



**UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE**

**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

---

Corso di Laurea triennale in ingegneria meccanica

**Progettazione di metamateriali a bassa densità  
macroscopicamente isotropi**

**Design of low-density macroscopically isotropic  
metamaterials**

Relatore:

Prof. Marco Sasso

*Correlatore:*

*Dott. Mattia Utzeri*

Tesi di Laurea di:

Matteo Montemurro

A.A. 2021/2022

Alla mia famiglia, fonte di ispirazione ed esempio di vita

# I. Sommario

<b>1. Additive Manufacturing</b> .....	8
<b>1.1 Cenni storici</b> .....	9
<b>1.2 Fasi della produzione per AM</b> .....	10
<b>1.2.1 Definizione del modello matematico della parte e file STL</b> .....	10
<b>1.2.2 Generazione dei supporti</b> .....	10
<b>1.2.3 Slicing</b> .....	10
<b>1.2.4 Setup della macchina</b> .....	10
<b>1.2.5 Fase di stampa 3D</b> .....	11
<b>1.2.6 Post-Produzione</b> .....	11
<b>1.3 Materiali per AM</b> .....	12
<b>1.3.1 Polimeri</b> .....	12
<b>1.3.2 Metalli</b> .....	14
<b>1.3.3 Compositi</b> .....	14
<b>1.3.4 Ceramiche</b> .....	14
<b>1.4 Metodi di produzione per AM</b> .....	15
<b>1.4.1 Material Extrusion</b> .....	15
<b>1.4.2 Vat Photopolymerization</b> .....	16
<b>1.4.3 Powder Bed Fusion</b> .....	19
<b>1.4.4 Polyjet Printing</b> .....	21
<b>1.4.5 Sheet Lamination</b> .....	21
<b>1.5 Applicazioni per la tecnologia AM</b> .....	23
<b>1.5.1 Sensori e sistemi elettromeccanici</b> .....	23
<b>1.5.2 Istituzioni accademiche</b> .....	23
<b>1.5.3 Applicazioni Biomediche</b> .....	23
<b>1.5.4 Industria aerospaziale</b> .....	24
<b>1.5.5 Prototipazione rapida</b> .....	24
<b>1.5.6 Applicazioni in odontoiatria</b> .....	24
<b>1.6 Vantaggi e Svantaggi</b> .....	25
<b>1.6.1 Vantaggi</b> .....	25

1.6.2	Svantaggi .....	26
2.	Lattice Structures .....	27
2.1	Superfici TPMS .....	28
2.1.1	Densità relativa $\rho r$ .....	29
2.1.2	Modulo e superficie di Young .....	30
2.1.3	Zener Ratio .....	30
2.1.5	Limiti di Hashin-Shtrikman .....	31
2.2	Principali superfici TPMS .....	32
2.2.1	Diamond .....	32
2.2.2	Gyroid .....	32
2.2.3	Neovius .....	33
2.2.4	Schwarz P. ....	34
2.3	Simulazione numerica .....	34
2.3.1	Omogeneizzazione .....	34
2.4	Proprietà meccaniche delle superfici TPMS .....	35
2.4.1	Moduli elastici .....	35
2.4.2	Anisotropia delle superfici TPMS .....	36
2.4.3	Rigidità delle superfici TPMS .....	37
3.	Lavoro sperimentale .....	38
3.1	Caratterizzazione del materiale di base .....	38
3.1.1	Fabbricazione dei provini .....	38
3.1.2	Prove meccaniche e risultati ottenuti sulla resina Liqcreate Premium Tough .....	39
3.2	Determinazione della composizione ottimale di TPMS .....	42
3.2.1	Diagramma ternario con le strutture plate-lattices BCC, SC, FCC .....	42
3.2.2	Definizione dei casi di studio ottenuti come composizione di superfici TPMS .....	44
3.2.3	Prove di compressione sui tre campioni del caso 18 .....	51
3.2.4	Rappresentazione del diagramma ternario con le superfici TPMS .....	52
4.	Conclusioni .....	54
	Bibliografia .....	58

## II. Elenco delle figure

Figura 1- Rappresentazione processo di Additive Manufacturing [1] [2] .....	8
Figura 2- Scala temporale Additive Manufacturing [3] .....	9
Figura 3- Fasi della produzione per Additive Manufacturing [7].....	11
Figura 4- Rappresentazione processo di produzione FDM [14] .....	16
Figura 5- Rappresentazione processo di produzione SLA [15] .....	18
Figura 6- Rappresentazione processo di produzione DLP [16].....	19
Figura 7- Rappresentazione processo di produzione SLS [13] .....	20
Figura 8- Rappresentazione processo di produzione Polyjet Printing [13] .....	21
Figura 9- Rappresentazione processo di produzione LOM [17] .....	22
Figura 10- Esempi di strutture Plate-Lattices [18] .....	27
Figura 11- Esempi di superfici TPMS [19] .....	28
Figura 12- (a) superficie tridimensionale, (b) superficie del modulo di Young .....	32
Figura 13- (a) superficie tridimensionale, (b) superficie del modulo di Young .....	33
Figura 14- (a) superficie tridimensionale, (b) superficie del modulo di Young .....	33
Figura 15- (a) superficie tridimensionale, (b) superficie del modulo di Young .....	34
Figura 16- Variazione dei moduli in dipendenza della densità relativa [19] .....	35
Figura 17- Dipendenza Zener Ratio dalla densità relativa [19] .....	36
Figura 18- Dipendenza della rigidità totale rispetto la densità relativa [19].....	37
Figura 19- Provini cilindrici a dx e provini a osso di cane a sx .....	38
Figura 20- (a) Prova di trazione ASTM D638 e (b) ingrandimento su provino durante la prova.....	39
Figura 21- Rappresentazione del procedimento di ottenimento dello speckle .....	39
Figura 22- Funzionamento di LabView durante la prova di trazione .....	40
Figura 23- Curve caratteristiche del materiale di stampa .....	41
Figura 24- Calcolo modulo di Young .....	41
Figura 25- Particolari composizioni di plate-lattices isotrope [18].....	42
Figura 26- Diagramma ternario con le strutture Plate-Lattices [18] .....	43
Figura 27- Esempi di lettura del diagramma ternario .....	44
Figura 28- Rappresentazione tridimensionale, tensore elastico e superficie di Young caso 2 .....	48
Figura 29- Rappresentazione tridimensionale, tensore elastico e superficie di Young caso 7 .....	48
Figura 30- Rappresentazione tridimensionale, tensore elastico e superficie di Young caso 12 .....	49
Figura 31- Rappresentazione tridimensionale, tensore elastico e superficie di Young caso 15 .....	49
Figura 32- Rappresentazione tridimensionale, tensore elastico e superficie di Young caso 18 .....	50
Figura 33- Rappresentazione dei tre provini stampati del caso 18.....	50
Figura 34- Immagini relative al test 1 del caso 18 .....	51
Figura 35- Immagini relative al test 2 del caso 18 .....	51
Figura 36- Immagini relative al test 3 del caso 18 .....	52
Figura 37- Diagramma ternario in dipendenza del rapporto tra i moduli di Young.....	52
Figura 38- Diagramma ternario in dipendenza del rapporto Zener .....	53
Figura 39- Curve nominali tensione deformazione relative al Test 1.....	54
Figura 40- Curve nominali tensione deformazione relative al Test 2.....	54
Figura 41- Curve nominali tensione deformazione relative al Test 3.....	55
Figura 42- Confronto delle tre curve nominali .....	55

Figura 43- Calcolo dei moduli di Young nei tre test..... 56

### III. Elenco delle tabelle

Tabella 1- Proprietà Premium Tough [9] ..... 13  
Tabella 2- Rapporto tra i moduli di Young e rapporto Zener ..... 47

## Abstract

Nel capitolo uno di questo lavoro di tesi viene presentata la fabbricazione additiva (AM), generalmente nota come stampa 3D, un'innovativa tecnica di fabbricazione che ha visto una notevole evoluzione ed espansione solo negli ultimi anni rinnovando l'industria e la produzione. Per AM si intende un processo di fabbricazione che prevede la realizzazione delle parti depositando il materiale strato per strato a partire da un modello geometrico 3D computerizzato. Si presterà particolare attenzione alla successione delle fasi da seguire per il processo di fabbricazione, i materiali prettamente utilizzati, le diverse tecniche di stampa esistenti, le principali applicazioni e vantaggi e svantaggi di tale processo.

Nel secondo capitolo ci si concentrerà su un'innovativa famiglia di strutture nata grazie a una continua ricerca di materiali con bassi valori di densità ma con le caratteristiche quali rigidità e resistenza pari a quelle dei materiali ad elevata massa. Le strutture a reticolo, dette lattice-structures, hanno suscitato un notevole interesse in questo campo, in particolare le superfici minime tripolarmente periodiche prodotte tramite tecniche di Additive Manufacturing. Si studieranno attentamente le proprietà e le caratteristiche che contraddistinguono queste strutture soffermandosi principalmente sulle superfici Diamond, Gyroid, Neovius e Schwarz P.

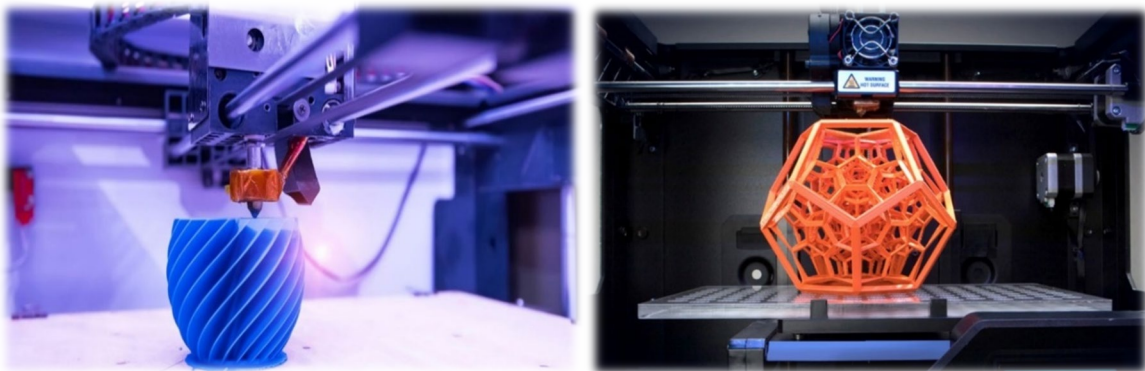
Nel terzo capitolo, fulcro di questo lavoro di tesi, dopo aver compreso come le superfici sopra nominate, prese singolarmente, non solo non riescono a raggiungere elevati valori dei moduli elastici ma presentano un'elevata anisotropia, si è pensato di combinare tra loro differenti tipologie di strutture TPMS per definire una nuova composizione delle stesse con comportamento macroscopicamente isotropo e possibile da stampare mediante tecnologia DLP. Verranno discussi argomenti prettamente pratici come la produzione dei provini necessari per comprendere le proprietà del materiale, le differenti composizioni possibili della nuova struttura, simulazione numerica tramite il software nTopology e prove meccaniche per verificare se i dati ottenuti mediante omogeneizzazione combaciano con quelli ottenuti sperimentalmente.



# Capitolo 1

## 1. Additive Manufacturing

La fabbricazione additiva (AM), generalmente nota come stampa 3D, è un'innovativa tecnica di fabbricazione introdotta nel 1987 con il termine stereolitografia ma che ha visto una notevole evoluzione ed espansione solo negli ultimi anni rinnovando l'industria e la produzione. Con la fabbricazione additiva, come mostrato in Figura 1, si intende un processo di fabbricazione che prevede la realizzazione delle parti attraverso la deposizione strato per strato di materiale a partire da un modello geometrico 3D computerizzato, in completa opposizione ai processi tradizionali di fabbricazione sottrattivi, i quali partendo da un blocco asportano il materiale in eccesso per ottenere la forma desiderata causando un notevole spreco di materiale. Con l'introduzione dell'AM si è riusciti a velocizzare i cicli di sviluppo del prodotto permettendo di riprodurre configurazioni differenti senza intaccare l'oggetto reale, definire nuove strategie di produzione grazie alla diminuzione dei costi delle stampanti, l'aumento delle capacità delle stesse, maggiore recupero del materiale e la possibilità di offrire design personalizzati su misura per differenti tipologie di clienti a costi ridotti.



*Figura 1- Rappresentazione processo di Additive Manufacturing [1] [2]*

## 1.1 Cenni storici

La nascita dell'AM risale al 1981 con Hideo Kodama, il quale registrò il brevetto sulla prototipazione rapida seguito nel 1984 da Charles Hull con la presentazione del brevetto sulla tecnologia SLA, basata sull'utilizzo di una sorgente laser in grado di termoindurire la resina strato dopo strato. Pochi anni dopo nel 1989 si assiste a un nuovo brevetto di Carl Deckard con l'introduzione del processo SLS (selective laser sintering), tecnica di sinterizzazione mediante un fascio di laser in una polvere di metallo. Nel 1992 si vede l'invenzione da parte di Scott Crump di una nuova tecnica di stampa, la FDM (fused deposition modeling), nel quale un filamento di polimeri, scaldato da resistenze, attraversa un ugello permettendo la solidificazione strato per strato dando vita al pezzo. Una vera e propria evoluzione di tale tecnologia è avvenuta nel 2005, con Adrian Bowyer, il quale introdusse nel mercato la prima stampante 3D auto-replicante. Negli ultimi anni l'additive manufacturing ha visto una rapida crescita, sia nel campo delle applicazioni, dei metodi di stampa e dei materiali supportati dai differenti processi, tanto che nel 2018 ha raggiunto un valore di 9,3 miliardi di dollari, mentre è previsto per il 2027 il raggiungimento di 41 miliardi di dollari. La linea temporale può essere visualizzata in Figura 2. [3] [4]

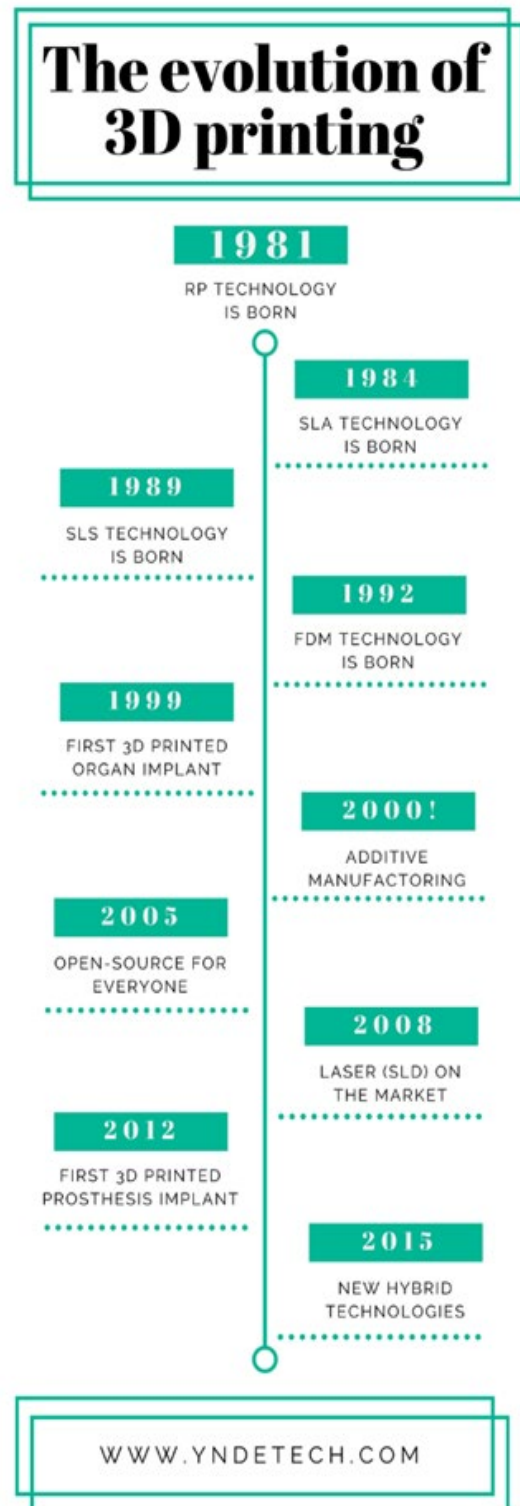


Figura 2- Scala temporale Additive Manufacturing [3]

## **1.2 Fasi della produzione per AM**

L'additive manufacturing, in quanto processo di fabbricazione, è costituito da una serie di processi logici successivi come mostrato in Figura 3, i quali permettono la realizzazione della parte reale, tangibile. A partire dalla definizione di un modello CAD, computerizzato passando per la fase di stampa fino ad ottenere la parte reale si distinguono una serie di fasi:

### **1.2.1 Definizione del modello matematico della parte e file STL**

Punto di partenza dell'additive manufacturing consiste nella progettazione della parte, mediante l'uso di un software CAD in grado di rappresentare la parte mediante geometrie semplici, al fine di ottenere il modello tridimensionale. Lo stesso viene poi convertito in file formato STL, nel quale le superfici vengono approssimate da triangoli.

### **1.2.2 Generazione dei supporti**

Definito l'orientamento con il quale verrà fabbricato l'oggetto è opportuno definire dei supporti in modo da ancorare la parte alla piattaforma affinché venga mantenuta la corretta posizione e proteggere le pareti laterali.

### **1.2.3 Slicing**

Tale fase, eseguita automaticamente dal software della stampante, prevede la divisione del modello, nel formato STL, in diverse sezioni ottenuti con piani tra loro paralleli, la cui normale coincide con l'asse z, separati tra loro da una distanza legata alla risoluzione della macchina.

### **1.2.4 Setup della macchina**

Prima di procedere alla fase di stampa bisogna effettuare un controllo delle geometrie, importare nella stampante selezionata il modello 3D e scegliere i parametri di stampa adeguati come consumo dei materiali e tempi di stampa. Il risultato sarà un file in formato G-Code.

### 1.2.5 Fase di stampa 3D

Viene effettuato il passaggio dall'oggetto digitale a quello fisico, concreto. In tale fase la stampante è autonoma, il processo è completamente automatizzato, solo la fase iniziale deve essere monitorata per evitare eventuali malfunzionamenti.

### 1.2.6 Post-Produzione

Si effettua la rimozione dei supporti di stampa sia mediante l'azione manuale, mediante alta temperatura o sistemi ad ultrasuoni e eventuali processi di finitura superficiali per miglioramenti funzionali.

[5] [6]



Figura 3- Fasi della produzione per Additive Manufacturing [7]

## 1.3 Materiali per AM

Per la produzione di prodotti di elevata qualità e affidabili, la tecnologia AM, come altri processi di fabbricazione, richiede materie prime che soddisfino requisiti precisi e che siano compatibili con il processo predefinito. Quattro sono le grandi famiglie di materiali dei quali si fa principalmente uso nell'Additive Manufacturing: polimeri, metalli, ceramiche e compositi.

### 1.3.1 Polimeri

I polimeri sono tutt'ora una classe di materiali ampiamente utilizzata nella produzione per additive manufacturing. Essi vengono classificati come:

**Termoindurenti:** a seguito di una reazione di reticolazione indotta tramite del calore, si permette la nascita di forti legami tra le catene polimeriche diventando notevolmente duri e se scaldati successivamente non tendono a indebolirsi ma carbonizzano.

