

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE



FACOLTA D'INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

**REALIZZAZIONE DI STRUTTURE ISOGRID IN
MATERIALE COMPOSITO MEDIANTE
ADDITIVE MANUFACTURING**

**REALIZATION OF COMPOSITE ISOGRID
STRUCTURES BY ADDITIVE MANUFACTURING**

Candidato:

Valerio Di Pompeo

Relatore:

Prof. Ing. Archimede Forcellese

Correlatore:

Ing. Alessio Vita Ph.D

Anno accademico 2018-2019

Sommario

INTRODUZIONE	4
STATO DELL'ARTE	6
1.1 MATERIALI COMPOSITI	6
1.1.1 <i>Matrici Polimeriche</i>	9
1.1.2 <i>Rinforzi</i>	18
1.2 CARBON PA.....	35
1.3 METODI DI REALIZZAZIONE DEI COMPOSITI	39
1.3.1 <i>Bag Molding</i>	40
1.3.2 <i>LCM</i>	44
1.3.3 <i>Filament Winding</i>	49
1.3.4 <i>ATL e AFP</i>	51
1.4 STAMPA 3D.....	53
1.4.1 <i>Stampanti 3D tradizionali</i>	55
1.4.2 <i>Strutture reticolari con il 3D Printing</i>	57
1.4.3 <i>Stampa 3D a fibre continue</i>	60
1.5 STRUTTURE ISOGRID	63
1.5.1 <i>Meccanica delle Isogrid</i>	65
1.6 RETE NEURALE	72
1.6.1 <i>Multilayer Perceptron</i>	75
1.6.2 <i>Algoritmo di apprendimento dell'MLP</i>	76
1.6.3 <i>Suddivisione del Training set e Testing set</i>	80
PARTE SPERIMENTALE.....	81
2.1 PROVA DI TRAZIONE	81
2.2 PROVA DI INSTABILITÀ.....	84
2.3 RETE NEURALE	113
ANALISI DEI RISULTATI	122
CONCLUSIONI.....	123
RIFERIMENTI	124

INTRODUZIONE

Oggi il campo automobilistico come quello aerospaziale è sempre più alla ricerca di nuovi materiali dotati di elevate caratteristiche meccaniche, di nuovi processi produttivi in grado di limitare gli scarti e l'impatto ambientale, nonché di nuove soluzioni geometriche al fine di aumentare la leggerezza, mantenendo elevate le prestazioni.

I materiali oggetto del presente studio, prendono il nome di **composito alto-performanti**. Si tratta di materiali costituiti da fasi chimicamente distinte, con caratteristiche fisico-meccaniche diverse, denominati: **rinforzo e matrice**; l'utilizzo di questi ultimi è in forte crescita nel settore industriale grazie alla possibilità di ottenere caratteristiche meccaniche comparabili a quelle dei materiali tradizionali, tuttavia ne viene ridotto il peso, e si presta attenzione all'impatto ambientale, come richiesto dalle normative Internazionali.

Negli ultimi sessanta anni, i materiali compositi sono stati estensivamente utilizzati in quei settori dove era richiesta una elevata resistenza o rigidità specifica e dove il costo elevato, a causa dei processi produttivi prettamente artigianali, non costituivano un problema rilevante. Per poter aumentare i campi di impiego, laddove il costo è un elemento imprescindibile nella scelta dei materiali, si sta cercando di introdurre processi produttivi automatizzati come: l'**RTM (Resin Transfer Molding)**, il **Filament Winding** e la **Stampa 3D**. Quest'ultima è un processo additivo, e nella fattispecie il pezzo viene realizzato stratificando il materiale solo dove è necessario, permettendo l'ottenimento di geometrie molto complesse al contrario dei tradizionali processi produttivi, ma anche limitando lo spreco e riducendo le fasi di processo; ne consegue una riduzione dei costi e del Production Lead Time, cioè il tempo che intercorre da quando si riceve l'ordine a quando c'è l'evasione dello stesso.

Oltre alla ricerca di materiali con ottime proprietà meccaniche e sistemi innovativi di realizzazione di strutture, data la necessità di ottenere delle strutture meno impattanti in termini di utilizzo del materiale così come di riduzione del peso stesso, si è cercato di realizzare delle strutture reticolari, si tratta di un insieme di aste complanari vincolate ai nodi in modo da costituire un elemento resistente e indeformabile. L'opera più famosa

che è in grado di definire quanto descritto, è la torre Eiffel. Infatti, grazie all'introduzione di questo innovativo sistema di aste è stato possibile dar forma ad una struttura così imponente, preservandone la leggerezza e la stabilità nonostante l'utilizzo dell'acciaio. Attualmente, le più innovative strutture reticolari prendono il nome di Isogrid e Anisogrid, impiegate nel settore aerospaziale per la progettazione di aerei, razzi e veicoli spaziali aventi valide caratteristiche di resistenza all'instabilità, combinate ad una notevole leggerezza ed efficienza strutturale.

Il presente lavoro ha lo scopo di individuare il comportamento a carico di punta delle strutture reticolari sopracitate, realizzate mediante 3D printing e con l'impiego di un materiale composito denominato **Carbon PA**, cioè formato da **Poliammide (PA)**, materiale termoplastico, rinforzato con delle fibre corte di **Carbonio**, andando così a migliorare quelle che sono le prestazioni meccaniche del primo, soprattutto in termini di rigidità e tensione a rottura.

Inizialmente sono state eseguite delle prove di Trazione per la caratterizzazione del materiale al fine di ottenere: la tensione massima e il modulo, per poi realizzare vari provini, nei quali uno o più parametri geometrici sono stati variati al fine di indagare sul loro comportamento. Una volta realizzati i vari elementi, questi sono stati sottoposti a compressione al fine di individuare il carico massimo, la tipologia di rottura e la modalità di inflessione. Inoltre, un parametro di particolare rilevanza a causa del sistema di realizzazione, risiede nella presenza di vuoti presenti durante la deposizione. Non a caso, sono state messe a punto delle valutazioni inerenti la presenza di umidità, osservando quanto questa possa ostacolare le prestazioni del materiale, inficiando sulle caratteristiche per instabilità dei provini.

Le prove sono state svolte presso il laboratorio del **Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche (DIISM)** mediante una macchina in controllo di spostamento, e successivamente confrontate attraverso la rete neurale.

STATO DELL'ARTE

Introduzione

Come già evidenziato nel capitolo introduttivo, sono molteplici gli aspetti da considerare nel presente studio. Nello specifico si tratterà dettagliatamente dei materiali compositi, dei vari processi produttivi quali la **Stampa 3D** utilizzata nel settore industriale e delle strutture reticolari, nella fattispecie alle Isogrid.

1.1 Materiali compositi

Molte tecnologie moderne richiedono l'impiego di materiali che offrono peculiari combinazioni di diverse proprietà che non possono essere presenti contemporaneamente nei materiali tradizionali. La possibilità di combinare diverse proprietà in un unico materiale e di ampliarne gli intervalli di validità è stata ottenuta, e viene continuamente migliorata ed ottimizzata. In base a questo principio, denominato il **principio delle azioni combinate**, l'ottimizzazione di una proprietà viene ottenuta mediante l'attenta e studiata combinazione di due o più materiali differenti pur correndo il rischio di peggiorare alcune altre caratteristiche. Molti materiali compositi si trovano in natura, ad esempio il legno è un materiale composto da fibre resistenti e flessibili di cellulosa annegate e tenute insieme da una sostanza più rigida chiamata lignina. Le ossa rappresentano un altro esempio di materiale composito, composte dalle resistenti ma soffici proteine di collagene e dall'apatite, un minerale duro e fragile. Nella progettazione dei materiali compositi gli scienziati e gli ingegneri hanno ingegnosamente combinato l'insieme di diversi metalli, ceramici, polimeri al fine di ottenere e produrre una nuova generazione di materiali straordinari. La maggior parte dei materiali compositi sono stati creati al fine di incrementare le diverse caratteristiche quali la rigidità, la tenacità e la resistenza meccanica alle alte temperature ed all'esposizione all'ambiente [1].

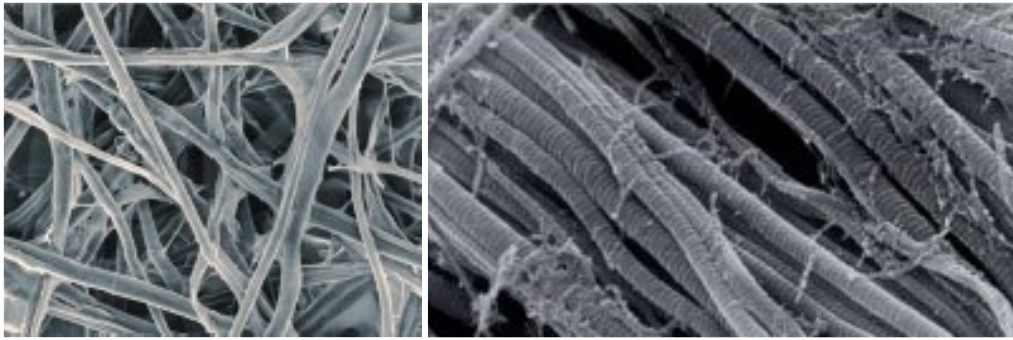


Figura 1.1: *Fibra di cellulosa a sinistra, collagene a destra.*

Un materiale composito ha origine dalla combinazione di due o più, micro o macro costituenti che differiscono nella forma e nella composizione chimica e che essenzialmente sono insolubili l'uno nell'altro.

Comunemente questo straordinario materiale è formato da due diverse fasi, una detta **matrice**, cioè una fase continua che avvolge l'altra fase e ha lo scopo di:

- Inglobare il rinforzo;
- Trasferire i carichi al rinforzo;
- Proteggere il rinforzo dall'ambiente esterno (umidità, agenti chimici);
- Proteggere la superficie delle fibre dal degrado meccanico (abrasione);
- Conferire al composito, se richiesto, elevata tenacità che il rinforzo non possiede.

La seconda fase prende il nome di **rinforzo** e ha il compito di

- Sopportare i carichi esterni,
- Aumentare il modulo
- Limitare le deformazioni
- Limitare l'assorbimento di umidità del composito.

In funzione delle percentuali in peso delle differenti fasi, della disposizione e tipologia del rinforzo, ma anche dalle geometrie e dall'orientazione della stessa, si ottengono materiali aventi differenti caratteristiche, nonostante le due fasi abbiano la stessa composizione chimica. Quanto precedentemente riportato permette di asserire con certezza che i materiali compositi risultano molto versatili e flessibili, utilizzabili in molteplici applicazioni.

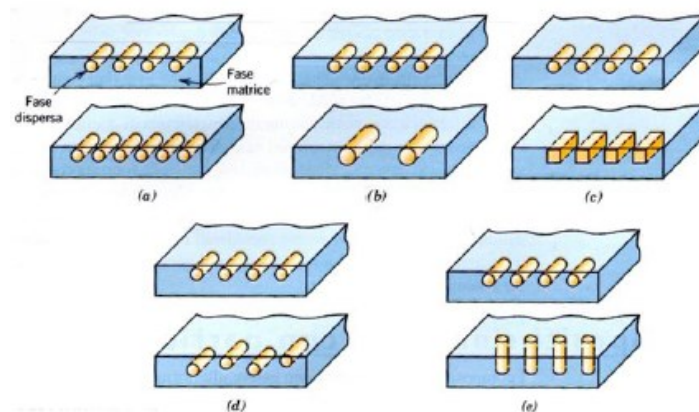


Figura 1.2: *Rappresentazione schematica di diverse caratteristiche geometriche e spaziali del rinforzo: (a) concentrazione, (b) dimensione, (c) forma, (d) distribuzione, (e) orientazione*[1].

Considerando l'enorme versatilità di questi particolari materiali è possibile classificarli in base al tipo di matrice e rinforzo:

- In riferimento al tipo di matrice:
 - Compositi a matrice ceramica (Ceramic Matrix Composites);
 - Compositi a matrice metallica (Metal Matrix Composites);
 - Compositi a matrice polimerica (Polymer Matrix Composites).
- PMC ulteriormente suddivisibili in:
 - Compositi a matrice termoindurente;
 - Compositi a matrice termoplastica.
- In riferimento alla forma della fase del rinforzo:
 - Particelle;
 - Fibre (discontinue e continue);
- I compositi con rinforzo particellare si suddividono in:
 - Particelle dell'ordine del millimetro;
 - Nanoparticelle;

Nei compositi fibro-rinforzati, le fibre possono essere:

- Disposte lungo direzioni predefinite;
- Organizzate in tessuti in uno o più strati;
- Organizzate in strutture tridimensionali.

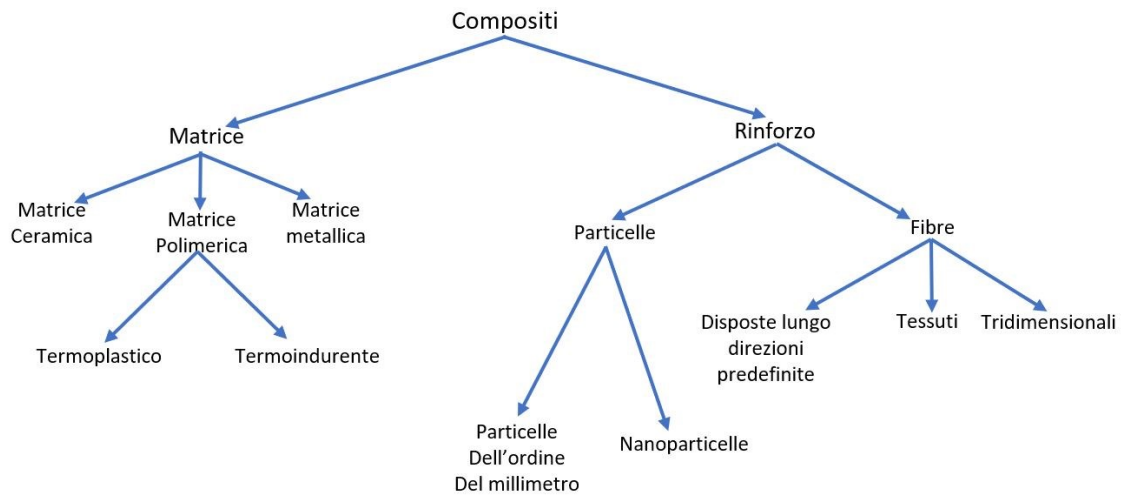


Figura 1.3: *Classificazione dei compositi.*

1.1.1 Matrici Polimeriche

I polimeri che si trovano in natura, sono quelli derivati da piante ed animali e vengono impiegati da parecchi secoli. Tra i noti si possono citare il legno, la gomma, il cotone, la lana, il cuoio e la seta. Altri polimeri naturali quali le proteine, gli enzimi, gli amidi e la cellulosa sono rilevanti nei processi biologici e fisiologici di piante ed animali. I moderni mezzi di ricerca hanno reso possibile l'identificazione delle strutture molecolari di questo gruppo di materiali e lo sviluppo di numerosi polimeri che vengono sintetizzati da molecole organiche di piccole dimensioni. Molti dei nostri materiali più utili, quali le plastiche, gomme e fibre sono polimeri sintetici. In effetti, a partire dalla fine della Seconda Guerra Mondiale, il campo dei materiali è stato virtualmente rivoluzionato dall'avvento dei polimeri sintetici [2]. Essi possono essere prodotti a basso costo e le loro proprietà possono essere controllate con un tale grado di precisione che molte di esse risultano superiori a quelle degli omologhi prodotti naturali. In diverse applicazioni, parti in metallo o in legno sono state sostituite dalle plastiche, che presentano proprietà soddisfacenti con abbattimenti dei costi di produzione.

La parola **polimero** significa letteralmente "molte parti". Un solido polimerico può essere considerato un materiale formato da molecole denominate **monomeri**, composte da catene, che a loro volta si collegano in modo da formare un solido.

Le singole catene sono formate da legami di tipo **covalente**, mentre tra le catene si possono generare sia legami di tipo covalente che legami secondari quali le **forze di Van der Walls** e i **legami idrogeno**. Le unità ripetitive possono provenire da un solo monomero, in tal caso si parla di **Omopolimeri**, da due o più monomeri, presenti in percentuali relative variabili e prendono il nome di **Copolimeri** e possono essere: a blocchi, a innesto o casuali.

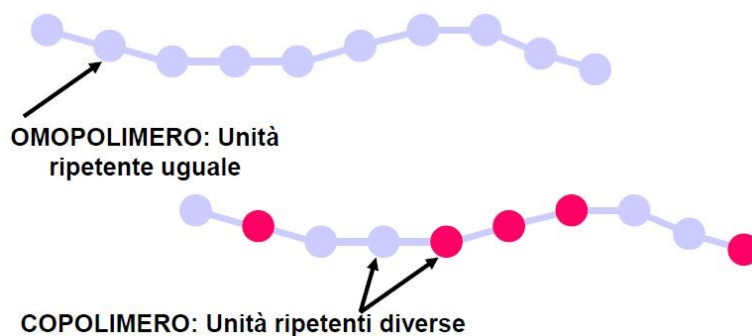


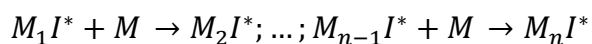
Figura 1.4: Omopolimero e Copolimero.

