**POLITECNICO DI TORINO** 



# FACOLTÀ DI INGEGNERIA

## Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea

# Progettazione di una struttura Auxetica per processo di

fusione selettiva del letto di polvere per materiali metallici

Relatore Prof. Luca Iuliano Candidato **Colella De Santis Luca** Mat. 252745

Correlatore Ing. Manuela Galati Ing. Flaviana Calignano

ANNO ACCADEMICO 2019/2020

A mio padre, a mia madre, a mio fratello

e a tutti coloro che mi sono stati vicini,

che mi hanno sostenuto e appoggiato

dall'inixio della mia esistenxa.

## Sommario

1. I	NTR	RODUZIONE	. 4	
1	.1	ADDITIVE MANUFACTURING	6	
	1.1.	1 Material Extrusion	. 10	
	1.1.	2 Material Jetting	.13	
	1.1.	3 Fotopolimerizzazione vat	. 14	
	1.1.	4 Laser Powder Bed Fusion	.15	
	1.1.	5 Electron Beam Melting	. 18	
1	.2	VANTAGGI E SVANTAGGI DELLA FABBRICAZIONE ADDITIVA	19	
1	.3	PROGETTAZIONE PER FUSIONE SELETTIVA LASER A LETTO DI POLVERE (L-		
Р	BF)		20	
2. 1	ΛΑΤ	ERIALI E STRUTTURE AUXETICHE	25	
2	.1	MATERIALI AUXETICI	25	
2	.2	STRUTTURE AUXETICHE	29	
3. FASE SPERIMENTALE				
3	.1	MODELLO DOBLE-U	35	
	3.1.	1 Realizzazione modello CAD	.36	
	3.1.	2 Problematiche e modifica della geometria	.38	
	3.1.	3 Analisi agli elementi finiti	.42	
	3.1.	4 Analisi cella elementare con mesh tetraedrica	.43	
	3.1.	5 Analisi cella elementare con mesh esaedrica	.44	
	3.1.	6 Calcolo del coefficiente di Poisson per cella elementare	.46	
	3.1.	7 Analisi struttura totale	.47	
	3.1.	8 Calcolo coefficiente di Poisson per multi-cella	.52	
3	.2	PROGETTAZIONE STRUTTURA AUXETICA	53	
	3.2.	1 Parametri geometrici	.56	
	3.2.	2 Calcolo coefficiente di Poisson	.59	
	3.2.	3 Struttura totale	.60	
4. RISULTATI				
4	.1	MODELLO DOUBLE-U	61	
	4.1.	1 Variazione quota del punto di applicazione del carico	.61	

4.1.2 Confronto tra mesh esaedrica e tetraedrica	63	
4.1.3 Calcolo Coefficiente di Poisson per cella elementare	64	
4.1.4 Struttura multi-cella	65	
4.1.5 Calcolo coefficiente di Poisson per struttura multi-cella	69	
4.2 STRUTTURA PROGETTATA	70	
4.2.1 Effetto dei parametri geometrici	70	
4.2.2 Calcolo coefficiente di Poisson	76	
4.2.3 Struttura multi-cella	77	
5. CONCLUSIONI		

### ABSTRACT

La Fabbricazione Additiva sta attraversando un momento di forte affermazione nell'intero scenario internazionale. La sua espansione attraversa diversi settori industriali, tra i quali troviamo quello aerospaziale, automobilistico, medicale e militare. Grazie alla possibilità di produrre un componente aggiungendo materiale strato su strato, si riescono a realizzare dei componenti di geometria complessa. La complessità realizzabile mediante tecniche di fabbricazione additiva permette di progettare strutture e geometrie in cui le performance complessive non dipendono più dal solo materiale ma anche dalla sua modellazione geometrica. Esempio di queste strutture già prodotte in ambito industriale mediante tecniche di fabbricazione additiva sono le strutture trabecolari che emulano il comportamento meccanico di elevata resistenza a compressione delle trabecole dell'osso. In questo lavoro di tesi si mira a progettare una struttura con comportamento di tipo auxetico (coefficiente di Poisson negativo), intervenendo esclusivamente sulla geometria della parte ed utilizzando un materiale che non possiede tale caratteristica, ma processabile mediante tecnologia Laser Powder Bed Fusion (L-PBF). Partendo da un'analisi di letteratura degli argomenti in questione è stato identificato un lavoro di riferimento. La struttura è stata riprodotta e modellata mediante metodo agli elementi finiti (FEM). La modellazione è stata modificata fino alla convergenza con i dati riportati sul lavoro. Tale step ha avuto la finalità di convalidare l'approccio utilizzato. Successivamente, in accordo alle regole di progettazione per la produzione mediante tecniche L-PBF, si è progettata una nuova struttura elementare che presentasse comportamento auxetico. La struttura è stata validata mediante FEM ed è stata eseguita un'analisi di sensitività sui parametri geometrici della struttura e sulla loro interazione con il suo funzionamento. Infine, è stato analizzato anche il comportamento multi-cella, costruendo una struttura di 5x5x5 celle (100x100x100 mm<sup>3</sup>). I risultati ottenuti mettono in mostra come la geometria elementare progettata abbia la capacità di sopportare carichi maggiori rispetto alla deformazione ottenuta. Tale lavoro conferma, come già presente in letteratura, che l'integrazione tra Fabbricazione Additiva e strutture auxetiche è possibile, fornendo una nuova struttura elementare da utilizzare in questo campo.

## **1.INTRODUZIONE**

Partendo dallo studio di materiali presenti in natura, quali la pelle del gatto e la struttura ossea, negli ultimi anni grande attenzione è stata riservata allo studio dei materiali auxetici. La caratteristica principale di tali materiali è quella di avere un coefficiente di Poisson negativo, che li rende particolarmente interessanti in tante applicazioni e settori, quali quello aerospaziale, automobilistico e medicale. Il ristretto numero di materiali presenti in natura con tale caratteristica ha portato allo studio e alla progettazione di particolari strutture che godessero di tale proprietà. Grande interesse è stato dedicato all'utilizzo di materiali che non siano auxetici, come i metalli e i polimeri, al fine di ottenere delle geometrie con caratteristiche auxetiche. La creazione di queste strutture riscontra grandi vantaggi anche nel campo delle tecnologie additive, le quali, grazie alla capacità di realizzare componenti strato dopo strato, permettono di ottenere geometrie complesse. I vantaggi legati all'uso delle tecnologie additive sono tanti a partire dalla riduzione degli scarti e dei tempi tra concettualizzazione e produzione, dalla possibilità di migliorare le caratteristiche meccaniche, di ridurre il peso finale del componente e avere una buona dose di personalizzazione grazie alla produzione in piccoli lotti. Una delle più importanti tecnologie additive è la Laser Powder Bed Fusion (L-PBF), un processo di fusione a letto di polvere che utilizza un laser come fonte di energia per fondere lo strato di polvere metallica. I materiali processati con questa tipologia di tecnologia sono principalmente metalli. Partendo dallo studio di strutture auxetiche già presenti in letteratura si è definita una geometria di riferimento, la Doble-U [1], realizzata in acciaio inossidabile tramite tecnologia L-PBF. Tale geometria sfrutta le sue forme ricurve per ottenere un comportamento auxetico. La riprogettazione della struttura presentata in [1] ha subito delle modifiche a causa di alcuni problemi legati alla geometria. La realizzazione del modello della struttura è stata eseguita con il software Solidworks mentre le analisi agli elementi finiti (FEM) sono state svolte con Hypermesh. Gli studi condotti sulla singola cella elementare hanno evidenziato il comportamento auxetico della struttura. Le analisi FEM sono state condotte poi sulla struttura formata da più celle (4x4x6 celle) ed hanno mostrato come il comportamento auxetico sia molto più evidente sull'intera struttura che sulla singola cella. La struttura multi-cella presenta infatti delle caratteristiche auxetiche su tutti gli assi. Consolidata la metodologia di analisi, è stata progettata una struttura che rispettasse il Design for Additive Manufacturing e che possedesse delle caratteristiche auxetiche. Lo studio della struttura progettata si è concentrato sull'analisi di alcuni parametri geometrici e su come questi influiscono su spostamenti e sollecitazioni. Ottenuto il set di parametri geometrici ottimali, è stato studiato il comportamento della struttura multi-cella costituita da 5x5x5 celle.

## 1.1 ADDITIVE MANUFACTURING

Con il termine Additive Manufacturing (AM), si va ad indicare una categoria di tecnologie di produzione che consentono di produrre un componente aggiungendo materiale strato su strato. Tale tecnologia risulta dunque un'ottima alternativa a processi che prevedono asportazione di materiale (come avviene nell'asportazione di truciolo) e alla tradizionale colata. Il grande interesse, legato a nuove tecnologie di produzione nasce da differenti richieste, quali la personalizzazione dei prodotti e la necessità di produrre componenti di maggior complessità geometrica con la possibilità di risparmiare sullo scarto di lavorazione nel caso di materiali costosi. Diverse sono le tecniche utilizzate, come mostrato in Tab. 1 [2], ma tutte si basano sulla deposizione selettiva degli strati. I componenti prodotti con la tecnologia additiva possono inoltre presentare delle proprietà di anisotropia in alcune direzioni che possono essere regolate con un appropriato orientamento degli strati durante la produzione. In termini di materiali, possono inoltre essere utilizzati polimeri, metalli, ceramici e compositi, a seconda della struttura e dall'applicazione [3].





Tabella 1. a) Principi di elaborazione AM per materiali metallici; b) Principi di elaborazione AM per materiali per polimeri; c) Principi di elaborazione AM per materiali ceramici [4]

La prima applicazione di questa tipologia di fabbricazione fu la prototipazione rapida, ma oggi con il dilagare della tecnologia e con richieste sempre più specifiche e particolari, viene utilizzato in maniera sempre maggiore. L'industria come quella aerospaziale e dell'automotive, dove il bisogno di produrre componenti complessi con particolari proprietà, quali leggerezza e resistenza, ben si sposa con le qualità ottenibili con tale processo. Ad esempio, fattori decisivi nel settore spaziale sono la riduzione del peso (in tal modo si riduce anche il consumo di carburante da utilizzare) e la capacità di ottenere componenti che si comportano in modo ottimale anche in condizioni estreme come quelle nello spazio e durante le procedure di lancio. Pertanto, il componente non deve solo essere leggero ma anche estremamente rigido. Una tecnica chiave sfruttata all'interno del ciclo di progettazione di AM è l'ottimizzazione topologica, la quale identifica e rimuove le aree di materiale di una struttura senza inficiare la rigidità della parte e le sue capacità di carico. Tale tecnica permette di far convergere le caratteristiche essenziali del progetto in termini di volume, tecnologia produttiva, carichi, condizioni di funzionamento e obiettivi da raggiungere. Attraverso l'ottimizzazione topologica si riesce ad arrivare rapidamente a proposte e forme concettuali grossolane (pertanto richiedono un raffinamento) ma che permettono di ridurre le iterazioni progettuali fornendo preziose indicazioni al progettista. Un esempio (Fig.1) può essere rappresentato dalle staffe che collegano i riflettori al corpo dei satelliti che tramite tecnologia additiva sono state notevolmente modificate (inizialmente costituite da quattro parti e 44 rivetti, sostituite da un pezzo unico ottenuto mediante fusione laser) con una riduzione del peso del 35% e un aumento della rigidità del 40% [5].





Figura 1. Alleggerimento di una staffa per satellite di telecomunicazioni E3000 [5]

Un altro esempio è il lavoro ottenuto sugli ugelli dei motori per aerei (Fig.2) che ha permesso di ottenere una riduzione del consumo di carburante del 15% [6].



Figura 2. Esempio di ugello per aerei realizzato con tecnologia additiva [6]

Nel settore medico, grande successo viene riscontrato nell'ambito delle applicazioni ortodontiche, delle protesi e dei plantari, dove viene richiesto un alto grado di personalizzazione. L'additive manufacturing ha infatti come altri vantaggi quello di ridurre gli scarti, il lead time e la possibilità di poter generare componenti adatti anche a prestazioni particolarmente elevate. Diverse sono le tecniche utilizzate dalla tecnologia additiva e di seguito verranno illustrate le più diffuse. Particolare riguardo verrà posto sulla tecnologia Laser Powder Bed Fusion (L-PBF) e i suoi criteri di progettazione in quanto utilizzati all'interno di questo lavoro di tesi per la realizzazione di strutture con comportamento auxetico.

