

ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
- SEDE DI FORLÌ -
FACOLTÀ DI INGEGNERIA



CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA AEROSPAZIALE
CLASSE: L-9

ELABORATO FINALE DI LAUREA IN: COSTRUZIONI AERONAUTICHE

ANALISI SPERIMENTALE
Di
STRUTTURE A RIGIDEZZA NEGATIVA

CANDIDATO:

Francesco Cuttitta

RELATRICE:

Prof.ssa Sara Bagassi

CORRELATORE:

Ing. Martino Carlo Moruzzi

ANNO ACCADEMICO: 2024-2025

Sommario

Questa tesi è stata svolta come proseguimento di uno studio avviato sulle strutture a rigidità negativa (NSS) realizzate tramite manifattura additiva (AM), con l'obiettivo di sviluppare una metodologia sperimentale semplificata per la loro caratterizzazione. In particolare, è stata progettata e realizzata una pressa prodotta con manifattura additiva, utilizzata per analizzare il comportamento forza-deformazione di strutture NS realizzate in materiale simil-gomma.

Dopo una panoramica introduttiva sulle proprietà delle strutture a rigidità negativa e sulle principali tecnologie di manifattura additiva, viene presentata nel dettaglio la geometria analizzata, che deriva da precedenti ricerche scientifiche ed è stata riadattata per questo lavoro.

Viene quindi descritta la metodologia adottata per la raccolta dei dati, a partire dal design sviluppato per la pressa fino alle procedure di misura, basate su una serie di test sperimentali condotti su sette celle NS, di cui vengono presentati e analizzati i risultati.

A partire dai dati sperimentali è stato ricostruito un andamento medio della curva forza-deformazione, confrontato con le stime teoriche ottenute dai modelli matematici. Il confronto ha evidenziato scostamenti significativi tra i modelli e la realtà, legati principalmente ai limiti del materiale e del sistema di misura.

Indice

Sommario	I
Elenco delle figure	V
Introduzione.....	1
Capitolo 1 Le Strutture a Rigidezza Negativa.....	3
1.1 Le proprietà principali.....	4
1.1.1 L'instabilità elastica (<i>buckling</i>)	6
1.2 Modello analitico	8
Capitolo 2 La Manifattura Additiva	11
2.1 Il workflow fondamentale	13
2.2 Le tecniche principali	14
2.2.1 Filament Deposition Modeling (<i>FDM</i>)	17
2.2.2 Fotopolimerizzazione a getto (<i>PolyJet</i>)	18
Capitolo 3 Design delle strutture NS	19
3.1 La geometria	20
3.2 Il materiale.....	22
3.3 Produzione.....	23
Capitolo 4 Il Metodo Sperimentale	25
4.1 Lo sviluppo della pressa	26
4.1.1 Design realizzato	27
4.1.2 Design alternativo	28
4.2 La procedura di misura	29
4.3 Risultati teorici.....	30
4.4 Risultati sperimentali	32
4.5 Commento dei risultati	34
Conclusione.....	37
Appendice	41

Elenco delle figure

Figura 1 – Geometria tridimensionale e bidimensionale	3
Figura 2 – Andamento tipico F-Spostamento NSS	4
Figura 3 – 3 posizioni di equilibrio di una trave	5
Figura 4 – Rappresentazione dello snap-through di una trave	5
Figura 5 – Buckling in una trave (P carico, δ spostamento laterale)	6
Figura 6 – Primi 3 modi di buckling di una trave	7
Figura 7 – Rappresentazione di una trave che subisce deformazione	8
Figura 8 – Stampante 3D FDM in fase di stampa	11
Figura 9 – Schema di funzionamento FDM	14
Figura 10 – Schema di funzionamento MJF	14
Figura 11 – Schema di funzionamento SLA	15
Figura 12 – Schema di funzionamento SLS	15
Figura 13 – Schema di funzionamento EBM	16
Figura 14 – Schema di funzionamento PolyJet	16
Figura 15 – Stampante FDM utilizzata Figura 16 – Bobine di PETG	17
Figura 17 – Stampante PolyJet utilizzata Figura 18 – Cartuccia di TangoGray	18
Figura 19 – Celle appena stampate sul piatto di stampa	19
Figura 20 – Schema delle dimensioni fondamentali della cella e modello	20
Figura 21 – Transizione da una configurazione di equilibrio all'altra	21
Figura 22 – Modello della cella importato sul software GrabCAD	23
Figura 23 – Risultati finali	23
Figura 24 – Setup per le misure sperimentali e pressa assemblata	25
Figura 25 – Modelli 3D dei componenti della pressa	27
Figura 26 – Design della pressa con l'aggiunta di molle	28
Figura 27 – Grafico forza spostamento dei tre modi di buckling	30
Figura 28 – Grafico Forza-Spostamento cella singola	30
Figura 29 – Esempio di misurazione	32
Figura 30 – Grafico carico-spostamento con tutte le prove effettuate	32
Figura 31 – Collasso asimmetrico e simmetrico	33
Figura 32 – Grafico carico-spostamento medio	33
Figura 33 – Struttura danneggiata ai raccordi superiori durante i test	34
Figura 34 – Possibili modifiche del design	35

Introduzione

I materiali nel contesto moderno

Negli ultimi decenni, i progressi scientifici e tecnologici nell'ambito della scienza dei materiali sono stati innumerevoli: con l'introduzione della simulazione, dell'intelligenza artificiale e l'avvento di nuove tecniche manifatturiere, è stato possibile condurre ricerche a un livello del tutto nuovo, che hanno portato a scoperte in numerosi settori, tra cui quello dei metamateriali.

In questo ambito, una nuova e importante frontiera di studio è rappresentata dalle strutture a rigidità negativa, una particolare classe di strutture che presenta proprietà peculiari, come la rigidità negativa e la bistabilità, affrontate nel dettaglio nel capitolo seguente.

I metodi di realizzazione di queste strutture possono variare, ma tutti si basano prevalentemente sull'utilizzo della manifattura additiva, una tecnica produttiva che si distingue per l'elevata accessibilità e libertà progettuale. Il progresso tecnologico ne ha favorito una significativa riduzione dei costi e una miniaturizzazione dei sistemi utilizzati, contribuendo ulteriormente alla sua crescente diffusione.

Queste strutture si caratterizzano per risposte al carico non convenzionali, spesso non lineari e cicliche, che le rendono in grado di assorbire energia cinetica sotto forma di urti o vibrazioni. Tali proprietà le rendono particolarmente interessanti per applicazioni in ambiti industriali avanzati, come il settore aerospaziale, dove sono attualmente oggetto di ricerca attiva.

Motivazioni e obiettivi dello studio

Per lo studio di una struttura a rigidità negativa, è fondamentale determinare con accuratezza la sua risposta sotto carico, trattandosi di una caratteristica unica per ogni geometria realizzata. Questa fase, nota come caratterizzazione, viene solitamente condotta mediante l'impiego di presse idrauliche e sistemi di misurazione avanzati, che permettono di rilevare con precisione l'andamento della deformazione in funzione di un carico applicato. Tuttavia, per quanto accurato, tale sistema risulta spesso complesso, costoso e poco accessibile, rappresentando un possibile scoglio specialmente per le ricerche emergenti. Per questo motivo, tra gli obiettivi principali di questa tesi vi è stato quello di approfondire la possibilità di sviluppare, realizzare e testare una metodologia sperimentale semplificata, basata sull'utilizzo della manifattura additiva, che fosse al tempo stesso facilmente accessibile e sufficientemente accurata. Per quanto riguarda le strutture analizzate, sono state impiegate quelle derivate dall'articolo scientifico di Giri e Mailen [3].

In questo articolo è stata analizzata una particolare tipologia di geometria curva, distinta da quella di altri studi svolti e caratterizzati invece da forme rettilinee.

L'obiettivo di queste strutture è stato valutare il potenziale applicativo del *TangoGray*, un materiale prodotto dall'azienda Stratasys, nelle applicazioni NS, similmente a quanto fatto da Candini [5] e Santinato [6] nei loro studi. A tal fine, è stato impiegato il metodo sperimentale sviluppato nel presente lavoro per analizzarne il comportamento sotto carico, evidenziandone le caratteristiche tecniche ed eventuali criticità.

Struttura della tesi

Lo studio si è articolato in tre fasi di lavoro principali: preparazione, sviluppo e sperimentazione.

Durante la fase di preparazione, sono state approfondite le conoscenze teoriche relative alle strutture a rigidità negativa e alle metodologie di caratterizzazione esistenti. È stata prestata particolare attenzione all'analisi dei modelli matematici, fondamentali per il confronto con i dati raccolti nella fase sperimentale.

Nella fase di sviluppo, si è svolto un primo periodo di brainstorming, durante il quale sono stati valutati diversi concept per le metodologie sperimentali successivamente impiegate. Una volta definito il design definitivo, si è proceduto alla sua realizzazione e modellizzazione analitica, attraverso l'introduzione di funzioni atte a descriverne il funzionamento.

Infine, nella fase di sperimentazione, sono state eseguite le misurazioni e i test sulle strutture, da cui sono stati ricavati i dati necessari per la caratterizzazione meccanica. Questi sono stati poi confrontati con i risultati teorici, consentendo un confronto tra uno scenario ideale ed uno reale.

Capitolo 1

Le Strutture a Rigidezza Negativa

È opportuno essere in possesso di una conoscenza di base delle tipologie di strutture che verranno studiate nel corso di questa tesi, ossia le Strutture a Rigidezza Negativa. Note in inglese come *Negative Stiffness Structures* o NSS, queste particolari tipologie di strutture fanno parte di una categoria dei metamateriali, ovvero materiali artificiali le cui proprietà fisiche non derivano esclusivamente dalla composizione chimica, ma sono ottenute artificialmente attraverso l'uso di particolari geometrie costruttive.

Queste strutture possono essere distinte in base alla loro complessità e forma delle geometrie, parametri che possono variare significativamente in base al contesto applicativo considerato, ma in generale possiamo osservare strutture bidimensionali, caratterizzate da geometrie piane semplici, e strutture tridimensionali, come le strutture cilindriche multistrato da cui ha tratto ispirazione questo studio (figura 1).

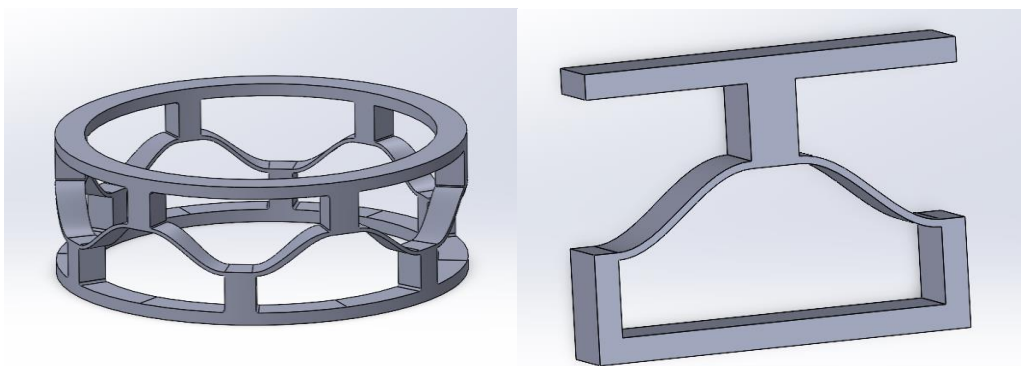


Figura 1 – Geometria tridimensionale (a sinistra) e bidimensionale (a destra)

Tali strutture costituiscono una delle frontiere più recenti della ricerca sui materiali, in quanto solo grazie alle moderne tecnologie manifatturiere ne è stato reso possibile lo sviluppo e lo studio su larga scala.

Le proprietà delle NSS vengono ottenute dalla combinazione di particolari tipologie di materiali costruttivi e configurazioni geometriche, modellabili attraverso una serie di parametri chiave che ne permettono grande adattabilità a diverse applicazioni. In particolare, il loro comportamento in risposta a carichi è ciò che le distingue dalle altre strutture: oltre una certa soglia, infatti, la forza resistente esercitata dalla struttura, che normalmente si oppone alla deformazione, si inverte favorendola invece di contrastarla. Questa inusuale proprietà può essere sfruttata per molteplici contesti applicativi, dal controllo delle vibrazioni all'assorbimento degli urti, fino alla realizzazione di meccanismi complessi utilizzabili in settori avanzati come l'aviazione, lo spazio, l'*automotive* o il biomedicale.

1.1 Le proprietà principali

Le NSS vantano alcune proprietà meccaniche non osservabili nelle strutture convenzionali. Queste impattano prevalentemente il comportamento statico o quasi statico della struttura, e sono fortemente influenzate dalla scelta del materiale e dalla geometria utilizzata.