Il processo chimico mediante il quale i monomeri vengono chimicamente trasformati in polimeri a lunga catena molecolare si chiama polimerizzazione per crescita a catena, ed avviene in 3 fasi:

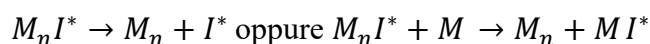
- 1) **Iniziazione** (fase più lenta): sul monomero si crea un **centro attivo** (particolari zone della struttura di un catalizzatore che sono attivamente implicate nel processo). Esistono 3 modi in cui avviene l'iniziazione: attacco da parte di un radicale libero R; attacco da parte di un catione K^* ; attacco da parte di un anione A^- , reagendo con il monomero insaturo:



- 2) **Propagazione**: la macromolecola accresce di una unità ad ogni successiva fase della reazione:



- 3) **Termine**: il centro attivo viene espulso dalla macromolecola o trasferito al monomero:



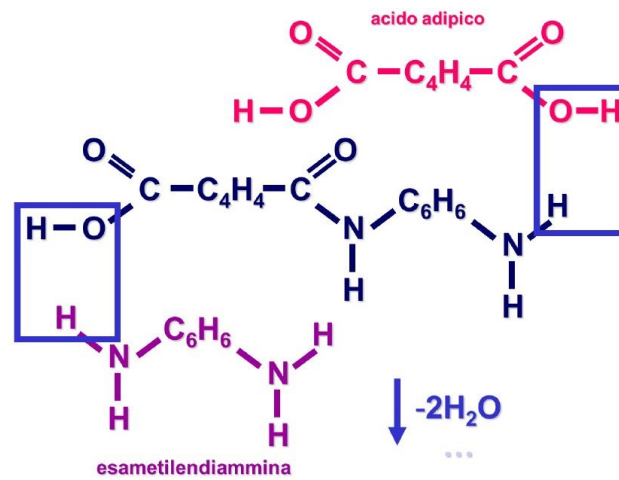


Figura 1.5: configurazione del PA alifatiche, comunemente chiamato Nylon.

Le macromolecole che costituiscono un polimero hanno un diverso **grado di polimerizzazione**, cioè diversa lunghezza e quindi diverso peso molecolare andando a influenzare le proprietà fisiche, meccaniche e l'attitudine ad essere lavorato. Nella maggior parte dei casi maggiore è il peso molecolare e maggiori saranno la **resistenza meccanica** e la **tenacità** del polimero, ciò a scapito della processabilità che diminuisce. **Grado di polimerizzazione (X)** di una macromolecola: è il numero totale di unità monomeriche concatenate, sia nella catena principale che in eventuali ramificazioni.

La solidificazione dei polimeri può portare ad una struttura **amorfa** o **semicristallina**. Se si ha una struttura amorfa la disposizione delle catene nello spazio è casuale, priva di un ordine tridimensionale a lungo raggio.

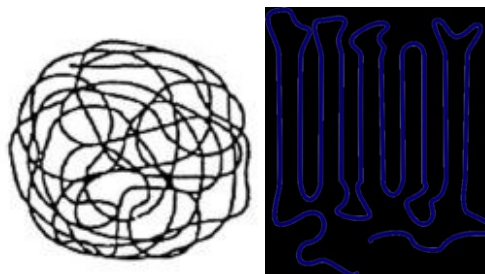


Figura 1.6: Struttura amorfa a sinistra e semicristallina a destra.

Per quanto concerne la struttura semicristallina, essa è formata da piccole regioni cristalline (chiamate **crystalliti** o **micelle**) aventi un preciso allineamento e disperse all'interno di una matrice amorfa composta da molecole orientate in modo del tutto casuale. Al termine del processo di cristallizzazione il sistema è costituito da un insieme di micelle di dimensioni variabili, inglobate in una matrice rigida disordinata. Nonostante ci sia una composizione piuttosto disordinata è possibile individuare alcune forme caratteristiche:

- **Micelle sfrangiate** (struttura bidimensionale): costituite da segmenti provenienti da catene diverse;
- **Strutture lamellare** (struttura tridimensionale): le catene possono disporsi in modo parallelo. Le singole lamelle risultano legate le une alle altre dalle numerose catene polimeriche, che prendono il nome di **molecole laccio**.

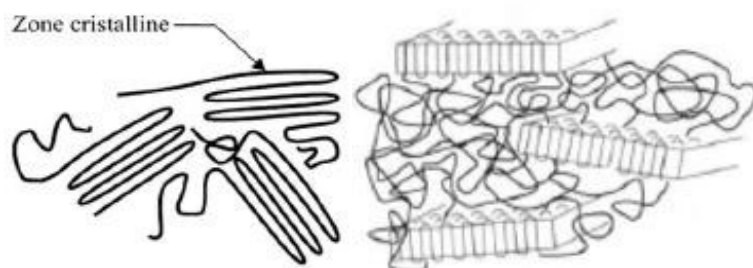


Figura 1.7: *A sinistra le micelle sfrangiate, a destra una struttura lamellare con una chiara zona amorfa.*

Un aspetto da tenere in considerazione che esemplifica e ne descrive la differenza tra le due tipologie di strutture andando a cambiare le proprietà meccaniche del materiale, è il raffreddamento e nello specifico, la transizione di fase da liquido a solido.

In una struttura completamente amorfa, il passaggio dallo stato fuso allo stato cristallino non avviene ad una temperatura precisa. Piuttosto, è possibile osservare un aumento progressivo della viscosità del fluido che porta il polimero dallo stato liquido allo stato solido con comportamento **gommoso**. La temperatura che individua il passaggio da uno stato gommoso ad uno vetroso prende il nome di **temperatura di transizione vetrosa**

(T_g), essa non è una transizione termodinamica, bensì cinetica, avviene senza alterare la disposizione degli atomi (vedi figura 1.7).

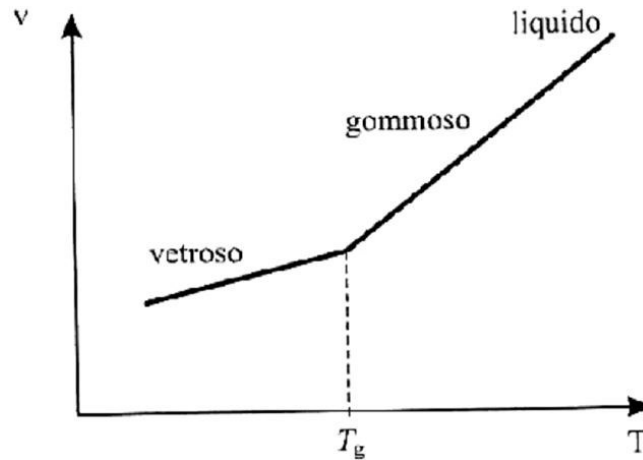


Figura 1.8: *Diagramma di transizione di fase di un polimero completamente amorfo.*

I parametri che abbassano la temperatura di transizione vetrosa (T_g), favorendo un comportamento gommoso anche a temperatura ambiente, sono:

- Minore velocità di raffreddamento del materiale;
- Minore cristallinità;
- Minore massa molecolare;
- Minore grado di reticolazione;
- Maggiore flessibilità grazie alla geometria molecolare;
- Maggiore flessibilità grazie alle minori forze intermolecolari.

Di conseguenza, il valore della T_g confrontato con la T_{amb} determinerà le proprietà e la fase del polimero:

- Se si avrà una $T_g > T_{amb}$, il polimero presenterà una fase vetrosa e risulterà: molto rigido, scarsamente deformabile e di conseguenza molto fragile;
- Se si avrà una $T_g < T_{amb}$, il polimero sarà una gomma e risulterà: molto tenace con bassa rigidità e capace di sopportare deformazioni fino al cento per cento.

Per quanto attiene un polimero cristallino ideale invece, il passaggio di stato da liquido a solido avviene ad una temperatura specifica detta, **temperatura di solidificazione (T_m)**

che rimane costante finchè tutto il materiale non ha effettuato il passaggio di stato. Dal grafico riportato in basso si può osservare una diminuzione del volume specifico (v) in corrispondenza di T_m (vedi figura 1.8).

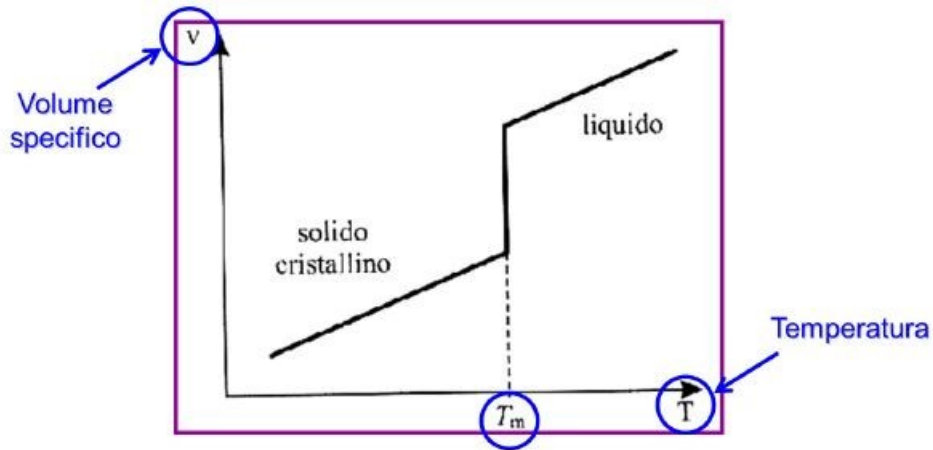


Figura 1.9: *Diagramma di transizione di fase di un polimero completamente cristallino.*

I polimeri non presentano strutture completamente cristalline, ma saranno presenti dei polimeri con differente percentuale di cristallizzazione, di conseguenza il diagramma di transizione di fase avrà sia una T_g che una T_m , come descritto nel grafico (vedi figura 1.9).

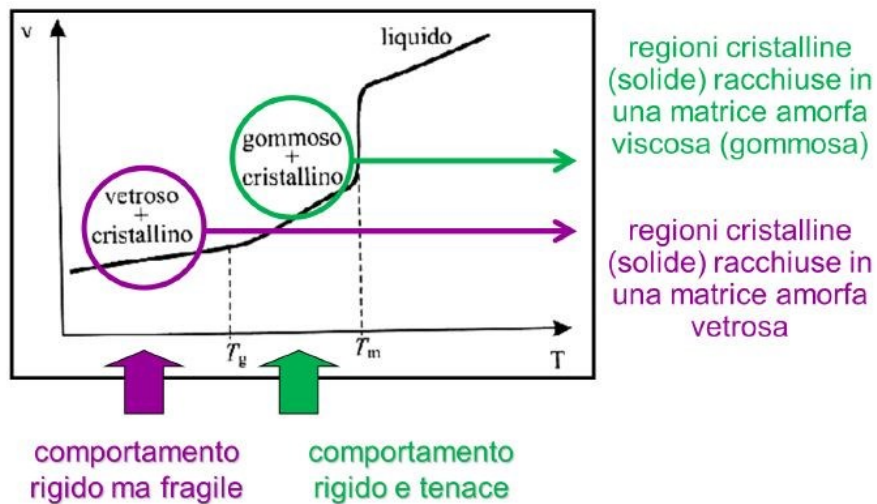


Figura 1.10: *Diagramma di transizione di fase di un polimero semicristallino.*

Come descritto in figura 1.3 le matrici polimeriche si suddividono in:

- **Termoplastiche:** sono flessibili e resistenti a temperatura ambiente ma rammolliscono ad alta temperatura;
- **Termoindurenti:** sono più rigide e resistenti delle termoplastiche e si decompongono ad alta temperatura;
- **Elastomeri:** possono subire grandi allungamenti elastici con bassissima plasticità.

I polimeri **termoplastici** sono formati da catene principali molto lunghe di atomi di carbonio legati tra loro mediante **legami covalenti**. Le macromolecole sono legate le une alle altre con legami secondari deboli con conseguente rottura degli stessi mediante riscaldamento. Ad elevate temperature le catene sono libere di spostarsi e unirsi in nuove forme rendendo il materiale **riciclabile**. Con il raffreddamento, i legami deboli si ricreano e il materiale termoplastico assume la nuova forma conferitagli dalle lavorazioni. A loro volta i termoplastici possono essere ulteriormente suddivisi in:

- **termoplastici di massa:** Polietilene, Polipropilene, Polivinilcloruro e Polistirene. Si tratta di materiali prodotti a partire da materie prime di basso costo e con impianti su larga scala, che fanno in modo di essere venduti a prezzi contenuti;
- **tecnopolimeri:** Poliammidi (chiamate comunemente Nylon), Policarbonato e Poliestere. Materiali che vantano ottime proprietà meccaniche e termiche consone per applicazioni ingegneristiche e di gran lunga superiori a quelli di massa, favorendo il loro largo impiego. Le densità dei tecnopolimeri sono relativamente basse e questo è un grande vantaggio per molteplici applicazioni.



Figura 1.11: Esempi di termoplastico di massa e tecnopolimero.

I **termoindurenti** hanno una struttura molecolare reticolata (**cross-linking**) tridimensionale formata da legami covalenti primari forti. La reazione chimica per cui le catene polimeriche si legano tra loro a formare un materiale polimerico tridimensionale prende il nome di **cura**, che allo stato solido risulta essere vetroso con una $T_g > T_m$. Per la realizzazione si parte da una miscela di polimeri a basso peso molecolare che allo stato liquido ($T_g < T_a$) saranno miscelati con agenti reticolanti, a determinate condizioni:

- Presenza del catalizzatore (termoindurenti a freddo);
- Riscaldamento;
- Riscaldamento e pressione;
- Radiazione UV o laser.

Le resine termoindurenti possono ammorbidirsi per effetto del calore ma i legami covalenti del reticolo impediscono loro di tornare allo stato fluido esistente già prima della reticolazione e di conseguenza presentante natura irreversibile. Dunque, a processo avviato non è possibile ottenere il prodotto di partenza. Questi particolari polimeri riscaldandoli **carbonizzano** e non ritornano allo stato iniziale, al contrario di quanto avveniva con i termoplastici, di conseguenza il materiale risulterà **non riciclabile**.

Per caratterizzare il comportamento meccanico di un polimero termoindurente è indispensabile conoscere il **grado di reticolazione** (o **grado di cura**), valore che individua il numero di cross linking formati tra il numero complessivo di cross linking formabili. Se i legami tridimensionali sono molto fitti si può avere la scomparsa della temperatura di transizione vetrosa, in quanto il suo valore risulta superiore alla temperatura di stabilità del polimero, ciò comporta la degradazione del materiale al momento del riscaldamento ancor prima di diventare gommoso, rimanendo dunque allo stato liquido. I fattori che influenzano la cura sono: tipo di indurente, promotori o inibitori di cura, fillers, natura chimica dei reagenti e pressione.

Le proprietà dei polimeri termoindurenti fortemente reticolati sono le seguenti:

- Elevata rigidità;
- Deformabilità plastica quasi nulla;
- Assenza di fenomeni di creep;
- Buone caratteristiche meccaniche anche a temperature relativamente alte;

- Elevata stabilità termica;
- Basso peso;
- Elevate proprietà di isolamento elettrico e termico.

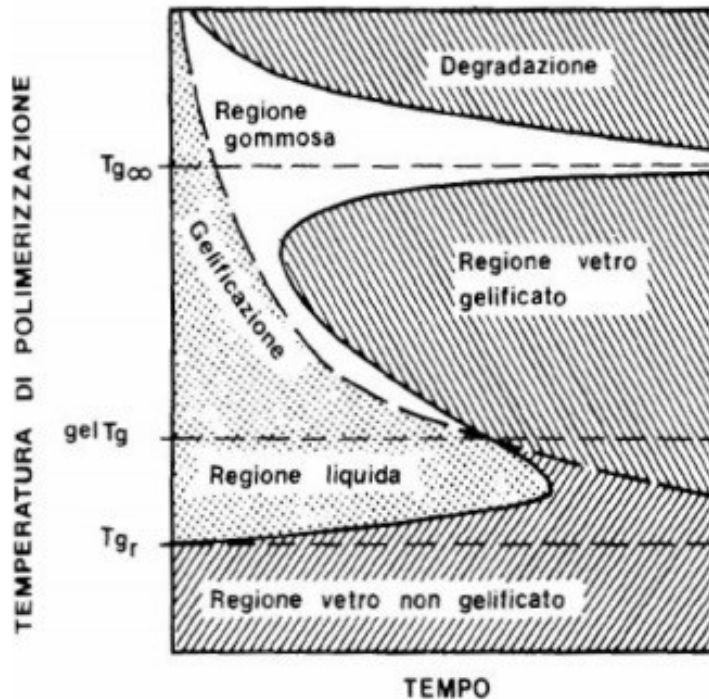


Figura 1.12: Grafico TTT (temperatura-tempo-trasformazione); (Fonte Mallick).

I termoindurenti più utilizzati per i materiali compositi sono: resine epossidiche, fenoliche e poliesteri che conferiscono al materiale ottime caratteristiche di resistenza alla rottura ma anche elevate rigidità corrisposte ad una notevole leggerezza. Attualmente a causa degli elevati costi di produzione esse vengono impiegate nei settori, quali: racing, aerospaziali, navali e automotive.

Al polimero di base, vengono in seguito aggiunti diversi **additivi**, come:

- Plastificanti;
- Stabilizzanti per contrastare il deterioramento di alcune proprietà con l'aumento della temperatura;
- Coloranti;
- Fluidificanti.

1.1.2 Rinforzi

Le caratteristiche meccaniche di un materiale composito sono il risultato di meccanismi di trasferimento di sforzi tra matrice continua e rinforzo, in base a questo meccanismo verranno influenzate le risultanti prestazioni. Un efficace trasferimento di sforzi richiede un'estesa superficie di contatto tra le fasi, oltre che un'efficiente interfaccia influenzando le prestazioni e le conseguenti applicazioni. Come descritto nella Figura 1.3 i rinforzi si suddividono in: **particellari** e **fibrosi**, questi ultimi si suddividono in **fibres corte** e **fibres lunghe**. Dato quanto affermato in precedenza, grazie ad una elevata superficie di contatto le fibres lunghe risultano i compositi più performanti rispetto alle altre.