**Termoplastici:** a seguito di un riscaldamento tendono a immorbidirsi finché non liquefano. Riescono a resistere a cicli ripetuti di riscaldamento e raffreddamento. [8]

Il primo processo nel quale si vede l'utilizzo di materiali polimerici è la vat polymerization, il quale prevede l'indurimento della resina per costruire parti in polimero. Materiali come PLA e ABS sono i più usati nei filament-driven system. L'ABS vede un utilizzo negli elettrodomestici e carrozzerie di auto ed è caratterizzato da una notevole resistenza alla temperatura ed è riciclabile. Il PLA invece nasce da materie prime organiche, viene stampato a temperature notevolmente minori però si deteriora in contatto con l'acqua. Differentemente il Nylon e TPU vengono fortemente utilizzati nei powder bed fusion processes. In particolare, il Nylon è un materiale termoplastico, poco costoso, viene usato per la creazione di strutture dall'elevata complessità. È caratterizzato da buona resistenza alla corrosione, notevole durata e alte proprietà meccaniche. Il TPU possiede caratteristiche quali alta flessibilità e durata, trova grande uso nell'industria calzaturiera e automobilistica. Il materiale utilizzato in questo studio di tesi per la produzione di particolari strutture è la **Liqcreate Premium Tough**. Resina dalla grande resistenza agli urti e al taglio, dal colore

trasparente che a seguito della polimerizzazione passa al bianco. Viene usata in processi quali LCD e DLP. Rappresenta il materiale perfetto per la fabbricazione di prototipi la cui caratteristiche richieste sono durezza e durata nel tempo. Le sue proprietà sono mostrate nella tabella 1. [9]

## Liqcreate Premium Tough Technical Data

Liquid properties			
Appearance	Transparent liquid	$E_c$	14.47 mJ/cm <sup>2</sup>
Viscosity	800 cps at 25°C	$D_p$ metric	0.56 mm
Density	1.18 g/cm <sup>3</sup>	$D_p$ imperial	22.05 mils

Polymer properties			
Mechanical properties		30 minutes high power LED curing at 60°C	
Description	ASTM Method	Metric	Imperial
Tensile Strength	D638M	28 MPa	4.0 ksi
Tensile Modulus	D638M	1.0 GPa	145 ksi
Elongation at break	D638M	15 - 25 %	
Flexural Strength	D790M	38 MPa (no break)	5.5 ksi (no break)
Flexural Modulus	D2240	1.0 GPa	145 ksi
IZOD Impact (notched)	D256A	40 J/m	0.81 ft-lb/in
Shore D Hardness	D2240	69	
Water sorption	D570-98	0.6 %	

*These values may vary and depend on individual machine processing and post-curing.*

Visit [www.liqcreate.com](http://www.liqcreate.com) for more information about this product.

Tabella 1- Proprietà Premium Tough [9]

### **1.3.2 Metalli**

Parti metalliche dalle elevate qualità possono essere ottenute mediante processi per AM basati su un'alimentazione con filo metallico o a polvere. La gamma di metalli usati nei processi di additive manufacturing è sempre in continua espansione ma i principali sono: titanio, acciaio inossidabile, nichel e leghe degli stessi. Diverse sono le limitazioni nell'uso di materiali metallici nella stampa 3D come la necessità degli stessi di essere saldabili e colabili, inoltre la zona di fusione è notevolmente ristretta rispetto le dimensioni finali del prodotto tanto da causare tensioni residue considerevoli.

### **1.3.3 Compositi**

Per compositi si intendono composizioni di due o più materiali differenti atte ad ottenere proprietà notevolmente più spinte rispetto a quelle che avrebbero i singoli costituenti. Tali materiali con caratteristiche quali leggerezza e adattabilità trovano ampio utilizzo in questa nuova tecnologia. I più usati sono composti polimerici rinforzati con fibre di carbonio e vetro offrendo un buon compromesso tra metalli e polimeri assicurando una notevole forza ma con risparmi di peso.

### **1.3.4 Ceramiche**

Le ceramiche caratterizzate da un basso assorbimento sono notevolmente complesse da poter stampare tramite tecnologie AM con laser. Tuttavia, grazie a nuove tecniche quali fotopolimerizzazione ed estrusione di materiale si è riusciti a bypassare tale difficoltà e rendere possibile l'utilizzo di tale materiale.

[10] [11]

## 1.4 Metodi di produzione per AM

La preparazione e i tipi del materiale, la tecnica di creazione degli strati e i requisiti di applicazione influenzano la tipologia del processo. Le iniziative di ricerca legate all'ambito industriale hanno permesso una notevole evoluzione di differenti tipologie di tecniche produttive per Additive Manufacturing. [6] [12] [13]

### 1.4.1 Material Extrusion

L'estrusione è un processo di deformazione plastica che permette di ottenere parti con sezioni costanti. Si forza il materiale tramite un'azione di compressione attraverso un estrusore. Nel caso di utilizzo di polimeri, il materiale viene scaldato mediante resistenza elettriche che causano la fusione del materiale stesso. Prototipi in plastica o parti con basso volume vengono prodotti usando tecniche di estrusione.

#### FDM

La sigla FDM detta anche Fused Deposition Model, si basa sull'utilizzo di un filamento di polimero termoplastico, il quale viene riscaldato in un estrusore fino al raggiungimento del punto di fusione per ottenere uno stato semi-liquido per poi essere estruso strato dopo strato fino all'ottenimento dell'oggetto reale come mostrato in figura 4. I filamenti più utilizzati nella tecnologia FDM sono in materiale termoplastico quali: TPU, ABS, Nylon, PLA. La qualità dei prodotti ottenuti può essere modificata variando differenti valori dei parametri di stampa quali temperatura della testa dell'ugello, del letto di stampa, lo spessore dello strato e la velocità di stampa. In questo processo un gantry-robot dotato della testa dell'estrusore permette lo spostamento lungo le direzioni x, y mentre invece il tavolo di lavoro ha un movimento lungo l'asse z. Una volta aver depositato uno strato di materiale sul tavolo di lavoro, si ha un movimento di discesa pari allo spessore dello strato realizzato così da continuare la fabbricazione. Per la creazione di parti di notevole complessità, nella tecnica FDM si fa uso di materiale di supporto oltre quello di costruzione fondamentale per sostenere le strutture e assicurarne la loro integrità finché non vengano rafforzate, per poi rimuoverlo mediante un solvente. I principali vantaggi sono un costo inferiore e la capacità di stampa di oggetti multimateriale. Alcune sono le limitazioni di tale processo che includono il



materiale di partenza necessariamente in forma di filamento e il punto di fusione non può essere alto. È da tenere in considerazione anche il valore di viscosità del materiale. Se la viscosità è alta si rischia di impedire l'estrusione e rallentare la fase di stampa, in caso contrario con viscosità bassa i layers falliranno non riuscendo a creare sezioni senza supporti andando incontro a instabilità strutturale. Pertanto, la gamma di materiali con valori di viscosità accettabili viene ridotta. Sarà necessario che il filamento mantenga la stabilità chimica e resista alle sollecitazioni al fine di ottenere una stampa dall'elevata qualità.

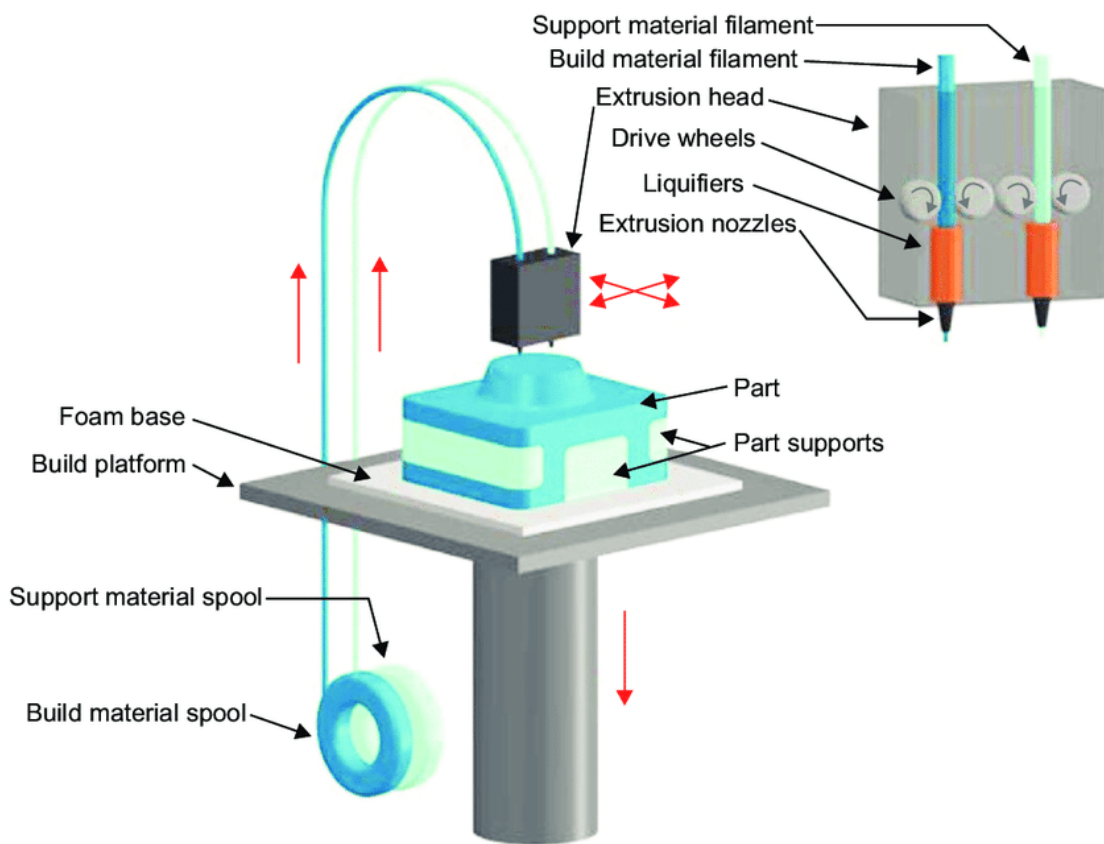


Figura 4- Rappresentazione processo di produzione FDM [14]

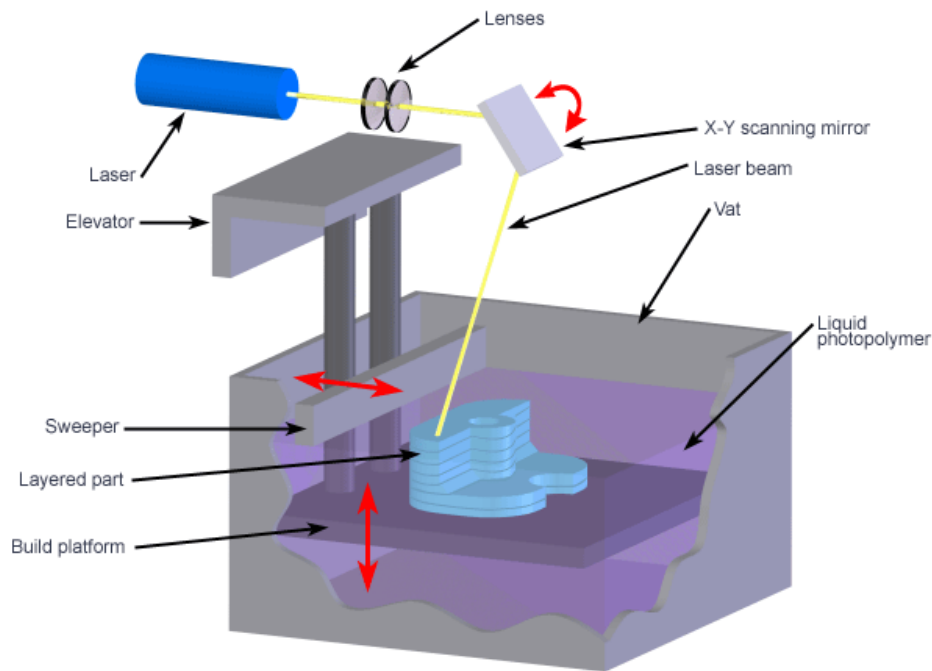
#### 1.4.2 Vat Photopolymerization

Tale processo di fabbricazione prevede l'utilizzo di una resina polimerica liquida la quale viene polimerizzata usando una fonte di luce per la creazione di prototipi. I materiali che vengono usati per tale procedura sono diverse tipologie di polimeri. Normalmente vengono generati dei supporti

per evitare eventuali deformazioni. I supporti, fatti dello stesso materiale del prodotto, vengono poi eliminati con strumenti appositi. La parte finale ottenuta, viene sottoposta a un processo di post-cure all'interno di un forno a raggi UV dopo essere stata ripulita mediante dell'alcool isopropilico al fine di rimuovere residui di resina.

## **SLA**

La tecnologia SLA detta Stereo Lithography, mostrata in figura 5, sfrutta la tecnica di indurimento del materiale fotopolimerico mediante un raggio laser UV (ultravioletto). Il fotopolimero viene versato all'interno di un serbatoio, il raggio UV invece è dotato di uno spostamento nel piano x-y mentre invece la base di stampa si muove lungo l'asse z. Due sono i metodi di stampa tramite la tecnologia SLA, top-down and bottom-up. Per il metodo top-down, il raggio laser UV è puntato verso il basso e percorre il percorso definito sulla superficie della resina. Tale processo permette di indurire la resina formando il primo layer di stampa che aderirà alla base. Successivamente alla formazione del primo strato, la base di stampa si riabbassa permettendo la definizione dello strato successivo. Un problema per questo metodo è la resina in eccesso che potrebbe rimanere intrappolata in caso di celle chiuse. Invece per l'approccio bottom-up, il raggio laser UV a differenza del precedente sarà diretto verso l'alto. Il serbatoio contenente la resina ha una base trasparente in modo da permettere il passaggio del raggio UV. La luce tende a polimerizzare la resina sulla base di stampa e successivamente alla creazione di ogni singolo layer la base viene alzata secondo lo spessore dello strato impostato. Una limitazione del processo risiede sulla mancata adesione del primo strato alla base di stampa. I materiali tipici di riferimento per la tecnologia SLA sono le resine acriliche ed epossidiche. La resina in eccesso non polimerizzata, viene poi asportata mediante il lavaggio tramite alcool isopropilico. È fondamentale tenere sotto controllo i parametri di stampa quali: il tempo di esposizione, l'intensità UV, lo spessore dello strato, affinché si riesca ad ottenere una stampa corretta. La velocità di stampa è un punto a sfavore per questa tecnica, poiché richiede tempi molto elevati e per questo è perfetta per parti di precisione. Quattro sono i componenti principali di tale tecnica: il primo è il materiale ossia un fotopolimero che viene versato nel serbatoio, il secondo è il tavolo forato, il terzo è la sorgente del laser UV e l'ultimo è il computer che ha sotto controllo tutti i parametri e gli spostamenti durante la stampa.



Copyright © 2008 CustomPartNet

Figura 5- Rappresentazione processo di produzione SLA [15]

## DLP

Allo stesso modo della tecnica SLA, anche la DLP, mostrata in figura 6, usa una luce UV per curare la resina con differenza che il fascio di luce UV non viene prodotto da un laser ma da uno schermo proiettore UV. Lo schermo illumina i pixel strato per strato del disegno. Per questo, si permette la stampa contemporanea dell'intero strato, a differenza della tecnica DLP, con il vantaggio di una velocità di stampa notevolmente più veloce. La resina che è polimerizzata aderisce al piano di stampa strato per strato. Nei primi layers di stampa, si genera un'aspirazione tra la base della stampa e il serbatoio andando a causare una perdita di adesione tra gli strati e la base portando al fallimento dell'operazione. Al fine di evitare questo è fondamentale regolare la velocità di sollevamento della base e il tempo di esposizione dello strato iniziale alla base. A seguito del processo di stampa viene effettuato un processo di post-indurimento per prevenire eventuali deformazioni. Si può concludere che la tecnica DLP sia più veloce rispetto la SLA grazie alla polimerizzazione degli strati simultaneamente.

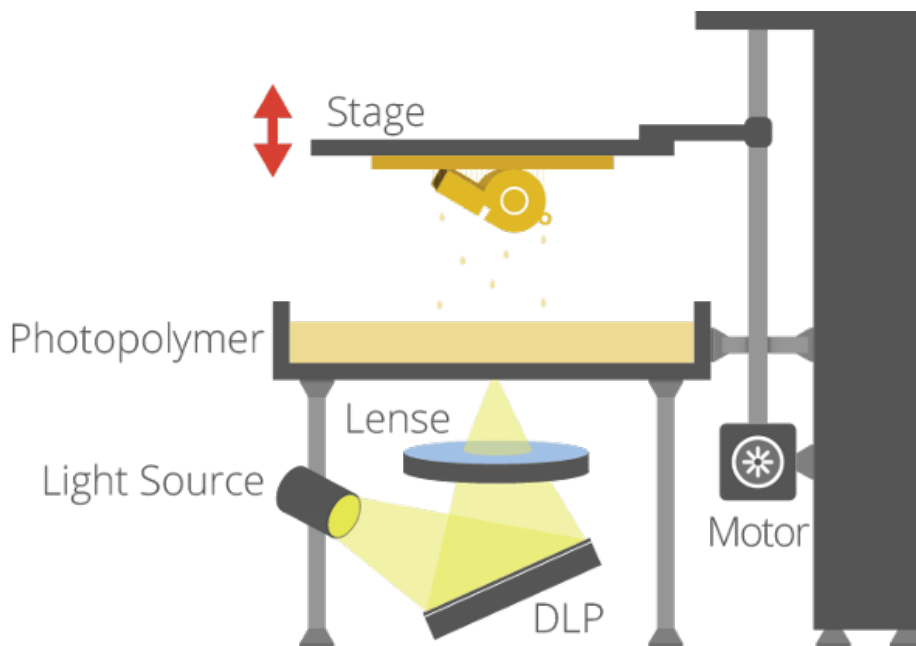


Figura 6- Rappresentazione processo di produzione DLP [16]

### 1.4.3 Powder Bed Fusion

In tale tecnologia si fa uso di un fascio di laser come sorgente di calore per fondere le polveri metalliche. La fusione della polvere è localizzata in zone precise, nelle quali lo scopo è quello di ottenere del materiale coeso per la fabbricazione del componente. Il vantaggio dell'uso di un laser è la possibilità di concentrarlo su piccole dimensioni, garantendo elevate densità di potenza, che assicurano una rapida fusione e un ottimo valore di precisione della parte.

### SLS

La tecnologia SLS, detta anche Selective Laser Sintering, è un processo di fusione a letto di polvere che viene mostrata in figura 7. Mediante un raggio laser collegato al computer dell'utente, ottenuto da una particolare sorgente, viene poi trasportato mediante diversi elementi ottici fino al di sopra della camera di lavoro nella quale è contenuta la polvere e puntato su un film sottile della stessa. Il risultato di tale processo è la fusione della polvere con creazione di uno strato solido. Il meccanismo sul quale si basa tale tecnica può essere scisso in tre passi fondamentali:

**Fusione completa:** i materiali sotto forma di polveri vengono completamente fusi mediante l'azione del raggio laser.

**Sinterizzazione assistita nella fase liquida:** necessaria per i materiali per i quali la sinterizzazione è complessa come per materiali ceramici.

**Sinterizzazione assistita nella fase solida:** la polvere non è completamente fusa ma viene riscaldata raggiungendo una temperatura tra la  $T_m$  (temperatura di fusione) e  $T_m/2$ .

