



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

**Analisi microstrutturale di strutture reticolari auxetiche realizzate
tramite metal additive manufacturing**

**Microstructural analysis of auxetic lattice structures made by metal
additive manufacturing**

Relatore: Prof.
Eleonora Santecchia

Tesi di Laurea di:
**Omar Sherif Helmy
Abdelkhalek Mohamed**

Correlatore: Prof.
Maria Laura Gatto

A.A. 2024/2025

Indice

Introduzione.....	3
Capitolo 1: I metamateriali.....	4
1.1 Definizione di metamateriali.....	4
1.2 Metamateriali meccanici programmabili.....	5
1.2.1 Strategie di programmazione.....	6
1.3 Classificazione dei metamateriali meccanici.....	8
1.4 Struttura dei materiali cellulari.....	10
1.5 Effetto dimensionale nei materiali su micro/nanoscala.....	12
1.6 Metodi computazionali e ottimizzazione topologica	12
1.7 Caratterizzazione delle proprietà meccaniche e dei comportamenti.....	13
1.8 Proprietà uniche e multifunzionalità.....	13
1.9 Metamateriali auxetici.....	14
1.9.1 Struttura della natura e auxetici.....	14
1.9.2 Rapporto di poisson negativo.....	15
1.9.3 Struttura re-entrant honeycomb.....	16
1.9.4 Struttura chirale.....	17
1.9.5 Processi di fabbricazione.....	18
1.9.6 Comportamento auxetico.....	19
capitolo 2: La fabbricazione additiva.....	21
2.1 Definizione della fabbricazione additiva.....	21
2.2 Vantaggi della stampa 3D.....	21
2.3 Fusione laser a letto di polvere (laser powder bed fusion).....	23
2.3.1 Layout del sistema LPBF.....	24
2.3.2 Limiti della tecnologia LPBF.....	24
2.3.3 Polvere metallica.....	26
2.3.4 Difetti caratteristici di componenti realizzati tramite LPBF.....	26
Capitolo 3: l'acciaio inossidabile 316L.....	29
3.1 Definizione di acciaio.....	29
3.2 Acciaio inossidabile.....	29
3.3 AISI 316L.....	30

3.3.1 Le proprietà fondamentali ed i tipici usi.....	31
3.3.2 AISI 316L da additive manufacturing.....	32
3.3.3 Prove quasi statiche e prove dinamiche.....	32
Capitolo 4: procedura sperimentali.....	34
4.1 Preparazione campioni.....	34
4.2 Lucidatura.....	36
4.3 Attacchi chimici.....	38
4.4 Microscopio ottico (MO).....	41
4.5 Prove di microdurezza.....	43
Capitolo 5: risultati sperimentali.....	45
5.1 Porosità.....	45
5.2 Microstruttura.....	47
5.3 Risultati delle prove di microdurezza.....	52
Conclusioni.....	59
Bibliografia.....	60
Ringraziamenti.....	66

Introduzione

La produzione additiva (AM) è una tecnica di manifattura che ha registrato un notevole sviluppo negli ultimi anni, al punto da diventare una valida alternativa ai metodi produttivi tradizionali. Rispetto ai processi di fabbricazione sottrattiva, l'AM permette di creare oggetti con geometrie complesse e pareti sottili, riducendo il numero di utensili impiegati, la quantità di manodopera, i tempi di produzione e gli scarti. Questo consente di produrre componenti a costi inferiori.

Per quanto riguarda la produzione di componenti metallici tramite AM, una delle tecniche più utilizzate è la fusione laser a letto di polvere (LPBF). Questa metodologia ha trovato applicazione in diversi settori, come l'aerospaziale, il biomedico e l'automobilistico.

L'obiettivo di questo lavoro è condurre una caratterizzazione microstrutturale completa di componenti metallici con struttura auxetica realizzati mediante AM. In particolare, i campioni analizzati sono stati prodotti in AISI 316L utilizzando la tecnica LPBF. Nel corso delle fasi sperimentali, sono state studiate le porosità presenti nei campioni e ne è stata calcolata la densità. Inoltre, è stata analizzata la microstruttura dei campioni di 316L, misurata la durezza tramite un microdurometro e infine è stata eseguita una prova dinamica su un campione xy con una split-Hopkinson pressure bar.

Per le osservazioni necessarie alla caratterizzazione microstrutturale è stato utilizzato un Microscopio Ottico.

Capitolo 1: I metamateriali

1.1 Definizione di metamateriali

I metamateriali meccanici rappresentano una frontiera affascinante dell'ingegneria dei materiali.

A differenza dei materiali tradizionali, le cui proprietà dipendono principalmente dalla loro composizione chimica, i metamateriali traggono le loro caratteristiche uniche dalla geometria della loro struttura interna, a livello micro e nanoscopico. Immaginateli come dei Lego atomici: piccole unità elementari, chiamate cellule unitarie, che possono essere assemblate in modi sempre diversi per ottenere proprietà meccaniche sorprendenti e spesso controintuitive [1], [2].

Queste strutture artificiali, frutto dell'ingegno umano, ci offrono la possibilità di progettare materiali "su misura", con caratteristiche specifiche per determinate applicazioni.

La chiave di volta di questa tecnologia risiede nella progettazione della geometria delle cellule unitarie. Modificando la forma, le dimensioni e l'orientamento di queste unità elementari, è possibile influenzare in modo significativo il comportamento meccanico del materiale. In questo modo, gli ingegneri possono creare materiali con proprietà che vanno ben oltre quelle dei materiali naturali [3].

I metamateriali possono essere classificati in base al tipo di interazione fisica che modulano:

- **Metamateriali acustici**
- **Metamateriali ottici**
- **Metamateriali termici**
- **Metamateriali meccanici**

I tipici metamateriali meccanici sono strettamente correlati a quattro costanti elastiche: modulo di Young (E), modulo di taglio (G), modulo di massa (K) e il rapporto di Poisson (ν). I primi tre misurano la rigidità, la rigidità e la comprimibilità di un materiale strutturale. La costante elastica per i materiali isotropi, il rapporto di Poisson, offre una metrica fondamentale con cui confrontare le prestazioni strutturali di qualsiasi materiale reale, omogeneo o meno, quando sottoposto a sollecitazione elastica.

- Il rapporto di Poisson può essere definito come la quantità relativa di contrazione trasversale di un dato materiale quando allungato assialmente.
- Il modulo di taglio, G , generalmente si riferisce a un cambiamento di forma a volume costante. Nei gas o nei liquidi ideali, $G = 0$.
- Il modulo di massa, K , si riferisce al cambiamento di volume di un cubo, pur mantenendo la forma.

In genere, questi metamateriali meccanici presentano una varietà di proprietà meccaniche significativamente migliorate, come rapporti di Poisson pari a zero o negativi [4,5], modulo di taglio nullo [6,7,8], rigidità negativa [9], comprimibilità negativa [10], comportamento singolarmente non lineare [11,12] e microstrutture topologiche personalizzate [13,14], tutto ciò li distingue dai materiali naturali convenzionali. Si prevede che queste qualità forniranno supporto meccanico e diverse funzioni protettive in una varietà di potenziali applicazioni industriali, biomediche e di bioingegneria.

1.2 Metamateriali meccanici programmabili

Di recente, sono stati sviluppati metamateriali intelligenti o programmabili, che rappresentano una nuova frontiera nel campo dei materiali avanzati. Questi materiali innovativi sono progettati per controllare in modo preciso la propagazione dei segnali meccanici attraverso un sistema di trasformazione e disposizione di celle unitarie, ognuna delle quali svolge una funzione specifica. Le celle unitarie sono piccole strutture che, quando organizzate in modo opportuno, possono modificare il comportamento complessivo del materiale [15].

Diversi studi, come quelli di [16,17], hanno mostrato come questi metamateriali siano in grado di adattarsi dinamicamente a condizioni variabili. Un'altra caratteristica di questi materiali è la possibilità di programmare e controllare le loro proprietà meccaniche, come la forma o la rigidità, in risposta a comandi esterni. In questo senso, gli studi di [18,19] ([Hawkes et al., 2010](#)), ([van Manen et al., 2018](#)) hanno dimostrato che è possibile programmare il comportamento del materiale controllando vari parametri come il gradiente di sollecitazione, le sollecitazioni di compressione e la sequenza temporale. Questo consente di manipolare la deformazione del materiale in modo da ottenere comportamenti desiderati, come la flessione o la stabilità strutturale.

I metamateriali meccanici programmabili sfruttano il controllo computazionale di parametri informativi, che vengono utilizzati per definire il comportamento del materiale stesso. In pratica, ciò significa che il materiale può essere regolato in modo tale da rispondere in modo controllabile e prevedibile a diversi stimoli [20]. Questo concetto di programmabilità apre la strada a molte applicazioni innovative in cui è possibile costruire materiali che si adattano a specifiche esigenze strutturali o funzionali, rendendoli estremamente versatili e personalizzabili.

1.2.1 Strategie di programmazione

Le strategie di programmazione possono essere suddivise in: a) L'idea principale è quella di programmare strategie con celle di unità geometriche o combinazioni strutturali, come la programmazione parametrica geometrica, la programmazione geometrica topologica e la programmazione parametrica strutturale. B) Programmazione esterna della forza motrice [15].

In primo luogo, secondo la geometria, i metamateriali meccanici programmabili sono divisi in tre categorie principali: quelli basati sulla geometria degli Origami e dei kirigami, quelli basati sulla geometria reticolare e quelli basati su altre geometrie.

Inoltre, in base alla struttura, i metamateriali meccanici programmabili sono divisi in due categorie principali: programmazione strutturale gerarchica [21], la programmazione strutturale multistabile [22]. Infine, anche i metamateriali meccanici programmabili basati sulla programmazione della forza motrice esterna sono una categoria significativa.

Geometria reticolare o programmazione strutturale:

La strategia basata sulla geometria reticolare rappresenta un metodo efficace per controllare la deformazione dei metamateriali. In particolare, i parametri legati alla geometria e alla struttura del reticolo possono essere programmati in modo da permettere il controllo preciso della forma del materiale. Ciò significa che, modificando la configurazione geometrica, è possibile ottenere metamateriali che rispondono a sollecitazioni esterne con cambiamenti di forma predeterminati.

Un altro aspetto importante della geometria reticolare è la sua capacità di regolare la rigidità del materiale. Infatti, i parametri geometrici, come le dimensioni e la disposizione degli elementi del reticolo, possono essere modificati per influenzare direttamente la rigidità complessiva del metamateriale [15].

Oltre alla deformazione e alla rigidità, la geometria del reticolo offre un grande potenziale anche per la programmazione dell'assorbimento di energia. Questo significa che i metamateriali possono essere progettati per assorbire o dissipare energia in modo controllato, ad esempio durante un impatto o sotto carico meccanico. Tale capacità di assorbimento energetico può essere programmata variando la densità del reticolo, come dimostrato da Yuan et al. nel 2019, oppure modificando il volume del reticolo stesso, come evidenziato da Wang et al. nello stesso anno [23,24].

Programmazione gerarchica tipica:

La strategia basata sulla struttura gerarchica nei metamateriali consiste nell'utilizzo di configurazioni composte da due o più strati di celle unitarie eterogenee, con l'obiettivo di ottenere un controllo programmabile sulle loro proprietà meccaniche. Questo approccio può essere suddiviso in due categorie principali: la gerarchia geometrica e la gerarchia basata sui materiali di substrato.

Nel caso della gerarchia geometrica, la programmazione delle proprietà meccaniche si ottiene mediante la regolazione di strutture stratificate, in cui i parametri geometrici delle celle unitarie variano tra i diversi strati. Questi parametri includono dimensioni, forme e disposizione delle celle, che possono essere progettati per influenzare specifiche proprietà meccaniche come rigidità e deformazione. In questo modo, è possibile creare metamateriali con risposte meccaniche precise, programmando la gerarchia delle strutture in modo da ottenere comportamenti meccanici personalizzati.

Dall'altro lato, la gerarchia basata sui materiali di substrato sfrutta la combinazione di strati realizzati con materiali dalle proprietà meccaniche differenti. In questo caso, ogni strato di materiale apporta una caratteristica meccanica unica, e la loro combinazione permette di ottenere un controllo programmabile delle proprietà complessive del metamateriale. Questo approccio consente di adattare le proprietà meccaniche del materiale in risposta a stimoli esterni, come forza o deformazione, migliorando la versatilità e la personalizzazione del comportamento meccanico.

Le proprietà di deformazione programmabili possono essere realizzate grazie alla gerarchia geometrica, dove la disposizione di celle unitarie eterogenee permette di programmare sequenze di deformazione. Ciò significa che le diverse fasi di deformazione del materiale possono essere controllate in modo preciso attraverso la progettazione delle celle. Inoltre, le strutture gerarchiche possono essere progettate con parametri di cella unitaria programmati per realizzare percorsi di deformazione a più stadi, dove ogni fase di deformazione può essere regolata in modo indipendente. Infine, la strategia gerarchica geometrica può essere utilizzata anche per programmare e controllare la rigidità dei metamateriali. Modificando i parametri geometrici attraverso i diversi strati, è possibile influenzare la rigidità complessiva del materiale, rendendo la struttura adattabile a specifiche esigenze applicative [15].

Le strutture multistabili:

I metamateriali con due o più stati stabili hanno la capacità di assumere proprietà meccaniche differenti a seconda dello stato in cui si trovano. Ogni stato può essere caratterizzato da proprietà meccaniche uniche, come rigidità o deformazione, che variano significativamente tra uno stato e l'altro, come dimostrato da Pan et al. (2019).

Questo tipo di struttura consente al metamateriale di essere programmato per passare da uno stato stabile a un altro in modo controllato e su richiesta. Questo cambiamento può essere realizzato utilizzando un approccio basato sul pensiero logico, dove il comportamento del materiale viene determinato in base a specifiche condizioni o input. In pratica, ciò significa che il metamateriale può essere configurato per rispondere a stimoli esterni in modo prevedibile, cambiando le sue proprietà meccaniche in base allo stato attivato. Questo rende possibile l'uso di questi materiali in applicazioni che richiedono adattabilità e risposte meccaniche personalizzabili [15].

Le principali strategie costruttive dei metamateriali meccanici programmabili possono essere suddivise in parametri geometrici, parametri strutturali e programmazione della forza motrice esterna. Che si tratti di geometria o di programmazione della forza motrice esterna, il fulcro è la regolazione della geometria. In effetti, la differenza è che la programmazione geometrica o strutturale dipende dalla progettazione della geometria o della struttura per determinare le proprietà meccaniche del metamateriale, mentre la programmazione della forza motrice esterna controlla lo stato della geometria o della struttura attraverso forze motrici esterne [15].

1.3 Classificazione dei metamateriali meccanici

La figura qui sotto mostra un diagramma schematico che illustra la classificazione dettagliata dei metamateriali meccanici. Questa classificazione si basa sulle costanti elastiche fondamentali, poiché le strutture dei metamateriali vengono spesso descritte in termini di modulo elastico e rapporto di Poisson. L'obiettivo di questa sezione è analizzare le strutture micromeccaniche e capire come queste influenzano e determinano le varie proprietà meccaniche. La maggior parte dei metamateriali meccanici discussi è legata a tre costanti elastiche principali: il modulo di Young, il modulo di taglio e il modulo di massa, insieme al rapporto di Poisson [3].

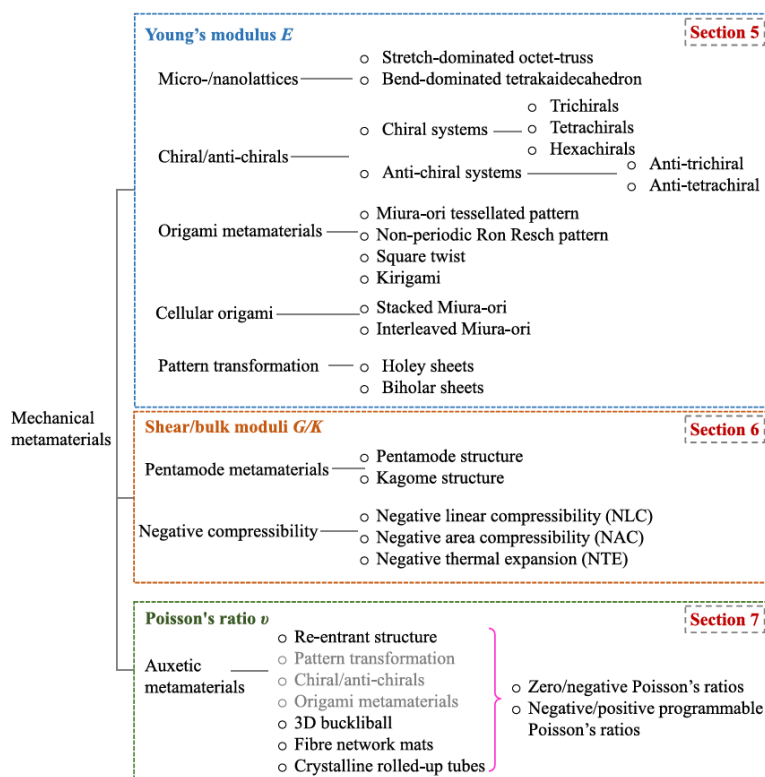


Figura 1: Classificazione di base dei metamateriali meccanici.

I metamateriali meccanici possono essere classificati in tre gruppi principali basati sulle loro costanti elastiche, piuttosto che sulla loro composizione come leghe metalliche, ceramiche o polimeri. Tra questi, due esempi noti sono le strutture Pentamode e Kagome. Questi metamateriali si ottengono quando il modulo elastico è rappresentato lungo l'asse K, come mostrato nella Figura 2, e il modulo di taglio G tende a zero rispetto al modulo di massa K.

La relazione tra questi parametri elastici può essere visualizzata sulla mappa KG, nota anche come mappa di Milton, Figura 2. In particolare, i materiali con una comprimibilità negativa si trovano nella regione centrale del quadrante inferiore destro della mappa, dove G è maggiore di 0 e il modulo K si trova nell'intervallo tra $-4G/3$ e 0. Questo fornisce un quadro chiaro dei comportamenti elastici dei metamateriali in base ai loro moduli di compressione e taglio.

Un altro tipo è costituito da metamateriali auxetici con rapporti di Poisson pari a zero o negativi o con rapporti di Poisson negativi/positivi commutabili.

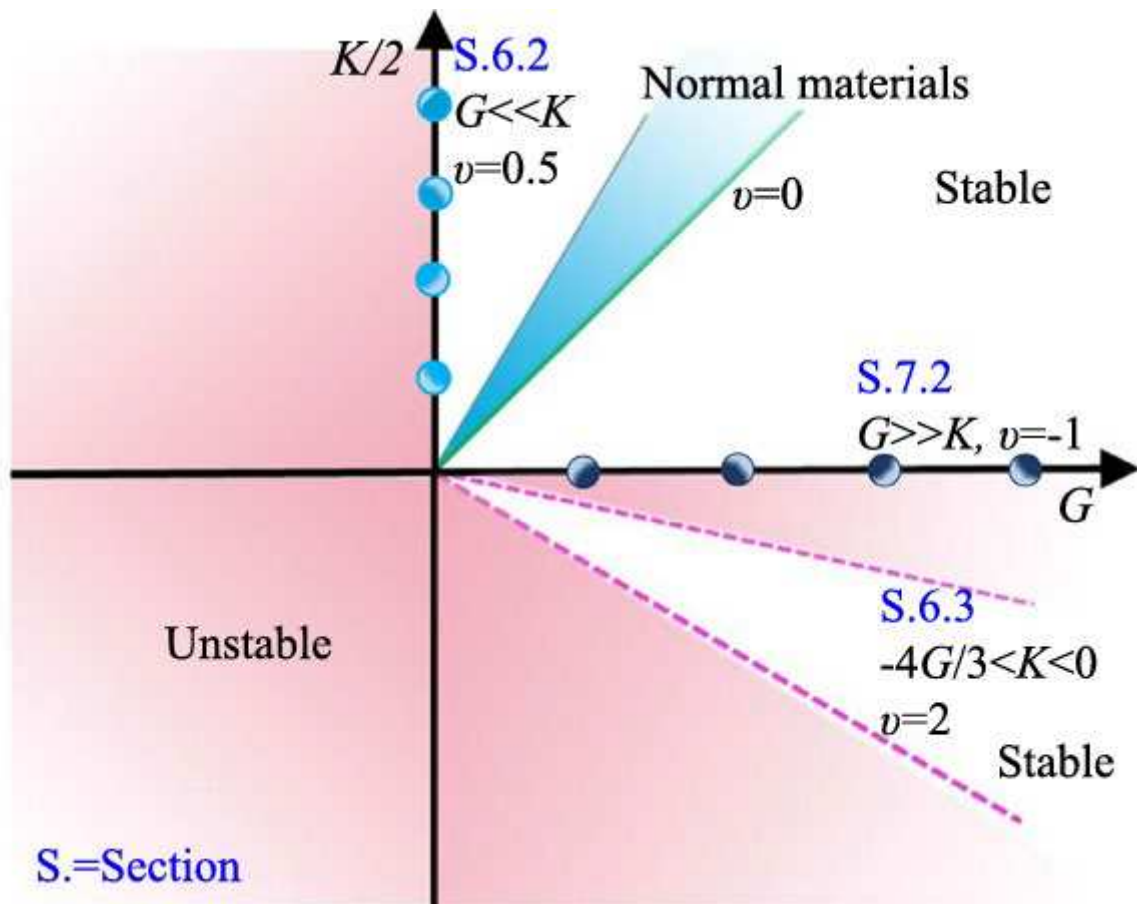


Figura 2: La mappa dei KG.

1.4 Struttura dei materiali cellulari

I materiali cellulari sono composti da montanti e piastre che si intersecano per formare i bordi e le facce delle celle unitarie. Queste piccole strutture sono assemblate insieme per riempire uno spazio in modo efficiente [25]. Negli ultimi anni, queste strutture cellulari sono state utilizzate nella progettazione di metamateriali meccanici, portando alla creazione di nuovi materiali con proprietà uniche.

Questo approccio di costruzione "inverso" è possibile grazie alla capacità di comprendere e prevedere la risposta meccanica di questi metamateriali. In questi materiali, le loro proprietà meccaniche non dipendono solo dalla composizione atomica, ma soprattutto dalla struttura ingegnerizzata, che ne determina il comportamento complessivo.

Comprendere la meccanica dei materiali cellulari è essenziale per sfruttare i vantaggi della loro struttura nella creazione di metamateriali. Le proprietà meccaniche dei materiali cellulari dipendono da tre fattori principali: le proprietà del materiale di base, l'architettura della struttura e la densità

relativa. Quest'ultima è definita come il rapporto tra la densità del materiale cellulare e la densità di un materiale solido composto dallo stesso materiale. In altre parole, la densità relativa confronta quanto è "vuoto" il materiale cellulare rispetto a un materiale pieno dello stesso tipo [26].