Fiber	Typical Diameter (μm) ^a	Density (g/cm^3)	Tensile Modulus GPa (Msi)	Tensile Strength GPa (ksi)	Strain-to-Failure (%)	Coefficient of Thermal Expansion ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) ^b	Poisson's Ratio
<i>Glass</i>							
E-glass	10 (round)	2.54	72.4 (10.5)	3.45 (500)	4.8	5	0.2
S-glass	10 (round)	2.49	86.9 (12.6)	4.30 (625)	5.0	2.9	0.22
<i>PAN carbon</i>							
T-300 ^c	7 (round)	1.76	231 (33.5)	3.65 (530)	1.4	-0.6 (longitudinal) 7-12 (radial)	0.2
AS-1 ^d	8 (round)	1.80	228 (33)	3.10 (450)	1.32		
AS-4 ^d	7 (round)	1.80	248 (36)	4.07 (590)	1.65		
T-40 ^e	5.1 (round)	1.81	290 (42)	5.65 (820)	1.8	-0.75 (longitudinal)	
IM-7 ^d	5 (round)	1.78	301 (43.6)	5.31 (770)	1.81		
HMS-4 ^d	8 (round)	1.80	345 (50)	2.48 (360)	0.7		
GY-70 ^e	8.4 (bilobal)	1.96	483 (70)	1.52 (220)	0.38		
<i>Pitch carbon</i>							
P-55 ^e	10	2.0	380 (55)	1.90 (275)	0.5	-1.3 (longitudinal)	
P-100 ^e	10	2.15	758 (110)	2.41 (350)	0.32	-1.45 (longitudinal)	
<i>Aramid</i>							
Kevlar 49 ^f	11.9 (round)	1.45	131 (19)	3.62 (525)	2.8	-2 (longitudinal) 59 (radial)	0.35
Kevlar 149 ^f		1.47	179 (26)	3.45 (500)	1.9		
Technora ^g		1.39	70 (10.1)	3.0 (435)	4.6	-6 (longitudinal)	

Tabella 1.1: Caratteristiche meccaniche di alcuni rinforzi [3].

I materiali compositi a **rinforzo particellari** sono rinforzati e induriti disperdendo uniformemente in essi diverse percentuali in volume di particelle fini di un materiale molto duro ed inerte, facilitando il processo di formatura, riducendo i costi di produzione (rispetto alle fibres) e in più si ha un comportamento isotropo del materiale. La fase dispersa può essere un metallo o un non-metallo; molto spesso vengono impiegati ossidi. Come descritto in precedenza, anche in questo caso il meccanismo di rafforzamento è dovuto alla interazione tra le particelle introdotte e le dislocazioni della matrice.

Le particelle rinforzanti possono essere utilizzate, come:

- **Riempitivi:** in tal caso, presentano un basso costo con la possibilità di essere aggiunti in grandi quantità (fino all'80%);
- **Rinforzanti:** migliorano caratteristiche meccaniche e termiche;
- **Diluenti:** migliorano la lavorabilità del composito.

È essenziale l'interazione tra la matrice e il rinforzo, infatti, se si ha una **matrice non polare** si avrà un'interazione nulla e le cariche hanno la funzione di diluente, se la **matrice è polare** si hanno dei legami chimici forti che aumenteranno le prestazioni del composito. Le particelle possono presentare una diversa forma, andando ad influenzare l'interazione tra le particelle e la matrice e di conseguenza le prestazioni:

- Forma arrotondata;
- Forma lamellare: come metalli, mica e talco;
- Forma aciculare.

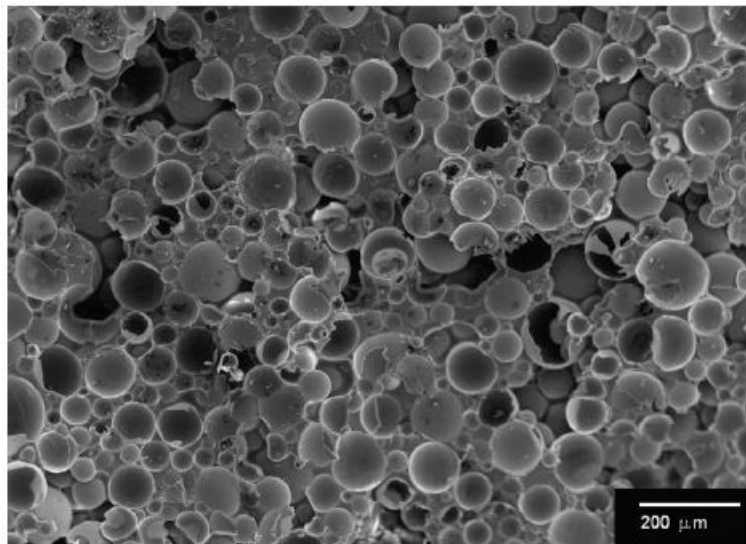


Figura 1.13: *Sferette di vetro utilizzate come rinforzo.*

Una particolare tipologia di composito con rinforzo particellare è il **Nanocomposito** [4]. Si tratta di una tecnologia che amalgama conoscenze: fisiche, chimiche e biologiche.

Il nanocomposito è definito come un solido multifase nel quale una delle fasi deve avere almeno una dimensione inferiore ai 100 nanometri, e si classifica in:

- Isodimensionali (0D): tutte e tre le dimensioni sono dell'ordine dei nanometri;
- Wiskers o nanotubi (1D): due dimensioni sono dell'ordine dei nanometri mentre la terza è di dimensioni superiori alle altre due;
- Lamellari(2D): una sola dimensione è dell'ordine dei nanometri

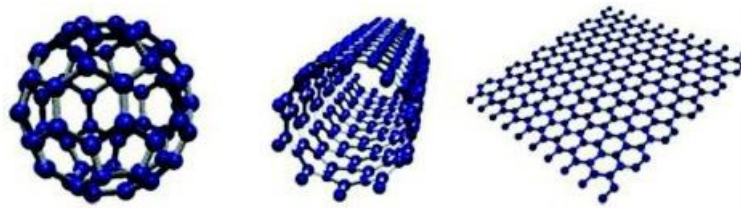


Figura 1.11: *Isodimensionali a sinistra, nanotubi al centro e lamellari a destra.*

Le nanoparticelle possiedono due caratteristiche fondamentali:

- 1) Le loro proprietà dipendono non solo dalla composizione ma anche dalla loro dimensione e forma;
- 2) Possiedono un elevatissimo rapporto superficie/volume che aumenta al diminuire della dimensione delle nanoparticelle.



Figura 1.14: *Lamborghini Terzo Millennio, grazie ai nanocompositi la scocca diventa una batteria; (Fonte www.lamborghini.com).*

I materiali compositi annoverati tra i più importanti, sono quelli in cui il rinforzo è costituito da **fibre**. Gli obiettivi della progettazione dei compositi fibro-rinforzati sono spesso quelli di ottenere elevate resistenze e/o rigidità con bassi pesi. Queste caratteristiche vengono espresse in termini di resistenza specifica e modulo specifico, i quali corrispondono, rispettivamente, al rapporto resistenza-peso specifico e modulo di elasticità-peso specifico. Vengono attualmente prodotti compositi fibro-rinforzati, realizzati con fibre e matrici a bassa densità, i quali offrono valori della resistenza e del modulo specifici eccezionali. Le caratteristiche meccaniche dei compositi rinforzati con fibre non dipendono soltanto dalle proprietà intrinseche delle fibre stesse, ma anche dal grado di sforzo ad esse trasmesso dalla matrice e dal rapporto tra la matrice e la fibra. A questo proposito, al fine di garantire il massimo trasferimento dei carichi possibile da parte della matrice, è fondamentale che il legame interfacciale tra la matrice e le fibre sia molto forte. Le **fibre corte**, possono essere disperse in elevate percentuali in termini di volume, ciò implica ottima lavorabilità con riduzione dei costi di processo, a scapito di un basso rapporto superficiale tra matrice e fibra che influisce in maniera negativa sulle proprietà meccaniche. Le **fibre lunghe**, invece, vantano proprietà meccaniche eccezionali grazie ad un elevato rapporto matrice-fibra, tuttavia necessitano di processi produttivi delicati che ne aumentano il costo.

Un'ulteriore classificazione può essere fatta in base al materiale di rinforzo utilizzato:

- Vetro;
- Carbonio;
- Kevlar.

La **Fibra di vetro** è l'elemento rinforzo più diffuso nel mondo per quanto riguarda i compositi a matrice polimerica. I principali vantaggi sono:

- Basso costo;
- Resistenza ad elevati carichi a rottura;
- Elevata resistenza agli agenti chimici;
- Elevate proprietà isolanti;
- Proprietà meccaniche fino al 50% della capacità di resistenza a $T < 375$ °C e fino al 25% a 538 °C.

Di contro, essa presenta:

- Scarsa resistenza ai carichi di fatica;
- Sensibilità all'abrasione durante la manipolazione che ne comporta un abbassamento della resistenza e una scarsa lavorabilità;
- Densità elevate;
- Elevata durezza: che ne comporta usura sia degli stampi che degli strumenti di taglio.

Due tipi di fibre di vetro sono comunemente utilizzate come rinforzo e sono: E-glass e S-G-glass, una terza è il C-glass utilizzata per applicazioni chimiche. L'E-glass è la fibra commercialmente più utilizzata nell'industria FRP (Fiber Reinforced Polymer) grazie ai suoi bassi costi. L'S-glass, invece, è stata impiegata in alcuni componenti degli aerei o per la realizzazione di missili, poiché essa presenta la più alta tensione a rottura tra tutte le fibre. Tuttavia, la differente composizione chimica e gli elevati costi manifatturieri, determinano un costo molto più elevato dell'E-glass. Sebbene in commercio, è presente una versione più economica denominata S-2-glass. Nella figura 1.14 è possibile osservare la composizione chimica delle due tipologie di fibra di vetro.

Type	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	B ₂ O ₃	Na ₂ O
E-glass	54.5	14.5	17	4.5	8.5	0.5
S-glass	64	26	—	10	—	—

Tabella 1.2: *Composizione chimica dell'E-glass e S-glass* [3].

A differenza del vetro comune, ossidi come Na₂O e K₂O sono presenti in basse quantità, ciò conduce ad un miglioramento della resistenza alla corrosione dovuta all'acqua che ne degraderebbe le caratteristiche meccaniche e una maggiore resistività superficiale. Le fibre di vetro sono amorfe e isotrope, cioè si hanno caratteristiche meccaniche identiche in tutte le direzioni, mentre la struttura di base è una catena a lungo termine di silicio, ossigeno e altri atomi disposti in modo casuale.

Il vetro è il peggior nemico di se stesso, per questo è necessario proteggere le fibre attraverso un trattamento chimico, denominato **Sizing**.

Il processo di Sizing è realizzato mediante l'uso di diversi composti chimici (di solito in base acquosa) che svolgono tre funzioni:

- Film Former;
- Agente di accoppiamento;
- Additivi.

Il **Film Former** migliora la lavorabilità, creando uno strato protettivo e lubrificante attorno la fibra che evita la rottura durante la lavorazione; ma ha anche il compito di tenere unite le fibre prima dello stampaggio. Ci sono centinaia di Film Former a base acquosa sul mercato, come: epossidico, poliuretano (PU), polipropilene (PP), acrilico, polietilene (PE), poliammide (PA), policarbonato (PC), polivinilacetato (PVAc).

L'**agente di accoppiamento** permette il legame della fibra (inorganica) con la matrice e il Film Former (organici). Gli agenti di accoppiamento più utilizzati sono gli Organosilani.

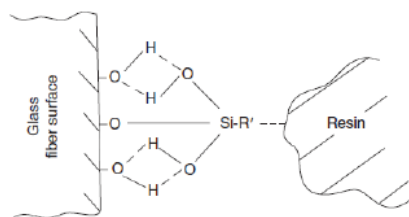


Figura 1.15: Azione dell'agente di accoppiamento tra fibra di vetro e resina.

Per il processo di Sizing vengono utilizzati dagli otto ai dieci **additivi** che hanno lo scopo di:

- Migliorare l'adesione sulle fibre;
- Lubrificare le fibre;
- Prevenire la decolorazione dei compositi;
- Dissipare le cariche statiche durante la lavorazione;
- Migliorare la processabilità delle fibre;
- Stabilizzare e impedire il deterioramento del sizing;
- Prevenire l'usura e le lacerazioni delle attrezzature.

È bene precisare che gli additivi rappresentano il 5-10% della composizione totale.

La **Fibra di Carbonio** è stata impiegata per la prima volta da Thomas Edison nel 1879, come incandescente della prima lampadina, in seguito sostituito con il Tungsteno. Il materiale venne commercializzato nel 1960 con un procedimento studiato da William Watt per la Royal Aircraft nel Regno Unito. Attualmente, sono presenti molteplici tipologie con un range di modulo dai 207 Gpa ai 1035 Gpa, le fibre di carbonio con basso modulo hanno bassa densità, basso costo, alta resistenza a trazione e compressione oltre che un'alta tensione a rottura se confrontate con a quelle ad alto modulo. I vantaggi presentati dal carbonio, sono:

- Resistenza specifica eccezionalmente elevata;
- Modulo specifico elevato;
- Coefficiente molto basso di dilatazione termica;
- Alata resistenza a fatica;
- Alta conduttività termica (superiore a quella del rame).

In riferimento agli svantaggi:

- Basso allungamento a rottura;
- Bassa resistenza agli urti;
- Alta conduttività elettrica che può causare “cortocircuito”;
- Costo elevato;
- Strutturalmente, la fibra di carbonio contiene una miscela di carbonio e grafite, il loro alto modulo è ottenuto grazie alla particolare forma della grafite, nella quale gli atomi di carbonio sono arrangiati in una struttura cristallografica esagonale avente i piani paralleli (vedi Figura 1.16).

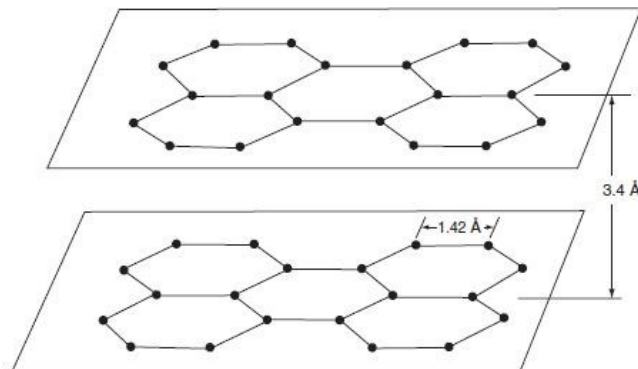


Figura 1.16: *Struttura cristallografica.*

Gli atomi di carbonio interagiscono mediante legami di tipo covalente mentre ogni piano, disposto indicativamente ad una distanza pari a 3.4 Angstrom (\AA), è legato da delle Forze di Van Der Waals, la cui caratteristica è di essere forze attrattive più deboli rispetto ai primi e ciò conferisce alla fibra di carbonio una forte anisotropia. Quest'ultima peculiarità, può essere sfruttata per ottenere forti caratteristiche unidirezionali o disporre le fibre in direzioni preferenziali in base agli impieghi che il composito dovrà assumere.

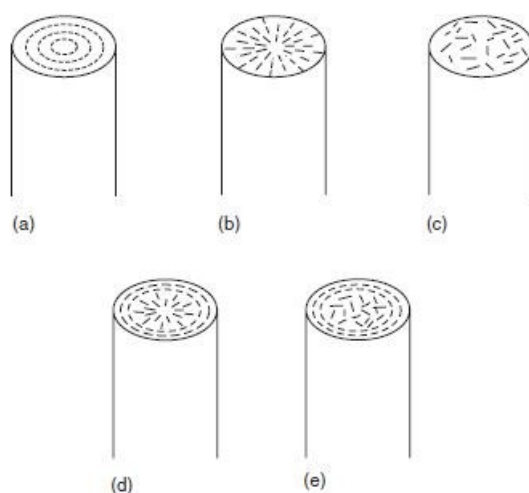


Figura 1.17: *Direzioni delle fibre: (a) circonferenziali, (b) radiali, (c) random, (d) radiali-circonferenziali, (e) random-circonferenziali [3].*

Le Fibre di Carbonio vengono realizzate partendo da due tipi di precursori: **Polyacrylonitrile (PAN)** e **Pitch**.

Il PAN è il precursore maggiormente utilizzato e ha generalmente modulo più basso del Pitch ma resistenza a trazione e compressione solitamente più elevata; questo perché le molecole grafitizzate del Pitch sono più sensibili ai difetti.

La struttura molecolare del PAN illustrata in Figura 1.18 (a), contiene un elevato numero di gruppi polari CN, arrangiati in maniera casuale lungo la catena. Il PAN che inizialmente risulterà bagnato, sarà tirato a 200°C - 300°C in aria per qualche ora, durante il quale le catene polimeriche si allineeranno lungo la direzione di sollecitazione. In questo step, denominato **stabilizzazione**, i gruppi CN saranno localizzati nella stessa posizione di origine ma realizzeranno una più stabile e rigida struttura a scala (Figura 1.18 (b)).

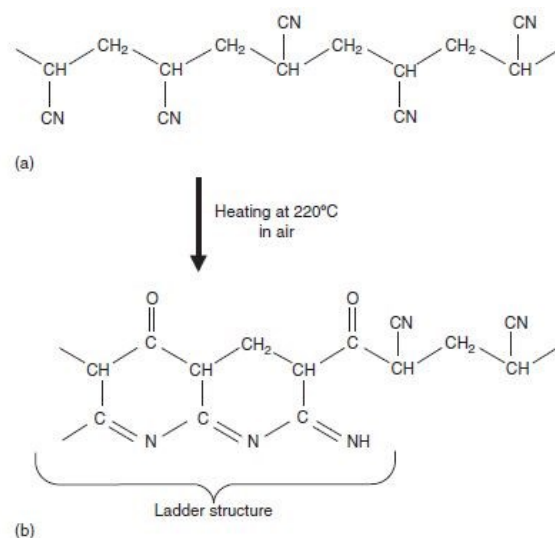


Figura 1.18: (a) Iniziale struttura del PAN; (b) Struttura del PAN dopo il processo di stabilizzazione [3].

