



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA

– SEDE DI FORLÌ –

CORSO DI LAUREA
IN INGEGNERIA AEROSPAZIALE

CLASSE: L-9

ELABORATO FINALE DI LAUREA IN:
COSTRUZIONI AERONAUTICHE

Caratterizzazione e studio di strutture a rigidezza negativa prodotte con tecnologie additive

Candidato
Elia Santinato

Relatore
Prof. Ing. Sara Bagassi
Correlatore
Ing. Martino Carlo Moruzzi

Anno Accademico 2023-2024

A mio nonno Gianni

Sommario

Questo lavoro di tesi è stato svolto nell'ambito di uno studio pluriennale sulle strutture a rigidità negativa (*Negative Stiffness Structures*, NSS) che ha analizzato diverse tipologie di materiali additivi. Il presente elaborato ha quindi approfondito il materiale per fabbricazione additiva TangoGrey, che differisce dal materiale TangoBlack, non solo in termini di colorazione del materiale ma anche nelle caratteristiche di rigidità e resistenza. Inizialmente, vengono esaminati gli obiettivi del progetto, i quali includono l'acquisizione di conoscenze sulle tecniche di *Additive Manufacturing* (AM), la definizione dello stato dell'arte sulle NSS e lo studio di una particolare geometria per eseguire test di compressione quasi-statica. In seguito viene esplorato il mondo dell'AM focalizzandosi sulla tecnologia usata per questo lavoro, la *PolyJet*, per poi focalizzarsi sulle caratteristiche principali delle NSS tra le quali si trovano la rigidità negativa, la bistabilità e lo *snap-through*, insieme alle loro applicazioni, come l'assorbimento di shock e l'attenuazione degli impatti, interessanti in diversi campi dell'ingegneria. Si prosegue poi con la descrizione della campagna di realizzazione delle strutture che comprende una panoramica sul materiale utilizzato e le operazioni di manutenzione del sistema per la fabbricazione additiva che si è deciso di utilizzare, necessarie ad assicurarne un corretto funzionamento. La tesi continua poi con la caratterizzazione delle proprietà del materiale usato tramite una campagna sperimentale su alcuni provini a compressione per poi concludere con un commento sui test effettuati sulle strutture a rigidità negativa.

Indice

Introduzione	5
1 L'Additive Manufacturing	7
1.1 Le diverse tecniche di AM	8
1.2 I materiali nell'AM	10
1.3 Campi di applicazione	11
1.4 Gli sviluppi futuri	13
1.5 La tecnologia <i>PolyJet</i>	13
1.5.1 Processo di fabbricazione	14
1.5.2 Il sistema di distribuzione del materiale	14
1.5.3 La fotopolimerizzazione	15
1.5.4 I materiali utilizzabili	15
1.5.5 I parametri di fabbricazione additiva che influenzano le proprietà dei modelli	16
1.5.6 I vantaggi	17
1.5.7 Le differenze con le tecnologie maggiormente utilizzate	17
1.5.8 Le sfide future per migliorare la <i>PolyJet</i>	17
2 Le strutture a rigidità negativa	19
2.1 Il <i>Buckling</i>	20
2.2 Le proprietà delle NSS	22
2.3 Le NSS in AM	24
3 Campagna sperimentale sulle NSS in TangoGrey	25
3.1 La geometria e il <i>design</i>	25
3.2 Produzione delle NSS e dei provini a compressione	27
3.2.1 Processo di fabbricazione nella Objet 30 V5 Prime	27
3.2.2 Operazioni di manutenzione della Objet 30 V5 Prime	27
3.3 Caratterizzazione comportamento materiale con i provini a compressione	33
3.3.1 Geometria dei provini	33
3.3.2 Test sui provini	34
3.4 Test sperimentali sulle NSS	35
3.5 Commento dei risultati	36
Conclusioni	39
A Grafici dei test	43
A.1 Grafici test sui provini a compressione	43
A.2 Grafici test sulle NSS	44

Elenco delle figure

1.1	Confronto tra diverse tecnologie di produzione additiva a partire da un materiale liquido	8
1.2	Confronto tra diverse tecnologie di produzione additiva a partire da un filamento	9
1.3	Confronto tra diverse tecnologie di produzione additiva a partire da polveri	9
1.4	Confronto tra diverse tecnologie di produzione additiva a partire da polveri	10
1.5	<i>Laminated Object Manufacturing</i>	10
1.6	Esempi di applicazioni dell'AM nel campo dell' <i>automotive</i>	11
1.7	Esempi di applicazioni dell'AM nel campo della medicina	12
1.8	Esempi di applicazioni dell'AM nel campo dell'industria aerospaziale	12
1.9	Produzione <i>fuel cell</i> in AM	13
1.10	Funzionamento della tecnologia <i>Polyjet</i>	14
1.11	Confronto tra <i>Thermal Drop On Demand (DOD) Printing</i> e <i>Piezoelectric DOD</i>	15
2.1	Esempi di strutture studiate	19
2.2	Esempi di celle elementari	20
2.3	Sistema per assorbire gli urti con i detriti spaziali per la loro raccolta	20
2.4	Lunghezza di libera inflessione in diversi casi	21
2.5	Fenomeno del buckling a seguito della compressione di una trave	21
2.6	Grafico Forza-Deformazione per una struttura generica	22
2.7	Grafico Forza-Deformazione per una NSS	22
2.8	Esempio di struttura bistabile	23
2.9	Grafico Forza-Spostamento per una struttura a rigidità negativa con <i>snap-through</i> dei livelli	23
2.10	NSS prodotte in AM con diversi materiali	24
3.1	Cella elementare quotata	26
3.2	Struttura cilindrica completa quotata	26
3.3	Schema funzionamento Objet 30 V5 Prime	27
3.4	Objet 30 V5 Prime	28
3.5	Cartellone per utilizzo e manutenzione del sistema per la fabbricazione additiva	28
3.6	Modelli per calibrazione testine	29
3.7	Righello per determinare il numero di ugelli otturati	30
3.8	Bilancia calibrata per pesare i modelli	30
3.9	Foglio rosa posizionato all'interno della macchina	31
3.10	Macchinario per pulizia modelli con lama ad acqua	32
3.11	Interno della macchina per la pulizia delle strutture	32
3.12	Modello CAD del provino con le quote	33
3.13	Provino in TangoGrey prima dei test	33
3.14	Provini in TangoBlack frantumati a seguito dei test	34

3.15	Test del provino	34
3.16	Media dei test sui 6 provini in TangoGrey	35
3.17	Struttura in TangoGrey prima dei test	36
3.18	Fasi del test	36
3.19	Strutture a seguito dei test	37
3.20	Confronto del comportamento delle 6 strutture	37

Introduzione

Negli ultimi anni, il campo dell'ingegneria dei materiali ha visto un crescente sviluppo del settore delle strutture a rigidità negativa (*Negative Stiffness Structures*, NSS), grazie alle loro particolari proprietà meccaniche che consentono di ottenere una risposta ai carichi esterni diversa rispetto alle strutture tradizionali. Queste strutture trovano applicazioni in diversi settori, tra cui l'aerospaziale, delle costruzioni e l'*automotive*, dove è cruciale assorbire o isolare vibrazioni e impatti. Le NSS sono particolarmente interessanti per la loro capacità di combinare leggerezza e resistenza agli urti e alle vibrazioni, offrendo vantaggi significativi nella progettazione di componenti per esigenze specifiche.

L'*additive manufacturing* (AM) risulta fondamentale nella progettazione e produzione delle NSS grazie agli sviluppi degli ultimi anni in questo campo. Le tecniche di AM, infatti, permettono di produrre geometrie complesse con un livello di precisione e personalizzazione molto elevati, superando i limiti delle tecniche di produzione tradizionali. Questo metodo consente non solo di esplorare nuove configurazioni strutturali ma anche di ottimizzare le strutture studiando l'effetto dei parametri di fabbricazione e dell'utilizzo di materiali differenti in fase di produzione.

Obiettivi del progetto

Il campo delle NSS ha grandi potenzialità, però le informazioni riguardo questo tipo di strutture sono ancora poche e presentano diverse lacune, soprattutto riguardo lo studio delle possibili configurazioni delle strutture, i materiali utilizzabili e la possibilità di prevederne il comportamento. L'obiettivo principale di questo progetto è fornire una panoramica sul comportamento di una particolare configurazione di NSS, in combinazione con le moderne tecniche di AM, aprendo la strada a nuove applicazioni e miglioramenti nel design e nella produzione di queste particolari strutture.

Struttura della tesi

Nella presente tesi, per raggiungere l'obiettivo del progetto, il lavoro è stato diviso in diverse fasi: inizialmente si è concentrato su una definizione dello stato dell'arte dell'AM al giorno d'oggi, illustrato nel Capitolo 1, per poi passare ad uno studio sulle NSS per stabilire le loro caratteristiche principali, le geometrie più efficaci, le applicazioni e il loro legame con l'AM come sarà descritto nel Capitolo 2. Successivamente si è proceduto con un caso studio specifico con la produzione delle NSS con l'ausilio della Objet 30 V5 Prime col materiale TangoGrey. Questo caso studio comprenderà una descrizione della geometria e del design delle strutture e una serie di test sperimentali per caratterizzare le proprietà meccaniche del materiale utilizzato e studiare il comportamento a rigidità negativa della geometria selezionata, descritto nel Capitolo 3.

Capitolo 1

L'Additive Manufacturing

L'AM è una tecnica di produzione innovativa che ha iniziato a svilupparsi a partire dagli anni '80, più precisamente per mano di Chuck Hull, che nel 1984 ha presentato il brevetto per la tecnologia della Stereolitografia. L'AM è stato definito dal comitato tecnico ASTM F41 come "il processo di unire materiali per produrre oggetti a partire da modelli tridimensionali solitamente costruendo uno strato dopo l'altro, in opposizione alle tecniche produttive tradizionali" [1].

L'AM viene considerato come parte della quarta rivoluzione industriale e ha visto negli ultimi 20 anni grandi progressi, infatti la ricerca ha portato l'AM ad essere utilizzato nell'industria aerospaziale, automobilistica, biomedica, nell'architettura e in numerosi altri campi grazie alle sue caratteristiche peculiari.

Nelle tecniche produttive tradizionali solitamente viene rimosso materiale, invece quando si parla di AM si parte da un modello CAD tridimensionale per poi costruire il prodotto sovrapponendo strati di materiale uno dopo l'altro, ed è proprio per questo motivo che viene definita una tecnica 'additiva'. Alcune delle caratteristiche principali che vengono richieste in un prototipo sono l'accuratezza, la finitura superficiale (spesso bisogna sottoporre le parti ad altri processi dopo la loro produzione per rifinirle), la facilità di rimozione delle parti non necessarie e la possibilità di assemblare le parti tra loro per formare un insieme. Uno dei vantaggi principali di questa tecnica di produzione consiste nel fatto che è possibile fabbricare direttamente parti tridimensionali geometricamente complesse senza particolari apparecchiature, ad esempio degli stampi, come invece sarebbe richiesto da tecniche che prevedono la rimozione di materiale, quindi permette di avere la massima libertà nel progettare le strutture.

Al giorno d'oggi questa tecnica ci consente di produrre prototipi con particolari proprietà per eseguire test, valutare l'estetica, l'economia delle parti e le problematiche in assemblaggio nel caso di prodotti più complessi, così da risparmiare tempo e denaro, elementi molto importanti nell'industria moderna, volta al progresso continuo ed estremamente rapido.

L'AM permette quindi di avere grande libertà di progettazione e personalizzazione, soprattutto per parti geometricamente complesse, però presenta anche alcuni limiti, tra i quali spiccano i costi elevati soprattutto per le tecniche che impiegano materiali metallici, la scarsa conoscenza del comportamento a fatica delle strutture ed il fatto che sia adatto solo alla produzione di piccole serie di parti e non a quella su larga scala. È inoltre importante sottolineare che le proprietà del componente cambiano a seconda dell'orientamento della stessa nel corso della produzione quindi bisogna prestare attenzione a questo fenomeni nel corso della produzione di strutture.

1.1 Le diverse tecniche di AM

Nel mondo dell'AM ci sono diversi tipi di tecnologie, distinte in base allo stato iniziale del materiale, infatti si può partire da un materiale liquido, un filamento, la polvere oppure un foglio solido.

Quando si parla di materiale liquido la prima tecnologia che viene in mente è la Stereolitografia (SLA), che è stata la prima ad essere sviluppata, e consiste nel solidificare una resina liquida fotosensibile esponendola alla luce ultravioletta (UV). In questo processo il modello CAD viene diviso in strati, ognuno dei quali viene sottoposto alla luce UV così da essere trattato in ogni sezione e quando viene ultimato la base di lavoro si abbassa e un *wiper* con la resina passa sulla parte così da ricoprire lo stato appena ultimato per procedere col successivo. La Stereolitografia è stata successivamente studiata a fondo e ora è possibile usarla anche con ceramiche e metalli, si usa soprattutto per prototipi.

