

ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA
- Sede di Forlì -



CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA AEROSPAZIALE
Classe: L-9

ELABORATO FINALE DI LAUREA IN:
COSTRUZIONI AERONAUTICHE

**Strutture a Rigidezza Negativa
realizzate in *Additive
Manufacturing*: analisi delle
caratteristiche meccaniche**

Candidato:
Riccardo Candini

Relatrice:
Prof.ssa Ing. Sara Bagassi
Correlatore:
Ing. Martino Carlo Moruzzi

Anno Accademico 2023/2024

SOMMARIO

Questo lavoro di tesi è stato svolto nell'ambito di uno studio pluriennale sulle strutture a rigidità negativa (NSS) che ha analizzato diverse tipologie di materiale per *Additive Manufacturing* (AM).

In particolare il presente elaborato ha approfondito tramite un'analisi sperimentale dettagliata le strutture a rigidità negativa realizzate in materiale similgomma *TangoBlack* prodotte utilizzando la tecnologia additiva *PolyJet*.

Un analogo studio è in corso di realizzazione sul materiale *TangoGrey*, che differisce dal materiale trattato da questo lavoro non solo in termini di colorazione ma anche nelle caratteristiche di rigidità e resistenza, come descritto nell'elaborato del collega Santinato presentato contestualmente al presente elaborato.

Riguardo la stesura di questa tesi, inizialmente viene fatta un'introduzione generale al problema delle strutture a rigidità negativa, in seguito vengono analizzate nel dettaglio le tecniche di *Additive Manufacturing*, con un approfondimento sulla *PolyJet*, e sui materiali utilizzabili nel campo.

Successivamente vengono descritte in modo più dettagliato le strutture a rigidità negativa, concentrandosi su: applicazioni; caratteristiche peculiari, tra cui rigidità negativa, bistabilità e *snap-through*; e sul design utilizzato per lo svolgimento delle prove sperimentali, facendo riferimento anche a studi precedenti. Il documento procede poi con i dati ottenuti dalle prove sperimentali per tipo di strutture, non prima di aver caratterizzato il materiale oggetto di questo studio utilizzando sia i dati indicati dalla ditta di produzione, sia prove sperimentali su provini cilindrici.

Infine si possono trovare le conclusioni, che riassumono il lavoro svolto, le difficoltà incontrate e le prospettive future nella ricerca e nell'applicazione delle strutture a rigidità negativa.

Indice

Elenco delle figure	IV
1 Introduzione	1
1.1 Obiettivi	2
1.2 Fasi principali del progetto	2
2 Additive Manufacturing	3
2.1 Tecniche produttive	4
2.1.1 Tecnica <i>PolyJet</i>	6
2.2 Materiali	8
2.2.1 Polimeri	8
2.2.2 Metalli	9
2.2.3 Ceramiche	9
2.2.4 Compositi	10
3 Strutture a Rigidezza Negativa	13
3.1 Proprietà	14
3.1.1 <i>Buckling</i>	15
3.2 Design e Geometria	16
4 Campagna sperimentale	17
4.1 Produzione e problemi	17
4.1.1 Problemi in fase di produzione	17
4.1.2 Problemi successivi	18
4.2 Caratterizzazione del materiale	18
4.2.1 Risultati delle prove sui provini cilindrici	20
4.3 Test delle strutture	21
4.3.1 Strutture a Singolo Strato	21
4.3.2 Strutture a Doppio Strato	22
4.3.3 Strutture a Doppio Strato con Spessori Raddoppiati	24
4.3.4 Confronto dei valori ottenuti	25

5	Conclusioni	27
5.1	Limitazioni	27
5.2	Studi futuri	28
	Bibliografia	29
A	Grafici ottenuti dalle prove sperimentali	31
A.1	Provini Cilindrici	31
A.2	Strutture a Singolo Strato	32
A.3	Strutture a Doppio Strato	33
A.4	Strutture a Doppio Strato con Spessori Raddoppiati	34

Elenco delle figure

1.1	Strutture oggetto di questo studio realizzate in plastica	1
2.1	Esempio di oggetto ottenuto tramite tecniche di <i>Additive Manufacturing</i>	4
2.2	Diagramma che schematizza le tecniche più popolari per AM: A) <i>Fused Deposition Modeling</i> (FDM); B) Stereolitografia (SLA); C) <i>PolyJet</i> ; D) <i>Selective Laser Sintering</i> (SLS); E) <i>Laminated Object Manufacturing</i> (LOM)	5
2.3	Immagine riassuntiva del procedimento delle tecniche di AM	6
2.4	Schema riassuntivo sul funzionamento della tecnica <i>Polyjet</i>	7
2.5	Filamenti di ABS per FDM	8
2.6	Esempio di parte in metallo prodotta usando tecniche di AM	9
2.7	Alcuni esempi di pezzi in ceramica prodotti tramite AM	10
2.8	Esempio di parti ottenute tramite FDM a partire da materiali compositi	11
3.1	Comportamento di una struttura a rigidità negativa in un grafico deformazione-carico	13
3.2	Esempio di comportamento bi-stabile in un elemento curvo	14
3.3	Esempio di comportamento <i>snap-through</i>	15
3.4	Esempio di <i>buckling</i> in una trave	15
3.5	Da sinistra verso destra: struttura A, struttura B, struttura C	16
3.6	Parametri costruttivi della struttura A	16
4.1	<i>Objet30 V5 Prime</i> con il pannello di controllo	18
4.2	Provino cilindrico usato per la caratterizzazione del materiale	19
4.3	Provino rotto a seguito del test	19
4.4	Grafico compressione-carico dei valori medi ottenuti dai provini	20
4.5	Grafico compressione-carico dei valori medi ottenuti dalle due strutture a singolo strato	21
4.6	Struttura prima di essere testata	22
4.7	Fasi del test di una struttura a doppio strato	22
4.8	Grafico compressione-carico dei valori medi ottenuti dalle strutture a doppio strato	23

4.9	Esempio di struttura a doppio strato significativamente danneggiata nello strato più inferiore dopo un test	23
4.10	Struttura con spessori raddoppiati a confronto con una struttura a doppio strato	24
4.11	Grafico della media dei valori per compressione e carico ottenuta dalle strutture	24
A.1	Grafici compressione-carico relativi ai sei provini cilindrici	31
A.2	Grafici compressione-carico relativi alle due strutture a singolo strato	32
A.3	Grafici compressione-carico relativi alle sei strutture a doppio strato	33
A.4	Grafici compressione-carico relativi alle quattro strutture con spessori raddoppiati	34

Capitolo 1

Introduzione

Le strutture a rigidità negativa, o, più brevemente, NSS, sono un gruppo di particolari strutture multistabili appartenenti alla famiglia dei metamateriali meccanici in cui, in caso di sollecitazione, per riscontrare un aumento nella deformazione è necessario diminuire il carico applicato [1]. Ciò è dato dalle principali caratteristiche di queste particolari strutture, ovvero rigidità negativa, bistabilità e *snap-through*. Queste caratteristiche sono associabili al fenomeno del *buckling*, il quale è legato all'instabilità di elementi sottili, perciò difficile da prevedere e calcolare.

Le caratteristiche sopracitate delle NSS individuano, sulla carta, le prerogative per essere impiegate nel campo dell'assorbimento degli urti, isolamento delle vibrazioni e anche sistemi antisismici [2].

Per via della complessità del problema, gli studi precedenti legati alle NSS si sono concentrati prevalentemente sulla ricerca di una geometria ottimale delle celle elementari, che nell'insieme compongono la struttura completa.

Il design delle NSS è da sempre legato a forme cubiche, solo recentemente gli studi si stanno concentrando su strutture di forma cilindrica, in particolare, questo studio prende come base la struttura studiata da Wang et al. [3] e Corsi et al. [4], visibile in Figura 1.1, proponendo come materiale di realizzazione il materiale simil-gomma *TangoBlack*, prodotto dall'azienda *Stratasys*.



Figura 1.1: Strutture oggetto di questo studio realizzate in plastica

Per la produzione si è scelto di ricorrere a tecniche di *Additive Manufacturing* (abbreviato con AM) per via delle dimensioni ridotte della struttura, della significativa complessità della geometria interna e della difficoltà di lavorazione del materiale prodotto tramite tecniche differenti.

Lo svolgimento del lavoro alla base di questa tesi è stato svolto in contemporanea con quello del collega Santinato, il quale nel suo lavoro si occupa dello studio delle medesime strutture realizzate in materiale *TangoGrey* [5]; che differisce dal materiale trattato da questo lavoro non solo in termini di colorazione ma anche nella caratteristiche di rigidità e resistenza.

1.1 Obiettivi

L'obiettivo di questa tesi è verificare che le NSS prodotte in materiale *TangoBlack* si comportino coerentemente alle simulazioni numeriche ottenute utilizzando il metodo degli elementi finiti (FEM) da Neri et al. [6] e Millene et al. [7] nei loro rispettivi studi. Il secondo obiettivo di questo lavoro è verificare che il *TangoBlack* sia un materiale valido per la realizzazione di questo particolare tipo di strutture. Poiché non si hanno ancora dati su NSS realizzate in *TangoBlack*, si è reso necessario una parte preliminare di caratterizzazione del materiale che è stata realizzata in primo luogo grazie ai dati forniti da *Stratasys*, ma soprattutto tramite provini cilindrici che sono stati sottoposti a test di compressione utili a stimarne il comportamento proprio in questa condizione.