I materiali cellulari sono a celle chiuse o a celle aperte e il loro meccanismo di deformazione è solitamente classificato in due tipi, vale a dire, dominato dalla flessione e dominato dalla trazione [27,28].

I materiali reticolari sono una sottocategoria di materiali cellulari a celle aperte, composti da un gran numero di elementi strutturali ben definiti, come travi sottili o aste. Perché un reticolo possa essere considerato un materiale e non una semplice struttura, deve contenere abbastanza celle unitarie. In pratica, il carico applicato deve agire su una scala più grande rispetto ai singoli elementi del reticolo; altrimenti, si comporterebbe come una struttura, e non come un vero materiale con proprietà uniformi.

Architetture dominate da flessione e allungamento:

Le strutture dominate dalla **flessione** si deformano principalmente attraverso la piegatura degli elementi interconnessi che le compongono. Al contrario, i materiali cellulari dominati dallo **stiramento** si deformano mediante compressione o tensione uniaxiale dei loro elementi strutturali.

Un'architettura dominata dallo stiramento è più vantaggiosa per le applicazioni strutturali perché offre un'alta efficienza in termini di peso nel supportare carichi esterni. Questo significa che può sopportare grandi forze senza aggiungere massa eccessiva. D'altra parte, una struttura dominata dalla flessione è composta da materiali leggeri e altamente deformabili, rendendola ideale quando è necessaria una grande conformità o flessibilità [26].

In alternativa, è possibile utilizzare una configurazione strutturale **multiscala** o **gerarchica** dove un singolo elemento strutturale, come un puntone, è costituito da un insieme di reticoli più piccoli [29]. L'introduzione di una gerarchia strutturale in questi metamateriali aumenta la flessibilità nella progettazione, permettendo di ottimizzare le proprietà meccaniche in modo più efficace. Questo approccio consente di adattare il materiale per soddisfare specifiche esigenze meccaniche, migliorando prestazioni come resistenza, rigidezza e deformabilità.

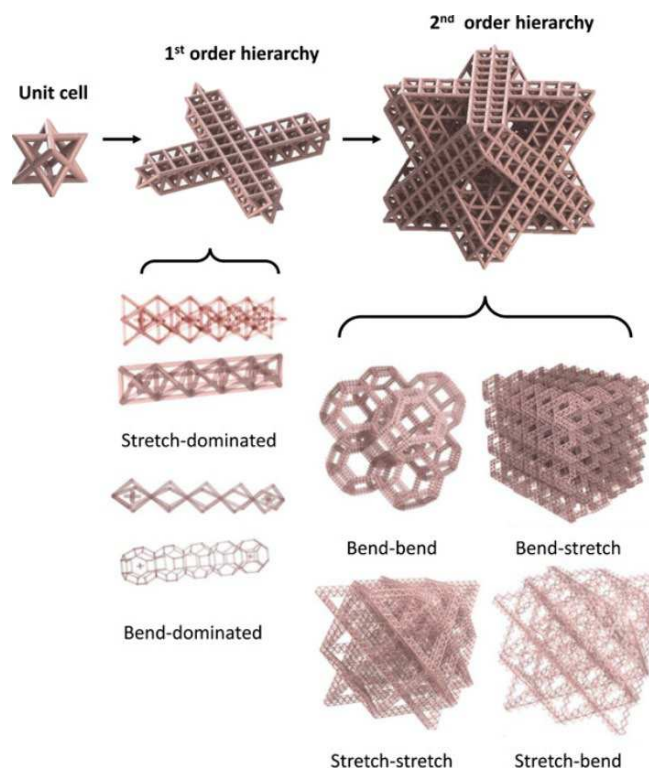


Figura 3: Architetture reticolari gerarchiche multiscala che possono essere ottimizzate per un'applicazione specifica.

1.5 Effetto dimensionale nei materiali su micro/nanoscala

Quando i materiali vengono ridotti a dimensioni nanometriche, il loro comportamento meccanico cambia in modo significativo, mostrando caratteristiche uniche. In alcuni casi, i materiali possono diventare molto più forti [30], più deboli [31] o persino passare da un comportamento fragile a uno più duttile, modificando il modo in cui si deformano [32].

Con la riduzione delle dimensioni del materiale, anche i difetti interni diventano più piccoli o meno probabili. Difetti più piccoli rendono il materiale più resistente rispetto a quando è in forma massiva. Questo fenomeno è spesso chiamato "più piccolo è più forte", poiché materiali su scala nanometrica tendono a mostrare una maggiore resistenza rispetto ai materiali più grandi [33].

1.6 Metodi computazionali e ottimizzazione topologica

Il metodo computazionale è ampiamente utilizzato per progettare e studiare le proprietà meccaniche dei metamateriali. Grazie a questo approccio, è possibile ottenere una comprensione completa delle loro caratteristiche senza dover eseguire costosi o lunghi esperimenti ripetuti. La meccanica computazionale consente di simulare diversi scenari e di individuare i parametri che ottimizzano le prestazioni del materiale, come il tipo di struttura e la configurazione geometrica che

offrono la massima resistenza con la minima densità. Questo rende il processo di progettazione più efficiente e mirato.

L'ottimizzazione topologica è un metodo importante per ottenere strutture con proprietà meccaniche desiderabili [26].

1.7 Caratterizzazione delle proprietà meccaniche e dei comportamenti

I metamateriali meccanici aprono nuove possibilità per migliorare le proprietà meccaniche dei materiali, offrendo al contempo funzioni multiple in diversi campi grazie alla loro capacità di essere personalizzati nel design, nelle dimensioni e nei materiali utilizzati.

La valutazione delle proprietà meccaniche di questi metamateriali viene spesso effettuata con metodi di test standard utilizzati per i materiali tradizionali su larga scala. Tuttavia, a causa del loro comportamento unico, è comune preferire test meccanici **in situ**, che permettono di osservare direttamente le prestazioni del materiale nelle condizioni d'uso reali [26].

1.8 Proprietà uniche e multifunzionalità

I metamateriali meccanici hanno introdotto concetti innovativi che aggiungono nuove funzionalità. Tra questi, ci sono il **coefficiente di Poisson negativo** (materiali auxetici), la **compressibilità negativa**, la **dilatazione termica negativa** e il **modulo di taglio evanescente**. Queste caratteristiche uniche permettono ai metamateriali di comportarsi in modi del tutto differenti rispetto ai materiali tradizionali, offrendo soluzioni avanzate in vari campi.

Il **rapporto di Poisson** (ν) descrive come un materiale si deforma in modo omogeneo quando viene stirato o compresso. Tuttavia, nei metamateriali meccanici, a causa delle deformazioni concentrate attorno a cerniere e nodi, è possibile progettare materiali che mostrano un **rapporto di Poisson negativo**, noti come **materiali auxetici**. Le strutture rientranti e chirali sono esempi tipici di metamateriali che esibiscono questo comportamento, dove si espandono lateralmente quando vengono stirati, invece di restringersi come i materiali convenzionali [34].

I reticoli auxetici basati su un design tridimensionale a nido d'ape rientrante, come mostrato nella Figura 4, permettono l'alterazione del rapporto di Poisson del materiale. Con piccole variazioni nella geometria delle celle unitarie [34], è possibile passare da valori negativi a zero o persino a positivi, semplicemente adattando la struttura del reticolo.

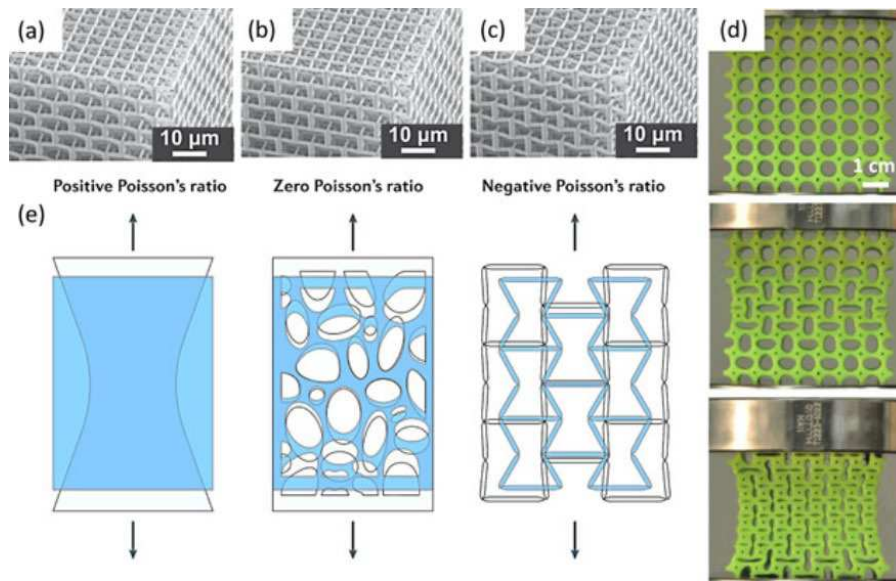


Figura 4: Metamateriali auxetici 2D e 3D. a-c) reticoli 3D con rapporto di Poisson personalizzabile da a) positivo, b) a circa zero, c) a negativo. [26]

1.9 Metamateriali auxetici

in questa parte parliamo dei [metamateriali](#) meccanici auxetici (AMM): I **metamateriali meccanici auxetici (AMM)** offrono un modo innovativo per rivoluzionare diversi settori. Le loro potenziali applicazioni coprono una vasta gamma di aree, come l'industria automobilistica, l'aeronautica, i prodotti farmaceutici, le applicazioni militari, l'abbigliamento protettivo e i sistemi biomedici.

Un metamateriale auxetico è una struttura che presenta un rapporto di Poisson negativo . Il termine auxetico, derivato dalla parola greca "auxetos" e che significa "tende ad espandersi", è stato definito per la prima volta da Evans e colleghi nel 1991 [36].

I metamateriali auxetici offrono importanti vantaggi meccanici in virtù della loro elevata deformabilità derivante dal **rapporto di Poisson negativo (NPR)**. Queste caratteristiche li rendono ideali per la progettazione di assorbitori di urto [37].

Il comportamento auxetico delle strutture progettate dipende dalla geometria della cella base utilizzata [36]. Variando la geometria della cella base si possono variare le performance meccaniche degli assorbitori di urto.

1.9.1 Comportamento auxetico in natura

Il comportamento auxetico naturale, presente in minerali e organismi biologici, è stato osservato per oltre un secolo. Alcuni esempi di strutture auxetiche naturali sono mostrati in Figura 5. I ricercatori

hanno studiato materiali come la pelle, ceramiche, grafite, zeolite e metalli per capire come possano essere applicati in ingegneria. Grazie alle loro cavità ben definite e ai percorsi strutturati, questi materiali possono essere usati in sensori, setacci molecolari e tecniche di separazione. Le strutture auxetiche artificiali che conosciamo oggi si sono evolute proprio da queste strutture naturali.



Figura 5: Materiali auxetici naturali.

1.9.2 Rapporto di Poisson negativo (NPR)

Una struttura auxetica è un tipo di metamateriale meccanico auxetico (AMM) che possiede un **rapporto di Poisson negativo (NPR)**. Questo comportamento ha costruito una rivoluzionaria struttura in schiuma con un rapporto di Poisson di $-0,7$, dimostrando l'importanza di questo fenomeno [38]. Da allora, i metamateriali auxetici artificiali hanno acquisito grande rilevanza nel campo della scienza dei materiali.

Le proprietà auxetiche di un materiale dipendono in gran parte dalla sua configurazione geometrica. Per questo motivo, i **modelli auxetici** sono spesso descritti come modelli puramente matematici, il cui scopo principale è prevedere il comportamento auxetico e ottimizzare la geometria per ottenere risultati specifici [39]. Il **rapporto di Poisson** di queste strutture può essere regolato modificando parametri come angoli e lunghezze degli elementi strutturali. Inoltre, il modo in cui la struttura si deforma ha un forte impatto sull'intensità della risposta auxetica e sulle proprietà complessive del materiale. Le strutture auxetiche vengono quindi classificate in base al loro modello geometrico o al meccanismo di deformazione.

Queste strutture auxetiche mostrano un comportamento caratteristico solo quando vengono compresse oltre un certo limite, ma non reagiscono allo stesso modo sotto tensione. Per questo motivo, è fondamentale comprendere e analizzare i processi di deformazione e i modelli strutturali che variano a seconda del tipo di struttura auxetica. Questa conoscenza è essenziale per sviluppare e applicare metamateriali auxetici (AMM) in diversi ambiti ingegneristici e scientifici. La Figura 6 mostra i vari tipi di meccanismi di deformazione delle strutture auxetiche [36].

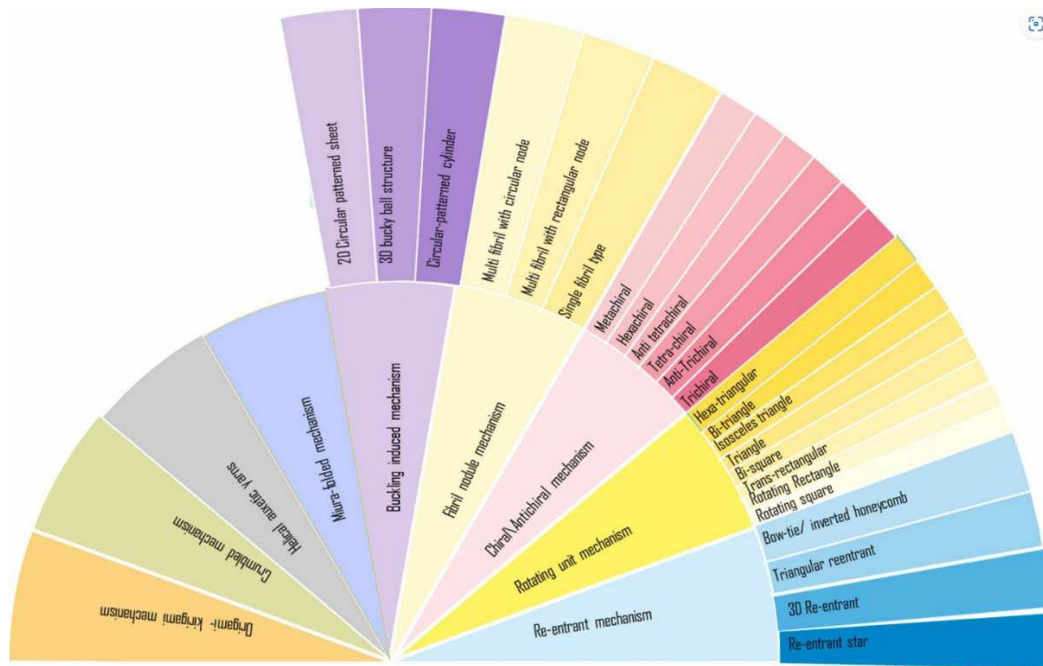


Figura 6: Classificazione delle strutture auxetiche in base al loro meccanismo di deformazione.

1.9.3 Struttura re-entrant honeycomb

La struttura **re-entrant honeycomb** è una configurazione geometrica particolare utilizzata per ottenere materiali con comportamento auxetico, cioè con un coefficiente di Poisson negativo (NPR). Ciò significa che, a differenza dei materiali convenzionali, quando viene tirata in una direzione, la struttura si espande anche lateralmente, anziché assottigliarsi.

La struttura *re-entrant honeycomb* è costituita da celle poligonali (solitamente esagonali), con una geometria che presenta delle rientranze verso l'interno. A differenza del nido d'ape convenzionale, dove le celle hanno pareti perpendicolari o leggermente inclinate verso l'esterno, in una struttura *re-entrant*, le pareti delle celle sono inclinate verso l'interno, formando una "V" rovesciata.

La chiave del comportamento auxetico di questa struttura è la disposizione delle celle. Le pareti delle celle esagonali sono inclinate verso il centro della cella stessa, formando un angolo che permette alla struttura di espandersi lateralmente quando viene tirata in una direzione.

Comportamento meccanico

- **Trazione:** Quando una forza di trazione viene applicata, le celle della struttura re-entrant si aprono, espandendosi in tutte le direzioni. Questo comportamento è dovuto alla forma geometrica delle celle, che favorisce l'espansione trasversale.
- **Compressione:** In modo simile, sotto compressione, le celle si "chiudono" su se stesse, riducendo il volume in maniera coordinata. Questo comportamento conferisce alla struttura

una buona capacità di assorbimento dell'energia e una maggiore resistenza a fratture e danni [40].

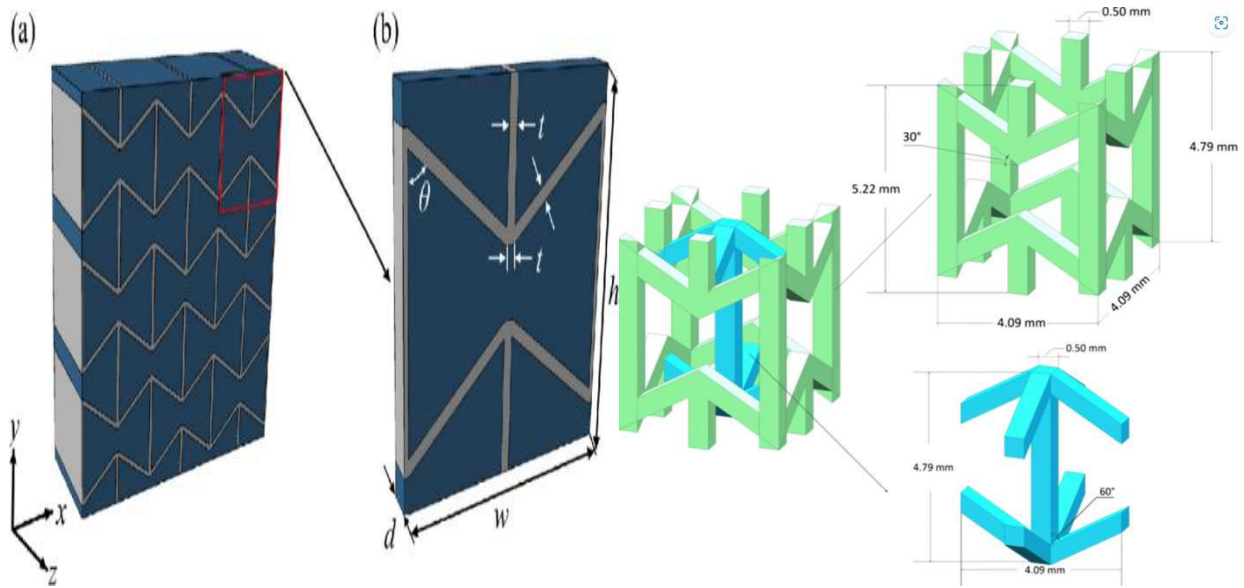


Figura 7: struttura re-entrant honeycomb

1.9.4 Struttura chirale

In natura, una cella unitaria chirale è tipicamente formata da un cilindro centrale circondato da nervature che sono collegate tangenzialmente [41]. Quando viene applicata una forza meccanica, l'unità chirale si piega o si apre in modo flessibile grazie alla rotazione dei cilindri. Questo meccanismo di piegamento delle strutture chirali è illustrato nella Figura 8.

Le strutture chirali possono avere diverse disposizioni geometriche, con un numero variabile di legamenti per cella unitaria, che può andare da 6 legamenti (nella struttura esa-chirale) a 3 legamenti (nella struttura tri-chirale), come mostrato in Figura 8. Quando viene applicata una forza di compressione o di trazione, i nodi ruotano all'interno del piano, costringendo i legamenti attaccati a ogni nodo a flettersi [42].

Se il collegamento avviene con nodi sui lati opposti dei legamenti (nervature) parliamo di sistema chirale Figura 8 se, invece, il collegamento avviene con nodi sullo stesso lato dei legamenti parliamo di sistemi anti-chirali Figura 9.

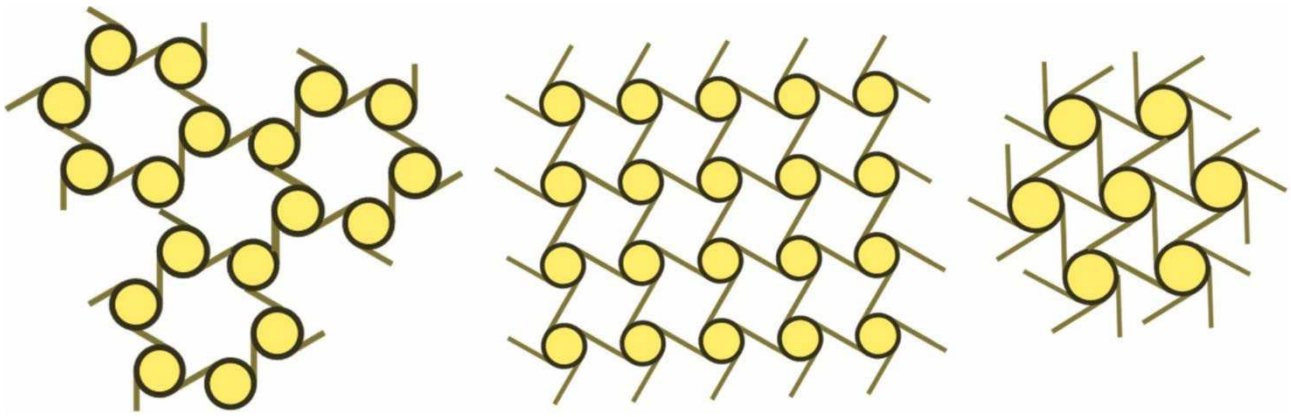


Figura 8: Struttura chirale (a)Tri-chirale (b)Tetra-chirale (c)Esale-chirale.