Un altro processo che usa materiale liquido è il *Rapid Freeze Prototyping* (RFP), che costruisce parti in ghiaccio depositando gocce d'acqua uno strato dopo l'altro mantenendo l'ambiente di lavoro sotto il punto di solidificazione dell'acqua così che le gocce appena espulse dall'ugello ghiaccino a contatto con lo strato precedente. E' una tecnica non ancora molto diffusa, che però riduce l'impatto ambientale considerando che utilizza l'acqua e permette di costruire prototipi e modelli [2].

Infine tra le tecniche che usano materiali liquidi troviamo il *Multi Jet Modeling* (MJM), nel quale si ottiene la parte depositando il materiale liquido con degli ugelli e trattandolo con una luce UV, costruendo uno strato dopo l'altro; questa tecnica permette di ottenere una buona velocità di fabbricazione e il contenimento dei costi. Una tecnica simile a quella appena esaminata è la *PolyJet*, le cui caratteristiche verranno esaminate successivamente, nella sezione 1.5 .

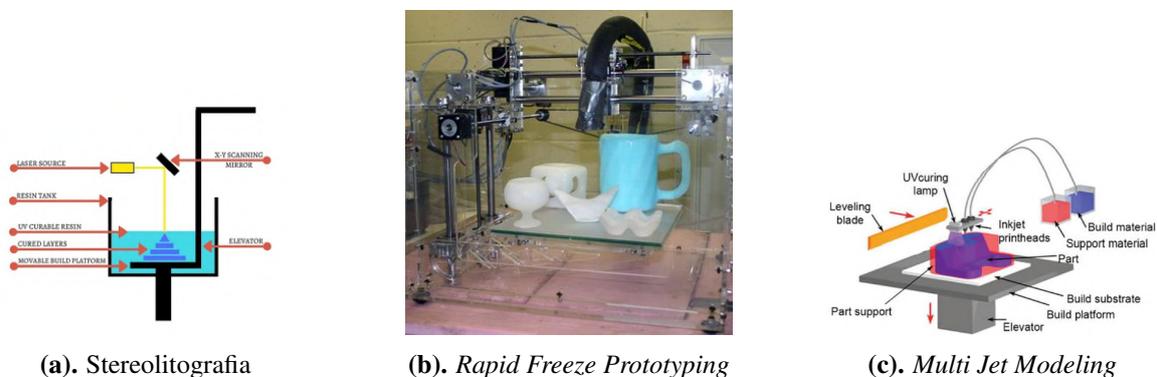


Figura 1.1: Confronto tra diverse tecnologie di produzione additiva a partire da un materiale liquido

Per quanto riguarda la fabbricazione a partire da un filamento la tecnica più diffusa è il *Fused Deposition Modeling* (FDM), in cui il materiale sciolto sotto forma di filamento viene depositato sulla *build tray* con una testina mobile e raffreddandosi si solidifica così da ottenere la parte. Un'altra tecnica è quella del *Robocasting*, la quale estrude un una pasta di ceramica acquosa strato dopo strato man mano che il materiale si solidifica, è quindi molto importante controllare le proprietà del materiale al fine di ottenere la parte richiesta con le caratteristiche corrette. L'ultima tecnica in questo campo è il *Freeze-form Extrusion Fabrication* (FEF) che è simile al *Robocasting*, però gli strati solidificano ghiacciando la pasta ceramica; questa tecnica presenta diversi vantaggi rispetto alle altre visti i costi bassi e il minor impatto ambientale. Queste ultime due tecniche vengono utilizzate principalmente per produrre parti funzionali, mentre l'FDM per i prototipi.

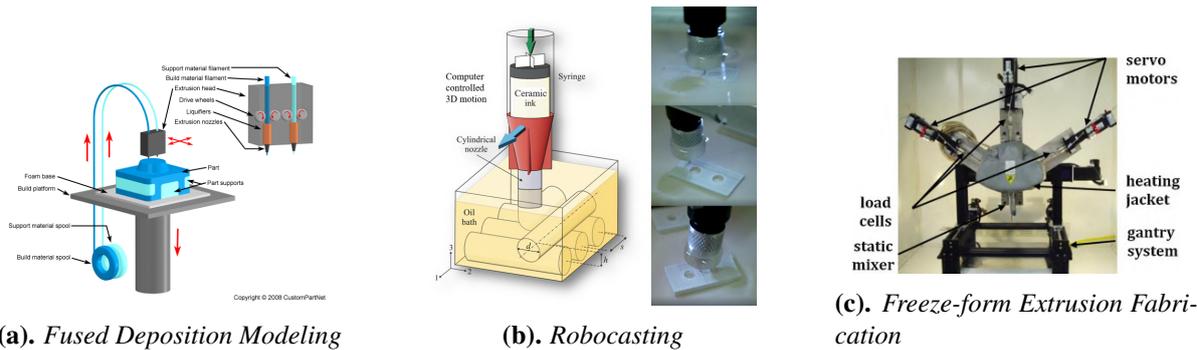


Figura 1.2: Confronto tra diverse tecnologie di produzione additiva a partire da un filamento

Nei processi in cui si parte da una polvere le parti si ottengono depositando quest'ultima e costruendo ciascuno strato grazie a una fonte di calore localizzata per fondere la polvere. Rispetto alle altre tecnologie elencate precedentemente, queste permettono di ottenere parti con diversi tipi di materiali e non richiedono materiale di supporto durante la produzione. Tra queste tecniche troviamo il *Selective Laser Sintering* (SLS), che si è poi sviluppata portando al *Selective Laser Melting* (SLM), in cui la polvere viene completamente fusa, non solo parzialmente, e all'*Electron Beam Melting* (EBM), in cui si usa un raggio di elettroni come fonte di calore. L'SLS si usa principalmente per prototipi e modelli, mentre le altre per parti funzionali.

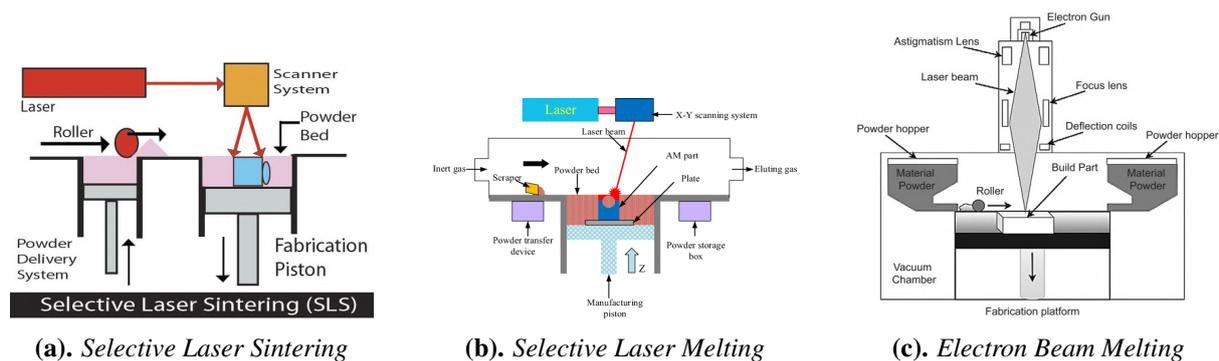


Figura 1.3: Confronto tra diverse tecnologie di produzione additiva a partire da polveri

Sempre in questa categoria di tecniche troviamo il *Three-Dimensional Printing* (3DP), nel quale viene creata la parte iniziando da uno strato di polvere sul quale viene spruzzato un legante liquido che si solidifica e forma uno strato. Questa tecnologia, similmente alle altre, viene usata per ottenere prototipi, modelli di fabbricazione e utensili.

L'ultima tecnica appartenente a questa categoria è il *Laser Metal Deposition* (LMD), in cui la polvere è completamente fusa da un raggio laser e non richiede alcun trattamento di *post processing*. La principale differenza con l'SLM è l'approvvigionamento della polvere, infatti nell'LMD la polvere viene fornita da un ugello mentre nel secondo caso la parte viene ottenuta a partire da un letto di polvere. Come l'SLM e l'EBM questa tecnologia viene usata per produrre prototipi, parti funzionali ma anche parti metalliche per riparazioni.

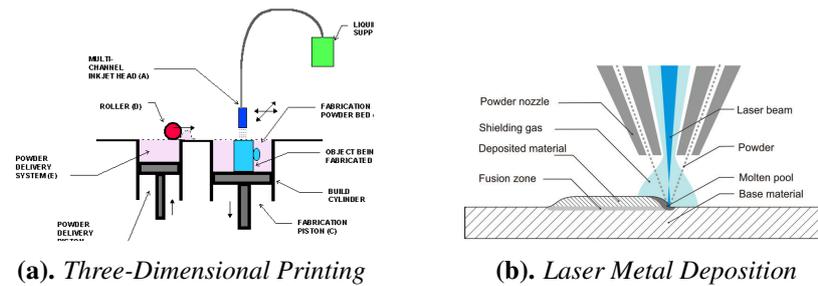


Figura 1.4: Confronto tra diverse tecnologie di produzione additiva a partire da polveri

Infine, per quanto riguarda la fabbricazione a partire da un foglio solido, nel *Laminated Object Manufacturing* (LOM) il materiale solido viene fornito a partire da un foglio. Durante il processo il foglio viene tagliato così da ottenere la sagoma richiesta, essa viene attaccata alla parte in costruzione e un raggio laser lavora per tagliare gli spigoli così da ottenere la geometria voluta. Per collegare gli strati tra loro si usa un rullo compressore ad elevata temperatura che attiva un adesivo sensibile al calore. Il vantaggio principale di questa tecnologia è la velocità di produzione, infatti il laser deve lavorare solo lungo il bordo della parte e non su tutta la sezione, d'altro canto però non permette un'elevata qualità di fabbricazione riguardo la finitura superficiale visto che dipende principalmente dallo spessore del foglio. Anche questa tecnologia, come quelle precedentemente esaminate, si usa per produrre prototipi e modelli.

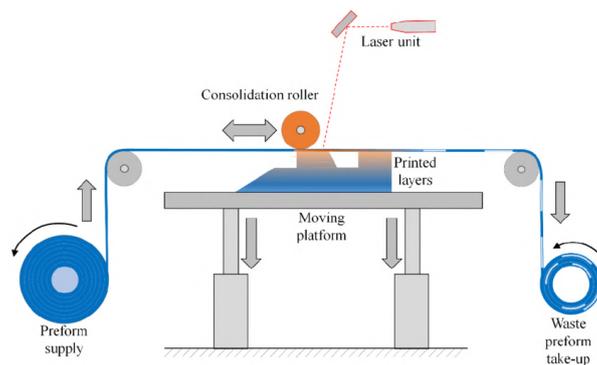


Figura 1.5: *Laminated Object Manufacturing*

1.2 I materiali nell'AM

L'AM permette di produrre parti in diversi materiali, tra quelli principalmente utilizzati possiamo trovare le resine fotosensibili, il poliammide, la plastica, la cera, l'*acrylonitrile-butadiene-styrene* (ABS), il policarbonato, polveri di metalli, ceramiche e polimeri ed infine troviamo i materiali compositi. Ognuno di questi materiali trova applicazioni in determinati campi: i polimeri risultano adatti alla produzione di impianti di diverso tipo in ambito biomedico, mentre i metalli trovano più applicazioni in ambito industriale, sia aerospaziale che automobilistico. Grazie alle diverse tipologie di materiali e allo sviluppo della tecnologia è possibile produrre parti con forme particolari in modo molto preciso che possono essere direttamente utilizzate come parti funzionali.

I polimeri sono molecole di grandi dimensioni composte di unità strutturali che si ripetono, nei processi di AM i materiali polimerici come le resine e il Nylon vengono impiegati per SLA, SLS, FDM e 3DP vista la possibilità di scioglierli e legarli tra loro con il laser. Le parti prodotte

grazie ai polimeri possono essere usate come prototipi, modelli per test, ma anche come parti funzionali.

Le parti in metallo prodotte in AM sono ottenute legando le particelle tra loro, ed è poi richiesto un trattamento di *post-processing*, oppure possono essere prodotte in modo diretto, grazie al quale le parti vengono ottenute, come ci suggerisce la parola, in maniera diretta durante il processo di AM.

Le ceramiche sono materiali solidi, inorganici e non metallici ed includono alluminia, silicio e zirconio. Tra le loro principali caratteristiche troviamo un'ottima resistenza chimica e la capacità di resistere ad alte temperature, elementi che ne hanno permesso una grande diffusione nell'industria. D'altro canto però presentano una spiccata fragilità e durezza, caratteristiche che rendono più difficile ottenere parti con geometrie complesse, ma ciò non ha fermato il processo tecnologico nello sviluppo dell'AM con questo tipo di materiali, infatti molte parti strutturali vengono prodotte con ceramiche.