Di seguito sono elencate le tre principali:

- **Rigidezza negativa:** Quando una struttura è sottoposta a sollecitazione, superata una determinata soglia di carico essa tende a deformarsi favorendo la deformazione, ossia il movimento nella direzione della forza applicata. In questa fase, affinché la deformazione prosegua, è necessario ridurre il carico applicato, contrariamente a quanto avviene nelle strutture convenzionali. Il valore massimo di carico che precede l'innescio di questo comportamento prende il nome di carico critico, e la fase successiva, è ciò che definisce la rigidezza negativa. Questo comportamento si manifesta nel grafico forza-deformazione come un tratto decrescente seguito da uno crescente (figura 2). A livello teorico, durante il tratto decrescente, la curva può anche assumere valori negativi, indicativi di un carico necessario in direzione opposta alla deformazione. Questa inversione rappresenta un recupero di energia, che però nella pratica non potrà mai essere totale a causa di fenomeni dissipativi come lo smorzamento e la comprimibilità del materiale.

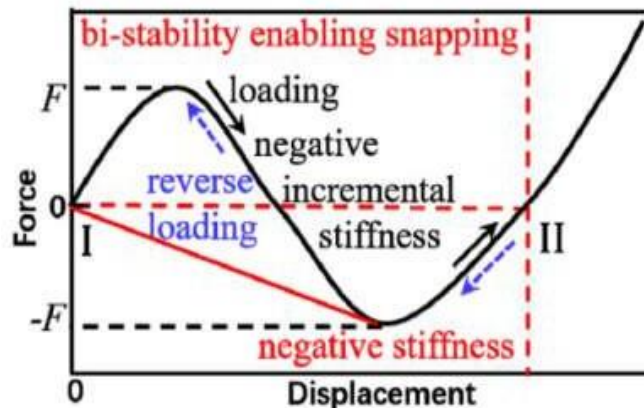


Figura 2 – Andamento tipico F -Spostamento NSS

- **Bistabilità:** Durante la deformazione, una volta raggiunto il carico critico e rimosso il carico, la struttura assume una nuova configurazione di equilibrio non permanente, quindi nel campo elastico (Figura 3). Nel caso di bistabilità, esistono due configurazioni di equilibrio stabile, ed è possibile passare dall'una all'altra invertendo il verso del carico e forzando la struttura a tornare nella posizione originale. Idealmente, quando si progetta una NSS, si tende a favorire l'esistenza di un'unica posizione di equilibrio, in modo che, a seguito di una compressione, torni autonomamente alla posizione iniziale e sia pronta per essere nuovamente compressa.

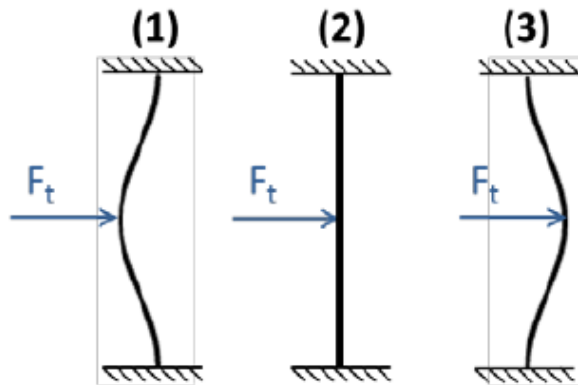


Figura 3 – 3 posizioni di equilibrio di una trave

- **Snap-through:** Se il passaggio da una configurazione di equilibrio all'altra avviene in modo rapido e improvviso, similmente ad uno scatto, si parla di *snap-through* (figura 4). In questi casi, il grafico forza-deformazione mostra tipicamente, poco dopo il picco di carico massimo, una curva con forte pendenza che rappresenta una rapida diminuzione della forza. Questa caratteristica può essere sfruttata in applicazioni che richiedono una risposta dinamica rapida, rendendo le NSS particolarmente adatte ad applicazioni legate all'assorbimento di energia cinetica (*shock absorbers* [4,8]).

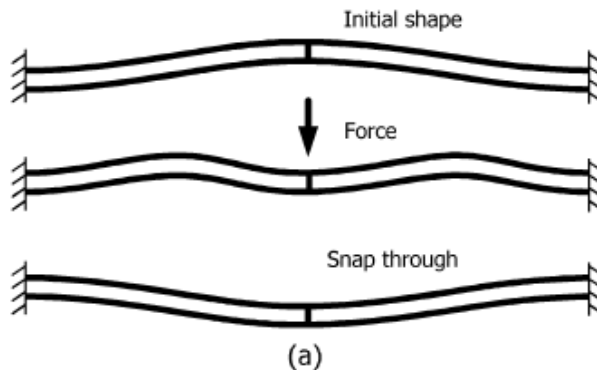


Figura 4 – Rappresentazione dello snap-through di una trave

1.1.1 L'instabilità elastica (*buckling*)

Il fenomeno fisico alla base delle proprietà delle NSS si manifesta in presenza di un carico di compressione lungo l'asse principale della struttura. Noto come instabilità elastica, o *buckling*, tale fenomeno si verifica quando, durante la compressione di un elemento allungato, questo perde di stabilità cominciando a deformarsi lateralmente rispetto la direzione originale (figura 5).

Si tratta di un fenomeno strutturale di tipo deformativo elastico o non elastico, che si verifica quando il carico di un elemento in compressione supera una soglia critica, oltre la quale l'elemento non è più in grado di mantenere la configurazione di partenza. A seguito di ciò, si verifica un improvviso incurvamento o imbozzamento dello stesso che, cambiando forma (talvolta permanentemente), altera la sua capacità di resistere ad ulteriori carichi impattando la rigidezza complessiva della struttura.



Figura 5 – *Buckling in una trave (P carico, δ spostamento laterale)*

La soglia di carico critico alla quale si verifica il *buckling* può essere determinata utilizzando approcci teorici differenti, che tengono conto di diversi parametri e approssimazioni fondamentali, tra cui le caratteristiche costruttive della trave, come il materiale e la geometria della sezione. Il metodo più comunemente utilizzato è quello Euleriano, che è definito come segue:

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_0^2}$$

dove:

- F_{cr} è il carico assiale critico
- E è modulo di Young del materiale
- I è il momento di inerzia minimo della sezione trasversale di trave
- L_0 è la lunghezza libera di inflessione, che rappresenta la misura della porzione di trave libera di flettersi sotto compressione

In funzione dei vincoli strutturali, del carico applicato e delle caratteristiche geometriche della struttura, il *buckling* può manifestarsi in modalità diverse, dette modi di instabilità. Ogni modo rappresenta una possibile configurazione instabile assumibile dalla struttura una volta superato il carico critico.

I modi vengono numerati in base al numero di onde di inflessione che si generano nella geometria durante la deformazione: quelli inferiori (come il primo) generalmente si verificano a carichi critici bassi e sono più semplici, in quanto solitamente caratterizzati da un'unica inflessione; quelli superiori (secondo, terzo, ecc.), sono invece caratterizzati da un numero crescente di onde di inflessione e presentano soglie di carico critico più elevate (figura 6). Poiché richiedono carichi critici maggiori per manifestarsi, i modi superiori si verificano con meno probabilità.

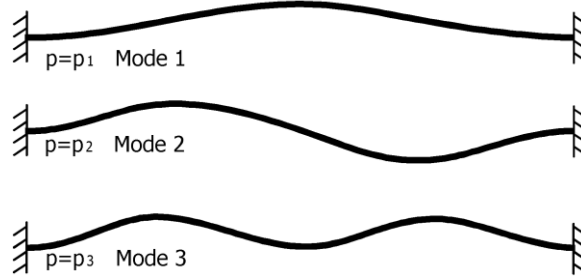


Figura 6 – Primi 3 modi di buckling di una trave

Tramite opportuni accorgimenti costruttivi come l'introduzione di vincoli strutturali, è possibile controllare i modi che si verificano durante la compressione, favorendo o inibendo selettivamente alcuni di essi.

Sfruttando il *buckling* nelle strutture a rigidezza negativa, è possibile creare meccanismi complessi capaci di svolgere diverse funzioni, dall'immagazzinamento di energia cinetica a strutture collapsabili e salvaspazio.

1.2 Modello analitico

Lo studio delle strutture NSS oggetto di questa tesi è stato condotto facendo riferimento ad articoli scientifici dedicati all'analisi di strutture NS cilindriche multistrato [3,7]. Il loro sviluppo e la successiva analisi sono stati resi possibili grazie ai modelli matematici proposti in tali studi, che hanno consentito di descrivere analiticamente, tramite equazioni e formule, il comportamento della struttura in presenza di un carico.

1.2.1 La trave inflessa

A partire dalla geometria, la forma dei lati obliqui della struttura della sono stati realizzati utilizzando la seguente formula:

$$y = \frac{h}{2} \left[1 - \cos \left(\frac{2\pi x}{l} \right) \right]$$

dove:

- h è l'ampiezza di oscillazione dell'apice della geometria
- l è la distanza tra gli estremi della geometria
- y è lo spostamento verticale rispetto alla retta congiungente gli estremi della geometria
- x è lo spostamento orizzontale lungo la retta congiungente gli estremi della geometria

Questa particolare forma geometrica è stata utilizzata come forma principale del meccanismo bistabile, in quanto il suo andamento approssima la forma del primo modo di *buckling* di una trave dritta compressa alle estremità in condizioni di riposo (figura 7). Ciò consente alla struttura di trovarsi in una configurazione di equilibrio stabile senza stress residuo, il che le consente di possedere nativamente una seconda configurazione stabile, speculare rispetto alla prima, e quindi bistabilità. L'assenza di tensioni residue rende inoltre la struttura instabile in presenza di carico, condizione desiderata in quanto facilita lo *snap-through* e l'analisi dei modi di *buckling*.

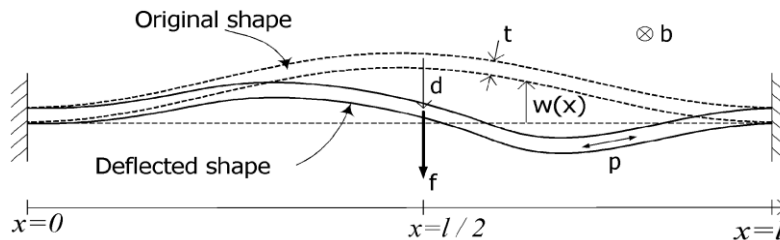


Figura 7 – Rappresentazione di una trave che subisce deformazione da un carico f

1.2.2 L'andamento forza-spostamento

A partire da questa geometria, sono stati determinati (tramite analisi modale) gli andamenti forza-spostamento per i diversi modi di *buckling*. L'analisi parte dall'equazione differenziale che descrive lo spostamento laterale di una trave rettilinea soggetta a carico assiale [14]:

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} + p \frac{d^2 w}{dx^2} = 0$$

Dove:

- p è il carico assiale
- w è lo spostamento laterale della trave

Per consentirne la risoluzione, viene normalizzato il carico assiale e vengono applicate le condizioni al contorno imposte dai vincoli strutturali, ossia i due incastri laterali:

$$w(0) = w(l) = 0,$$

$$\left(\frac{dw}{dx}\right)_{x=0} = \left(\frac{dw}{dx}\right)_{x=l} = 0,$$

$$N^2 = \frac{pl^2}{EI}$$

Dopo ulteriori passaggi matematici consultabili in forma estesa nell'articolo di riferimento [3], si può ricavare la relazione tra la forza esercitata (F) e lo spostamento adimensionalizzato (Δ) per i primi tre modi di *buckling*:

$$F_1 = \frac{3\pi^4 Q^2}{2} \Delta \left(\Delta - \frac{3}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{4}{3Q^2}} \right) \left(\Delta - \frac{3}{2} - \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{4}{3Q^2}} \right)$$

$$F_2 = 4.18\pi^4 - 2.18\pi^4 \Delta$$

$$F_3 = 8\pi^4 - 6\pi^4 \Delta$$

con

$$F_i = \frac{f_i l^3}{E_s I h}, \quad \Delta = \frac{d}{h}, \quad Q = \frac{h}{t}$$

dove:

- F_i è la forza adimensionale per i-esimo modi di *buckling*
- f_i è la forza dimensionale [N] per i-esimo modo di *buckling*
- t è lo spessore della sezione della geometria
- d è lo spostamento effettivo apice geometria

L'andamento complessivo della forza in funzione della deformazione può essere rappresentato come una funzione definita a tratti, suddivisa in tre intervalli distinti:

1. **Pre-snap-through:** Fase iniziale in cui la struttura si trova nella posizione di equilibrio originale, e si oppone alla compressione subendo una deformazione elastica. Questa fase è considerata stabile, in quanto in assenza di sollecitazioni la struttura torna alla configurazione di equilibrio originaria. Durante la compressione si verifica esclusivamente il primo modo di *buckling*.
2. **Durante lo snap-through:** Fase intermedia caratterizzata da un repentino cambiamento della configurazione della struttura, durante la quale la forza resistente diminuisce nonostante l'aumento della deformazione, evidenziando il comportamento a rigidità negativa. Questa fase di transizione risulta instabile, poiché esiste una posizione di equilibrio teorica ma instabile, difficilmente mantenibile: la struttura tende infatti a evolvere spontaneamente verso una configurazione di equilibrio stabile. Durante questa fase possono manifestarsi il secondo o il terzo modo di *buckling*. Tuttavia, nel caso in cui si verifichi il secondo modo, la struttura non effettua lo *snap-through* e di conseguenza non manifesta né rigidità negativa né, in alcuni casi, bistabilità. Per questo motivo, è necessario impedire il verificarsi del secondo modo di *buckling* affinché il comportamento a rigidità negativa e la bistabilità possano manifestarsi correttamente.
3. **Post-snap-through:** Fase finale, in cui la struttura raggiunge una nuova configurazione di equilibrio stabile. La struttura si deforma nuovamente manifestando solo il primo modo di *buckling*.

