

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 ottenuti da additive manufacturing

Tutor universitario: Prof. Alberto Campagnolo

Laureando: *De Zane Francesco*

Padova, 22/09/2023

Processo di stampa additiva:

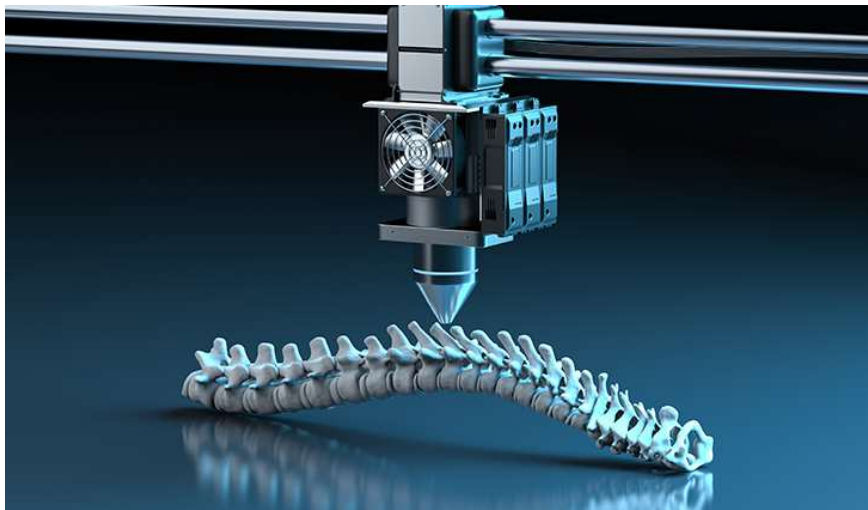
Cos'è ?

Additive manufacturing (AM) : processo che permette la creazione di oggetti, depositando del materiale fuso/in polvere e solidificandolo /sinterizzandolo grazie a degli appositi processi

Perchè?

VANTAGGI:

- Tempo di applicazione
- Tool-free process
- Assenza di limiti di design, legati alla struttura
- Sprechi di materiale ridotti
- Peso ridotto, il materiale va solo dove serve

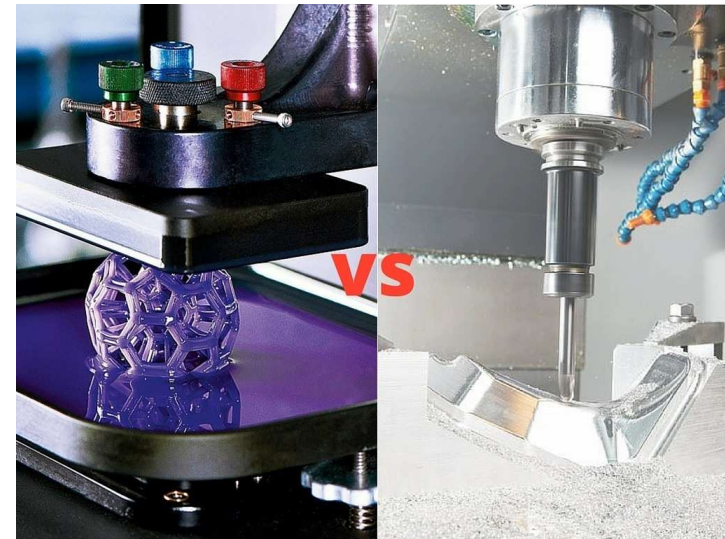


Esempio pratico: Design innovativi, processi più veloci, sprechi ridotti

OBIETTIVO FINALE

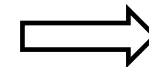
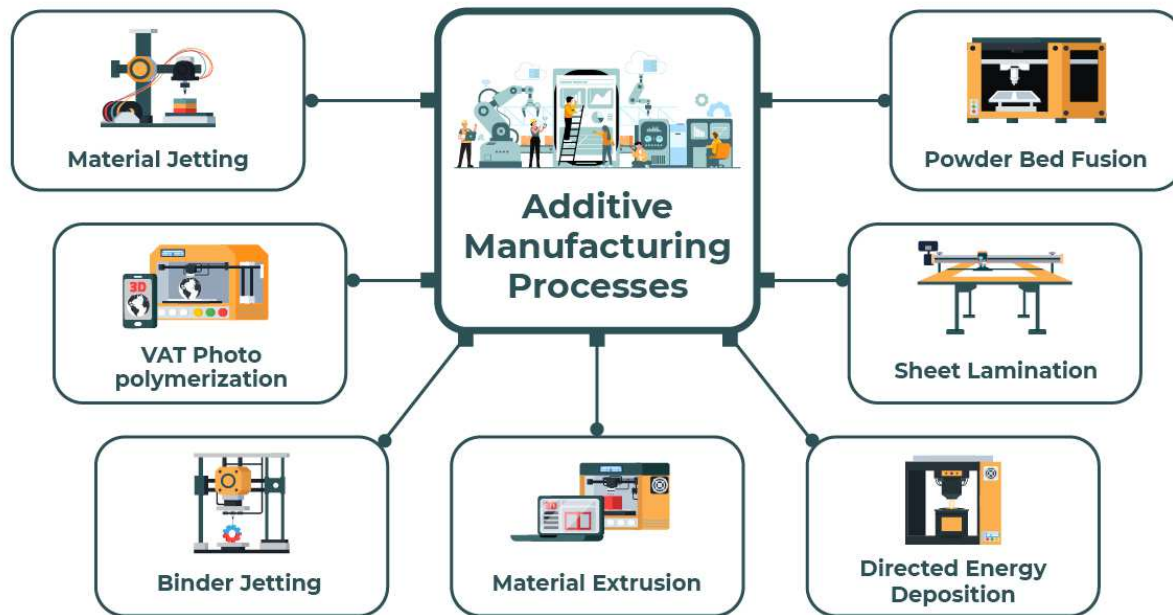
Studio di dati sperimentali e confronto diretto per caratteristiche di resistenza statica e a fatica di componenti ottenuti per AM e metodi tradizionali

