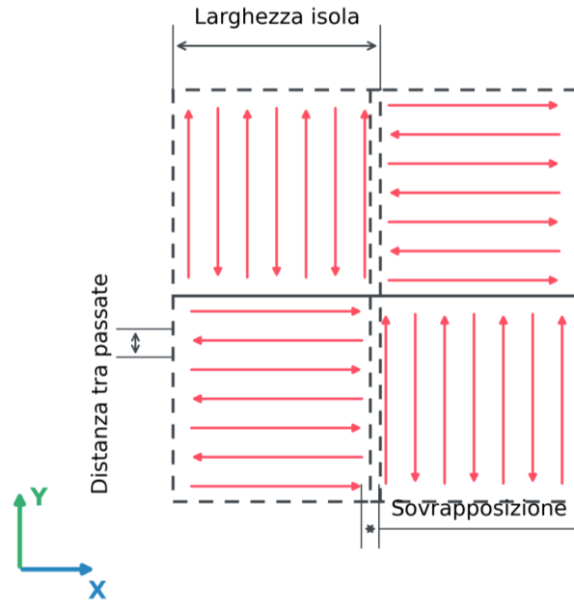
$$E_A = \frac{P}{v_s \cdot SP}$$

- A parità di densità di energia, combinazioni diverse dei parametri possono determinare proprietà meccaniche e accuratezza differenti.
- La distanza tra le passate è inferiore alla loro larghezza per assicurare una parziale sovrapposizione.



Passate parallele al laser durante la sinterizzazione.

SLS – parametri di processo



Riempimento con strategia ad isole con passate parallele.

- La direzione di scansione influenza distribuzione termica, tensioni residue e anisotropia.
- Nella strategia **a isole**, il layer viene suddiviso in aree riempite secondo direzioni di scansione differenti.
- La rotazione della strategia tra layer successivi consente di distribuire meglio il calore e ridurre tensioni residue e anisotropia.
- La direzione di scansione viene ruotata tra layer successivi, spesso di 67° , per ridurre anisotropia e tensioni residue.

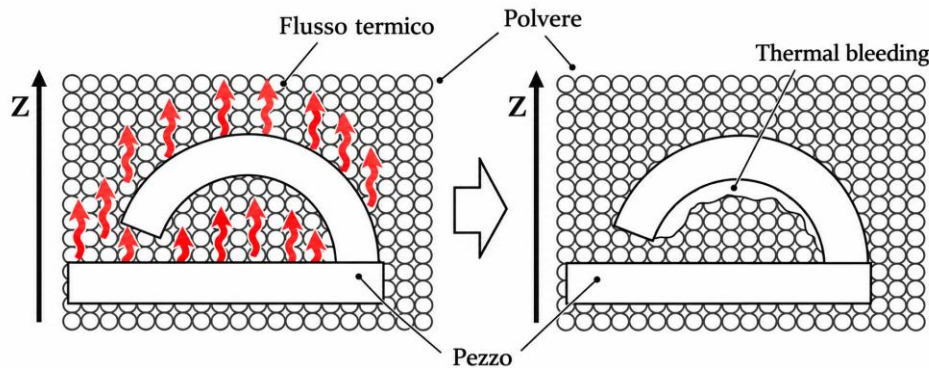
SLS – fasi finali e vincoli

- Prima dell'estrazione, la vasca viene raffreddata per limitare le deformazioni dei componenti.
- Un raffreddamento rapido migliora le proprietà meccaniche, ma può ridurre l'accuratezza dimensionale.
- La polvere non sinterizzata viene aspirata, filtrata e parzialmente riutilizzata, miscelandola con polvere vergine.
- La manipolazione delle polveri richiede aspirazione, filtrazione e adeguati dispositivi di protezione. La rugosità superficiale può richiedere lavorazioni meccaniche, finitura manuale o rivestimenti.
- La polvere sostiene i componenti durante la costruzione: generalmente non servono supporti, ma il posizionamento dei pezzi deve favorire lo smaltimento del calore.
- La densità di *nesting* esprime il rapporto tra il volume dei componenti e il volume complessivo di polvere.

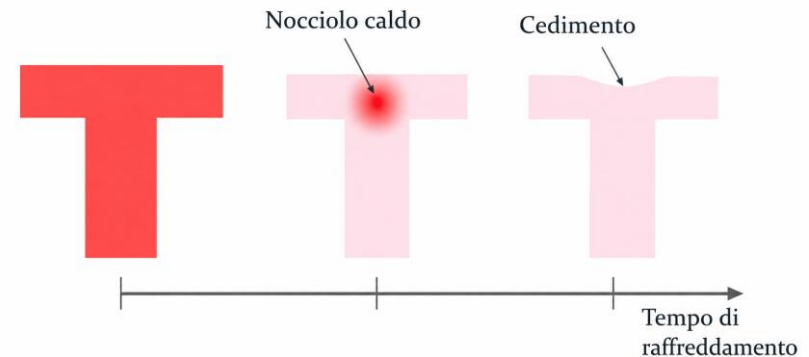


Criteri di nesting e progettazione nella SLS

- I componenti devono essere opportunamente distanziati per evitare accumuli di calore e sinterizzazione indesiderata della polvere circostante (*thermal bleeding*).
- È preferibile distribuire uniformemente le aree dei layer e non collocare i pezzi vicino alle pareti della vasca.
- Il ritiro durante il raffreddamento deve essere compensato modificando opportunamente le dimensioni nominali del modello.
- Cambiamenti bruschi di sezione e concentrazioni di materiale favoriscono deformazioni e *sink marks*; occorre quindi adottare spessori adeguati e il più possibile uniformi.



