



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Triennale in
INGEGNERIA MECCANICA

**STUDIO DEI FENOMENI DI BUCKLING SU STRUTTURE
RETICOLARI OTTENUTE MEDIANTE ADDITIVE
MANUFACTURING.**

**STUDY OF BUCKLING PHENOMENA ON LATTICE
STRUCTURES OBTAINED THROUGH ADDITIVE
MANUFACTURING**

RELATORE:

Ch.mo **ARCHIMEDE FORCELLESE**

CANDIDATO:

DOMENICO D'AMICO

CORRELATORE:

Ch.ma **MICHELA SIMONCINI**

MATRICOLA:

1086934

Anno Accademico 2020/2021

*Per te che avresti voluto esserci,
Sarai sempre nel mio cuore, cugino mio.*

INDICE

INTRODUZIONE	2
--------------	---

CAPITOLO 1 - LA STAMPA 3D

1.1) LA TECNOLOGIA DELLA STAMPA 3D	4
1.2) TECNICHE DI STAMPA 3D	6
1.3) CENNI SUI MATERIALI	15

CAPITOLO 2 - L'INSTABILITÀ A COMPRESSIONE

2.1) IL FENOMENO DELL'INSTABILITÀ	17
2.2) IL PROBLEMA DI EULERO	19

CAPITOLO 3 – MATERIALI E PROCEDURE SPETIMENTALI

3.1) IL CARBON-PA	24
3.2) LA STAMPANTE: ROBOZE ONE +400	27
3.3) GEOMETRIA PER PROVA DI COMPRESSIONE	28

CAPITOLO 4 - PROVA DI COMPRESSIONE

4.1) PREPARAZIONE DELLA PROVA	31
4.2) COMPORTAMENTO A COMPRESSIONE	34

CONCLUSIONI	51
-------------	----

RINGRAZIAMENTI	52
----------------	----

INTRODUZIONE

Negli ultimi anni, si sta parlando sempre più di Quarta Rivoluzione Industriale, intesa come la presenza di nuove tecnologie che, combinando sfera fisica, digitale e biologica, generano oggi, e continueranno a generare nel futuro, molteplici cambiamenti in ambito industriale, dal punto di vista sia produttivo che organizzativo e manifatturiero.

L'industria 4.0 sarà caratterizzata in misura sempre maggiore da sistemi di produzione completamente automatici, connessi tra loro mediante un utilizzo sempre più vasto della robotica. Come conseguenza di tutto ciò, si svilupperà una diversa ricerca sul mercato del lavoro, focalizzata su abilità e competenze legate al problem solving ed al lavoro in team.

Agli sviluppi legati ai processi produttivi, seguono - però - anche problemi legati all'aspetto ambientale, che spingono verso la ricerca di metodi di produzione energetica alternativi, oltre all'impiego di materiali fortemente innovativi.

Uno dei pilastri fondamentali di questa Nuova Rivoluzione, è sicuramente l'Additive Manufacturing (AM), conosciuta più comunemente come Stampa 3D.

Alle origini, questa tecnica di produzione era fortemente utilizzata solamente in ambito di prototipazione rapida, consentendo alle imprese di produrre modelli da testare in un lasso temporale ridotto rispetto alle tecniche tradizionali, ma nel tempo ha suscitato un interesse crescente anche in altri campi dell'industria.

Nonostante i molteplici vantaggi, un problema da affrontare nella progettazione di strutture con questa tecnica è sicuramente il comportamento al buckling, nonché a carico di punta o compressione.

Alla luce di quanto detto finora, il lavoro svolto in questa tesi avrà come obiettivo la determinazione delle caratteristiche di resistenza al buckling di alcune strutture reticolari aventi delle caratteristiche geometriche differenti, ma realizzate con lo stesso materiale (Carbon PA) e con l'utilizzo della medesima macchina di stampa 3D (Roboze).

Per far questo, sono stati realizzati, testati e analizzati dei provini realizzati mediante tecnologia Fused Deposition Modeling (FDM) e, per poter andare a determinare queste caratteristiche, sono stati eseguiti dei test di compressione sui provini stessi e successivamente analizzati i dati che la macchina stessa ci fornisce.

CAPITOLO 1

LA STAMPA 3D

Introduciamo la tecnologia della stampa 3D, facendo particolare riferimento ai diversi metodi utilizzati, con un cenno finale ai vari materiali coinvolti.

1.1) LA TECNOLOGIA DELLA STAMPA 3D.

La stampa 3D, nota anche come Additive Manufacturing, è un processo di fabbricazione che consente di ottenere oggetti fisici partendo da un modello digitale. In termini tecnici, si tratta di un metodo di produzione che consente di ottenere un prodotto finito mediante la deposizione di strati di materiale fino ad ottenere la parte finita. È noto che, rispetto alle tecniche di produzione sottrattiva dove, a partire da materiale grezzo ed asportando materiale si otteneva il prodotto finito, la produzione additiva consente di avere meno scarto di materiale.

La stampa 3D nasce nel 1986 con la pubblicazione del brevetto di Chuck Hull che inventava la stereolitografia, una delle attuali tecniche di Additive Manufacturing. L'idea di Chuck Hull era quella di realizzare oggetti con strati di plastica, incisi da un blocco iniziale e fissati con le lampade a ultravioletti.

Dal 1986 ad oggi, le tecniche di stampa sono diventate di natura diversa con la possibilità di utilizzare una quantità sempre maggiore di materiali.

Tali tecnologie produttive sono state applicate con successo anche a numerosi settori industriali per la produzione di oggetti e attrezzature, come componenti per il settore automotive, strumentazione da laboratorio e molteplici altri campi applicativi.

L'Additive Manufacturing è destinata ad affiancare o addirittura sostituire le più comuni tecniche di fabbricazione industriale e se ne prevede un utilizzo sempre più esteso e conveniente, caratterizzato da tempi di processo sempre più corti.

La recente diffusione di questa tecnica produttiva è sicuramente legata anche ai suoi molteplici vantaggi come: elevata accuratezza dimensionale, rapidità di prototipazione, riduzione dei costi e degli scarti rispetto alle comuni lavorazioni sottrattive e forte attitudine di queste tecniche ad essere automatizzate (...)

Inoltre, essa permette di produrre componenti di dimensioni variabili, caratterizzati da elevata complessità geometrica.

L'adozione su larga scala può, però, portare all'ottenimento di inferiori proprietà meccaniche e ad un comportamento anisotropo del materiale, dovuto alla formazione di vuoti e alla struttura stratificata che andiamo ad ottenere, generando quindi delle direzioni preferenziali di resistenza del materiale.

Per quanto riguarda le varie tecniche di stampa 3D abbiamo una prima distinzione in tre macroaree, legate al tipo di materiale che viene utilizzato nella stampa:

- Polveri: tecniche basate sulla sinterizzazione o fusione delle polveri o sulla deposizione di un legante chimico su un letto di polvere omogeneo;
- Solidi: tecniche che prevedono l'incollaggio stratificato di fogli o l'estrusione di un materiale solido e semi-liquido;
- Liquidi: tecniche di fotopolimerizzazione tramite lampade UV o di stampaggio a getto.

L'impiego di una specifica tecnologia piuttosto che un'altra si basa sulla valutazione di alcuni parametri, quali: tipologia di materiale da stampare, resistenza meccanica del pezzo, finitura superficiale desiderata, velocità di produzione, investimento necessario e costo finale di realizzazione del progetto.

Per concludere, dunque, l'Additive Manufacturing rappresenta terreno fertile in molti campi applicativi e sempre più applicazioni richiedono l'utilizzo di questo tipo di stampa. Sono molti gli sviluppi futuri di queste tecniche, soprattutto per quanto riguarda l'utilizzo di materiali metallici.

1.2) TECNICHE DI STAMPA 3D.

Illustriamo ora le principali tecniche di stampa sperimentate nel tempo, con i relativi utilizzi, sulla base della classificazione in base ai processi di stampa dell'ASTM (American Society for Testing and Materials International).

Lo standard ISO / ASTM 52900 , creato nel 2015, mira a standardizzare tutti i termini e classificare ciascuno dei diversi tipi di stampante 3D. In totale, sono state identificate e stabilite sette diverse categorie di processi di produzione additiva.

VAT POLYMERIZATION

Questa tecnica si basa sulla polimerizzazione solida mediante l'utilizzo di un raggio laser che, colpendo in maniera selettiva, attiva la fotopolimerizzazione di una resina di un fotopolimero sensibile alla luce contenuta in una vasca. Al suo interno è presente una piattaforma orizzontale capace di salire o scendere che supporta la parte in costruzione e si abbassa di uno step una volta completata la solidificazione di ogni singolo strato. A svolgere il compito più importante è una sorgente luminosa, in grado di attivare il fotopolimero, direzionando il fascio lungo la traiettoria che percorre l'intera sezione dell'oggetto tramite uno specchio in rapido movimento.

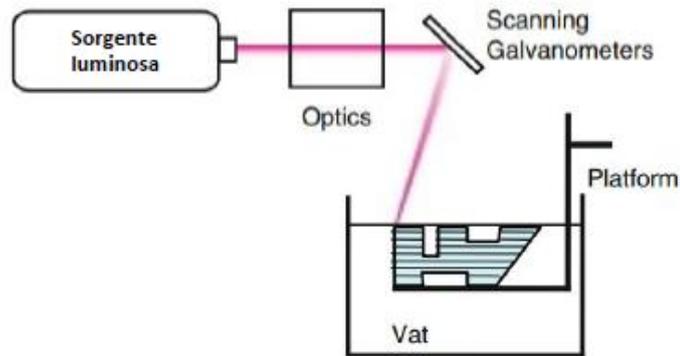


Figura 1.1 Schema rappresentativo del processo di Vat Polymerization.
 Fonte: A.Forcellese, Slides del Corso "Tecnologia Meccanica"

Gli oggetti ottenuti con questa tecnologia sono caratterizzati da una risoluzione elevata con strati da 0.01 a 0.15 mm e da una finitura superficiale molto buona.

Le due varianti di sorgente luminosa determinano le due principali tecnologie di questo tipo di stampa:

- Un laser puntiforme per la stereolitografia, che fotopolimerizza punto per punto la sezione.
- Un proiettore per la digital light processing, che attiva il fotopolimero su tutta la sua sezione in modo uniforme.

MATERIAL EXTRUSION

Il principio di funzionamento di questa tecnologia è l'estrusione: attraverso l'ugello di un estrusore, un materiale malleabile viene depositato su uno strato di materiale sottostante depositato in precedenza e già solidificato. La deposizione e l'indurimento progressivo degli strati consentono la fabbricazione dell'oggetto dal basso verso l'alto.

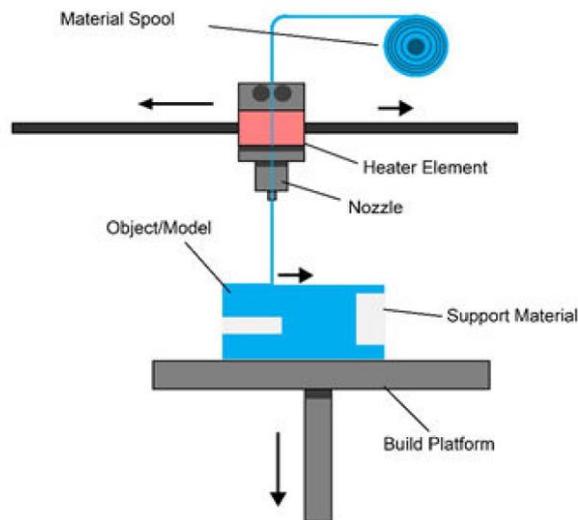


Figura 1.2 Schema rappresentativo del processo di Material Extrusion.
 Fonte: A.Forcellese, Slides del Corso "Tecnologia Meccanica"

Grazie all'elevatissima resistenza e alla grande stabilità termica di materiali speciali, come l'Ultem, è possibile costruire prodotti e attrezzature avanzate per il settore medico, automobilistico, aerospaziale e alimentare. Si ottengono discrete caratteristiche meccaniche e chimiche, con finitura superficiale apparentemente grezza in quanto gli strati di filamento risultano evidenti. Le proprietà meccaniche migliorano notevolmente se si utilizzano dei materiali compositi a matrice polimerica rinforzati con fibre.

La principale tecnica che sfrutta questa tecnologia è la Fused Deposition Modeling (FDM). Il requisito fondamentale che il materiale stampabile con questa tecnica deve possedere è sicuramente la termoplasticità, necessaria per l'estrusione e per far sì che gli strati aderiscano l'uno sull'altro.

MATERIAL JETTING

Tecnica che si basa su un principio di funzionamento molto simile a quello delle stampanti inkjet bidimensionali, basato principalmente su una testina di stampa, alimentata da una bobina che le fornisce materiale allo stato liquido. In particolare, si distinguono:

- la tecnologia Multi Jet Modeling, che utilizza cere e resine acriliche;
- la tecnologia Polyjet, che sfrutta un fotopolimero attivato da una fonte di luce UV.

