

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria
Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

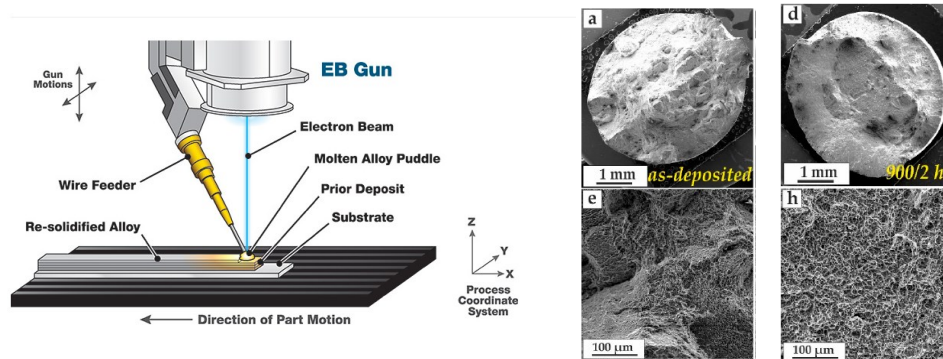
***Relazione per la prova finale
«Valutazione della resistenza statica
e a fatica di componenti in materiale
metallico stampati 3D»***

Tutor universitario : Prof. Alberto Campagnolo

Laureando: Alessandro Adami

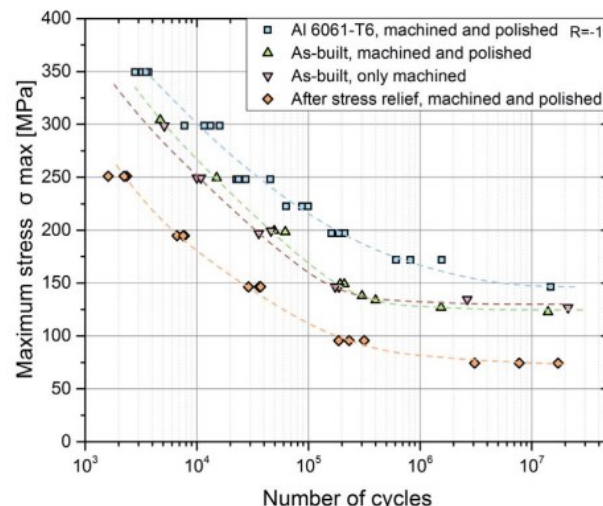
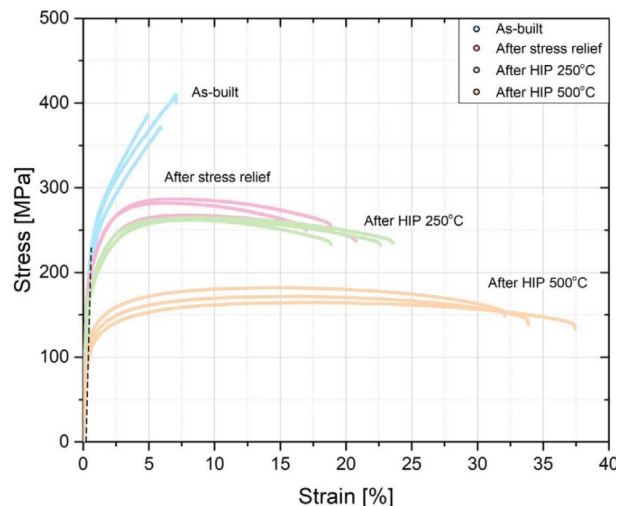
Padova, 18/11/2022

1) Analizzare le principali tecniche di stampa 3D per materiali metallici e studiarne i principali aspetti metallurgici



2) Valutare le proprietà meccaniche statiche e a fatica per i componenti realizzate in additive manufacturing

3) Confrontarne le prestazioni con i campioni prodotti tradizionalmente

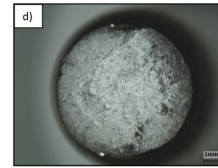
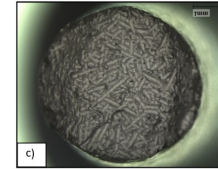
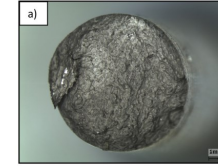
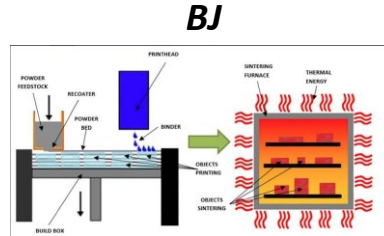
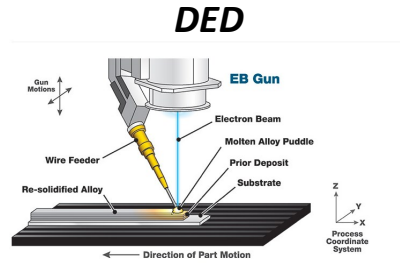
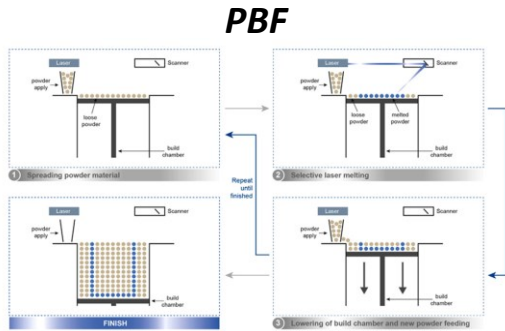


Perché studiarli?

