



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Meccanica

Caratterizzazione sperimentale di materiali polimerici e di metamateriali torcenti tramite prove meccaniche di compressione

**Experimental characterization of polymeric materials and twisting metamaterials
by mechanical compression tests**

Relatore:

Prof. Sasso Marco

Tesi di Laurea di:

Giannini Yuri

Correlatore:

Dott. Utzeri Mattia

A.A. 2022 / 2023

SOMMARIO

1.INTRODUZIONE.....	5
2. STATO DELL'ARTE	8
2.1 MATERIALI CELLULARI.....	8
2.2 METAMATERIALI.....	9
2.3 METAMATERIALI TORCENTI	12
2.3.1 RICHIAMI COMPRESSIONE E TORSIONE.....	13
2.4 ADDITIVE MANUFACTURING	17
3. MATERIALI E PROCEDURE SPERIMENTALI.....	20
3.1 RESINE TERMOINDURENTI	20
3.2 DEFINIZIONE E RICERCA TOPOLOGICA	23
3.3 PRODUZIONE	25
3.4 MATERIALI BASE: DOGBONE E CILINDRO	30
3.5 FABBRICAZIONE PROVINI: GYROIDE.....	32
3.6 PROVE MECCANICHE EFFETTUATE SU PROVINI BASE	35
3.6.1 PARTICOLARITA' PROVA DI TRAZIONE	35
3.7 TESTING-RISULTATI OTTENUTI DAI TEST EFFETTUATI PROVINI BASE.....	36

3.7.1 APPROFONDIMENTO.....	37
3.8 TESTING-RISULTATI OTTENUTI DAI TEST EFFETTUATI GYROIDE..	39
3.8.1 MACCHINA PROVA DI COMPRESSIONE	39
3.8.2 ELIMINAZIONE ATTRITO.....	40
3.8.3 OPERAZIONI ESEGUITE FASE DI TEST.....	42
4. RISULTATI E DISCUSSIONE.....	45
4.1 ANALISI E INTERPRETAZIONE RISULTATI.....	45
4.2 GRAFICI.....	50
4.3 COMMENTI GRAFICI GYROIDE CON IL 15% E 35% DI DENSITA'.....	52
4.4 CURIOSITA'-COMMENTO GRAFICO GYROIDE 25% DI DENSITA.	53
4.5 CONFRONTO RISULTATI OTTENUTI CON PROVINI DI VARIE DENSITA'.....	55
5. CONCLUSIONI	59
5.1 RINGRAZIAMENTI.....	59
6. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	61

1. INTRODUZIONE

L'obiettivo di questa tesi è la caratterizzazione sperimentale di materiali polimerici e di metamateriali torcenti tramite prove meccaniche di compressione, i quali se sottoposti ad uno sforzo di compressione vanno in torsione, un fenomeno affascinante che apre nuove possibilità. Il lavoro svolto durante il tirocinio si è sviluppato in varie fasi: la realizzazione tramite Additive Manufacturing di provini base (dogbone e cilindro) e Gyroide con varie densità, prove meccaniche fondamentali di trazione e compressione, estrapolazione e analisi risultati su MatLab ed infine il confronto dei risultati ottenuti con i vari provini di varie densità.

Complessivamente, nella prima fase sono stati realizzati e analizzati i provini base, dogbone e cilindro; in una seconda fase è stata realizzata e analizzata una singola struttura (cella) Gyroide, ma con varie densità da 15% e 35%. Nella macchina, per la prova di compressione sono stati fatti tre slot di prove, bloccando la rotazione, lasciando la rotazione libera, infine è stato eseguito l'ultima prova testando provini senza effetto twist, ogni prova è stata effettuata per ogni provino con densità diverse; quindi, complessivamente sono stati studiati:

- 3 provini dogbone;
- 2 provini cilindrici;
- 6 provini Gyroide, di cui 2 Gy twist 15% di densità; 2 Gy twist 35% di densità; 1 Gy Ntwist 15% di densità; 1 Gy Ntwist 35% di densità;

Uno studio particolare è incentrato sulla curva stress-strain di questi materiali, la quale rivela una buona capacità di assorbire energia.

L'obiettivo del lavoro consiste in una prima fase di stampare provini base, i quali verranno poi sottoposti a prove meccaniche di trazione e compressione, così da comprendere le proprietà del materiale usato per la stampa delle superfici; ed una seconda fase del lavoro che consiste nel dedicarci all'approfondimento delle proprietà meccaniche di queste strutture torcenti, concentrandoci in particolare sulla loro capacità di assorbire energia. In tal modo, potremo comprendere appieno il potenziale di questi materiali innovativi e contribuire allo sviluppo di soluzioni ingegneristiche sempre più avanzate.

Una volta eseguiti i test ed estrapolati i vari risultati dalle prove, si effettuerà un'analisi dei risultati ottenuti tramite il software MatLab, così da confrontare i vari provini con densità diverse ed ottenere le conclusioni.

I provini sono stati ingegnerizzati sul software nTopology, finita la fase di progettazione si è passati alla stesura del ciclo di realizzazione, dove la scelta è ricaduta nell'ottenere i provini per Additive Manufacturing tramite tecnologia di fotopolimerizzazione (DLP), il comportamento dei materiali è stato trovato misurando tramite tecnica a immagini lo spostamento assiale per ricavarsi la deformazione normale dovuta alla compressione e lo spostamento lungo la circonferenza del cuscinetto su cui si poggia la base, infine estrapolando i dati si sono ottenuti i valori necessari per poter tracciare la caratterizzazione del materiale. Rispettivamente i grafici ottenuti per le diverse topologie sono:

- grafici di trazione e compressione dei materiali base;
- grafici di variazione della deformazione al variare della forza applicata, efficienza, valore dell'energia ed infine grafici dell'energia normalizzati rispetto al modulo di Young dei provini base, dei Gyroidi.

Il capitolo "Stato dell'arte" fornisce una panoramica dei materiali cellulari e metamateriali, dalla loro storia all'utilizzo dei metamateriali torcenti. Questi materiali sono importanti nell'ingegneria moderna perché offrono nuove possibilità di progettazione e produzione. Il capitolo prosegue discutendo della principale tecnica di produzione dei metamateriali, la manifattura additiva, con particolare attenzione alla stampa di polimeri termoindurenti. Infine, il capitolo presenta le sollecitazioni studiate, compressione e torsione.

Il capitolo "Materiale e Procedure Sperimentali" inizia introducendo il materiale utilizzato per i provini e le ragioni di tale scelta. Successivamente, il capitolo descrive tutte le operazioni svolte durante la fase di progettazione e sperimentazione, includendo una descrizione dei macchinari utilizzati. Infine, il capitolo illustra la tecnica utilizzata per ridurre al minimo l'attrito nella prova dei twist metamaterial.

Nel capitolo "Risultati e Discussione" vengono riportati i risultati ottenuti dalle prove sperimentali di caratterizzazione meccanica dei provini, per essere discussi in modo critico pensando ai possibili utilizzi di questi materiali osservandone i risultati ottenuti, infine vengono riportate tutte le problematiche incontrate nelle diverse fasi di sviluppo del progetto, ideazione, realizzazione e interpretazione dei risultati.

2.STATO DELL'ARTE

2.1 Materiali cellulari

Il concetto precursore dei metamateriali è il materiale cellulare, ovvero quel tipo di materiale composto da due fasi, solida più aeriforme, la quale è composta da piccoli vuoti interconnessi ripetuta spazialmente in modo da formare una cella continua, la fase aeriforme è dispersa tramite pori i quali possono essere disposti:

- in maniera non controllato, come nel caso di schiume, spugne, e in più in generale tutte quelle strutture che rispettino il vincolo di possedere due fasi disperse in modo non controllato e replicate, questo tipo di materiali possono essere sia naturali come nel caso del legno, sughero, scheletro umano, ecc., che artificiali cioè creati in appositi siti produttivi disperdendo il gas più comunemente aria all'interno della matrice solida;
- in maniera controllata, progettando l'architettura finale della posizione dei pori all'interno della matrice, si possono avere sia strutture 2-dimensionale che strutture 3-dimensionale (come i lattice material), è all'interno di questa classificazione che rientrano i metamateriali studiati in questo lavoro.

Queste strutture, caratterizzate da una struttura interna altamente porosa, rappresentano una classe di materiali straordinariamente versatili, che stanno rivoluzionando numerosi settori dell'ingegneria, della scienza dei materiali e dell'industria, la quale conferisce loro proprietà fisiche e meccaniche in modo significativo, come leggerezza, elevata resistenza, buona capacità di assorbimento di energia.

2.2 Metamateriali

In generale, un metamateriale, dunque, è un materiale realizzato artificialmente con proprietà non presenti in natura date sia dalla sua composizione chimica sia dalla sua geometria. Sono strutture caratterizzate da proprietà meccaniche definite dalla trama ripetitiva con la quale sono disposte le “celle” di cui sono costituiti, più che dal materiale stesso con cui sono realizzati. Si può dire che la nascita dei metamateriali è dovuta soprattutto da una esigenza umana di cercare dei materiali sempre più prestanti, cercando di avere più leggerezza e resistenza. Questo incremento di prestazione del materiale si può raggiungere tramite la chimica trovando elementi che hanno particolari proprietà per poi essere combinati tra loro e osservare le caratteristiche ottenute; oppure come nel caso dei metamateriali lo si può fare modificando la topologia, cioè la disposizione geometrica della materia nello spazio. Questo si traduce nella ricerca di materiali sempre più prestanti dal punto di vista grafico, analizzando la figura 2.2.1 si vede come la regione di ricerca contrassegnata dalla croce rossa sia spostata in alto a sinistra a indicare un materiale che abbia una alta resistenza e una bassa densità come nel caso dei materiali cellulari.

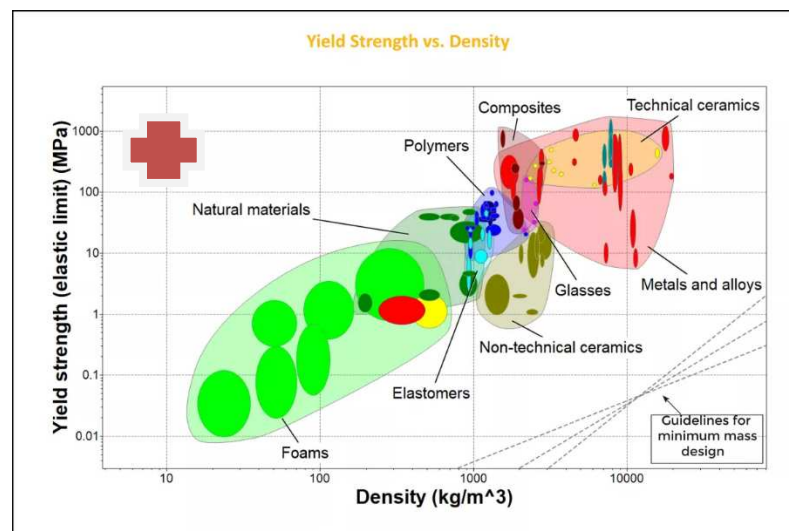


Figura 2.2.1

Il termine metamateriale fu coniato nel 1999 da Rodger M. Walser dell'Università del Texas ad Austin. Egli definì i metamateriali come:

“ Compositi macroscopici aventi una architettura tridimensionale cellulare periodica e sintetica progettata per produrre una combinazione ottimizzata, non disponibile in natura, di due o più risposte a una specifica sollecitazione. ”

Dalla definizione si intuisce già la loro enorme potenzialità datagli soprattutto dalla possibilità di eseguire la programmazione delle proprietà finali desiderate non solo meccaniche, ma anche ottiche.

Inizialmente lo studio di questi materiali era incentrato su proprietà ottiche perché essi possiedono una straordinaria peculiarità ovvero un indice di rifrazione negativo con in quale si stanno studiando la possibilità di avere dei sistemi occultamento radar, dato che questi funzionano calcolando il tempo di ritorno di onda luminosa, il metamateriale reindirizzando l'onda in una direzione perpendicolare alla direzione di provenienza dell'onda sarebbe potenzialmente in grado di schermare l'oggetto posto dietro di esso a sistemi di avvistamento che si basano sulla propagazione nello spazio di onde sia che esse siano luminose o non ,successivamente si iniziarono a fare i primi studi sul comportamento meccanico in cui si sono affermate in particolare due frontiere di ricerca:

- La prima riguarda l'auxteicità ovvero avere un coefficiente di Poisson negativo questo comporta che se la struttura è compressa invece che formare la classica forma a botte con dimensioni ridotte in altezza e aumento della larghezza non costante per via dell'attrito nelle superficie all'interfaccia, va a formare una struttura ridotta in altezza insieme a una contemporanea riduzione generalizzata della larghezza come si può notare nella figura 2.2.2, un comportamento insolito rispetto ai materiali tradizionali.
- La seconda riguarda il comportamento a compressione del materiale ed è qui che in particolare si soffermerà lo studio, questo tipo di configurazione è in grado di convertire la sollecitazione di compressione in sollecitazione di torsione come mostrato nella figura 2.2.3., i cosiddetti Twisting Metamatirial, che subiscono una

torsione quando vengono sottoposti a uno sforzo normale di compressione, un fenomeno affascinante che apre nuove possibilità.