Infine, è possibile approssimare il modulo di forza necessario per innescare lo *snap-through* con:

$$f_{3(peak)} \approx 8\pi^4 \frac{E_s I h}{l^3}, \quad f_{3(bottom)} \approx 4\pi^4 \frac{E_s I h}{l^3}$$

dove:

- $f_{3(peak)}$ è la forza dimensionale [N] massima (+) per il terzo modo di *buckling*
- $f_{3(bottom)}$ è la forza dimensionale [N] massima (-) per il terzo modo di *buckling*

Capitolo 2

La Manifattura Additiva

Le strutture di questa tesi sono state realizzate utilizzando una particolare metodologia produttiva chiamata Manifattura Additiva [1]. Conosciuta in inglese come *Additive Manufacturing* (AM), con essa si fa riferimento ad un gruppo di tecniche produttive avanzate che consentono la realizzazione di strutture attraverso la deposizione o polimerizzazione mirata di materiale (figura 8).



Figura 8 – Stampante 3D FDM in fase di stampa

Questo tipo di manifattura, nota comunemente come stampa 3D, ha visto numerosi sviluppi nel corso degli anni, specialmente grazie ai numerosi progressi tecnologici del settore industriale. In particolar modo, quelli legati alla miniaturizzazione della componentistica e l'introduzione di nuovi materiali, hanno segnato l'inizio di una nuova era per questo tipo di manifattura, favorendone una sempre più ampia diffusione e dandone un forte impulso allo sviluppo. Le caratteristiche principali della manifattura additiva sono individuabili in:

- **Tempi di sviluppo e costi ridotti**

La manifattura additiva rende possibile la realizzazione in tempi ridotti di prototipi funzionanti direttamente da un modello tridimensionale. Questo consente di effettuare velocemente fasi di sperimentazione dei design preliminari, ottimizzando e velocizzando il processo di sviluppo.

- **Elevata versatilità produttiva**

Grazie all'elevato grado di precisione raggiungibile e alla libertà conferita dal fondamento sull'utilizzo di piattaforme *CAD* (*Computer Assisted Drawing*), la manifattura additiva permette di realizzare con facilità anche geometrie complesse, rendendo possibile la personalizzazione dei singoli pezzi e ampliando notevolmente le possibilità progettuali o le modifiche in corso d'opera.

- **Ridotto utilizzo di risorse**

La produzione avviene mediante l'utilizzo mirato di materiale, limitando gli sprechi e l'utilizzo di risorse potenzialmente inquinanti. Rispetto alle tecnologie convenzionali, la manifattura additiva impiega solo il materiale strettamente necessario alla realizzazione del pezzo, rendendo inoltre il processo maggiormente conveniente sul lato costo/effetto.

Questi elementi hanno contribuito in modo sostanziale alla diffusione della manifattura additiva in diversi settori industriali, favorendone l'integrazione anche in contesti dedicati alla ricerca e lo sviluppo. Con la progressiva riduzione dei costi delle attrezzature e delle risorse necessarie, questa tecnologia è diventata molto più accessibile rispetto al passato, consentendone la diffusione anche in contesti privati e persino domestici, confermandone ulteriormente la grande flessibilità ed il potenziale applicativo.

Tuttavia, nonostante i numerosi vantaggi, la manifattura additiva continua a rappresentare una tecnologia produttiva ancora non adatta alla produzione di massa. Ciò è dovuto principalmente agli elevati tempi di produzione richiesti per ciascun componente e ad una competitività economica spesso inferiore rispetto ad altre tecniche di produzione tradizionali, specialmente in ambiti caratterizzati da grandi volumi produttivi. Questi limiti, anche se in fase di mitigazione, rendono questa tecnologia ancora poco adatta alla produzione in serie, rendendola nettamente più efficace in contesti di prototipazione rapida, ricerca o produzione di piccoli lotti.

2.1 *Il workflow fondamentale*

Alla base della manifattura additiva, è possibile individuare un set di operazioni chiave che ne individuano il principio di funzionamento generale, a prescindere dalla tecnica utilizzata. Tale principio è individuabile in tre operazioni cardine:

1. **Progettazione del modello**

La produzione inizia con la realizzazione di un modello tridimensionale tramite una piattaforma *CAD*, come ad esempio il noto software *SolidWorks*. Una volta completato, il modello viene esportato in formato STL, un tipo di file che rappresenta la superficie del solido attraverso un mesh di triangoli, i cui vertici sono definiti da coordinate spaziali. Successivamente, il file viene elaborato da un software di *slicing*, che lo converte in una serie di istruzioni (dette *G-Code*) interpretabili dalla stampante 3D come movimenti e azioni. Durante questa fase, è possibile selezionare i parametri fondamentali della stampa, come la qualità, velocità, altezza degli strati e le temperature.

2. **Stampa del modello**

Il file di istruzioni viene trasmesso alla stampante, che lo elabora e avvia il processo di stampa. Il modello viene realizzato strato dopo strato, attraverso il movimento di una testina mobile che deposita il materiale in modo preciso. Il processo può durare da pochi minuti a diverse ore, a seconda della complessità della geometria, dei parametri di stampa e del materiale impiegato.

3. ***Post-processing***

Il prodotto di stampa viene sottoposto a operazioni di pulizia per rimuovere eventuali residui di materiale o il materiale di supporto. Le tecniche di *Post-processing* variano a seconda del materiale e della tecnologia utilizzata e possono includere lavaggi chimici, trattamenti termici e lavaggi con acqua ad alta pressione. Il processo è fondamentale per garantire la funzionalità del pezzo ed una precisione dimensionale accettabile.

2.2 Le tecniche principali

La manifattura additiva, come accennato racchiude al suo interno diverse tecniche produttive, distinte prevalentemente dallo stato iniziale del materiale e dalla tecnologia utilizzata. Il materiale può trovarsi principalmente in forma liquida o filamentosa. Le tecniche maggiormente utilizzate attualmente sono:

- **Filament Deposition Modeling (FDM)**

Un filamento di materiale termoplastico viene riscaldato fino alla sua temperatura di fusione e successivamente estruso attraverso un ugello mobile, che lo deposita secondo pattern predefiniti (figura 9). Questa tecnologia è largamente diffusa e particolarmente versatile, avendo un costo operativo molto contenuto e consentendo l'utilizzo di diversi materiali.

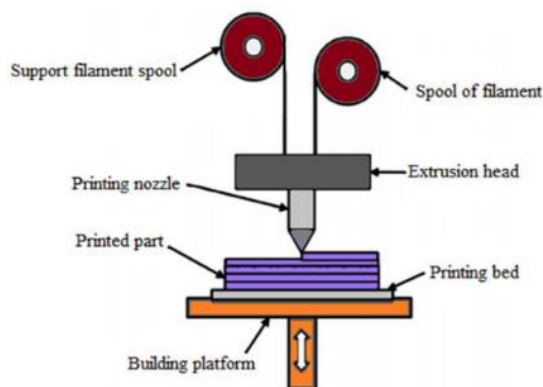


Figura 9 – Schema di funzionamento FDM. Fonte: MDPI

- **Multi Jet Fusion (MJF)**

Viene sfruttata l'energia infrarossa emessa da fonti di calore statiche per riscaldare una polvere polimerica mescolata con un agente di fusione (o *fusing agent*), ossia un materiale che assorbe la radiazione infrarossa facilitando la fusione del materiale primario (figura 10). La tecnologia offre una buona efficienza nell'uso delle risorse, poiché la polvere non fusa può essere recuperata e riutilizzata per stampe successive. Tuttavia, alcune complessità operative come i costi elevati e la tossicità delle polveri ne limitano la diffusione rispetto ad altre tecniche.

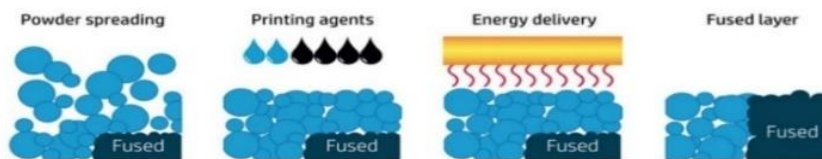


Figura 10 – Schema di funzionamento MJF. Fonte: ResearchGate

- **Stereolitografia (SLA)**

Una resina liquida fotosensibile viene spruzzata su una superficie mobile e successivamente esposta ad un laser UV che la solidifica. Il processo viene ripetuto diverse volte, creando strato per strato una stampa molto precisa adatta a contesti di alta precisione (figura 11). Questa tecnologia possiede tuttavia costi operativi significativi e richiede tecniche di *post-processing* apposite a base di solventi per la rifinitura delle stampe.

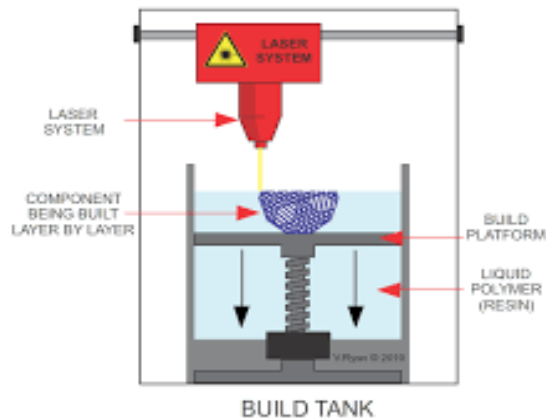


Figura 11 – Schema di funzionamento SLA. Fonte: Technology Student

- **Sinterizzazione laser selettiva (SLS)**

Un laser ad alta intensità fonde con precisione un materiale in polvere, generalmente a base polimerica o metallica, costruendo strato per strato la stampa. È una tecnica versatile molto consolidata, che consente la stampa senza la necessità di supporti, in quanto la polvere non fusa sostiene la struttura durante la stampa (figura 12). Tuttavia, le superfici presentano una finitura superficiale rugosa, che necessita di ulteriore rifinitura in *post-processing* per migliorarne l'estetica e funzionalità.

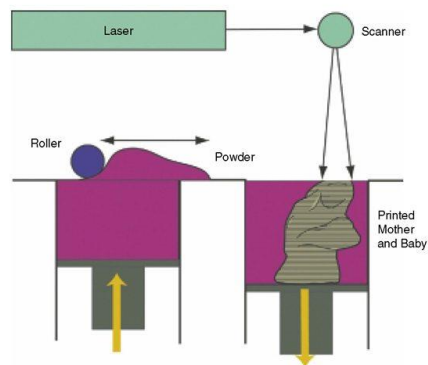


Figura 12 – Schema di funzionamento SLS. Fonte: Zhonghengh3d

- **Electron Beam Melting (EBM)**

Un fascio di elettroni ad alta energia viene utilizzato per riscaldare e fondere una polvere metallica in una camera a vuoto (figura 13). Questa tecnica sperimentale consente la realizzazione di stampe in materiali metallici, grazie alle alte temperature raggiungibili superiori a quelle del laser, ma richiede ambienti controllati e presenta costi operativi elevati.

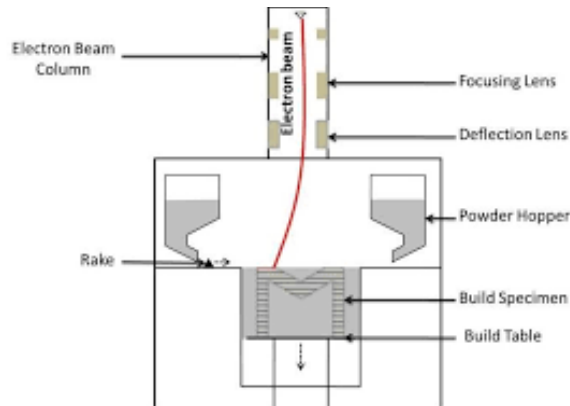


Figura 13 – Schema di funzionamento EBM. Fonte: ResearchGate

- **Fotopolimerizzazione a getto (PolyJet)**

Strato per strato, un liquido fotopolimerico viene depositato da una testina mobile su un piano di stampa e successivamente solidificato, creando uno strato sottile solido (figura 14). Questa tecnica si distingue per l'elevata precisione e per la possibilità di utilizzare contemporaneamente più materiali, presentando tuttavia un funzionamento abbastanza complesso ed esigente.