## 1.1.1 Material Extrusion

Anche chiamato Fused Deposition Modeling (FDM), il Material Extrusion, consiste nell'estrusione e nella successiva deposizione di un filamento fuso di materiale polimerico. Il principio di base è molto semplice e può essere paragonato a quello della pistola a caldo. Un filamento di materiale polimerico viene ammorbidito e riscaldato fino alla temperatura di rammollimento con l'aiuto del calore per poi essere estruso attraverso un ugello e depositato strato per strato sulla piattaforma. Il filamento depositato ha un diametro che varia tra i 1.75mm e 3mm e viene fornito da bobine mediante un motore passo-passo e attraverso una serie di ingranaggi e pulegge che "pizzicando il materiale" lo spingono nella testa dell'estrusore. La camera di quest'ultimo viene riscaldata mediante delle resistenze elettriche fino a raggiungere la viscosità desiderata. L'ugello a questo punto permette la fuoriuscita del materiale rammollito sulla piattaforma, motivo per cui lo spazio tra l'ugello e il letto corrisponde allo spessore dello strato costruito. La rugosità superficiale delle parti è profondamente influenzata dall'altezza dello strato deposto (layer), dalla forma, dalla curvatura e dall'orientamento della superficie. L'altezza del singolo layer è influenzata dalla velocità di deposizione e dal diametro dell'ugello. La macchina FDM è un sistema di controllo numerico computerizzato (CNC) che controlla i tre assi cartesiani in velocità e posizione attraverso la velocità di rotazione e le fasi dei motori passo-passo. Il prezzo delle macchine FDM parte da meno di 1.000 € per i kit di autoassemblaggio fino a oltre 200.000 € per un sistema industriale con un volume di lavoro di mezzo metro cubo. Lo schema rappresentativo è rappresentato in Fig.3.



Figura 3. Schema FDM [7]

Per quanto riguarda i materiali più utilizzati da queste macchine abbiamo [2]:

- ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) è il materiale termoplastico più comunemente usato, in particolare per la realizzazione di oggetti leggeri e rigidi quali componenti automobilistici, strumenti musicali e giocattoli. Si tratta di un materiale termoplastico amorfo che presenta un basso assorbimento di umidità. Si stampa ottimamente per iniezione, estrusione e termoformatura, si incolla e si salda bene e può essere avvitato con viti auto-maschianti. Presenta buona rigidezza e tenacità a basse temperature fino a -40 °C, elevata durezza, resistenza agli urti e alle scalfiture. Ha un ottima resistenza elettrica. E' utilizzabile termicamente da -45 a +85 °C, ci sono tipi speciali che possono operare anche a temperature più elevate. Per quanto riguarda l'ambiente resiste ad acqua, soluzioni saline acquose, acidi diluiti, soluzioni alcaline, idrocarburi saturi, benzina, oli minerali, grassi animali e vegetali, e presenta una sufficiente resistenza all'invecchiamento, mentre non resiste ad acidi minerali concentrati, idrocarburi aromatici e clorurati, eteri e chetoni
- PLA (Polylactic Acid ) termoplastico derivato da risorse rinnovabili come amido di mais, quindi biodegradabile e compostabile. Aderisce molto bene e velocemente dunque possiede una buona velocità di stampa. È più duro dell'ABS ma presenta un maggiore attrito che viene però compensato dalla bassa viscosità. È molto sensibile all'umidità e al calore dunque non è indicato per l'utilizzo in ambienti esterni, poiché quando viene riscaldato l'umidità assorbita può trasformarsi in bolle di vapore. Come l'ABS è disponibile in una vasta gamma di colori
- HIPS (High Impact PolyStyrene) è un filamento termoplastico a bassa deformazione. è un materiale termoplastico costituito da Polistirene e gomma Stirene-Butadiene (SBR). L'effetto dell'aggiunta dell'elastomero al polistirene comune, ne modifica le proprietà rendendolo più tenace e con un maggior allungamento a rottura. L'HIPS può allungarsi sino al 40% prima di rompersi, rendendolo resistente agli urti. L'aggiunta della gomma SBR avviene per miscelazione a caldo o per innesto, sciogliendo la gomma nello Stirene. È facile da incollare ed è uno dei materiali più leggeri. È disponibile in una vasta gamma di colori e viene spesso utilizzato per prototipi di pre-produzione. È molto simile all'ABS, tuttavia i due materiali funzionano con solventi diversi: limonene per HIPS e acetone per

ABS. Quindi HIPS può essere utilizzato come materiale di supporto a causa del limonene che non influisce sull'ABS.

- Il PC (policarbonato) è un polimero con elevata resistenza agli urti. Ha anche una buona resistenza alla temperatura. Tende a deformarsi significativamente più dell'ABS o del PLA, quindi è indispensabile l'uso di un letto riscaldato. Inoltre, è molto igroscopico e assorbe l'umidità dall'aria e ciò può causare problemi durante l'elaborazione. Il PC è disponibile in nero, bianco e colori chiari. La versatilità del policarbonato lo rendono un prodotto eccellente per la creazione di prodotti funzionali e al tempo stesso esteticamente piacevoli. Può essere facilmente utilizzato per prodotti che vanno dagli alloggiamenti degli specchietti delle auto alle cover dei telefoni cellulari fino ai contenitori per microonde, ma può essere anche perfettamente trasparente, il che lo rende la soluzione ideale per applicazioni quali vetrate e lucernari. Trasparenza, eccellente resistenza, stabilità termica e ottima stabilità dimensionale fanno del policarbonato (PC) uno dei materiali termoplastici tecnici maggiormente utilizzati. Compact disc, scudi antisommossa, vetrate antivandalo, biberon, componenti elettrici, caschi di protezione e lenti dei fari delle auto sono tutte applicazioni tipiche del PC. Il policarbonato resta uno dei materiali termoplastici tecnici più richiesti per le nuove applicazioni.
- PA (PolyAmmide) comunemente conosciuto come Nylon. Le stampe sono flessibili e resistenti all'usura. A differenza di ABS e PLA, il PA è meno fragile e quindi più forte, ha proprietà autolubrificanti, utili per la fabbricazione di ingranaggi o dadi per viti. Essendo un termoplastico semicristallino, si restringe più degli altri materiali quando si raffredda dopo la deposizione di ogni singolo strato. Per questo motivo, tende a deformarsi più dell'ABS e del PLA e l'adesione al letto è più problematica. Si consiglia l'uso di un letto riscaldato e di un volume dell'edificio riscaldato.
- II PVDF (fluoruro di polivinildene) è caratterizzato da un'eccellente resistenza al creep e alla fatica, alla radiazione e ai raggi UV, un'eccellente stabilità termica (in grado di lavorare tra –20°C e + 130°C) e un'alta costante dielettrica. Inoltre, grazie alla sua stabilità chimica, viene spesso utilizzato come isolante e protezione in applicazioni chimiche.
- PEEK (PolyEtherEtherKetone) è un termoplastico semicristallino ad alte prestazioni in grado di mostrare elevata resistenza e rigidità nonché elevata duttilità. Per questi motivi,

può sostituire alluminio e acciaio in applicazioni strutturali, offrendo un peso totale ridotto. Inoltre, essendo chimicamente resistente agli ambienti aggressivi, offre una maggiore durata e possibilità di sterilizzazione per applicazioni a contatto con alimenti.

## 1.1.2 Material Jetting

I componenti sono creati attraverso l'uso di testine di stampa a getto d'inchiostro che muovendosi spruzzano fotopolimero su una piattaforma di costruzione. Le goccioline vengono espulse mentre una o più testine di stampa si spostano nell'area di lavorazione [8]. Le principali caratteristiche di questa tipologia di produzione sono una elevata precisione nel posizionamento, bassi sprechi, piccole dimensioni delle goccioline e una più ampia disponibilità di materiale. Il materiale depositato viene polimerizzato utilizzando la luce UV (ultravioletta). Il modello viene prodotto strato per strato. Per facilitare il getto, i materiali devono essere riscaldati per passare dallo stato solido al liquido, cercando di ridurre la viscosità che altrimenti non consentirebbe il deflusso del getto. La velocità della testina di stampa, la frequenza e la velocità delle goccioline possono influenzare la qualità della deposizione. La fase di post processo è limitata a causa dell'alta precisione del processo. Lo schema del processo è riportato in Fig.4



Figura 4. Schema Material Jetting [2]

### 1.1.3 Fotopolimerizzazione vat

Il fotopolimero liquido è polimerizzato selettivamente mediante polimerizzazione attivata dalla luce. Il processo più comune è la stereolitografia (SLA. Il processo di base è la fotopolimerizzazione di una resina fotosensibile attraverso un laser a ultravioletti che la trasforma in un materiale solido. Successivamente la piattaforma viene abbassata nuovamente per la costruzione di un nuovo strato. Nella la fase di post-processo vi è la pulizia del componente in un bagno chimico e la parte prodotta viene posta in un forno UV fino a solidificazione, con conseguente restringimento [2]. Tale fase, genera delle sollecitazioni di compressione sugli strati precedenti, generando possibili distorsioni della parte che possono essere evitati tramite diversi modelli di scansione che consentono il raggiungimento del 98% di solidificazione con una minima distorsione. Il vantaggio principale del processo SLA è la sua capacità di fabbricare parti con ottima finitura superficiale e un alto livello di accuratezza. La rugosità superficiale media (Ra) è in genere inferiore a 10  $\mu$ m. Le diverse macchine SL hanno un volume di costruzione che può arrivare fino a 1500 × 750 × 550 mm<sup>3</sup>. Il processo SLA è relativamente veloce; tuttavia, spesso richiede strutture di supporto, che influiscono negativamente sulla qualità della superficie. Per superare i limiti delle proprietà meccaniche delle parti SLA, è possibile applicare un processo di metallizzazione alle superfici del componente, migliorando la resistenza e mantenendo un peso ridotto. Per la produzione di parti molto piccole e ad alta risoluzione è stata introdotta la microstereolitografia (MSL) [9]. La tecnologia SLA viene applicata in molti settori, incluso il settore aerospaziale, quello biomedico e chirurgico, per produrre componenti funzionali in modo rapido ed economico e la produzione di prototipi per la verifica della progettazione automobilistica.

### 1.1.4 Laser Powder Bed Fusion

La tecnologia Laser Powder Bed Fusion (L-PBF) è un processo di fusione a letto di polvere che utilizza un laser ad alta intensità come fonte di energia per fondere lo strato di polvere secondo i dati CAD. Insieme ad Electron Beam Melting (EBM) e Selective Laser Sintering (SLS) appartiene alle tecnologie di produzione basate sul letto di polvere. Il processo di costruzione inizia con la posa di un sottile strato di polvere di metallo su una piastra di substrato in una camera di costruzione. Dopo aver depositato la polvere, viene utilizzato un laser ad alta densità di energia per fondere le aree selezionate in base ai dati elaborati. Una volta completata la scansione laser, la piattaforma viene abbassata di una quantità pari allo spessore del layer, un successivo strato di polvere viene depositato sulla parte superiore e il laser esegue la scansione di un nuovo strato. Il processo viene quindi ripetuto fino al completamento dei componenti. A causa delle elevate temperature necessarie per la fusione, le parti vengono costruite in atmosfera di ossigeno controllata utilizzando un gas inerte come argon o azoto, per evitare l'innesco di incendi per reazione tra combustibile e comburente (metallo e ossigeno). Potenza del laser, velocità di scansione e spessore dello strato sono i parametri più comuni regolati per ottimizzare il processo. Questi parametri influenzano la densità di energia volumetrica disponibile per riscaldare e fondere le polveri, le proprietà meccaniche e la rugosità superficiale delle parti prodotte. Una combinazione di bassa potenza laser, alta velocità di scansione e grande spessore dello strato genera di solito un'energia insufficiente che spesso produce un fenomeno di rigonfiamento a causa della mancanza di bagnatura della parte fusa con lo strato precedente. Tale fenomeno, detto di balling [10] è dannoso per la qualità finale del componente. Per migliorare la qualità della superficie finale, vengono utilizzate varie tecniche di post-processo, tra cui sabbiatura, incisione, elettro-lucidatura e spruzzatura al plasma. Tuttavia, non è sempre possibile utilizzare queste tecniche su alcune parti complesse. Le leghe attualmente disponibili per questo processo includono acciaio inossidabile, cromo cobalto (leghe Co-Cr), leghe a base di Ni, alluminio (leghe Al-Si-Mg), titanio (lega Ti6Al4V), acciaio inossidabile. I componenti realizzati, vengono principalmente utilizzati nell'industria aeronautica e aerospaziale in cui le proprietà meccaniche e la saldabilità superiori sono le caratteristiche più importanti e nelle applicazioni di attrezzamento che richiedono una lavorabilità superiore [2]. La formazione dei difetti è un problema rappresentato principalmente da meccanismi, quali porosità e cricche. Questi difetti sono dannosi per la parte fabbricata in termini di proprietà meccaniche e fisiche, e di conseguenza limitano l'applicazione del processo L-PBF. Molti parametri sono coinvolti in un processo L-PBF, come potenza del laser, velocità di scansione, spessore dello strato, tipologia di materiale in polvere e ambiente della camera. I difetti vengono inevitabilmente introdotti se uno di questi parametri viene scelto in modo errato. Una porosità è di solito di piccole dimensioni, in genere inferiore a 100 μm con una forma approssimativamente sferica, come mostrato nella Fig. 5.



