

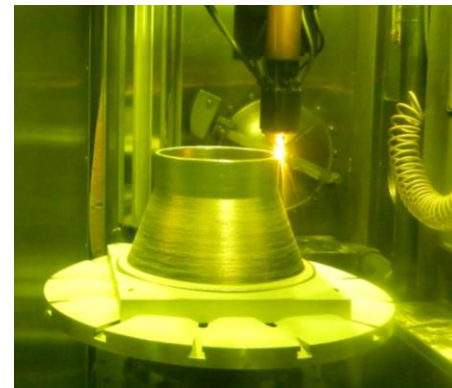
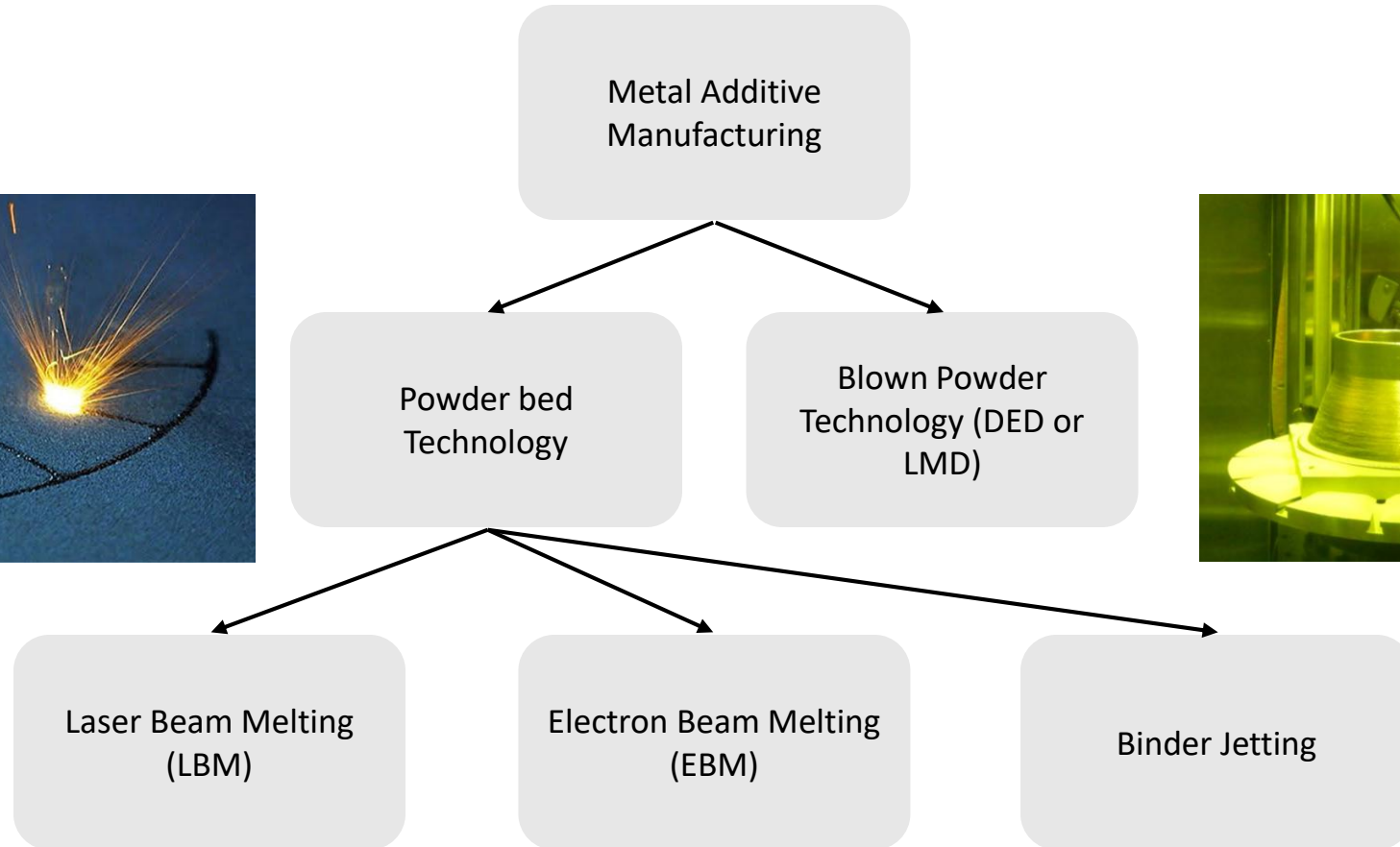
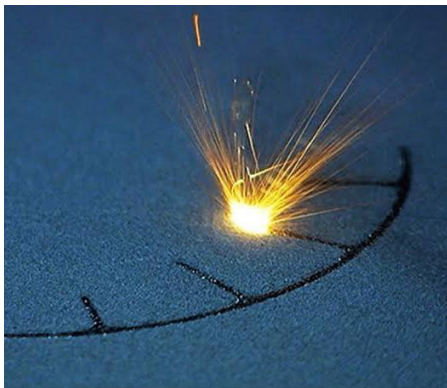
Metal Additive Manufacturing (M-AM)



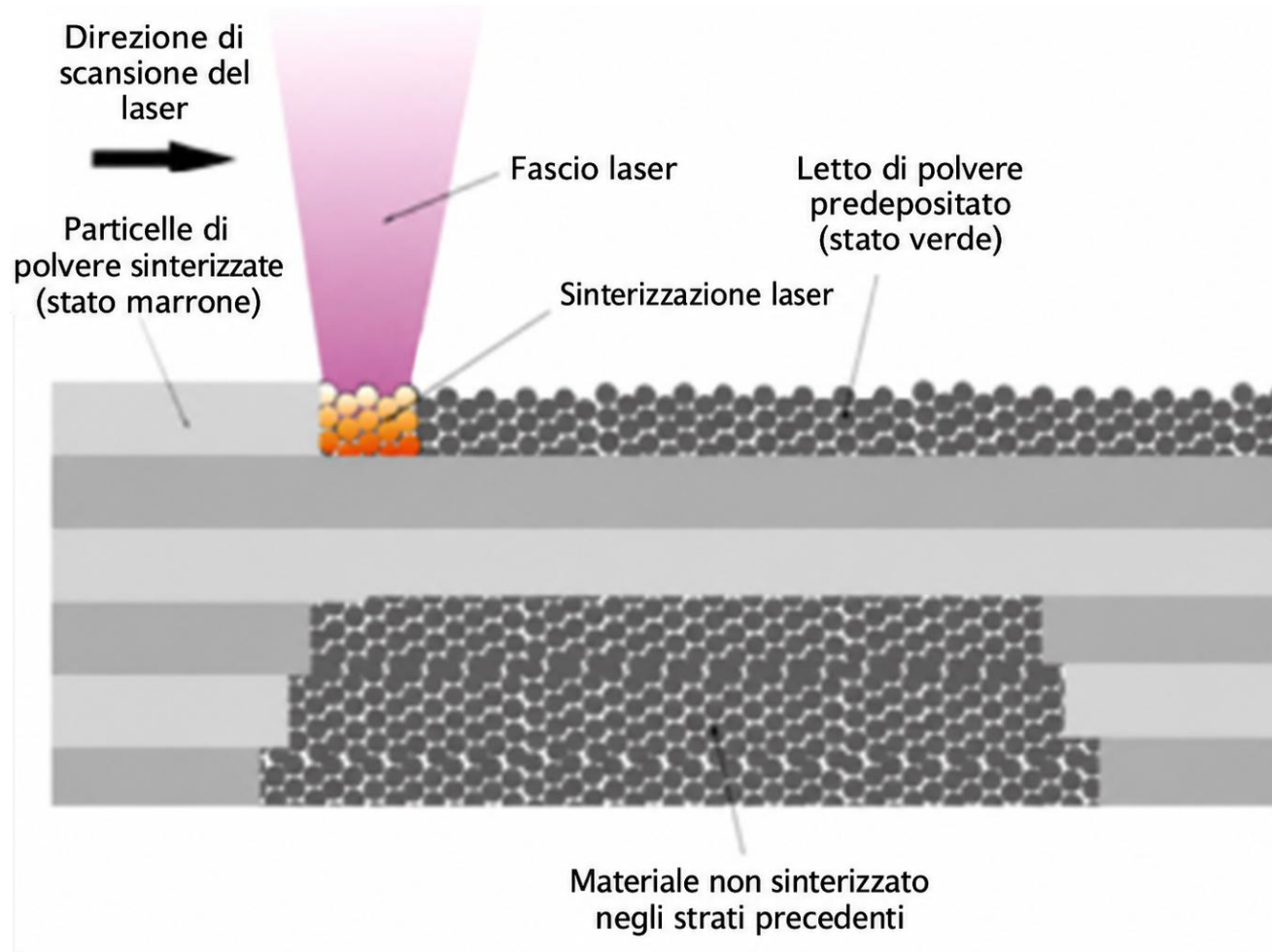
<https://app.wooclap.com/PFFSNBP?from=instruction-slide>



Classificazione dei processi M-AM



Il ruolo della polvere nel processi M-AM



Polveri metalliche per M-AM

La qualità delle polveri influenza:

- l'uniformità della deposizione e del consolidamento tra strati successivi;
- la riproducibilità tra diverse macchine di manifattura additiva;
- la produzione di componenti privi di difetti e con superfici di alta qualità.

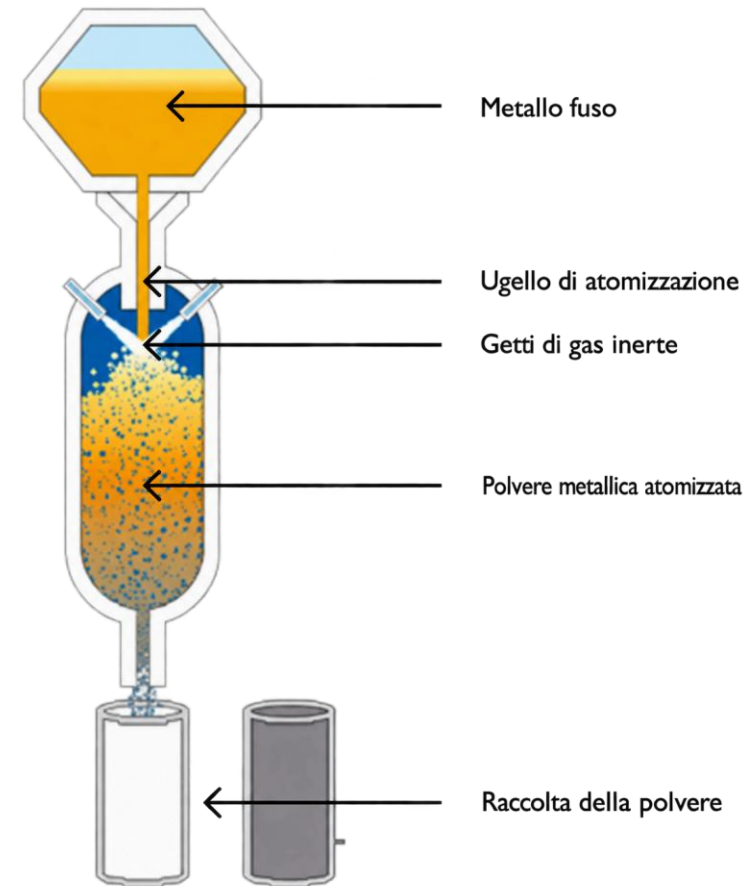
Le polveri delle seguenti leghe metalliche sono disponibili in commercio:

- Acciai, come gli acciai inossidabili (316L) e gli acciai indurenti per precipitazione;
- Superleghe a base di nichel (Inconel 718) e a base di cobalto (CoCr F75);
- Leghe di titanio (Ti6Al4V) e leghe di alluminio (AlSi10Mg)



Polveri metalliche per M-AM

- ➔ Caratteristiche delle polveri: le particelle hanno una forma prevalentemente sferica, favorevole alla scorrevolezza e alla distribuzione uniforme degli strati.
- ➔ Le dimensioni dipendono dai parametri di atomizzazione e dalle proprietà del metallo fuso.
- ➔ Preparazione per l'AM: le polveri vengono setacciate o classificate per selezionare l'intervallo granulometrico richiesto dal processo.
- ➔ Criticità: possono formarsi porosità interne dovute al gas intrappolato e satelliti, cioè piccole particelle aderenti a quelle più grandi, che peggiorano la scorrevolezza. Inoltre, solo una parte della polvere prodotta rientra nell'intervallo dimensionale desiderato.



Schematizzazione del processo di atomizzazione a gas.

Polveri metalliche per M-AM

Esempi di quotazioni commerciali di materiali per la manifattura additiva.

Descrizione Prodotto	Q.tà	Prezzo per unità	Prezzo per riga
Nitinol Alloy Spherical Powder Composition: Ni 55.8 wt%, Ti bal.Size: 10 - 45 um	5 kg	€ 1.015,00/kg	€ 5.075,00
Spesa di spedizione e consegna (piano strada)			comprese
SUBTOTALE			euro 5.075,50
Iva al 22%			euro 1.116,50
TOTALE			Euro 6.191,50

Quotazione polveri di Nitinol risalente all'anno 2024.

Codice Prodotto	Descrizione Prodotto	Quantità	Prezzo per kg	Totale riga
Ti6Al4V_10-45 µm	polvere di Ti6Al4V con granulometria 10-45 µm	20 kg	Euro 400,00/cad.	Euro 8.000,00
spedizione assicurata				Ns carico
I.V.A. 22%				Euro 1.760,00
TOTALE				Euro 9.760,00

Quotazione polveri di Ti6Al4V risalente all'anno 2025.



Polveri metalliche per M-AM

Esempio di scheda tecnica di una polvere per manifattura additiva, con le principali caratteristiche della polvere sottolineate.

Lieferzustand: Condition of Delivery:		Particle spherical, Argon atomized					
Lieferschein delivery note LS 80005963	Charge Cast Nr. 0158/5	Anzahl Quantity 2,00 kg	Korngröße - CILAS 990L Grain size - CILAS 990 L	ATTACHED NO.:	15488 (15481)		
				D10	12,70 µm		
				D50	28,12 µm		
				D90	45,60 µm		
Produktionsdatum: Date of Production:		11/2021					
Chemische Zusammensetzung (Schmelzanalyse) Chem. Composition							
Charge Lot Nr. 0158/5							
		Ti	Ni	C	O	N	H
		%	%	%	%	%	%
Istwert/ actual val.		bal.	55,5	0,003	0,04	0,004	0,0005
Bemerkung: Remarks:							
Es wird bestätigt, dass die Lieferung den Vereinbarungen bei der Bestellung entspricht. We hereby certify that the material described above has been tested and complies with the terms of the order.							

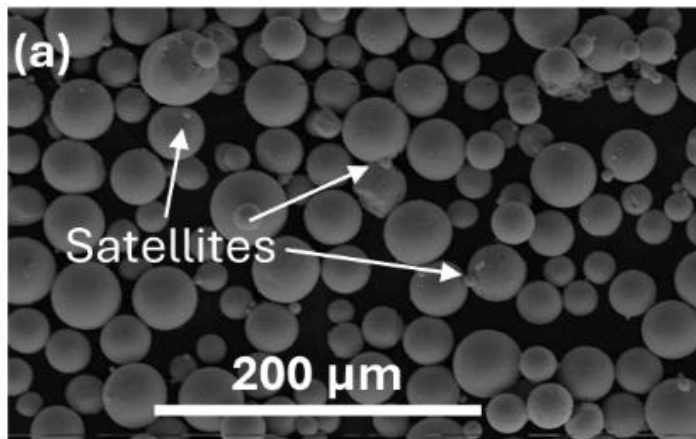
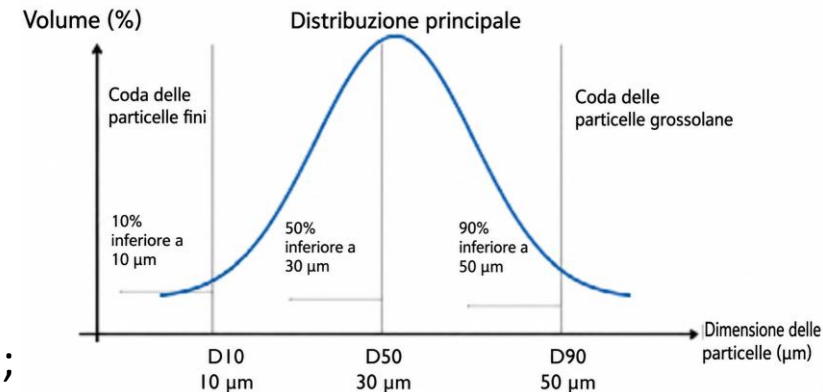


Polveri metalliche per M-AM

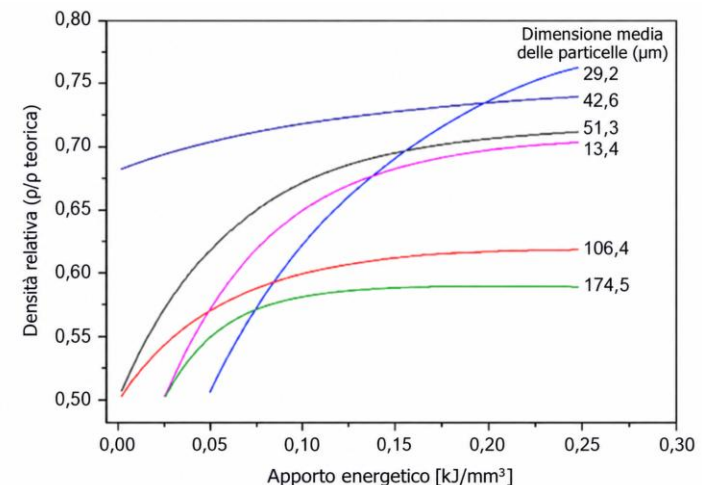
Le caratteristiche principali delle polveri sono:

- composizione chimica;
- distribuzione dimensionale delle particelle (PSD);
- morfologia → è raccomandata una forma sferica;
- proprietà fisiche (conservazione e invecchiamento);
- riutilizzabilità dopo la produzione additiva (AM), problematiche relative a salute, sicurezza e ambiente

Powder Size Distribution



(b)

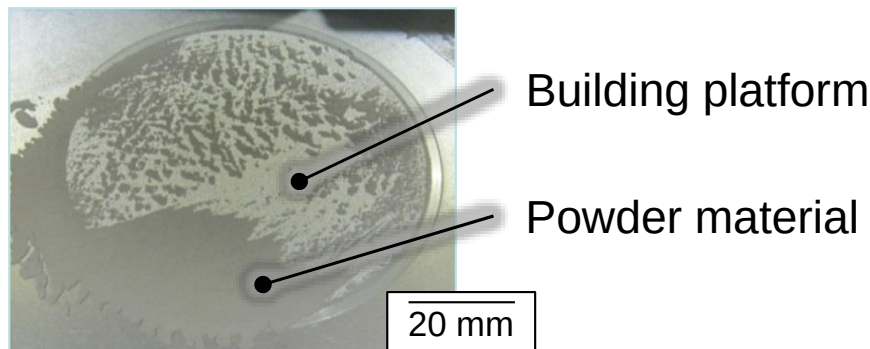


(a) Immagine SEM di polveri per M-AM; (b) Densità relativa del componente in funzione dell'apporto energetico per polveri con diversa dimensione media delle particelle.

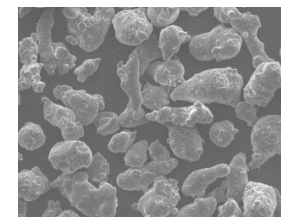
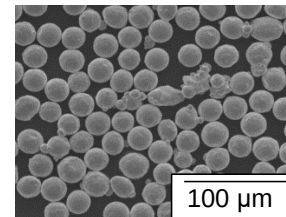
Polveri metalliche per M-AM

- **Morfologia e granulometria** influenzano la scorrevolezza e l'impaccamento della polvere.
- La **densità relativa** aumenta con l'energia fornita, con un andamento dipendente dalla dimensione delle particelle.
- Granulometria e parametri energetici devono essere **ottimizzati** congiuntamente per favorire il consolidamento e ridurre la porosità.