Formazione di *thermal bleeding* in una geometria cava orientata verso il basso.



Formazione di *sink marks* durante un processo di SLS.

SLS Powders Explained

<https://www.youtube.com/watch?v=Fx3XwzGwQSY>



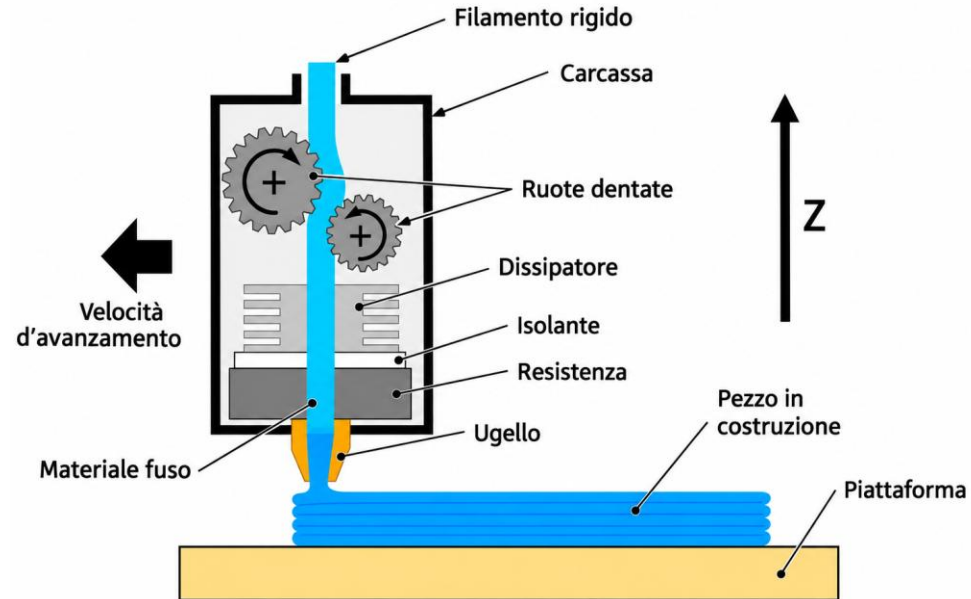
Estrusione di materiale: terminologia e principi

- **Material Extrusion (MEx o MEAM):** categoria di processi additivi basati sulla deposizione di materiale pastoso attraverso un canale, indipendentemente dal materiale e dalla temperatura di processo.
- **Fused Deposition Modelling (FDM):** comprende i processi in cui il materiale, generalmente termoplastico, viene portato allo stato viscoso mediante riscaldamento, depositato e successivamente solidificato.
- **Fused Filament Fabrication (FFF):** processo alimentato da un filamento termoplastico, trascinato verso la zona di riscaldamento ed estrusione.
- La grande diffusione di queste tecnologie deriva dalla semplicità costruttiva delle macchine e dalla scadenza dei primi brevetti.
- Nell'uso comune, **FDM e FFF sono spesso impiegati come sinonimi.**



FFF: principio di funzionamento

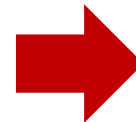
- Tecnologia additiva basata sull'estrusione di un filamento termoplastico, riscaldato e depositato strato per strato.
- Il filamento, alimentato da una bobina, viene trascinato da ruote dentate verso la zona riscaldata.
- Una resistenza elettrica riscalda il polimero al di sopra della temperatura di fusione, che viene spinto attraverso un ugello dalla pressione esercitata dal filamento.
- Il moto relativo tra ugello e piattaforma permette di seguire le traiettorie definite dallo slicing.
- Il materiale depositato si raffredda e solidifica, formando progressivamente il componente.



Schema dell'estrusore nel processo FFF.

FFF: principio di funzionamento

- Isolamento termico e dissipatore limitano la propagazione del calore verso l'alto, evitando il rammollimento prematuro del filamento.
- Il filamento deve avere rigidità sufficiente per trasmettere la spinta e duttilità sufficiente per seguire il percorso di alimentazione senza rompersi.
- I materiali molto flessibili possono presentare difficoltà di trascinamento e instabilità durante la spinta.
- Il raffreddamento del materiale depositato, spesso assistito da una ventola, aumenta la rigidità e limita le deformazioni.



FFF: principio di funzionamento

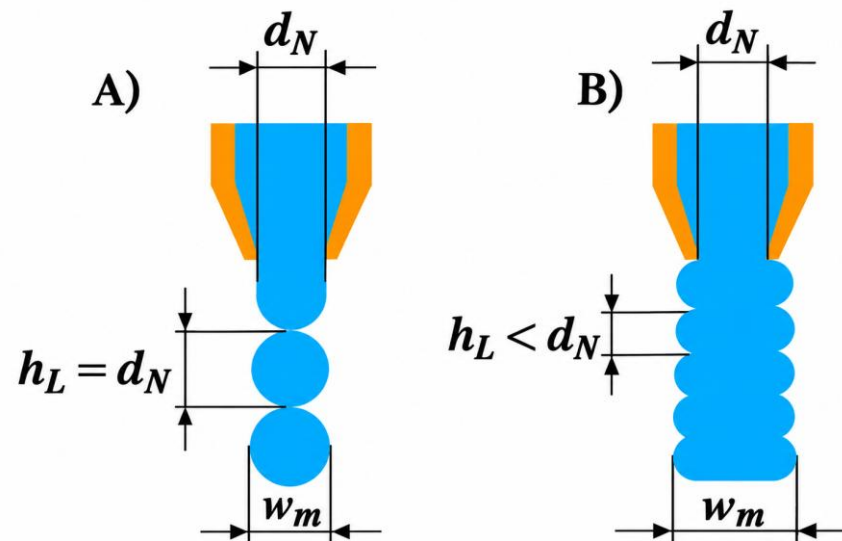
- Il raffreddamento provoca ritiro e *warping*, che possono causare il distacco del pezzo dalla piattaforma.
- Una piattaforma riscaldata limita la contrazione termica dei primi strati.
- Materiali e superfici della piattaforma adeguati, eventualmente con adesivi lavabili, migliorano l'adesione.
- La contrazione degli strati successivi genera tensioni interne e distorsioni, riducendo l'accuratezza dimensionale, soprattutto nei polimeri semicristallini.
- Una camera riscaldata rende più uniforme la temperatura durante la stampa e limita il raffreddamento non uniforme; il pezzo completa il raffreddamento al termine del processo.