1.2 Fasi principali del progetto

La prima fase del progetto consiste nella realizzazione delle NSS e dei provini cilindrici adibiti alla caratterizzazione del materiale tramite il sistema per la fabbricazione additiva *Objet30 V5 Prime*, sempre prodotta da *Stratasys*.

Nella seconda fase, quella di test vera e propria in laboratorio, è stato possibile innanzitutto caratterizzare il materiale tramite i provini cilindrici, e in seguito analizzare il comportamento delle varie strutture nel caso di compressione quasi statica.

Nell'ultima fase invece si è effettuata un'analisi dei dati ottenute dalle prove sperimentali; per fare ciò si è reso necessario l'utilizzo del *software MATLAB*, in particolare per la costruzione dei grafici utilizzati per commentare i risultati. Grazie a questi dati e grafici è stato possibile effettuare una comparazione tra le diverse tipologie di strutture realizzate, identificandone pregi e difetti.

Capitolo 2

Additive Manufacturing

Si definiscono tecniche di *Additive Manufacturing*, abbreviato con AM, quei determinati processi che portano alla creazione di un oggetto, solitamente ottenuto tramite sovrapposizione di strati di materiale, da modelli 3D; perciò sono note nel linguaggio comune come "Stampa 3D" [4]. Questo tipo di tecniche produttive sta vedendo, soprattutto da trent'anni a questa parte, una sempre maggiore diffusione nei più diversificati ambiti della società. Al giorno d'oggi le tecniche di AM trovano impiego nei più veri settori; tra questi medicina (in particolare in ortodonzia, biomedicale e protesica), ingegneria, architettura, artistico, tessile, gioielleria, giocattoli, attrezzatura sportiva e, soprattutto recentemente, produzione di cibo [8]. Per quanto riguarda il ramo ingegneristico le tecniche di AM trovano il loro impiego in molte applicazioni, che spaziano dai metamateriali e elettronica ai componenti industriali, energia, aerospazio, *automotive*, industria del petrolio e costruzioni marittime.

Questa incredibile varietà di applicazioni è dovuta dal fatto che le tecniche di AM presentano svariati pregi, tra i quali:

- la possibilità di ottenere forme molto complesse e intricate con abbastanza semplicità;
- un ridotto *Time To Market*, ovvero il periodo di tempo che intercorre tra l'ideazione di un prodotto e la sua effettiva commercializzazione [8];
- una vasta libertà di design e customizzazione del prodotto;
- sostenibilità elevata in quanto gli sprechi di materiale sono ridotti in quanto i macchinari per AM lavorano per aggiunta di materiale e non per rimozione, inoltre per quanto riguarda il trasporto i file per la realizzazione possono essere inviati digitalmente invece che spedire via cargo il prodotto finito;
- i costi ridotti di produzione nonostante i macchinari per AM siano abbastanza dispendiosi, ma non a livello di alcuni macchinari tradizionali;

Esistono però anche delle criticità per quanto riguarda le tecniche di AM; per quanto riguarda i materiali ci sono limitazioni su quali possono essere utilizzati e sulle proprietà meccaniche, esse potrebbero risultare infatti differenti rispetto a una lavorazione tradizionale del medesimo materiale a causa della produzione tramite sovrapposizione di strati di materiale. Inoltre le dimensioni dei modelli prodotti sono limitati dalla dimensione della macchina operatrice e alcuni materiali non possono essere trattati con sufficiente precisione (si parla di errori dell'ordine di ± 0.1 mm in certi casi). Per finire le tecniche di AM non sono ancora abbastanza rapide o economicamente convenienti rispetto ai metodi di produzione già in uso per permetterne uno sfruttamento a livello industriale o di produzione di massa.



Figura 2.1: Esempio di oggetto ottenuto tramite tecniche di *Additive Manufacturing*

2.1 Tecniche produttive

Quando si parla di AM si indicano diverse tecniche produttive, ognuna delle quali presenta differenti vantaggi e svantaggi.

Per cominciare, la *Fused Deposition Modeling* (FDM) prevede l'estrusione di un materiale termoplastico attraverso un ugello riscaldato; è una tecnica che vede il suo punto di forza il rapporto costi-efficacia [8].

Per quanto riguarda la tecnica *PolyJet* (che verrà approfondita successivamente nella sezione 2.1.1), si può dire che unisca il getto d'inchiostro (usato dalle stampanti 2D) e l'uso di fotopolimeri. In sostanza prevede che delle testine depositino uno strato di materiale che viene poi vulcanizzato da una lampada UV. I suoi vantaggi principali possono essere individuati in: un'eccellente risoluzione, una vasta scelta di materiali, un costo e un tempo di realizzazione relativamente bassi.

La stereolitografia (SLA) utilizza invece dei laser per solidificare selettivamente dei fotopolimeri in resina, essa sta vedendo maggiore sviluppo dopo l'avvento della tecnologia CLIP (*Continuous Liquid Interface Production*) che comporta

un miglioramento della precisione e un aumento significativo della velocità di fabbricazione.

Invece la tecnica di *Selective Laser Sintering* (SLS) utilizza un laser per fondere la polvere del materiale selezionato, una volta raffreddato si aggiunge un nuovo strato di polvere e così via; il vantaggio di questa tecnica sta nel fatto che come materiale di supporto utilizza la parte di polvere non sinterizzata, rendendola quindi riutilizzabile, ma rende impossibile la realizzazione di oggetti cavi poiché la polvere non sinterizzata ne rimarrebbe all'interno [4].

Infine la tecnica *Laminated Object Manufacturing* (LOM) consiste nella creazione di oggetti tridimensionali attraverso il legame di vari strati di materiale. Questo metodo è particolarmente vantaggioso per la prototipazione rapida per la sua velocità e semplicità di utilizzo. Nella Figura 2.2 sottostante è presente un disegno schematico per riassumere le tecniche illustrate precedentemente.

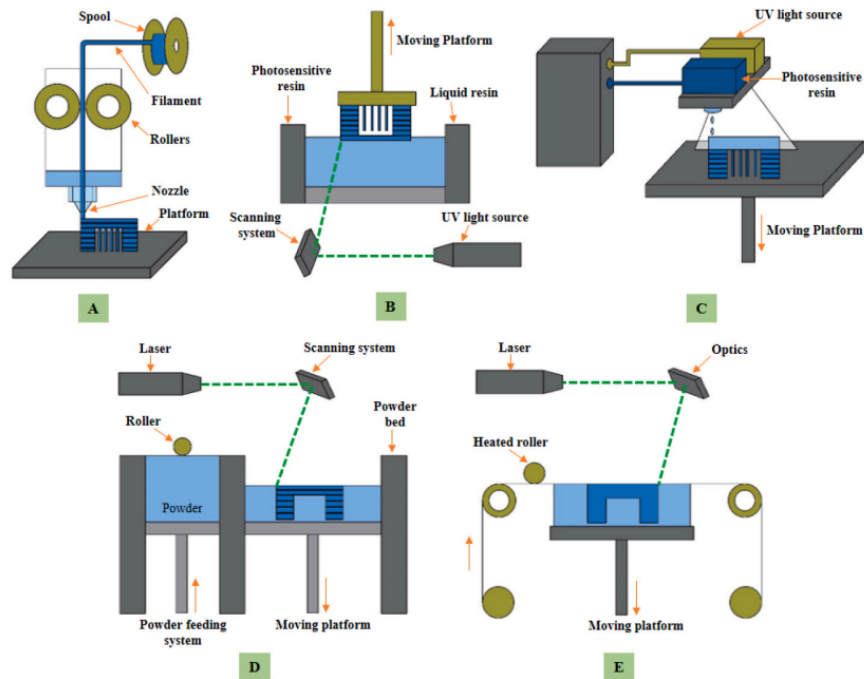


Figura 2.2: Diagramma che schematizza le tecniche più popolari per AM: A) *Fused Deposition Modeling* (FDM); B) *Stereolitografia* (SLA); C) *PolyJet*; D) *Selective Laser Sintering* (SLS); E) *Laminated Object Manufacturing* (LOM)

Negli ultimi anni si è vista l'introduzione di diverse nuove metodologie per AM: tra queste si ha la *Liquid Deposition Modeling* (LDM), dove strati di materiale volatile vengono depositati direttamente, la *Digital Light Processing* (DLP), la quale polimerizza i fotopolimeri utilizzando un raggio di luce, e *Fiber Encapsu-*

lation Additive Manufacturing (FEAM), che è in grado di depositare allo stesso momento sia il materiale di supporto che quello di cui è fatto il modello. Queste nuove tecniche offrono minori tempi di realizzazione e una maggiore gamma di materiali utilizzabili rispetto alle tecniche tradizionali, ma il loro rapporto costo-efficacia non è comparabile rispetto a quest'ultime. Nonostante ciò queste nuove tecniche innovative sono il principale oggetto di ricerca e sviluppo in materia di AM.

