



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE  
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

---

**CONFRONTO DELLA MICROSTRUTTURA E DELLE PROPRIETÀ  
MECCANICHE DI STRUTTURE RETICOLARI IN ACCIAIO INOX  
316L REALIZZATE CON TECNOLOGIA LPBF**

**COMPARISON OF THE MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL  
PROPERTIES OF LATTICE STRUCTURES IN 316L STAINLESS  
STEEL PRODUCED USING LPBF TECHNOLOGY**

Relatore:

**Prof. Marcello Cabibbo**

Correlatore:

**Alberto Santoni**

Tesi di Laurea di:

**Luca Casadei**

A.A. 2024/2025

# INDICE

INTRODUZIONE	1
<b>1. Panoramica generale Metal Additive Manufacturing</b>	<b>2</b>
1.1 Morfologia della polvere	2
1.2 Tecnologia ME	4
1.2.1 Processo ME	4
1.3 Tecnologia BJ	5
1.3.1 Processo BJ	6
1.4 Tecnologia PBF	8
1.4.1 Processo PBF	9
1.5 Tecnologia DED	11
1.5.1 Processo DED	12
<b>2. Strutture Reticolari</b>	<b>14</b>
2.1 Progettazione nella Additive Manufacturing	14
2.2 Strutture reticolari	14
2.3 Difetti strutture reticolari SLM	18
2.4 Strutture reticolari in ambito Biomedico	19
<b>3. Caratterizzazione pozza di fusione</b>	<b>20</b>
<b>4. Difetti nelle AM dei metalli</b>	<b>22</b>
4.1 Porosità	22
4.2 Mancata fusione (Lack of Fusion)	23
4.3 Balling	24
4.4 Tensioni residue e fessurazioni	24
<b>5. Ottimizzazione del processo</b>	<b>25</b>
5.1 Morfologia dei grani	25
5.2 Ottimizzazione struttura dei grani	26
<b>6. Acciaio inox 316L</b>	<b>27</b>
6.1 Crescita grani 316L con tecnologia SLM	27
<b>7. Metodi post-elaborazione</b>	<b>29</b>
7.1 Pressatura isostatica a caldo	29

7.2 Ricottura	30
<b>8. Considerazioni generali</b>	<b>33</b>
<b>9. Caso studio</b>	<b>33</b>
9.1 Procedure sperimentali	33
9.1.1 Caratterizzazione dei vuoti	34
9.1.2 Microdurezza	35
9.1.3 Macchine e strumenti utilizzati	36
9.1.4. Risultati ottenuti	43
<b>Conclusioni</b>	<b>55</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>56</b>

# INTRODUZIONE

I processi produttivi stanno attraversando una trasformazione radicale, guidata dall'integrazione di tecnologie avanzate e dalla crescente richiesta di prodotti sempre più sofisticati, in linea con l'avvento di quella che è spesso definita "Industria 4.0". Al centro di questa quarta rivoluzione industriale troviamo l'Additive Manufacturing, una tecnica innovativa che consente la produzione di geometrie complesse mediante la sovrapposizione di strati successivi di materiale. I componenti metallici realizzati attraverso questa tecnologia tendono a presentare microstrutture più raffinate rispetto a quelli ottenuti con metodi tradizionali. Le tecniche di Additive Manufacturing applicate ai metalli, note come Metal Additive Manufacturing (MAM), si basano su un principio opposto rispetto alla produzione sottrattiva: il materiale di base, che può essere sotto forma di polvere o filo, viene fuso o legato strato dopo strato seguendo le indicazioni di un modello CAD (Computer-Aided Design). L'impiego della MAM nell'industria aeronautica, ad esempio, ha permesso di ridurre le 300 parti che compongono lo scambiatore di calore del motore GE9X per il Boeing 777× a un unico componente, che risulta il 40% più leggero e il 25% più economico [6].

Ci sono situazioni in cui la Metal Additive Manufacturing (MAM) risulta particolarmente adatta a diverse applicazioni, offrendo chiari vantaggi tecnici rispetto ai metodi di produzione tradizionali (Traditional Manufacturing). Ad esempio, nei processi tradizionali, il costo di fusione o lavorazione di un prodotto è strettamente legato alla sua complessità. Invece, nella MAM, la creazione di una parte 3D attraverso la deposizione di materiale strato per strato elimina molte delle limitazioni imposte dai metodi convenzionali. Per questo motivo, la MAM è spesso definita come un processo in cui la complessità non comporta costi aggiuntivi. Risulta particolarmente vantaggiosa per la realizzazione di componenti con geometrie intricate o strutture interne a reticolo, simili a quelle presenti nei materiali naturali, come la porosità interna di un osso. Questo approccio consente una significativa riduzione della massa del componente, poiché il materiale viene posizionato solo dove è realmente necessario dal punto di vista strutturale. Di conseguenza, si riduce la quantità di materiale impiegato, i tempi di produzione e si migliora l'efficienza energetica del processo.

È risaputo che alcune leghe possono essere particolarmente difficili da lavorare utilizzando metodi tradizionali. Un esempio tipico sono le superleghe a base di nichel, che risultano difficili da lavorare meccanicamente a causa della loro resistenza alle forze di taglio, trazione e compressione. La Metal Additive Manufacturing (MAM), invece, consente di stampare molti di questi materiali ostici senza dover ricorrere a utensili costosi. Stampando componenti near net shape (NNS), ovvero parti geometricamente vicine alla forma finale, è possibile ridurre significativamente i costi di produzione.

Attraverso gli studi condotti sulle tecnologie additive sono emerse diverse limitazioni legate a modalità di guasto, come la bassa plasticità e la ridotta resistenza alla fatica. Questi problemi sono stati in parte attribuiti a discontinuità microstrutturali causate da difetti quali alte tensioni residue (RS), rugosità superficiale, mancanza di fusione (Lack of Fusion), elevata porosità, restringimenti e distorsioni. I meccanismi che generano tali difetti sono collegati alle complesse sollecitazioni termiche che le parti metalliche subiscono durante il processo di stampa, come il rapido riscaldamento, raffreddamento e solidificazione. I parametri di processo possono influenzare in modo significativo la comparsa di questi difetti; tra i principali fattori figurano lo spessore dello strato (Layer Thickness), l'orientamento di costruzione, la potenza di ingresso, la velocità di scansione, la distanza tra le linee, la densità di riempimento e la strategia di scansione utilizzata.

In linea generale, i processi MAM si suddividono in sette categorie principali:

- **Estrusione di materiale** (Material Extrusion - ME),
- **Getto di legante** (Binder Jetting - BJ),
- **Fusione a letto di polvere** (Powder Bed Fusion - PBF),
- **Deposizione di energia diretta** (Direct Energy Deposition - DED),
- Laminazione di fogli
- Polimerizzazione in vasca.

Questa tesi si propone di analizzare in dettaglio i principali aspetti dell'Additive Manufacturing, con particolare attenzione alle tecnologie LPBF (fusione laser a letto di polvere). L'obiettivo è studiare le caratteristiche microstrutturali, inclusi i difetti, e le proprietà meccaniche di campioni di strutture reticolari realizzati in acciaio inox 316L mediante la tecnologia sopra citata, sia prima che dopo l'applicazione di un trattamento termico post-processo.

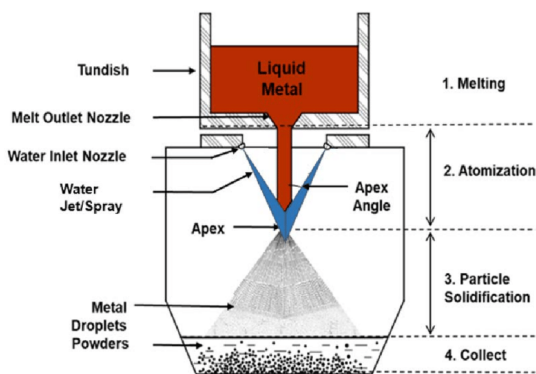
# **1. Panoramica generale Metal Additive Manufacturing**

## **1.1 Morfologia della polvere**

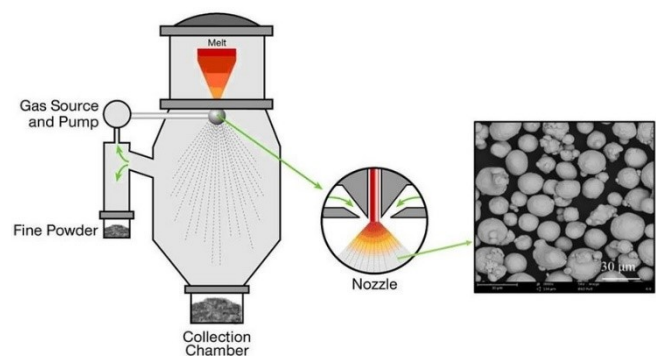
I sistemi di MAM (Metal Additive Manufacturing) richiedono un materiale di alimentazione metallico, questo può essere a filo o, nella maggior parte dei casi, a polvere e viene poi fuso e depositato su un substrato dando inizio così al processo di stampa. Un fattore cruciale per garantire la precisione e la qualità del pezzo finale è lo sviluppo adeguato della polvere di lega. La morfologia della polvere metallica gioca infatti un ruolo chiave nella qualità del prodotto stampato, e per questo motivo è essenziale che la geometria, la composizione e la fluidità della polvere siano costanti. Il metallo atomizzato utilizzato nella produzione additiva deve avere una corretta dimensione specifica

per assicurare un buon comportamento di impaccamento e minimizzare la porosità. Nella fusione a letto di polvere laser (LPBF), la distribuzione media delle dimensioni delle particelle è solitamente compresa tra 10 e 45  $\mu\text{m}$ , inoltre la fluidità della polvere migliora all'aumentare della sfericità delle particelle. Tuttavia, una polvere eccessivamente fluida può causare difetti, per cui una leggera rugosità o irregolarità nella forma delle particelle può essere utile per mantenere la polvere stabile durante la deposizione.

I metodi più comuni per polverizzare il metallo nell'industria sono l'atomizzazione a gas e l'atomizzazione ad alta pressione con acqua. In entrambi i casi, il metallo fuso viene fatto passare attraverso un ugello e messo a contatto con un flusso di fluido ad alta pressione, che lo divide in piccole particelle raffreddandolo rapidamente. Le polveri atomizzate con acqua sono generalmente meno costose rispetto a quelle atomizzate con gas, ma tendono ad avere una forma irregolare, che può influire negativamente sulla fluidità e sulla qualità del prodotto finale. Questo è dovuto al raffreddamento rapido e all'impatto energetico del getto d'acqua sul flusso di metallo fuso. L'atomizzazione a gas, che utilizza solitamente vapore, aria naturale o gas inerti, è invece preferita per produrre polveri di alta qualità, caratterizzate da un'elevata sfericità, purezza e un basso contenuto di ossigeno.



**Fig. 1** Atomizzazione ad alta pressione con acqua

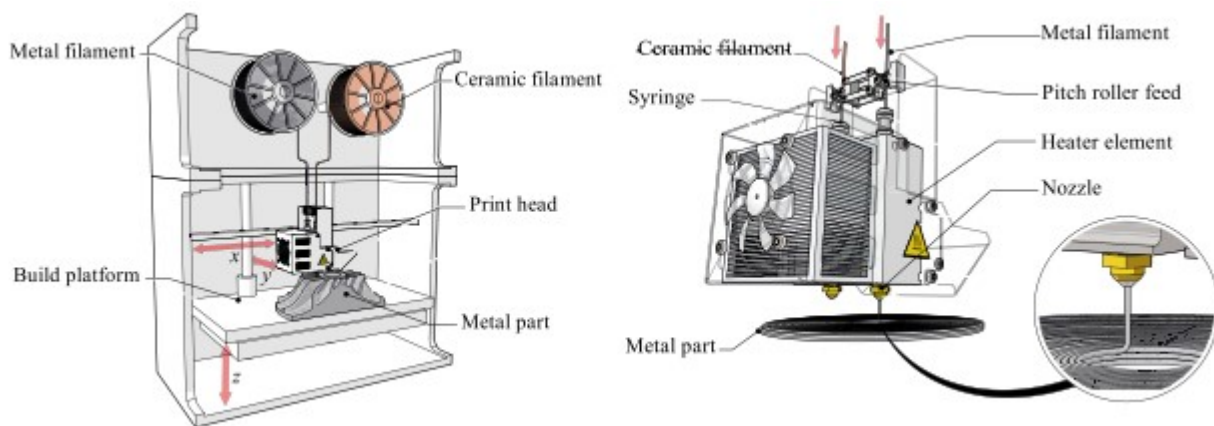


**Fig. 2** Atomizzazione a gas

## 1.2 Tecnologia ME

Uno dei metodi più economici per la stampa di componenti metallici è l'estrusione di metallo (ME - Metal Extrusion), che non utilizza polvere o filo. In questo processo, le particelle di polvere metallica vengono incorporate in un filamento polimerico. Il materiale di alimentazione ME viene estruso attraverso un ugello riscaldato e depositato strato per strato su una piastra di costruzione per creare il pezzo. Questo metodo richiede due fasi di post-elaborazione: prima la rimozione del legante e poi la sinterizzazione del pezzo.

Nel 2020, il mercato dell'estrusione di metallo ha rappresentato il 10% delle vendite totali nel settore della produzione additiva (MAM) [1]. Rispetto ad altre tecnologie, l'estrusione di metallo è considerata più efficiente dal punto di vista energetico, in quanto non richiede l'uso di laser ad alta energia.



*Fig. 3 Stampante Metal Extrusion [6]*

### 1.2.1 Processo ME

La tecnologia di estrusione di metallo (ME) si basa sull'estrusione di materiale per realizzare componenti 3D. Le macchine ME utilizzano un materiale di alimentazione flessibile, che consiste in polveri metalliche legate all'interno di una matrice polimerica che agisce da legante. In una macchina ME tipica, il materiale di alimentazione e un materiale di rilascio ceramico, conservato su bobine separate, vengono estrusi all'interno di una camera riscaldata. Il materiale di alimentazione viene riscaldato a una temperatura superiore al punto di fusione dei leganti polimerici tramite una testa di stampa riscaldata, che poi estrude il materiale ammorbidito su una piastra di costruzione riscaldata. La piastra di costruzione si muove lungo l'asse verticale (z), permettendo all'estrusione di avvenire in strati separati e equidistanti dai precedenti. Nel frattempo, la testa di stampa, si muove nel piano orizzontale (x, y) per depositare il materiale. Durante il processo, il materiale di rilascio ceramico

viene depositato tra il componente e qualsiasi struttura di supporto a sbalzo, nonché tra il componente e la piastra di costruzione, facilitando così la separazione dopo la stampa. L'estrusione a strati può portare all'anisotropia, poiché i vuoti introdotti tra i vari depositi possono compromettere l'adesione tra gli strati. Inoltre, il processo di Metal Extrusion tende a produrre parti con finiture superficiali non eccellenti a causa del profilo circolare dell'ugello. Questo profilo comprime e deforma la polvere legata in una forma quasi ellittica rispetto allo strato sottostante. Di conseguenza, le parti prodotte con la tecnologia di estrusione del metallo spesso presentano profili laterali ondulati e intagli tra gli strati. Queste imperfezioni possono generare concentrazioni di stress indesiderate che compromettono la resistenza dei legami e possono rendere il componente suscettibile a cedimenti prematuri, in particolare nel piano parallelo alla direzione del carico e all'orientamento di costruzione. Inoltre, lo spessore dello strato può influenzare significativamente l'insorgere di tali problemi.

Successivamente alla parte stampata, nota come "verde" (una fase in cui il componente che non ha ancora subito trattamenti post-processo necessari per raggiungere la forma e le proprietà finali), viene rimosso il legante attraverso un processo chiamato "debinding". Il pezzo fragile e parzialmente legato viene collocato in una macchina di debinding riscaldata, dove una parte del sistema di legatura viene dissolta in un solvente. I sistemi di legatura, che possono influenzare il processo di produzione e la qualità del componente finito, sono generalmente composti da tre componenti: polimeri, cere e additivi, e possono essere suddivisi in nucleo, spina dorsale e additivo.

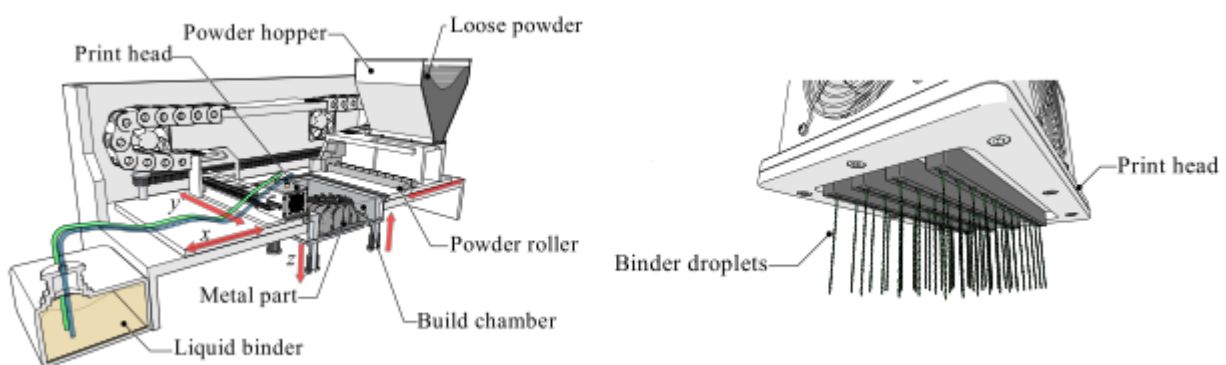
Durante la fase iniziale del debinding, il componente principale (nucleo) viene dissolto, lasciando solo la spina dorsale, portando così il componente in uno stato definito 'marrone' (una fase intermedia in cui il legante è stato rimosso, ma la parte è ancora altamente porosa). Successivamente, il pezzo viene posto in un forno e riscaldato gradualmente fino al 70–90% del punto di fusione del metallo (processo di sinterizzazione). Quando la temperatura raggiunge il punto di fusione del metallo, avviene la diffusione atomica tra le particelle metalliche, portando alla formazione di legami solidi, riducendo la porosità e trasformando la polvere metallica leggermente legata in un componente metallico densificato al 96–99,8%. Questo processo di densificazione comporta una riduzione delle dimensioni della parte del 12–20%.

### **1.3 Tecnologia BJ**

Le tecnologie di Binder Jetting (BJ) producono pezzi utilizzando una testa di stampa simile a quella delle stampanti 2D, che deposita gocce di legante liquido strato per strato. Questa tecnologia presenta due vantaggi principali: la possibilità di utilizzare più teste di stampa contemporaneamente per lavorare su diverse aree e la capacità di produrre un numero ridotto o moderato di pezzi identici.

Come le tecnologie di estrusione di metalli (ME) anche le macchine BJ utilizzano risorse molto inferiori, poiché non sono necessari laser o fasci di elettroni. Questo le rende una soluzione a basso costo per la produzione di geometrie complesse utilizzando vari metalli e ceramiche.

Nel processo di Binder Jetting, la testina di stampa deposita selettivamente il legante liquido su un letto di polvere per ciascun strato. Un dispositivo chiamato re-coater stende uno strato fresco di polvere per il successivo strato da legare. Dopo la deposizione, il legante può essere parzialmente polimerizzato tra gli strati, conferendo sufficiente resistenza per la rimozione immediata dopo la stampa, oppure può richiedere un'asciugatura completa e una polimerizzazione fino a 12 ore prima di essere rimosso dal letto di polvere.



*Fig. 4 Stampante Binder Jetting [6]*

### **1.3.1 Processo BJ**

Il processo, eseguito a temperatura ambiente, aiuta a eliminare difetti termicamente indotti, come la crescita indesiderata dei grani e le distorsioni, che sono comuni in altri processi MAM che dipendono da fonti di calore. Inoltre, la polvere metallica circostante funge da supporto temporaneo, riducendo la necessità di strutture di supporto e, di conseguenza, minimizzando gli scarti di produzione.

Inizialmente, uno strato sottile di polvere metallica, fornito da una tramoggia, viene depositato sulla piattaforma di costruzione tramite il re-coater. Successivamente, attraverso la testina di stampa a getto d'inchiostro, gocce di legante liquido vengono depositate selettivamente sulla polvere esistente. L'azione combinata della pressione capillare e delle forze gravitazionali costringe ogni goccia di legante a penetrare e fluire nei vuoti tra le particelle di polvere metallica, assicurando così una distribuzione uniforme.

La distribuzione del legante rispetto alla polvere, nota come livello di saturazione del legante (Binder Saturation Level - BSL), influisce sulla resistenza meccanica delle parti verdi, sulla finitura

superficiale e sulla tolleranza, ed è determinata dalla capacità della testina di stampa a getto d'inchiostro.

Successivamente, una lampada riscaldata o a raggi ultravioletti passa sopra lo strato iniziale per asciugare il legante. Dopo che il legante è stato polimerizzato e fissato nello strato iniziale, la piastra di costruzione si sposta lungo la direzione negativa dell'asse y, di una distanza equivalente allo spessore del primo strato. A questo punto, il re-coater distribuisce un nuovo strato di polvere metallica e viene aggiunto ulteriore legante. Questo processo viene ripetuto fino al completamento della parte.

Sebbene legata, la parte è fragile, circondata da polvere metallica in eccesso e ha una composizione relativa di 25–50% di legante e aria. A causa della fragilità della parte, è necessario prima sottoporla a un processo di polimerizzazione, solitamente collocando la piattaforma di costruzione all'interno di un forno per un periodo di tempo e a una temperatura variabili. Una volta completata la polimerizzazione, la parte viene rimossa, pulita, e la polvere metallica residua viene recuperata e riciclata. Per migliorare le proprietà meccaniche, si procede generalmente con un processo secondario di sinterizzazione, che serve a ridurre la porosità, densificare il materiale e ottimizzare le proprietà meccaniche del componente.

La sinterizzazione viene eseguita in due fasi termiche, solitamente in un'atmosfera inerte all'interno di un forno. Nella fase iniziale di de-binding, il legante evapora; successivamente, la parte "marrone" viene sottoposta al ciclo finale, durante il quale, grazie alle alte temperature, si ottiene una densificazione del 92%-93%. Per ottenere questo livello di densificazione, è necessaria la sinterizzazione in vuoto.

Quando inizia il fenomeno del *necking* (formazione dei colli tra le particelle) nella fase iniziale della sinterizzazione, è comune osservare un restringimento della parte "verde". È quindi fondamentale calcolare e compensare tale restringimento durante il ciclo finale di sinterizzazione. La natura del restringimento in alcune parti sinterizzate tende ad essere non uniforme. Una delle soluzioni più affidabili per correggere le deviazioni dimensionali è prevedere gli effetti del restringimento lineare non uniforme già nella fase di progettazione. Le tolleranze di alcune parti dipendono dalla capacità di controllare accuratamente questo restringimento, e le temperature di sinterizzazione rappresentano uno dei fattori chiave che influenzano l'entità del restringimento in relazione al tempo o alla velocità del processo.