Esempio di warping di un componente prodotto tramite FFF.

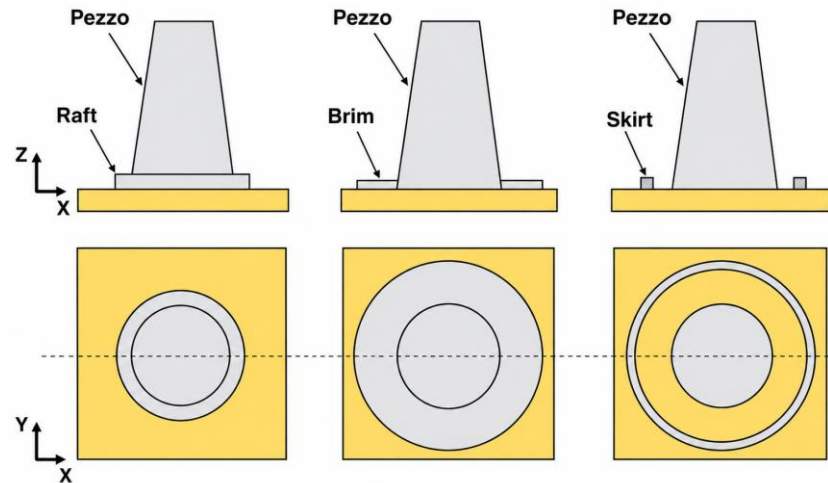
FFF: principio di funzionamento

- Altezza dello strato: si sceglie $h_L < d_N$, dove d_N è il diametro dell'ugello, per schiacciare il materiale depositato e aumentare il contatto e l'adesione tra gli strati.
- Larghezza della traccia: dipende dal rapporto tra velocità di alimentazione del filamento e velocità di avanzamento della testa.
- Retrazione del filamento: limita la fuoriuscita di materiale durante gli spostamenti senza deposizione



Effetto delle diverse altezze di layer sulla stampa FFF.

FFF: adesione alla piattaforma



Strategie di scansione per migliorare l'adesione del pezzo alla piattaforma.

Strategia	Geometria e funzione
Raft (zattera)	Strati aggiuntivi sotto il pezzo : aumentano la superficie di contatto con la piattaforma e vengono rimossi dopo la stampa.
Brim (orlo)	Perimetri aggiuntivi collegati al bordo del primo strato : aumentano l'adesione. La rimozione può richiedere una rifilatura dei bordi.
Skirt (gonna)	Linee di contorno separate dal pezzo : regolarizzano il flusso prima della deposizione del primo strato, senza migliorare direttamente l'adesione.

FFF: parametri di processo

- Bilancio delle portate: l'alimentazione del filamento deve essere coordinata con la velocità dell'ugello

$$Q_{in} = Q_{out}$$

V_f = vel. In ingresso del filo
 r_f = raggio del filo in ingresso

V_a = vel. Avanzamento ugello
 W_m = larghezza del materiale depositato
 h_L = altezza del materiale depositato

$$v_f \pi r_f^2 = v_a w_m h_L$$

- Diametro del filamento: piccole variazioni modificano la portata e la larghezza della traccia, compromettendo l'accuratezza.
- Velocità massima (v_f): limitata dalla capacità del sistema riscaldante di portare il materiale alla temperatura necessaria all'estrusione.
- Temperatura di estrusione: influenza viscosità, adesione tra gli strati e mantenimento della forma.
- Gestione termica: temperature di ugello, piattaforma e camera e intensità del raffreddamento devono essere coordinate.



FFF: criteri progettuali e post-lavorazioni

- Sbalzi non autoportanti: richiedono supporti oppure una riprogettazione con superfici inclinate autoportanti.
- Ponti: possono essere realizzati senza supporti entro limiti geometrici, grazie all'ancoraggio alle due estremità e a un raffreddamento adeguato.
- Rimozione del pezzo: distacco dalla piattaforma ed eliminazione di supporti, raft e brim.
- Supporti solubili: utilizzabili con sistemi multimateriale; facilitano la rimozione anche nelle zone difficilmente accessibili e riducono il rischio di danneggiare il pezzo.
- Finitura superficiale: lavorazioni meccaniche o trattamenti chimici con solventi compatibili riducono la rugosità e i gradini dovuti alla stratificazione.



*Z-axis resolution : 0.33-0.12 mm;
X/Y-axis resolution: 0.025 mm;*

Applicazioni FFF

NASA Human-Supporting Rover has FDM Parts



“...about 70 of the parts that make up the rover were built digitally, directly from computer designs, in the heated chamber of a production-grade Stratasys 3D Printer.”