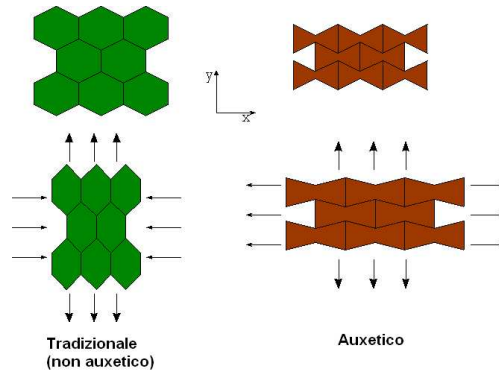


Figura 2.2.2

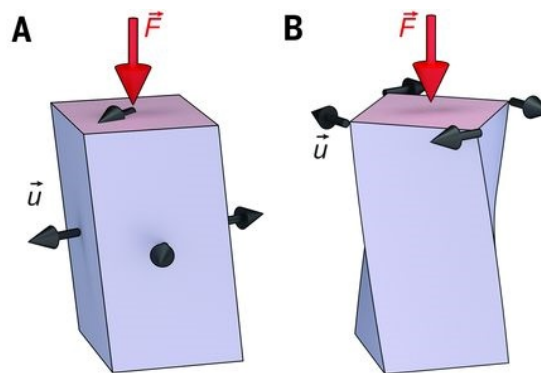


Figura 2.2.3

2.3 Metamateriali torcenti

Come detto in precedenza, i twist metamaterials (metamateriali torcenti) sono una sottofamiglia dei metamateriali aventi la caratteristica di andare in torsione quando sottoposti a compressione, lo sviluppo temporale di questi lo si può ripercorre partendo dal concetto di chiralità (dal greco χείρ, "mano") è la proprietà di un oggetto rigido (o di una disposizione spaziale di punti o atomi) di essere non sovrapponibile alla sua immagine speculare, da questo concetto ideato all'inizio del 900 vengono ideate le prime strutture 2-dimensionali con questa particolarità, andando avanti nel tempo fino alla fine del ventesimo secolo quando iniziò il paradigma delle tecnologie per la stampa 3D, che permise la produzione di strutture chirali 3-dimensionali aventi la proprietà di twistare, questo frangente è molto importante perché fa capire il legame intrinseco tra questi materiali e la loro tecnologia di produzione, si riporta immagine che indica quanto detto

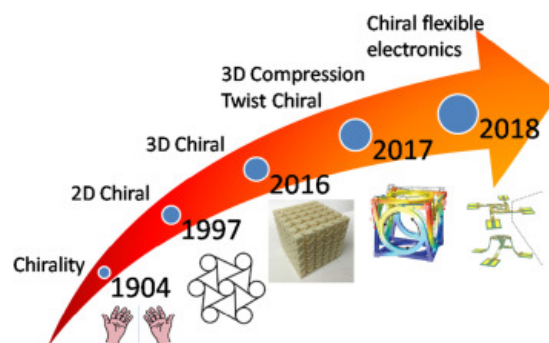


Figura 2.3.1

Sono di notevole interesse per questa famiglia di metamateriali le strutture origami. Il campo di applicazione di questi materiali ha ancora un perimetro vasto e poco definito essendo che, come si può vedere, sono relativamente nuovi come materiali, ma comunque sono stati condotti diversi studi come questo che mostrano la capacità di questa configurazione di assorbire energia derivante da un impatto, come si vedrà in seguito la curva stress-strain ha un platò molto pronunciato il che tradotto in termini ingegneristici significa avere un'alta capacità di assorbire energia.

2.3.1 Richiami compressione e torsione

Dato che si studieranno Metamateriali torcenti dove è stata spiegata la loro peculiarità vengono riportate le due sollecitazioni principali che si noteranno durante l'esecuzione della prova la prima ovvero quella di input sarà quella di compressione, mentre quella di output sarà quella di torsione.

Compressione: indica nella meccanica uno degli sforzi elementari mono assiali normali alla superficie di riferimento al quale può essere sottoposto un corpo, comporta una riduzione di altezza come si può notare nell' immagine riportata.

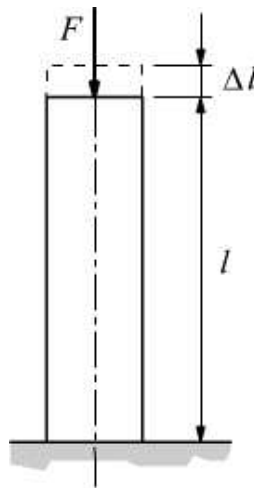


Figura 2.3.2

Per descrivere questa sollecitazione meccanica a livello matematico si utilizzano le stesse equazione valide per la sollecitazione di trazione dal momento che agiscono entrambe in direzione normale al corpo quindi il vettore che rappresenta la tensione di trazione e di compressione è lo stesso in modulo e direzione ma non nel verso.

$$\sigma = \frac{N}{A}$$

Dove N rappresenta la forza normale in questo caso rivolta verso il basso, mentre A rappresenta il dominio di regione su cui tale forza agisce.

Un modo alternativo di rappresentare la compressione è attraverso altri due parametri di deformazione e modulo di elasticità, la deformazione indicata con:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_i}$$

un rapporto adimensionale che esprime quanto si è deformato un corpo che mette in relazione la variazione di spostamento parametrizzandolo alla lunghezza iniziale, l'altro parametro è il modulo di elasticità (E) valutato come pendenza nel tratto lineare della curva sforzo-deformazione che si riporterà in seguito, indica una proprietà intrinseca del materiale, materiali che hanno modulo di Young grande si dicono *poco deformabili* o, impropriamente rigidi (ad esempio i metalli), mentre quelli con E piccolo si dicono *deformabili* (ad esempio materiali polimerici) come quelli studiati in questo lavoro, ritornando alla compressione ora è possibile descriverla grazie a queste due grandezze con la nota formula di Hooke $\sigma = E\varepsilon$.

Per estendere il risultato e poter applicare l'equazione sopra in maniera da tale da avere una caratterizzazione completa del solido nelle tre direzioni spaziali è necessario introdurre la legge di Hooke generalizzata dove le tensioni e deformazioni non sono espressi da numeri scalari ma da tensori che descrivono il comportamento delle grandezze nello spazio.

La matrice sotto riportata va sotto il nome Legge costitutiva dei materiali, studia il comportamento di un solido sottoposto a tensioni.

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{yz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{xxxx} & C_{xxxy} & C_{xxzz} & C_{xxxxy} & C_{xxxzx} & C_{xxxyz} \\ C_{yyxx} & C_{yyyy} & C_{yyzz} & C_{yyxy} & C_{yyxz} & C_{yyyzy} \\ C_{zzxx} & C_{zzyy} & C_{zzzz} & C_{zzxy} & C_{zzxz} & C_{zzzy} \\ C_{xyxx} & C_{xyyy} & C_{xyzz} & C_{xyxy} & C_{xyxz} & C_{xyyz} \\ C_{xzxz} & C_{xzyy} & C_{xzzz} & C_{xzxxy} & C_{xzxzx} & C_{xzxzy} \\ C_{yzxx} & C_{yzyy} & C_{yzzz} & C_{yzxy} & C_{yzzx} & C_{yzyzy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yz} \end{bmatrix}$$

La matrice 6x6 dei coefficienti C_{ijkl} rappresenta il tensore dell'elasticità che fa le veci di E modulo di Young nelle tre direzioni.

Riportata in forma compatta si presenta nella forma

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}\varepsilon_{kj}$$

Torsione:

La torsione consiste in una sollecitazione semplice derivante dal momento torcente M_t , indicato con un vettore giacente sull'asse del componente che comporta una tendenza alla rotazione opposta sulle due facce, generando un angolo rispetto alla sezione inderformata, per semplicità di trattazione si riporta una sezione circolare piena per descrivere in maniera analitica quanto accade dal punto di vista meccanico dove il momento lo si può calcolare come

$$M_t = \frac{G\theta}{l}J$$

Dove

G = modulo di elasticità trasversale

θ = angolo di torsione

l = lunghezza

J = momento di inerzia polare della sezione

Dalla formula precedente è possibile ricavarsi l'angolo di torsione conoscendo il momento torcente applicato.

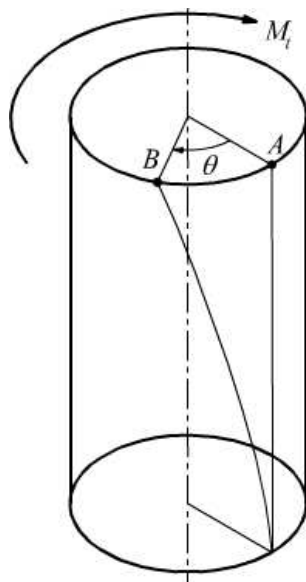


Figura 2.3.3

La problematica che si riscontra con questo tipo di materiali è la non validità di quanto scritto sopra, ovvero per la teoria di Cauchy; quindi, bisogna approcciare il problema con altre teorie più evolute come la teoria del gradiente di deformazione o la teoria del microcontinuum, quest'ultima è la più utilizzata per questi materiali di questo tipo per la sua convenienza matematica dove la matrice 6x6 di Cauchy viene trasformata in una matrice 9x9 per tenere conto del comportamento a torsione.

La definizione rigorosa del problema elastico lineare richiede l'individuazione dei campi che soddisfano contemporaneamente l'equilibrio, la compatibilità cinematica e le equazioni costitutive.

La cinematica di un continuo micropolare è caratterizzata dall'introduzione di un campo di deformazione aggiuntivo prodotto dal campo di microrotazione. Le microrotazioni sono indipendenti dal campo degli spostamenti. Essendo ϕ il vettore delle microrotazioni nel punto il tensore di deformazione micropolare ε_{ij} è espresso come:

$$\varepsilon_{ij} = U_{j,i} - e_{kij} \theta_k$$

Dove $U_{j,i}$ è il vettore spostamento, θ_k è il vettore microrotazione e e_{kij} è il simbolo della permutazione di Levi-Civita e il pedice indica la derivata parziale della quantità rispetto i . Già si nota la presenza del termine microrotazionale che fa differire l'equazione da quella classica.

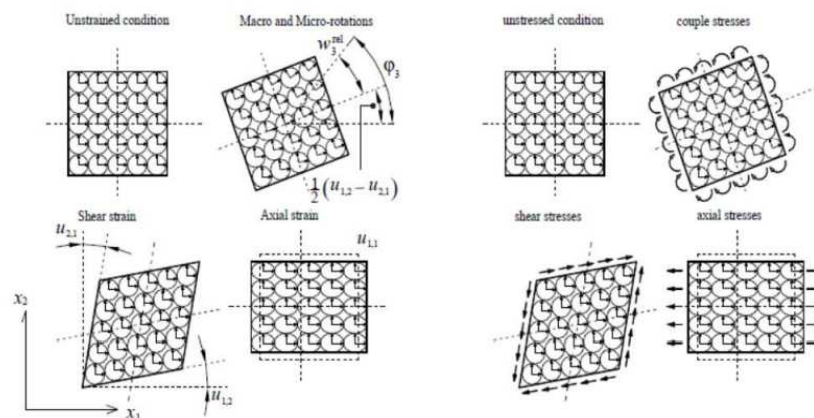


Figura 2.2.

2.4 Additive manufacturing

La stampa 3D è il processo di creazione di oggetti depositando strati di materiale uno sull'altro. La stampa 3D è chiamata manifattura additiva (AM), cioè il corpo viene creato depositando file di materiale uno sopra l'altro a strati, invece nei tradizionali metodi sottrattivi, come le operazioni al CNC, che hanno come filosofia di lavorazione a partire dal pieno per arrivare al pezzo finito.

Questo si traduce in enorme semplificazione dal punto di vista della libertà di progettare e realizzare pezzi con parti molto complesse difficilmente ottenibili con altri processi, questa tecnologia esiste da circa quattro decenni, essendo stata inventata all'inizio degli anni Ottanta.

Se all'inizio la stampa 3D era una tecnica lenta e costosa, gli ampi sviluppi tecnologici hanno reso le odierne tecnologie AM più accessibili e veloci che mai, la ricerca moderna sta spingendo molto su questa tecnologia per i risultati che può portare che ancora non sono noti è stata definita un'invenzione in grado di rivoluzionare l'industria manifatturiera cambiando completamente visione del processo produttivo, c'è chi l'associa come importanza all'avvento della macchina a vapore, se inizialmente era utilizzata per lo più come strumento di ricerca acerbo e ad uso hobbistico, oggi si sta iniziando ad intravedere l'utilizzo di questa tecnologia come sostituta di altre lavorazioni, per fare degli esempi basti pensare alla produzione in serie di pannelli porte o cockpit ad nell'industria automotive dove nella maggior parte delle volte sono ottenuti per stampaggio il che comporta la scarsa personalizzazione perché ogni pezzo è prodotto iniettando plastica in uno stampo identico ottenuto per lavorazione sottrattiva, con l'AM tutto questo non avviene potendo ottenere pezzi personalizzati senza bisogno di stampi, altro traguardo raggiunto molto importante di questa innovazione è la diversificazione dei materiali stampabili, prima si utilizzano solamente resine termoindurenti e plastiche oggi invece è possibile stampare una gamma di materiali molto vasto che va dai tessuti umani passando per il calcestruzzo arrivando a leghe metalliche come per la bound metal deposition.

Nonostante tanti acronimi diversi, "stampa 3D" in realtà è un termine generico che comprende un gruppo di processi.

Lo standard ISO/ASTM 52900, creato nel 2015, mira a standardizzare tutta la terminologia e classificare ciascuno dei diversi tipi di stampante 3D. In totale, sono state identificate e stabilite sette diverse categorie di processi di produzione additiva. Questi 7 processi di stampa 3D hanno prodotto 11 diversi tipi di tecnologia di stampa 3D.

Elaborazione digitale della luce (digital light processing) (DLP)

DLP è un altro processo di stampa 3D molto simile alla stereolitografia. La tecnologia DLP è stata realizzata nel 1987 da Larry Hornbeck di Texas Instruments ed è diventata famosa per il suo utilizzo nella produzione di proiettori.