Nonostante una grande diversità nelle tecniche produttive, ognuna di queste presenta una struttura simile (Figura 2.3), si parte sempre dal modello 3D ottenuto al CAD o tramite scannerizzazioni dell'oggetto che si desidera realizzare. Poi si procede alla creazione della *mesh*, che serve ad adattare il modello 3D alle caratteristiche della macchina operatrice, solitamente questa *mesh* si basa su elementi triangolari. Il file generato in questo modo viene salvato in formato STL e si procede alla scelta della direzione in cui realizzare il modello, il programma apposito procede dunque nel dividere in strati infinitesimi il modello (processo di *slicing*) secondo le caratteristiche della tecnologia utilizzata e a calcolare qualora fosse necessario dove applicare materiale di supporto; dunque si procede con la produzione vera e propria del modello. Una volta ultimata la realizzazione si procede alla rimozione del materiale di supporto ove presente e in alcuni casi si rendono necessarie opere di lavorazione *post-processing* per esempio per soddisfare determinati requisiti di tolleranza.

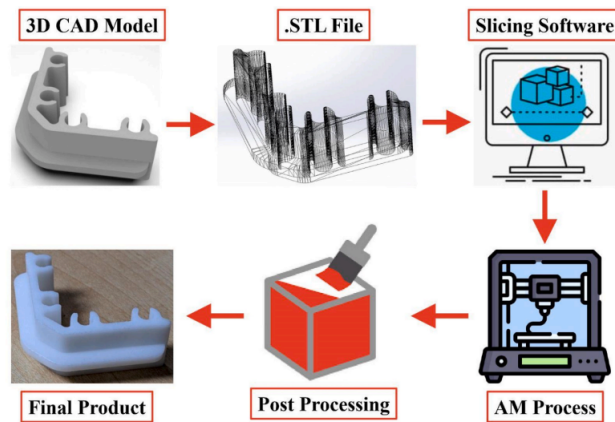


Figura 2.3: Immagine riassuntiva del procedimento delle tecniche di AM

2.1.1 Tecnica *PolyJet*

Per gli studi sperimentali riportati da questa tesi si è scelto di utilizzare un sistema per la realizzazione additiva dotata di tecnologia *PolyJet*, nota anche come *Material Jetting* o *ColorJet* (Figura 2.4); quando si parla di *PolyJet* ci si riferisce alla tecnologia brevettata da *Objet Ltd.* nel 1999, poi acquisita da

Stratasys nel 2012. E' una tecnologia che sfrutta il principio della fotopolimerizzazione tramite luce UV dei polimeri ed è in grado di raggiungere precisioni nell'ordine di 0.1-0.3 mm [9].

Una volta avviato il processo di fabbricazione, la resina liquida deve essere riscaldata fino a 30-60° in base al materiale per ottenere la viscosità adeguata per il processo. Le testine (molto simili a quelle per una stampante a inchiostro 2D) depositano un sottile strato di resina liquida (si parla di strati di spessore tipicamente tra i 16 e i 32 micron [8]) che viene solidificata da una lampada UV, è bene specificare che in macchinari che sfruttano questa tecnologia le testine si muovono solo su un piano, di conseguenza per ottenere modelli tridimensionali sono dotati di *build tray* mobile. Una volta terminato uno strato la *build tray* si sposta verso il basso e il sistema procede alla realizzazione del secondo strato. Strato dopo strato in questo modo viene prodotto il modello finito.

I vantaggi di questa tecnologia sono numerosi: un'eccellente risoluzione (fino a 0,016 mm), superfici uniformi (nessun effetto scalino a differenza degli oggetti fabbricati con la tecnologia FDM), una vasta scelta di materiali e colori, un costo e un tempo di realizzazione relativamente bassi. Inoltre, grazie al numero elevato di testine (almeno quattro), è possibile processare materiali diversi e quindi produrre modelli multimateriale. Grazie a tutto ciò, i sistemi dotati di *PolyJet* riescono a produrre modelli molto dettagliati e precisi, il tutto condito con superfici lisce e levigate, mostrando attenzione ai dettaglio e precisione degni di nota. Per questi motivi la tecnologia *PolyJet* trova la sua applicazione maggiore in campo medico, infatti per le caratteristiche sopracitate è perfetta per realizzare repliche di organi, produzione di impianti protesici personalizzati, denti realistici e modelli anatomici in scala.

Dall'altro lato però presenta anche diverse criticità, come un volume limitato per la realizzazione del modello e, come nel caso della maggior parte delle altre tecnologie, il processo richiede l'utilizzo di materiale di supporto e perciò una fase di *post-processing*; durante questa fase, i supporti e i residui di resina devono essere rimossi. Va notato che, come tutti i pezzi creati da fotopolimeri, sono sensibili alla luce, cosa che può modificarne le sue proprietà nel tempo.

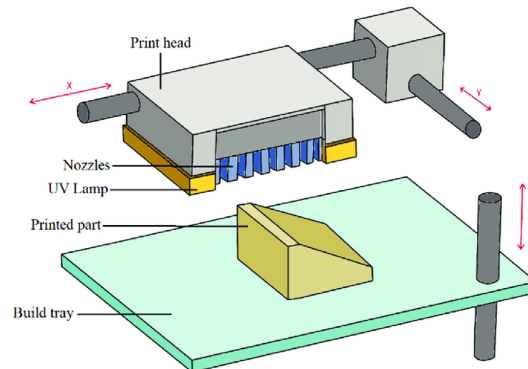


Figura 2.4: Schema riassuntivo sul funzionamento della tecnica *Polyjet*

2.2 Materiali

Nelle prime fasi di sviluppo le tecnologie di AM erano incentrate prevalentemente su materiali plastici, e molte di queste sono state sviluppate per produrre modelli con diversi materiali di questo tipo. Dopo un importante sviluppo le tecnologie di AM sono sempre più in grado di produrre forme complesse nei più svariati materiali, tra cui polimeri, metalli, ceramiche e compositi [10].

2.2.1 Polimeri

Un polimero è una molecola di grandi dimensioni composta da unità strutturali che si ripetono, ne esistono di vari tipi sia di naturali che sintetici; per i processi di AM i polimeri come resine fotosensibili, elastomeri, Nylon, plastica ABS e cera possono essere utilizzati per produrre modelli tramite tecniche quali SLA, SLS e FDM.

Il Nylon è il polimero più utilizzato nel processo SLS perché si fonde e si lega grazie al laser meglio di altri polimeri. La plastica ABS è invece il polimero più popolare per il processo FDM (Figura 2.5), mentre i polimeri fotosensibili, usati nel processo SLA, vulcanizzano quando esposti a un laser con una determinata lunghezza d'onda. Nylon, elastomeri, plastica ABS e cera sono materiali termoplastici, ovvero quando portati a alte temperature passano da una struttura solida dall'aspetto vetroso a una più morbida per poi fondersi in un liquido viscoso. Le resine fotosensibili invece sono solitamente polimeri termoindurenti, i quali andranno incontro a degradazione invece che fusione se sottoposti ad alte temperature.

I modelli prodotti tramite AM e formati da polimeri possono essere usati per prototipi, provini per test o anche parti funzionali. Oltre ai polimeri industriali, anche i polimeri biocompatibili sono stati testati tramite i processi SLS e FDM per applicazioni mediche come impianti o sostegni per tessuti. I componenti formati da composti polimerici a livello industriale sono solitamente ottenuti tramite stampaggio; l'impiego di tecniche di AM può essere sfruttato per fabbricare le forme per ridurre il tempo e i costi per lo sviluppo di nuovi utensili.



Figura 2.5: Filamenti di ABS per FDM

2.2.2 Metalli

Le parti in metallo possono essere prodotti usando tecniche di AM sia in modo indiretto, dove un *binder* viene utilizzato per legare le particelle di metallo per formare il modello 3D e sono richieste lavorazioni *post-processing*, sia in modo diretto, dove le particelle di metallo sono completamente fuse per ottenere il modello finito senza ricorrere al *post-processing*.

Per quanto riguarda i metodi così detti indiretti, le parti in metallo possono essere prodotte tramite SLS o fondendo parzialmente la polvere metallica o fondendo prima il *binder* (il quale fonde a una temperatura minore) per legare le particelle. Questi *binder* possono essere polimeri oppure metalli con una bassa temperatura di fusione. Come già riportato in precedenza, le parti prodotte in questo modo necessitano di trattamenti di *post-processing*, come la rimozione del *binder*, trattamento termico e, se necessario, infiltrazioni di metallo liquido in modo da ottenere una parte finita uniformemente densa. Tuttavia le parti in metallo possono essere prodotte anche tramite SLA mescolando particelle di metallo in resine fotosensibili, ma risultano necessarie lavorazioni *post-processing* per ottenere le caratteristiche desiderate. La tecnica di LOM presenta però criticità nel determinare la resistenza della parte nella direzione perpendicolare agli strati, i quali possono essere stati uniti tramite saldatura o incollaggio.