I serbatoi di polvere usati nel processo SLS sono due, il primo usato come serbatoio di alimentazione mentre il secondo come serbatoio di stampa. Entrambi i serbatoi sono mantenuti ad una temperatura molto vicina alla temperatura di fusione  $T_m$ . Il raggio laser effettua un movimento lungo il piano x-y seguendo un modello bidimensionale, fondendo contemporaneamente la polvere generando il primo layer di stampa. Successivamente allo stampaggio di ogni strato, il letto di polvere viene abbassato di una distanza pari allo spessore dello strato stesso e dal serbatoio di alimentazione viene steso un nuovo strato di polvere sul precedente mediante l'ausilio di un tamburo. Alla fine del processo, la parte ottenuta sarà contenuta all'interno del serbatoio di stampa mentre la polvere in eccesso viene rimossa e verrà riutilizzata per operazioni successive. I materiali utilizzati con questa tecnica di produzione sono le poliammidi, polimeri, vetro, termoplastica, metallo e ceramica. Il più utilizzato è la plastica, in particolare il Nylon. A differenza delle tecniche precedenti, non saranno necessari i supporti strutturali, però sarà fondamentale il processo di post-produzione per ottenere una migliore finitura superficiale.



Figura 7- Rappresentazione processo di produzione SLS [13]

#### 1.4.4 Polyjet Printing

La stampa a getto di inchiostro è un processo che comporta la solidificazione del polimero attraverso la luce UV, mostrata in figura 8. Una fila di ugelli spruzza il materiale liquido o semi-liquido sul letto di stampa, il quale tende a solidificare grazie all'azione dei raggi UV. Gli stessi ugelli come la sorgente di raggi UV sono montati su un gantry che si muove lungo un piano x-y mentre invece il letto di stampa è dotato di un moto lungo l'asse z. Layer dopo layer il letto di stampa viene abbassato del valore dello spessore dello strato stesso per fare spazio a quello successivo. I materiali utilizzati sono qualsiasi fotopolimero che sia in stato liquido o semi-liquido. Il tempo di stampa è notevolmente minore, proporzionale al numero di ugelli che riescono a spruzzare contemporaneamente i polimeri. Le parti stampate godono di notevole finitura superficiale e non avranno la necessità di subire un post-trattamento.

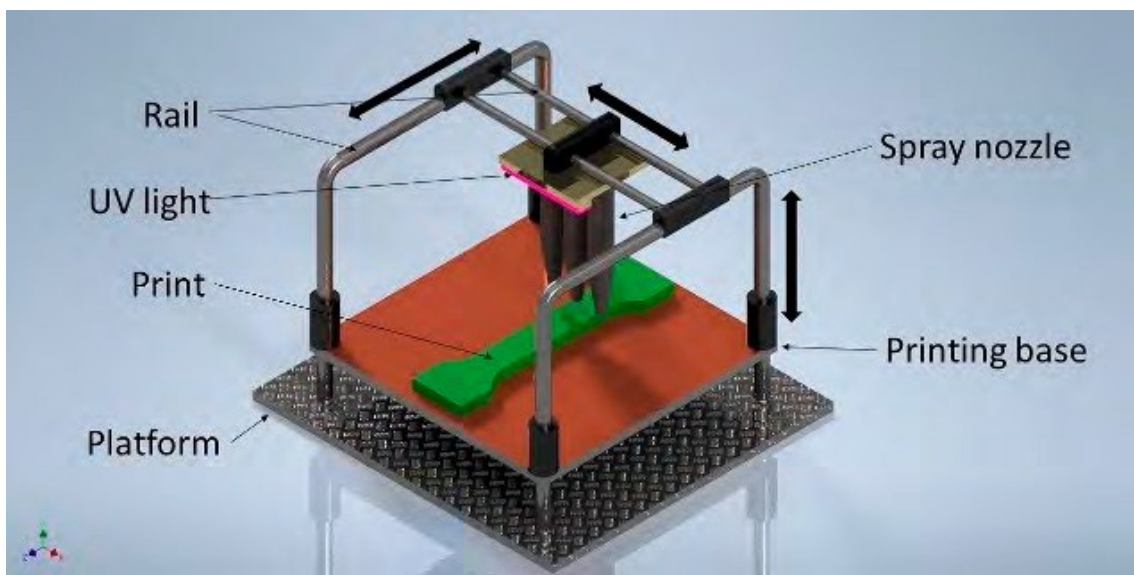


Figura 8- Rappresentazione processo di produzione Polyjet Printing [13]

#### 1.4.5 Sheet Lamination

##### LOM

La tecnica LOM mostrata in figura 9 anche detta Laminated Object Manufacturing è un processo che permette di creare oggetti tridimensionali mediante la deposizione di lamine di materiale che incollate insieme e tagliate da un laser, permettono il raggiungimento della forma desiderata.

Vengono usate lamine di diversi tipi di materiale come laminati di carta, di plastica e di metalli. Il processo LOM prevede una fase iniziale nella quale si unisce un foglio, dal contenitore di alimentazione, con un substrato mediante l'uso di un rullo riscaldato e il laser dotato di un movimento nel piano x-y taglia un'area rettangolare per poi ricavare il motivo richiesto. Dopo la creazione di ogni singolo strato, un nuovo foglio di laminato scorre andando a sovrapporsi al precedente grazie a un tamburo caldo livellatore. Il materiale in eccesso viene poi inviato verso un contenitore di raccolta. Dopo la creazione dello strato, la base di stampa viene spostata verso il basso di una distanza pari allo spessore della lamina per lasciare spazio alla stampa del layer successivo.

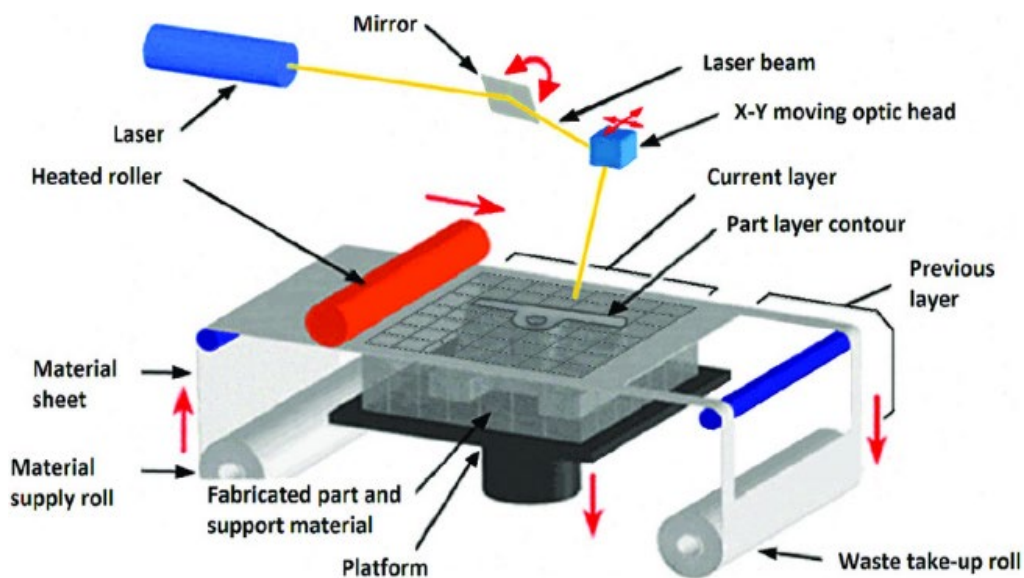


Figura 9- Rappresentazione processo di produzione LOM [17]

Tale tecnica rappresenta un metodo di prototipazione rapida. Gli oggetti stampati non richiedono l'ausilio di nessun supporto, poiché il laminato in eccesso svolge tale funzione. Uno svantaggio è la possibilità di stampare solo con materiali in fogli. Un'attenzione particolare viene assegnata allo spessore dei laminati, fondamentale per ottenere un livello di finitura superficiale e qualità elevate.

## 1.5 Applicazioni per la tecnologia AM

Grazie ai notevoli progressi effettuati nell'Additive Manufacturing negli ultimi anni e l'aumento esponenziale della varietà di materiali adeguati hanno permesso alla tecnologia AM di infiltrarsi in molti settori dell'ingegneria. [13] [12] [6]

### 1.5.1 Sensori e sistemi elettromeccanici

Da recenti studi si è scoperto come i circuiti stampati mediante AM, hanno una variabilità della resistenza elettrica notevolmente bassa mentre un altro studio ha visto un sensore liquido in nanocomposito PLA-CNT ottenuto mediante il processo di stampa FDM. In particolare, una matrice polimerica ottenuta per FDM e il nanocomposito CNT trovano il loro utilizzo per la fabbricazione di particolari sensori di deformazione le cui proprietà piezoresistive possono essere modificate. La fabbricazione mediante AM di un sensore permette di bypassare le fasi di fabbricazione e assemblaggio.

### 1.5.2 Istituzioni accademiche

Altro settore fortemente beneficiario dei processi per AM è l'istruzione. La stampa di modelli 3D con materiali polimerici è notevolmente economica. Tali modelli vengono utilizzati per mostrare idee e modelli di design. Un'altra notevole applicazione risiede nell'educazione speciale e nello studio dell'anatomia umana dove gli stampati 3D aiutano gli studenti a una corretta e più efficace visualizzazione.

### 1.5.3 Applicazioni Biomediche

La stampa 3D di biomateriali polimerici trova largo utilizzo nel settore biomedico. Diverse sono le tipologie di biopolimeri ossia biodegradabili e non biodegradabili, anche se si preferisce l'uso di quelli biodegradabili. Un esempio sono gli Hidrogels, particolare varietà di polimeri utilizzati per l'incapsulamento delle cellule e sistemi di consegna dei farmaci. Lo sviluppo di farmaci tramite AM permette notevoli vantaggi quali per esempio caratteristiche specifiche per i singoli pazienti come il dosaggio. Tuttavia, una grande limitazione nell'uso della tecnica FDM è l'elevata temperatura di utilizzo che causerebbe il degrado dei principi attivi dei singoli medicinali. Con l'innovazione si è reso



possibile la fabbricazione e sostituzione di organi umani ma anche protesi corrispondenti alle caratteristiche fisiche di ogni singolo paziente.

#### **1.5.4 Industria aerospaziale**

L'industria aerospaziale si è avvicinata all'Additive Manufacturing grazie all'elevata flessibilità di progettazione e affidabilità delle parti metalliche stesse. Anche materiali come polimeri o composti polimerici sono utilizzati in ambienti a temperatura notevolmente bassa come condotti delle ventole o rivestimenti acustici. I materiali principalmente utilizzati sono PEKK e CF grazie alla loro elevata resistenza al calore, alta inerzia chimica e resistenza meccanica notevole. Anche i composti ULTEM trovano una notevole applicazione nel campo aerospaziale grazie alla loro semplicità di fabbricazione, notevole rigidità

#### **1.5.5 Prototipazione rapida**

I progressi effettuati nell'Additive Manufacturing hanno permesso la realizzazione di prototipi dalle forme notevolmente complesse, con un risparmio in termini di tempo e costi. Precedentemente gli ingegneri potevano affidarsi ai soli software di modellazione per la progettazione delle parti, le cui capacità di prototipazione erano fortemente limitate mentre con l'avvento dell'AM si è riusciti ad ottenere modelli stampati molto più accurati.

#### **1.5.6 Applicazioni in odontoiatria**

Ovvia applicazione della tecnologia AM è l'odontoiatria. I materiali polimerici vengono utilizzati per la creazione dei modelli di fusione per le protesi come anche la fabbricazione di denti artificiali. Una notevole soluzione introdotta con l'AM è la sostituzione degli apparecchi metallici con allineatori dentali stampati mediante processi 3D. Tali allineatori sono composti da telai facilmente personalizzabili per ogni differente esigenza dei pazienti quali forma e dimensioni dei denti.

## 1.6 Vantaggi e Svantaggi

Riguardo la tecnologia Additive Manufacturing, è possibile annoverare una serie di pro e contro. [6]  
[13]

### 1.6.1 Vantaggi

- Al contrario delle lavorazioni sottrattive convenzionali, nei quali il principio è quello di rimuovere materiale, l'AM impiega in modo proficuo le materie prime basando il processo di fabbricazione delle parti sulla sovrapposizione di strato dopo strato. I materiali avanzati vengono riutilizzati per ulteriori lavorazioni.
- I tradizionali processi di produzione molto spesso richiedono ulteriori risorse come attrezzature, utensili e refrigeranti in più alla macchina utensile principale. A differenza degli stessi, L'AM non richiede nessuna risorsa, per questo è possibile la produzione di pezzi da parte delle piccole industrie.
- Non essendo presenti vincoli di attrezzaggio, i pezzi dalle forme e geometrie complesse possono essere fabbricati in un unico pezzo. Inoltre, è possibile fabbricare un'unica parte con proprietà meccaniche differenti nelle varie direzioni.
- Le macchine per AM sono più economiche rispetto le tradizionali macchine utensili non richiedendo notevoli allestimenti. Per questo, trovano ampio campo nella produzione di piccoli lotti. Inoltre, vengono evitati particolari problemi di bilanciamento delle linee e vengono completamente evitati colli di bottiglia della produzione perché i pezzi complessi saranno prodotti come singole unità.
- il modello ottenuto rapidamente mediante programma CAD permette di effettuare test sulle funzionalità e caratteristiche molto prima delle fasi di produzione. Sarà inoltre possibile effettuare direttamente il passaggio dal modello CAD al prototipo 3D senza la necessità di un macchinista esperto.
- È possibile effettuare la ridefinizione dei componenti danneggiati di un prodotto precedentemente definito, in base al materiale di cui è costituita la parte stessa da ricostruire.

### 1.6.2 Svantaggi

- I processi di AM adoperano materiali polimerici liquidi o in polvere per fabbricare i layers del prodotto. Questi materiali però impediscono la produzione di oggetti dalle grandi dimensioni a causa della loro bassa resistenza. Inoltre, parti di dimensioni notevoli richiedono un lungo tempo necessario per completare il processo di fabbricazione.
- Molto spesso i prodotti ottenuti mediante processi di AM sono caratterizzati da una rugosità superficiale molto elevata, tipicamente hanno superfici ruvide e rigate. Tale caratteristica è dovuta a particelle di plastica o di polvere di grandi dimensioni che impilate le une sulle altre conferiscono un aspetto non rifinito al prodotto.
- Bisogna tenere in considerazione anche l'elevato costo delle apparecchiature per Additive Manufacturing. Le stesse, richiedono elevati investimenti iniziali. Basti pensare al costo delle singole stampanti, senza contare ulteriori esborsi di denaro per gli accessori e per i materiali operativi.
- Il numero di materiali a disposizione per la produzione AM è notevolmente limitato, ma grazie alla ricerca e innovazione la lista è sempre in continua evoluzione.

## Capitolo 2

### 2. Lattice Structures

Nel campo dell'ingegneria leggera è presente una continua ricerca per materiali con valori di densità bassi ma con le caratteristiche quali rigidità e resistenza pari a quelle dei materiali ad elevata massa. Le strutture a reticolo, dette lattice-structures o metamateriali a reticolo, mostrate in figura 10, hanno suscitato un notevole interesse in questo campo, in particolare le superfici minime tripolarmente periodiche prodotte tramite tecniche di Additive Manufacturing.

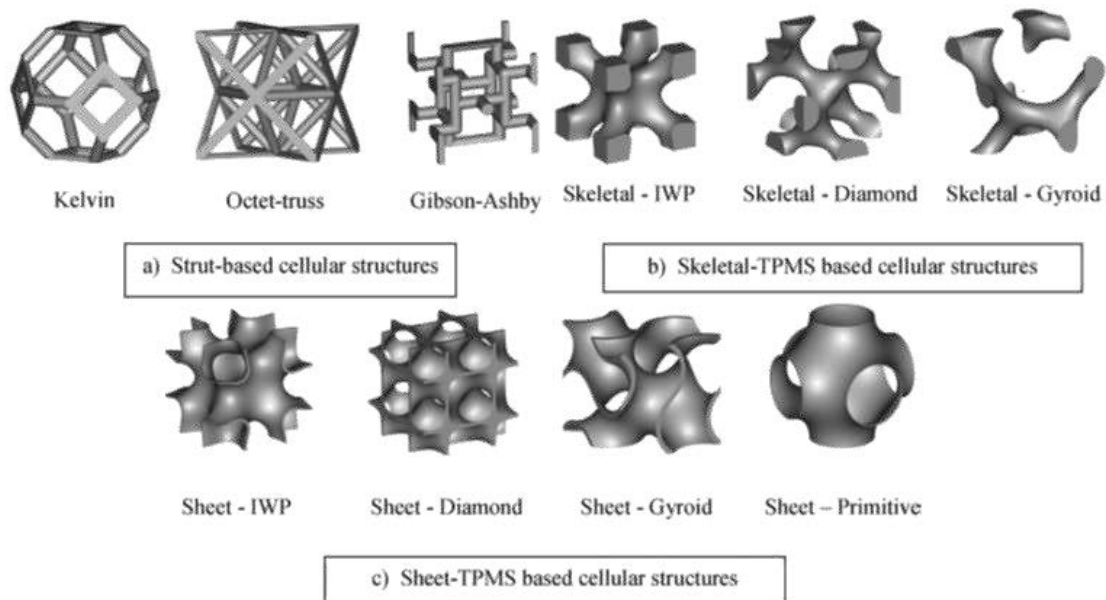


Figura 10- Esempi di strutture Plate-Lattices [18]

In particolare, l'interesse principale non è il materiale del quale sono composti, ma la relazione che intercorre tra la geometria del campione e le proprietà meccaniche. La possibilità di introdurre porosità permette di adattare la loro densità riuscendo ad innescare veri e propri effetti di rafforzamento. I plate-lattices vengono realizzati andando a predisporre delle piastre lungo i piani vicini alle strutture cristalline. Tali materiali sono caratterizzati da una forte anisotropia, sfruttata al fine di ottenere un alto valore di resistenza, ma attraverso un'analisi computazionale si è riusciti a

comprendere come particolari composizioni degli stessi plate-lattices permettono di ottenere valori del carico di snervamento isotropi e un'isotropia elastica. Una problematica per queste tipologie di strutture è la fase della produzione, assicurata solo mediante processi per AM essendo impossibile la fabbricazione mediante i processi tradizionali. Il materiale in eccesso rischia di essere intrappolato all'interno di eventuali celle chiuse create dalle medesime piastre. Allora per ovviare a tale problematica vengono effettuati dei fori al centro delle singole piastre al fine di permettere la fuoriuscita del materiale eccedente. [18]

## 2.1 Superfici TPMS

Una classe di lattice-structures base di notevoli studi sono le superfici minime tripolarmente periodiche dette anche TPMS, superfici definite matematicamente, note grazie alle loro caratteristiche topologiche, per esempio sono di natura lisce caratterizzate dall'assenza di spigoli vivi, in grado di conferirgli notevoli proprietà fisiche e meccaniche. Alcuni esempi di superfici sono mostrati in figura 11, in particolare abbiamo: (a) Diamond, (b) Gyroid, (c) Neovius e (d) Schwarz P. Le TPMS sono superfici che tendono a minimizzare l'area in modo che in ogni punto sulla superficie la curvatura sia nulla.