Uno dei principali svantaggi del BJ è la densità relativamente bassa che il processo è in grado di ottenere. Tuttavia, esistono diversi metodi per aumentare significativamente la densità delle parti BJ, come ad esempio l'infiltrazione, una tecnica di post-elaborazione comune in cui un metallo liquido

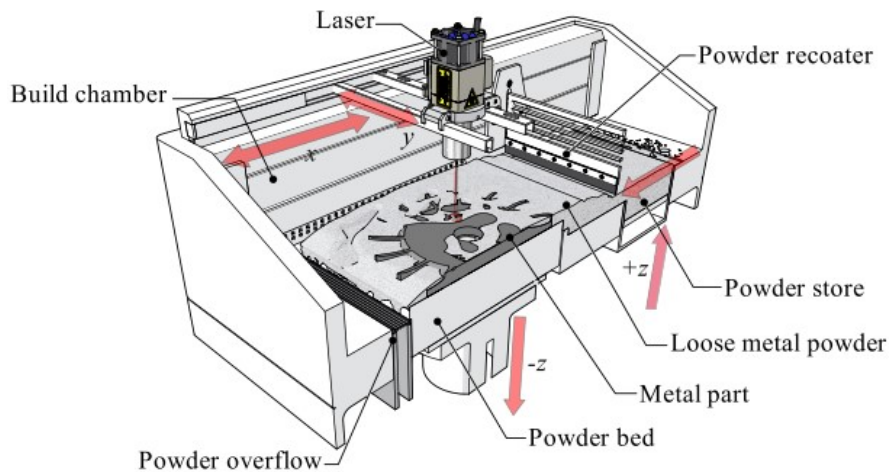
viene attirato nel componente stampato grazie all'azione capillare, contribuendo a densificare le parti sinterizzate. Poiché il binder jetting richiede un numero maggiore di trattamenti di post-elaborazione, il completamento delle costruzioni può richiedere tempi più lunghi. Inoltre, le proprietà meccaniche delle parti risultano generalmente inferiori quando vengono utilizzati materiali di infiltrazione meno resistenti.

## **1.4 Tecnologia PBF**

La Powder Bed Fusion (PBF) viene sempre più impiegata per la produzione di prodotti in settori come l'aerospaziale, medico, automobilistico, industriale, utensili e beni di consumo. Un sistema PBF può produrre componenti ad alta risoluzione con controlli dimensionali accurati e la capacità di fabbricare parti con canali interni.

I componenti di base di un sistema PBF comprendono una camera di costruzione con un'atmosfera inerte per ridurre l'ossidazione del metallo fuso, una fonte termica per fondere le particelle di polvere metallica, un meccanismo per controllare la fusione e un metodo per depositare e livellare ogni strato di polvere metallica. I sistemi PBF che utilizzano un fascio di elettroni sono classificati come fusione a letto di polvere elettronico (EPBF) o fusione a fascio di elettroni (EBM), mentre quelli con un laser sono chiamati fusione laser a letto di polvere (LPBF) o fusione laser selettiva (SLM). Tra le tecnologie di Additive Manufacturing esistenti, la fusione a letto di polvere laser ha attirato grande interesse grazie alla possibilità di stampare parti near net shape (vicine alla forma finale) con geometrie complesse.

È possibile definire ulteriormente le tecnologie PBF in base alla loro capacità di fondere o sinterizzare le polveri; ad esempio, si può avere la sinterizzazione laser selettiva (SLS). Nelle tecnologie SLS, la polvere viene sinterizzata, garantendo una sufficiente diffusione superficiale delle particelle, producendo una parte "verde" a bassa densità, caratterizzata da porosità intrinseca e proprietà meccaniche anisotrope. Al contrario, nelle tecnologie SLM, la polvere viene completamente fusa in un liquido e poi solidificata ripetutamente e rapidamente, favorendo la formazione di parti omogenee e completamente dense.



*Fig. 5 Stampante Powder Bed Fusion [6]*

### 1.4.1 Processo PBF

Il processo PBF avviene all'interno di una camera di costruzione riempita con gas inerte (azoto o argon), dove sottili strati di polvere metallica, con spessore compreso tra 20 e 200  $\mu\text{m}$ , vengono uniformemente distribuiti tramite un re-coater. Dopo che il primo strato è stato depositato e distribuito, un fascio ad alta potenza viene utilizzato per fondere o sinterizzare le particelle di polvere seguendo un percorso utensile basato su un modello CAD 3D. Le strutture di supporto, realizzate con lo stesso materiale, vengono costruite per ridurre al minimo eventuali distorsioni dovute alle alte temperature durante la fase di fusione o sinterizzazione. Dopo la scansione del primo strato, il letto di polvere si abbassa nella direzione dell'asse z di una distanza equivalente allo spessore dello strato precedente, permettendo al re-coater di distribuire un nuovo strato di polvere. Questo processo si ripete fino al completamento della parte. Una volta terminata la costruzione, il pezzo viene raffreddato gradualmente fino a temperatura ambiente per evitare shock termici e garantire una manipolazione sicura.

La polvere non fusa circostante fornisce supporto meccanico alla struttura durante la stampa. Una volta completato il processo di stampa, la polvere in eccesso nel letto deve essere rimossa dalla camera di costruzione per estrarre la struttura stampata. Nel caso di parti costruite con la tecnologia EBM, la polvere viene direttamente rimossa e riciclata per future costruzioni. Nei processi SLM, invece, la polvere deve essere setacciata prima di poter essere riutilizzata, a causa della formazione di satelliti e irregolarità dovute all'agglomerazione durante la stampa. Uno dei principali svantaggi dei sistemi PBF è costituito dai lunghi tempi di lavorazione e dagli elevati costi associati.

Le caratteristiche della parte finita dipendono in gran parte dai meccanismi ciclici di fusione e solidificazione ultra-rapida della polvere metallica, con temperature operative che possono

raggiungere i 3000 °C. Per la fusione vengono utilizzati laser ad alta potenza, con valori compresi tra 200 e 500 W. La precisione del processo è influenzata dal diametro del fascio, che può variare tra 20 e 500 µm.

Lo spessore dello strato (Layer Thickness) influisce direttamente sulla tolleranza e la precisione della parte. Le dinamiche dei processi PBF, come le elevate velocità di raffreddamento a cui il metallo è sottoposto, richiedono caratteristiche specifiche e sofisticate della morfologia della polvere. Le polveri metalliche fini utilizzate nei sistemi PBF devono essere maneggiate e conservate con particolare attenzione, poiché la loro qualità può deteriorarsi a causa della loro capacità di assorbire elementi dall'atmosfera. Questo tipo di contaminazione può compromettere negativamente le caratteristiche finali della parte. Anche l'uso di polvere riciclata può influenzare le proprietà meccaniche di alcuni materiali, a causa delle variazioni nelle dimensioni delle particelle e del loro danneggiamento.

Le tensioni residue (RS) rappresentano un problema rilevante, strettamente legato alla comprensione limitata degli effetti dei gradienti termici elevati e delle rapide velocità di raffreddamento durante il processo. Le principali variabili che influenzano la formazione delle RS sono state suddivise in tre gruppi: parametri del fascio (come velocità di scansione, potenza e input energetico), condizioni di processo e geometria (inclusi spessore dello strato, geometria e temperatura della piastra di base) e strategia di scansione (come schema raster e tempo di attesa tra gli strati). Diversi metodi sono stati sviluppati per ridurre le RS, tra cui post-trattamenti come la pallinatura laser, il controllo termico tramite preriscaldamento del letto di polvere, l'ottimizzazione della strategia di scansione con algoritmi e il monitoraggio in tempo reale con telecamere termiche. La soluzione più efficace resta l'uso di tecniche di post-trattamento, come i trattamenti termici tradizionali, inclusi l'HIP (Hot Isostatic Pressing). Tuttavia, sebbene il post-trattamento possa alleviare le RS, questi metodi non sono sempre economicamente sostenibili.

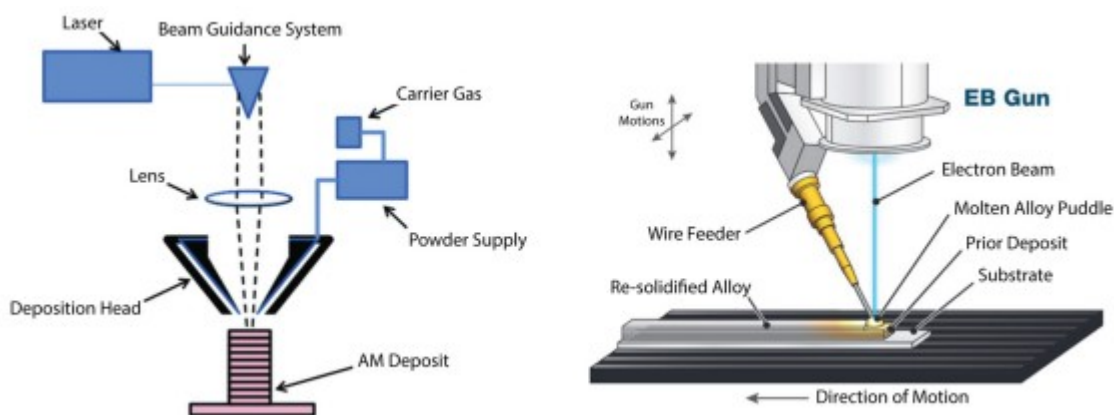
Il monitoraggio in-situ e il controllo del processo hanno recentemente guadagnato maggiore attenzione per affrontare questi problemi. Grazie all'utilizzo di dati provenienti da vari sensori di monitoraggio e diagnostica, è possibile caratterizzare il processo di costruzione e identificare i difetti in tempo reale. Ciò consente di prevedere le proprietà finali del pezzo e di regolare automaticamente i parametri del processo per un controllo ottimale. Tra le tecniche utilizzate per il monitoraggio in-situ vi sono test ultrasonici, spettroscopia acustica e ottica, tomografia ottica e a raggi X, pirometria e imaging a infrarossi.

È stata esplorata anche la possibilità di combinare la MAM (Manufacturing Additive Metal) con tecniche tradizionali (TM) di post-trattamento, come fresatura, tornitura, deformazione, vibrazione e trattamenti termici, all'interno di un sistema di produzione integrato. Questa combinazione è conosciuta come HAM (Hybrid Additive Manufacturing). Gli studi evidenziano che i principali vantaggi includono il miglioramento della rugosità superficiale, della precisione dimensionale, la riduzione delle distorsioni dei pezzi, l'eliminazione delle tensioni residue, la diminuzione degli errori umani, oltre a una riduzione dei tempi di produzione e degli sprechi di materiale. Poiché MAM e TM offrono vantaggi specifici, la fusione di entrambe le tecnologie garantisce benefici produttivi ed economici, grazie a un processo decentralizzato capace di realizzare parti metalliche complesse e funzionali, difficili da ottenere con un singolo processo.

## 1.5 Tecnologia DED

Il processo DED (Direct Energy Deposition) può utilizzare sia filo che polvere come materiale di alimentazione. Tipicamente, nel DED vengono impiegati laser per fondere il materiale; sia il materiale di alimentazione che la fonte di energia sono solitamente posizionati sulla stessa testa di stampa. Le macchine DED che utilizzano polvere sono spesso chiamate macchine di deposizione laser di metallo (Laser Metal Deposition), mentre quelle che utilizzano filo sono conosciute come electron beam-AM (EBAM) e wire arc-AM (WAAM).

Il DED è particolarmente indicato per creare parti prossime alla forma finale (near-net-shape) e per riparare o aggiungere caratteristiche a componenti esistenti. Rispetto ad altri metodi come il PBF, il tempo di lavorazione nel DED è significativamente più rapido, e le proprietà meccaniche possono essere ottimizzate controllando la microstruttura attraverso la gestione dei gradienti termici e della composizione chimica.



**Fig. 6** Stampante Direct Energy Deposition [16]

### **1.5.1 Processo DED**

La DED (Direct Energy Deposition) è un processo che utilizza una fonte di energia termica focalizzata per fondere il materiale di apporto, che può essere filo o polvere, mentre viene depositato attraverso un ugello. Le tecnologie DED impiegano generalmente quattro tipi di fonti di energia termica: laser al plasma, fascio di elettroni, arco elettrico e fascio laser. Il pezzo metallico viene creato o riparato su una piastra di costruzione all'interno di una camera ermeticamente sigillata. Un gas inerte può essere iniettato nella camera tramite spurgo ciclico oppure rilasciato direttamente dall'ugello per proteggere il metallo in fase di solidificazione, in modo analogo alla saldatura ad arco con gas. Il materiale di apporto viene indirizzato verso la fonte di energia soffiando polvere attraverso un ugello coassiale o alimentando un filo metallico tramite un ugello di erogazione.

Nei sistemi a polvere, la polvere metallica viene diretta verso una pozza di materiale fuso, dove inizialmente si fonde e successivamente si scioglie, unendosi alla pozza di fusione prima di raffreddarsi e solidificarsi. Nei sistemi a filo, il filo si ammorbidisce e si lega allo strato precedente, solidificandosi man mano. L'ugello, insieme al materiale di apporto, sposta la pozza di fusione lungo un percorso utensile predefinito, solitamente controllato da un braccio robotico CNC che regola il movimento sia dell'ugello che del materiale di apporto, in coordinazione con una piastra di costruzione. Quando l'ugello e il materiale di apporto si allontanano dalla pozza di fusione, il materiale si solidifica, e il processo prosegue lungo il percorso utensile, costruendo strati incrociati fino al completamento del pezzo.

Il meccanismo di fusione del DED imita i processi di saldatura convenzionali, richiedendo un'elevata concentrazione di energia per mantenere la pozza di fusione e fondere ciascun percorso e strato successivo. Allo stesso modo, si forma una zona termicamente alterata (HAZ - Heat Altered Zone) attorno alla pozza di fusione, esposta a intensi gradienti termici che generano elevate tensioni residue (RS). Quando queste tensioni interne vengono rilasciate improvvisamente, possono verificarsi cricche a causa delle rapide velocità di raffreddamento, che influiscono negativamente sulla struttura del grano. Le tensioni residue possono essere parzialmente alleviate rimuovendo il pezzo durante la costruzione e trattandolo termicamente in un forno prima di riprendere il processo. Il DED presenta altre limitazioni, tra cui una bassa precisione geometrica e una rugosità superficiale inferiore a 25 µm. Tolleranze e finiture dipendono dalla velocità di stampa: una velocità più elevata riduce la precisione, e a causa delle grandi pozze di fusione generate dall'alta energia termica, è difficile processare geometrie interne intricate o supporti sospesi.

I sistemi DED sono in grado di lavorare molti materiali commerciali utilizzati nella saldatura e nella metallurgia delle polveri. L'abbondanza, l'affidabilità e la convenienza dei materiali di apporto, sia a

filo che a polvere, insieme alle elevate velocità di stampa, rendono il processo relativamente economico. Inoltre, il DED può produrre pezzi completamente densi con strutture a singolo cristallo, consentendo di personalizzare la microstruttura grazie alla capacità del processo di combinare materiali diversi in una singola costruzione e di controllare la velocità di solidificazione.

Grazie delle alte velocità di deposizione, il DED è anche l'alternativa più economica per la produzione di grandi parti metalliche, un aspetto che ha recentemente attirato l'interesse dell'industria delle costruzioni. Il DED permette di depositare materiale direttamente su una superficie esistente durante la produzione, rendendolo ideale per applicazioni di riparazione e ricondizionamento (RR) di componenti esistenti. Il DED si distingue per il minore apporto di calore, le distorsioni ridotte e una maggiore precisione.

Recentemente sono state esplorate le implicazioni del monitoraggio e del controllo del processo per migliorare la qualità delle parti metalliche stampate attraverso l'ottimizzazione del processo, al fine di comprendere i meccanismi sottostanti responsabili di alcuni difetti. Ad esempio, il monitoraggio in situ e l'analisi termo-meccanica sono stati utilizzati per indagare questi aspetti. Le sfide principali che queste tecnologie devono affrontare includono la gestione della porosità tipica del Direct Energy Deposition (DED) e, similmente ai difetti nelle parti metalliche prodotte tramite Powder Bed Fusion (PBF), problemi come "keyholes", intrappolamento di gas e mancata fusione. I processi DED possono amplificare la formazione di crepe a causa di gradienti termici particolari ed estremi. Tuttavia, tecniche come il preriscaldamento della camera di costruzione, un design appropriato e il controllo delle velocità di raffreddamento possono ridurre la formazione di crepe. Anche le finiture superficiali scadenti sono un problema, spesso causato da particelle di polvere non fuse, effetto scala e spruzzi di metallo fuso. Per migliorare la qualità delle parti, si raccomanda di aumentare la temperatura della fonte di calore termico e di ridurre le velocità di stampa. Un'altra tecnica potenziale per mitigare questi problemi è l'uso di sistemi DED-HAM (Hybrid Additive Manufacturing).

I benefici del DED-HAM (Direct Energy Deposition - Hybrid Additive Manufacturing) includono la riduzione degli errori di posizionamento che si verificano quando una parte viene trasferita da un processo additivo a uno sottrattivo. Inoltre, il movimento del materiale all'interno dell'officina può essere ridotto, il che diminuisce lo spazio necessario per la fabbrica e riduce le spese in conto capitale per le macchine, abbattendo così il costo finale del prodotto. Poiché i materiali più comunemente utilizzati sono spesso leghe difficili da lavorare, la lavorabilità dei materiali rappresenta una delle sfide principali per una più ampia implementazione dell'HAM, inclusa la gestione della precisione dimensionale.

## 2. Strutture Reticolari

### 2.1 Progettazione nella Additive Manufacturing

Il termine "Design for Additive Manufacturing" (DfAM) si riferisce alla pratica di progettare e ottimizzare un prodotto insieme al suo sistema di produzione per ridurre i tempi e i costi di sviluppo, e per migliorare le prestazioni, la qualità e la redditività.

Per superare le limitazioni geometriche imposte dai sistemi CAD, durante la progettazione si utilizza la modellazione free-form, un metodo di scultura virtuale che consente all'utente di interagire con il progetto CAD-3D tramite uno strumento manuale. La modellazione può iniziare anche con una scansione 3D del componente, che viene poi ridisegnata. Successivamente, i dati vengono convertiti in geometria attraverso un processo di tassellazione, che ricostruisce il solido CAD in una serie di triangoli (mesh). Infine, il file generato viene elaborato da uno slicer.

I parametri fondamentali del DfAM includono lo spessore del layer (layer thickness), che è l'altezza dello strato di materiale depositato, e l'orientamento del pezzo. Poiché i pezzi stampati con AM sono solitamente anisotropi (con possibilità di cricche tra lo strato depositato e quello precedente), l'orientamento influisce sulla risposta del pezzo alle sollecitazioni. Altri parametri importanti sono i supporti necessari per sostenere il pezzo stampato e il percorso dell'utensile.

Lo spessore minimo dello strato, che dipende dalla granulometria della polvere utilizzata, influisce sulla dimensione minima, sulla precisione lungo l'asse z (direzione di costruzione) e sulla finitura superficiale. Nel piano xy, la dimensione minima degli elementi strutturali, come le pareti sottili, è vincolata dalla dimensione della pozza di fusione, che dipende dalla dimensione dello spot laser e dai parametri del processo.

La strategia di scansione, cioè il modello geometrico seguito dal fascio di energia del laser, influisce sul gradiente termico e, di conseguenza, sulla qualità del pezzo. Difetti come tensioni residue elevate o polvere non completamente fusa possono essere controllati regolando la strategia di scansione durante il processo di AM. La rifusione laser dopo la formazione di ogni strato migliora generalmente la densificazione, riduce la rugosità superficiale e i difetti. Pertanto, la strategia di scansione ha un'influenza diretta anche sulle proprietà meccaniche del pezzo stampato.

### 2.2 Strutture reticolari

Nel guidare il mercato verso una maggiore efficienza energetica, pratiche come il "lightweighting" stanno assumendo un ruolo fondamentale. Questo approccio consiste nell'alleggerire una struttura sostituendo il materiale o eliminando il materiale in eccesso, mantenendo però le funzionalità chiave

del componente. Le tecniche più recenti di lightweighting si basano sull'ottimizzazione della struttura e del design. I metodi di ottimizzazione strutturale si suddividono in: ottimizzazione delle dimensioni, che definisce le dimensioni ottimali della struttura; ottimizzazione della forma, che si concentra sulle geometrie; e ottimizzazione topologica, utilizzata per trovare la distribuzione ottimale del materiale.

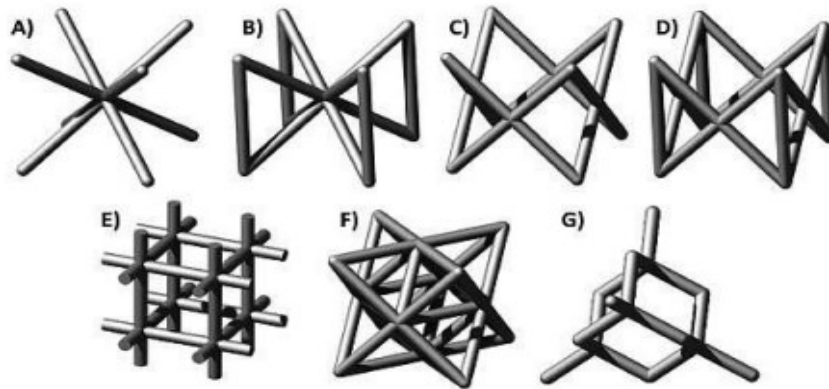
Quando si alleggerisce una struttura, è essenziale garantire che i componenti critici non vengano compromessi. Anche la geometria del pezzo deve essere presa in considerazione, poiché può limitare i metodi di produzione praticabili. La sicurezza è un'altra considerazione fondamentale nell'alleggerimento, e per le parti destinate all'uso finale, la precisione risulta spesso cruciale per garantire le funzionalità richieste.

Le strutture cellulari, o reticolari, sono ampiamente utilizzate nel lightweighting grazie alla loro elevata resistenza e rigidità specifiche, derivanti dalla struttura porosa. Queste sono particolarmente rilevanti per applicazioni in ambito biomedicale e aerospaziale. Nel settore biomedicale, le strutture reticolari vengono impiegate per ridurre la rigidità degli impianti medici metallici, avvicinandola a quella dell'osso, permettendo il flusso dei fluidi grazie alla loro porosità e offrendo un ampio rapporto superficie-volume, favorendo così l'osteointegrazione. Nell'ambito aerospaziale, il loro elevato rapporto resistenza-peso e le proprietà di conduzione termica le rendono particolarmente attrattive. Esistono diversi tipi di strutture reticolari, così come una grande varietà di tecniche per la loro fabbricazione.