I metodi diretti invece utilizzano un laser ad alta potenza come fonte di calore, perciò il meccanismo per cui le particelle di metallo si legano è prettamente la fusione. Per questo motivo le parti in metallo prodotte con metodi diretti presentano proprietà pari, se non migliori in certi casi, rispetto al metallo lavorato tramite tecniche tradizionali.



Figura 2.6: Esempio di parte in metallo prodotta usando tecniche di AM

2.2.3 Ceramiche

Le ceramiche sono materiali inorganici, non metallici e solidi; alcuni esempi sono l'allumina, la silice e lo zirconio. Le ceramiche solitamente presentano grande resistenza chimica e la capacità di resistere alle alte temperature, perciò hanno trovato grande applicazione nel campo industriale. Però questi materiali sono molto fragili e duri, il che li rende complessi da produrre, specialmente se si

parla di parti con geometrie complesse; per questi motivi le tecnologie di AM hanno potuto trovare successo con questi materiali, sia con processi indiretti che diretti.

Per quanto riguarda i metodi indiretti, possono essere processate per la produzione di parti ceramiche industriali, ceramiche avanzate e ceramiche biocompatibili tramite metodi di FDM, SLS e SLA. I modelli ceramici prodotti in questo modo presentano tipicamente un elevato contenuto di *binder* organici e inorganici, perciò è richiesto un ulteriore passaggio di sinterizzazione per rimuovere quest'ultimi e addensare il modello.

I metodi diretti per la produzione di ceramiche tramite tecniche di AM sono molto più complicate a causa delle elevate temperature di fusione (anche oltre i 1700°C), dei notevoli gradienti termici, degli stress termici e stress residui associati alla fusione e solidificazione nei processi a base di laser. Per esempio, il processo SLS è stato testato per produrre parti in ceramica da un misto di allumina e zirconio fondendo completamente la polvere ceramica. La base di polvere ceramica era stata preriscaldata (oltre i 1600°C) per evitare di accumulare stress termico; in questo modo si è riusciti a creare modelli senza crepe, ben definiti e uniformemente densi senza bisogno di *post-processing*.



Figura 2.7: Alcuni esempi di pezzi in ceramica prodotti tramite AM

2.2.4 Compositi

I compositi sono materiali studiati in laboratorio o anche ottenuti naturalmente formati da almeno due materiali costituenti che presentano proprietà fisiche e/o chimiche differenti che rimangono separate e distinte a livello microscopico, ma una volta che la struttura completa è terminata il composito presenta caratteristiche che non sarebbero state ottenute utilizzando nessuno dei materiali costituenti da soli. I materiali in un composito possono essere mescolati uniformemente, originando così un composto omogeneo (composito uniforme),

oppure non uniformemente, nel quale la composizione varia gradualmente all'interno del volume, originando quindi cambiamenti nelle proprietà del materiale composito.

I compositi uniformi fabbricati utilizzando processi di AM sono solitamente formati utilizzando un misto pre-preparato dei materiali appositi, come per esempio una base di polvere mista per SLS, un filamento di materiali misto per FDM, un composito laminato per LOM, o un misto di resina fotosensibile con particolato per SLA.

I compositi possono essere prodotti con tecniche di AM comprendono matrici polimeriche, matrici ceramiche, matrici metalliche, fibre e particolati rinforzati compositi. Una delle famiglie di compositi uniformi più importanti per utilizzo industriale sono i compositi rinforzati con fibre. I processi di AM possono essere usati per produrre compositi a base di fibre sono la FDM e LOM, invece la SLS non è indicata per la lavorazione di compositi a base di fibre in quanto formare uno strato uniforme di misto polvere e fibra è complicato in questa tipologia di processo. I compositi metallo-metallo e ceramica-ceramica invece possono essere processati tramite SLS. Questi compositi lavorati possono essere classificati in due categorie: quelli che mirano a facilitare il processo usando una sinterizzazione a base di liquidi, e quelli che combinano vari materiali per ottenere proprietà impossibili impiegando un solo materiale. I compositi polimero-metallici e polimero-ceramici possono invece essere prodotti tramite FDM. La fabbricazione di compositi tramite LOM dipende direttamente dallo sviluppo di compositi laminati, come fibre o fogli rinforzati di particolato, come per esempio compositi a matrice polimerica o a matrice ceramica.



Figura 2.8: Esempio di parti ottenute tramite FDM a partire da materiali compositi

Capitolo 3

Strutture a Rigidezza Negativa

Le strutture a rigidezza negativa (*Negative Stiffness Structures*), o, più semplicemente, NSS sono particolari strutture multistabili appartenenti al gruppo dei metamateriali meccanici che, nel loro insieme, presentano qualità diverse da quelle che ci si aspetterebbe da un materiale tradizionale, ovvero, in caso di sollecitazione (solitamente compressione), per ottenere un aumento nella deformazione il carico applicato richiesto è minore una volta raggiunto un determinato carico critico [1], come è possibile notare nella Figura 3.1. Ciò è dovuto a una particolare disposizione delle strutture interne, che, assumendo una nuova configurazione stabile tramite il fenomeno del *buckling*, variano la propria reazione al carico [3].

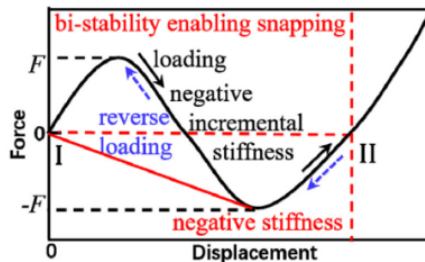


Figura 3.1: Comportamento di una struttura a rigidezza negativa in un grafico deformazione-carico

E' bene specificare quindi che non esistono materiali veri e propri che presentano caratteristiche delle NSS, ma determinati materiali (per lo più plastici o gommosi) modellati in determinate configurazioni, possono presentare un comportamento a rigidezza negativa, perciò si parla di metamateriali.

I metamateriali meccanici sono materiali che presentano proprietà differenti in

base alla loro architettura e configurazioni e non in base alle proprietà di massa dei materiali costituenti. Altre proprietà generali degne di nota dei metamateriali sono: modulo di massa negativo, rapporto di Poisson negativo e elevato assorbimento di energia specifica [11]. Perciò sfruttando l'instabilità elastica di alcuni materiali si possono creare multimateriali formati da celle con configurazioni particolari che globalmente mostrano le caratteristiche delle NSS: ovvero bistabilità, *snap-through* e rigidità negativa vera e propria. Queste proprietà rendono queste strutture particolarmente adatte per l'assorbimento di urti, ma non sono da escludere anche applicazioni antisismiche in campo edile [2] e di riduzioni di vibrazioni. Gli elementi di rigidità negativa tendono a deformarsi come risultato dell'energia assorbita e quindi amplificano l'azione di dissipazione piuttosto che dissipare l'energia attraverso una deformazione plastica [12].

Le forme più comuni di NSS sono per lo più cubiche, ma gli studi più recenti (tra cui anche questo) si stanno concentrando su forme cilindriche, indagando sulle configurazioni e materiali più adatti alla loro realizzazione. Avendo perciò le NSS una struttura elementare complessa, per lo più formata da elementi sottili e curvi per sfruttare il fenomeno dello *snap-through*, per la realizzazione di questa tesi si è scelto di produrre quest'ultime tramite AM, in particolare usando un sistema dotato di tecnologia *PolyJet*.

3.1 Proprietà

Come già illustrato precedentemente, le NSS presentano tre caratteristiche principali legate strettamente alla deformazione che ne caratterizzano il loro comportamento: bi-stabilità, *snap-through* e rigidità negativa vera e propria. Queste proprietà sono influenzate dai diversi parametri costruttivi della NSS, modificandone i valori si possono variare le sopracitate caratteristiche.

In particolare la proprietà di bi-stabilità, legata strettamente al fenomeno del *buckling* (approfondito maggiormente nella sezione 3.1.1), individua strutture che possiedono diverse configurazioni stabili, ovvero, se deformate e raggiunta una soglia di carico critica, possono assumere una nuova configurazione stabile senza portare il materiale o la struttura oltre la soglia di snervamento che ne altererebbe permanentemente le proprietà fisiche e meccaniche (Figura 3.2).

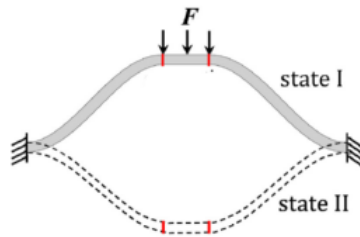


Figura 3.2: Esempio di comportamento bi-stabile in un elemento curvo

Per *snap-through* si intende un passaggio tra una configurazione stabile e l'altra che avviene in tempi molto brevi, quasi istantaneo.

Si parla di rigidità negativa vera e propria se per avere un aumento della deformazione è necessario ridurre il carico applicato. In un grafico carico-deformazione è evidenziata da un tratto discendente; questo fenomeno è dovuto alla liberazione di energia tramite lo *snap-through* (Figura 3.3).