Si sono confrontate 3 tipi diversi di leghe, per comprendere a pieno le caratteristiche del processo di stampa additiva ed il modo in cui si adatta al variare dei materiali.



- 316L SS (Acciaio inossidabile austenitico)
- Ti6Al4V (Lega di titanio alfa-beta)
- AlSi10Mg & Al6061 (Leghe in alluminio)

In accordo con la terminologia riportata da AM technologies by American Society for Testing and Materials (ASTM) F2792-12°, le categorie di stampa additiva sono:

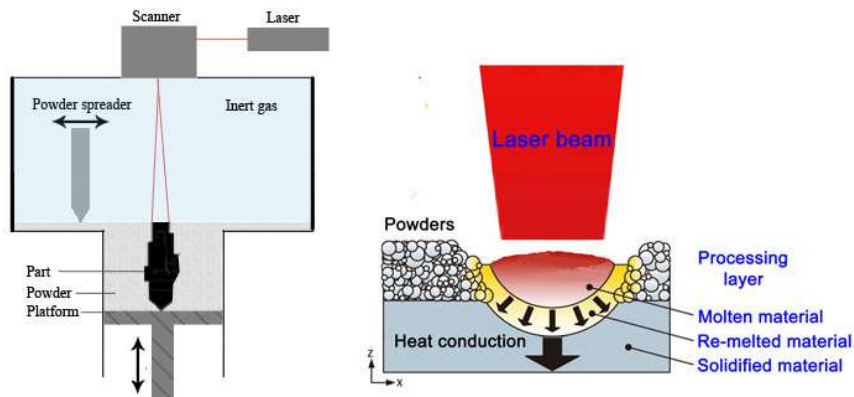


Le più utilizzate per lavorazioni con materiali metallici sono:

- Powder Bed Fusion, fusione su letto di polvere: comprendono le lavorazioni più note LBM e EBM.
- DED (Direct Energy Deposition)

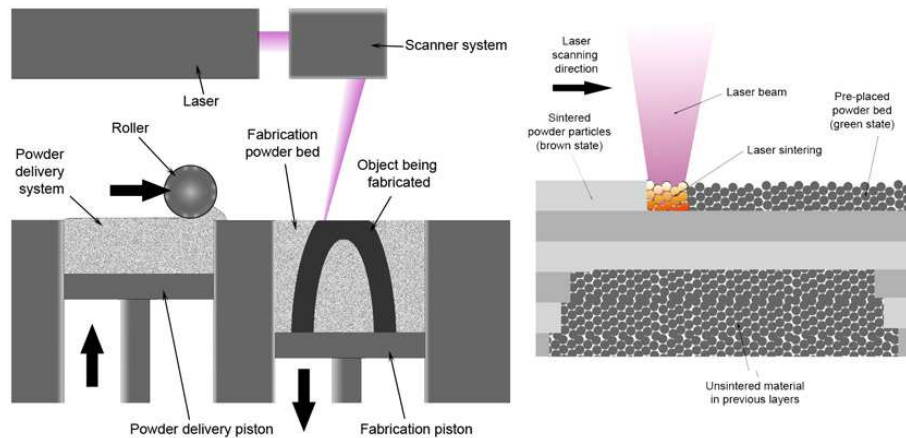
La principale differenza tra i due è che PBF suddivide la deposizione/fusione in 2 distinti passaggi, mentre DED fonde la polvere metallica nel momento in cui viene depositata.

Nel 2002, in Germania, è stato ufficialmente collaudato l'utilizzo della fusione laser per materiali metallici (SLM) da Fraunhofer Institute for Laser Technology.



SLM

Selective Laser Melting: fusione totale del layer depositato tramite l'interazione con la sorgente laser



SLS

Selective Laser Sintering: sinterizzazione delle polveri metalliche depositate, che si legano tra loro senza portare a fusione l'intero layer. La sinterizzazione si distingue dalla fusione per la temperatura a cui avviene il processo.