Successivamente, il PAN subisce un processo di **carbonizzazione**, riscaldato a 5°C/min in un intervallo di temperatura compreso tra i 1000°C-2000°C, in un ambiente inerte. Anche in questa fase le fibre sono tirate per evitare grinze ed aumentare l'allineamento delle molecole. Attraverso questo trattamento si ha l'eliminazione dell'Ossigeno e dell'Azoto, con conseguente aumento in percentuale degli atomi di Carbonio. Tuttavia, gli atomi di carbonio dei piani vicini non sono perfettamente riordinati presentando un basso modulo e di conseguenza c'è la necessità di compiere un ulteriore trattamento denominato **grafitizzazione**. Tale processo ha la finalità ultima di ordinare maggiormente le molecole, donandogli una struttura grafica proporzionale alla temperatura. Attraverso questo step, si conferisce un elevato modulo ma bassa resistenza che sarà incrementato tensionando le fibre. Il PAN è una fibra di colore bianco con T_g di 80 °C e temperatura di fusione pari a 350°C. Tuttavia, subisce un impattante degrado al crescere della temperatura, e per questo, differentemente da quanto accade di consuetudine per il Pitch, il processo di **Melt Spinning** (impiegato nel Pitch) non è possibile realizzarlo.

Il **Pitch**, in italiano “**pece**”, è un termoplastico derivante dalla raffinazione del petrolio ed è più economico del PAN. Gli atomi di carbonio sono disposti ad anello ed hanno un basso peso molecolare. Attraverso un riscaldamento al di sopra dei 300 °C, fonde, dando

vita alla **mesofase**. Durante questa fase (che dura circa 44 ore), si ha una polimerizzazione delle molecole in lunghe strutture bidimensionali.

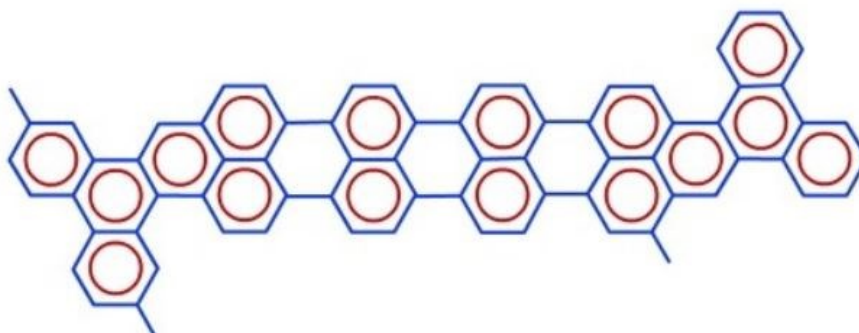


Figura 1.19: *Struttura bidimensionale del Pitch.*

La produzione della fibra di Pitch avviene quando è in uno stato di mesofase mediante il **Melt-Spinning**; questo processo tenderà ad allineare le molecole lungo la direzione di estrusione (vedi Figura 1.20).

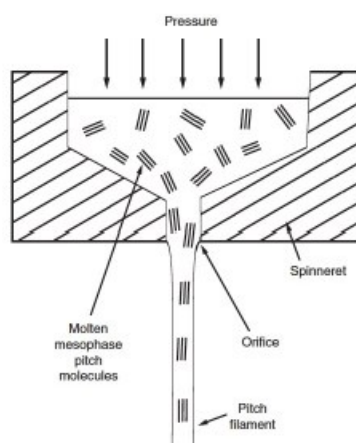


Figura 1.20: *Melt-Spinning.*

Tuttavia, date le proprietà scadenti e la natura termoplastica conferitegli con il Melt-Spinning, il Pitch necessita di trattamenti chimici che prendono il nome di **stabilizzazione** o **termoindurimento**, al fine di realizzare successivamente la **carbonizzazione**. La stabilizzazione è un processo di ossidazione piuttosto critico, poiché le fibre non ossidate rimarranno termoplastiche e potrebbero provocare una fusione indesiderata nella successiva carbonizzazione o sovra-ossidazione infragilendo il prodotto e riducendo la grafitizzazione del Pitch. Il processo è tipicamente svolto a 260 °C per 40-150 minuti.

Una volta terminata tale fase, il materiale sarà sottoposto al processo di **carbonizzazione**, come già affermato, con lo scopo di rimuovere le molecole indesiderate quali H₂O, CO₂, CO, N₂, SO₂, CH₄, H₂. Il processo viene effettuato in più fasi, iniziando a bassa temperatura 700°C per 1-5 minuti. Il conseguente aumento della temperatura conferirà al materiale una più elevata resistenza a trazione e un modulo più elevato. L'ultimo processo a cui il Pitch è sottoposto è la **grafitizzazione**. Questa ha come obiettivo, l'ulteriore eliminazione delle impurità e allineare i cristalli di carbonio nella direzione della fibra, attraverso un riscaldamento superiore ai 2500 °C in atmosfera inerte.

Al fine di incrementare le proprietà meccaniche e l'adesione matrice-rinforzo, le fibre di carbonio subiscono alcuni trattamenti:

- **L'ossidazione** superficiale, con lo scopo di eliminare lo strato debole esterno delle fibre e sostituirlo con uno strato più reattivo e rugoso così da favorire l'adesione meccanica (interlocking);
- **Trattamenti superficiali** com'è il caso delle fibre di vetro, migliorano la lavorabilità, aumentano la compatibilità con la matrice e prevengono le rotture. Con tale finalità, vengono utilizzati gli **agenti di accoppiamento**, gli **agenti bagnanti** e il **Sizing**.

Un'ultima tipologia di fibra molto impiegata nei settori: racing, aerospaziale e navale è quella **arammidica**, commercialmente conosciuta come **Kevlar**. Questo particolare materiale presenta una bassa densità e la più alta resistenza specifica tra le fibre, oltre che una elevata resistenza all'impatto. Come nel caso delle fibre di carbonio, anche quelle aramidiche hanno un coefficiente termico negativo e i principali svantaggi risiedono nella bassa resistenza a compressione e una bassa lavorabilità, specialmente durante l'operazione di taglio. La struttura molecolare (vedi Figura 1.21) è basata su lunghe catene polimeriche aromatiche (o alifatiche) che conferiscono al materiale una migliore stabilità chimica e termica, infatti sopra ai 400 °C non fondono né bruciano ma **carbonizzano** e grazie a questa particolare caratteristica vengono utilizzate come coperte termiche nell'Aerospace. Le molecole sono organizzate in lunghe **fibrille** che, a loro volta, compongono filamenti di 10-20 µm e questa formazione porta ad una spiccata

anisotropia. Sebbene la curva sforzo deformazione sia lineare, la rottura è preceduta da frammentazione longitudinale, distacco tra fibrille e possibile stiro localizzato.

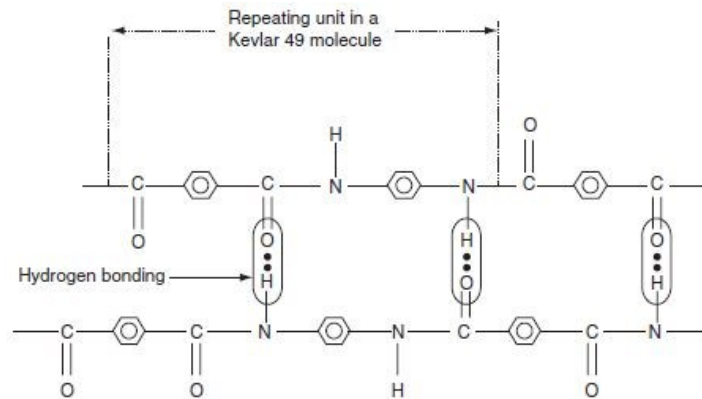


Figura 1.21: *Struttura chimica del Kevlar [3].*

Il processo produttivo consiste nell'estrusione di una soluzione acida del precursore tramite una filiera, nella quale il solvente acido viene rimosso mediante **neutralizzazione** con NaOH, ed applicando uno stiro a freddo si riesce ad ottenere molecole altamente orientate.

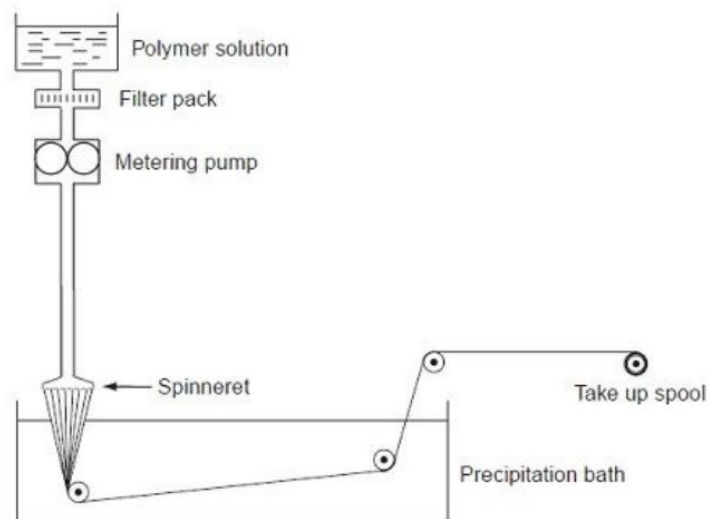


Figura 1.22: *Filiera del Kevlar; (Fonte Kevlarweb.wordpress).*

I trattamenti che subiscono le fibre aramidiche sono gli stessi delle fibre di carbonio: nello specifico, l'**ossidazione superficiale** riduce la resistenza a trazione, tuttavia tende

a migliorare la resistenza trasversale del composito e i **gruppi reattivi** contribuiscono a incrementare l'interazione con la matrice.

Dopo aver ampiamente disquisito sui materiali disponibili ed impiegati come rinforzo, è necessario enucleare le tipologie e le caratteristiche di filamento che vengono utilizzate all'interno del composito. Il filamento ha dimensioni tipiche di 5-15 μm , sovrapposto al fine di ottenere un **tow** (o **roving**) molto più resistente e con un'ottima flessibilità di applicazione in quanto per i tessuti fini sarà necessario impiegare tow di **1-3K** (da 1000-3000 filamenti) mentre per i più spessi, anche i **50K**. Un'ulteriore tipologia risiede nello **yarn** (**filato**), composto da filamenti tenuti uniti mediante torsione.

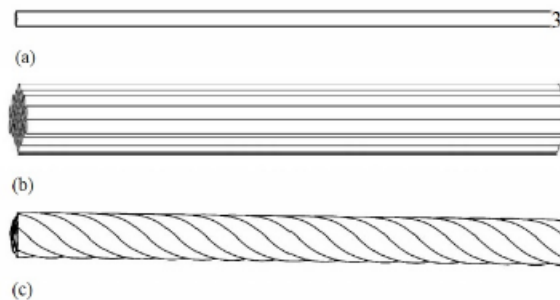


Figura 1.23: a) Filamento; b) Roving o Tow; c) Yarn.

Al fine di aumentare l'interazione tra fibra e matrice, cercando di enfatizzare certe caratteristiche piuttosto che altre, sono state realizzate differenti **architetture**. Nella fattispecie, con il termine architetture si suole intendere delle particolari disposizioni delle fibre all'interno di un composito che ne influenzeranno le proprietà, le performance, i meccanismi di rottura ma anche la lavorabilità e l'impregnazione. La disposizione può essere: **lineare, 2D o 3D**.

L'architettura a fibre lineari si ottiene realizzando dei piani aventi i filamenti tutti nella stessa direzione, utilizzati per:

- **Laminati unidirezionali:** nei quali l'orientazione delle fibre di ogni piano corrono lungo la stessa direzione $[\theta]_n$;
- **Laminati angle-play:** le fibre di ogni piano sono orientate alternativamente a $+\theta$ e $-\theta$;

- **Laminati cross-ply:** le fibre sono orientate alternativamente a 0° e 90° $[0/90/0/90/0/90]$ o semplicemente $[0/90]_{n=3}$;

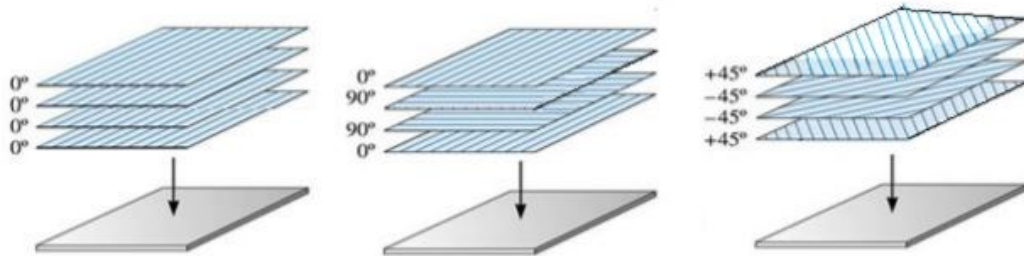


Figura 1.24: A sinistra si ha il laminato unidirezionale, al centro l'angle-ply e a destra il cross-ply [5].

- **Laminati simmetrici:** per ogni strato al di sopra del piano intermedio del laminato ce n'è uno identico alla stessa distanza sotto al piano, es. $[0/45/90/90/45/0]$ oppure $[0/45/90]_s$;
- **Laminati quasi-isotropici:** hanno fibre a $[0/\pm 45/90]$ o $[0/\pm 60]$, es. $[0/\pm 45/90]_{16s}$ $[0/\pm 60]_{10s}$ $[\pm 45/0/90]_{32s}$.

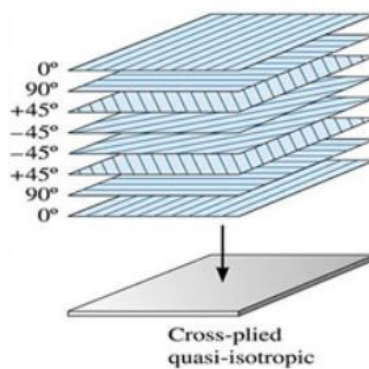


Figura 1.25: laminato quasi-isotropico (fonte quartus.com)

Le **architetture 2D**, invece, possono essere orientate in due o più direzioni sul piano. Il vantaggio che ne deriva, è un miglioramento delle proprietà trasversali rispetto all'uso

dei lineari; di contro tutte le proprietà longitudinali saranno inferiori rispetto a quelle di un laminato unidirezionale.

Esistono tre tipologie di architettura 2D:

- **Tessuti biassiali (woven fabric);**
- **Tessuti a maglia (knitted fabric);**
- **Tessuto intrecciato (braided fabric).**

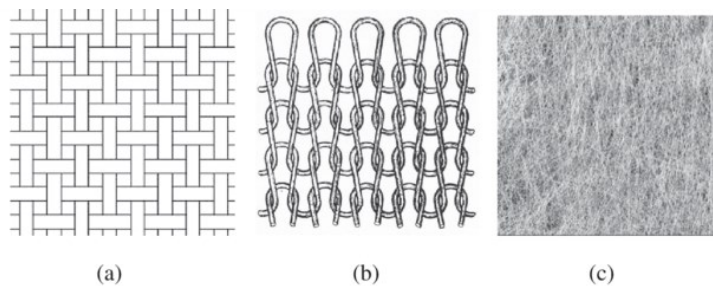


Figura 1.26: a) *Woven fabri*, b) *Knitted fabric*, c) *Braided fabric*; (Fonte *potentiality of texture...*).

I **tessuti biassiali** vengono realizzati intrecciando due fili ad angolo retto l'uno con l'altro, in un unico piano, per creare un singolo strato 2D o biassiale. La direzione parallela alla direzione della lunghezza del tessuto è chiamato **ordito**, mentre la direzione perpendicolare viene chiamata **trama**.

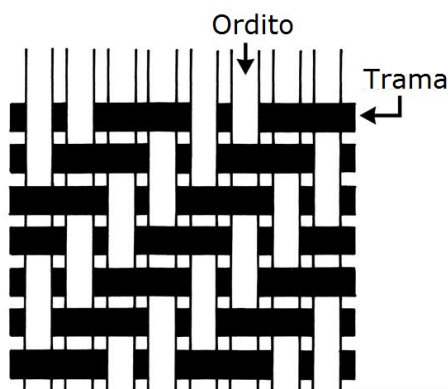


Figura 1.27: *Esempio di trama e ordito*; (Fonte *www. Skyscooter.it*).

I tipi di tessitura maggiormente utilizzati sono:

- **Plain weave (armatura)**: ogni filo di ordito passa alternativamente sopra e sotto i fili di trama;
- **Twill weave (saia)**: uno o più fili di trama si intrecciano con due o più fili di ordito;

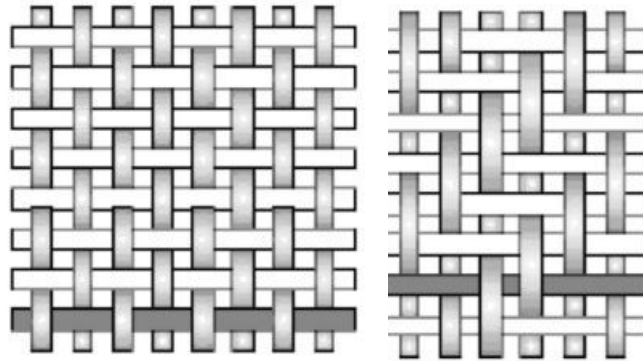


Figura 1.28: *esempio di plain e twill weave;*

- **N-Satin weave (raso)**: simile a twill, ma con intrecci più distanziati. Il numero n di fili tra le intersezioni è di solito 4, 5 o 8;
- **Basket weave (panama)**: simile al plain, ma con gruppi di due più fili di trama e ordito che si intrecciano alternativamente.