I materiali compositi sono ottenuti a partire da due o più materiali con differenze evidenti dal punto di vista chimico e fisico, però combinandoli si ottengono caratteristiche che nessuno dei due presenta singolarmente. I materiali possono venire combinati in maniera uniforme o non-uniforme, portando a significative differenze nelle proprietà.

Un altro tipo di materiali che può risultare interessante è rappresentato dai *Functionally Graded Materials* (FGM), i quali permettono di ottenere strutture con parti in materiali diversi, un vantaggio che le altre tecniche di AM non permettono di avere. Questa abilità permette quindi di avere maggior flessibilità nel controllare la composizione delle parti e ottimizzarne le proprietà.

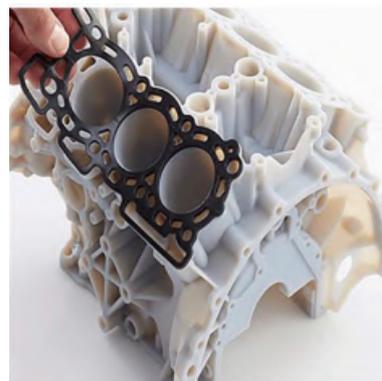
1.3 Campi di applicazione

Tra i principali campi in cui l'AM trova applicazioni troviamo l'*automotive*, quello biomedico, l'industria aerospaziale ed infine l'ambito energetico.

Nell'*automotive* sviluppare nuovi prodotti è spesso molto dispendioso sia dal punto di vista economico che tempistico, quindi l'AM è uno strumento molto potente usato per il *design* e lo sviluppo dei componenti perchè abbatta i problemi precedentemente elencati. Vengono infatti prodotte piccole quantità di parti funzionali e strutturali come scarichi delle auto, scatole del cambio, alberi di trasmissione e sistemi di frenata, soprattutto per veicoli di lusso ma anche per auto da corsa, ambito in cui le tecniche di AM permettono di risparmiare peso, caratteristica molto importante nel settore delle corse.



(a). Prototipo di imbocco fabbricato in FDM



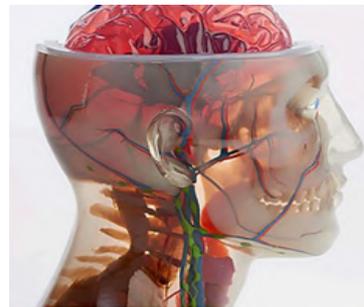
(b). Componenti di un motore

Figura 1.6: Esempi di applicazioni dell'AM nel campo dell'*automotive*

In ambito biomedico gli ultimi progressi nell'AM, nella medicina e nei biomateriali hanno permesso di applicare le tecniche di AM nella produzione di impianti ortopedici, tessuti, organi artificiali e reti vascolari di piccole dimensioni, risultano quindi evidenti l'enorme importanza e le potenzialità che l'AM possiede in questo campo. Un'altra frontiera della collaborazione tra AM e medicina è la biofabbricazione, ossia la produzione tramite biomateriali di sostanze e dispositivi terapeutici grazie all'incontro tra le tecniche di AM e la manipolazione di cellule.



(a). Protesi di una gamba realizzata in AM



(b). Modello di testa umana per studi

Figura 1.7: Esempi di applicazioni dell'AM nel campo della medicina

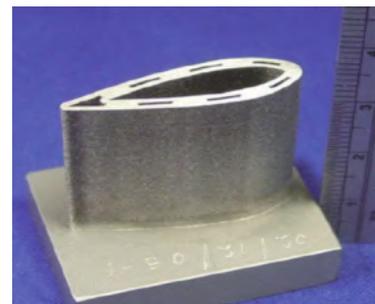
Per quanto riguarda l'industria aerospaziale, spesso i componenti presentano geometrie complesse e materiali tecnologicamente avanzati come leghe di titanio e ceramiche ultra-resistenti, i quali sono complessi e costosi da produrre, inoltre i lotti di produzione sono spesso di numero limitato, ed è proprio per questi motivi che l'AM risulta estremamente utile in questo ambito. Le tecniche di AM vengono quindi utilizzate per produrre le parti più complesse di satelliti, elicotteri e motori, come ad esempio le pale di una turbina o il supporto di un compressore. Oltre che per la produzione l'AM viene usato anche per riparare parti complesse e costose di aeromobili e per la costruzione di gallerie del vento per testare modelli di profili alari, missili e velivoli.



(a). Ugello per mix dei gas di una turbina



(b). Pale di una turbina statica realizzate in 3DP



(c). Profilo alare realizzato in LMD

Figura 1.8: Esempi di applicazioni dell'AM nel campo dell'industria aerospaziale

Infine, passando all'ambito energetico, negli ultimi decenni la ricerca si è concentrata principalmente sulle energie rinnovabili e "pulite" per ridurre il consumo di combustibili fossili. Uno dei dispositivi principali per il raggiungimento di questo obiettivo sono le *fuel cells*, che presentano diversi vantaggi come l'efficienza elevata, le emissioni basse e l'alta densità di energia, però il loro costo elevato e la bassa durabilità ne hanno ridotto la diffusione.

Per risolvere questi problemi si è deciso di ricorrere all'AM, che viene utilizzato per produrre

piccole parti, con elevato grado di precisione, così da velocizzare il processo di produzione di prototipi, lo studio e lo sviluppo della ricerca.

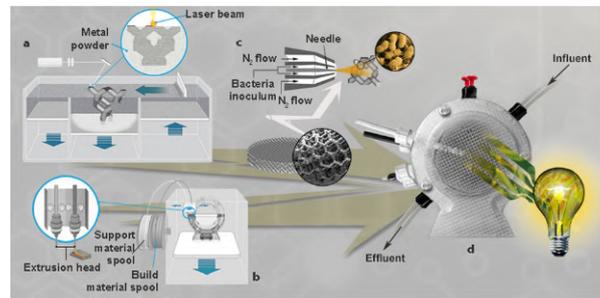


Figura 1.9: Produzione *fuel cell* in AM

1.4 Gli sviluppi futuri

Il campo dell'AM è ancora relativamente giovane e si appresta a svilupparsi e ampliarsi sempre di più negli anni a venire, e per farlo è necessario l'apporto non solo della ricerca, ma anche delle industrie che utilizzano queste tecniche visto che in tale ambito la ripetibilità e la consistenza di una parte sono caratteristiche fondamentali, quindi molte industrie sono ancora diffidenti verso l'AM vista la difficoltà nell'ottenere queste proprietà. Infatti le tecniche di AM sono principalmente basate sulla prototipazione rapida, una filosofia molto diversa rispetto ai requisiti che le parti prodotte devono soddisfare. Sono quindi richiesti grandi progressi in termini di *design*, materiali, apparecchiature e processi di produzione, non solo nell'ambito industriale, ma anche in quello biomedico.

1.5 La tecnologia *PolyJet*

Per la produzione delle strutture a rigidità negativa da studiare si è deciso di adottare la tecnica chiamata *PolyJet*, vista la disponibilità nei laboratori dell'università del sistema di produzione additiva Objet 30 V5 Prime (Stratasys). La *PolyJet* è stata sviluppata dall'azienda Stratasys a partire dagli anni duemila ed è differente rispetto alle altre tecnologie vista la sua similarità ad un normale sistema per la fabbricazione additiva. Essa infatti utilizza fotopolimeri liquidi per costruire le parti, depositando uno strato dopo l'altro sulla *build tray* ed è in grado di ottenere una precisione dell'ordine di 0.1-0.3 mm, rendendola ideale per la produzione di strutture con geometrie complesse [4].

Un'altra importante caratteristica che la differenzia dalle altre tecnologie è la possibilità di utilizzare diverse tipologie di materiali e anche diversi colori, così da ottenere prototipi non solo molto precisi ma anche estremamente realistici. Grazie ai suoi punti di forza questa tecnica permette quindi di produrre modelli e oggetti che trovano applicazioni in numerosi settori, come l'idraulica, l'elettronica, l'ingegneria biomedica, l'*automotive*, l'industria dei giocattoli e quella della moda. Per merito di alcuni studi è stato possibile stabilire che vari parametri di produzione hanno un impatto significativo sulle caratteristiche meccaniche delle parti prodotte con questa tecnologia [5].

1.5.1 Processo di fabbricazione

Il processo di fabbricazione additiva di questa tecnologia ha tre fasi principali: il *pre-processing*, la produzione e la rimozione del supporto. Durante il *pre-processing* si importa il file CAD nel software di produzione additiva, così da stabilire l'ordine di fabbricazione e la disposizione delle parti sulla *build tray*, ma anche le dimensioni, il colore, il tipo di materiale e di supporto, il quale è importante per sostenere la struttura in caso questa presenti delle parti vuote o forme concave.

Dopo aver lanciato la produzione delle parti dal software inizia la fase di fabbricazione in cui la il sistema additivo deposita la resina liquida sulla *build tray* tramite degli ugelli disposti in riga (il cui funzionamento verrà descritto più approfonditamente nella sezione 1.5.2), similmente a una normale stampante così da ottenere uno strato sul quale passa un rullo che livella la superficie. In seguito il sistema additivo solidifica il materiale con una lampada UV che permette di ottenere uno strato dalla risoluzione di $16\ \mu\text{m}$ (nel caso della Objet 30 V5 Prime è di $28\ \mu\text{m}$) e successivamente la *build tray* si abbassa così che gli ugelli possano depositare un altro strato di resina. Nel caso si abbiano oggetti che possiedono parti vuote, al fine di non far collassare la struttura su se stessa, viene depositato del materiale di supporto che verrà poi rimosso.

Questa tecnica di fabbricazione rende la tecnologia *PolyJet* molto veloce, così che il processo di studio dei prototipi e produzione di parti sia ancora più efficiente. Dopo aver ottenuto la parte e aver atteso il suo raffreddamento, si procede con la fase di pulizia della struttura rimuovendo il materiale di supporto, operazione effettuabile sia a mano che attraverso un getto d'acqua. Una volta pulita la parte è subito pronta per essere utilizzata o per venire testata [6].

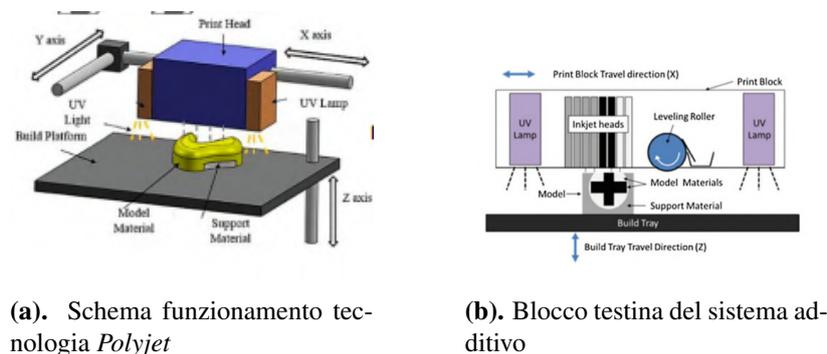


Figura 1.10: Funzionamento della tecnologia *Polyjet*

1.5.2 Il sistema di distribuzione del materiale

Per depositare la resina fotosensibile sulla *build tray* questa tecnologia usa una schiera di ugelli di diametro $60\ \mu\text{m}$, nei quali, per creare un impulso di pressione per formare la goccia di resina ed espellerla, si possono usare due metodi.

Il primo metodo è chiamato *Thermal Drop On Demand (DOD) Printing*, nel quale un sottile film che si riscalda tramite la corrente viene posizionato all'interno dell'ugello in modo da aumentare la temperatura fino al punto di ebollizione per generare una piccola sacca di vapore e quando si interrompe la corrente cessa anche il trasferimento di calore la bolla collassa causando la fuoriuscita di una goccia.

La seconda metodologia è chiamata *Piezoelectric DOD*, nella quale è presente un'attuazione meccanica diretta grazie a un trasduttore piezoelettrico (nel quale si trasforma un segnale elet-

trico in un movimento meccanico) che è usato per creare un impulso di pressione per espellere la goccia di resina, ed è generalmente usato per le applicazioni di AM.