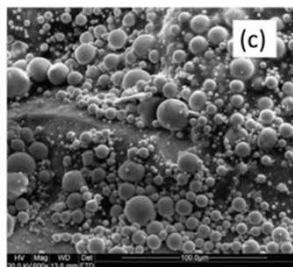
Jouan Pou, Antonio Riveiro, J. Paulo Davim, (2021), "Additive Manufacturing: Introduction to additive manufacturing"

Perdita di elementi in lega:

vaporizzazione di elementi in lega, nei casi in cui le temperature del bagno di fusione siano molto elevate

Finitura superficiale:

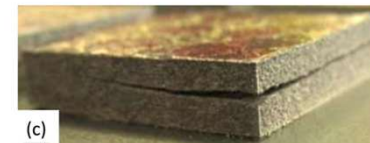
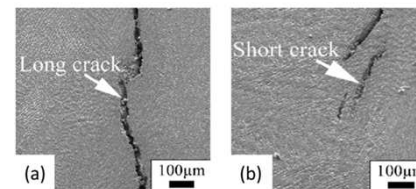
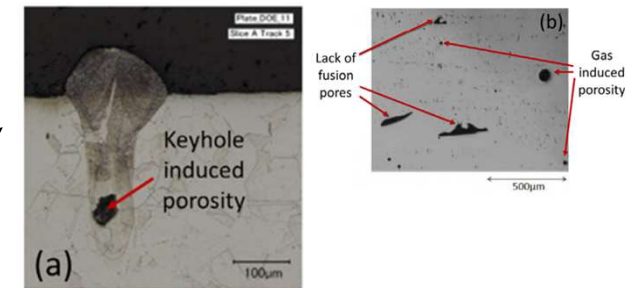
- Stair step
- Balling phenomenon



DIFETTI COMUNI

Porosità e mancanza di fusione:

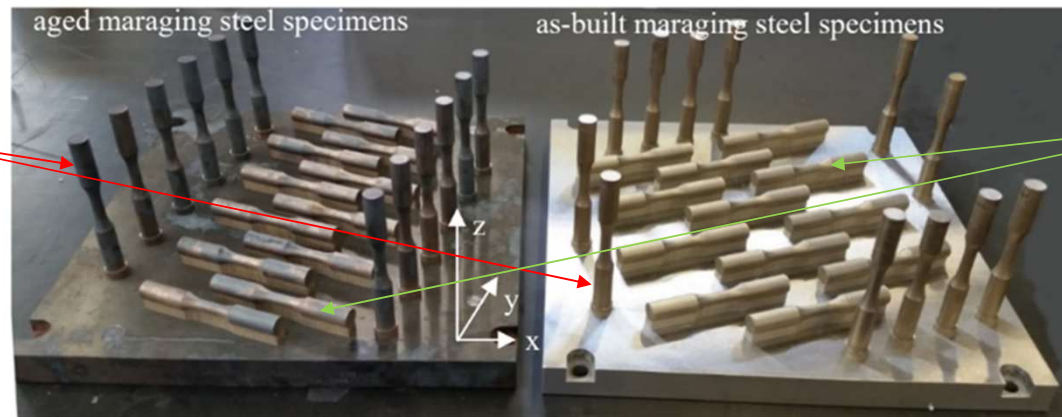
- Keyhole porosity
- Gas intrappolato nel processo di atomizzazione



Cricche e delaminazione:

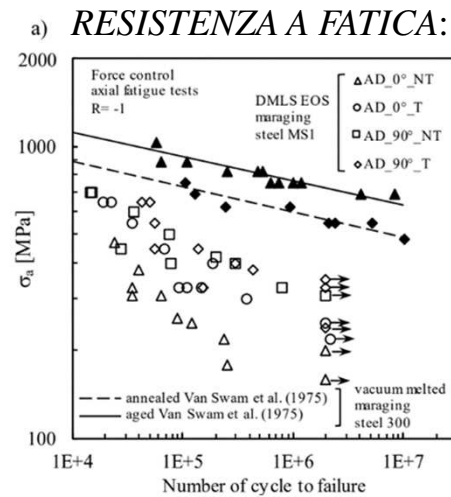
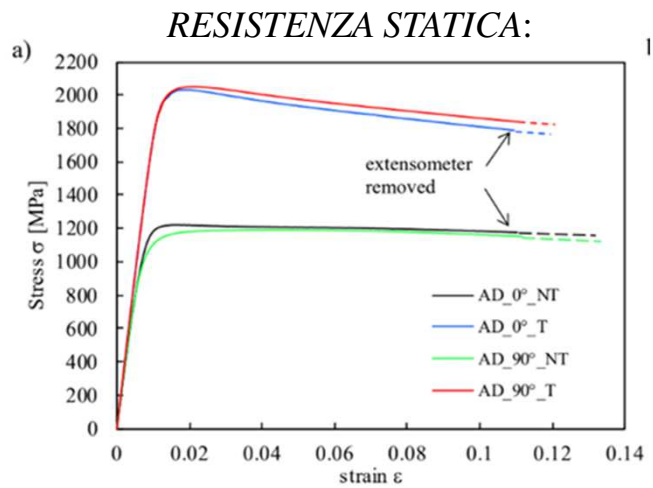
- Contrazione da solidificazione e termica
- Crepe da liquazione
- Delaminazione

AD_0°: orientazione di costruzione parallelo all'asse Z.