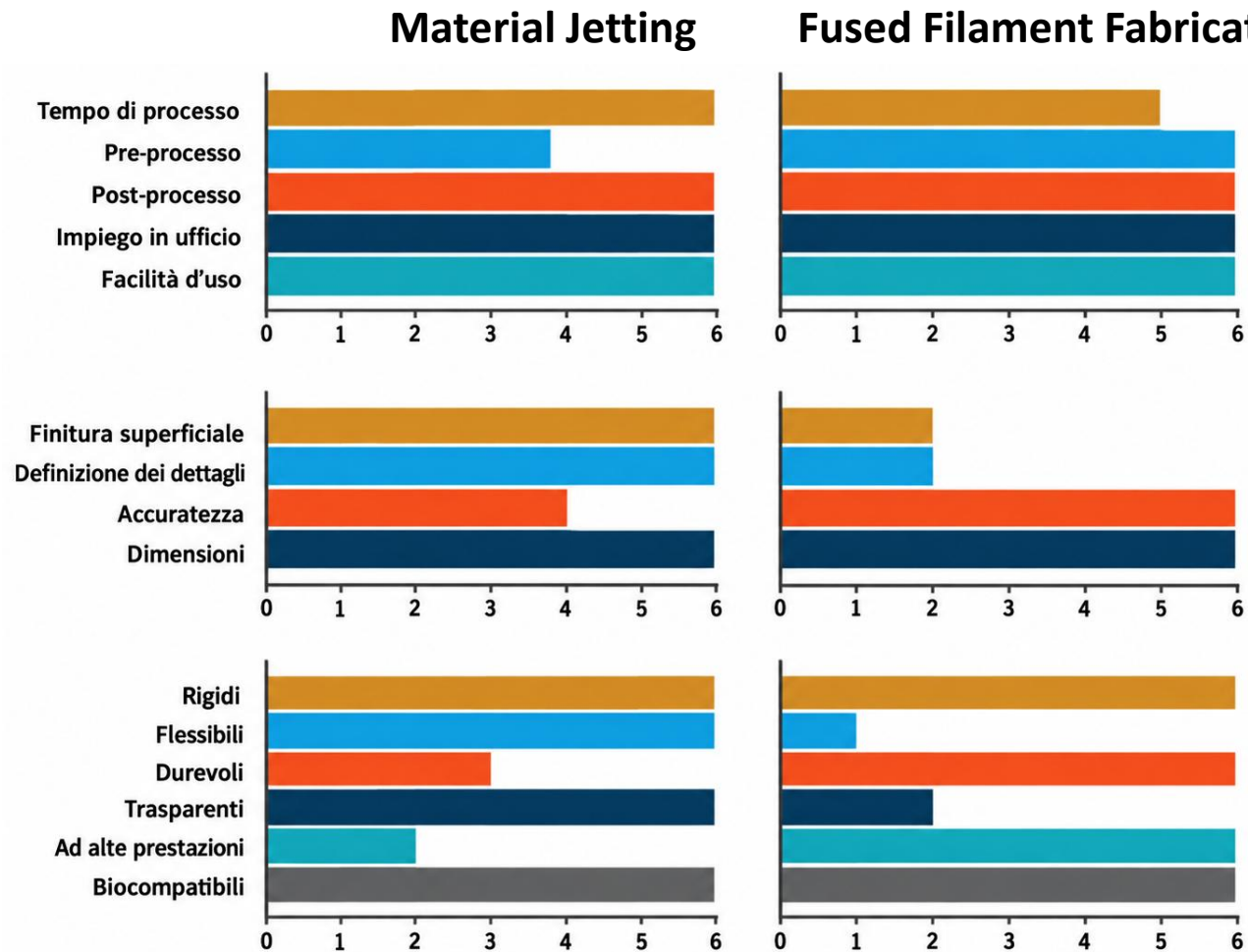
-www.stratasys.com-



Trainer Development Flight (TDF)

“The TDF uses direct digital manufacturing to fabricate a wide majority of its training products.”

MJ vs FFF



Adattato da Stratasys, FDM and PolyJet 3D Printing, p. 14.
Confronto qualitativo del produttore riportato nel documento originale.