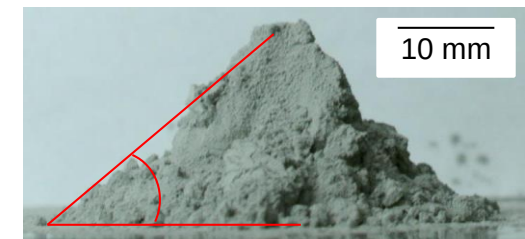
Strato di polvere disomogeneo



Immagini SEM delle polveri metalliche



Angolo di riposo



Polveri metalliche per M-AM

Gestione delle polveri metalliche

- Lo stoccaggio deve essere fatto in un ambiente adeguato per prevenire problemi di invecchiamento o ossidazione
 - Le polveri devono essere ben compattate nel cilindro di alimentazione
 - Le polveri non fuse devono essere setacciate prima di essere riusate in altre stampe per rimuovere agglomerati o impurità
-
- Gli operatori devono indossare i DPI per proteggere le vie respiratorie e la pelle
 - Il macchinario deve trovarsi in uno spazio dedicato e correttamente ventilato



Materiali per AM

Molti metalli - **ma non tutti** – sono adatti all’additive. Le leghe più impiegate in questo processo sono le seguenti:

Famiglia di materiali	Leghe tipiche	Applicazioni principali
Leghe di titanio	Ti6Al4V (grado 5 e 23), CP-Ti, leghe Beta, gradi biomedicali, ecc.	Aerospaziale, biomedicale
Leghe di alluminio	AlSi10Mg, AlSi7Mg, Scalmalloy, CP1, MMC (A20X, ELEMENTUM 3D), ecc.	Strutture leggere, automotive, aerospaziale
Acciai	316L, 17-4PH, acciai maraging, acciai per utensili, ecc.	Componenti meccanici, attrezzature, energia
Superleghe a base di nichel	IN625, IN718, Hastelloy X, ecc.	Aerospaziale, turbine, applicazioni ad alta temperatura
Leghe Co-Cr	CoCrMo	Biomedicale, dentale, applicazioni ad alta temperatura
Leghe di rame	Cu, CuCrZr, CuNiSi, GRCo	Scambiatori di calore, gestione termica, elettronica
Altre leghe	Metalli refrattari, leghe preziose, materiali funzionali, ecc.	...



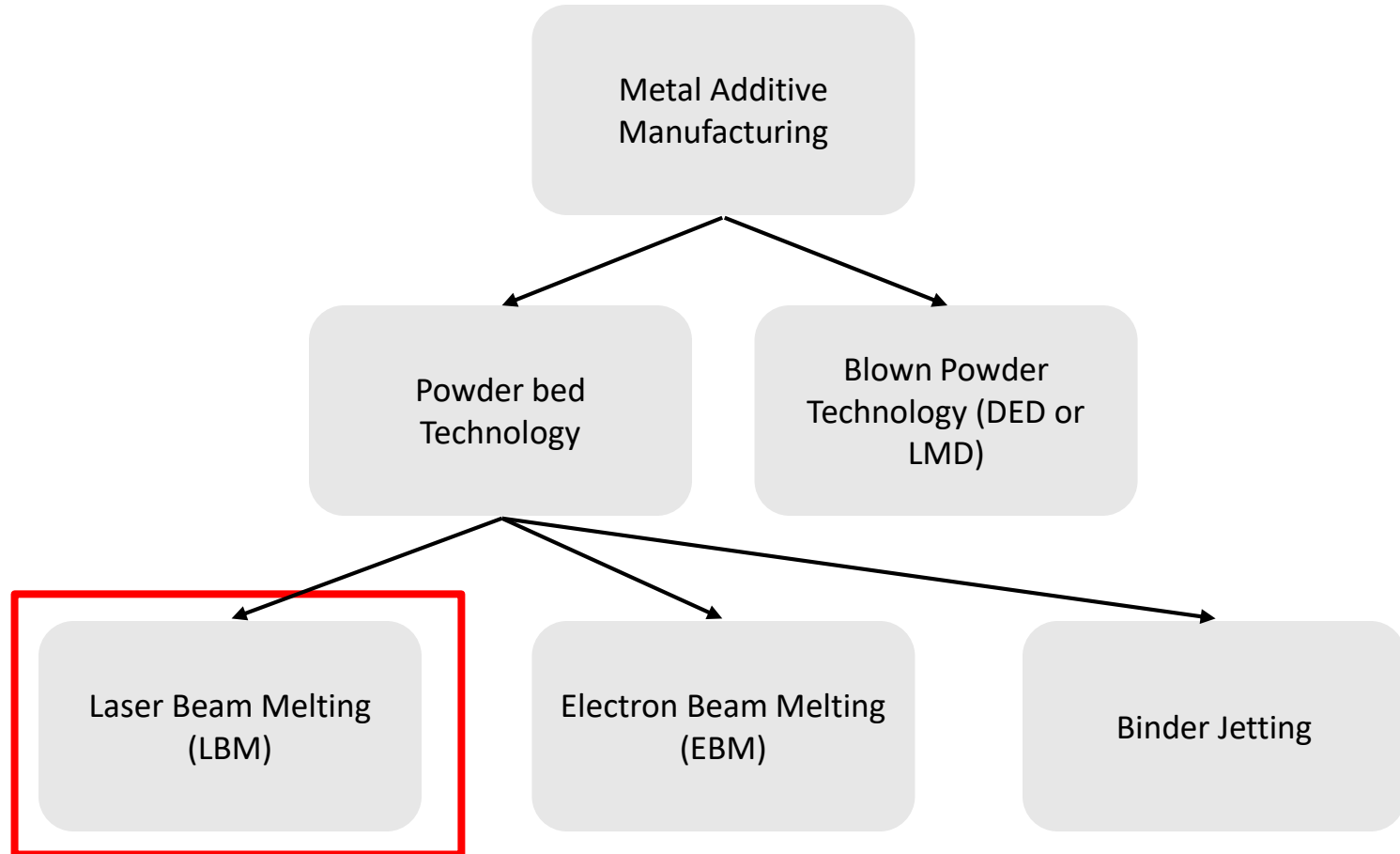
Materiali per AM

I principali fattori che limitano la stampabilità sono:

- Composizione: generalmente il materiale deve essere saldabile e colabile
- Riflettanza: nel caso di processi con laser materiali con alta riflettanza (basso assorbimento) sono difficili da processare
- Conduttività termica: una alta conduttività rende instabile la pozza fusa, conduttività termica troppo bassa genera hotspot
- Affinità per i costituenti dell'atmosfera: materiali altamente reattivi come magnesio o alluminio possono essere molto pericolosi da processare e maneggiare
- Stress residui: alcuni materiali sono pronti a criccare durante quando sottoposti a forti gradienti termici

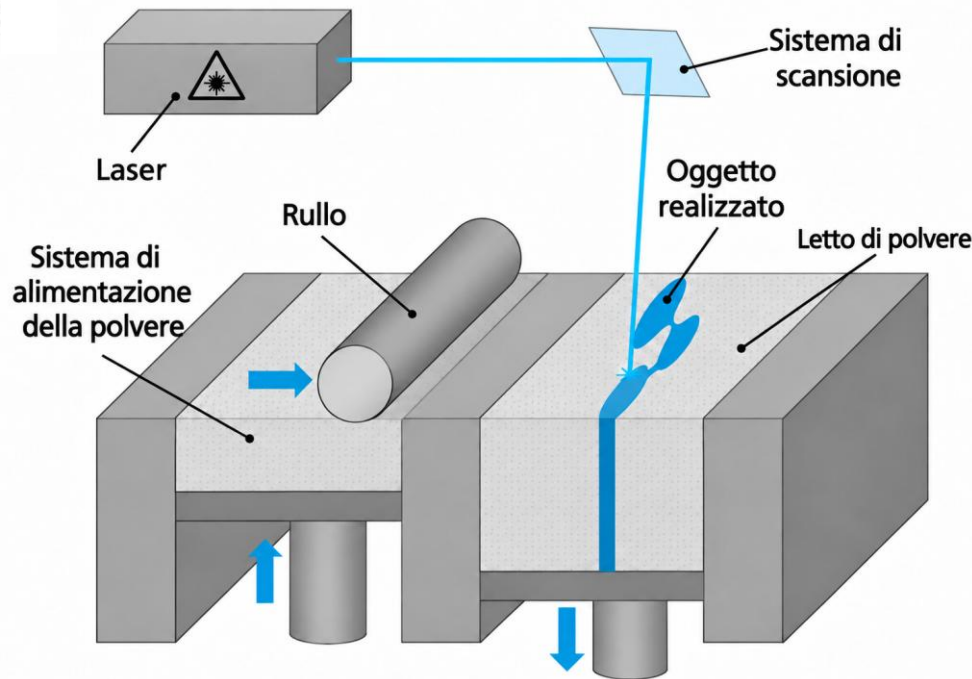


Fusione laser a letto di polvere metallica (PBF-LB/M)



Fusione laser a letto di polvere metallica (PBF-LB/M)

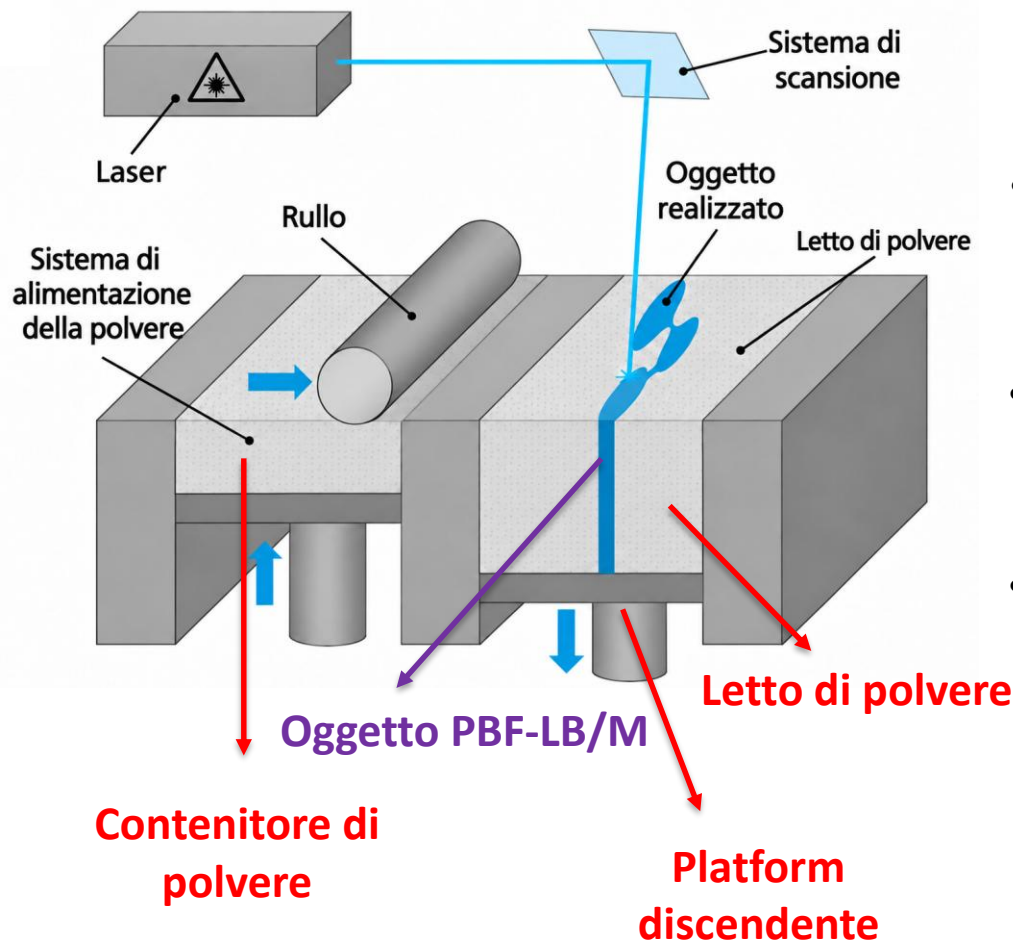
- Denominazioni alternative sono fusione laser selettiva (Selective Laser Melting, SLM) e sinterizzazione laser diretta dei metalli (Direct Metal Laser Sintering, DMLS).



Schema di funzionamento della fusione laser a letto di polvere.

- La PBF-LB/M utilizza un laser per fondere selettivamente la polvere metallica, formando le sezioni trasversali del componente.
- Dopo la realizzazione di ciascuna sezione trasversale, viene depositato un nuovo strato di polvere sopra quello precedente.
- La polvere non fusa funge da supporto durante la costruzione dell'oggetto.

Fusione laser a letto di polvere metallica (PBF-LB/M)



- Il processo viene eseguito in atmosfera inerte.
- Il rullo viene utilizzato per stendere uno strato di polvere.
- La piattaforma di costruzione si abbassa ad ogni strato.
- La piattaforma del serbatoio di alimentazione, contenente la polvere metallica, si solleva a ogni strato.

<https://www.youtube.com/watch?v=te9OaSZ0kf8>



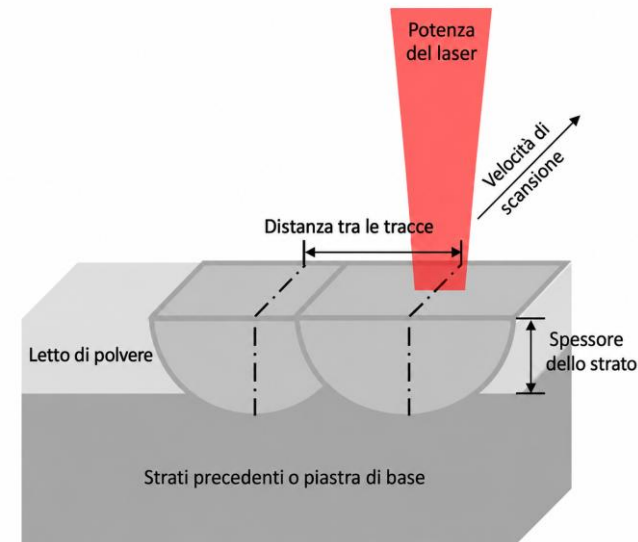
UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Additive Manufacturing: tecnologie, progettazione e applicazioni

Prof. R. Bertolini

PBF-LB/M: parametri di processo

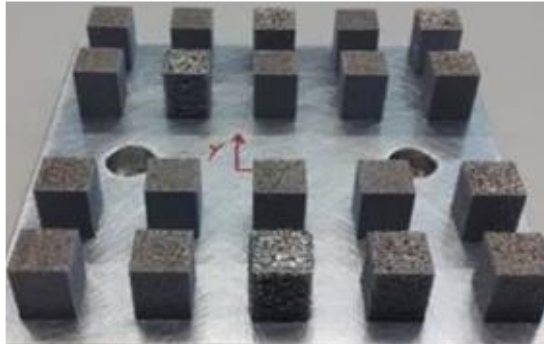
- Principali parametri di processo:
 - Potenza del laser (P) [W];
 - Velocità di scansione (S) [mm/s];
 - Distanza tra le tracce di scansione (h) [mm];
 - Spessore dello strato (t) [mm];
- Questi parametri devono essere ottimizzati per ciascun materiale, poiché influenzano le proprietà meccaniche, la microstruttura, la densità e la qualità del componente realizzato.
- Questa densità di energia rappresenta l'energia media fornita dal laser per unità di volume di materiale durante la scansione di un singolo strato.



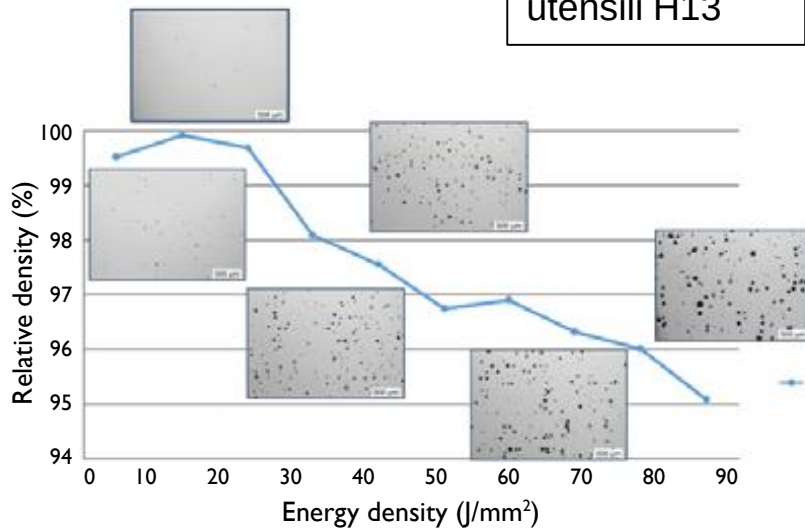
$$E = \frac{P}{S * h * t}$$

Densità di energia volumetrica
[J/mm³]:

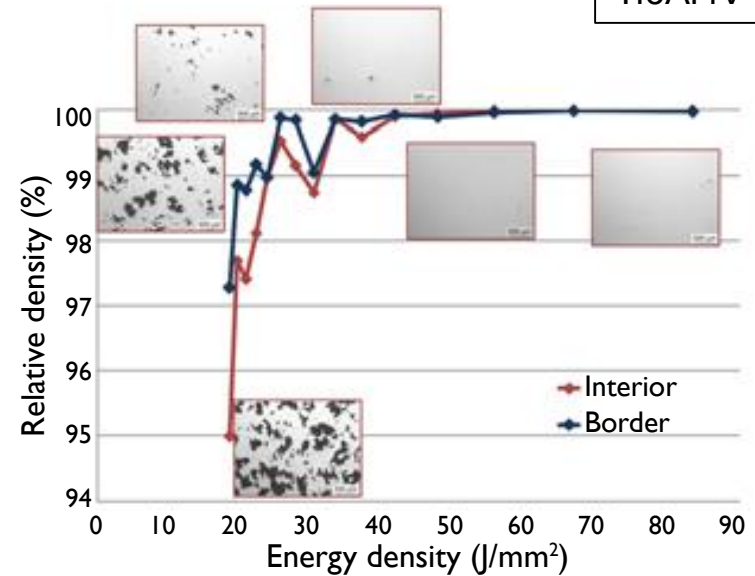
PBF-LB/M: parametri di processo



Acciaio per
utensili H13



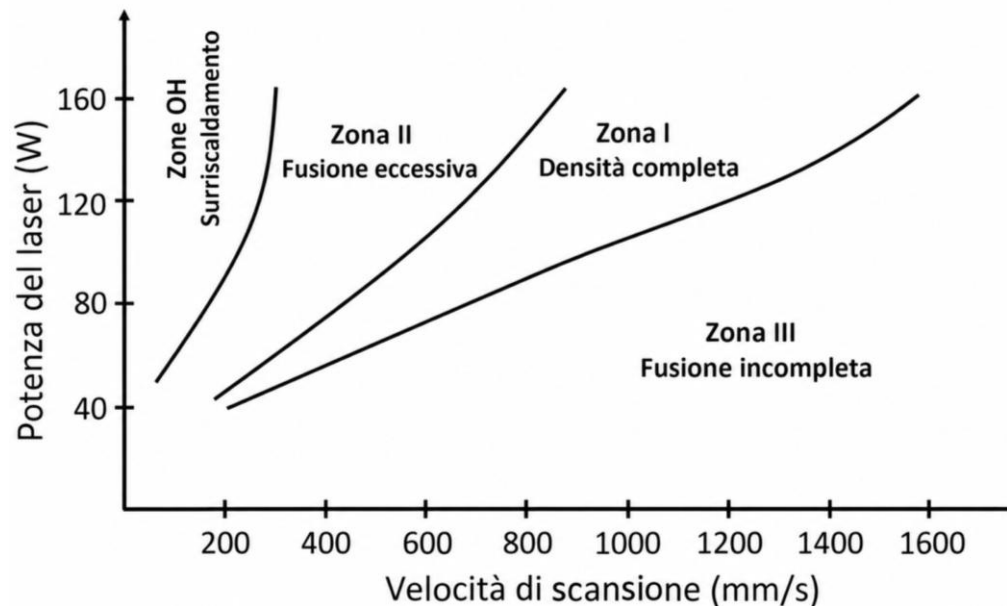
Ti6Al4V



Densità relativa in funzione della densità di energia per l'acciaio per utensili H13 (sinistra) e la lega Ti6Al4V (destra).

PBF-LB/M: parametri di processo

- Nella zona I, denominata «zona a piena densità», il campione è pressoché privo di porosità.
- Nelle zone II e III, denominate rispettivamente «zona di fusione eccessiva» e «zona di fusione incompleta», il campione presenta una porosità misurabile.
- La porosità nella zona II è causata da un apporto energetico eccessivo, mentre nella zona III deriva da un apporto energetico insufficiente.
- Infine, a velocità di scansione molto basse e potenze laser elevate si raggiunge la «zona di surriscaldamento».