Le strutture reticolari sono costituite da una struttura ripetitiva regolare delle loro cellule unitarie costituite da puntoni (beam) o piastre. Questo significa che mentre le celle unitarie delle strutture reticolari possono essere analizzate come telai usando la meccanica classica, una struttura reticolare dovrebbe essere considerata un materiale vero e proprio.

Le strutture reticolari sono classificate in base allo sforzo che devono sopportare: flessione (bending-dominated) o allungamento (stretch-dominated). La configurazione della struttura cellulare determina se una struttura è più adatta a sopportare flessione o allungamento. Le topologie cellulari basate su puntoni (beam) più comuni studiate sono la body-centered cubic (BCC) e la face-centered cubic (FCC), che prendono il nome da strutture cristalline simili. Variazioni di queste strutture includono l'aggiunta di puntoni lungo l'asse z, denominate BCCZ e FCCZ. Esistono anche altre topologie basate su puntoni, come il cubo (cubic), l'ottetto (octet) e il diamante (diamond). Queste topologie, selezionate per la loro semplicità di progettazione, sono ottenute attraverso l'ottimizzazione topologica delle strutture cristalline analoghe.

Le topologie basate su puntoni possono essere caratterizzate dal loro numero di Maxwell,  $M$ , che dipende dal numero di beam,  $s$ , e dal numero di nodi,  $n$ , secondo l'equazione:  $M = s - 3n + 6$



*Fig. 7 Topologie cellulari basate sui beam [1]*

Se  $M < 0$ , significa che ci sono troppo pochi beam per bilanciare le forze esterne, causando tensioni flettenti nei beam e portando a un comportamento dominato dalla flessione. Al contrario, se  $M \geq 0$ , i carichi esterni sono equilibrati dalla tensione assiale e dalla compressione nei beam, il che implica che non si verifica alcuna flessione nei nodi, rendendo queste strutture dominate dall'allungamento.

È importante chiarire che i benefici del latticing sono ottenuti a scapito della rigidità. Pertanto, l'uso delle strutture reticolari non rappresenta un approccio al lightweighting finalizzato al miglioramento della rigidità. Tuttavia, le strutture composte da celle unitarie basate su superfici tendono a mostrare una rigidità superiore rispetto alle celle costituite da beam.

Per progettare una struttura reticolare, è necessario progettare sia la cella unitaria che il modello complessivo. A tal fine, si possono utilizzare due metodi principali: uno basato su operazioni booleane, in cui la cella è generata mediante sottrazione booleana, e uno basato su superfici implicite, che utilizza equazioni implicite per rappresentare le superfici.

Ogni struttura cellulare si distingue per caratteristiche topologiche come lo spessore dei beam, il loro orientamento e le interazioni tra di essi. Quando si studiano le diverse tipologie di celle unitarie, è essenziale stabilire le relazioni tra il diametro dei puntoni (beam), la loro lunghezza e la frazione di volume. La frazione di volume è definita come il rapporto tra il volume dei puntoni e quello di un cubo unitario solido immaginario. È importante sottolineare che, durante la fase di design, personalizzando l'orientamento delle celle si può controllare e minimizzare l'uso delle strutture di supporto, poiché queste ultime tendono a compromettere la qualità della stampa e ad allungare i tempi di produzione.

La struttura reticolare viene generata dalla ripetizione delle celle unitarie in tutte le direzioni. Questo processo può avvenire tramite direct patterning, in cui le celle unitarie sono ripetute attraverso la traslazione; conformal patterning, in cui le unità sono ripetute seguendo una geometria di superficie specifica; oppure ottimizzazione topologica, che può essere utilizzata per organizzare la replica spaziale della cella unitaria attraverso l'intero spazio di progettazione.

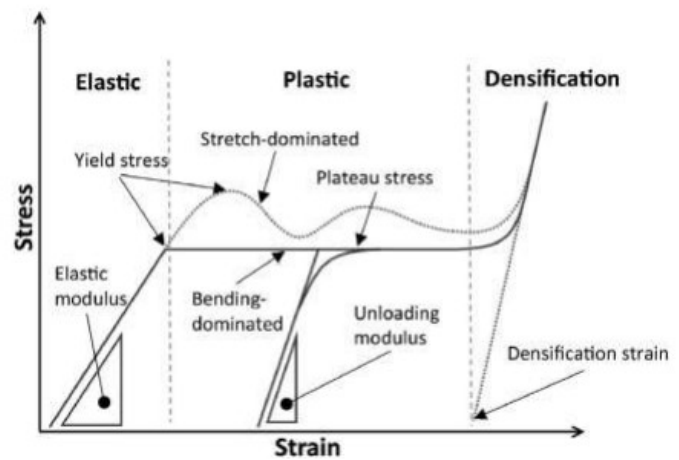
Nel considerare le strutture reticolari stampate con Selective Laser Melting (SLM), ci sono alcuni svantaggi. Ad esempio, la dimensione minima degli elementi è limitata dalla dimensione del fascio laser, i difetti microstrutturali e metallurgici ereditati dal processo di fabbricazione possono essere difficili da valutare, e c'è il rischio di distorsione termica dei componenti a causa delle tensioni residue generate dal rapido raffreddamento durante la produzione. Inoltre, la rimozione della polvere rappresenta una limitazione significativa del processo SLM, poiché non è possibile produrre vuoti interni chiusi a causa dell'intrappolamento della polvere.

Il comportamento meccanico di una struttura reticolare dipende dal materiale utilizzato, dall'architettura che organizza la distribuzione del materiale e dalla porosità della struttura. Con una struttura reticolare è possibile ottenere maggiore flessibilità meccanica oltre alle altre proprietà meccaniche di base.

Le proprietà meccaniche delle strutture reticolari sono generalmente espresse come una frazione delle proprietà meccaniche del materiale di base e dipendono dalla densità relativa della struttura reticolare, definita come il rapporto tra la densità apparente della struttura cellulare e la densità del materiale della struttura cellulare. Indipendentemente dalla topologia, è noto che le proprietà meccaniche delle strutture reticolari diminuiscono all'aumentare della densità relativa. Inoltre, l'orientamento delle cellule rispetto alla direzione del carico influisce significativamente sulla risposta meccanica delle strutture reticolari anisotrope.

La maggior parte delle prove meccaniche delle strutture reticolari stampate con Selective Laser Melting (SLM) viene eseguita in compressione, poiché questa modalità è generalmente più semplice rispetto alle prove in tensione. Il comportamento deformativo delle strutture reticolari può essere suddiviso in tre fasi principali: deformazione elastica lineare, deformazione plastica e densificazione.

Sotto compressione, i montanti possono subire tre meccanismi di collasso: snervamento, buckling e frattura. Durante la deformazione elastica, la risposta del materiale è lineare ed elastica. Una volta superato il limite elastico, inizia la fase di deformazione plastica. Per le strutture dominate dalla flessione, la deformazione prosegue con uno stress quasi costante, noto come stress di Plateau, mentre nelle strutture dominate dall'allungamento, lo stress necessario per ulteriori deformazioni oscilla. Quando i componenti della cellula si deformano al punto da entrare in contatto con altri componenti, limitando ulteriormente la deformazione, si raggiunge la fase di densificazione.



*Fig. 8* Comportamento generale a compressione delle strutture reticolari dominate da flessione e allungamento

L'architettura dominata dall'allungamento (come BCCZ e FCCZ) è particolarmente adatta per progettare strutture leggere, dove sono desiderabili alta rigidità specifica e resistenza. Al contrario, per applicazioni di assorbimento di energia, è prioritario progettare strutture che possano assorbire elevate energie attraverso deformazioni. In tali casi, l'architettura dominata dalla flessione (come BCC e FCC) è più adatta, poiché è in grado di sostenere grandi deformazioni a uno stress relativamente più basso.

I principali fattori che influenzano le proprietà di fatica delle strutture reticolari includono: le proprietà meccaniche del materiale di base, la densità relativa del reticolo, la topologia della cella e la geometria dei beam della cella.

## 2.3 Difetti strutture reticolari SLM

I componenti realizzati tramite Selective Laser Melting (SLM) possono essere soggetti a difetti geometrici, spesso causati da vari problemi come parametri di lavorazione non ottimizzati o difetti interni legati a un riempimento incompleto della traiettoria laser. Le tensioni residue, generate dai notevoli gradienti termici che si verificano durante la fabbricazione, possono anch'esse portare a difetti geometrici e a deformazioni macroscopiche, come gravi intagli o puntoni distorti.

Le limitazioni del processo SLM possono causare discrepanze tra le geometrie previste delle strutture reticolari e quelle effettivamente fabbricate, un fenomeno noto come effetto scala. Queste discrepanze

possono derivare dal ritiro post-fusione, dall'attaccamento di particelle non fuse, dall'ondulazione o dalla rugosità delle beam, fattori che possono compromettere la resistenza e la rigidità delle strutture.

La rugosità superficiale dei componenti SLM è influenzata da diversi fattori, come la stabilità, le dimensioni e il comportamento della pozza di fusione durante il processo, oltre all'orientamento della superficie rispetto al raggio laser. Tuttavia, in alcuni contesti, come in ambito biomedico, la rugosità superficiale non rappresenta necessariamente uno svantaggio, anzi può facilitare l'attaccamento cellulare.

La presenza di difetti può essere ridotta ottimizzando i parametri di lavorazione, ma a causa della complessità intrinseca del processo, sembra che i componenti fabbricati con SLM siano comunque suscettibili a un certo livello di difetti.

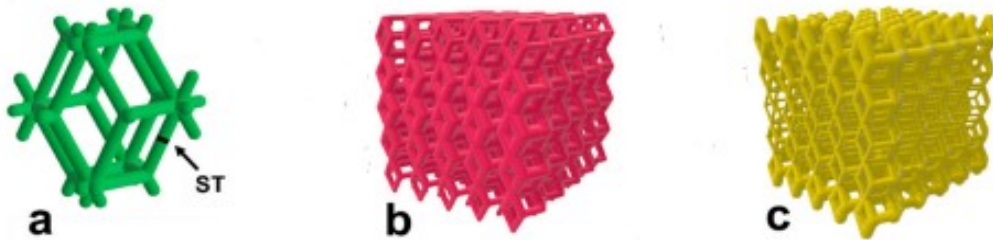
## **2.4 Strutture reticolari in ambito Biomedico**

Tra i vari metalli impiegati per la rigenerazione del tessuto osseo, l'acciaio inox 316L rappresenta la soluzione più economica per impianti a breve termine, grazie alle sue proprietà meccaniche adeguate per le ossa, biocompatibilità accettabile, elevata resistenza alla corrosione e basso costo. Tuttavia, il contatto prolungato con ioni cloruro nell'ambiente fisiologico può causare la corrosione del film passivo superficiale, con conseguente rilascio di ioni di ferro e potenziale rischio infiammatorio.

In questo contesto, una scelta adeguata della tecnologia di produzione, che influisce sul comportamento del materiale nei confronti della corrosione, può contribuire a ridurre il rischio di fallimento dell'impianto. È stato dimostrato che l'acciaio inox 316L prodotto mediante tecniche additive offre una biocompatibilità superiore rispetto alla lega forgiata. In particolare, i campioni realizzati con la fusione a letto di polvere laser (LPBF) hanno mostrato una maggiore resistenza alla corrosione, riducendo il rilascio di ioni tossici nell'ambiente biologico e migliorando la vitalità e la proliferazione delle cellule pre-osteoblasti.

Le proprietà meccaniche dello scaffold devono essere compatibili con i tessuti in cui verrà impiantato, per evitare l'effetto di stress shielding (perdita di massa ossea) e prevenire il cedimento meccanico sotto il carico anatomico. Le prestazioni meccaniche e la risposta biologica di un dispositivo possono essere regolate attraverso la geometria. La disposizione periodica delle celle elementari nello spazio tridimensionale (reticolo) consente di personalizzare la dimensione e la forma dei pori, così come la porosità, influenzando direttamente le proprietà meccaniche dello scaffold. Inoltre, una rete di pori interconnessi facilita la migrazione cellulare, favorendo il trasporto di nutrienti e ossigeno alle cellule.

Le geometrie a reticolo con gradiente "dense-in" (DI) e "dense-out" (DO) sono state ottenute ripetendo nello spazio la cella unitaria dodecaedrica rombica (RD). La struttura è stata realizzata variando lo spessore dei montanti della cella unitaria strato per strato lungo la direzione di costruzione. In questo modo, la porosità dello scaffold varia inversamente rispetto allo spessore dei montanti. Nella geometria DI, lo spessore dei montanti diminuisce dal nucleo verso i bordi, mentre nella geometria DO, lo spessore aumenta dal nucleo verso i bordi. Entrambe le geometrie sono state costruite con simmetria speculare rispetto all'asse orizzontale centrale.



**Fig. 9** a) Cella unitaria rombododecaedrica b) Geometria dense-in c) Geometria dense-out [2]

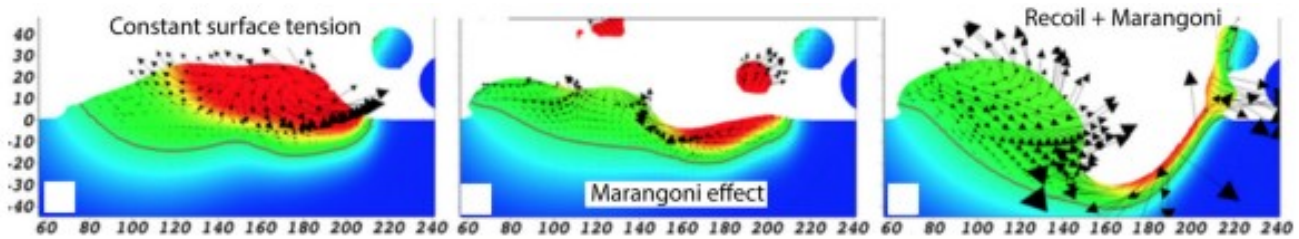
### 3. Caratterizzazione pozza di fusione

La pozza di fusione formata durante il processo di produzione additiva per metalli (MAM) è simile a quella osservata nella saldatura laser ed è cruciale per la qualità complessiva del pezzo stampato. Durante il MAM, esistono due modalità di formazione della pozza di fusione: la modalità di conduzione e la modalità keyhole. La modalità di conduzione fonde il materiale localmente, creando una pozza di fusione con una forma ellittica e superficiale che tende a ridurre i difetti. Se la densità di energia è sufficientemente alta, può avvenire la modalità keyhole, formando una pozza di fusione stretta e profonda chiamata appunto keyhole.

I parametri di processo, come la potenza del laser e la velocità di scansione, influenzano la dimensione e la profondità del keyhole. Il collasso del keyhole può avere effetti sulla porosità e su altri difetti del pezzo. La rapida solidificazione può intrappolare bolle di vapore all'interno della pozza di fusione, creando porosità nel pezzo. Le principali forze che causano l'instabilità del flusso nella pozza di fusione sono la turbolenza di Marangoni e la pressione di rinculo.

La turbolenza di Marangoni si verifica quando le particelle non fuse interagiscono con la pozza di fusione, generando una tensione superficiale che spinge il fluido verso le aree più fredde, creando vuoti e porosità. Questo fenomeno induce un flusso di circolazione verso l'esterno della pozza di fusione. La pressione di rinculo, d'altra parte, è causata dalle temperature estremamente elevate generate dalla fonte di calore, che fanno sì che la superficie della pozza di fusione superi facilmente

il punto di ebollizione del materiale, aumentando così la pressione all'interno del materiale fuso. Questa pressione di rinculo, generata dalla vaporizzazione del metallo, risulta in una colonna di vapore ad alta velocità.



**Fig. 10** Simulazione di fluidodinamica computazionale della turbolenza di Marangoni nel bacino di fusione durante la manifattura additiva di metalli [16]

Un aumento della pressione di rinculo del vapore può fornire energia sufficiente alla colonna di vapore per uscire dal keyhole ed espellere particelle tramite il trasferimento di momento alle particelle vicine, fenomeno noto come "spatter". L'energia immessa nel processo di stampa influisce notevolmente sulla dimensione dello "spatter", sulla direzione di dispersione e sull'altezza. Gli "spatter" e le particelle espulse durante la manifattura additiva (AM) possono influenzare significativamente la rugosità superficiale del pezzo stampato. Pertanto, nei sistemi basati su laser, si utilizza un flusso di gas inerte per spostare queste particelle. È quindi essenziale ottimizzare tutte le variabili di processo che influenzano la formazione della pozza di fusione per produrre parti metalliche di alta qualità.

È chiaro che l'interazione tra il metallo e il laser è uno dei passaggi più determinanti nel processo di costruzione additiva. Due tecniche comuni di fusione laser nei sistemi PBF (Powder Bed Fusion) sono la fusione a onda continua e la fusione modulata. Nella fusione a onda continua, il laser irradia costantemente la polvere di metallo mentre viene depositato ogni strato della costruzione. In questo processo, le linee di scansione, costituite dalle pozze di fusione e di solidificazione, si sovrappongono a ogni passaggio successivo, parzialmente rifondendo la linea depositata precedentemente. Al contrario, nella fusione modulata, il laser alterna tra accensione e spegnimento, creando una serie di esposizioni di irradiazione brevi, dove ogni esposizione si sovrappone a quella precedente.

La potenza del laser rappresenta la fonte del flusso di calore trasferito alla polvere di metallo, mentre la dimensione del punto è il diametro del raggio focalizzato, che può essere modificato a seconda del sistema di messa a fuoco. La velocità di scansione è la velocità con cui il punto laser attraversa la costruzione. Per la fusione laser a onda continua, è definita dalla distanza percorsa entro un determinato intervallo di tempo, mentre nella fusione modulata è definita dal tempo di esposizione. La distanza tra le strisce indica lo spazio tra i percorsi di scansione adiacenti, che di solito richiede

una sovrapposizione per fondere parzialmente e unire le saldature vicine. Infine, lo spessore dello strato nei sistemi PBF è la profondità della polvere da fondere per ogni strato e nei sistemi DED è la velocità di deposizione della polvere.

Esiste una correlazione diretta tra la densità del pezzo costruito e i parametri di potenza del laser e velocità di scansione. Con l'aumento della potenza del laser e la diminuzione della velocità di scansione, la densità del pezzo tende ad aumentare. Al contrario, una maggiore velocità di scansione o una minore potenza del laser comportano una riduzione della densità. Inoltre, si osserva che un incremento nella distanza tra le strisce o nella velocità di scansione può portare a un aumento della porosità del pezzo.

## **4. Difetti nelle AM dei metalli**

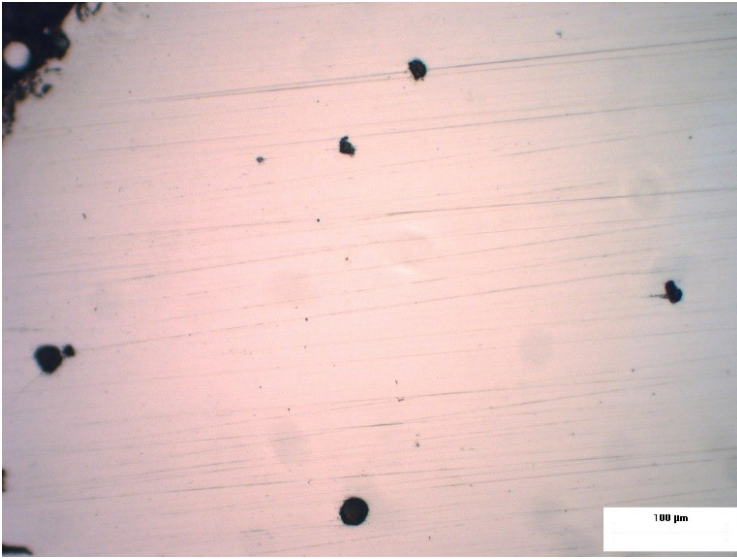
Molti dei difetti si verificano a causa di parametri di processo non ottimali, come la potenza del laser e la velocità di scansione, o se il materiale di alimentazione e la camera di costruzione non sono adeguati.

### **4.1 Porosità**

La porosità influisce significativamente sulle proprietà meccaniche dei pezzi stampati, fungendo da punti di inizio per le fessure e riducendo la tenacità e la resistenza alla fatica. I pori sono generalmente molto piccoli, con un diametro inferiore ai 100  $\mu\text{m}$ . A causa dei forti gradienti di temperatura e della rapida solidificazione durante la deposizione, la porosità può svilupparsi a causa di parametri di processo non ottimizzati. È stato dimostrato che la densità della porosità tende a diminuire con l'aumento della potenza del laser e della velocità di scansione.

Un'altra importante causa di porosità è l'intrappolamento di gas, che possono formarsi nella polvere di alimentazione durante il processo di atomizzazione. Quando il laser scansiona una determinata area del letto di polvere, si crea un'incisione che successivamente collassa a causa di un'improvvisa inversione nel campo di velocità del flusso di fusione, questo collasso repentino facilita l'intrappolamento di bolle di gas nella parte inferiore del tracciato. Il brusco cambiamento del campo di velocità provoca inoltre la formazione di un vortice che promuove ulteriormente la formazione di bolle e la loro eventuale coalescenza in pori più grandi. A causa della ripetuta formazione e collasso delle cavità di vapore, si genera una sequenza di vuoti lungo il percorso del raggio laser. Inoltre, l'elevato tasso di solidificazione della pozza di fusione impedisce alle bolle di gas di risalire e sfuggire, questo processo di solidificazione rapida contribuisce anche al raffinamento della microstruttura. Oltre al controllo dei parametri di processo per ridurre o eliminare la formazione di pori, la pressatura

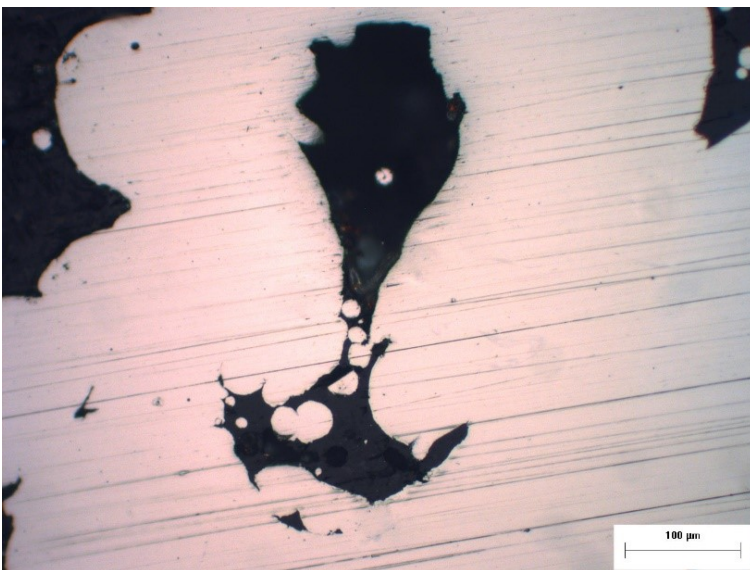
isostatica a caldo (HIP) può essere utilizzata come metodo di post-elaborazione per mitigare i difetti di stampa, inclusi i pori.