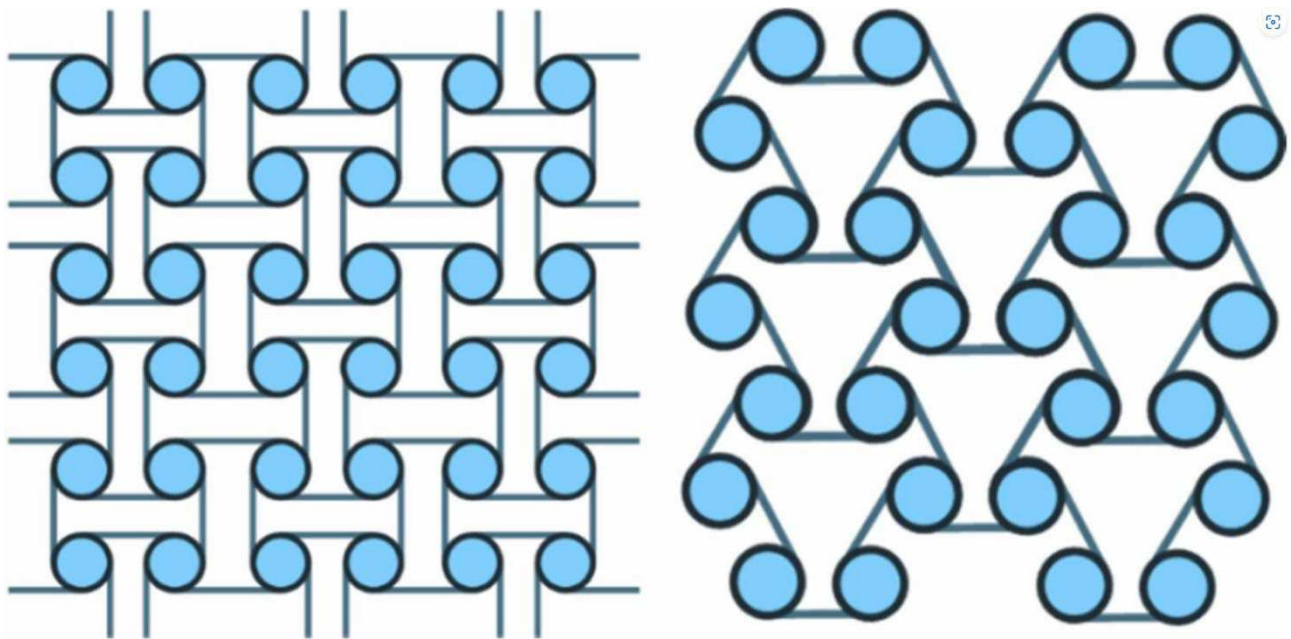


Figura 9: Struttura anti-chirale (a)Anti-Trichirale (b)Anti-tetra-chirale.

I materiali e i design chirali leggeri possono essere abilitati per l'assorbimento dell'energia d'impatto, riduzione delle vibrazioni, prestazioni acustiche, stealth elettromagnetico, [isolamento termico](#), espansione termica zero.

1.9.5 Processi di fabbricazione

I materiali strutturali auxetici possono essere prodotti da una gamma di metalli o polimeri attraverso varie tecniche di produzione. Però la manifattura additiva (AM) si distingue per la sua elevata adattabilità e flessibilità nella creazione di strutture auxetiche, rendendola una tecnica particolarmente efficace per la realizzazione di composizioni complesse. Le tecnologie AM sono state

ampiamente impiegate per costruire sia strutture auxetiche bidimensionali che tridimensionali, come quelle rientranti, chirali e nervature mancanti [36].

È chiaro, quindi, che i materiali auxetici hanno il potenziale per dare un contributo chiave allo sviluppo di nuovi e migliorati materiali strutturali e funzionali. La direzione di applicazione auxetica illustrata in figura 10.

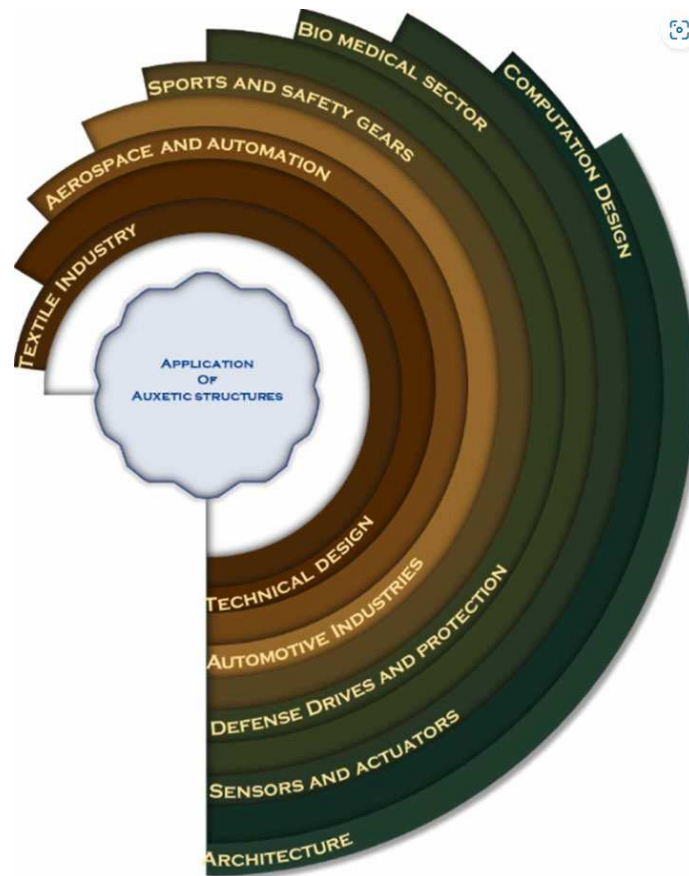


Figura 10: Applicazioni delle strutture auxetiche

1.9.6 Comportamento auxetico

I metamateriali auxetici si distinguono per un comportamento unico e opposto a quello dei materiali convenzionali, grazie al loro coefficiente di Poisson negativo (NPR). Quando una struttura auxetica subisce una deformazione, la sua risposta si concentra nella zona rientrante, dove il materiale si compatta anziché assottigliarsi. Questa caratteristica consente al materiale di diventare più denso vicino alla regione danneggiata, migliorando la sua resistenza.

La tenacità alla frattura dei metamateriali auxetici è significativamente superiore rispetto ai materiali normali, come dimostrato da studi che riportano valori superiori [43]. A differenza dei materiali ordinari, i metamateriali auxetici mostrano un comportamento anomalo sotto sforzo di trazione: invece di assottigliarsi, si espandono lateralmente, aumentando la loro sezione trasversale.

Inoltre, i metamateriali auxetici offrono vantaggi anche in termini di proprietà di smorzamento e assorbimento acustico, superiori rispetto ai materiali tradizionali, rendendoli ideali per applicazioni dove è necessaria la dissipazione dell'energia o la riduzione del rumore [36].

Le strutture auxetiche sono ancora al livello iniziale per essere implementate su larga scala per varie applicazioni ingegneristiche ed esistono molte sfide critiche.

-la capacità portante e la resistenza agli urti delle strutture auxetiche sono relativamente basse.

-Un altro problema è che la produzione di massa e le applicazioni AMM sono fortemente limitate a causa dei loro elevati costi di produzione [36].

Capitolo 2: La fabbricazione additiva

2.1 Definizione della fabbricazione additiva

Esistono varie tecniche di fabbricazione che potrebbero essere impiegate per sintetizzare metamateriali meccanici, la maggior parte delle quali prevede l'uso di tecnologie di produzione additiva [26].

La produzione additiva, o stampa 3D, è una rivoluzione industriale che consente di creare oggetti tridimensionali aggiungendo materiale strato per strato, a partire da un modello digitale. Questa tecnologia ha trasformato il modo in cui progettiamo e produciamo, consentendo la realizzazione di geometrie complesse e personalizzate che sarebbero difficili o costose da ottenere con metodi tradizionali.

L'impatto della produzione additiva è notevole in molteplici settori, dall'aerospaziale al medico.

La capacità di produrre parti a parete sottile e altamente complesse a costi contenuti ha aperto nuove frontiere nella progettazione e nella produzione. Grazie a sofisticati software, i progettisti possono simulare le prestazioni e le caratteristiche di ciascun componente, ottimizzando il processo e riducendo gli sprechi [44].

2.2 Vantaggi della stampa 3D

- **Flessibilità:** Consente la produzione di forme complesse e personalizzate direttamente dal modello digitale, senza la necessità di attrezzature costose o di numerosi passaggi di lavorazione.
- **Rapidità:** Riduce i tempi di produzione e consente di passare rapidamente dalla progettazione alla prototipazione.
- **Riduzione dei costi:** Elimina la necessità di molti utensili e permette di produrre parti in un unico passaggio, minimizzando gli scarti di materiale.
- **Personalizzazione:** Offre la possibilità di creare prodotti su misura e in piccole serie.
- **Sostenibilità:** Riduce gli sprechi di materiale e consente di utilizzare materiali riciclati.

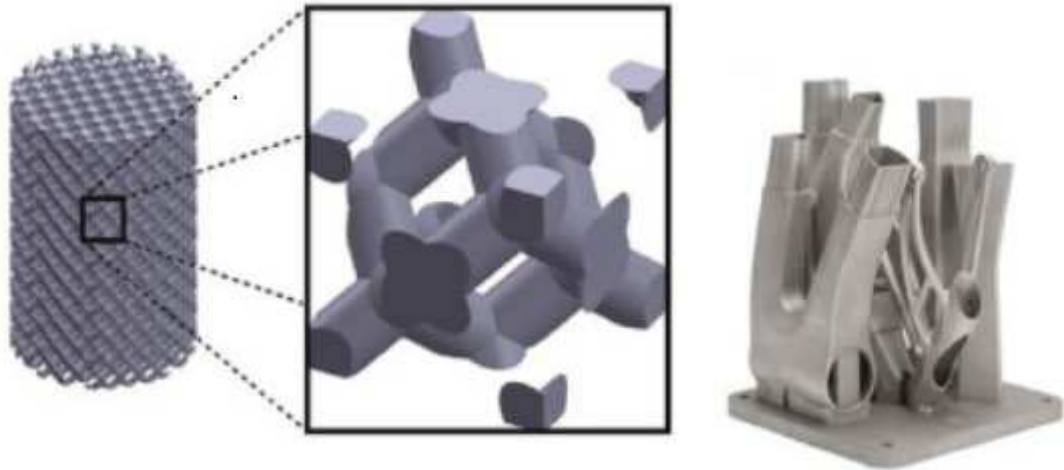


Figura 11: Parte prodotta da LPBF (figura sinistra), [campione poroso](#) prodotto da LPBF (figura destra)

I processi di produzione additiva (AM) per metalli, come la fusione laser a letto di polvere (LPBF), l'EBM e la DED, inducono cicli termici estremamente rapidi e localizzati. Questa caratteristica unica genera microstrutture e proprietà meccaniche specifiche, differenziando le parti prodotte in AM da quelle ottenute con metodi tradizionali [44].

La rapida fusione e solidificazione del materiale, causata dall'interazione tra il laser o il fascio di elettroni e la polvere metallica, porta alla formazione di gradienti termici elevati e a elevate velocità di raffreddamento [45]. Questi fattori influenzano significativamente la microstruttura del componente, dando origine a sollecitazioni residue, anisotropia e difetti [46]. Tali caratteristiche sono tipiche dei processi AM e possono influenzare le proprietà meccaniche finali della parte.

Le proprietà meccaniche delle parti prodotte in AM sono fondamentali per valutarne la qualità e la durata nel tempo, e per determinare se questa tecnologia può essere adottata come alternativa ai metodi di produzione tradizionali in specifici ambiti applicativi.

La scelta del materiale è un fattore cruciale nella produzione additiva, in particolare nella fusione laser a letto di polvere (LPBF). Sebbene l'LPBF sia un processo versatile che consente l'utilizzo di una vasta gamma di materiali metallici, come evidenziato in [47], esistono delle limitazioni intrinseche.

La necessità di ottenere parti dense e la rapida solidificazione del materiale inducono microstrutture specifiche, spesso caratterizzate da una ridotta duttilità. Inoltre, difetti come la porosità e la formazione di spallamenti possono compromettere le prestazioni a fatica delle componenti prodotte con questa tecnologia [44].

I rapidi cicli termici tipici dell'LPBF generano elevati gradienti termici e tensioni residue nel materiale solidificato. Queste tensioni residue possono influenzare significativamente l'innesco e la propagazione delle cricche, riducendo la durata a fatica dei componenti [48].

2.3 Fusione laser a letto di polvere (laser powder bed fusion)

La fusione laser a letto di polvere (LPBF) è una tecnologia di produzione additiva ampiamente utilizzata in settori come l'aerospaziale, il biomedico e l'automotive, grazie alla sua capacità di creare componenti metallici complessi e ad alte prestazioni.

Nonostante la sua versatilità, l'LPBF presenta un tasso di costruzione relativamente lento. Tuttavia, recenti sviluppi tecnologici mirano ad accelerare il processo e migliorare la qualità delle parti prodotte. Tra questi, si possono citare:

- **Sistemi di alimentazione avanzati:** Camere di alimentazione intercambiabili, gestione della polvere con controllo a circuito chiuso e setacciatura automatizzata consentono di ottimizzare il processo di produzione.
- **Strategie di stampa innovative:** La stampa simultanea multistrato, il rivestimento a 2 assi e le tramogge multipolvere permettono di aumentare l'efficienza e la flessibilità del sistema.
- **Sorgenti laser migliorate:** L'utilizzo di laser a fascio inferiore, multi-laser e con velocità più elevate contribuisce ad accelerare il processo di fusione.
- **Controllo ambientale preciso:** Un flusso costante di gas inerte, sistemi di posizionamento precisi e sistemi a vuoto garantiscono un ambiente di lavorazione controllato e riducono le variazioni dimensionali.
- **Preriscaldamento:** Il preriscaldamento del substrato a temperature superiori a 500°C limita il rischio di deformazioni e cricche, migliorando la qualità delle parti.

Questi miglioramenti tecnologici consentono di ottenere prodotti con tolleranze più strette e una maggiore qualità costruttiva, rendendo l'LPBF una tecnologia sempre più competitiva in diversi settori industriali [49].

Sebbene il gas inerte nella camera sia necessario per [prevenire l'ossidazione](#), presenta anche alcuni inconvenienti, come spingere materiale fuso, poltiglia e semisolido lungo la direzione del flusso di gas [50]. Le aberrazioni dimensionali e il rischio di distorsione aumentano a causa di questo fenomeno.

[LPBF](#) è uno dei processi [AM](#) che hanno rivoluzionato l'industria manifatturiera in quanto consente la produzione di componenti complessi per ridurre costi, tempi e manodopera. Consente di produrre forme complesse senza utensili, fusioni o metodi di produzione convenzionali.

2.3.1 Layout del sistema LPBF

Il layout del sistema LPBF di solito include una sorgente laser, una piattaforma di costruzione, un sistema automatico per erogare la polvere, un sistema di controllo e parti complementari come rulli, raschiatori.

Nel complesso, le fasi di produzione di una parte tramite LPBF possono essere classificate come segue: (i) Progettazione e modellazione della parte 3D da produrre in un software CAD e quindi suddivisione del modello nel numero richiesto di strati con uno spessore di strato definito; (ii) Per la fabbricazione, un substrato è fissato sulla piattaforma di stampa. Questo è il livello di base su cui verranno depositati gli strati; (iii) La camera di costruzione viene spostata in un'atmosfera protettiva, principalmente di azoto e argon, per ridurre al minimo il rischio di ossidazione superficiale; (iv) In base allo spessore dello strato predefinito, il primo strato viene steso sulla piattaforma di stampa; (v) Il laser scansiona quindi il letto di polvere nel percorso predefinito per fabbricare la forma a strato come comandato dal software CAD e il modello progettato; (vi) Abbassamento della piattaforma di costruzione e ripetizione degli ultimi due passaggi di stesura del letto di polvere e scansione più volte fino alla produzione della parte finita [44].

2.3.2 Limiti della tecnologia LPBF

La fusione laser a letto di polvere (LPBF) per metalli, pur essendo una tecnologia rivoluzionaria, presenta un limite intrinseco: **la velocità di costruzione**. Questo limite è principalmente attribuibile allo spessore ridotto degli strati depositati e ai tempi necessari per la configurazione del processo.

Per ovviare a questa limitazione, l'industria ha concentrato i propri sforzi nello sviluppo di soluzioni innovative. Un'area cruciale è quella della gestione delle polveri metalliche. L'introduzione di cilindri regolabili e sistemi autonomi ha permesso di ottimizzare i processi di installazione e di aumentare significativamente la produttività. Alcune aziende hanno ulteriormente raffinato queste soluzioni, implementando sistemi di gestione delle polveri con controllo a circuito chiuso e cilindri sostituibili, massimizzando così l'efficienza complessiva [44].

Un'altra strategia efficace consiste nell'automatizzare i processi. L'impiego di sistemi di gestione automatizzati delle polveri su più unità di una linea di produzione ha permesso di aumentare in modo esponenziale la velocità di produzione [51]. Parallelamente, l'adozione di tecniche di setacciatura e ricircolo automatico delle polveri ha contribuito a ridurre significativamente i tempi di lavorazione e i costi dei materiali [52].

I componenti di una macchina LPBF sono forniti in figura 12

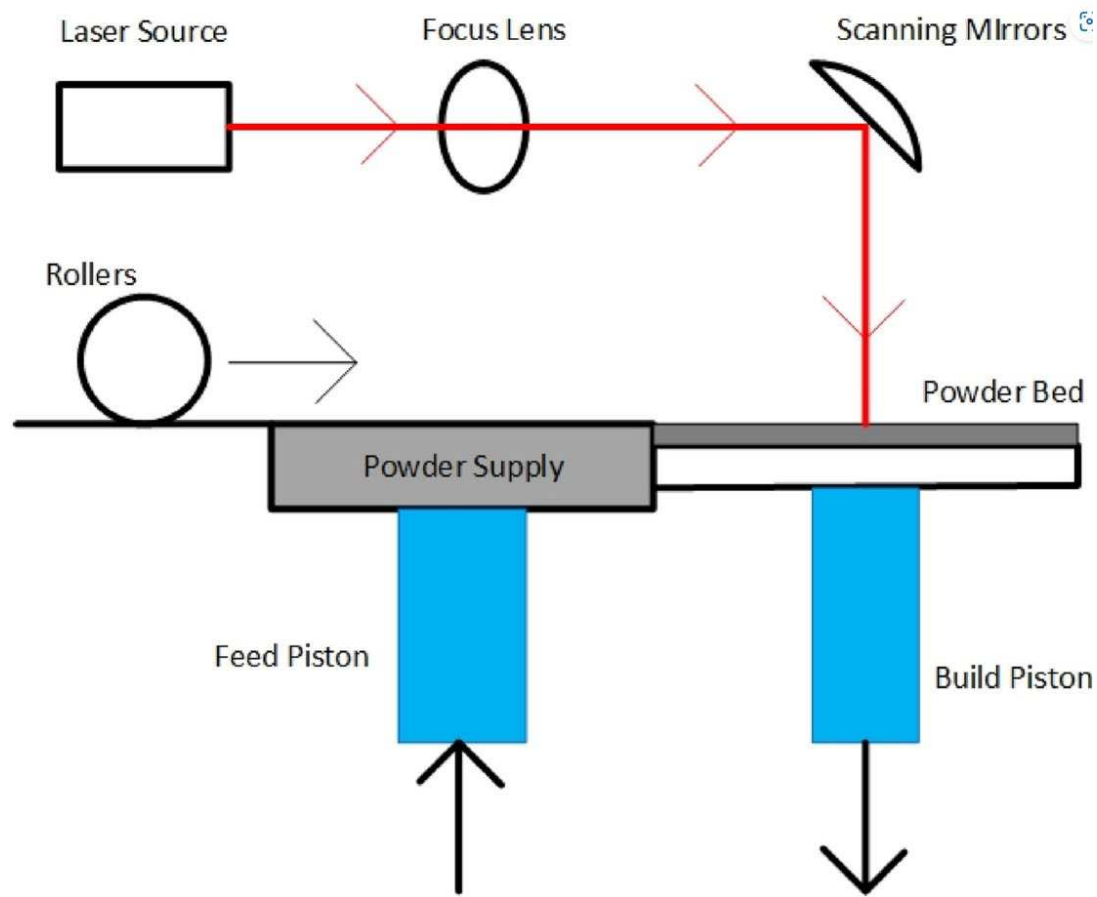


Figura 12: Schema di una tipica macchina LPBF.

Nell'ambito della fusione laser a letto di polvere (LPBF), la formazione del bagno di fusione è un fenomeno complesso determinato dall'interazione tra l'energia laser e il materiale metallico in polvere. L'energia luminosa del laser viene convertita in calore, fondendo localmente la polvere metallica. Grazie alla tensione superficiale, il materiale fuso assume una forma caratteristica, spesso a forma di cilindro o segmento [53].

La rapidità con cui avviene questo processo di fusione e solidificazione è una delle peculiarità dell'LPBF. L'interazione tra il laser e il letto di polvere è estremamente breve, generando temperature elevatissime (fino a 10^5 °C) e velocità di raffreddamento elevatissime (fino a $10^6 - 10^8$ °C/s) [54]. Queste condizioni estreme influenzano profondamente la microstruttura del materiale solidificato.

La solidificazione rapida induce fenomeni metallurgici fuori equilibrio, con importanti implicazioni sulle proprietà meccaniche del componente finale. Ad esempio, la raffinazione della microstruttura, l'indurimento per soluzione solida e la formazione di fasi metastabili sono tutti effetti diretti della velocità di raffreddamento elevata. Queste caratteristiche possono migliorare significativamente le proprietà meccaniche del materiale, come la resistenza e la durezza [55].

2.3.3 Polvere metallica

La polvere metallica utilizzata nel processo di fusione laser a letto di polvere (LPBF) è un elemento fondamentale che incide profondamente sulla qualità e sulle proprietà del componente finale. Le sue caratteristiche intrinseche, come dimensioni, forma e composizione chimica, influenzano in modo significativo sia la stabilità del processo di fabbricazione che le proprietà meccaniche del pezzo prodotto [44].

La morfologia delle particelle di polvere è un fattore cruciale. Una forma regolare e una distribuzione dimensionale stretta favoriscono un migliore impacchettamento nel letto di polvere e una maggiore fluidità, migliorando così la qualità della sinterizzazione. Al contrario, particelle irregolari o con una distribuzione dimensionale ampia possono compromettere la densità del componente e la sua resistenza meccanica.

La purezza della polvere è un altro aspetto fondamentale. La presenza di impurità o difetti, come pori o inclusioni, può inficiare la qualità della sinterizzazione, causando la formazione di porosità nel componente finale e riducendone la resistenza meccanica. La porosità, infatti, rappresenta un punto debole nella struttura del materiale, predisponendolo alla propagazione di cricche e alla riduzione della resistenza a fatica.

La dimensione delle particelle di polvere gioca un ruolo altrettanto importante. Particelle più piccole tendono a sinterizzare più rapidamente, ma sono anche più soggette a difetti come la formazione di vuoti. Al contrario, particelle più grandi limitano il restringimento delle particelle più piccole, favorendo la formazione di fessure. Per ottenere una buona densità e una microstruttura omogenea, è spesso necessario utilizzare miscele di polveri con diverse dimensioni, in modo da bilanciare i vantaggi e gli svantaggi delle diverse frazioni [56].