AD_90°: orientazione di costruzione ortogonale all'asse Z

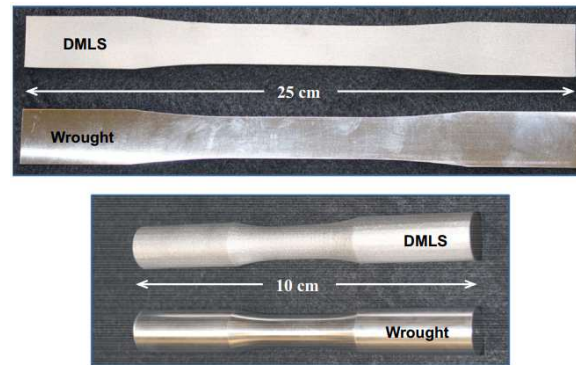
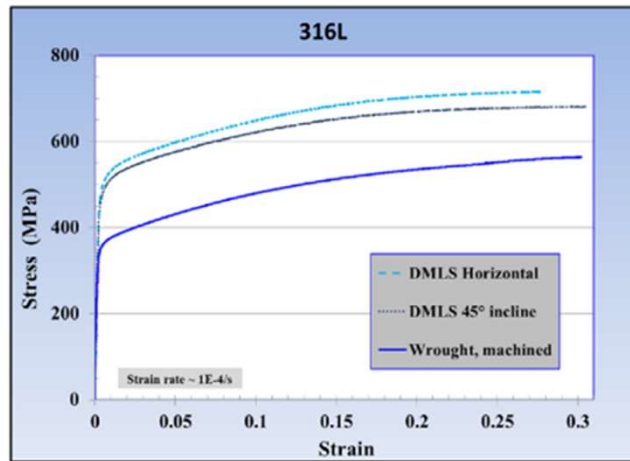
www.dii.unipd.it



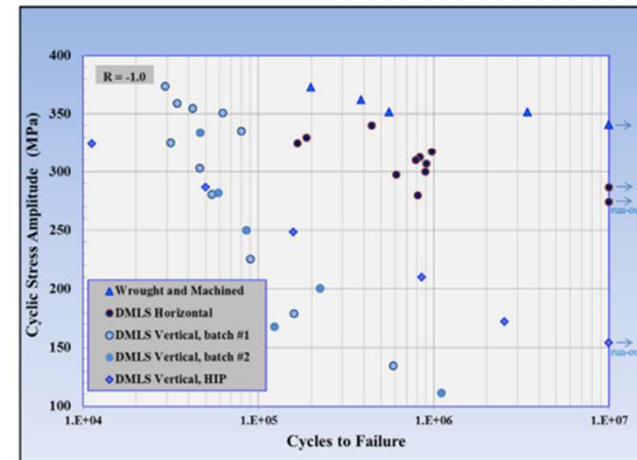
Conclusioni in breve:
resistenza statica: non è profondamente influenzata dall'orientazione di costruzione. Ciò che determina una apprezzabile differenza di resistenza è il trattamento dei provini. (NT=Non trattato termicamente, T=Trattato termicamente)
resistenza a fatica: non presenta un risultato univoco. In questo caso provini AD_90°_T & AD_90°_NT risultano più resistenti ma non viene rilevato un comportamento lineare.

[6] G. Meneghetti, D. Rigon, D. Cozzi, W. Waldhauser, M. Dabalà, (2017), "Influence of build orientation on static and axial fatigue properties of maraging steel specimens produced by additive manufacturing"
 Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

CONFRONTO STATICO:



CONFRONTO PER RESISTENZA A FATICA:



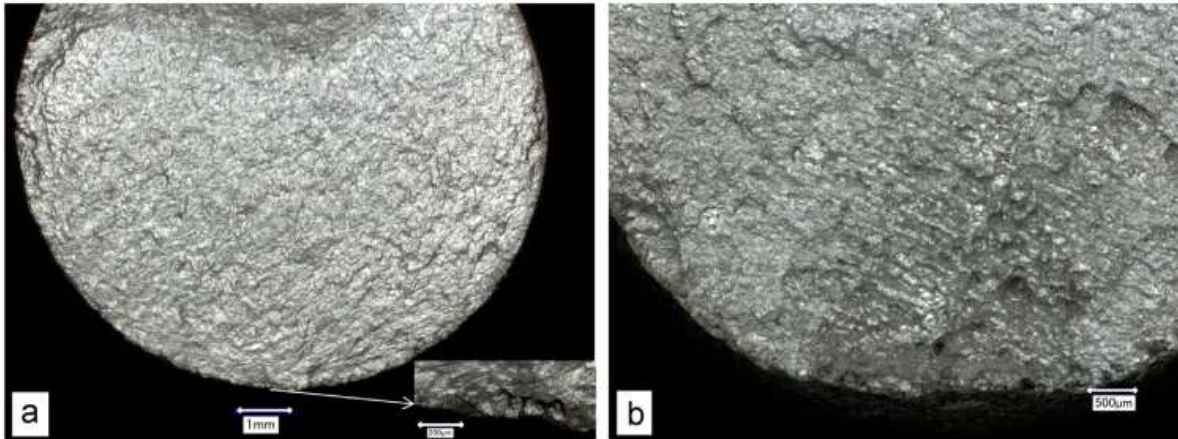
Material	Modulus (GPa)	Yield (MPa)	Ultimate (MPa)	Failure Strain
Wrought 316L	187	345	563	0,30
DMLS316L-Horizontal	180	496	717	0,28
DMLS 316L-45° Incline	193	473	680	0,30