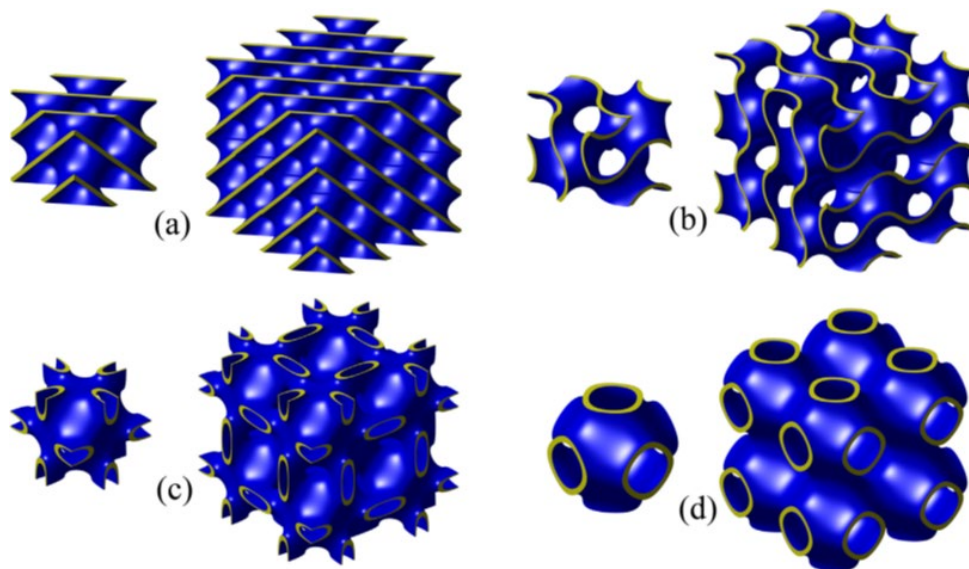


Figura 11- Esempi di superfici TPMS [19]

Le stesse superfici vengono rappresentate matematicamente mediante la level-set function  $\psi$ . Tale funzione assume valori differenti a seconda della zona nella quale viene valutata. In particolare:

- la funzione  $\psi$  avrà segno positivo se calcolata nella zona della fase di vuoto.
- la funzione  $\psi$  avrà segno negativo nella zona occupata dalla fase solida.

Lo stesso valore della level-set function  $\psi$  può subire regolazioni al fine di modificare il volume occupato dalla fase solida. In generale è possibile uguagliare la funzione  $\psi$  a un generico valore  $c$ . Sarà possibile ottenere una struttura a guscio, effettuando uno spostamento simmetrico verso l'interno e l'esterno della superficie per cui si ha  $\psi=0$  rispetto la direzione perpendicolare alla superficie stessa di una distanza  $t/2$  definito  $t$  lo spessore.

I principali svantaggi che tendono ad ostacolare lo sviluppo e l'utilizzo delle superfici TPMS sono:

- la loro microstruttura complessa. Eventuali test su prototipi permetterebbero di ottenere le proprietà delle differenti superfici; tuttavia, i risultati verrebbero influenzati da difetti legati alla fase di stampa. Nel caso di strutture semplici è possibile ricavare le proprietà mediante un nuovo metodo sperimentale che vede l'utilizzo della trasformata veloce di Fourier evitando l'analisi agli elementi finiti che richiederebbe milioni di dati.
- Assenza di tecniche efficaci per la fabbricazione delle TPMS. Proprio a causa della notevole complessità geometrica delle TPMS risultano essere assenti opportune tecniche di fabbricazione. Però con l'avvento dell'AM, si è resa possibile la fabbricazione delle superfici, scambiando eventuali celle chiuse in celle aperte al fine di evitare difetti di stampaggio.

Per un corretto e completo studio sulle TPMS è fondamentale la definizione di alcune caratteristiche macroscopiche quali: densità relativa, modulo e superficie di Young, Zener ratio e rigidità totale.

[19] [20]

### 2.1.1 Densità relativa $\rho_r$

Si definisce densità relativa il rapporto  $\frac{\rho^*}{\rho_s}$  nel quale  $\rho^*$  sta a indicare la densità del campione di reticolo cellulare mentre  $\rho_s$  la densità del materiale costituente. Normalmente il campo di studio per le TPMS si sofferma a valori di densità relativa pari a  $\rho_s < 0.4$ . In modo equivalente, è possibile

esprimere la densità relativa come la frazione di volume solido del reticolo rispetto al volume che esso stesso occupa nello spazio. Il valore della densità relativa nelle TPMS può essere modificato andando a variare il valore della level-set constant  $c$ . [19]

### 2.1.2 Modulo e superficie di Young

Il modulo di Young o anche modulo di elasticità è una grandezza che esprime la capacità di un materiale di subire una deformazione di allungamento o accorciamento in campo elastico a seguito dell'azione di un carico esterno. Una deformazione ossia una variazione di forma è definita elastica se è temporanea, ossia eliminando il carico esterno, il corpo tornerà alle dimensioni originarie. Introducendo la legge di Hooke, secondo la quale la tensione esterna risulta essere direttamente proporzionale alla deformazione subita in campo elastico, è possibile definire il modulo di Young come il rapporto (1):

$$(1) \quad E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

con  $\sigma$  la tensione e  $\varepsilon$  la corrispondente deformazione. Valutando il valore del modulo di Young  $E$  lungo tutte le direzioni dello spazio, è possibile comporre la Superficie del Modulo di Young. La stessa sarà una sfera per quelle strutture macroscopicamente isotrope ossia con modulo di Young congruente in tutte le direzioni, mentre avrà forme differenti se il comportamento risulterà essere anisotropo.

### 2.1.3 Zener Ratio

Lo Zener Ratio è un fattore adimensionale usato per quantificare il comportamento anisotropo dei cristalli di forma cubica. Per anisotropia si intende la caratteristica di un materiale di avere comportamenti e proprietà differenti lungo diverse direzioni. È il contrario del comportamento isotropo per il quale il valore dello Zener Ratio sarà  $Z = 1$ . È possibile valutare lo Zener Ratio attraverso tale rapporto (2):

$$(2) \quad Z = \frac{G}{\frac{E}{2(1+\nu)}} = \frac{G \cdot 2(1+\nu)}{E} = \frac{2C_{44}}{C_{11} - C_{12}}$$

Dove indichiamo con  $G$  il modulo di taglio, con  $E$  il modulo di Young,  $\nu$  il modulo di Poisson mentre  $C_{ij}$  rappresenta le componenti del tensore elastico  $C$ . [19]

#### 2.1.4 Rigidità totale

Al fine di comprendere e riuscire a determinare esattamente la raggiungibilità delle superfici TPMS al limite H-S, nasce un nuovo parametro definito rigidità totale indicato con  $\Omega$  andando a considerare i tre moduli solo lungo le direzioni (1,0,0) e (1,1,0). In particolare, è possibile esprimere la rigidità totale come (3):

$$(3) \quad \Omega = \frac{\frac{\bar{E}_{100} + \bar{E}_{110}}{2} + (\bar{G}_{100} + \bar{G}_{110}) \left(1 - \frac{\bar{\nu}_{100} + \bar{\nu}_{110}}{2}\right)}{E_{HSU} + 2G_{HSU}(1 - \nu_{HSU})}$$

Naturalmente i materiali i cui tre moduli riescono ad avvicinarsi al limite H-S in entrambe la coppia di direzioni avrà come valore di rigidità totale  $\Omega = 1$ .

Al fine di riuscire a tenere in considerazione i valori dei tre moduli lungo una qualsiasi direzione arbitraria, è possibile ridefinire la rigidità totale  $\Omega$  come (4):

$$(4) \quad \Omega = \frac{1}{2} \left( \frac{\sum_{i=1}^p E^H_{\alpha\beta\gamma}}{pE_{HSU}} + \frac{\sum_{i=1}^p G_{\alpha\beta\gamma}^H}{pG_{HSU}} \right)$$

Nella quale p sta a indicare il numero delle differenti direzioni nello spazio, mentre invece  $\alpha, \beta, \gamma$  stanno a rappresentare le rispettive inclinazioni rispetto le 3 direzioni principali x, y, z. [19]

#### 2.1.5 Limiti di Hashin-Shtrikman

Con il termine limiti di Hashin-Shtrikman si indicano i limiti più spinti possibili nella gamma dei moduli elastici. Considerando attentamente la frazione volumetrica dei materiali costituenti si è in grado di valutare i limiti superiori e inferiori per i moduli elastici di un qualsiasi tipo di materiale composito. Possiamo definire i limiti di H-S per la massa indicato con K (5) e il modulo di taglio  $\mu$  (6) come [19] [21]:

$$(5) \quad K_{HS}^{\pm} = K_2 + \frac{\phi}{(K_1 - K_2)^{-1} + (1 - \phi) \left(K_2 + \frac{4}{3}\mu_2\right)^{-1}}$$

$$(6) \quad \mu_{HS}^{\pm} = \mu_2 + \frac{\phi}{(\mu_1 - \mu_2)^{-1} + \frac{2(1 - \phi)(K_2 + 2\mu_2)}{5\mu_2 \left(K_2 + \frac{4}{3}\mu_2\right)}}$$



## 2.2 Principali superfici TPMS

Le forme delle superfici TPMS nascono da un'attenta osservazione dei sistemi biologici naturali, i quali possiedono una microstruttura composta dall'interpenetrazione tra fasi solide e vuote che conferiscono elevati valori di resistenza e un'apprezzabile leggerezza. Tra le più svariate forme andremo ad approfondire e studiare con maggiore dettaglio quattro tipologie di superfici TPMS: Diamond, Gyroid, Neovius e Schwarz P.

### 2.2.1 Diamond

Questa superficie TPMS, viene denominata Diamond poiché è composta da due labirinti congruenti sovrapposti, ognuno dei quali riprende la forma della struttura di legame del diamante in una versione gonfia e tubolare. Una rappresentazione matematica di tale superficie viene espressa mediante la level-set function  $\psi$  definita come:

$$(7) \quad \psi_D = \sin(kx) \sin(ky) \sin(kz) + \sin(kx) \cos(ky) \cos(kz) + \cos(kx) \sin(ky) \cos(kz) + \cos(kx) \cos(ky) \cos(kz)$$

Oltre alla rappresentazione matematica mediante funzioni di omogeneizzazione siamo in grado, valutando il valore del modulo di Young  $E$  rispetto tutte le direzioni, definire la superficie di Young corrispondente. Ambedue sono visibili nella figura 12. [19]

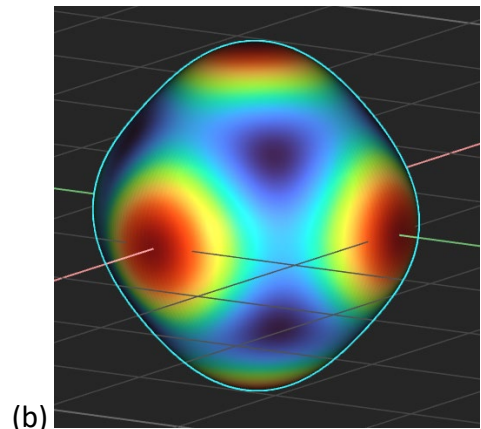
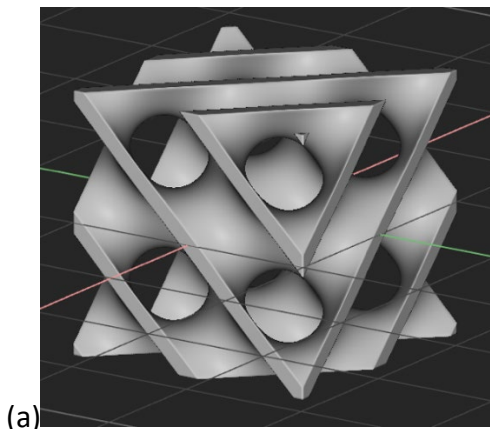


Figura 12- (a) superficie tridimensionale, (b) superficie del modulo di Young

### 2.2.2 Gyroid

La superficie TPMS Gyroid è tale da suddividere lo spazio disponibile in due labirinti di passaggi identici ma opposti. I canali stessi attraversano i labirinti lungo le direzioni (100) e (111). I passaggi emergono rispetto al canale attraversato con angoli di inclinazioni di 70.5 gradi.

Allo stesso modo della superficie precedente è possibile definire una rappresentazione matematica mediante la level-set function  $\psi$  (7):

$$(1) \quad \psi_G = \cos(kx) \sin(kx) + \cos(kz) \sin(kx) + \cos(ky) \sin(kz)$$

Anche per la superficie Gyroid è possibile rappresentare la superficie del modulo di Young al fine di studiare le sue proprietà. Entrambe raffigurate in figura 13. [19]

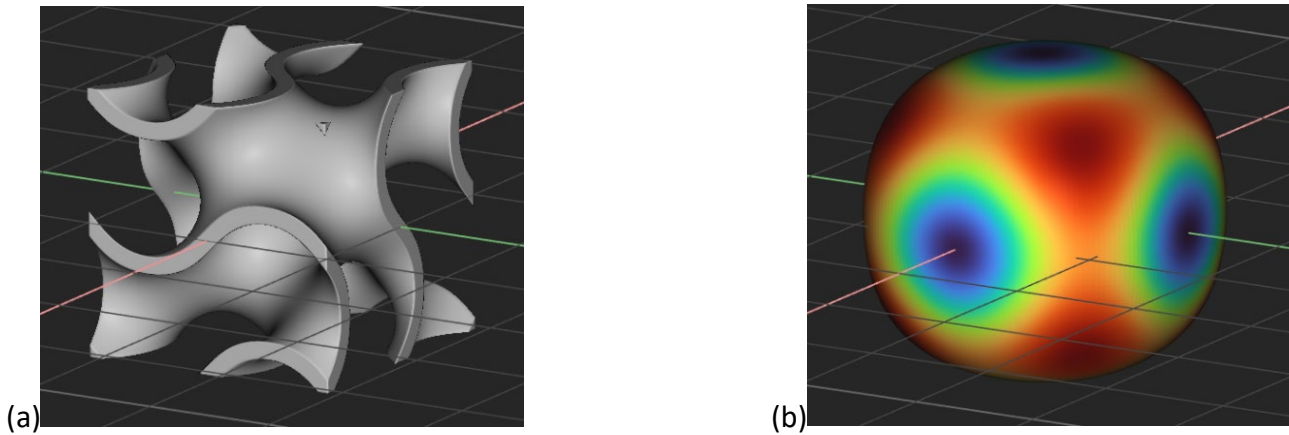


Figura 13- (a) superficie tridimensionale, (b) superficie del modulo di Young

### 2.2.3 Neovius

La superficie Neovius ha una conformazione grazie alla quale permette di dividere lo spazio in due labirinti infiniti, non equivalenti tra loro. La level-set function  $\psi$  che la rappresenta matematicamente è:

$$(2) \quad \psi_N = 3(\cos(kx) + \cos(kz) + \cos(ky)) + \cos(kx) \cos(kz) \cos(ky)$$

Riportiamo oltre la rappresentazione tridimensionale anche la rappresentazione della superficie del modulo di Young della TPMS Neovius in figura 14. [19]

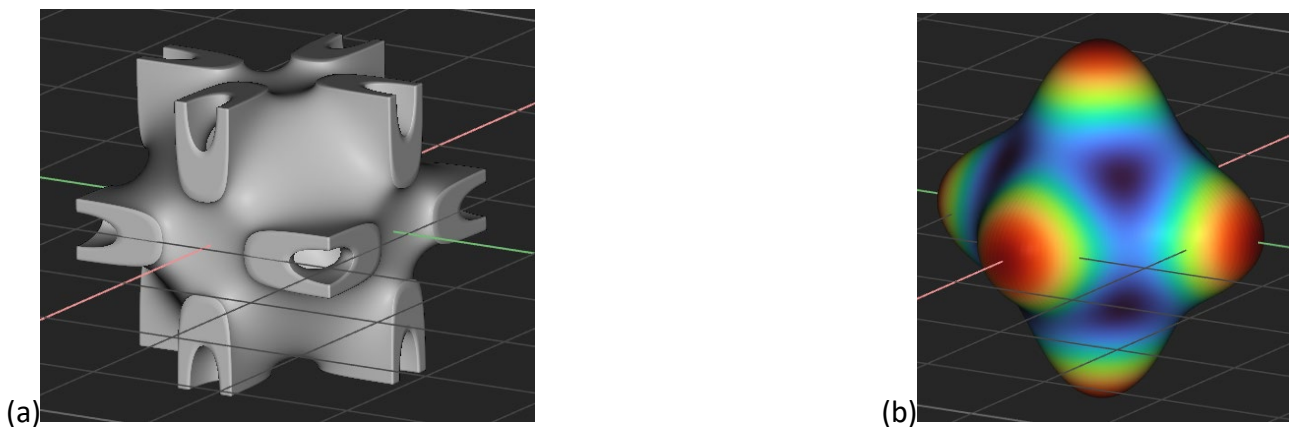


Figura 14- (a) superficie tridimensionale, (b) superficie del modulo di Young

#### 2.2.4 Schwarz P.

La superficie Schwarz P. ha due labirinti congruenti che si intrecciano tra loro, ognuno con forma tubolare rigonfiata del reticolo cubico. È possibile approssimare tale superficie tramite la funzione  $\psi$  (9):

$$(3) \quad \psi_p = \sin(kx) + \cos(kz) + \cos(ky)$$

Anche in questo caso possiamo riportare la superficie del modulo di Young, ottenuta mediante omogeneizzazione. Si rappresentano ambe le superfici in figura 15. [19]



Figura 15- (a) superficie tridimensionale, (b) superficie del modulo di Young

## 2.3 Simulazione numerica

Un approccio utilizzato per poter prevedere il comportamento dei reticoli è la simulazione numerica. Esistono differenti metodi di simulazione, uno dei più utilizzati è il metodo degli elementi finiti. L'analisi agli elementi finiti è uno strumento di notevole supporto al progettista che permette di valutare le proprietà meccaniche dei più diversi sistemi. Il componente verrà diviso in molteplici elementi solidi semplici che hanno il compito di approssimare il comportamento locale della struttura stessa. Un problema di questo metodo nasce con l'aumentare della complessità della geometria stessa che causa un eccessivo sforzo computazionale. Un ulteriore approccio utile nella simulazione numerica è quello di considerare il reticolo come un mezzo infinito. Attraverso uno studio microscopico si arriva alla definizione delle proprietà macroscopiche. Tale processo viene definito omogeneizzazione.

### 2.3.1 Omogeneizzazione

Il comportamento di una struttura reticolare perlomeno a livello macroscopico può essere studiato come uno pseudo-materiale omogeneizzato, i cui moduli di taglio e Poisson risultano uguali lungo le 3 direzioni principali. L'idea alla base di questo metodo è quella di prendere in considerazione un'unità periodica rappresentativa dell'intera struttura e applicare condizioni al contorno di periodicità. Il modello rappresentante la cella unitaria reagirà ai carichi concentrati allo stesso modo

rispetto ad una struttura periodica infinita. Tale metodo non è però in grado di calcolare e prevedere eventuali fenomeni locali ma solo globali. [22]

## 2.4 Proprietà meccaniche delle superfici TPMS

Siamo in grado mediante software di simulazione numerica di valutare le proprietà meccaniche delle superfici TPMS, facendo particolare attenzione a determinare l'evoluzione delle stesse in dipendenza della densità relativa  $\rho_r$ .