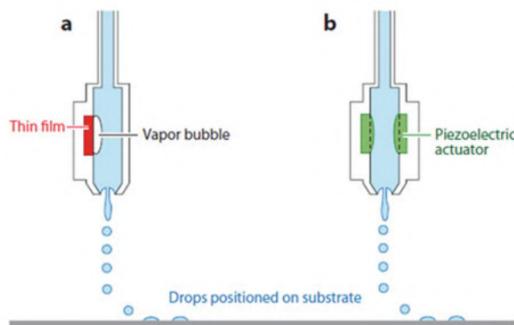


Figura 1.11: Confronto tra *Thermal Drop On Demand (DOD) Printing* e *Piezoelectric DOD*

1.5.3 La fotopolimerizzazione

I fotopolimeri sono un tipo di polimeri che se esposti ad una fonte di luce cambiano le proprie proprietà fisico-chimiche, di solito si usa una luce UV che aiuta l'inizio della reazione di cambiamento delle caratteristiche del materiale. La solidificazione dei polimeri avviene solo nella zona esposta alla luce, mentre le altre rimangono liquide.

I fotopolimeri sono formati da tre parti: i leganti, presenti tra il 50% e l'80%, sono complessi molecolari che danno alla forma solida le sue proprietà e sono liquidi a temperatura ambiente; i monomeri, le molecole base che formano un polimero e sono divise in due tipi, i monofunzionali, che possono essere usati o come diluenti o come reticolanti, e quelli polifunzionali, che possono essere usati sia come diluenti che come reticolanti. Infine troviamo i fotoiniziatori, molecole che si dividono quando esposte alla luce UV.

I fotopolimeri si possono dividere in tre categorie: la prima è quella dei fotopolimeri classici, i quali sono usati per adesivi e rivestimenti ed hanno un'alta sensibilità alla luce e buone proprietà finali; la seconda è quella dei *combination systems*, che sono stati sviluppati per risolvere problemi legati alla viscosità e durante le reazioni, possono sopportare alte temperature e trovano applicazioni nell'industria elettrica e nell'odontoiatria; infine ci sono i fotopolimeri nuovi, in cui tutte le parti sono già assemblate in un'unica molecola così da ottenere un migliore assorbimento della luce, stabilità termica e poter regolare la solubilità.

1.5.4 I materiali utilizzabili

Uno dei principali punti di forza di questa tecnologia è la possibilità di fabbricare parti usando materiali diversi, anche più alla volta, sono quindi possibili molte combinazioni diverse a partire dagli otto materiali utilizzabili.

Il primo tipo di materiali sono i *Digital Materials*, i quali possono mescolarsi tra loro per formare fino a sei diversi tipi di resine, permettono di ottenere parti solide e flessibili con un ottimo grado di precisione.

Successivamente troviamo le *Digital ABS Plastics*, che sono più forti e resistenti rispetto alle plastiche ABS tradizionali e permettono di ottenere parti con pareti molto sottili e una migliore stabilità, quindi parti elettriche, di motori e custodie per telefoni.

Per i prototipi che richiedono un certo livello di flessibilità o rivestimenti morbidi al tatto risultano utili i *Rubber-Like Materials*, che permettono di ottenere guarnizioni, tubi e soles di scarpe; di questa categoria fa parte il TangoGrey, materiale usato per la produzione delle NSS studiate.

Oltre a questi materiali si possono utilizzare anche i *High-Temperature Materials* che permettono di ottenere prototipi con un'eccellente stabilità quando esposti al calore. Essi possono inoltre essere combinati con i *Rubber-Like Materials* per migliorare le loro doti di isolamento e la flessibilità.

I materiali trasparenti sono molto utili per i prototipi in cui è richiesta la possibilità di vedere attraverso l'oggetto, come ad esempio lenti di occhiali, custodie di telefoni ma anche lenti a contatto, quindi risultano particolarmente utili in ambito medico.

I materiali rigidi opachi permettono di avere la massima libertà riguardo ai colori del prototipo, e se vengono combinati con i *Rubber-Like Materials* si possono creare parti mobili o assemblabili e componenti elettrici.

I *Simulated Polypropylene Materials* replicano le qualità e l'aspetto del polipropilene, quindi sono estremamente utili per produrre prototipi per prodotti come equipaggiamenti da laboratorio e componenti di macchine prima di passare a una produzione su vasta scala.

Infine troviamo i materiali biocompatibili che soddisfano i requisiti per l'uso medico: genotossicità, citotossicità, ipersensibilità ritardata, irritazione e compatibilità con plastica USP di classe VI. Questi materiali possono essere usati per costruire prototipi incolori che richiedono un'esposizione a corto termine con le membrane della mucosa o che possono rimanere a contatto con la pelle per oltre trenta giorni.

1.5.5 I parametri di fabbricazione additiva che influenzano le proprietà dei modelli

Le parti realizzate con la *PolyJet* hanno proprietà meccaniche che dipendono da alcuni parametri di fabbricazione che riguardano non solo i materiali, ma anche la velocità e la precisione di produzione dei modelli, l'orientamento della struttura sulla *build tray*, la geometria, la luce UV e il *post-processing*.

Durante la produzione il materiale, quando viene trattato con la luce UV, subisce un'alterazione delle sue proprietà e ciò può portare all'anisotropia della parte prodotta, soprattutto nel caso della fabbricazione col PLA. La velocità e la precisione di produzione, stabilite grazie al software di gestione del sistema prima di farla iniziare, sono due parametri fondamentali, che vanno presi in considerazione con attenzione infatti se si dovesse decidere di produrre una struttura con un processo a velocità elevata sarà necessario mettere in conto una minor precisione nei dettagli, e viceversa.

Altri parametri molto influenti sono l'orientamento della parte sulla *build tray*, lo spessore degli strati e gli angoli di realizzazione, infatti se si fabbrica una parte con strati più sottili si potranno osservare proprietà meccaniche diverse nella struttura ottenuta, similmente se si deciderà di produrre un modello con un orientamento diverso rispetto al precedente il materiale e il supporto verranno depositati in modo differente durante la fabbricazione e ciò porterà a un cambiamento nelle proprietà del prototipo.

Anche la luce UV influenza profondamente le caratteristiche delle parti prodotte, di fatti si possono osservare cambiamenti significativi variando la potenza e la lunghezza d'onda del laser e si è osservato che il modo con cui la parte viene irradiata con la luce UV influenza varie zone del componente durante la produzione e può anche portare ad un trattamento eccessivo di alcuni componenti del prototipo durante la sua produzione, alterandone le caratteristiche.

La durezza e la rugosità delle superfici delle strutture sono particolarmente influenzate dal *post-processing* dato che durante la fase di pulizia, se viene utilizzata una lama ad acqua per rimuovere il supporto, si potrebbero arrecare danni alla superficie della parte appena prodotta, alterandone la rifinitura precedentemente stabilita grazie al software di gestione del sistema di produzione e alterando le proprietà meccaniche della parte soprattutto nel caso di materiali molto teneri.

1.5.6 I vantaggi

Questa tecnologia presenta diversi vantaggi, innanzitutto è dotata di un'ottima velocità dato che si possono fabbricare diversi oggetti contemporaneamente combinando diversi materiali e una volta terminata la produzione è sufficiente rimuovere il supporto ed il prototipo è già pronto all'uso. Tutto ciò permette di risparmiare molto tempo e quindi avere più tempo per disegnare il prototipo, testarlo, migliorarlo e velocizzare il processo di produzione su larga scala e la commercializzazione del prodotto, nel caso sia concepito per la vendita.

La varietà di materiali utilizzabili e la possibilità di combinarli permettono inoltre di produrre modelli estremamente precisi e realistici, caratteristiche che in ambito medico sono fondamentali perchè permettono di ottenere protesi che il corpo riconosce come parti proprie. Ne consegue una maggior preparazione dei medici in questo campo e più possibilità di curare i pazienti, anche in situazioni particolari.

Un altro vantaggio derivante dalla possibilità di usare e combinare diversi materiali è la capacità, da parte dei sistemi di fabbricazione additiva, di produrre parti non solo molto precise, ma anche con diversi tipi di rifiniture superficiali e diverse proprietà di durezza e flessibilità.

1.5.7 Le differenze con le tecnologie maggiormente utilizzate

Rispetto alla SLA, nonostante usino entrambe la resina liquida, la *PolyJet* deposita la resina sulla *build tray*, mentre la prima estrude l'oggetto a partire da una vaschetta di resina. Inoltre la SLA può fabbricare con un solo materiale alla volta e le parti necessitano di una pulizia nettamente più lunga per rimuovere il supporto, che richiede macchinari appositi.

Passando invece all'FDM, sia questa tecnologia che la *PolyJet* producono la parte strato dopo strato, però nel primo caso il filamento di plastica si solidifica raffreddandosi, mentre nel secondo si usa la luce UV. Inoltre con la tecnologia dell'FDM si possono usare solo diversi tipi di materiali e generalmente i modelli sono più resistenti però hanno una flessibilità e un livello di dettaglio limitati rispetto alla *PolyJet*.

1.5.8 Le sfide future per migliorare la *PolyJet*

La tecnologia *PolyJet* presenta numerosi vantaggi, ma ha ancora diversi limiti, primo tra tutti la necessità di individuare i parametri di fabbricazione ottimali per produrre strutture non solo con una precisione elevata ma anche con ottime proprietà meccaniche. E' quindi fondamentale un processo di studio per l'ottimizzazione della produzione, non solo dal punto di vista della velocità e del consumo di materiale, ma anche da quello degli altri parametri come l'orientamento della parte e il trattamento con la luce UV. Sono inoltre necessari ulteriori sforzi per lo studio e lo sviluppo di materiali ibridi che soddisfino i requisiti industriali, sia meccanici che elettromagnetici, e di materiali leggeri ma al contempo molto resistenti per applicazioni in zone ostili dal punto di vista ambientale, come caldo estremo e tempeste.

È bene anche sviluppare numerosi *standard* di fabbricazione e per i test così da assicurare

un'applicazione universale per le parti prodotte con questa tecnologia. Inoltre, al fine di studiare il comportamento a fatica delle strutture in multi-materiale, così da poterlo prevedere, è necessario uno sforzo per completare il modello ad elementi finiti per questi tipi di materiali. Infine, ma non per importanza, è imprescindibile studiare il trattamento delle resine durante la fabbricazione con la luce UV che causa un gradiente di temperatura e porta quindi ad avere stress residui, anisotropia e un'adesione tra uno strato e l'altro della parte non ottimale. Si può quindi concludere che, visti i grandi vantaggi di questa tecnologia, e la diversità di possibili applicazioni, gli sforzi per svilupparla e migliorarla saranno ripagati.

Capitolo 2

Le strutture a rigidezza negativa

Le strutture a rigidezza negativa sono un peculiare tipo di metamateriali multistabili, tra le loro caratteristiche principali, derivanti dal fenomeno del *buckling*, si trovano la rigidezza negativa, la bistabilità, e lo *snap-through*.

Diversi studi sono stati portati avanti riguardo questo particolare tipo di materiali: inizialmente si sono concentrati su strutture monodimensionali, per poi passare a casa bidimensionali e tridimensionali derivanti da quelli monodimensionali, così da superare le limitazioni riscontrate inizialmente.

Per quanto riguarda la forma delle strutture, i primi studi [8] si sono focalizzati soprattutto su strutture cubiche, la cui forma però non risulta adatta ad applicazioni ingegneristiche specifiche, mentre i più recenti hanno rivolto la loro attenzione sulla ricerca di nuove strutture innovative, come cilindri e strutture a nido d'ape, per migliorarne le proprietà e adattarli sempre di più a diverse esigenze.

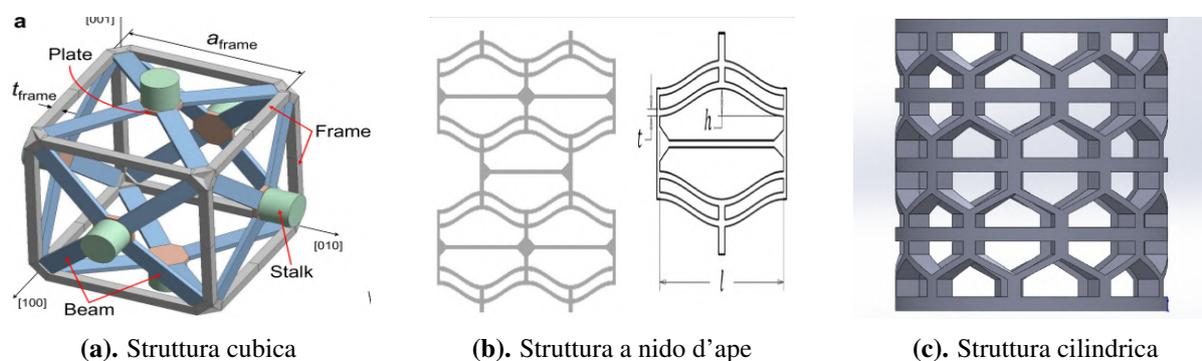


Figura 2.1: Esempi di strutture studiate

Le NSS sono formate da una cella elementare ripetuta così da ottenere una struttura generalmente cilindrica formata da più strati, in ciascuno dei quali si possono vedere le celle affiancate le une alle altre. In base alla forma geometrica delle singole celle la struttura acquisisce proprietà diverse e un comportamento diverso quando sottoposta a una prova di compressione. Diversi studi si sono concentrati sui parametri geometrici della cella, tra cui troviamo gli spessori, il raggio interno ed esterno della struttura cilindrica, l'altezza di una cella e la sua ampiezza angolare [9]; mentre altri sul numero di strati che compongono la struttura [10] o sulla forma delle travi costituenti singole celle [11].