I provini ottenuti per AM presentano proprietà resistenti statiche più elevate, duttilità generalmente peggiore.

- I provini ottenuti per lavorazioni convenzionali riportano una resistenza alla fatica di 350 MPa a 10⁵ cicli. Problema sull'affidabilità dei provini, deviazione standard molto elevata per i provini AM.
- Provini con deposizione di layer verticali presentano una resistenza a fatica che corrisponde a circa il 30% di quella generata dai provini ottenuti per deposizione orizzontale.
- Provini ottenuti con orientazione dei layer orizzontali, presentano una riduzione di resistenza a fatica del 15% rispetto ai provini lavorati.

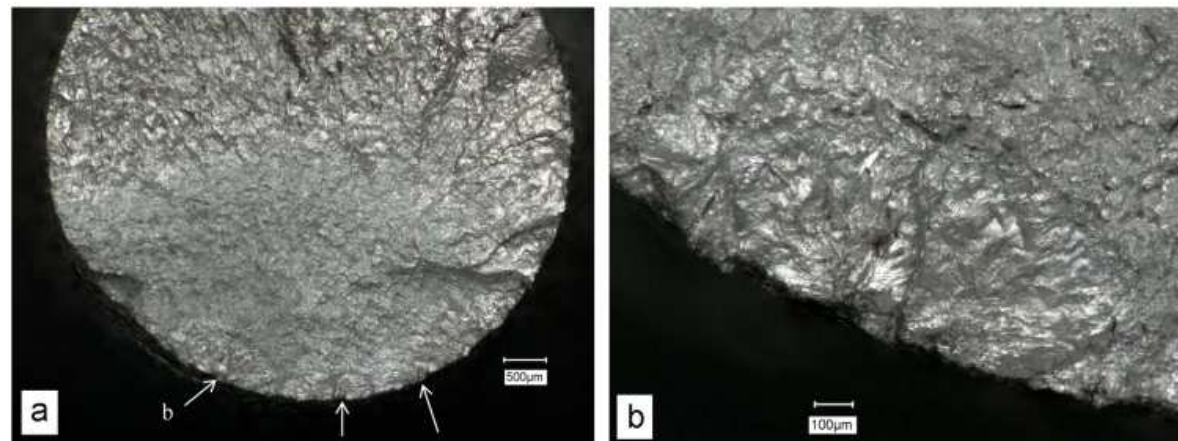
[9] Todd M. Moner, Michael J. Long, (2015), "Mechanical behavior of additive manufactured, powder bed laser fused materials"

SUPERFICIE DI FRATTURA A FATICA DI UN PROVINO DMLS 316L SS



Superficie di frattura di un provino as built
a)costruito orizzontalmente, b)costruito verticalmente.
Caratteristiche:

- Frattura piatta, tipica di materiali fragili
- Entrambe iniziate da difetti superficiali, causa di rugosità più elevate



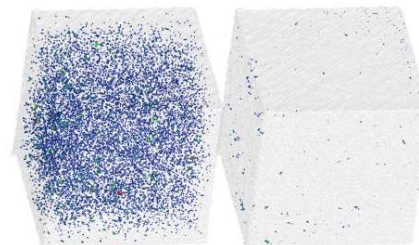
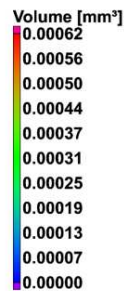
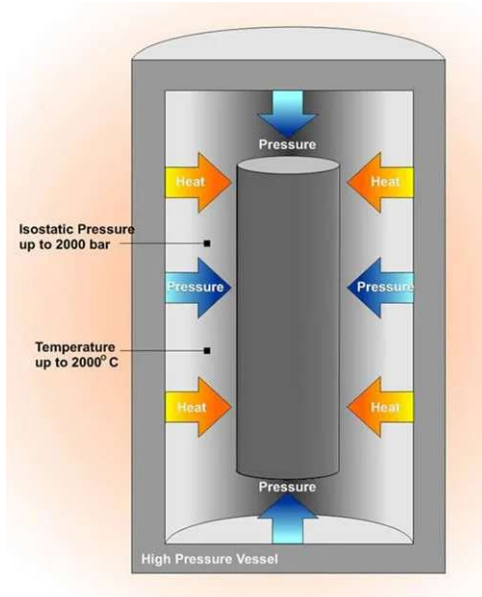
Superficie di frattura di un provino trattato HIP
costruito verticalmente
Caratteristiche:

- Frattura NON piatta
- Visibili le cause primarie (difetti superficiali) che si collegano tra loro per inizializzare la frattura (b)

HIP: Hot Isostatic Pressing

processo entro il quale il materiale viene sottoposto ad un'elevata pressione isotropa in un ambiente a temperatura elevata, le caratteristiche dei provini sviluppati verticalmente migliorano perché migliora l'adesione tra i layer sovrapposti

il trattamento HIP riporta notevoli miglioramenti per alti numeri di cicli, mentre le caratteristiche per cicli medio-bassi rimangono quasi invariate. Il motivo è che l'HIP consente la riduzione dei difetti caratteristici dei componenti ottenuti per AM (porosità) che risultano influire soprattutto nella resistenza a fatica ad alti cicli.

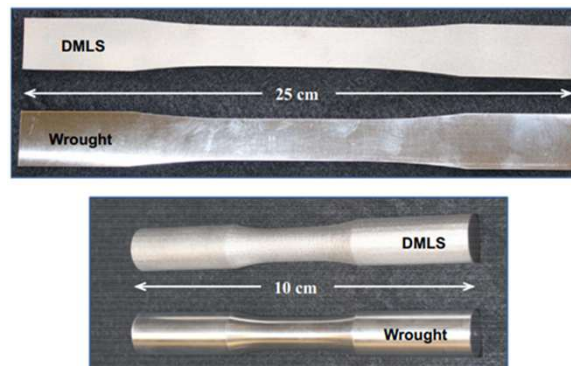
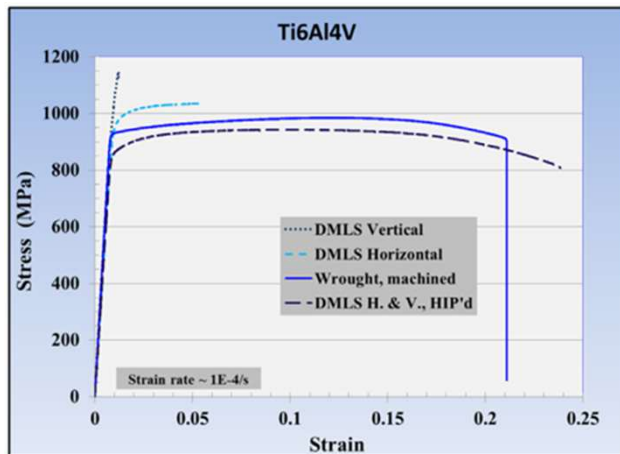


1.5 mm

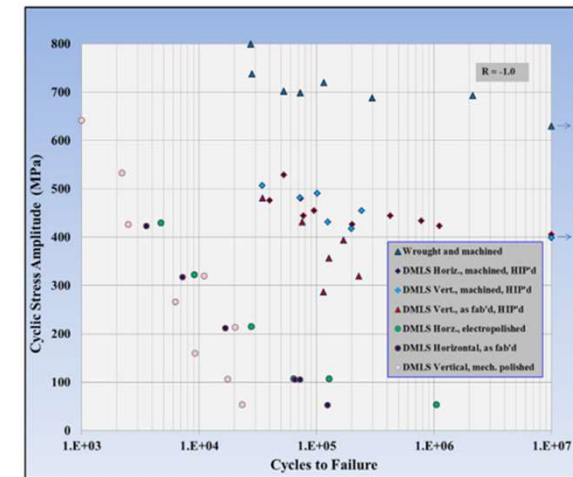
Prima e dopo l'applicazione di HIP. Porosità 0.6%, i punti blu rappresentano i pori di dimensioni rappresentati nella legenda a lato.

[9] Todd M. Moner, Michael J. Long, (2015), "Mechanical behavior of additive manufactured, powder bed laser fused materials"

CONFRONTO STATICO:



CONFRONTO PER RESISTENZA A FATICA:



www.dii.unipd.it

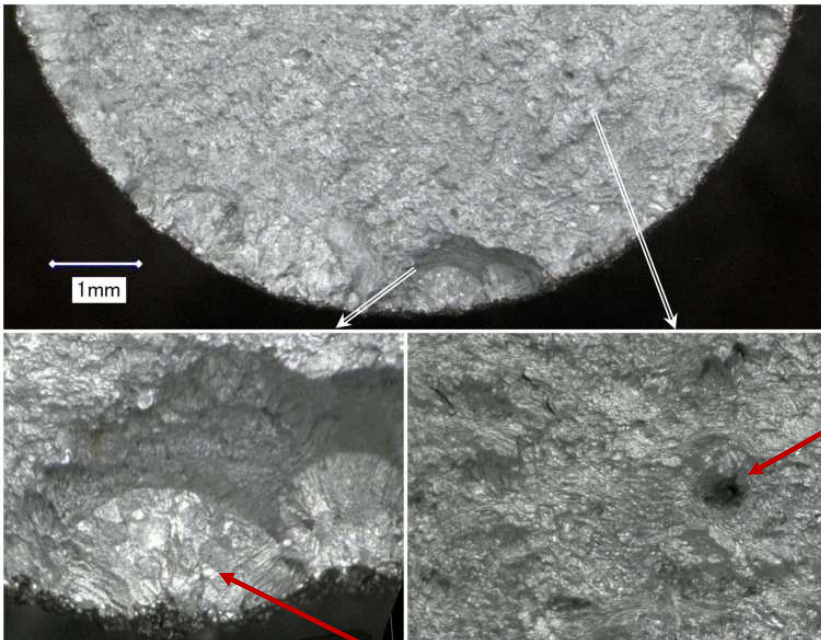
Material	Modulus (GPa)	Yield (MPa)	Ultimate (MPa)	Failure Strain
Wrought Ti6Al4V	113,1	945	979	0,1
DMLS Ti6Al4V-Horizontal	108,8	972	1034	0,055
DMLS Ti6Al4V-Vertical	114,9	1096	1130	0,012
DMLS Ti6Al4V-HIP (Hor & Vert)	111,7	862	931	0,24

- Mentre il materiale ottenuto per metodi tradizionali (wrought, machined) riporta una deformazione a rottura di circa 0,21 per una $R_m \cong 1000 \text{ MPa}$, i provini costruiti in AM per layer disposti orizzontali e verticali riportano una resistenza maggiore (1050-1200 MPa) ma deformazioni minime se confrontate con gli altri provini (0,01-0,03).

- Il materiale ottenuto per AM non trattato, presenta delle caratteristiche di resistenza a fatica talmente basse da non poter essere utilizzato per alcuna applicazione
- I provini ottenuti per DMLS, lavorati e sottoposti al trattamento HIP mostrano una resistenza del 70% circa rispetto a quelli ottenuti per metodi tradizionali
- provini non sottoposti ad alcun trattamento la resistenza a fatica ad alto numero di cicli ($N > 10^5$) è abbondantemente inferiore ai 100 MPa ($\sigma_a < 100 \text{ MPa}$) mentre per i provini sottoposti ad HIP non lavorati superficialmente $\sigma_a > 300 \text{ MPa}$. Superfici di rottura a fatica mostrate nella prossima slide.

[9] Todd M. Moner, Michael J. Long, (2015), "Mechanical behavior of additive manufactured, powder bed laser fused materials"

SUPERFICIE DI FRATTURA A FATICA DI UN PROVINO DMLS Ti6Al4V

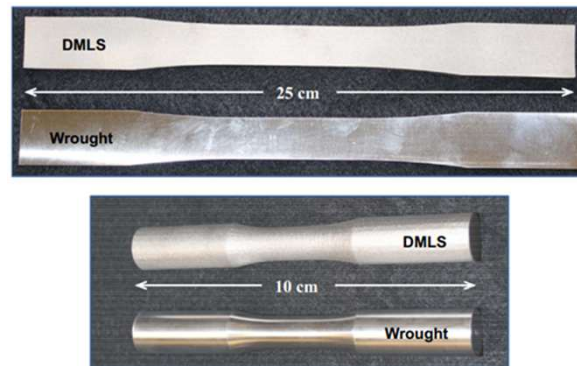
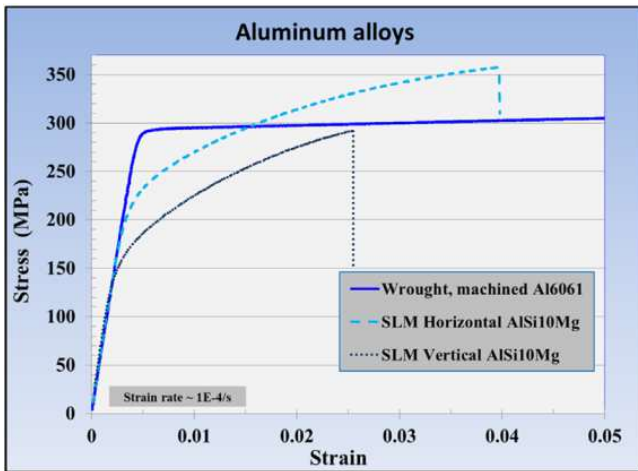