### 2.4.1 Moduli elastici

Il modulo di Young, di taglio, di Poisson il Bulk modulus verranno rappresentati al variare del valore della densità relativa  $\rho_r$  come mostrato nei grafici nell'immagini 20. Il range di variabilità preso in considerazione della densità stessa sarà da 0.005 a 0.8 ossia si considererà sempre lo stesso materiale cellulare ma si verrà a modificare lo spessore della singola superficie generando un incremento di densità. Gli stessi moduli verranno normalizzati rispetto a quelli del materiale usato per la generazione della superficie, per cui verranno definiti come:

$$(4) \quad K_{HSU} = \frac{4G_S K_S \bar{\rho}}{4G_S + 3K_S(1-\bar{\rho})}$$

$$(5) \quad E_{HSU} = \frac{9G_{HSU} K_{HSU}}{3K_{HSU} + G_{HSU}}$$

$$(6) \quad G_{HSU} = \frac{(9K_S + 8G_S)G_S \bar{\rho}}{20G_S + 15K_S - 6(K_S + 2G_S)\bar{\rho}}$$

$$(7) \quad \nu_{HSU} = \frac{3K_{HSU} - 2G_{HSU}}{2(3K_{HSU} + G_{HSU})}$$

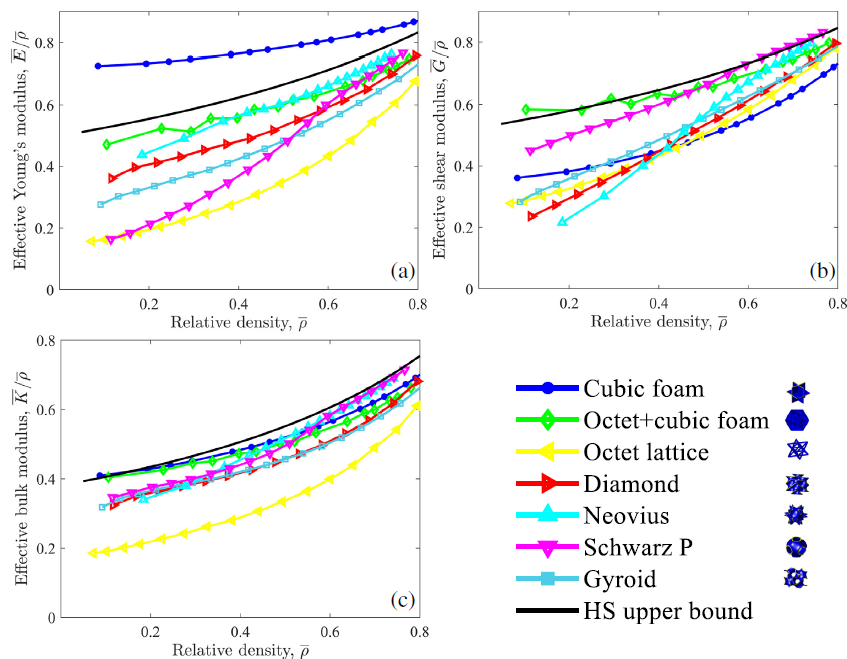


Figura 16- Variazione dei moduli in dipendenza della densità relativa [19]

Come si può notare dalla figura 20, i moduli delle superfici TPMS normalizzati vengono valutati prendendo di riferimento i moduli elastici di tre particolari strutture quali cubic-foam, octet+cubic foam e octet lattice. Si comprende, visionando i tre grafici in figura 21 come rispetto alle superfici TPMS, la struttura octet+cubic foam tende al limite superiore di H-S quasi in tutto il range di densità relativa. Grazie a una forte similitudine geometrica, la superficie Neovius tende a superare la struttura octet+cubic foam per valori di densità relativi  $\rho_r > 0.4$ , mentre tende a essere molto simile per valori di densità relativi minori. Rispetto al grafico dell'andamento del modulo di Young E, si può affermare che la struttura cellulare Schwarz P è caratterizzata dal secondo valore più basso, questo è dovuto alla scarsa distribuzione di materiale lungo le direzioni principali, mentre ha un elevato modulo di taglio. L'analoga struttura geometria, octet lattice ha il modulo di Young E più basso di tutte le superfici. Tutte le strutture cellulari tendono ad avere un Bulk modulus elevato. Tuttavia, si può concludere come i tre moduli elastici delle superfici TPMS tendano per alte densità relative al limite H-S anche se non contemporaneamente, questo a causa della loro particolare struttura a celle aperte. [19]

### 2.4.2 Anisotropia delle superfici TPMS

Al fine di valutare complessivamente le prestazioni dei materiali cellulari è opportuno caratterizzare l'anisotropia dei materiali cellulari. Per quantificare il livello di anisotropia si fa uso dello Zener Ratio. Viene mostrata in figura 21 la variabilità dello Zener Ratio al variare del valore di densità relativa.

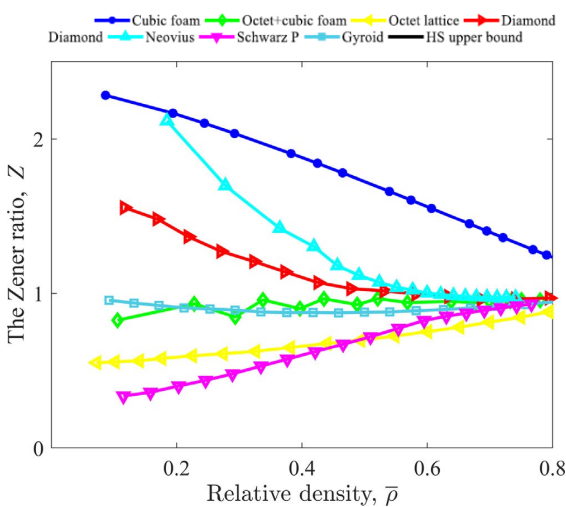


Figura 17- Dipendenza Zener Ratio dalla densità relativa [19]

Si può notare come per valori bassi di densità relativa l'indice Zener per le superfici TPMS tende ad allontanarsi notevolmente dal valore  $Z=1$ . Questo a rappresentare l'elevata anisotropia di tali strutture. Tuttavia, quando la densità relativa tende a valori maggiori di 0.5 si nota come l'indice anisotropo tenda al valore unitario  $Z=1$  mostrando un notevole miglioramento nel comportamento isotropo. Un comportamento particolare ricade sulla superficie Gyroid che per tutto il range di variabilità si mantiene costantemente vicino all'unità.

Lo stesso Zener Ratio viene espresso mediante la superficie del modulo di Young, tracciata in accordo con il valore del modulo di Young E valutato lungo tutte le direzioni. In particolare, la superficie Gyroid è caratterizzata da una superficie quasi sferica a rappresentare un comportamento vicino a quello isotropo, le superfici Neovius e Diamond hanno una superficie fortemente allungata lungo le 3 direzioni principali mentre la Schwarz P ha delle rientranze verso il centro. [19]

### 2.4.3 Rigidità delle superfici TPMS

Fondamentale per determinare il raggiungimento delle superfici TPMS al limite H-S, risulterà essere la valutazione dell'andamento della rigidità al variare della densità relativa, mostrato nell'immagine 22, ricavato mediante il metodo di omogeneizzazione.

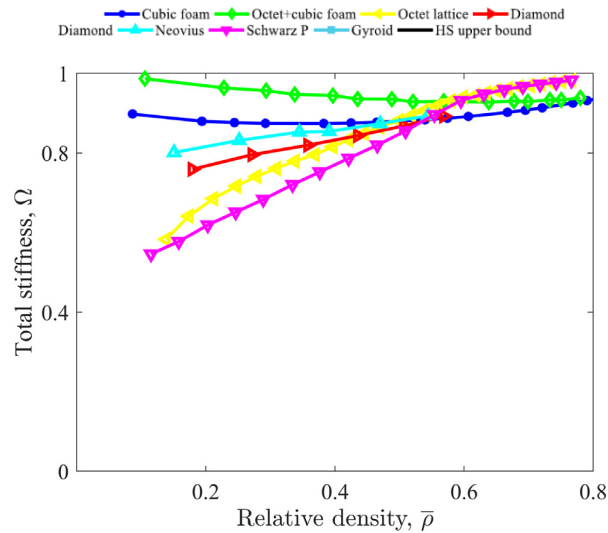


Figura 18- Dipendenza della rigidità totale rispetto la densità relativa [19]

Dagli andamenti si comprende come la struttura octet-cubic foam abbia il maggiore valore di rigidità per valori di densità relativa  $\rho_r > 0.5$ . Le superfici TPMS rispetto ai materiali truss-lattice hanno valori di rigidità notevolmente superiori, nonostante mostrino una scarsa rigidità per bassi valori della densità, mentre vedono un notevole incremento con migliori prestazioni per valori di  $\rho_r > 0.5$ . In particolare, le superfici Schwarz P e Neovius tendono ad un valore di rigidità unitaria per  $\rho_r = 0.8$ . [19]

## Capitolo 3

### 3. Lavoro sperimentale

Il capitolo seguente risulta essere il fulcro centrale di questo lavoro di tesi. Dopo aver discusso nel capitolo due tutte le proprietà meccaniche delle superfici TPMS al variare della densità relativa e aver compreso come tali superfici, prese singolarmente, non solo non permettono il raggiungimento dei limiti imposti di H-S ma presentano un'elevata anisotropia si è pensato di combinare tra loro differenti tipologie di strutture al fine di ottenerne una con comportamento macroscopicamente isotropo e possibile da stampare mediante tecnologia DLP. Verranno discussi argomenti pratici come la produzione dei provini necessari per comprendere le proprietà del materiale usato per la stampa delle superfici, le differenti composizioni al variare della densità relativa per la definizione delle nuove strutture, simulazione numerica tramite il software nTopology e prove meccaniche per verificare se i dati numerici combaciano con quelli ottenuti sperimentalmente.

#### 3.1 Caratterizzazione del materiale di base

Il materiale scelto come base per la fabbricazione delle nuove strutture, ottenute come combinazione di più superfici TPMS è stata la Liqcreate Premium Tough, un particolare tipo di resina trasparente. Al fine di riuscire a valutarne le proprietà meccaniche sono stati fabbricati differenti tipologie di provini.

##### 3.1.1 Fabbricazione dei provini

I provini fabbricati, per essere sottoposti a prove meccaniche fondamentali per determinare il modulo di Young e di Poisson, sono sia di forma cilindrica, di forma piatta e ad osso di cane riportati in figura 19. Le relative dimensioni dei provini risultano essere:

- 8 mm di diametro e 8 mm di altezza per i provini cilindrici
- Larghezza di 12,5 mm, lunghezza di 60 mm e spessore di 2.3 mm per i provini a osso di cane e a piastra.



Tutte le tipologie di provini sono state fabbricate mediante tecnologia Additive Manufacturing usufruendo della tecnica DLP e successivamente sottoposti a un procedimento di power led curing a 60 gradi, all'interno di una camera a raggi UV per 30 minuti. Tale trattamento si vede necessario per assicurare il raggiungimento di proprietà meccaniche e livelli di durezza adeguati.



Figura 19- Provini cilindrici a dx e provini a osso di cane a sx

### 3.1.2 Prove meccaniche e risultati ottenuti sulla resina Liqcreate Premium Tough

Al fine di riuscire a valutare con certezza le proprietà del nostro materiale costituente, gli stessi provini precedentemente creati sono stati sottoposti a prove meccaniche. Due sono state le prove svolte a seconda della forma dei provini. Quelli cilindrici sono stati sottoposti a una prova di compressione, i provini piatti a una prova di trazione denominata ASTM D790 e quelli ad osso di cane sempre a una prova di trazione definita ASTM D638 mostrata in figura 20 (a) e un ingrandimento in figura 20 (b).

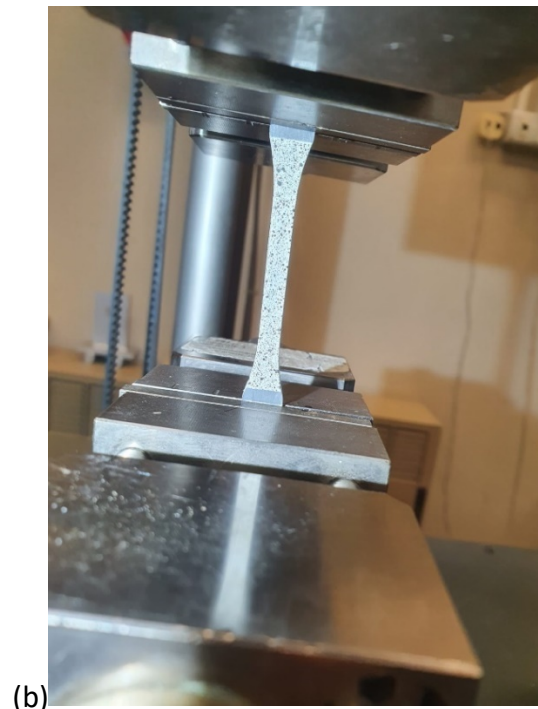
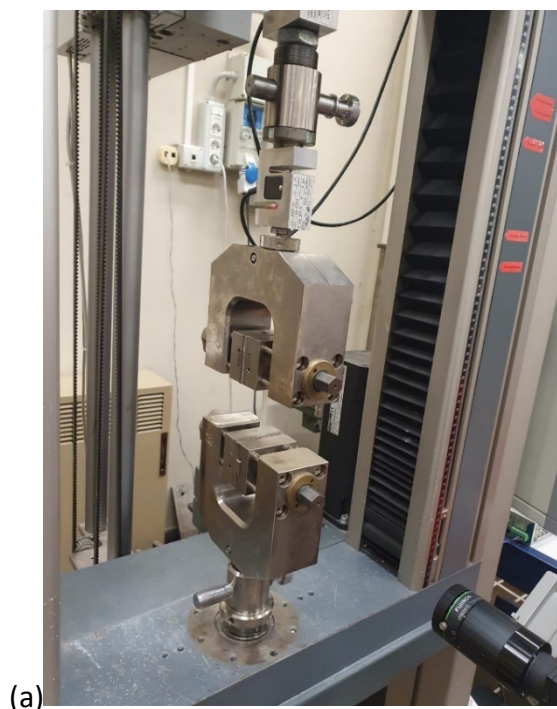


Figura 20- (a) Prova di trazione ASTM D638 e (b) ingrandimento su provino durante la prova

Facendo particolare attenzione alla prova di trazione, si è reso necessario effettuare un procedimento di tinteggiatura dei provini che prevede di tingere la loro base di bianco e successivamente la creazione di una rete di puntini neri. Tale procedimento è finalizzato all'ottenimento dello speckle rappresentato in figura 21.



Figura 21-Rappresentazione del procedimento di ottenimento dello speckle



La colorazione mostrata precedentemente è stata fondamentale per comprendere le deformazioni dei provini lungo tutte le direzioni permettendo di ricavare il modulo di Poisson grazie anche all'ausilio del programma LabView. Uno scatto è riportato nell'immagine 22. Tale programma è in grado, mediante una telecamera ad alta risoluzione, di scattare un notevole numero di immagini durante l'intera prova di trazione per poi andarle a comparare tra loro. In base alla deformazione misurata delle singole particelle nere su sfondo bianco si è riusciti a ricavare il modulo di Poisson della resina pari a  $\nu = 0.3$ .



Figura 22-Funzionamento di LabView durante la prova di trazione

Allo stesso modo oltre al modulo di Poisson, i dati ottenuti nelle differenti prove meccaniche sono stati riportati su un foglio excel andando a calcolare le relative tensioni e deformazioni sia nominali che vere al fine di ricavare il modulo di Young. In particolare:

➤ Tensione nominale  $s = \frac{F}{A}$

Con F la forza e A la sezione del provino.

➤ Deformazione nominale  $e = \frac{S}{L}$

Con S lo spostamento e L la lunghezza del tratto utile.

➤ Tensione vera  $\sigma = s(1 + e)$

Con s la tensione nominale ed e la deformazione nominale.

➤ Deformazione vera  $\varepsilon = \log_e(1 + e)$

Con e la deformazione nominale e la funzione logaritmo con base il numero di Nepero.

Tutti i risultati così ottenuti sono stati plottati permettendo di graficare le rispettive curve dei valori nominali e dei valori veri, confrontandole anche tra loro. Tutti i grafici sono mostrati in figura 23.

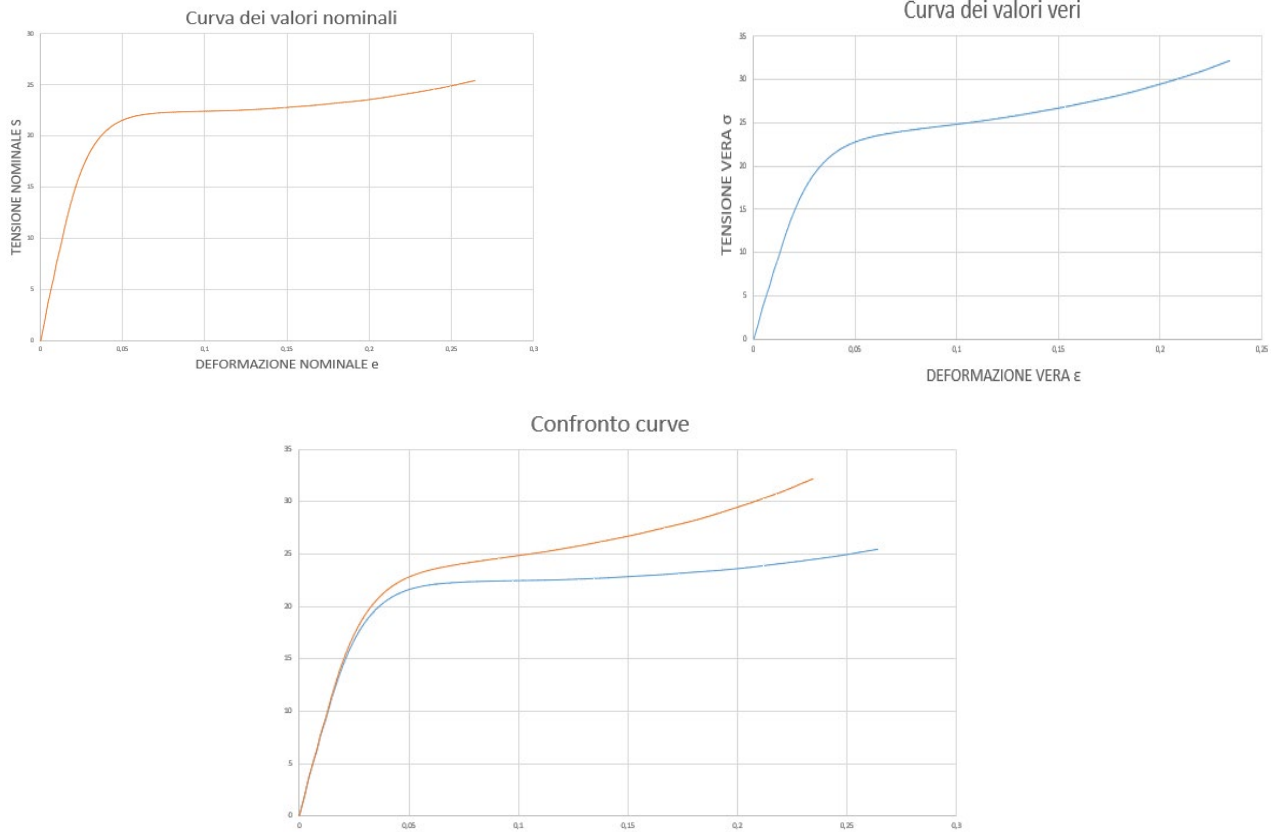


Figura 23- Curve caratteristiche del materiale di stampa

Per il calcolo del modulo di Young  $E$ , si è considerata la pendenza del tratto elastico, andando a plottare deformazioni e tensioni nominali da valori iniziali nulli fino al raggiungimento di uno spostamento pari a 0.734 mm e una forza di 147.96 N. Utilizzando la funzione mostra linea di tendenza si è ottenuta la retta  $y = 736.97 x$  mostrata in figura 24. In questo modo si è riusciti a calcolare il modulo di Young, come coefficiente angolare della retta di valore pari a  $E = 736.97 MPa$ .