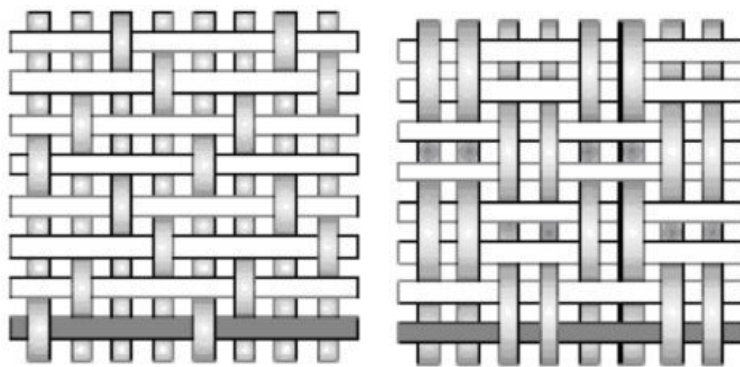


Figura 1.29: *Esempio di Satin e Basket weave.*

Lo stile di tessitura influenza:

- **Drappabilità**: ovvero quanto bene il tessuto può essere adattato sulla superficie dello stampo, specialmente agli angoli;

- **Stabilità:** che determina lo spostamento della fibra nel piano del tessuto durante il flusso della resina o durante il drappaggio;
- **Porosità:** che dipende dalla quantità e grandezza degli spazi tra i fasci e influenza la permeabilità del tessuto;
- **Disallineamento (crimp):** vale a dire, l'ondulazione fuori dal piano delle fibre.

Da un confronto del Plain weave con il Satin, è possibile osservare che quest'ultimo ha molti meno intrecci ed è più consono per seguire forme complesse, con maggiore **drappabilità**. Il Plain weave ha più disallineamenti, questo determina una minore sensibilità agli spostamenti, ad esempio durante i processi HP-RTM (High pressure Resin Transfer Molding) essendo per giunta più stabile, è consigliato per processi a fibra secca.

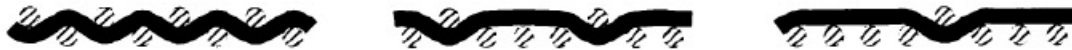


Figura 1.30: Esempio di intreccio.

Le architetture 3D sono realizzate mediante tessitura o cucitura nella direzione dello spessore di un tessuto, in questo modo un composito con architettura 3D presenta buone proprietà nella direzione dello spessore. Inoltre, si registra un aumento della resistenza alla delaminazione e un miglioramento della resistenza all'impatto e alla fatica. Esistono 3 tipologie di realizzazione:

- **Stitching (cucitura):** presenta numerosi vantaggi rispetto alla tessitura o alla lavorazione a maglia poiché può essere utilizzata sia con tessuti asciutti che con tessuti impregnati di resina, ma anche in aeree locali per prevenire la delaminazione in prossimità dei fori;
- **Tufting:** è la versione più semplice degli approcci di cucitura ed è specificatamente progettato per **RTM/Infusione**, e prevede l'inserimento di filamenti aggiuntivi, tramite un ago singolo attraverso gli strati di una preforma secca;
- **Z-Pinning:** vengono inseriti dei pin (rinforzi) attraverso lo spessore di una pila di strati preimpregnati o secchi per donare rinforzo lungo la direzione Z. Con frazioni

di volume di pin pari al 4% è possibile ottenere un miglioramento significativo della resistenza alla delaminazione, agli urti a bassa velocità e al danneggiamento.

1.2 Carbon PA

Il Carbon PA è un termoplastico avente una matrice in poliammide rinforzata per il 20% da fibre corte di carbonio PAN. Questo particolare materiale è ottimo per le applicazioni industriali che necessitano di un'elevata rigidità grazie all'elevato modulo. Inoltre, essendo termoplastico e di conseguenza riciclabile, esso risulta essere compatibile a livello ambientale oltre che presentarsi ottimo per sostituire i metalli grazie al suo basso peso, alla resistenza agli impatti e all'infiammabilità. Gode inoltre, di buona resistenza ai fluidi, dunque ideale per molteplici applicazioni tra cui: l'Oil and Gas, il Racing, l'Aerospace e l'Automotive. Il composito è stato sviluppato da Roboze, azienda italiana leader nel 3D printing industriale e viene utilizzato come bobina per la stampa 3D differenziandosi dalle altre aziende che producono Carbon PA per le elevate caratteristiche meccaniche ottenibili così come per l'elevato quantitativo in percentuale di fibra corta.

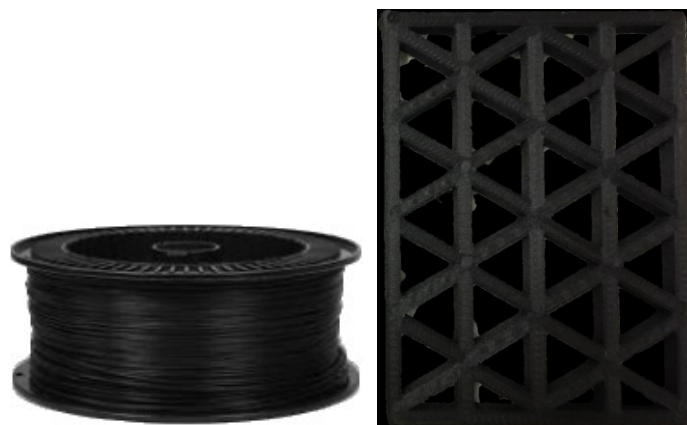


Figura 1.31: *Bobina di Carbon PA e struttura Isogrid in Carbon PA realizzata mediante 3D printing.*

Le caratteristiche del materiale sono le seguenti:

THERMAL PROPERTIES	Test Method	Value
HDT (load 1.82 MPa)	ASTM D648	200°C
Continuous Service Temperature	UL746B	150°C
OTHERS	Test Method	Value
Density	ISO 1183	1,4 g/cm ³
Water Absorption	ISO 3167A	< 0,3 %
Surface Resistance	IEC 60093	< 1 e+2 ohm

Tabella 1.3: *Proprietà presentate dal produttore.*

	MECHANICAL PROPERTIES	Test Method	Build Orientation		Infill density
			xz	xy	
TENSILE	Tensile Strength Ultimate	ASTM D638	138 MPa	136 MPa	100%
	Tensile Modulus	ASTM D638	14.7 GPa	15.5 GPa	
	Elongation	ASTM D638	1,71%	1,62%	
FLEXURAL	Flexural Strength	ASTM D790	-	100 MPa	100%
	Flexural Modulus	ASTM D790	-	5 GPa	

Tabella 1.4: *Proprietà meccaniche dal produttore.*

Come descritto dal produttore, tutti i test sono stati eseguiti mediante provini stampati in due orientazioni: **EDGE (XZ)**, cioè la deposizione avviene a novanta gradi dal piatto di stampa, mentre il secondo **FLAT (XY)** è ottenuto depositando il materiale parallelamente al piano. Le caratteristiche meccaniche di trazione descritte in tabella 1.4 sono state rilevate seguendo la Norma Internazionale **ASTM D638** adatta per i materiali plastici rinforzati e non, mentre il provino viene realizzato rispettando specifiche dimensioni in

funzione dello spessore. Oltre a determinare il modulo, la tensione a rottura e l'allungamento, è necessario individuare il coefficiente di Poisson che in questo caso è pari a 0.35.

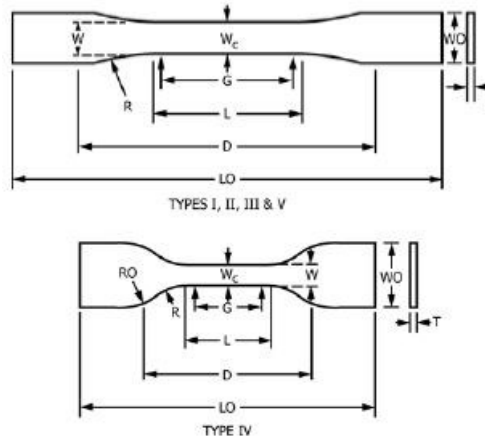


Figura 1.32: *Provini ASTM D638* [6];

Dimensions (see drawings)	7 (0.28) or under		Over 7 to 14 (0.28 to 0.55), incl		4 (0.16) or under		Tolerances
	Type I	Type II	Type III	Type IV ^B	Type V ^{C,D}		
W—Width of narrow section ^{E,F}	13 (0.50)	6 (0.25)	19 (0.75)	6 (0.25)	3.18 (0.125)	±0.5 (±0.02) ^{B,C}	
L—Length of narrow section	57 (2.25)	57 (2.25)	57 (2.25)	33 (1.30)	9.53 (0.375)	±0.5 (±0.02) ^C	
WO—Width overall, min ^G	19 (0.75)	19 (0.75)	29 (1.13)	19 (0.75)	...	+ 6.4 (+ 0.25)	
WO—Width overall, min ^G	...	...	...	...	9.53 (0.375)	+ 3.18 (+ 0.125)
LO—Length overall, min ^H	165 (6.5)	183 (7.2)	246 (9.7)	115 (4.5)	63.5 (2.5)	no max (no max)	
G—Gage length ^I	50 (2.00)	50 (2.00)	50 (2.00)	...	7.62 (0.300)	±0.25 (±0.010) ^C	
G—Gage length ^I	...	...	...	25 (1.00)	...	±0.13 (±0.005)
D—Distance between grips	115 (4.5)	135 (5.3)	115 (4.5)	65 (2.5) ^J	25.4 (1.0)	±5 (±0.2)	
R—Radius of fillet	76 (3.00)	76 (3.00)	76 (3.00)	14 (0.56)	12.7 (0.5)	±1 (±0.04) ^C	
RO—Outer radius (Type IV)	...	...	...	25 (1.00)	...	±1 (±0.04)

Tabella 1.5: *Dimensione standardizzate dei provini ASTM D638* [6].

Per quanto riguarda la Norma ASTM D790, ha lo scopo di determinare le proprietà a flessione dei materiali rinforzati e non di tipo plastico. Questo test denominato a tre punti, proprio a causa del numero di contatti tra supporto e provino, ha lo scopo di determinare oltre la tensione a flessione, anche: la tensione a flessione nel momento della rottura, la deformazione a flessione oltre che quella a rottura, l'alto modulo ma anche l'isolamento elettrico.

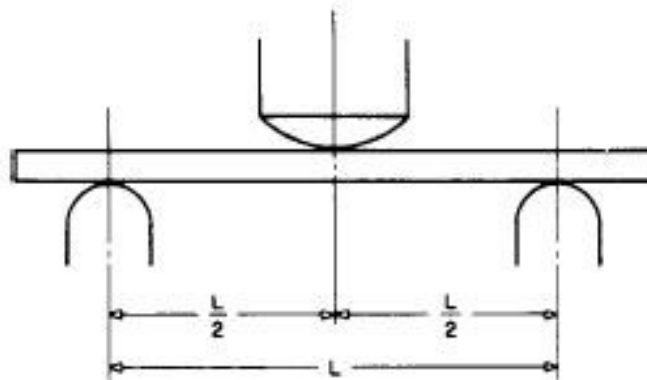


Figura 1.33: Prova ASTM D790 [7].

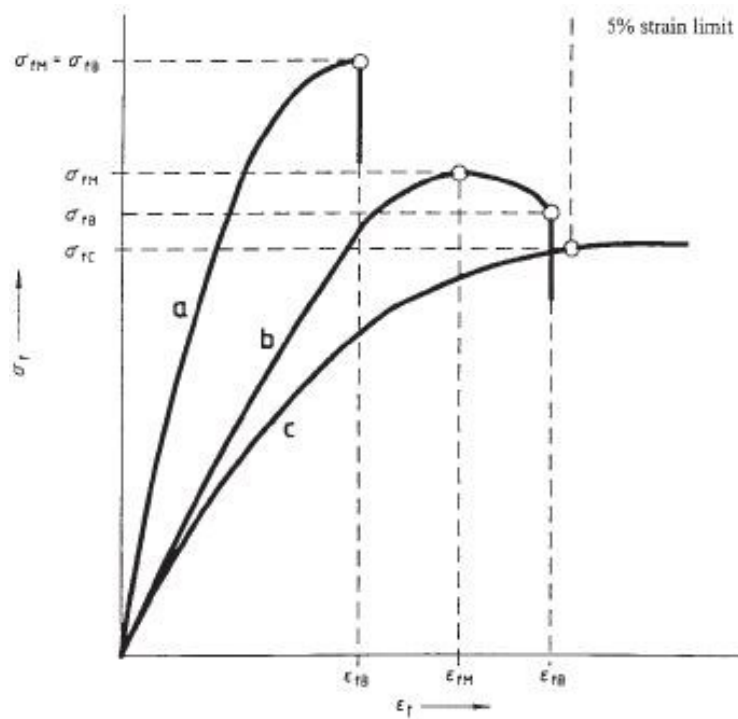


Figura 1.34: Grafico Tensione e deformazione presente nell'ASTM D790 [6].

Come si può osservare dalla curva **b** nella Figura 1.31, la tensione massima è differente da quella a rottura.

1.3 Metodi di realizzazione dei compositi

Per il successo di un materiale o di un prodotto, i metodi produttivi devono essere affidabili ed economicamente convenienti al fine di poterli impiegare in un numero crescente di settori. La maggior parte dei processi produttivi dei compositi a matrice polimerica fibrorinforzati verte sull'utilizzo di resine termoindurenti grazie alle enormi proprietà meccaniche ottenibili, alla facilità con cui il composito è possibile lavorarlo ma anche perché storicamente sono state le prime ad essere sviluppate (già dagli anni '40) e le attrezzature richieste hanno un costo sensibilmente inferiore. Si consideri infatti che le resine termoindurenti sono liquide a T ambiente ed hanno quindi una viscosità molto più bassa delle termoplastiche e di conseguenza come già sottolineato in precedenza possono essere lavorate più facilmente. Lo svantaggio principale è legato alla non riciclabilità dei termoindurenti al contrario dei termoplastici e conseguentemente, una volta ottenuto un determinato componente esso non potrà essere rimodellato e rilavorato. Il primo processo produttivo utilizzato per la realizzazione dei materiali compositi fu l'**Hand Layup** consistente nel posizionare la fibra in uno stampo per poi inserire la resina e compattarla mediante rullo, questo storico processo viene ancora impiegato per applicazioni a basso costo e con ridotte performance. Successivamente, sono stati sviluppati dei sistemi molto più performanti utilizzati però quando i ratei produttivi richiesti, risultano non troppo elevati e prendono il nome di processi di **formatura**. Questi sono:

- **Bag Molding**: si tratta di un processo manuale in ambienti controllati (in termini di umidità, temperatura e polvere) in cui le pelli di Prepreg vengono fatte aderire in uno stampo per poi essere inserite in autoclave a temperature e pressioni controllate;
- **RTM**: è una tecnica che permette di produrre parti complesse in maniera automatizzata;
- **Filament Winding**: sistemi anch'essi automatizzati, ma presentanti vincoli di forma, dimensione e di qualità dei componenti.

Il presente capitolo ha l'obiettivo di descrivere i principali processi di realizzazione dei compositi a matrice polimerica sino alla Stampa 3D (descritta nel capitolo successivo) con la finalità ultima di eseguire una comparazione, e mettere in luce i campi di applicazione.

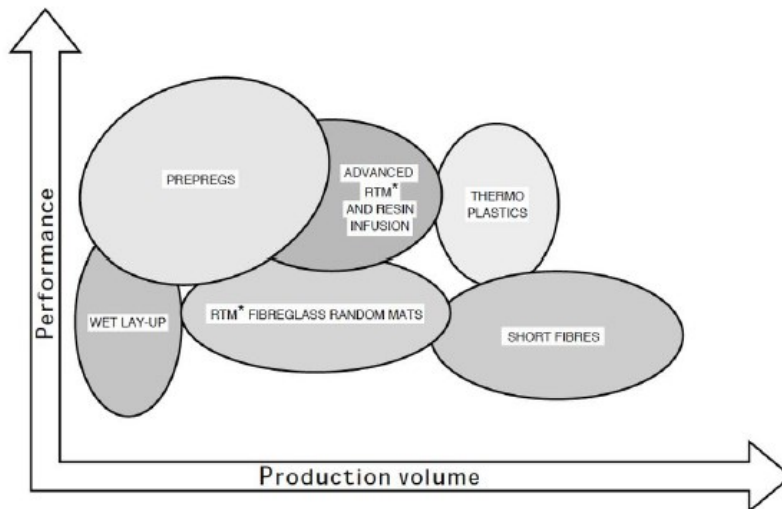


Figura 1.35: Grafico in cui vengono inseriti i processi di realizzazione dei compositi in funzione delle performance e dei volumi di produzione.

1.3.1 Bag Molding

Il Bag Molding è un processo basato sulla deposizione manuale di un **preimpregnato** sulla superficie di uno stampo, seguendo una determinata sequenza di laminazione (**ply-book**).

Prima di procedere al dettaglio del processo, è necessario definire il preimpregnato, un materiale composito nel quale una fibra è impregnata con una matrice di resina termoplastica o termoindurente, parzialmente indurita. Per evitare la completa **cura** in luoghi inadatti, il preimpregnato deve essere mantenuto in un luogo fresco a -18 °C.



Figura 1.35: Step di processo del Bag Molding.

Il primo step che viene eseguito dopo la preparazione degli utensili è il taglio del preimpregnato che può essere effettuato in maniera manuale mediante dei **cutter** o automatizzata attraverso delle fustellatrici di tipo: **Beam** o **Roller**.

Visto l'elevato costo dei prepreg, il taglio deve essere volto alla riduzione degli sfridi, per questo viene fatta un'operazione di **nesting** cioè si cerca di ottimizzare il taglio al fine di sprecare meno materiale possibile, ed è per questo che si parla di sfridi.



Figura 1.36: Nesting (fonte jetcamcomposite.com).

Il successivo step è la **laminazione** cioè la fase di deposizione delle lamine di preimpregnato sullo stampo in un ambiente controllato che può essere eseguita manualmente o in maniera automatizzata. La sequenza di laminazione è tipicamente riportata nei **ply-book** all'interno dei quali sono rintracciabili il numero di identificazione delle lamine, le dimensioni e la posizione in pianta sullo stampo.