DLP usa come fonte di luce un proiettore. Poiché il proiettore è uno schermo digitale, l'immagine di ogni strato è composta da pixel quadrati, e lo strato è formato da piccoli blocchi rettangolari chiamati voxel (pixel volumetrici).

La luce viene proiettata sulla resina utilizzando schermi a diodi a emissione di luce (LED) o una sorgente di luce UV (lampada) che viene diretta alla superficie di costruzione da un dispositivo DMD (Digital Micromirror Device).

Un DMD è una serie di micro-specchi che controllano il punto in cui viene proiettata la luce e generano il modello di luce sulla superficie di costruzione.

La sostanza utilizzata per la stampa è una resina plastica liquida fotopolimerica, inserita in un contenitore di resina trasparente. La resina si indurisce rapidamente se esposta a fotoni o, più semplicemente, a una luce intensa.

È questa la tecnologia usata nello studio fatto.

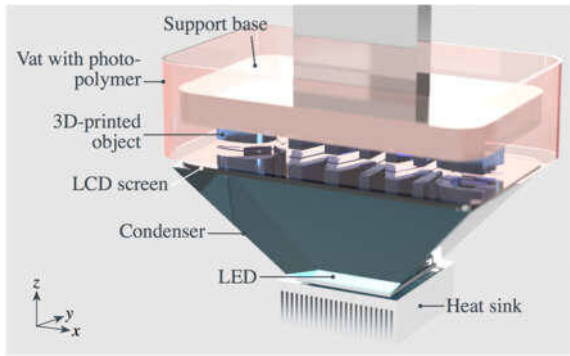


Figura 2.4.1

Unendo alta risoluzione, scelta di materiali e velocità elevate, le stampanti con tecnologia DLP offrono benefici praticamente in tutte le aree della stampa 3D, ad esempio macchine di fascia alta per realtà industriali e studi professionali, modelli di largo consumo affidabili e stampanti 3D personali. Mentre il mondo pregusta l'innovazione della produzione additiva, i limiti storici della tecnica di stereolitografia possono essere superati con la tecnologia DLP, realizzando una delle tecniche di produzione additiva più raffinate.

3.MATERIALI E PROCEDURE SPERIMENTALI

3.1 Resine termoindurenti

Per realizzare il nostro progetto è stato scelto di optare per una stampa DLP che funziona tramite fotopolimerizzazione, la quale ci consente di costruire l'oggetto strato per strato, controllando con precisione la forma e la composizione del materiale, la scelta è ricaduta su questa, perché la particolare geometria del pezzo era difficilmente ottenibile con altri metodi di stampa.

La resina fa parte del macrogruppo dei polimeri, in questo caso termoindurenti ovvero strutture che, una volta prodotte, non possono essere fuse senza andare incontro a degradazione chimica.

Anche i polimeri così come altri materiali più usati comunemente nelle costruzioni hanno un reticolo.

Vengono indicati con il nome di termoindurenti quei polimeri che, in opportune condizioni di temperatura e/o in presenza di particolari sostanze si trasformano in materiali rigidi, insolubili e infusibili, questa trasformazione si verifica in seguito a reazioni di reticolazione (processo tramite il quale le catene polimeriche vanno incontro a una reazione che crea legami fra diverse catene) detto curing che avvengono fra le catene polimeriche con formazione di legami forti.

Tali polimeri sono difficilmente riciclabili in quanto i nuovi legami formati a seguito delle operazioni di reticolazione sono definitivi.

Il processo di curing riportato sopra è essenziale per la riuscita del processo produttivo tramite DLP, permette una corretta polimerizzazione cioè l'aggregazione di più unità fondamentali chiamate monomeri che poi andranno a formare il polimero.

La prima cura è eseguita dalla stampa 3D nel caso della DLP da una luce ultravioletta prodotta tramite led, che va quindi ad imprimere layer per layer la sezione della geometria finale tramite una flashata nel punto giusto ottenendo così la prima polimerizzazione.

Il secondo step prima di eseguire il processo finale di cura è fare passare lo stampato in due vasche contenenti entrambe alcool isopropilico ma in diverse concentrazioni, il primo bagno è necessario per avere la superficie del pezzo pulito da resina liquida che è rimasta intrappolata all'interno anche il secondo bagno serve per avere una pulizia del pezzo ma avendo una concentrazione di alcool isopropilico maggiore il lavaggio risulterà più efficiente, il pezzo ora risulta pulito e quindi può avvenire l'ultimo passaggio che serve per cercare di bloccare le proprietà meccaniche e non far andar avanti il processo di polimerizzazione nel tempo, questo lo si fa tramite il processo di seconda cura chiamato anche post-curing che consiste nel immettere il pezzo all'interno di un forno in grado di emettere radiazione ultravioletta, e volendo anche di mantenere una certa temperatura impostata, nel lavoro svolto è stato scelto di mettere il pezzo all'interno del forno con dell'acqua perché essendo l'acqua più ricca di ossigeno rispetto all'aria consente una maggiore efficienza di processo.



Figura 3.1.1

La figura 3.1.1 mostra il processo di cura tramite forno UV.

Per quanto riguarda il materiale utilizzato, abbiamo optato per una resina termoidurente chiamata "flexible-x", un particolare fotopolimero che quando plasticizzato rimane morbido ed elastico, proprietà fondamentali per il nostro scopo.

Utilizzare una resina "morbida" ci permette di esaltare le proprietà elastiche del materiale, garantendo una maggiore resistenza agli sforzi e ai carichi; infatti, si è optato per questa resina proprio perché per le prove che poi si andranno ad eseguire è necessario mantenere un certo grado di elasticità per notare l'effetto desiderato alla prova di compressione ovvero la rotazione parziale della cella. Inoltre, la scelta di una resina flessibile ci ha aiutato a ridurre il rischio di rotture durante l'esecuzione delle prove. Questo aspetto è particolarmente importante perché eventuali rotture avrebbero pregiudicato la corretta valutazione dell'effetto di rotazione che stiamo studiando. Grazie alla flessibilità del materiale, siamo stati in grado di effettuare le prove in modo sicuro e ottenere conclusioni valide sul comportamento di rotazione dell'oggetto.

In seguito, si riportano i principali valori della scheda tecnica della resina con valori che fanno riferimento al sistema metrico internazionale.

Forma	Liquido nero opaco
Densità	1.18 g /cm ³
Viscosità	950 cps a 25°C
E _c	6.87 mJ/cm ²
Resistenza alla trazione	2.4 MPa
Allungamento a rottura	120-160%
Resistenza allo strappo	14.9 KN/m
Compressione impostata 24 ore a 22°C	2%

3.2 Definizione e ricerca topologica

L'inizio del lavoro è iniziato tutto dalla progettazione e lo stampaggio dei provini base, dogbone e cilindro ed infine lo stampaggio dei Gyroidi con varie densità, strutture riprese da un lavoro di tirocinio precedente che, come idea alla base, c'era che la struttura rispettasse il vincolo della rotazione, ed essendo un nuovo argomento inizialmente sono stati analizzati studi condotti da altre università che avevano già approcciato la trattazione, le geometrie proposte erano soprattutto quelle chiamate strutture origami, sono delle tipologie di strutture particolari come si può vedere dalla figura 3.2.1.

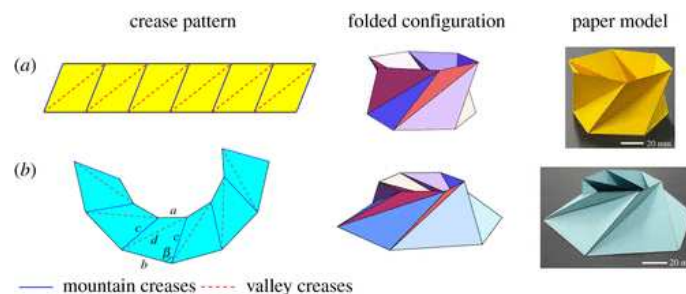


Figura 3.2.1

Da queste prendendo ispirazione durante la realizzazione al software nTopology è uscita una geometria completamente nuova e inesplorata, il cammino che ha portato alla realizzazione di questa geometria è stato proprio quello di seguire la struttura origami in modo che le superfici laterali del corpo centrale stessero dentro l'involuppo delle superfici di contorno alto-basso. La struttura del Gyroide ha un corpo interno pieno e con questa geometria, il Gyroide è una struttura unica è caratterizzata dalla mancanza di linee rette e dal fatto che si tratta di una superficie minima triplamente periodica (TPMS). I TPMS sono "superfici con curvatura media zero e sono caratterizzate da una minimizzazione dell'area locale, il che significa che qualsiasi patch sufficientemente piccola presa dal TPMS ha l'area più piccola tra tutte le patch create sotto gli stessi confini". Una volta fatto il corpo centrale è stato twistato di un certo angolo di twist rate, per ottenere le strutture Non Twist, si sono ripresi i file già fatti per le strutture Twist, ma si è andato a modificare il twist rate imponendolo uguale a zero senza la necessità di andare a

modificare altre grandezze poiché sono state prima adottate delle strategie di parametrizzazione adeguate ed con la stessa idea si sono andati a modificare altri parametri per ottenere dei Gyroidi con varie densità: 15% e 35%.

Ci si aspetta che queste ruotino, sarà poi verificato in questo lavoro tramite analisi sperimentale al banco, poi infine si cercherà di ottenere e\o confrontare i risultati ottenuti praticamente con altri risultati provenienti dalla simulazione agli elementi finiti.

L'operazione di disegno nella fase finale si è svolta facendo delle operazioni in cui si è messo in relazione lo spessore delle piastre con lo spessore del corpo centrale per avere così un solido parametrico dove è possibile andare a variare una sola grandezza e avere l'intero disegno scalato della quantità opportuna questa operazione è stata fatta soprattutto per velocizzare la fase finale, quella del calcolo della densità relativa, uniti i corpi centrali alle piastre di superficie si ottiene un unico pezzo, ottenuto il singolo pezzo questo è stato messo dentro un bounding box un cubo delle dimensioni di 20mm che fungerà da cella elementare, un cubo pieno delle dimensioni del bounding box è stato costruito per fare l'operazione del calcolo della densità relativa un parametro che mi dà indicazione di quanto volume è occupato dal corpo rispetto al volume totale della cella occupato dal cubo pieno, , quella voluta si attestava al 15% e 35 % del volume totale occupato, seguono le operazioni finali, che consistono nel produrre la cella finita e la generazione della mesh per portare il file di disegno in .stl con cui poi fare l'elaborazione sul software di stampa.

- Gyroide Twist



Figura 3.2.2

3.3 Produzione

Per la fase di produzione dei provini è stata scelta la tecnologia di additive manufacturing, in particolare la tipologia DLP per la possibilità di ottenere una notevole precisione.

Proseguendo il flusso logico sopra descritto si va ad esportare la barra di programmazione dal software di disegno nTopology riguardante la mesh per trasformarla in file. STL (standard to triangulation language To layer) è uno standard grafico che descrive l'oggetto tramite una decomposizione in triangoli delle superfici che lo compongono, così che può essere aperta dal software per la stampa 3D chitubox.

La stampante utilizzata è una Any Cubic Photon S2, dal software di stampa è necessario andare a modificare i parametri di stampa nella sezione settings, i parametri fondamentali per una corretta esecuzione della produzione sono:

- Layer Height imposta l'altezza del layer, per la prova è stato utilizzato un valore di 0.100mm
- Bottom Layer count imposta il conteggio dei layer iniziali, per la prova sono stati utilizzati 2 layer

- Exposure time, tempo di esposizione cioè di emissione della radiazione UV per i normali layer (non quelli di base), impostato a 28 secondi
- Bottom Exposure time, tempo di esposizione per i layer dello strato di base (bottom layer), impostato a 120 secondi
- Light-off delay, tempo di spegnimento della macchina, intervallo di tempo tra un flash e l'altro impostato a 2 secondi

Per altri molti parametri, è stato deciso di lasciare i valori di default. La scelta dei parametri citati è stata fatta in modo empirico-sperimentale modificando i valori di default in modo razionale non sapendo però la possibilità certa di resa.

Finita la fase di impostazione macchina il lavoro sul software si è focalizzato sulla corretta ottimizzazione della disposizione dei supporti resi necessari dal momento la tecnologia di stampa potrebbe nei primi layer scaturire sullo stampato in produzione una pressione tale da generare delle rotture per via dell'effetto vuoto creatosi quando la piastra mobile scende fino al bagno di resina, inoltre servono per favorire la rimozione dello stampato, anche in questo frangente il software genera in modo automatico i supporti, che devono essere rivisti nelle proprietà e disposizioni, come proprietà si è intervenuti nel diametro del supporto dopo che diversi stampati sono usciti difettati e questi erano imputabili ad un collasso di materiale nel supporto, nella disposizioni si sono andati a migliorare la disposizione già resa disponibile dal programma in primo luogo si sono tolti tutti i supporti che andavano a sorreggere la parte superiore in quanto non necessario, poi si sono modificati i supporti inferiori nelle piastre di base in modo da avere una disposizione bilanciata e ordinata degli stessi supporti, inoltre in alcuni progetti soprattutto quelli fatti in successione dopo i provini falliti sono stati spostati di 10mm sulla piastra mobile di stampa per non avere problemi di ri-polimerizzare di parti del bagno di resina già polimerizzate che potrebbero causare lo scarto dei pezzi successivi, in ultimo nel file è stato eseguito lo slicing ovvero la conversione di quanto fatto in linguaggio di programmazione adatto alla stampante, una volta mandato questo prima di salvare il progetto il software rende disponibile, quantità di resina utilizzata, peso finale

dell'oggetto e prezzo che si spenderebbe se si stampasse quel provino, questa funzione è di notevole interesse nell'industria meccanica.