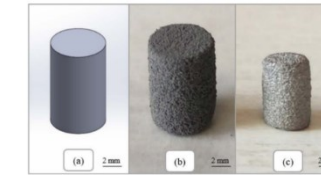
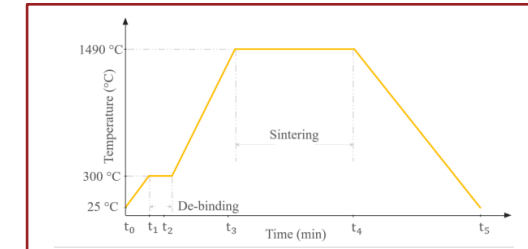
- I metodi additivi permettono complessità geometriche non raggiungibili dalle tecniche tradizionali
- Maggiore versatilità soprattutto nei piccoli lotti



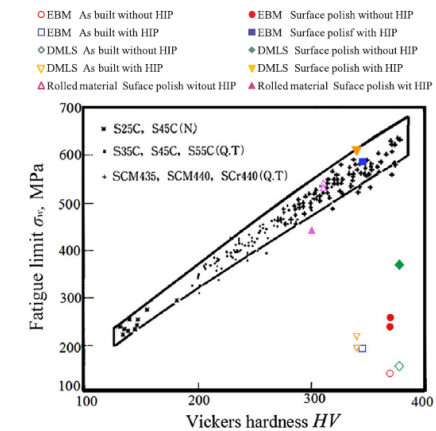
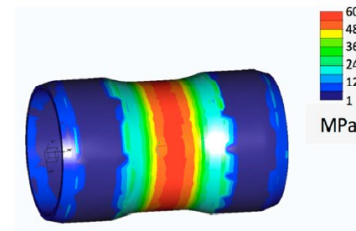
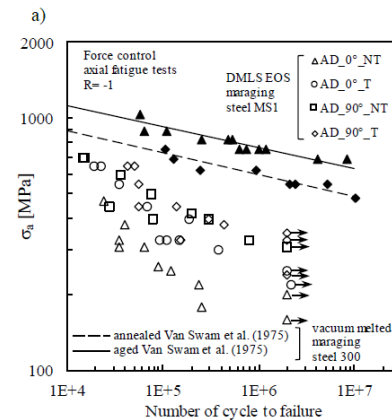
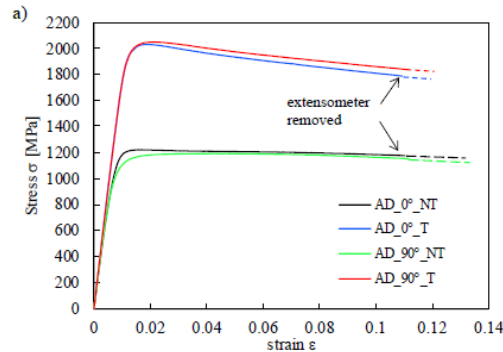
Sono stati presentati i processi
additivi comunemente in uso in
ambito industriale



Si sono studiati i trattamenti post-
produttivi necessari e il loro effetto
sulla microstruttura



Sono state analizzate le prestazioni meccaniche statiche e a fatica delle leghe
metalliche più diffuse in tale campo e i principali fattori di influenza su di esse



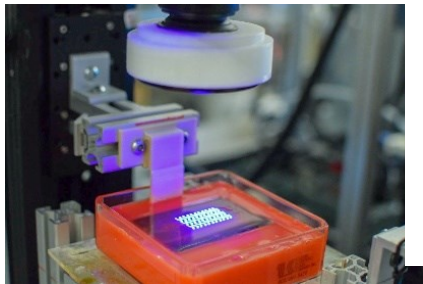
Definizione di processo additivo:

«Si intende l'unione di particelle di materiale, in forma liquida o polveri, al fine di ottenere un componente tridimensionale, utilizzando come riferimento un modello cad 3D»

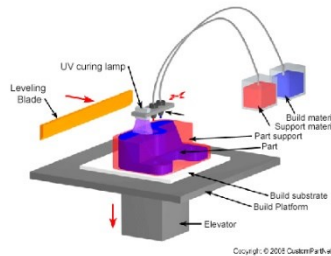
In base ai materiali impiegabili:

Ceramici e polimeri:

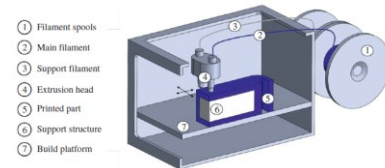
VPP:
Vat
PhotoPolymerisation



MJ:
Material
Jetting



ME:
Material
Extrusion

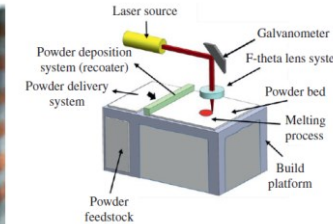


SL:
Sheet
Lamination

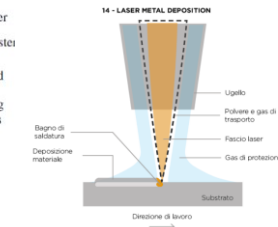


Leghe metalliche:

PBF:
Powder
Bed
Fusion



DED:
Directed
Energy
Deposition

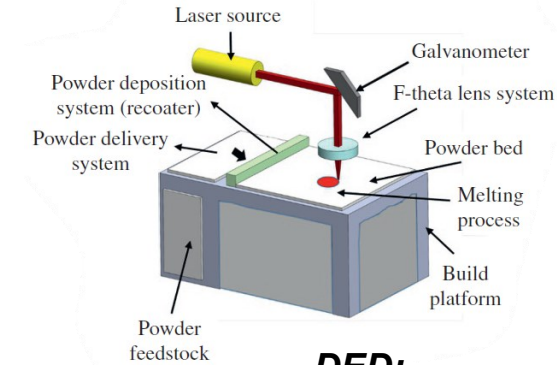


BJ:
Binder
Jetting



PBF:

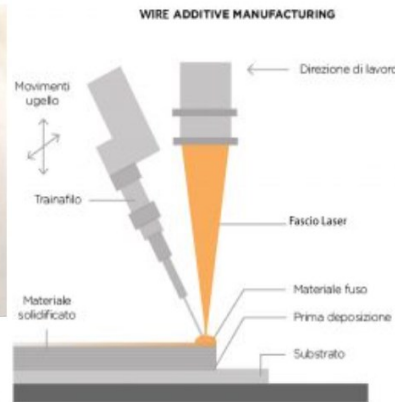
- Sorgenti laser/fascio di elettroni fondono localmente la polvere in strati
- Atmosfere controllate necessarie (camere a vuoto per il fascio di elettroni)
- Elevata accuratezza dimensionale (30-60 μm)
- Capacità produttiva ridotta (20-100 cm^3/h)



DED:

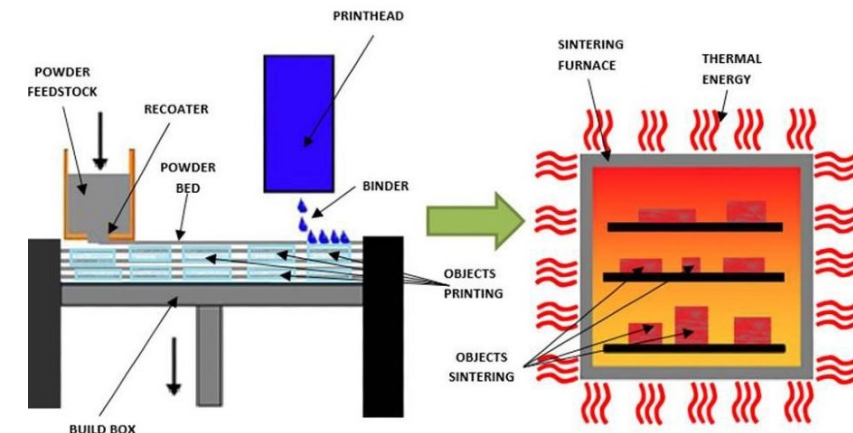
- Materiale fuso al momento della deposizione sul piano di supporto
- Possibilità di utilizzare materiali in fili, o in polveri, con l'impiego di gas inerti
- Minore accuratezza: 0,25-1 mm [1]
- Elevata capacità produttiva (500-4000 cm^3/h) [1]
- Largo utilizzo nella riparazioni di componenti di grandi dimensioni o di difficile sostituzione

Direct energy deposition



BJ:

- Impiego di un allegante polimerico per la coesione delle particelle
- Necessaria sinterizzazione o iniezione elementi liquidi per ridurre le porosità del componente «verde»
- Ritiri volumetrici difficilmente valutabili
- Complessità geometrica limitata, spessori minimi limitati, ma con grande capacità produttiva



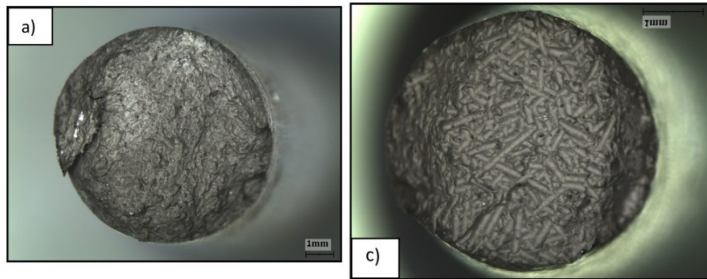
Fonti: [1] Ehsan Toyserkani, , First Edition, *Metal Additive Manufacturing*, John Wiley & Sons Ltd. 2022;