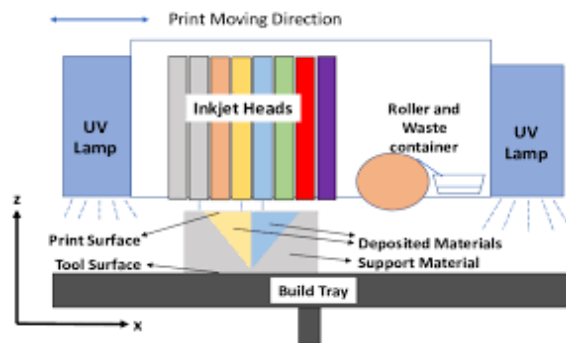


Figura 14 – Schema di funzionamento PolyJet. Fonte: ResearchGate

Per la realizzazione degli studi sperimentali oggetto di questa tesi, sono state utilizzate due tecniche di manifattura additiva: la *Filament Deposition Modeling* (FDM) e la Fotopolimerizzazione a getto (*PolyJet*). Di seguito, i dettagli di utilizzo di entrambe le tecniche sono illustrati con maggiore precisione.

2.2.1 Filament Deposition Modeling (FDM)

Per condurre gli studi sperimentali di questa tesi, come affrontato più in dettaglio in seguito, è stato necessario sviluppare una pressa per effettuare le misurazioni sulla cella NS. Per la sua realizzazione è stata scelta la tecnica *Filament Deposition Modeling* (FDM), poiché le tolleranze richieste non erano particolarmente stringenti. Questa scelta ha permesso di proseguire autonomamente le sperimentazioni senza dover dipendere dai laboratori dell'università.

La stampante utilizzata è una *Crealty Ender 3 V2* (figura 15) [11], un modello ampiamente diffuso per l'ottimo rapporto qualità-prezzo e predisposizione all'open sourcing. Compatta nelle dimensioni, offre un volume di stampa di 220×220×250 mm e dispone di un'interfaccia utente semplice e intuitiva, rendendola adatta specialmente in contesti di utilizzo domestico.



Figura 15 – Stampante FDM utilizzata



Figura 16 – Bobine di filamento PETG utilizzate

Tra i diversi materiali termoplastici compatibili con la stampante, è stato selezionato il PETG (*Polietilene Tereftalato Glicol-modificato*) (figura 16), un polimero facilmente reperibile, noto per la sua buona lavorabilità e resistenza termica, oltre che per la sua adeguata robustezza meccanica. Il processo di stampa inizia con il preriscaldamento dell'ugello a 245–250 °C seguito da quello del piano di stampa a 80–85 °C, al fine di garantire una corretta fusione del materiale e un'adeguata adesione al piano.

Una volta raggiunte le condizioni operative, il filamento viene spinto attraverso l'ugello mediante uno *stepper motor* (un tipo di motore elettrico ad alta precisione) e depositato strato su strato secondo le istruzioni del *G-code* del modello. Le stampe, che richiedono complessivamente circa 16 ore, una volta completate devono essere sottoposte ad una fase di *post-processing*, che consiste nella rimozione manuale di eventuali residui o imperfezioni derivanti dal processo realizzativo. Questa operazione è fondamentale per garantire la piena funzionalità dei componenti ottenuti, in particolare per quanto riguarda la rimozione di attriti indesiderati in prossimità delle superfici di contatto. Al termine di questa fase, i pezzi sono pronti e possono essere assemblati per comporre la pressa.

2.2.2 Fotopolimerizzazione a getto (*PolyJet*)

Per la realizzazione delle NSS, visto l'alto livello di precisione richiesto e le tecniche a disposizione, si è scelto di utilizzare la tecnica *PolyJet*. Per la stampa è stata utilizzata una Stratasys Objet30 V5 Prime (Figura 17) [12], stampante dell'azienda Stratasys, che detiene anche il brevetto della tecnologia. Si tratta di una stampante di fascia alta, molto utilizzata nell'ambito della ricerca e della prototipazione rapida per il suo ingombro ridotto e per le elevate performance, sia in termini di velocità che di qualità.

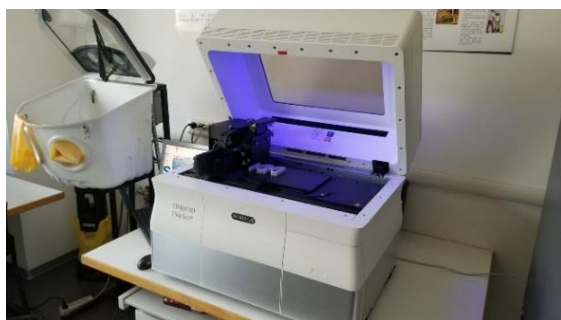


Figura 17 – Stampante *PolyJet* utilizzata



Figura 18 – Cartuccia di *TangoGray*

Le NSS sono state stampate utilizzando due materiali [13], entrambi stoccati in forma liquida (figura 18):

- il *TangoGray FLX950*, un materiale proprietario di *Stratasys* con proprietà fisiche simili alla gomma, utilizzato come materiale principale per la stampa di strutture flessibili.
- Il *FullCure 705*, anch'esso proprietario, utilizzato come materiale di supporto al materiale principale.

La stampa ha inizio con una fase di preriscaldamento, durante la quale l'ambiente di stampa, la testina e i serbatoi dei materiali vengono portati automaticamente alle temperature operative, che si attestano intorno ai 60-65 °C.

Raggiunte le condizioni ottimali, la stampante inizia il processo di stampa vero e proprio: la testina si muove lungo il piano di lavoro spruzzando da alcuni ugelli il materiale fotopolimerico, che viene livellato e solidificato da una lampada UV.

Il processo viene ripetuto per ogni strato e, a fine processo, le stampe possono essere rimosse dal piano di stampa e si può procedere con il *post-processing*, necessario per rimuovere il materiale di supporto che circonda le NSS. A causa della natura di funzionamento della stampante, per garantirne il corretto funzionamento, sono necessarie frequenti pulizie delle testine e calibrazioni, rendendo la stampante molto esigente in termini di manodopera nel lungo periodo.

Capitolo 3

Design delle strutture NS

Dopo aver delineato i principi di funzionamento delle strutture a rigidità negativa e i vantaggi offerti dalle tecniche di manifattura additiva, si passa ora ad analizzare nel dettaglio le specifiche delle strutture realizzate nell'ambito di questo lavoro di tesi. Questa tesi è stata incentrata sullo studio dei metodi sperimentali per la caratterizzazione delle NSS realizzate tramite AM in *TangoGray*, un materiale che simula le proprietà della gomma (figura 19).



Figura 19 – Celle appena stampate sul piatto di stampa

L'utilizzo di questo materiale per la realizzazione di NSS non rappresenta l'introduzione di una novità assoluta, ma costituisce un approccio volto all'analisi di aspetti differenti, già osservati in precedenza da altri ricercatori. Nello specifico, la struttura usata come fondamento del presente studio deriva dall'articolo scientifico di Tark Raj Giri e Russell Mailen [3], che studia il comportamento di strutture cilindriche multistrato composte da celle NS bistabili a geometria curva.

Le tecniche realizzative invece, prendono ispirazione dagli studi realizzati da Santinato nella sua tesi [6], che affronta i particolari tecnici, le criticità e caratteristiche della manifattura additiva utilizzando il *TangoGray*, ma per la realizzazione di strutture con una geometria differente da quella di studio.

3.1 La geometria

La geometria individuata per l'analisi è quella della cella NS fondamentale che compone gli strati delle strutture cilindriche. L'articolo di riferimento ne riporta in dettaglio le misure dei parametri principali, lasciando tuttavia margine di parametrizzazione per alcune caratteristiche non essenziali, come l'altezza delle pareti laterali della base e la lunghezza dello stelo centrale. In questa tesi, tali parametri sono stati mantenuti simili, salvo leggere modifiche per ottimizzare il processo di stampa e semplificarne lo studio. La cella NS è caratterizzata da uno spessore della geometria curva (t) pari a 1.5 mm, e da un'altezza relativa dell'apice della geometria (h) di 15.12 mm: una compressione completa fa compiere alla geometria un'oscillazione di 30.24 mm a partire dalla posizione estesa. Nella parte superiore, la struttura assume una forma a "T", costituita da uno stelo spesso 10 mm e lungo 15.14 mm, con estremità spesse 5 mm che, nel complesso, eguagliano in lunghezza la base. Inferiormente, la struttura presenta una forma a "U", con una base larga 77.48 mm (l) e due pareti laterali spesse 5 mm e alte anch'esse 15.14 mm. Lo schizzo bidimensionale è stato successivamente estruso perpendicolarmente al piano per 12.7 mm, ottenendo un solido con dimensioni generali di 77.48 × 56.90 × 12.7 mm.

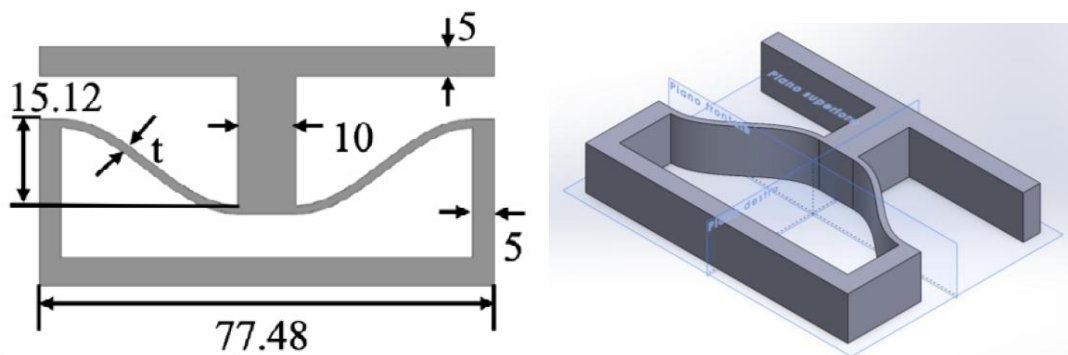


Figura 20 – Schema delle dimensioni fondamentali della cella e modello realizzato su SolidWorks

A differenza di quanto riportato nell'articolo, la cella è stata modellata in configurazione già estesa, ossia con la concavità della geometria curva rivolta verso il basso, per consentirne l'analisi sotto carico compressivo invece che in trazione (Figura 20). Questa scelta ha semplificato significativamente lo sviluppo del metodo sperimentale, che è stato condotto tramite l'utilizzo di una pressa appositamente progettata per l'applicazione di carichi assiali.

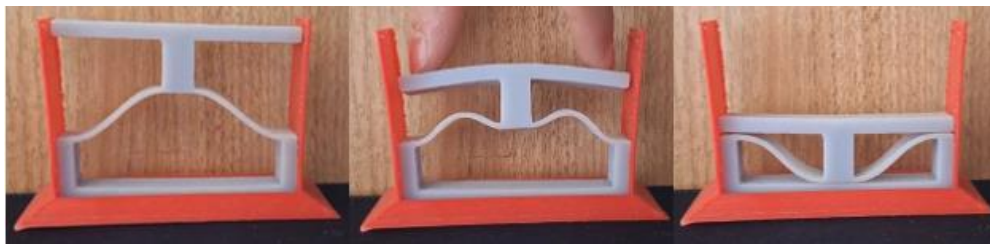


Figura 21 – Transizione da una configurazione di equilibrio all'altra con modi di buckling visibili (primo a sinistra e destra; secondo al centro)

Durante le diverse fasi di compressione, la geometria della cella è progettata per ammettere esclusivamente il primo e il terzo modo di *buckling* (figura 21). Affinché la cella manifesti correttamente questo comportamento, le pareti laterali della geometria a forma di “U” devono essere vincolate meccanicamente: in caso contrario, lo spostamento laterale impedisce alla cella di bloccarsi nella seconda posizione di equilibrio. A questo scopo, si adotta una semplice struttura contenitiva (figura 21), che sarà successivamente sostituita da alcuni accorgimenti costruttivi durante lo sviluppo della pressa sperimentale.

3.2 Il materiale

Un requisito fondamentale delle strutture, è che il materiale in cui vengono prodotte sia sufficientemente flessibile da consentirne la deformazione, ma sufficientemente rigido da conservarne la forma originale. Una categoria di materiali che soddisfano questi requisiti, sono i materiali simil-gomma, come quelli della famiglia *Tango* di Stratasys [2], ed in particolare il *TangoGray*.

Il materiale originariamente utilizzato nell'articolo di riferimento è il TPU (*Thermoplastic Polyurethane*), un filamento termoplastico utilizzabile con la tecnica FDM che vanta grande robustezza e flessibilità. Per questi studi invece, si è deciso di sperimentare il *TangoGray*, resina fotopolimerica grigia utilizzabile con la tecnica *PolyJet*. Questo, in quanto il *TangoGray*, a differenza del TPU, consente di ottenere risoluzioni di stampa significativamente superiori, permettendo così futuri sviluppi di geometrie più complesse. Nella tabella 1 sono elencati i parametri tecnici del materiale dichiarati dal produttore [2].