2.3.4 Difetti caratteristici di componenti realizzati tramite LPBF

Il risultato dell'output del processo LPBF dipende da vari parametri correlati, rendendo difficile l'ottimizzazione del processo e rendendo la parte soggetta a difetti. Di seguito vengono discussi alcuni dei difetti significativi che influenzano il risultato delle parti LPBF:

-Il balling: è il risultato di microstrutture tipiche sulla superficie delle parti fabbricate in LPBF dovute alla presenza di polveri sciolte nel letto di polvere. Non è altro che l'accumulo di piccole particelle quando il materiale liquido in [fase fusa](#) viene scomposto in sfere in miniatura per ridurre al minimo l'energia superficiale. E quando vengono fornite una bassa densità di energia, una bassa potenza, un grande spessore dello strato e un'elevata velocità di scansione, queste sfere sferiche si uniscono per formare un grande pool di fusione noto come regione di balling [57].

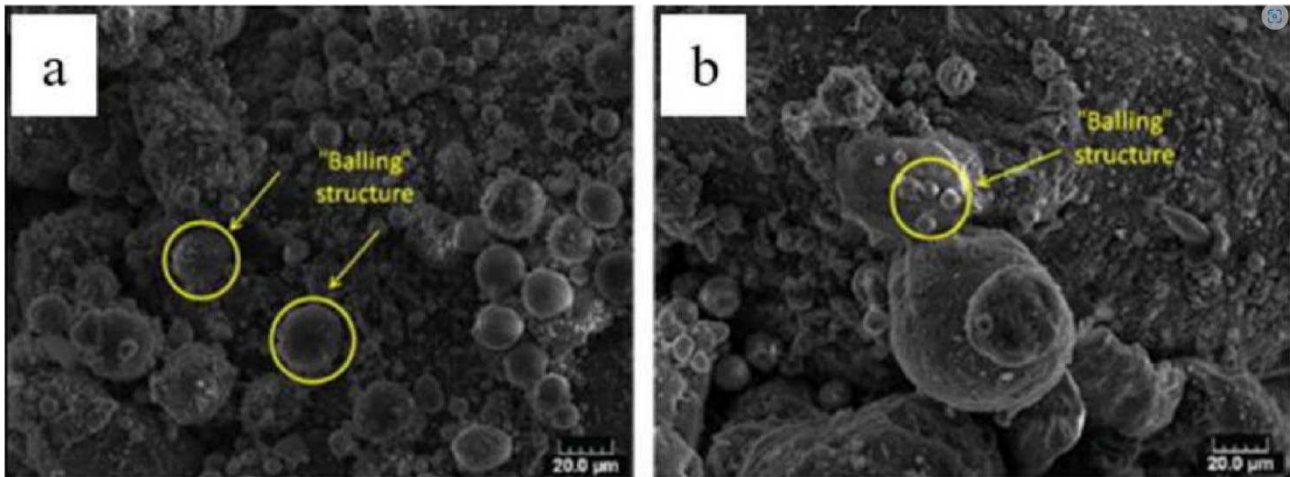


Figura 13: [Effetti di balling](#)

-Porosità: La porosità è uno dei principali difetti che possono insorgere durante il processo di fusione laser a letto di polvere (LPBF). Sebbene questa tecnologia si basi sulla fusione completa delle particelle metalliche, la formazione di pori è un fenomeno piuttosto frequente, influenzato da numerosi fattori legati ai parametri di processo e alle caratteristiche della polvere metallica.

I pori che si formano nell'LPBF possono essere classificati in tre categorie principali:

- **Pori di fusione:** Si originano quando la densità di energia del laser è insufficiente per fondere completamente le particelle metalliche. In questo caso, si creano delle cavità all'interno del componente che possono comprometterne la resistenza meccanica [58].
- **Pori gassosi:** Sono causati dalla presenza di gas intrappolati tra le particelle di polvere. Durante la fusione, questi gas vengono rilasciati e possono formare delle bolle che rimangono intrappolate nel materiale solidificato [59].
- **Pori da ritiro:** sono causati principalmente durante la solidificazione quando viene prodotto una quantità insufficiente di metallo fuso [60].

La presenza di pori all'interno di un componente prodotto con LPBF ha un impatto significativo sulle sue proprietà meccaniche. I pori agiscono come inneschi per la propagazione di cricche, riducendo la resistenza a fatica e la tenacità del materiale. Inoltre, la porosità può influenzare la conducibilità termica ed elettrica del componente.

-Rugosità superficiale: È stato affermato che il motivo principale che causa la rugosità superficiale è l'ossidazione dovuta alla presenza dei gas atmosferici e l'adesione di polveri parzialmente fuse sulla superficie del pezzo [61]. La rugosità superficiale può essere ridotta riducendo lo spallamento fornendo un'elevata densità di energia, un'elevata potenza laser a bassa velocità, un basso spessore dello strato e una spaziatura del portello inadeguata.

-Crepe e tensioni residue: ci sono due tipi di crepe, le crepe fredde e le crepe calde. le crepe calde possono essere create da una convezione insufficiente nella regione del liquido. Le cricche da freddo causate dalle sollecitazioni residue.

Capitolo 3: L'acciaio inossidabile 316L

3.1 Definizione di acciaio

Il termine **acciaio** indica in maniera generica una lega tra due elementi principali: ferro e carbonio. Il **ferro** è un elemento metallico ed il suo simbolo chimico è **Fe**. Il **carbonio** è un elemento non metallico, il suo simbolo chimico è **C**; è l'elemento legante principale nelle leghe ed il suo contenuto percentuale oscilla tra lo 0,002% ed il 2,1%. Il carbonio ed altri elementi agiscono come agenti indurenti. Cambiando la quantità degli elementi nella lega, si controllano le caratteristiche dell'acciaio: temprabilità, durezza, tenacità, duttilità, fragilità, resistenza alla corrosione, resistenza alla trazione, resistenza all'usura, resistenza al calore. Ad esempio, un acciaio con un'alta presenza di carbonio nella lega, risulterà più duro, ma allo stesso tempo meno duttile di uno con una bassa percentuale di carbonio [62].

in relazione alla componente meccanica e fisica, è possibile classificare l'acciaio in diverse categorie. Ad esempio possiamo distinguere fra:

- acciaio al carbonio
- acciaio legato
- acciaio per utensili
- acciaio inox [63]

3.2 Acciaio inossidabile

si tratta di un materiale altamente resistente all'ossidazione, quindi di un **acciaio che non arrugginisce**, grazie alla presenza di cromo nella lega (tra il 10% ed il 20%). Esistono diverse tipologie di acciaio inossidabile ma, un approfondimento particolare, merita la classe di [acciaio 304 e 316](#). Si tratta di due tipologie di acciai ampiamente ricercati per la loro **resistenza alla corrosione** [63].

esiste un'ampia varietà di gradi di acciaio inossidabile, generati attraverso la variazione della composizione chimica e del trattamento termico. Questi possono essere classificati in cinque gruppi principali in base alla loro struttura metallurgica, vale a dire austenitico (Contengono **alti livelli di cromo e nichel**, che conferiscono loro eccellente resistenza alla corrosione e alla ruggine. Questi acciai sono **non magnetici** e mantengono la loro struttura austenitica anche a temperature molto basse, rendendoli adatti per applicazioni in ambienti criogenici. Tra gli esempi più noti di **acciaio**

austenitico vi sono il **304** e il **316**.) [64], ferritico, duplex (austenitico-ferritico), martensitico e indurente per precipitazione. Oltre al minimo del 10,5% di cromo (Cr) necessario per conferire all'acciaio inossidabile la sua resistenza alla corrosione, possono essere presenti una serie di altri elementi di lega. Questi includono carbonio (C), nichel (Ni), manganese (Mn), molibdeno (Mo), rame (Cu), silicio (Si), zolfo (S), fosforo (P) e azoto (N) [65].

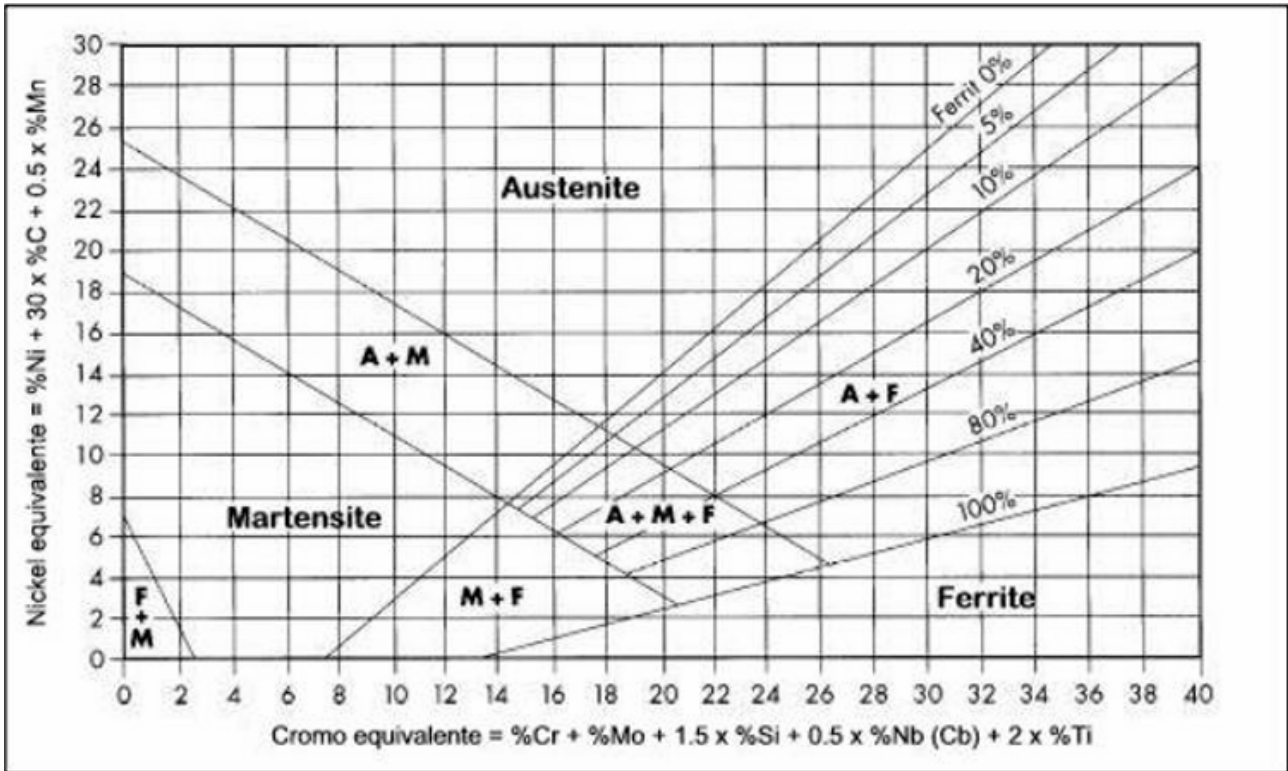


Figura14: diagramma schaeffler

3.3 AISI 316L

Le leghe vengono spesso aggiunte all'acciaio per aumentare le proprietà desiderate. L'acciaio inossidabile 316L è una sottoclasse di acciaio inossidabile 316 con meno carbonio [66].

L'acciaio inossidabile AISI 316L è ampiamente utilizzato come biomateriali e materiali da costruzione. Più specificamente, grazie alla sua proprietà unica di buona resistenza alla corrosione e biocompatibilità [67].

L'AISI 316 o X5CrNiMo17-12-2 è una lega di acciaio inox austenitica composta da un tenore di cromo tra il 16% ed il 18%, di nichel tra l'11% e il 14% e di molibdeno tra il 2% ed il 3%. È nato come modifica dell'acciaio AISI 304 per aggiunta del 2,3% di molibdeno, utile per migliorare la resistenza alla corrosione elettrolitica (pitting) da cloruri, che per il 304 è molto scarsa.

La versione 316L (X2CrNiMo17-12-2) con L che specifica Low Carbon cioè con tenore di carbonio inferiore allo 0,035% (il 316 ammette fino a 0,080%) utile a impedire la precipitazione dei carburi di cromo e quindi la corrosione.

COMPOSIZIONE CHIMICA	C% (max)	Si% (max)	Mn% (max)	P% (max)	S% (max)	Cr%	N% (max)	Ni%	Mo%		
	0,03	1,00	2,00	0,045	0,030	16,5 - 18,5	0,11	10,0 - 13,0	2,0 - 2,5		

Tabella 1: composizione chimica dell'acciaio 316L

3.3.1 Le proprietà fondamentali ed i tipici usi

Le proprietà fondamentali sono:

- Ottima resistenza alla corrosione e a pitting;
- Facilità di ripulitura e ottimo coefficiente igienico;
- Facilmente lavorabile, forgiabile e saldabile;
- Maggiore resistenza a creep rispetto agli altri acciai della stessa categoria
- Buona resistenza a corrosione intergranulare anche dopo la saldatura
- Ottime proprietà meccaniche ad alte temperature

I tipici usi dell'AISI 316L sono:

- Strumenti chirurgici e medici, impianti chirurgici
- Digestori, evaporatori e attrezzature per la movimentazione della carta
- Apparecchiature per la raffinazione del petrolio
- Attrezzature per l'industria tessile
- Condotti, tubi per l'acqua di alimentazione, filtri per l'acqua di scarico
- Tubi di scambiatori di calore
- Generatori di ozono

3.3.2 AISI 316L da Additive Manufacturing

La necessità di limitare il contenuto di carbonio è legata al voler limitare al minimo il fenomeno della formazione di carburi a seguito delle alte temperature nella zona di scansione. La formazione di tali fasi porterebbe infatti a un infragilimento del materiale.

una caratteristica importante per acciai destinati ad essere lavorati con tecniche di additive manufacturing è la loro buona saldabilità in quanto essendo il processo di fusione e raffreddamento molto rapido si ha uno shock termico con conseguenti tensioni indotte elevate.

L'acciaio inossidabile 316L risponde bene a questi requisiti richiesti, negli ultimi anni è stato infatti uno dei materiali più utilizzati e studiati nell'ambito delle tecnologie di AM.

3.3.3 Prove quasi-statiche e prove dinamiche

Oltre alla prova di trazione, una prova utile che si può condurre su campioni in AISI 316L realizzati tramite LPBF per determinare le proprietà meccaniche, risulta essere la prova di compressione. In particolare, grazie a questo test si riesce a studiare la capacità di assorbimento di energia dei vari campioni utilizzati. Durante la prova il provino metallico viene posizionato tra due piastre piane e parallele, quella superiore e quella inferiore. La piastra inferiore generalmente è fissa avendo gradi di libertà vincolati in ogni direzione, mentre la piastra superiore è mobile ed esercita una forza con una determinata velocità in direzione opposta all'asse z, che prende il nome di asse di compressione [36]. La prova procede fino a quando il materiale non si rompe o non subisce una deformazione permanente. Durante il test si registrano i dati in tempo reale della forza applicata e della deformazione del materiale ottenendo il grafico tensione-deformazione della prova di compressione. A seconda della velocità di deformazione / applicata esistono due tipi di prove di compressione: prova di compressione quasi statica (ideale) e la prova di compressione dinamica (reale). Durante la prima il carico viene applicato in maniera estremamente lenta e costante al provino raggiungendo velocità di deformazione addirittura dell'ordine di $10^{-3} s^{-1}$; durante la seconda, invece, il provino è sottoposto non più ad un carico lento e controllato, bensì ad un carico d'urto, quindi ad una elevata velocità di deformazione, cercando di simulare, così, sollecitazioni di compressione reali. Le prove quasi-statiche sono fondamentali per ottenere un quadro generale delle proprietà del campione analizzato, mentre le prove dinamiche sono altrettanto importanti perché grazie ad esse si riesce a capire se il materiale testato è adatto o meno ad applicazioni pratiche. Per quanto riguarda la prova di compressione dinamica, nel 1949 è stata sviluppata una particolare macchina di compressione da parte di Bertram Hopkinson, detta split-Hopkinson pressure bar (SHPB), pensata con il fine di determinare le proprietà dinamiche dei materiali.

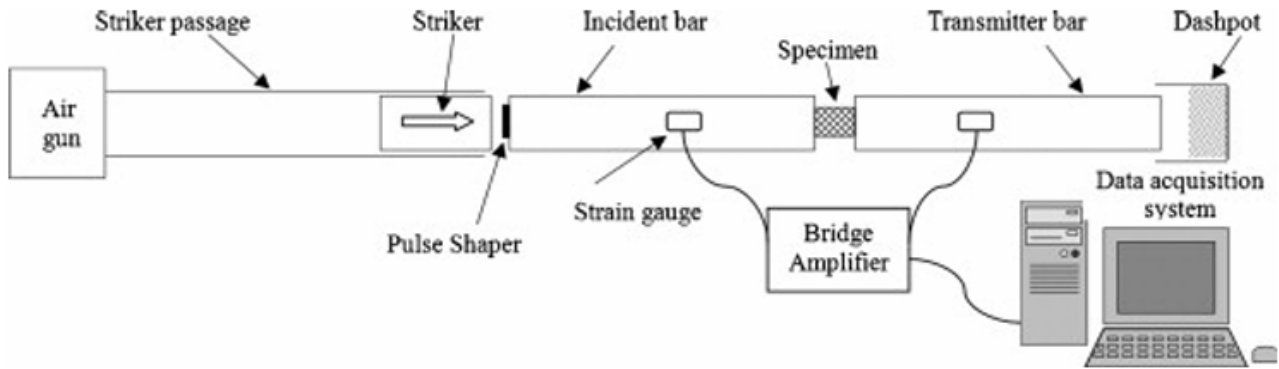


Figura 15: Rappresentazione schematica della SHPB

Come si vede dalla Figura 2. 7 la SHPB è costituita da una pistola ad aria compressa, un percussore, una barra incidente e una barra trasmittente. Sulla barra trasmittente e incidente sono montati una coppia di estensimetri, in modo da essere diametralmente opposti, collegati ad un sistema di acquisizione dati tramite un amplificatore di segnale [37]. Quello che si verifica quando dei campioni metallici come quelli di AISI 316L vengono deformati a freddo è il cosiddetto effetto di incrudimento. Per spiegare brevemente questo fenomeno si inizia con il dire che qualsiasi campione metallico presenta a livello microstrutturale delle irregolarità del reticolo cristallino chiamate dislocazioni. Aumentando la tensione impressa sul campione e superato il punto di snervamento, esso inizia a deformarsi plasticamente. La presenza delle dislocazioni all'inizio favorisce lo scorrimento dei piani cristallini a seguito della tensione impressa, ma poi questo movimento delle dislocazioni fa sì che via via se ne creino delle nuove. L'aumento del numero delle dislocazioni diventa un ostacolo al movimento dei piani cristallini e quindi alla deformazione del materiale. Il risultato è l'ottenimento di un metallo più resistente. Per un'analisi di campioni metallici sottoposti a prove dinamiche di compressione risulta estremamente utile l'utilizzo di un modello che fu proposto negli anni '80, il modello di Johnson-Cook. Questo modello riguarda materiali soggetti a grandi deformazioni, ad alte velocità di deformazione e a temperature elevate. Il Johnson-Cook tramite un'unica legge riesce ad esprimere gli effetti che l'incrudimento, la velocità di deformazione e la temperatura hanno sulla relazione tensione-deformazione.

$$\sigma = (A+B\varepsilon^n)(1+C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_0})(1-T^{*m})$$

dove:

$(A+B\varepsilon^n)$ termine legato all'effetto dell'incrudimento n sulla tensione σ .

$(1+C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_0})$ termine legato all'effetto della velocità di deformazione $\dot{\varepsilon}$ sulla tensione σ .

$(1-T^{*m})$ termine legato all'effetto dell'incremento della temperatura T^{*m} sulla tensione σ .

Capitolo 4: Procedure sperimentali

In questa parte vengono illustrate le diverse procedure sperimentali condotte su tre campioni di AISI 316L, realizzati con la tecnica LPBF. L'obiettivo è osservare e studiare i vari difetti, analizzare la microstruttura e svolgere test di microdurezza.

4.1 Preparazione campioni

come avevamo già detto che il materiale usato è 316L realizzato con la tecnica LPBF. Dopo che sono stati stampati 3 oggetti che vedremo in seguito, si eseguono questi processi:

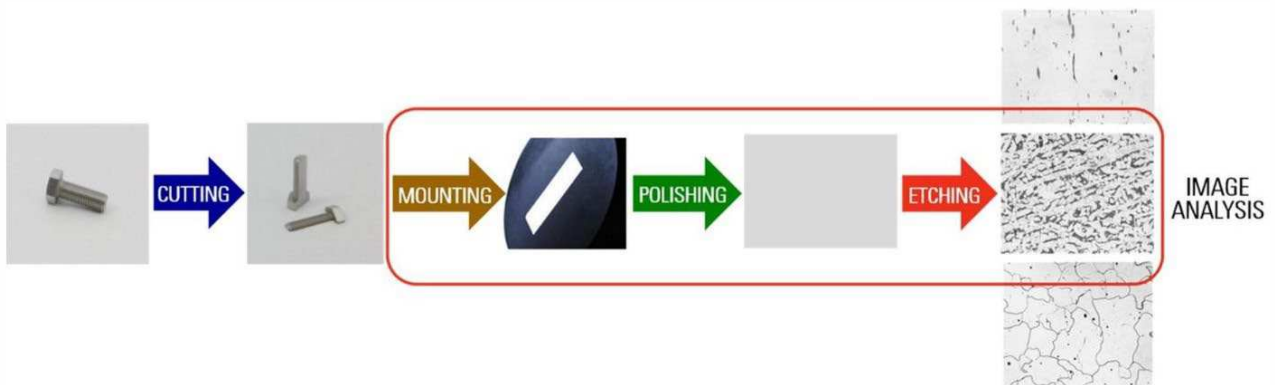


Figura 16: workflow

-prova di compressione: un campione di questi 3 e' sottoposto ad una prova di compressione dinamica mediante SHPB

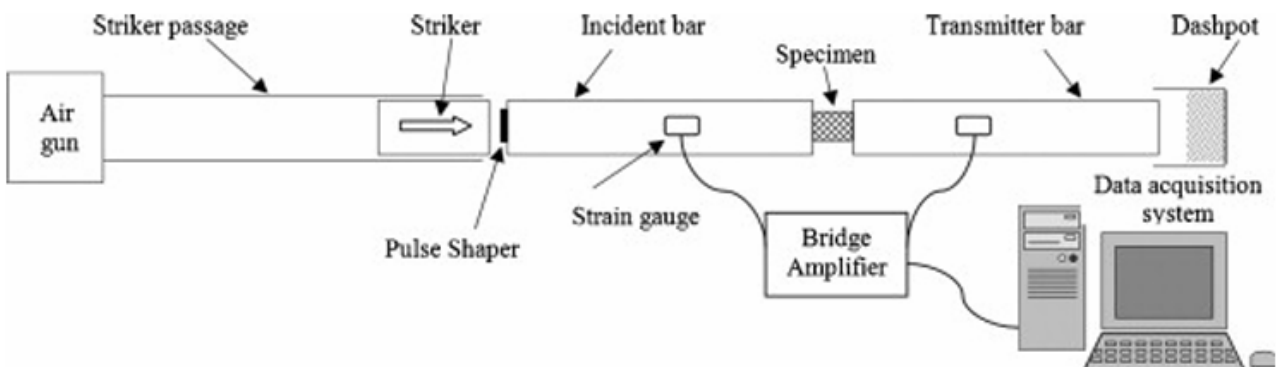


Figura 17: Rappresentazione schematica della SHPB

- Inglobatura: ci consente di avere più facilità nel maneggiare successivamente il campione che abbiamo isolato. ci sono due tipi di resina: resina termoindurente (polimerizzanti a freddo) o resina termoplastica (polimerizzanti a caldo). Nel nostro caso, si è utilizzata la resina termoplastica. Il quale ce un pistone sul quale viene appoggiato il campione, viene ricoperto con questi grani di resina termoplastica poi si chiude il sistema con un cappello quindi si stringe dove ce il campione.