[2] Bhaskar Dutta, Sudarnam Babu, Bradley Jared Science, *Technology and Applications of Metals in Additive Manufacturing*, Elsevier inc., 2019

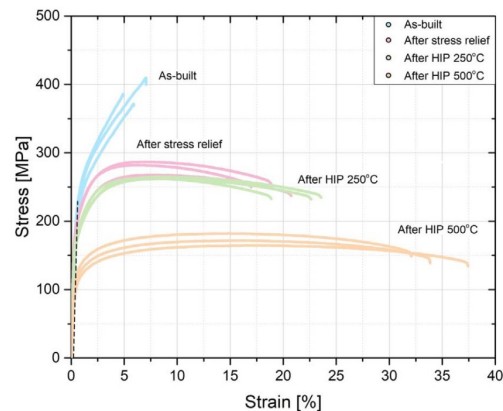
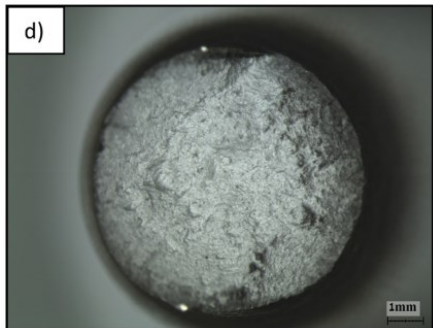
DIFETTI principali: tensioni residue e porosità

PBF e DED:

RINVENIMENTO: per ridurre la tendenza a comportamento fragile, aumentando la deformazione a rottura



HIP: (Hot Isostatic Pressing): trattamento in forno ad alta temperatura e pressione.



BJ:

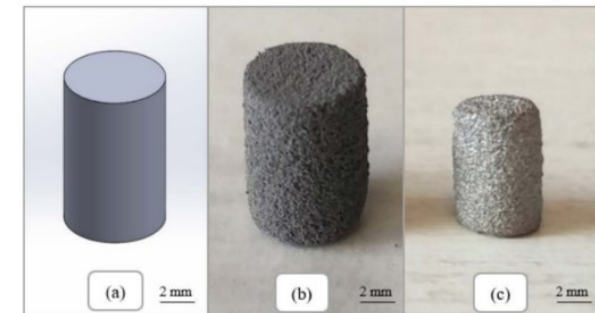
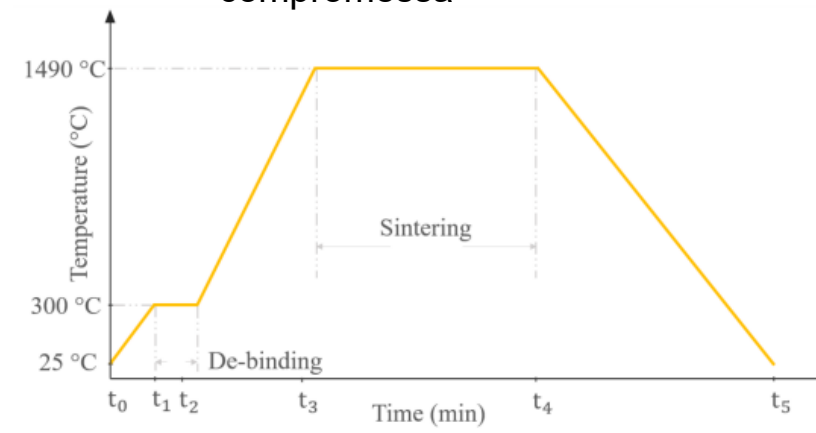
Sinterizzazione preliminare per eliminare l'allegante impiegato in fabbricazione

SINTERIZZAZIONE PRINCIPALE:

- Aumenta la densità del componente
- Provoca un ritiro volumetrico non facilmente quantificabile
- Accuratezza geometrica compromessa

INIEZIONE DI SECONDO MATERIALE LIQUIDO:

- In genere leghe metalliche come bronzo e rame
- Densità vicina al 100%
- Proprietà meccaniche ibride del componente, «multimateriale»



ACCIAIO

DIFFUSIONE NEI PROCESSI ADDITIVI: concentrata su acciai pregiati ad alta resistenza. (Es: acciai «maraging»)