*Fig. 11 Porosità dovuti all'intrappolamento di gas*

## 4.2 Mancata fusione (Lack of Fusion)

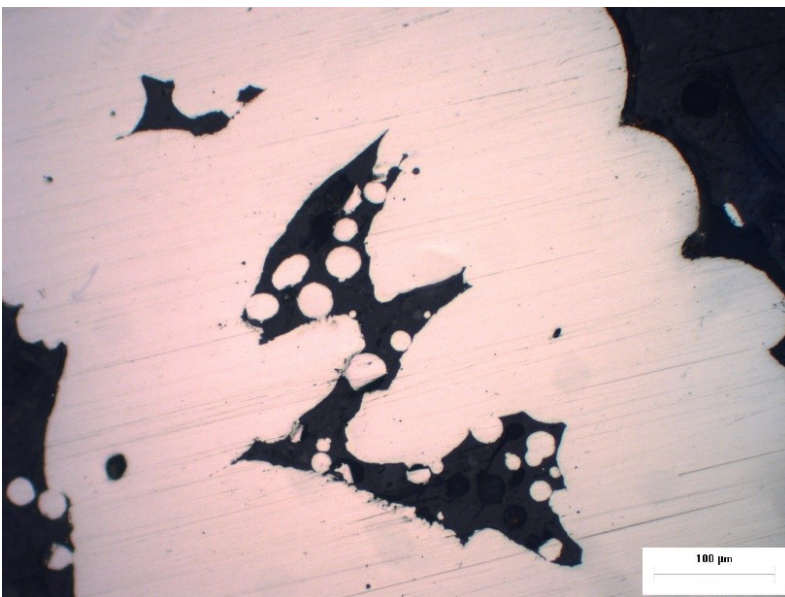
I difetti di mancata fusione si verificano quando c'è una carenza di input energetico durante il processo di fusione, impedendo alla pozza di fusione e alle particelle di polvere non fuse sullo strato depositato **di penetrare e fondersi completamente con lo strato precedente. Questa insufficiente fusione** contribuisce significativamente all'anisotropia e all'eterogeneità nei pezzi, degradando sia la superficie che le proprietà meccaniche. Inoltre, si formano pori di forma irregolare a causa della mancanza di fusione tra l'interfaccia degli strati adiacenti, aumentando ulteriormente la densità dei difetti.



*Fig. 12 Porosità dovuta da mancata fusione*

### 4.3 Balling

La formazione di palline di metallo fuso, nota come "balling", è un fenomeno in cui la pozza di fusione si separa in piccole sfere o perle che "bagnano" lo strato successivo o il substrato del materiale stampato. La tensione superficiale è la forza principale che contribuisce a questo fenomeno, che si verifica quando la lunghezza della pozza di fusione è doppia rispetto al suo diametro, provocando la trasformazione della pozza in perle. Elevate potenze del laser e velocità di scansione tendono ad allungare la pozza di fusione, favorendo la formazione di palline. Al contrario, a basse velocità di scansione e potenze del laser, il balling è stato dimostrato non verificarsi. Oltre a compromettere la qualità superficiale del pezzo stampato, il balling ostacola anche la connessione tra gli strati adiacenti.



*Fig. 11 Mancata fusione con particelle non fuse all'interno del poro*

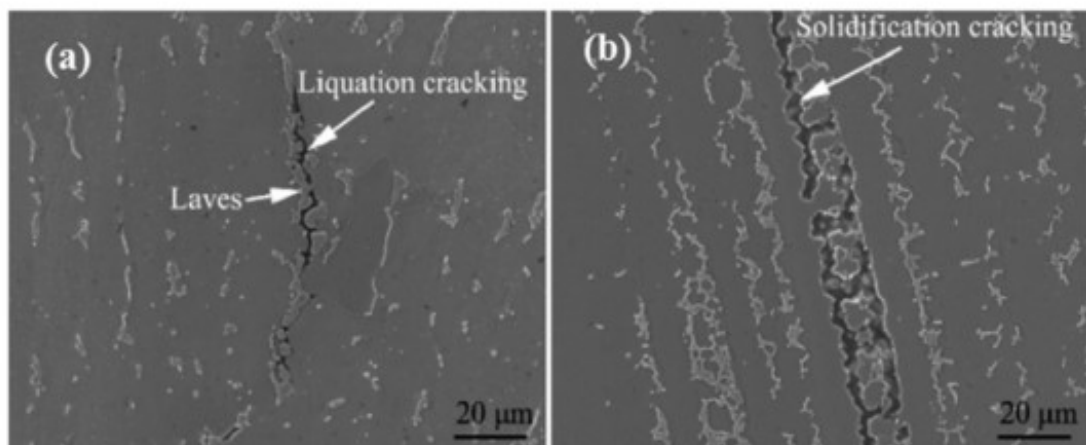
### 4.4 Tensioni residue e fessurazioni

Le fessurazioni sono principalmente attribuite alle tensioni residue termiche generate da elevati gradienti di temperatura e dalla rapida solidificazione, che provocano la contrazione della pozza di fusione. Velocità di scansione relativamente basse combinate con un alto input energetico possono generare elevate tensioni residue. Il grado e il tipo di fessurazioni dipendono dal materiale utilizzato. Se la tensione residua all'interno del materiale supera la tensione di snervamento locale, si verificano deformazioni plastiche, mentre se supera la tensione di rottura locale, si possono verificare fessurazioni.

I sistemi riscaldati da laser generano gradienti termici più elevati e tensioni residue maggiori, mentre i sistemi a fascio elettronico sono spesso preriscaldati, riducendo così il gradiente termico locale. Inoltre, le leghe con bassa conducibilità termica e alta espansione termica, come gli acciai

inossidabili, sono più suscettibili alla formazione di fessurazioni durante il processo di stampa. Questo fenomeno dipende fortemente dalla natura della solidificazione del materiale, che può essere dendritica, cellulare o piana, e dalla viscosità della pozza di fusione. Le tensioni termiche durante il processo di stampa possono essere mitigate attraverso l'ottimizzazione dei parametri di processo, il preriscaldamento del substrato, l'uso di dispositivi di monitoraggio e la scelta della composizione del materiale.

Le cricche nel processo LPBF possono essere classificate in cricche da solidificazione e cricche da liquazione. Le cricche da solidificazione si verificano nelle fasi finali della solidificazione, quando i dendriti sono quasi completamente cresciuti in grani equiassici, separati da un sottile strato liquido residuo sotto forma di film al confine dei grani nella zona pastosa. Le cricche da liquazione si originano nella regione più debole, ovvero nella zona parzialmente fusa o nella zona termicamente alterata (HAZ) negli strati precedenti, e si propagano attraverso la regione intergranulare con la deposizione successiva, procedendo strato per strato.



*Fig. 12 a) cricche da liquefazione b) cricche da solidificazione [6]*

## 5. Ottimizzazione del processo

Il processo di AM può essere migliorato mediante l'uso di diverse tecniche per controllare e ottimizzare la microstruttura del materiale stampato.

### 5.1 Morfologia dei grani

Ottenere una struttura adeguata dei grani durante la stampa migliora le proprietà meccaniche del materiale. Regolando i parametri di stampa, è possibile controllare la morfologia dei grani per ottimizzare il materiale. In questo modo, si possono ottenere grani fini e equiassiali che aumentano

resistenza e duttilità, invece di grani colonnari epitassiali (orientati coerentemente con il substrato), che sono altamente testurizzati (con un'orientazione preferenziale) e si estendono su più strati lungo la direzione di costruzione

Durante la solidificazione, i grani si orientano seguendo la superficie del nucleo solido (lo strato precedentemente applicato), che rappresenta la superficie energeticamente più favorevole per la cristallizzazione, fenomeno noto come crescita epitassiale. Tuttavia, il flusso di calore influisce sulla direzione di crescita, portando a una crescita perpendicolare agli strati sottostanti. I grani isolati tendono a crescere verso il centro del bagno di fusione, con una velocità che varia in base alla temperatura locale. La loro crescita si arresta quando i grani si scontrano tra loro. Di solito, la crescita dei grani colonnari termina quando compare una zona di grani equiassiali, i quali si formano direttamente sopra il substrato, precedendo lo sviluppo dei grani colonnari, che crescono paralleli alla direzione di costruzione. La topologia del bagno di fusione, il gradiente termico e la velocità del fronte di solidificazione hanno un'influenza determinante sul meccanismo di crescita dei grani.

Poiché i grani equiassiali crescono in più direzioni, è possibile utilizzare inoculanti per promuovere la nucleazione eterogenea, affinando così la struttura dei grani e migliorando la tenacità del materiale. Questo effetto è particolarmente evidente durante il processo di produzione additiva (AM), dove le particelle non fuse possono fungere da siti di nucleazione per la crescita dei grani equiassiali.

## **5.2 Ottimizzazione struttura dei grani**

Poiché la qualità del pezzo prodotto dipende direttamente dalla microstruttura sviluppata, essere in grado di controllare e personalizzare la morfologia dei grani durante la costruzione può ridurre il tempo e il costo di produzione. In alcuni casi, può essere utile sviluppare una morfologia dei grani più fine e resistente nelle aree ad alta sollecitazione e meno nelle zone meno sollecitate. Creare strutture fini durante la costruzione garantisce proprietà meccaniche adeguate e aiuta a prevenire la crescita eccessiva dei grani durante i trattamenti termici successivi.

Durante la deposizione, ogni punto all'interno della costruzione subisce una rapida solidificazione iniziale, seguita da riscaldamenti e raffreddamenti successivi con l'aggiunta di strati. Un aspetto chiave è la presenza di zone influenzate dal calore (HAZ), che colpiscono le aree vicine alla pozza di fusione. Queste aree solide adiacenti alla pozza di fusione raggiungono temperature sufficientemente elevate da causare trasformazioni microstrutturali, come la crescita dei grani e la ricristallizzazione. Tuttavia, modificare i parametri del processo, come aumentare la velocità di scansione, può ridurre la dimensione delle zone termicamente alterate.

La modellazione a elementi finiti (FEM) può simulare la microstruttura durante la costruzione e fornire previsioni realistiche riguardo alla microstruttura e alle sollecitazioni residue in base ai parametri del processo di stampa. I dati ottenuti dalle simulazioni possono essere utilizzati per sviluppare una mappa di processo specifica per ciascuna lega.

## **6. Acciaio inox 316L**

L'AISI 316L è una lega di acciaio inossidabile austenitico caratterizzata da un basso contenuto di carbonio (inferiore allo 0,035%) e da un adeguato tenore di cromo (16-18%), nichel (11-14%) e molibdeno (2-3%).

Sebbene molte leghe strutturali siano ancora considerate difficili da produrre in modo affidabile tramite AM, l'acciaio inossidabile 316L realizzato con tecnologia L-PBF offre proprietà meccaniche e resistenza alla corrosione accettabili, oltre a garantire una buona qualità complessiva delle parti.

A causa delle elevate velocità di raffreddamento, la lavorazione dell'acciaio inossidabile 316L tramite L-PBF solitamente porta alla formazione di microstrutture colonnari con celle di dislocazione sub-microniche all'interno dei grani. In condizioni "as-built", il molibdeno (Mo) e il cromo (Cr) tendono a segregarsi nelle pareti cellulari. La presenza di queste strutture di dislocazione cellulare è stata identificata come il principale fattore responsabile delle superiori proprietà meccaniche degli acciai prodotti tramite AM.

### **6.1 Crescita grani 316L con tecnologia SLM**

Tra gli acciai, gli acciai inossidabili a basso contenuto di carbonio, in particolare l'acciaio inox 316L, sono tra i più utilizzati grazie al loro basso costo, alla facilità di lavorazione, alla buona resistenza alla corrosione e all'eccellente tenacità anche in condizioni di lavoro severe.

La fusione laser selettiva (SLM) ha ottenuto molta attenzione negli ultimi anni grazie alla sua capacità di produrre parti metalliche ad alta precisione, con elevata densità e prestazioni elevate. Le parti realizzate con SLM possono essere utilizzate direttamente, senza la necessità di trattamenti post-lavorazione. Il processo genera grani colonnari con diverse e complesse direzioni di crescita, perpendicolari alla direzione di costruzione (BD), influenzando significativamente il miglioramento delle proprietà a trazione. Questo fenomeno rappresenta uno dei principali vantaggi del processo LPBF, a differenza di fusione e forgiatura, dove le pozze di fusione crescono solo in una o due direzioni.

La struttura granulare del bacino di fusione ha un forte impatto sulle proprietà meccaniche delle parti prodotte con SLM. Il processo induce nucleazione eterogenea (poiché la nucleazione omogenea richiede tempi più lunghi, non raggiungibili con SLM) al confine del bagno di fusione, e la crescita dei grani avviene per epitassia con un fronte di solidificazione colonnare. Questi grani si sviluppano principalmente nella direzione perpendicolare al confine del bagno di fusione e lungo il gradiente di temperatura massimo, facilitando un efficace trasferimento di calore e un elevato grado di sotto-raffreddamento.

È stato osservato che il limite di snervamento dell'acciaio inox 316L prodotto con SLM è significativamente migliorato rispetto ai pezzi forgiati, sebbene l'allungamento sia diminuito. L'elevata resistenza meccanica dei campioni SLM è chiaramente correlata ai grani fini e all'alta densità di dislocazioni risultante dalle elevate velocità di raffreddamento coinvolte nel processo. Inoltre, studi hanno dimostrato che l'alta porosità e le grandi dimensioni dei pori contribuiscono alla bassa duttilità dei campioni SLM.

A causa del comportamento reologico irregolare del materiale fuso e del fenomeno di ossidazione inevitabile durante il processo di fusione, il materiale fuso non aderisce bene al substrato sottostante, e il fenomeno di "balling" si forma facilmente, ostacolando una deposizione uniforme e riducendo la densità della parte prodotta.

Un altro fattore importante è l'anisotropia delle proprietà meccaniche delle parti prodotte con SLM. È stato osservato che i grani presentano un'orientazione preferenziale lungo la direzione di crescita, che dipende in gran parte dalla direzione dei gradienti termici presenti durante il processo SLM.

La densità di energia volumetrica, indicata con VED, influisce significativamente sulla dimensione dei grani nei pezzi prodotti tramite SLM (Selective Laser Melting). La VED quantifica la quantità di energia laser fornita per unità di volume della polvere metallica. Un aumento della VED implica una maggiore energia fornita alla polvere, garantendo una fusione più completa e una maggiore coalescenza delle particelle di polvere. La densità di energia volumetrica viene calcolata con la seguente formula:

$$VED = \frac{P}{v s h}$$

dove P è la potenza del laser, h è lo spessore dello strato di polvere, s è lo spazio di hatching e v è la velocità di scansione. Utilizzando una bassa densità di energia volumetrica VED, si osservano numerose porosità residue e alcune porosità di grandi dimensioni, spesso agglomerate tra tracce

adiacenti, portando a un grado di densificazione relativamente basso. Con l'aumento della VED, la densità relativa dei pezzi può raggiungere il 98% senza pori residui evidenti. Questo accade perché con un VED basso, il tempo di permanenza del raggio laser su ciascuna regione aumenta, garantendo una sufficiente fusione del materiale e un buon grado di densificazione.

Nonostante l'elevatissima velocità di raffreddamento durante il processo SLM, l'acciaio inox 316L produce esclusivamente fasi di austenite a causa dell'alto contenuto di Ni e Cr, che favorisce la formazione di austenite. Inoltre, il flusso di Marangoni, che causa il trasferimento di calore convettivo e il movimento del fluido all'interno del bagno di fusione, può alterare la direzione del flusso di calore e influenzare l'orientamento di crescita dei dendriti.

## **7. Metodi post-elaborazione**

Nella maggior parte dei casi, i pezzi stampati richiedono una fase di post-elaborazione, che può includere operazioni di lavorazione per rimuovere le piastre di costruzione e le strutture di supporto, nonché interventi per migliorare le tolleranze. Altri processi, come la rimozione termica del legante e la sinterizzazione, sono necessari per eliminare il filamento residuo e ottenere una maggiore densità. Potrebbe inoltre essere richiesto l'impiego di trattamenti termici aggiuntivi, quali la pressatura isostatica a caldo (HIP), l'invecchiamento o la ricottura.

Nei pezzi realizzati tramite produzione additiva di metalli (MAM) si possono riscontrare diversi difetti che non sono comunemente presenti nei metalli fabbricati con metodi tradizionali. Difetti come un'elevata rugosità superficiale, porosità, stress residui, anisotropia e microstrutture indesiderate risultano inaccettabili per la maggior parte delle applicazioni. I metodi di post-elaborazione per i pezzi MAM, come la pressatura isostatica a caldo (HIP), i trattamenti termici, la lucidatura e la lavorazione, possono migliorare significativamente sia le proprietà meccaniche che l'estetica dei componenti prodotti con la tecnologia AM.

### **7.1 Pressatura isostatica a caldo**

L'HIP (pressatura isostatica a caldo) è una tecnica rigorosa di post-elaborazione utilizzata per eliminare la porosità all'interno della struttura metallica. Il processo consiste nel riscaldare il pezzo a temperature elevate, applicando contemporaneamente pressioni elevate, vicine o uguali al limite di snervamento, in un'atmosfera inerte. Questo provoca una deformazione plastica che densifica e omogeneizza la microstruttura del materiale. Le alte pressioni e temperature favoriscono la dissoluzione dei gas intrappolati nei pori del metallo, portando al collasso dei pori stessi. Poiché i pori agiscono come punti di nucleazione delle crepe e riducono notevolmente la resistenza a fatica,

L'HIP ha dimostrato di migliorare significativamente la resistenza alla fatica, grazie all'eliminazione o alla riduzione delle dimensioni dei pori.

## 7.2 Ricottura

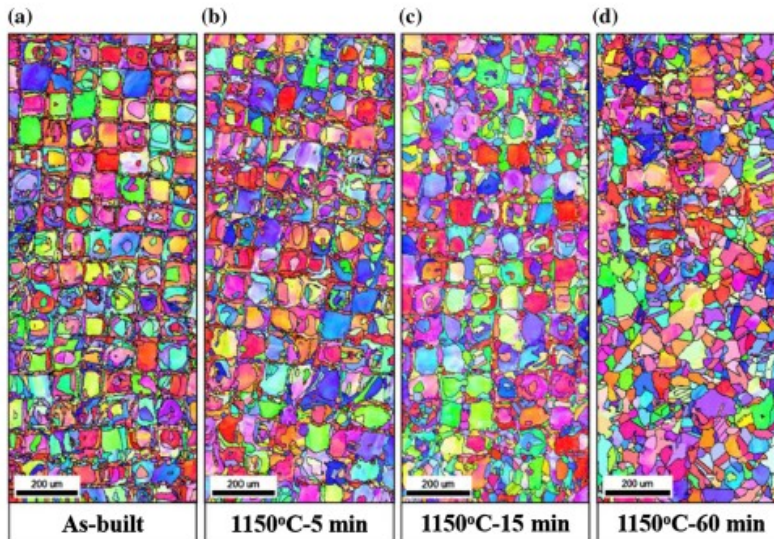
Un fenomeno interessante per la personalizzazione delle microstrutture nella fusione laser a letto di polvere (LPBF) è la ricristallizzazione, ottenuta tramite ricottura post-processo. La forza che guida la ricristallizzazione è l'energia elastica immagazzinata nelle pareti delle celle di dislocazione, formatesi a causa delle elevate tensioni termiche generate dalle alte velocità di raffreddamento e dai successivi cicli di riscaldamento e raffreddamento.

A partire da circa 600 °C, diversi studi hanno riportato la scomparsa dei confini delle pozze di fusione durante il trattamento termico, dovuta alla diffusione atomica [8]. Inoltre, è stato osservato che un tempo di mantenimento prolungato a 1200 °C comporta l'ingrossamento dei grani e la transizione da grani colonnari a grani equiassici. A temperature di ricottura elevate,  $T \geq 1000$  °C, queste celle di dislocazione tendono a de-strutturarsi completamente. Di conseguenza, le eccellenti proprietà meccaniche riscontrate nelle condizioni "as-built" (appena costruito) si riducono rapidamente con l'aumento della temperatura. La riduzione della densità di dislocazione e la diffusione degli elementi sono le principali cause della diminuzione del limite di snervamento.

È noto che l'esposizione prolungata dell'acciaio inossidabile 316L a temperature elevate può portare alla formazione di carburi, come  $M_{23}C_6$ ,  $M_6C$  e diverse fasi intermetalliche. La formazione di queste fasi indesiderate non solo degrada le proprietà meccaniche del materiale, ma riduce anche la sua resistenza alla corrosione, causando una deplezione di cromo e molibdeno dalla matrice. La velocità di nucleazione del carburo di Cr raggiunge il picco tra i 600 e i 750 °C nella maggior parte degli acciai inossidabili austenitici, rallentando a temperature superiori o inferiori. Oltre ai carburi, la fase  $\sigma$  è un'altra fase intermetallica ampiamente studiata e considerata indesiderata, poiché si ritiene che causi fragilizzazione locale e favorisca la formazione di microfessure. Tuttavia, un trattamento termico tra 1100 e 1200 °C elimina la fase  $\sigma$ .

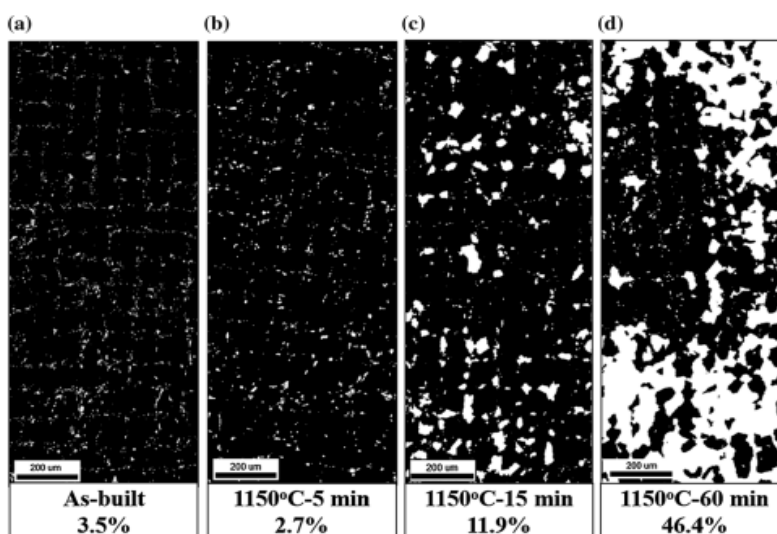
Quando i campioni vengono sottoposti a ricottura a 1150 °C, a questa temperatura, in condizioni di equilibrio, nella microstruttura dovrebbero essere presenti esclusivamente austenite e composti ossidici costituiti da ossidi misti di metalli, come  $MnCr_2O_4$ , noti come spinelli. Temperature inferiori rallenterebbero il processo di ricristallizzazione, mentre temperature superiori favorirebbero una rapida coalescenza delle particelle, la crescita dei grani e la possibile formazione di ferrite delta. Dall'osservazione delle mappe IPF (Inverse Pole Figure) [8], si può notare che i cambiamenti microstrutturali significativi diventano evidenti solo dopo 60 minuti di ricottura. Il pattern a

scacchiera inizialmente presente, risultato della rotazione del laser di 90° dopo ogni strato, viene in parte sostituito da una nuova microstruttura composta da grani equiasiali e geminati di ricottura. Trascorso questo tempo, solo una piccola parte della microstruttura trattata termicamente mantiene le caratteristiche iniziali della condizione as-built.