Tabella 1– Proprietà meccaniche del *TangoGray*

Resistenza a trazione	3-5 MPa	Durezza	73-77 (scala A)
Elongazione a rottura	45-55 %	Resistenza a strappo	8-12 Kg/cm
Deformazione permanente post-compressione	0.5-1.5 %	Densità materiale polimerizzato	1.16-1.17 g/cm ³

Nel datasheet del materiale [1], non è tuttavia riportato il modulo di Young, parametro critico per le analisi preliminari delle strutture. Per ricavarlo, si è fatto riferimento agli studi effettuati da Santinato [6] per la caratterizzazione del *TangoGray*.

Sulla base dei risultati da lui ottenuti (Area: 650 mm², Carico: 4500 N, Deformazione: 40%), il modulo di Young del *TangoGray* risulta essere circa 17.3 Mpa.

3.3 Produzione

Il modello CAD realizzato su *SolidWorks* è stato esportato in formato STL e successivamente importato nel software *GrabCAD Print* (figura 22), che controlla la stampante.

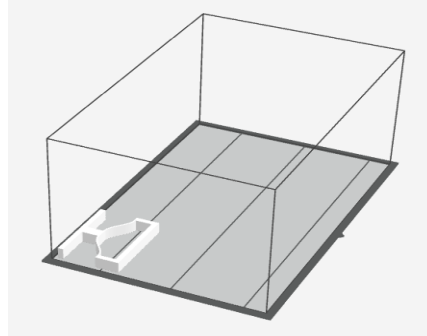


Figura 22 – Modello della cella importato sul software GrabCAD

Successivamente si inseriscono i parametri di stampa, scegliendo le impostazioni adeguate al tipo di materiale utilizzato (*TangoGray* come materiale principale, *FullCure 705* come materiale di supporto) e selezionando la modalità di stampa qualità, ossia ottimizzata per favorire un grande livello di dettaglio della stampa. Le stampe individuali richiedono circa 3 ore per cella, ma stampando più celle alla volta è possibile velocizzare significativamente il processo: stampando 4 celle alla volta, complessivamente servono circa 9 ore più 1 ora di pulizia per ogni cella, ed il materiale complessivamente utilizzato si attesta intorno a 39g di materiale principale e 31g di supporto (figura 23).

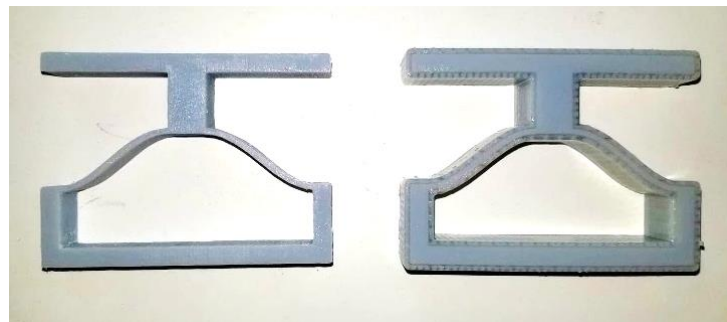


Figura 23 – Risultati finali (stampa pulita a SX e grezza a DX)

In totale, su dieci strutture realizzate tra tesi e tirocinio, tre hanno subito danni in fase di pulizia, soprattutto a causa dello spessore molto ridotto delle sezioni curve. Come verrà affrontato successivamente, proprio queste sezioni si riveleranno essere sorgente di importanti criticità durante i test.

Capitolo 4

Il Metodo Sperimentale

Per caratterizzare il comportamento meccanico delle NSS, è necessario determinarne la risposta in funzione di un carico compressivo, tipicamente rappresentata tramite il grafico forza-deformazione. Questo tipo di analisi, infatti, permette di evidenziare i tratti caratterizzanti della struttura, come la presenza di bistabilità, le soglie di *snap-through* e la conseguente rigidità del materiale.

Per effettuare ciò, è necessario disporre di una metodologia per somministrare gradualmente un carico compressivo alla cella campione e misurarne la relativa deformazione per un numero discreto di misurazioni. Convenzionalmente, ciò viene effettuato tramite l'utilizzo di una pressa idraulica e sistemi di misura ad alta precisione, come celle di carico e sensori di spostamento, che però richiedono l'accesso a laboratori specializzati e attrezzature costose.

Nell'ambito di questa tesi, si è voluto valutare la fattibilità di effettuare le medesime misurazioni attraverso metodologie più semplici, economicamente sostenibili e sufficientemente precise per le finalità dello studio; questo anche alla luce della bassa entità delle forze in gioco che non richiede l'utilizzo di carichi elevati. A tal proposito, è stata progettata, realizzata e testata una piccola pressa ad acqua stampata in 3D (figura 24). Qui di seguito, si analizzano in dettaglio il design della pressa, le modalità di misurazione ed i risultati ottenuti.

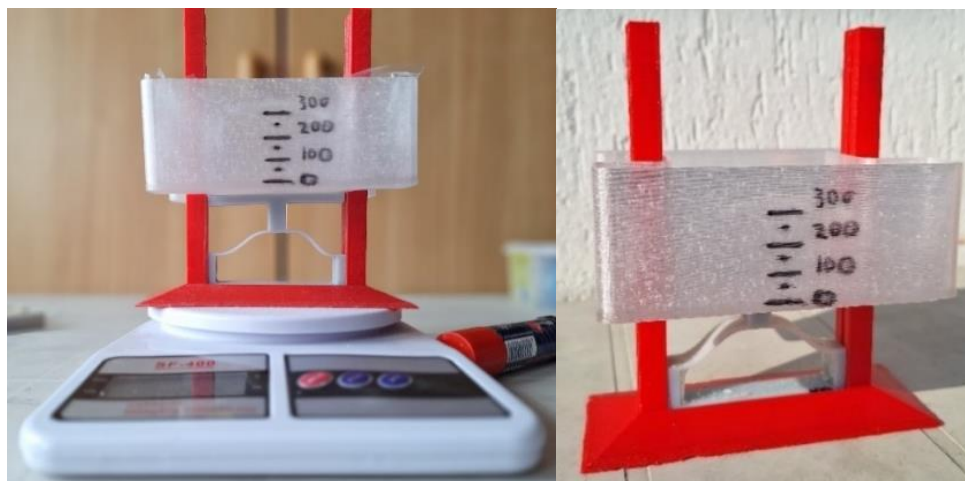


Figura 24 – Setup per le misure sperimentali e pressa assemblata

4.1 Lo sviluppo della pressa

Durante lo sviluppo del design della pressa, si è posta particolare attenzione a due requisiti fondamentali: da un lato la necessità di scegliere una massa variabile per simulare un carico compressivo, dall'altro il garantire una distribuzione uniforme del carico sulla superficie superiore della cella NS, così da evitare sollecitazioni asimmetriche che potessero alterare la risposta meccanica.

Per effettuare correttamente le misurazioni, è importante considerare che, durante la fase di compressione, la struttura NS deve trovarsi in equilibrio di forze con la pressa. Ciò implica che, fino al collasso della cella, la forza esercitata dal carico (F_{pressa}) e la forza resistente della struttura (F_{cella}) devono essere uguali in modulo e opposte in direzione. Analiticamente:

$$F_{pressa} = F_{cella} \text{ dove } \begin{cases} F_{pressa} = F_{peso} = m_{carico} * g \\ F_{cella} = f(\text{deformazione, modo di buckling}) \end{cases}$$

Per la scelta della massa di carico, sono state considerate diverse soluzioni, con l'obiettivo di individuare un metodo semplice, dosabile con precisione e in grado di garantire una distribuzione uniforme del carico sulla cella. Una delle prime soluzioni ipotizzate prevedeva l'impiego di contenitori cubici riempiti di sabbia da posizionare progressivamente sulla piattaforma mobile. Questa scelta offriva una buona modulabilità del peso applicato, ma è stata scartata per le difficoltà nel garantire un corretto centraggio delle masse, fondamentale per evitare carichi che avrebbero potuto compromettere la validità delle misurazioni. Una seconda soluzione si basava sull'uso di superfici magnetiche omopolari, posizionate in modo da generare una forza di repulsione variabile al variare della distanza tra di esse. Sebbene questa configurazione avrebbe potuto eliminare il problema della distribuzione del carico, è stata scartata in quanto la relazione tra distanza e forza esercitata non è facilmente esprimibile in maniera lineare, rendendo inutilmente complicata la caratterizzazione del comportamento della cella. Alla fine, si è deciso di optare per l'utilizzo di acqua, in quanto facilmente reperibile, dosabile con facilità e uniforme nella distribuzione all'interno delle superfici, il che semplifica trovarne il baricentro.

4.1.1 Design realizzato

La pressa è composta da due elementi fondamentali: la base fissa e la piattaforma-serbatoio scorrevole, dentro cui viene caricata l'acqua (figura 25).

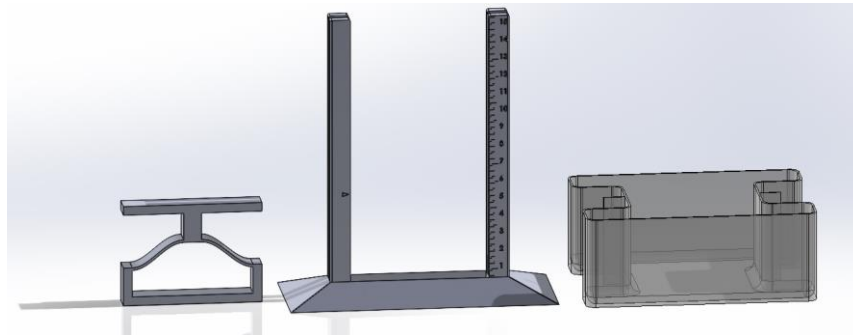


Figura 25 – Modelli 3D dei componenti della pressa

La base presenta dimensioni complessive pari a $15 \times 6.5 \times 16$ cm e include, nella parte inferiore, un'estrusione rettangolare di $7.75 \times 1.5 \times 0.5$ cm che funge da alloggiamento per la struttura NS, garantendone il corretto posizionamento e impedendone lo spostamento laterale. Ai lati di questa sede si trovano due colonne verticali a sezione quadrata, alte 15.5 cm, ciascuna dotata di una fessura centrale che funge da guida per lo scorrimento della piattaforma. Sulla superficie frontale della colonna destra è stato estruso un righello graduato, utile per la misurazione precisa degli spostamenti verticali della cella e della piattaforma. La colonna sinistra presenta invece un riferimento visivo per indicare la posizione di riposo della cella NS, ovvero la configurazione iniziale prima dell'applicazione del carico.

La piattaforma-serbatoio scorrevole è costituita da una struttura cava con dimensioni di $13 \times 9.5 \times 5$ cm, progettata per contenere acqua utilizzata come massa variabile (m_{H_2O}) durante le misure. Il serbatoio è stato graduato manualmente sulla superficie frontale per consentire il monitoraggio del volume d'acqua ($\max \approx 40 \text{ cm}^3$), ed è rivestita internamente da un sottile rivestimento impermeabile per garantirne la tenuta. La forma è stata ottimizzata per massimizzare il volume contenibile minimizzando l'ingombro e assicurando una distribuzione omogenea del peso sulla superficie superiore della cella NS.

Il suo peso a vuoto di circa 50 g ($m_{\text{serbatoio}}$), il che determina durante la misurazione un carico non trascurabile sempre agente sulla cella NS.

4.1.2 Design alternativo

È stata esplorata una variante del design finale, caratterizzata dal medesimo design ma con l'aggiunta di molle posizionate in compressione tra la piattaforma e la cella (figura 26). Lo scopo delle molle è di evidenziare il comportamento bistabile della struttura, in quanto nel momento in cui la cella supera il punto di *snap-through* e si contrae, delle molle sufficientemente elastiche si estendono per un breve istante, fornendo così indicazione della riduzione dell'effetto del carico sulla cella, caratteristica della rigidità negativa.

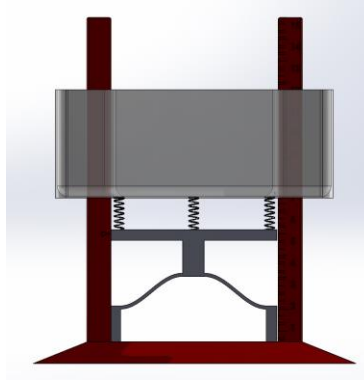


Figura 26 – Design della pressa con l'aggiunta di molle

A livello analitico, l'utilizzo di molle introduce una seconda forza esercitata dalla pressa, funzione della compressione della molla (Δx) dovuta a sua volta sia alla forza del carico (F_{peso}) sia alla forza resistente della struttura (F_{cella}). La nuova formulazione analitica per la forza esercitata dalla pressa diventa:

$$F_{pressa} = F_{peso} + F_{molle} = (m_{H2O} + m_{serbatoio}) * g + (k * \Delta x) * n_{molle}$$

$$\text{con } \begin{cases} k = \text{costante elastica della molla} \\ \Delta x = f(F_{peso}, F_{cella}) \end{cases}$$

Sebbene promettente sul piano concettuale, questa opzione è stata abbandonata per motivi pratici, legati alla difficoltà di progettare un sistema di molle sufficientemente accurato e che al contempo non interferisse con la misurazione delle deformazioni.