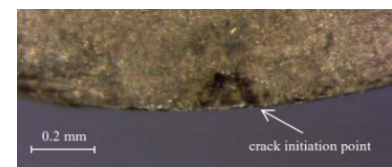
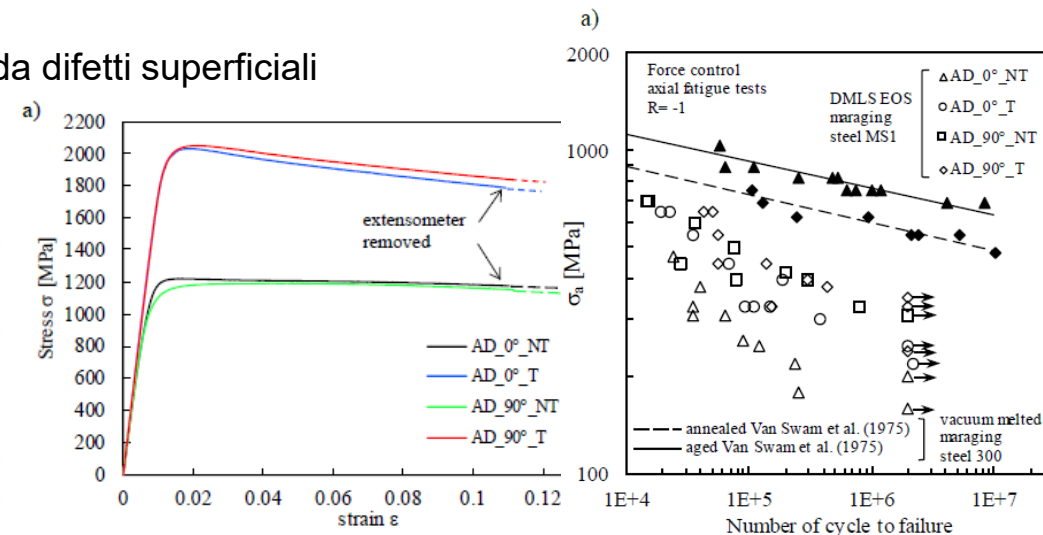
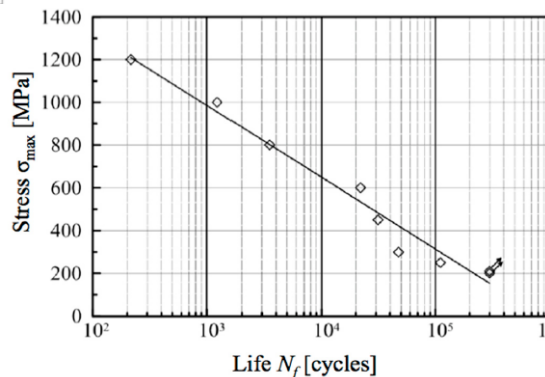
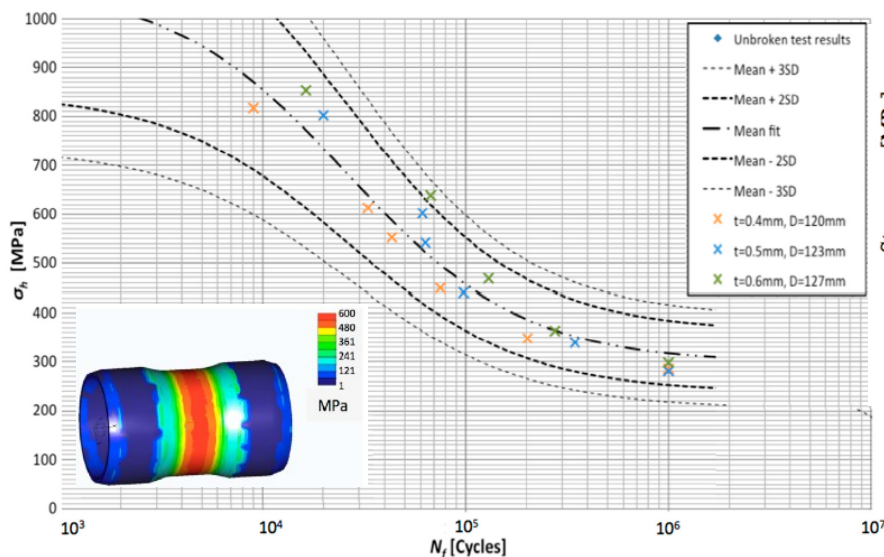
Fe (wt-%)	Ni (wt-%)	Co (wt-%)	Mo (wt-%)	Ti (wt-%)	Al (wt-%)	Cr (wt-%)	Cu (wt-%)	C (wt-%)	Mn (wt-%)	Si (wt-%)	P (wt-%)	S (wt-%)
balance	17-19	8.5-9.5	4.5-5.2	0.6-0.8	0.05-0.15	≤ 0.5	≤ 0.5	≤ 0.03	≤ 0.1	≤ 0.1	≤ 0.01	≤ 0.01

PROPRIETÀ MECCANICHE:

- Influenzate dalla direzione di fabbricazione nelle prove di fatica, al contrario delle prove statiche
- A fatica, σ_{alim} per $N=5 \cdot 10^5$ cicli minore rilevata con direzione di fabbricazione ortogonale al carico (0°) con valori: -72% (AD_0°), -33% (AD_90°) per i campioni NT; -68%(AD_0°), -61%(AD_90°) per i campioni T
- Dispersione notevole dei dati data da difetti superficiali

ESEMPIO APPLICATIVO: Manicotti aeronautici fabbricati in PBF

- Due diverse prove a fatica, trazione pura e pressione pulsante
- $\sigma_{alim} = 210-250$ MPa per trazione
- $\sigma_{alim} = 350$ MPa per pressione pulsante
- Diverso andamento delle due curve di fatica