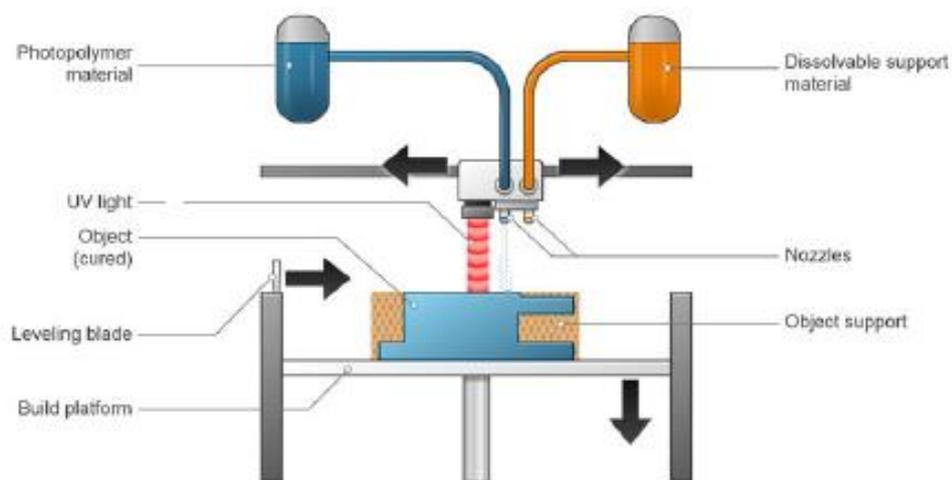


Figura 1.3 Schema rappresentativo del processo di Material Jetting.
Fonte: A.Forcellese, Slides del Corso "Tecnologia Meccanica"

Le parti ottenute con questo tipo di stampa sono caratterizzate da elevato livello estetico e, nel caso di specifici fotopolimeri e resine, possiedono anche delle proprietà meccaniche medio-alte.

BINDER JETTING

Tecnica che si caratterizza per la presenza di un legante chimico in grado di unire in maniera puntiforme e progressiva i singoli granelli di un letto omogeneo di polveri. La polvere non trattata dal legante rimane sospesa sullo strato sottostante e viene rimossa al termine del procedimento per essere poi riutilizzata nello stesso o in altri processi.

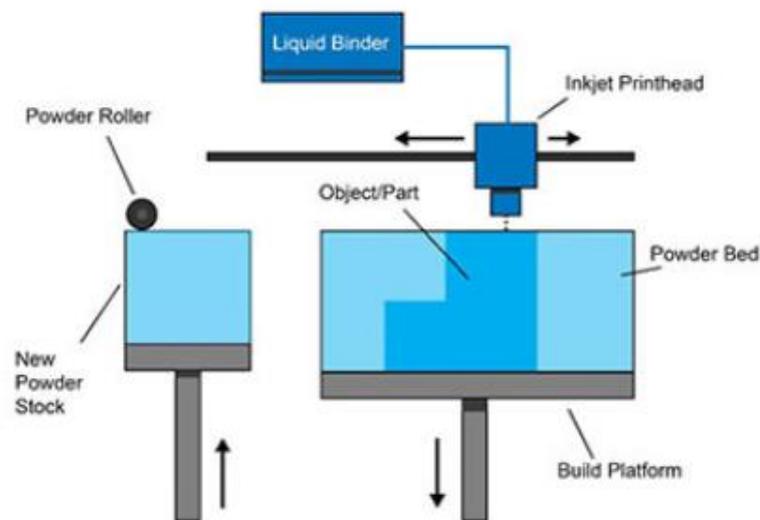


Figura 1.3 Schema rappresentativo del processo di Binder Jetting.
Fonte: A.Forcellese, Slides del Corso "Tecnologia Meccanica"

I materiali trattabili con questo procedimento sono polveri plastiche, compositi e polveri meccaniche. I pezzi realizzati sono generalmente molto porosi e piuttosto fragili, risultando molto più economici rispetto ad altre tecnologie e adatti per essere utilizzati come modelli estetici a scopo dimostrativo.

POWDER BED FUSION

Processo di fabbricazione additiva che sfrutta energia termica per fondere e solidificare, strato dopo strato, una regione di un letto di polvere posizionata su un piano mobile in direzione verticale. Una volta completato uno strato, la piattaforma mobile si muove verso il basso e un elemento mobile orizzontale deposita nuova polvere per lo strato successivo. Al termine della stampa la polvere non utilizzata viene recuperata e riutilizzata in seguito.

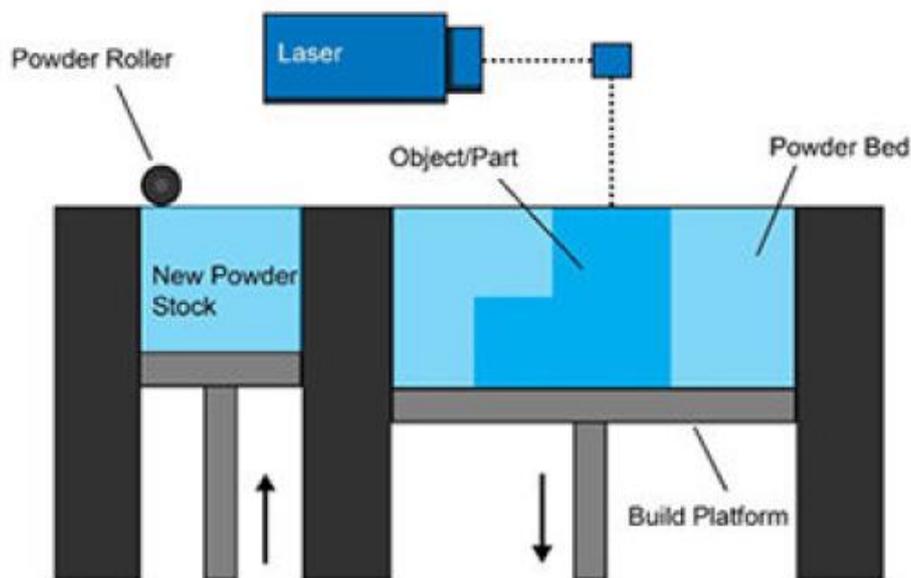


Figura 1.4 Schema rappresentativo del processo di Direct Energy Deposition.
Fonte: A.Forcellese, Slides del Corso "Tecnologia Meccanica"

Le tecnologie che sfruttano questo metodo di stampa sono:

- Selective Laser Sintering (SLS): un laser fisso direziona il fascio verso uno specchio mobile e colpisce la polvere che viene sinterizzata legandosi ai granelli circostanti con legami molecolari. Tecnica utilizzabile per diverse famiglie di materiali come polimeri, materiali compositi e ceramiche.

- Selective Laser Melting (LSM) o Direct Metal Laser Sintering: tecnica di stampa simile alla precedente solo che in singoli granelli vengono fusi in un pezzo monolitico; utilizzabile solo con materiale metallico.
- Electron Beam Melting (EBM): sfrutta un fascio di elettroni come fonte di energia termica che viene direzionato lungo la traiettoria impostata, facendolo passare tra due magneti rotanti ad anello. Tecnica utilizzabile solo con polveri metalliche pure.

DIRECT ENERGY DEPOSITION

Con questa tecnica di stampa, la polvere metallica, il gas di protezione e il laser vengono simultaneamente erogati attraverso l'ugello. La polvere viene poi trasportata attraverso l'ugello usando un gas inerte che permette al materiale di essere soffiato lungo la traiettoria del fascio laser in modo selettivo solo dove è necessario.

L'energia del laser fonde parzialmente le particelle di metallo, che si fondono completamente a contatto con il bagno di fusione creando così un legame metallico tra la polvere ed il substrato. Il processo prevede anche lo spostamento del substrato o del laser per permettere al bagno di fusione di solidificarsi e di produrre così una piccola zona rialzata di metallo solido. La principale tecnologia che sfrutta questo principio è la Laser Metal Deposition (LMD).

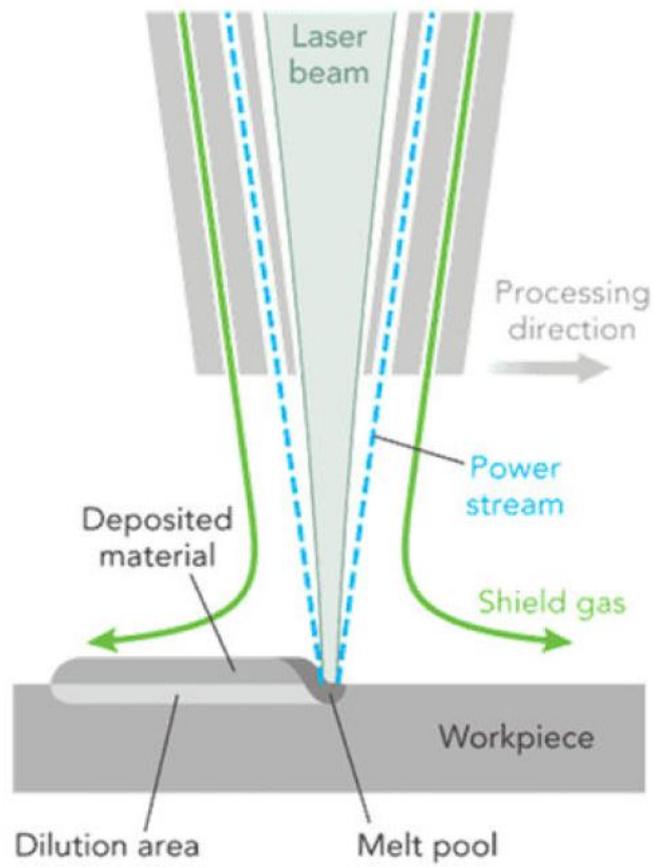


Figura 1.5 Schema rappresentativo del processo di Direct Energy Deposition.
 Fonte: A.Forcellese, Slides del Corso "Tecnologia Meccanica"

SHEET LAMINATION (LOM)

Tecnica relativamente moderna, in cui dei rulli di materiale vengono tagliati da un laser per formare l'oggetto livello dopo livello, permettendo di raggiungere spessori molto piccoli per singolo livello, aumentando dunque la risoluzione dell'oggetto finale.

Durante il processo, strati di laminati di carta, plastica o metallo adesivizzato sono fissati su n un piatto e fusi insieme mediante calore e pressione, per poi essere tagliati nella forma desiderata mediante l'ausilio di un laser o un coltello,

opportunamente controllati da un computer. Il processo viene ripetuto finché l'oggetto non è completo.

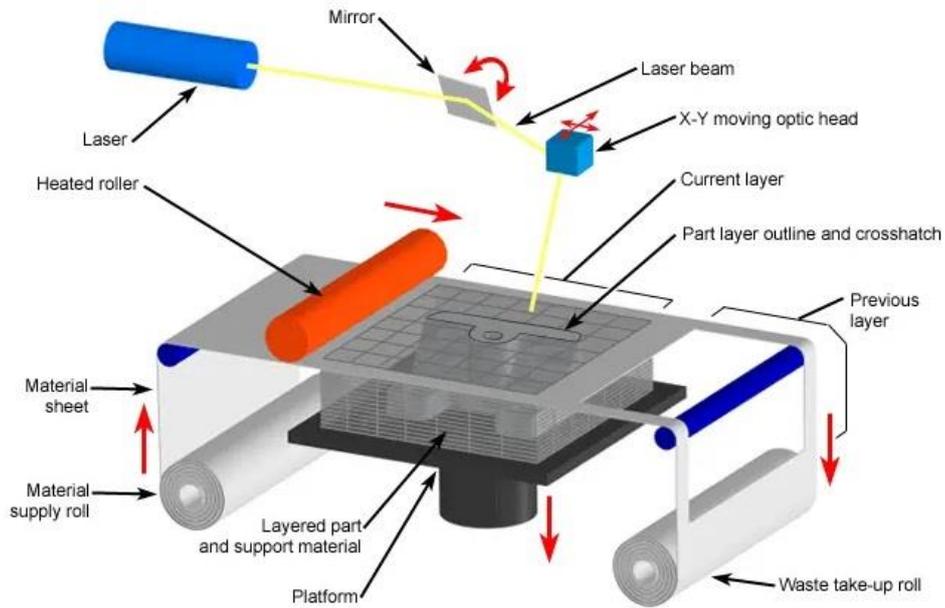


Figura 1.6 Schema rappresentativo del processo di Sheet Lamination.
Fonte: makermiky.com "Stampa 3D – Tecniche di Additive Manufacturing"

Sicuramente la LOM (Laminated Object Manufacturing) non è la tecnica di stampa più popolare, ma è una delle più convenienti e veloci, in quanto consente l'utilizzo di materie prime economiche e la realizzazione di pezzi di dimensioni anche relativamente grandi.

1.3) CENNI SUI MATERIALI

Le tecnologie di produzione additiva permettono l'utilizzo di varie tipologie di materiali; i produttori stanno sfruttando una quantità sempre maggiore di risorse per aumentare la ricerca di materiali aventi caratteristiche sempre migliori, spostandosi sempre più verso materiali più performanti.

Le due classi di maggiore interesse in ambito industriale, ed in particolare in campo meccanico, sono: materiali polimerici e materiali metallici. Dalla diversa combinazione di questi, stanno oggi nascendo numerosi materiali innovativi.

I **materiali polimerici** sono i più utilizzati in ambito di Additive Manufacturing e rappresentano il giusto compromesso sia in termini di costo che in termini di facilità di stampa, dato il basso punto di fusione caratteristico.

Dal punto di vista delle caratteristiche meccaniche, il miglior materiale è il nylon che – però - presenta l'inconveniente di saldarsi su sé stesso impedendo l'identificazione degli strati della produzione additiva.

Caratteristiche meccaniche importanti in termini di durezza e resistenza all'urto si possono trovare anche nell' ABS (Acrilnitrile Butadiene Stirene), adatto ad applicazioni con sforzi rilevanti.