<https://www.youtube.com/watch?v=C7RowQYwADU>

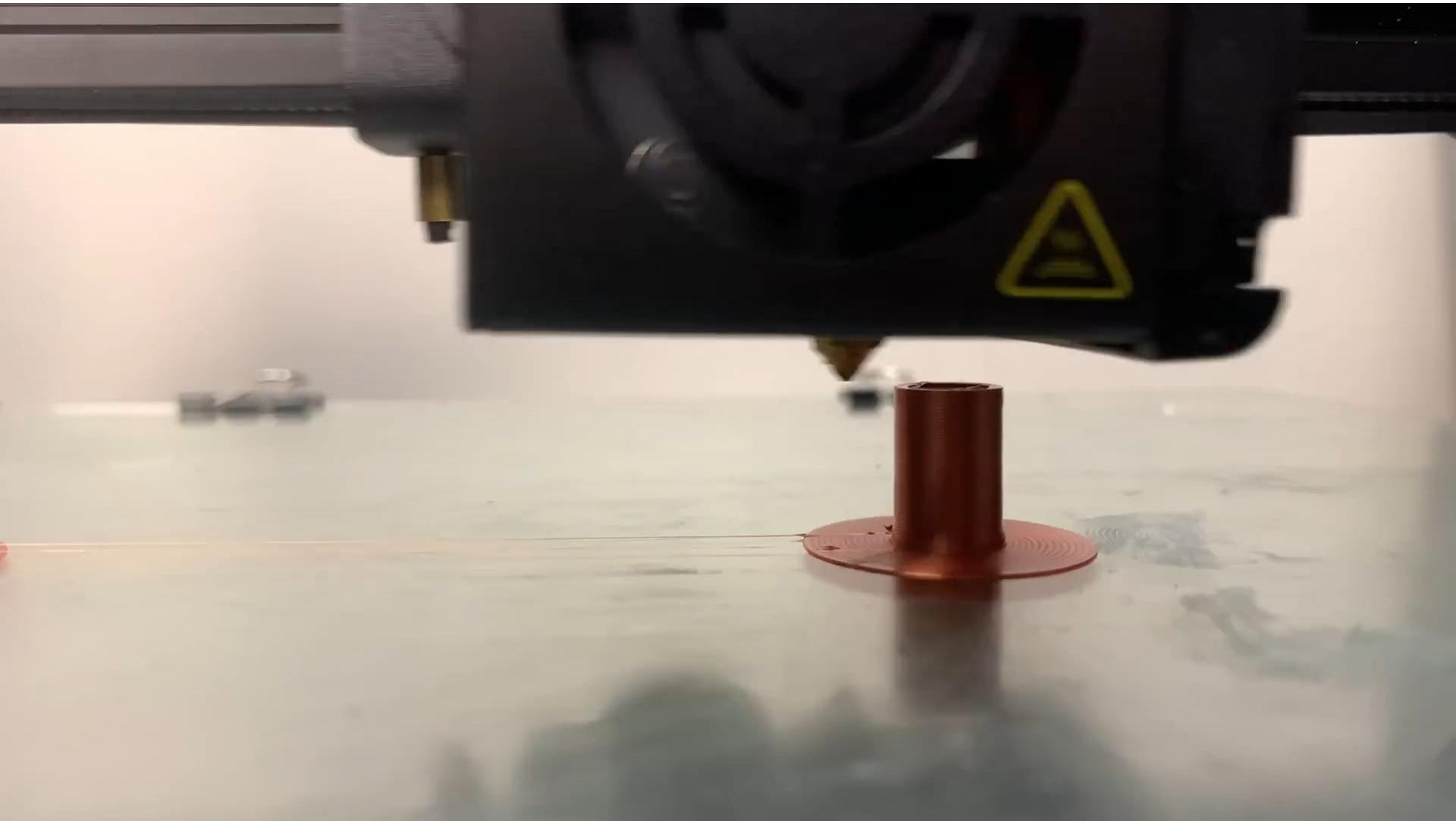


UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Additive Manufacturing: tecnologie, progettazione e applicazioni

Prof. R. Bertolini

FDM Bridge



<https://www.youtube.com/watch?v=m4i1SbIIIMaA>



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Additive Manufacturing: tecnologie, progettazione e applicazioni

Prof. R. Bertolini

Polymer Additive Manufacturing (P-AM)

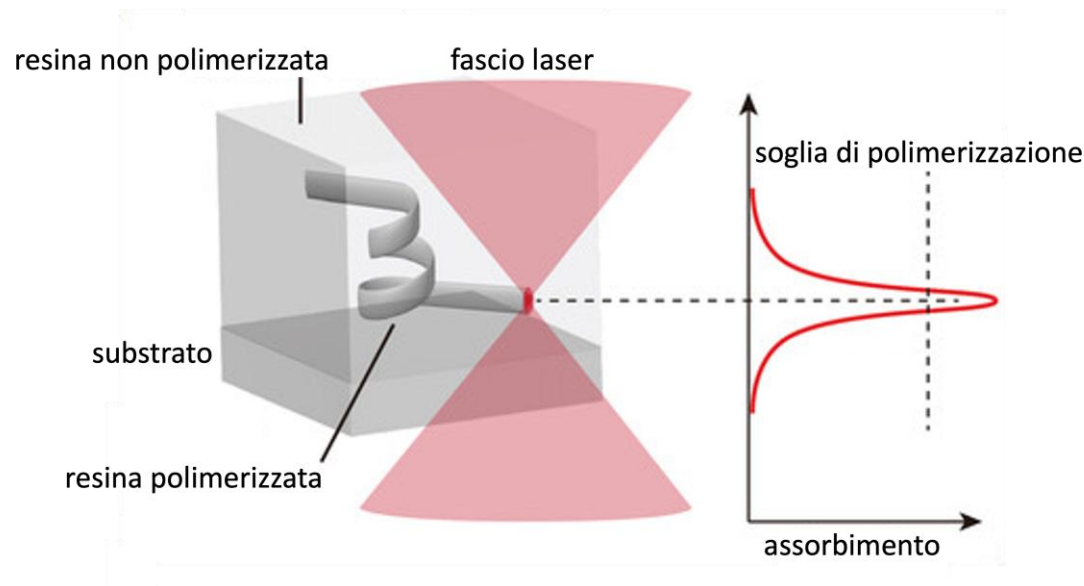


<https://app.wooclap.com/XUKCUHD?from=instruction-slide>



Polimerizzazione a due fotoni (TPP)

- **Fotopolimerizzazione:** processo in cui la luce induce la polimerizzazione di una resina fotosensibile, trasformandola da uno stato liquido a un materiale polimerico solido
- **TPP:** assorbimento simultaneo di due fotoni da parte di un fotoiniziatore, che innesca la polimerizzazione della resina
- Fenomeno non lineare: l'assorbimento a due fotoni avviene localmente nella regione locale del fascio laser (**voxel**), dove l'intensità luminosa è massima