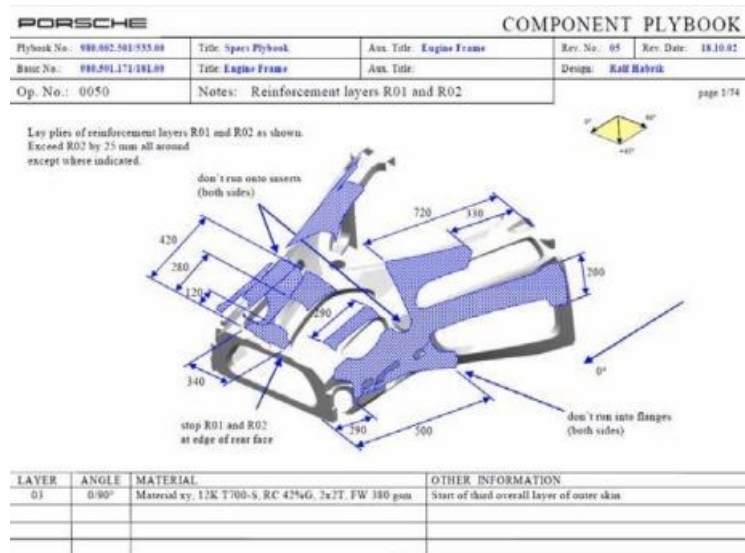


Figura 1.37: Esempio di ply-book.

La buona riuscita di un processo di laminazione oltre che dall'operatore, è influenzata dal **tack** (quanto la resina è appiccicosa) e dalla drappabilità del materiale che aumentano all'aumentare della

temperatura e, spesso, si utilizzano pistole termiche per riscaldare localmente il preimpregnato e facilitarne la stesura.

Una volta laminato il pezzo, viene ricoperto da vari strati quali:

- 1) **Peel-ply**: Tessuto di vetro che conferisce alla superficie la rugosità ottimale per successivi incollaggi;
- 2) **Film separatore microforato**: Film in PTFE® che consente la separazione dal laminato di tutte le pellicole costituenti il sacco; i microfori consentono il passaggio della resina in eccesso, dell'aria e delle sostanze volatili che fuoriescono dal laminato durante il processo di polimerizzazione. In assenza di microfori è possibile evitare completamente la perdita di resina. Spessore 0,05mm;
- 3) **Bleeder**: materassino in poliестere, fibra di vetro o cotone atto ad assorbire la resina in eccesso che fuoriesce dal laminato;
- 4) **Breather (assorbitore)**: simile al Bleeder ma possiede maggiore porosità. Ha la funzione di distribuire uniformemente il vuoto in tutto il sacco, permette la fuoriuscita di aria e sostanze volatili, consente di evitare che pieghe e difetti di giacitura del sacco da vuoto possano essere trasferite al laminato sottostante. Una funzione ulteriore è quella di proteggere il sacco da vuoto da eventuali spigoli dello stampo che potrebbero essere la causa di rotture accidentali;
- 5) **Sacco da vuoto**: Film polimerico, tipicamente nylon, fortemente espandibile per potersi conformare facilmente all'assieme stampo, laminato e altri materiali di consumo sottostante. Per cicli di polimerizzazione ad alte temperature (superiori ai 200°C) si utilizzano film di poliammide. Al sacco da vuoto sono applicate anche le valvole che permettono la fuoriuscita dell'aria e di tutte le sostanze volatili.

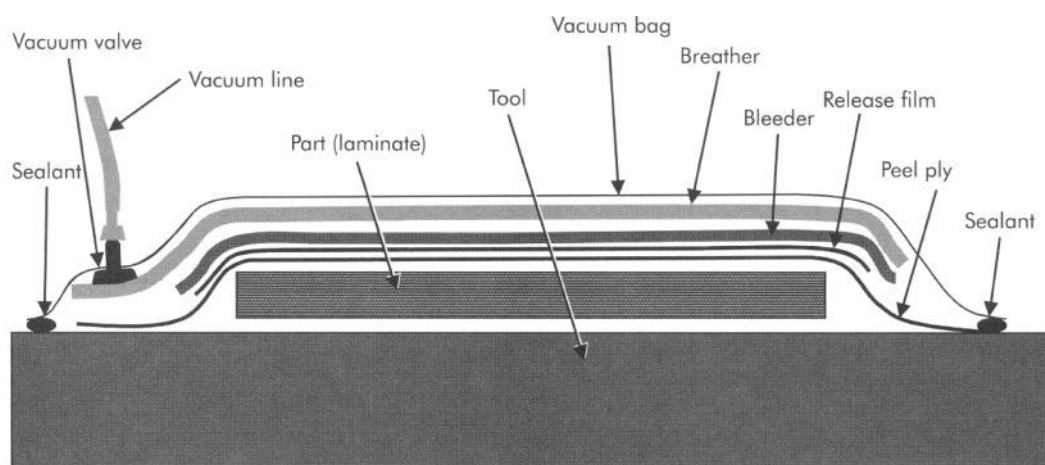


Figura 1.38: Vari strati che formano il sacco da vuoto.

Una volta realizzato il sacco da vuoto, questo viene posto all'interno dell'autoclave, un sistema che permette di mettere in pressione il laminato e di aumentarne la temperatura seguendo una determinata rampa. L'autoclave ha costi d'investimento e di funzionamento piuttosto elevati, e a causa del rateo produttivo tipicamente basso è difficile ammortizzare gli investimenti iniziali. Dunque, per ovviare a tale problema, è possibile inserire più componenti contemporaneamente, a patto che abbiano cicli di cura compatibili, in alternativa è possibile effettuare il **co-curing**, processo che prevede l'incollaggio delle due pelli contemporaneamente. All'interno dell'autoclave avviene la polimerizzazione, essa conferisce la forma e la struttura finale al componente per effetto combinato di temperatura e pressione. Le caratteristiche meccaniche del laminato dipendono sia dal ciclo di polimerizzazione della matrice che dalla presenza di vuoti in essa, infatti, la riduzione del contenuto di vuoti avviene mediante l'applicazione del vuoto (aspirazione) e della pressione esterna e conferisce al materiale migliori prestazioni meccaniche in termini di resistenza.



Figura 1.39: *Esempio di autoclave.*

Successivamente, avverrà la rimozione del sacco da vuoto, dello stampo e della pellicola esterna del pezzo al fine di conferire maggior lucentezza all'elemento stesso. Una volta ottenuto il pezzo, in base alla volontà del cliente e dalle specifiche richieste vengono svolti dei trattamenti di finitura superficiale oltre che dei test non distruttivi.

1.3.2 LCM

Nelle tecnologie LCM (**Liquid Composite Molding**) una resina termoindurente premiscelata viene iniettata su una preforma di fibra secca posizionata in uno stampo, grazie al flusso della resina nella preforma, si riempiono gli spazi vuoti tra le fibre, eliminando l'aria intrappolata. Questi metodi, generalmente, garantiscono tempi di produzione più brevi rispetto ai preimpregnati oltre che elevata qualità superficiale e tolleranze ristrette. Inoltre, l'utilizzo di preforme secche porta a vantaggi non indifferenti nel design dei componenti e del processo. I processi LCM si possono dividere in tre grandi famiglie:

- **RTM (Resin Transfer Molding);**
- **VARTM (Vacuum Assisted Resin Transfer Molding);**
- **RFI (Resin Film Infusion).**

Tra i vantaggi nell'uso di queste tecnologie c'è sicuramente il basso costo delle attrezzature che le rendono appetibili per il settore automotive e rappresentano una valida alternativa al processo in autoclave se il rateo produttivo si aggira tra i 10000 e i 50000 pezzi/anno.

Il Resin Transfer Molding è una tecnologia utilizzata negli anni '80 che nonostante fosse stata capace di essere utilizzata per la produzione di tutte le componenti di un aereo, è stata progressivamente abbandonata e riscoperta 20 anni dopo. Tra i processi LCM, l'RTM è attualmente il più utilizzato.

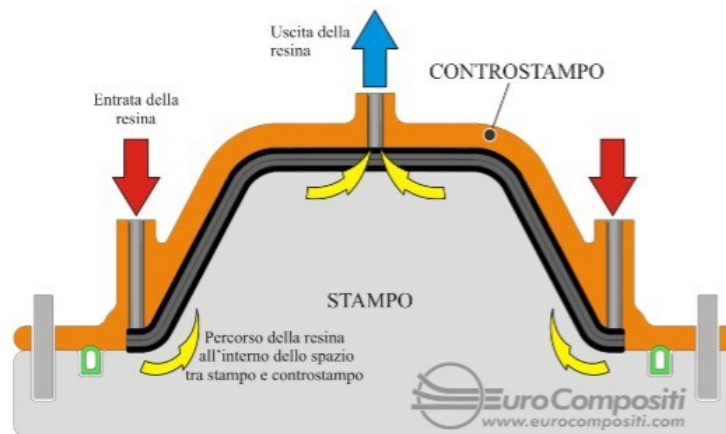


Figura 1.40: RTM; (Fonte www.eurocompositi.com).

Il primo step da eseguire nel processo è il **taglio**, ed è esattamente lo stesso visto in precedenza per i preimpregnati, con l'unica differenza che il taglio della fibra secca prevede maggiori attenzioni per evitare lo sfibramento. Successivamente, si ha la fase di **preformatura** che costituisce una delle parti più importanti dell'intero processo, specialmente quando il volume di produzione è medio-alto, una preforma industrializzata permette di ammortizzare i costi in tempi relativamente brevi, questa viene preparata separatamente e costituisce il negativo del prodotto finale, semplificando le operazioni di

stampaggio e riducendo costi e tempi del processo. In questa fase i layer di materiale verranno fatti aderire sullo stampo e verrà inserito un **binder** imprescindibilmente compatibile con la matrice, che può essere termoplastico o termoidurente, facendo attenzione al primo per le temperature e al secondo, durante la polimerizzazione. Lo scopo principale del binder è quello di far mantenere al laminato la forma adeguata per poi essere inserito facilmente nello stampo, gioca un ruolo cruciale anche nella limitata deformazione del tessuto durante il flusso di resina. Le caratteristiche da considerare in una preforma sono:

- **Impregnazione:** la preforma deve essere completamente impregnabile, deve avere spazi vuoti dalla resina liquida alla più bassa pressione possibile e nel minor tempo possibile;
- **Bagnabilità:** la resina liquida deve bagnare completamente le fibre in modo da rimuovere completamente l'aria e garantire buona adesione superficiale. Ciò dipende dall'energia relativa tra resina e fibre (ovvero dal sizing e dal binder);
- **Conformabilità:** la geometria della preforma deve essere la più vicina possibile a quella dello stampo di formatura. Se ci sono gap tra loro, si formano i cosiddetti **racetracking channel**.
- **Resistenza alla stramatura:** vicino al punto di ingresso della resina può verificarsi la stramatura del tessuto o lo spostamento delle fibre corte se si usano i **mat**. Ciò dipende dal binder e dall'architettura;
- **Manipolazione:** la preforma è solitamente sottoposta a movimentazione manuale o automatizzata e deve essere in grado di resistere alle sollecitazioni indotte.

Un aspetto molto importante nell'RTM è la scelta del sistema di resina, poiché deve assicurare bassa viscosità e tempo di gelificazione sufficientemente lungo così da garantire la completa impregnazione della preforma e l'estrazione dell'aria, ma anche ridurre il più possibile i tempi di cura al fine di ottenere alti ratei produttivi. Il flusso di resina in questi processi è dato dalla legge di Darcy:

$$\vec{v} = -\frac{1}{\mu} [K] \nabla P$$

\vec{v} = vettore velocità della resina;

$[K]$ = tensore di permeabilità del mezzo poroso;

μ = viscosità della resina;

∇P = gradiente di pressione.

A livello microscopico, si ha il fenomeno della capillarità che per verificarsi, il liquido deve creare un menisco con angolo inferiore a 90°, infatti, la resina epossidica e le fibre di carbonio tipicamente, generano un angolo di 20°. Questo fa sì che durante l'impregnazione si formi un menisco concavo che si muoverà verso l'interno per minimizzare l'energia superficiale.

Durante il processo la resina continuerà a muoversi per effetto della tensione superficiale fino a quando il menisco non diventa piatto (T5) e non esiste più un gradiente di pressione che tende a compattare le fibre diminuendo la porosità del mezzo. Per permettere la continuità del processo, il flusso deve toccare una nuova fibra (T6) e ciò dipende dalla distanza tra le fibre e dalla percentuale di volume delle fibre.

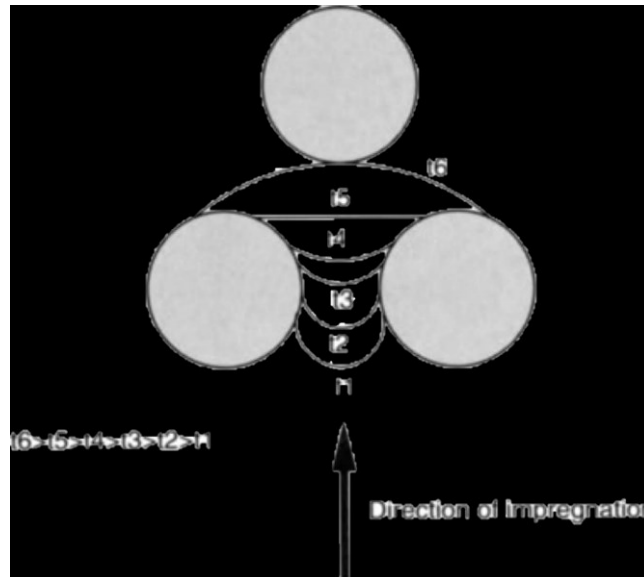


Figura 1.41: *Interazione tra il flusso di resina e la fibra.*

Il fronte del flusso può non avere un andamento regolare all'interno del filamento per via della disomogeneità dello stesso, per evitare l'intrappolamento dell'aria, si deve cercare di mantenere il fronte uniforme ed evitare flussi indesiderati.

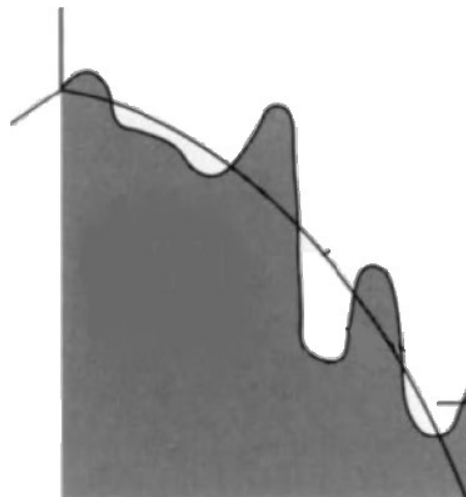


Figura 1.42: *Fronte d'onda irregolare che porta alla formazione di vuoti.*

Esistono molteplici tipologie di RTM che variano per pressione, tempo ciclo e tonnellaggio pressa:

	RTM	HP-RTM	Light RTM
Pressione di iniezione	40 bar	150 bar	<10 bar
Pressione nello stampo	10-30 bar	70-120 bar	3-4 bar
Tempo ciclo	20-30 minuti	3/6 minuti	30/60 minuti
Tonnellaggio pressa	1000	2500	500
Contenuto di resina	32%	30%	35%

Tabella 1.6: *Tipologie di RTM, High Pressure RTM e Light RTM.*

Oltre alle tre sopracitate tipologie di RTM, è presente una diversa tipologia in fase di sviluppo che prende il nome di **Compression-RTM**. Questo particolare processo si basa su un'impregnazione di tipo **through thickness** (lungo z) per via della presenza del gap sopra la preforma, questo riduce notevolmente i tempi di impregnazione poiché solitamente lo spessore è molto minore delle altre dimensioni.

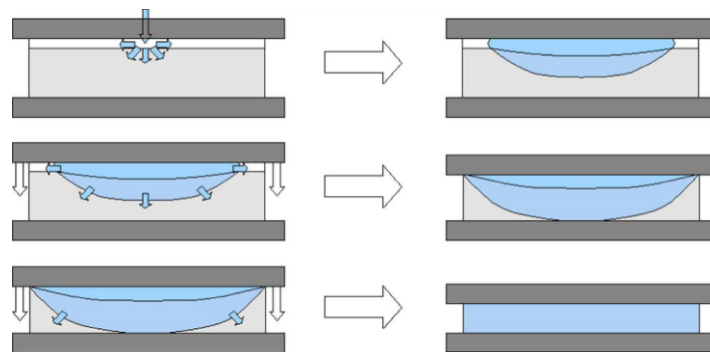


Figura 1.43: *Compression-RTM.*

È bene sottolineare che non tutta la resina fluisce nel gap prima di entrare nella preforma, infatti una parte penetrerà anche senza muovere il controstampo e questo conduce ad una impregnazione non solo lungo z ma anche nelle altre direzioni.

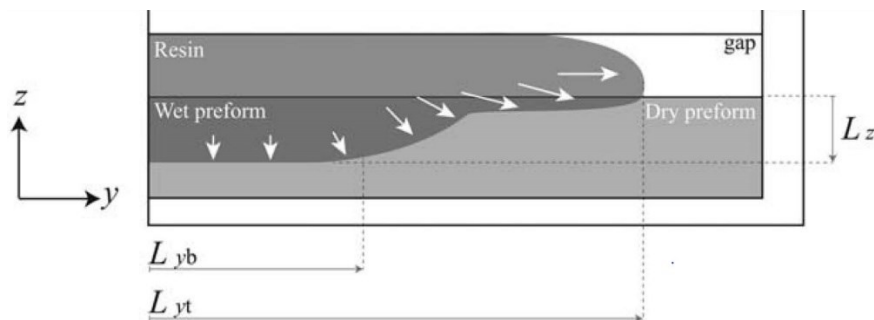


Figura 1.44: *Flusso di resina nel Compression-RTM.*

I due fattori principali su cui si può agire per regolare il flusso nel processo RTM sono la **portata Q** di ingresso della resina e la **pressione P** di iniezione. Esistono diverse strategie di azione

- **Iniezione a pressione costante:** porterà ad un elevato flusso iniziale che tenderà ad abbassarsi;
- **Iniezione a portata costante:** porterà ad un aumento della pressione che può causare perdite o deformazioni della preforma;
- **Iniezione combinata:** con il primo tratto a Q costante, e il secondo a P costante.