Tra i materiali polimerici troviamo anche i materiali plastici. Di notevole importanza, sotto questo punto di vista, è l'HDPE (High Density Polyethylene, o Polietilene ad Alta Densità), che presenta delle caratteristiche importanti di resistenza all'azione di agenti chimici.

La seconda classe di materiali è rappresentata dai **materiali metallici**, i quali sono caratterizzati da prestazioni notevolmente superiori rispetto ai materiali polimerici, soprattutto in termini di caratteristiche meccaniche.

Il loro utilizzo è fortemente ostacolato da difficoltà di stampa dovute all'elevato punto di fusione a cui devono arrivare i materiali per poter essere stampati, il che determina la necessità di ricorrere a macchine di stampa più costose e complesse. Non mancano, tuttavia, le applicazioni in cui vengono preferiti rispetto ai precedenti.

I campi biomedico, automotive ed aeronautico sono i principali richiedenti di elementi stampanti con materiali metallici. Tra quest'ultimi possiamo trovare sia materiali classici, come l'acciaio o l'alluminio, ma anche materiali con caratteristiche molto più rilevanti, come titanio, nichel o cobalto-cromo. In base alle caratteristiche dello stampato si preferirà un materiale piuttosto che un altro.

Concludendo, per citare solamente uno dei materiali innovativi che si sta oggi diffondendo in molte realtà, il CarbonPa non è altro che un materiale composito in cui le fibre corte di carbonio sono incorporate in una matrice poliammide creando uno dei materiali con le migliori performance nel settore. Così strutturato, esso presenta un'elevata resistenza meccanica ed ottima resistenza chimica, che gli permette di trovare applicazione in una quantità di campi sempre crescente.

CAPITOLO 2

L'INSTABILITÀ A COMPRESSIONE

L'instabilità a compressione, nota anche come buckling, è una particolare modalità di collasso che può riguardare una struttura. In questo capitolo andremo ad analizzare nel dettaglio il fenomeno, con l'introduzione della principale teoria di risoluzione.

2.1) IL FENOMENO DELL'INSTABILITÀ

Con il termine **instabilità o buckling** si intende il fenomeno per cui, sollecitando a compressione un elemento strutturale, si può verificare inflessione dello stesso sino a raggiungere il punto di rottura caratteristico di quel materiale. Ciò può svilupparsi in due modi differenti: se riguarda l'intera struttura, si parlerà di **instabilità globale**; se interessa solo una parte limitata e localizzata della struttura, si parlerà di **instabilità locale**. A sviluppi differenti corrispondono, ovviamente, rotture differenti.

L'esempio più comune, utilizzato nello studio di tale fenomeno, è sicuramente un'asta sottoposta ad un carico di compressione verticale. La Figura 2.1 illustra graficamente il classico comportamento di un'asta verticale sottoposta a compressione, riportando in ascisse la freccia in mezzzeria e in ordinata il carico applicato in direzione verticale all'asta stessa.

Dal grafico si evince un elemento particolare per lo studio del fenomeno dell'instabilità, il c.d. "punto di biforcazione", ossia quel punto in corrispondenza del carico critico. Se il carico applicato è inferiore a quello critico, l'asta rimane dritta, la freccia è nulla e si è in presenza di una configurazione di equilibrio stabile; se il

carico è superiore a quello critico, l'asta rimane dritta e una qualsiasi perturbazione causa instabilità portando l'asta verso una configurazione inflessa.

Quanto appena detto è una situazione puramente teorica in quanto, nella realtà oggettiva, compare istantaneamente solo la flessione, mentre il buckling si sviluppa in maniera graduale.

L'eventuale presenza di difetti all'interno della struttura stessa rappresenta un'aggravante che potrebbe portare allo sviluppo di fenomeni di rottura per compressione.

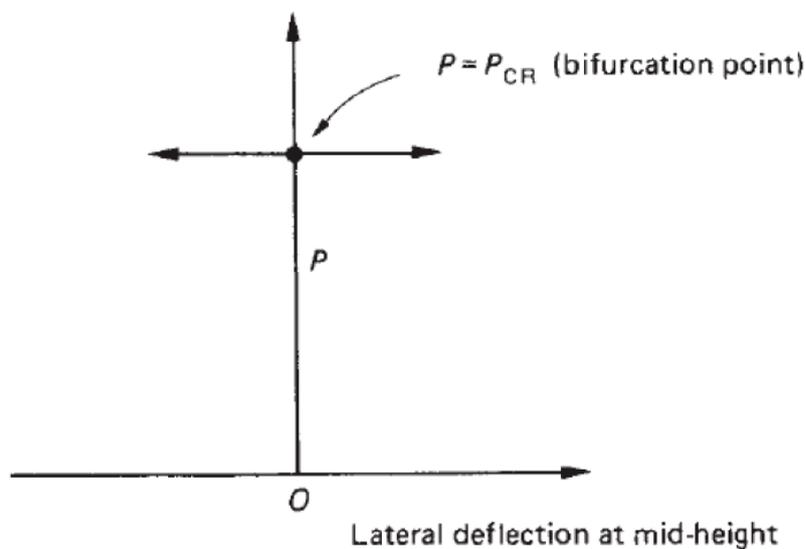


Figura 3.1 Grafico carico-deflessione per una trave compressa.

Fonte: J. A. Collins, *Failure of materials in mechanical design*.

2.2) IL PROBLEMA DI EULERO

Il più semplice e comune fenomeno di instabilità elastica è rappresentato dal **modello di Eulero**, basato su una trave rettilinea incernierata sottoposta ad un carico di compressione.

Consideriamo una trave di lunghezza L , con una sezione $S = b_2 * b_1$, appoggiata agli estremi, rettilinea e soggetta a carico di compressione.

Per poter andare a determinare la condizione critica, ovvero la comparsa di una configurazione deformata diversa da quella che prevede spostamenti esclusivamente assiali, andiamo a perturbare il sistema applicando una forza F , che causa uno spostamento trasversale $\eta(x)$.

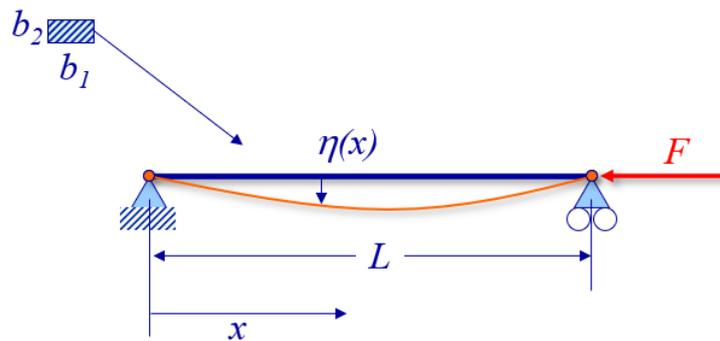


Figura 2.2 rappresentazione trave sottoposta a compressione per lo studio del modello di Eulero

Fonte: Shigley's Progetto e costruzione di macchine Richard G. Budynas, J. Keith Nisbet Editore: McGraw Hill

Se definiamo le caratteristiche di sollecitazione nella generica sezione individuata da x , riferendoci alla configurazione deformata, possiamo notare che, oltre allo sforzo normale di compressione, compare anche un momento flettente il cui modulo vale $Mx = F * \eta(x)$

Ricordando l'equazione della linea elastica flessionale, si potrà scrivere:

$$\frac{d^2\eta}{dx^2} = -\frac{M(x)}{EJ} = -\frac{F}{EJ} \eta$$

Si ottiene:

$$\frac{d^2\eta}{dx^2} + \frac{F}{EJ} \eta = 0$$

Da cui deriva la soluzione generale dell'equazione differenziale:

$$\eta(x) = C1 * \sin \sqrt{\frac{F}{EJ}} x + C2 * \cos \sqrt{\frac{F}{EJ}} x$$

Dove:

F è il carico di compressione applicato alla trave;

E indica il modulo di Young caratteristico del materiale;

J rappresenta il momento d'inerzia della sezione della trave.

Le condizioni al contorno che occorre imporre, per poter risolvere le due soluzioni, sono quelle imposte dai due vincoli. Risulta evidente che sia cerniera che carrello non consentono di avere degli spostamenti in direzione perpendicolare all'asta stessa. Si avrà quindi:

$$x = 0 \rightarrow \eta(0) = 0 \text{ (cerniera)}$$

$$x = L \rightarrow \eta(L) = 0 \text{ (carrello)}$$

Imponendo le condizioni al contorno e utilizzandole per risolvere il sistema, si ottengono le seguenti soluzioni:

$$\eta(0) = C2 = 0$$

$$\eta(L) = C1 * \sin \sqrt{\frac{P}{EJ}} L = 0$$

La seconda condizione al contorno risulta essere verificata solo per $C1 = 0$ e $\sin \sqrt{\frac{P}{EJ}} L = 0$.

La prima soluzione è quella banale in quanto l'asta non subirà alcuno spostamento. La seconda, invece, è verificata per qualsiasi valore di C_1 e corrisponderà quindi ad una situazione di equilibrio indifferente $\sin \sqrt{\frac{P}{EJ}}L = 0$ da cui otteniamo che

$$\sqrt{\frac{P}{EJ}}L = k\pi \text{ con } k=1, 2, (\dots)$$

In particolare, ci interessa determinare il primo carico critico, quello più basso, che si otterrà per un valore di k pari a 1, ottenendo così $\frac{P_C}{EJ} = \frac{\pi^2}{L^2}$

Volendo ricavare il valore di P_C , si ottiene:

$$P_C = \frac{\pi^2 * E * J}{L^2}$$

P_C , definito **carico critico di Eulero**, corrisponde al carico in corrispondenza del quale si ha l'insorgere della condizione di instabilità elastica per un'asta sottoposta a carico di punta.

L'espressione fa riferimento ad una trave appoggiata-appoggiata, quindi isostatica. In corrispondenza di tale carico, la configurazione deformata sarà descritta da una sinusoide di ampiezza indeterminata C_1 : $\eta(x) = C_1 * \sin \sqrt{\frac{P}{EJ}}x$

Cambiando i vincoli, la formula necessaria per il calcolo del carico critico rimane sostanzialmente identica, ma con l'aggiunta di un opportuno coefficiente.

In altre parole, si preferisce utilizzare sempre la formula precedente, considerando la lunghezza di inflessione " L_f ", che si ottiene moltiplicando la lunghezza fisica L_e dell'asta per un opportuno coefficiente " β " legato al tipo di vincolo che compare.

Vincoli	L_e/L	Condizioni al contorno
cerniera-carrello	1	$v = 0$ per $z = 0, L$
incastro-incastro	0.5	$v = 0$ per $z = 0, L$; $dv/dz = 0$ per $z = 0, L$
incastro-carrello	0.7	$v = 0$ per $z = 0, L$; $dv/dz = 0$ per $z = 0$
incastro-estremo libero	2	$v = 0$ e $dv/dz = 0$ per $z = 0$

Figura 2.3 Condizioni al contorno e lunghezza di inflessione per alcune tipologie di vincoli

Fonte: Shigley's Progetto e costruzione di macchine Richard G. Budynas, J. Keith Nisbet Editore: McGraw Hill

Sulla base del carico critico di Eulero, si osserva che le condizioni di instabilità dipendono dal rapporto geometrico tra momento d'inerzia e lunghezza libera di inflessione:

$$P_C = \frac{\pi^2 * E * J}{L_f^2}$$

Esprimendo il momento d'inerzia attraverso il raggio d'inerzia (ρ) $J = A * \rho^2$, si ha:

$$P_C = \pi^2 * E * A * \left(\frac{\rho}{L_f}\right)^2$$

Introducendo il concetto di snellezza della trave, $\lambda = \frac{L_f}{\rho}$, si ottiene, per il carico critico, la seguente espressione:

$$P_C = \frac{\pi^2 * E * A}{\lambda^2}$$

Il fenomeno dell'instabilità elastica è inversamente proporzionale al quadrato della snellezza della trave stessa.

Partendo dall'espressione del carico critico di Eulero, è possibile determinare anche la tensione critica di Eulero:

$$\sigma_C = \frac{P_C}{A} = \frac{\pi^2 * E}{\lambda^2}$$

Graficando la tensione critica in funzione della snellezza, si ottiene un andamento di tipo parabolico che, però, nella pratica deve essere corretto per tenere conto di errori geometrici, eccentricità del carico, (...)

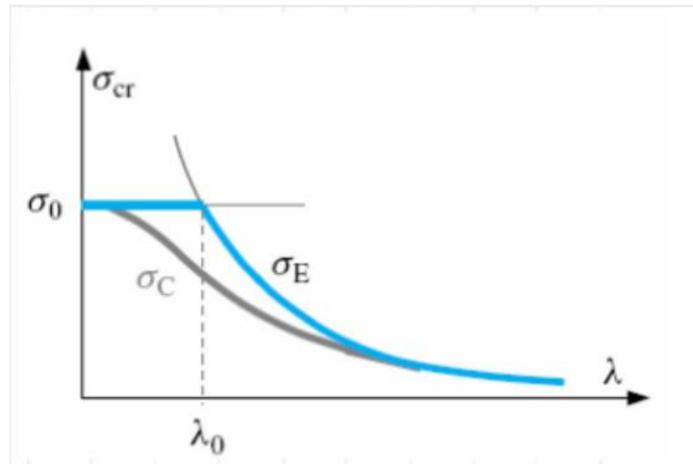


Figura 2.5 Grafico che mostra l'andamento della tensione critica in funzione della snellezza della trave.