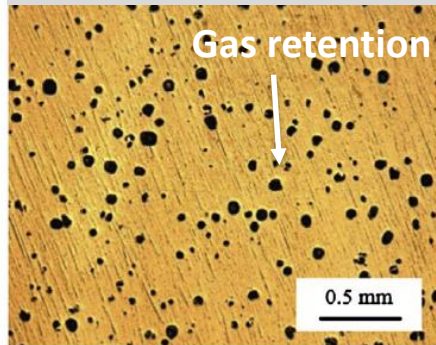


*Finestra di processo
per campioni in Ti-
6Al-4V prodotti
mediante PBF-LB/M.*

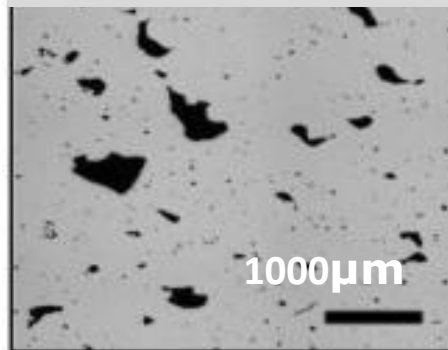
PBF-LB/M: difettologia

Porosity:

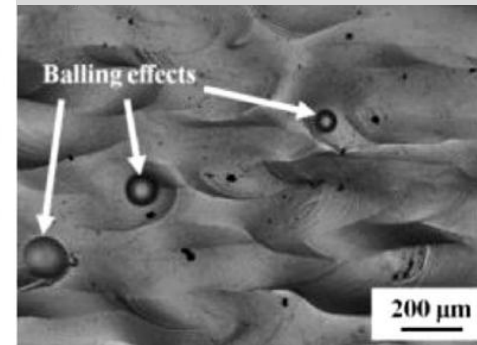
Key-hole



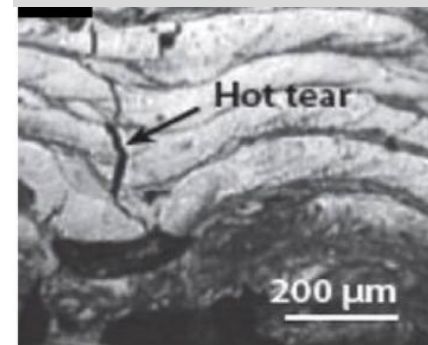
Lack Of Fusion (LOF)



Balling



Hot tear



Instabilità e
collasso della
cavità di vapore

Fusione o
sovrapposizione
insufficienti

Instabilità
capillare e scarsa
bagnabilità

Deformazioni di
trazione durante le
ultime fasi della
solidificazione.



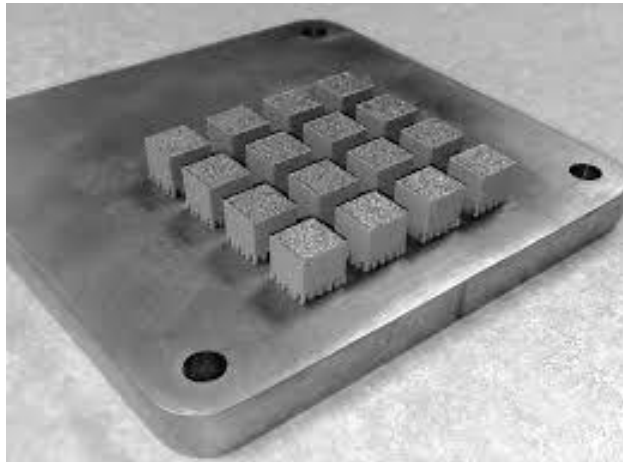
UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Additive Manufacturing: tecnologie, progettazione e applicazioni

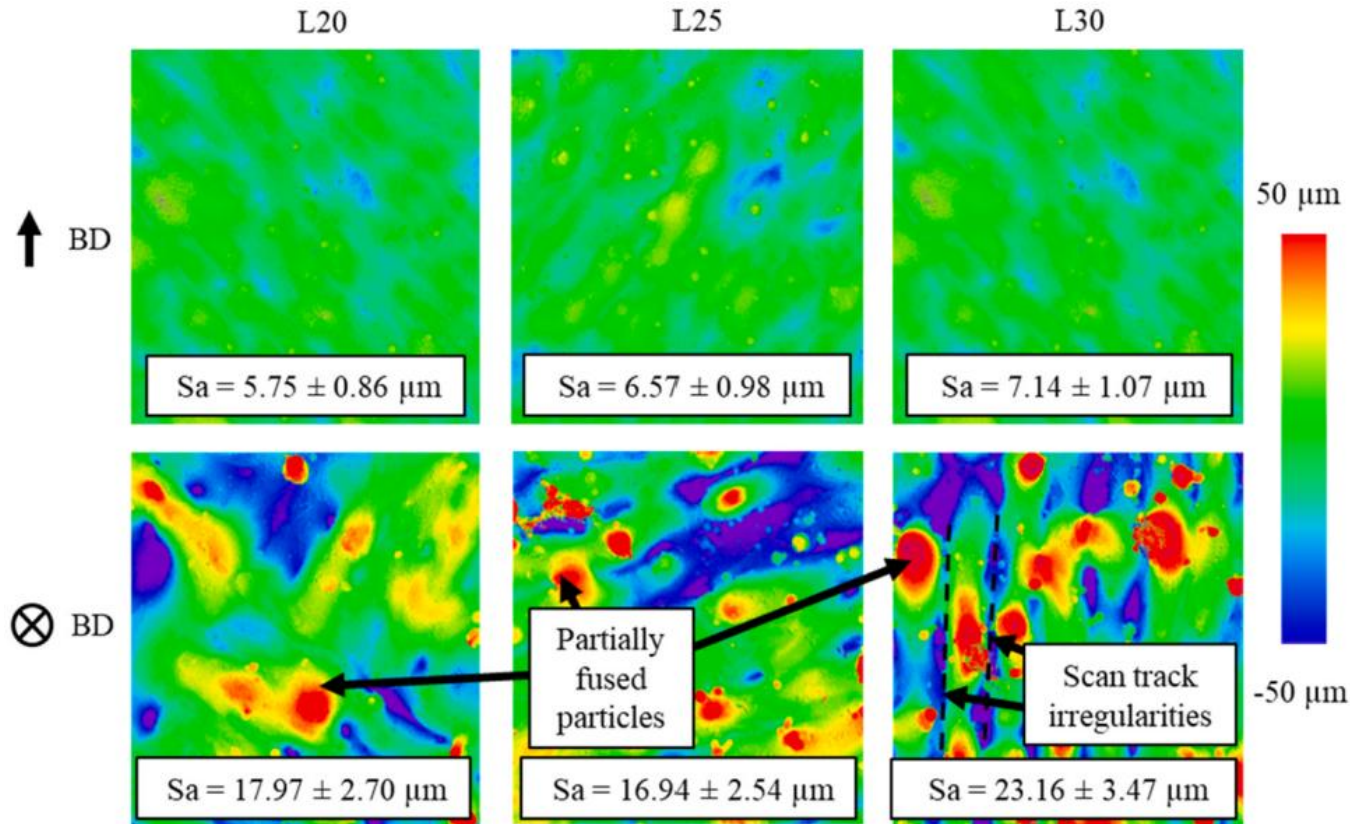
Prof. R. Bertolini

PBF-LB/M: finitura superficiale

- I componenti prodotti mediante manifattura additiva presentano generalmente una finitura superficiale scadente e richiedono quindi operazioni di finitura successive;
- È possibile ridurre la rugosità superficiale ottimizzando i parametri di processo nelle zone in corrispondenza della superficie;
- La rugosità superficiale dipende da numerosi fattori, tra cui la dimensione delle particelle di polvere, la presenza di supporti, l'inclinazione della superficie e la velocità di scansione.



PBF-LB/M: finitura superficiale

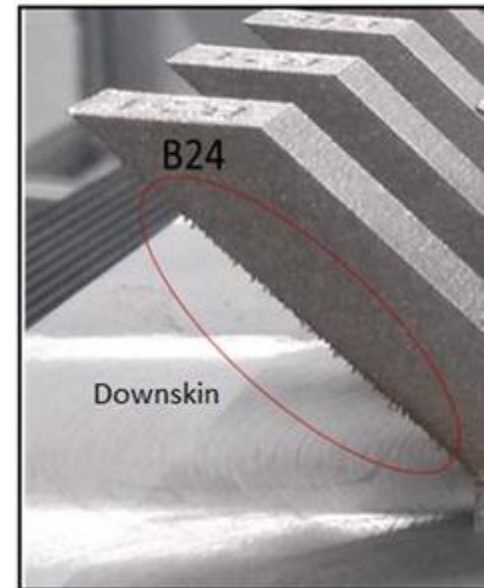
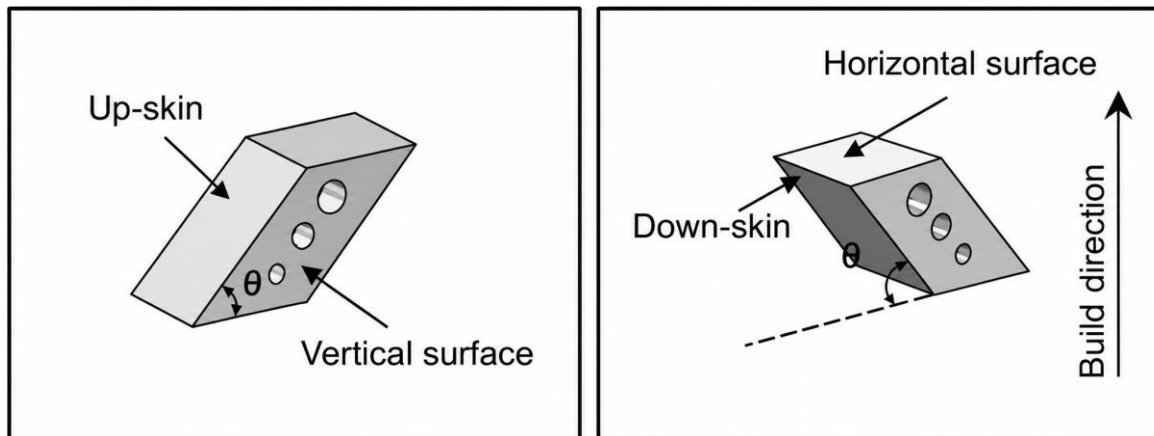


Topografia superficiale dei campioni in AlSi7Mg prodotti mediante LPBF e sottoposti a trattamento termico, per diversi spessori dello strato, lungo la direzione di costruzione (BD) e perpendicolarmente a essa.

Ghinatti, E., et al. (2026). Effect of layer thickness on the microstructure and machinability of AlSi7Mg processed by laser powder bed fusion. *CIRP J Sci Manuf Technol*, 64, 137-148.

PBF-LB/M: finitura superficiale

- Le superfici rivolte verso l'alto (up-skin) e verso il basso (down-skin) sono critiche.
- Nelle superfici down-skin, l'area scansionata è sostenuta dal letto di polvere anziché dal metallo solidificato degli strati precedenti: ciò comporta una minore dissipazione del calore e impone un angolo minimo di inclinazione ammissibile rispetto al piano di costruzione.



PBF-LB/M: finitura superficiale

Achievable roughness average Rz in μm

0,04	0,06	0,10	0,16	0,25	0,40	0,63	1,0	1,6	2,5	4,0	6,3	10	16	25	40	63	100	160	250
------	------	------	------	------	------	------	-----	-----	-----	-----	-----	----	----	----	----	----	-----	-----	-----

Turning																			
Milling																			
Polishing																			
SLM - as built																			
SLM - after shot - peening																			
SLM - after polishing																			

	Average Range
	Less Frequent Range

PBF-LB/M: strategia di scansione

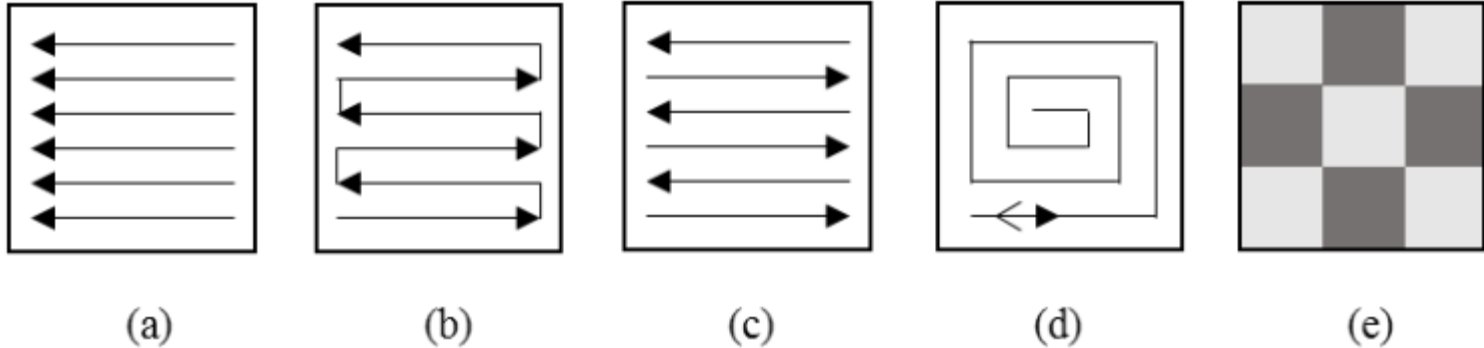
Strategia di scansione:

- La strategia di scansione definisce il percorso seguito dal laser durante la scansione di uno strato e stabilisce se la direzione di scansione cambia o rimane costante negli strati successivi.
- Questo parametro è molto importante nel processo SLM, poiché influenza significativamente la storia termica del materiale e, di conseguenza, la densità, le tensioni termiche e residue, il consolidamento, le caratteristiche del bagno fuso, la microstruttura e le deformazioni del componente.
- Sono disponibili numerose strategie di scansione.
- La rotazione di 67° è particolarmente utilizzata perché contribuisce a ridurre la direzionalità delle tensioni residue.

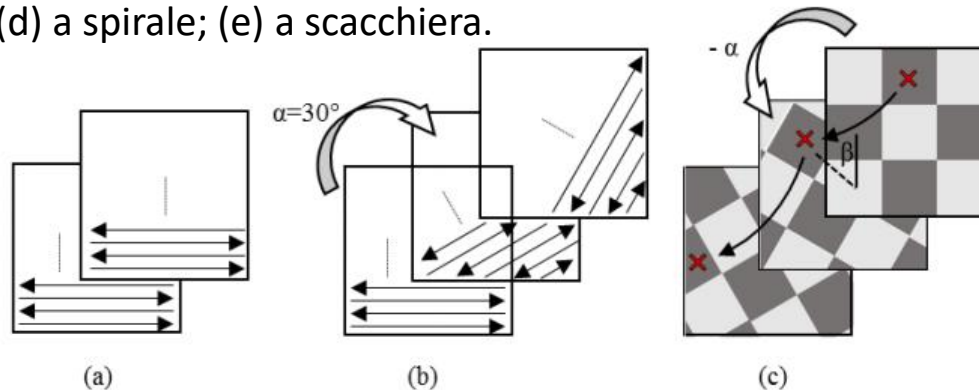


PBF-LB/M: strategia di scansione

- Strategia di scansione



Esempi di strategie di scansione: (a) unidirezionale; (b) bidirezionale con percorso continuo; (c) bidirezionale; (d) a spirale; (e) a scacchiera.



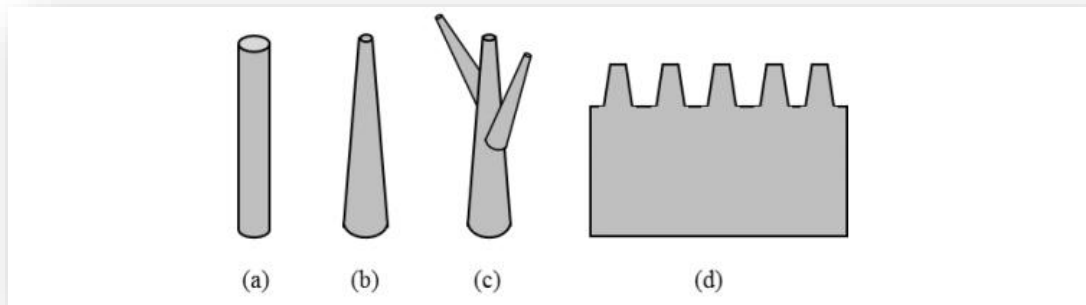
Strategie di scansione tra strati successivi: (a) ripetizione dello stesso percorso; (b) rotazione della direzione di scansione; (c) rotazione della direzione di scansione e spostamento del punto di partenza del laser.

PBF-LB/M: supporti

I **supporti** sono strutture ausiliarie realizzate insieme al componente durante la manifattura additiva ma vengono generalmente rimossi al termine della costruzione.

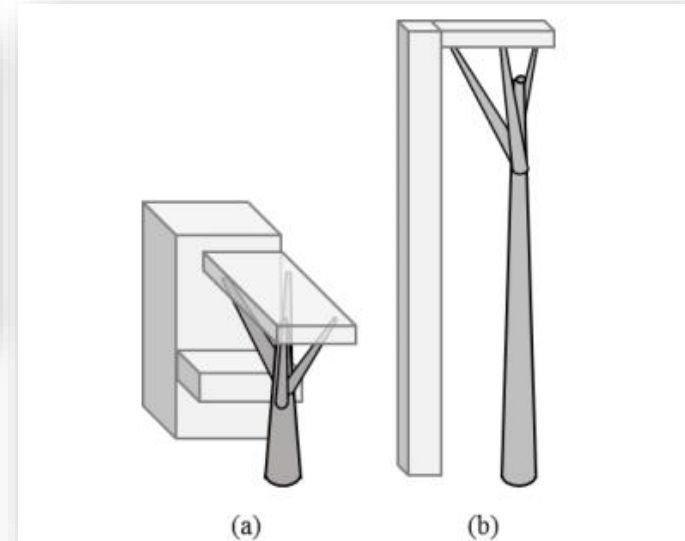
FUNZIONI PRINCIPALI:

- Garantire che il componente rimanga ancorato alla piastra di base durante il processo.
- Favorire un'adeguata dissipazione del calore, soprattutto nelle zone a sbalzo.



*Geometrie dei supporti utilizzati nel processo SLM:
(a) cilindrica, (b) conica, (c) ad albero e (d) a muro.*

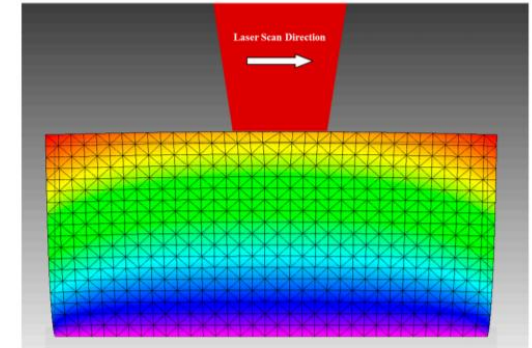
Per ciascuna di queste geometrie è possibile definire tutte le dimensioni, così da ottimizzare la conduzione del calore.



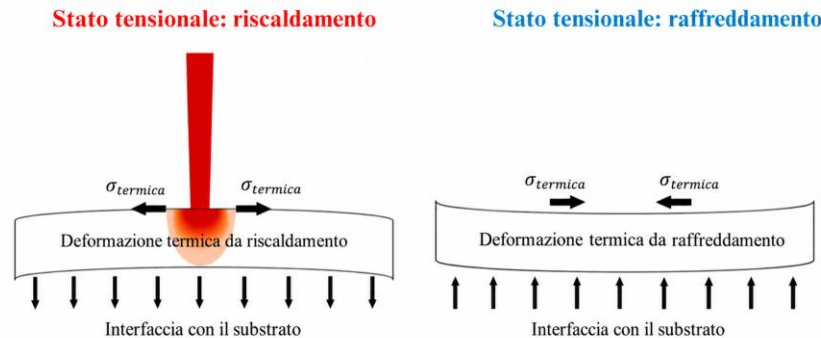
Principali utilizzi dei supporti ad albero.

PBF-LB/M: stress residui

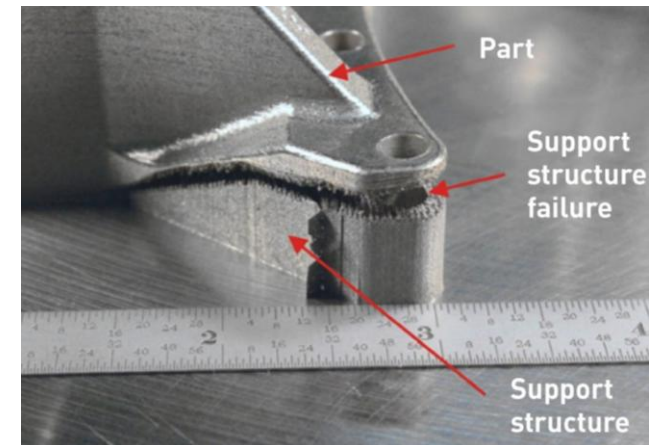
- Nel processo PBF-LB/M, le tensioni residue derivano dai rapidi e ripetuti cicli di riscaldamento e raffreddamento prodotti dal laser.
- Durante il riscaldamento, il materiale più freddo ostacola la dilatazione della zona calda ancora solida, generando tensioni di compressione.
- Durante il raffreddamento, gli strati sottostanti ne vincolano la contrazione, favorendo tensioni di trazione.
- Questi vincoli, insieme alle deformazioni plastiche accumulate, determinano la presenza di tensioni residue nel componente.