Il pistone sale in modo da comprimere i granoli quindi si applica sia una pressione che temperatura. Dopo alla fine si avvia un sistema di raffreddamento (acqua) così raffredda il sistema ed estrarre il mio campione.

Tutti e tre campioni sono stati inglobati, ad esempio il campione deformato dinamicamente è stato inglobato per 8 minuti a 150 C. siccome in questo campione ci sono delle zone molto fine che è difficile far arrivare la resina, vado a mettere all' inizio un po' di resina in modo che la resina si scioglie sotto e mi va subito a contatto con il pezzo. Dopo di che mettiamo 3 cucchiaini di resina poi metto il cappello per chiudere. La pressione deve essere quasi costante tra 25÷30 bar. Dopo 8 minuti, si avvia il sistema di raffreddamento per 5 minuti dopo di che abbasso la pressione e ottengo il campione inglobato.



Figura 16: inglobatrice

finendo questo processo, avrò i 3 campioni inglobati.

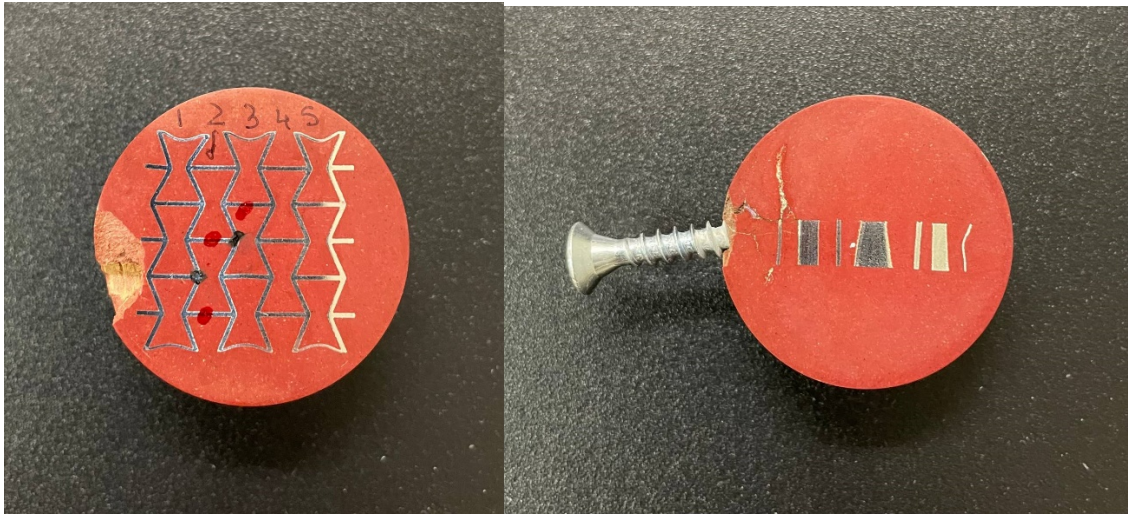


Figura 17: campione xy

figura 18: campione yz



Figura 19: campione xy deformato dinamicamente

4.2 Lucidatura

La fase di lucidatura è cruciale in quanto permette di preparare le superfici dei tre campioni per le altre analisi sul microscopio ottico e per l'attacco chimico. Infatti, è fondamentale ottenere superfici perfettamente levigate e prive di graffi con una finitura a specchio prima di proseguire ulteriori esami.

In questa fase andiamo a ridurre l'asperità della superficie del nostro campione. Lo facciamo utilizzando delle carte abrasive di SiC messe in rotazione. Le carte sono classificate secondo una

normativa internazionale assegnandone un numero che indica la densità media dei carburi di silicio per inch.

Minore sarà il numero riportato nella carta abrasiva e tanto minore sarà la densità di SiC con conseguente maggiore grossezza media dei singoli carburi presenti.

Carte a bassa *inch*² producono solchi profondi e spessi, mentre carte ad alta *inch*² graffiano le superficie del campione con solchi fino a 6 µm di diametro e profondità.

Le carte più diffuse sono le seguenti: 180, 320, 600, 1200, 2400, 4000 grit.

È importante mantenere sempre il campione nella stessa orientazione quando si usa una carta abrasiva. Decido qual è l'orientamento iniziale e per tutto il tempo in cui uso questa carta, io devo tenere il campione con la stessa orientazione. Perché devo arrivare nella situazione in cui sulla superficie dovrò visualizzare graffi che sono tutti nella stessa direzione, così posso cambiare carta. Ad esempio, passo da 180 a 320 quella leggermente meno aggressiva cambiando carta, il campione lo ruoto a 90° e vado avanti finché tutta la mia superficie non presenterà graffi solo in una direzione che è la direzione relativa alla carta che sto utilizzando adesso.

Il macchinario utilizzato si chiama lappatrice, in questo macchinario si usa l'acqua come lubrificante così la superficie non si riscalda troppo.

Nel nostro caso, con il campione xy e yz abbiamo utilizzato carte abrasive 2400 e 4000 grit, mentre con il campione deformato dinamicamente abbiamo utilizzato carte abrasive 320, 2400, 4000 grit.

Una volta finito il processo di lappatrice, si passa alla lucidatura. Questo processo è più o meno simile a quello precedente, abbiamo un piatto che ruota ma sopra quel piatto non si mette carta abrasiva, ma si mette panno abrasivo con una pasta diamantata a diversa granulometria che contiene particelle di diamante sintetico calibrate di modo da produrre solchi nell'ordine pari a 3-1-0.25 µm.

Il risultato finale è quello di ottenere una superficie perfettamente lucida a specchio ed esenti da imperfezioni dovute alla preparazione metallografica. Così la superficie è pronta all'attacco chimico ed a sopire la prova di durezza.

Nel nostro caso, tutti e tre campioni vengono lucidati con panno acciaio 3, di conseguenza si usa la pasta 3 µ e il lubrificante che si usa è una miscela di olio più acqua.

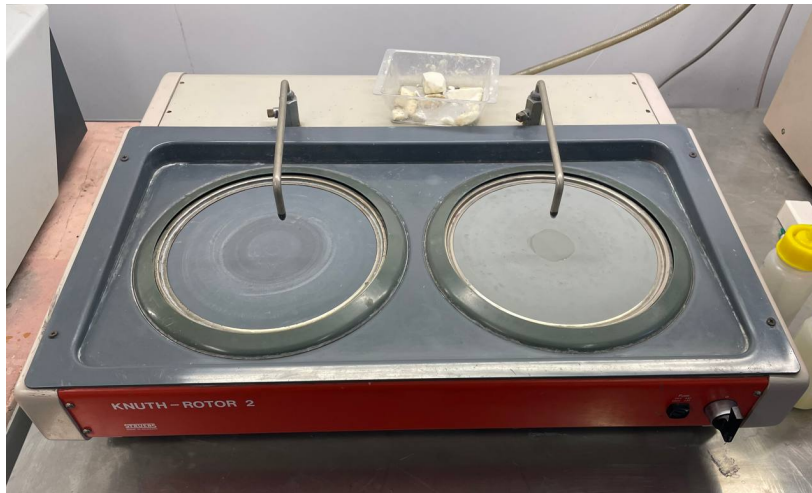


Figura 20: lappatrice



Figura 21: macchina per lucidatura

4.3 Attacchi chimici

Avendo una superficie lucidata e perfetta, possiamo adesso proseguire gli attacchi chimici sui nostri campioni per mettere in evidenza i dettagli della microstruttura dei campioni come bordi di grano, seconde fasi, strutture allotropiche. Gli attacchi che si possono compiere sui campioni possono essere di due tipi:

-attacco elettrochimico: durante gli attacchi elettrochimici si impiega una cella elettrolitica costituita da due elettrodi: l'anodo che funge da polo positivo ed è rappresentato dal campione da trattare, e il catodo che corrisponde al polo negativo. La cella è inoltre riempita con una soluzione elettrolitica

nella quale viene introdotta una piccola quantità di azoto liquido per garantire il mantenimento di temperatura basse e costanti, essenziali per evitare il surriscaldamento e garantire l'efficacia del processo. È presente anche un generatore di tensione.

La figura mostra un tipico andamento tensione-corrente di un attacco elettrochimico.

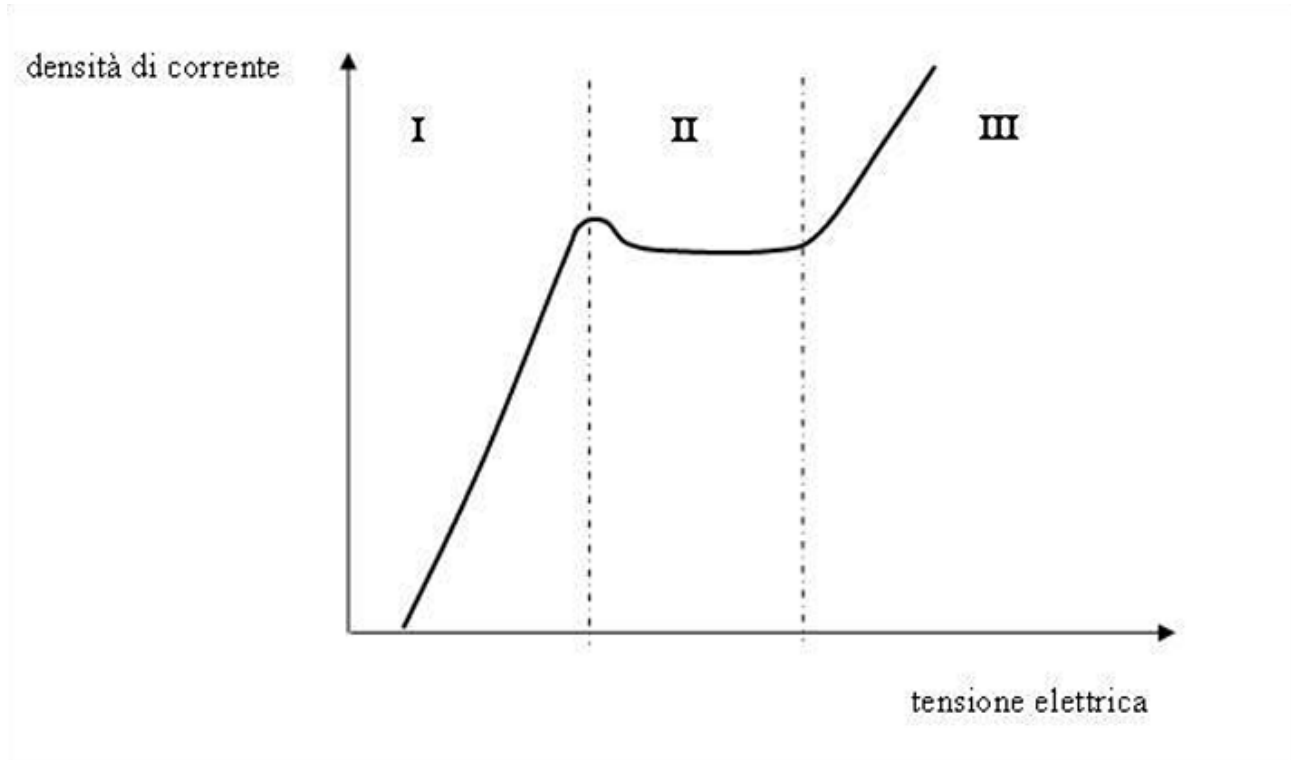


Figura 22: andamento grafico tensione-corrente durante attacco elettrochimico

Si vede che il grafico è diviso in tre parti: zona I è la zona di etching in cui il campione subisce un attacco iniziale ma se io mi fermo, cioè, interrompo la reazione, non riesco a vedere bene i dettagli che voglio. Se invece lascio agire per più tempo, aumentando tensione e corrente, posso arrivare facilmente alla zona III che è chiamata zona di pitting (bruciato), ci si forma uno strato di ossido talmente spesso che la soluzione non è in grado di portarlo via, cioè questi ossidi non riescono a sciogliersi in maniera ottimale. Invece nella zona II abbiamo condizioni stabili di densità di corrente, e abbiamo un range di tensione elettrica che ci consente di avere le condizioni ottimali per l'attacco elettrochimico. In questa zona che si chiama plateau si vedono tutti i dettagli che voglio vedere.

Nel nostro caso sono stati eseguiti attacchi elettrochimici su due campioni, sul campione xy e sul campione yz. Poiché gli attacchi elettrochimici richiedono il passaggio di corrente elettrica attraverso i campioni, è necessario garantire un collegamento elettrico diretto. Per questo motivo, prima di avviare il processo di attacco, si provvede a forare la resina utilizzata per inglobare i campioni fino a raggiungere il materiale metallico. In questo modo si crea uno spazio per l'inserimento di viti metalliche che stabiliscono il contatto diretto con i campioni. Questo accorgimento assicura una corretta conduzione della corrente elettrica fondamentale per un attacco elettrochimico. Una volta

inserita la vite, collego i morsetti al catodo ed all'anodo e attivo il generatore di tensione che si trasforma in corrente quando metto il campione.

Per entrambi i campioni xy e yz si utilizza l'acido ossalico $H_2C_2O_4$. Il primo campione xy è stato tenuto sotto reazione per 60 secondi, mentre l'altro campione yz è stato tenuto sotto reazione per 50 secondi.



Figura 23: attacco elettrochimico

-attacco chimico: gli attacchi chimici sono costituiti da un solvente (alcool metilico o etilico, acqua distillata) e da uno o più acidi. Nel momento in cui vado ad applicare il mix di acidi e solventi che ho scelto, andrò ad attaccare selettivamente la discontinuità, cioè, andrò ad agire dove effettivamente al di sotto della superficie questi bordi di grano vengono localizzati, andrò anche a corrodere la superficie in alcuni punti. Maggiore sarà il tempo che io lascerò agire la mia soluzione, maggiore sarà la penetrazione. Sicuramente il tempo deve essere adeguato a non bruciare il campione.

L'attacco chimico è stato eseguito sul campione deformato dinamicamente, in questo caso si utilizza una soluzione composta da 15 ml di HCl, 10 ml di nitrico HNO_3 e 10 ml di acetico $C_2H_4O_2$. il campione è stato tenuto sotto questa soluzione per 35 secondi.



Figura 24: attacco chimico

4.4 Microscopio Ottico (MO)

L'osservazione dei campioni metallici mediante il microscopio ottico (MO) rappresenta una fase fondamentale per la caratterizzazione microstrutturale di tali campioni. Questo strumento, basato sull'impiego di due sistemi di lenti, consente di raccogliere e ingrandire la luce riflessa o trasmessa dal campione. Il MO è dotato principalmente di due componenti essenziali: l'obiettivo, che ingrandisce e risolve l'immagine correggendo eventuali aberrazioni ottiche, e l'oculare, che permette di visualizzare con il minimo ingrandimento i dettagli dell'immagine. I microscopi ottici sono solitamente equipaggiati con diversi obiettivi, ognuno dei quali offre vari livelli di ingrandimento.

La sorgente luminosa utilizzata per l'illuminazione del campione emette radiazioni con lunghezze d'onda comprese tra 380 nm e 780 nm, cioè nell'intervallo dello spettro visibile. Questo determina un limite fisico dell'ingrandimento del MO, che varia tra 1000x e 2000x, imposto dal fenomeno della diffrazione. In sostanza, non è possibile visualizzare dettagli più piccoli della lunghezza d'onda della luce impiegata. La risoluzione minima, ovvero la distanza più piccola tra due punti distinti che il MO può discernere, è legata a questa lunghezza d'onda ed è descritta da una formula specifica

$$r_{min} = \frac{0,61\lambda}{NA}$$

Dove NA rappresenta l'apertura numerica, definita come il prodotto tra l'indice di rifrazione del materiale tra la lente e il campione e il seno del semiangolo dei raggi di luce più obliqui $\sin \alpha$ che entrano nella lente dell'obiettivo, ovvero

$$NA = \sin \alpha$$

L'osservazione al microscopio ottico può essere eseguita in diversi momenti a seconda dell'obiettivo dell'analisi. Ad esempio, l'osservazione dopo la lucidatura del campione è utile per individuare difetti strutturali come la presenza di porosità. Invece, l'osservazione successiva all'attacco chimico consente di analizzare nel dettaglio la microstruttura del campione, rendendo visibili le fasi metalliche e altre caratteristiche microstrutturali.

Nel nostro caso, tutti e tre campioni, xy, yz e quello deformato dinamicamente sono stati osservati al microscopio ottico con diversi ingrandimenti sia dopo la lucidatura che dopo l'attacco chimico.

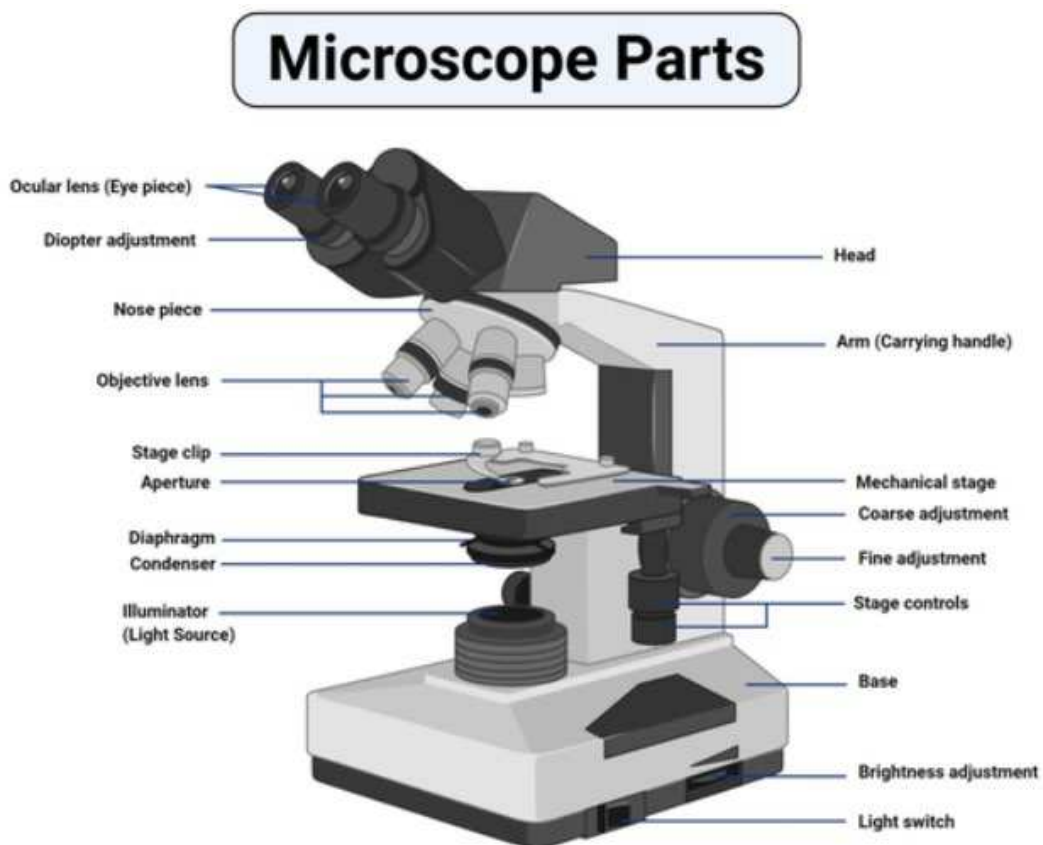


Figure: Parts of a microscope, Image Copyright © Sagar Aryal, www.microbenotes.com

Figura 25: Le parti di un microscopio ottico

4.5 Prove di microdurezza

Al termine della lucidatura, oltre agli attacchi chimici e all'osservazione tramite microscopio ottico, è possibile effettuare anche prove di durezza, che risultano fondamentali per la caratterizzazione dei materiali metallici. La durezza di un materiale viene determinata utilizzando specifici macchinari dotati di un penetratore realizzato in un materiale estremamente duro. Durante la prova, il macchinario applica una forza controllata che spinge il penetratore a deformare permanentemente la superficie del campione, lasciando un'impronta misurabile. Attraverso il calcolo delle dimensioni di questa impronta, è possibile risalire al valore della durezza del materiale.

Le prove di durezza si suddividono principalmente in due categorie:

- **Prove di macrodurezza:** In questo caso, l'impronta lasciata dal penetratore è abbastanza grande da poter essere osservata a occhio nudo. Le forze applicate variano da un minimo di 1 N fino a un massimo di 30 kN, rendendo questa tipologia di prova particolarmente adatta per campioni di grandi dimensioni o per misurazioni su scala più ampia.
- **Prove di microdurezza:** Questa tipologia di prova si concentra su un volume molto ridotto di materiale, tanto che l'impronta lasciata dal penetratore è visibile solo con l'ausilio di un microscopio. Le forze applicate sono solitamente inferiori a 1 N, rendendo queste prove ideali per analisi dettagliate su piccoli campioni o su strati superficiali di materiali.

Le diverse prove di durezza sono classificate in base alla forma e al materiale del penetratore utilizzato, e prendono il nome di specifiche metodologie, come la prova **Brinell, Vickers, Rockwell e Knoop**. Ogni tipologia di prova richiede di rispettare un determinato tempo di permanenza del penetratore sulla superficie del campione e di applicare una forza all'interno di un intervallo specifico. Queste variabili permettono di ottenere risultati precisi e ripetibili, essenziali per valutare le proprietà meccaniche dei materiali, come la resistenza all'usura, la capacità di deformarsi plasticamente e la durabilità del prodotto finale.