Fonte: Shigley's Progetto e costruzione di macchine Richard G. Budynas, J. Keith Nisbet Editore: McGraw Hill

Il massimo carico che può sopportare un'asta rettilinea è limitato, nella stragrande maggioranza dei casi, dal carico di instabilità elastica piuttosto che dalla resistenza del materiale. Il grosso limite della formulazione di Eulero è che sovrastima il carico critico reale. Nelle applicazioni reali occorre quindi correggere al ribasso il massimo carico di compressione che interessa un'asta compressa.

La rottura per instabilità elastica è molto pericolosa perché avviene senza alcun segnale premonitore e si traduce nella totale perdita di rigidità dell'elemento strutturale.

CAPITOLO 3

MATERIALI E PROCEDURE SPERIMENTALI

In questo capitolo si descriverà la procedura seguita per ottenere i provini da sottoporre successivamente a prova di compressione. Viene illustrata la geometria dei provini, con le dimensioni caratteristiche da tenere in considerazione per poter determinare come le caratteristiche si modificano al variare delle dimensioni geometriche.

3.1) IL CARBON-PA

Il materiale utilizzato per ottenere i provini, sottoposti successivamente a prova di compressione, è il “**Carbon-PA**”.

È un materiale composito termoplastico in cui le fibre corte di carbonio, presente al 20%, sono incorporate in una matrice di poliammide, in particolare Nylon 6, creando un buon materiale nel campo della Stampa 3D. Nella stampante utilizzata, viene adoperata la **matrice PA 6.10** perché garantisce minore igroscopicità e una maggiore stabilità delle caratteristiche meccaniche nel tempo.

Il rinforzo della plastica semi-cristallina PA 6.10, con il rinforzo delle fibre corte di carbonio, si traduce in un materiale molto più resistente alla normale poliammide.

Per quanto riguarda le caratteristiche principali, tale materiale possiede elevata resistenza meccanica ed elevata resistenza agli agenti chimici.

La Carbon-PA è uno dei materiali polimerici di Stampa 3D a più alte performance meccaniche dell'intero settore. Questa caratteristica è legata anche alla sua elevata resistenza a trazione che, in direzione XY raggiunge un valore di 136 Mpa, mentre in direzione XZ un valore di 138 MPa.

Grazie a questa proprietà, può essere paragonabile all'alluminio e un ottimo candidato per la sostituzione del metallo in applicazione con carichi anche abbastanza rilevanti.

Inoltre, la matrice Carbon-PA è caratterizzata da un'elevata resistenza chimica agli idrocarburi aromatici, grassi, oli ed idrocarburi idrogenati, oltre ad un'elevata resistenza alla temperatura essendo caratterizzato da un HDT (High Deflection Temperature) pari a 180 °C.

Queste eccezionali proprietà sono state raggiunte grazie ad un'accurata progettazione del materiale a partire dalla scelta della matrice poliammidica, fino allo studio della lunghezza e della natura della fibra corta.

La combinazione delle caratteristiche possedute conferisce al materiale le giuste proprietà per essere ampiamente utilizzato nell'industria manifatturiera e nel motorsport.

È proprio quest'ultimo settore dove il materiale trova la sua maggiore espressione: pesi ridotti, consumi ed emissioni abbattuti per un'efficienza del veicolo sempre maggiore grazie alla produzione di molteplici componenti sotto cofano, collettori di aspirazione d'aria, componenti strutturali e organi di trasmissione.

	PROPRIETÀ MECCANICHE	Metodo di Prova	Inglese		SI	
			XZ	XY	XZ	XY
Trazione	Resistenza a trazione (a rottura)	ASTM D638	20015 psi	19725 psi	138 MPa	136 MPa
	Modulo	ASTM D638	2132 ksi	2248 ksi	14.7 GPa	15.5 GPa
	Allungamento a rottura	ASTM D638	1.71%	1.62%	1.71%	1.62%
Flessione	Resistenza	ASTM D790	-	14503 psi	-	100 MPa
	Modulo	ASTM D790	-	725 ksi	-	5 GPa

PROPRIETÀ TERMICHE	Metodo di Prova	Inglese	SI
HDT	ASTM D648	392 °F (@ 263 psi)	180 °C (@ 1.82 MPa)
Temperatura di uso continuo	ASTM D 3045	302 °F	150 °C

PROPRIETÀ FISICHE	Metodo di Prova	Inglese	SI
Densità	ASTM D792	0.050 lb/in ³	1.4 g/cm ³
Assorbimento Acqua	ASTM D570	9%	
Assorbimento Umidità	ASTM D570	2.8%	

Tabella 3.1 Principali proprietà meccaniche, termiche e fisiche del CarbonPa.

Fonte: <https://www.elmec.com/3d/risorse/documenti/materiali/TDS-CarbonPA.pdf>

3.2) LA STAMPANTE: ROBOZE ONE +400

È una stampante del marchio **ROBOZE** ed è la più versatile per tecno-polimeri ad alte temperature.

Roboze ONE +400 dispone di un sistema di movimentazione meccatronica senza cinghie brevettato, il **Patented Beltless System**, che garantisce altissima precisione rispetto ai sistemi di movimentazione degli assi basati su un movimento indiretto delle cinghie di trascinamento.

Tale sistema consente di migliorare la produzione in termini di ripetibilità e resistenza oltre al fatto che permette di ottenere manufatti di altissima precisione nei dettagli.

La tecnologia di produzione è di tipo additiva, in particolare FFF (Fused Filament Fabrication) che lavora depositando materiale termoplastico layer dopo layer, ottenendo il pezzo finito per sovrapposizione di strati.

La stampante è dotata di un estrusore, completamente ingegnerizzato, che può superare i 500 °C permettendo la stampa di materiali avanzati, come PEEK e ULTEM™ AM9085F, oltre alla matrice Carbon-PA da noi utilizzata.

È una stampante in grado di gestire nove materiali termoplastici avanzati differenti.

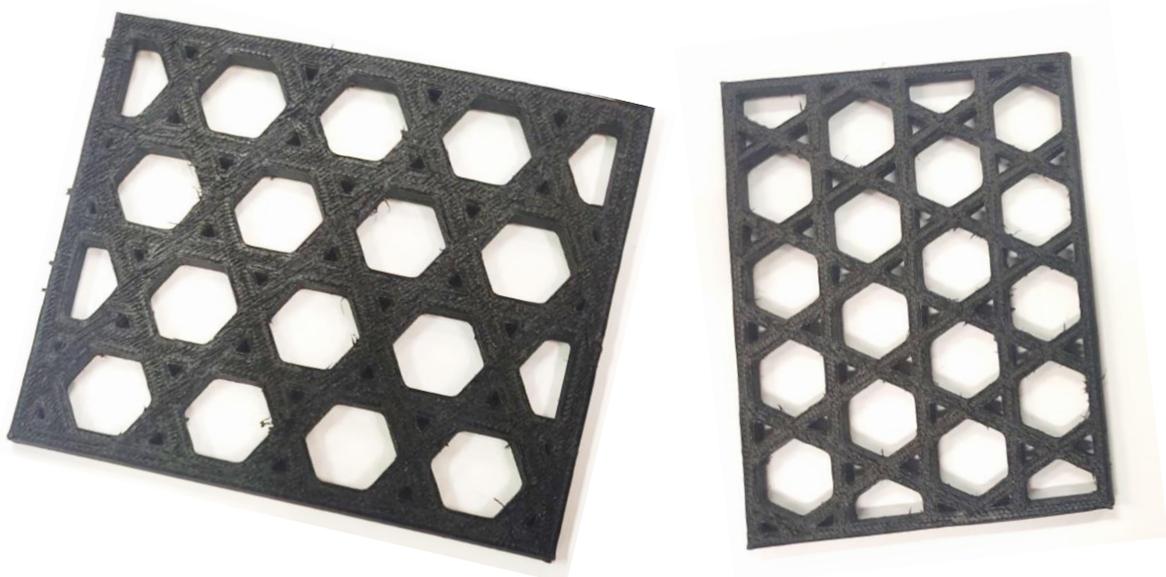
Si adatta a molteplici settori, come quello automobilistico, aerospaziale e petrolifero perché capace di lavorare sfruttando hardware e materiali di altissima qualità e ad altissime temperature.

Viene utilizzata principalmente per la realizzazione di prototipi funzionali e produzione di piccole serie.

3.3) GEOMETRIA PER PROVA DI COMPRESSIONE

Le prove di compressione sono state eseguite con lo scopo di indagare l'insorgere del fenomeno di buckling nei provini sottoposti ad esame e valutare le proprietà caratteristiche variando le dimensioni del provino stesso.

Per l'esecuzione delle prove di compressione sono stati realizzati, mediante stampa 3D, dei provini caratteristici di una struttura reticolare, in particolare una struttura anisogrid.



*Figura 3.1 Struttura dei provini analizzati.
Fonte: Elaborazione propria*

Il materiale utilizzato per la realizzazione dei provini è un materiale composito, in particolare il CarbonPa, nonché un materiale termoplastico poliammide costituito da una matrice polimerica rinforzata con delle fibre corte di carbonio. Provini realizzati con questa tecnica risultano essere caratterizzati da un elevato rapporto resistenza-peso, date quindi le elevate caratteristiche di resistenza meccanica e il basso peso caratteristico del materiale.

I provini testati, quindi, sono elementi di struttura reticolare a sezione rettangolare, aventi diverse dimensioni geometriche: diversa altezza, diversa larghezza, diverso spessore e diverso spessore delle costole. I due elementi che, però, sono stati tenuti maggiormente in considerazione sono lo spessore della piastra stessa e lo spessore delle costole.

È proprio su tali variazioni che si baserà il successivo studio delle caratteristiche, andando ad esaminare le curve di forza-spostamento ottenute dalla macchina.

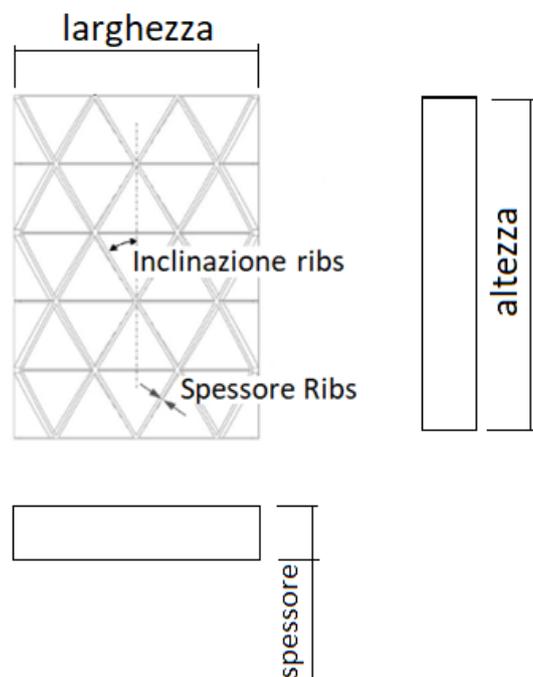


Figura 3.2 Geometria del provino per la prova di compressione.

Fonte: Elaborazione propria.

Un parametro che verrà determinato è il rapporto tra la Forza massima e il peso del provino (Forza specifica), un parametro di valutazione della resistenza nel caso di strutture anisogrid.

Le dimensioni caratteristiche dei provini testati sono riportati in Tabella 3.2:

Provino	Larghezza (mm)	Altezza (mm)	Spessore (mm)	Spessore Costole (mm)	Peso (kg)
4,30x3	75,00	99,60	4,30	3,00	0,0137
4,30x5	89,00	106,60	4,30	5,00	0,0234
8x3	75,00	100,00	8,00	3,00	0,0306
8x5	89,00	107,00	8,00	5,00	0,0481
10x3	75,00	100,00	10,00	3,00	0,0394
10x5	89,00	107,00	10,00	5,00	0,0585
15x3	75,00	100,00	15,00	3,00	0,0566
15x5	89,00	107,00	15,00	5,00	0,0880

Tabella 3.2 Tabella riportante le dimensioni caratteristiche dei provini testati.

Fonte: Elaborazione propria.

CAPITOLO 4

PROVA DI COMPRESSIONE

Questo capitolo riguarda esclusivamente lo svolgimento delle prove di compressione sui provini. Sono descritte le fasi di preparazione e di esecuzione delle varie prove che porteranno all'ottenimento delle curve forza-spostamento necessarie per determinare il comportamento del materiale a compressione.

4.1) PREPARAZIONE DELLA PROVA

La macchina di prova, la “**macchina di prova universale MTS 810**”, di tipo servoidraulico, comprende la struttura di supporto sulla quale è montata la cella di carico insieme ai dispositivi per l'applicazione del carico e l'afferraggio del provino. La cella di carico è collegata ad un controller che, a sua volta, è collegato ad un computer sul quale viene mostrato in tempo reale l'andamento delle deformazioni subite dal provino in funzione del carico applicato.

Mediante quest'ultimo è inoltre possibile gestire i parametri di prova, gestirne lo svolgimento e memorizzare i dati in uscita dalla macchina come carichi e spostamenti.

Per la prova di compressione, il provino viene posizionato tra due piastre di supporto e il carico viene applicato tramite il movimento della piastra inferiore. Il provino deve essere necessariamente posizionato con il suo asse verticale allineato con l'asse di applicazione del carico e con le basi parallele alle superfici delle piastre appartenenti alla macchina (Figura 4.1)

Poiché le prove di buckling sono molto influenzate dalle condizioni alle quali vengono svolte, sarà necessario prestare molta attenzione nella fase di

posizionamento in modo da minimizzare disallineamenti che possano portare a errori in fase di esecuzione delle prove.