Una volta pronto il file si va a caricarlo all'interno della stampante con una pen-drive e si va a richiamarlo tramite pannello di interfaccia presente sulla scocca frontale della stessa, prima di mandare la fase di stampa è necessario fare l'azzeramento della macchina così che il suo zero coincida con la base pezzo, per zero pezzo si intende la quota $z=0$ dove si contano anche la soletta e i supporti, il processo di azzeramento è fatto direttamente a bordo macchina, seguendo degli stadi che si riportano.

Si seleziona sul pannello di controllo la sezione TOOLS, poi tra le opzioni che vengono fuori automaticamente si seleziona MOOVE Z dove è possibile andare a muovere in maniera autonoma il piatto mobile sull'asse z, si interpone un foglio di carta tra il proiettore e il piatto mobile che scorrendo sulla guida andrà a toccare e bloccare il foglio è importante in questa fase allentare il piatto dal suo meccanismo di bloccaggio sulla macchina in modo di avere la movimentazione libera dello stesso, quando il piatto è arrivato in prossimità del foglio si provvede a fare dei piccoli incrementi di discesa per avvicinarci in modo delicato al set-point, lo scopo del foglio è quello di ingannare la macchina ricreando lo spessore del film della vaschetta contenente la resina che per noi sarà il punto dove si inizierà la stampa ovvero $z=0$.

Una volta raggiunto il valore di target ovvero quando il foglio risulta completamente bloccato, in modo equanime tra le parti ovvero non devono verificarsi scorrimenti del foglio in certe zone, si andrà a tirare la vite sopra al piatto che consente il bloccaggio sulla macchina, questo è necessario farlo per lo zero pezzo perché il sistema di bloccaggio è un sistema vite-sfera che con le successioni delle lavorazioni può perdere di precisione ovalizzando la sfera dando come risultato un certo angolo di inclinazione del piatto non accettabile dal momento che deve essere perfettamente parallelo al proiettore, una volta che il foglio risulta bloccato bisogna andare ad alzare il piatto di pochi millimetri perché essendo questo l'idealizzazione del film della vaschetta l'obiettivo non è quello di arrivare con il piatto di stampa sulla vaschetta con una pressione eccessiva quindi si va ad alzare il piatto, una volta decisa la quota giusta per l'azzeramento si procede ad

eseguire l'operazione di eliminazione del gioco tra vite motorizzata e mozzo (piatto di stampa) andando a dare e poi togliere delle stessa quantità la quota impartita, ora è tutto pronto per la fase finale dell'azzeramento dove si andrà a cliccare sul logo della casa presente nell'interfaccia grafica del pannello di lavoro concludendo così la fase.

Compiuta la fase di azzeramento, si può procedere al caricamento di materiale all'interno della vaschetta, fase molto delicata perché bisogna assolutamente evitare forti scuotimenti della bottiglia contenente la resina per non indurre forti turbolenze nel fluido all'interno che provocherebbero l'aumento della solubilità del materiale e quindi la presenza di gas all'interno aumenterebbe drasticamente andando a generare delle bolle che potrebbero portare allo scarto del pezzo prodotto, una volta versata la quantità giusta è possibile richiamare il file del disegno della struttura da ricreare dal pannello e poi mandare ufficialmente la fase di stampa, una volta completata si rende necessaria l'estrazione andando a utilizzare appositi raschietti per staccare la struttura dal raft (soletta) e supporti, si riprende la fase di stampa producendo nuove strutture avendo l'accortezza nel rimontaggio del piatto di stampa di premere bene per evitare indecisione di posizione e riprendere la posizione per la quale si era precedentemente fatto l'azzeramento.

Si riporta figura che rappresenta in ordine cronologico la fase progettuale-costruttiva dei provini per la tesi.



Figura 3.3.1

3.4 Materiali base: Dogbone e cilindro

I provini base fabbricati, per essere sottoposti a prove meccaniche fondamentali per determinare il modulo di Young e di Poisson, sono sia di forma cilindrica e ad osso di cane (dogbone). La produzione dei provini è stata necessaria per comprendere le proprietà del materiale usato per la stampa delle superfici.

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 0 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 3.4.1



Figura 3.4.2



3.5 Fabbricazione provini: Gyroide

Per le prove meccaniche di compressione, abbiamo scelto il Gyroide come campione da stampare, grazie alla sua struttura tridimensionale, ottimale per l'utilizzo della tecnologia Additive Manufacturing con tecnologia DLP. Abbiamo proceduto con lo stampaggio di una serie di campioni con diverse densità, al fine di esaminare il comportamento del Gyroide sotto compressione. Le densità relative dei campioni includono:

-Gyroide Twist 15% di densità relativa: questo campione presenta una cella finale che occupa il 15% del volume totale, mentre il restante 85% è vuoto.

-Gyroide Not Twist 15% di densità relativa: in questo caso, il campione ha una struttura simile al precedente, ma senza la torsione del gyroide.

-Gyroide Twist 35% di densità relativa: questo campione ha una cella finale che occupa il 35% del volume totale, con il 65% restante vuoto.

-Gyroide Not Twist 35% di densità relativa: simile al campione precedente, ma senza la torsione nella struttura.

Con queste diverse densità relative, possiamo valutare come la struttura del gyroide e la torsione influenzino il comportamento meccanico del materiale durante la compressione. Questi dati ci forniranno informazioni sulle prestazioni e le proprietà del gyroide, consentendoci di comprenderne meglio il comportamento e di ottimizzare l'applicazione di questa struttura tridimensionale.

Figura 3.5.1 di un Gyroide con il 15% di densità relativa



Figura 3.5.2 di un Gyroide con il 35% di densità relativa



3.6 Prove meccaniche effettuati su provini base

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 e quelli ad osso di cane a una prova di trazione.

3.6.1 Particolarità prova di trazione

Durante la prova di trazione, si è reso necessario effettuare un procedimento di tinteggiatura dei provini che prevede di tingere la loro superficie di bianco così da creare una superficie speculata e quindi la creazione di una rete di puntini neri.

La colorazione 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 Match2D (per maggiore accuratezza). Tale programma è in grado, mediante una telecamera ad alta risoluzione, la quale può scattare un notevole numero di immagini durante l'intera prova di trazione, per poi andare a comparare tra loro queste immagini. In base alla deformazione misurata dei singoli puntini neri, si è riusciti a ricavare la deformazione del provino. 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 reali al fine di ricavare anche il modulo di Young.



3.7 Testing-Risultati ottenuti dai test effettuati provini base

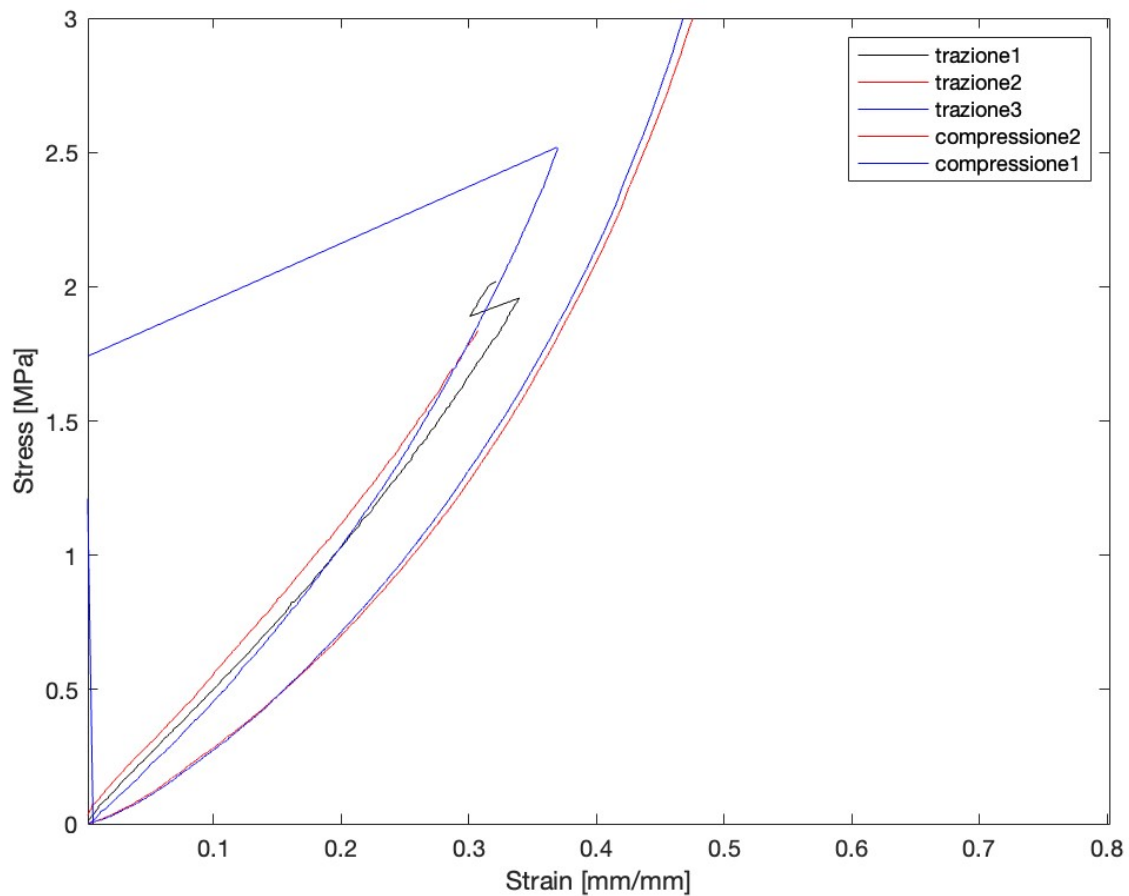
Abbiamo rappresentato tutti i risultati ottenuti dalle prove di trazione e compressione, attraverso grafici, evidenziando le varie curve (corrispondenti ai valori della macchina e del DIC). Inoltre, abbiamo confrontato queste curve tra loro per valutare le differenze e le correlazioni tra i dati.

Per ogni prova effettuata, abbiamo generato grafici, mostrando i valori previsti in base alle specifiche nominali e i valori effettivamente osservati durante le prove. Questo ci ha permesso di analizzare le discrepanze e le similitudini tra le previsioni teoriche e le misurazioni sperimentali, concludendo che il materiale a trazione e compressione si comporta nello stesso modo.

Sulla curva di trazione si può notare che le curve sono leggermente diverse tra loro, per via dei vari giochi della macchina ad esempio; mentre per la compressione le curve sono fondamentalmente uguali. Questo è un punto che ci è servito poi per concludere che per il Gyroide il comportamento del materiale a trazione e compressione è uguale

Confrontando le curve dei valori nominali e dei valori veri, abbiamo potuto valutare la precisione delle previsioni e identificare eventuali scostamenti o fenomeni interessanti. Questo approccio ci ha fornito una panoramica completa delle prestazioni del materiale e delle sue proprietà meccaniche, consentendoci di ottenere una comprensione dettagliata del comportamento dei campioni durante le diverse prove.

Figura 3.7.1 Grafico trazione-compressione provini base



3.7.1 Approfondimento

Si è provato a adattare questo materiale usando il modello neo-Hookean con equazione (rappresentato con una linea tratteggiata, la costante elastica calcolata), che è tipico dei materiali elastomerici, ma non si riesce a prendere il comportamento. Preso il materiale base si è constatato che in effetti la risposta sia a trazione che a compressione è la stessa (somiglianza delle curve), cioè il materiale, che ha questo tipo di fenomeno, non segue questo modello.

Pertanto, anziché continuare a utilizzare questo modello, si opterà per un altro modello diverso, dato che, dopo aver eseguito tali test e considerazioni, abbiamo deciso di fermarci a questo punto. Di seguito l'immagine di quanto detto:

Under plane stress conditions we have

$$\sigma_{11} = 2C_1 \left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda^4} \right)$$

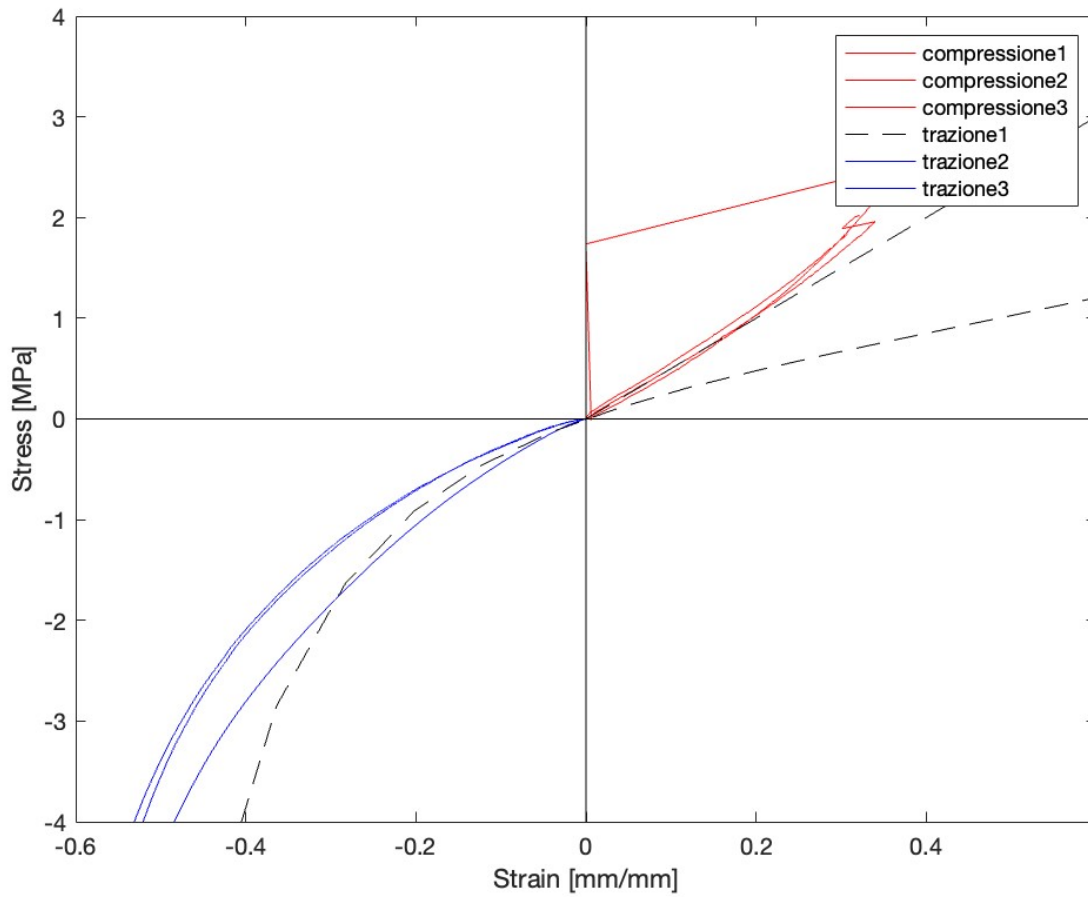


Figura 3.7.1.1

3.8 Testing-Risultati ottenuti dai test effettuati Gyroide

Dopo aver fabbricato i nostri campioni, li abbiamo sottoposti a prove di compressione, variando le condizioni durante l'esecuzione dei test:

Inizialmente, le prime prove sono state eseguite sui campioni con twist rate (angolo di torsione) pari a zero, ovvero i campioni "Not Twist". Questa scelta ci ha permesso di ottenere una comparazione della prestazione delle stesse geometrie in condizioni diverse, ma senza la torsione presente.