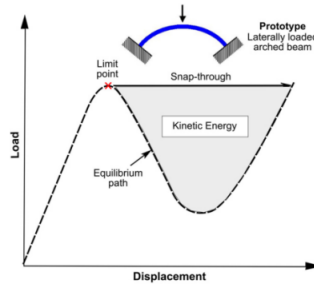


Figura 3.3: Esempio di comportamento *snap-through*

3.1.1 *Buckling*

Il *buckling* è un fenomeno non lineare che si verifica quando una struttura caricata raggiunge un carico critico (Figura 3.4), che può anche essere minore del carico ultimo di rottura o del carico di snervamento [13]. E' un fenomeno abbastanza comune visibile soprattutto in travi sollecitate a compressione, rotaie sottoposte a espansione termica, gasdotti sottomarini e pannelli sottili [7].

Il carico critico (P_{cr}) non dipende dal carico in compressione ma bensì dal modulo elastico del materiale; per una trave è calcolabile tramite la formula di Eulero:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{l^2}$$

Dove E è il modulo elastico del materiale, I è il momento d'inerzia della trave e l è la lunghezza d'inflessione libera.

L'utilizzo di questo fenomeno a proprio vantaggio è alla base del comportamento e del design delle NSS.

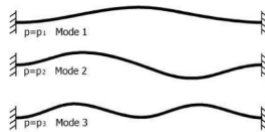


Figura 3.4: Esempio di *buckling* in una trave

3.2 Design e Geometria

Prima di arrivare al design oggetto di questo studio è stato condotto un approfondito studio, prima ipotizzando tre tipi di celle elementari (denominate A,B,C) che potessero presentare un comportamento a rigidità negativa (riportate nella Figura 3.5 sotto), poi eseguendo simulazioni preliminari per stimarne il comportamento, variandone anche i parametri strutturali. Così facendo si sono individuate le strutture, con le diverse configurazioni delle celle, che probabilmente avrebbero riportato il comportamento atteso, scartando le altre [4]. E' stato possibile individuare una configurazione in particolare che ha mostrato un comportamento migliore rispetto alle altre, che coincide con la struttura A.

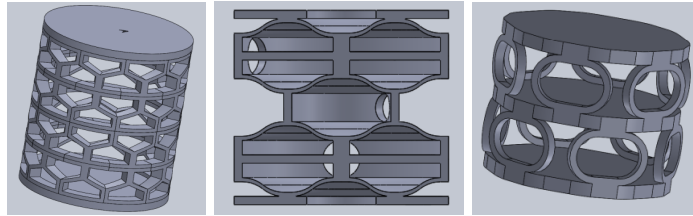


Figura 3.5: Da sinistra verso destra: struttura A, struttura B, struttura C

Individuata questa configurazione gli studi successivi si sono concentrati più sull'analisi di quest'ultima tramite il metodo degli elementi finiti (FEM) grazie al software ANSYS, per cercare di ottimizzarne il comportamento variandone parametri costruttivi e orientamento [6]. Trovata quindi la configurazione globale migliore, ci si è potuti concentrare sull'analisi più dettagliata di questa, spostando il focus della ricerca sul materiale migliore per lo scopo, individuando i candidati principali nella famiglia di materiali simil-gomma *Tango* [7].

La geometria ottima individuata grazie agli studi precedenti è quella in Figura 3.6 con un valore dello spessore t pari a 1 mm e h pari a 4 mm, la struttura presenta una geometria cilindrica con un'altezza totale e diametro esterno di 59 mm, mentre il diametro interno è pari a 50 mm.

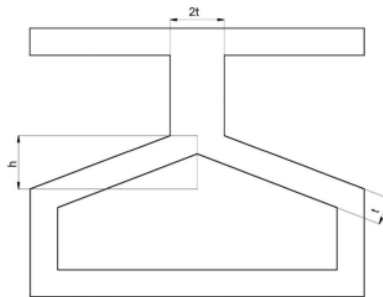


Figura 3.6: Parametri costruttivi della struttura A

Capitolo 4

Campagna sperimentale

La campagna sperimentale effettuata si può dividere in due parti: caratterizzazione del materiale tramite provini cilindrici e studio delle strutture; in particolare sono state studiate due strutture a singolo strato, sei con due strati e, siccome alcune strutture presentavano danneggiamenti in qualche caso anche estesi dopo i test, quattro con due strati ma con spessori raddoppiati.

4.1 Produzione e problemi

Per la realizzazione delle strutture e dei provini si è deciso di utilizzare un sistema per la fabbricazione in AM *Objet30 V5 Prime* (Figura 4.1), prodotta da *Stratasys* e dotata di tecnologia *PolyJet*, il tutto supportato dal *software GrabCAD Print*. Il sistema è in grado di raggiungere una buona precisione di 0.1 mm [14] e la possibilità di creare strati di spessore di 28 micron [15], il materiale di supporto scelto è il SUP705, che necessita di essere rimosso tramite un getto d'acqua pressurizzata. Durante la rimozione di quest'ultimo è bene prestare attenzione a non danneggiare le strutture e comprometterne le caratteristiche. Per la produzione di modelli in materiale *TangoBlack* (e per tutti i materiali simil-gomma della famiglia *Tango*) è necessario impostare la qualità su *high-speed* in quanto le altre modalità di fabbricazione non sono supportate [16].

4.1.1 Problemi in fase di produzione

Durante alcune stampe sono stati riscontrati problemi come il componente traslato di circa mezzo centimetro lateralmente a partire da una certa altezza sempre sopra la metà, oppure durante altre stampe il sistema ha distrutto il modello urtandoci contro.

La causa di questi errori di realizzazione è stata individuata nel file STL della NSS a doppio strato, perciò per risolvere il problema è stato necessario creare un nuovo modello CAD utilizzando il *software SOLIDWORKS*, in particolare

è stato creato un assieme sovrapponendo due strutture a singolo strato e poi importato in *GrabCAD* in formato stp.

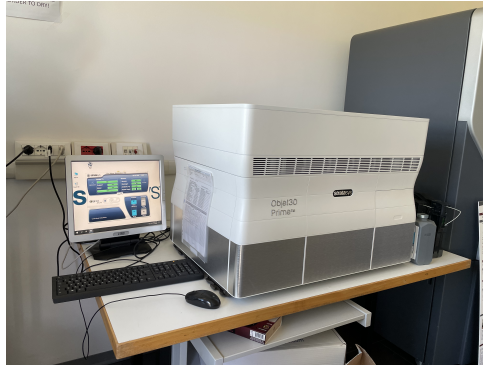


Figura 4.1: *Objet30 V5 Prime* con il pannello di controllo

4.1.2 Problemi successivi

Oltre ai problemi in fase di realizzazione le NSS dopo ogni prova statica presentavano vari danneggiamenti delle celle elementari, ma anche semplicemente maneggiandole era possibile creare delle rotture considerevoli, in questo modo compromettendo anche solo la validità dei test. E' bene specificare che i modelli non hanno mai subito sbalzi di temperatura e sono state sempre immagazzinate in una scatola chiusa lontana da fonti di luce e calore nel laboratorio dell'università, dotato di condizionamento, quindi è da escludere un degrado termico del materiale, al quale, essendo un fotopolimero, ne è particolarmente soggetto. E' possibile però che il materiale si sia deteriorato a causa del tempo passato tra la realizzazione e i test, infatti tra le stampe e i test sono passati all'incirca 20 giorni.

4.2 Caratterizzazione del materiale

Le caratteristiche del *TangoBlack* fornite dalla ditta produttrice *Stratasys* [15] sono:

- Densità pari a 1.14-1.15 g/cm³
- Resistenza alla trazione pari a 1.8-2.4 MPa
- Elongazione a rottura del 45-55%
- Resistenza al taglio pari a 3-5 kg/cm

I provini cilindrici utilizzati per la caratterizzazione del materiale *TangoBlack* (riportati nella Figura 4.2) sono stati realizzati seguendo la normativa D 575-91,

la quale indica come dimensioni di realizzazione un diametro di base di 28.6 ± 0.1 mm (così da ottenere 1 in^2 di superficie) e 12.5 ± 0.5 mm in spessore [17]; è opportuno specificare che ogni provino è stato realizzato in stampe differenti come da normativa.



Figura 4.2: Provino cilindrico usato per la caratterizzazione del materiale

Il test è stato svolto utilizzando una cella di carico da 10 T, effettuare tre compressioni fino al 40% dello spessore del provino (5 mm), dove le prime due hanno l'obiettivo di condizionare il provino, la terza invece è quella utilizzata per calcolare la media dei valori.

Per la realizzazione di queste compressioni inizialmente si è deciso di effettuare compressioni alla velocità di 12 mm/min, quindi è stato necessario creare un'onda triangolare con span di 5 mm dalla condizione di contatto, ottenendo una frequenza di 0.01 Hz. Con questi dati però si portava il provino a rottura, come riportato in Figura 4.3, perciò si è reso necessario cambiare alcuni parametri: si è scelto di aumentare la velocità di discesa a 1.2 mm/s, portando quindi la frequenza dell'onda triangolare a 0.06 Hz. Per la rilevazione dei dati è stata impostata la frequenza di campionamento (*Sample Rate*) a 1000 Hz e lo *Scan Rate* a 500 Hz.