Polimerizzazione a due fotoni (TPP)

Vantaggi e limiti

Assorbimento a **singolo** fotone (1PA):

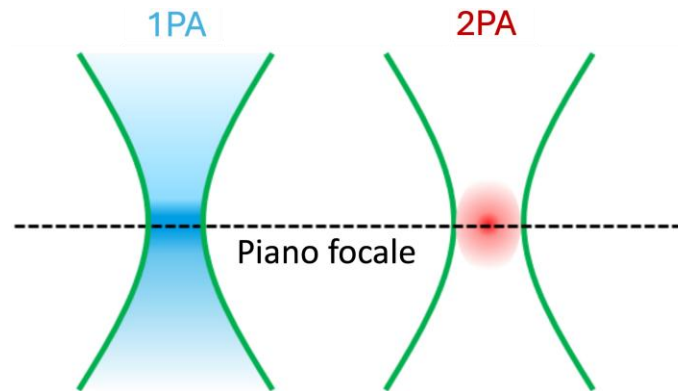
- la reazione di polimerizzazione può iniziare lungo l'intero percorso del fascio laser
- la probabilità di assorbimento a singolo fotone è proporzionale all'intensità della luce

Assorbimento a **due** fotoni (2PA):

- la reazione di polimerizzazione avviene nella regione in cui il laser è fortemente focalizzato (voxel)
- la probabilità di assorbimento a due fotoni è proporzionale al **quadrato** dell'intensità della luce

Limiti:

- lunghi tempi di fabbricazione
- bassa produttività



risoluzione spaziale e accuratezza
significativamente superiori
(dimensione laterale minima delle
strutture 3D ~ **200 nm**)

Stereolitografia SLA - Nanoscribe®



Application Video: 3D μ -Printing



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Additive Manufacturing: tecnologie, progettazione e applicazioni

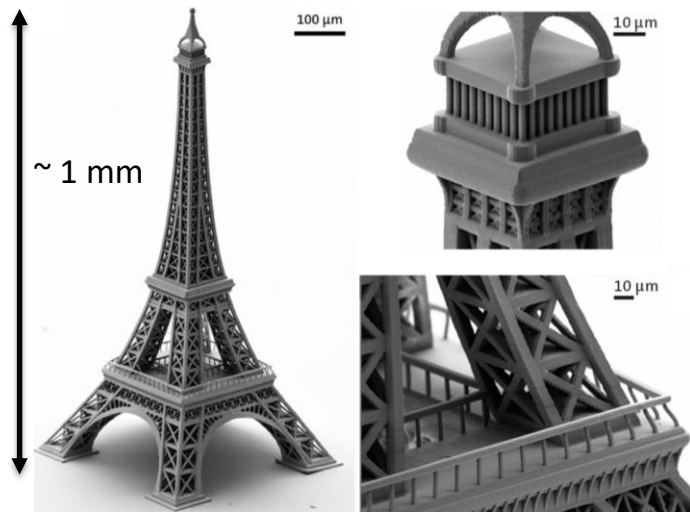
Prof. R. Bertolini

Polimerizzazione a due fotoni (TPP)

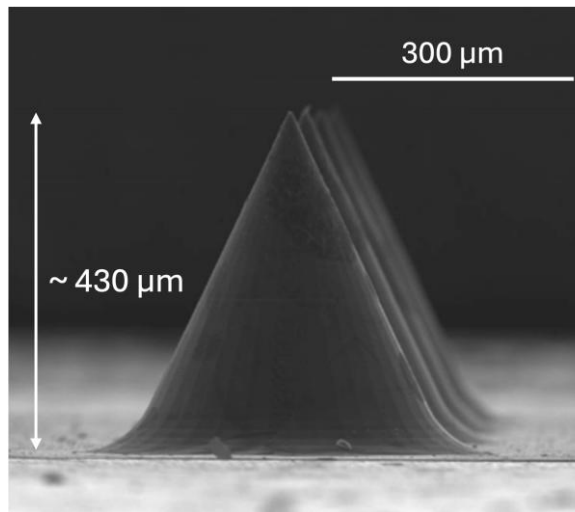


Nanoscribe Photonic Professional GT

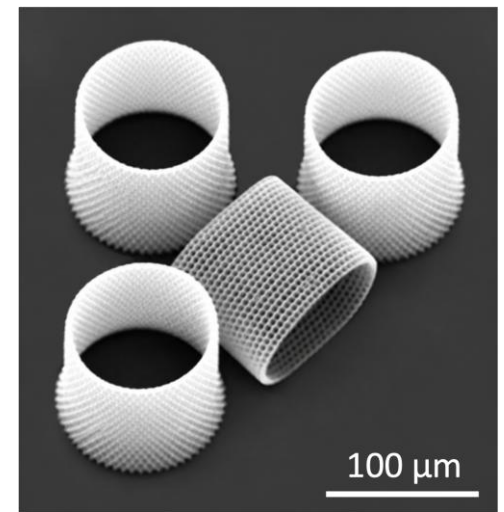
- Utilizza un laser a impulsi ultrabrevi (**femtosecondi**) con una lunghezza d'onda nel vicino infrarosso (**780 nm**) → il fascio laser viene focalizzato mediante un obiettivo all'interno del voxel