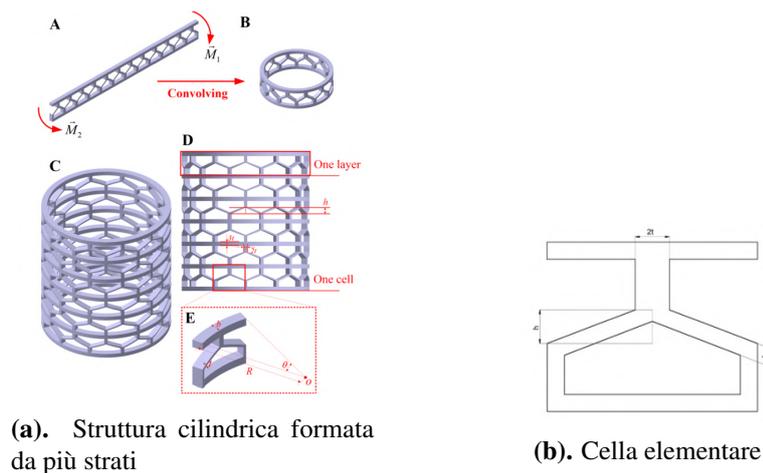


Figura 2.2: Esempi di celle elementari

Tra le applicazioni delle NSS si trovano, grazie alle loro proprietà, l'assorbimento di shock, il controllo delle vibrazioni, la costruzione di attuatori e l'attenuazione degli impatti [7] grazie al fatto che i singoli elementi della struttura tendono ad assistere la deformazione come risultato dell'immagazzinamento di energia nel processo di compressione. Inoltre, recenti studi, grazie alle già citate applicazioni, si sono concentrati sul possibile utilizzo delle NSS alle basi degli edifici nelle zone sismiche per migliorare la resistenza ai terremoti [12] e nella raccolta dei detriti spaziali vista la loro capacità di assorbire gli urti [13].

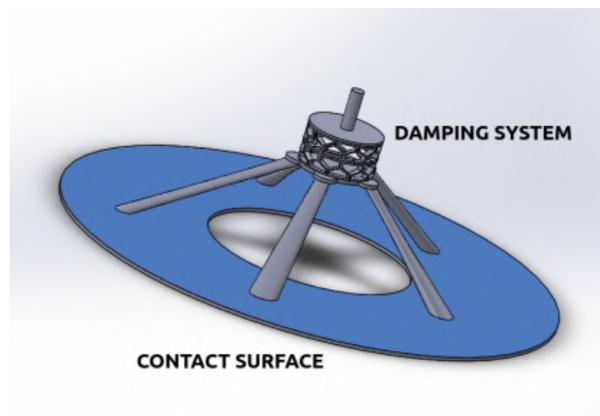


Figura 2.3: Sistema per assorbire gli urti con i detriti spaziali per la loro raccolta

2.1 Il *Buckling*

Il *Buckling* è un fenomeno che riguarda la compressione di una trave, nella quale, raggiungendo una soglia di carico critica, si potrà osservare una deformazione molto accentuata. La soglia di carico critica può essere calcolata grazie alla formula di Eulero:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L^2} \quad (2.1)$$

dove:

- P_{cr} è il carico critico di *buckling*,
- E è il modulo di elasticità del materiale,
- I è il momento d'inerzia della sezione trasversale,
- L è la lunghezza di libera inflessione della trave, ossia una misura della porzione di trave che è libera di flettersi sotto un carico di compressione.

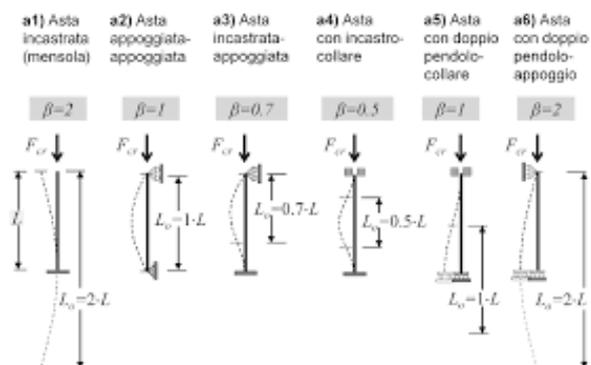


Figura 2.4: Lunghezza di libera inflessione in diversi casi

Si può notare quindi che il carico critico e la modalità in cui si manifesta il *buckling* non dipendono dal carico di compressione, bensì dal modulo di elasticità del materiale e dai vincoli della struttura. Questo fenomeno è stato a lungo una limitazione nel campo del *design* delle travi sottili visti il collasso improvviso e le grandi deformazioni, però la risposta *post-buckling* attrae interesse per quanto riguarda la capacità residua della struttura e può presentare alcune applicazioni piuttosto interessanti sia nel campo legato al movimento che quello dell'energia (*micro electro-mechanical systems*) grazie a due caratteristiche importanti: il movimento a velocità elevate e il rilascio di energia improvviso [14].

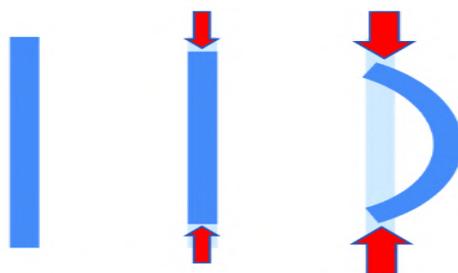


Figura 2.5: Fenomeno del buckling a seguito della compressione di una trave

2.2 Le proprietà delle NSS

Le principali proprietà di queste strutture sono:

- **Rigidezza negativa**

Normalmente quando si deforma una struttura, con l'aumento della forza esercitata, si ottiene un aumento della deformazione della suddetta struttura come si può vedere in Fig.2.6. Nel caso delle NSS invece alla diminuzione della forza applicata corrisponde un aumento della deformazione, comportamento visibile in Fig.2.7, ed è proprio ciò che le rende così particolari e interessanti. Questa risposta meccanica controintuitiva può essere evidenziata caricando trasversalmente una trave curva con una geometria appositamente studiata che può manifestare una o due posizioni stabili, caratteristica approfondita in seguito.

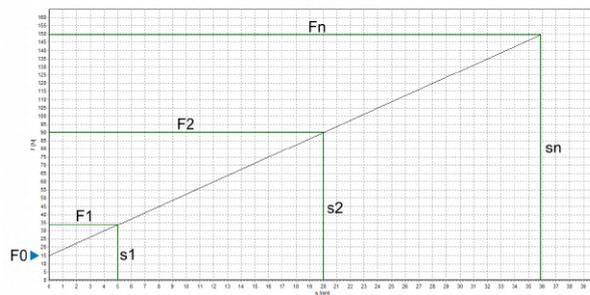


Figura 2.6: Grafico Forza-Deformazione per una struttura generica

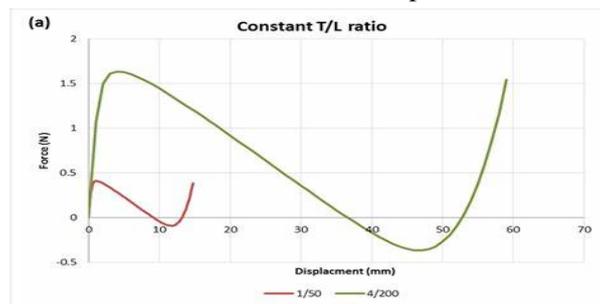


Figura 2.7: Grafico Forza-Deformazione per una NSS

- **Bistabilità**

Una struttura si definisce bistabile quando a seguito di una deformazione rimane nella posizione in cui si trova in quel momento anche quando il carico viene rimosso, caratteristica visibile in Fig.2.8. Nel caso si sia alla ricerca di una struttura che possa essere utilizzata varie volte per i propri scopi (come ad esempio assorbire un impatto) si vuole evitare questo comportamento perchè altrimenti bisognerebbe agire manualmente dopo ogni impatto per farla tornare nella posizione iniziale per poterla riutilizzare. Si cerca quindi una struttura monostabile.

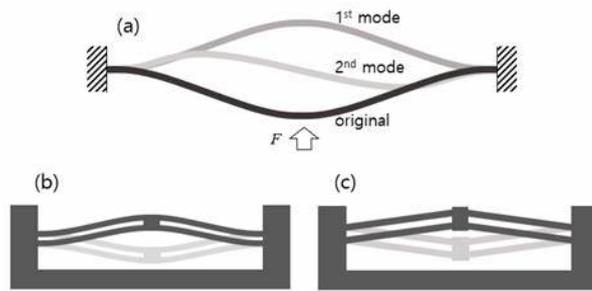


Figura 2.8: Esempio di struttura bistabile

- ***Snap-through***

Questo tipo di strutture sono formate solitamente da più di uno strato e durante una prova di compressione quasi statica, ossia così lenta da poter essere considerata statica, si arriva ad un livello di forza che provoca il cedimento di uno degli strati e dà inizio alla parte di grafico che manifesta la rigidità negativa. Il ciclo si ripete per ogni strato, quindi nel grafico i picchi corrispondono ai cedimenti di ciascuno strato come si può vedere in Fig.2.9.

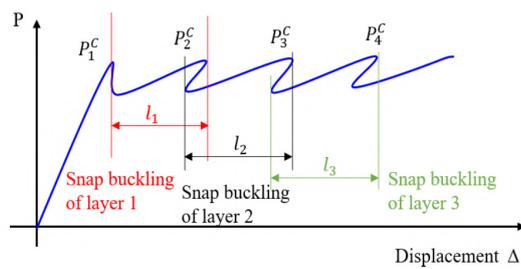


Figura 2.9: Grafico Forza-Spostamento per una struttura a rigidità negativa con *snap-through* dei livelli

2.3 Le NSS in AM

Le NSS, come detto in precedenza, possono avere forme diverse, ma in generale sono forme caratterizzate da geometrie particolarmente complesse e di conseguenza difficili da produrre con tecniche tradizionali. Alla luce di ciò e dei vantaggi derivanti dalle caratteristiche dell'AM, tra i quali spiccano l'accuratezza di realizzazione e la possibilità di produrre forme complesse in tempi ristretti, risulta corretta la scelta di usare le tecnologie di prototipazione additiva per produrre questo tipo di strutture.

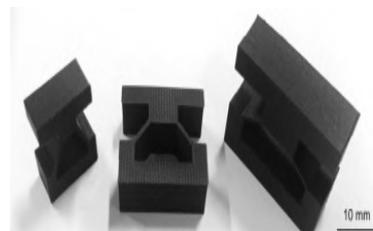
Nei diversi studi effettuati sono state utilizzate diverse tecnologie per produrre le strutture, tra cui l'FDM [9], l'SLS e il MJP [10] e diversi tipi di materiali come gli elastomeri termoplastici (TPE) [9], il *PrimePart*® ST (PEBA 2301), l'*Ultrasint*® TPU01 [10] oppure l'onice [15]. Per lo studio delle strutture svolto in questa tesi si è deciso di utilizzare una tecnologia differente, la *PolyJet* e un materiale diverso, le cui caratteristiche saranno elencate successivamente nel Capitolo 3.



(a). Strutture in PEBA



(b). Strutture in TPU



(c). Strutture in onice

Figura 2.10: NSS prodotte in AM con diversi materiali

Capitolo 3

Campagna sperimentale sulle NSS in TangoGrey

Dopo aver scelto di produrre le NSS in AM, si è deciso, vista la presenza della Objet 30 V5 Prime nei laboratori dell'università, di fabbricare le strutture col suddetto sistema di prototipazione additiva. Come materiale si è scelto il TangoGrey, un materiale *Rubber-Like* prodotto da Stratasys e particolarmente indicato per simulare rivestimenti *soft-touch*, superfici anti-scivolo e altre applicazioni che richiedono una spiccata flessibilità, quindi possiede proprietà che soddisfano i requisiti riguardo alle proprietà ricercate nelle NSS. Le principali proprietà del TangoGrey sono visibili nella tabella 3.1 [16]. Come supporto invece è stato usato il FullCure705 [17].

Tabella 3.1: Proprietà meccaniche del TangoGrey

Proprietà	ASTM	Valori
Resistenza alla trazione	D-412	3-5 MPa
Allungamento alla rottura	D-412	45-55%
Set di compressione	D-395	0.5-1.5%
Durezza superficiale (A)	D-2240	73-77 Scala A
Resistenza alla lacerazione	D-624	8-12 Kg/cm
Densità polimerizzata	D-792	1.16-1.17 g/cm ³

Per studiare a fondo le proprietà di questo materiale sotto sforzo, prima di testare le NSS nelle presse dei laboratori dell'università, sono stati eseguiti alcuni test, come stabilito dalla normativa ASTM D575-91 [18], su almeno 3 provini, le cui caratteristiche saranno specificate nella sezione 3.3.2.