L'operazione successiva sarà l'impostazione della modalità di applicazione del carico, che può essere eseguita sia in termini di forza che in termini di spostamento. La normativa richiede infatti di dover effettuare la prova in controllo di spostamento con una velocità di 0.03 mm/s che può eventualmente essere incrementata dopo lo spostamento. Nel nostro caso, per semplicità, verrà mantenuta costante.

Terminate tutte le operazioni preliminari e dopo aver effettuato l'azzeramento della macchina, si può procedere all'esecuzione della prova mediante applicazione del carico di compressione.



Figura 4.1 Provino posizionato sulla macchina prima dell'applicazione del carico.

Fonte: Elaborazione propria



Figura 4.2 Provino giunto a rottura dopo l'applicazione del carico.

Fonte: Elaborazione propria

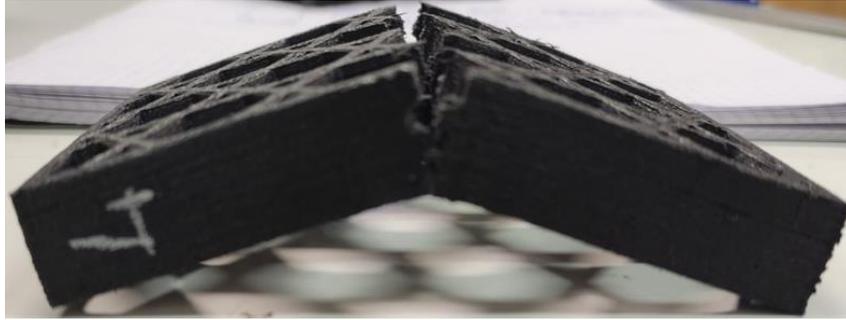


Figura 4.3 Rottura di un provino a seguito della sollecitazione di compressione.

Fonte: Elaborazione propria

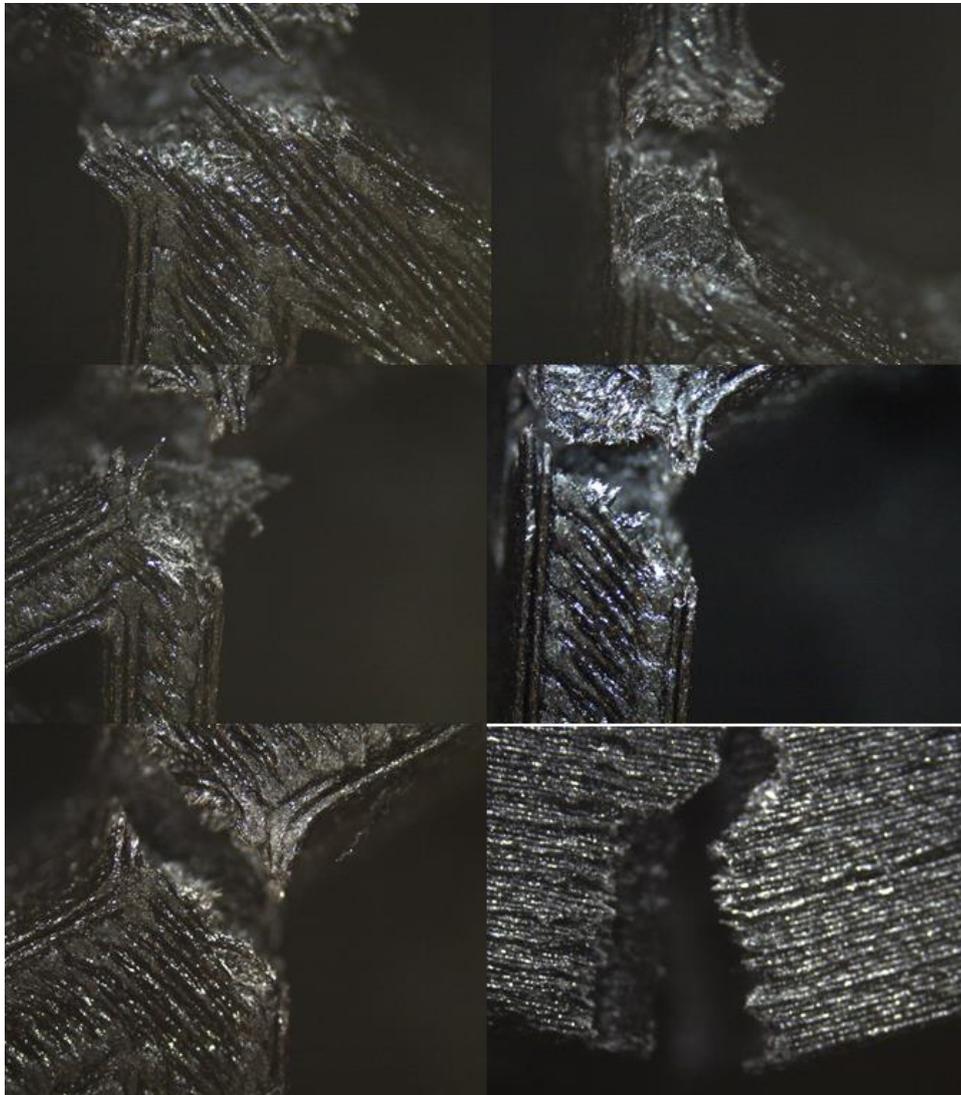


Figura 4.4 Punto di rottura del materiale visto al microscopio con ingrandimento 8X.

Fonte: Elaborazione propria

Nella Figura 4.4 vengono mostrate alcune immagini nelle quali si nota il punto di rottura di alcune strutture sottoposte a compressione.

Nel dettaglio, nelle prime cinque immagini si nota la rottura vista dall'alto mentre nell'ultima si osserva la frattura in vista laterale.

4.2) COMPORTAMENTO A COMPRESSIONE

Sia L la lunghezza del provino e D la sua larghezza, i possibili modi di deformazioni, dovuti a sollecitazione di compressione, sono:

- Buckling, tipica configurazione inflessa per instabilità che solitamente avviene quando $L/D > 5$;
- Deformazione a taglio, che può verificarsi quando $L/D = 5$;
- Barreling, deformazione per rigonfiamento dovuta all'attrito tra le facce del provino e i supporti della macchina; potrebbe verificarsi quando $L/D < 2$;
- Double barreling, barreling che, per motivi di attrito con i supporti, porta alla formazione di un doppio rigonfiamento se $L/D > 2$;
- Compressione omogenea, se $1.5 < L/D < 2$;
- Deformazione irregolare, dovuta ad una notevole instabilità elastica che porta ad una notevole espansione localizzata.

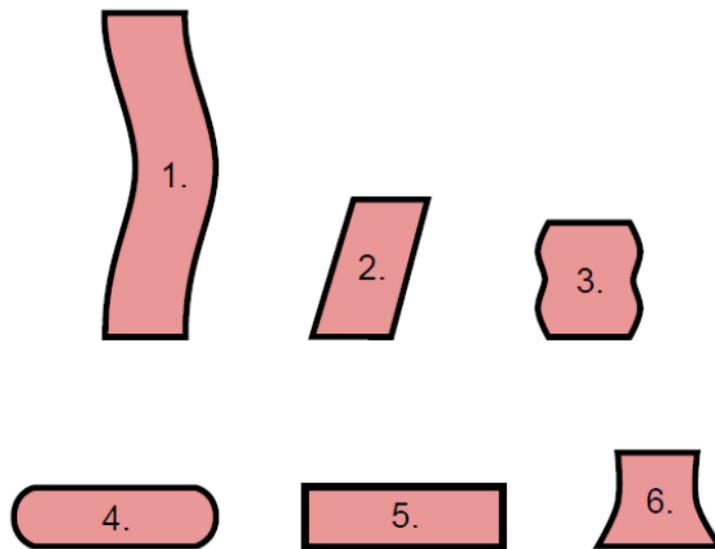


Figura 4.5 Modi di deformazione a compressione:

1-buckling; 2-taglio; 3-double barreling; 4-barreling; 5-compressione omogenea; 6-deformazione irregolare

Fonte: Shigley's Progetto e costruzione di macchine Richard G. Budynas, J. Keith Nisbet Editore: McGraw Hill

Le figure che seguono riportano i grafici caratteristici dell'andamento dello spostamento, relativo alle piastre, in funzione della forza applicata. In questa trattazione non si può parlare di sforzo o di deformazione in quanto siamo in corrispondenza di un provino caratterizzato da una sezione non piena. Non avrebbe, quindi, senso andare a calcolare lo sforzo come rapporto tra la forza e l'area del provino essendo quest'ultima non piena.

Sia il valore della forza che quello dello spostamento vengono campionati direttamente dalla macchina durante la prova con una frequenza costante.

Tutti i provini presentano più o meno marcatamente una prima zona iniziale lineare fino ad un punto di flesso. Da un punto di vista fisico questa zona è priva di significato in quanto si verificano dei riallineamenti iniziali del provino. Segue poi la classica zona elastica lineare. È questa la zona in cui il materiale ha un comportamento elastico, in quanto le deformazioni sono reversibili. Allo scarico, il provino tornerà nella sua configurazione iniziale.

Tale zona è seguita da un breve tratto non lineare fino ad un punto di tangente orizzontale. Segue poi un andamento variabile a seconda che il fenomeno di buckling si sia verificato oppure no.

Nel caso di buckling per provini più lunghi si ha una diminuzione della forza applicata fino al punto di rottura; all'avvicinarsi di tale punto iniziano a formarsi delle fessure dalla parte delle fibre tese finché non si verifica l'improvvisa rottura per scorrimento a taglio. Tale rottura si può ben osservare nella Figura 4.2 e nella Figura 4.3.

Potrebbe capitare, però, che a causa delle caratteristiche geometriche del provino può non verificarsi la rottura. In una situazione di questo tipo si verifica il fenomeno del buckling nonché l'incurvatura della struttura.

Si raccolgono i dati ottenuti in gruppi, sulla base delle caratteristiche geometriche dei provini, facendo riferimento allo spessore del provino stesso e allo spessore caratteristico delle costole.

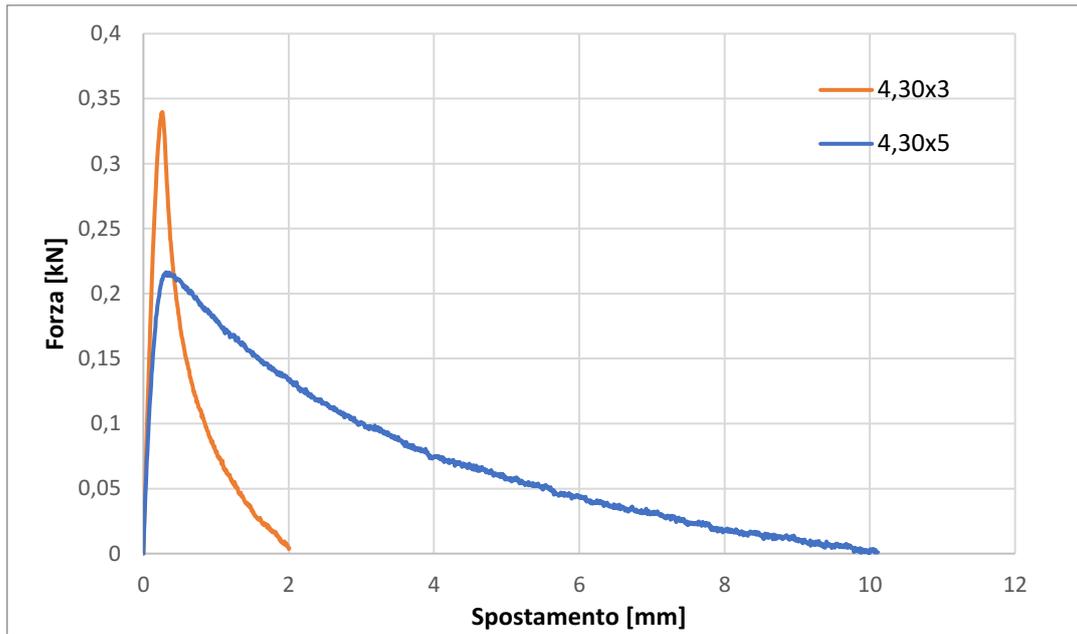


Grafico 4.1 Confronto di anisogrid con spessore di 4,30 mm e spessore costola rispettivamente di 3 mm e 5 mm.
Fonte: Elaborazione propria.

Dal Grafico 4.1 si nota che la struttura anisogrid 4,30x3 permette di raggiungere i valori più alti in termini di forza sopportata; a parità di forza applicata sui due provini, presenta degli spostamenti inferiori.

Relazionando poi questo risultato con i successivi, si andrà a notare come questa situazione presenta delle anomalie rispetto alla maggioranza dei casi analizzati.