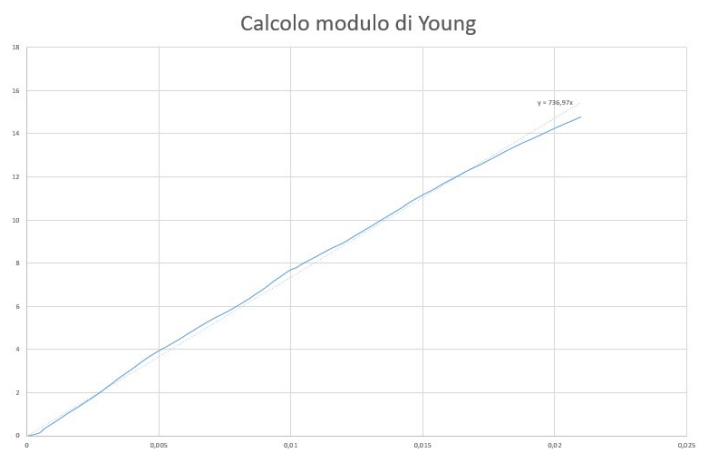


Figura 24- Calcolo modulo di Young

## 3.2 Determinazione della composizione ottimale di TPMS

Il cuore di questo lavoro sperimentale è stata la ricerca di una composizione di strutture TPMS in grado di mostrare un comportamento macroscopicamente isotropo, ossia assicurare uno stesso valore del modulo di Young in tutte le direzioni dello spazio. Lo stesso sarà confermato mediante un processo di omogeneizzazione andando a definire la superficie del modulo di Young che risulterà essere sferica.

### 3.2.1 Diagramma ternario con le strutture plate-lattices BCC, SC, FCC

Il punto di inizio di questo studio di tesi è nato riprendendo una ricerca effettuata sui plate-lattices, nella quale sono state considerate tre particolari strutture:

- BCC, cubica a corpo centrato.
- FCC, cubica a faccia centrata.
- SC, cubica semplice.

Entrambe le tre tipologie risultano essere fortemente anisotrope come dimostrato anche dalle superfici del modulo di Young notevolmente distanti da una forma sferica. Andando a combinare in percentuali differenti le strutture sottoposte a questo studio, si è giunti alla scoperta di opportuni accostamenti in grado di rendere la struttura complessiva macroscopicamente isotropa. In particolare, tre risultano essere le speciali combinazioni mostrate in figura 25:

- 80% di BCC e 20% di SC
- 30% di SC, 30% di FCC e 40% di BCC
- 60% di FCC e 40% di SC

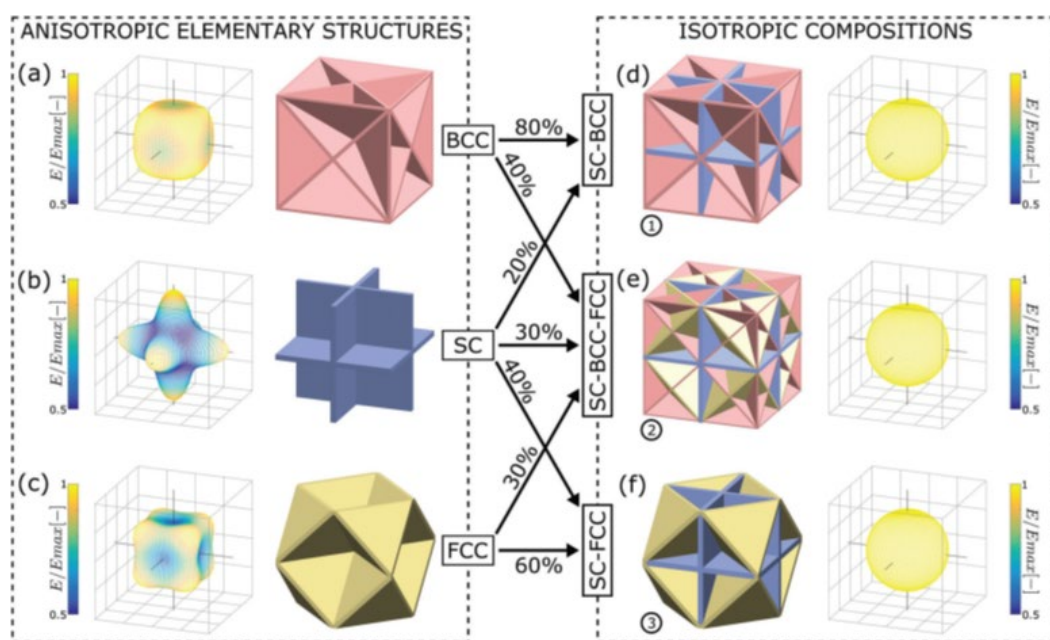


Figura 25- Particolari composizioni di plate-lattices isotrope [18]

Nello stesso studio, è stato creato un diagramma ternario, il quale mostra le infinite possibili combinazioni, con differenti percentuali, ottenibili dalla composizione delle tre strutture predefinite. Tale diagramma in figura 26, ha forma di un triangolo equilatero e lungo ognuno dei suoi cateti, vengono riportate le strutture oggetto di studio al variare della loro percentuale. La costruzione del diagramma è legata anche al valore del rapporto  $\frac{E_{min}}{E_{max}}$ . Lo stesso, viene rappresentato mediante differenti colorazioni a seconda del suo valore. Nei punti in cui tale rapporto tende al valore unitario, definito mediante il colore rosso, si delineano possibili composizioni con comportamento isotropo, la cui superficie del modulo di Young risulta essere una sfera. I casi limite determinati sono una composizione di SC-BCC (1), nella quale avremo 60% di FCC e 40% di SC e una di SC-FCC (2), con 80% di BCC e 20% di SC. [18]

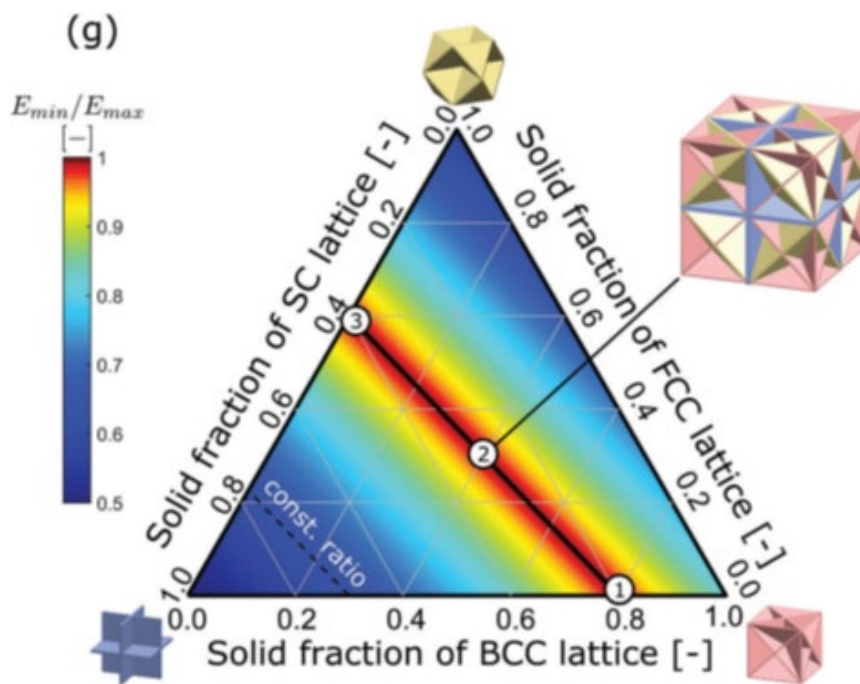


Figura 26- Diagramma ternario con le strutture Plate-Lattices [18]

Particolare attenzione è stata applicata alla lettura del diagramma, soprattutto per comprendere le percentuali relative alle singole composizioni determinate dall'intersezione delle linee rette, le quali rappresentano la percentuale costante di ogni singola struttura. In particolare, si è riusciti a definire ben 21 composizioni differenti. La lettura del grafico è abbastanza particolare, per ogni singola intersezione le relative percentuali delle tre strutture sono state determinate in questo modo:

considerando un generico punto ottenuto dall'incontro delle tre rette, ognuna a percentuale costante di una data struttura, per la FCC bisogna seguire la lettura a destra del grafico, per la BCC verso il basso a sinistra mentre per la SC verso l'alto a sinistra seguendo sempre le rette.

Risulterà più chiaro mediante un esempio mostrato in figura 27:

esaminiamo il punto denominato Caso 1 e Caso 2, ottenuti dall'intersezione delle tre rette. Per determinare i valori in percentuale di ogni struttura bisogna seguire il ragionamento precedentemente spiegato e mostrato adesso per via grafica al fine di una migliore comprensione. In questo modo siamo in grado di determinare tutte le configurazioni con le relative percentuali delle tre strutture fondamentali.

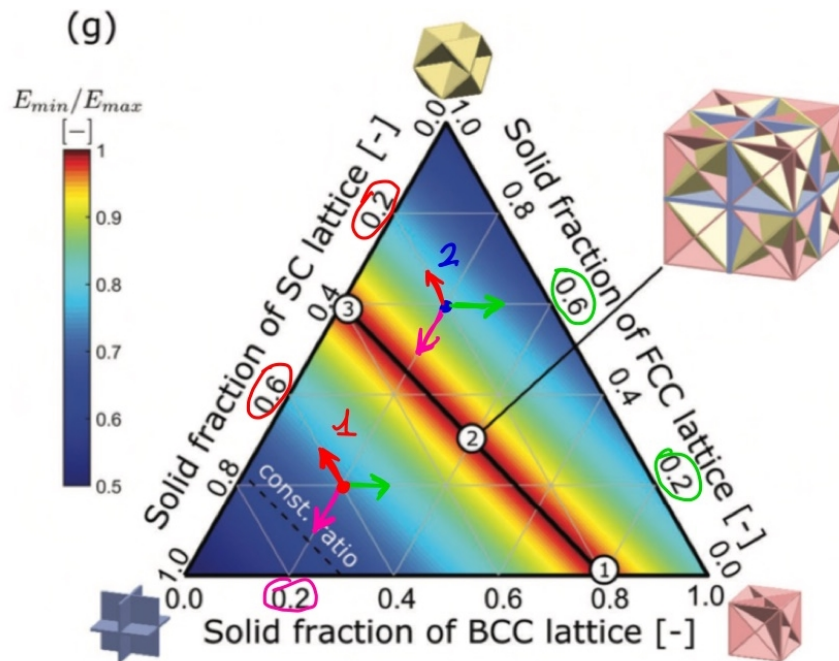


Figura 27- Esempi di lettura del diagramma ternario

### 3.2.2 Definizione dei casi di studio ottenuti come composizione di superfici TPMS

Con riferimenti allo studio esplicito nel paragrafo precedente, si è costruito un nuovo diagramma ternario non considerando più le tre strutture plate-lattices, ma combinando tra loro le differenti strutture TPMS. Le tre superfici scelte per tale lavoro sperimentale sono state la Neovius, Schwarz e Diamond. Si sono scelte queste tre superfici poiché, grazie al software di simulazione nTopology, le superfici del modulo di Young ottenute mediante omogeneizzazione sembravano essere tra loro complementari. Diversi sono stati i casi esaminati, in totale 21, ottenuti mediante variazioni delle percentuali di volume solido di ogni singola struttura, necessari per la costruzione del grafico ternario, fissando la densità relativa della struttura finale complessiva a  $\rho = 0.3$ . È possibile modificare la percentuale di ogni singola struttura andando a modificare la dimensione dello spessore della singola superficie.

I 21 casi di studio simulati attraverso il software risultano essere:

- (1) Caso A  
100% di Neovius
- (2) Caso 1  
20% di Schwarz e 80% di Neovius
- (3) Caso 2  
40% di Schwarz e 60% di Neovius
- (4) Caso 3  
60% di Schwarz e 40% di Neovius
- (5) Caso 4  
80% di Schwarz e 20% di Neovius
- (6) Caso B  
100% di Schwarz
- (7) Caso 5  
80% di Neovius e 20% di Diamond
- (8) Caso 6  
60% di Neovius, 20% di Diamond e 20% di Schwarz
- (9) Caso 7  
40% di Neovius, 40% di Schwarz e 20% di Diamond
- (10) Caso 8  
20% di Neovius, 60% di Schwarz e 20% di Diamond
- (11) Caso 9  
80% di Schwarz e 20% di Diamond
- (12) Caso 1  
40% di Diamond e 60% di Neovius
- (13) Caso 11  
40% di Diamond, 40% di Neovius e 20% di Schwarz

(14) Caso 12

40% di Diamond, 20% di Neovius e 40% di Schwarz

(15) Caso 13

40% di Diamond e 60% di Schwarz

(16) Caso 14

60% di Diamond e 40% di Neovius

(17) Caso 15

60% di Diamond, 20% di Neovius e 20% di Schwarz

(18) Caso 16

60% di Diamond e 40% di Schwarz

(19) Caso 17

80% di Diamond e 20% di Neovius

(20) Caso 18

80% di Diamond e 20% di Schwarz

(21) Caso C

100% di Diamond

Ognuno dei 21 casi è stato rappresentato con l'ausilio del programma di modellazione virtuale nTopology grazie al quale è stato possibile definire le singole strutture con valori differenti di spessore e comporle tra loro per ottenere le strutture finali. Oltre a tale procedimento, per ogni caso è stata calcolata la superficie del modulo di Young mediante la funzione di omogeneizzazione così da comprendere il comportamento delle stesse almeno per via teorica.

Da questa analisi sono risultate esistere diverse composizioni il cui comportamento almeno da un punto di vista macroscopico risulterebbe essere isotropo, confermato mediante due tipologie di approccio:

- Calcolo del modulo di Young lungo tutte le direzioni dello spazio, valutazione del rapporto  $E_{min}/E_{max}$  e rappresentazione della superficie del modulo di Young.
- Calcolo del rapporto Zener per ogni singola composizione.

Tanto più il rapporto tra i moduli di Young e il rapporto Zener tendono al valore unitario tanto più il comportamento della nostra nuova struttura risulta essere isotropo. I valori dei rapporti calcolati per ogni singolo caso sono riportati nella tabella 2.

	Neivous	Schwarz	Diamond	E/E	Z
	X	Y	Z	Value	Value
caso A	1	0	0	0,71012	1,48082
caso 1	0,8	0,2	0	0,73592	1,421
caso 2	0,6	0,4	0	0,91265	1,1102
caso 3	0,4	0,6	0	0,83322	0,81241
caso 4	0,2	0,8	0	0,66129	0,62515
caso B	0	1	0	0,61713	0,57558
caso 5	0,8	0	0,2	0,69909	1,49044
caso 6	0,6	0,2	0,2	0,76648	1,34487
caso 7	0,4	0,4	0,2	0,98393	1,004
caso 8	0,2	0,6	0,2	0,75908	0,73057
caso 9	0	0,8	0,2	0,65706	0,62678
caso 10	0,6	0	0,4	0,75264	1,37613
caso 11	0,4	0,2	0,4	0,87327	1,16724
caso 12	0,2	0,4	0,4	0,93171	0,92969
caso 13	0	0,6	0,4	0,77824	0,75882
caso 14	0,4	0	0,6	0,81265	1,26196
caso 15	0,2	0,2	0,6	0,92954	1,08208
caso 16	0	0,4	0,6	0,8975	0,88926
caso 17	0,2	0	0,8	0,85717	1,18978
caso 18	0	0,2	0,8	0,98681	1,0032
caso C	0	0	1	0,89738	1,1317

Tabella 2- Rapporto tra i moduli di Young e rapporto Zener

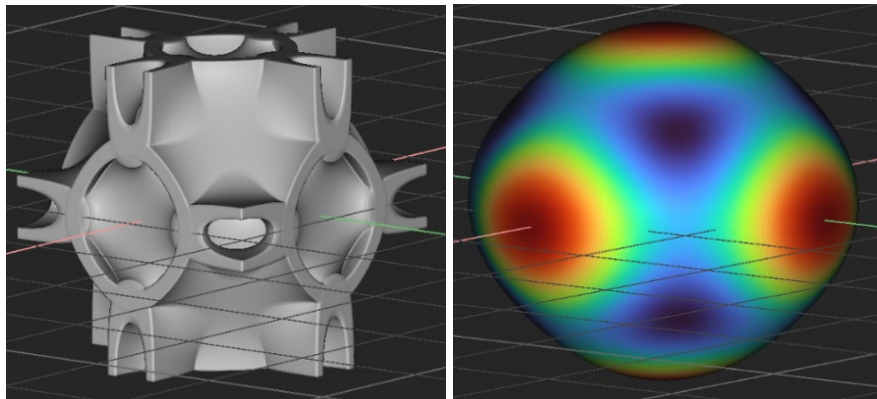
Com'è possibile notare anche nella tabella 2 vengono evidenziati di giallo quei particolari casi per i quali il rapporto tra i moduli di Young e il rapporto Zener tendono all'unità. Risultano evidenti cinque particolari strutture per le quali è possibile almeno teoricamente, mediante i due differenti approcci, ottenere un comportamento macroscopicamente isotropo. Risultano essere i casi:

- Caso 2 in figura 28
- Caso 7 in figura 29
- Caso 12 in figura 30
- Caso 15 in figura 31
- Caso 18 in figura 32

Mostriamo la composizione tridimensionale, il tensore elastico e la superficie del modulo di Young per ognuno dei casi seguenti.



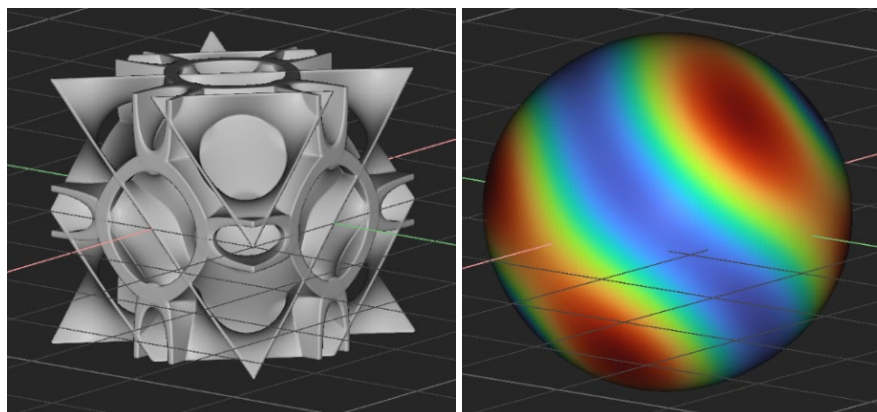
**Caso 2**



1,08E+13	4,67E+12	4,67E+12	1984.37	-7165.53	4687.14
4,67E+12	1,08E+13	4,67E+12	-1196.5	-9154.45	3737.6
4,67E+12	4,67E+12	1,08E+13	7970.11	-7853.95	12648.3
1984.37	-1196.5	7970.11	2,81E+10	8937.13	-9000.61
-7165.53	-9154.45	-7853.95	8937.13	2,81E+12	2878.13
4687.14	3737.6	12648.3	-9000.61	2878.13	2,81E+12

Figura 28- Rappresentazione tridimensionale, tensore elastico e superficie di Young caso 2

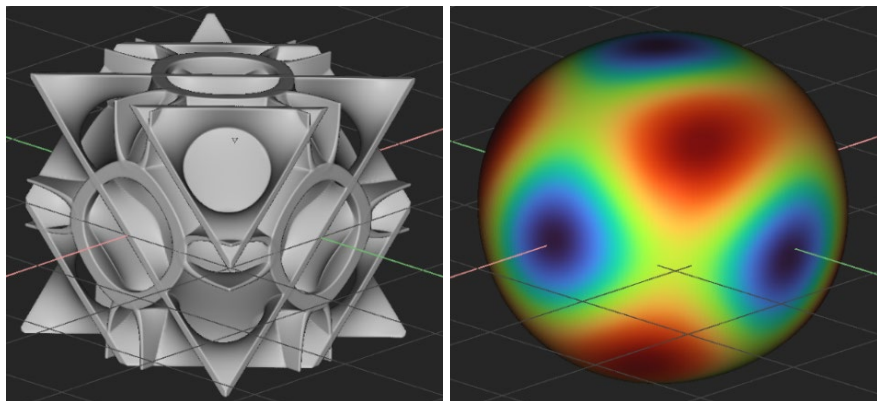
**Caso 7**



1,12E+13	5,11E+12	5,11E+12	-169056	206641	-161606
5,11E+12	1,12E+12	5,11E+12	-165613	-157754	210970
5,11E+12	5,11E+12	1,12E+13	202308	-154578	-158895
-169056	-165613	202308	3,04E+12	-135957	-129877
206641	-157754	-154578	-135957	3,03E+12	-135364
-161606	210970	-158895	-129877	-135364	3,04E+12