Successivamente, abbiamo effettuato ulteriori prove sui campioni identici, ma questa volta con geometria "Twist", variando le condizioni durante l'esecuzione dei test. In questo modo, abbiamo esaminato come la presenza o l'assenza di attrito influenzasse il comportamento meccanico dei campioni con la torsione nella loro struttura.

Questo approccio ci ha fornito preziose informazioni sulla risposta del materiale alle diverse condizioni di compressione e ci ha aiutato a comprendere meglio l'effetto della torsione sulla prestazione meccanica dei campioni.

In questa fase si è caratterizzato il materiale studiando e confrontando i provini sotto diversi casi, suddiviso in tre case study, il primo valutando il comportamento dei provini twist in condizioni normali con la macchina di compressione, il secondo analizzando gli stessi provini con la rotazione libera per cercare di minimizzare gli effetti dell'attrito, per il terzo case study sono stati realizzati provini non twist per avere un confronto totale e una corretta caratterizzazione del materiale.

3.8.1 Macchina prova di compressione

Per l'esecuzione della prova è stata utilizzata una macchina per la prova di compressione-trazione Zwick/Roell Z050 nel nostro caso è stata utilizzata come macchina di compressione per comprimere i provini e valutare il comportamento a compressione-torsione, la macchina è composta di due guide principali su cui scorre la piastra superiore

in direzione assiale che andrà ad impartire il carico fino, la parte inferiore è fissa, le grandezze misurate sono rispettivamente lo spostamento assiale e lungo la circonferenza del cuscinetto per ricavarsi le deformazioni tramite tecnica a immagini, la forza misurata con celle di carico usata per definire la tensione, i valori disponibili alla fine della fase di test saranno, curva stress-strain per valutare il comportamento a compressione, curva angle-strain per valutare il comportamento a torsione, curva misura di energia immagazzinata dalla struttura ottenuta con l'integrazione delle curve in ambito di elaborazione dati.

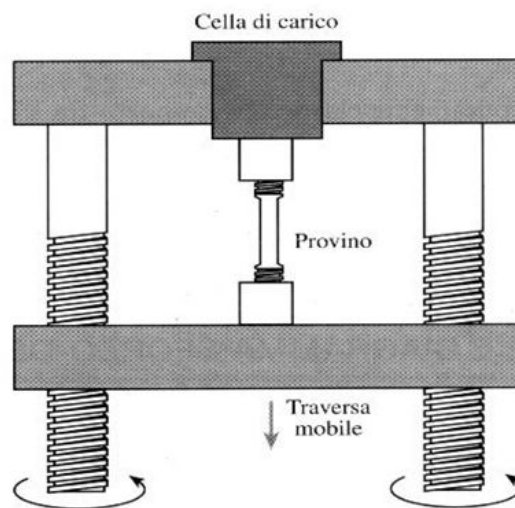


Figura 3.8.1

3.8.2 Eliminazione dell'attrito

Le superfici reali non sono mai perfettamente piane, ma hanno sempre una certa rugosità. A causa dell'elevata pressione si hanno quindi fenomeni di manifestazione di microgiunzioni tra i materiali dei due membri per le elevate pressioni locali, per la loro interazione, in fase di avvio del moto relativo (primo distacco), sono necessarie forze superiori, seguendo il modello di attrito coulombiano, andando a imprimere una pressione notevole per il provino in esame può verificarsi la non rotazione della stessa,

si potrebbe vanificare la fase di test non potendo notare l'effetto della rotazione essenziale per i metamateriali torcenti, nasce l'esigenza di ridurre l'attrito, questo obiettivo lo si è perseguito utilizzando un cuscinetto reggispinna in grado di ridurre l'attrito nella direzione del carico cioè assiale, il cuscinetto scelto è un cuscinetto reggispinna utilizzato nelle frizioni automobilistiche dei motori endotermici, trovato il sistema per ridurre l'attrito è stato necessario ideare un sistema per consentire la misurazione della rotazione, dopo diverse ipotesi è stato optato di realizzare tramite lavorazione non convenzionale al taglio laser una sezione cilindrica con intagli intervallati di 5° sul bordo di raccordo, così da consentire durante l'esecuzione della prova di segnare i risalti e notare lo spostamento.

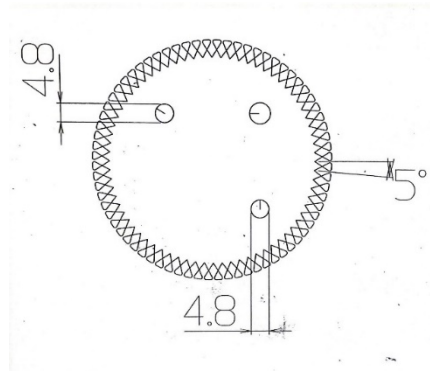


Figura 3.8.2

Si è riportato il disegno tecnico della piastra ideata per la fase di misurazione nella figura 3.8.2

Tuttavia provando con questo sistema si sono riscontrate diverse problematiche durante la fase di setup della macchina poiché i risalti della piastrina intagliata davano vita a dei riscontri luminosi che non permettevano l'acquisizione corretta dalle posizione del segno messo, quindi si è scelto di mettere sopra al cuscinetto una piastra più spessa non intagliata segnando con un pennarello le righe che poi saranno prese come riferimento per misurare l'angolo di torsione, prima di eseguire la prova si è provveduto a fare dei fori questo per garantire un corretto deflusso dell'aria contenuta all'interno delle celle che altrimenti potrebbe falsare il risultato della prova andando ad aumentare la rigidità totale della struttura.

3.8.3 Operazioni eseguite fase di test

Prima di iniziare la prova è necessario procedere al settaggio dei parametri della macchina e della stessa, montando le opportune attrezzature. Come prima cosa si deve montare la cella di carico interposta tra slitta mobile e pressa che esercita il carico per la prova si sono messe due celle di carico in serie da 50KN e 5KN questa scelta è stata adoperata per aumentare la sensibilità e migliorare l'accuratezza della misurazione conclude la catena di misura la piastra che applica il carico con il provino, è necessario riportare che durante questa fase preliminare si sono riscontrati problemi di parallelismo tra la piastra superiore e inferiore della macchina dove si è notato che scendendo con la slitta mobile la piastra andava prima in contatto nella parte destra, problematica seria dal momento che se si fossero fatte le misurazioni in questo modo si sarebbero ottenute delle deformazioni non uguali sulle superfici che avrebbero potuto falsare il risultato ottenuto, per eliminare il problema si sono fatte scendere le due piastre senza provino mandandole in contatto con il permesso di rotazione dato dalla coppia conica, una volta allineate si sono serrate, in questo il difetto di parallelismo si è quasi azzerato, un certo grado di imprecisione è presente e questo è dato dalla catena di misura montata sulla macchina la quale essendo molto lunga potrebbe soffrire di inflessione.

Successivamente abbiamo montato il sistema di visualizzazione della deformazione tramite telecamera collegata al computer per poter verificare e modificare in tempo reale l'allineamento della fotocamera e la messa a fuoco (DIC).

Durante i test sono stati analizzati i provini eseguendo 3 slot di prove.

Per il primo slot sono stati presi i provini twist e sottoposti alla prova di compressione senza il meccanismo necessario per ridurre\eliminare l'attrito, i dati derivanti dalla prova hanno differenti flussi di informazione, i dati relativi alla forza e allungamento con il relativo grafico sono inviati automaticamente dalla macchina al computer collegato con essa che permette anche una visualizzazione istantanea della curva forza-allungamento

ma per avere dei dati più precisi l'allungamento si va a misurare tramite telecamera ed qui che avviene il secondo flusso di informazione la telecamera una volta settata è in collegamento con un altro computer con in quale comunica con l'interfaccia software MatchID, dove è possibile visualizzare in tempo reale la deformazione, per poterlo fare si va a segnare il provino con vernice in due punti lungo la direzione interessata la telecamera terrà il fuoco su questo punto e il software darà informazioni sulla distanza di questi due punti al variare del Δt , i dati ottenuti saranno poi interessanti dalla manipolazione e implementazione tramite MATLAB, per fare la fase di prova è necessario essere almeno in due persone ed inoltre essere coordinati perché mentre uno dà il via alla prova facendo scendere la piastra che esercita il carico sul provino l'altro deve iniziare l'acquisizione dei dati dal computer .

Il secondo slot di test è stato eseguito sempre sugli stessi provini andando però ad interporre tra superficie inferiore del provino e piastra fissa della macchina il meccanismo per la riduzione dell'attrito lasciando invariato il sistema sopra descritto, aggiungendo una telecamera per la misura della rotazione sui picchi della piastra intagliata dove sono stati messi dei segni con vernice.

Il terzo slot di test è stato fatto su provini differenti non twist, quindi, non è necessario introdurre il meccanismo per la riduzione dell'attrito e si è riassetata la macchina per la configurazione del test 1.

I dati relativi alle diverse prove sono stati utilizzati per tracciare i grafici e analizzare il comportamento elastico come è riportato nel capitolo successivo.

Si allegano le foto del processo di test.

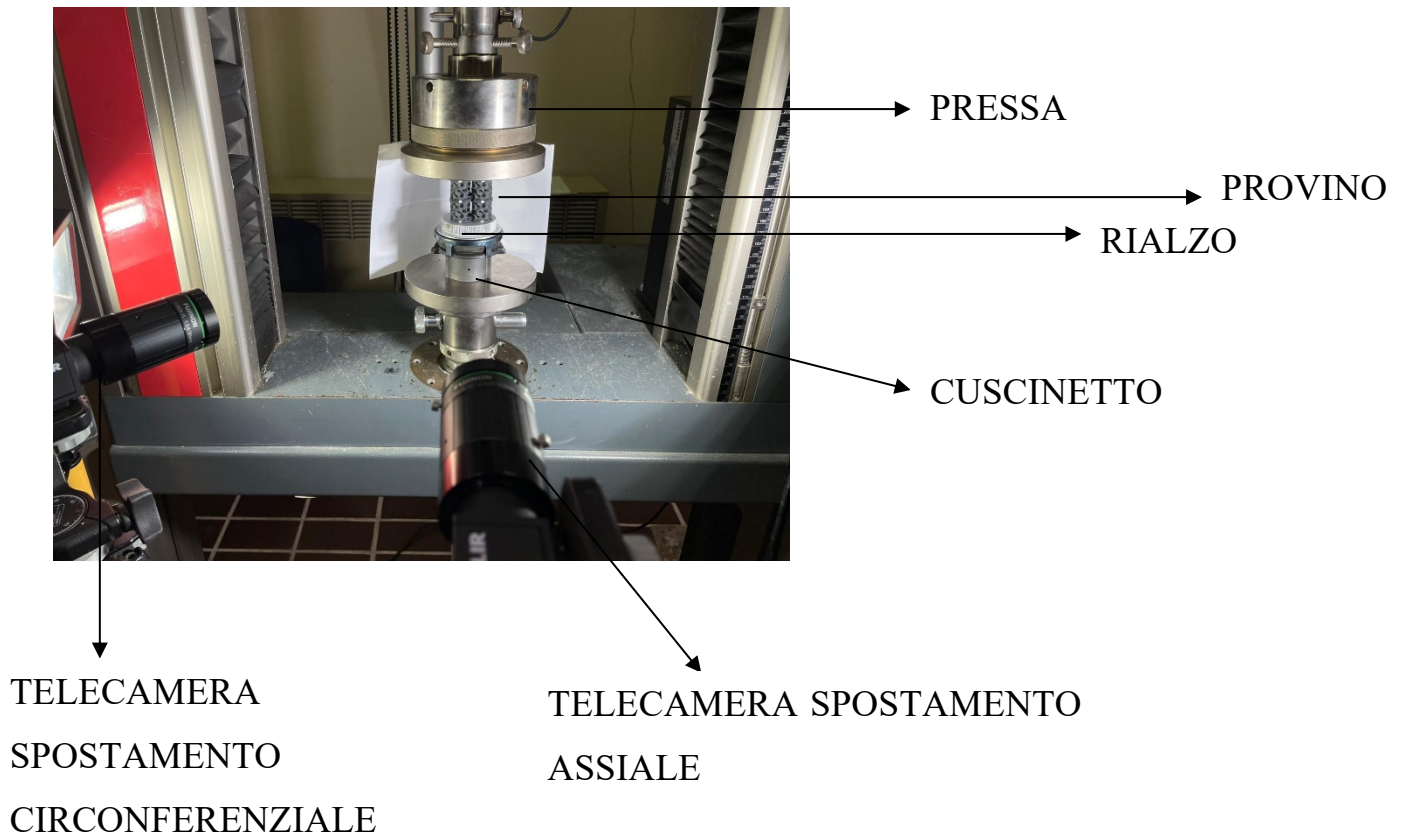


Figura 3.8.3

Nella figura 3.8.3 si possono notare due particolari importanti, il rialzo avente un duplice compito quello di allargare l'area di appoggio del provino e soprattutto quello di permettere di individuare delle rette che poi durante la prova verranno usate come pitch point, ovvero punti di riferimento per la misura della rotazione e quindi della torsione, altro componente che è possibile individuare dalla figura è il cuscinetto assiale fondamentale per eseguire la prova perché permette ridurre l'attrito il quale come spiegato è un fenomeno dissipativo e porterebbe alla difficoltà di apprezzare la nella prova quando si studiano le strutture twist, inoltre è possibile notare un foro nel cuscinetto questo è stato fatto per permettere all'aria di sfiatare durante la compressione nei provini, il foro si rende necessario perché l'aria intrappolata all'interno del provino porta ad un aumento della rigidità del materiale andando a falsare quelli che sarebbero i risultati attesi per la caratterizzazione.