Figura 5. Porosità nate da processo L-PBF su lega di Ti6Al4V [11]

Se la densità di impaccamento delle polveri metalliche è bassa, il gas presente tra le particelle di polvere può dissolversi nella zona fusa e a causa dell'elevata velocità di raffreddamento durante il processo di solidificazione, non riesce più a fuoriuscire dalla superficie. Inoltre, la temperatura della pozza fusa è generalmente elevata a causa dell'intensa potenza del laser, dunque la solubilità del gas nel metallo liquido è elevata, facilitando il suo arricchimento. Ulteriori bolle di gas possono essere indotte a causa della vaporizzazione di componenti a basso punto di fusione all'interno di una lega. Tali porosità, generalmente sferiche, possono nascere in modo casuale in una parte fabbricata mediante L-PBF e risultano molto difficili da eliminare [11]. I buchi di fusione invece, noti anche come difetti di mancanza di fusione (lack of fusion, LOF), sono principalmente dovuti alla mancanza di energia immessa durante un processo L-PBF [11]. Un difetto LOF può contenere numerose polveri metalliche non fuse. Se l'energia del laser è bassa, l'entità della pozza fusa è ridotta e la sovrapposizione dei layer risulta poco efficace. Inoltre, in una posizione in cui sono stati generati questi difetti, la superficie diventa ruvida. I difetti interstrato possono gradualmente estendersi e propagarsi verso l'alto per formare grandi difetti multistrato in un processo di deposizione continua [12]. La velocità di raffreddamento della pozza fusa può raggiungere 108 K/s, il che crea un gradiente di temperatura elevato e di conseguenza un grande stress termico residuo nella parte fabbricata. L'alto gradiente di temperatura combinato con il grande stress residuo spesso causa l'inizio e la propagazione delle cricche in una parte fabbricata. Gli acciai inossidabili e le superleghe a base di nichel, a causa della loro bassa conduttività termica e dell'elevato coefficiente di espansione termica, sono più

vulnerabili alla generazione di cricche con elevata suscettibilità alla rottura in un processo L-PBF. Maggiore è l'apporto di energia, maggiore è la contrazione del metallo fuso nel processo di solidificazione con relativo stress residuo molto elevato [13]. A una velocità di scansione relativamente elevata e una bassa potenza laser, l'ingresso di energia è troppo basso per fondere completamente le polveri, generando una pozza fusa discontinua. In generale, la densità di energia E è ampiamente utilizzata per caratterizzare l'apporto energetico. l'equazione seguente fornisce tale definizione:

$$E\left(\frac{J}{mm^3}\right) = \frac{P}{v \times h \times t}$$

dove P è la potenza del laser (W); v è la velocità di scansione (mm/s); h rappresenta la hatch distance (mm); t è lo spessore dello strato (mm) [14]. La morfologia e le dimensioni delle polveri metalliche hanno un'influenza significativa sul processo di deposizione delle polveri. I difetti in un processo L-PBF causano la concentrazione dello stress nella parte fabbricata, che può portare al cedimento della parte, infatti quando lo stress supera il limite del materiale, può formarsi una cricca e propagarsi gradualmente. Attualmente, ci sono due principali strategie per sopprimere la formazione di difetti nei processi L-PBF, vale a dire il rilevamento online e la simulazione numerica, oltre alle differenti lavorazioni per ridurre o eliminare i difetti [11]. Lo schema tipico di una macchina per L-PBF è riportato in Fig.6.



Figura 6. Schema Selective Laser Melting [15]

### 1.1.5 Electron Beam Melting

Nel processo Electron Beam Melting (EBM), un fascio di elettroni ad alta potenza (circa 4 kW) viene utilizzato come fonte di alimentazione, a differenza di L-PBF dove viene utilizzato un fascio laser. I componenti prodotti mediante EBM generalmente presentano una rugosità superficiale maggiore rispetto a L-PBF (la rugosità superficiale di una parte EBM è circa 30-50  $\mu$ m in R<sub>a</sub>) [19]. Come avviene per L-PBF, la polvere può essere riciclata. Una delle differenze fondamentali tra i processi L-PBF ed EBM è che la camera EBM funziona in atmosfera sottovuoto (circa 1 × 10<sup>-5</sup> mbar), al fine di evitare che particelle di gas deflettano il fascio di elettroni riducendo così qualsiasi contaminazione. Risulta dunque particolarmente utile durante la lavorazione di materiali reattivi come leghe di titanio o leghe intermetalliche di titanio gamma. Altra differenza importante è che il fascio di elettroni, grazie alla sua elevata velocità di scansione, consente un preriscaldamento generale della polvere (a seconda del materiale trattato, anche fino a 1100 °C) prima della fusione, che permette di ridurre il gradiente termico e abbassare gli stress nel componente [20]. Ciò si traduce in un componente con minori stress, minore probabilità di formazione di cricche. Le principali applicazioni per componenti ottenuti tramite EBM riguardano il campo aerospaziale e quello biomedicale. Lo schema della tecnologia EBM è riportato in Fig.7. Sfrutta particolarmente materiali quali Ti6Al4V e CrCo.



Figura 7. Schema Electron Beam Melting [21]

## 1.2 VANTAGGI E SVANTAGGI DELLA FABBRICAZIONE ADDITIVA

Tipica applicazione dell'AM è la prototipazione rapida, la quale consente di ridurre i tempi di produzione dei prototipi rispetto ai metodi classici. La riduzione del time to market fornisce all'azienda non pochi vantaggi strategici nei confronti dei concorrenti. Altro beneficio può essere riscontrato nelle prestazioni superiori degli oggetti rispetto a quelle ottenibili con tecnologie sottrattive. È possibile dunque realizzare geometrie semplici e complesse, migliorare caratteristiche meccaniche dove richiesto e ridurre anche il peso finale. Risulta migliorata anche l'efficienza del processo di produzione e assemblaggio avendo modo di realizzare differenti pezzi in un unico processo di stampa. La sostenibilità ambientale, sempre più importante, è un altro importante vantaggio, riducendo il materiale di scarto, dal momento che tutto ciò che non viene lavorato, può essere riutilizzato. L'AM permette inoltre di poter raggiungere alti gradi di personalizzazione dei prodotti, in quanto generalmente le produzioni per piccoli lotti possono creare componenti molti diversi gli uni dagli altri. L'incidenza sui costi è molto rilevante non avendo necessità di scorte con relativi magazzini. La possibilità di produrre i componenti in qualsiasi luogo tramite un semplice file permette di abbattere anche i costi di trasporto. Di conseguenza, essendoci meno fasi all'interno del ciclo di produzione, risultano anche inferiori i costi legati al controllo e alla gestione di ogni singola fase. Sebbene i vantaggi siano molteplici, sono presenti anche delle criticità. La prima riguarda la produzione di massa, legata ai tempi di produzione non confrontabili con i tradizionali processi. Altro limite è da ritrovarsi nei materiali dato che la loro varietà è ridotta e. In aggiunta, la rugosità della superficie molto spesso implica una fase successiva di finitura. L'AM è sempre più diffusa, ma quello che davvero manca in molto settori è una conoscenza ben chiara della tecnologia: molti manager non riescono a valutare con chiarezza i vantaggi ottenibili da AM.

## 1.3 PROGETTAZIONE PER FUSIONE SELETTIVA LASER A LETTO DI POLVERE (L-PBF)

Il Design for Additive Manufacturing (DfAM) consiste in una serie di regole di progettazione di un componente per ridurre o minimizzare difficoltà e costi di produzione, avvantaggiandosi di tutte le possibilità di progettazione e ottimizzazione dei componenti in base alle funzioni e i requisiti del processo selezionato. Attraverso il DfAM è dunque possibile progettare in modo corretto nuove strutture o ripensare, ridisegnare e rifinire il componente esistente, per migliorarne la funzionalità. All'interno di questo capitolo verrà posta particolare attenzione riguardo i principali criteri di design di strutture realizzate per fabbricazione tramite L-PBF. È bene in primo luogo specificare che esistono caratteristiche fondamentali di una geometria, di un processo e di un materiale:

- Parametri di progettazione;
- Parametri della macchina;
- Parametri materiale.

La realizzabilità di un progetto tramite L-PBF, ma più in generale con tecnologia additiva, passa attraverso la verifica di vari fattori, quali complessità, funzionalità, presenza di supporti e metodologia di rimozione, strutture sottili, concentrazione di tensioni, tolleranze e distorsioni. Alcuni esempi vengono riportati in Tab.2.

#### **Design for Additive Manufacturing**



Tabella 2. Design for additive manufacturing [16]

Il progettista dunque deve saper utilizzare la propria creatività in modo da superare determinati limiti usando i punti di forza del processo. Fattori principali risultano:

- Orientamento di stampa;
- Dimensioni e forma del componente stampato;
- Stampa attraverso struttura a strati.

Il design deve infatti tener conto della costruzione degli strati durante il processo Particolare attenzione deve essere posta alla forma del componente e al suo orientamento all'interno della macchina. Un diverso orientamento del componente all'interno della macchina influenzerà la presenza o meno di supporti; è bene ricordare che questi ultimi dovranno essere rimossi tramite attrezzi adeguati che in alcuni casi possono inficiare il corretto utilizzo della struttura. Nel caso di questo lavoro di tesi è infatti importante precisare che le strutture presentate risultano essere prive di supporti interni in quanto l'ambito di applicazione e le ridotte dimensioni dei componenti pregiudicano la loro presenza. Come è possibile osservare in Fig.8 uno dei principali criteri da rispettare per la realizzazione di strutture autoportanti è l'angolo formato tra il piano xy.



Figura 8. Differenza tra struttura che necessita supporti (sinistra) e una autoportante

Test sperimentali hanno evidenziato che il minimo valore di tale angolo affinché la struttura non necessiti supporti sia 45° [17] anche se il suo valore può leggermente variare in relazione ai dettagli del processo e al materiale utilizzato. Utilizzare valori di angoli compresi tra 30° e 45° rende la struttura autoportante, ma allo stesso tempo va ad inficiare la rugosità superficiale come si nota in Fig.9 [18].



Figura 9. Problemi di rugosità superficiale con tecnologia L-PBF [18]

In numerosi casi, il problema prima citato può essere superato orientando opportunamente il componente all'interno della macchina, al fine di evitare supporti non necessari e rugosità elevate. Un esempio può essere osservato in Fig.9.



#### Figura 10. Esempio di diverse orientazioni di uno stesso componente. In rosso sono le zone in cui sono presenti supporti

Viene inoltre sempre consigliato di posizionare il componente con la parte più alta rivolta verso la posizione opposta al recoater blade; se si muove da destra verso sinistra è dunque consigliato posizionare la parte più alta verso sinistra. Notiamo come in Fig.11 è raffigurato in verde il recoater blade, in rosso i supporti, in giallo la configurazione non consigliata, in grigio quella consigliata.



Figura 11. Orientamento componente

Per quanto riguarda il PIN è importante sottolineare come il rapporto tra la base e l'altezza deve essere di 1 a 8, come visibile in Fig.12.



Figura 12. Rapporto base altezza per un PIN

È inoltre consigliato realizzare pareti con uno spessore maggiore di 1 mm in quanto, a secondo del materiale utilizzato potrebbero risultare eccessivamente fragili. In alcuni casi è necessario inserire alcune aperture per far fuoriuscire la polvere, come mostrato in Fig.13.





Figura 13. Aperture per fuoriuscita polvere

## 2. MATERIALI E STRUTTURE AUXETICHE

La caratteristica principale dei materiali e strutture auxetiche è quella di avere un coefficiente di Poisson Negativo (NPR), che li rende particolarmente interessanti in determinate applicazioni. Il valore del modulo di Poisson è dato dal rapporto cambiato di segno tra l'allungamento trasversale e quello longitudinale come mostrato dalla formula:  $v = -\frac{\xi_T}{\xi_L}$ . Per i materiali isotropi, (materiali che presentano le medesime caratteristiche meccaniche in tutte le direzioni) tale rapporto è compreso tra -1  $\leq v \leq 0.5$  nello spazio, tra -1  $\leq v \leq 1$  all'interno del piano. Il primo a suggerire che il modulo di Poisson potesse assumere anche valori negativi fu Saint Venant, basandosi sulla teoria dell'elasticità e sulle restrizioni termodinamiche imposte dalle leggi costitutive dei materiali Sebbene possano essere trovati in natura, possono essere prodotti anche in laboratorio e sintetizzati in forma di corde, tessuti o schiume anche se nel panorama industriale i più utilizzati sono i polimeri e i metalli, ognuno con le proprie caratteristiche. La possibilità di sintetizzare materiali polimerici al fine di ottenere determinate caratteristiche consente di usarli come sostituti più economici a materiali più costosi e meno versatili [22].

## 2.1 MATERIALI AUXETICI

Concettualmente, i materiali con NPR sono stati conosciuti nel 1944 e da quel momento il loro sviluppo e utilizzo è andato sempre crescendo. Materiali presenti in natura come il cadmio, la pirite di ferro, le ossa spugnose, la pelle dei gatti e quella del seno delle mucche furono identificati come potenziali auxetici. Grande attenzione fu riscontrata nel 1987 quando si scoprì che le schiume auxetiche potevano essere prodotte dalle convenzionali schiume open-cell [22]. Praticamente, i materiali auxetici durante una compressione tendono a contrarsi in tutte le altre direzioni e ad espandersi se sottoposti ad un carico di trazione, in contrapposizione al comportamento dei materiali convenzionali.