Torre Eiffel



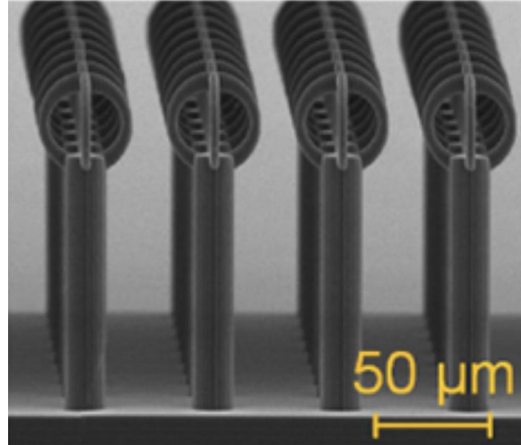
Microago



Scaffold vascolari tubulari

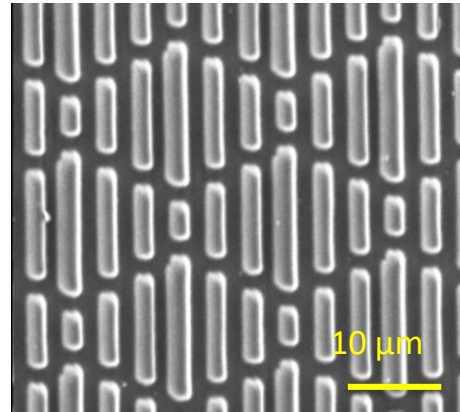
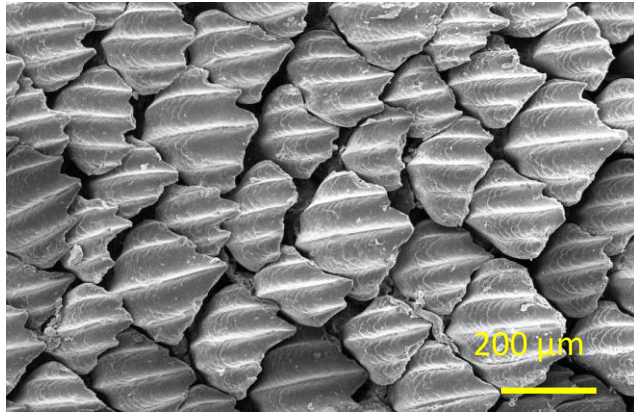
Superfici biomimetetiche

- Superfici artificiali la cui morfologia, struttura e/o funzionalità è ispirata a quella di una superficie naturale



pianta della Salvinia
proprietà di superidrofobicità

Applicazione: rivestimenti
autopulenti



pelle di squalo
riduzione dell'attrito

Applicazione: riduzione della
resistenza fluidodinamica

Superfici antibatteriche

- Ali di libellule e cicale: superfici caratterizzate da **proprietà antibatteriche**, associate alla presenza di **nanopilastr**i ad alto rapporto d'aspetto
- Nanopilastri: esercitano forze meccaniche sulla membrana batterica, provocandone stiramento e deformazione → ciò può portare a lesioni della membrana e alla **morte cellulare**
- Proprietà antibatteriche → influenzate dalla combinazione di:
 - altezza (200-310 nm): deformazione della membrana
 - diametro (50-220 nm): concentrazione dello stress
 - spaziatura (170-250 nm): interazione del batterio con più nanopilastri

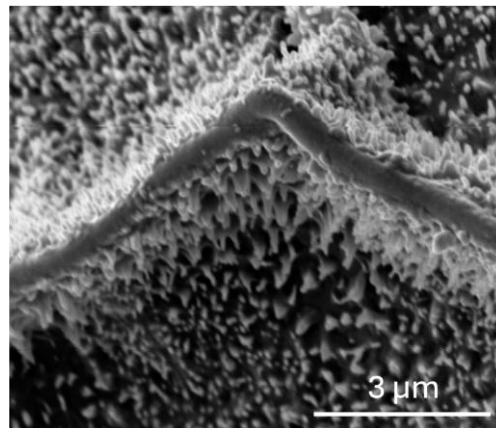


Immagine SEM di un'ala di libellula

Scopo: ottenere proprietà antibatteriche derivanti esclusivamente dalla geometria della superficie, anziché dal materiale, senza ricorrere all'impiego di agenti chimici o antibiotici

Superfici realizzate mediante TPP

Piastre (50 μm di lato) con nanopilastri in **IP-Dip** in modalità **solida** → pilastri completamente riempiti di resina polimerizzata

Dimensioni pilastri (a base quadrata):

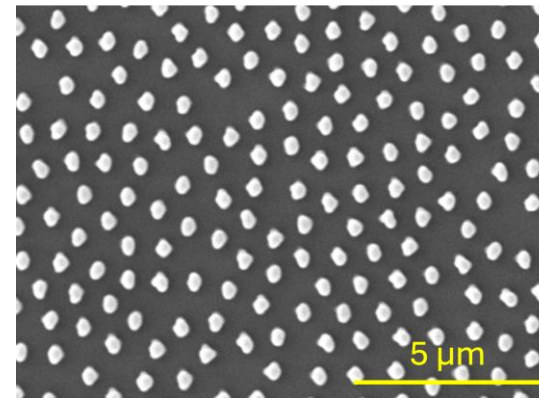
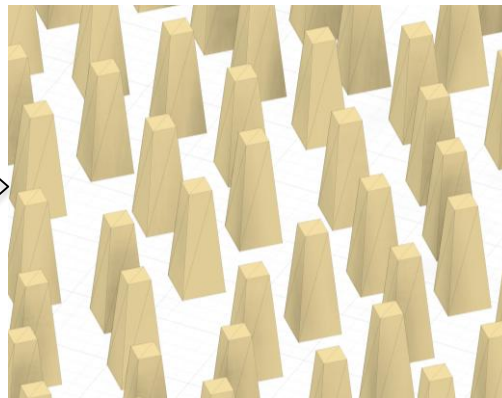
- altezza: 1000 nm
- angolo di sforno: 5°
- spacing: randomizzato nell'intervallo 750-850 nm
- lato di base superiore: 200 nm