Figura 4.3: Provino rotto a seguito del test

4.2.1 Risultati delle prove sui provini cilindrici

I dati della media estratta grazie ai dati ottenuti dai sei provini rimanenti sono riportati in Figura 4.4; presenta un massimo al valore di 2605 N in corrispondenza di 4.61 mm di compressione.

I valori di compressione e di carico sono ottenute facendo una media di ambedue i valori, in quanto, per quanto riguarda i valori di compressione, pur non essendo stato possibile campionarli ogni volta allo stesso valore, si trovano nello stesso intorno di valori (la massima differenza riscontrata tra i valori di compressione è stata dell'ordine di ± 0.2 mm dal valore medio). Mentre per i valori di carico, per ogni punto i valori mostrano poca differenza tra tutti i provini, quindi possono essere ritenuti comparabili per un andamento qualitativo delle proprietà del materiale *TangoBlack*.

Il primo valore di compressione del grafico è negativo per via di imprecisioni nella pressa, che leggeva un valore di carico residuo maggiore di zero diverso per ogni provino, anche quando non in contatto con esso; è stato comunque ritenuto opportuno riportarlo nonostante non sia un valore congruente con la realtà per avere maggiore precisione nel costruire l'andamento della curva.

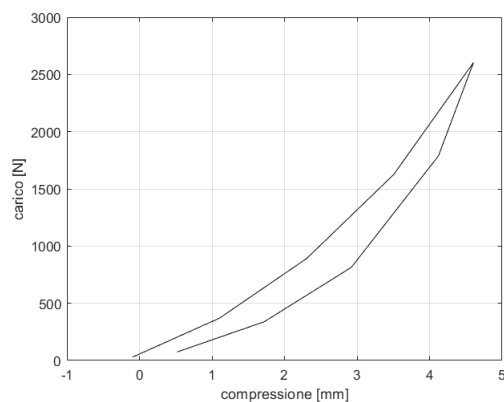


Figura 4.4: Grafico compressione-carico dei valori medi ottenuti dai provini

4.3 Test delle strutture

I test per le NSS in materiale *TangoBlack* sono stati effettuati come compressioni quasi statiche, utilizzando una cella di carico di 500 N e una velocità di discesa di 12 mm/min fino a circa metà dell'altezza delle strutture. Per la rilevazione dei dati delle strutture a singolo e doppio strato è stata impostata la frequenza di campionamento (*Sample Rate*) a 1000 Hz e lo *Scan Rate* a 500 Hz; mentre per le strutture con spessori raddoppiati il *Sample Rate* è stato impostato a 2000 Hz e lo *Scan Rate* a 1000 Hz.

4.3.1 Strutture a Singolo Strato

Le due strutture a singolo strato testate sono i resti delle stampe fallite delle strutture a doppio strato (sezione 4.1.1), che si sono comunque ritenute utili a questo studio. Sono state realizzate in due stampe differenti.

Come visibile in Figura 4.5 la curva ricavata dalla compressione quasi statica delle strutture a singolo strato sono presenti due picchi, e altrettante valli, in corrispondenza di un carico di circa 2 N dovuti al collasso delle celle elementari della struttura, delle quali ne sono presenti due per ogni strato, perciò per le strutture a doppio strato ci si aspettano quattro picchi. La presenza dei picchi nel grafico evidenzia un comportamento a rigidezza negativa della struttura fino alla valle del grafico successiva. Una volta che l'intero strato è collassato la struttura presenta un comportamento non a rigidezza negativa. E' bene sottolineare che entrambe le strutture testate una volta completata la prova hanno riportato danneggiamenti e quindi un'alterazione delle proprietà della struttura, nonostante ciò non è stata riscontrata una variazione dell'altezza delle strutture dopo il test.

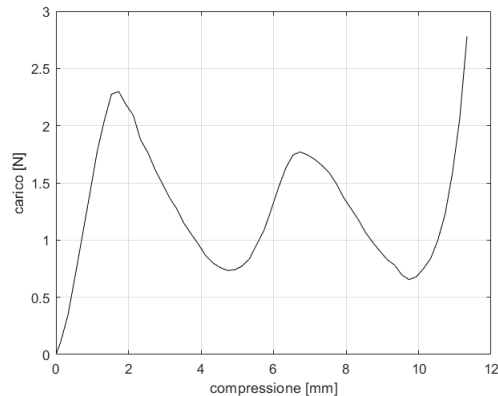


Figura 4.5: Grafico compressione-carico dei valori medi ottenuti dalle due strutture a singolo strato

4.3.2 Strutture a Doppio Strato

Delle sei strutture testate tre presentavano danneggiamenti a più di una cella elementare dovuti a maneggiamenti eccessivi e/o impropri prima dei test oppure a un deterioramento anomalo del materiale durante lo stoccaggio nel laboratorio, ma si è ritenuto comunque opportuno testarle. Ogni struttura è stata realizzata in una stampa differente.



Figura 4.6: Struttura prima di essere testata

Le strutture hanno presentato in generale comportamenti molto eterogenei che non dipendevano dai danneggiamenti (grafici visualizzabili nell'appendice A.3), infatti alcune strutture che presentavano rotture a un paio di celle elementari alterate hanno presentato un comportamento a rigidità negativa maggiore. Il fenomeno è da imputare al fatto che il comportamento della struttura è dettato dal collasso simultaneo di uno o più strati (Figura 4.7), se il collasso avviene strato per strato si ottiene un grafico con 4 picchi e 4 valli molto distinti, mentre se gli strati collassano in parte tutti allo stesso momento si ottiene un andamento più lineare dove è più difficile individuare i picchi e le valli.

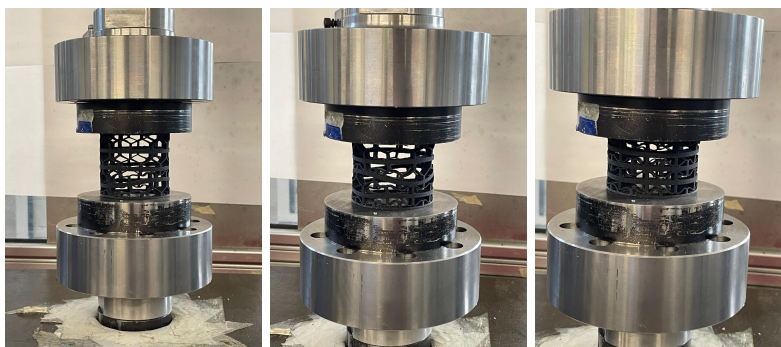


Figura 4.7: Fasi del test di una struttura a doppio strato

Come è possibile vedere dal grafico in Figura 4.8 che riporta la media delle prove sulle strutture danneggiate e non, il collasso degli strati una volta raggiunto il

carico di circa 1.5-1.6 N, paragonabile alle strutture a singolo strato (il confronto dei valori è approfondito nella sezione 4.3.4).

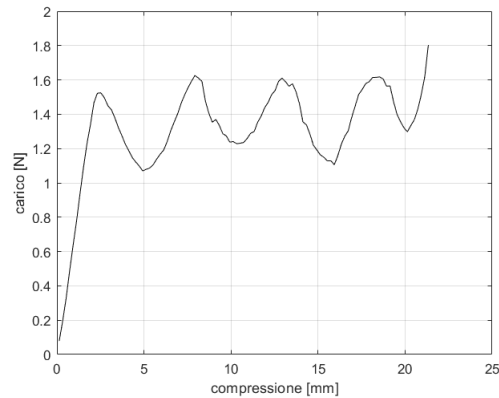


Figura 4.8: Grafico compressione-carico dei valori medi ottenuti dalle strutture a doppio strato

Anche in questo caso nelle strutture una volta testate non sono state riscontrate variazioni residue nell'altezza, ma, al contempo, su alcune strutture sono state individuate rotture alle celle elementari (Figura 4.9), rendendole inutilizzabili in un ipotetico secondo utilizzo. I danneggiamenti riportati dalle strutture dopo il test possono essere dati anche da una compressione esagerata delle strutture, in quanto non è possibile impostare nella pressa l'altezza finale a cui fermare la discesa, perciò si è reso necessario farlo a mano, quindi anche solo fermare leggermente più tardi la discesa della pressa potrebbe aver potuto danneggiare maggiormente le strutture.



Figura 4.9: Esempio di struttura a doppio strato significativamente danneggiata nello strato più inferiore dopo un test

Per verificare che il fenomeno della rottura sia dovuto solo a un'eccessiva fragilità del materiale sono state prodotte e testate quattro strutture con gli spessori delle celle elementari raddoppiati (analizzate più nel dettaglio nella prossima sezione).