4.2 *La procedura di misura*

La procedura utilizzata per effettuare un ciclo di misurazione si articola in quattro fasi principali:

1. **Preparazione del setup di misurazione:** La cella NS da testare viene inserita nell'incavo presente alla base della pressa, assicurandosi che le pareti inferiori aderiscano alla struttura e che la geometria superiore sia libera di scorrere senza impedimenti. Successivamente, si aggiunge la piattaforma scorrevole, avendo cura di centrarla correttamente, e si trasferisce l'intero sistema su una bilancia digitale.
2. **Taratura della bilancia:** Si registra la massa della piattaforma scorrevole, in quanto rappresenta un carico a vuoto costantemente agente sulla cella NS. Dopodiché si tara la bilancia considerando il peso complessivo del sistema base–cella–serbatoio (vuoto), in modo da poter monitorare con precisione la quantità di acqua aggiunta nel corso della prova.
3. **Incremento graduale del carico:** Si procede all'aggiunta controllata di piccole quantità di acqua utilizzando una siringa graduata da 20 ml, distribuendola nel modo più uniforme possibile all'interno del serbatoio. L'operazione viene ripetuta fino al raggiungimento del collasso della cella e al conseguente passaggio a una nuova configurazione di equilibrio.
4. **Reset della misurazione:** Una volta avvenuto il collasso, si svuota il serbatoio e si riposiziona manualmente la cella nella configurazione estesa iniziale. È ora possibile una nuova misurazione, ripetendo la procedura dal primo passaggio.

Durante le prove, l'intero processo di misurazione è stato registrato mediante una fotocamera posizionata frontalmente rispetto al sistema. Questo ha permesso di revisionare ciascuna misura a posteriori, verificando il posizionamento della cella e l'eventuale presenza di anomalie durante la prova.

4.3 Risultati teorici

A partire dalle equazioni ricavate nel capitolo 1, è stato approssimato l'andamento teorico forza-deformazione della cella NS come una funzione definita a tratti che considera il primo ed il terzo modo di *buckling*. Utilizzando MATLAB è stato quindi realizzato un codice (A.1) per rappresentare il grafico della forza resistente in funzione dei diversi modi di *buckling*, di seguito è rappresentato quello adimensionalizzato relativo a tutti e tre i modi (figura 27).

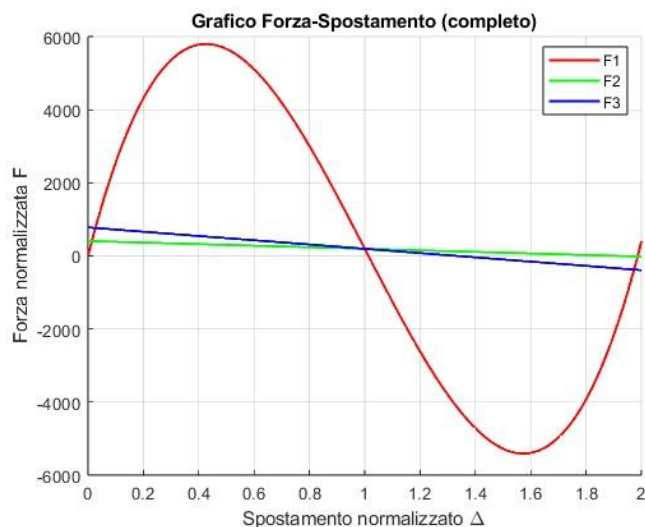


Figura 27 – Grafico forza spostamento dei tre modi di buckling

A partire da questo è stato estratto un secondo grafico, contenente solo il primo ed il terzo modo definiti lungo i rispettivi intervalli di validità. Per determinare tali intervalli, è stato necessario studiare le intersezioni tra F_1 , rappresentante il primo modo, ed F_3 , rappresentante il terzo.

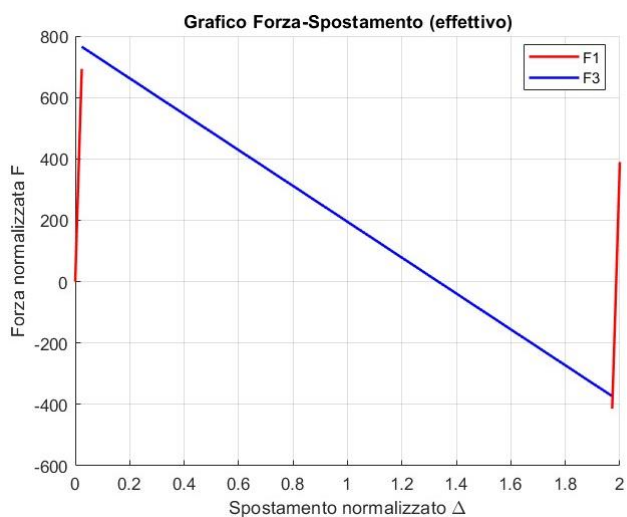


Figura 28 – Grafico Forza-Spostamento cella singola

Come osservabile, l'andamento forza-spostamento (figura 28) è caratterizzato da un tratto inizialmente crescente, che rappresenta il primo modo di *buckling*, seguito da un segmento decrescente associato al terzo modo, e infine da un secondo tratto crescente, che riporta nuovamente al primo modo. Tramite le formule inverse presentate alla fine del capitolo 1, è stato possibile approssimare i valori di forza necessaria per innescare lo *snap-through* con:

- $f_{3\ top} = 1.5654\text{ N}$, corrispondente circa 160 g
- $f_{3\ bottom} = -0.7827\text{ N}$, corrispondente a circa (-)80 g

Il verificarsi dello *snap-through* è evidenziato proprio dalla porzione decrescente (in blu) seguita da quella crescente (in rosso): in questa fase, la forza richiesta per continuare la deformazione diminuisce fino a diventare negativa, segnalando un'inversione del carico necessario, per poi aumentare rapidamente, indicando l'ingresso nella fase post *snap-through*.

Un valore positivo della forza indica un carico agente nella stessa direzione della deformazione, mentre un valore negativo corrisponde a un carico di verso opposto.

Il punto in cui la forza si annulla (0 N) rappresenta una condizione teorica di equilibrio instabile, in cui la struttura, al minimo disturbo, tende ad assumere una nuova configurazione più stabile.

Il significato fisico dell'inversione di segno è un rilascio dell'energia cinetica immagazzinata durante la parte iniziale della compressione, che durante lo *snap-through* viene liberata consentendone il recupero. Tuttavia, questo risultato è ottenibile solo a livello teorico, in quanto nella pratica, a causa del comportamento viscoelastico del materiale, vengono introdotti attriti e dissipazioni energetiche indesiderate che impediscono un recupero completo dell'energia. Nella tabella 2 vengono illustrati i range teorici chiave ricavati dallo studio della funzione.

Tabella 2 – Stime teoriche degli intervalli di deformazione in funzione del carico

	Range deformazione	Range di forze
Pre-snap-through	0 - 0.3636 mm	0 - 1.5654 N
Snap-through	0.3636 - 29.8158 mm	1.5654 - 0.7827 N
Post-snap-through	29.8158 - 30.24 mm	> 0.7827 N

Nel paragrafo successivo, vengono illustrate le misurazioni sperimentali. Per via della natura del metodo utilizzato, è stato tuttavia possibile ottenere informazioni esclusivamente sulla fase di pre-*snap-through*.

4.4 Risultati sperimentali

Delle nove celle NS realizzate, solo sette sono state sottoposte a test sperimentale, realizzate in momenti distinti ma con la stessa geometria. In base alla data di stampa, le celle sono state suddivise come segue:

- Dicembre 2024 (2 celle, denominate 1812 e 2812), realizzate nell'ambito del tirocinio.
- Maggio 2025 (5 celle, denominate 1,2,3,4 e 5), realizzate nell'ambito della tesi.

I test sono stati effettuati nel mese di maggio, e per ciascuna cella sono stati eseguiti due tentativi di misurazione (figura 29), utilizzando lo stesso procedimento descritto nel paragrafo 4.2 (i grafici delle misurazioni delle celle NS individuali sono disponibili in appendice A.2).

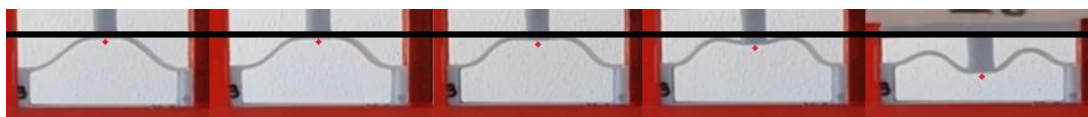


Figura 29 – Esempio di misurazione: senza carico, solo serbatoio, 20g, 45g, 50g

Nel grafico carico [g] – spostamento [mm] riportato di seguito (figura 30), sono visualizzati tutti i dati sperimentali raccolti.

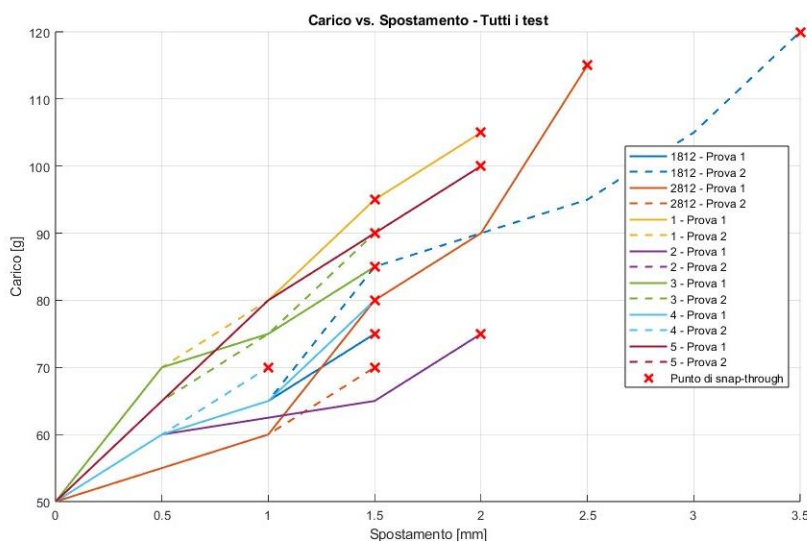


Figura 30 – Grafico carico-spostamento con tutte le prove effettuate

Ogni curva corrisponde ad una prova sperimentale e consente di identificare il carico massimo sostenibile dalla cella prima del collasso ed il conseguente innesco dello *snap-through*. Per la caratterizzazione complessiva della geometria, sono stati selezionati solo i tentativi in cui si è verificato un collasso simmetrico (figura 31), senza interferenze esterne o anomalie.



Figura 31 – Collasso asimmetrico (a sinistra) e simmetrico (a destra)

Le prove selezionate per il calcolo dell'andamento medio sono:

- Entrambe le prove della Cella 1.
- La seconda prova della Cella 2.
- La seconda prova della Cella 3.
- Entrambe le prove della Cella 5.

Questi risultati sono stati ritenuti i più affidabili, in quanto i collassi osservati sono stati perfettamente simmetrici e le strutture non hanno subito danni, suggerendo un basso grado di degradazione del materiale e l'assenza di alterazioni significative nel suo comportamento meccanico. Il grafico (figura 32) mostra l'andamento medio carico-spostamento, ottenuto interpolando e mediando i dati delle misurazioni.

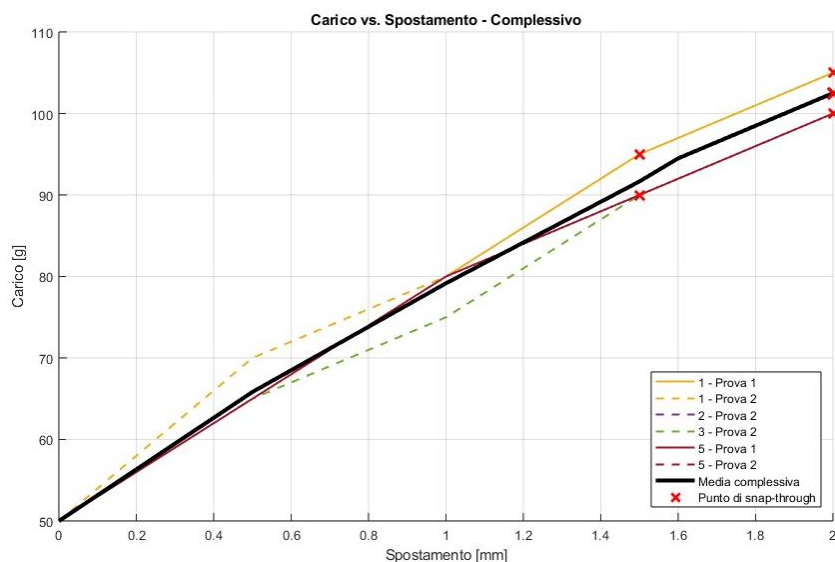


Figura 32 – Grafico carico-spostamento medio

In media, il collasso della cella si è innescato con un carico complessivo (serbatoio + acqua) di 102.5 g, corrispondente a 1.007 N, ed una deformazione massima di circa 2 mm.