Porosità interna, classificata come secondary internal cracking

Sito di innesco, principale causa della rottura del provino

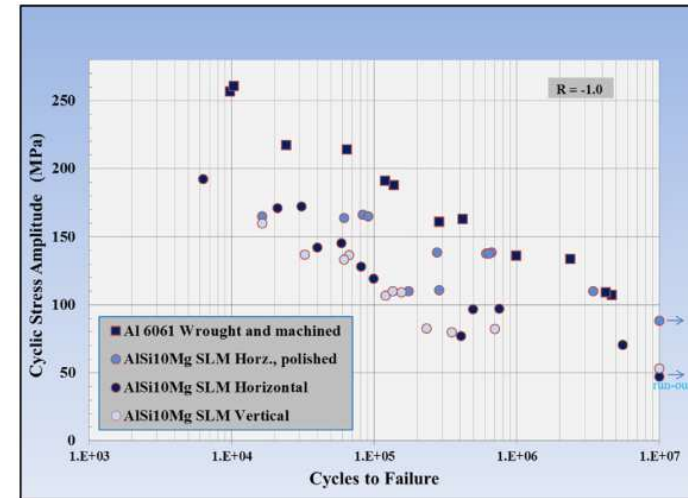
[9] Todd M. Moner, Michael J. Long, (2015), "Mechanical behavior of additive manufactured, powder bed laser fused materials"

CONFRONTO STATICO:



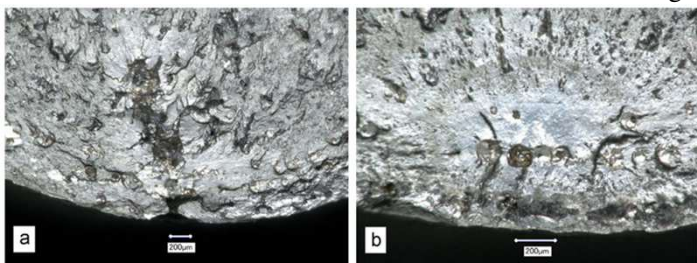
- Comportamento plastico, tipico delle leghe di alluminio
- tensioni di snervamento, per l' Al6061 sono state rilevate $\sigma_y = 293 \text{ MPa}$.
- AlSi10Mg: $\sigma_{y\text{-orizz}} = 227 \text{ MPa}$, $\sigma_{y\text{-vert}} = 172 \text{ MPa}$.

CONFRONTO PER RESISTENZA A FATICA:



- Per $N \cong 2 \cdot 10^4$ si trovano rotture di provini a circa la stessa ampiezza di carico ($\sigma_{a,10^4,-1} \cong 160 \text{ MPa}$), mentre per $N > 10^5$ si verifica l'incremento di resistenza dei provini lucidati.
- Nei campioni in cui la lucidatura ha migliorato il comportamento a fatica, è stato messo in evidenza che la rottura è stata inizializzata da difetti presenti in sub-strati

SUPERFICIE DI ROTTURA DI PROVINI SLM AlSi10Mg LUCIDATI



- a) Innesco cricca superficiale
- b) Innesco cricca in sub-superficie

[9] Todd M. Moner, Michael J. Long, (2015), "Mechanical behavior of additive manufactured, powder bed laser fused materials"

Pistoni montati sul modello 911 GT2 RS di Porsche

VANTAGGI:

- Peso ridotto del 10% sul singolo pistone
- Prestazioni generali migliorate, potenza erogata sul banco aumentata di 30cv.
- Aggiunta di una conduttura refrigerante posta dietro agli anelli del pistone

SVANTAGGI:

- Costo della lega utilizzata
- Tempo di produzione (12 ore/pezzo)
- Capacità produttiva ancora ridotta



<https://media.porsche.com/mediakit/porsche-innovationen/en/porsche-innovationen/3d-printed-pistons>

Resistenza statica :

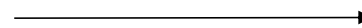
Risulta sempre maggiore nei provini ottenuti per stampa additiva, a discapito della duttilità.



Posso sottoporre i provini a trattamenti termici per guadagnare duttilità e ottenere un buon compromesso

Resistenza a fatica :

Per provini AM non trattati è sempre minore di decine di punti %, dipende strettamente dalla lega in analisi.
I risultati si distaccano per $N > 10^5$ cicli.



Trattamento HIP migliora la microstruttura, aumenta l'adesione tra layer con compressione ad alta temperatura, permette la riduzione di porosità.

Perché SI? Al netto delle analisi sperimentali

- Sprechi di materiale ridotti fino al 90%, polvere recuperata
- Resistenza statica maggiore
- Peso ridotto

Perché NO? Al netto delle analisi sperimentali

- Duttilità ridotta, necessità di trattamenti termici che non alterino le dimensioni nominali
- Resistenza a fatica sempre minore
- Rotture non lineari, deviazione standard nella curva di Wohler molto elevata
- Trattamenti termici obbligatori per resistenza a fatica

Perché è considerata la tecnologia di produzione futura?

- Vantaggi pratici introdotti
- Potenzialità di sviluppo trainate da investimenti da parte delle maggiori aziende, leader mondiali
- Riduzioni estreme di scarti di materiale, fino al 90% rispetto alle lavorazioni per asportazione di truciolo
- Riduzione del peso e aumento prestazioni per componenti progettati a sollecitazioni
- Unico processo, si evitano le catene di produzione, processi più veloci
- Costi manutenzione e mantenimento minori