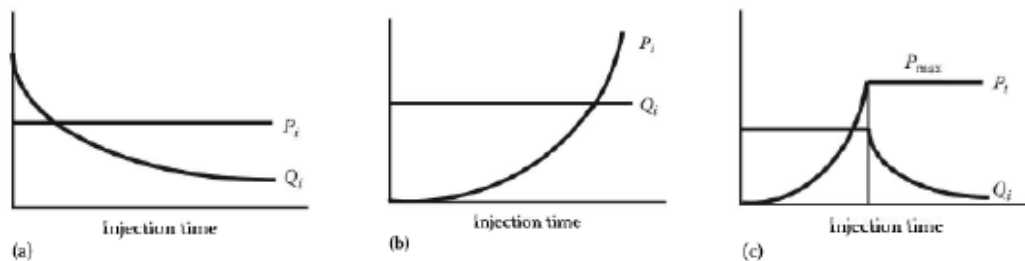


Figura 1.45: a) *Iniezione a pressione costante*; b) *Iniezione a portata costante*; c) *Iniezione combinata*.

Tra le problematiche tipiche del riempimento dello stampo, si annoverano:

- **Dry spots:** zone secche non raggiunte dalla resina, si verificano per prematura solidificazione della resina, pressione insufficiente, prese del vuoto localizzate male;
- **Macrovuoti:** creati tra i tow o tra gli strati nel caso in cui la resina non riesca ad evacuare l'aria intrappolata. Possono essere presenti anche bolle nella resina. Va pertanto elaborata un'accurata progettazione del processo per evitarle;
- **Microvuoti:** intrabundle e interbundle (fuori o dentro i fasci), a seconda delle velocità relative;
- **Racetracking:** si verificano spesso se la preforma non è accuratamente progettata, portano a zone ricche di resina;
- **Movimento delle fibre:** nel caso in cui la pressione sia troppo elevata e il binder non efficace;
- **Deformazione del core:** anche in questo caso, condizione necessaria per verificarsi è un'eventuale pressione troppo elevata.

1.3.3 Filament Winding

Il Filament Winding è un processo tecnologico nel quale un rinforzo continuo viene avvolto attorno ad un mandrino rotante, tale processo imita il baco da seta quando produce il bozzolo che lo avvolge. Il carrello della macchina per l'avvolgimento si muove di moto rettilineo alterato lungo l'asse del mandrino mentre l'angolo d'avvolgimento e la giacitura dei rinforzi sono modificati variando le velocità relative tra carrello e mandrino. Si possono utilizzare filamenti secchi, impregnati immediatamente prima della deposizione, oppure preimpregnati e la laminazione avviene aggiungendo strati con lo stesso o con diversi angoli d'avvolgimento fino a raggiungere lo spessore desiderato.

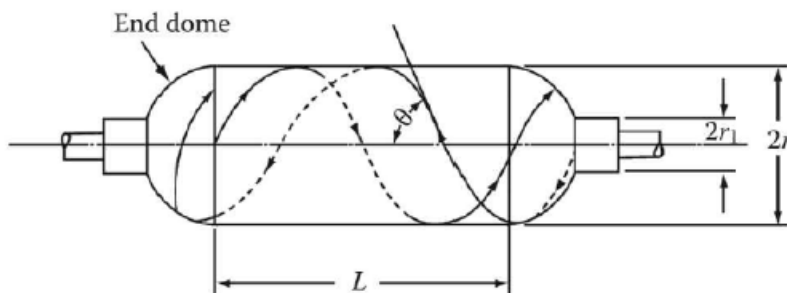


Figura 1.46: *Mandrino nel Filament Winding.*

In questo processo, la polimerizzazione avviene a temperatura con o senza pressione, mentre una volta terminata, il mandrino può essere rimosso o mantenuto e fungerà da componente funzionale. Per il processo di Filament Winding si possono utilizzare impianti semplici, la cui architettura è assimilabile a quella delle bobinatrici o dei torni paralleli, o più sofisticati, basati su macchine a controllo numerico con 3 o 4 gradi di libertà. In base al tipo di avvolgimento e di macchina utilizzata è possibile avere:

- **Avvolgimenti polari:** il mandrino rimane stazionario mentre il braccio di alimentazione della fibra ruota lungo l'asse longitudinale, inclinato dell'angolo di avvolgimento;
- **Avvolgimenti elicoidali:** il mandrino ruota con continuità, mentre il carrello di alimentazione delle fibre si muove di moto rettilineo alternato lungo l'asse del mandrino (vedi Figura 1.42);
- **Avvolgimenti circolari:** hanno un angolo molto vicino a 90° ; l'alimentatore avanza di una lunghezza di bandella (banda forata) per rotazione del mandrino.

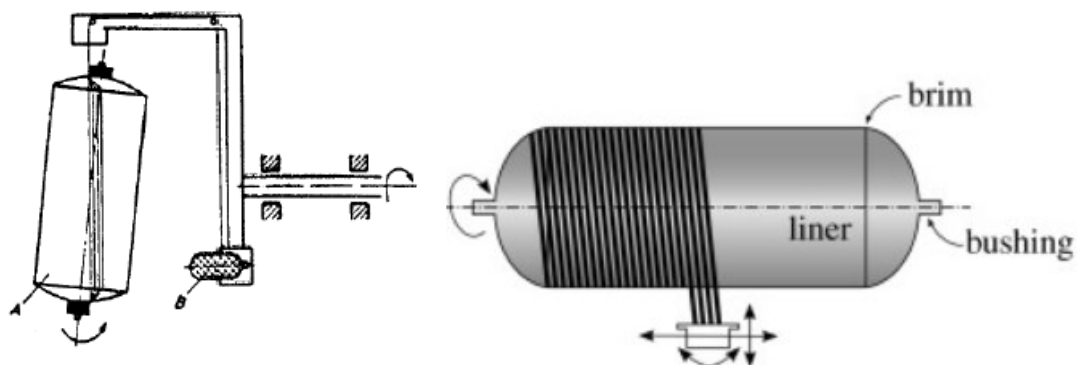


Figura 1.47: A destra si osserva un avvolgimento polare; a sinistra quello circonferenziale.

Attraverso questo processo è possibile realizzare le Isogrid in CFRP, si tratta di strutture reticolari utilizzate per la realizzazione di razzi e componenti impiegate nell'aeronautica. Le Isogrid saranno oggetto di descrizione dettagliata nel capitolo 1.5.



Figura 1.48: Isogrid circolari realizzati mediante Filament Winding [8].

I mandrini possono essere realizzati in maniera diversa:

- **Mandrini solubili:** composti di sabbia e PVA, vengono sabbiati e trattati con gel-coat.
- **Mandrini a perdere:** vengono realizzati in gesso/stucco presentando buone tolleranze.
- **Mandrini metallici smontabili:** risultano molto costosi.
- **Mandrini tubolari;**
- **Mandrini gonfiabili.**

1.3.4 ATL e AFP

L'**Automated Tape Laying (ATL)** e l'**Automated Fibre Placement (AFP)** sono le due principali tecnologie additive che vengono impiegate per la produzione di componenti compositi avanzati a partire da prepreg unidirezionali.

La tecnologia di ATL è impiegata per depositare larghi tape unidirezionali su una superficie, (operazione che viene effettuata rimuovendo contemporaneamente il film distaccante a protezione del prepreg). La velocità di deposizione, la temperatura e il grado di tensionamento del tape possono essere controllati durante il lay-up. Il tape unidirezionale utilizzato nell'ATL presenta larghezze tipiche di 75 mm, 150 mm e 300 mm, e in genere viene fornito nella forma arrotolata su un'anima di cartone, in maniera simile ai prepreg utilizzati per la laminazione manuale.

A causa della massa della testa e del materiale da depositare in essa contenuta, così come delle dimensioni delle parti tipicamente prodotte, le teste ATL in genere sono installate su strutture a cavalletto o su sistemi a colonna verticale.

I vantaggi dell'ATL sono:

- Elevate velocità di deposizione;
- Elevate proprietà meccaniche (utilizzo di prepreg);
- Possibilità di utilizzare prepreg ad elevata grammatura;
- Semplicità nella programmazione offline.

Mentre i principali svantaggi sono:

- Elevato investimento iniziale;
- Limitata complessità geometrica dei componenti da realizzare;
- Tassi di spreco di materiale più alti rispetto all'AFP.



Figura 1.49: ATL.

L'**Automated Fiber Placement (AFP)** è simile all'ATL, tuttavia utilizza una banda di tows (strisce di prepreg), che vengono fatti collimare all'interno della testa di deposizione e successivamente depositati sullo stampo. Dunque, i sistemi AFP differiscono principalmente da quelli ATL nella

larghezza del materiale che viene depositato; le larghezze tipiche dei tows depositati mediante AFP sono 3.2 mm, 6.4mm, e 12.7 mm. Nella figura che segue viene riportata la schematizzazione di una testa AFP. Attualmente la tecnologia AFP può depositare fino a 32 tows in parallelo.

Ciascun tow (insieme di n. tows di prepreg) viene guidato individualmente e può essere clampato, tagliato e riavviato durante la produzione. Questo rende possibile depositare ciascun tow a velocità differente, permettendo di effettuare il lay-up su geometrie complesse (a doppia curvatura) e di curvare i singoli tow (steering). La possibilità di depositare singolarmente i differenti tows migliora la produttività, riducendo contemporaneamente lo spreco di materiale. Un' importante considerazione da effettuare riguarda inoltre, l'entità dei difetti tipici della deposizione automatizzata, ovvero dei gaps e degli overlaps esistenti tra i differenti tows, maggiore rispetto all'ATL ed è generalmente proporzionale alla curvatura eseguita; ciò influenza negativamente le proprietà meccaniche del componente finale. La produttività AFP è in genere più bassa rispetto a quella dell'ATL, e viene impiegata per geometrie più complesse. Ad esempio, la produttività per il layup di una sezione di fusoliera complessa è di 8.6 kg/h, corrispondente alla metà della produttività di un moderno sistema di AFP o ATL. Il materiale di partenza per la deposizione mediante AFP si può presentare sia come singoli tows impregnati (towpreg) che sotto forma di slit prepreg tape (tape unidirezionale ridotto in fasci (tows) di larghezza inferiore rispetto alla larghezza del tape iniziale). Lo slit tape è più costoso rispetto ai singoli tow impregnati, tuttavia offre vantaggi in termini di produttività, affidabilità e qualità del prodotto finito. Il materiale da depositare (slit tape o tows impregnati) può essere trasportato alla testa di deposizione oppure può essere incorporato in essa. La prima possibilità permette di utilizzare bracci antropomorfi industriali, permettendo di abbattere i costi dell'intera attrezzatura di AFP. Riassumendo, i principali vantaggi dell'AFP sono di seguito elencati:

- Possibilità di realizzare forme complesse;
- Minimizzazione del materiale di scarto;
- Possibilità di utilizzare robot industriali.

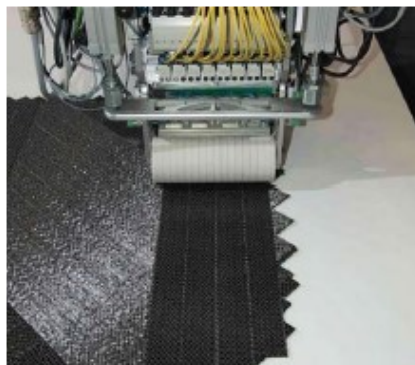


Figura 1.50: AFP.

Mentre, i principali svantaggi della tecnologia di AFP sono:

- Bassa produttività;
- Proprietà meccaniche inferiori rispetto all'ATL (gaps tra i tows);
- Difetto tipico degli slit tapes, denominato fuzzy edge (vedi Figura 1.47);
- Elevato investimento iniziale.

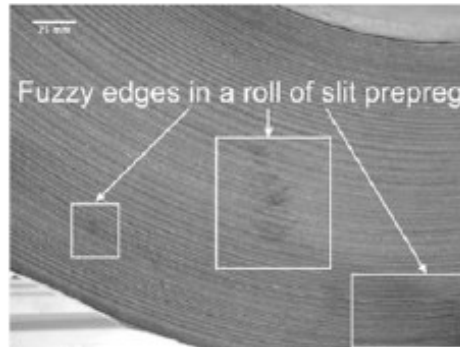


Figura 1.51: *Difetto tipico degli slit tapes, denominato fuzzy edge.*

1.4 Stampa 3D

La **Stampa 3D** è stata sviluppata nel 1993 dal MIT, nota anche come **Additive Manufacturing (AM)** [9] e **Rapid Prototyping (RP)**. Un processo **additivo** che, aggiungendo materiale solo dove occorre, permette di limitare lo spreco e ridurre le fasi di processo. Ad oggi, la tecnologia del 3D Printing è utilizzata per la lavorazione dei seguenti materiali:

- **Metalli** (Acciaio, Alluminio, Titanio, Inconel (cromo-nichel), Cromo-Cobalto, etc...);
- **Plastica** (Moltissimi tipi di termoplastici);
- **Compositi** (Termoplastici rinforzati con fibre).

I settori più interessati alla tecnologia di Stampa 3D sono:

- **Biomedico**;
- **Sport**;
- **Aerospace**;
- **Automotive**.

Considerando le ottime caratteristiche dei materiali compositi, combinate con le ottime caratteristiche produttive della Stampa 3D, è stata corrisposta anche una crescita e si stanno sviluppando sempre più sistemi ad hoc in grado di affiancare o sostituire i sistemi tradizionali. Per il settore dei compositi, la **stampa FFF (Fused Filament Fabrication)** detta anche **FDM (Fused Deposition Modelling)** è

quella maggiormente utilizzata, nella quale l'oggetto da stampare viene ideato e realizzato tramite sistema CAD, o mediante acquisizione (**Reverse Engineering**) [9].

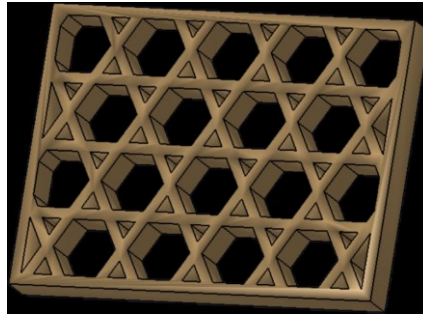


Figura 1.52: *Struttura Anisogrid realizzata mediante C.A.D.*

Successivamente il disegno viene esportato in **.Stl** e tramite un software di **Slicing** convertito in **Gcode**, in modo tale da assegnare il percorso che l'estrusore dovrà compiere.

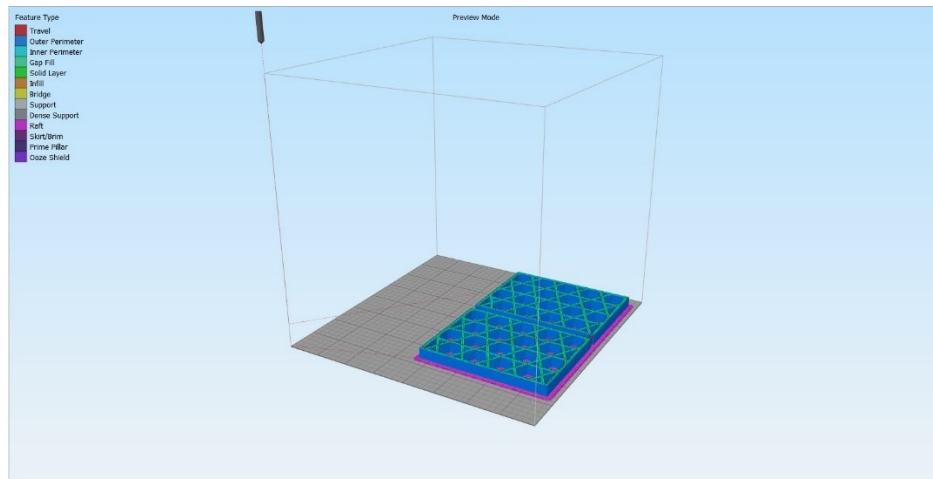


Figura 1.53: *Struttura Anisogrid all'interno del programma di slicing Simplify.*

```
G1 X90.502 Y29.200 E0.2273 F1200
G1 X194.498 Y29.200 E8.8747
G1 X196.431 Y31.133 E9.1020
G1 X196.431 Y108.867 E15.5656
G1 X195.298 Y110.000 E15.6988
G1 X196.431 Y111.133 E15.8321
G1 X196.431 Y188.867 E22.2957
G1 X194.498 Y190.800 E22.5230
G1 X90.502 Y190.800 E31.1704
G1 X88.568 Y188.867 E31.3977
G1 X88.568 Y111.133 E37.8613
G1 X89.702 Y110.000 E37.9945
G1 X88.568 Y108.867 E38.1278
G1 X88.568 Y31.133 E44.5914
G1 X190.923 Y29.800 F6000
G0 Z E0
G1 X195.468 Y31.018 E0.3912 F1200
G1 X195.832 Y31.382 E0.4340
```

Figura 1.54: *Gcode.*

1.4.1 Stampanti 3D tradizionali

L'FDM è il sistema di stampaggio tridimensionale più utilizzato e semplice, utilizzando un'unica bobina in **CFRTP (Carbon Fiber Reinforced Termoplastic)**, cioè una matrice termoplastica di svariate tipologie, dal **PLA (Acido Poliattico)** derivato da scarti di mais e grano fino al **PEEK**, materiale al 100% riciclabile, caricato con **particelle** o **fibre corte** in **bassa quantità**, migliorando al contempo le prestazioni meccaniche, chimiche e termiche dei materiali non caricati [10]. Per conferire qualità paragonabili ai sistemi tradizionali, la mission è quella di utilizzare **fibre lunghe**, aumentando la % delle stesse.