4.5 Commento dei risultati

A partire dai dati ricavati dalle misurazioni, è stato possibile ricostruire un andamento medio della prima parte del comportamento forza-deformazione della cella NS a geometria curva.

Dal confronto preliminare tra il comportamento della cella e le stime teoriche emerge una differenza significativa rispetto a quanto previsto dal modello. In particolare, il carico critico misurato risulta inferiore di circa il 40% (1.007 N contro 1.5654 N teorici), mentre la deformazione è circa cinque volte e mezzo maggiore (2 mm contro 0.3636 mm). In sostanza, la cella si comporta come se fosse meno rigida del previsto, collassando a carichi inferiori e deformandosi in modo più marcato. Questo evidenzia una maggiore flessibilità strutturale rispetto al modello ideale, verosimilmente attribuibile a diversi fattori riconducibili ad:

- Imperfezioni legate al processo di stampa e post-processing, che possono alterare le proprietà meccaniche della struttura.
- Perdite dovute a smorzamenti, trascurate nel modello analitico per ragioni semplificative.
- Degradazione del materiale nel tempo, che alterano le proprietà meccaniche del materiale.

Questi fattori compromettono l'accuratezza del modello matematico impiegato, introducendo un margine di errore non trascurabile.

Un ulteriore differenza è stata riscontrata nel comportamento delle celle prodotte a dicembre e quelle prodotte a maggio.

Durante i test, le prime tendevano in generale ad esibire un comportamento poco regolare, con collassi a carichi maggiori rispetto le seconde ma spesso asimmetrici. Entrambe le strutture, a differenza di quelle più recenti, hanno inoltre riportato danni a fine misurazione (figura 33).

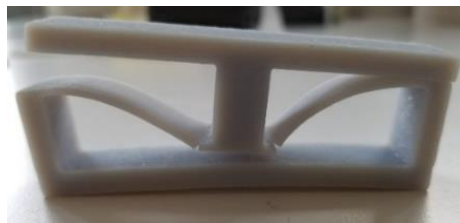


Figura 33 – Struttura danneggiata ai raccordi superiori durante i test

Come già evidenziato da Santinato [6], il *TangoGray* è molto soggetto a degradazione nel tempo, il che suggerisce che, nei mesi trascorsi, le celle stampate a dicembre abbiano subito un progressivo deterioramento, con conseguente indebolimento della struttura e alterazione delle proprietà elastiche. Ciò è probabilmente dovuto ad una progressiva diminuzione del grado di umidità del materiale, che nel lungo periodo, come avviene nelle gomme, lo porta a seccarsi e a perdere parte delle prestazioni meccaniche iniziali.

Per migliorarne la robustezza quindi, si rende necessario rivedere i metodi di conservazione delle strutture ed in generale la geometria adottata, poiché risulta essere fragile specialmente in prossimità degli spigoli interni.

Nonostante l'introduzione di raccordi da 1 mm, i risultati sperimentali suggeriscono la necessità di adottare modifiche più incisive, come l'impiego di geometrie più spesse e robuste, o l'utilizzo di materiali più resistenti a stress meccanici prolungati.

Per quanto riguarda la pressa, il design realizzato si è rivelato nel complesso adeguato, in quanto ha permesso di ottenere misurazioni sperimentali affidabili, seppur con qualche criticità migliorabile. In particolare, le principali difficoltà riscontrate durante le prove, riguardano prevalentemente l'affidabilità del sistema di carico, legate alla tendenza del serbatoio scorrevole a bloccarsi nelle guide, nonché alla difficoltà nel distribuire uniformemente l'acqua all'interno del serbatoio stesso. Questo ha comportato, in alcuni casi, carichi non uniformi che hanno portato a collassi asimmetrici o attriti indesiderati durante la fase di compressione.

Per mitigare tali criticità, si è reso necessario prestare particolare attenzione alla fase iniziale di centraggio del serbatoio sulla cella, accompagnata da una levigatura delle superfici delle guide per agevolarne lo scorrimento.

In futuro, alcune modifiche strutturali al design dei componenti della pressa (figura 34) potrebbero semplificare ulteriormente tale operazione, ad esempio mediante l'introduzione di guide aggiuntive, posizionate frontalmente e posteriormente al serbatoio, al fine di garantirne un corretto allineamento durante tutte le prove. L'utilizzo di un lubrificante potrebbe inoltre migliorare l'affidabilità del sistema, facilitando lo scorrimento del serbatoio e limitando l'usura a lungo termine. A ciò si potrebbe associare un design semplificato del serbatoio, che consenta di convogliare uniformemente l'acqua in una sezione estrusa ristretta, corrispondente esattamente alla superficie superiore della cella.

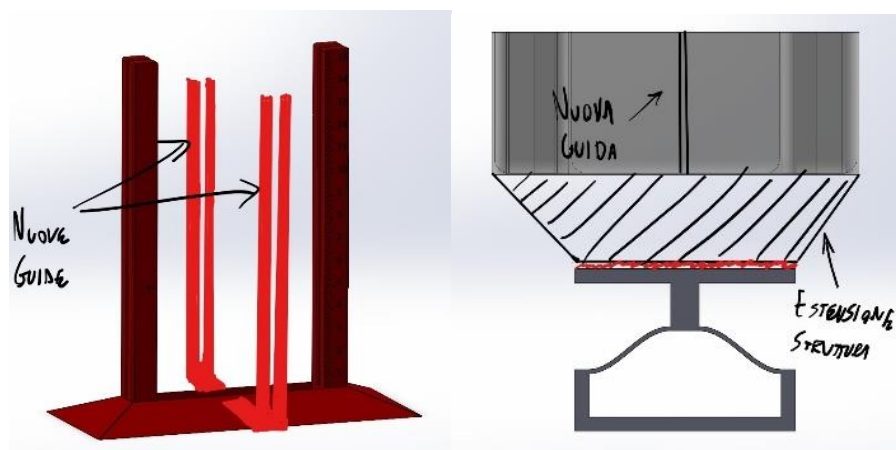


Figura 34 – Possibili modifiche del design

Conclusione

L'obiettivo degli studi svolti nel corso di questa tesi era quello di sviluppare una metodologia sperimentale alternativa a quella convenzionale, che unisse semplicità tecnica ad un buon livello di precisione, al fine di caratterizzare correttamente il comportamento di NSS realizzate tramite manifattura additiva. Nel corso delle varie fasi del lavoro, è stato possibile progettare e realizzare con successo una pressa ad acqua stampata in 3D, che ha permesso di caratterizzare le strutture realizzate durante il percorso di tirocinio, con un livello di accuratezza ritenuto accettabile per una stima preliminare.

In base ai dati raccolti durante le sperimentazioni, è possibile affermare che l'obiettivo è stato raggiunto con successo, ma sono stati anche confermati alcuni aspetti critici già osservati durante il tirocinio, e individuati di nuovi, come ad esempio limiti nel design della pressa e la fragilità delle strutture realizzate in *TangoGray*.

Limiti dello studio

Il design adottato per la pressa ha consentito, in primo luogo, un'analisi solo parziale della struttura, limitata alla determinazione del carico critico e a un andamento medio generale della prima parte del grafico forza-deformazione. Le difficoltà incontrate durante le misurazioni hanno inoltre avuto un impatto significativo sulla loro precisione ed affidabilità, che lascia spazio ad un discreto margine di miglioramento sia per il lato strumentale sia per quello metodologico. Per un futuro riutilizzo di questo specifico design, sarebbe opportuno procedere a una rivisitazione della geometria del serbatoio e della struttura della base, al fine di implementare le modifiche strutturali suggerite in precedenza.

Per quanto riguarda le strutture analizzate, restano ancora delle perplessità sulla scelta del materiale *TangoGray* per le applicazioni a questo tipo di geometria NS: se da un lato si dimostra versatile nella stampa, dall'altro si è rivelato troppo suscettibile all'usura per un'applicazione affidabile a lungo termine. La suscettibilità ai danni, la degradazione nel tempo ed in generale l'eccessiva flessibilità riscontrata, hanno sottolineato che, allo stato attuale, questo materiale risulta più adatto per scopi sperimentali e ricerca piuttosto che applicazioni concrete.

Prospettive future

Sebbene le misurazioni effettuate abbiano consentito di raccogliere dati fondamentali alla caratterizzazione delle strutture, per degli studi futuri sarebbe senz'altro interessante utilizzare un design più articolato (come, ad esempio, quello alternativo proposto al paragrafo 4.1.2) che permetta uno studio anche durante la fase di *snap-through*, offrendo così una caratterizzazione più completa della rigidità negativa.

Per quanto riguarda il materiale, a parità di geometria utilizzata, sarebbe preferibile orientarsi verso un materiale più tenace, come il TPU o altre resine simil-gomma, in grado di offrire maggiore resistenza a stress meccanico ed usura. A seconda del tipo di applicazione studiato, potrebbe inoltre risultare conveniente selezionare materiali con rigidità diversa: più rigidi per carichi a bassa frequenza (come gli urti), dove è richiesta una risposta più netta e concentrata; più flessibili per carichi ad alta frequenza (come le vibrazioni), dove è preferibile una risposta più continuativa e distribuita nel tempo.

Riferimenti Bibliografici

1. Manifattura additiva, URL: <https://magnaflux.com/Magnaflux/Blog/What-is-Additive-Manufacturing>
2. “Tango data sheet”, Stratasys, URL: <https://www.stratasys.com/en/materials/materials-catalog/PolyJet-materials/tango/>
3. Tark Raj Giri, Russell Mailen, *Controlled snapping sequence and energy absorption in multistable mechanical metamaterial cylinders*, Da: *International Journal of Mechanical Sciences* 204 (2021) 106541
4. Corsi M., Bagassi S., Moruzzi M.C., Weigand F. (2022). Additively manufactured negative stiffness structures for shock absorber applications, Da: *MECHANICS OF ADVANCED MATERIALS AND STRUCTURES*, 29(7), 999-1010
5. Candini Riccardo, *Strutture a rigidezza negativa realizzate in Additive Manufacturing: analisi delle caratteristiche meccaniche*; Università di Bologna, Anno Accademico 2023/2024 (“Tesi di laurea discusse nel 2024 - AMS Tesi di Laurea - AlmaDL ...”)
6. Santinato Elia, *Caratterizzazione e studio di strutture a rigidezza negativa prodotte con tecnologie additive*; Università di Bologna, Anno Accademico 2023/2024 (“Tesi di laurea discusse nel 2024 - AMS Tesi di Laurea - AlmaDL ...”)
7. Jn Qiu, Jeffrey H. Lang, Alexander H. Slocum; *A curved-beam bistable mechanism*; Da: *Journal of microelectromechanical systems*, Vol. 13, No. 2, April 2004
8. Marzia Corsi. *Design of experiment analysis of additively manufactured negative stiffness structures for shock absorber applications. Master’s thesis*; Università di Bologna, Anno Accademico 2018/2019.
9. First-mode buckled beam transitioning,
URL: https://www.researchgate.net/figure/First-mode-buckled-beam-transitioning-from-one-stable-state-to-another-under-transverse_fig3_289031968
10. Mechanics of Materials: Beam Buckling,
URL: <https://www.bu.edu/moss/mechanics-of-materials-beam-buckling/>
11. Creality Ender 3 V2,
URL: <https://www.creality.com/products/ender-3-v2-3d-printer-csco>
12. Stratasys Objet 30 V5 Prime,
URL: <https://support.stratasys.com/it/printers/polyjet-legacy/objet30-v5-pro-and-prime>

13. Stratasy. Tango Family of Rubber-Like Materials, 2019.
14. Enrico Troiani e Sara Bagassi. Appunti del corso di 'Costruzioni Aeronautiche' (2024).