3.1 La geometria e il *design*

Per le strutture da studiare si è optato per una geometria già nota nell'ambito dello studio delle NSS, derivante dalla ripetizione di celle curve formate da travi inclinate, visibili in Fig2.2b, con parametri geometrici ricavati dagli studi precedenti [7]. Si tratta quindi di una struttura più robusta vista l'esperienza maturata nei test effettuati sulle strutture prodotte in TangoBlack, risultate eccessivamente cedevoli. La singola cella è caratterizzata dai seguenti parametri:

- $\Theta=40^\circ$
- $R_i=25$ mm
- $R=30$ mm
- $h=4.50$ mm
- $t=1.5$ mm
- Spessore base=3 mm

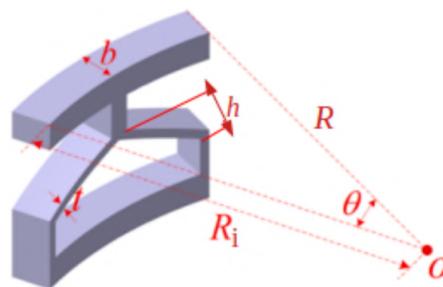


Figura 3.1: Cella elementare quotata

Per quanto riguarda la struttura nel suo complesso essa è formata dall'affiancamento delle celle elementari a formare uno strato e la sovrapposizione degli strati.

- Numero di celle per strato=9
- Numero di strati=4
- Altezza=63 mm
- Diametro=60 mm

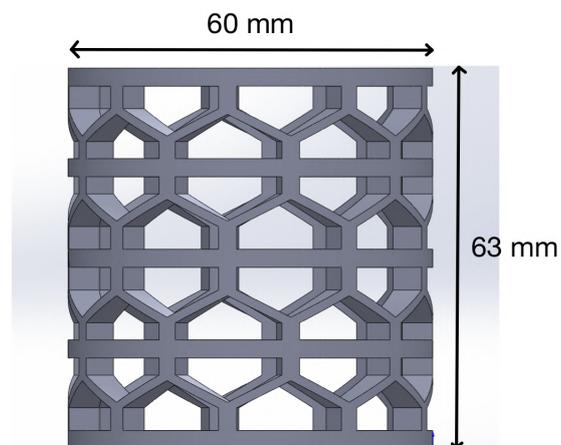


Figura 3.2: Struttura cilindrica completa quotata

3.2 Produzione delle NSS e dei provini a compressione

Come già precedentemente detto per la produzione di strutture e provini è stata utilizzata la Objet 30 V5 Prime, sistema additivo che sfrutta la tecnologia *PolyJet*. Solitamente bisogna produrre 5 strutture per eseguire i test in 5 stampe diverse, quindi per rispettare i requisiti sono state lanciate 6 stampe differenti in ciascuna delle quali veniva prodotta una struttura e un provino a compressione, così da avere dati maggiormente accurati.

3.2.1 Processo di fabbricazione nella Objet 30 V5 Prime

Questo sistema additivo funziona sulla base della tecnologia *PolyJet*, la quale è stata caratterizzata nel Capitolo 1, in questa sezione si procederà ad un'analisi più attenta del funzionamento di questo macchinario in particolare. Come succede nella *PolyJet* si parte da un modello CAD della struttura che viene elaborato con un programma di gestione del sistema per la fabbricazione additiva, in questo caso si è deciso di usare *GrabCad*, grazie al quale è possibile iniziare la produzione. Successivamente avviene la produzione delle strutture e al suo completamento le parti prodotte vengono pulite con l'ausilio di un macchinario che utilizza una lama ad acqua. Il sistema additivo utilizza durante la produzione delle parti il materiale principale e il supporto, i quali sono conservati all'interno delle cartucce che vanno sostituite una volta vuotate, e vengono trasferiti grazie ad una pompa alle testine, le quali scaldano il materiale fino a 70 °C e lo deposita sulla *build tray* uno strato dopo l'altro, espellendo contemporaneamente sia materiale che supporto. Dopo aver ottenuto uno strato la lampada UV avvia una reazione chimica che solidifica la resina e un rullo compatta lo strato. Il supporto risulta fondamentale per mantenere la struttura in posizione sotto l'azione del rullo, soprattutto in caso di geometrie concave particolari.

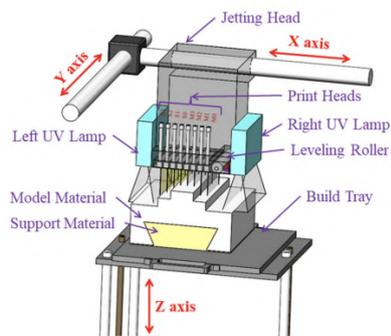


Figura 3.3: Schema funzionamento Objet 30 V5 Prime

3.2.2 Operazioni di manutenzione della Objet 30 V5 Prime

Prima di procedere con la fabbricazione delle strutture per i test si è reso necessario operare una campagna di manutenzione del sistema additivo per renderlo operativa e fare in modo che funzionasse correttamente sotto tutti i punti di vista dato che non veniva utilizzata da molto tempo. Grazie al manuale operativo è stato possibile capire quali fossero le procedure necessarie da eseguire che verranno elencate di seguito.



Figura 3.4: Objet 30 V5 Prime

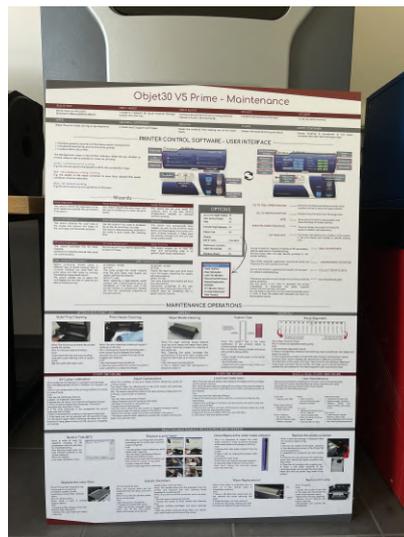


Figura 3.5: Cartellone per utilizzo e manutenzione del sistema per la fabbricazione additiva

Load Cell Calibration

Le celle di carico sono sensori che misurano il peso delle cartucce e del contenitore dei rifiuti e bisogna verificare che siano calibrate in relazione al peso reale di cartucce e bidone per prevenire errori di riempimento delle testine. Una volta iniziato il test si seleziona la cella di carico da calibrare sullo schermo del computer, si rimuove la cartuccia o il bidone corrispondente, si chiude lo scompartimento e si osservano a schermo i numeri. Bisogna aspettare fino a quando il numero non ha una stabilità pari a due cifre decimali attorno al numero esatto, e una volta verificato si procede con gli altri scompartimenti delle cartucce.

Head Optimization

Una volta pulite sommariamente le testine, sotto indicazione del manuale è stata eseguita l'operazione di *Head Optimization* visto che le condizioni delle testine influenzano direttamente la qualità dei modelli. Il *wizard* testa il funzionamento delle testine e le calibra per raggiungere la miglior configurazione così da produrre uno strato uniforme di materiale. Durante il test vengono realizzati dei campioni visibili in Fig.3.6 che vanno esaminati con un righello mostrato in Fig.3.7 per determinare il numero di ugelli otturati e con una bilancia mostrata in Fig.3.8 per determinarne il peso. Questi dati vanno inseriti nel programma di gestione del sistema così che la macchina possa analizzare le condizioni delle testine e ottimizzarle risolvendo eventuali problemi.

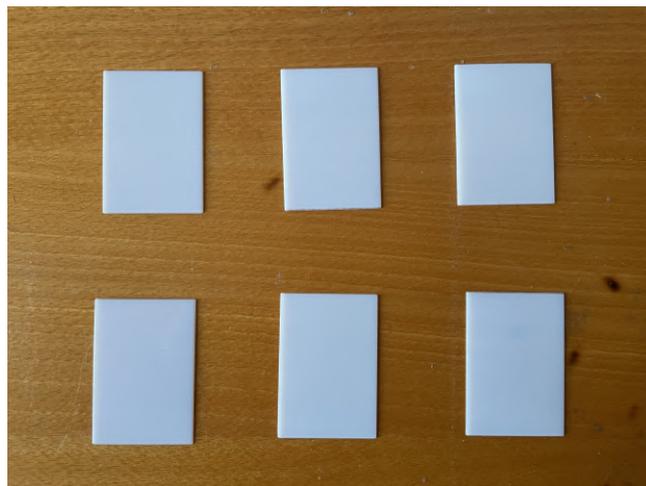


Figura 3.6: Modelli per calibrazione testine



Figura 3.7: Righello per determinare il numero di ugelli otturati



Figura 3.8: Bilancia calibrata per pesare i modelli

Calibrazione della lampada UV

Questo test calibra e verifica l'intensità della radiazione UV della lampada perchè il funzionamento e l'efficacia della lampada possono cambiare nel corso del tempo, e un basso livello di UV potrebbe far rimanere il materiale allo stato liquido. Nel corso del test bisogna verificare che il vetro del sensore sia pulito, poi il blocco di produzione passa sul sensore e viene calcolato il livello di UV richiesto, e se quello misurato non è accettabile il *wizard* calibra la lampada UV, e una volta finita l'operazione viene mostrata a schermo la condizione della lampada. Nel caso la calibrazione venga fallita prima di sostituire la lampada si può riprovare a eseguire il test così da correggere eventuali errori compiuti durante il test precedente.

Pattern test

Per verificare che il sistema di produzione sia in grado di creare modelli di qualità è necessario eseguire questo test, così da identificare le testine aventi problemi e risolverli. Per compiere questo test è necessario posizionare un foglio rosa al centro della *build tray* come mostrato in Fig.3.9, fornito dall'azienda produttrice della Objet 30 V5 Prime, far iniziare il test e infine esaminare il foglio e vedere se ci sono linee mancanti, le quali indicherebbero la presenza di problemi in alcuni ugelli. Una volta verificato lo stato delle testine, se necessario, viene eseguito uno spurgo intensivo negli ugelli così da risolvere i problemi.

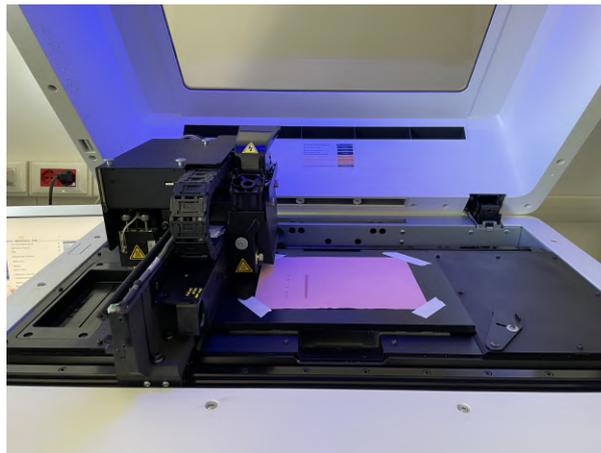


Figura 3.9: Foglio rosa posizionato all'interno della macchina

Head Alignment

Per assicurarsi che il sistema additivo sia in grado di lavorare bene e verificare la qualità di realizzazione, con una frequenza mensile, bisogna eseguire l'*Head Alignment Test*. Come prima cosa è necessario posizionare sulla *build tray* un foglio trasparente, sul quale vengono stampate sette linee verticali in quindici colonne diverse. In ogni colonna vengono stampate in maniera alternata una linea di supporto e una di materiale, e ciascuna delle quindici colonne mostra il risultato di una diversa testina. L'allineamento perfetto tra linee verticali corrisponde all'ottava colonna, se invece dovesse corrispondere, ad esempio, alla decima il *wizard* aggiorna i parametri e procede a stampare nuovamente le linee.

Oltre a queste operazioni che sono state svolte una volta che il macchinario era stato acceso dopo un lungo periodo di inattività, alla fine della fabbricazione di ciascuna struttura è necessario eseguire alcune operazioni: innanzitutto si procede con la pulizia della *Build Tray* con

l'apposito panno, successivamente si eseguono l'*Head Alignment*, l'*Head Cleaning* e l'*Head Optimization*. Tutte queste operazioni sono atte a mantenere le testine in buono stato e un'alta qualità di produzione.