*Fig. 13* Rappresentazione con mappa IPF della ricristallizzazione a 1150°C dopo 5, 15 e 60 minuti

L'evoluzione della ricristallizzazione e l'identificazione dei potenziali siti di nucleazione sono state analizzate mediante la costruzione di mappe GOS (Grain Orientation Spread) a partire dai dati EBSD (Electron Backscatter Diffraction) [8]. I grani ricristallizzati e i potenziali nuclei di ricristallizzazione sono stati individuati come quelli con una dispersione molto bassa e sono stati rappresentati in bianco, con la loro percentuale in volume indicata. Abbiamo distinto i potenziali nuclei di ricristallizzazione dai grani ricristallizzati in base alla presenza di geminati di ricottura, poiché entrambi mostrano una bassa dispersione. I nuclei di ricristallizzazione sono stati osservati fino a 5 minuti di ricottura a 1150 °C, ma questi grani non presentano geminati di ricottura né una morfologia di grani ricristallizzati.



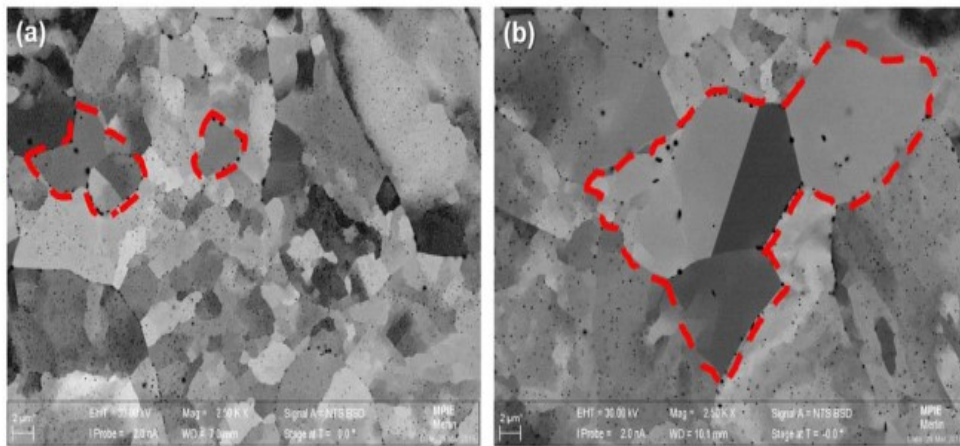
*Fig. 14* Rappresentazione attraverso mappe GOS della ricristallizzazione dopo 5, 15 e 60 minuti.

Al contrario, i grani ricristallizzati, che mostrano geminati di ricottura, sono stati osservati a partire da 15 minuti di ricottura a 1150 °C.

Durante il processo di ricottura, la nucleazione avviene lungo i percorsi del raggio laser, dove le regioni presentano una maggiore energia immagazzinata localmente e maggiori disorientamenti, favorendo così la formazione di potenziali nuclei di ricristallizzazione. Pertanto, per tempi di ricottura prolungati e considerando un pattern a scacchiera, il fronte di ricristallizzazione progredisce lungo i percorsi del laser e successivamente verso le aree adiacenti.

Durante la ricristallizzazione primaria, il numero di bordi di grano a basso angolo, caratterizzati da una bassa disorientazione (Low Angle Boundary – LAB), diminuisce, mentre la frazione di bordi di grano ad alto angolo, con elevata disorientazione (High Angle Boundary – HAB), aumenta progressivamente. I geminati di ricottura sono assenti nella condizione as-built, e solo dopo 15 minuti di trattamento termico cominciano a emergere in quantità significative nella microstruttura.

Man mano che la ricristallizzazione avanza, le nanoparticelle (ossidi, carburi, ecc.) interagiscono con i bordi di grano ad alto angolo, rallentandone la migrazione. Questa interazione tra i bordi in movimento e le particelle favorisce un rapido ingrossamento delle nanoparticelle. È stato osservato che le nanoparticelle situate ai bordi dei grani ricristallizzati presentano un ingrossamento quasi doppio rispetto a quelle nelle regioni non ricristallizzate, dopo soli 5 minuti di ricottura.



**Fig.15** Rappresentazione dell'ingrossamento delle nanoparticelle dopo 5 e 15 minuti di trattamento termico a 1150°C

## **8. Considerazioni generali**

I benefici ambientali della produzione additiva (AM) sono evidenti, poiché, a differenza dei processi di produzione tradizionali e della lavorazione meccanica, le parti prodotte con AM sono vicine alla loro forma finale (NNS) e possono quindi essere realizzate con uno spreco minimo di materiale. Questo porta a un processo che è sia efficiente in termini di risorse che di energia. L'applicazione di metodologie di progettazione per la produzione additiva (DfAM) consente di ottimizzare la distribuzione del materiale, rimuovendo le aree della parte che non supportano i carichi funzionali e che non contribuiscono all'integrità complessiva del componente. Di conseguenza, è richiesto meno materiale e i tempi di costruzione possono essere ridotti, con implicazioni ambientali positive nette.

Il riciclaggio delle parti metalliche (RR) contribuisce anche a ridurre l'impatto ambientale complessivo prolungando la durata dei pezzi danneggiati. Tuttavia, prima della stampa, le materie prime e le polveri subiscono un alto grado di lavorazione, il che comporta impatti ambientali significativi. Il materiale grezzo deve essere estratto e lavorato in lingotti di metallo, poi fuso e atomizzato in particelle sferiche fini. Le polveri devono poi essere setacciate, lavate, asciugate, ridotte, ricotte, frantumate, trasformate e confezionate per la vendita commerciale. A seconda delle dimensioni e della complessità del design, il tempo necessario per stampare una parte può variare da poche ore a diversi giorni, e alcune tecnologie di produzione additiva metallica (MAM) possono richiedere ulteriori lavorazioni, come il debinding e la sinterizzazione. Inoltre, è spesso necessario un trattamento post-lavorazione, come la lavorazione meccanica o il trattamento termico.

In generale, l'AM non è stata concepita per sostituire il TM come processo di produzione più sostenibile, ma piuttosto per creare geometrie complesse che erano quasi impossibili da produrre con metodi convenzionali. Anche se la letteratura esistente indica che il MAM è generalmente meno sostenibile a causa del suo elevato SEC, le sue caratteristiche permettono di utilizzarlo per ridurre l'impatto ambientale dei prodotti in alcuni casi.

## **9. Caso studio**

### **9.1 Procedure sperimentali**

L'obiettivo delle attività svolte in laboratorio è eseguire un'analisi microstrutturale e delle proprietà meccaniche di due campioni di strutture reticolari in acciaio inox 316L, realizzati mediante tecnologia di fusione laser a letto di polvere (LPBF). L'analisi prevede il confronto tra un campione nello stato "as-built", direttamente uscito dalla stampante, e un altro campione sottoposto a un trattamento post-processo di ricottura.

### 9.1.1 Caratterizzazione dei vuoti

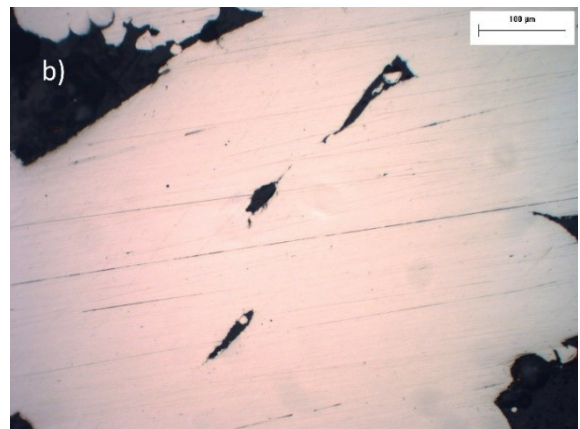
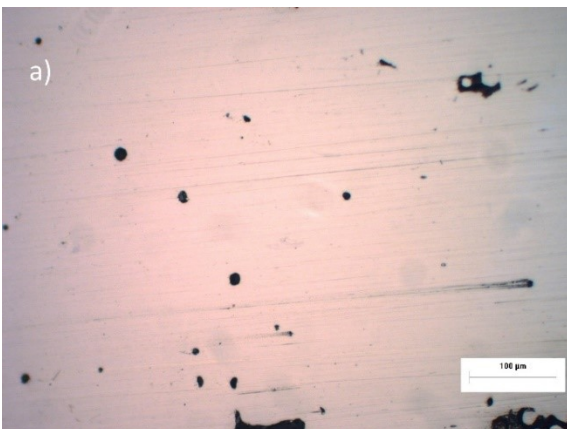
Nella letteratura sono proposti due diversi approcci per l'analisi della porosità. Il primo consiste nel rilevare, misurare e possibilmente analizzare i pori esistenti nella parte finita. Si tratta quindi di una strategia di post-processo. L'analisi post-processo è un metodo molto comune per valutare la qualità e la coerenza delle parti finite. Si basa spesso su tecnologie relativamente semplici ed è utile per fornire informazioni per migliorare il processo. In alternativa, lo sviluppo dei pori può essere valutato in situ, direttamente durante la produzione.

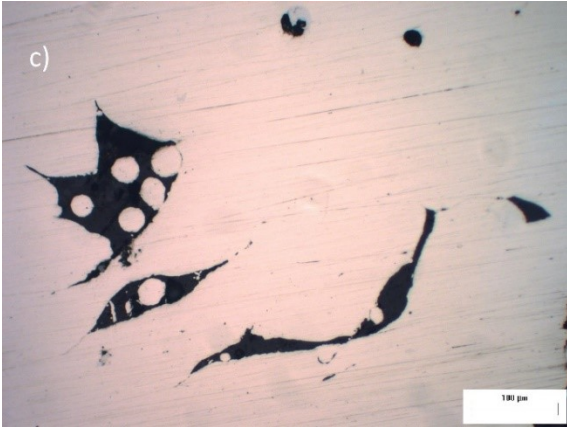
La porosità,  $P$ , è spesso calcolata a partire dalla misurazione della densità utilizzando la seguente equazione:

$$P = 1 - (\rho_{\text{misurata}}/\rho_{\text{teorica}}) \times 100$$

dove  $\rho_{\text{misurata}}$  rappresenta la densità misurata del componente, mentre  $\rho_{\text{teorica}}$  è la densità teorica del materiale completamente denso. Questo metodo è ampiamente utilizzato per diversi motivi: è relativamente semplice, economico e non distruttivo. Tuttavia, va impiegato con cautela poiché non è in grado di rilevare cavità riempite con particelle non fuse. Inoltre, la sensibilità della tecnica è piuttosto limitata, poiché non riesce a individuare pori isolati che, pur avendo un impatto minimo sulla massa, possono compromettere le proprietà meccaniche. In sintesi, questo metodo può essere usato per quantificare la frazione volumetrica dei pori (nei limiti menzionati), ma non fornisce informazioni su dimensioni, morfologia e distribuzione dei pori all'interno del componente.

I pori e altri difetti nella fusione laser selettiva (SLM) possono essere classificati in tre gruppi: (a) porosità, prevalentemente sferiche e di dimensioni inferiori a 100  $\mu\text{m}$ ; (b) difetti legati alla fusione, caratterizzati da forme irregolari; e (c) crepe, che derivano da un rapido raffreddamento, forti gradienti termici e stress termici. È interessante notare che il secondo gruppo può essere ulteriormente suddiviso in porosità causate da fusione incompleta e difetti dovuti a mancanza di fusione, riconoscibili per la presenza di pori di dimensioni maggiori.





**Fig. 16** Pori caratteristici della Laser Powder Bed Fusion

### 9.1.2 Microdurezza

La misurazione della microdurezza Vickers consiste nel far penetrare una punta di diamante a forma di piramide a base quadrata sulla superficie del materiale, applicando una forza definita come carico. Questo processo genera un'impronta, la cui dimensione varia in funzione della durezza del materiale. Una volta rimosso il carico, l'impronta viene misurata tramite un microscopio ottico, rilevando entrambe le diagonali e calcolandone la media. La durezza Vickers viene poi determinata dividendo il carico applicato  $F$  per il quadrato della media delle diagonali ( $d^2$ ) e moltiplicando per una costante geometrica, che tiene conto dell'angolo della piramide del penetratore:

$$HV = 1.854 \times (F / d^2)$$

La durezza HV è espressa sulla scala Vickers, con il carico misurato in kgf e la media delle diagonali in mm.

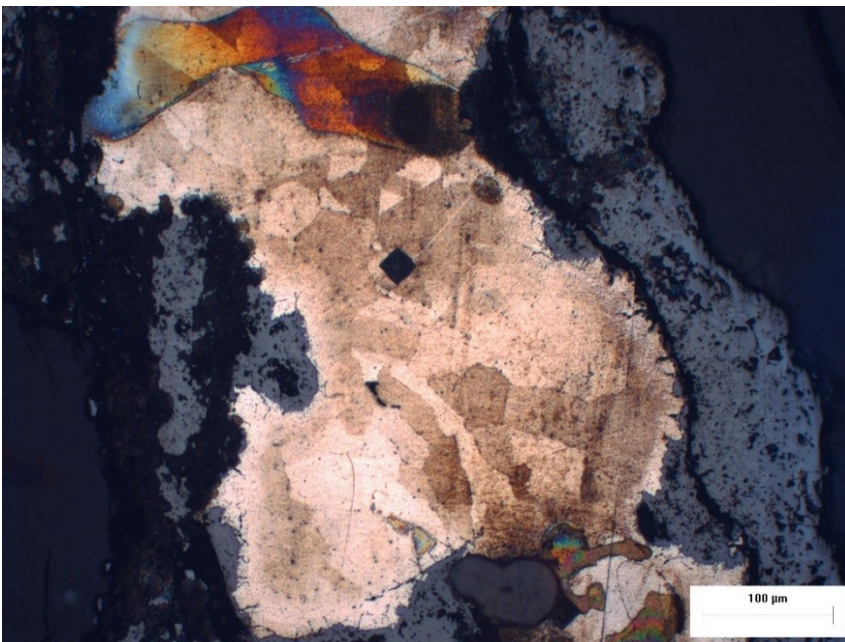


**Fig. 17** Rappresentazione della prova Vickers

Il test è generalmente considerato non distruttivo, poiché lascia un'impronta di dimensioni ridotte. Data la piccola impronta del test Vickers, è utile per un'ampia gamma di applicazioni, come testare materiali molto sottili, parti di piccole dimensioni o aree ridotte, esaminare microstrutture individuali e creare una serie di impronte per descrivere il profilo del cambiamento di durezza. Può inoltre essere

applicato su diversi materiali, dai metalli più duri ai materiali più morbidi, come plastiche o ceramiche.

La preparazione del campione deve garantire una superficie liscia per permettere un'impronta regolare e una misurazione accurata, assicurandosi che il campione sia posizionato perpendicolarmente al penetratore. In generale, il test viene eseguito a temperatura ambiente, con un tempo massimo di 10 secondi per raggiungere la forza completa e una durata della forza applicata compresa tra 10 e 15 secondi. La distanza tra il centro di un'impronta e il bordo del campione deve essere almeno 2,5 volte la lunghezza media delle diagonali dell'impronta. Inoltre, la distanza tra i centri di due impronte adiacenti deve essere almeno tre volte la lunghezza media delle diagonali, o sei volte nel caso di metalli leggeri o malleabili. Le impronte dovrebbero essere il più grandi possibile per massimizzare la precisione della misurazione, poiché gli errori aumentano con la riduzione delle dimensioni dell'impronta. La procedura del test può essere influenzata dalle azioni dell'operatore sui risultati finali.

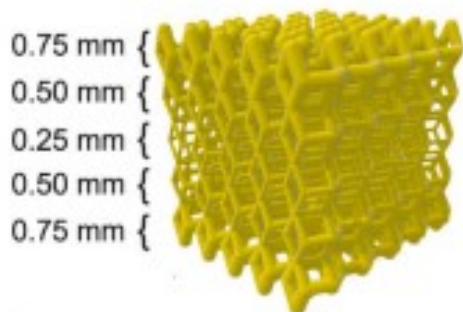


*Fig. 18* Indentazione della prova Vickers su campione ricristallizzato

### **9.1.3 Macchine e strumenti utilizzati**

Gli scaffold sono stati realizzati utilizzando polvere grezza di acciaio inossidabile 316L (SS) fornita da LPV CARPENTER Technology, attraverso la tecnologia di fusione a letto di polvere laser (LPBF) nel sistema di produzione 3D4steel (3D4Mec Srl, Sasso Marconi, Italia). Il sistema era equipaggiato con un laser a fibra Yb da 300 W e i campioni sono stati costruiti in atmosfera di azoto.

Lo spessore dello strato (layer thickness), la potenza del laser e la velocità di scansione sono stati impostati rispettivamente a 0,02–0,06 mm, 200–270 W e 400–1000 mm/s. La distanza tra le linee di fusione nello strato (hatch distance) è stata regolata tra 0,10 e 0,14 mm. La densità di energia volumetrica (VED) utilizzata per produrre gli scaffold graduati esaminati è stata di 48 J/mm<sup>3</sup>. Sono stati stampati campioni di strutture reticolari con geometria graduata, in cui la sezione dei montanti nelle strutture dense-out diminuisce verso il centro, facendo variare la porosità dello scaffold inversamente rispetto allo spessore delle aste. Gli spessori delle aste utilizzati variavano tra 0,25 e 0,75 mm, con incrementi di 0,25 mm. Il campione è stato prodotto stampando inizialmente un supporto a blocco, necessario per dissipare il calore in maniera ottimale e ridurre le deformazioni durante il processo di stampa.



**Fig. 19** *Struttura reticolare Dense-Out [2]*



**Fig. 20** *Supporto a blocco*

Una volta rimossi i supporti, la preparazione dei provini per lo studio prosegue con la troncatura, effettuata tramite una troncatrice metallografica automatica Remet, modello Micromet. Questo strumento è progettato per garantire un taglio preciso e privo di deformazioni, permettendo di ottenere informazioni accurate sulla struttura e composizione dei materiali. È dotato di una morsa che fissa saldamente il pezzo durante il processo, mentre il taglio viene eseguito da un disco progettato per resistere alle alte temperature e velocità di taglio. La formula dei dischi è studiata per assicurare un taglio rapido e preciso, senza alterare la struttura del provino. Durante la troncatura, un sistema di raffreddamento applica un fluido refrigerante nell'area di taglio, mantenendo la temperatura del campione sotto controllo, prevenendo danni da surriscaldamento e facilitando la rimozione dei residui dal disco e dal campione.



*Fig. 21 Troncatrice metallografica automatica Remet modello micromet*

Una volta completato il processo di troncatura, il provino è stato rilasciato dalla morsa e preparato per il successivo trattamento di ricottura, un processo termico volto a migliorare le proprietà meccaniche e microstrutturali del materiale, riducendo le tensioni interne, migliorando la duttilità e favorendo la ricristallizzazione della microstruttura. Questo trattamento è particolarmente utile per il 316L, poiché è un acciaio austenitico che tende a formare tensioni interne durante i processi di lavorazione o fabbricazione, come la stampa 3D. Il trattamento è stato eseguito all'interno di un forno Lenton Thermal Design a una temperatura di 1150°C per 2 ore, sufficientemente elevata da permettere la dissoluzione dei carburi e la ricristallizzazione dei grani austenitici deformati.



*Fig. 22 Forno Lenton Thermal Design*

Dopo il trattamento di ricottura, il provino è stato lasciato raffreddare in aria. Questo passaggio è fondamentale per evitare la formazione di carburi di cromo ai bordi dei grani, un fenomeno che può portare alla sensibilizzazione e alla riduzione della resistenza alla corrosione intergranulare. Una volta completamente raffreddato, si è proceduto con l'inglobatura in resina, un passaggio necessario per migliorarne la maneggevolezza e creare un supporto stabile e duraturo per l'esame dei materiali

metallici. Per l'inglobatura vengono comunemente utilizzati due tipi di materiali: le resine a caldo, che richiedono un riscaldamento sotto pressione e sono adatte per applicazioni metallografiche generali grazie alla loro facilità d'uso e all'eccellente adesione ai materiali metallici; e le resine a freddo, che al momento dell'uso, miscelate con un catalizzatore (indurente), producono un liquido viscoso che viene colato in uno stampo contenente il provino. Queste ultime sono preferite per inglobare leghe che possono subire trasformazioni strutturali alle temperature di polimerizzazione delle resine a caldo.

Il processo di inglobatura è stato eseguito con una pressa inglobatrice Struers LaboPress-1, utilizzando una resina fenolica nera e una resina trasparente termoplastica. Il provino è stato posizionato sull'apposito supporto dell'inglobatrice e, una volta ricoperto con la resina, si è proceduto con l'inglobatura vera e propria, a una temperatura di 150°C e una pressione di 25 kN per 7 minuti. Successivamente, il campione è stato raffreddato in acqua per 5 minuti.



*Fig. 23 Inglobatrice Struers LaboPress-1*

Una volta completato il raffreddamento, il provino inglobato viene espulso sollevando il supporto su cui era stato posizionato, e si procede quindi con il processo di lucidatura. Il processo di lucidatura del campione è stato svolto manualmente. Le macchine impiegate per questo processo sono state rispettivamente una lucidatrice Struers Knuth-rotor 2 e una Struers Planopol-V.

La lucidatura rappresenta la fase finale del processo di preparazione di un campione metallico per l'analisi metallografica. Il suo scopo è ottenere una superficie priva di deformazioni e graffi, altamente riflettente, in modo da consentire una valutazione precisa e dettagliata delle strutture metalliche.

Durante il processo di lucidatura, sono state utilizzate carte abrasive al carburo di silicio, partendo da una grana P180, caratterizzata da carburi di dimensioni maggiori e una minore densità di distribuzione, passando poi a P320, P600, P1200, P2400, fino a P4000, con carburi più fini e una distribuzione più densa, per ottenere una lucidatura a specchio. Durante la lucidatura, sulla carta abrasiva montata su un disco rotante viene erogato un flusso continuo di acqua e, ad ogni cambio di carta, il campione viene ruotato di 90°. Infine, è stata utilizzata una lucidatrice Struers Planopol-V, insieme a un panno e a una sospensione diamantata con grani di dimensione fino a 0,025  $\mu\text{m}$ , per la lucidatura finale.