Figura 29- Rappresentazione tridimensionale, tensore elastico e superficie di Young caso 7

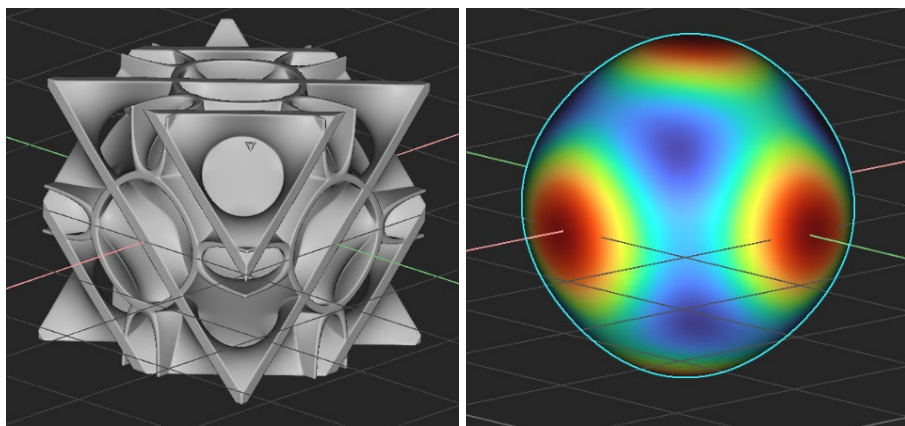
**Caso 12**



1,18E+13	5,54E+12	5,53E+12	-463043	-138065	-459467
5,54E+12	1,18E+12	5,53E+12	-464139	-462018	-140583
5,53E+12	5,53E+12	1,18E+13	-137526	-460673	-456539
-463043	-464139	-137526	3,39E+12	-329565	-331722
-138065	-462018	-460673	-329565	3,39E+12	-336766
-459467	-140583	-456539	-331722	-336766	3,39E+12

Figura 30- Rappresentazione tridimensionale, tensore elastico e superficie di Young caso 12

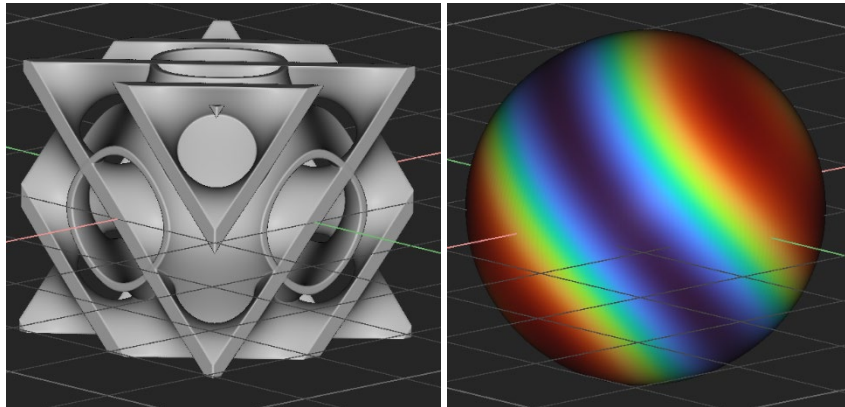
**Caso 15**



1,22E+13	5,33E+12	5,32E+12	-320615	-252923	-321173
5,33E+12	1,22E+13	5,33E+12	-320810	-317207	-255749
5,32E+12	5,33E+12	1,22E+13	-255585	-317485	-320296
-320615	-320810	-255585	3,19E+12	-194681	-192036
-252923	-317207	-317485	-194681	3,19E+11	-193993
-321173	-255749	-320296	-192036	-193993	3,19E+12

Figura 31- Rappresentazione tridimensionale, tensore elastico e superficie di Young caso 15

**Caso 18**



1,29E+13	5,78E+12	5,78E+12	-655705	-714226	-655643
5,78E+12	1,29E+13	5,78E+12	-660105	-648356	-714502
5,78E+12	5,78E+12	1,29E+13	-724625	-642372	-650007
-655705	-660105	-724625	3,55E+12	-215351	-211705
-714226	-648356	-642372	-215351	3,55E+12	-218817
-655643	-714502	-650007	-211705	-218817	3,55E+10

Figura 32- Rappresentazione tridimensionale, tensore elastico e superficie di Young caso 18

Proprio il caso 18, grazie alla sua struttura tridimensionale priva di celle chiuse quindi ottimale per la produzione tramite Additive Manufacturing con tecnologia DLP, è stata scelta come campione da stampare, al fine di essere sottoposto a prove meccaniche per verificare se i dati ottenuti mediante simulazione numerica coincidono con quelli ottenuti sperimentalmente. In particolare, si è proceduto allo stampaggio di ben tre campioni denominati Test 1, Test 2 e Test 3 del caso 18, andando a inclinare la superficie in tre direzioni differenti come mostrato in figura 33 per permettere di valutare il modulo di Young lungo tali direzioni tramite prove di compressione.

**Test 1**

**Test 2**

**Test 3**

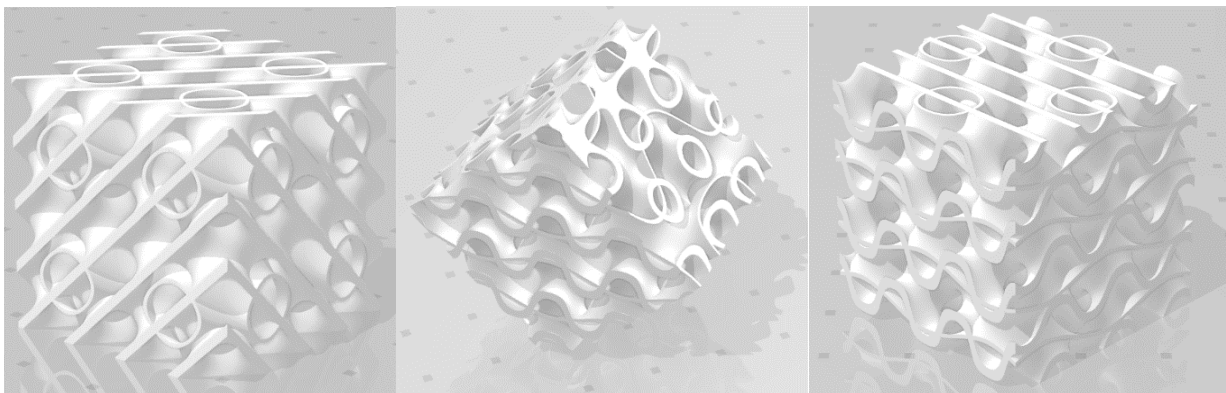


Figura 33- Rappresentazione dei tre provini stampati del caso 18

### 3.2.3 Prove di compressione sui tre campioni del caso 18

Successivamente alla fabbricazione dei tre provini rappresentativi del caso 18, gli stessi sono stati sottoposti a prove di compressione per ricavare le curve nominali e calcolare il loro modulo di Young. Vengono mostrate diverse immagini dei tre provini, rispettivamente per il test 1 in figura 34, il test 2 in figura 35 e il test 3 in figura 36, che rappresentano:

- La loro superficie matematica. (a)
- La corrispondente forma tridimensionale reale. (b)
- Scatti rappresentativi dell'andamento della deformazione durante le prove di compressione. (c, d)

#### Test 1

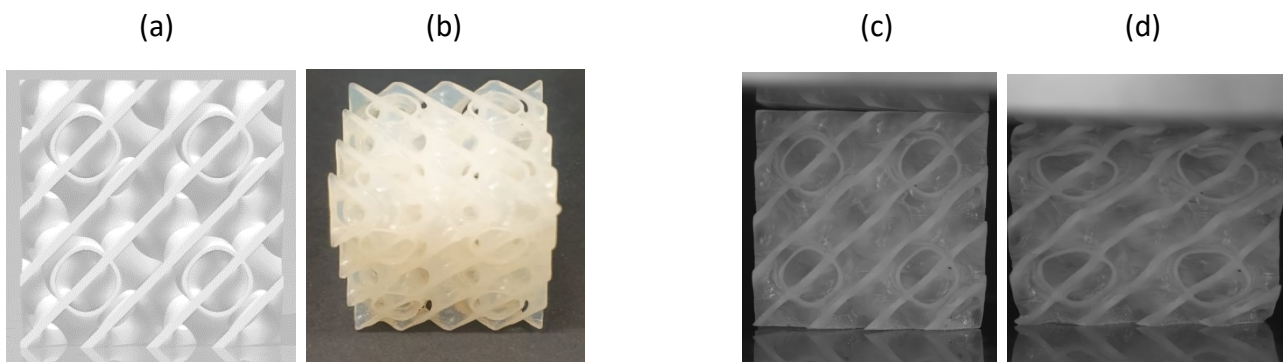


Figura 34- Immagini relative al test 1 del caso 18

#### Test 2

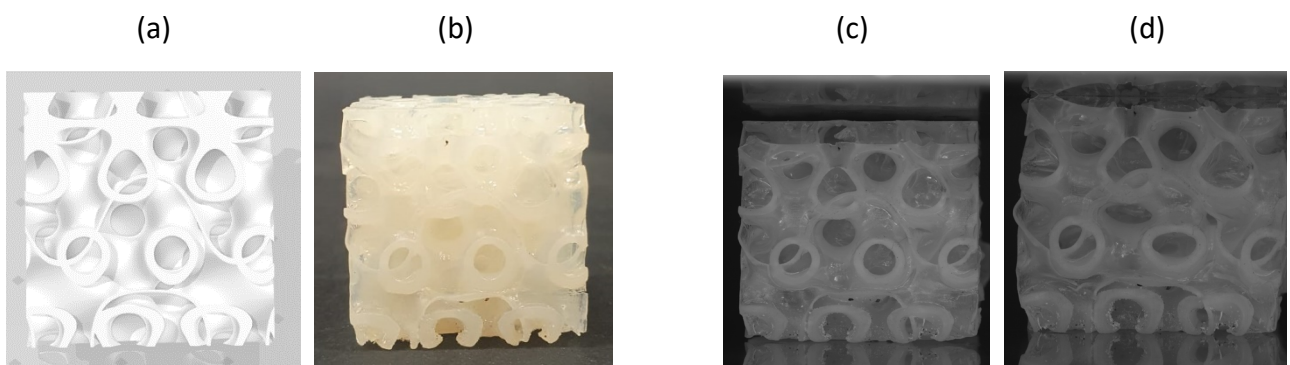


Figura 35- Immagini relative al test 2 del caso 18

### Test 3

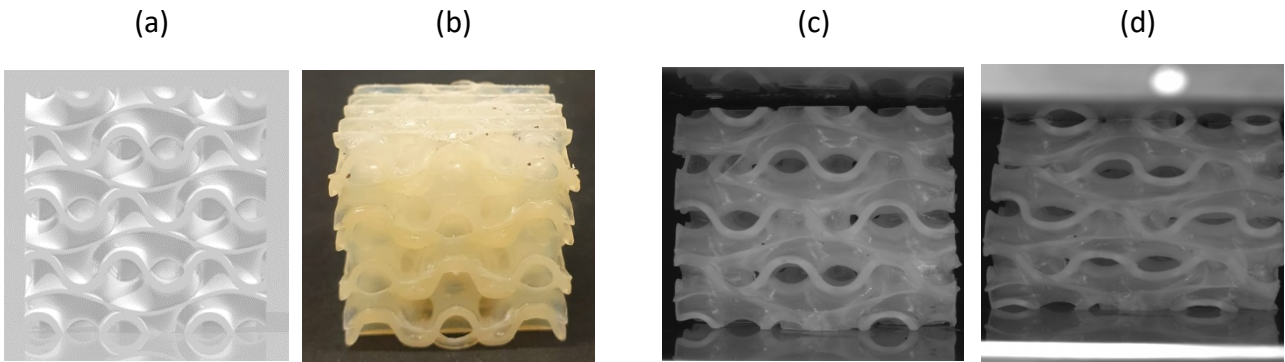


Figura 36- Immagini relative al test 3 del caso 18

### 3.2.4 Rappresentazione del diagramma ternario con le superfici TPMS

Tutti i dati forniti dalle simulazioni numeriche, ricavati grazie al software nTopology e alla funzione di omogeneizzazione sono stati raccolti in tabelle e caricati sul software Matlab. Qui attraverso un opportuno codice si è riusciti a definire due diagrammi ternari con le superfici TPMS di riferimento quali Schwarz, Neovius e Diamond. Un primo diagramma in figura 37 in dipendenza del rapporto tra i moduli di Young per permettere di confrontarlo con il diagramma ternario ottenuto con le strutture plate-lattices, il secondo invece considerando la variazione del rapporto Zener mostrato in figura 38.

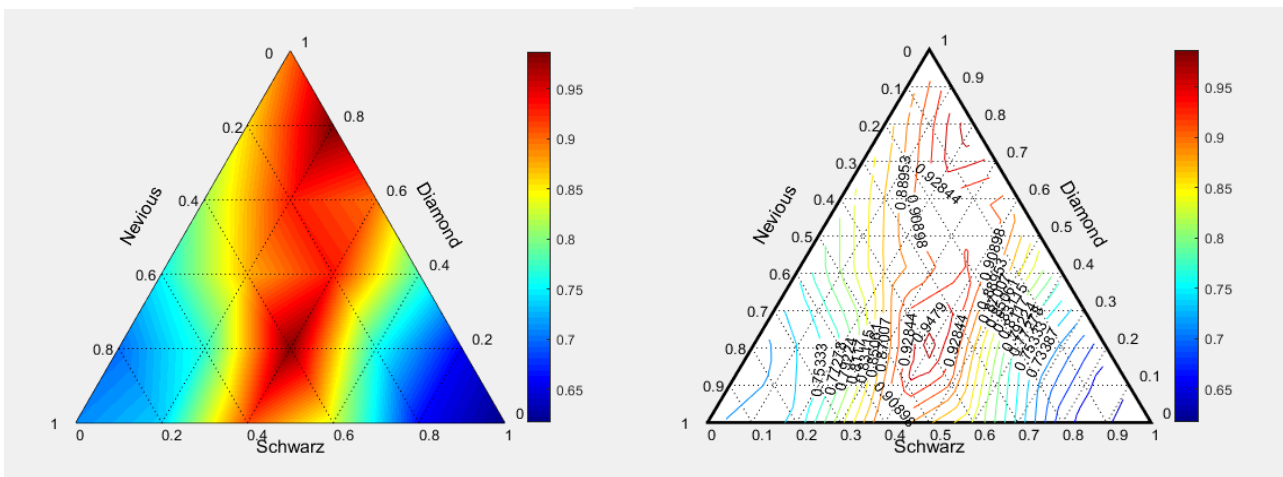


Figura 37- Diagramma ternario in dipendenza del rapporto tra i moduli di Young

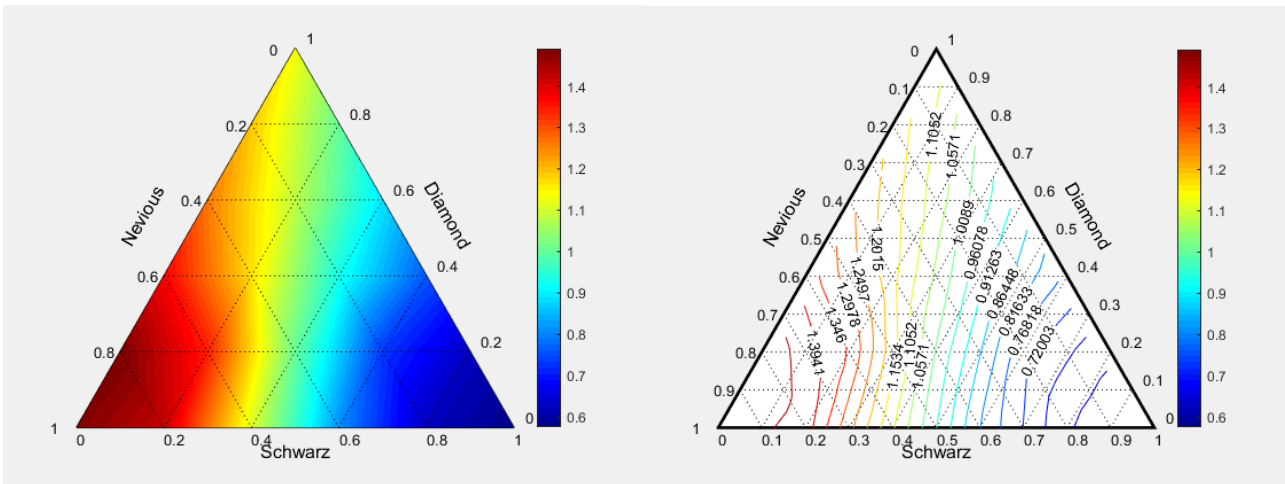


Figura 38- Diagramma ternario in dipendenza del rapporto Zener

Nel primo diagramma rappresentato in figura 37, si possono riconoscere due particolari zone nelle quali il rapporto tra i moduli di Young è molto vicino al valore unitario ma in modo particolare si accentua la caduta del medesimo nella zona centrale del grafico passando da un valore di 0.9479 a valori di 0.908. Invece si può notare dal grafico in figura 38 come sia possibile riconoscere una curva lungo la quale il rapporto Zener tende all'unità, ad indicare come dalle strutture contenute nella curva ci si aspetta un comportamento isotropo almeno rispetto a questo secondo approccio.

## Capitolo 4

### 4. Conclusioni

Effettuate le prove di compressione sui tre provini, sono stati raccolti tutti i dati dell'allungamento e della forza nominale istante per istante. Sono state calcolate le deformazioni e le tensioni nominali rispettivamente per ogni singolo test e plottate le relative curve nominali rappresentate in figura 39 per il test 1, 40 per il test 2 e 41 per il test 3. Viene mostrata nell'immagine 42 la sovrapposizione delle stesse curve così da poterle confrontare.