Figura 14. a) comportamento di un materiale convenzionale a trazione. b) comportamento di in materiale auxetico a trazione [23]

Esistono materiali auxetici naturali, sebbene vi siano evidenti difficoltà nel determinare le loro esatte proprietà elastiche allo stato naturale. Tra gli esempi di materiali auxetici naturali, possiamo ricordare anche l'osso spugnoso, oltre a quelli prima citati. Vi è un numero crescente di materiali naturali che sono stati scoperti con coefficiente di Poisson negativo; l'esistenza di un rapporto negativo di Poisson nelle piriti di ferro fu osservata per la prima volta nella prima parte del XX secolo, sebbene all'epoca questa fosse considerata un'anomalia poco conosciuta. Successivamente, è stato osservato un comportamento auxetico in altri materiali monocristallini presenti in natura come arsenico e cadmio. In particolare, alcuni studi condotti da Baughman hanno rivelato che il 69% dei materiali aventi reticolo cubico a facce centrate (metalli elementali e alcuni solidi gassosi), presentano caratteristiche auxetiche quando allungati lungo una specifica direzione fuori asse [24]. A partire dallo studio di materiali auxetici naturali, sono stati proposti modelli di strutture molecolari auxetiche più complesse. Altra categoria di materiali auxetici può essere ritrovata nei polimeri, progettati e fabbricati per avere una struttura macromolecolare o macroscopiche che causano un comportamento auxetico. Il loro utilizzo è da ritrovarsi principalmente in schiume, fibre e materiali compositi La microstruttura che caratterizza i polimeri microporosi auxetici è un semplice modello 2D che sostanzialmente consiste in una rete interconnessa di noduli e fibrille come visibile in Fig.15.



Figura 15 Tipica struttura di un materiale polimerico auxetico [25]

Se viene applicato un carico di trazione, le fibrille causano la traslazione del nodulo laterale, portando a un rapporto di Poisson negativo dipendente dalla deformazione. Un campo in rapido sviluppo riguarda la produzione di fibre polimeriche auxetiche con corpi allungati, aventi una lunghezza di almeno cento volte il diametro. Il materiale polimerico può essere integrato in qualsiasi altro materiale e svolgere il compito di riempitivo [22]. In tal modo è possibile produrre materiali filamentosi che possono essere usati come elementi di rinforzo in materiali compositi per conferire, al pezzo finito, proprietà di assorbimento di energia come nella produzione di indumenti protettivi. Un esempio di tale utilizzo è visibile in Fig. 16.



*Figura 16. Esempio di indumento protettivo realizzato con strutture auxetiche* [26]

Parametro importante per la produzione di polimeri auxetici è la temperatura; perché sia possibile il comportamento auxetico è necessario che la temperatura di fusione della fibra sia molto simile

a quella della polvere da cui deriva. Numerosi sono gli studi presenti in letteratura; tra questi vi è lo studio di un processo costituito da compattazione, sinterizzazione ed estrusione delle polveri al fine di produrre dei campioni auxetici di polietilene ad alto peso molecolare [22]. Se si omette lo stadio di compattazione, il prodotto è altamente fibrillare e molto auxetico ma ha proprietà meccaniche e densità basse. Allo stesso modo, lo stadio di estrusione può anche essere sostituito dalla compattazione seguita da una sinterizzazione multipla. Altre due interessanti caratteristiche sono state esaminate per questi materiali: la durezza e l'assorbimento degli ultrasuoni. Rientrano nella categoria di materiali auxetici anche composti ottenuti da metalli, ceramici e compositi. Esempi possono essere rappresentati dal rame che viene spesso utilizzato per produrre schiume auxetiche o dalle ceramiche utilizzate nella creazione di sensori e attuatori. Definita piezoelettricità la carica elettrica che si accumula in alcuni materiali solidi in risposta a stress meccanici applicati è possibile osservare come le prestazioni piezoelettriche e i potenziali benefici di un composito piezoelettrico dipendono dai cambiamenti dei componenti non polimerici, quindi dalle caratteristiche degli elementi ceramici e metallici [22]. I metalli invece sono in grado di assorbire molta energia e possono avere un'elevata capacità di smorzamento. Tali caratteristiche sono molto richieste negli ammortizzatori per urti e oscillazioni, e vengono in aiuto anche per i sostituti ossei e per la costruzione di impianti. Particolarmente utilizzati sono metalli quali l'alluminio, il silicio, il titanio e il nichel. L'alluminio è un metallo leggero ma molto resistente e presenta un peso specifico di circa un terzo dell'acciaio e del rame. Proprietà principali dell'alluminio sono una eccellente resistenza alla corrosione (il suo aspetto grigio argento è dovuto ad un sottile strato di ossidazione detto "film di passivazione") che si forma rapidamente quando è esposto all'aria e che previene la corrosione bloccando il passaggio dell'ossigeno verso l'alluminio sottostante), alta conducibilità termica ed elettrica, è paramagnetico, ha una eccellente malleabilità e duttilità, grazie alle quali può essere lavorato facilmente e risulta facilmente riciclabile [27]. Il titanio invece è un elemento metallico che è ben conosciuto per la sua resistenza alla corrosione e per il suo alto rapporto resistenza/peso. È leggero, duro e con una bassa densità. Allo stato puro è abbastanza duttile, lucido, di colore bianco metallico. Questo metallo forma una patina di ossido passivo se esposto all'aria a temperatura ambiente, ma quando si trova in un'atmosfera libero da ossigeno è molto duttile. Il titanio, che brucia se riscaldato nell'aria, è anche l'unico elemento che brucia in atmosfera di azoto, reagendo anche con idrogeno e alogeni [28].

## 2.2 STRUTTURE AUXETICHE

Le strutture auxetiche vengono scoperte nel 1800 ma solo alla fine del 1900 uno scienziato di nome Ken Evans gli attribuì il nome di "auxetici" dal greco auxetikos "che tende ad espandersi" [29]. La necessità di adottare delle strutture che posseggano caratteristiche auxetiche nasce dal bisogno di poter utilizzare anche materiali che non siano auxetici per ottenere strutture con modulo di Poisson negativo.



Figura 17. Esempi di strutture auxetiche in 2D [22]

Tra le caratteristiche più importanti delle strutture auxetiche si ricordano:

- Elevata resistenza a compressione
- Elevata rigidità
- Capacità di far fluire materiale verso la zona di impatto quando soggette a compressione

- Capacità di assorbire e dissipare alte quantità di energia
- Capacità di formare superfici a curvatura sinclastica quando flesse
- Possibilità di variare la porosità quando compresse/stirate

Proprio grazie alle loro particolari caratteristiche meccaniche, trovano grande applicazione nel settore ingegneristico, in quello biomedico, aerospaziale, tessile, automobilistico e in qualche caso di design del prodotto. Sebbene però ci siano numerosi vantaggi nell'utilizzo di queste particolari strutture, la loro diffusione fatica a diffondersi in quanto ha bisogno di essere supportata da una consistente attività di ricerca atta a definire gli usi e i processi ottimali per la loro industrializzazione. L'attenzione per le strutture auxetiche ha riscosso sempre più successo negli ultimi anni, motivo per cui molti studi e ricerche si sono soffermati sulla loro analisi. Le tipologie più importanti risultano [22]:

- Strutture rientranti;
- Strutture chirali;
- Strutture ottenute da rotazioni di unità rigide/semi-rigide;
- Laminati angle-ply;

dove per laminati angle ply si definiscono particolari tipologie di laminati in cui si ha una sola orientazione possibile, come mostrato in Fig.18



Figura 18. Esempi di struttura interna per laminati angle ply [30]

La suddetta classificazione ha lo scopo di fornire utili dettagli e caratteristiche, al fine di poter comprendere e capire quali proprietà possono essere raggiunte e ottimizzate. Le strutture rientranti sono la categoria più conosciuta in quanto mostra chiaramente un comportamento non convenzionale. Più in generale si tratta di strutture realizzate in un piano e successivamente estruse al fine di ottenere una maglia che abbia caratteristiche auxetiche. La più famosa e studiata è sicuramente quella rientrante riportata in Fig. 19, che presenta degli angoli concavi. Teoricamente l'allineamento dei montanti disposti diagonalmente lungo la direzione verticale, permette di farli allontanare quando il reticolo è soggetto a tensione ottenendo un comportamento auxetico. Il comportamento auxetico può anche essere raggiunto con altre strutture rientranti come quelle con testa a doppia freccia e a stelle come in Fig. 17d, 17e, 17f. Definito "n" come ordine di simmetria, un corpo presenterà una simmetria di rotazione di ordine n intorno ad una retta (detta asse di simmetria rotazionale) se una rotazione di ampiezza 360°/n attorno a tale retta trasforma il corpo in sé stesso. Un esempio è il cubo che presenta sei simmetrie rotazionali di ordine 2 intorno ad ognuna delle rette che congiungono i punti medi di due spigoli opposti. Le strutture a stella possono avere simmetria di rotazione di ordine 3, 4 e 6 collegando le frecce tra di loro, in modo che i loro bracci formino delle stelle.





*Figura 19. Esempio di struttura rientrante* [31]

Altre strutture rientranti proposte possono essere considerate quella a maglie esagonali rientrante come in Fig. 17c per migliorare le proprietà nel piano e quelle in Fig. 17h e Fig. 17i formate da losanghe e quadrati dove l'effetto auxetico è ottenuto dalla rotazione ed estensione dei lati della singola cella. Da notare che la struttura a maglie quadrate esibisce un comportamento auxetico migliore di quella a maglia romboidale se sottoposte alla stessa sollecitazione. La struttura presente in Fig. 17g è costituita invece da lineamenti sinusoidali dove il NPR viene ottenuto rendendo le celle quasi rettangolari. Lo svantaggio che questa tipologia di struttura è la difficoltà di realizzazione su scala commerciale, perché la comune tecnica di "incollare" filamenti

di materiale a intervalli regolari tra loro, per poi estruderli, non può essere utilizzata per le strutture rientranti.



Figura 20. Differenti tipologie di strutture cellulari: a) struttura esagonale, b) esagonale modificata, c) a spirale [32]

Esistono inoltre, tante e differenti tipologie di schiume caratterizzate da differenti processi di produzione e materiali aventi questa struttura. Particolare attenzione a riguardo si ebbe dagli inizi del 1900 quando furono introdotti nuovi metodi di conversione di schiume con coefficiente di Poisson positivo in schiume con caratteristiche auxetiche. In particolar modo, le prime ad essere convertite in auxetiche furono le schiume microcellulari e le closed cell. Ad esempio, confrontando la struttura del poliuretano prima e dopo la conversione in struttura auxetica, si nota che la seconda ha una struttura rientrante più complessa se comparata con quella iniziale del materiale [33].



Figura 21. Confronto tra struttura di poliuretano auxetica e convenzionale [33]

Le schiume auxetiche mostrano inoltre una curvatura sinclastica, una resilienza migliorata, un miglior controllo delle vibrazioni e una migliore resistenza di indentazione e al taglio. Inoltre, il loro utilizzo sempre più frequente anche in campi come quello magnetico o elettrico ha portato ad una modifica della loro rigidezza, osservando effetti di magnetostrizione. Le strutture chirali rappresentano un'altra soluzione al fine di ottenere comportamento auxetico. In questo tipo di strutture le unità chirali di base sono formate in primo luogo collegando i legamenti diritti (nervature) ai nodi centrali che possono essere cerchi o rettangoli o altre forme geometriche. Le strutture chirali (Fig. 22b) intere vengono quindi formate unendo le unità chirali elementari (Fig. 22a).



Figura 22. a) unità chirale; b) struttura chirale 2D [34]

Normalmente queste strutture vengono chiamate chirali se tutti i nodi ruotano nella stessa direzione, anti-chirali se ciò non avviene. Gli effetti auxetici si ottengono avvolgendo o srotolando i legamenti intorno i nodi in risposta a una forza applicata. Contrariamente alla maggior parte delle altre strutture auxetiche, questa struttura può mantenere un elevato effetto auxetico per una vasta gamma di deformazioni. Sulla base di questa struttura, una nuova classe di strutture denominata "meta-chirale" è stata recentemente sviluppata, all'interno delle quali le stesse unità chirali (chiamate anche blocchi chirali) possono essere collegate tra loro per formare strutture chirali diverse (il nodo in ogni blocco chirale può essere ad esempio un rettangolo). È evidente che gli effetti auxetici dipendono dalla forma del nodo e dalla lunghezza dei legamenti attaccati [34]. Il comportamento auxetico di questa tipologia di struttura nasce dalla giunzione di quadrati e triangoli rigidi/semi-rigidi come mostrato in Fig.23.