**Fig. 24** Lucidatrice Struers Knuth-rotor 2

Al termine del processo di lucidatura, si è proceduto a lavare il campione sotto acqua corrente, seguito da un risciacquo con acetone e infine asciugato con aria compressa. Abbiamo riscontrato dei problemi con un provino, nel quale, dopo il passaggio con l'acetone, sono emerse delle macchie al microscopio ottico. Pertanto, come alternativa, è stato utilizzato dell'etanolo.

Successivamente, è stata eseguita un'analisi preliminare al microscopio ottico prima dell'attacco chimico o elettrolitico, che ha permesso di individuare inclusioni, cavità, porosità, soffiature e cricche. Il microscopio utilizzato è un Leica Reichert Jung MeF3, un microscopio ottico a piatto invertito. In questo tipo di microscopio, la sorgente luminosa e il sistema ottico, inclusi gli obiettivi, sono posizionati sotto il campione, mentre il piatto porta-campioni si trova sopra. Questo strumento offre immagini nitide e ben definite, con obiettivi intercambiabili che permettono l'osservazione a diversi ingrandimenti. Le immagini ottenute sono state analizzate con il software ImageJ, che ha consentito la caratterizzazione dei vuoti, permettendo di determinare la percentuale di vuoti presenti nel materiale e la loro distribuzione.



**Fig. 25** microscopio ottico Leica Reichert Jung MeF3

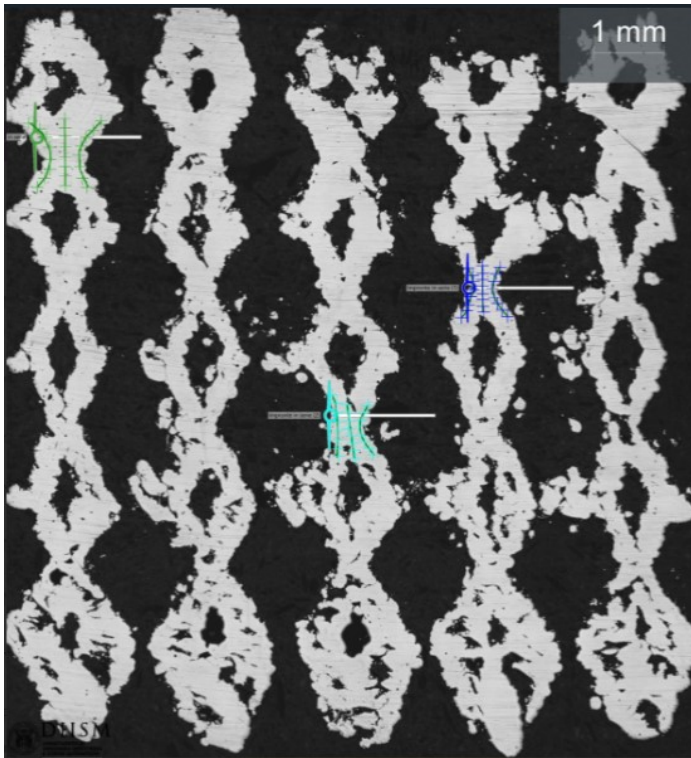
Una volta completata questa analisi preliminare, è stato eseguito l'attacco chimico con una soluzione composta da 10 ml di acido acetico, 15 ml di HCl e 10 ml di HNO<sub>3</sub>, facendo cadere alcune gocce sulla superficie esaminata. Successivamente, la reazione è stata interrotta con dell'etanolo e asciugata con aria compressa. Infine, è stata effettuata un'altra analisi microstrutturale al microscopio ottico per evidenziare, in questo caso, i grani, i bordi di grano e i geminati resi evidenti dall'attacco chimico.

L'ultima fase consiste nello studio della microdurezza, eseguito utilizzando un microdurometro Qness60 A Evo, progettato per garantire precisione e facilità d'uso nelle misurazioni. Questo modello consente di eseguire prove di durezza secondo vari metodi standardizzati, tra cui Vickers, Knoop e Brinell. In tutti questi metodi, il campione viene indentato con una punta diamantata di forma sferica, piramidale a base quadrata o romboidale, e successivamente viene misurata l'impronta lasciata. Il dispositivo si distingue per l'elevata precisione e ripetibilità delle misurazioni, la forza applicata durante il test può essere regolata con grande precisione, permettendo misurazioni accurate anche su campioni molto piccoli o sottili. Il micro-durometro è dotato di funzionalità automatizzate, come il posizionamento automatico dell'indentatore e la messa a fuoco automatica, e include un'interfaccia software avanzata che consente di programmare e automatizzare le misurazioni, visualizzare i risultati in tempo reale e generare report dettagliati. Il software permette anche l'acquisizione e l'analisi delle immagini delle impronte, facilitando l'interpretazione dei risultati. Infine, il sistema è dotato di una camera integrata, che consente l'osservazione e la registrazione visiva delle impronte d'indentazione, migliorando l'accuratezza nella valutazione e permettendo di documentare visivamente i risultati.



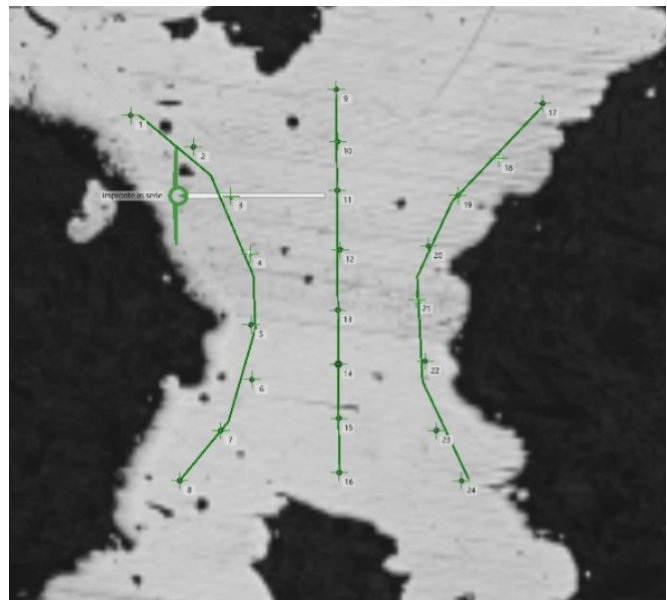
*Fig. 26 Microdurometro Qness60 A Evo con le rispettive ottiche e l'indentatore*

I provini sono stati fissati sulla macchina utilizzando un apposito porta-campioni. Dopo aver azzerato la macchina tramite l'interfaccia software, sono stati programmati il numero di prove, i percorsi che l'indentatore doveva seguire e i parametri di processo, come il carico da applicare e il tempo di permanenza.



**Fig. 27** Serie di misurazioni della microdurezza eseguite su tre nodi differenti del campione As-Built

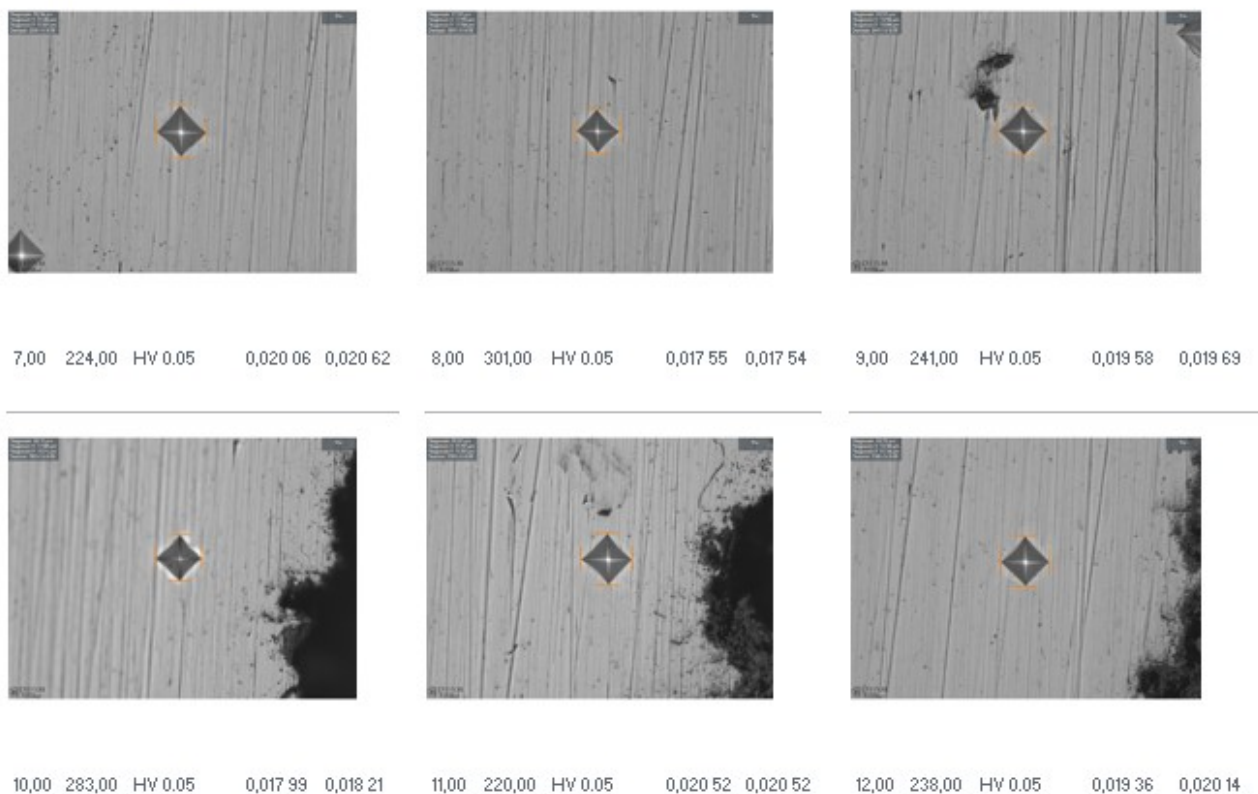
**Fig. 28** Serie di misurazioni della microdurezza eseguite sul nodo 1 del modello As-Built



Nel nostro caso, è stato applicato un carico di 50 gf con una permanenza di 10 secondi per ogni impronta. Le aree di indentazione sono state selezionate nei nodi delle struts, poiché in questi punti è presente una maggiore quantità di materiale, evitando vuoti, porosità e graffi. Le indentazioni sono

state effettuate dal nodo più denso a quello meno denso, ovvero dall'esterno verso il centro del campione. Successivamente, la macchina ha eseguito autonomamente le indentazioni e ha misurato l'area delle impronte, riportando i valori di durezza misurati in Vickers in tre tabelle, ciascuna dedicata a uno dei nodi esaminati. Durante questo processo, è fondamentale non toccare il macchinario né il piano su cui è posizionato, per evitare vibrazioni o urti che potrebbero compromettere l'accuratezza delle misurazioni.

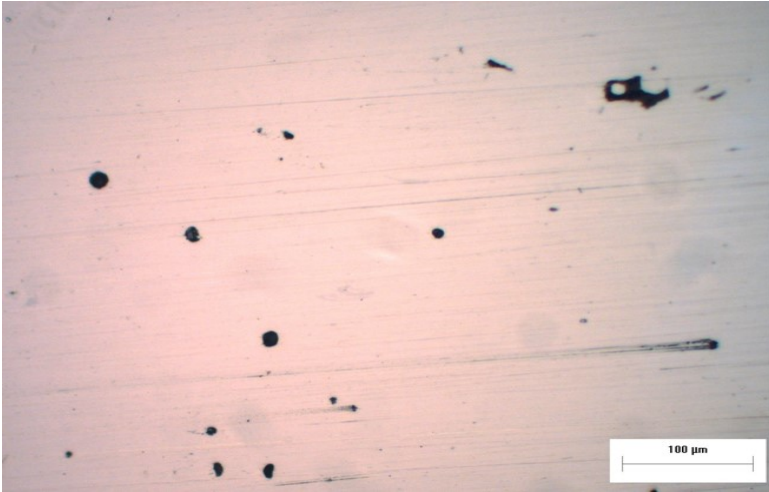
Test point images:



**Fig. 29** Misurazione area delle impronte lasciate dall'indentatore e seguente calcolo della durezza Vickers

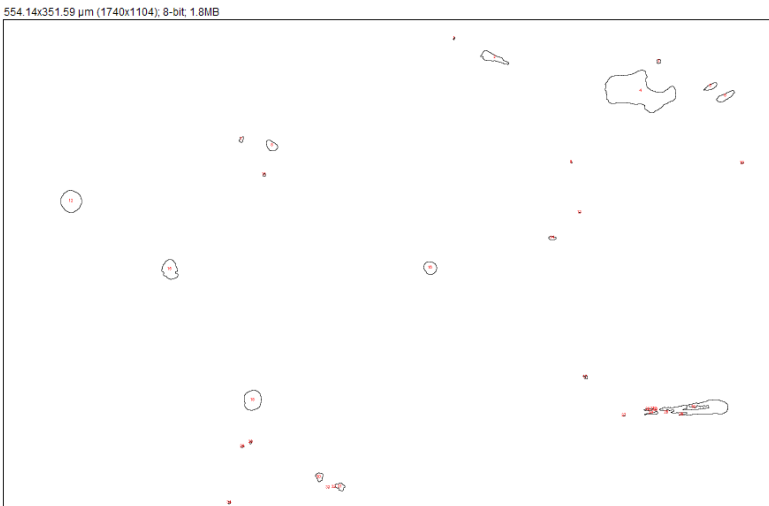
#### 9.1.4. Risultati ottenuti

La prima analisi eseguita consiste in una caratterizzazione microstrutturale preliminare, condotta con il microscopio ottico dopo il processo di lucidatura, per evidenziare vuoti, porosità e inclusioni. Scelte le immagini su cui effettuare lo studio, è stato utilizzato il software ImageJ. Dopo aver impostato la scala e ritagliato l'immagine per escludere vuoti strutturali e graffi, è stato possibile evidenziare i vuoti presenti.



**Fig. 30** Superficie del campione As-Built lucidato con un ingrandimento 20x0,8

**Fig. 31** Superficie campione As-Built lucidato dopo l'applicazione del comando Make binary del software ImageJ



**Fig. 32** Superficie campione As-Built lucidato dopo l'applicazione del comando Analize particles del software ImageJ

Il programma ha poi proceduto a numerarli e calcolarne l'area, generando una tabella con i valori ottenuti. Successivamente, i dati raccolti da ImageJ sono stati trasferiti su un foglio Excel. Per ogni provino sono state selezionate 10 immagini, e per ciascuna immagine è stata creata una tabella in cui

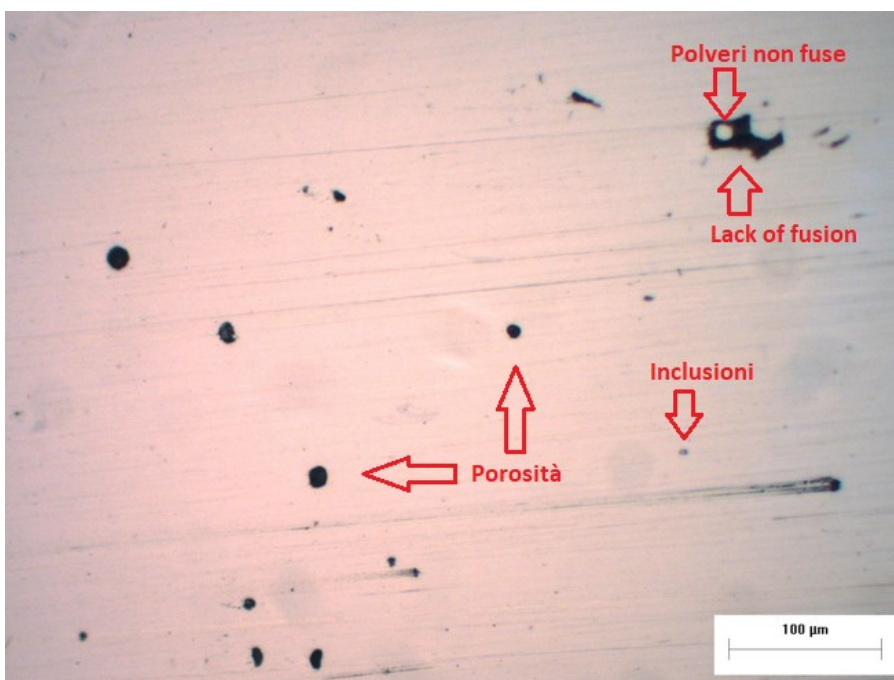
è stata calcolata la somma delle aree dei vuoti. Conoscendo l'area dell'immagine, grazie al software, è stato possibile determinare la percentuale di vuoti presente in ogni immagine utilizzando la formula:

$$\% \text{ vuoti} = \frac{\text{somma delle dimensioni dei vuoti}}{\text{area dell'immagine}} \cdot 100$$

Immagine n°0							
n° vuoto	Area	n° vuoto	Area	n° vuoto	Area	n° vuoto	Area
1	0,101	11	1,826	21	8,824	31	65,418
2	0,101	12	2,333	22	10,041	32	78,604
3	0,203	13	2,637	23	23,226	33	116,739
4	0,304	14	2,738	24	23,632	34	143,515
5	0,406	15	3,347	25	24,342	35	181,042
6	0,406	16	3,651	26	35,194	36	264,412
7	0,507	17	3,956	27	42,598	37	779,241
8	0,507	18	5,173	28	45,742	Σ aree	1993,793
9	1,623	19	5,781	29	45,742	Area	256.736
10	1,724	20	8,317	30	59,84	% vuoti	0,776593

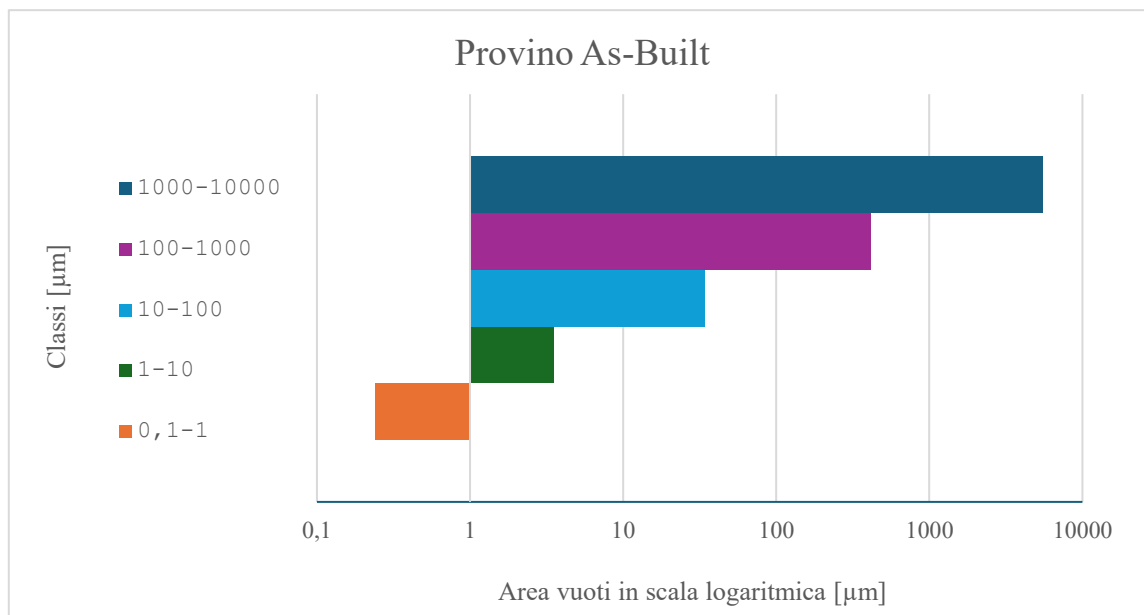
**Tab. 1** Dati ricavati dalla misurazione dell'area dei vuoti attraverso il software ImageJ

Infine, è stata calcolata la media dei valori percentuali ottenuti. Inoltre, è stato possibile identificare difetti come *Lack of fusion*, porosità dovute all'intrappolamento di gas, particelle non fuse e inclusioni.

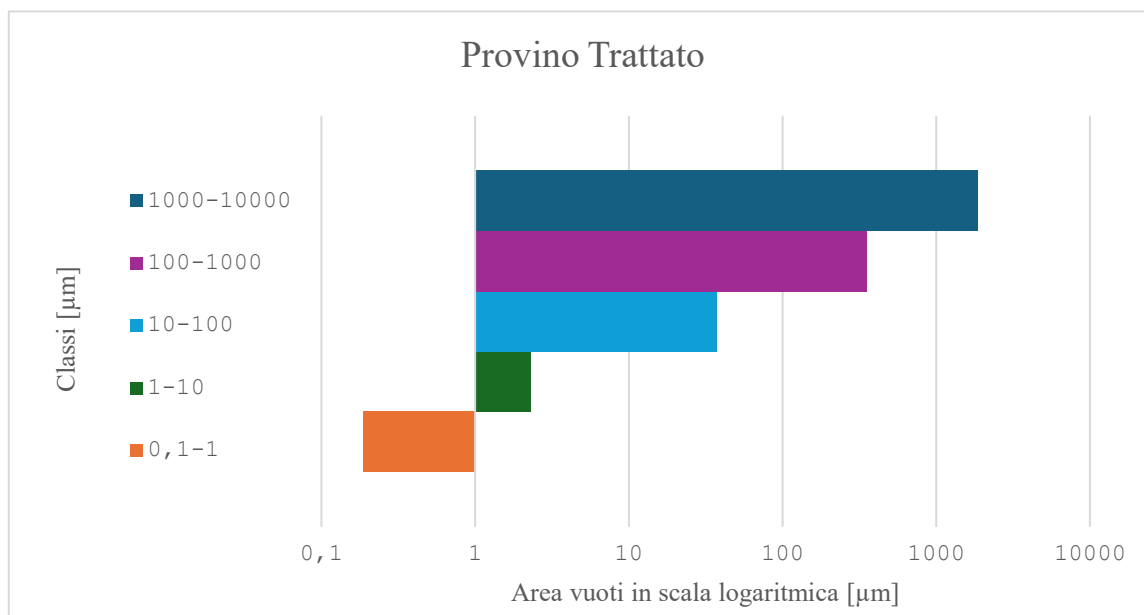


**Fig. 33** Superficie campione *As-Built* lucidata con porosità, mancata fusione, inclusioni e particelle non fuse

Osservando i dati tabulati, si è notato che le dimensioni dei pori variano notevolmente, da  $0,01 \mu\text{m}$  a  $10.000 \mu\text{m}$ . Per questo motivo, si è deciso di suddividere le aree dei vuoti in cinque classi distinte. Successivamente, è stata calcolata la media della dimensione dei pori per ciascuna classe. I dati raccolti sono stati poi confrontati tramite un istogramma, mettendo a confronto sia il campione As-Built sia il campione che ha subito il trattamento di ricottura.