Tensioni tra gli strati (esempio di deformazione mediante analisi agli elementi finiti).



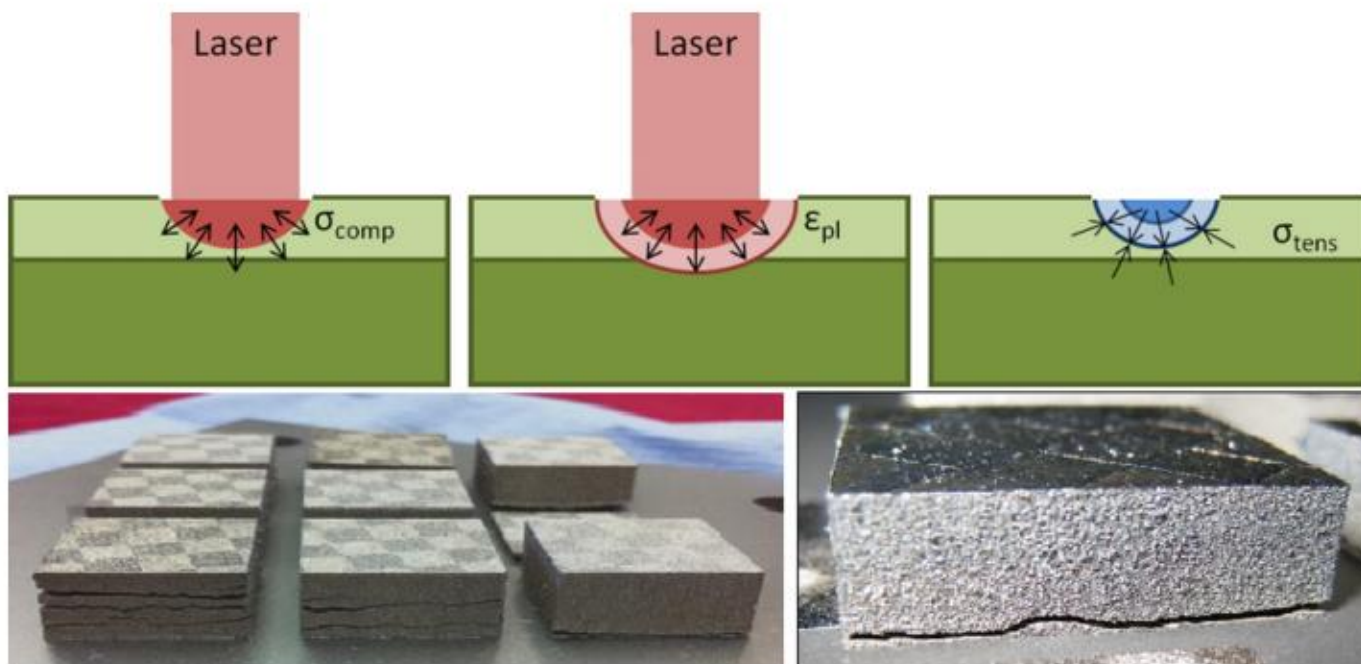
Gradienti di tensione nei singoli strati.



Distacco dal supporto a causa degli stress residui

PBF-LB/M: stress residui

- I componenti prodotti mediante PBF-LB/M presentano tensioni residue di trazione in superficie, che possono causare deformazioni o cricche.
- Possibili rimedi: preriscaldamento e ottimizzazione dei parametri di processo.



Meccanismo del gradiente di temperatura (in alto) che porta alla formazione di cricche/fessure e alla delaminazione (in basso).

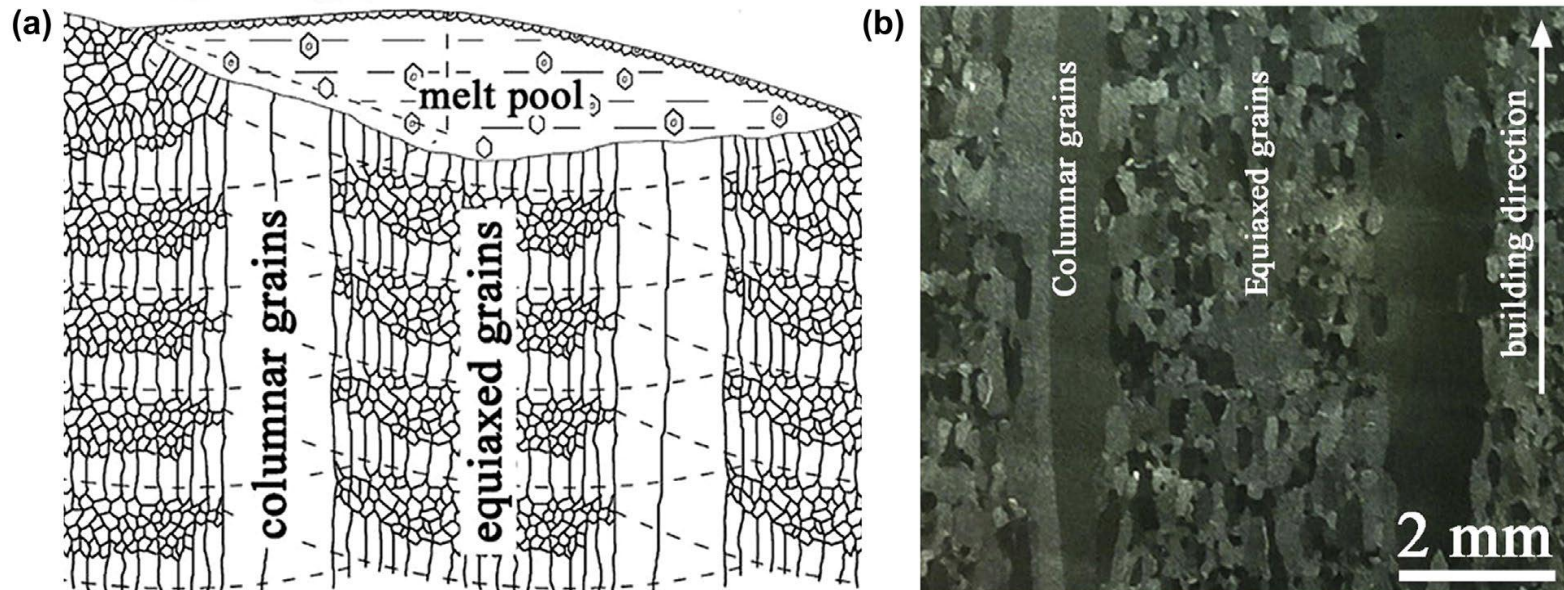
PBF-LB/M: microstruttura

- Il processo PBF-LB/M è caratterizzato da rapidi cicli termici e da elevate velocità di solidificazione e raffreddamento.
- La temperatura del bagno di fusione dipende dalla potenza del laser e dalle condizioni di processo. Un elevato rapporto tra gradiente termico e velocità di solidificazione (G/R) favorisce la crescita di grani colonnari; un rapporto più basso favorisce la formazione di grani equiassici, in presenza di condizioni favorevoli alla nucleazione.
- Nella lega Ti-6Al-4V, il liquido solidifica inizialmente in fase β . Il successivo rapido raffreddamento favorisce la trasformazione $\beta \rightarrow \alpha'$, con formazione di martensite. Raffreddamenti più lenti favoriscono invece una microstruttura $\alpha + \beta$.
- La microstruttura finale dipende anche dai successivi cicli di riscaldamento, che possono indurre la decomposizione della martensite.



PBF-LB/M: microstruttura

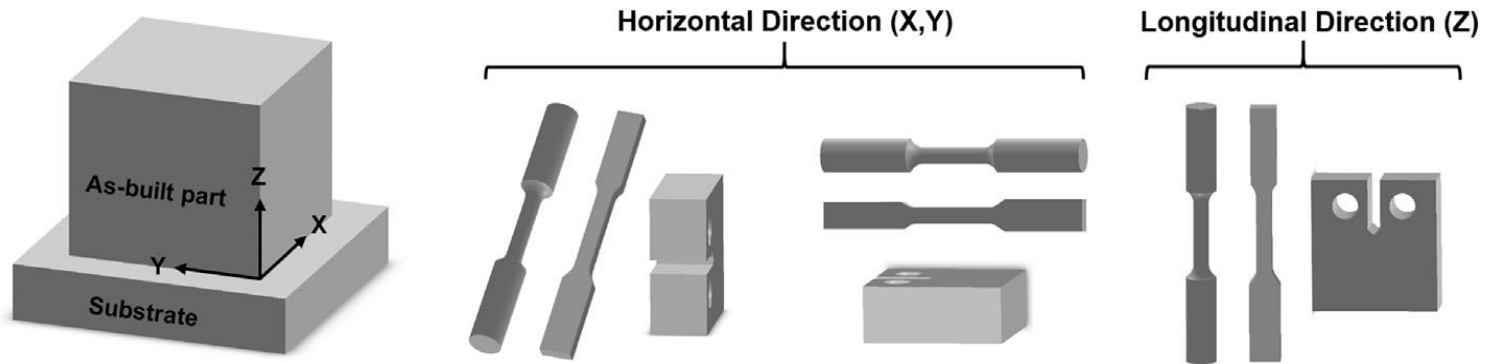
- È stato osservato che la direzione di crescita durante la solidificazione tende ad allinearsi con la direzione del massimo gradiente termico, che corrisponde alla direzione di costruzione nel processo PBF-LB/M.
- È necessario un trattamento termico!



Formazione, durante la fabbricazione additiva strato per strato, di una microstruttura a grani misti, analoga al cemento armato, costituita da grossi grani colonnari continui e fini grani equiassici. (a) Rappresentazione schematica; (b) micrografia ottica.

PBF-LB/M: anisotropia

- I componenti prodotti mediante PBF-LB/M possono presentare anisotropia delle proprietà a trazione, che dipendono dall'orientamento rispetto alla direzione di costruzione.
- Le differenze di resistenza e duttilità tra provini paralleli e perpendicolari alla direzione di costruzione sono legate alla microstruttura, alla tessitura cristallografica e alla distribuzione e all'orientamento dei difetti.
- L'entità di tali differenze dipende dal materiale, dai parametri di processo e dagli eventuali trattamenti termici.



Rappresentazione della geometria del deposito e degli orientamenti di prelievo dei provini per le prove di trazione. Le direzioni X e Y giacciono nel piano orizzontale, mentre la direzione Z corrisponde alla direzione longitudinale, coincidente con quella di costruzione.

PBF-LB/M: anisotropy

Anisotropia microstrutturale

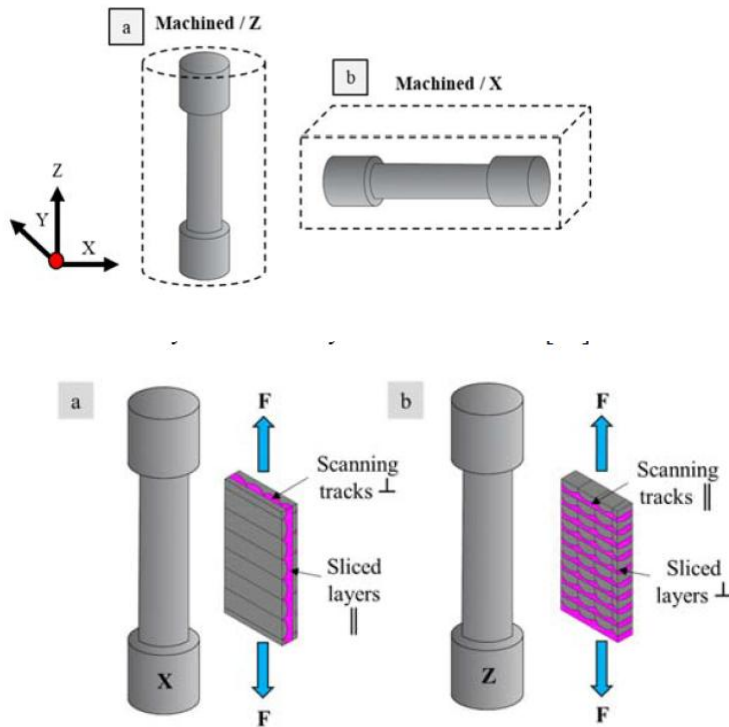


Fig. 7. Scheme of the interaction between the loading direction and orientation of the DED-induced microstructural features in the *machined / X* (a) and *machined / Z* (b) samples.

316L stainless steel

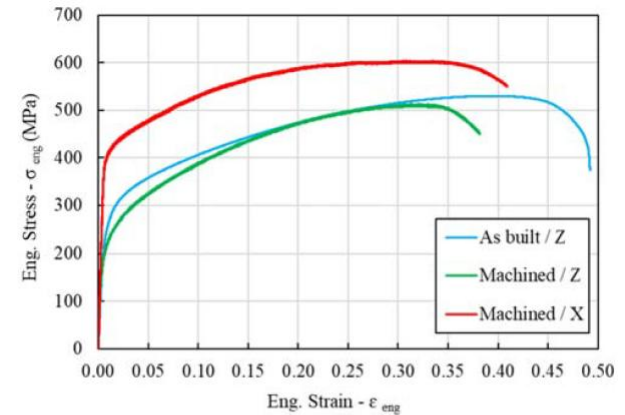


Fig. 5. Engineering stress-strain curves of the investigated samples.

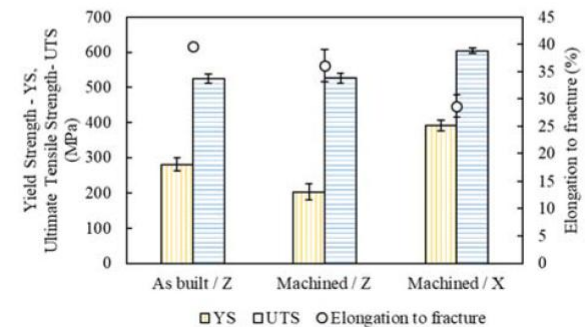


Fig. 6. Mechanical properties of the investigated samples.

Fonte: Bertolini et al. (2022). The effect of the building direction and surface finish on the mechanical properties of the direct energy deposited AISI 316L stainless steel. *Manufacturing Letters*, 33, 109-116.

Applicazioni PBF-LB/M

The Areion by Formula Group T: The World's First 3D Printed Race Car

<https://www.materialise.com/en/cases/areion-by-formula-group-t-worlds-first-3d-printed-race-car>



Like a Shark through Water



Critical component: nose tip of the car

Bloodhound supersonic car by Renishaw which will attempt to break the 1,000 mph



<https://www.renishaw.com/en/bloodhound-ssc-turns-to-renishaw-for-3d-printing-expertise--21224>

Aerospaziale

- -Supporti leggeri;
- Componenti di fusoliera di alta qualità;
- Prototipi funzionali (ad esempio, componenti di turbine)

Automobilistico

- Sospensione della ruota
- Albero
- Giunti

Biomedicale

- Protesi dentali
- Strumenti chirurgici
- Applicazioni ortopediche



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Additive Manufacturing: tecnologie, progettazione e applicazioni

Prof. R. Bertolini

Applicazioni PBF-LB/M

Aerospaziale

Ugelli del motore LEAP prodotti mediante PBF

Vantaggi:

- Consolidamento di circa 20 parti in un unico componente.
- Riduzione del peso del 25%.
- Durata cinque volte maggiore rispetto alla versione precedente.



LEAP engine

Ugello di iniezione del combustibile realizzato dalla NASA

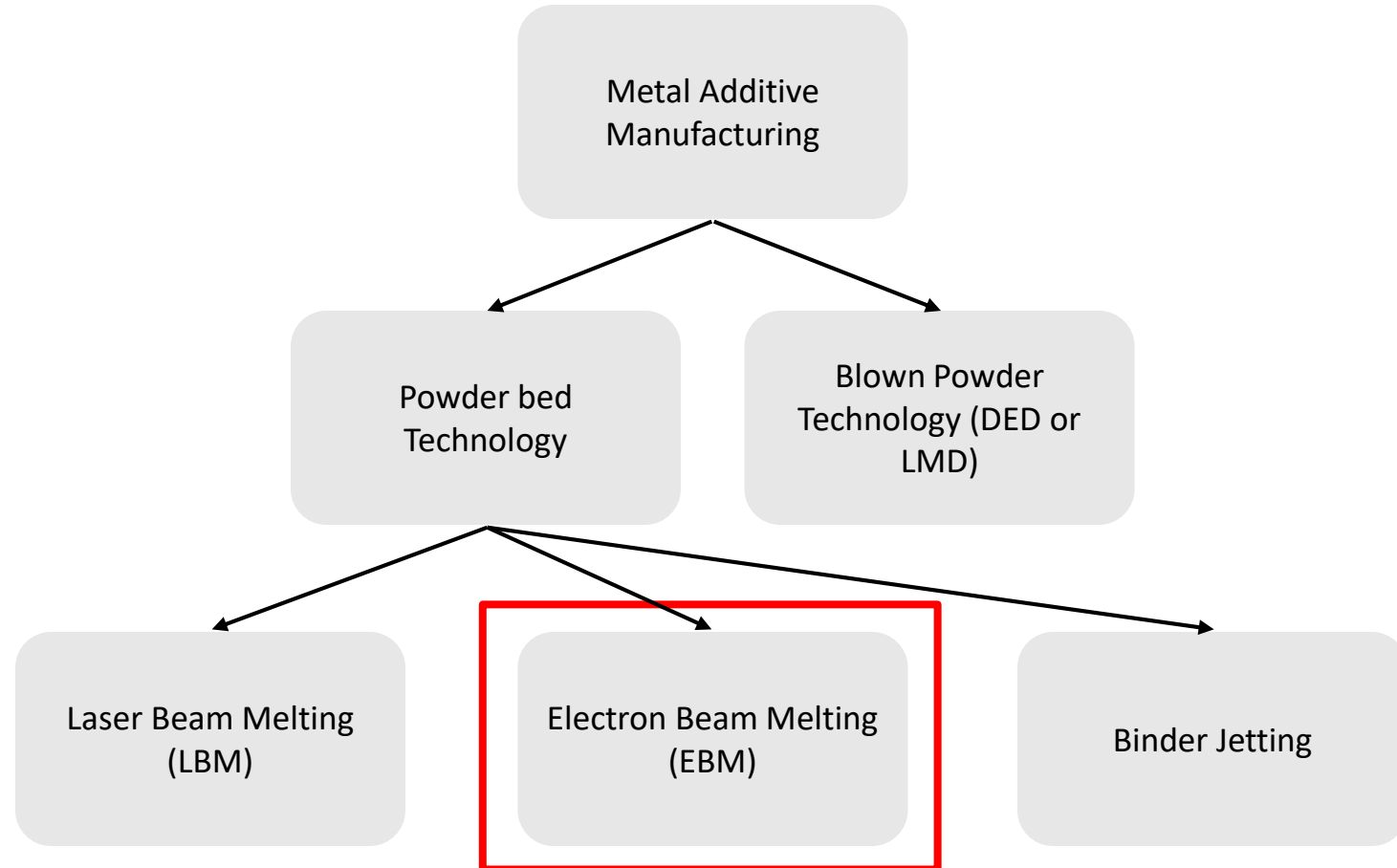
Vantaggi:

- Riduzione da 163 componenti a 2 parti;
- Drastica riduzione delle operazioni di giunzione e assemblaggio;
- Tempi di fabbricazione convenzionale di 6–9 mesi, rispetto a circa 10 giorni di costruzione additiva nel caso riportato.