#### Figura 23. Unità rigide rotanti [35]

I vertici possono essere incernierati o collegati da molle. Gli effetti auxetici provengono dalla rotazione di triangoli, quadrati, rettangoli e tetraedri quando caricati. È stato riscontrato che il coefficiente di Poisson per queste strutture è una proprietà indipendente dalla scala, ovvero il meccanismo di deformazione può operare su qualsiasi scala, dal nano livello (livello molecolare) ad una macroscala. In alcuni casi, la presenza del comportamento auxetico, in sistemi molto diversi, è stata spiegata utilizzando lo stesso meccanismo di deformazione. Il modello delle unità rigide rotanti è stato utilizzato per spiegare il comportamento auxetico di materiali quali schiume polimeriche, silicati e zeoliti. Per semplici strutture o meccanismi di deformazione, l'entità del rapporto di Poisson può essere facilmente identificata da un'analisi visiva di varie conformazioni della struttura, tuttavia, quando la geometria è più complessa, l'entità del rapporto di Poisson non può più essere facilmente determinata da una semplice analisi visiva. Inoltre, si può dimostrare che per queste strutture più generali, i rapporti di Poisson non sono costanti ma dipendono dalla direzione di carico (cioè, la struttura è anisotropa). Questo problema può essere risolto derivando equazioni analitiche per i rapporti di Poisson in termini di parametri geometrici della struttura. In questo modo si può calcolare il rapporto di Poisson nel piano in qualsiasi direzione [36].
# **3.FASE SPERIMENTALE**

La fase sperimentale di questo lavoro di tesi è stata suddivisa in due parti: nella prima si è svolto uno studio ai fini della validazione di una metodologia di analisi, mentre nella seconda si è progettata un struttura auxetica che rispettasse i criteri DfAM e fosse realizzabile con tecnologia L-PBF. Nella prima parte è stata studiata una struttura già presente in letteratura[1], realizzata con tecnologia L-PBF in acciaio inossidabile. Le analisi condotte su tale struttura hanno portato ad una convergenza dei risultati ottenuti con quelli presenti all'interno dell'articolo di riferimento. Nella seconda parte della fase sperimentale si è studiato come alcuni parametri geometrici influiscono su spostamenti e sollecitazioni della struttura progettata. Ottenuto il set di parametri geometrici ottimali, è stato studiato il comportamento della struttura multi-cella costituita da 5x5x5 celle.

# 3.1 MODELLO DOBLE-U

Dopo avere analizzato le strutture auxetiche presenti in letteratura prodotte con tecnologia L-PBF, si è deciso di prendere come riferimento la "double-U hierarchical structures, DUHs" [1] la cui struttura è rappresentata in Fig. 24. Il nome doble-U deriva infatti dalla caratteristica forma a doppia U degli elementi costituenti la cella.



Figura 24. Cella auxetica double-U hierarchical structures, DUHs [1]



Figura 25. a) Schema in 2D dell'elemento costituente la cella con relative quote [1]

## 3.1.1 Realizzazione modello CAD

La realizzazione della cella presentata in Fig.24 è avvenuta utilizzando il software Solidworks 2019 Student Edition partendo dallo schema presente in Fig.25.



Figura 26. a) schizzo in 2D realizzato con il software Solidworks b) successiva estrusione e realizzazione dell'elemento 3D

Partendo da uno schizzo in 2D, realizzato utilizzando la funzione spline, tramite le funzioni di Offset e di estrusione con spessore di 1 mm, si è ottenuto l'elemento finale, alla base della cella con comportamento auxetico presa in esame. È importante sottolineare che la struttura è stata progettata per essere prodotta tramite L-PBF, utilizzando come materiale un acciaio inossidabile che presenti le seguenti caratteristiche meccaniche [1]:

- E = 200 GPa
- ν = 0,3
- $\rho = 8000 \frac{Kg}{m^3}$
- *G* = 76,92 *GPa*
- $\sigma_{rottura} = 500 MPa$
- $\sigma_{snervamento} = 200 MPa$

Per quanto riguarda la realizzazione della struttura, partendo dal singolo elemento in Fig. 26, tramite la funzione di "Estrusione con offset" (come mostrato in Fig.42) si è ottenuta la cella auxetica. In tal modo, è stato possibile connettere tra loro tutti gli elementi, ottenendo un unico solido.



Figura 27. Utilizzo della funzione "estrusione con Offset"

## 3.1.2 Problematiche e modifica della geometria

Utilizzando le quote descritte in [1], si sono riscontrate alcune problematiche riguardanti principalmente compenetrazioni di materiale e discontinuità, come quelle presentate in Fig. 28, Fig. 29, Fig. 30.



Figura 28. Primo posizionamento con offset possibile





Figura 29. Secondo posizionamento con offset possibile



Figura 30. Terzo posizionamento asse di Ripetizione

Come si nota da Fig.28, Fig.29 e Fig.30, si osserva che in nessuna delle configurazioni si ottiene un risultato accettabile. Si è ipotizzato allora che la struttura potesse aver subito delle modifiche non specificate, motivo per cui sono state apportate delle correzioni alla geometria che permettessero di ottenere un buon risultato. Le modifiche apportate risultano visibili in Fig. 31.



Figura 31. Modifiche apportate alla struttura

Si può osservare come la lunghezza iniziale *I* pari inizialmente a 10 mm (visibile in Fig. 25) in seguito alle modifiche risulta essere pari ad 11,50 mm. Tale variazione di quota è imputabile ad un prolungamento effettuato sia nella parte centrale che all'estremità della struttura. Applicando tali correzioni, si può notare come vengono ad essere soppressi i problemi relativi a discontinuità e compenetrazioni prima evidenziati. Tale modifica è da tenere in conto nel momento in cui verranno confrontanti i risultati ottenuti in questo lavoro di tesi, con quelli già presenti in letteratura. La struttura così ottenuta può essere osservata in Fig. 32.





Risolti i problemi sulla singola cella, è stato possibile realizzare l'intera struttura, composta da N<sub>x</sub> x N<sub>z</sub> x N<sub>y</sub> = 4 x 4 x 6 celle tramite la funzione di ripetizione presente all'interno del software.





Figura 33. Struttura formata da 4x4x6 celle elementari

È importate ora osservare come, a causa delle modifiche effettuate, le due strutture differiscono per la quota in direzione X e Z rispetto al paper di riferimento.





Figura 34.a) Quote della struttura modificata. b) Quote struttura di riferimento [1]

#### 3.1.3 Analisi agli elementi finiti

Il metodo degli elementi finiti (FEM, dall'inglese Finite Element Method) è una tecnica numerica atta a cercare soluzioni approssimate di problemi descritti da equazioni differenziali alle derivate parziali riducendo queste ultime a un sistema di equazioni algebriche [37]. Tale metodologia di analisi, viene spesso utilizzata per componenti dalla forma complessa (telai e motori di auto e aerei), quando sono presenti condizioni al contorno variabili e quando c'è bisogno di una maggior precisioni dei risultati solo in una parte del dominio. L'analisi FEM. presente in [1], è stata eseguita modellando la struttura tramite degli elementi di tipo Esaedro (C3D8), importando direttamente dal modello CAD realizzato con Solidworks. La grandezza massima degli elementi della mesh è stata scelta pari a 0.33 mm ottenendo un ottimo compromesso tra tempo di calcolo e precisione dei risultati. La piastra superiore per la simulazione della prova di compressione è stata ottenuta utilizzando elementi rigidi sul quale è applicata una determinata forza. I gradi di libertà della piastra inferiore vengono invece completamenti bloccati. Le simulazioni agli elementi finiti in questo lavoro di tesi sono state ottenute invece con l'ausilio del software Hypermesh Student Edition 2019.1. La prima parte delle simulazioni, è stata dedicata alla ricerca di condizioni che permettessero di riprodurre i risultati presenti in letteratura, in modo da ottenere un modello per l'applicazione di forze e vincoli applicabili anche ai modelli successivi. Partendo dall'import della geometria precedentemente realizzata, si è creato un modello su cui effettuare le simulazioni. Allo scopo di ottenere dei risultati simili a quelli presenti in [1] si sono effettuate simulazioni sia con mesh tetraedrica e successivamente con mesh esaedrica con facce quadrilatere e infine confrontate. Generalmente gli elementi tetraedrici presentano il vantaggio di adattarsi a qualunque tipo di forma e richiedere una bassa potenza di calcolo, ma al contempo presentano dei risultati che possono essere leggermente sottostimati, se comparati con quelli ottenuti con mesh esaedrica.

### 3.1.4 Analisi cella elementare con mesh tetraedrica

Il primo modello utilizzato per le simulazioni è stato con elementi tetraedrici (tetra4).



#### Figura 35. Mesh tetraedrica

Importato il modello CAD precedentemente realizzato, la mesh con elementi tetraedrici è stata creata tramite il comando "Tetra mesh", impostando un *element size* 0.33, valore utilizzato anche all'interno del paper di riferimento [1]. Tale valore permette infatti di ottenere un buon compromesso tra tempo computazionale e precisione dei risultati. Dopo aver eseguito una ottimizzazione della mesh tramite la funzione *solid mesh optimization*, il passaggio successivo è stato l'inserimento delle proprietà relative al materiale elencate precedentemente nel paragrafo 4.1.1. La prova da riprodurre con le simulazioni è un test di compressione, motivo per cui l'ultimo passaggio che precede il lancio dell'analisi lineare è stata la creazione delle modalità di carico e vincolo. La parte inferiore della cella è stata vincolata tramite dei carrelli che consentissero lo spostamento lungo i piani X e Z ed impedissero la traslazione lungo Y, in modo da poter simulare la piastra inferiore per una prova di compressione senza attrito, mentre la parte superiore è stata ottenuta con dei link rigidi sui quali applicare il carico come in Fig. 36. Tale soluzione non è indicata nell'articolo di riferimento[1] ma è stata ipotizzata al fine di ottenere dei risultati quanto più vicini possibili a quelli già presenti in letteratura.



Figura 36. Modalità di vincolo e carico

A tal proposito sono state effettuate delle simulazioni al fine di osservare come vengono influenzati i risultati al variare della quota Y del nodo su cui è applicata la forza. Di seguito vengono riportati i risultati delle simulazioni con un carico applicato di 12000 N.

## 3.1.5 Analisi cella elementare con mesh esaedrica

Il secondo set di simulazioni è stato realizzato con l'ausilio di una mesh costituita da esaedri con facce regolari. Come detto nel paragrafo precedente, utilizzare una tipologia di elemento non tetraedrico ha maggiori complicazioni per la realizzazione di mesh in geometrie curve e complesse. A tal proposito infatti, sono state effettuate delle operazioni preliminari che hanno facilitato la realizzazione della mesh. In primo luogo, la geometria è stata suddivisa in sotto elementi come mostrato in Fig.37 Tale operazione ha consentito di creare elementi che fossero quanto più vicini

ad esaedri regolari e che dunque rendessero minima la probabilità di generare una mesh costituita da unità deformate. Tramite la funzione *Edit Geometry* è infatti possibile lo split della geometria in superfici e volumi più piccoli, tali da rendere più precisa la realizzazione della mesh.



Figura 37. Split geometria di base per mesh tetraedrica

Il passo successivo, come avvenuto per la mesh tetraedrica, è la realizzazione della mesh e l'inserimento delle proprietà del materiale, le quali risultano invariate. Le modalità di vincolo e carico risultano le stesse del caso precedente. In Fig.38 è possibile osservare il risultato delle operazioni prima descritte.





Figura 38. Mesh esaedrica

Avendo effettuato un'operazione preliminare di suddivisione della struttura in sotto elementi, è stato necessario utilizzare la funzione *merge*, la quale permette di "unire" i nodi coincidenti di due sotto elementi differenti come è visibile in Fig.39.



Figura 39. Merge nodi

Il modello è ora pronto per le simulazioni.

## 3.1.6 Calcolo del coefficiente di Poisson per cella elementare

Noti gli spostamenti è possibile a questo punto calcolare il coefficiente di Poisson. A tal proposito in Fig.40 viene riportato uno schema che illustra i punti considerati per il calcolo di tale coefficiente.



Figura 40. Punti significativi per il calcolo del coefficiente di Poisson

Definiamo dunque:

$$\varepsilon_x = \frac{u_x^A}{l_{xo}^A}$$
$$\varepsilon_y = \frac{u_y^A}{l_{yo}^A}$$
$$\varepsilon_z = \frac{u_z^A}{l_{zo}^A}$$

Dove:

- $u_x^A$ ,  $u_y^A$ ,  $u_z^A$  rispettivamente gli spostamenti del punto A lungo asse x, y e z
- $I_{x0}^{A}$ ,  $I_{y0}^{A}$ ,  $I_{z0}^{A}$  rispettivamente le quote iniziali del punto A rispetto agli asse x, y e z

Analogamente viene fatto per i punti B<sub>i</sub>. Le quote dei punti A<sub>i</sub> e B<sub>i</sub> possono essere calcolate con l'ausilio di Solidworks e conoscendo il lato di ogni singolo elemento (uguale all'element size). Le distanze  $I_{x0}^{A}$ ,  $I_{y0}^{A}$ ,  $I_{z0}^{A}$  sono state misurate dal punto centrale della cella. Uno spostamento positivo per convenzione tende a far allontanare il punto scelto dal centro della cella, mentre uno negativo lo fa avvicinare. Conoscendo gli spostamenti e le quote iniziali di ogni punto scelto, è stato possibile calcolare le deformazioni e di conseguenza il coefficiente di Poisson.