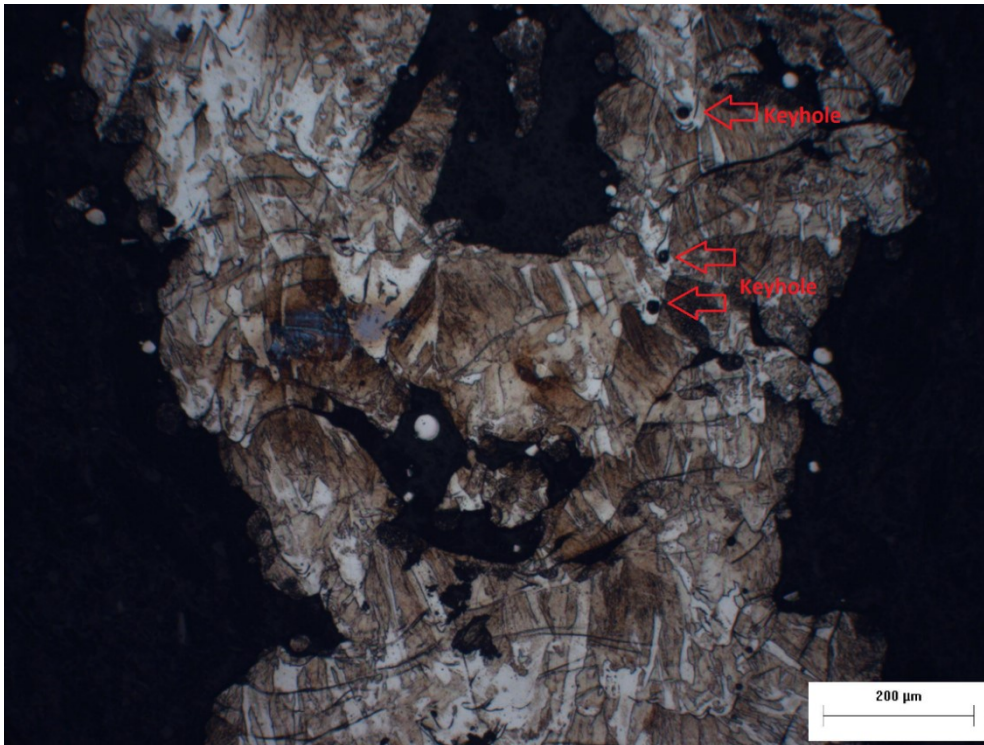


**Fig. 34** Istogramma che rappresenta le medie delle aree dei vuoti del campione As-Built, con le rispettive deviazioni standard, suddivise per classi dimensionali:  $0,1-1 \mu\text{m}$ ,  $1-10 \mu\text{m}$ ,  $10-100 \mu\text{m}$ ,  $100-1000 \mu\text{m}$ ,  $1000-10000 \mu\text{m}$



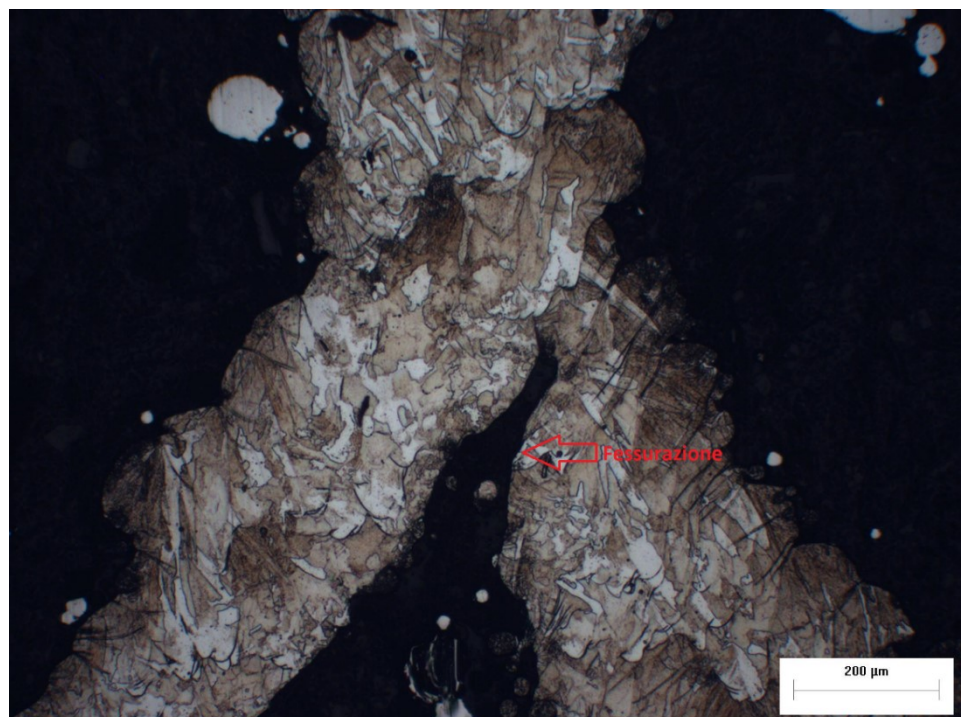
**Fig. 35** Istogramma che rappresenta le medie delle aree dei vuoti del campione trattato, con le rispettive deviazioni standard, suddivise per classi dimensionali:  $0,1-1 \mu\text{m}$ ,  $1-10 \mu\text{m}$ ,  $10-100 \mu\text{m}$ ,  $100-1000 \mu\text{m}$ ,  $1000-10000 \mu\text{m}$

Successivamente, è stato eseguito l'attacco chimico e il campione è stato nuovamente osservato al microscopio elettronico. Questa volta, nel campione As-Built, è stato possibile identificare le pozze di fusione, i vuoti dovuti alla modalità keyhole, una microstruttura prevalentemente austenitica, e nelle regioni vicine al punto di fusione, si è osservata una struttura colonnare o dendritica, oltre alla presenza di microfessurazioni.

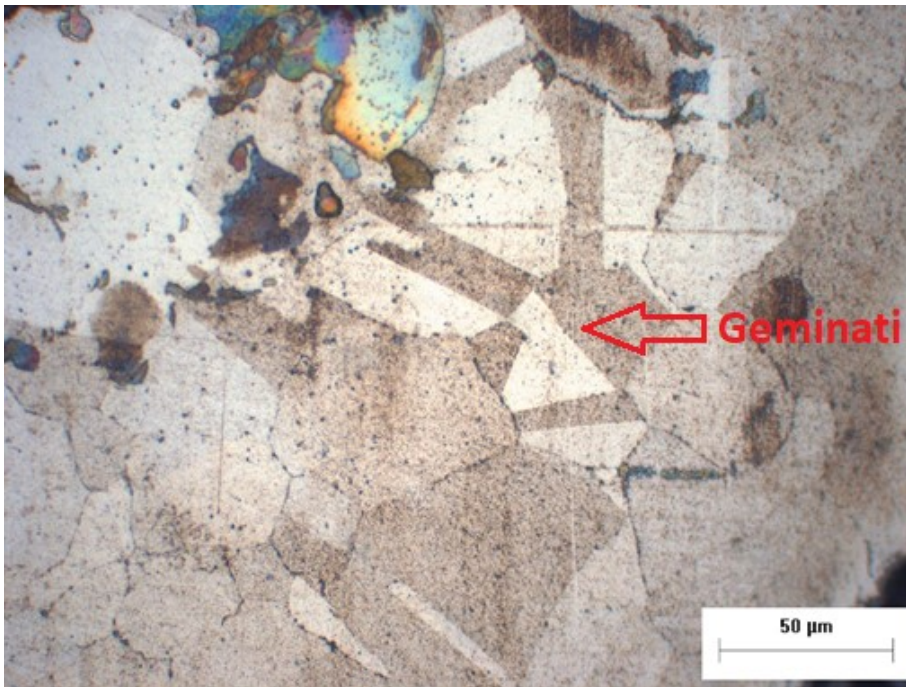


**Fig. 36** Superficie campione As-Built dopo l'attacco chimico, evidenziando Keyhole

**Fig. 37** Superficie del campione As-Built dopo l'attacco chimico, evidenziando fenomeni di fessurazione.

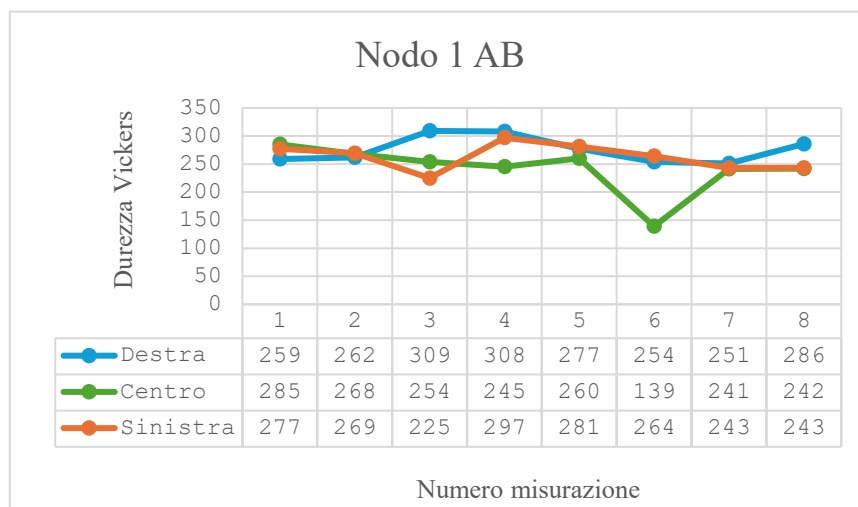


Nel provino trattato termicamente si può osservare la ricristallizzazione dell'acciaio attraverso i bordi di grano. Inoltre, è possibile notare la formazione di geminati, caratteristici degli acciai austenitici come il 316L.

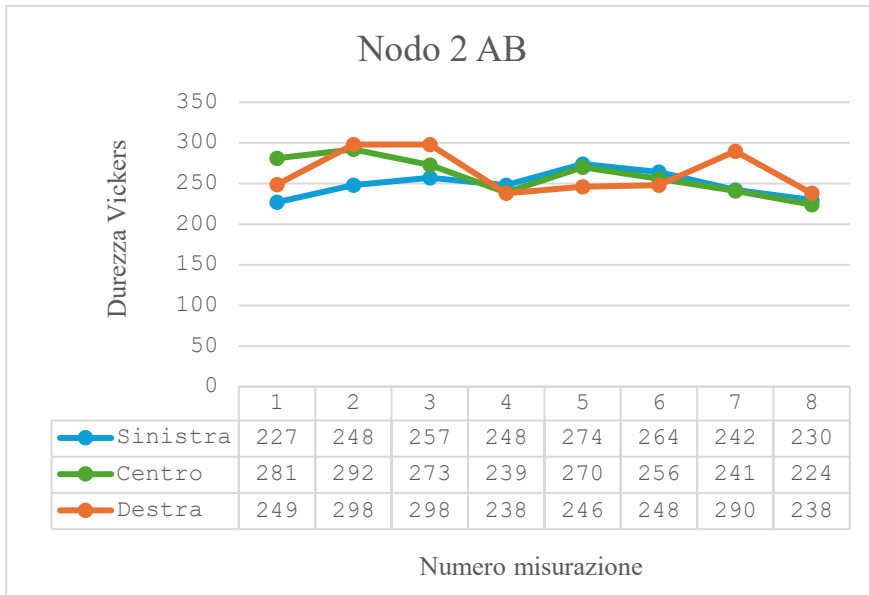


**Fig. 38** Superficie del campione trattato dopo l'attacco chimico, evidenziando la formazione di geminati.

Successivamente, è stata eseguita la prova di micro-durezza su entrambi i campioni. Il software del micro-durometro ha calcolato i valori di durezza in Vickers per ogni misurazione effettuata, e i dati sono stati poi tabellati in un file Excel. Per ogni nodo in cui è stata eseguita la prova, sono state effettuate tre serie di misurazioni: una sul bordo sinistro, una al centro e una sul bordo destro. Una volta raccolti i dati, le tre serie di misurazioni per ciascun nodo sono state confrontate graficamente

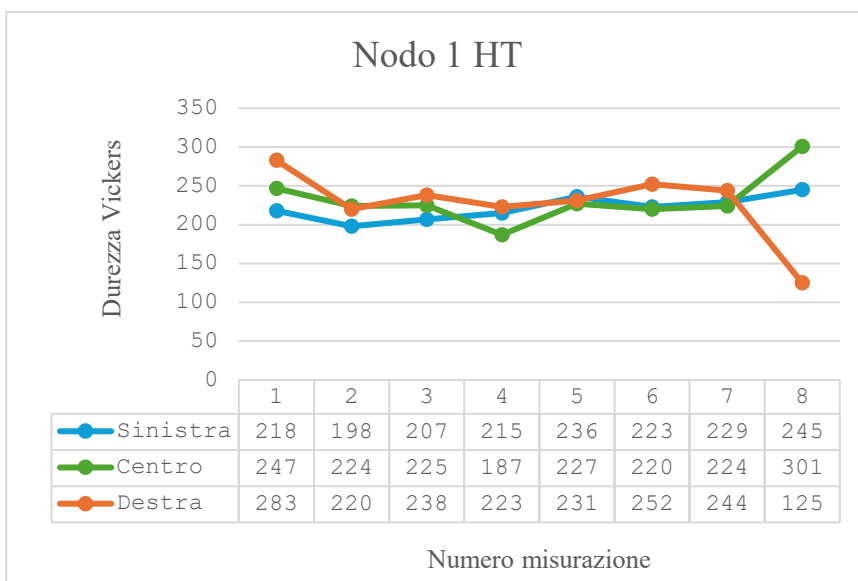
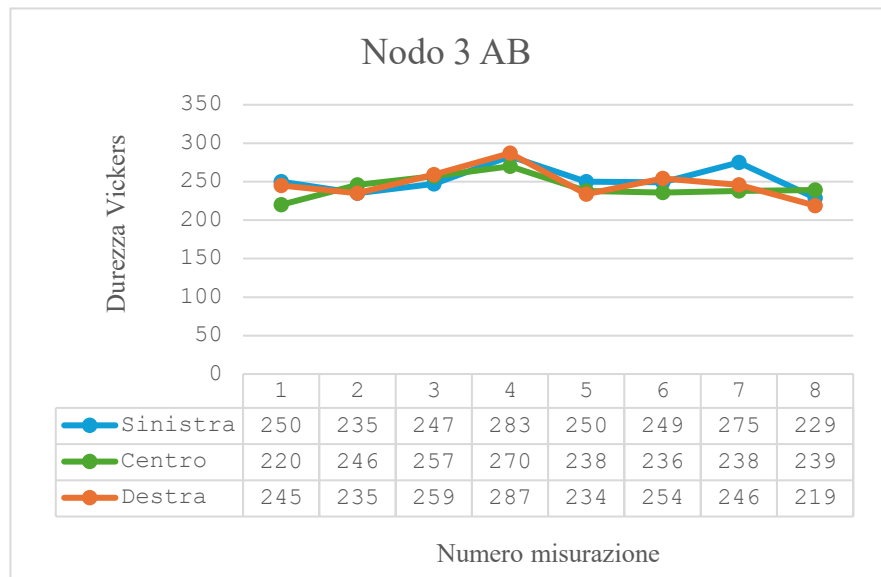


**Fig. 39** Confronto grafico delle tre serie di misurazioni nel nodo 1 campione As-Built



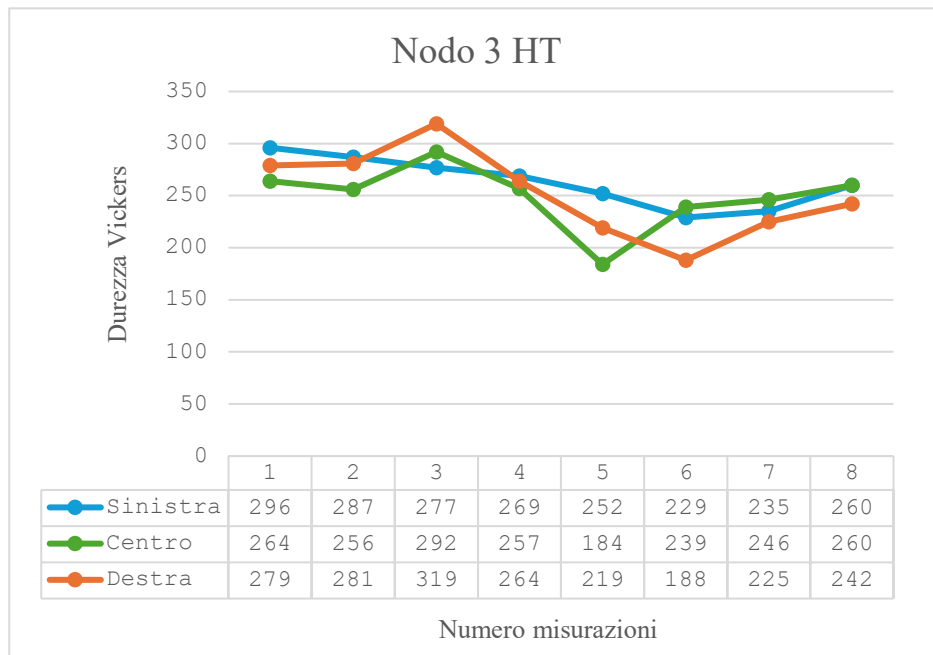
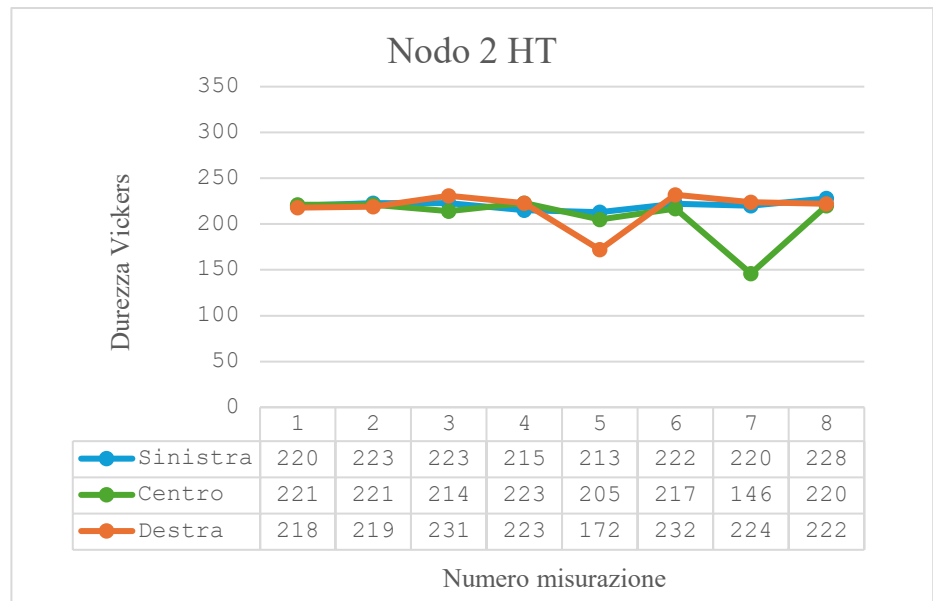
**Fig. 40** Confronto grafico delle tre serie di misurazioni nel nodo 2 campione As-Built

**Fig. 41** Confronto grafico delle tre serie di misurazioni nel nodo 3 campione As-Built



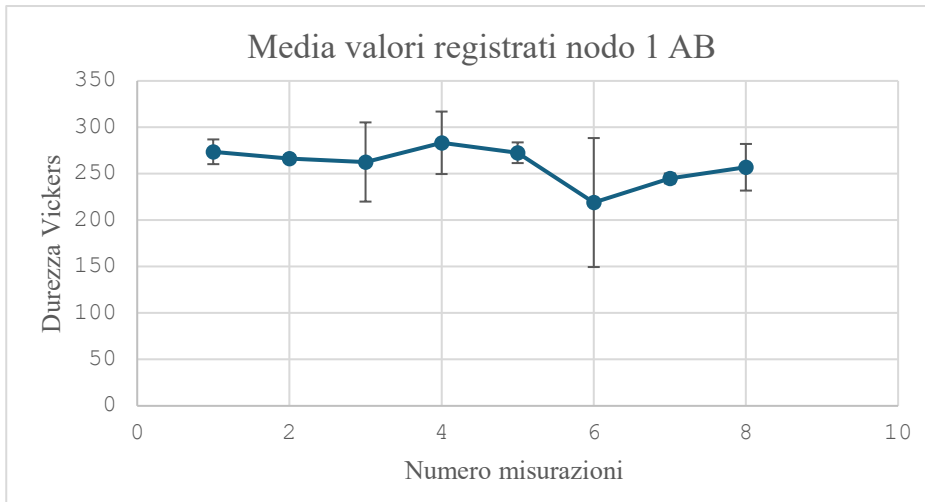
**Fig. 42** Confronto grafico delle tre serie di misurazioni nel nodo 1 campione trattato

**Fig. 43** Confronto grafico delle tre serie di misurazioni nel nodo 2 campione trattato



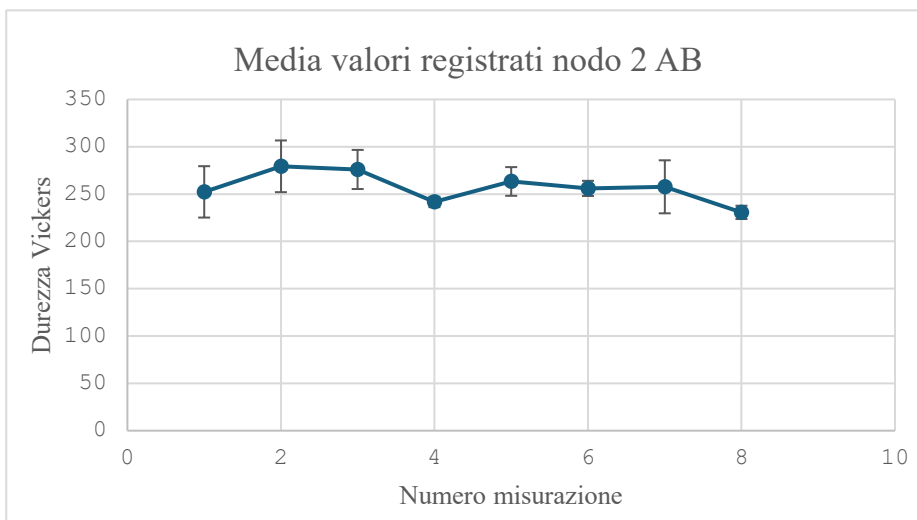
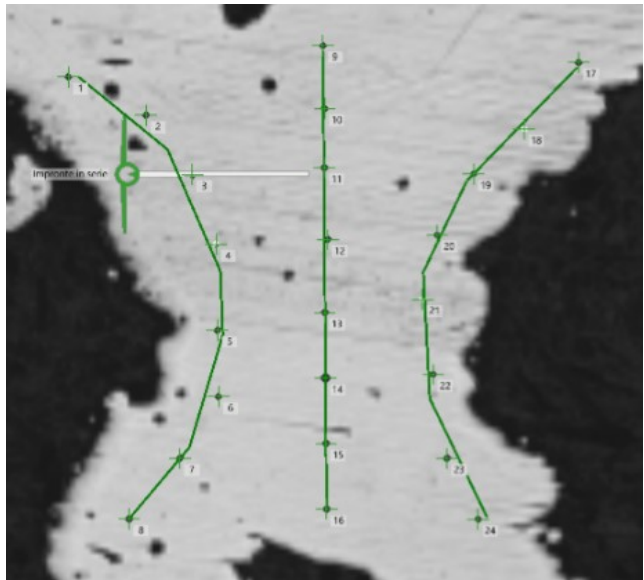
**Fig. 44** Confronto grafico delle tre serie di misurazioni nel nodo 2 campione trattato

Successivamente, per ogni valore appartenente alla stessa colonna, sono state calcolate la media aritmetica e la deviazione standard, generando i grafici corrispondenti. Infine, è stata calcolata la media di tutti i valori ottenuti dalle misurazioni per ciascun nodo, e successivamente è stata determinata la media della durezza sia per il campione As-Built che per il campione sottoposto a trattamento termico.