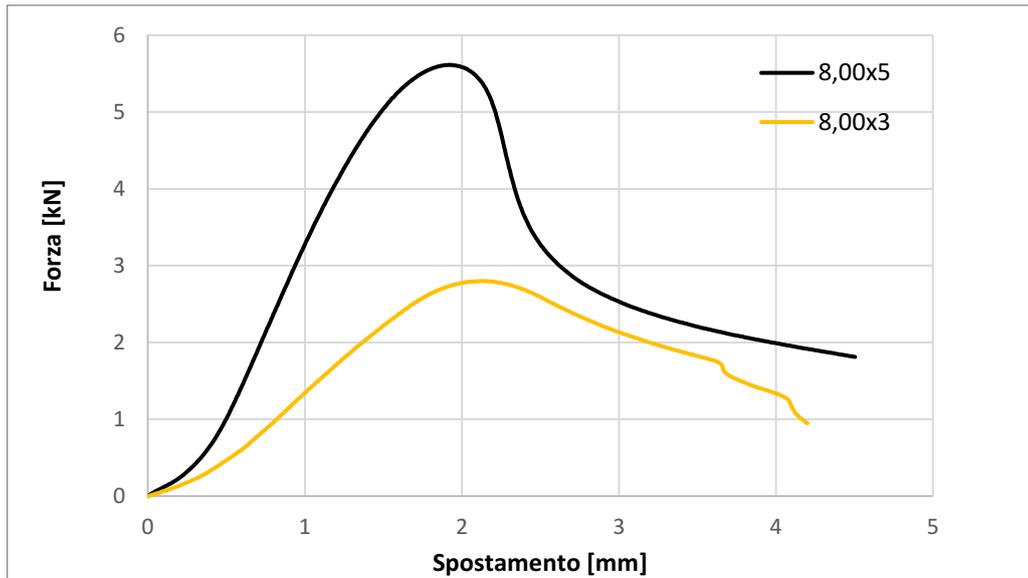


Grafico 4.2 Confronto anisogrid con spessore di 8,00 mm e spessore costola rispettivamente di 3mm e 5mm
 Fonte: Elaborazione propria

Analizzando il Grafico 4.2 si può dire che la struttura che possiede le caratteristiche migliori è l'anisogrid 8x5 poiché permette di raggiungere valori di forza applicata notevolmente maggiori rispetto la struttura 8x3.

In questo caso è necessario fare una precisazione per quanto riguarda il provino 8x3. I valori ottenuti potrebbero non essere corretti in quanto quest'ultimo presentava un'alterazione legata alla stampa che potrebbe aver influito sul comportamento del materiale al buckling.

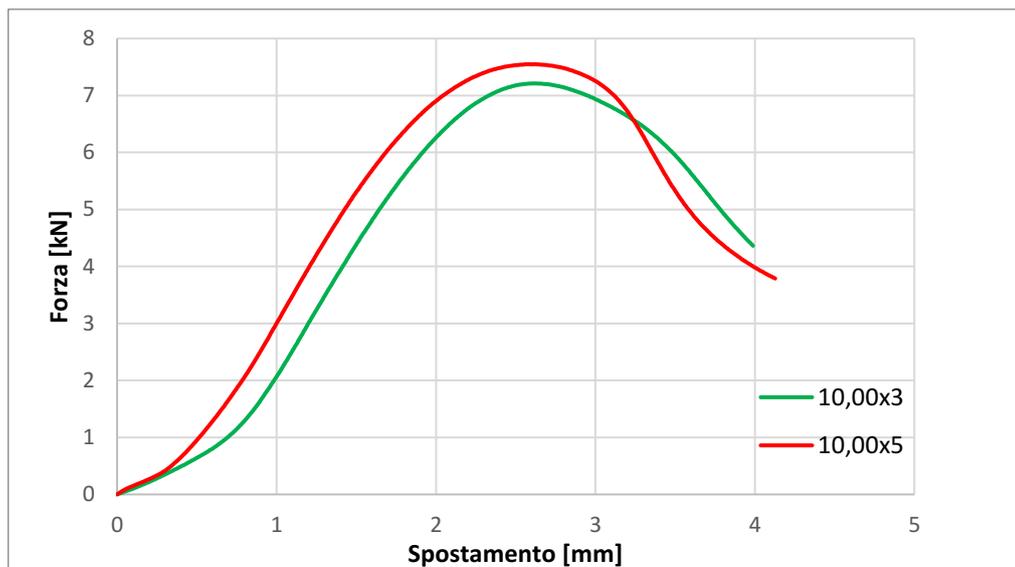


Grafico 4.3 Confronto anisogrid con spessore di 10,00 mm e spessore costole rispettivamente 3mm e 5mm
 Fonte: Elaborazione propria

In relazione al Grafico 4.3, si può dire che, nonostante le due strutture presentano delle caratteristiche geometriche diverse, l'andamento della curva è molto simile.

Una lieve differenza si può notare per quanto riguarda la forza massima che la struttura è in grado di sopportare: nel caso di anisogrid 10x5, questo valore è leggermente superiore. Questo ci permette di dire che quest'ultimo, in termini di forza sopportata, presenta la caratteristica migliore tra i due.

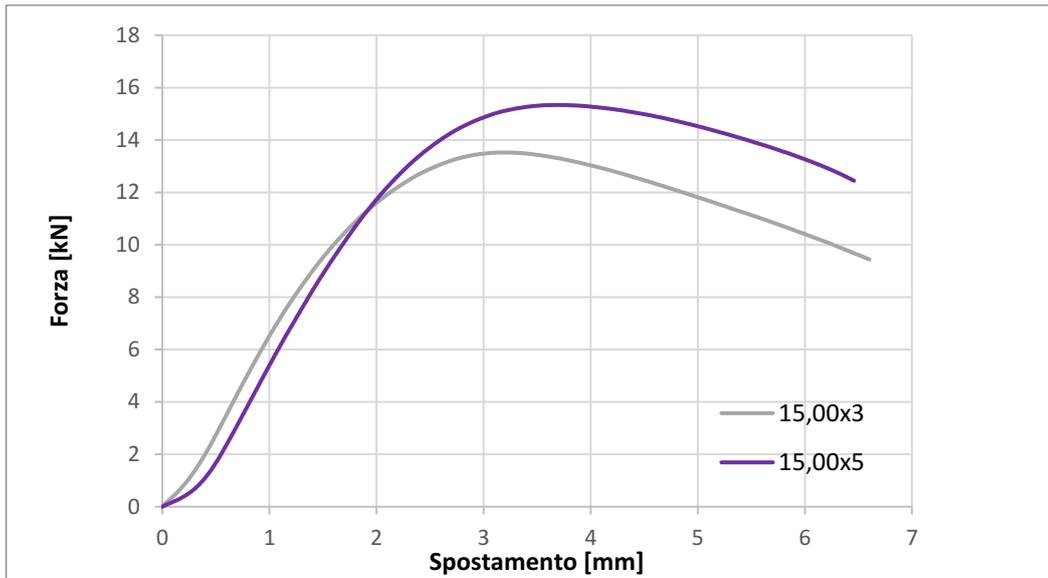


Grafico 4.4 Confronto anisogrid con spessore di 15,00 mm e spessore delle costole rispettivamente di 3mm e 5 mm
 Fonte: Elaborazione propria

Nel Grafico 4.4 è messa in relazione la curva forza-spostamento di due strutture aventi stesso spessore, ma diverso spessore delle costole.

La prima parte della curva, nonché il tratto elastico, ha un andamento molto simile tanto che le due curve sono quasi sovrapposte.

La differenza sostanziale tra le due risiede nel valore di forza massima in quanto, nell'anisogrid 15x5, riusciamo a raggiungere dei carichi superiori.

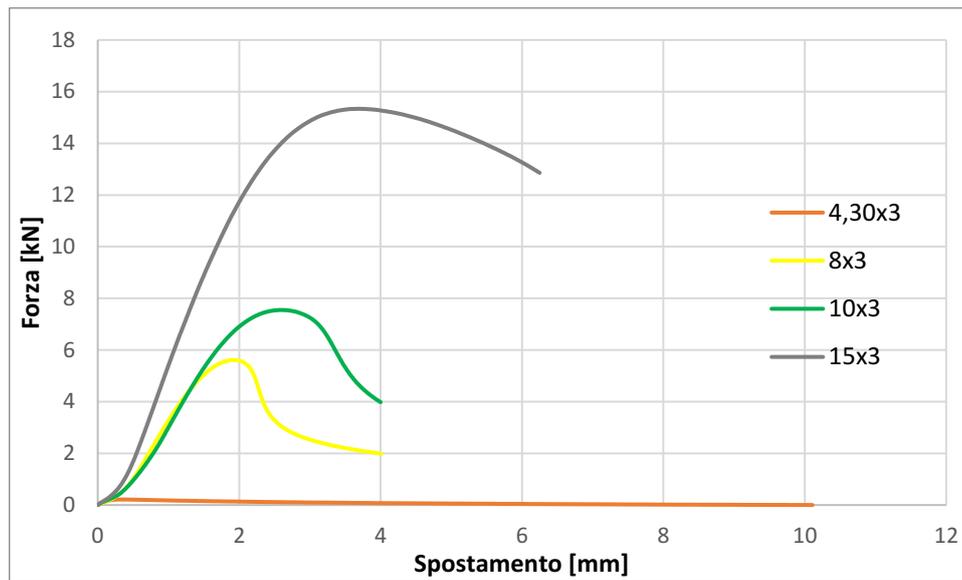


Grafico 4.5 Confronto anisogrid con spessore delle costole di 3mm e spessore di 4,30mm, 8mm, 10mm e 15 mm
Fonte: Elaborazione propria

Nel Grafico 4.5 viene esaminato l'andamento delle curve forza-spostamento in funzione dello spessore della struttura mantenendo costante lo spessore delle costole (3mm).

Si può notare come a parità di spessore delle costole, un aumento di spessore della struttura comporta un incremento di forza che il provino riesce a sopportare.

Si evince, infatti, che la struttura anisogrid 15x3 permette di resistere a carichi di entità maggiore rispetto i restanti provini di spessore inferiore.

Rilevante è la pendenza del tratto elastico che si mantiene costante pur variando le caratteristiche geometriche tra le varie prove eseguite.

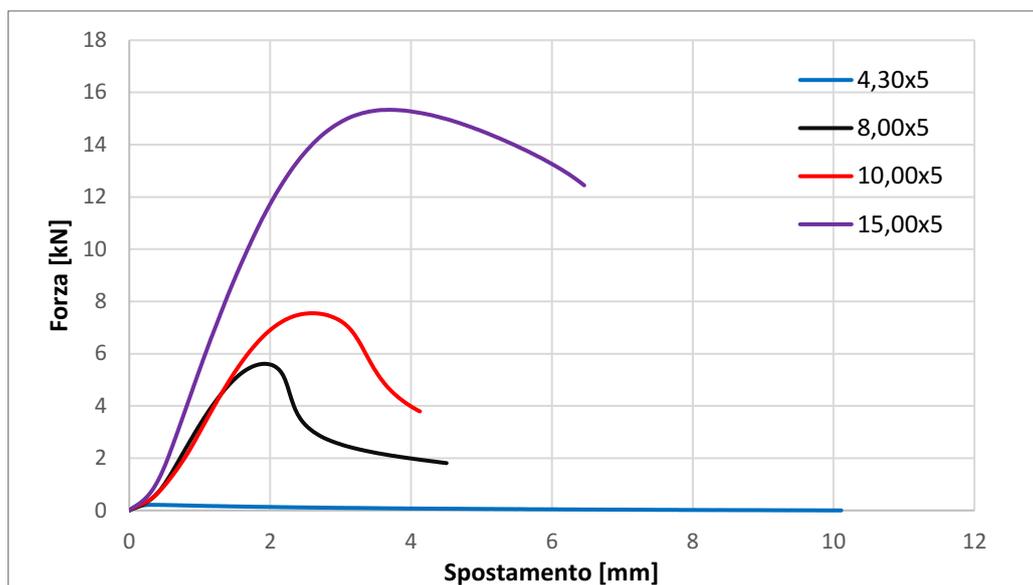


Grafico 4.6 Confronto anisogrid con spessore delle costole di 5mm e spessore di 4,30mm, 8mm, 10mm e 15mm
 Fonte: Elaborazione propria

Nel Grafico 4.6 viene esaminato sempre l'andamento della curva forza spostamento in funzione dello spessore della struttura mantenendo lo spessore delle costole costante che, in questo caso, vale 5mm.

Dal punto di vista della forza sopportata, la struttura anisogrid di dimensioni 15x5 presenta il valore più alto.

Questo dato ci permette di confermare che, all'aumentare dello spessore della struttura, a parità di spessore delle costole, si verifica un aumento del carico applicabile sulla struttura.

Per quanto riguarda lo studio delle caratteristiche delle strutture anisogrid, piuttosto che valutare l'entità della forza applicata, si preferisce valutare la forza specifica, data dal rapporto tra la forza realmente misurata dalla macchina e il peso, costante, del provino sottoposto a compressione.

Teoricamente, una valutazione di questo tipo è molto simile allo studio delle tensioni nel caso di provino pieno, fornendo delle informazioni per quanto concerne la resistenza alle sollecitazioni di compressione, in particolare al buckling per strutture anisogrid.

Nel dettaglio, si possono andare a costruire le curve di Forza specifica – spostamento e fare, come nel caso precedente, dei raggruppamenti in base alle caratteristiche geometriche dei provini potendo stabilire una relazione tra resistenza e dimensioni.