4.RISULTATI E DISCUSSIONE

4.1 Analisi e interpretazione risultati

I Dati ottenuti dalla fase test sono stati implementanti tramite software di calcolo che permette anche di tracciare le curve e di calcolare l'integrale per misurare l'ampiezza dell'area sottesa.

Dividendo le prove in diverse serie, i dati sono stati manipolati prima per ogni struttura facente parte di uno slot ricavandosi la curva stress-strain in seguito si è fatta una comparazione critica dei risultati a parità di struttura con differenti condizioni per vedere quale effettivamente sia la topologia migliore in termini di densificazione e in che condizione esprime la maggiore prestazione meccanica in termini energetici e di deformazione massima raggiunta.

Prima di fare una valutazione analitica si riportano le foto per apprezzare visivamente i provini post prova.

Figura 4.1.1 Gyroide 35% di densità Not Twist



Figura 4.1.2 Gyroide 15% di densità Not Twist



Figura 4.1.3 Gyroide 15% di densità Twist

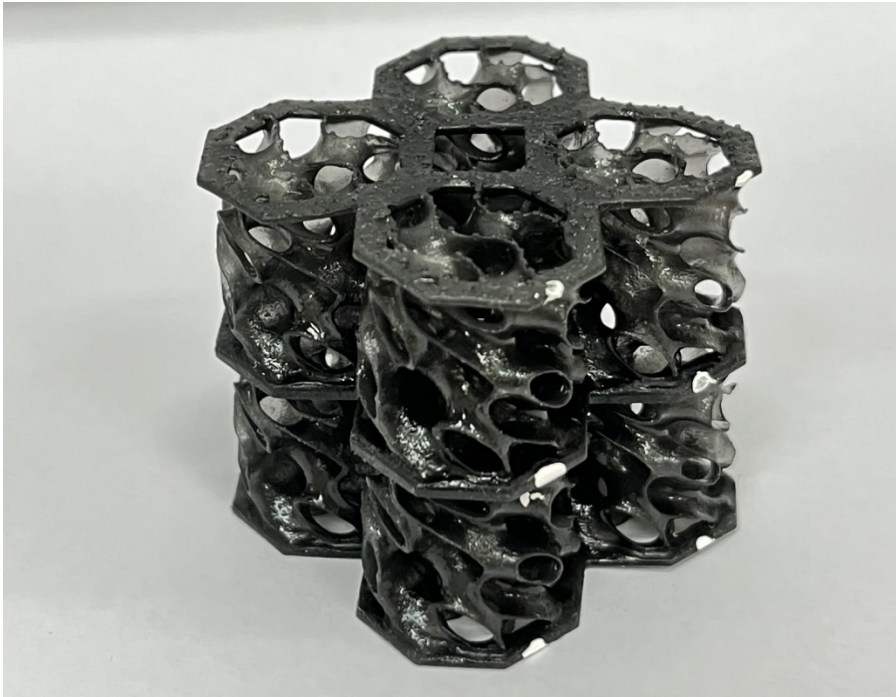


Figura 4.1.4 Gyroide 35 % di densità twist

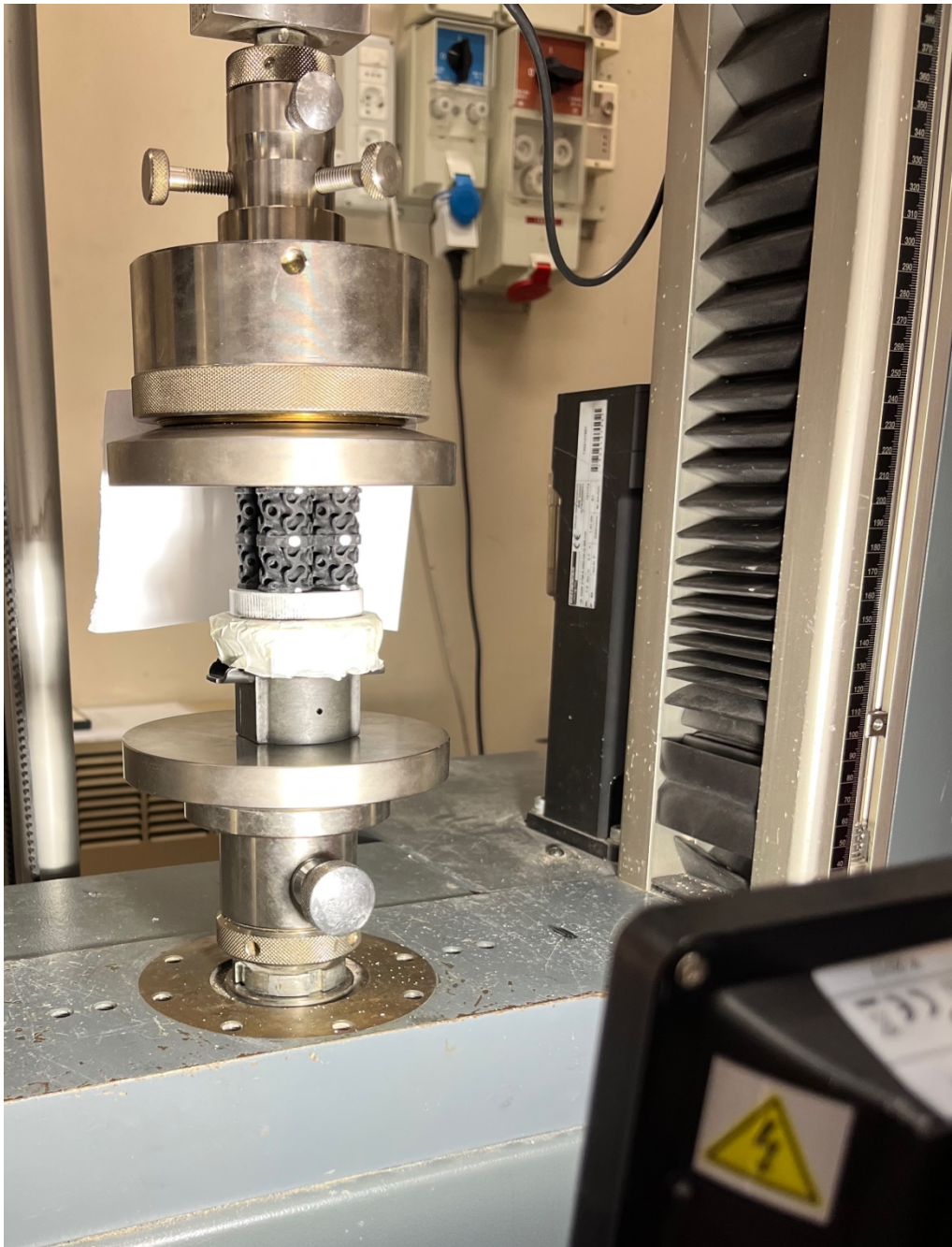


Figura 4.1.5 Gyroide con rotazione impedita

Per impedire la rotazione è stato mantenuto invariato tutto il sistema con l'unica variante riguardante il bloccaggio del cuscinetto eseguito con uno scotch commerciale.



Figura 4.1.6 prova di compressione Gyroide 35% Not Twist



Nelle figure dei provini è possibile notare le prestazioni dei materiali a livello qualitativo, analizzando si vede come la struttura Gyroide 35% è quella più spessa e solida, ma allo stesso tempo, risulta essere quella con più fratturazioni, mentre la struttura Gyroide 15% sia quella con minore spessore, ma durante le prove di compressione non si è notato visivamente nessuna frattura. Durante l'esecuzione delle prove è stato notato per quanto riguarda in particolar modo le geometrie Gyroide, in ogni condizione di prova che queste una volta rilasciato il carico ritornano nella posizione iniziale a valor dimostrare l'iperelasticità del materiale, soprattutto nei Gyroidi con 15% di densità.

4.2 Grafici

I grafici per una descrizione quantitativa del materiale si sono ottenuti tramite implementazione dei dati relativi alla prova sul software MATLAB, dove è stato sviluppato uno script per la visualizzazione dei grafici, il punto di partenza sono stati i dati di output forniti dalla macchina derivanti dai diversi componenti di misura, celle di carico per la forza mentre per lo spostamento è stato preso come riferimento lo spostamento della traversa mobile, i grafici stress-strain sono di tipo ingegneristico ovvero fanno riferimento alla lunghezza e area iniziale, nel continuo di questo lavoro verranno analizzati le differenze di comportamento tra i risultati ottenuti in questo modo e i risultati ottenuti facendo riferimento alla tecnica per immagini, lo scopo dell'analisi è quello di valutare la bontà delle strutture misurando quanto queste riescano ad immagazzinare energia per questo dopo il plottaggio base della curva stress-strain sono stati fatti degli integrali per misurare l'area sottesa al grafico per ottenere questo risultato, è stato fatto un integrale numerico con il comando trapz che provvede a fare il calcolo dei rettangoli sottesi al vettore stress-strain, prima di eseguire l'integrale è stata fatta una linearizzazione della curva perché all'inizio si nota una non linearità della stessa dovuta ad effetti di bordo come l'attrito, quindi nella prima fase è stata fatta una correzione della curva calcolando la E in modo analitico come media dei valori che si hanno lungo tutto il vettore che rappresenta la pendenza corretta che dovrebbe avere la curva nel primo

tratto successivamente è stato traslato il vettore per avere la giusta pendenza mantenendo le y costanti, ovvero lo sforzo per mantenere invariato il significato della curva, nel secondo step è stato trovato il punto di densificazione per avere il limite superiore dell'integrale, il punto di densificazione rappresenta il punto dove si ha la massima efficienza ovvero quando il materiale cellulare sotto l'effetto di compressione diventa un solido continuo si individua nella curva nel punto di flesso dove cambia rapidamente la pendenza mostrando una rapida crescita della resistenza quindi dello stress, a livello quantitativo per trovare questo punto è stata adoperata la formula sotto indicata che serve per poter comparare diversi studi per differenti geometrie valutando così il tratto utile all'assorbimento di energia in modo uguale per ogni lavoro, osservando la formula si nota che è l'espressione dell'efficienza è una funzione della deformazione quindi questa fornirà l'andamento dell'efficienza, dove il massimo corrisponde al cambio di pendenza della curva stress-strain indicati con gli scatter.

$$\eta(\varepsilon) = \frac{1}{\sigma(\varepsilon)} \int_0^{\varepsilon} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon$$

Successivamente per trovare il massimo dell'efficienza che è il punto che interessa per mettere il limite all'integrale dell'energia si svolge la derivata prima della funzione e la si pone uguale a zero per trovare il punto a pendenza nulla quindi tangente con il massimo trovando la ε_d , deformazione relativa al punto di densificazione.

$$\frac{d\eta(\varepsilon)}{d\varepsilon} = 0$$

Ora è possibile calcolare l'integrale avendo gli estremi inferiori e superiori, per prima è stata calcolata l'energia assorbita dalla struttura per unità di volume calcolata come:

$w = \int_0^{\varepsilon_d} \sigma d\varepsilon$ successivamente si è calcolata la SEA che il parametro energetico più importante in quanto mette in relazione l'energia assorbita per unità di volume e la densità relativa avendo così un valore che identifichi l'energia assorbita per unità di massa, ora è possibile ricavarsi i diversi grafici necessari per la caratterizzazione del materiale. Per analizzare il comportamento si riportano i grafici per ogni struttura con le varie densità, dove si hanno le informazioni dello stesso provino nelle diverse prove

effettuate, ovvero provini in assenza di Twist indicata dal colore nero, provini con rotazione bloccata, ma sempre strutture twist quindi che potrebbero ruotare ma non gli è stato concesso, indicate con il colore blu, infine provini Twist con rotazione libera indicata dal colore rosso. Nei grafici si può apprezzare la prestazione della struttura osservando nel grafico di sinistra le curve stress-strain e le curve relative all'efficienza, nel grafico a destra è riportata l'energia assorbita dalla struttura nelle diverse prove.