Pulizia modelli realizzati

Una volta avvenuta la realizzazione della parte ed estratto il modello dalla macchina è necessario pulirlo visto che è immerso nel supporto che è un materiale oleoso. La pulizia viene eseguita posizionando il modello all'interno di una macchina, visibile in Fig.3.10, dove si usa una lama ad acqua che rimuove il supporto facendo attenzione a non rovinare la struttura all'interno, è poi necessario asciugare il modello e eventualmente rimuovere i frammenti di supporto rimanenti a mano.



Figura 3.10: Macchinario per pulizia modelli con lama ad acqua



Figura 3.11: Interno della macchina per la pulizia delle strutture

3.3 Caratterizzazione comportamento materiale con i provini a compressione

Al fine di capire le caratteristiche meccaniche a compressione del TangoGrey, come stabilito nella normativa già citata, dovevano venire prodotti almeno 3 provini in 3 stampe diverse, quindi per raccogliere dati più accurati si è deciso di produrre 6 provini, e in seguito è stata calcolata la media delle 6 prove.

3.3.1 Geometria dei provini

I provini sono di forma cilindrica e sono caratterizzati dai seguenti parametri geometrici determinati dalla normativa:

- Diametro= 28.6 ± 0.1 mm (1.129 ± 0.005 in.)(area= 650 mm² (1.000 in²))
- Altezza= 12.5 ± 0.5 mm (0.49 ± 0.02 in.)

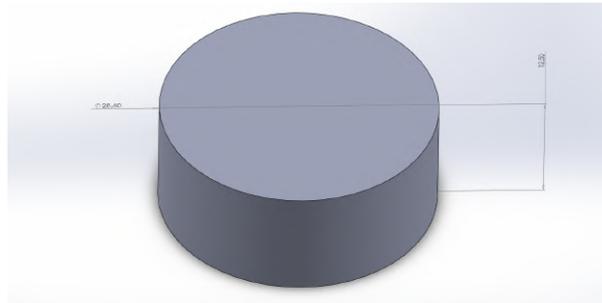


Figura 3.12: Modello CAD del provino con le quote



Figura 3.13: Provino in TangoGrey prima dei test

3.3.2 Test sui provini

Per eseguire i test di compressione quasi-statica si è deciso di utilizzare la pressa presente nei laboratori dell'università. Secondo la normativa si sarebbero dovuti eseguire i test con una velocità pari a 12 mm/min, pari a una frequenza dell'onda triangolare usata per muovere la cella di carico di 0.01 Hz, fino a raggiungere la deflessione voluta, pari al 40%. Dalle prove eseguite sui provini in TangoBlack è tuttavia emerso che i parametri scelti portavano alla rottura dei provini, come visibile in Fig.3.14.



Figura 3.14: Provini in TangoBlack frantumati a seguito dei test

Di conseguenza, per i test, si è deciso di usare i seguenti parametri:

- Cella di carico da 2 tonnellate
- Velocità di compressione= 1.2 mm/s
- Frequenza dell'onda triangolare= 0.06 Hz, pari a 6 volte quella inizialmente utilizzata
- *Sample rate*= 2000 Hz
- *Scan rate*= 500 Hz



Figura 3.15: Test del provino

I test eseguiti hanno reso possibile creare il seguente grafico 3.16 nel quale è possibile vedere la media delle 6 prove eseguite, così da ricavare una stima del comportamento meccanico del materiale sottoposto a compressione.

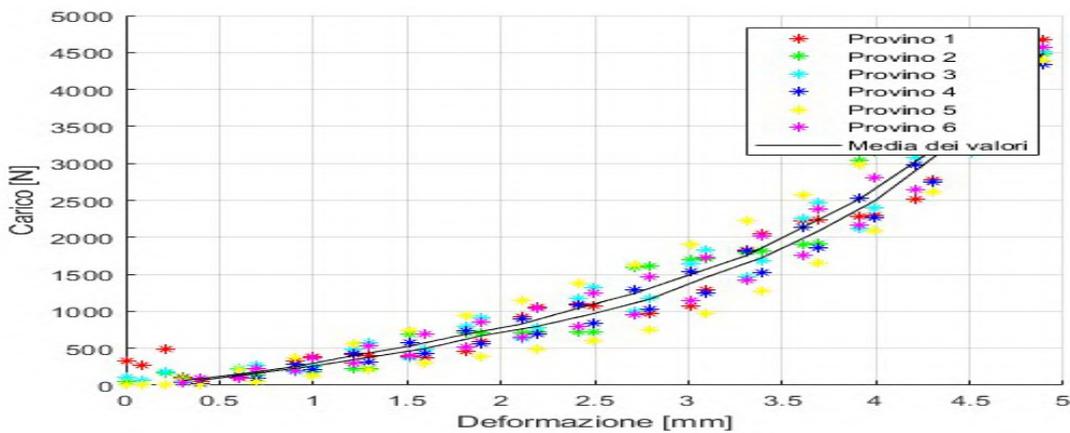


Figura 3.16: Media dei test sui 6 provini in TangoGrey

Dal grafico è possibile notare che il carico massimo raggiunto durante la prova è pari circa a 4500 N, corrispondente a una deformazione di quasi 5 mm, pari a circa il 40% dell'altezza del provino.

3.4 Test sperimentali sulle NSS

Le strutture sono state testate con parametri analoghi a quelli dei provini, tramite un'onda triangolare per muovere la cella di carico con *span* di 5 mm rispetto alla condizione di contatto, arrivando a comprimere la struttura fino a 31.5 mm pari a metà della sua altezza, come visibile in Fig.3.18c. I parametri sono i seguenti:

- Cella di carico da 2 tonnellate
- Velocità di compressione= 1.2 mm/s
- Frequenza dell'onda triangolare= 0.06 Hz
- *Sample rate*= 2000 Hz
- *Scan rate*= 500 Hz



Figura 3.17: Struttura in TangoGrey prima dei test



(a). Struttura inserita nella pressa all'inizio del test



(b). Struttura in fase di compressione



(c). Struttura arrivata alla massima compressione

Figura 3.18: Fasi del test

3.5 Commento dei risultati

Grazie ai test eseguiti, come nel caso dei provini, è stato possibile ricavare un grafico per ciascuna prova, nel quale si può notare il comportamento a rigidità negativa delle strutture. I test hanno portato a rotture in diversi punti delle strutture, soprattutto nei punti di collegamento tra i segmenti inclinati, come è possibile vedere in Fig.3.19. Dalle immagini si può evincere che la struttura maggiormente danneggiata è la prima, la quale era parzialmente influenzata dalla presenza di TangoBlack, che è meno resistente quindi la rottura potrebbe essere dovuta a questa contaminazione, mentre le altre presentano danni simili tra loro. Tutte le strutture, ad eccezione della prima, a seguito della compressione sono tornate nella loro configurazione originale nonostante i danni subiti durante i test, hanno quindi manifestato un comportamento monostabile.

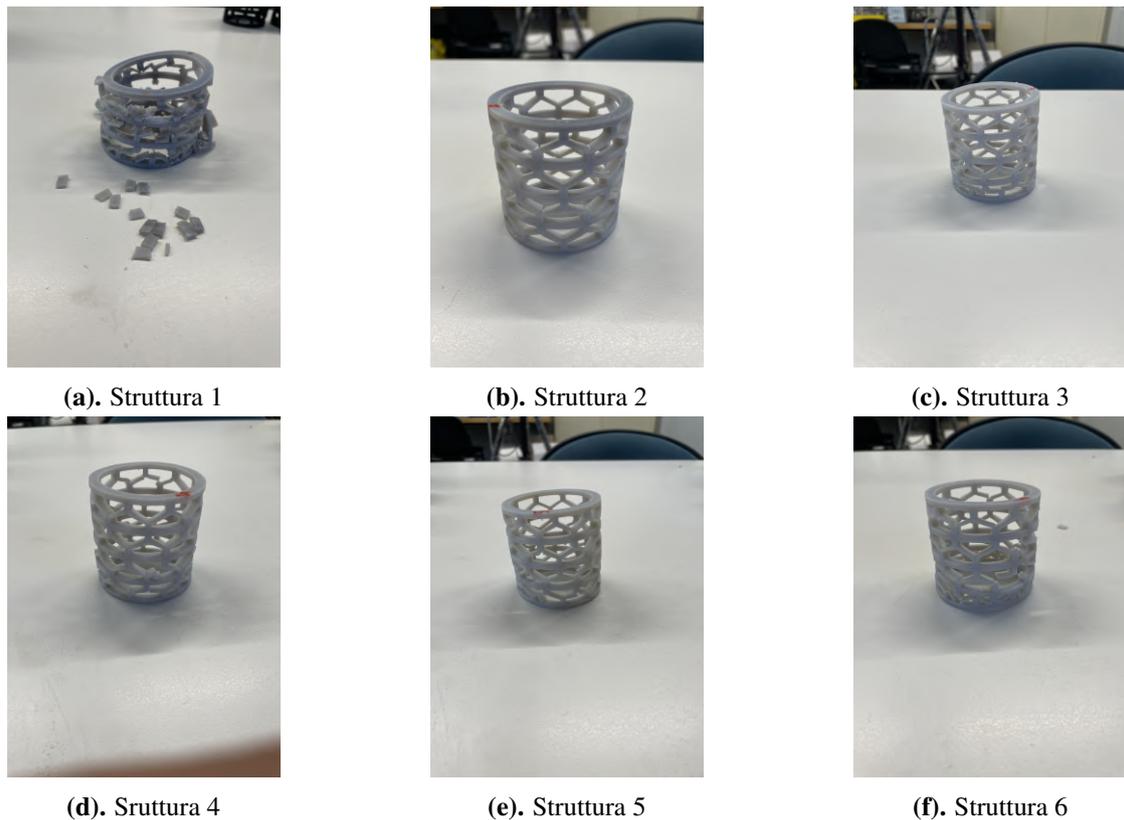


Figura 3.19: Strutture a seguito dei test

Si è deciso di riunire gli andamenti di tutti i 6 test in un unico grafico così da poterli confrontare tra loro e notare eventuali differenze, anomalie e analogie.

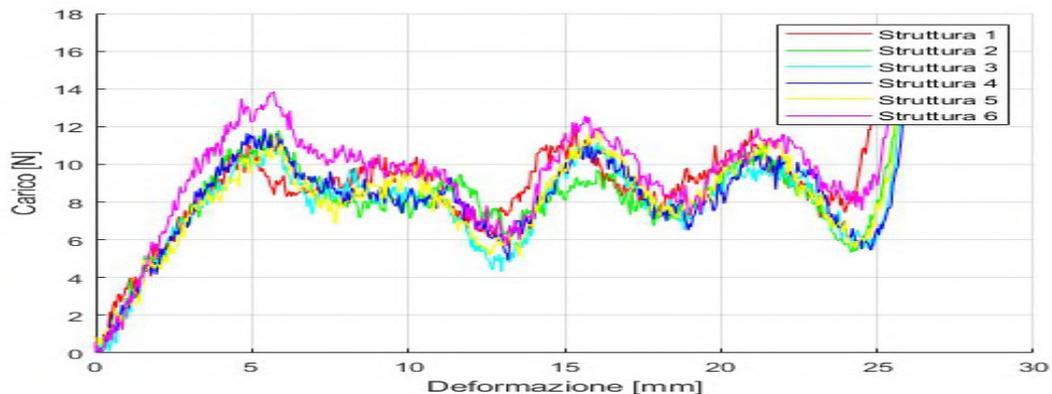


Figura 3.20: Confronto del comportamento delle 6 strutture

Grazie al grafico è possibile notare un comportamento analogo tra le diverse strutture, le quali presentano effettivamente un comportamento di rigidità negativa visibile quando le curve presentano un andamento a pendenza negativa, quindi con una diminuzione della forza applicata si ottiene un aumento della deformazione. Quando la curva raggiunge uno dei 4 minimi si presenta il collasso di uno strato (*snap-through*), andamento che si ripete fino a quando non sono collassati tutti, come visibile in Fig.3.18c; tendenzialmente all'inizio collassa o il primo o il quarto strato e solo successivamente quelli intermedi. Dal grafico si evince inoltre che il carico massimo raggiunto è attorno ai 13 N inizialmente, per poi diminuire fino a raggiungere i 10 N

prima del collasso del secondo strato e aumentare nuovamente fino a 11 N nel caso dell'ultimo strato. Per quanto riguarda i punti di minimo, il primo non è ben visibile avendo un valore simile al secondo massimo ed è intorno a 8 N, mentre quelli successivi sono mediamente pari a 6 N e non presentano differenze sostanziali. Infine, quando sono collassati tutti i 4 strati si registra un aumento della forza e della deformazione visto che la struttura si è compattata non essendoci più strati che possono collassare. Si può quindi concludere che le strutture presentano la rigidità negativa, anche se in certi punti tale comportamento non è ben distinguibile.