TITANIO

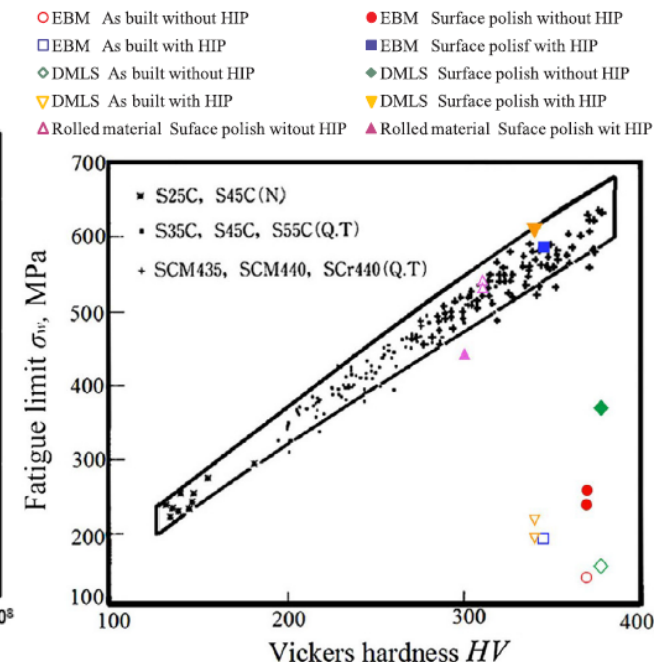
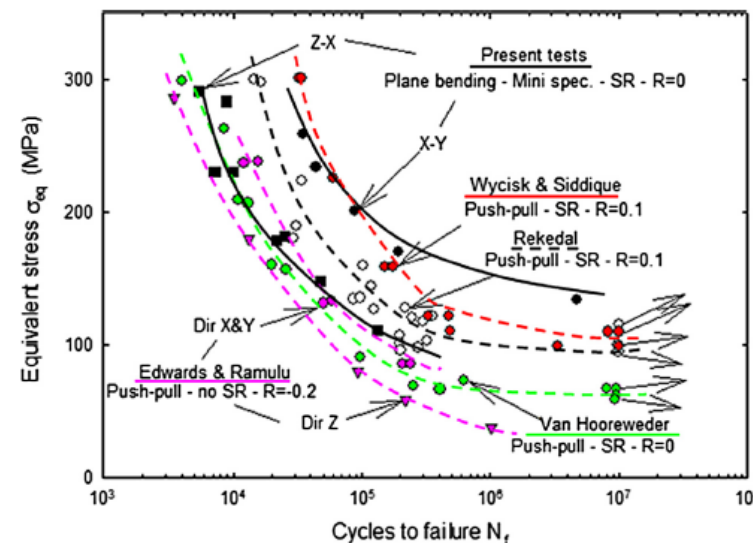
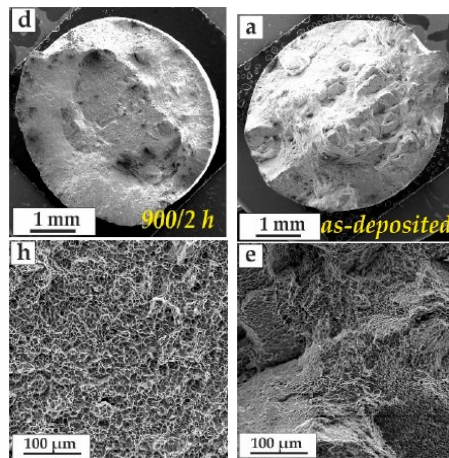
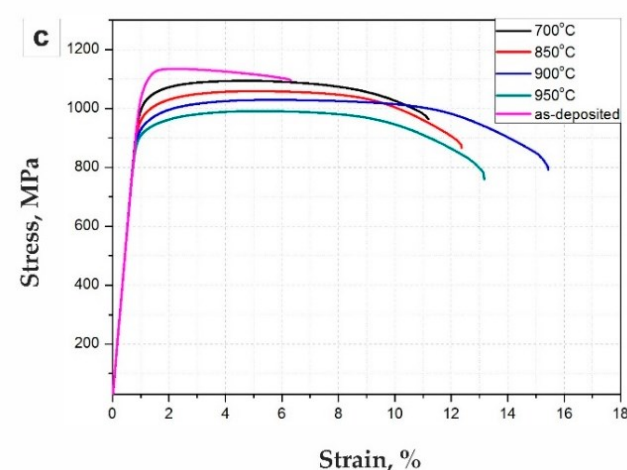
DIFFUSIONE NEI PROCESSI ADDITIVI: Favorita in volumi produttivi ridotti e alto valore aggiunto (es: biomedica)

PROPRIETÀ MECCANICHE:

ESEMPIO APPLICATIVO: Pale compressore fabbricate in DED

- Eseguiti post-trattamenti ad diverse temperature
- $\sigma_R = -15\%$ rispetto al componente non trattato
- ϵ_f aumentata dal 6% a 16%
- Provocata nucleazione di nuovi grani durante il trattamento

- Marcata anisotropia e finitura superficiale dipendente dalla direzione di fabbricazione
- Campioni sfavoriti Z-X : $\sigma_{\text{layer}0^\circ\text{lim}} = 140-150$ MPa rispetto a Y-Z e X-Y : $\sigma_{\text{layer}90^\circ\text{lim}} = 200-210$ MPa per $N = 5 \cdot 10^4$ cicli
- Componenti trattati termicamente e lavorati superficialmente ottengono valori compatibili con il comportamento di acciai tradizionali
- Prestazioni dei prodotti DED(▼) e EB-PBF(▼), $\sigma_{\text{lim}} = 575-600$ MPa, migliori delle parti prodotte convenzionalmente nella stessa lega (▲) $\sigma_{\text{lim}} = 520-550$ MPa



Fonti:[7] Leonhard Hitzler, Markus Merkel, Wayne Hall, and Andreas Ochsner, A Review of Metal Fabricated with Laser- and Powder-Bed Based Additive Manufacturing Techniques: Process, Nomenclature, Materials, Achievable Properties, and its Utilization in the Medical Sector, *Advanced Engineering Materials* 2018, 20, 1700658

[8] Gianni Nicoletto, Anisotropic high cycle fatigue behavior of Ti-6Al-4V obtained by powder bed laser fusion, *International Journal of Fatigue* 94, (2017), 30/04/2016, 255-262

[9] Marina Gushchina, Gleb Turichin, Olga Klimova-Korsmik, Konstantin Babkin and Lyubov Maggeramova, Features of Heat Treatment the Ti-6Al-4V GTD Blades Manufactured by DLD Additive Technology, *Materials* 2021, 14, 4159, 27/07/2021

ALLUMINIO

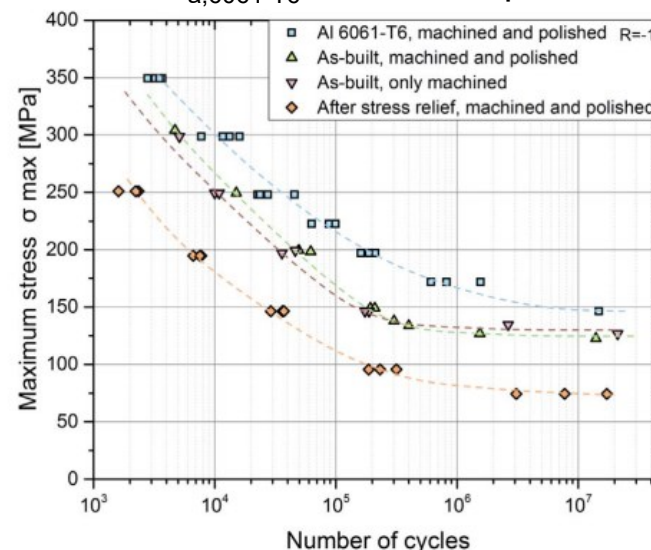
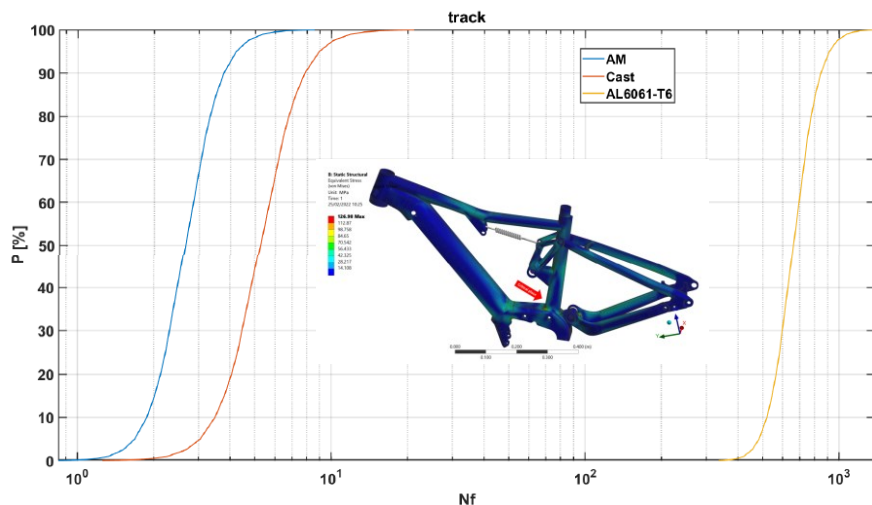
DIFFUSIONE NEI PROCESSI ADDITIVI: Principalmente in ambito automotive e sportivo per la sua elevata resistenza in rapporto alla densità

PROPRIETÀ MECCANICHE:

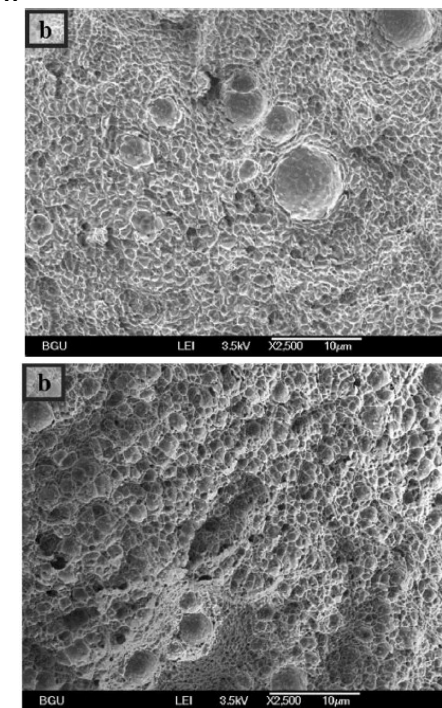
- Microstruttura compatibile con comportamento isotropo
- Una migliore finitura superficiale migliora le prestazioni a fatica analogamente agli studi tradizionali sulla fatica
- I campioni additive presentano $\sigma_{a,additive} = 150$ MPa, minore rispetto al materiale di riferimento $\sigma_{a,6061-T6} = 200$ MPa, per $N = 2 \cdot 10^5$ cicli

ESEMPIO APPLICATIVO: telaio ciclistico

- Eseguite sollecitazioni cicliche simili alla reale vita della parte: dossi, rampe di scale, salti.
- $N_{f,medio} = -48,4\%$ rispetto ad alluminio fuso in stampo e $-99,6\%$ rispetto Al6061-T6
- Medesimo risultato in un ciclo combinato
- I vantaggi delle ridotte/eliminate zone termicamente alterate non compensano la minor resistenza intrinseca del materiale stampato in 3D



Mat.	Ditch	Stair	Jump
	N_f	N_f	N_f
AM	73.6	104.2	34.3
Cast	166.7	211.5	55.9
Al6061-T6	19,737.5	27,313.8	7375.9



Fonti: [10] Naor Elad Uzana, Roni Shnecka, Ori Yeheskelb, Nachum Fragea, Fatigue of AlSi10Mg specimens fabricated by additive manufacturing selective laser melting (AM-SLM), *Material Science & Engineering A* 704, (2017), 10/08/2017, **229-237**

[11] I. Rosenthal, R. Shneck, A. Stern, Heat treatment effect on the mechanical properties and fracture mechanism in AlSi10Mg fabricated by additive manufacturing selective laser melting process, *Material Science & Engineering A* 729, (2018), 22/05/2018, **310-322**

[12] Matúš Margetin, Vladimír Chmelko, Miroslav Sulko, Róbert Durka and Tomáš Košco, Fatigue Lifetime Analysis of a Bicycle Frame Made by Additive Manufacturing Technology from AlSi10Mg, *Metals* 2022, 12, 1277, 29/07/2022

- Sono state presentate le principali tecniche di stampa 3D per i materiali metallici, evidenziandone gli aspetti tecnici e metallurgici
- Sono state analizzate le caratteristiche meccaniche statiche e a fatica delle leghe metalliche: acciaio, titanio e alluminio

RISULTATI RILEVATI:

Acciaio:

- I campioni additive mostrano σ_a minore dei rispettivi riferimenti tradizionali, trattati e non, con risultati (a $N=5 \cdot 10^5$ cicli):
- $\sigma_a(AD-0^\circ-NT)$: -72%
- $\sigma_a(AD-90^\circ-NT)$: -33%
- $\sigma_a(AD-0^\circ-T)$: -68%
- $\sigma_a(AD-90^\circ-T)$: -61%
- I materiali additive mostrano una diversa prestazione in funzione della tipologia di prova eseguita:
- σ_a (assiale)= 210-250 MPa
- σ_a (pressione pulsante)= 350 MPa

Titanio:

- I campioni additive mostrano elevata anisotropia secondo direzione di fabbricazione ($N=5 \cdot 10^4$ cicli)
- $\sigma_a=140-150$ Mpa 0° (Z-X)
- $\sigma_a=200-210$ Mpa 90° (Y-Z e X-Y)
Risultato confermato da prove con diverse sollecitazioni
- Comportamento compatibile ad acciai tradizionali nella relazione durezza-carico di rottura
- Variazione di σ_R e ε post-trattamento analoga ad alluminio
- σ_R 0° = -15% rispetto al non trattato
- ε = da 6% NT a 16% T

Alluminio:

- Comportamento statico post trattamento termico mostra una maggiore duttilità
- $\sigma_R=140-150$ Mpa 0° (Z-X)
- ε = da 7,5% (NT) a 37,5% (HIP 500°)
- Possibile applicazione nell'ambito di telai ciclistici, ma con prestazioni sensibilmente minori:
 $N_{f\text{medio}}=-48,2\%$ rispetto ad alluminio fuso in stampo, -99,6% rispetto ad Al6061-T6, in diversi casi di sollecitazione.
- Risultato confermato da storie di carico combinate