Test 1

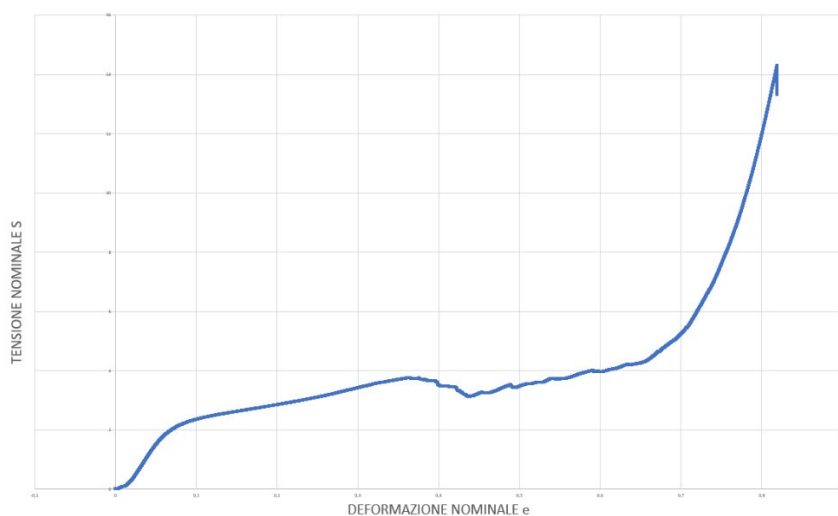


Figura 39- Curve nominali tensione deformazione relative al Test 1

Test 2

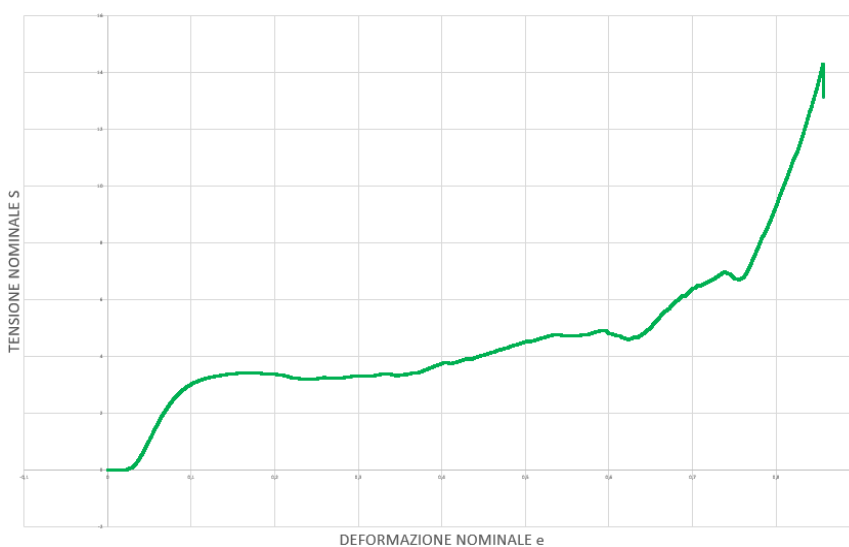


Figura 40- Curve nominali tensione deformazione relative al Test 2

### Test 3

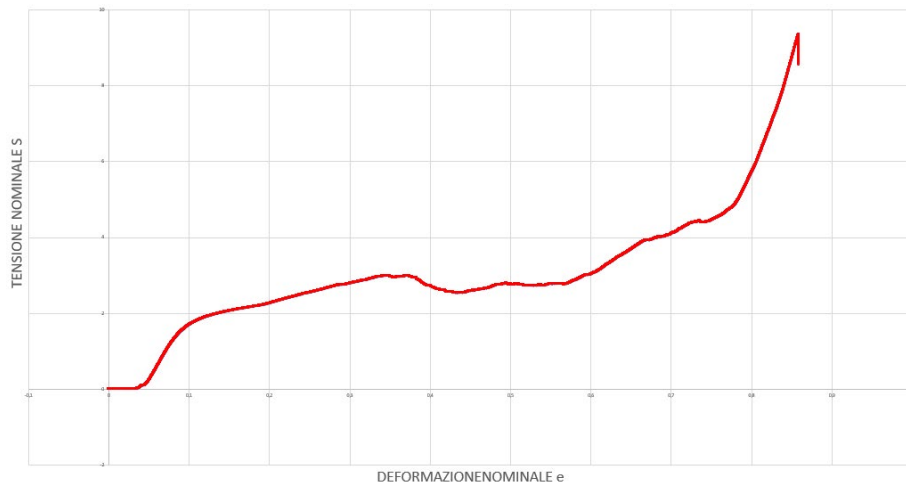


Figura 41- Curve nominali tensione deformazione relative al Test 3

### Confronto delle tre curve nominali

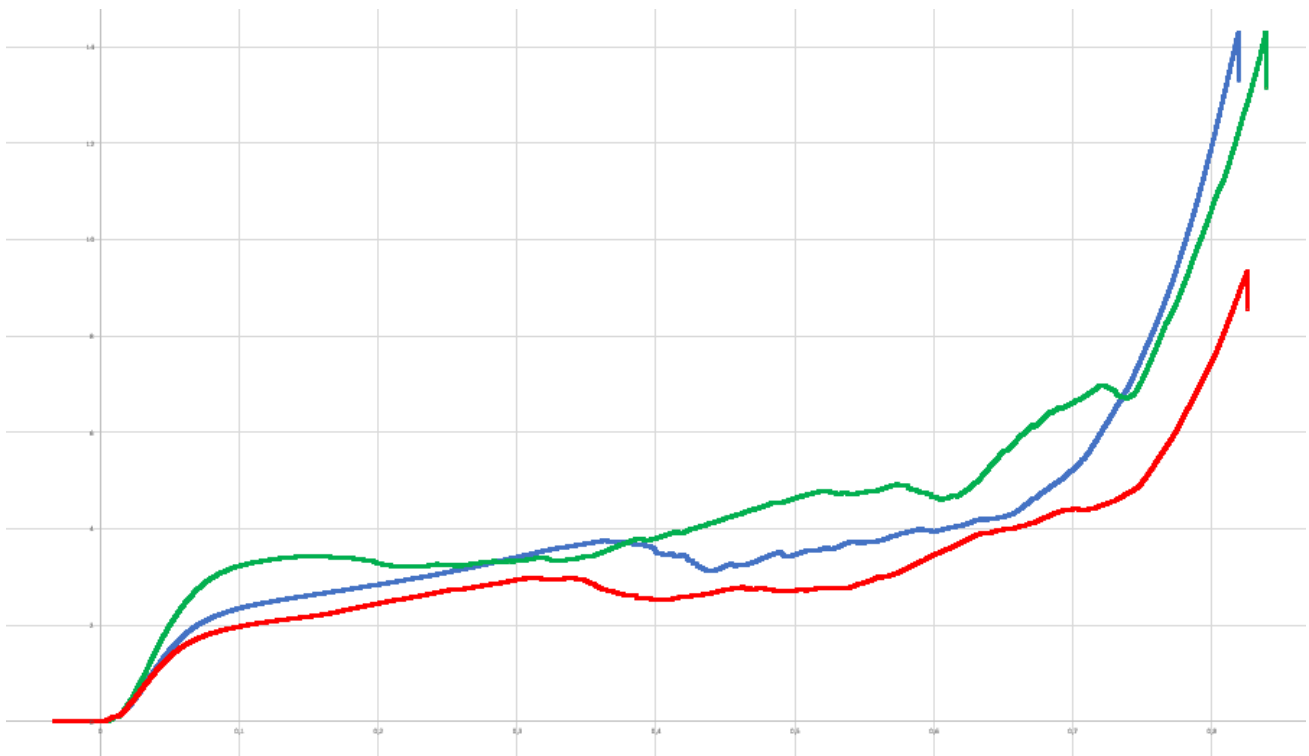


Figura 42- Confronto delle tre curve nominali



Determinate le tre curve nominali, dal loro confronto, si può notare come le curve rossa e blu coincidano perfettamente sia nel campo elastico sia nel campo plastico mentre invece la curva verde tende a seguire un andamento differente, dovuto a diverse variabili: la qualità dei provini non perfettamente ottimale, la difficoltà di stampa delle strutture a causa dei bassi valori di densità ed effetti legati al trattamento di post-cure complici della modifica delle proprietà delle strutture. Al fine di dimostrare un comportamento isotropo del Caso 18, si è proceduto al calcolo del modulo di Young ricavandolo dalle stesse curve nominali come pendenza del tratto elastico mediante la funzione linea di tendenza verificando che in entrambi i due casi ossia Test 1 e 3, meno nel caso del Test 2 per effetti sopra citati, essi combaciano a dimostrazione del comportamento isotropo confermando i dati ottenuti mediante simulazione. Viene mostrato il calcolo del modulo di Young per ogni singolo campione nella figura 43.

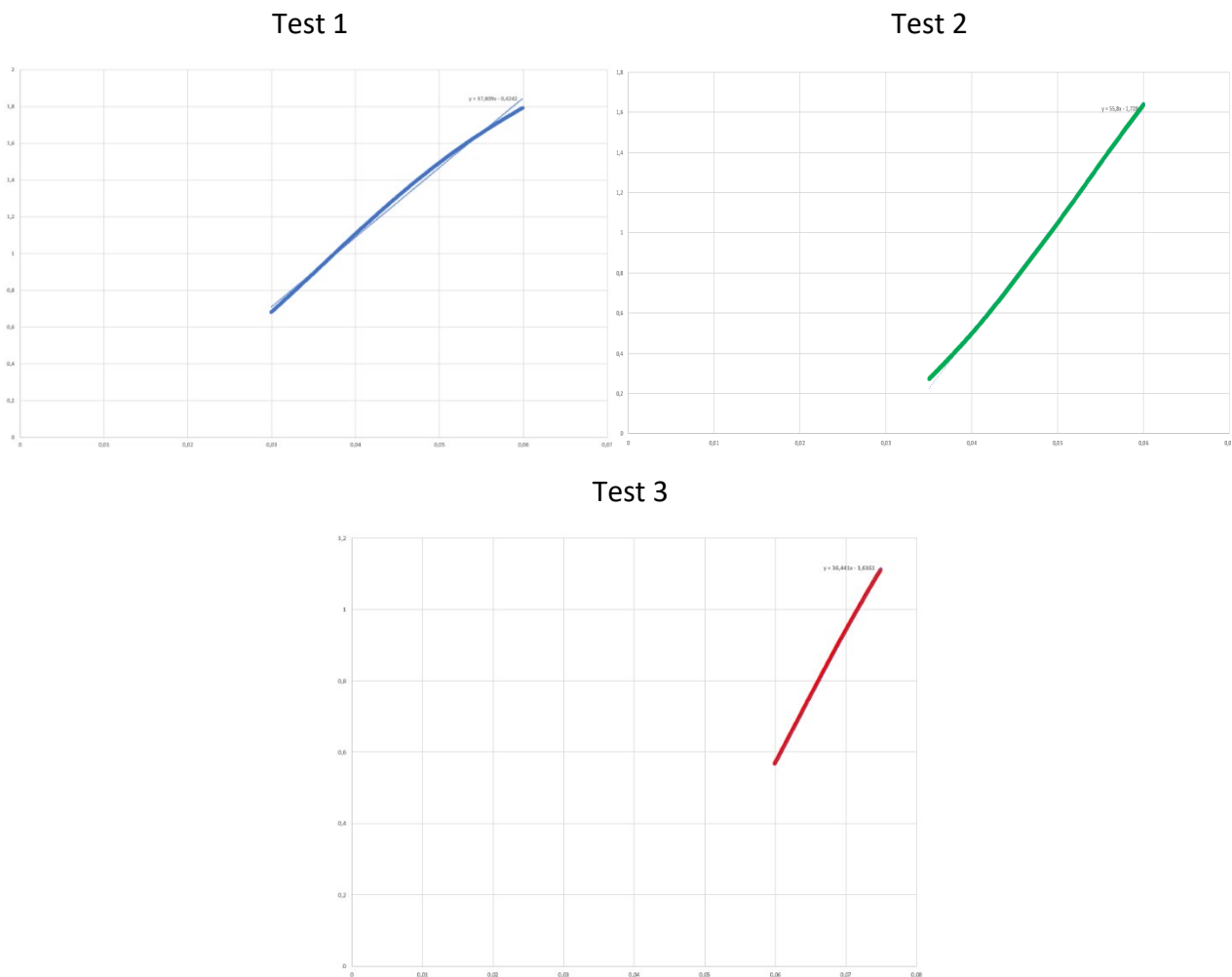


Figura 43- Calcolo dei moduli di Young nei tre test

Come è possibile notare dal grafico, il modulo di Young per i test 1 e 3 coincidono perfettamente, in particolare risulta:

- Per il Test 1  $E= 37,8 \text{ Mpa}$
- Per il Test 2  $E= 55,8 \text{ Mpa}$
- Per il Test 3  $E=36,4 \text{ Mpa}$

A conferma dei dati ottenuti matematicamente, la struttura rappresentativa del Caso 18 riporta un comportamento macroscopicamente isotropo.

# Bibliografia

- [1] Come funziona una stampante 3D.
- [2] Additive manufacturing & 3D printing in design and engineering.
- [3] «Storia ed evoluzione della stampa 3D | Yndetech,» [Online]. Available: <https://www.yndetech.com/storia-ed-evoluzione-della-stampa-3d/>.
- [4] «Additive manufacturing: cos'è e come funziona la manifattura additiva | Internet4Things,» [Online]. Available: <https://www.internet4things.it/iot-library/che-cose-il-3d-printing-e-come-si-colloca-nellambito-industry-4-0-e-iot/>.
- [5] «Processo di stampa 3d : dall'idea all'oggetto finito - Maker Miky,» [Online]. Available: <https://www.makermiky.com/2020/10/processo-di-stampa-3d/4/>.
- [6] T. N. V. S. R. K. Satish Prakash, «Additive Manufacturing Techniques in Manufacturing -An Overview,» *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, pp. 3873-3882, 2018.
- [7] La Stampa 3D può cambiare le economie mondiali?.
- [8] «Le principali differenze tra materiali termoplastici e termoindurenti - Ansa Compositi Group,» [Online]. Available: <https://compositi.it/le-principali-differenze-tra-materiali-termoplastici-e-termoindurenti/>.
- [9] «TDS-Liqcreate-Premium-Tough-V2-07-10-2020.pdf,» [Online]. Available: <https://www.liqcreate.com/wp-content/uploads/2022/01/TDS-Liqcreate-Premium-Tough-V2-07-10-2020.pdf>.
- [10] «Top 10 Materials that are Used in Additive Manufacturing Technology - Additive Accelerator,» [Online]. Available: <https://www.additiveaccelerator.com/top-10-materials-that-are-used-in-additive-manufacturing-technology/>.
- [11] J. P. K. M. L. G. L. D. R. A. M. B. A. C. David Bourell, «Materials for additive manufacturing,» *CIRP Annals*, vol. 66, pp. 659-681, 2017.
- [12] V. S. J. Aniket Jadhav, «A review on 3D printing: An additive manufacturing technology,» *Materials Today: Proceedings*, 2022.
- [13] S. Nath e S. Nilufar, «An Overview of Additive Manufacturing of Polymers and Associated Composites,» *Polymers*, 2020.
- [14] Stampa 3d – Tecniche di Additive Manufacturing.
- [15] Stereolithography.

- [16] SLA e DLP: quale tecnologia di stampa 3D basata su resina scegliere?.
- [17] Laminated Object Manufacturing of Ceramic-Based Materials.
- [18] T. D. M. G. M. B. B. C. M. D. Tancogne-Dejean, «3D Plate-Lattices: An Emerging Class of Low-Density Metamaterial Exhibiting Optimal Isotropic Stiffness,» *Advanced Materials*, 2018.
- [19] Y. M. X. X. W. Z. W. Q. L. S. Z. Zeyao Chen, «On hybrid cellular materials based on triply periodic minimal surfaces with extreme mechanical properties,» *Materials & Design*, vol. 183, n. 108109, pp. 0264-1275, 2019.
- [20] O. A. A.-R. R. K. Al-Ketan, «MSLattice: A free software for generating uniform and graded lattices based on triply periodic minimal surfaces,» *Material Design & Processing Communications*, vol. 3, 2021.
- [21] «Hashin–Shtrikman bounds - SubSurfWiki,» [Online]. Available: [https://subsurfwiki.org/wiki/Hashin%E2%80%93Shtrikman\\_bounds](https://subsurfwiki.org/wiki/Hashin%E2%80%93Shtrikman_bounds).
- [22] E. Mariani, «Additive Manufacturing (polito.it),» [Online].
- [23] Esempi di strutture plate-lattices.

## Ringraziamenti

Non ci avrei mai creduto, mi sembrava un traguardo lontano eppure eccomi qua, seduto sulla scrivania a concludere il mio lavoro di tesi. Quasi non riesco a crederci, sento i brividi al solo pensiero di quel tanto sognato giorno che oramai è alle porte. È accaduto tutto così in fretta, sembra ieri che per la prima volta entravo in aula per seguire i precorsi. Tante cose sono successe in questi tre anni, sono cresciuto sia dal punto di vista professionale che interiore. Desidero ringraziare tutte le persone che mi hanno affiancato in questo percorso spronandomi a dare il meglio di me per puntare sempre in alto. È grazie a loro se sono riuscito ad arrivare fin qui.

In principio ringrazio il relatore di questo lavoro di tesi: il **Prof. Marco Sasso**, per la sua professionalità e disponibilità che lo contraddistingue.

Ringrazio il correlatore: il **Dott. Mattia Utzeri**, vero e proprio punto di riferimento in questo percorso. Mi ha sempre accompagnato passo per passo, trovando una soluzione a qualsiasi mio dubbio con preziosi suggerimenti trasmettendomi l'amore e la costanza che lui stesso prova verso la progettazione.

Non posso che ringraziare la **mia famiglia**, i **miei genitori**, **mamma papà** siete state le mie guide in questo cammino, la mia fonte di ispirazione, la mia luce nelle tenebre. Mi avete sempre confortato, sostenuto ogni passo di questo lungo viaggio. A te **bro** non posso che ringraziarti per essere sempre riuscito a strapparmi un sorriso, con il tuo fare e carattere sprizzante di gioia, mi sei sempre stato vicino con un messaggio, una chiamata, era come se fossi ogni istante affianco a me.

Che dire degli amici di una vita: **Della, Nick, Vlad, Saitto**... anche se le nostre strade si sono divise, anche se non ci vediamo spesso, sappiamo che possiamo sempre contare l'uno sull'altro, una catena invisibile ci unisce andando oltre ogni distanza, una parte di questo traguardo è anche vostro.

Un ringraziamento speciale va allo **Study Group**, non saprei come avrei fatto senza di voi. Le videochiamate, le ore passate a studiare in polifunzionale, le pause lunghe un'eternità, le notti per capire una formula ma alla fine aveva sbagliato il prof. Non posso che dirvi grazie, non posso che ringraziarvi per avermi sempre spronato a crescere, a migliorarmi, siete stati un gruppo studio meraviglioso.

Grazie al gruppo **Scout Ancona 4** per avermi accolto come un fratello e fatto sentire a casa, grazie a **Luca** (Aki) e a **Don Alessio**, siete stati un'ancora per me, due punti fissi ai quali aggrapparmi, due stelle nell'infinità dello spazio, esempi di vita e del vivere a servizio degli altri.

Quelli a cui devo tutto però siete voi, il **gruppo Serate Uscite Univpm**. Siete balzati nel mio cuore come un fulmine a cielo sereno, senza accorgermene siete entrati nella mia vita e non ne siete più usciti. Con voi ho passato le migliori serate universitarie, le sbronze, le risate, i tuffi al passetto, i viaggi a macerata e le feste organizzate che finivano sempre con la luci lampeggianti. Non conosco parole con le quali esprimere l'affetto che provo per voi, uno ad uno vi ringrazio:

**Simone, Alessia, Alessio, Alice, Beatrice, Carlo, Chiara, Diego, Edoardo, Emanuele, Emilio, Federico, Francesca, Giulia, Giuseppe, Lorenzo, Luigi, Marco M, Marco P, Miriana, Paolo, Pasquale, Riccardo, Siria, Stefano, Vincenzo, Youssef.**

Vi ringrazio per aver allietato questi tre anni di università, vi ringrazio per esserci sempre stati, per le mille avventure passate insieme. Avete lasciato in me una traccia indelebile, custodirò ogni singolo ricordo che ho con voi. Con le lacrime agli occhi, con le farfalle nello stomaco e qualche goccia sul foglio non mi rimane che dirvi che mi mancherete, mi mancherà tutto di voi. Spero di avervi lasciato un piccolissimo segno di me, con la mia voglia di giocare, tra scherzi e risate, dandovi fastidio perché è così che ho mostrato il mio affetto per voi.

E infine non posso che ringraziare **me stesso**, la mia forza di volontà, il mio animo che mi ha sempre spinto a dare il massimo per giungere al traguardo.

Adesso è davvero **Traggica**... troppi sono i fazzoletti che ho accumulato sulla scrivania è ora che vada a dormire.

Matteo Montemurro