L'utilizzo di queste prove, in combinazione con altre tecniche di analisi, fornisce una visione completa delle caratteristiche meccaniche e microstrutturali dei materiali metallici, fondamentali per valutarne le prestazioni in diverse applicazioni industriali.

Nel nostro caso, si è scelto di eseguire la prova di microdurezza di tipo Vickers su due campioni solo, quello xy e quello deformato dinamicamente.

Questa prova utilizza un penetratore a forma di piramide retta con base quadrata, realizzato in diamante, che è uno dei materiali più duri conosciuti. Nella **prova di durezza Vickers**, il valore di durezza (HV) è calcolato in base al rapporto tra la forza applicata (F) e l'area della superficie dell'impronta lasciata dal penetratore. Questo rapporto può essere espresso attraverso una formula specifica, che tiene conto delle dimensioni dell'impronta e della forza esercitata.

$$HV = 0,189 \frac{F}{d^2}$$

Durante queste prove Vickers si è utilizzata come forza di prova 25 gf (grammi-forza) e un tempo di mantenimento del penetratore pari a 10 s per ogni test.



Figura 26: macchina per prove di micrudurezze



Figura 27: set-up prove di microdurezza sul campione xy deformato dinamicamente

Capitolo 5: Risultati sperimentali

5.1 Porosità

Come precedentemente menzionato, i tre campioni stampati tramite LPBF sono stati esaminati in dettaglio utilizzando un Microscopio Ottico, dopo essere stati sottoposti al processo di lucidatura. Queste osservazioni costituiscono i primi risultati sperimentali ottenuti dalle varie procedure eseguite e rivestono particolare importanza, poiché permettono di valutare la qualità dei campioni realizzati con la tecnologia di additive manufacturing e di identificare eventuali difetti presenti. Di seguito, presentiamo alcune immagini significative tratte dalle osservazioni al MO.

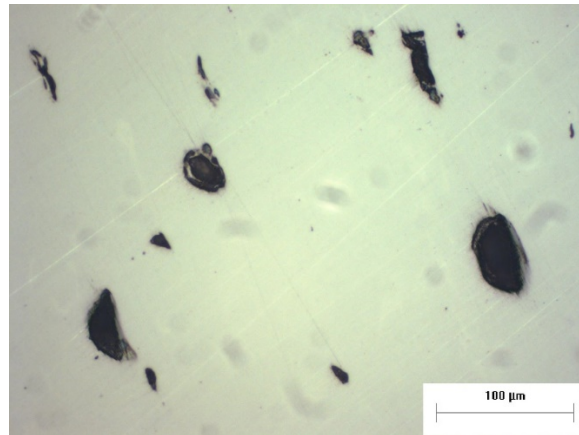


Figura 28: campione yz



Figura 29: campione xy

Dall'osservazione delle immagini riportate, si evidenzia che i campioni realizzati con la tecnica LPBF, presentano numerosi vuoti di dimensioni medie e grandi. La presenza di questi vuoti è una caratteristica tipica dei processi di additive manufacturing, rendendo tale difetto praticamente inevitabile.

Le osservazioni al Microscopio Ottico hanno permesso non solo di individuare la presenza di porosità nelle aree critiche del campione, ma anche di condurre un'analisi dettagliata dei vuoti e stimare la densità dei campioni ottenuti tramite la stampa 3D con LPBF. Per raggiungere questo risultato, sono state esaminate diverse immagini dei campioni a vari ingrandimenti. Utilizzando un software specifico, è stato possibile calcolare il numero di vuoti presenti in ogni immagine, l'area analizzata e quella di ciascun vuoto. I risultati sono stati poi importati in un file Excel, consentendo di determinare sia l'area totale dei vuoti, sia la percentuale di vuoti per ogni immagine.

Eseguendo l'analisi dei vuoti sulle immagini dei campioni, si è determinato che la media percentuale dei vuoti è di circa 21.8% .

5.2 Microstruttura

Le osservazioni dei campioni di AISI 316L al microscopio ottico sono state condotte non solo per valutare e quantificare le porosità all'interno dei campioni, ma anche per esaminare in dettaglio la loro microstruttura. L'analisi microstrutturale è stata eseguita sui tre campioni dopo essere stati sottoposti ad attacchi chimici, tecnica che permette di evidenziare le diverse fasi metalliche e le caratteristiche interne dei materiali.

L'utilizzo del microscopio ottico, combinato con l'attacco chimico, è essenziale per distinguere i dettagli strutturali che non sarebbero visibili con la semplice osservazione della superficie lucidata. Questo approccio consente di identificare eventuali difetti interni, distribuzioni delle fasi e la presenza di disomogeneità, informazioni cruciali per comprendere le proprietà meccaniche e le prestazioni dei materiali. Di seguito vengono riportate alcune immagini rappresentative ottenute durante queste osservazioni, che illustrano le caratteristiche principali della microstruttura dei campioni analizzati.

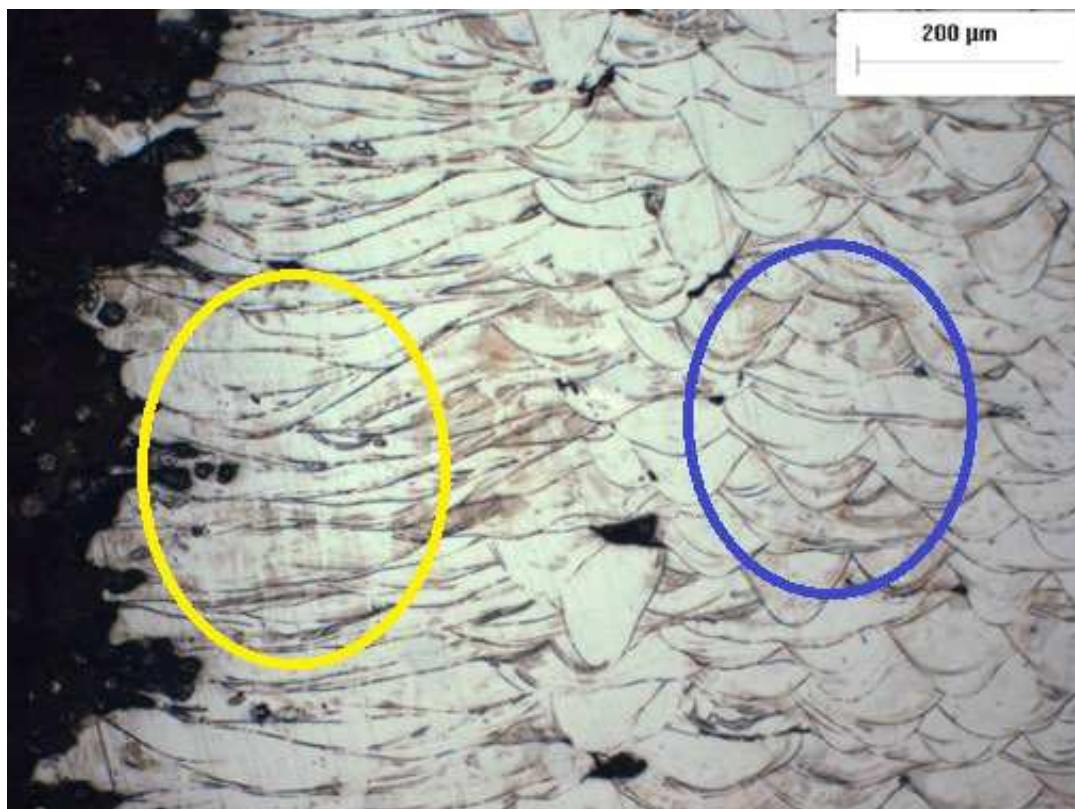


Figura 30: campione yz osservato al MO dopo l'attacco chimico

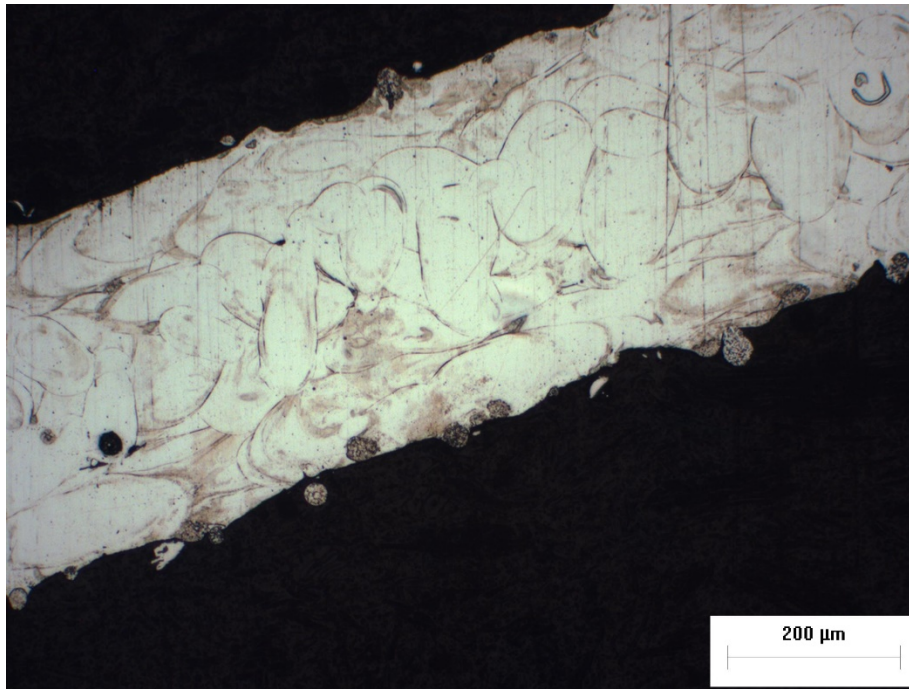


Figura 31: campione xy osservato al MO dopo l'attacco chimico

Come si può vedere chiaramente dalle prime due figure, durante il processo di stampa con la tecnica **Laser Powder Bed Fusion (LPBF)** sono stati impiegati parametri di processo e strategie di scansione differenti per il bordo e l'interno dei campioni. Sono messe in evidenza le diverse pozze di fusione create dal laser: quelle lungo il bordo del campione sono evidenziate in giallo, mentre quelle interne sono segnate in blu.

La differenza di forma tra la zona esterna e quella interna del campione dipende fortemente dalla densità volumetrica di energia, che è determinata dai parametri di processo. Nella zona esterna del campione, evidenziata in giallo, per ottenere una migliore finitura superficiale, il laser ha una potenza più bassa e la velocità di scansione è più alta, mentre nella zona interna, il laser ha una potenza maggiore e la velocità di scansione è più bassa. In questo modo, si ottiene una diversa profondità di penetrazione del laser nella polvere metallica e nella zona già precedentemente fusa, con una diversa percentuale di re-melting (rifusione) tra interno ed esterno del campione.

Questa scelta differenziata nei parametri di processo ha comportato non solo una variazione nella profondità delle pozze di fusione, ma ha anche determinato l'ottenimento di una microstruttura distinta tra il bordo e l'interno dei campioni, influenzando così le proprietà meccaniche e strutturali delle varie zone del materiale prodotto.

A causa dell'elevata velocità di raffreddamento, si formano dendriti molto fini. In questo caso, i dendriti risultano poco visibili proprio perché il raffreddamento del campione è stato estremamente rapido.

Questo fenomeno è legato al fatto che la velocità di raffreddamento influenza direttamente la morfologia e le dimensioni dei cristalli che si formano durante la solidificazione. Un raffreddamento rapido porta alla formazione di dendriti più sottili e meno definiti, mentre un raffreddamento più lento permette una crescita dendritica più marcata e visibile, facilitando l'osservazione della struttura cristallina. In ogni caso era prevedibile osservare ciò in quanto nella manifattura additiva la velocità di raffreddamento sono estremamente più elevate rispetto al processo di fabbricazione tradizionale (fonderia).

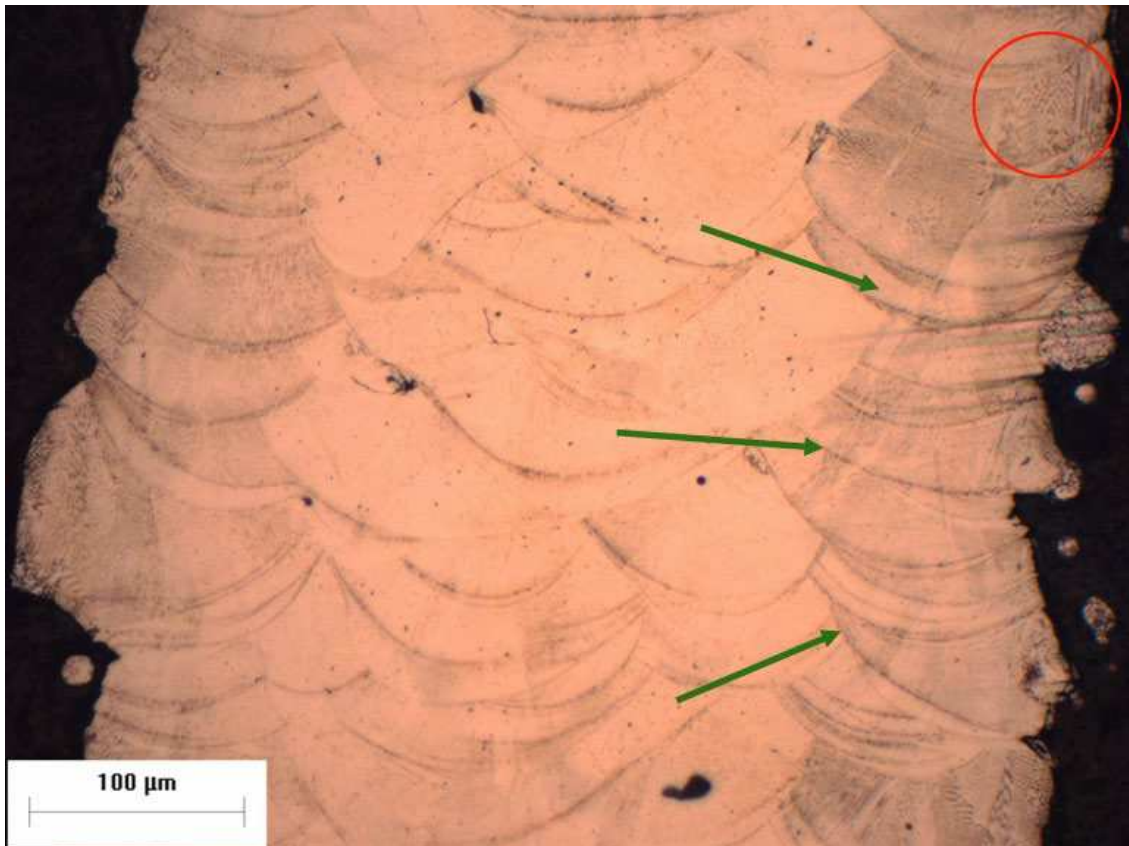


Figura 32: campione xy del mio collega dove si vedono i dendriti (cerchio rosso)

Un altro aspetto molto importante è la porosità: quando la potenza del laser è troppo elevata, si formano porosità chiamate "keyhole", caratterizzate da cavità profonde e strette. Questo avviene perché l'energia eccessiva del laser genera una penetrazione troppo intensa nel materiale, creando queste sacche allungate, evidenziato in marrone.

Al contrario, quando la potenza del laser è insufficiente, si manifestano porosità note come "lack of fusion". In questo caso, la bassa energia non è sufficiente a fondere completamente le particelle di polvere, lasciando zone non fuse o scarsamente collegate tra loro, evidenziato in viola.

Una corretta regolazione della potenza del laser è quindi fondamentale per evitare entrambi i tipi di porosità e garantire una fusione uniforme del materiale, con conseguente miglioramento delle proprietà meccaniche del prodotto finale.

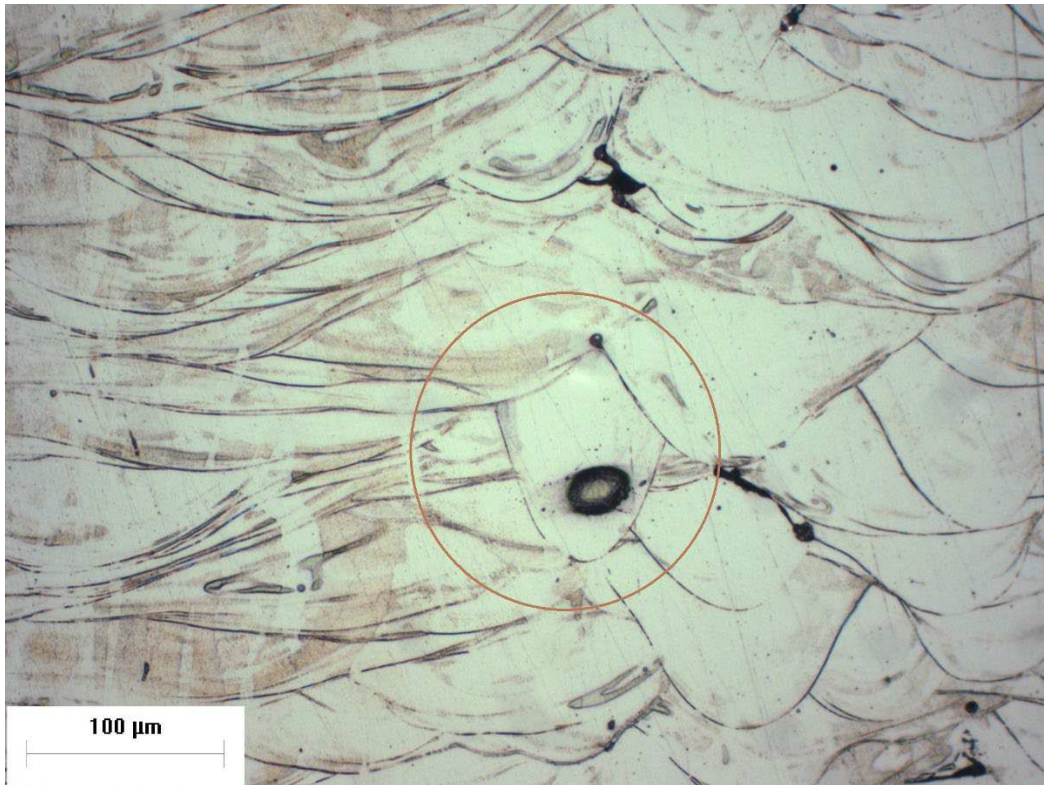


Figura 33: campione yz osservato al MO dopo attacco chimico

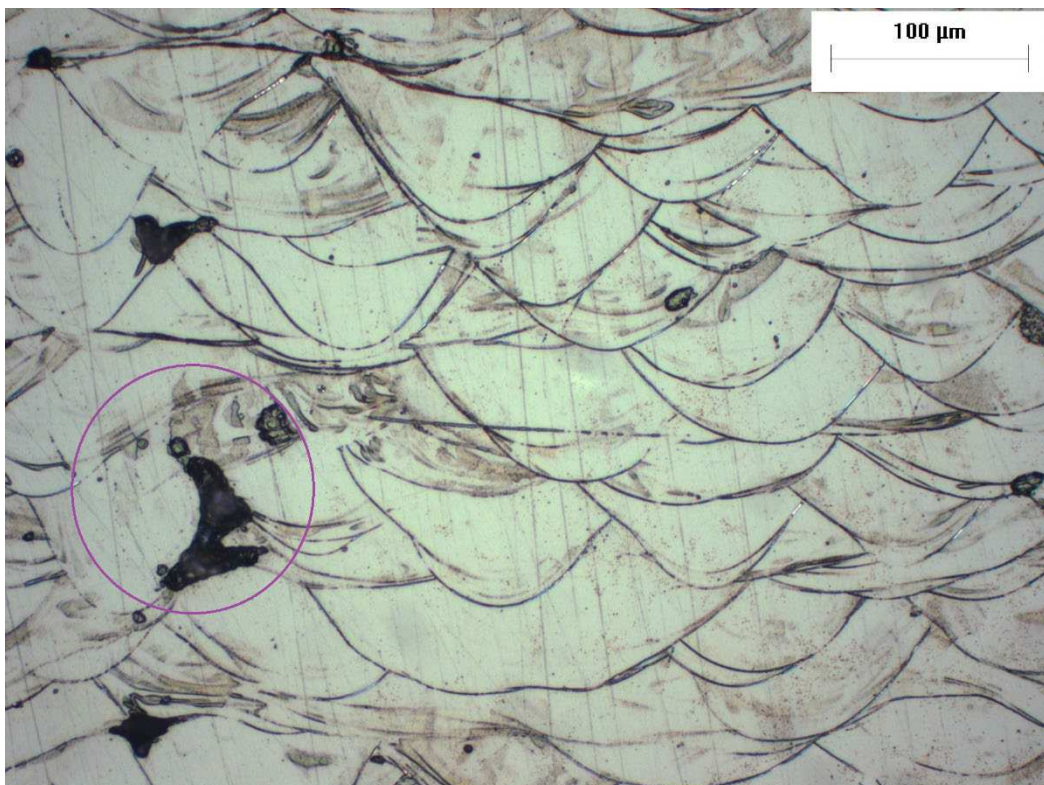


Figura 34: campione yz osservata al MO dopo attacco chimico

Usando un altro microscopio ottico con un ingrandimento maggiore, si nota che nelle immagini del campione deformato dinamicamente dopo l'attacco chimico, si può osservare chiaramente un fenomeno di ricristallizzazione e la formazione di nuovi grani austenitici, che sono il risultato diretto

della deformazione dinamica subita dal materiale. Questo processo di ricristallizzazione si verifica quando l'energia accumulata durante la deformazione viene rilasciata, promuovendo la riorganizzazione della microstruttura interna del campione.