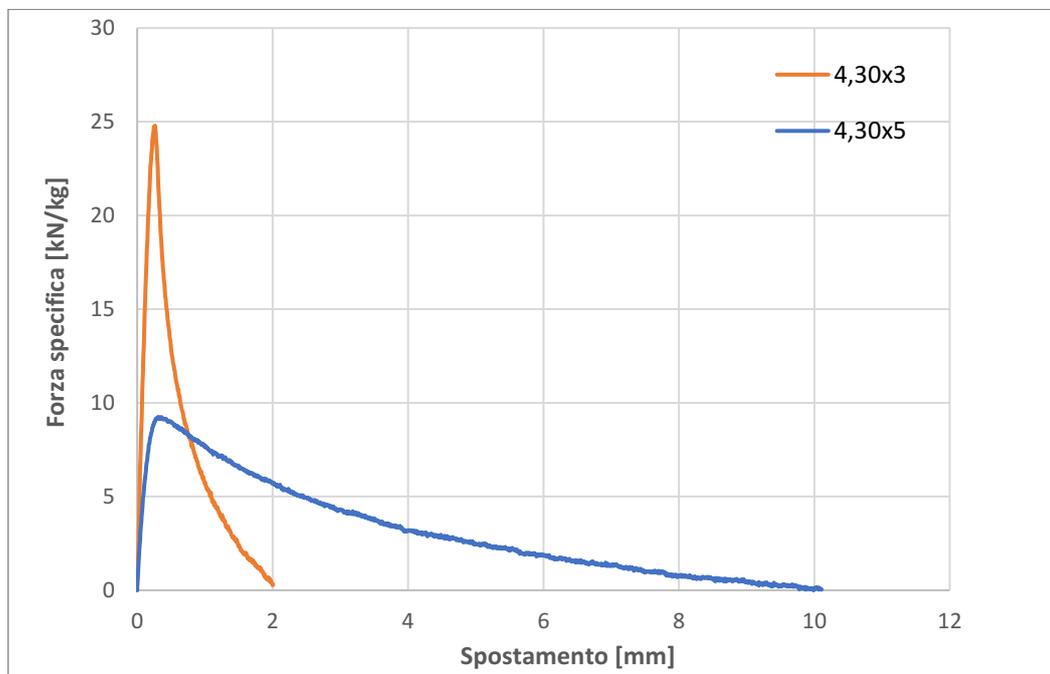


Grafico 4.7 Confronto anisogrid con spessore di 4,30 mm e spessore delle costole rispettivamente di 3mm e 5 mm
Fonte: Elaborazione propria

Dal Grafico 4.7 si nota che, tra le due strutture, quella caratterizzata da un valore maggiore di forza specifica è l'anisogrid 4,30x3, quindi quella con spessore delle costole inferiore.

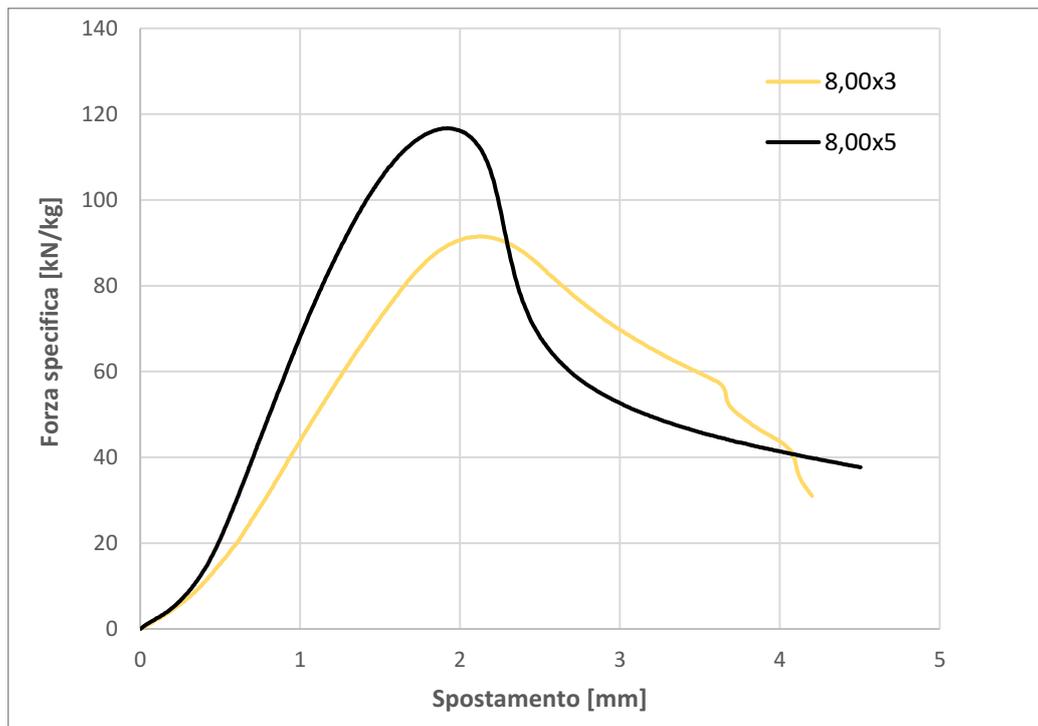


Grafico 4.8 Confronto anisogrid con spessore di 8,00 mm e spessore delle costole rispettivamente di 3mm e 5 mm
Fonte: Elaborazione propria

Dal Grafico 4.8 che mette in relazione la curva forza specifica-spuntamento di due strutture aventi stesso spessore, ma diverso spessore delle costole si nota come il provino 8x5 ha il valore di forza specifica maggiore.

C'è da tenere in considerazione il fatto che la struttura 8x3 è caratterizzata da un errore di stampa che potrebbe aver compromesso la prova e quindi le caratteristiche.

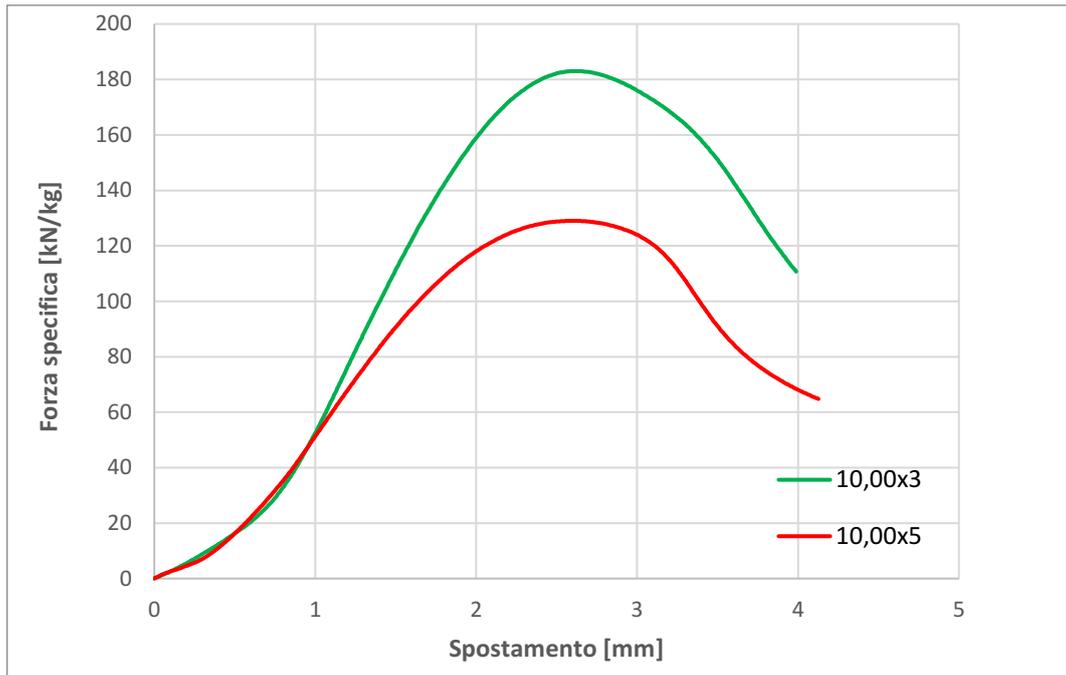


Grafico 4.9 Confronto anisogrid con spessore di 10,00 mm e spessore delle costole rispettivamente di 3mm e 5 mm
 Fonte: Elaborazione propria

L'andamento delle due curve, riportato nel Grafico 4.9, è molto simile tra loro. Questa similitudine che si può stabilire è una conseguenza diretta delle curve forza-spostamento.

La differenza di andamento deriva dal fatto che l'anisogrid 10x5, avendo uno spessore delle costole maggiore, è caratterizzato da un peso maggiore determinando una diminuzione del valore relativo alla forza specifica.

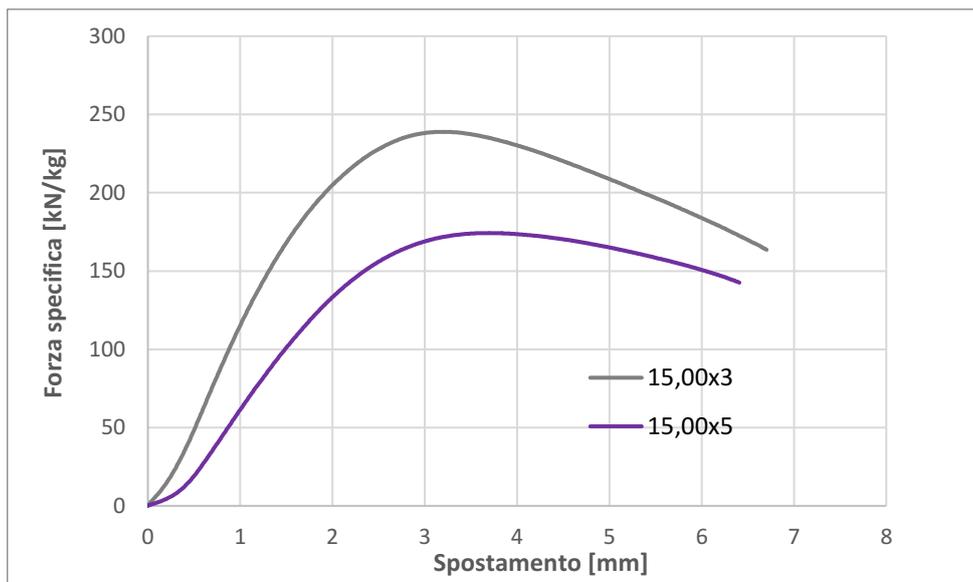


Grafico 4.10 Confronto anisogrid con spessore di 15,00 mm e spessore delle costole rispettivamente di 3mm e 5 mm
Fonte: Elaborazione propria

Il Grafico 4.10 relazione le due strutture caratterizzate dallo spessore maggiore analizzato. In queste due curve si nota come il provino di dimensioni 15x3 ha il valore di forza specifica maggiore.

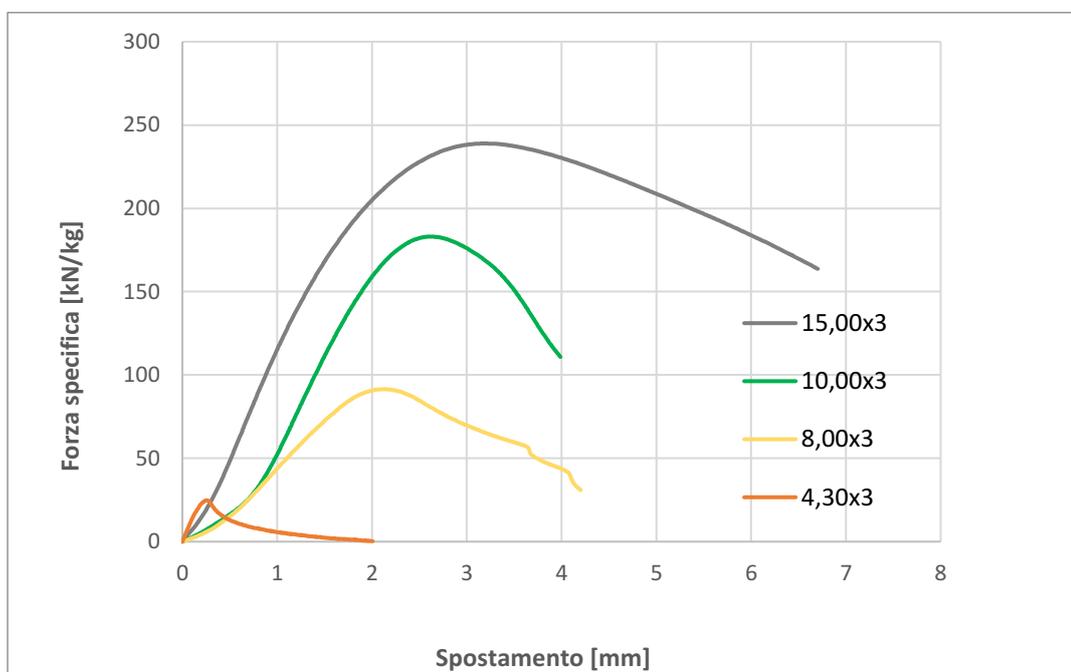


Grafico 4.11 Confronto anisogrid con spessore delle costole di 3mm e spessore di 4,30mm, 8mm, 10mm e 15mm
Fonte: Elaborazione propria

Nel Grafico 4.11 si va a relazionare la curva forza specifica – spostamento con lo spessore della struttura mantenendo costante lo spessore delle costole.

Si può notare come, un aumento di spessore della struttura, determina un aumento della forza specifica, nello specifico l'anisogrid 15x3, tra i provini messi in relazione, presenta il valore di forza specifica più alto.