Scelta delle dimensioni:

- valori ricavati dalla letteratura per la realizzazione di superfici antibatteriche biomimetiche
- geometria progettata ottimizzata per essere il più possibile simile a quella effettivamente realizzata

Geometria
progettata
(Autodesk Fusion)



Sweep parameters: variazione sistematica di due parametri di stampa lungo gli assi x e y per valutarne l'influenza sulla qualità del risultato

Superfici realizzate mediante TPP

Piastre (50 μm di lato) con nanopilastri in **IP-Dip** in modalità **swift** →
+ **sweep parameters**

struttura parzialmente
polimerizzata: l'interno rimane costituito
da resina non polimerizzata, con tempi di
stampa ridotti rispetto alla modalità
solida

Dimensioni pilastri (a base quadrata):

- altezza: 1000 nm
- angolo di sformo: 5°
- spacing: randomizzato
nell'intervallo 750-850 nm
- lato di base superiore: 200 nm,
150 nm, 100 nm, 50 nm

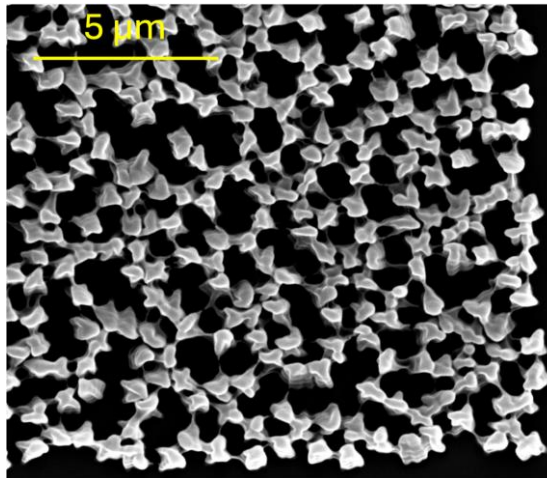


Immagine SEM dei nanopilastri
(vista dall'alto)

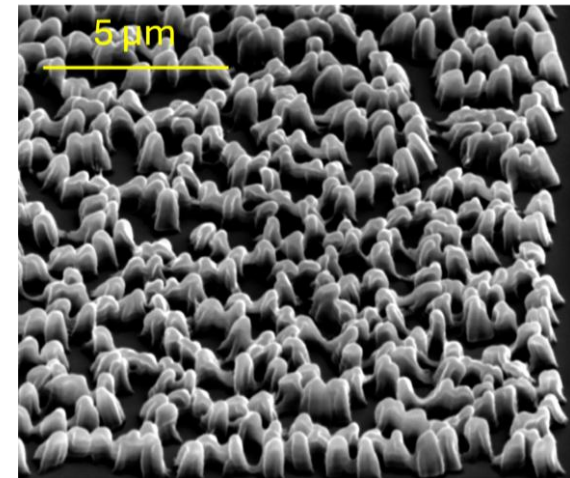


Immagine SEM dei nanopilastri
(inclinazione di 45°)

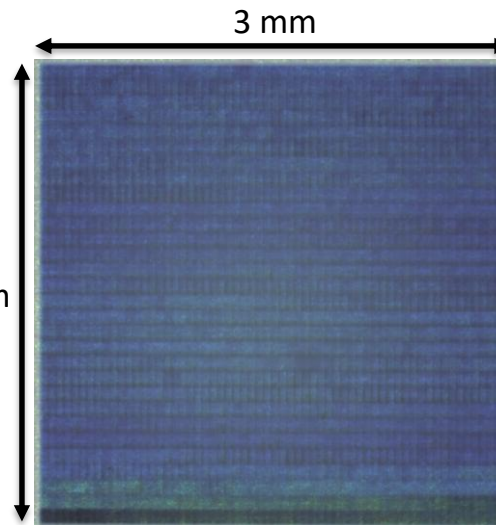
Superfici realizzate mediante TPP

- Valutazione delle proprietà antibatteriche (live/dead assay): costruzione di una piastra di **3x3 mm²** con nanopilastri in **IP-Dip** in modalità **swift**

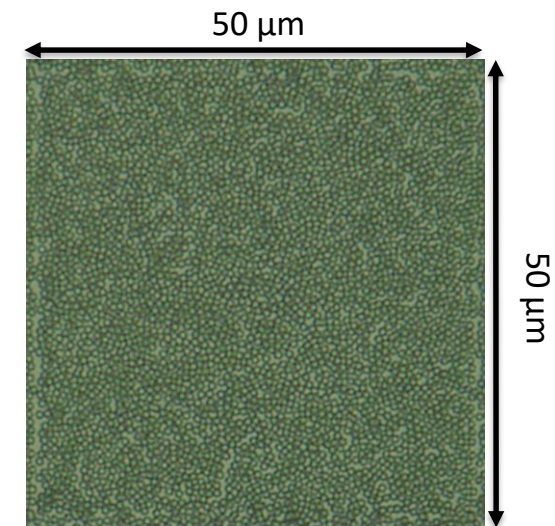
Tempo di stampa: 54 ore

Dimensioni pilastri (a base quadrata):

- altezza: 1000 nm
- angolo di sforno: 5°
- spacing: randomizzato nell'intervallo 3 mm
800-1000 nm
- lato di base superiore: 200 nm



Microscopia ottica digitale



Microscopia ottica digitale (ingrandimento)