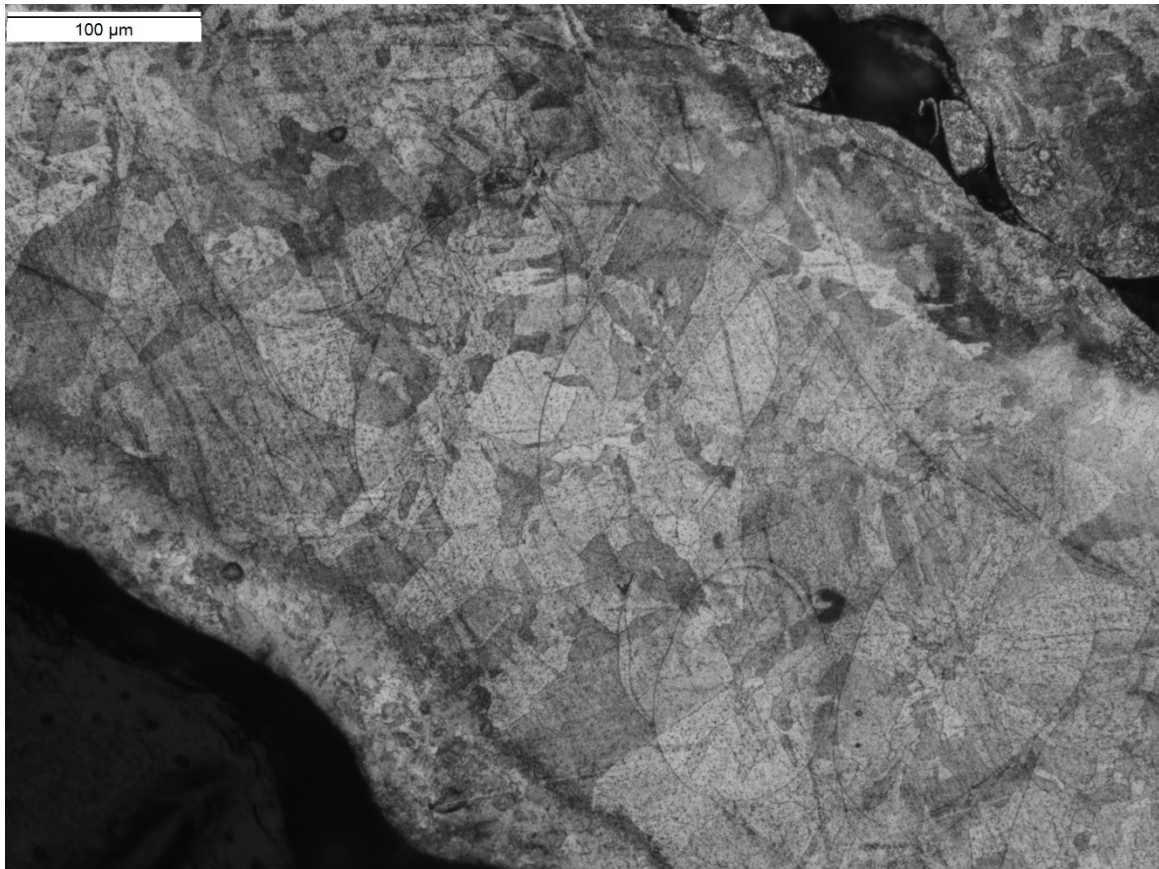


Figura 35: campione xy deformato dinamicamente.

5.3 Risultati delle prove di microdurezza

Le prove di microdurezza sono state effettuate sul campione xy e sul campione xy deformato dinamicamente. Di seguito, vengono analizzati e confrontati i risultati ottenuti.

Abbiamo iniziato a testare il campione xy, particolarmente abbiamo scelto una trave orizzontale dove si effettuano quattro serie di 8 impronte, una trave obliqua e un nodo dove si effettuano tre serie di 8 impronte come evidenziato in figura 36.

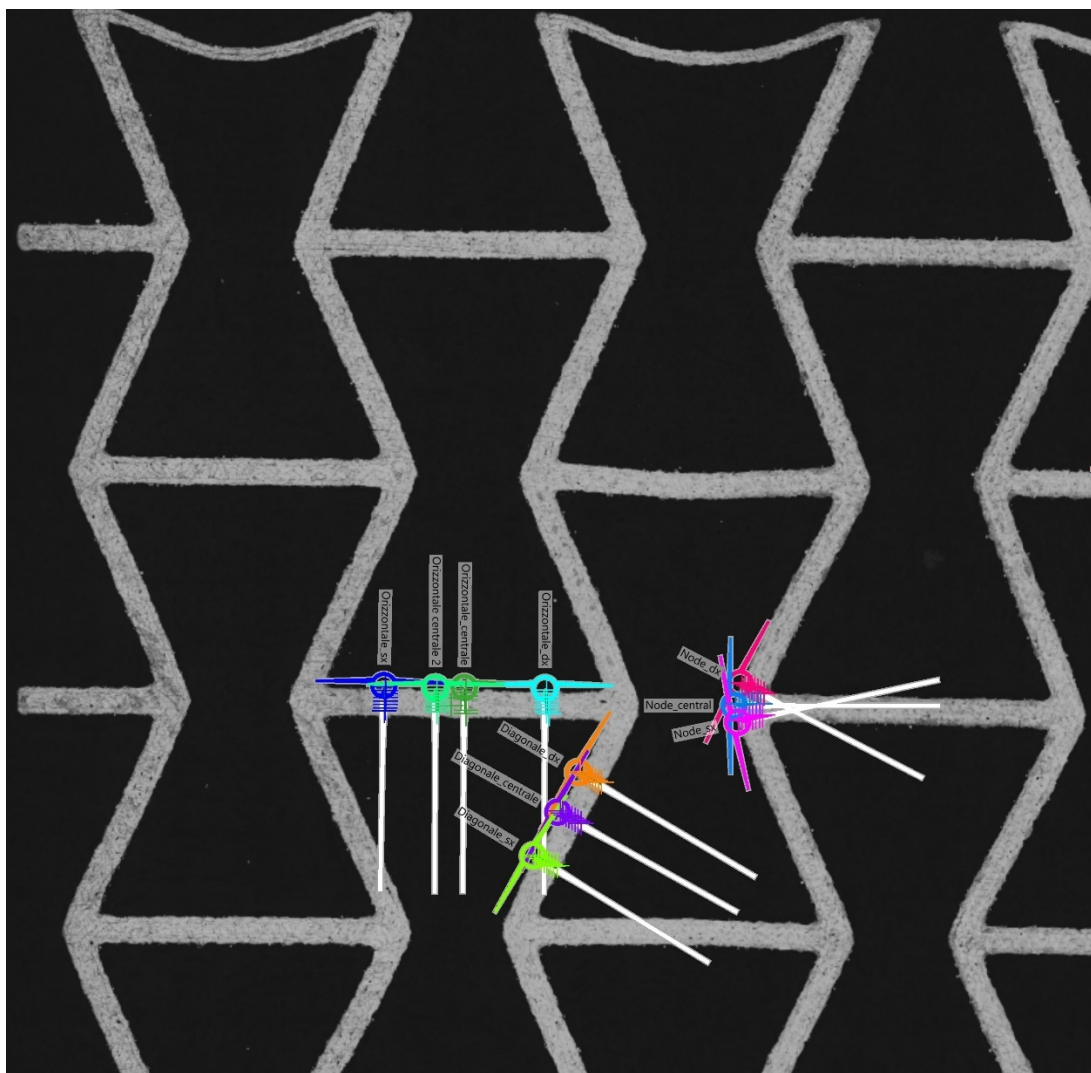


Figura 36: prova di microdurezza sul campione xy

Dopo questo test di microdurezza, possiamo osservare che la durezza nella parte esterna delle travi è minore della durezza della parte interna come mostrato in Figura 37.

media	236,4	256	255,1	263,8	256,7	260,5	250,4	243,2
dev_standard	19,8	11,1	20,4	22,6	8,5	13,7	19,5	17,7

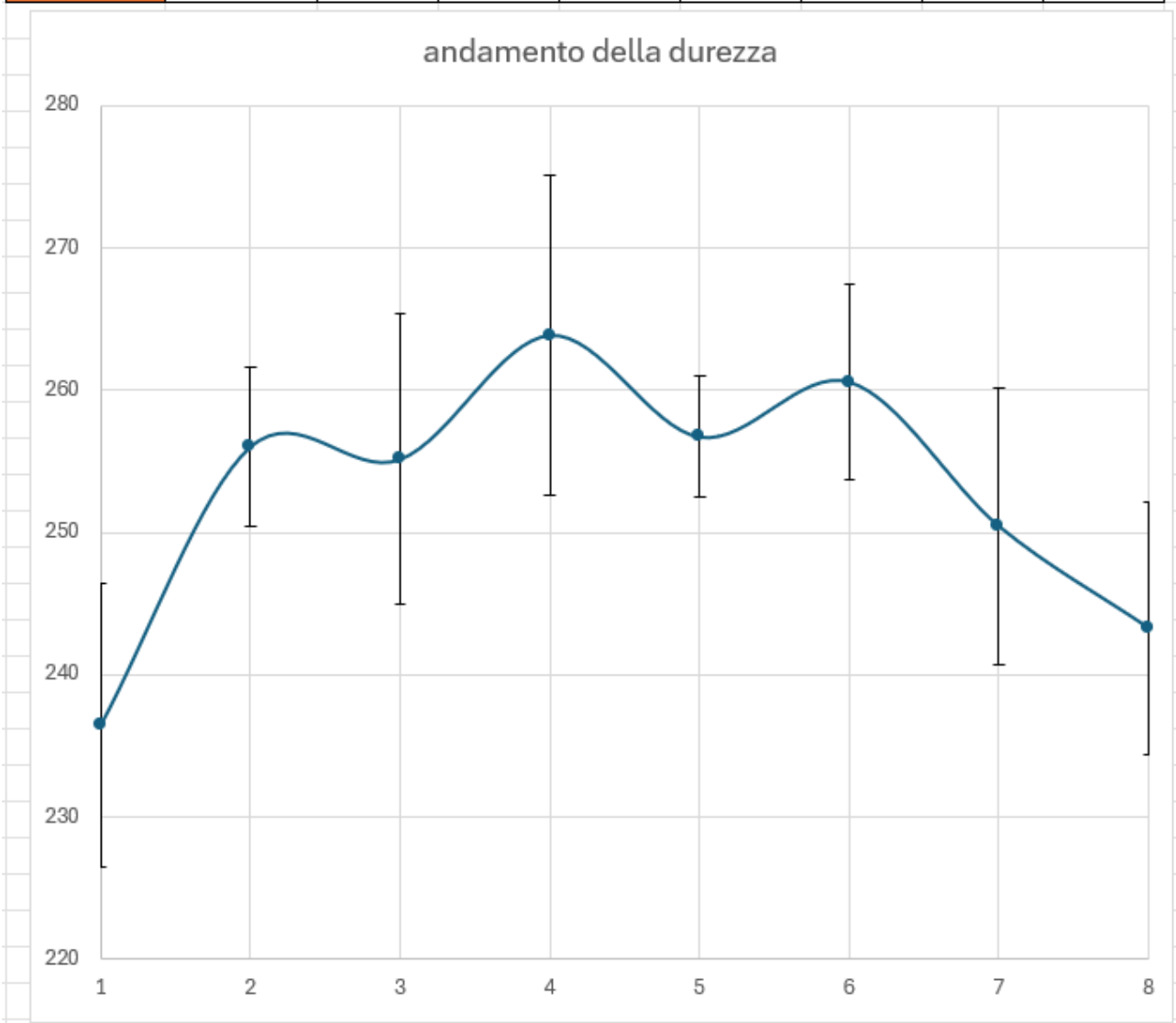


Figura 37: andamento della durezza del campione xy as-built

passando al campione deformato dinamicamente, per effettuare il test di microdurezza si scelgono le travi che si deformano per trazione e non quelle sottoposte a flessione, cioè, si sceglie la trave che si è mantenuta dritta, si può vedere le travi deformate a trazione con colore verde nella figura 38.

Nella figura 39 si mostrano le travi ed i nodi (che si deformano a flessione) dove andiamo ad effettuare il test.

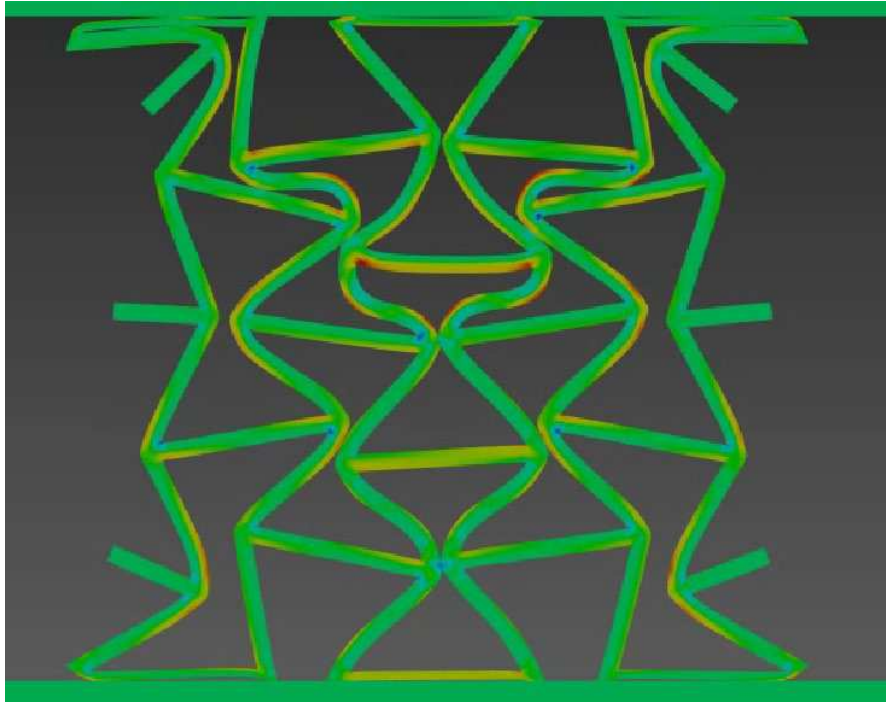


Figura 38: campione xy deformato dinamicamente

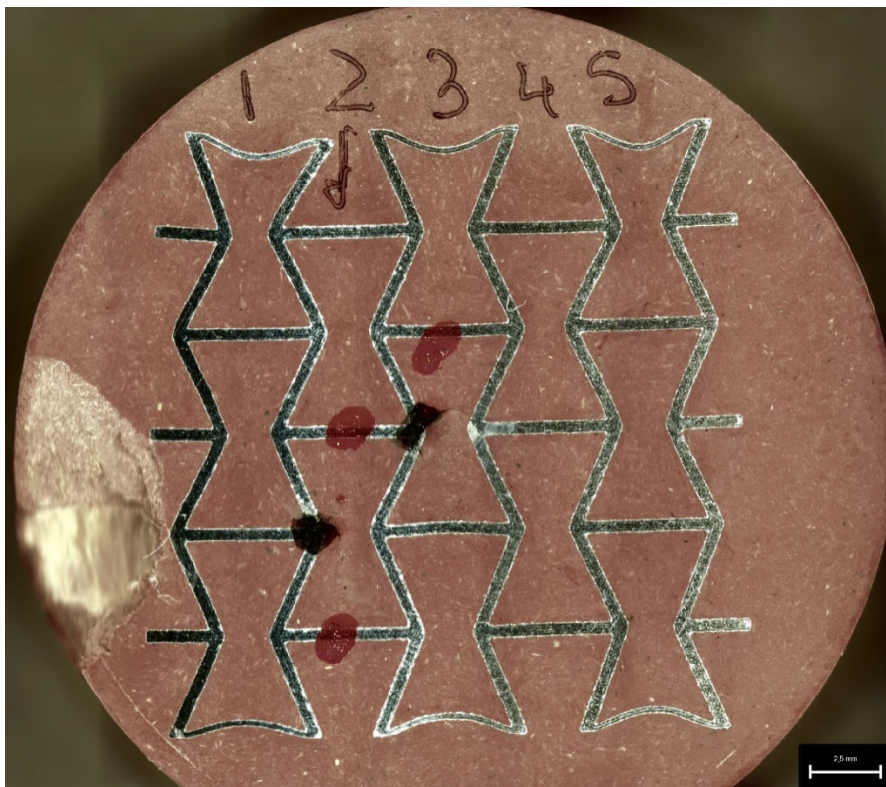


Figura 39: campione xy

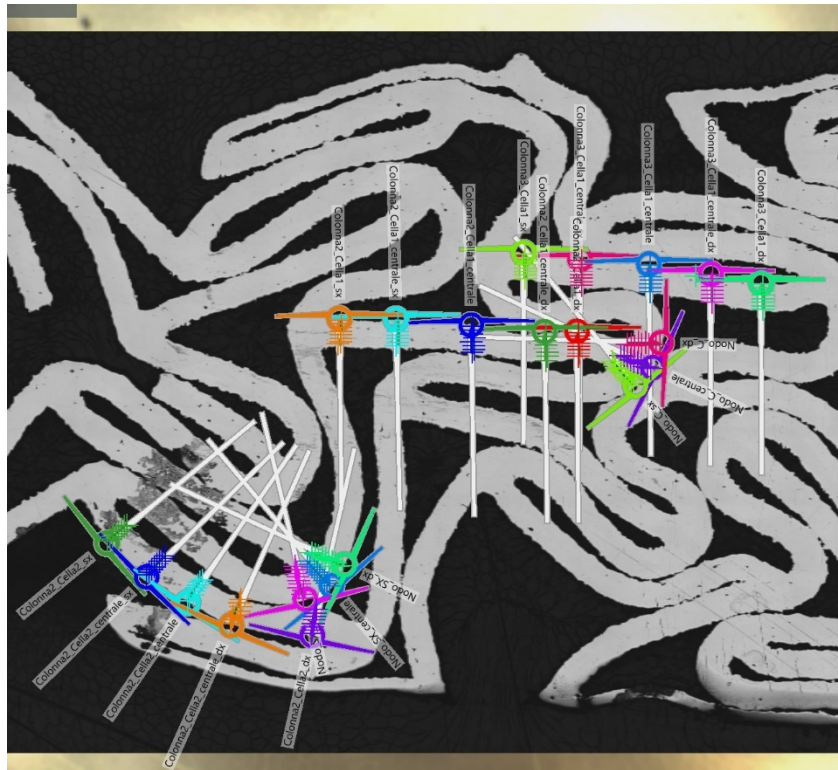


Figura 40: prova di microdurezza sul campione xy deformato dinamicamente

Dal test di microdurezza si aspettavano valori di durezza alti quando il valore di tensione è alto e valore di durezza bassi quando il valore di tensione è basso. Infatti, se si considera la curva del materiale in figura 41, con un sigma più elevata il materiale in esame sarà caratterizzato da un incrudimento più elevato e, quindi, da una durezza finale più elevata.

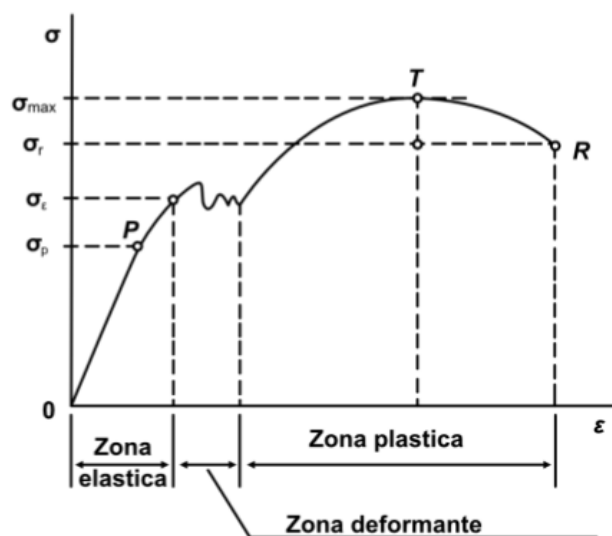


Figura 41: diagramma tensioni deformazioni

Dopo il test di microdurezza sul campione testato dinamicamente possiamo osservare che in alcuni punti non abbiamo superato il valore di snervamento pari a 524 MPa. Ciò avviene a livello delle travi in cui i valori di durezza sono gli stessi del componente as-built non deformato. Infatti, le simulazioni hanno evidenziato che lo stress si è accumulato soprattutto a livello dei nodi o in prossimità di essi come visibile in figura 43.

Poiché la deformazione e gli stress si sono accumulati sui nodi, di conseguenza sta struttura abbiamo deciso di fare un secondo test di microdurezza solamente su di essi figura 42.

La deformazione si concentra sui nodi in diagonale, facendo un comportamento a X come mostrato in figura 43.



Figura 42: prova di microdurezza sul campione xy deformato dinamicamente solo sui nodi

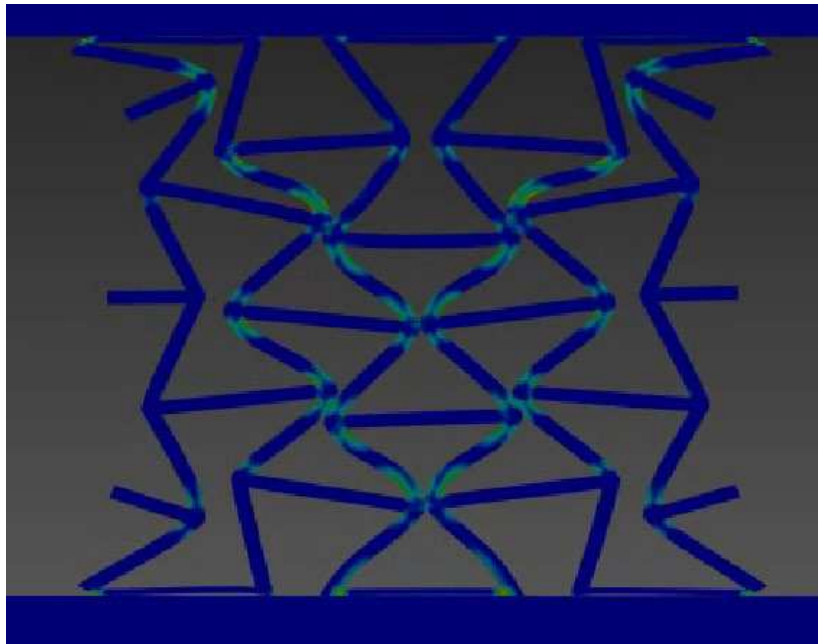


Figura 43: comportamento a X

Dunque, possiamo dire che abbiamo un incremento di durezza sui nodi, perché si sono deformati, cioè, sono nella fase plastica e anche perché la deformazione ha portato alla formazione di grani austenitici figura 44.

media	296,5	301,3	285,5	297,2	301,2	313,4	315,7	319,7
dev_standard	31,1	32,6	23,4	29,1	38	43,4	56,4	51,5

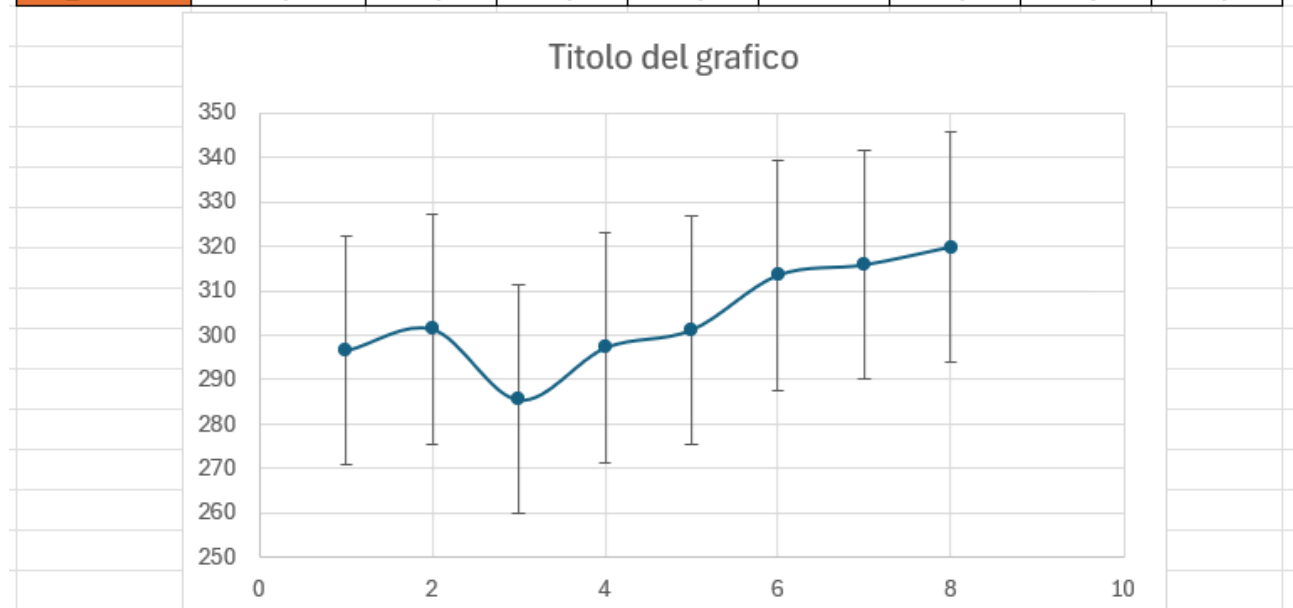


Figura 44: andamento della durezza del campione xy deformato dinamicamente

inoltre, quando la deformazione arriva ad un certo livello, i nodi si toccano e di conseguenza avrò un incremento assoluto della tensione. Il risultato sarà un diagramma della tensione analogo a quello in Figura 45 perché la struttura si muove in modo da deformarsi. La struttura per continuare a deformarsi va in rotazione e di conseguenza la deformazione dopo un certo punto non ci concentra più sui nodi ma in alcune zone della struttura stessa. È per questo che abbiamo dei valori randomici di durezza.