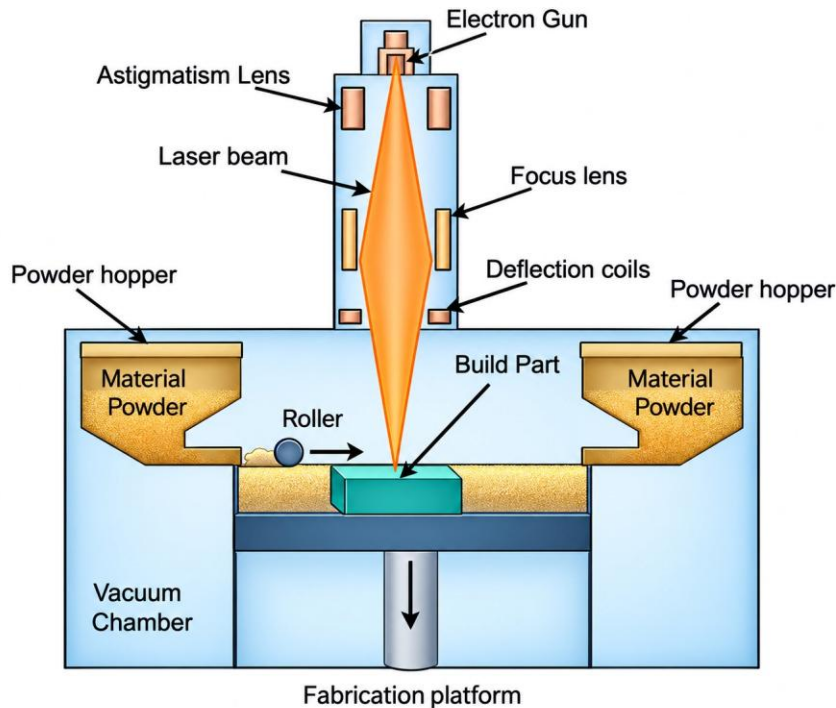


Fuel injector nozzle by NASA

Fusione mediante fascio di elettroni (PBF-EB/M)



Fusione mediante fascio di elettroni (PBF-EB/M)

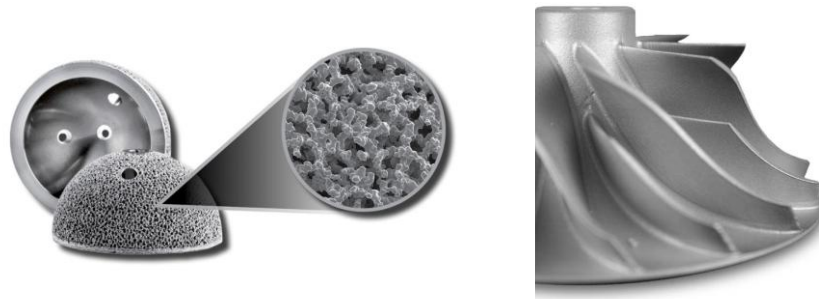


Schema del processo EBM.

- Un fascio di elettroni ad alta energia viene utilizzato per fondere la polvere.
- Il processo avviene **sotto vuoto** per eliminare le impurità e produrre componenti con maggiore resistenza meccanica.
- L'elevata temperatura di processo consente di ottenere componenti con buona stabilità dimensionale e basse tensioni residue.

Fusione mediante fascio di elettroni (PBF-EB/M)

- Le polveri devono essere preriscaldate prima della fusione mediante il fascio di elettroni, per ridurre la differenza di temperatura.
- La finitura superficiale ottenuta mediante EBM è peggiore rispetto a quella del processo LPBF, a causa delle maggiori dimensioni dello spot del fascio elettronico.
- Negli ultimi anni, questa tecnologia si è sviluppata soprattutto per la lavorazione delle leghe di titanio, che presentano diverse difficoltà con le tecniche tradizionali, dovute all'elevata temperatura di fusione e all'elevata reattività con alcuni elementi presenti nell'atmosfera.



- Pale di turbine
- Giranti di pompe
- Componenti di propulsori per applicazioni spaziali
- Impianti ortopedici



<https://www.youtube.com/watch?v=M1NhxcZQz1U>



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Additive Manufacturing: tecnologie, progettazione e applicazioni

Prof. R. Bertolini

PBF-EB/M vs PBF-LB/M

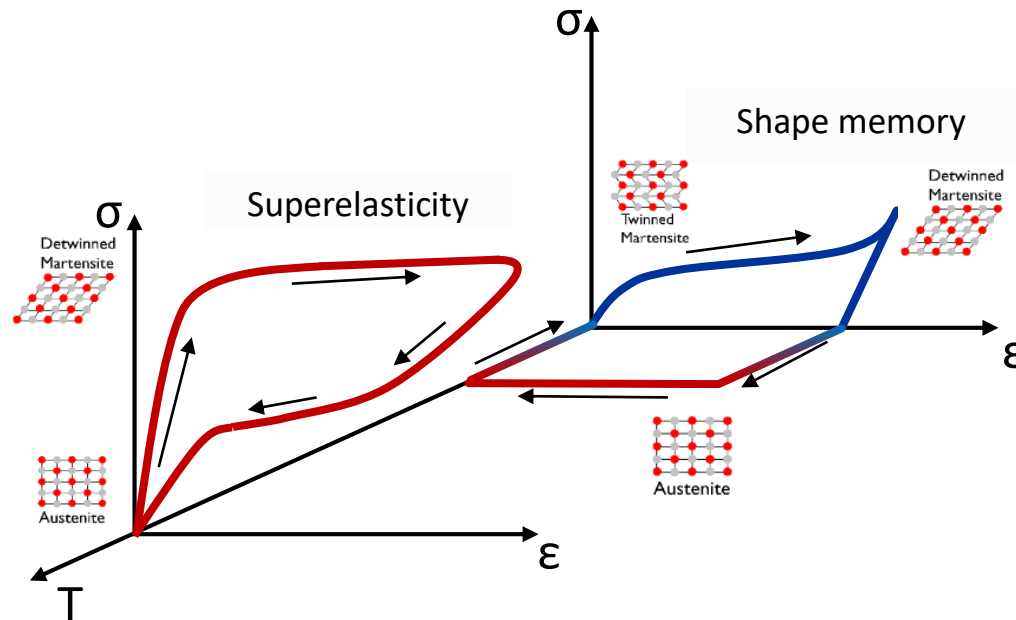
Parametro	PBF-LB/M	PBF-EB/M
Sorgente di energia	Uno o più laser a fibra da 200–1000 W	Fascio di elettroni da 3000 W
Atmosfera nella camera di costruzione	Argon o azoto	Vuoto con immissione controllata di elio
Metodo di preriscaldamento della polvere	Riscaldamento della piattaforma	Scansione di preriscaldamento
Temperatura di preriscaldamento (°C)	100–200	700–900
Dimensioni massime del volume di costruzione (mm)	500 × 350 × 300	350 × 380 (diametro × altezza)
Velocità massima di costruzione (cm ³ /h)	20–35	80
Spessore dello strato (μm)	20–100	50–200
Dimensione del bagno di fusione (mm)	0,1–0,5	0,2–1,2
Rugosità superficiale Ra	4–11	25–35
Tolleranza geometrica (mm)	±0,05–0,1	±0,2
Dimensione minima dei dettagli (μm)	40–200	100

Valori indicativi riferiti ai sistemi e alle condizioni riportati nella fonte; non rappresentano i limiti generali delle due tecnologie.



Case study: printing of Niti trabecular structures

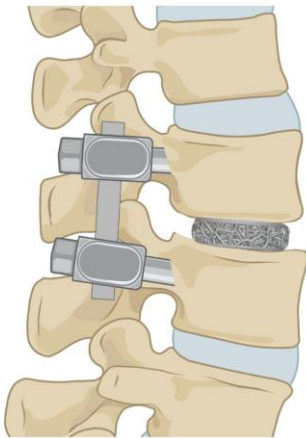
- Biocompatibile e resistente alla corrosione
- Superelastico -> allungamento reversibile fino a circa l'8%
- Modulo di Young relativamente basso (inferiore al Ti64) -> riduce lo stress shielding (effetto di schermo tensionale)
- Isteresi sforzo-deformazione simile a quella dell'osso



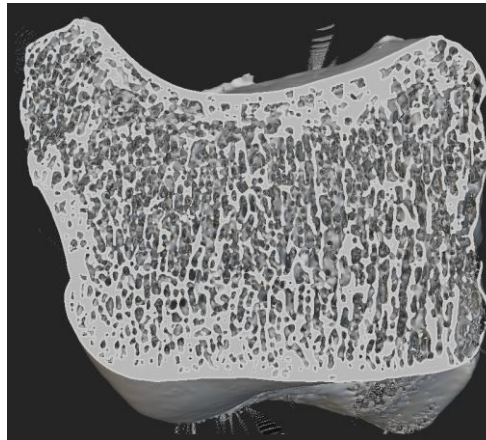
Case study: printing of Niti trabecular structures

Strutture trabecolari:

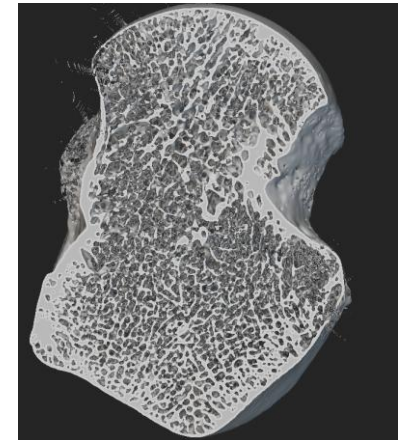
- riducono il modulo elastico dell'impianto
- consentono al nuovo tessuto osseo di crescere al loro interno -> osteointegrazione
- replicano meglio la morfologia nativa -> impianti con porosità controllata e variabile (FGM: materiali a gradiente funzionale)



gabbia intersomatica: dispositivo impiantato nello spazio intervertebrale durante la chirurgia di fusione spinale per ripristinare il corretto spazio discale e favorire la crescita ossea.



Modello segmentato dell'osso astragalo ottenuto da micro-TC: elaborazione digitale delle immagini mediche in cui la struttura ossea viene isolata dai tessuti circostanti per creare un modello 3D virtuale



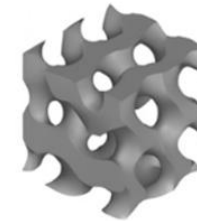
Case study: printing of Niti trabecular structures

- Periodico
- Gli sforzi si concentrano principalmente in corrispondenza delle giunzioni dei puntoni



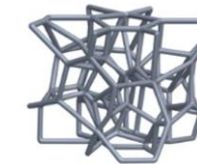
BCC

- Periodico
- Ampia superficie per l'adesione cellulare
- Distribuzione uniforme delle tensioni



Giroide

- Stocastico
- Può essere progettato ad hoc



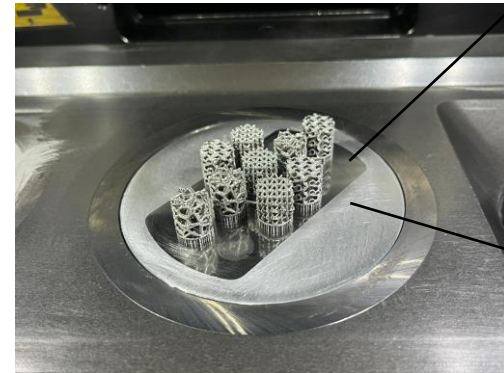
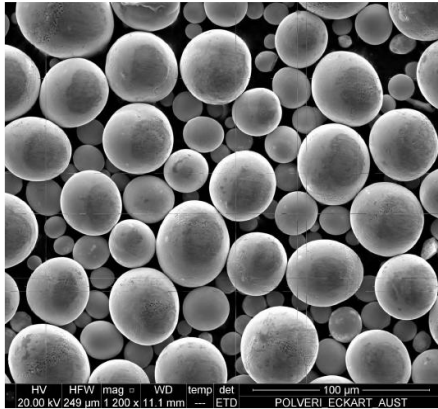
Voronoi

Porosità e tipo di struttura -> influenzano le proprietà meccaniche e osseointegrative degli scaffold:

- Il tessuto osseo si forma preferenzialmente negli angoli dei pori, specialmente dove gli elementi strutturali (strut) o le superfici si incontrano.
- La porosità può essere calibrata per soddisfare le esigenze meccaniche e fisiologiche del tessuto nativo.
- Il modulo elastico dipende dal tipo di struttura e dalla sua porosità.

Case study: printing of Niti trabecular structures

Polveri austenitiche: NiTi ($\text{Ni}_{50.8}\text{Ti}_{49.2}$ at%)



NiTi

aluminum

Sfide:

- La stampa di leghe ricche di nichel è più difficile: delaminazione e sollevamento degli angoli già nei primi strati.
- Tensioni residue indotte dal processo di stampa.
- Evaporazione del nichel.

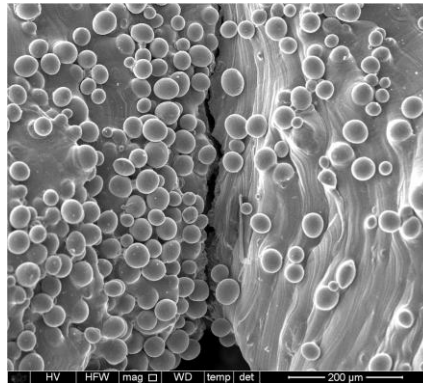
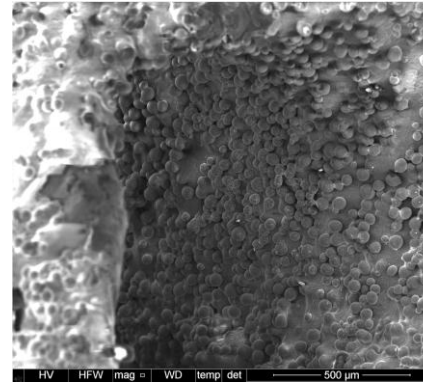
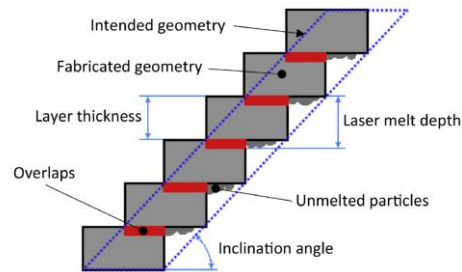


Trattamento termico:

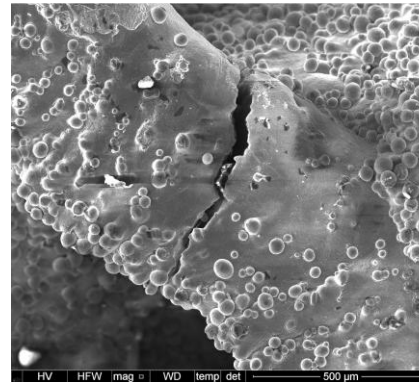
- Omogeneizza la microstruttura
- Distensione delle tensioni (o rilassamento delle tensioni)
- Forma nanoprecipitati per ottimizzare l'effetto superelastico

Case study: printing of Niti trabecular structures

Fractures/cracks



BCC C1 65%



Gyroid C4 65%

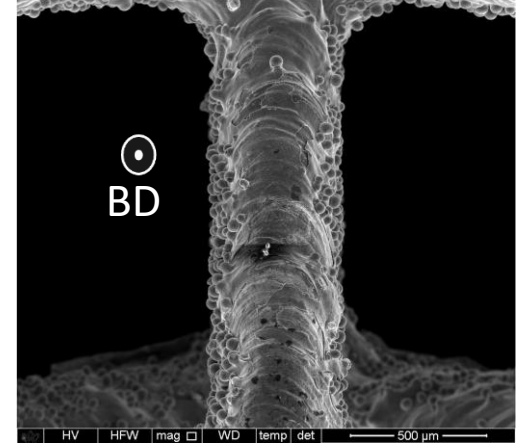
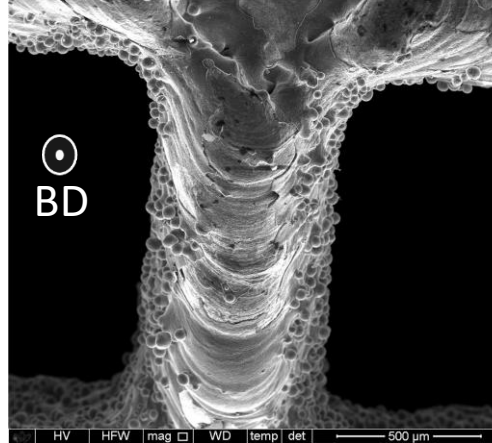
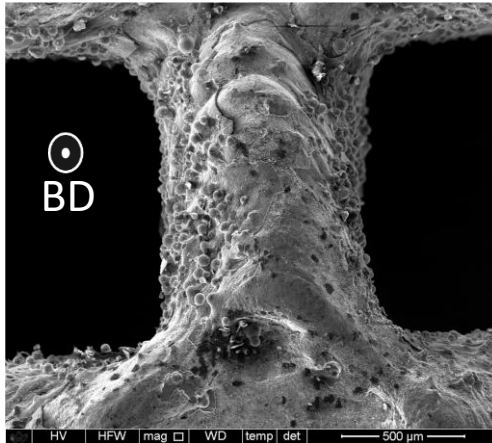
Case study: printing of Niti trabecular structures

BCC 65%

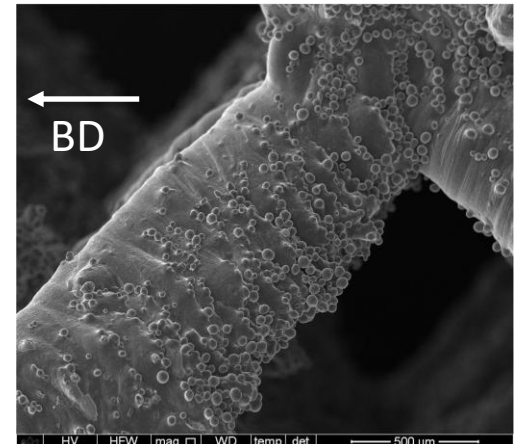
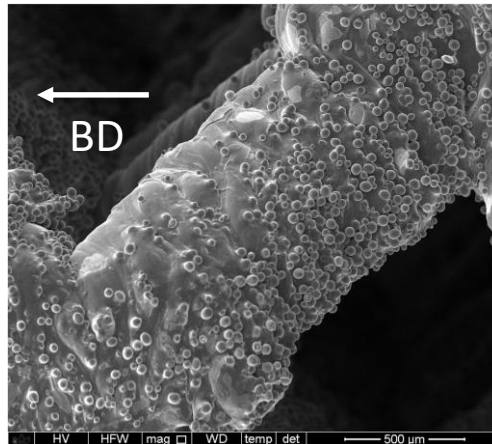
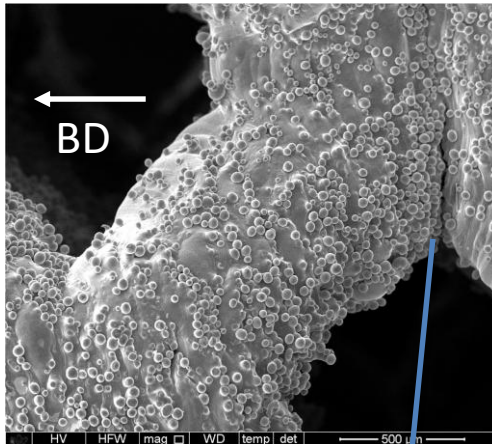
BCC 75%

BCC 85%

Top



Side



Cricca



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Additive Manufacturing: tecnologie, progettazione e applicazioni

Prof. R. Bertolini

Case study: printing of Niti trabecular structures

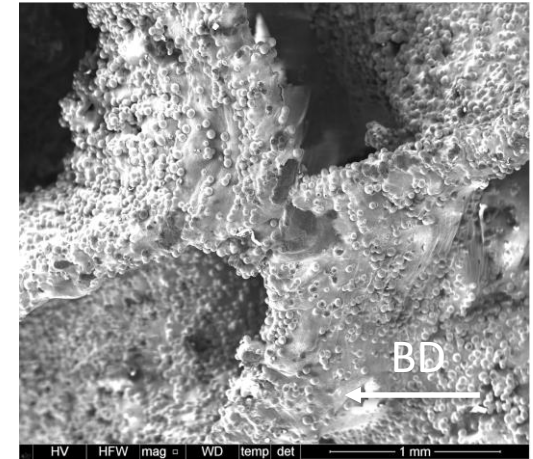
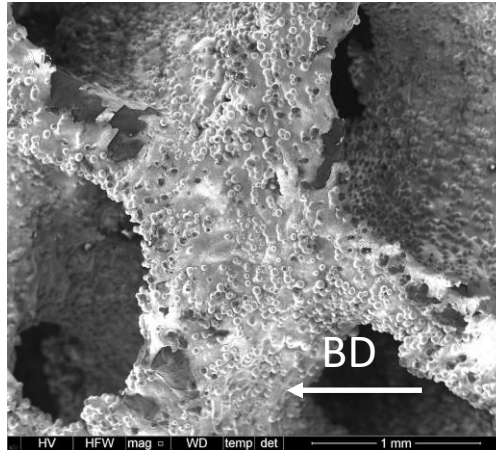
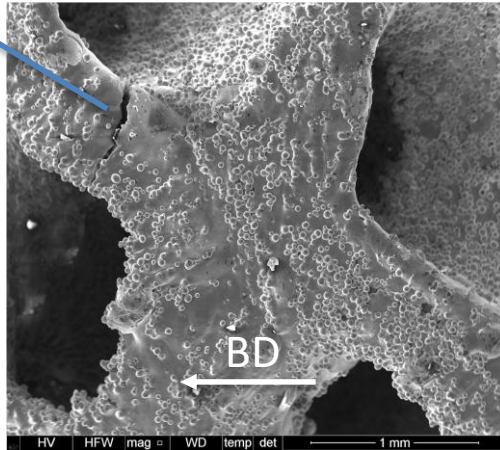
crack