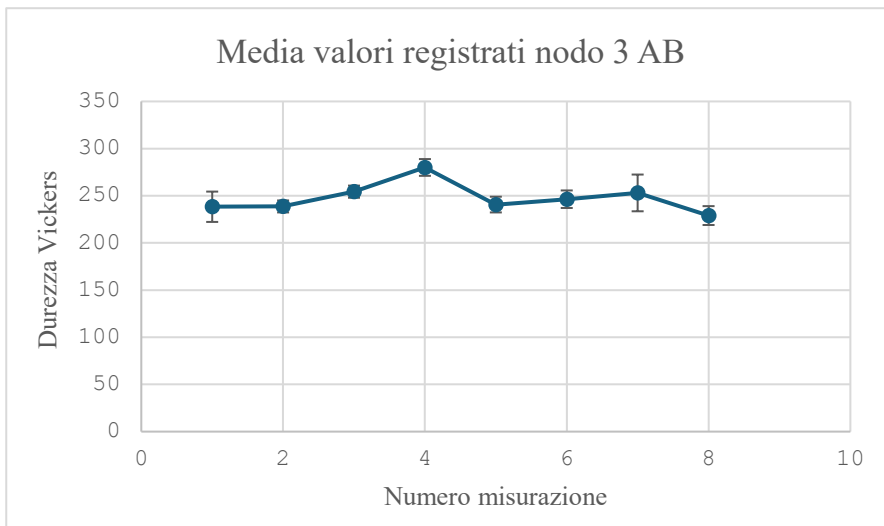
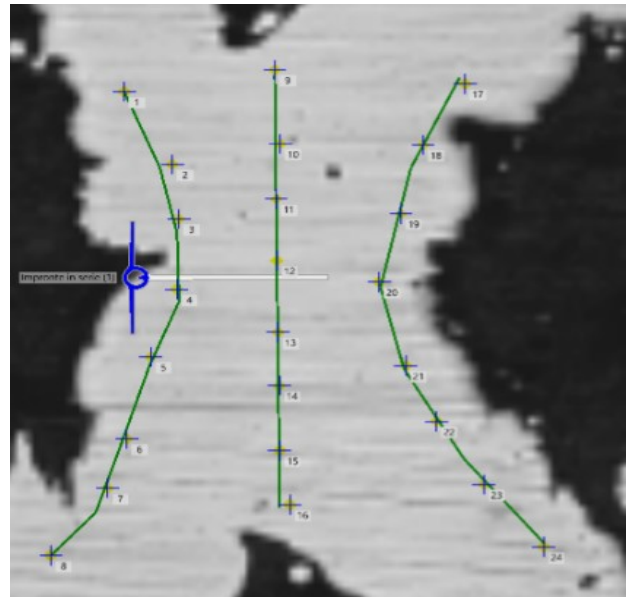
**Fig. 45**  
Rappresentazione grafica dei valori medi di durezza nel nodo 1 del modello As-Built

**Fig.46** Serie di misurazioni eseguite nel nodo 1 del modello As-Built



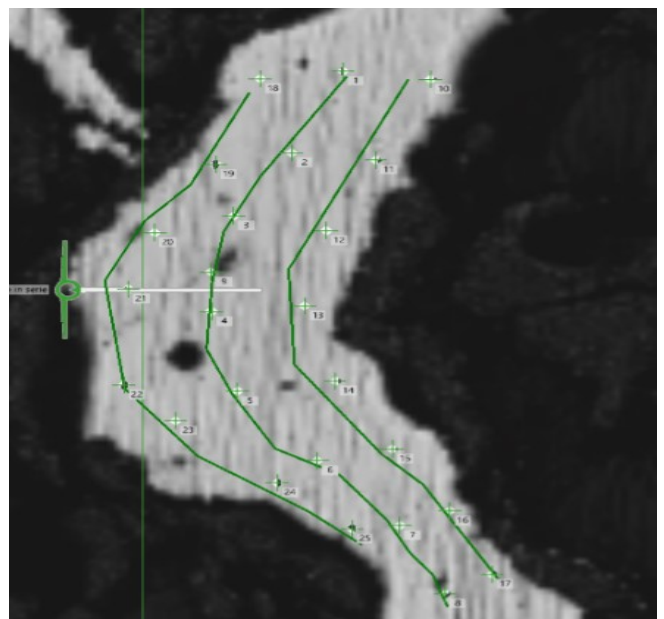
**Fig. 47** Rappresentazione grafica dei valori medi di durezza nel nodo 2 del modello As-Built

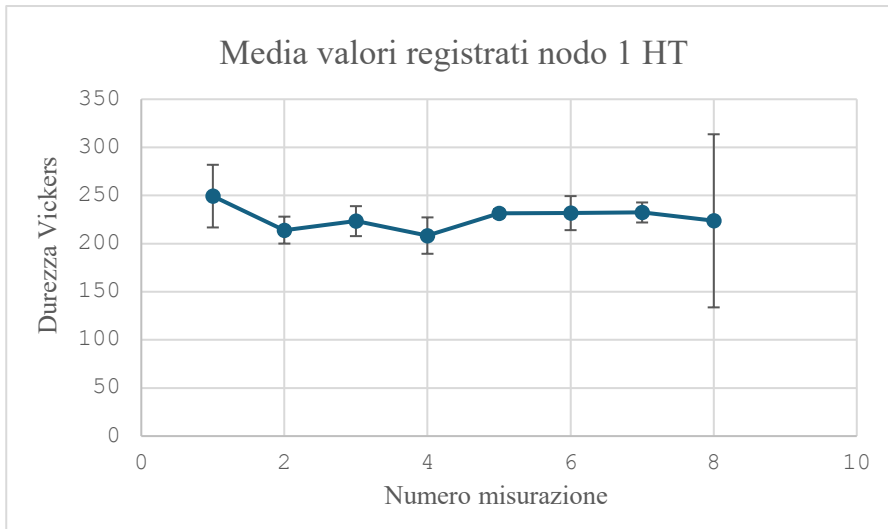
**Fig.48** Serie di misurazioni eseguite nel nodo 2 del modello As-Built



**Fig. 49** Rappresentazione grafica dei valori medi di durezza nel nodo 3 del modello As-Built

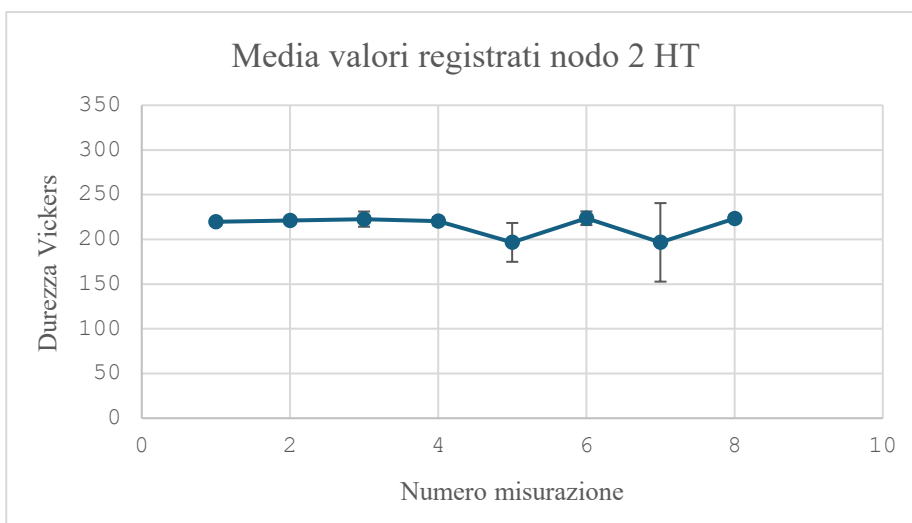
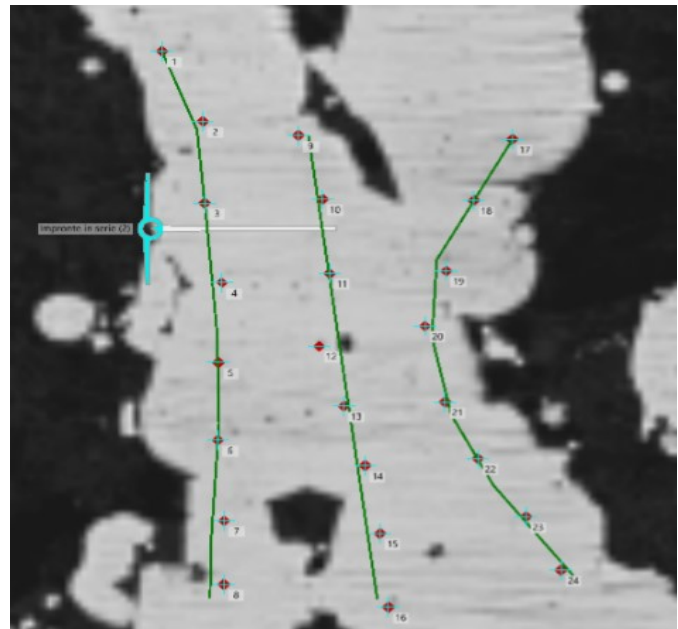
**Fig.50** Serie di misurazioni eseguite nel nodo 3 del modello As-Built





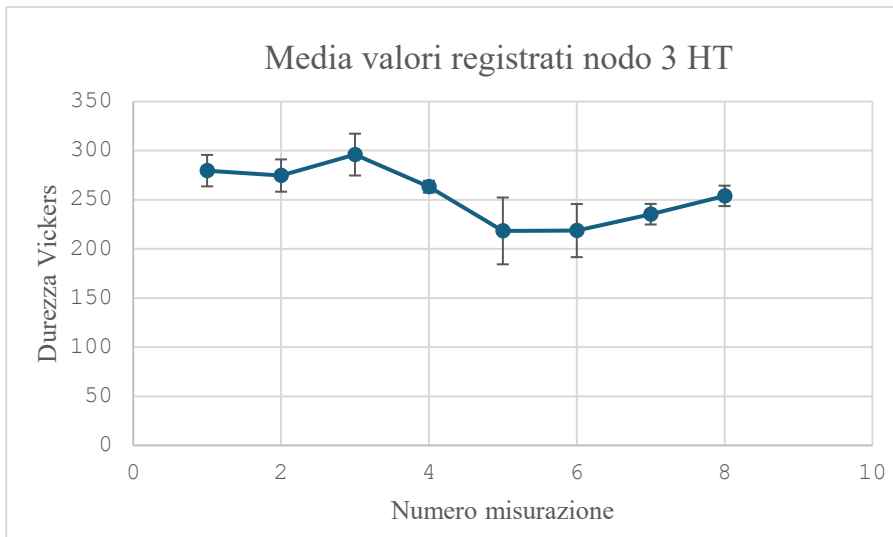
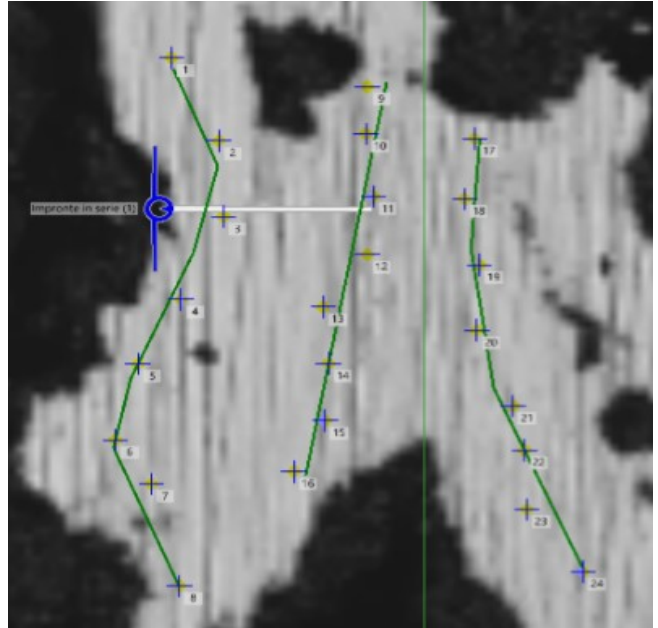
**Fig. 51** Rappresentazione grafica dei valori medi di durezza nel nodo 1 del modello trattato

**Fig. 52** Serie di misurazioni eseguite nel nodo 1 del modello trattato



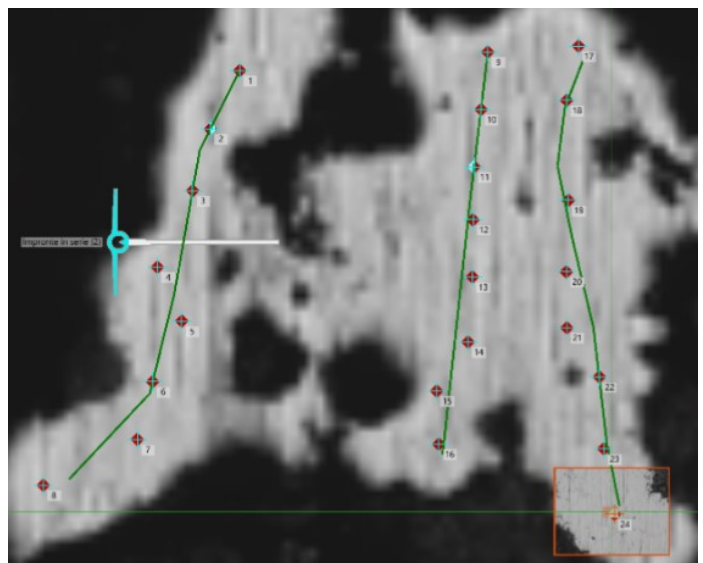
**Fig. 53** Rappresentazione grafica dei valori medi di durezza nel nodo 2 del modello trattato

**Fig.54** Serie di misurazioni eseguite nel nodo 2 del modello trattato



**Fig. 55** Rappresentazione grafica dei valori medi di durezza nel nodo 3 del modello trattato

**Fig.56** Serie di misurazioni eseguite nel nodo 3 del modello trattato



## Conclusioni

Attraverso la caratterizzazione dei vuoti, effettuata tramite il software ImageJ, è stata determinata la percentuale di vuoti presente all'interno dell'acciaio. Nel campione As-Built è stata rilevata una percentuale di vuoti pari al 2,3774%, mentre nel campione sottoposto a trattamento di ricottura la percentuale è risultata del 3,1529%. Questi valori di porosità risultano superiori rispetto alla media generalmente osservata per campioni in acciaio inox 316L prodotti con tecnologia LPBF. Solitamente, con parametri ottimizzati, la porosità nell'acciaio AISI 316L stampato con Laser Powder Bed Fusion si attesta su valori inferiori all'1%.

Attraverso la suddivisione dei vuoti in classi dimensionali, è stato possibile osservare che, nel campione As-Built, i vuoti con dimensioni comprese tra 0,1  $\mu\text{m}$  e 1  $\mu\text{m}$  presentano medie inferiori rispetto a quelle del campione trattato. Per i vuoti con dimensioni tra 1  $\mu\text{m}$  e 10  $\mu\text{m}$ , la media del campione trattato risulta anch'essa inferiore rispetto a quella dell'As-Built. Al contrario, considerando i vuoti con dimensioni comprese tra 1000  $\mu\text{m}$  e 10000  $\mu\text{m}$ , il campione As-Built mostra una media superiore rispetto al campione trattato. Per le classi dimensionali comprese tra 10  $\mu\text{m}$  e 100  $\mu\text{m}$  e tra 100  $\mu\text{m}$  e 1000  $\mu\text{m}$ , non si osservano variazioni significative nelle medie dei vuoti.

Le prove di microdurezza hanno mostrato che la media delle durezze misurate del campione As-Built è risultata pari a 254,875 HV, un valore notevolmente superiore rispetto a quello dell'acciaio inossidabile 316L lavorato, che si attesta intorno a 165 HV. Nel campione trattato termicamente, invece, sono stati registrati valori di durezza inferiori, dovuti alla riduzione delle tensioni interne e alla ricristallizzazione dell'acciaio, con una durezza finale di 232,4167 HV.

Si era previsto che le serie di misurazioni di durezza a sinistra e a destra avessero valori inferiori rispetto a quella centrale, a causa della minore densità del materiale. Tuttavia, in tutti e tre i nodi del modello As-Built, non si è osservata una durezza superiore nelle misurazioni centrali; al contrario, nel provino trattato termicamente, questa differenza è stata rispettata solo nel nodo 1.

Si presumeva che la media delle durezze diminuissi con il ridursi dello spessore delle strutture nel modello As-Built, e questa ipotesi è stata confermata nel modello trattato: il nodo 2 presenta una durezza inferiore rispetto al nodo 1, che ha una densità più bassa. Tuttavia, il nodo 3, essendo il più denso, mostra un valore di durezza superiore rispetto ai precedenti.

# Bibliografia

- [1] Tobias Maconachie, Martin Leary, Bill Lozanovski, Xuezhe Zhang, Ma Qian, Omar Faruque, Milan Brandt  
**SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges**  
Materials & Design, Volume 183, 5 December 2019, 108137
- [2] Maria Laura Gatto, Giorgia Cerqueni, Riccardo Groppo, Eleonora Santecchia, Emanuele Tognoli, Silvio Defanti, Monica Mattioli-Belmonte, Paolo Mengucci  
**Improved biomechanical behavior of 316L graded scaffolds for bone tissue regeneration produced by laser powder bed fusion**  
Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, Volume 144, August 2023, 105989
- [3] Röttger, J. Boes<sup>1</sup>, W. Theisen<sup>1</sup>, M. Thiele, C. Esen, A. Edelman, R. Hellmann  
**Microstructure and mechanical properties of 316L austenitic stainless steel processed by different SLM devices**  
The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 22 May 2020
- [4] Iuliia Morozova, Christian Kehm, Aleksei Obrosof, Yitong Yang, Kamal Uddin Mohammad Miah, Elena Uludintceva, Sebastian Fritzsche, Sabine Weiß, and Vesselin Michailov  
**On the Heat Treatment of Selective-Laser-Melted 316L**  
JMEPEG, 29 September 2022
- [5] Eleonora Santecchia, Stefano Spigarelli, Marcello Cabibbo  
**Material Reuse in Laser Powder Bed Fusion: Side Effects of the Laser—Metal Powder Interaction**  
Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche (DIISM), Università Politecnica delle Marche, 4 March 2020

- [6] Shubhavardhan Ramadurga Narasimharaju, Wenhan Zeng, Tian Long See, Zicheng Zhu, Paul Scott, Xiangqian Jiang (Jane), Shan Lou  
**A comprehensive review on laser powder bed fusion of steels: Processing, microstructure, defects and control methods, mechanical properties, current challenges and future trends**  
Journal of Manufacturing Processes, Volume 75, March 2022
- [7] H. Sohrabpoor, V. Salarvand, R. Lupoi, Q. Chu, W. Li, B. Aldwell, W. Stanley, S. O'Halloran, R. Raghavendra, C.-H. Choi, D. Brabazon  
**Microstructural and mechanical evaluation of postprocessed SS 316L manufactured by laser-based powder bed fusion**  
Journal of Materials Research and Technology, Volume 12, May–June 2021
- [8] Houshang Yin, Miao Song, Pu Deng, Lin Li, Barton C. Prorok, Xiaoyuan Lou  
**Thermal stability and microstructural evolution of additively manufactured 316L stainless steel by laser powder bed fusion at 500–800 °C**  
Additive Manufacturing, Volume 41, May 2021, 101981
- [9] Di Wang, Changhui Song, Yongqiang Yang, Yuchao Bai  
**Investigation of crystal growth mechanism during selective laser melting and mechanical property characterization of 316L stainless steel parts**  
Materials & Design, Volume 100, 15 June 2016
- [10] Mark Armstrong, Hamid Mehrabi, Nida Naveed  
**An overview of modern metal additive manufacturing technology**  
Journal of Manufacturing Processes, Volume 84, December 2022
- [11] Antonella Sola, Alireza Nouri  
**Microstructural porosity in additive manufacturing: The formation and detection of pores in metal parts fabricated by powder bed fusion**  
Journal of Advanced Manufacturing and Processing, June 2019

- [12] N. Iqbal, E. Jimenez-Melero, U. Ankalkhope, and J. Lawrence  
**Microstructure and Mechanical Properties of 316L Stainless Steel Fabricated Using Selective Laser Melting**  
Volume 4, 16 September 2019
- [13] Giorgio Giustizieri  
**Strutture Reticolari realizzate via Additive Manufacturing per il Lightweighting**  
November 2021
- [14] F. C. Pinto, L. S. Aota, I. R. Souza Filho, D. Raabe, and H. R. Z. Sandim  
**Recrystallization in non-conventional microstructures of 316L stainless steel produced via laser powder-bed fusion: effect of particle coarsening kinetics**  
Metal Additive Manufacturing, 20 January 2022
- [15] Baogang Zhou, Pingwei Xu, Wei Li, Yilong Liang, Yu Liang  
**Microstructure and Anisotropy of the Mechanical Properties of 316L Stainless Steel Fabricated by Selective Laser Melting**  
Metals 2021, 10 May 2021
- [16] Shaun Cooke, Keivan Ahmadi, Stephanie Willerth, Rodney Herring  
**Metal additive manufacturing: Technology, metallurgy and modelling**  
Journal of Manufacturing Processes, Volume 57, September 2020
- [17] Ali Eliasu, Aleksander Czekanski, Solomon Boakye-Yiadom  
**Effect of laser powder bed fusion parameters on the microstructural evolution and hardness of 316L stainless steel**  
The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2021) 113:2651–2669

[18] Aziz Chniouel, Pierre-Francois Giroux, Fernando Lomello, Pascal Aubry, Elodie Vasquez, Olivier Hercher, Hicham Maskrot

**Influence of substrate temperature on microstructural and mechanical properties of 316L stainless steel consolidated by laser powder bed fusion**

The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2020) 111:3489–3503