Conclusioni

L'obiettivo di questo progetto è quello di definire uno stato dell'arte dell'AM al giorno d'oggi e sfruttare questa tecnologia per produrre delle NSS così da testarne le proprietà. Lo studio è partito dalla definizione delle caratteristiche principali dell'AM, i suoi vantaggi e punti deboli, così da poter fabbricare le NSS, la cui geometria è stata definita grazie agli studi precedentemente effettuati su questo particolare tipo di strutture con un materiale *rubber-like*, le cui caratteristiche soddisfano i requisiti che si cercano nelle NSS. Successivamente si è proceduto con la produzione delle NSS grazie alla Objet 30 V5 Prime e con i test sui provini a compressione e sulle strutture in pressa per verificare che effettivamente manifestassero il comportamento a rigidità negativa, per poi confrontare i risultati dei 6 diversi test.

I risultati riportati nel presente elaborato riguardano lo specifico materiale TangoGrey. Un analogo studio è in corso di realizzazione sul materiale TangoBlack, avente differenti proprietà meccaniche, come descritto nell'elaborato del collega Candini [22] presentato contestualmente al presente elaborato.

Il lavoro svolto ha permesso di acquisire una profonda conoscenza delle diverse tecnologie di AM, specialmente la *Polyjet* e affrontare i problemi che nascono durante le fasi di fabbricazione, inoltre è stato possibile entrare nel mondo delle NSS, campo ancora in fase di sviluppo e dalle grandi potenzialità; infine si è potuto interfacciarsi con la pressa meccanica, capirne il funzionamento e la raccolta dei dati e la loro elaborazione.

Limiti dell studio svolto

Nel corso del progetto non è stato possibile rispettare alcuni requisiti di conservazione delle strutture prodotte e di svolgimento dei test, soprattutto riguardo la temperatura e l'umidità dell'ambiente e ciò può aver causato delle variazioni nei risultati. Le modalità di conservazione rappresentano quindi un limite del materiale per le applicazioni reali, vista la sua alta degradabilità; nei prossimi studi sarà quindi necessario rispettare i requisiti così da non alterare i risultati e ottenere dati accurati che possano aiutare la ricerca in questo campo.

Sviluppi futuri

La fase iniziale del progetto ha permesso di concentrarsi sui vantaggi e i limiti sia dell'AM che delle NSS, ciò ha reso possibile stabilire che viste le enormi potenzialità dell'AM sono necessari studi ulteriori per migliorare i materiali e le tecnologie, inoltre è fondamentale studiare le NSS sia dal punto di vista della forma e dei parametri geometrici delle celle, dei materiali utilizzabili studiandone le caratteristiche e dei metodi agli elementi finiti (FEM) per prevederne il comportamento. La ricerca permetterà quindi di migliorare l'AM sotto diversi punti di vista, rendendo questa tecnologia adatta anche ad altri campi di applicazione oltre a quelli già citati

e sviluppare NSS con caratteristiche migliori rispetto a quelle già studiate così da poter essere utilizzate in diversi settori industriali, tra cui si trovano l'ingegneria civile vista la capacità delle strutture di assorbire le vibrazioni così da migliorare la resistenza degli edifici ai terremoti [12] in zone sismiche, quella aerospaziale grazie alla possibilità di attutire gli urti così da costruire sistemi per la raccolta di detriti spaziali [13]. Inoltre, viste le proprietà delle NSS, esse possono venire utilizzate per assorbire shock e costruire attuatori, quindi trovano applicazioni in vari settori ingegneristici.

Bibliografia

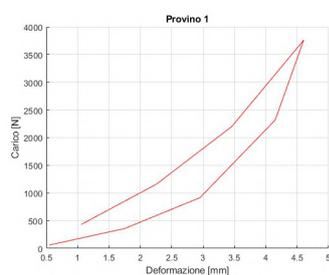
- [1] N. Guo, M.C. Leu, *Additive manufacturing: Technology, applications and research needs*, Frontiers of Mechanical Engineering, September 2013, pp. 215-243.
- [2] Wei Zhang et al., *Rapid freezing prototyping with water*, 1998, pp. 185-192.
- [3] Objet30 V5 Pro and Prime-Spec Sheet, URL: <https://www.overmach.it/product-files/Objet30>, 15/07/2024
- [4] What is the Polyjet process in 3D printing? Pros and cons. URL: <https://jiga.io/processes/polyjet/>, 15/07/2024
- [5] P. Patpatiya et al., *A review of polyjet 3D printing of polymers and multi-material structures*, Journal of Mechanical Engineering Science, April 2022, Volume 0(0), pp. 1-28.
- [6] P. Pandey, M. Taufik, *A Review on PolyJet 3-D Printing Process and Its Applications*, Recent Advances in Mechanical Engineering, September 2022, pp. 401-410.
- [7] M. Corsi, S. Bagassi, M. C. Moruzzi, and F. Weigand, *Additively manufactured negative stiffness structures for shock absorber applications*, Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2022, vol. 29, no. 7, pp. 999–1010.
- [8] Chan Soo Ha et al., *Cubic negative stiffness lattice structure for energy absorption: Numerical and experimental studies*, International Journal of Solids and Structures, 2019, 178-179, pp.127-135.
- [9] X. Tan et al., *A novel cylindrical negative stiffness structure for shock isolation*, Composite Structures, 2019, 214, pp. 397-405.
- [10] M. Corsi, *Design of experiment analysis of additively manufactured negative structures for shock absorber applications*, Master Thesis, 2019.
- [11] X. Tan et al., *Effect of beam configuration on its multistable and negative stiffness properties*, Composite Structures, 2022, 286, pp. 1-18.
- [12] Satya Eswara SanyasiRao Kolli, Govardhan Bhatt, *A state-of-the-art review on negative stiffness mechanism for safer structures in seismic areas*, Civil Engineering and Sustainable Infrastructures, Volume 30, pages 99160–99175, 2023.
- [13] L. Neri, *Negative stiffness structures: an additively manufactured design solution for aerospace applications*, Master Thesis, 2021.
- [14] Han Hu, Rigoberto Burgueño, *Buckling-induced smart applications: recent advances and trends*, Smart Materials and Structures, 2015, 24, pp. 1-20.

- [15] C. Wu et al., *Tunable 3D printed composite metamaterials with negative stiffness*, Smart Materials and Structures, 2023, 32, pp. 1-16.
- [16] Tango data sheet, Stratasys, URL:<https://www.stratasys.com/en/materials/materials-catalog/polyjet-materials/tango/>, 15/07/2024
- [17] FullCure 705 data sheet, Stratasys, URL: <https://www.stratasys.com/en/materials/materials-catalog/polyjet-materials/polyjet-support-materials/sup705-705b/>, 15/07/2024
- [18] ASTM International, *D575-91: Standard Test Methods for Rubber Properties in Compression*.
- [19] Tango Family of Rubber-Like Materials, URL: <https://support.stratasys.com/en/Materials/PolyJet/Tango>, 15/07/2024
- [20] M. G Araujo, *Root Cause Analysis Applied to a Finite Element Model's Refinement of a Negative Stiffness Structure*, Master Thesis, 2022.
- [21] ASTM International, *D695: Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics*.
- [22] R. Candini, *Strutture a rigidezza negativa realizzate in additive manufacturing: analisi delle caratteristiche meccaniche*

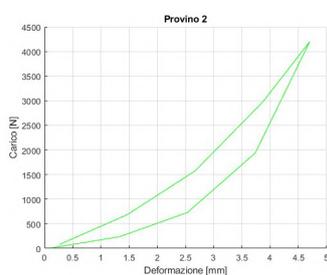
Appendice A

Grafici dei test

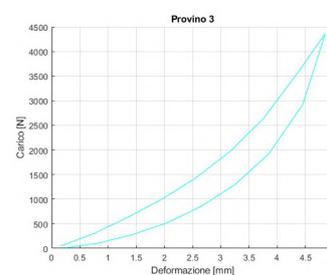
A.1 Grafici test sui provini a compressione



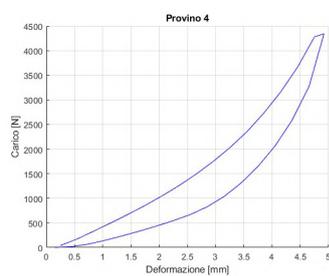
(a). Provino 1



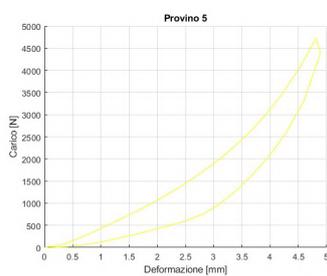
(b). Provino 2



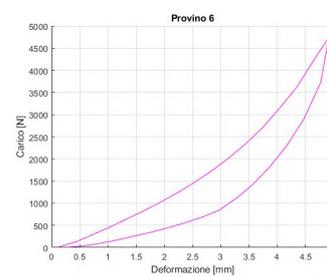
(c). Provino 3



(d). Provino 4

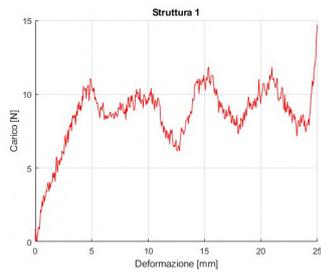


(e). Provino 5

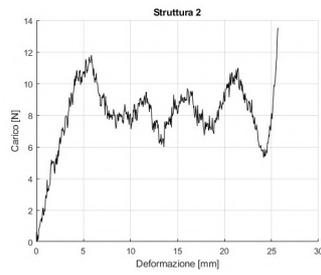


(f). Provino 6

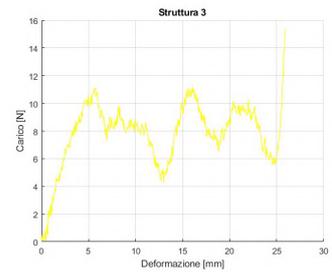
A.2 Grafici test sulle NSS



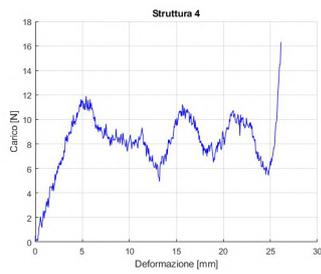
(a). Struttura 1



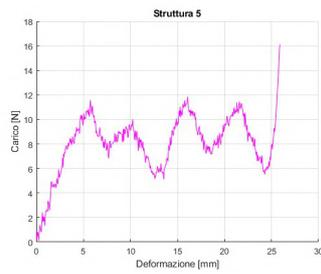
(b). Struttura 2



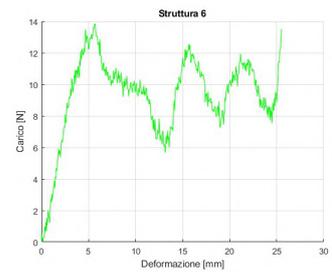
(c). Struttura 3



(d). Struttura 4



(e). Struttura 5



(f). Struttura 6

Ringraziamenti

Ringrazio inizialmente la Professoressa Sara Bagassi per avermi dato la possibilità di svolgere questo lavoro e portare avanti il progetto innovativo riguardante le NSS; l'ingegnere Martino Moruzzi per il supporto e il contributo tecnico nel corso delle attività di tirocinio e tesi e l'ingegnere Paolo Proli per l'aiuto nella campagna sperimentale.

Ringrazio tutta la mia famiglia, specialmente i miei genitori e mia sorella che mi hanno sempre incoraggiato e sostenuto, permettendomi di vivere a Forlì e di affrontare un'esperienza di vita da solo, grazie alla quale ho imparato tanto, non solo dal punto di vista accademico, ma anche umano. Un pensiero va anche ai nonni per avermi sostenuto in ogni momento, in particolare mio nonno Gianni che ci ha lasciati due anni fa ma avrebbe voluto vedermi raggiungere questo importante traguardo.

Desidero inoltre esprimere la mia gratitudine alla mia ragazza, Benedetta, il cui supporto incondizionato e la cui pazienza sono stati fondamentali durante tutto il percorso della laurea triennale. La tua presenza costante, i tuoi incoraggiamenti e la tua comprensione hanno reso possibile superare anche i momenti più difficili vedendo le cose da una prospettiva diversa e raggiungere questo traguardo. Ti ringrazio per essermi stata sempre accanto, per avermi motivato anche nelle situazioni in cui le mie convinzioni venivano meno e avermi permesso di crescere e maturare in questi tre anni passati assieme.

Ringrazio anche i miei amici coi quali ho passato bellissimi momenti e grazie ai quali ho avuto la possibilità di divertirmi non solo fuori dall'università, ma anche durante le lezioni e gli esami. Grazie a voi ho imparato che l'esperienza universitaria non è fatta solo di studio e sacrificio, ma anche di momenti di divertimento.

Infine, desidero ringraziare tutti coloro che, in un modo o nell'altro, hanno contribuito alla mia crescita personale e accademica in questi anni.