Gir 65%

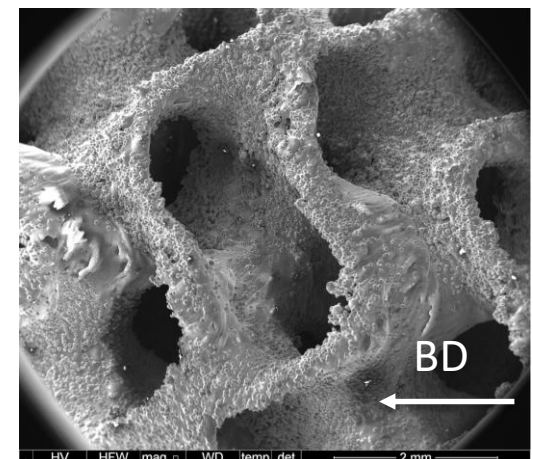
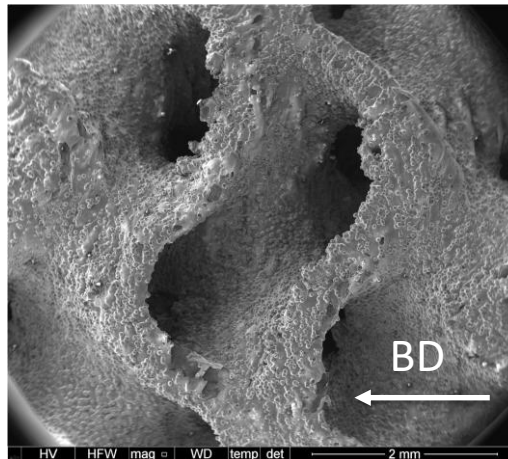
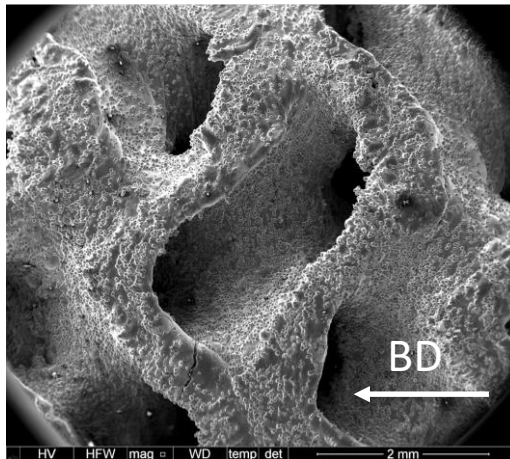
Gir 75%

Gir 85%

Top



Side



All'aumentare della porosità, i contorni geometrici dell'architettura diventano meno definiti ed è presente una maggiore quantità di polvere non fusa



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Additive Manufacturing: tecnologie, progettazione e applicazioni

Prof. R. Bertolini

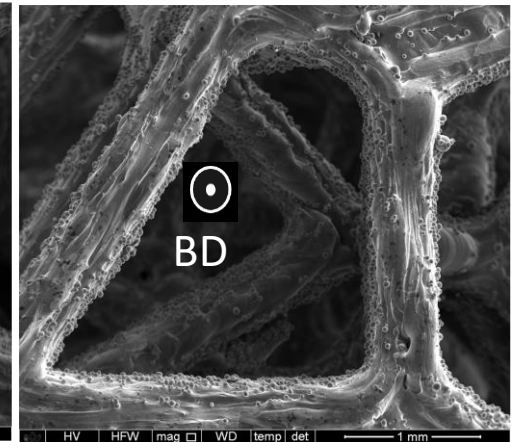
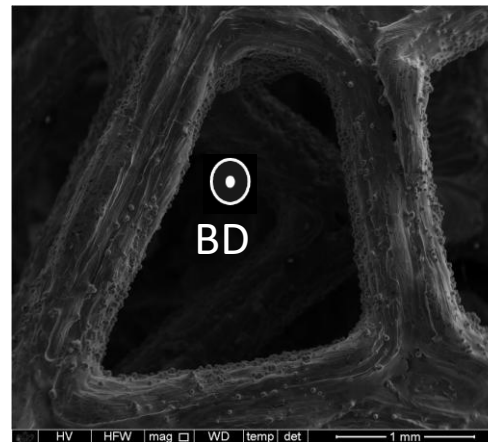
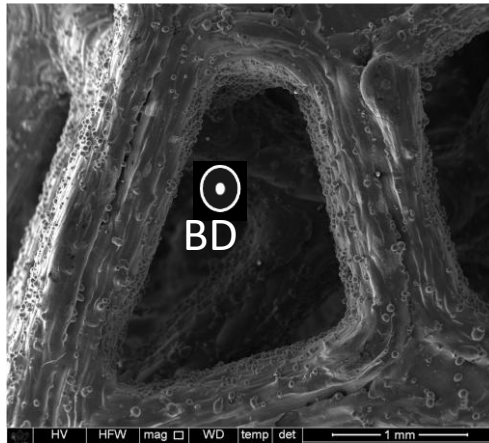
Case study: printing of Niti trabecular structures

Vor 65%

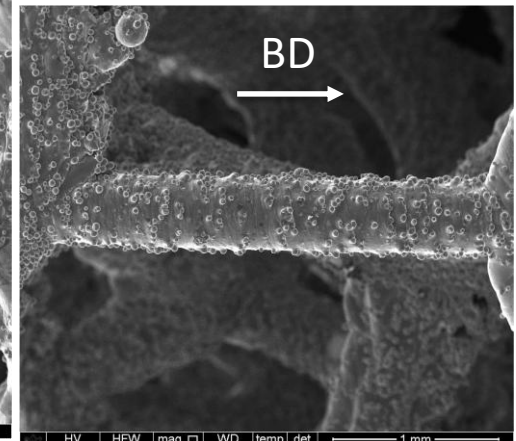
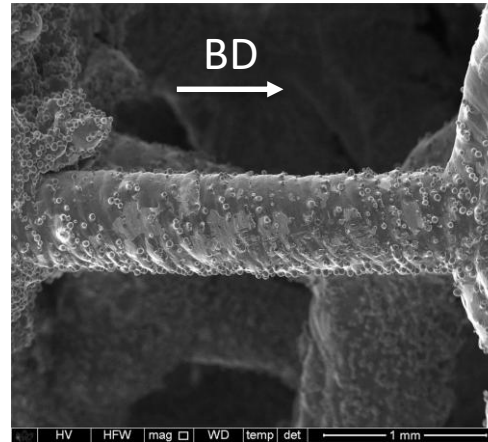
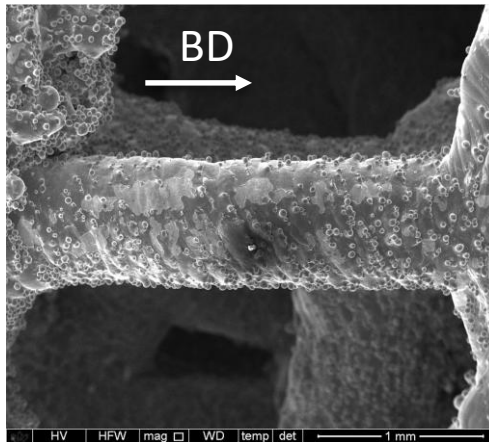
Vor 75%

Vor 85%

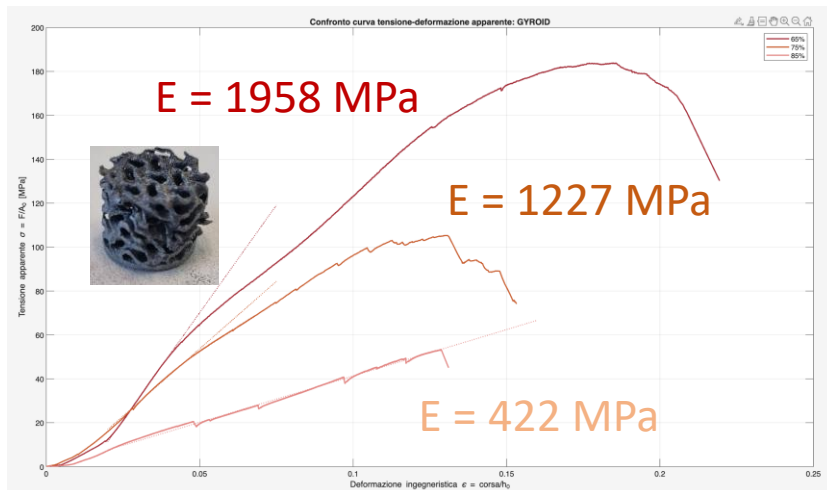
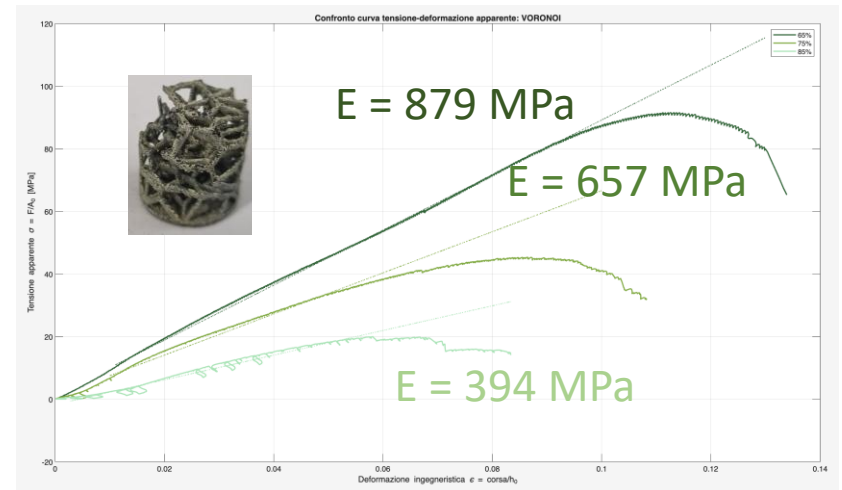
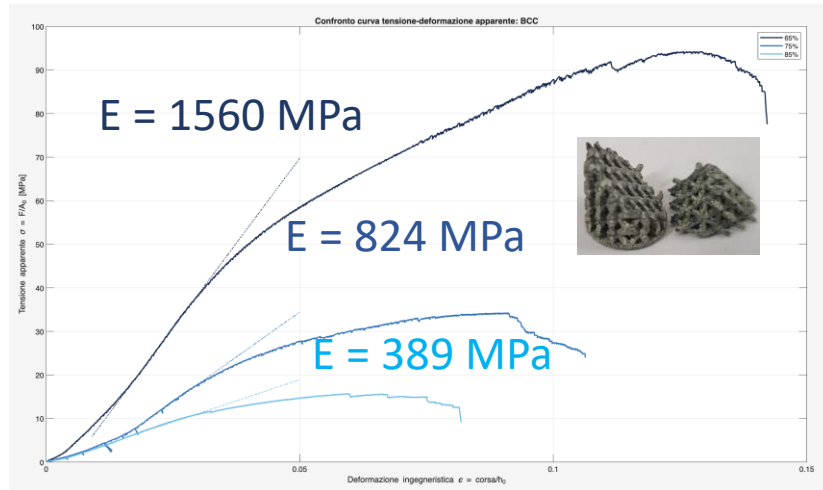
Top



Side



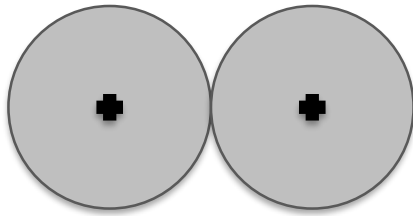
Case study: printing of Niti trabecular structures



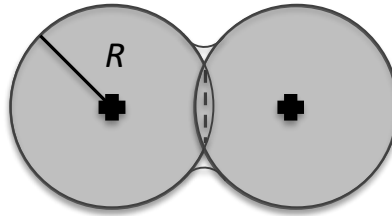
Cedimento causato da:

- Propagazione di difetti preesistenti
- BCC e Gyroid: frattura a taglio
- Voronoi -> buckling

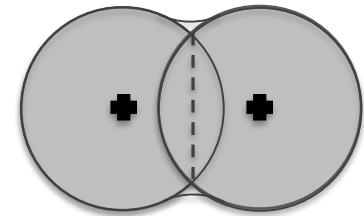
Sinterizzazione allo stato solido



1.



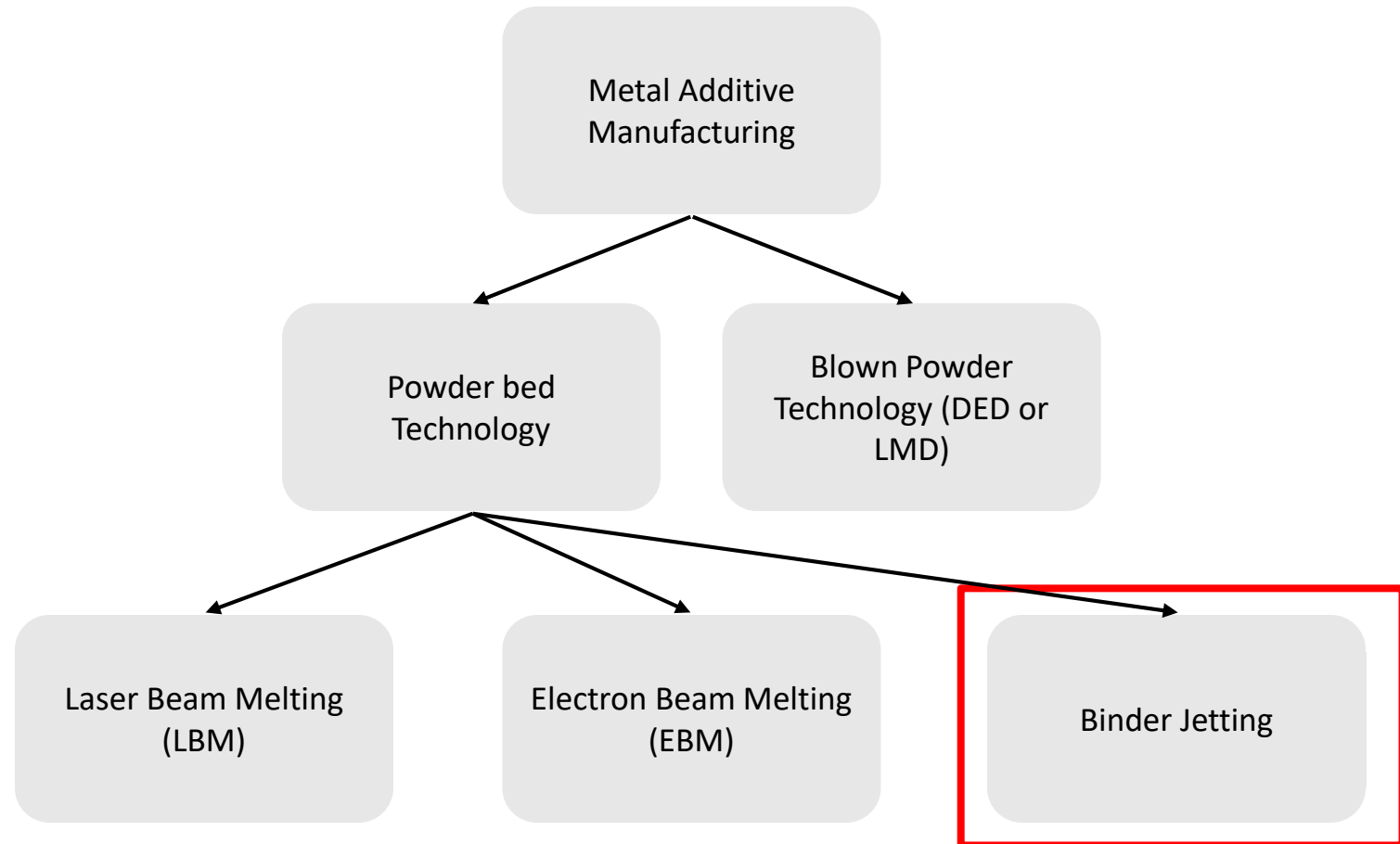
2. Formazione della strozzatura
per diffusione



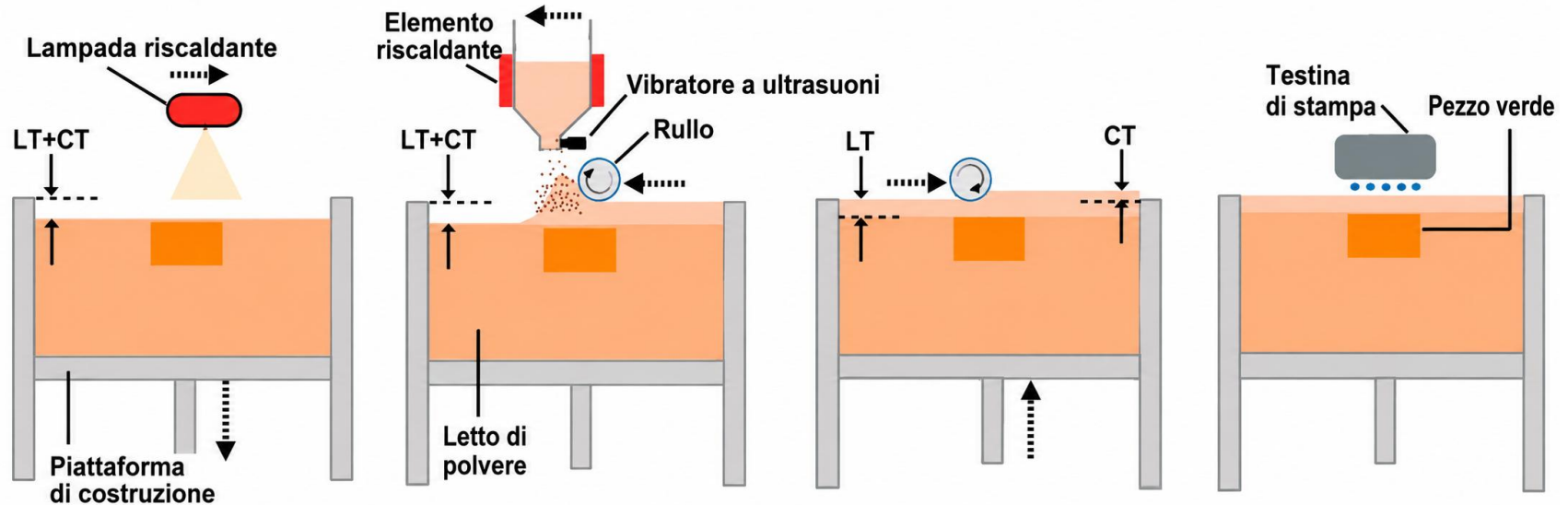
3. La distanza tra i centri si
riduce e le particelle si saldano

- All'aumentare della temperatura, due particelle adiacenti iniziano a formare un legame per **diffusione** (*saldatura allo stato solido*);
- Ne consegue un aumento della resistenza, della densità, della duttilità e della conducibilità sia termica che elettrica del verde.
- Contemporaneamente, tuttavia, il componente ritira.