#### 3.1.7 Analisi struttura totale

Il passaggio successivo è stato quello di riprodurre la prova di compressione sull'intera struttura. Importato il modello CAD precedentemente realizzato, è stata realizzata una mesh esaedrica con element size pari a 0.33 mm. Le simulazioni svolte con elementi esaedrici hanno presentato una difficoltà aggiuntiva dovuta alla maggior complicazione nel realizzare la mesh. Dopo aver importato la geometria, è stato infatti necessario suddividere l'intera geometria in sottocomponenti tali da rendere la distorsione degli elementi della mesh quanto minore possibile. Alcuni esempi vengono evidenziati con delle linee rosse in Fig. 41 e Fig.42. È stata dunque prima realizzata una mesh in 2D sulla superficie, poi estrusa per ottenerla in 3D.



Figura 41. Divisione in sotto elementi per il miglioramento della mesh



#### Figura 42. Mesh Esaedrica

Per le prove di compressione sono state create due piastre direttamente all'interno dell'ambiente di simulazione di spessore 35 mm. Per tali piastre si è adottata una mesh esaedrica molto grossolana, con element size di 5 mm. Il passo successivo, è stata la creazione del contatto tra le piastre e la struttura.



Figura 43. Differenze tra mesh della piastra (zona superiore) e della struttura (zona inferiore)

Il primo passo per ottenere contatto tra i corpi è stata la creazione delle superfici di contatto tramite il comando *Contactsurf*; gli elementi selezionati con tale modalità attiva vengono riconosciuti come possibili zone di contatto. Un esempio viene riportato in Fig. 44.



Figura 44. Superficie di contatto tra piastra e struttura

È possibile a questo punto accoppiare le due superfici per creare il contatto tra corpi, tramite il comando *interfaces* presente all'interno del pannello *analysis*. Al fine di consentire la traslazione orizzontale all'interfaccia tra i due corpi (come per i carrelli nel capitolo 3.1.4) il tipo di contatto viene impostato su *slide* e non su *freeze* che al contrario tende a creare un incastro. Come visibile in Fig.45 il contatto è ora garantito.



#### Figura 45. Contatto piastra struttura

La piastra inferiore viene completamente bloccata mentre il carico viene applicato sulla piastra superiore. Per ognuna delle due configurazioni di carico sono state realizzati due layout:

- 1. Materiale della piastra uguale a quello della struttura
- 2. Materiale della piastra con modulo E maggiore di tre ordini di grandezza rispetto alla struttura



Figura 46. a) piastra e struttura di materiale diverso. b) piastre con modulo E molto elevato rispetto alla struttura

Per un riscontro più preciso, sono stati confrontati i risultati delle simulazioni presenti all'interno dell'articolo di riferimento [1] con quelli ottenuti. In particolar modo, sono state effettuate due prove di compressione (Fig.47) dovute alla simmetria della struttura:

- 1) Applicazione carico lungo asse Y e rilevamento spostamento su asse X
- 2) Applicazione carico lungo asse X e rilevamento spostamento su asse Z e Y





Sono state effettuate dunque quattro prove di compressione:

	MATERIALI PIASTRA E STRUTTURA	DIREZIONE CARICO
LAYOUT 1	IDENTICI	Y
LAYOUT 2	DIFFERENTI	Y
LAYOUT 3	IDENTICI	Х
LAYOUT 4	DIFFERENTI	Х

Tabella 3. Materiali utilizzati per layout Prove di compressione

## 3.1.8 Calcolo coefficiente di Poisson per multi-cella



Figura 47. Punti C e D scelti per il calcolo del coefficiente di Poisson

Come per la singola cella, vengono scelti 4 punti nella zona indicata con C e 4 nella zona D come mostrato in Fig.47. Tali punti sono situati sulla faccia laterale della struttura, compresi tra la mezzeria e gli estremi esterni. In questo modo si riesce ad ottenere un valore medio del coefficiente di Poisson. Analogo ragionamento è svolto per la zona D.



Figura 48 Particolare di punti scelti per il calcolo del coefficiente di Poisson

Il ragionamento svolto è analogo a quello visto nel Cap.3.1.6

# 3.2 PROGETTAZIONE STRUTTURA AUXETICA

In questa seconda parte della tesi sperimentale è stata affrontata la progettazione di una struttura con comportamento auxetico adatta ad essere realizzata con tecnologia L-PBF. L'insieme di regole seguite per la corretta realizzazione di una struttura con tecnologia L-PBF sono riportate nel Cap. 1.3. La dimensione 20x20x20 mm è stata scelta tenendo conto del volume di lavoro della macchina per L-PBF e del numero di celle da inserire all'interno della struttura finale (10X10X10). Importante sottolineare come tale struttura è priva di supporti, in quanto molto piccola e da destinare ad un ambito aerospaziale. Rimuovere supporti per celle così piccole è molto complesso e rovina la rugosità superficiale. Lo schema della cella elementare ideata viene presentata in Fig.49.



Figura 49. Schema della struttura progettata

I parametri *a, s, r* rappresentano le variabili utilizzate per lo studio della cella. La realizzazione del modello CAD è avvenuta tramite il software Solidworks 2019, utilizzando gli stessi procedimenti del Cap. 3.1.1. La cella elementare progettata è mostrata in Fig.50



Figura 50. Cella elementare progettata. a) vista frontale b) vista dall'alto

Come si nota in Fig.51 tramite la funzione di "taglio estruso" è stato realizzato un angolo  $\alpha$  di 5° che permette alla struttura di comprimersi verso il centro della cella quando sopposta a carichi e amplificarne il comportamento auxetico.



Figura 51. Angolo  $\alpha$ 

Lo studio eseguito sulla cella è diretto ad osservare come variano gli spostamenti massimi e le relative sollecitazioni, al variare dei parametri *a*, *s*, *r* visti in Fig.49. Il valore di *s* (spessore) tende

ad essere maggiore di 1 mm come spiegato all'interno del Cap. 1.3. Di seguito viene riportata una tabella con i valori di *s, a*, ed *r* scelti per le analisi.

s (mm)	a (mm)	r (mm)
1	2.12	0
1.5	3	0.3
2	4	0.5
	5	1

Tabella 4. Valori di **s, a, r** 

Le simulazioni sono state realizzate con la seguente metodologia:

- 1. Studio il comportamento al variare di r, fissati i parametri s ed a
- 2. Scelto *r*, studio il comportamento al variare di *s*, con *a* fissato
- 3. Scelto *s*, studio il comportamento al variare di *a*

Utilizzando questa metodologia sono state effettuate diverse simulazioni al variare del set di parametri scelti. Realizzati i modelli CAD delle strutture con i differenti parametri è stato possibile importarli all'interno del software Hypermesh ed effettuare l'analisi FEM. Per le analisi è stata utilizzata una mesh tetraedrica (tetra4), con element size massimo di 0.3 per la cella e di 3 per le piastre. I passaggi seguiti per la realizzazione della mesh, della piastra superiore ed inferiore, le modalità di carico e vincolo sono identiche a quelle adottate nel Cap. 3.1.4. In Fig. 52 viene illustrato il layout utilizzato per le simulazioni.



Figura 52. Layout utilizzato per analisi FEM

## 3.2.1 Parametri geometrici

In questo capitolo è stato studiato come tendono a modificarsi spostamenti, forze e sollecitazioni variando il parametro *r*. In Fig.53 viene mostrato l'effetto del parametro *r* sulla geometria con *a* 5 mm e *s* 1 mm



Figura 53. a) struttura con "r" 0 mm; b) struttura con "r" 0.3 mm; c) struttura con "r" 0.5 mm; d) struttura con "r" 1mm

E' presentata per semplicità l'analisi effettuata per la struttura con *s* 1 mm ed *a* 5 mm. I layout confrontati saranno allora quattro:

NOME layout	s [mm]	a [mm]	r [mm]
R1	1	5	0
R2	1	5	0.3
R3	1	5	0.5
R4	1	5	1

Tabella 5. Layout con differenti valori di r

Le modalità di carico e vincolo risultano essere identiche per tutte i layout. Il valore massimo di raccordo è stato posto pari ad 1mm in modo da non ottenere delle superfici quasi piane. Èstato poi analizzato come gli spostamenti e le tensioni reagiscono ad una variazione di spessore (parametro *s*). In Fig.54 viene mostrato l'effetto della variazione di spessore per una struttura con *a* 5 mm e *r* 1 mm



Figura 54. a) struttura con "s" 1 mm; b) struttura con "s" 1.5 mm; c) struttura con "s" 2 mm



Figura 55. a) mesh per struttura con s 1mm; b) mesh per struttura con s 1.5mm; c) mesh per struttura con s 2 mm

#### In Fig.56 viene mostrato l'effetto del parametro **a**, per una struttura con **r** 1mm e **s** 1 mm



Figura 56.a) parametro a 2,12 mm; b) parametro a 3 mm; c) parametro a 4 mm; d) parametro a 5 mm

Tale parametro, permette di regolare la massima corsa percorribile durante la compressione dei bracci laterali. In Tab.6 vengono presentati i layout delle simulazioni.

NOME LAYOUT	s [mm]	a [mm]	r [mm]
A1	1	2,12	0.5
A2	1	3	0.5
A3	1	4	0.5
A4	1	5	0.5

Tabella 6. Layout simulazioni con variabile a

# 3.2.2 Calcolo coefficiente di Poisson

Per la cella così progettata è stato calcolato il coefficiente di Poisson. I punti presi in considerazione per tale analisi sono riportati in Fig.57. Essendo i due punti considerati simmetrici rispetto l'asse verticale, ci si aspetta una simmetria anche nei risultati ottenuti.



Figura 57. Punti per il calcolo del coefficiente di Poisson

### 3.2.3 Struttura totale

Nel seguente paragrafo verrà studiato il comportamento della struttura finale, composta dall'insieme di più celle elementari. Il modello finale prevederebbe un numero di celle N<sub>x</sub> x N<sub>y</sub> x N<sub>z</sub> 10x10x10 tale da poter occupare interamente il volume di lavoro della macchina per L-PB. Anche in questo caso le modalità di carico, vincolo, generazione mesh e contatto tra piastre e struttura sono identiche a quelle del Cap. 3.1.4. Causa emergenza sanitaria, non è stato possibile analizzare una struttura con numero di celle 10x10x10 non avendo a disposizione elaboratori che sorreggessero il peso di tale simulazione; motivo per cui è stata studiata una struttura 5x5x5 come in Fig. 58. La mesh utilizzata è di tipo tetraedrico con element size pari a 0.3 mm per la struttura e 3 per le piastre



Figura 58. Struttura costituita da 5x5x5 celle elementari

Su questa tipologia di struttura sono state condotte prove atte a verificare le sollecitazioni in gioco e le forze e spostamenti associati a tali sollecitazioni.

# 4. RISULTATI

Nel seguente capitolo sono stati presentati i risultati ottenuti in seguito alle simulazioni impostate nel Cap.3.1 e Cap. 3.2

# 4.1 MODELLO DOUBLE-U

All'interno di questa prima sezione del capitolo risultati sono stati presentati i risultati relativi alla struttura Double-U [1]

## 4.1.1 Variazione quota del punto di applicazione del carico

Nell'ipotesi di punto di applicazione rialzato rispetto alla superficie superiore della cella come in Fig.37c, si nota come i valori degli spostamenti siano leggermente inferiori, ma molto simili a quelli ottenuti con la configurazione mostrata in Fig.59a e Fig.59b. Risulta interessante notare come siano presenti sia dei valori positivi che negativi di spostamento. Ciò è visibile nelle immagini di Fig.60.





Figura 59. a) punto di applicazione del carico allineato con la superficie superiore. b) punto di applicazione del carico rialzato di 0.5mm rispetto alla superficie superiore. c) punto di applicazione del carico rialzato di 4.5mm rispetto alla superficie superiore



Figura 60. a) configurazione indeformata b) configurazione deformata

Come risultato di riferimento è stato selezionato quello presente in Fig.59a), il quale riesce meglio a simulare l'effetto di una piastra superiore durante una prova di compressione.

### 4.1.2 Confronto tra mesh esaedrica e tetraedrica

In Fig.61 sono presentati i risultati ottenuti con un carico di 12000 N per la mesh esaedrica.



Figura 61. Risultati simulazioni mesh esaedrica con carico di 12.000 N

Anche in questo caso, come visto precedentemente, risultano essere presenti dei valori di spostamento sia positivi che negativi. Effettuando un rapido confronto tra le simulazioni eseguite con mesh differenti si può osservare come gli spostamenti ottenuti con mesh tetraedrica risultano leggermente inferiori a quelli ricavati dalla mesh esaedrica come visibile in Fig.62.



Figura 62. Confronto tra la simulazione con mesh tetraedrica (Fig.a) e mesh esaedrica (Fig.b)

Le simulazioni effettuate con mesh tetraedrica, forniscono degli spostamenti mediamente inferiori. Tale risultato è auspicabile in quanto l'elemento tetraedrico permette di meshare qualsiasi tipo di solido ottenendo un minor sforzo computazionale, ma fornendo dei risultati che molto spesso non sono precisi e che spesso risultano sottostimare l'entità del problema.