4.3 COMMENTO GRAFICO GYROIDE con il 15% ed il 35% di densità

Dai diagrammi dei differenti Gyroidi è possibile osservare che la curva rossa è costantemente la più elevata. Questo significa che l'efficacia del campione Twist con rotazione libera, identificato come "Twist più rotazione", aumenta in tutti i casi esaminati. Questo miglioramento dell'efficacia è attribuibile in parte a una maggiore deformazione di densificazione, come evidenziato dal movimento verso l'alto del punto rosso. In altre parole, il maggior grado di deformazione conduce a una maggiore efficienza.

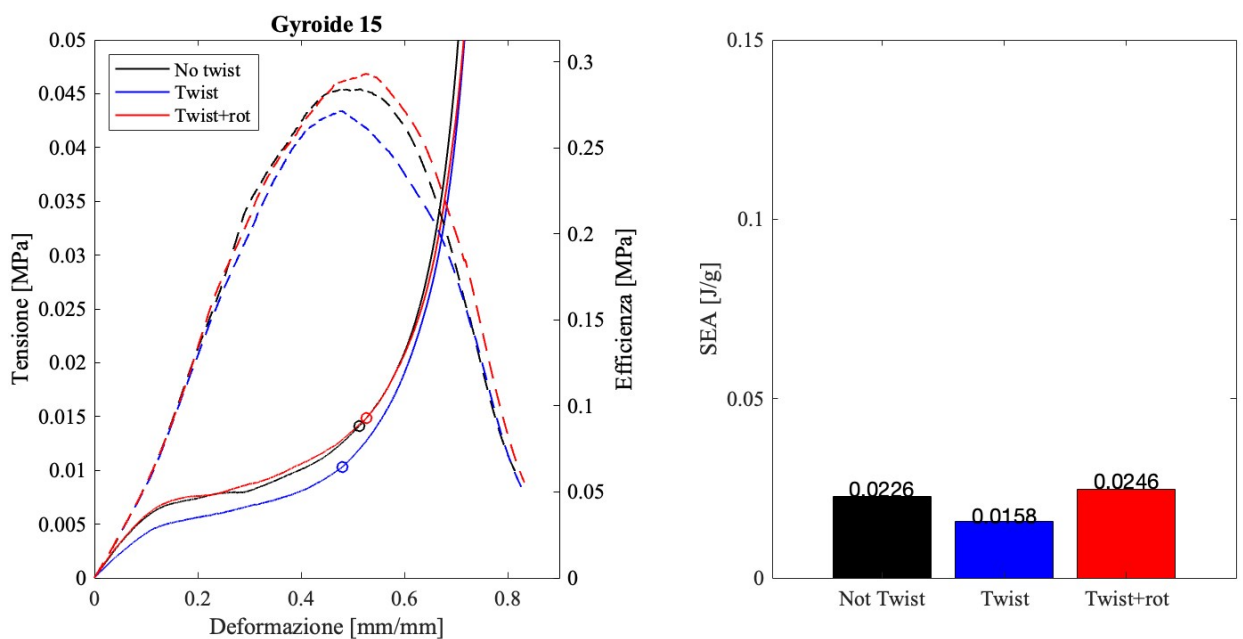


Figura 4.3.1

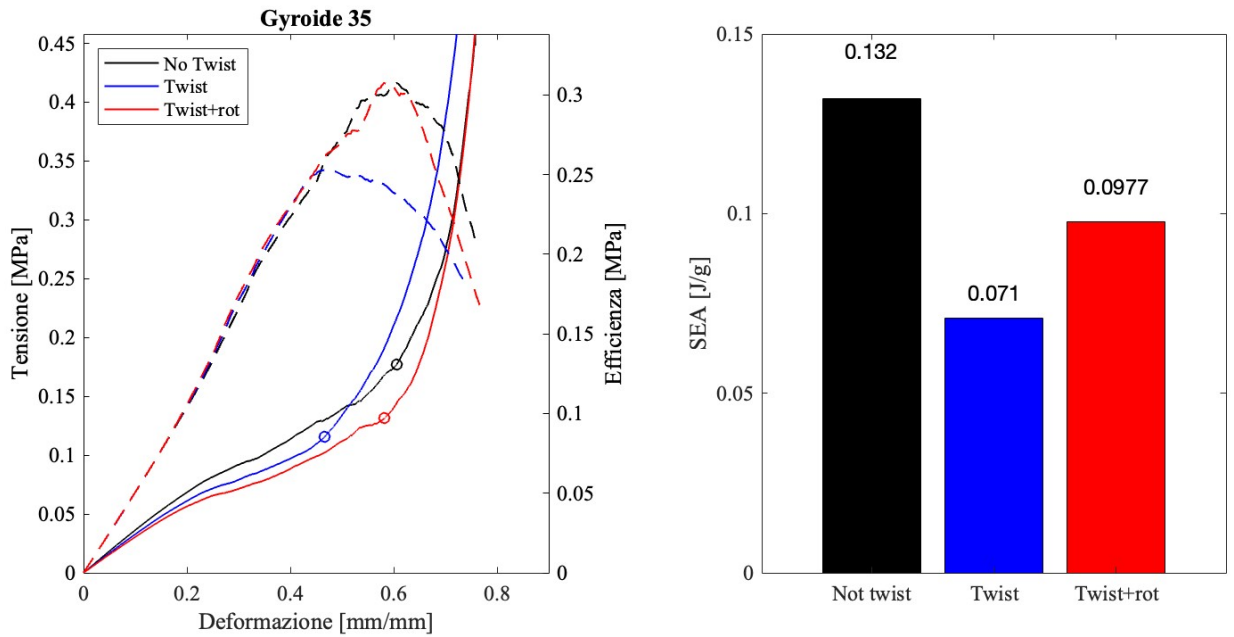


Figura 4.3.2

4.4 Curiosità-COMMENTO GRAFICO GYROIDE 25% di densità

Si sono confrontati oltre ai risultati ottenuti da queste prove, anche quelli relativi ad un provino caratterizzato con una densità relativa del 25%, il quale è stato studiato da un collega che si è focalizzato sui metamateriali, ma con altre strutture, compresa quella del Gyroide da 25% di densità.

Nella struttura Gyroide è possibile inquadrare la geometria nella famiglia di materiali in cui il meccanismo di deformazione preponderante, osservando i grafici, è il bending deformation, la curva stress-strain del grafico 4.4.5 non mostra alcuna discontinuità non mostra quindi alcun crollo delle proprietà infatti la curva è una monotona crescente, la prestazione energetica della struttura a livello di quantità di energia immagazzinata è intermedia tra quella dei Gyroidi con il 15% e 35% di densità, ma è interessante notare per questa struttura in quali condizioni si verifiche il maggior assorbimento di energia, nella prova con provini Gyroidi Not Twist.

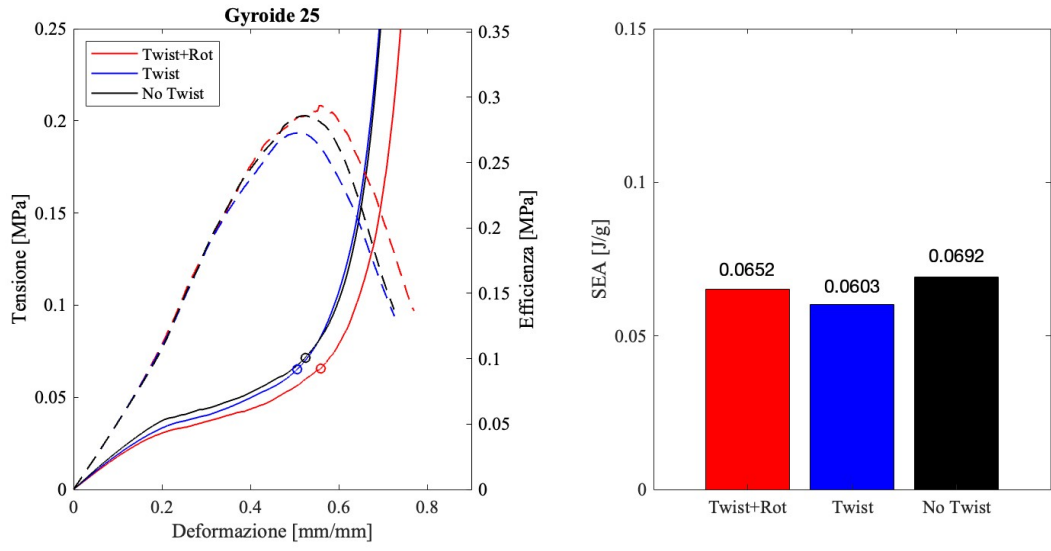
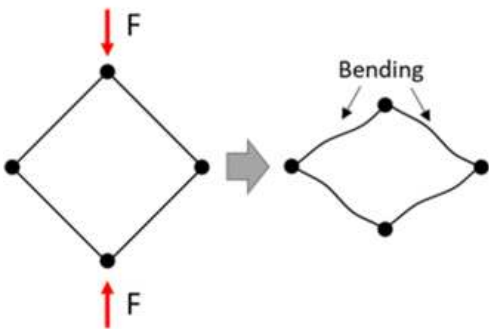


Figura 4.4.1



Schematizzazione strutture bending dominate

4.5 Confronto risultati ottenuti con provini di varie densità

L'idea è di scegliere un materiale che assorbe tanta energia, ma anche di trasmettere un basso carico.

Quindi, se si assorbe tanta energia ad una bassa tensione, si è in grado di ottenere un assorbitore d'urto che sia efficiente.

Se invece si assorbe energia, ma si scarica una certa tensione più alta, il materiale risponde più rigidamente o comunque scarica una forza più alta, cioè vuol dire che è vero che si assorbe energia, però effettivamente avrò una trasmissione del carico più elevata. Quindi, si cerca di avere queste curve sul grafico, che siano più in alto e a sinistra.

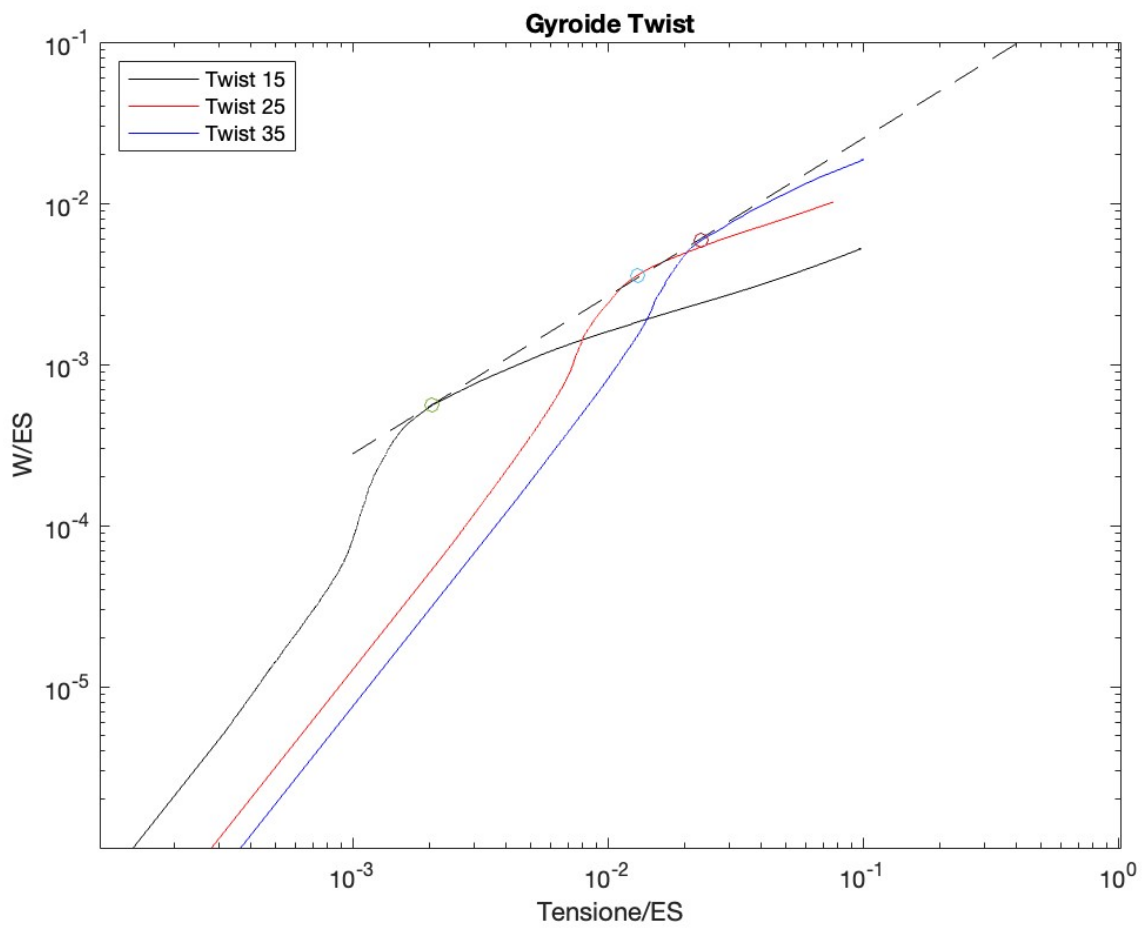
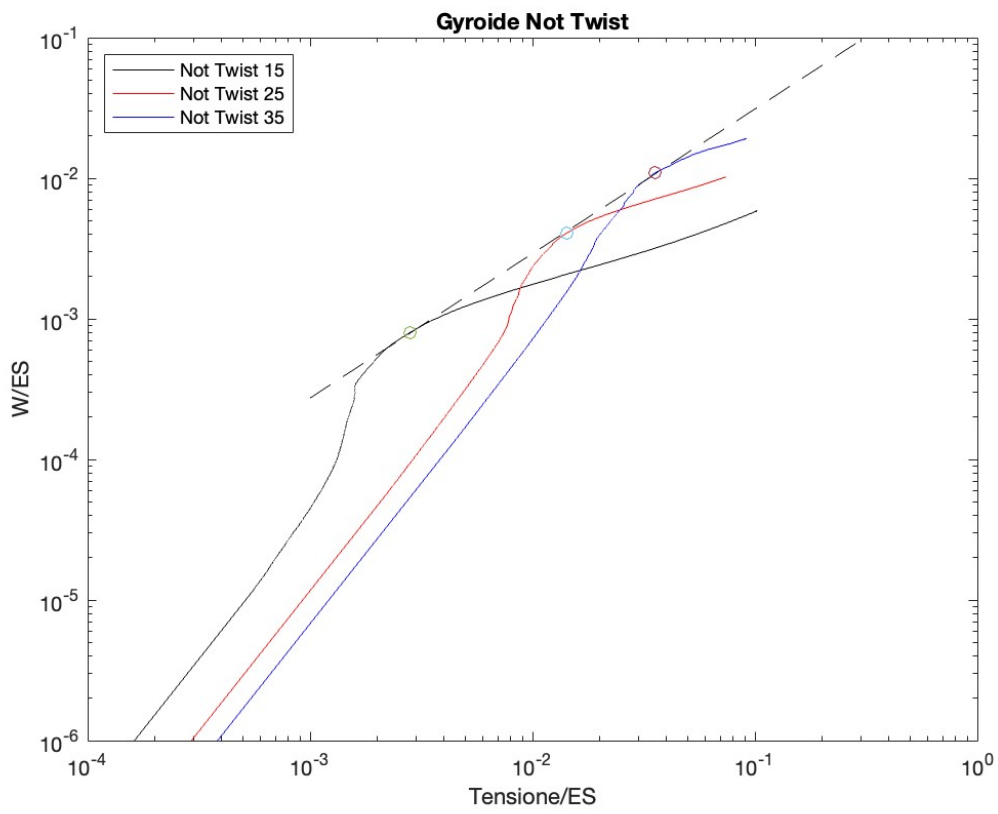
I grafici riportati di seguito sono grafici in fase di progettazione e sono utilizzati per ingegnerizzare il problema, così da prevedere il comportamento di un materiale o di una struttura in base a determinati parametri. In essi, è possibile visualizzare l'effetto di una cella in funzione del modulo di Young di un certo materiale base. Ciò significa che, se si desidera assorbire una certa energia e si deve scegliere un materiale base, è possibile utilizzare il grafico per determinare la quantità di energia che si otterrebbe. In altre parole, si può sapere da questi grafici, quanta energia si può ottenere da un materiale e da una struttura specifici. I grafici dell'energia sono normalizzati rispetto al modulo di Young.