4.3.3 Strutture a Doppio Strato con Spessori Raddoppiati

Per aumentare la resistenza delle strutture si è provato a produrre e testare delle strutture dove ogni spessore è il doppio rispetto a quelle di partenza (Figura 4.10), in questo caso però sono state realizzate tutte in un'unica stampa. Dal grafico in Figura 4.11 si può notare come gli spessori raddoppiati hanno permesso di portare il valore del collasso del primo strato a circa 5 N invece che a 2 N. Anche in questo caso le strutture presentavano danneggiamenti più o meno estesi dopo il test, spesso anche di entità maggiore rispetto alle strutture precedenti. Inoltre, ancora una volta dopo essere state testate le strutture non hanno riscontrato variazioni nell'altezza dovute alle rotture.



Figura 4.10: Struttura con spessori raddoppiati a confronto con una struttura a doppio strato

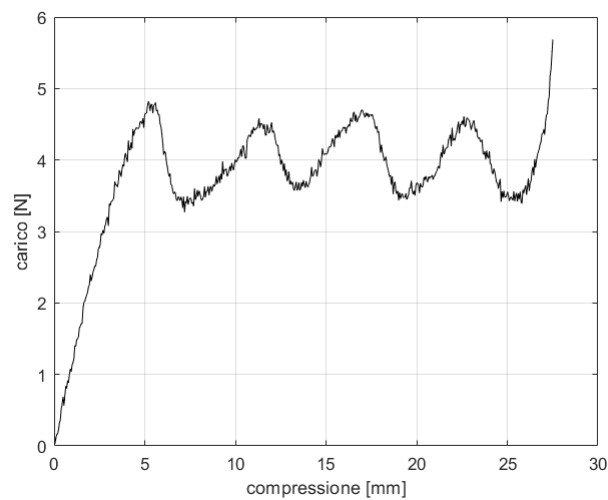


Figura 4.11: Grafico della media dei valori per compressione e carico ottenuta dalle strutture

4.3.4 Confronto dei valori ottenuti

La seguente tabella riporta in modo sintetico le informazioni estrapolate dal test delle strutture nei punti significativi. E' possibile notare come le strutture a doppio strato raggiungano il carico critico oltre il quale si presenta il comportamento a rigidità negativa per valori inferiori (vedi riga 1° picco), tuttavia la forza che viene assorbita è minore in quanto la differenza tra il picco e la valle è decisamente inferiore (per le strutture a doppio strato raggiunge al massimo un valore di circa 1.1 N, mentre per quelle a singolo strato 1.5 N e per le strutture con spessori raddoppiati 1.6 N). Nella seguente tabella sono riportati i valori notevoli ottenuti dalla media delle prove sulle diverse configurazioni di strutture arrotondati alla terza cifra decimale.

		singolo strato	doppio strato	spessori doppi
1° picco	compressione carico	1.732 mm 2.298 N	2.507 mm 1.524 N	5.595 mm 4.805 N
1° valle	compressione carico	4.734 mm 0.734 N	4.90 mm 1.064 N	7.197 mm 3.268 N
2° picco	compressione carico	6.735 mm 1.770 N	7.908 mm 1.514 N	12.001 mm 4.527 N
2° valle	compressione carico	9.737 mm 0.654 N	10.911 mm 1.190 N	13.402 mm 3.573 N
3° picco	compressione carico	/	13.513 mm 1.571 N	16.954 mm 4.698 N
3° valle	compressione carico	/	15.915 mm 1.049 N	19.006 mm 3.436 N
4° picco	compressione carico	/	18.716 mm 1.797 N	22.608 mm 4.611 N
4° valle	compressione carico	/	21.517 mm 0.675 N	25.809 mm 3.389 N

Capitolo 5

Conclusioni

L'obiettivo di questo studio era quello di verificare tramite prove sperimentali che le NSS realizzate in *TangoBlack* presentassero il comportamento auspicato, e queste hanno portato i risultati sperati mostrando l'efficacia delle strutture nell'assorbire energia.

Tutti e tre i tipi di strutture hanno presentato un comportamento a rigidità negativa che può essere utilizzato nell'ambito di assorbimento degli urti, la differenza sta soprattutto nel carico critico oltre il quale questo comportamento è riscontrabile, il minore è stato individuato nelle strutture a doppio strato, mentre il maggiore per le strutture con spessori raddoppiati.

Inoltre lo spessore delle celle elementari non ha influito positivamente nella resistenza delle NSS, in quanto nella maggior parte dei casi dopo il test le strutture con spessori raddoppiati hanno riportato danneggiamenti maggiori rispetto a quelle "normali".

In conclusione le strutture realizzate in *TangoBlack* hanno portato i risultati sperati, mostrando un buon comportamento a rigidità negativa, tuttavia non è possibile impiegarle per applicazioni dove si richiede che vengano sottoposte a numerosi cicli di carico-scarico.

5.1 Limitazioni

I problemi riscontrati con la fragilità e il rapido deterioramento del materiale *TangoBlack* sono stati la principale causa limitante nello studio, infatti avendo strutture già danneggiate prima del test ha probabilmente intaccato quella che è l'affidabilità di quest'ultimo. Tuttavia gli incoraggianti risultati dati dalle prove sperimentali provano che i materiali simil-gomma possono essere una buona soluzione per la realizzazione delle NSS per applicazioni nel campo dell'assorbimento di urti.

5.2 Studi futuri

Visti i risultati ottenuti, nonostante le criticità evidenziate, per gli studi futuri si consiglia di concentrarsi comunque sui materiali simil-gomma o plastici, concentrandosi su materiali con una spiccata elasticità.

Oppure, viste le buone caratteristiche elastiche del materiale *TangoBlack*, si potrebbe mantenere questo materiale e indagare maggiormente sulle possibili variazioni alla cella elementare, cercando di ridurre gli spigoli vivi, poiché sono le posizioni dove le strutture si sono rotte più frequentemente.

Bibliografia

- [1] Marzia Corsi, Sara Bagassi, Martino Moruzzi, and Felix Weigand. Additively manufactured negative stiffness structures for shock absorber applications. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 29:1–12, 08 2020.
- [2] Satish Nagarajaiah, Lin Chen, and Meng Wang. Adaptive stiffness structures with dampers: Seismic and wind response reduction using passive negative stiffness and inerter systems. *Journal of Structural Engineering*, 148:04022179, 08 2022.
- [3] Yi Pan, Yang Zhou, Meng Wang, Qiang Gao, and Beibei Sun. A novel reinforced cylindrical negative stiffness metamaterial for shock isolation: Analysis and application. *International Journal of Solids and Structures*, 279:112391, 06 2023.
- [4] Marzia Corsi. Design of experiment analysis of additively manufactured negative stiffness structures for shock absorber applications. Master's thesis, Alma Mater Studiorum - Università di Bologna, 2018/2019.
- [5] Elia Santinato. Caratterizzazione e studio di strutture a rigidità negativa prodotte con tecnologie additive, 2023/2024.
- [6] Luca Neri. Graduation thesis in aerospace technologies and materials: Negative stiffness structures: an additively manufactured design solution for aerospace applications. Master's thesis, Alma Mater Studiorum - Università di Bologna, 2020/2021.
- [7] Millene Gomes Araujo. Root cause analysis applied to a finite element model's refinement of a negative stiffness structure. Master's thesis, Alma Mater Studiorum - Università di Bologna, 2021/2022.
- [8] Md Islam, Md Hosne Mobarak, Md. Israfil Hossain Rimon, Md. Zobair Al Mahmud, Jubaraz Ghosh, Md. Mir Ahmed, and Nayem Hossain. Additive manufacturing in polymer research: Advances, synthesis, and applications. *Polymer Testing*, 132:108364, 02 2024.
- [9] Nunzia A. Material jetting (polyjet): tutto quello che c'è da sapere. *3D natives*, 09 2021.

- [10] Nannan Guo and Ming Leu. Additive manufacturing: Technology, applications and research needs. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 8, 09 2013.
- [11] Kaikai Che, Chao Yuan, Jiangtao Wu, H. Qi, and Julien Meaud. Three-dimensional-printed multistable mechanical metamaterials with a deterministic deformation sequence. *Journal of Applied Mechanics*, 84, 09 2016.
- [12] Xin Liu, Xiaojun Tan, Bing Wang, Shuai Chen, Lianchao Wang, and Shao-wei Zhu. Research on hierarchical cylindrical negative stiffness structures' energy absorption characteristics. *Smart Materials and Structures*, 32, 07 2023.
- [13] Enrico Troiani. Appunti del corso di 'Costruzioni Aeronautiche' (2024).
- [14] Stratasys. Polyjet - sistemi e materiali, 2022.
- [15] Stratasys. *Tango - PolyJet simulated rubber material*, 2018.
- [16] Stratasys. *Tango Family of Rubber-Like Materials*, 2019.
- [17] The American Society for Testing and Materials (ASTM). *Designation D 575 - 91: Standard Test Methods for Rubber Properties in Compression*, Reapproved 2001.