Appendice

A.1 Codice MATLAB utilizzato per i grafici teorici

```
% Programma per tracciare il grafico di forza-spostamento con F1 ed F3 troncate
clear all; close all; clc;

% Parametri costruttivi
h = 15.12; %(mm) Ampiezza geometria sinusoidale
d = 2 * h; %(mm) Spostamento verticale cella NSS
t = 1.5; %(mm) Spessore caratteristico
Q = h / t; % Ampiezza adimensionale
b = 12.7; %(mm) Profondità estrusione
Es = 17.3; %(MPa) Modulo Young medio "Tango Gray"
l = 77.48; %(mm) Lunghezza cella
I = (1/12) * b * (t^3); %(mm^4) Momento inerzia sezione arco bistabile
celle = 6; % Numero di celle strato
sigmaSn = 4; %(MPa) Sigma medio di snervamento "Tango Gray"
A = b * t; % Area sezione

% Variabili indipendenti
x = linspace(0, 2*h, 500); % Maggiore risoluzione per precisione intersezioni
delta = x / h; % Spostamento normalizzato Δ

% Funzioni da visualizzare [adimensionali]
F1 = (((3 * pi^4 * Q^2) / 2) * (delta)) .* ((delta) - 3/2 + ...
    sqrt(1/4 - 4/(3 * Q^2))) .* ((delta) - 3/2 - sqrt(1/4 - 4/(3 * Q^2)));
F2 = 4.18 * pi^4 - 2.18 * pi^4 .* delta;
F3 = ((8 * pi^4) - (6 * pi^4 * delta)); % Forza-deformazione per struttura

% Funzioni da visualizzare [dimensionali]
F1D = (((3 * pi^4 * Q^2) / 2) * (x / h)) .* ((x / h) - 3/2 + sqrt(1/4 - ...
    4/(3 * Q^2))) .* ((x / h) - 3/2 - sqrt(1/4 - 4/(3 * Q^2))) * (Es * I * h) / (l^3);
F3D = ((8 * pi^4) - (6 * pi^4 * (x / h))) * (Es * I * h) / (l^3); % Forza-deformazione per struttura

% Informazioni aggiuntive
f = (8*(pi^4)*Es*h*I/(l^3)); % Forza massima raggiunta per innescare collasso cella singola
sigmaMax = f/A;
if sigmaMax>sigmaSn
    fprintf("La struttura SI ROMPE, la tensione massima supera " + ...
        "la resistenza del materiale di "+(sigmaMax-sigmaSn)+" MPa\n");
else
    fprintf("La struttura RESISTE, la tensione massima è "+sigmaMax+ ...
        " MPa, ossia "+((sigmaMax/sigmaSn)*(100))+" percento della tensione di snervamento\n");
end
fprintf(f+ '|N (forza necessaria al collasso di una singola cella [top])\n");
fprintf(f/2+ "N (forza necessaria al collasso di una singola cella [bottom])\n");
fprintf(celle*f + " N (forza necessaria collasso strato)\n");

% Trova le intersezioni tra F1 e F3 [adimensionali]
intersections = find(diff(sign(F1 - F3)) ~= 0); % Indici dove F1 e F3 si incrociano
int1 = intersections(1); % Primo indice di intersezione
int2 = intersections(3); % Terzo indice di intersezione

% Trova le intersezioni tra F1 e F3 [dimensionali]
intersectionsD = find(diff(sign(F1D - F3D)) ~= 0); % Indici dove F1 e F3 si incrociano
int1D = intersections(1); % Primo indice di intersezione
int2D = intersections(3); % Terzo indice di intersezione

% Crea segmenti per F1 e F3 [adimensionali]
delta F1 sx = delta(1:int1): % Parte di F1 prima della prima intersezione
```

```

F1_sx = F1(1:int1);

delta_F1_dx = delta(int2:end); % Parte di F1 dopo la seconda intersezione
F1_dx = F1(int2:end);

delta_F3 = delta(int1:int2); % Segmento di F3 tra le due intersezioni
F3_segment = F3(int1:int2); % Calcola F3 nel segmento specifico

% Crea segmenti per F1 e F3 [dimensionali]
delta_F1_sxD = x(1:int1D); % Parte di F1 prima della prima intersezione
F1_sxD = F1D(1:int1D);

delta_F1_dxD = x(int2D:end); % Parte di F1 dopo la seconda intersezione
F1_dxD = F1D(int2:end);

delta_F3D = x(int1:int2); % Segmento di F3 tra le due intersezioni
F3_segmentD = F3D(int1:int2); % Calcola F3 nel segmento specifico

% Grafico 1: F1 e F3 troncati
figure; hold on;
plot(delta_F1_sx, F1_sx, 'r', 'LineWidth', 1.5); % F1 prima intersezione
plot(delta_F3, F3_segment, 'b', 'LineWidth', 1.5); % F3 compresa tra F1
plot(delta_F1_dx, F1_dx, 'r', 'LineWidth', 1.5); % F1 dopo intersezione

% Impostazioni del grafico 1
grid on;
xlabel('Spostamento normalizzato \Delta');
ylabel('Forza normalizzata F');
title('Grafico Forza-Spostamento (effettivo)');
legend('F1', 'F3', 'Location','best');
hold off;

% Grafico 2: F1, F2, F3
figure; hold on;
plot(delta, F1, 'r', 'LineWidth', 1.5); % F1
plot(delta, F2, 'g', 'LineWidth', 1.5); % F2
plot(delta, F3, 'b', 'LineWidth', 1.5); % F3

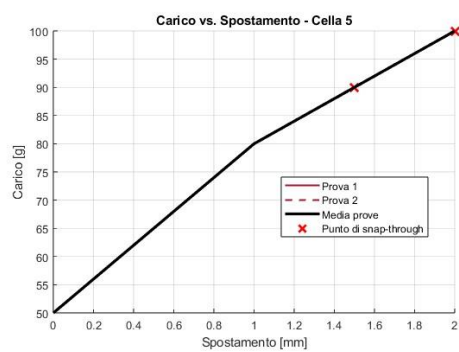
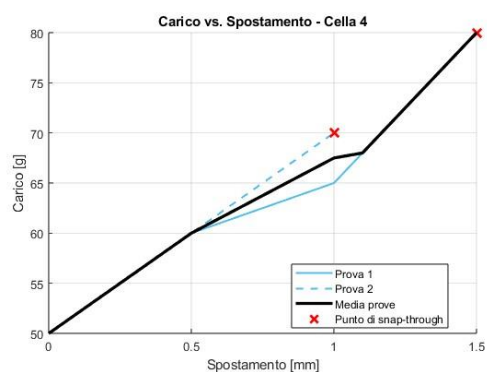
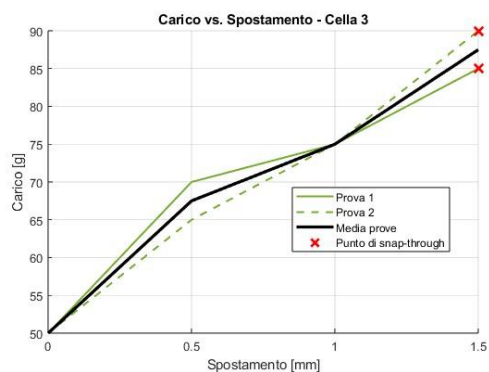
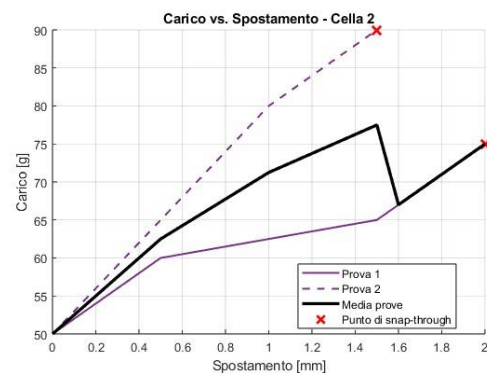
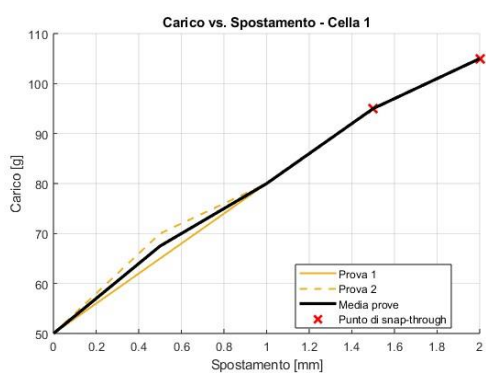
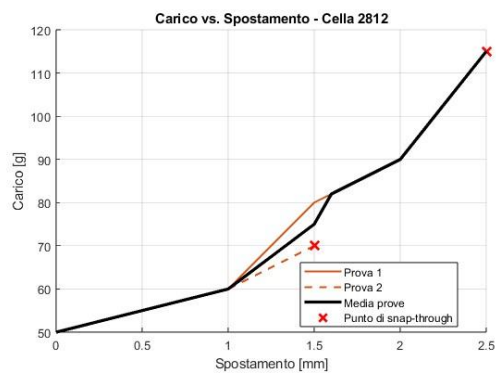
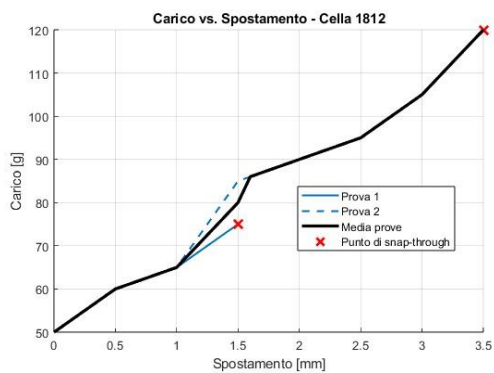
% Impostazioni del grafico 2
grid on;
xlabel('Spostamento normalizzato \Delta');
ylabel('Forza normalizzata F');
title('Grafico Forza-Spostamento (completo)');
legend('F1', 'F2', 'F3', 'Location','best');
hold off;

% Grafico 3: F1,F3 dimensionali
figure; hold on;
plot(delta_F1_sxD, F1_sxD, 'r', 'LineWidth', 1.5); % F1 prima intersezione
plot(delta_F3D, F3_segmentD, 'b', 'LineWidth', 1.5); % F3 compresa tra F1
plot(delta_F1_dxD, F1_dxD, 'r', 'LineWidth', 1.5); % F1 dopo intersezione

% Impostazioni del grafico 3 (uguale al grafico 1)
grid on;
xlabel('Spostamento mm');
ylabel('Forza N');
title('Grafico Forza-Spostamento (effettivo) - dimensionale');
legend('F1', 'F3', 'Location','best');
hold off;

```

A.2 Grafici carico spostamento celle NS individuali



Ringraziamenti

Con questa tesi si conclude finalmente il mio percorso di studi a Forlì, un importante capitolo della mia vita durato quattro anni, che mi ha permesso di crescere e maturare profondamente, sia come studente che come persona. Le difficoltà e i momenti di incertezza certo non sono mancati lungo il cammino, ma con il supporto delle persone attorno a me (ed una discreta dose di pazienza), quasi non sembra vero, ma sono finalmente giunto al traguardo.

Il mio primo ringraziamento va a chi ha reso possibile la realizzazione di questa tesi: la professoressa Sara Bagassi, relatrice e docente del corso di Costruzioni Aeronautiche, e l'ingegner Martino Carlo Moruzzi, in qualità di correlatore e principale punto di riferimento per questo studio.

Un secondo ringraziamento va a tutte le persone che mi sono state vicine, che mi hanno supportato nei momenti più ostici, ma anche sopportato in quelli più frustranti o riflessivi, a partire dalla mia famiglia. Grazie a chi per me c'è stato sempre, e anche a chi, magari da un altro luogo o dal cielo, ha continuato a vegliare su di me. In particolar modo, ringrazio mio padre, mia madre, mia sorella (e Penny) e mia nonna: per aver sempre condiviso con me le mie vittorie e per avermi permesso, talvolta con sacrificio, di proseguire lungo questo percorso. Senza di voi, questo traguardo non sarebbe stato possibile.

Allo stesso modo, desidero ringraziare i miei amici, che negli anni e lontano da casa, mi hanno fatto un po' da seconda famiglia: da quelli ormai storici del gruppo di Minerbio e del Copernico, a quelli conosciuti all'università durante la permanenza a Forlì, come il gruppo di Ronco. Le feste, i viaggi, le cucinate, le risate ed in generale tutti i bei momenti e le svariate avventure le porterò con me, ovunque andrò adesso.

Un ringraziamento speciale è rivolto anche ad EUROAVIA Forlì-Bologna, associazione studentesca di cui ho avuto anche l'onore essere presidente, a cui ho dedicato con passione tempo ed energie in questi anni. I membri, i colleghi e gli amici con cui ho lavorato, le persone che ho conosciuto viaggiando e tutte le esperienze vissute mi hanno cambiato profondamente: hanno ampliato i miei orizzonti, arricchendo il mio bagaglio culturale e cambiando il mio modo di vedere il mondo, ispirandomi al contempo a fare sempre del mio meglio per portare avanti le mie idee. Di sicuro, non sarei la persona che sono oggi se non ne avessi fatto parte.

Per concludere, un grazie finale anche a chi ha scritto queste righe, per non essersi arreso alle insicurezze, per essersi buttato con coraggio in nuove avventure e per avercela sempre messa tutta: che questo traguardo rappresenti solo l'inizio di un nuovo viaggio, alla ricerca del tuo posto in questo grande, affascinante e complicato mondo.

Francesco "Kutta" Cuttitta