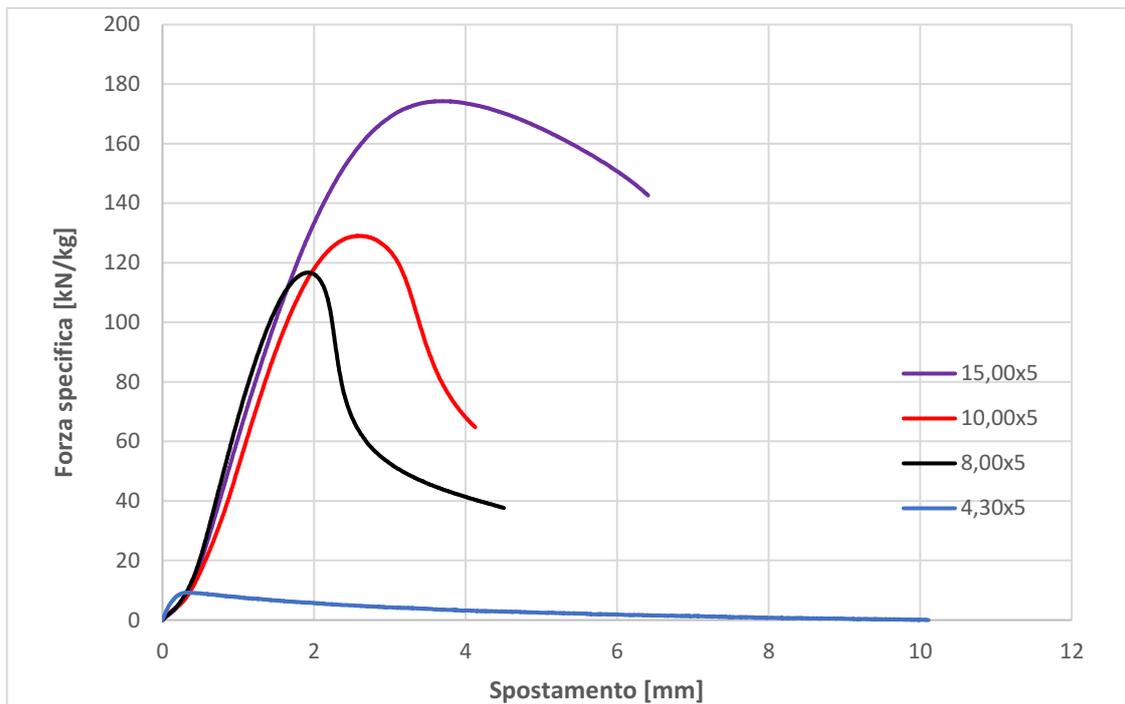


Grafico 4.12 Confronto anisogrid con spessore delle costole di 5mm e spessore di 4,30mm, 8mm, 10mm e 15mm
Fonte: Elaborazione propria

Il Grafico 4.12 relaziona la curva forza specifica – spostamento al variare dello spessore della struttura con spessore delle costole costante e pari a 5mm.

Le curve hanno un andamento generale molto simile tra loro raggiungendo, però, un valore massimo molto diverso tra loro. Questo diverso comportamento è legato alla differenza di spessore tra le varie strutture potendo quindi determinare che tra i quattro provini, l'anisogrid 15x5 ha il migliore comportamento al buckling.

Per avere una visione d'insieme, riguardo l'andamento delle caratteristiche meccaniche in funzione delle dimensioni dei provini, possiamo andare ad analizzare un istogramma nel quale riportiamo l'andamento della forza specifica massima in base al provino esaminato.

PROVINO	PESO [kg]	FORZA MASSIMA [kN]	FORZA SPECIFICA MASSIMA [kN/kg]
4,30x3	0,0137	0,216374	15,79372263
4,30x5	0,0234	0,339705	14,51730769
8x3	0,0306	2,80056	91,52156863
8x5	0,0481	5,614754	116,7308524
10x3	0,0394	7,212003	183,0457614
10x5	0,0585	7,549347	129,0486667
15x3	0,0566	13,523173	238,925318
15x5	0,088	15,337577	174,2906477

*Tabella 4.1 Tabella riportante i valori della Forza massima e della forza specifica massima
Fonte: Elaborazione propria*

Nella Tabella 4.1 vengono riportati i valori della forza massima per ogni provino, il peso e la forza specifica massima data dal rapporto tra la forza massima e il peso della struttura stessa.

I dati inseriti nella colonna relativa alla forza specifica massima saranno quelli che successivamente verranno visualizzati tramite istogramma per valutare l'anisogrid che presenta il miglior comportamento in termini di resistenza al buckling.

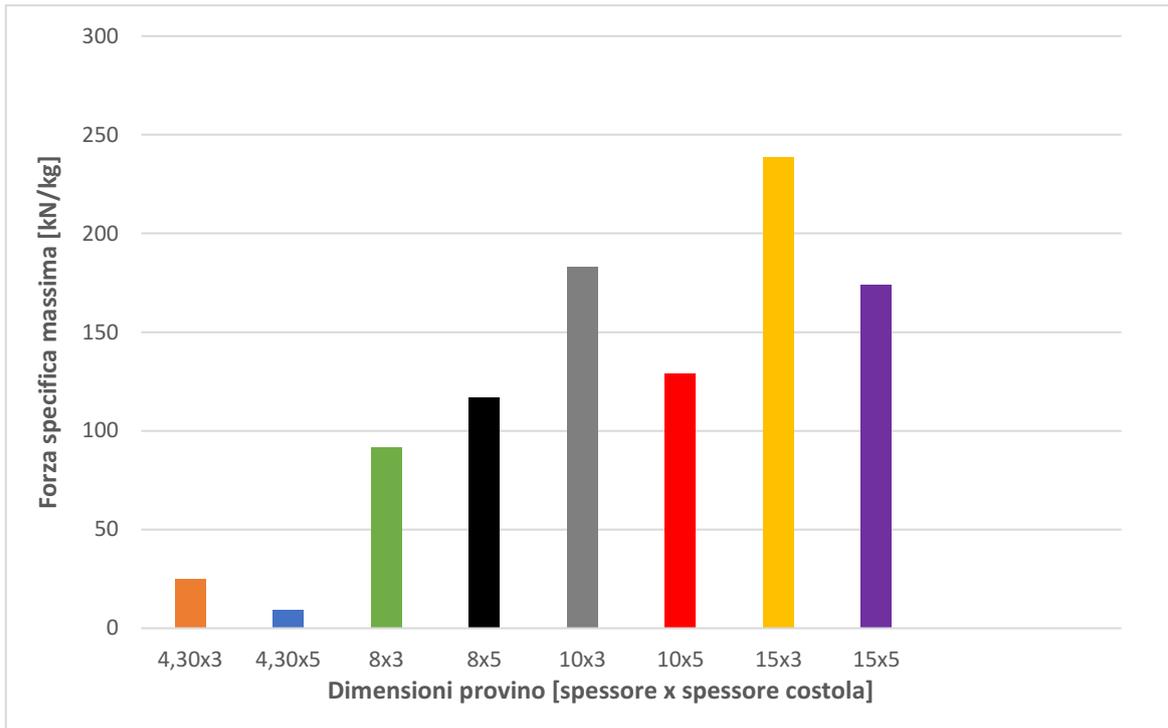


Grafico 4.13 Istogramma che mostra l'andamento della forza specifica in funzione del provino esaminato
Fonte: Elaborazione propria.

Dal Grafico 4.13 si nota che la struttura avente il valore maggiore di forza specifica e quindi le migliori caratteristiche di resistenza al buckling è l'anisogrid 15x3 caratterizzato cioè da uno spessore di 15 mm con spessore delle costole di 3 mm.

Ricapitolando quanto detto:

- Una prima relazione che si è evinta dai grafici è che, a parità di spessore del provino, un aumento dello spessore delle costole determina un incremento di forza che la struttura riesce a sopportare;
- A parità di spessore delle costole, un aumento di spessore della struttura determina un incremento di forza sopportabile dalla stessa;
- Nel caso di forza specifica, data cioè dal rapporto tra la forza applicata e il peso del provino, considerando due strutture aventi stesso spessore, ma

diverso spessore delle costole, quella caratterizzata da caratteristiche di resistenza migliori è quella con spessore delle costole inferiore.

- A parità di spessore della struttura, un aumento di spessore della stessa determina un incremento di forza specifica e quindi una migliore resistenza al buckling.

Se, infatti, andiamo a stabilire una relazione tra le caratteristiche ottenute dai grafici forza-spostamento e quelli forza specifica-spostamento si possono notare delle situazioni diverse tra loro: nel caso della semplice forza, la struttura caratterizzata dal valore di carico maggiore era l'anisogrid 15x5.

Osservando la forza specifica, però, quanto detto perde di validità in quanto la struttura avente le migliori caratteristiche di resistenza al buckling è l'anisogrid 15x3 che presenta il valore di forza specifica massima maggiore.

Questa discordanza è legata al fatto che, andando ad aumentare le dimensioni dell'anisogrid, è vero che aumenta la forza che la struttura è in grado di sopportare ma è altresì vero che aumenta il peso e di conseguenza si verifica una riduzione della forza specifica.

Nel Grafico 4.1 si nota una notevole discordanza con quanto detto poiché si ha che, all'aumentare dello spessore delle costole, si verifica una riduzione della forza che la struttura è in grado di sopportare.

Tale dato è in totale discordanza con la situazione generale e sarebbe quindi necessario, in futuro, analizzare nuovamente i dati effettuando nuove prove per poter determinare il motivo per cui si verifica tale disaccordo.

CONCLUSIONI

Lo scopo di questo lavoro di tesi era lo studio del fenomeno di buckling in provini in materiale composito, stampati via Fused Deposition Modeling (FDM). A tal scopo sono state effettuate delle prove sperimentali per osservare l'insorgere del fenomeno e per caratterizzare il comportamento dei provini stessi.

In conclusione, sulla base dei dati precedentemente analizzati, si può osservare che:

- Un aumento delle dimensioni delle strutture, sia in termini di spessore della stessa che in termini di spessore delle costole, determina un aumento della forza massima sopportata dalle strutture;
- Nel caso di forza specifica, la situazione è particolarmente differente. Nel caso di aumento di spessore, si verifica un aumento della forza specifica; nel caso di aumento dello spessore delle costole si determina una forza specifica maggiore con conseguente maggiore resistenza al buckling.

Ciò è vero se i provini sono “perfetti”; in caso di difetti di stampa, come avviene nel caso dell'anisogrid di dimensioni 8x3, potrebbe presentarsi un errore in quanto il difetto potrebbe aver compromesso le caratteristiche di resistenza del provino stesso: non a caso, osservando il Grafico 4.15. si può notare come – per i provini di spessore 8 mm – quanto detto finora in termini di resistenza decade, verificandosi una situazione di aumento della forza specifica in presenza di un aumento dello spessore delle costole.

Complessivamente, tra tutti i provini analizzati, si può concludere che il migliore in termini di resistenza al buckling è l'anisogrid di dimensione 15x3, dove 15 indica lo spessore della struttura e 3 quello delle costole: è questo provino, infatti, a presentare il valore maggiore in termini di forza specifica.

RINGRAZIAMENTI

Al termine di questo percorso universitario sono tante le persone che dovrei ringraziare, per la loro disponibilità e il supporto, per la vicinanza e l'affetto che non mi hanno fatto mai mancare.

Ringrazio in modo particolare:

~ Il Prof. Archimede Forcellese, la Prof.ssa Michela Simoncini e i Dottorandi del Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche (DIISM) per avermi permesso di svolgere un' interessante esperienza di Tirocinio, per aver mostrato elevata professionalità nello svolgimento del proprio lavoro , per la disponibilità e per la fiducia riposta nei miei confronti.

~ La mia famiglia, per avermi sostenuto nell'intero tragitto, per non avermi fatto mai mancare il supporto nei momenti di sconforto e per aver condiviso con me i momenti di gioia.

~ Mamma, per esser stata il mio punto di riferimento in molte occasioni, per avermi spronato nel proseguire gli studi, per essere un valido esempio di vita.

~ Sofia, la mia metà, che mi è stata vicina nel bene e nel male, credendo in me fin dall'inizio e incitandomi ad avere coraggio e fiducia in me stesso.

~ Gigio, il mio Angelo Custode, per essere stato sempre al mio fianco in qualsiasi momento, dandomi la forza necessaria per superare tutti gli ostacoli che ho incontrato.

~ Parenti, amici e conoscenti tutti, per essere stati un'arma importante per affrontare questo percorso di studi.

~ Tutti coloro che non credevano in me: è a voi che dedico questo traguardo.

BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Forcellese, Slides del Corso "*Tecnologia meccanica*", Università Politecnica delle Marche.
- [2] F. Gabrielli, R. Ippolito, F. Micari, "*Analisi e tecnologia delle lavorazioni meccaniche*", Seconda Edizione, McGraw-Hill, Milano, 2012
- [3] I. Gibson, D. W. Rosen e B. Stucker *Additive Manufacturing Technologies. Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing* Springer, 2010
- [4] J. A. Collins, "*Failure of materials in mechanical design*"
- [5] J. Singer, J. Arbocz e T. Weller *Buckling Experiments: Experimental Methods in Buckling of Thin-Walled Structures. Basic Concepts, Columns, Beams and Plates-Volume 1* John Wiley & Sons, Inc., 1998
- [6] Shigley's, Richard G. Budynas, J. Keith Nisbet "*Progetto e costruzione di macchine*" McGraw Hill Editore, 2012

SITOGRAFIA

www.makermiky.com/2020/10/stampa-3d/10/

www.elmec.com/3d/risorse/documenti/materiali/TDS-CarbonPA.pdf

www.roboze.com

www.italia3dprint.it/tecnologie

www.elmec.com/3d/soluzioni/stampanti-3d/roboze-one-400.html