#### 4.1.3 Calcolo Coefficiente di Poisson per cella elementare

Per la cella elementare analizzata, il coefficiente di poisson passa attraverso il calcolo degli spostamenti e delle sollecitazioni. Nella Tab.7 vengono riportate le lunghezze iniziali e gli spostamenti dei punti considerati

	L <sub>x0</sub> (mm)	L <sub>y0</sub> (mm)	L <sub>z0</sub> (mm)	u <sub>x</sub> (mm)	u <sub>y</sub> (mm)	u₂(mm)
A1	0.17	2.84	11.5	0.000322	0.07229	0.06264
A2	0.17	2.84	11.5	0.0004538	0.0723	0.062464
A3	0.17	3.17	11.5	-0.0001279	0.07218	0.07806
A4	0.17	3.17	11.5	-0.00000696	0.07219	0.07805
B1	0.17	9.16	11.5	-0.002633	-0.5723	-0.00759
B2	0.17	9.16	11.5	-0.0009781	-0.5723	0.07611
B3	0.17	8.83	11.5	-0.0004255	-0.5763	-0.01574
B4	0.17	8.83	11.5	0.00124	-0.5763	-0.01577

Tabella 7 Misurazione spostamenti per calcolo del coefficiente di Poisson

È possibile dunque calcolare le deformazioni e di conseguenza il coefficiente di Poisson (il primo pedice indica la direzione in cui è calcolato, il secondo la direzione di applicazione del carico).

	ξx	ξ <sub>y</sub>	ξz	V <sub>xy</sub>	V <sub>zy</sub>
A1	0.001894	0.025454	0.005447	-0.07441	-0.2511372
A2	0.0000400	0.0108461	0.0027235	-0.0036854	-0.2511024
A3	-0.0000113	0.0113974	0.0033939	0.0009902	-0.2977785
A4	0.0000614	0.0113990	0.0033939	-0.0053892	-0.2977372
B1	-0.0000232	0.0306699	-0.0003300	0.0007575	0.0107597
B2	-0.0000863	0.0343517	-0.0003309	0.0025124	0.0096331
B3	-0.0000375	0.0312220	-0.0006843	0.0012025	0.0219187
B4	0.0000109	0.0312220	-0.0006857	-0.0003504	0.0219605

Tabella 8. Calcolo delle deformazioni e del coefficiente di Poisson

Eseguendo una media sui valori così trovati possiamo ricavare che:

- $v_{xy} = -0.0008$
- $v_{zy} = -0.1292$

#### 4.1.4 Struttura multi-cella

Per ognuno dei layout proposti si è misurato lo spostamento della struttura all'interfaccia con la piastra superiore (Sy) tramite la funzione di **plot** e confrontato con quello presente in letteratura.

CARICO [N]	Sy LAYOUT 1 [mm]	Sy LAYOUT 2 [mm]	Sy PAPER [mm]
8000	0.121	0.124	0.4
1200	0.182	0.187	0.6

I risultati ottenuti si discostano da quelli presenti in letteratura (possibile motivazione potrebbe essere la modifica alla geometria presentata nel capitolo 3.1.2) ma è importante notare come tutte le simulazioni fatte abbiano restituito delle deformazioni simmetriche. Tali risultati, evidenti in Fig. 63, ben ci fanno intuire il comportamento auxetico della struttura, che tende a comprimersi verso l'interno quando sottoposta ad un carico di compressione e ad avere un comportamento opposto se sottoposta a trazione.







In Fig.64 e Fig.65 è invece presenta la struttura deformata.



Figura 64. Struttura deformata sotto carico di compressione lungo asse Y



Figura 65. Struttura deformata sotto carico di compressione lungo asse X

È risultato interessante osservare il comportamento del coefficiente di Poisson ed analizzare come varia in confronto alla singola cella.

# 4.1.5 Calcolo coefficiente di Poisson per struttura multi-cella

PUNTO	L <sub>x0</sub> (mm)	L <sub>y0</sub> (mm)	L <sub>z0</sub> (mm)	u <sub>x</sub> (mm)	u <sub>y</sub> (mm)	u₂(mm)
C1	33.17	3.16	44.5	-0.1403	-0.06165	-0.1701
C2	32.84	3.16	44.5	-0.1405	-0.06074	-0.17
C3	33.17	2.83	44.5	-0.1413	-0.06163	-0.1692
C4	32.84	2.83	44.5	-0.1412	-0.06073	-0.1691
D1	33.17	3.16	44.5	-0.1411	-0.06161	-0.1697
D2	32.84	3.16	44.5	-0.1413	-0.06071	-0.1695
D3	33.17	2.83	44.5	-0.1421	-0.06159	-0.1688
D4	32.84	2.83	44.5	-0.142	-0.06069	-0.1686

Di seguito vengono riportati i risultati relativi alle analisi impostate nel Cap.3.1.8

Tabella 9. Misurazione spostamenti per calcolo del coefficiente di Poisson

PUNTO	ξ <sub>xy</sub>	ξ <sub>γγ</sub>	ξ <sub>zy</sub>	V <sub>xy</sub>	V <sub>zy</sub>
C1	-0.00423	-0.01951	-0.00382	-0.2168	-0.19593
C2	-0.00428	-0.01922	-0.00382	-0.22258	-0.19875
С3	-0.00426	-0.02178	-0.0038	-0.19561	-0.1746
C4	-0.0043	-0.02146	-0.0038	-0.20036	-0.17708
D1	-0.00425	-0.0195	-0.00381	-0.21818	-0.19559
D2	-0.0043	-0.01921	-0.00381	-0.22396	-0.19826
D3	-0.00428	-0.02176	-0.00379	-0.19685	-0.1743
D4	-0.00432	-0.02145	-0.00379	-0.20163	-0.17667

Tabella 10. Calcolo delle deformazioni e del coefficiente di Poisson

Il calcolo del coefficiente di Poisson è stato possibile conoscendo le quote iniziali dei punti selezionati, rispetto al centro della cella.

Eseguendo una media sui valori così trovati possiamo ricavare che:

- $v_{xy} = -0.2095$
- $v_{zy} = -0.1864$

Si osserva come il comportamento auxetico della struttura multi-cella risulti molto più marcato su tutti gli assi rispetto a quello della cella elementare.

# 4.2 STRUTTURA PROGETTATA

All'interno di questa seconda sezione del capitolo risultati sono stati presentati i risultati relativi alla struttura auxetica progettata

## 4.2.1 Effetto dei parametri geometrici

Nel presente capitolo vengono discussi i risultati ottenuti dalle configurazioni descritte nel capitolo 3.2.1. In Tab.11 vengono indicati i valori ottenuti per le differenti configurazioni

Layout	R1	R2	R3	R4
Corsa orizzontale max al contatto [mm]	3.648	3.749	4.076	4.267
Spostamento verticale max al contatto [mm]	6.131	6.249	6.730	6.537
Carico max al contatto [N]	22100	20100	22900	25000
σ con carico massimo [MPa]	93838	80359	70165	60221

Tabella 11. Spostamenti, forze e sollecitazioni con differenti valori di r
Viene inoltre presentato un confronto dei risultati a parità di carico applicato

Layout	R1	R2	R3	R4
Carico [N]	1000	1000	1000	1000
Spostamento verticale [mm]	0.2689	0.3109	0.2939	0.2668
Spostamento orizzontale [mm]	0.163	0.1865	0.1778	0.1619
σ [MPa]	4208	3998	3064	2458

Tabella 12. Spostamenti, forze e sollecitazioni con carico di 1000 N

Come atteso, si nota che aumentando il valore di *r*, gli spostamenti a parità di forza risultano più piccoli, tranne che per la configurazione R1, che però non presenta alcun raccordo. Il valore più alto degli sforzi è presente nelle zone di raccordo come si nota in Fig.66. Aumentando il raggio di raccordo, gli sforzi tendono ad essere sempre minori



Figura 66. Concentrazione degli sforzi

Dalla Tab.12 si evince come la struttura che presenta degli sforzi minori a parità di carico è quella di configurazione R4, che presenta delle sollecitazioni molto inferiori con spostamenti che risultano dello stesso ordine di grandezza delle altre configurazioni. Il valore di *r* è allora fissato a

1 mm. Nella seguente Tab. 13 vengono riportati i valori degli spostamenti massimi per ogni valore di s scelto, ovvero quelli rilevati al momento in cui avviene il contatto dei bracci come illustrato in Fig. 67.



Figura 67. Contatto tra le superfici

Spessore [mm]	1	1,5	2
Corsa orizzontale max al contatto [mm]	4.2665	3.3275	2.64
Spostamento verticale max al contatto [mm]	6.5366	5.7325	4.774
Carico max al contatto [N]	25000	93000	220000
σ con carico massimo [MPa]	60221	85928	99880

Tabella 13. Spostamenti, carichi e tensioni al contatto

Come si evince dai dati ottenuti, all'aumentare del parametro s, il carico necessario affinché avvenga il contatto aumenta, anche se gli spostamenti risultano essere inferiori. Ciò è dovuto al fatto che la corsa disponibile nel caso di spessore maggiore risulta ridotta. Aumentando lo spessore, abbiamo però delle sollecitazioni massime maggiori, dovute alla capacità della struttura di poter sorreggere carichi più alti. La capacità del corpo di poter sorreggere carichi maggiori è una caratteristica positiva, ma prima di validare il modello, le tensioni devono essere comparate con quelle ammissibili dal materiale (Cap 3.1.1). A tal proposito è stato introdotto un coefficiente di sicurezza pari a 1,5 che va a ridurre gli sforzi massimi sopportabili dalla struttura. Si ottiene:

Acciaio inossidabile SS316L	
σ rottura [MPa]	500
σ rottura corretta [MPa]	$\frac{500}{1.5} = 333$
σ snervamento[MPa]	200
σ snervamento corretta[MPa]	$\frac{200}{1.5} = 133$

Tabella 14. Sollecitazioni che portano a rottura e snervamento per Acciaio inossidabile SS316L

Confrontando i valori di Tab.14 con quelli di Tab.13, si nota come questi siano nettamente inferiori, motivo per cui le strutture non riescono a raggiungere il contatto senza cedere. Ciò significa che spostamenti, sollecitazioni e forze sostenibili dalle strutture risultano inferiori a quelle presenti in Tab.13. Avendo osservato che la struttura con spessore maggiore risulta sovradimensionata per le sollecitazioni in gioco, si è osservato il comportamento della struttura con spessore pari ad 1 mm. La tab. 15 mostra gli spostamenti e le forze necessarie a raggiungere determinati valori di sollecitazioni.

Valori da raggiungere	Forza necessaria (N)	Spostamento orizzontale(mm)	Spostamento verticale (mm)
σ rottura [500MPa]	203	0.03304	0.05447
σ rottura corretta[333 MPa]	135	0.02188	0.03609
σ snervamento [200 MPa]	81	0.01308	0.02158
σ snervamento corretta [133 MPa]	57	0.00923	0.01521

Tabella 15. Spostamenti e forze corrispondenti ai carichi di rottura e snervamento

A questo punto risultano definiti due delle tre variabili che ottimizzano l'uso della struttura, compatibilmente con le caratteristiche meccaniche del materiale utilizzato, ovvero *s* 1mm e *r* 1 mm. La Tab.16 riassume le forze, gli spostamenti e le sollecitazioni che si ottengono al momento del contatto.

Layout	A1	A2	A3	A4
Spostamento orizzontale max al contatto [mm]	1.381	4.16	5.389	6.701
Spostamento verticale max al contatto [mm]	0.695	2.18	3.019	4.058
Carico max al contatto [N]	1650	6500	12500	22800
σ con carico massimo [MPa]	5202	20020	33338	69859

Tabella 16. Spostamenti e forze corrispondenti ai carichi di rottura e snervamento

Dalla Tab. 16 si osserva come la configurazione A1, permetta degli spostamenti nettamente minori rispetto alle altre ma presenta allo stesso tempo degli sforzi minori. Si nota come gli sforzi presenti nella configurazione di contatto superino quelli ammissibili dal materiale, per cui la struttura cederebbe prima di raggiungere i valori di Tab.16. È interessante notare come variando il layout si hanno differenti comportamenti di contatto. Per la struttura A4, il contatto avviene tra i bracci laterali, che a causa della forza vengono compressi verso l'interno della cella come da Fig. 68.



Figura 68. Contatto con layout A4

Nel caso di Layout A1, la corsa risulta essere inferiore, motivo per cui il contatto avviene tra i bracci orizzontali e quelli verticali come mostrato in Fig.69.