Stampa a getto di legante (Binder Jetting-BJ)

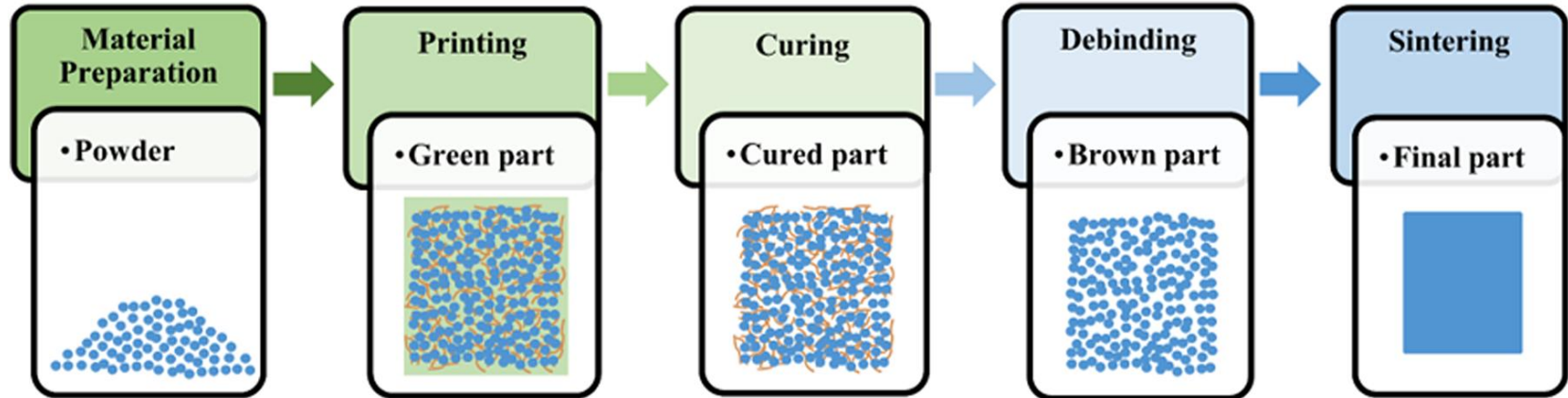


Stampa a getto di legante (Binder Jetting-BJ)

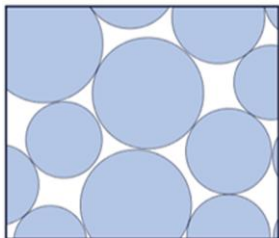


- Un strato di polveri viene distribuito tramite una tramoggia con vibrazioni ad ultrasuoni e successivamente steso da un rullo sul un piano di lavoro.
- Una testina a getto di inchiostro deposita selettivamente un legante sul letto di polveri e le incolla tra loro.
- Il piano di lavoro si abbassa e prima della stesura di un nuovo stato sulla piattaforma, una lampada riscalda le polveri già presenti.
- Un nuovo strato di polveri viene steso e il legante viene depositato nuovamente.
- Il processo viene ripetuto fino all'ottenimento della parte «green part».

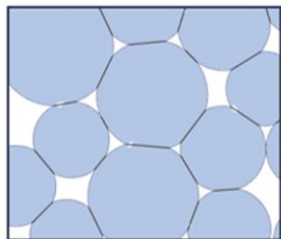
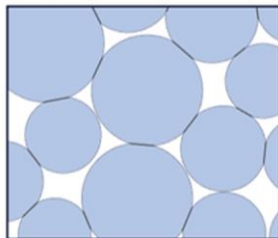
BJ – post processing



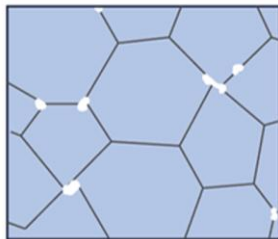
Loose Powder



Initial Stage



Intermediate Stage



Final Stage

- Dopo la stampa le polveri solo sono tenute insieme dal legante, è necessario riscaldare a bassa temperatura per consolidare il legante (curing).
- Il legante viene eliminato tramite un trattamento termico controllato (debinding) e si ottiene la «brown part».
- Per ottenere la parte finale è necessario un ultimo trattamento termico (sintering) in cui le particelle metalliche si saldano tra loro.
- L'ultimo step consiste nella rimozione delle polveri in eccesso.

BINDER JET 101

AREA-WIDE 3D PRINTING

<https://www.youtube.com/watch?v=Atvhm8-oQks>



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Additive Manufacturing: tecnologie, progettazione e applicazioni

Prof. R. Bertolini

BJ– utilizzi

Materiali:

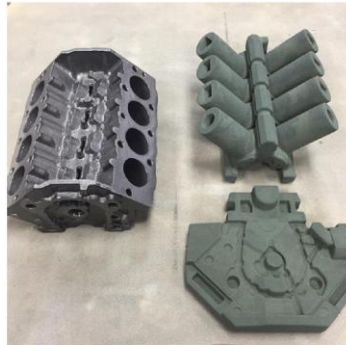
- Metalli (acciai inossidabili, leghe di nichel, leghe di titanio, leghe di rame) per produzione di parti metalliche durevoli e componenti ad alta densità.
- Ceramiche (alumina, zirconia e carburi di silicio) per produzione di componenti con elevata resistenza al calore, all'usura e agli agenti chimici.
- Materiali polimerici (poliammide, polipropilene, policarbonato) per creazione di parti leggere e complesse per i settori dei beni di consumo, automobilistico e medico.
- Biomateriali (PLLA, idrossiapatite e fosfati di calcio) per la produzione di componenti personalizzati funzionali per il corpo umano.

Applicazioni:

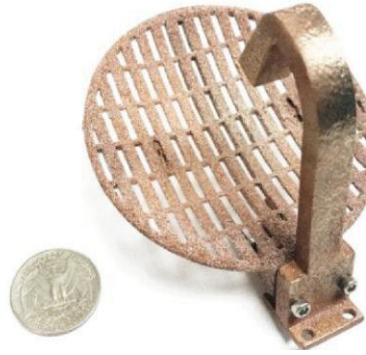
- Automotive: prototipi funzionali, parti leggere e complesse.
- Aerospace: componenti non strutturali e sistemi di raffreddamento avanzato.
- Componenti biomedicali: scaffold porosi e impianti personalizzati.
- Produzione in serie di componenti di piccole dimensioni: orologeria e oreficeria.



BJ – esempi



*Stampo per
fonderia*



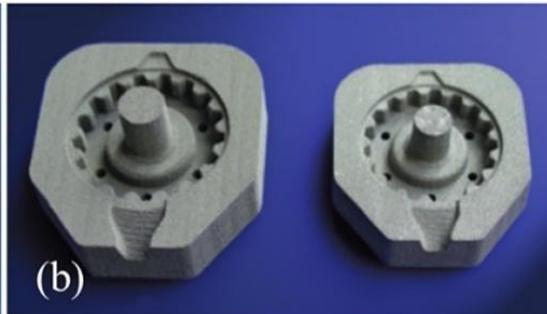
*Antenna parabolica
in acciaio 316,
infiltrata con rame*



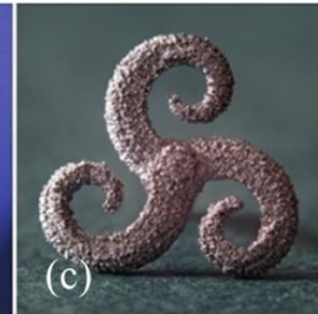
Pezzo in miniatura



*Componente di una turbina in
SS420, infiltrato con bronzo*



Inserto per stampo



Orecchino

Ziaee, Mohsen & Crane, Nathan. (2019). Binder Jetting: A Review of Process, Materials, and Methods. Additive Manufacturing. 28.

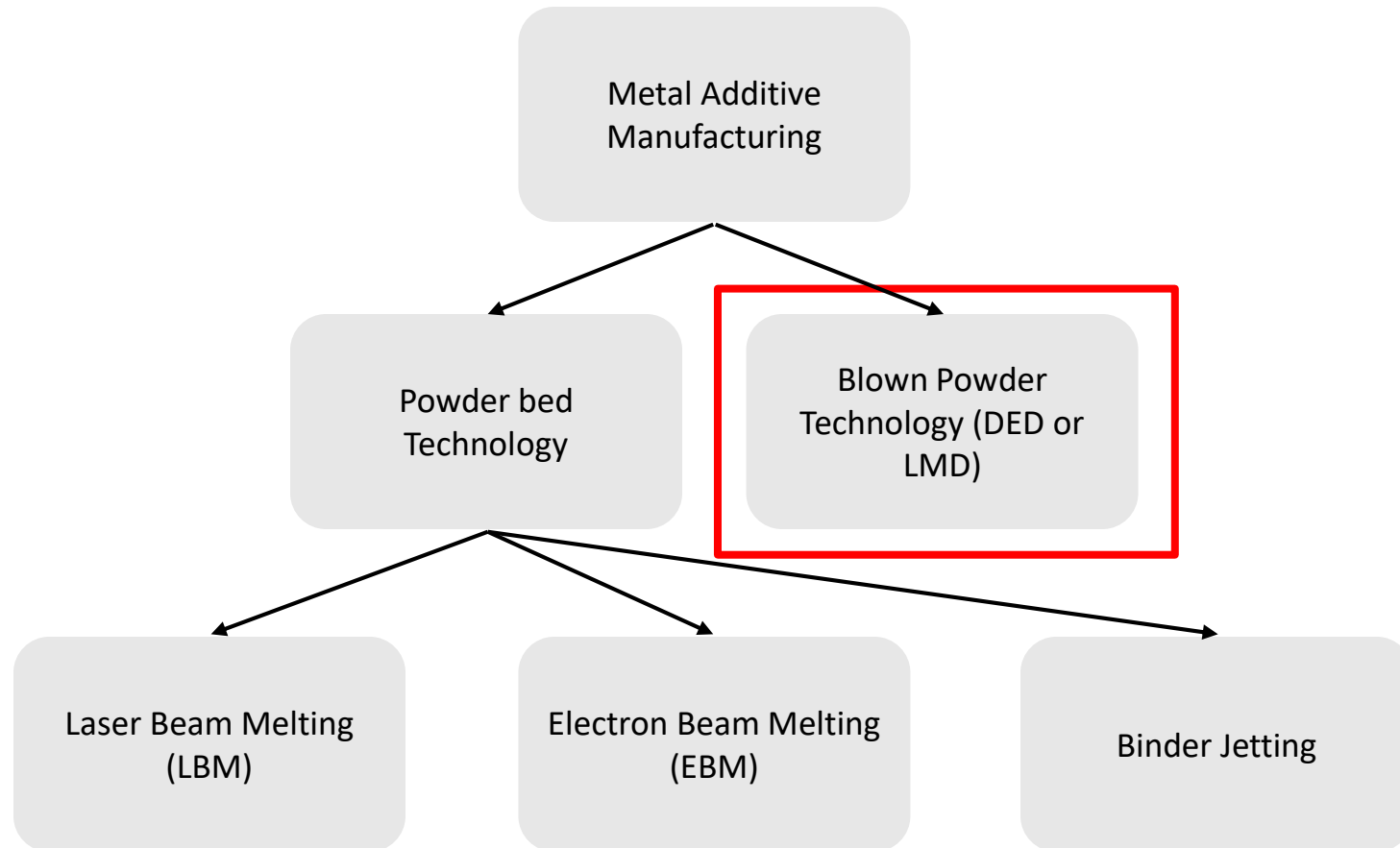
Mostafaei, Amir & Elliott, Amy & Barnes, John & Li, Fangzhou & Tan, Wenda & Cramer, Corson & Nandwana, Peeyush & Chmielus, Markus. (2020). Binder jet 3D printing – Process parameters, materials, properties, and challenges. Progress in Materials Science. 119. 100707.

BJ vs PBF-LB/M

Proprietà	Binder Jetting (BJ)	LPBF
Costo macchina	basso	molto elevato
Produttività / scalabilità	alta (testine multiple, build rate elevato)	limitata (processo più lento)
Materiali riflettenti / alta conducibilità	processabili	difficili da processare
Necessità supporti	non richiesti	necessari per dissipazione di calore e geometrie complesse
Materiali ad alto punto di fusione	processabili con buona accuratezza	rischio cracking e stress
Colorazione parti	possibile (binder colorato)	non possibile
Densità finale / proprietà meccaniche	inferiori, richiedono sinterizzazione	elevate, parti quasi dense
Post-processing	debinding + sinterizzazione (ritiro, distorsione)	solo trattamenti termici
Tolleranze dimensionali	moderate	molto elevate
Dimensione polveri	più grosse (contrazione, tensioni residue)	fini, alta stabilità

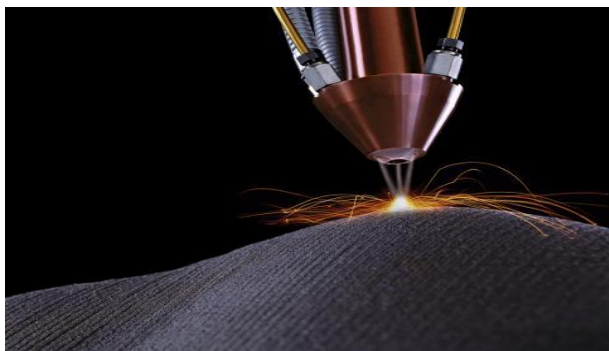
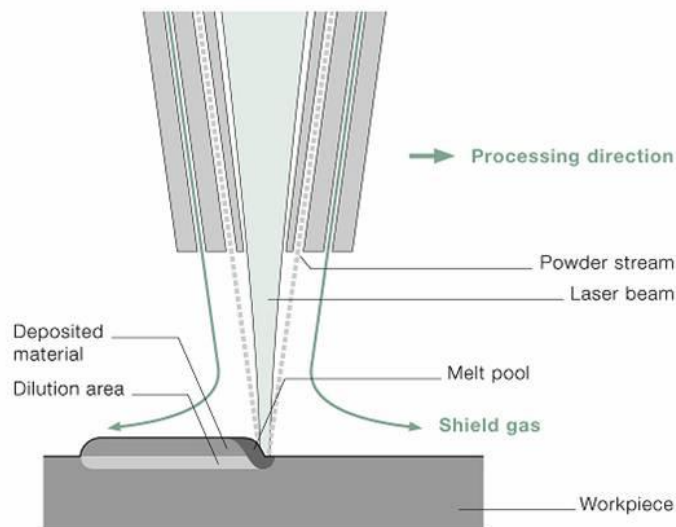


Direct Energy Deposition (DED)



Direct Energy Deposition (DED)

Nomi alternativi: Laser Engineering Net Shaped (**LENS**), Laser cladding (riparazione di parti o aggiunta di funzioni) oppure Direct Metal Laser Deposition (**DMLD**)



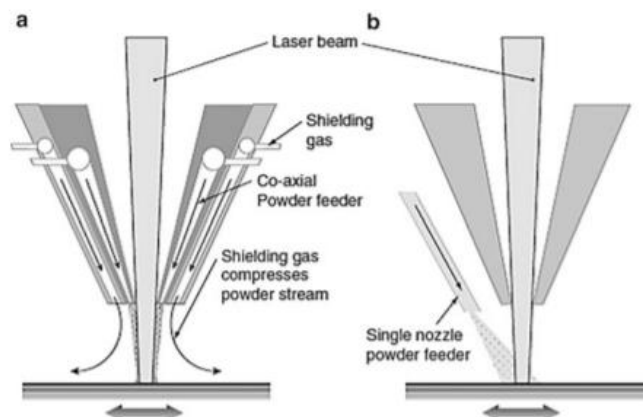
- Le polveri fondono direttamente, senza letto di polvere come nella SLS
- Consumo di polvere inferiore rispetto alla LPBD
- Nessuna struttura di supporto con sistema a 5 assi
- Adatto a riparazione e rivestimento
- Possibile produrre materiali a gradiente funzionale

Impieghi:

- Riparazione di stampi, veicoli militari e motori aeronautici
- Rivestimento di pale di turbina
- Scaffold per applicazioni biomedicali
- ...

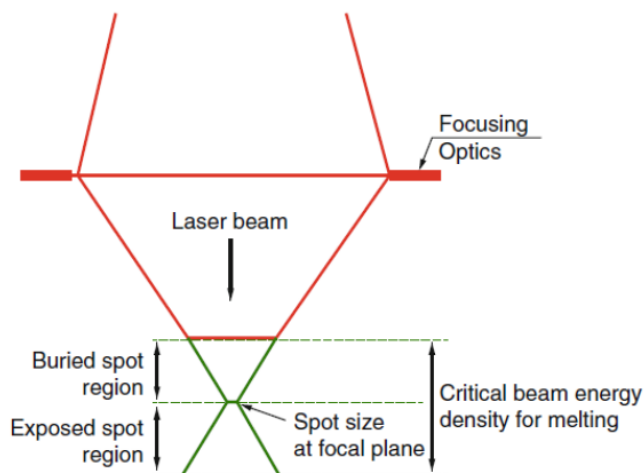
Direct Energy Deposition (DED)

- Le polveri utilizzate nel DED hanno generalmente una dimensione delle particelle compresa tra 20 e 150 μm , per poter essere facilmente trasportate con l'aiuto di un gas di trasporto (carrier gas).
- Durante la deposizione non tutte le polveri vengono catturate dal bagno di fusione (molten pool) -> possono essere utilizzate per un altro processo.
- Questa polvere residua può essere riutilizzata, previo opportuno trattamento, per un nuovo processo. La polvere viene trasportata alla testa di deposizione con l'aiuto di un gas di trasporto e successivamente focalizzata nell'area di interazione con il laser.
- Le particelle possono essere focalizzate attraverso un ugello assiale/coassiale (maggiore efficienza), un ugello frontale (uso più semplice ma comporta direzionalità sul bagno di fusione) o attraverso quattro ugelli laterali.



Direct Energy Deposition (DED)

- Quando il fascio laser viene focalizzato su un punto del pezzo da lavorare, si crea una zona al di sopra e al di sotto del piano focale in cui la densità di energia è sufficiente a formare un bagno di fusione;
- Il bagno di fusione è influenzato anche da altri parametri come la velocità di scansione, la potenza del fascio laser e la velocità del flusso di polvere.
- All'aumentare della velocità di scansione, si riduce il tempo di permanenza del fascio laser nel singolo punto e questo porta a un bagno di fusione di dimensioni inferiori.



Regione investita dalla massima densità di energia.

Direct Energy Deposition (DED)

Il punto d'impatto (spot) del getto di polvere (A) può variare la sua posizione relativa rispetto allo spot del fascio laser (O) a seconda della direzione di movimento della testa;

→ diversa quantità di polvere all'interno del bagno di fusione → formazione di un bagno di fusione fortemente asimmetrico, oltre ad influenzare l'altezza del deposito stesso (più evidente nella configurazione a singolo ugello)

Per valutare la quantità di polvere effettivamente utilizzata, si impiega un parametro chiamato efficienza della polvere (Pe) = il rapporto tra la polvere utilizzata per realizzare il pezzo e quella in uscita dagli ugelli della testa.