Appendice A

Grafici ottenuti dalle prove sperimentali

Nelle seguenti sezioni vengono riportati i grafici compressione-carico dei sei provini cilindrici per la caratterizzazione del materiale, delle due strutture a singolo strato, delle sei strutture a doppio strato e delle quattro strutture a doppio strato con spessori raddoppiati testati durante la campagna sperimentale.

A.1 Provini Cilindrici

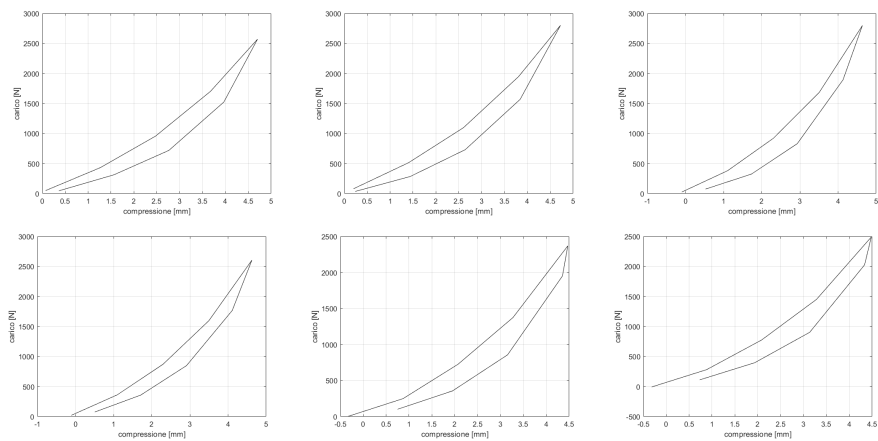


Figura A.1: Grafici compressione-carico relativi ai sei provini cilindrici

A.2 Strutture a Singolo Strato

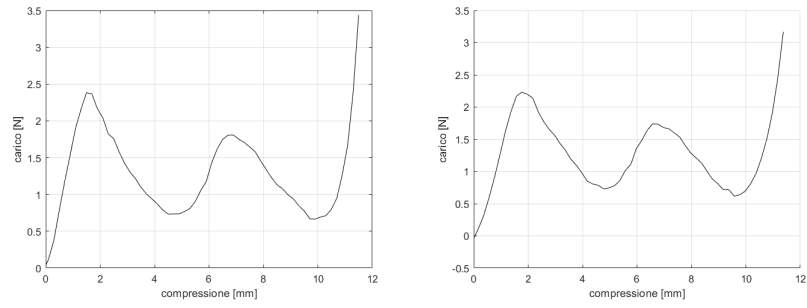


Figura A.2: Grafici compressione-carico relativi alle due strutture a singolo strato

A.3 Strutture a Doppio Strato

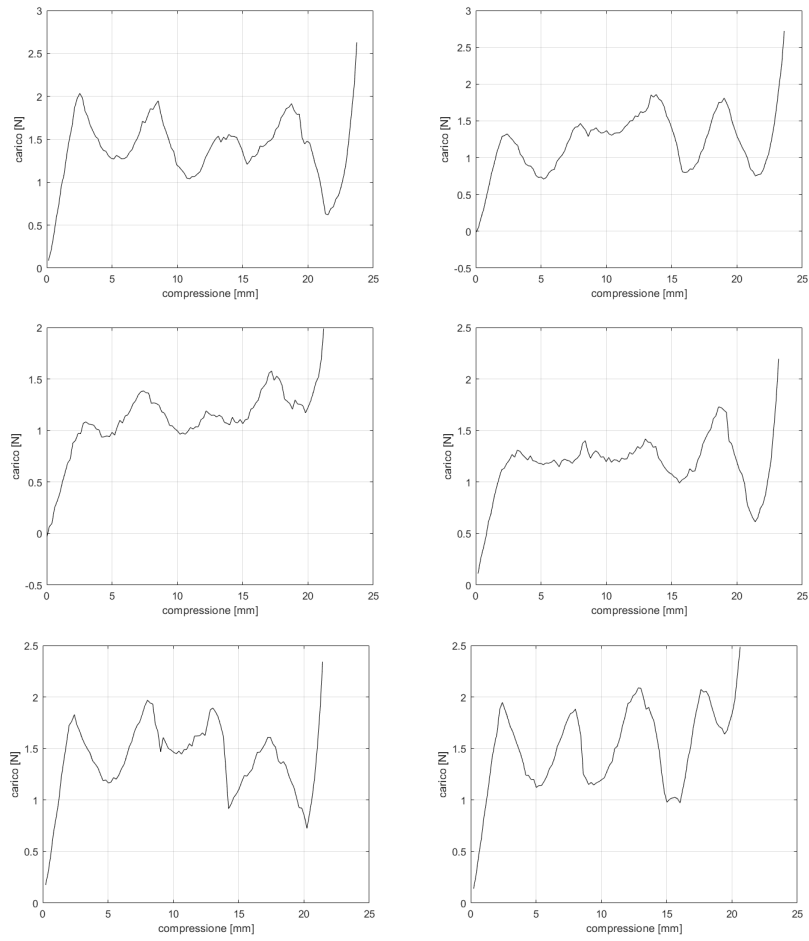


Figura A.3: Grafici compressione-carico relativi alle sei strutture a doppio strato

A.4 Strutture a Doppio Strato con Spessori Rad-doppiati

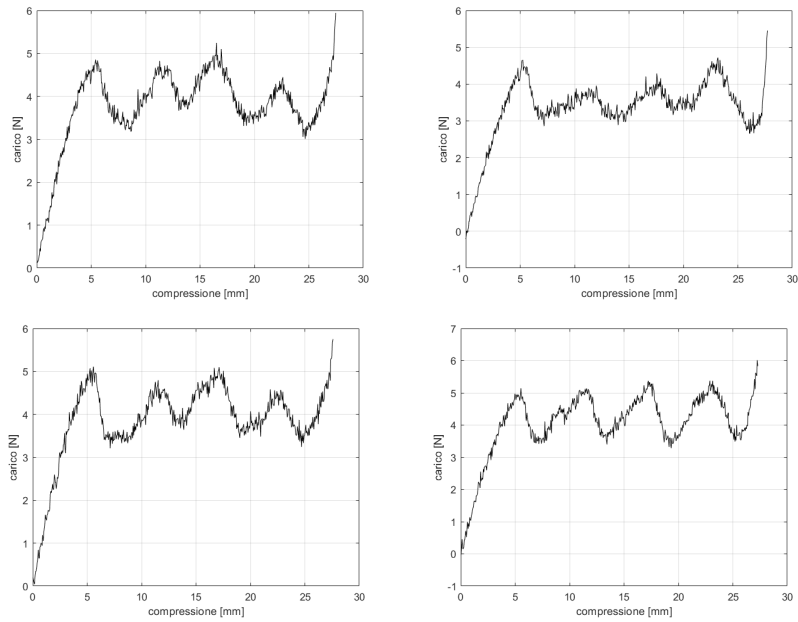


Figura A.4: Grafici compressione-carico relativi alle quattro strutture con spessori raddoppiati

RINGRAZIAMENTI

Per concludere finalmente, vorrei dedicare questo spazio del mio elaborato finale a chi ha contribuito alla redazione dello stesso.

Un primo ringraziamento va alla mia relatrice, la Professoressa Sara Bagassi, e il mio correlatore nonché tutor durante il tirocinio, l'Ingegnere Martino Carlo Moruzzi, per essere sempre stati disponibili, per aver messo a disposizione il materiale adatto e per aver dato le giuste indicazioni nella stesura dell'elaborato finale.

Inoltre per la stesura di questa tesi devo ringraziare anche l'Ingegnere Paolo Proli, che si è mostrato cordiale e disponibile per l'organizzazione delle prove in laboratorio.

Per avermi permesso di intraprendere questo percorso lontano da casa, per avermi reso la persona che sono, per avermi sempre sostenuto e incoraggiato anche nei momenti difficili mi sento di ringraziare la mia famiglia: mia mamma Manuela, mio padre Alessandro, mia sorella Sabrina e il cane Lucy, per gli amici Cane Giallo.

Oltre alla famiglia mi sento di ringraziare tutti i nonni: Gabriella, Franco, Lorenza e Dodo, che sono sempre stati pronti a incoraggiarmi.

Un ringraziamento in particolare va anche ai miei coinquilini Elia, Matteo e Tobia per aver condiviso gli ultimi due anni insieme e per avermi spinto a dare sempre il massimo soprattutto in campo accademico.

Un ulteriore ringraziamento va a tutti i miei amici, sia quelli del gruppo di Longara e Calderara, sia quelli che mi porto dietro dal periodo delle scuole, sia quelli conosciuti facendo l'università; i quali, chi più chi meno, hanno saputo supportarmi, sopportarmi, incoraggiarmi e avermi fatto staccare la testa nei momenti dove lo stress e la frustrazione erano al limite.

Come ultima persona da ringraziare mi vedo costretto a ringraziare me stesso; per non aver mai mollato nonostante i momenti difficili, per aver dato il massimo sempre e comunque, e che questo sia un nuovo punto di partenza per arrivare all'obiettivo.