#### Figura 69. Contatto con layout A1

Dalle analisi prima fatte, si è concluso che utilizzare celle con valori di **a** maggiori di 2,12 sarebbe poco utile, in quanto solo una piccolissima parte della corsa totale andrebbe ad essere utilizzata. Motivo per cui la cella definitiva è quella rappresentata dal layout A1. I valori della cella elementare scelti vengono riassunti nella Tab.17.

s (mm)	r (mm)	a (mm)		
1	1	2.12		
Tabella 17 Darametri colla elementare coelta				

Tabella 17. Parametri cella elementare scelta

# 4.2.2 Calcolo coefficiente di Poisson

Il calcolo del coefficiente di Poisson per la struttura progettata ha portato ai risultati presenti in Tab. 18 e Tab. 19

PUNTO	L <sub>x0</sub> (mm)	L <sub>y0</sub> (mm)	L <sub>z0</sub> (mm)	u <sub>x</sub> (mm)	u <sub>v</sub> (mm)	u₂(mm)
P2	6.44	4.69	10	-0.3499	-1.241	-0.2234
P3	6.44	4.69	10	-0.3555	-1.243	-0.2194

Tabella 18. Misurazione spostamenti per calcolo del coefficiente di Poisson

PUNTO	ξ <sub>xy</sub>	ξ <sub>νν</sub>	ξ <sub>zy</sub>	V <sub>xy</sub>	V <sub>zy</sub>
P2	-0.05433	-0.26461	-0.02234	-0.20533	-0.08443
P3	-0.0552	-0.26503	-0.02194	-0.20828	-0.08278

Tabella 19. Calcolo delle deformazioni e del coefficiente di Poisson

Eseguendo una media sui valori così trovati possiamo ricavare che:

- $v_{xy} = -0.20680$
- $v_{zy} = -0.8360$

Inoltre, da Tab. 19 risulta evidente come i risultati ottenuti sui punti P2 e P3 siano pressoché identici come atteso.

### 4.2.3 Struttura multi-cella

La prova di compressione che porta al contatto dei bracci laterali ha mostrato il comportamento visibile in Fig.70-71-72.



Figura 71. Spostamento su asse Y al contatto





In Fig. 73, Fig.74, Fig.75 vengono mostrate invece le sollecitazioni presenti all'interno della struttura al contatto.



Figura 73. Sollecitazioni al contatto



Figura 74. particolare delle sollecitazioni presenti



Figura 75. particolare delle sollecitazioni presenti

I valori vengono riassunti nella Tab. 20.

Spostamento orizzontale max al contatto [mm]	0.88
Spostamento verticale max al contatto [mm]	7.36
Carico max al contatto [N]	68000
σ con carico massimo [MPa]	11390

Tabella 20. Valori di spostamenti, sollecitazione e forza al contatto per struttura totale.

Tali valori di sollecitazione risultano eccessivamente elevati per il materiale scelto, motivo per cui la struttura cederebbe prima che si verifichi il contatto tra i bracci. Gli spostamenti massimi raggiungibili dovuti alle sollecitazioni massime sono riportati in Tab.21

Valori da raggiungere	Forza	Spostamento	Spostamento
	necessaria (N)	orizzontale(mm)	verticale (mm)
σ rottura [500MPa]	3000	0.0369	0.3261
σ rottura corretta[333 MPa]	1970	0.0253	0.2145
σ snervamento [200 MPa]	1200	0.0152	0.1302
σ snervamento corretta [133 MPa]	800	0,01	0,0867

Tabella 21. Valori di spostamenti, sollecitazione e forza con condizioni limite.

Confrontando i valori presenti in Tab.20 e Tab.21 si osserva come la struttura realizzata utilizza circa un decimo delle sue potenzialità massime a causa degli eccessivi stress che si instaurano. Sono dunque le sollecitazioni a definire la massima corsa che la struttura può compiere.

# 5. CONCLUSIONI

In questo lavoro di tesi è stato inizialmente presentato lo studio di una struttura già presente in letteratura [1] con comportamento auxetico e realizzabile con tecnologia L-PBF. Tale struttura è stata riprodotta prima in ambiente CAD e successivamente analizzata in ambiente FEM fino ad ottenere la convergenza dei risultati con quelli presenti all'interno dell'articolo di riferimento. Tale operazione è risultata fondamentale al fine di poter proseguire le analisi e applicare la metodologia studiata alla nuova struttura successivamente progetta. Dai risultati delle analisi agli elementi finiti si è riusciti ad ottenere il comportamento auxetico della struttura multi-cella che ha presentato un coefficiente di Poisson negativo sui punti di riferimento considerati. Si è passati poi alla progettazione di una struttura che presentasse caratteristiche auxetiche e che fosse realizzabile mediante tecnologia Laser Powder Bed Fusion (L-PBF). Al fine di progettare correttamente tale struttura sono stati seguiti i criteri del Design for Additive Manufacturing per la produzione mediante L-PBF. Le analisi condotte sulla struttura progettata hanno messo in evidenza come la modifica di determinati parametri di riferimento della geometria stessa (a, s e r) influenzino ampiamente gli spostamenti, le sollecitazioni e i carichi massimi. Evidenziato un set di parametri ottimali, si è realizzata la struttura della cella elementare, il cui comportamento auxetico è stato confermato dal calcolo del coefficiente di Poisson, in punti prestabiliti, ottenendo valori negativi. Gli studi condotti hanno messo in evidenza come le sollecitazioni massime non permettono alla struttura di ricoprire l'intera corsa disponibile. Il carico massimo sopportabile dalla struttura viene infatti definito tenendo conto delle sollecitazioni massime che si instaurano nel componente. Il lavoro di tesi presentato ha dunque evidenziato come la realizzazione di strutture auxetiche tramite l'utilizzo della tecnologia additiva L-PBF sia possibile effettuando un'attenta progettazione basata sulle regole del DfAM. I risultati e i modelli ottenuti in tale lavoro possono essere utilizzati come supporto per la realizzazione di nuove strutture o presi come punto di partenza per la modifica e l'ottimizzazione del materiale e della geometria iniziale al fine da poterne incrementare le potenzialità.

# Bibliografia

- H. Yang, B. Wang, and L. Ma, "Mechanical properties of 3D double-U auxetic structures," Int. J. Solids Struct., 2019, doi: 10.1016/j.ijsolstr.2019.07.007.
- [2] F. Calignano *et al.*, "Overview on additive manufacturing technologies," *Proc. IEEE*, 2017, doi: 10.1109/JPROC.2016.2625098.
- [3] N. Guo and M. C. Leu, "Additive manufacturing: Technology, applications and research needs," *Frontiers of Mechanical Engineering*. 2013, doi: 10.1007/s11465-013-0248-8.
- ISO/ASTM, "INTERNATIONAL STANDARD ISO / ASTM 52900 Additive manufacturing General principles — Terminology," *Int. Organ. Stand.*, vol. 5, pp. 1–26, 2015, doi: 10.1520/ISOASTM52900-15.
- [5] Airbus, "Airbus Defence and Space Optimising Components Using 3D Printing for New Eurostar E3000 Satellite Platforms," *Airbus Defence Press Office*, 2015.
- [6] GE ADDITIVE, "New manufacturing milestone: 30,000 additive fuel nozzles," October 04,
  2018. https://www.ge.com/additive/stories/new-manufacturing-milestone-30000-additivefuel-nozzles.
- [7] ARTIGLIO-ITALIA, "FDM Fused Deposition Modelling." https://www.artiglioitalia.it/website/news.aspx?id=529.
- [8] Wohlers Associates Inc., "Wohler's report 2015 3D printing and additive manufacturing state of the industry. Annual Worldwide Progress Report.," Wohlers Rep. 2012, 2015.
- [9] A. Bertsch and P. Renaud, "Chapter 1.2 Microstereolithography A2 Baldacchini, Tommaso BT - Three-Dimensional Microfabrication Using Two-photon Polymerization," in *Micro and Nano Technologies*, 2016.
- [10] D. Gu and Y. Shen, "Balling phenomena in direct laser sintering of stainless steel powder: Metallurgical mechanisms and control methods," *Mater. Des.*, 2009, doi: 10.1016/j.matdes.2009.01.013.
- B. Zhang, Y. Li, and Q. Bai, "Defect Formation Mechanisms in Selective Laser Melting: A Review," Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition). 2017, doi:

10.1007/s10033-017-0121-5.

- [12] X. Zhou *et al.*, "3D-imaging of selective laser melting defects in a Co-Cr-Mo alloy by synchrotron radiation micro-CT," *Acta Mater.*, 2015, doi: 10.1016/j.actamat.2015.07.014.
- [13] D. Gu *et al.*, "Densification behavior, microstructure evolution, and wear performance of selective laser melting processed commercially pure titanium," *Acta Mater.*, 2012, doi: 10.1016/j.actamat.2012.04.006.
- [14] H. Gong, K. Rafi, H. Gu, T. Starr, and B. Stucker, "Analysis of defect generation in Ti-6Al-4V parts made using powder bed fusion additive manufacturing processes," *Addit. Manuf.*, 2014, doi: 10.1016/j.addma.2014.08.002.
- [15] WIKIPEDIA, "Selective laser melting." https://en.wikipedia.org/wiki/Selective\_laser\_melting.
- [16] F. Valente, "Tecnologie Additive , un opportunità da cogliere," 2018.
- [17] A. T. Gaynor and J. K. Guest, "Topology optimization considering overhang constraints:
  Eliminating sacrificial support material in additive manufacturing through design," *Struct. Multidiscip. Optim.*, 2016, doi: 10.1007/s00158-016-1551-x.
- J. Xiong, D. Gu, H. Chen, D. Dai, and Q. Shi, "Structural optimization of re-entrant negative Poisson's ratio structure fabricated by selective laser melting," *Mater. Des.*, 2017, doi: 10.1016/j.matdes.2017.02.022.
- [19] J. K. Algardh *et al.*, "Thickness dependency of mechanical properties for thin-walled titanium parts manufactured by Electron Beam Melting (EBM) <sup>®</sup>," *Addit. Manuf.*, 2016, doi: 10.1016/j.addma.2016.06.009.
- [20] J. Wang and H. Tang, "Review on metals additively manufactured by SEBM," Materials Technology. 2016, doi: 10.1179/1753555715Y.0000000081.
- [21] G. Mandil, V. T. Le, H. Paris, and M. Suard, "Building new entities from existing titanium part by electron beam melting: microstructures and mechanical properties," Int. J. Adv. Manuf. Technol., 2016, doi: 10.1007/s00170-015-8049-3.
- [22] L. Mirante, "Auxetic Structures: toward bending-active architectural applications," 2015.
- [23] M. Wagner, T. Chen, and K. Shea, "Large shape transforming 4D auxetic structures," 3D

Print. Addit. Manuf., 2017, doi: 10.1089/3dp.2017.0027.

- [24] R. H. Baughman, J. M. Shacklette, A. A. Zakhidov, and S. Stafström, "Negative poisson's ratios as a common feature of cubic metals," *Nature*, 1998, doi: 10.1038/32842.
- [25] "Auxetic polymers." https://campus.minesdouai.fr/pluginfile.php/19033/mod\_resource/content/0/CH1\_en\_mai\_2013/co/ch2\_5\_3\_e n.html.
- [26] M. Chua, "The future of motorcycle helmet may be adaptive like madillo," 2019. https://mikeshouts.com/madillo-adaptive-motorcycle-helmet/.
- [27] "Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry," *Choice Rev. Online*, 2012, doi: 10.5860/choice.50-1224.
- [28] M. R. Zierden and A. M. Valentine, "Contemplating a role for titanium in organisms," *Metallomics*. 2016, doi: 10.1039/c5mt00231a.
- [29] K. E. Evans, "Auxetic polymers: a new range of materials," *Endeavour*, 1991, doi: 10.1016/0160-9327(91)90123-S.
- [30] L. Wan, D. Yang, Y. Ismail, and Y. Sheng, "3D particle models for composite laminates with anisotropic elasticity," *Compos. Part B Eng.*, 2018, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.05.022.
- [31] L. Yang, O. Harrysson, H. West, and D. Cormier, "Mechanical properties of 3D re-entrant honeycomb auxetic structures realized via additive manufacturing," *Int. J. Solids Struct.*, 2015, doi: 10.1016/j.ijsolstr.2015.05.005.
- [32] M. Kucewicz, P. Baranowski, J. Małachowski, A. Popławski, and P. Płatek, "Modelling, and characterization of 3D printed cellular structures," *Mater. Des.*, 2018, doi: 10.1016/j.matdes.2018.01.028.
- [33] L. Foster, P. Peketi, T. Allen, T. Senior, O. Duncan, and A. Alderson, "Application of auxetic foam in sports helmets," *Appl. Sci.*, 2018, doi: 10.3390/app8030354.
- [34] A. Spadoni and M. Ruzzene, "Elasto-static micropolar behavior of a chiral auxetic lattice," J. Mech. Phys. Solids, 2012, doi: 10.1016/j.jmps.2011.09.012.
- [35] J. Dagdelen, J. Montoya, M. De Jong, and K. Persson, "Computational prediction of new

auxetic materials," Nat. Commun., 2017, doi: 10.1038/s41467-017-00399-6.

- [36] J. N. Grima, V. Zammit, R. Gatt, A. Alderson, and K. E. Evans, "Auxetic behaviour from rotating semi-rigid units," 2007, doi: 10.1002/pssb.200572706.
- [37] Wikipedia, "metodo agli elementi finiti." https://it.wikipedia.org/wiki/Metodo\_degli\_elementi\_finiti.