- L'efficienza della polvere è definita come:

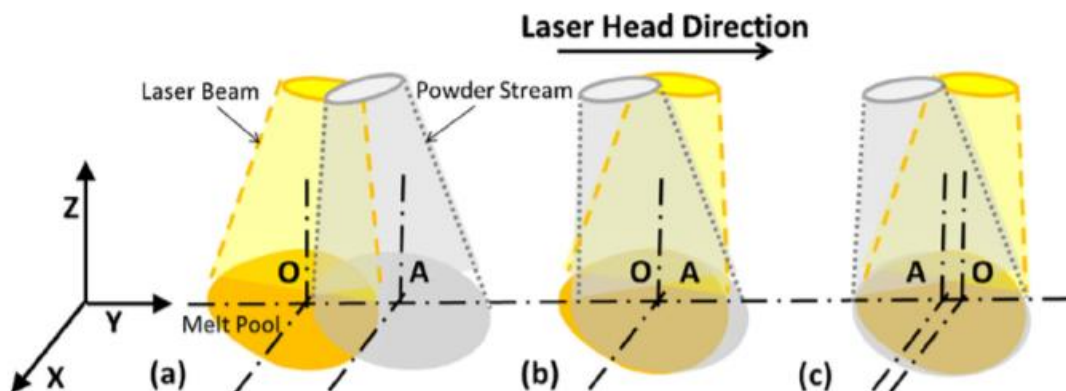
$$Pe = \frac{A * S * p}{F}$$

A = dimensione dello spot
(dimensione della macchia focale)

S = velocità di scansione

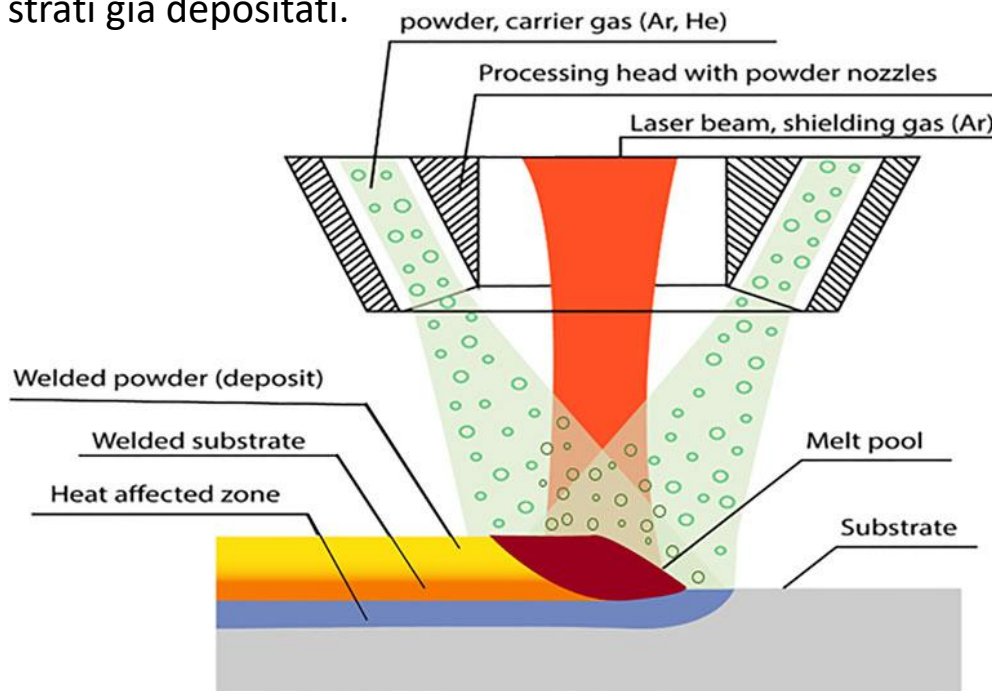
F = quantità di polvere

P = densità della polvere



Direct Energy Deposition (DED)

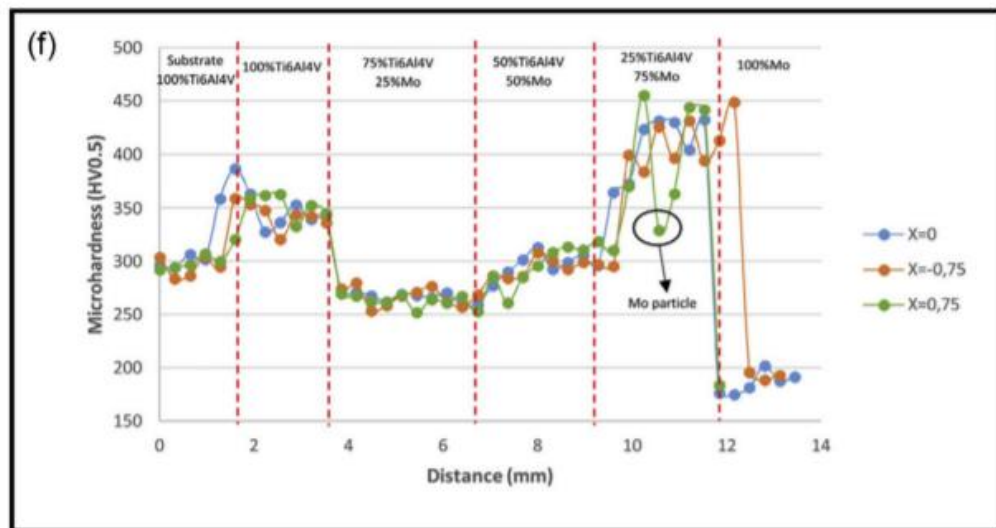
- Sotto il bagno fuso si trova una zona alterata dal calore, detta zona termicamente alterata (ZTA);
- La profondità di questa zona dipende dall'altezza del pezzo, dalla potenza del laser e dalla temperatura.
- L'estensione della ZTA va limitata per ridurre al minimo l'eventuale rifusione o il trattamento termico degli strati già depositati.



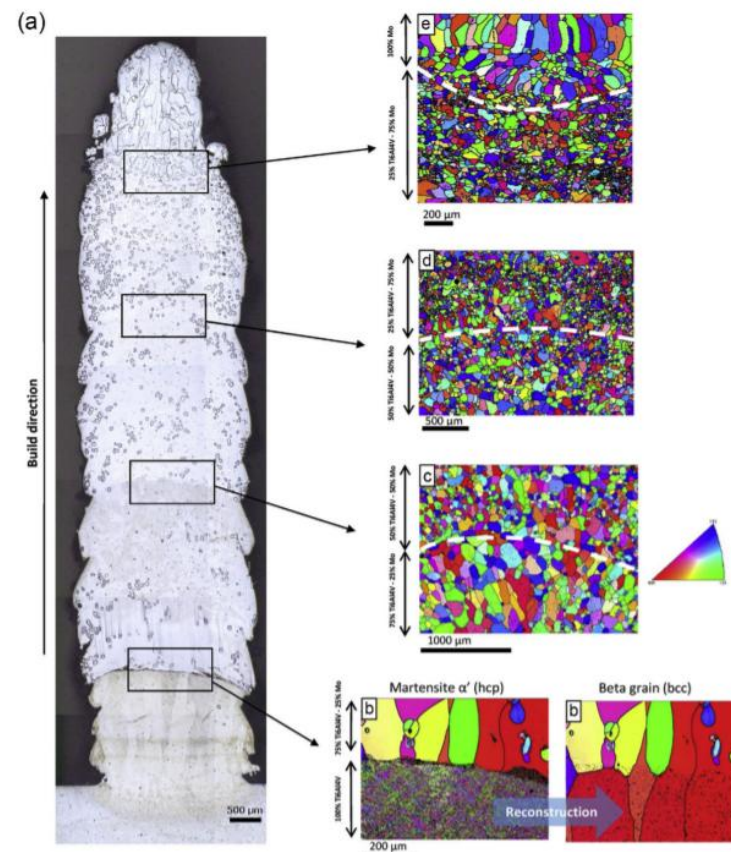
È necessario usare un gas protettivo per evitare l'ossidazione
→ è quindi necessario immettere un gas inerte (argon e azoto) che sostituisca l'ossigeno presente nell'aria

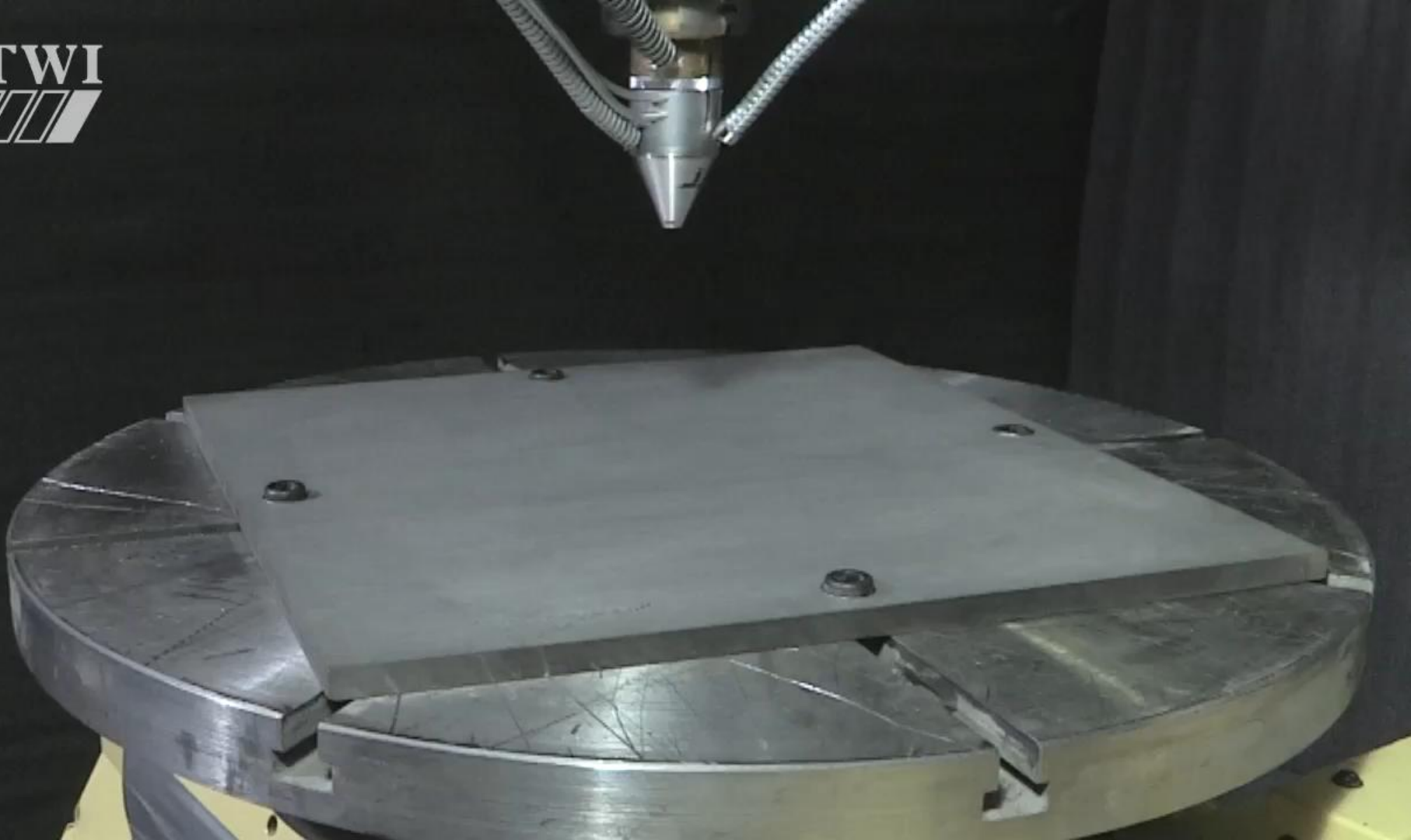
Direct Energy Deposition (DED)

- Fattibilità della realizzazione di materiali a gradiente funzionale (FGM)
- Gli FGM presentano transizioni graduali di composizione o microstruttura (ad es. dimensione dei grani, tessitura, porosità) lungo almeno una direzione, con variazioni funzionali di almeno una proprietà



FGM in Ti6Al4V/Mo





<https://youtu.be/yKnImfuMSgo?si=kx4BHSqAdexAE-KO>

Applicazioni DED

Aerospaziale

Riparazione degli shroud HPT

Riparazione dell'involucro HPT BR715 (Rolls-Royce)

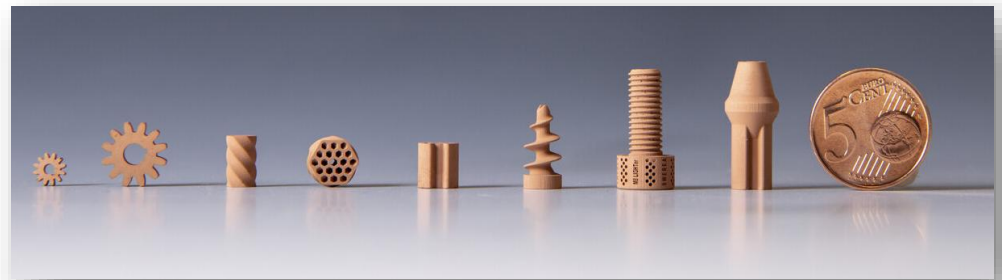
Produzione di pale di turbina presso Rolls-Royce (resistenza maggiore rispetto alle leghe lavorate per deformazione plastica)

Spazio

Fabbricazione di parti con regolite lunare grezza → produzione di pezzi di ricambio sulla Luna
Balla, Vamsi Krishna, et al. "First demonstration on direct laser fabrication of lunar regolith parts." *Rapid Prototyping Journal* (2012).



Shroud HPT



Parti ceramiche stampate in 3D realizzate con regolite lunare

DED vs PBF

	DED	PBF
Portfolio di materiali	+ (materiali a gradiente funzionale)	-
Dimensione massima del pezzo	2000 x 1500 mm x 750 mm	500 mm x 280 mm x 325 mm
Capacità di dettaglio (mm)	0.5-1	0.02-0.2
Ra (µm)	7-20	4-10
Complessità del pezzo	+	- (necessario il letto di polvere!)
Velocità di deposizione	+ (3-10 mm ³ /s)	(1-3 mm ³ /s)
Consumo di polvere	Inferiore	Superiore
Combinazione con metodi sottrattivi	+	/
Prezzo medio del sistema (€)	500.000-800.000	450.000-600.000
Ambito di applicazione	Riparazione di componenti usurati Modifica di attrezzature per il riutilizzo	Prototipazione rapida Produzione diretta di componenti



Controllo di processo M-AM

Instabilità di processo esistenti

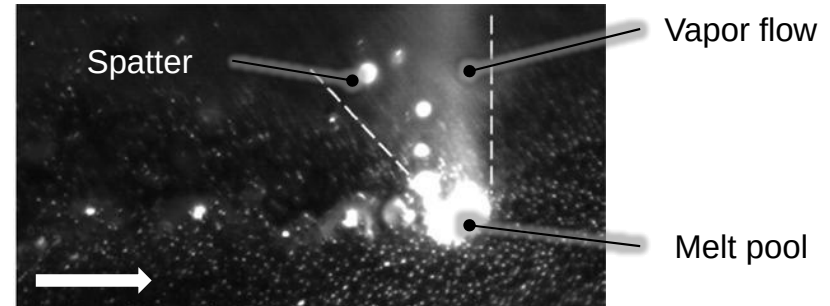
- Deposizione non omogenea dello strato di polvere
- Formazione di spruzzi (spatter) e balling
- Influenza della geometria del pezzo sul campo di temperatura
→ Tensioni interne e deformazioni

Stato attuale:

- Disponibilità di sistemi di monitoraggio
→ Deposizione dello strato di polvere
→ Monitoraggio delle emissioni di processo e delle dimensioni del bagno fuso
- Nessuna analisi automatica dei dati
→ Nessun controllo a ciclo chiuso

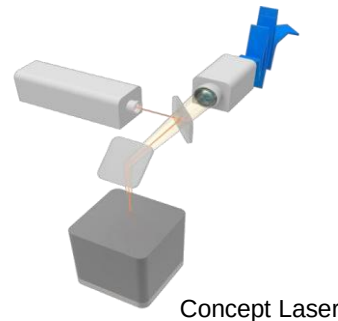
Serve un controllo a ciclo chiuso adeguato a superare le instabilità di processo

High speed camera image of LBM process



Gunenthiram (2017)

Process monitoring system: QM meltpool 3D



Camera data

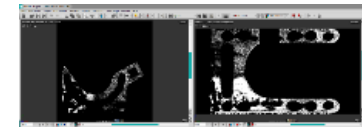
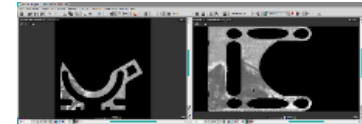
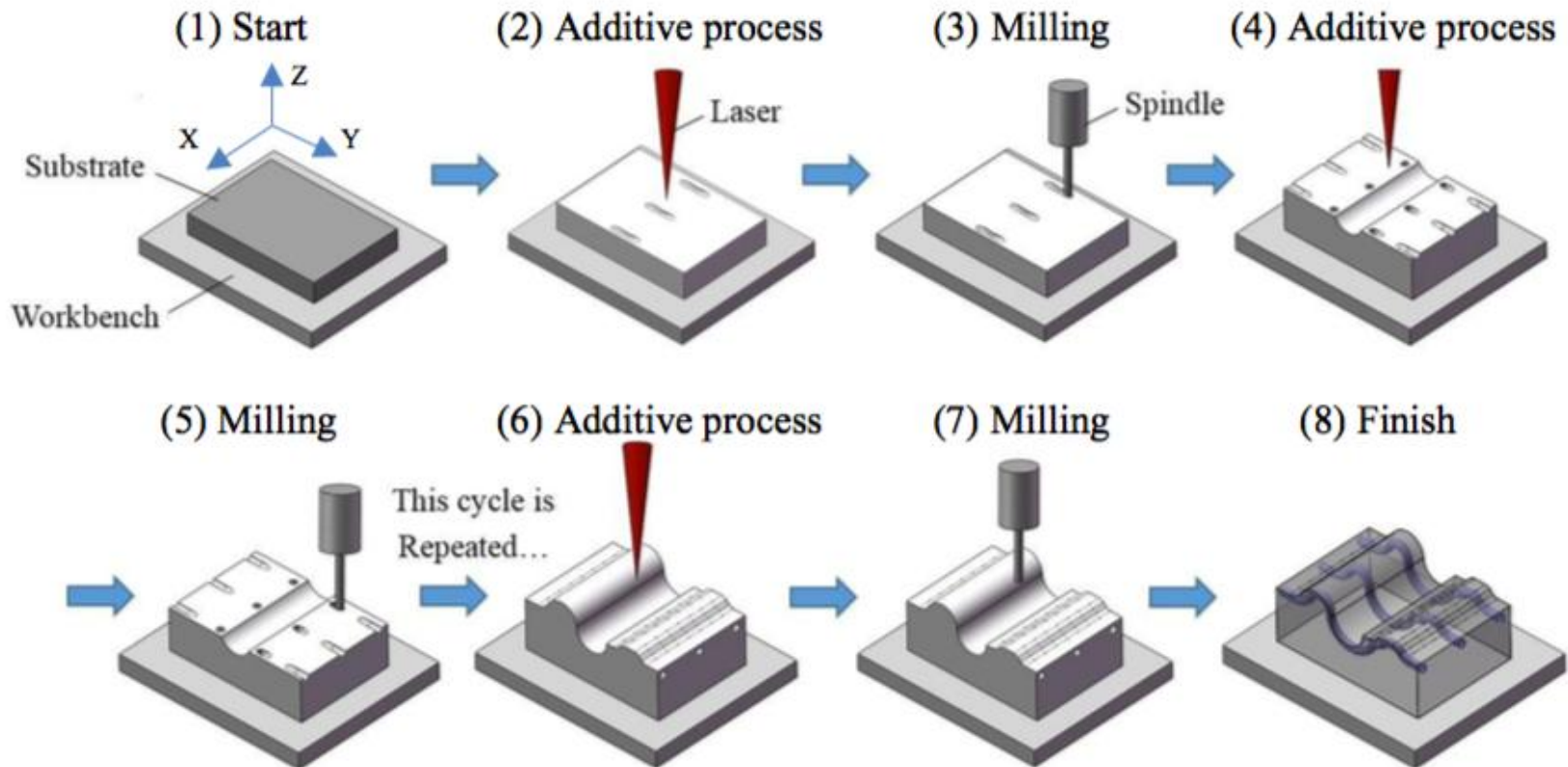


Photo diode data



Bosch/LPT
T.Kolb

Macchine utensili ibride



Combinazione di asportazione di truciolo e di Additive Manufacturing (sia PBF-EB/M che DED)

Macchine utensili ibride

https://youtu.be/Fr_PneeyO34?si=vaaBpKYk35vcVyX6



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Additive Manufacturing: tecnologie, progettazione e applicazioni

Prof. R. Bertolini

Criticità nei processi AM

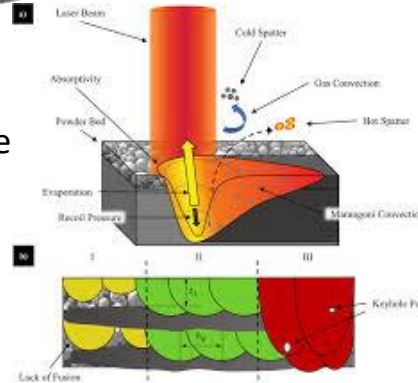
- Portfolio di materiali
- Qualità della polvere
- Routine di produzione della polvere



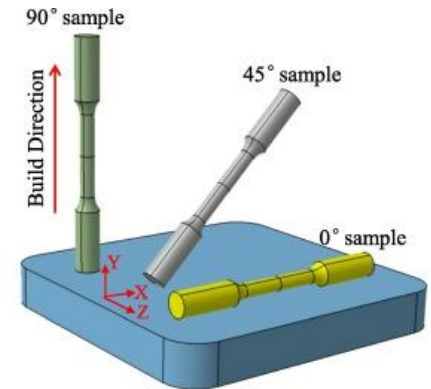
- Stoccaggio della polvere
- Gestione della polvere
- Riutilizzo della polvere



- Comprensione fondamentale del processo
- Risultati dipendenti dall'esperienza dell'operatore
- Nessun controllo di processo
- Condizioni di processo disomogenee
- Simulazione di processo rudimentale



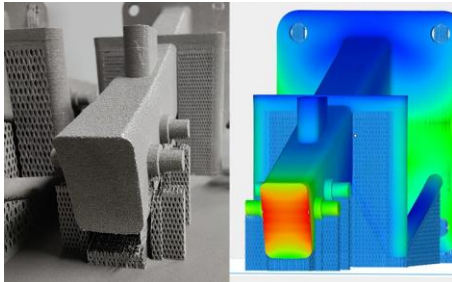
- Preparazione dei campioni laboriosa



- Livello di qualità della tecnologia del sistema



- Proprietà del pezzo dipendenti dall'orientamento di costruzione
- Metodi di caratterizzazione distruttivi



- Nessuna preparazione automatica dei dati
- Nessun formato di file universale