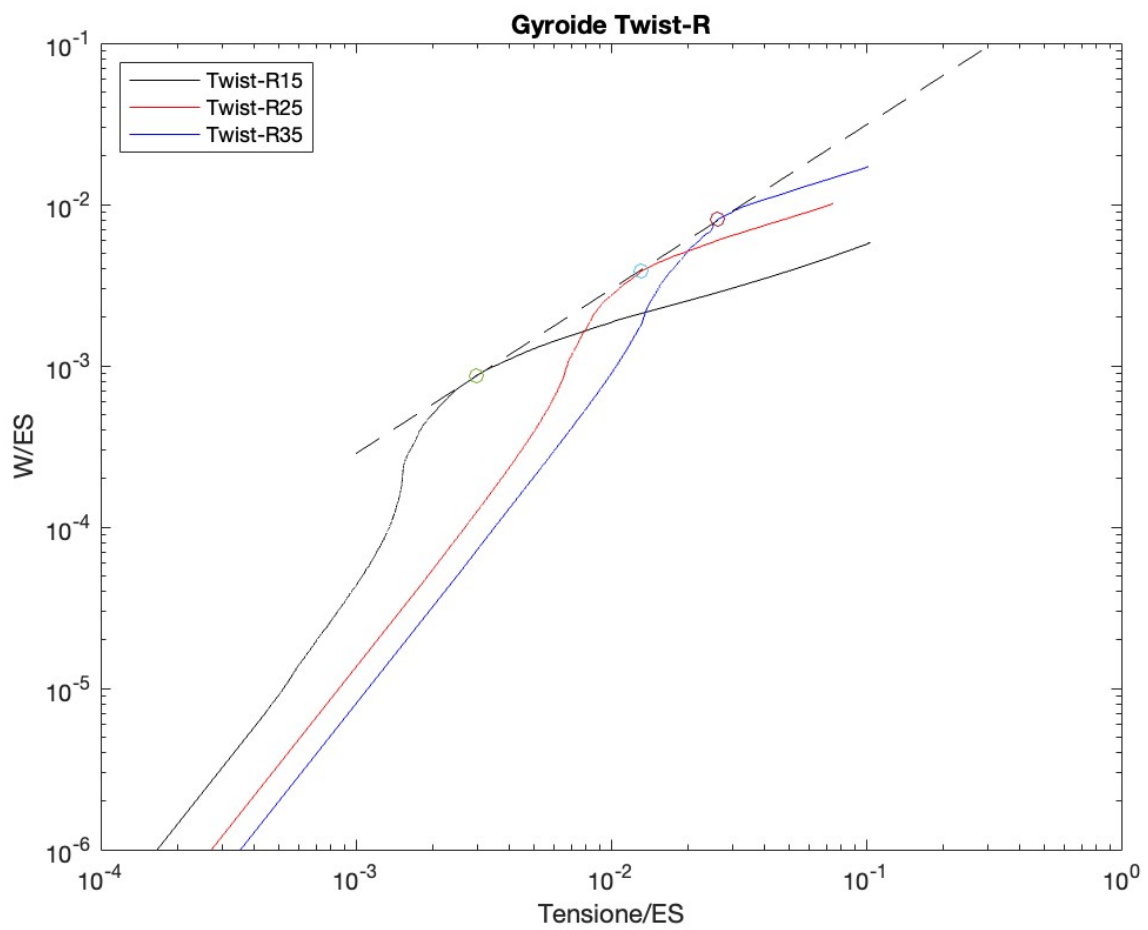
Una volta ottenute tutte le curve, sono state inserite tutte insieme per ottenere un grafico in cui sull'asse x abbiamo la tensione/modulo elastico del materiale base e asse y c'è invece l'energia assorbita (W), che ci dice come varia l'energia assorbita in funzione della densità. Questo grafico ci permette di confrontare tutte le strutture e definire l'andamento di quella retta che collega i vari punti, i quali rappresentano la sigma di picco.

L'idea è che le rette ottenute dalle varie densità, messe tutte insieme in uno stesso grafico, quella che si posiziona più in alto è la curva che teoricamente definisce un materiale con ottime proprietà assorbimento energia, perché non basta definire che assorbe tanta energia per dire che il materiale effettivamente è un materiale ottimale o giusto, perché

esso può anche assorbire più energia del dovuto però essendo che il materiale ha lo stesso modulo di Young alla base, può succedere che ad esempio se ho due materiali con due curve diverse (una alta e una bassa) potrei avere che una ha energia più alta dell'altra, però se ragioniamo dal punto di vista di assorbimento energia durante un impatto ci aspettiamo sempre un oggetto che urta e trasmette una certa forza e accumula energia durante la distruzione di questo pezzo, ma se abbiamo una curva bassa significa che il materiale sta trasmettendo poca forza alla parte che sta impattando, quindi sta assorbendo la stessa energia, ma trasmettendo anche meno forza; quindi un oggetto che assorbe tanta energia può trasmettere anche tanta forza, perché molto più alta la curva, quindi, è molto più rigido. Quando parliamo di massimo assorbimento di energia oppure massima capacità di assorbimento energia, bisogna anche vedere anche com'è la risposta del materiale, perché dipende quant'è la forza che stiamo subendo; quindi, effettivamente che la curva più alta ci definisce un materiale che assorbe energia anche in ottica proprio di impatto e non solo staticamente. Dal grafico ottenuto è possibile scegliere quale struttura prendere.

In seguito, i grafici dei vari provini Not Twist, Twist con rotazione bloccata e quelli Twist più rotazione:





5.CONCLUSIONE

Per quanto riguarda la capacità di assorbire energia di una geometria Twist, è stato riscontrato un leggero miglioramento, tuttavia, dalle prove effettuate, non si è rivelato così notevole, per quanto riguarda l'efficienza, dai grafici ottenuti, si può notare che rimane sempre più alta la curva nel caso del Twist con rotazione in tutti i vari casi di densificazione, con un aumento della deformazione. In altre parole, l'aggiunta del Twist al movimento di rotazione ha portato a un aumento dell'efficienza nel complessivo assorbimento di energia, ma l'aumento non è stato particolarmente significativo.

5.1 Ringraziamenti

Un giorno che sembrava così lontano, eppure eccomi qua, alla fine del mio percorso di studi. Sono ancora incredulo, ma allo stesso tempo entusiasta. Questi tre anni sono volati, e in loro ho imparato e cresciuto molto, sia professionalmente che personalmente.

"Ringrazio i miei genitori, che mi hanno sempre sostenuto e incoraggiato, e i miei professori, che mi hanno guidato e aiutato a crescere come studente e come persona.

In particolare, ringrazio il relatore Professor Marco Sasso, per la sua disponibilità e tutti coloro che hanno contribuito alla realizzazione di questo lavoro, in particolare il correlatore Dottor Mattia Utzeri, che mi ha guidato in tutte le fasi di questo tirocinio con competenza e passione, è stato un punto di riferimento molto importante.

Ovviamente, non posso che ringraziare i miei amici che hanno avuto un ruolo fondamentale in questo percorso, che mi hanno sempre spinto ad impegnarmi e a dare il meglio di me stesso, mi hanno supportato e soprattutto sopportato in tutti i momenti duri della mia vita universitaria, quindi non posso dirvi altro che, grazie.

Infine, devo ringraziare me stesso per aver avuto la forza di volontà, l'animo tenace, ma soprattutto la determinazione che mi ha permesso di raggiungere questo traguardo.

Questo brindisi, lo dedico a me, ai miei sogni, alle mie idee e ai sacrifici che mi hanno reso la persona che sono oggi e che hanno fatto in modo che arrivassi fino a qui, felice e fiero di me.

6.RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Ran Tao, Longtao Ji, Ying Li, Zhishuai Wan, Wenxia Hu, Wenwang Wu, Binbin Liao, Lianhua Ma, Daining Fang,
4D printed origami metamaterials with tunable compression twist behavior and stress-strain curves,
Composites Part B: Engineering,
Volume 201,
2020,
- [2] Yasuda, Hiromi & Yamaguchi, Koshiro & Miyazawa, Yasuhiro & Wiebe, Richard & Raney, Jordan & Yang, Jinkyu. (2020). Data-driven prediction and analysis of chaotic origami dynamics. *Communications Physics*. 3. 10.1038/s42005-020-00431-0.
- [3] Fleck, Norman & Deshpande, V.S. & Ashby, Mike. (2010). Micro-architected materials: Past, present and future. *Proceedings of The Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*.
- [4] Dong Han, Yi Zhang, Xiang Yu Zhang, Yi Min Xie, Xin Ren,
Mechanical characterization of a novel thickness gradient auxetic tubular structure under inclined load,
Engineering Structures,
Volume 273,2022,115079.
- [5] Zhong, R.; Fu, M.; Chen, X.; Zheng, B.; Hu, L. Un nuovo metamateriale meccanico tridimensionale con proprietà di compressione-torsione. *Compos. Struttura*. 2019, 13, 36416–36425.
- [6] Wang, YB; Liu, HT; Zhang, Molla di rotazione ZY: struttura di conversione compressione-torsione simmetrica a rotazione con elevato utilizzo dello spazio. *Compos. Struttura*. 2020, 245, 112341.

- [6] Buccino, F. Strutture ispirate alla natura resistenti alla torsione. Enciclopedia. Disponibile online: <https://encyclopedia.pub/entry/14386> (consultato l'8 aprile 2023).
- [7] Li QM, Magkiriadis I, Harrigan JJ. Deformazione compressiva all'inizio della densificazione dei solidi cellulari. *Giornale di plastica cellulare* . 2006;42(5):371-392. doi: 10.1177/0021955X06063519
- [8] Overvelde, T.B. Johannes, Y. Shevchenko, “A three-dimensional actuated origami-inspired transformable metamaterial with multiple degrees of freedom”, *Nature*
- [9] Twingsister, Twingsister. (2016). *La stampa 3D ed il Rapid Prototyping*.
- [10] <https://www.3dnatives.com/it/sla-dlp-stampa-3d-291020219>
- [11] <https://www.portalecompositi.it/news/la-rinascita-dei-termoindurenti-con-la-stampa-3d-12147.html>
- [12] <https://mm.ethz.ch/research-overview/metamaterials/truss-metamaterials.html>
- [13] <https://formlabs.com/it/blog/fdm-sla-sls-scegliere-tecnologia-stampa-3d/>
- [14] <https://www.portalecompositi.it/news/la-rinascita-dei-termoindurenti-con-la-stampa-3d-12147.html>
- [15] <https://corriereinnovazione.corriere.it/cards/nasa-mit-boston-hanno-realizzato-un-ala-d-aereo-rivoluzionaria-ecco-come-funziona/i-vantaggi.shtml>