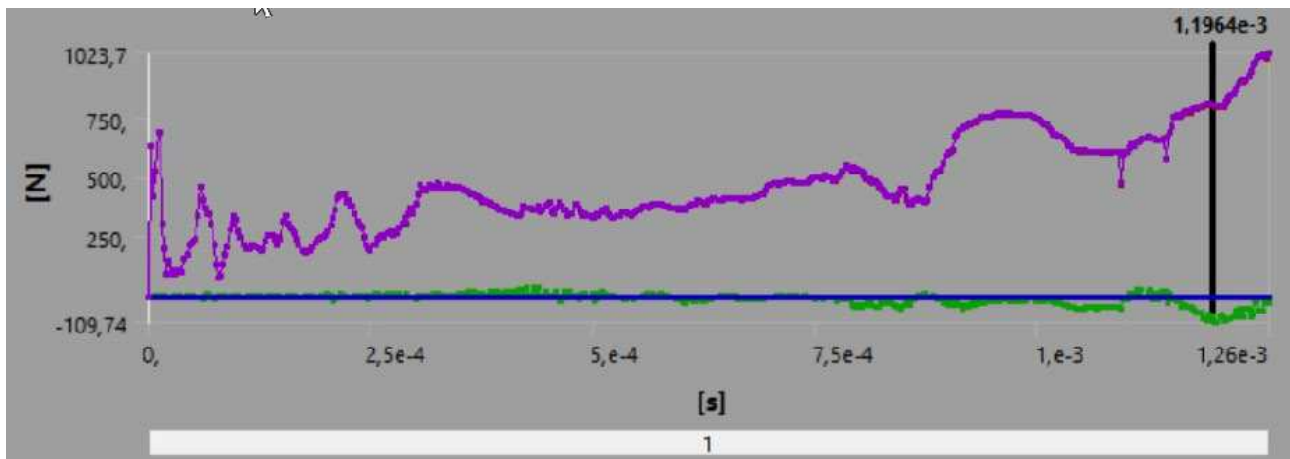


Figura 45: diagramma delle tensioni sul campione xy deformato dinamicamente

Conclusioni

La tecnologia Laser Powder Bed Fusion (LPBF), insieme ad altre tecniche di additive manufacturing, rappresenta una soluzione altamente efficiente per la produzione di componenti metallici. Grazie alla LPBF, è possibile realizzare oggetti con geometrie complesse e pareti sottili, riducendo significativamente i tempi e i costi di produzione. Ciò rende questa tecnica particolarmente adatta alla creazione di strutture reticolari metalliche, come i metamateriali auxetici.

In questo studio, sono stati analizzati tre campioni di AISI 316L prodotti tramite LPBF. La caratterizzazione microstrutturale di questi campioni è stata effettuata attraverso diverse procedure sperimentali, utilizzando una serie di strumenti specifici. In particolare, i campioni sono stati sottoposti a una prova di compressione dinamica, utile per analizzare la risposta dei campioni rispetto a quelli nello stato "as-built".

Le procedure sperimentali hanno incluso la preparazione metallografica, la compressione dinamica, l'osservazione dei campioni metallici mediante Microscopio Ottico (prima e dopo l'attacco chimico) e le prove di microdurezza. L'osservazione dei campioni 316L al microscopio ottico, successivamente all'attacco chimico, ha permesso di studiare la loro microstruttura. È emerso che, durante il processo di produzione additiva, è stata adottata una diversa strategia di scansione tra i bordi e la parte interna dei legamenti e nodi dei campioni. In particolare, lungo i bordi si sono raggiunte velocità di raffreddamento più elevate rispetto alle parti centrali, portando alla formazione di una struttura più raffinata, caratterizzata dalla presenza di strutture cellulari fini.

Bibliografia

[1] Zheludev NI. La strada da percorrere per i metamateriali. Scienza 2010;328:582–3.

[The Road Ahead for Metamaterials | Science](#)

[2] Soukoulis CM, Wegener M. Risultati passati e sfide future nello sviluppo di metamateriali fotonici tridimensionali. Nat Photonics 2011;5:523–30.

[Past achievements and future challenges in the development of three-dimensional photonic metamaterials | Nature Photonics](#)

[3] Xianglong Yu, Ji Zhou, Haiyi Liang, Zhengyi Jiang, Lingling Wu, Mechanical metamaterials associated with stiffness, rigidity and compressibility: A brief review, Progress in Materials Science, Volume 94, 2018, Pages 114-173, ISSN 0079-6425

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079642517301445>

[4] Bertoldi K, Reis PM, Willshaw S, Mullin T. Comportamento del rapporto di Poisson negativo indotto da un'instabilità elastica. Adv Mater 2010;22:361–6

[Negative Poisson's Ratio Behavior Induced by an Elastic Instability - Bertoldi - 2010 - Advanced Materials - Wiley Online Library](#)

[5] Laghi R. Strutture di schiuma con un rapporto di Poisson negativo. Scienza 1987;235:1038–40.

[Foam Structures with a Negative Poisson's Ratio | Science](#)

[6] Bückmann T, Thiel M, Kadic M, Schittny R, Wegener M. Un mantello di insensibilità elasto-meccanica realizzato con metamateriali pentamode. Nat Commun 2014;5:4130.

[Scopus - Document details - An elasto-mechanical unfeelability cloak made of pentamode metamaterials](#)

[7] Kadic M, Bückmann T, Stenger N, Thiel M, Wegener M. Sulla fattibilità dei metamateriali meccanici pentamode. Appl Phys Lett 2012;100:191901.

[Scopus - Document details - On the practicability of pentamode mechanical metamaterials](#)

[8] Christensen J, Kadic M, Kraft OI, Wegener M. Tempi vibranti per metamateriali meccanici. MRS Commun 2015;5:453–62.

[Vibrant times for mechanical metamaterials | MRS Communications \(springer.com\)](#)

[9] Laghi R, Lee T, Bersie A, Wang Y. Smorzamento estremo in materiali compositi con inclusioni di rigidità negativa. Natura 2001;410:565–7.

[Scopus - Document details - Extreme damping in composite materials with negative-stiffness inclusions](#)

[10] Nicolaou ZG, Motter AE. Metamateriali meccanici con transizioni di compressibilità negative. *Nat Mater* 2012;11:608–13.

[Mechanical metamaterials with negative compressibility transitions | Nature Materials](#)

[11] Wyart M, Liang H, Kabla A, Mahadevan L. Elasticità di reti casuali floppy e rigide. *Phys Rev Lett* 2008;101:215501.

[Phys. Rev. Lett. 101, 215501 \(2008\) - Elasticity of Floppy and Stiff Random Networks \(aps.org\)](#)

[12] Gómez LR, Turner AM, van Hecke M, Vitelli V. Shock quasi inceppati. *Phys Rev Lett* 2012;108:058001.

[Phys. Rev. Lett. 108, 058001 \(2012\) - Shocks near Jamming \(aps.org\)](#)

[13] Chen BG-G, Upadhyaya N, Vitelli V. Conduzione non lineare tramite soluzioni in un isolante meccanico topologico. *Proc Natl Acad Sci* 2014;111:13004–9

[Nonlinear conduction via solitons in a topological mechanical insulator | PNAS](#)

[14] Nash LM, Kleckner D, Leggi AI, Vitelli V, Turner AM, Irvine WTM. Meccanica topologica dei metamateriali giroscopici. *Proc Natl Acad Sci* 2015;112:14495–500

[Topological mechanics of gyroscopic metamaterials | PNAS](#)

[15] Chenyang Liu, Xi Zhang, Jiahui Chang, You Lyu, Jianan Zhao, Song Qiu. Article in **Frontiers in Materials**, published March 2024. [10.3389/fmats.2024.1361408](#)

[Frontiers | Programmable mechanical metamaterials: basic concepts, types, construction strategies—a review \(frontiersin.org\)](#)

[16] Ion, A., Frohnhofen, J., Wall, L., Kovacs, R., Alistar, M., Lindsay, J., et al. (2016). "Meccanismi metamateriali, UIST 2016", in ATTI DEL 29° SIMPOSIO ANNUALE SUL SOFTWARE E LA TECNOLOGIA DELL'INTERFACCIA UTENTE, Tokyo, Giappone, ottobre 2016, 529-539. DOI:10.1145/2984511.2984540

<https://doi.org/10.1145/2984511.2984540>

[17] Ion, A., Wall, L., Kovacs, R. e Baudisch, P. (2017). "Metamateriali meccanici digitali", in ATTI DELLA CONFERENZA ACM SIGCHI 2017 sui fattori umani nei sistemi informatici (chi'17), Denver Colorado USA, maggio 2017, 977–988. DOI:10.1145/3025453.3025624

<https://doi.org/10.1145/3025453.3025624>

[18] Hawkes, E., An, B., Benbernou, N. M., Tanaka, H., Kim, S., Demaine, E. D., et al. (2010). Materia programmabile piegandosi. *Proc. di Natl. Acad. di Sci. degli Stati Uniti* 107 (28), 12441–12445. DOI:10.1073/pnas.0914069107

<https://doi.org/10.1073/pnas.0914069107>

[19] van Manen, T., Janbaz, S., and Amir, A. (2018). Programming the shape-shifting of flat soft matter. *Mater. TODAY* 21 (2), 144–163. doi:10.1016/j.mattod.2017.08.026

<https://doi.org/10.1016/j.mattod.2017.08.026>

[20] Florijn, B., Coulais, C., and Martin van Hecke, (2016). Programmable mechanical metamaterials: the role of geometry. *Soft matter* 12 (42), 8736–8743. doi:10.1039/c6sm01271j

<https://doi.org/10.1039/C6SM01271J>

[21] Matthew, F. (2018). Berwind, alec kamas, and christoph eberl, A hierarchical programmable mechanical metamaterial unit cell showing metastable shape memory. *Adv. Eng. Mater.* 20 (11), 1800771. doi:10.1002/adem.201800771

<https://doi.org/10.1002/adem.201800771>

[22] Kadic, M., Milton, G. W., Martin van Hecke, , and Wegener, M. (2019). 3D metamaterials. *Nat. Rev. Phys.* 1 (3), 198–210. doi:10.1038/s42254-018-0018-y

<https://doi.org/10.1038/s42254-018-0018-y>

[23] Yuan, S., Chua, C. K., and Zhou, K. (2019). 3D-Printed mechanical metamaterials with high energy absorption. *Adv. Mater. Technol.* 4 (3), 1800419. doi:10.1002/admt.201800419

<https://doi.org/10.1002/admt.201800419>

[24] Wang, Y., Ramirez, B., Carpenter, K., Naify, C., Hofmann, D. C., and Daraio, C. (2019). Architected lattices with adaptive energy absorption. *Extreme Mech. Lett.* 33, 100557. doi:10.1016/j.eml.2019.100557

<https://doi.org/10.1016/j.eml.2019.100557>

[25] Lakes, R.S. Size effects and micromechanics of a porous solid. *J Mater Sci* **18**, 2572–2580 (1983).

<https://doi.org/10.1007/BF00547573>

[26] <https://doi.org/10.1002/adem.201800864>

[27] V. S. Deshpande, M. F. Ashby, N. A. Fleck, *Acta Mater.* 2001, **49**, 1035.

[https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(00\)00379-7](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(00)00379-7)

[28] M. P. Wolcott, L. J. Gibson, M. F. Ashby, *Mater. Sci. Eng. A* 1990, **123**, 282.

[https://doi.org/10.1016/0921-5093\(90\)90295-E](https://doi.org/10.1016/0921-5093(90)90295-E)

[29] X. Zheng, W. Smith, J. Jackson, B. Moran, H. Cui, D. Chen, J. Ye, N. Fang, N. Rodriguez, T. Weisgraber, C. M. Spadaccini, *Nat. Mater.* 2016, **15**, 1100.

<https://doi.org/10.1038/nmat4694>

[30] J. R. Greer, J. T. M. De Hosson, *Prog. Mater. Sci.* 2011, **56**, 654.

<https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2011.01.005>

[31] X. W. Gu, C. N. Loynachan, Z. Wu, Y. W. Zhang, D. J. Srolovitz, J. R. Greer, *Nano Lett.* 2012, **12**, 6385.

<https://doi.org/10.1021/nl3036993>

[32] J. Rys, L. Valdevit, T. A. Schaedler, A. J. Jacobsen, W. B. Carter, J. R. Greer, *Adv. Eng. Mater.* 2014, **16**, 889. <https://doi.org/10.1002/adem.201300454>

[33] R. Brezny, D. J. Green, *Acta Metall. Mater.* 1990, **38**, 2517.

[https://doi.org/10.1016/0956-7151\(90\)90263-G](https://doi.org/10.1016/0956-7151(90)90263-G)

[34] Li, D., Yin, J., Dong, L. *et al.* Strong re-entrant cellular structures with negative Poisson's ratio. *J Mater Sci* **53**, 3493–3499 (2018).

<https://doi.org/10.1007/s10853-017-1809-8>

[35] Bertoldi, K., Vitelli, V., Christensen, J. *et al.* Flexible mechanical metamaterials. *Nat Rev Mater* **2**, 17066 (2017).

<https://doi.org/10.1038/natrevmats.2017.66>

[36] Madhu Balan P, Johnney Mertens A, M V A Raju Bahubalendruni, Auxetic mechanical metamaterials and their futuristic developments: A state-of-art review, *Materials Today Communications*, Volume 34, 2023, 105285.

<https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.105285>

[37] Niranjan Kumar Choudhry, Biranchi Panda, S. Kumar, In-plane energy absorption characteristics of a modified re-entrant auxetic structure fabricated via 3D printing, *Composites Part B: Engineering*, Volume 228, 2022, 109437.

<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109437>

[38] Laghi Roderici, Strutture in schiuma con un rapporto di Poisson negativo. *Scienza* **235**, 1038-1040 (1987). [10.1126/science.235.4792.1038](https://doi.org/10.1126/science.235.4792.1038)

[39] I.G. Masters, K.E. Evans, Models for the elastic deformation of honeycombs, *Composite Structures*, Volume 35, Issue 4, 1996, Pages 403-422.

[https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(96\)00054-2](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(96)00054-2)

[40] Evans, K.E. e Alderson, A. (2000), Materiali auxetici: materiali funzionali e strutture dal pensiero laterale!. *Avv. Mater.*, 12: 617-628.

[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-4095\(200005\)12:9<617::AID-ADMA617>3.0.CO;2-3](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-4095(200005)12:9<617::AID-ADMA617>3.0.CO;2-3)

[41] A. Spadoni, M. Ruzzene, Elasto-static micropolar behavior of a chiral auxetic lattice, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Volume 60, Issue 1, 2012, Pages 156-171.

<https://doi.org/10.1016/j.jmps.2011.09.012>

[42] Davood Mousanezhad, Babak Haghpanah, Ranajay Ghosh, Abdel Magid Hamouda, Hamid Nayeb-Hashemi, Ashkan Vaziri, Elastic properties of chiral, anti-chiral, and hierarchical honeycombs: A simple energy-based approach, *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, Volume 6, Issue 2, 2016, Pages 81-96.

<https://doi.org/10.1016/j.taml.2016.02.004>

[43] <https://doi.org/10.1002/pssb.201384249>

[44] Sohini Chowdhury, N. Yadaiah, Chander Prakash, Seeram Ramakrishna, Saurav Dixit, Lovi Raj Gupta, Dharam Buddhi, Laser powder bed fusion: a state-of-the-art review of the technology,

materials, properties & defects, and numerical modelling, *Journal of Materials Research and Technology*, Volume 20, 2022, Pages 2109-2172

<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.07.121>

[45] Ahsan, F., Ladani, L. Temperature Profile, Bead Geometry, and Elemental Evaporation in Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing Process. *JOM* 72, 429–439 (2020).

<https://doi.org/10.1007/s11837-019-03872-3>

[46] L. Parry, I.A. Ashcroft, R.D. Wildman, Understanding the effect of laser scan strategy on residual stress in selective laser melting through thermo-mechanical simulation, *Additive Manufacturing*, Volume 12, Part A, 2016, Pages 1-15

<https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.05.014>

[47] T. DebRoy, H.L. Wei, J.S. Zuback, T. Mukherjee, J.W. Elmer, J.O. Milewski, A.M. Beese, A. Wilson-Heid, A. De, W. Zhang, Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties, *Progress in Materials Science*, Volume 92, 2018, Pages 112-224

<https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>

[48] S. Leuders, M. Thöne, A. Riemer, T. Niendorf, T. Tröster, H.A. Richard, H.J. Maier, On the mechanical behaviour of titanium alloy TiAl6V4 manufactured by selective laser melting: Fatigue resistance and crack growth performance, *International Journal of Fatigue*, Volume 48, 2013, Pages 300-307

<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2012.11.011>

[49] Andrey Molotnikov, Alex Kingsbury, Milan Brandt, 23 - Current state and future trends in laser powder bed fusion technology, Editor(s): Igor Yadroitsev, Ina Yadroitsava, Anton du Plessis, Eric MacDonald, In *Additive Manufacturing Materials and Technologies, Fundamentals of Laser Powder Bed Fusion of Metals*, Elsevier, 2021, Pages 621-634

<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824090-8.00011-1>

[50] Elmer JW, Gibbs G. The effect of atmosphere on the composition of wire arc additive manufactured metal components. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2019;24(5):367-374.

<https://doi.org/10.1080/13621718.2019.1605473>

[51] [US9126167B2 - Powder distribution in additive manufacturing - Google Patents](#)

[52] [US10814387B2 - Powder recirculating additive manufacturing apparatus and method - Google Patents](#)

[53] I. Yadroitsev, I. Smurov, Surface Morphology in Selective Laser Melting of Metal Powders, *Physics Procedia*, Volume 12, Part A, 2011, Pages 264-270

<https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.03.034>

[54] [Strategia di fabbricazione di parti di forma complessa basata sulla stabilità di una singola traccia fusa al laser \(spiedigitallibrary.org\)](#)

[55] Yali Li, Dongdong Gu, Parametric analysis of thermal behavior during selective laser melting additive manufacturing of aluminum alloy powder, *Materials & Design*, Volume 63, 2014, Pages 856-867

<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.07.006>

[56] Simchi, A. The role of particle size on the laser sintering of iron powder. *Metall Mater Trans B* 35, 937–948 (2004). <https://doi.org/10.1007/s11663-004-0088-3>

[57] <https://doi.org/10.1063/1.4935926>

[58] Dongdong Gu, Yves-Christian Hagedorn, Wilhelm Meiners, Guangbin Meng, Rui João Santos Batista, Konrad Wissenbach, Reinhart Poprawe, Densification behavior, microstructure evolution, and wear performance of selective laser melting processed commercially pure titanium, *Acta Materialia*, Volume 60, Issue 9, 2012, Pages 3849-3860

<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.04.006>

[59] Qingbo Jia, Dongdong Gu, Selective laser melting additive manufacturing of Inconel 718 superalloy parts: Densification, microstructure and properties, *Journal of Alloys and Compounds*, Volume 585, 2014, Pages 713-721

<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.09.171>

[60] Rongshi Xiao, Xinyi Zhang, Problems and issues in laser beam welding of aluminum–lithium alloys, *Journal of Manufacturing Processes*, Volume 16, Issue 2, 2014, Pages 166-175

<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2013.10.005>

[61] Cao, X. *et al.* (2003) 'Research and Progress in Laser Welding of Wrought Aluminum Alloys. II. Metallurgical Microstructures, Defects, and Mechanical Properties', *Materials and Manufacturing Processes*.

<https://doi.org/10.1081/AMP-120017587>

[62] [Acciaio approfondimenti, storia, acciaio inox, filo cotto, impieghi | Metalfil](#)

[63] [Acciaio: definizione, caratteristiche e tipologie | Univiti](#)

[64] [Acciaio inox: caratteristiche, applicazioni e trattamenti \(rossitre.com\)](#)

[65] [L'uso dell'acciaio inossidabile nelle strutture - Gardner - 2005 - Progressi nell'ingegneria strutturale e dei materiali - Wiley Online Library](#)

[66] [Proprietà degli acciai inossidabili di tipo 316 e 316L \(greelane.com\)](#)

[67] [Indagine sperimentale sulla corrosione e la durezza dell'acciaio inossidabile AISI 316L impiantato con ioni - ScienceDirect](#)

Ringraziamenti

Grazie alla mia famiglia per avermi sostenuto dal primo all'ultimo giorno.