Figura 1.55: *A sinistra un prodotto realizzato tramite Carbon PA; a destra il filamento.*

I componenti meccanici che formano una stampante FDM sono i seguenti:

- 1) **Estrusore:** formato dall' **hot-end**, appunto la parte calda che scioglie e deposita direttamente il materiale, e dal **cold-end**, il dispositivo che spinge il filamento nella zona di fusione. La posizione del cold-end nella stampante 3D permette di distinguere le due tipologie di estrusore:
 - L'**estrusore Direct:** ha fundamentalmente uno schema semplice: il meccanismo di spinta del filo è montato a ridosso dell'ugello e il motore fornisce direttamente la rotazione al pignone. Lo svantaggio di questa soluzione sta nel peso dello stesso meccanismo che costringe ad un maggiore stress le parti in movimento per vincere la sua inerzia, tutto ciò si ripercuote a scapito della precisione e della velocità massima della stampante. Il vantaggio è che tutta l'**energia del motore viene trasmessa al filamento senza dispersioni**. Grazie alla semplicità di funzionamento questa tipologia viene impiegata nelle stampanti 3D più economiche.

- Negli **estrusori Bowden**: il motore viene delocalizzato rispetto all'hot-end e portato in una zona non in movimento della stampante. Il moto è quindi trasferito ed il filamento passa attraverso un tubo flessibile in Teflon che riduce al minimo gli attriti. La delocalizzazione porta ad una notevole diminuzione di peso sul carrello risolvendo le criticità che invece si riscontrano negli estrusori Direct, permettendo delle **velocità di stampa maggiori**. Di contro, però, è noto che per quanto possa essere liscia la guaina si avrà comunque uno spreco di energia legato all'attrito che è proporzionale alla lunghezza del tubo, è bene pertanto utilizzare un tubo della minima lunghezza possibile.

In entrambe le tipologie di estrusori il moto nel cold-end può essere **diretto** o con **demoltiplica**. È facilmente intuibile come, nel primo caso, il motore fornisca direttamente la spinta. Il filo è schiacciato da un cuscinetto sul pignone dello **stepper**. Nel secondo caso invece, il meccanismo è quello di una trasmissione riducente, ciò vuol dire che per un certo numero di giri del motore si avrà un numero minore di giri trasferiti ma una maggiore coppia di forza. Ciò risulta molto utile negli estrusori Bowden per ovviare alle eventuali perdite di energia dovute all'attrito. La demoltiplica permette inoltre di porre rimedio al caratteristico movimento a scatti dei motori stepper (o passo-passo) **producendo una erogazione più fluida** e quindi più precisa, utile in entrambe le tipologie di estrusori.

In sostanza, la scelta consapevole di un estrusore si fa valutando pro e contro di ciascuna soluzione, anche e soprattutto in base al tipo e alla robustezza del telaio della stampante 3D.

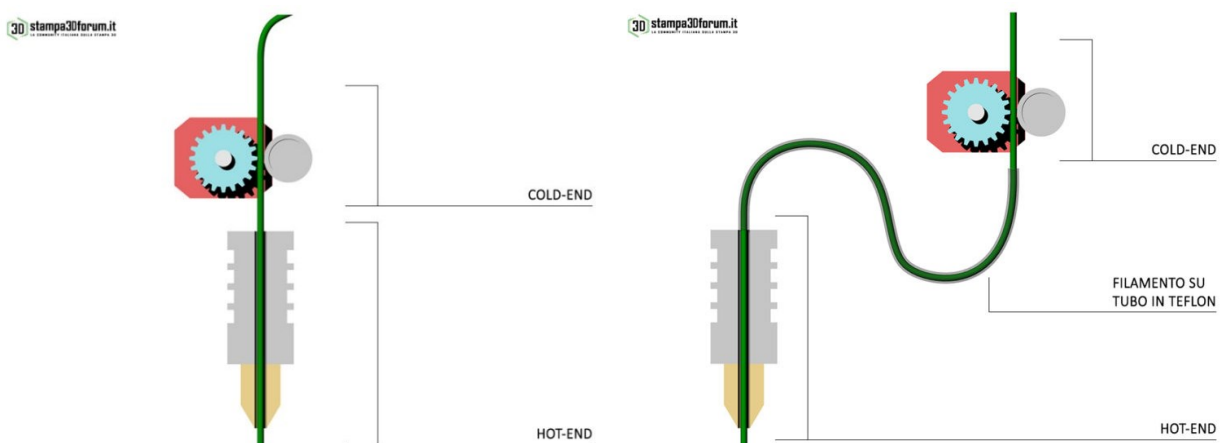


Figura 1.56: A sinistra l'estrusore Direct a destra l'estrusore Bowden.

2) **Motori elettrici passo-passo:** ciò che li differenzia da altri tipi di motori elettrici è la capacità di far ruotare il proprio albero a passi ben definiti e di poterlo mantenere in una certa posizione opponendo una certa forza a un eventuale movimento opposto proveniente dall'esterno. I motori utilizzati per la stampa 3D sono dei NEMA 17 con amperaggio che varia dai 1,7A a 2,5A.

Questi motori hanno la caratteristica di muoversi di un singolo **step** alla volta che corrisponde ad un determinato angolo di rotazione compiuto dal motore. Dalla Tabella 1.7 è possibile individuare gli angoli di step, è indispensabile sottolineare che più passi impiegherà il motore a fare un giro completo più risulterà preciso:

Suddivisioni del giro completo	Angolo di passo
100	3.6°
200	1.8°
400	0.9°

Tabella 1.7: *Tabella in cui si possono individuare gli angoli di passo in relazione al numero di step necessario a compiere un intero giro.*

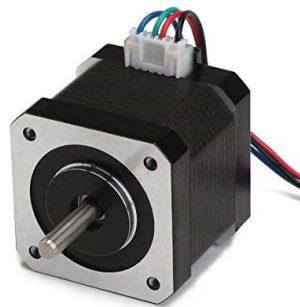


Figura 1.57: *Motore passo-passo.*

1.4.2 Strutture reticolari con il 3D Printing

L'uso di stampanti 3D in FDM permette la realizzazione di architetture, molto complesse, ad esempio una nuova generazione di **strutture reticolari** tridimensionali a spessore variabile. La realizzazione tradizionale avviene, sfruttando un materiale di supporto per poter conferire la tridimensionalità alla struttura, ciò comporta elevati tempi di realizzazione oltre che un maggior spreco di materiale.

Per limitare i problemi precedentemente descritti e conferire ottime qualità al materiale, si è ricorso alla deposizione di CFR-PLA in maniera continua senza l'utilizzo di materiale di supporto, denominata **Free-Hanging** [11].

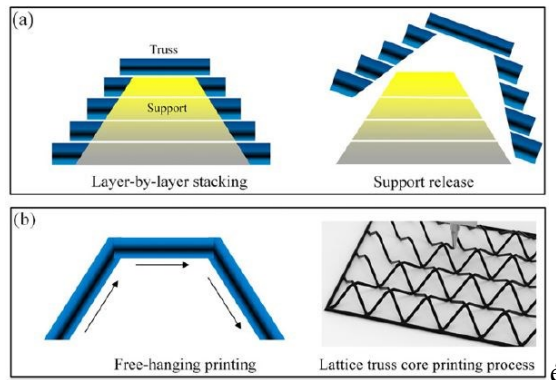


Figura 1.58: a) Stampaggio tradizionale; b) Stampaggio in Free-Hangig.

Lo stampaggio in **Free-Hanging**, tuttavia, presenta problemi di: **delaminazione, deformazione e rottura del composito**, che possono essere limitati controllando meticolosamente le condizioni di stampaggio. La T_g del CFR-PLA fluttua tra i 60 e i 70°C, mentre la temperatura nell'estrusore si stima intorno ai 220 °C. Come si può osservare in Figura 1.50 il materiale una volta estruso avrà una temperatura intorno ai 120 °C per poi scendere gradualmente solidificandosi (facilitato il flusso di raffreddamento). Temperature al di sopra dei 150°C conducono ad elevati tempi di solidificazione, mentre temperature al di sotto della T_g , provocano rotture e discontinuità del materiale.

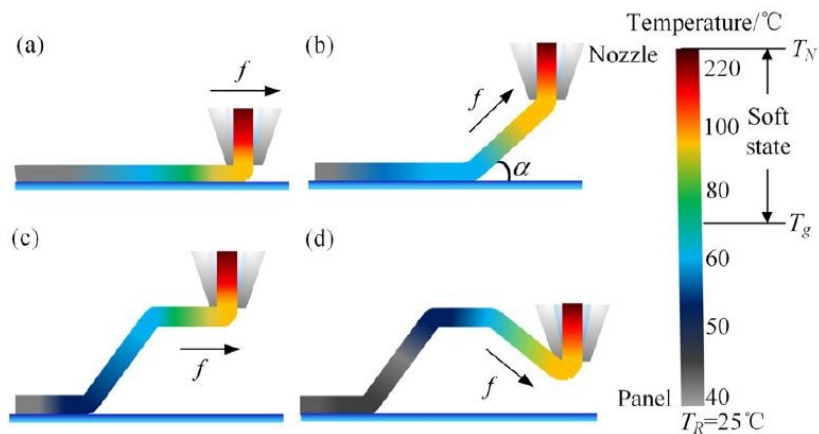


Figura 1.59: Varie fasi di deposizione del materiale in Free-Hanging.

L'architettura può essere impiegata come core di un sandwich composto da lamine di epossidico e tessuti in fibra di carbonio, successivamente curati per favorire la polimerizzazione e l'adesione.

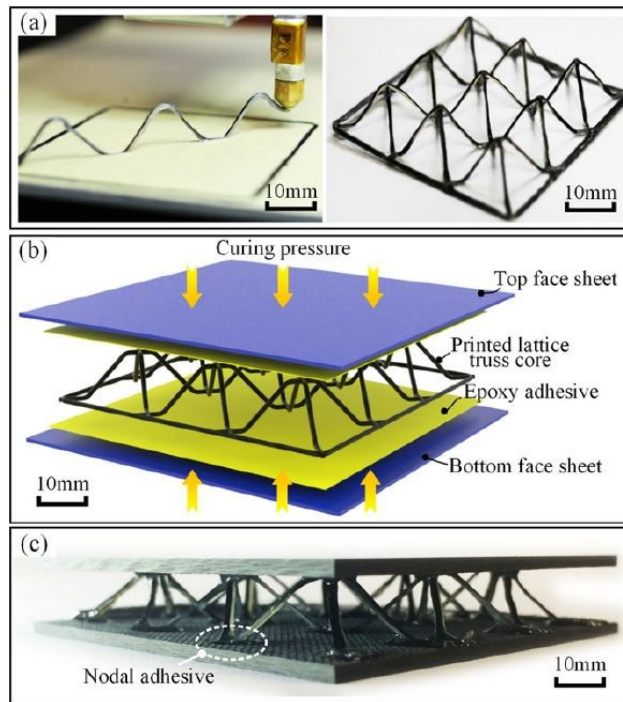


Figura 1.60: *Varie fasi di deposizione del materiale in Free-Hanging.*

Eseguendo una comparazione con altri due diversi materiali: Carbon-PET e Carbon-PP, è possibile notare che la resistenza alla compressione e il modulo delle strutture reticolari CFR-PLA stampate in 3D sono in seconda posizione (dietro al Carbon-PET), ma la forza di compressione specifica risulta molto competitiva, in quanto la densità di CFR-PLA è inferiore al Carbon-PET. Tuttavia, il modulo specifico presenta il risultato più debole, a causa del basso modulo del PLA e la mancata pressione di formatura nel processo di stampa che tende a creare vuoti, abbassandone le prestazioni.

Matrix material	Manufacturing method	ρ (kg m ⁻³)	σ (MPa)	E (MPa)	σ/ρ (MPa/kg m ⁻³)	E/ρ (MPa/kg m ⁻³)
Carbon-PP	Reversible assembly	28.8	0.12	3.70	0.004	0.13
Carbon-PET	Fold & cut	60	1.90	80	0.031	1.33
CFR-PLA	Free-hanging 3D printing	29.58	1.24	27.70	0.042	0.94

Tabella 1.8: *Confronto tra CFR-PLA, Carbon-PP e Carbon-PET.*

Utilizzando i termoplastici che hanno la caratteristica di poter essere ritrattati e rilavorati, si possono studiare tre diverse modalità di stampa, per tre differenti tipologie di uno stesso materiale: **primo**, **riciclato** e **rigenerato**. Specificatamente, il materiale viene triturato e grazie a ciò si trasforma in materia prima seconda. Le caratteristiche di stampa tra un materiale **vergine** e uno **rigenerato** sono le stesse, mentre per un materiale **riciclato** si può notare come la temperatura dell'estrusore deve essere tra i 240 e i 300°C, questo perchè al di sotto dei 240°C c'è pericolo di rottura delle fibre, discorso analogo per diametri dell'estrusore inferiori ai 0,8 mm che causano alti sforzi di taglio al materiale e di conseguenza necessitano di un cambio di setup della stampante.

Parameters	Process stages		
	Original printing	Recycling	Remanufacturing
Hatch spacing (H, mm)	1	/	1
Layer thickness (L, mm)	0.5	/	0.5
Printing or pulling speed (V, mm/min)	100	200	100
Temperature of liquefier (T, °C)	210	240	210
Feed rate of filament (E, mm/min)	100	/	80
Diameter of nozzle (mm)	2	0.8	2
Remelting temperature (T, °C)	/	240-300	/

Tabella 1.9: Parametri di stampa per materiale: primo, riciclato e rigenerato.

1.4.3 Stampa 3D a fibre continue

Per ottenere un materiale composito a fibre lunghe, la stampa viene realizzata suddividendo la matrice e le fibre in 2 bobine separate che successivamente, in prossimità dell'hot-end, verranno co-estruse depositando il materiale sul piatto riscaldato e aumentandone l'adesione [12].

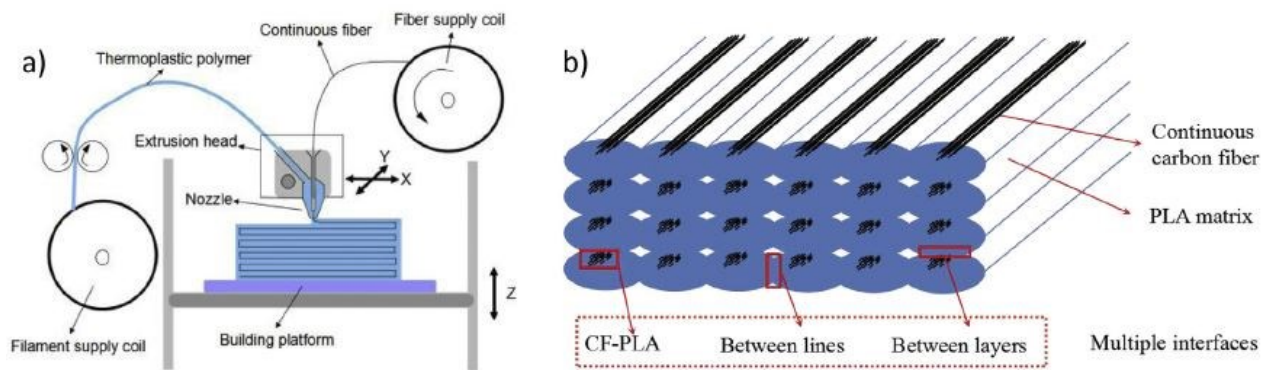


Figura 1.61: a) Stampante 3D a fibra lunga; b) Presenza di vuoti [13].

Un'ulteriore soluzione possibile per la deposizione di un composito a matrice termoplastica con rinforzo a fibra lunga è stata sviluppata e brevettata da Markforged che consiste nel realizzare una serie di terminali uno di fianco all'altro in cui verrà riscaldato un materiale preimpregnato al fine di ridurre i vuoti.

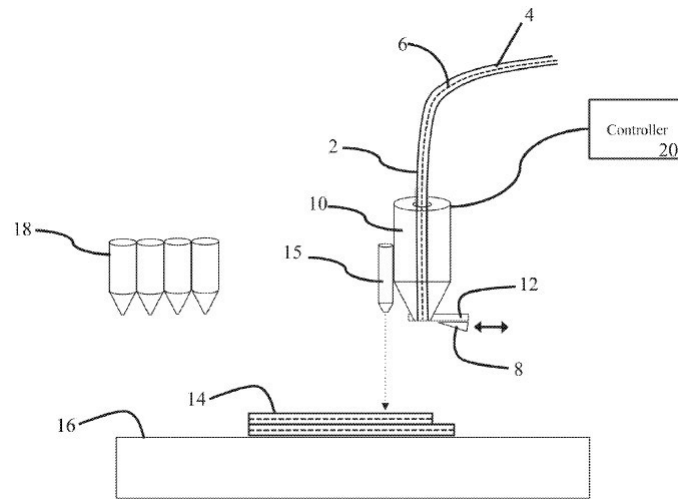


Figura 1.62: Sistema di estrusione della Markforged. [14]

Un'altra tipologia di stampante 3D a fibra lunga a matrice termoindurente e non termoplastica è la **“Continuous Fiber Composite Smart Manufacturing”** unisce la **tecnologia FDM** (quella a estrusione di filamento) con la **Stereolitografia** (ovvero la polimerizzazione della resina attraverso un laser). In questo processo le fibre lunghe, vengono imbevute di **resina fotoattiva liquida**, a questo punto è il filo indurito che si tira la restante parte e di conseguenza, è possibile affermare che il filo non viene estruso ma tirato. Mediante tale processo, si evitano problemi legati alla non omogenea distribuzione delle fibre con la matrice, poiché le prime saranno imbevute e tirate nello stesso estrusore.

Il braccio meccanico possiede all'apice una **corona laser**, in modo da polimerizzare la resina [15]. Un altro aspetto da evidenziare è l'utilizzo di un estrusore montato su un braccio a 9 assi, con lo scopo di depositare la fibra nelle migliori posizioni in modo da enfatizzare l'anisotropia della stessa.

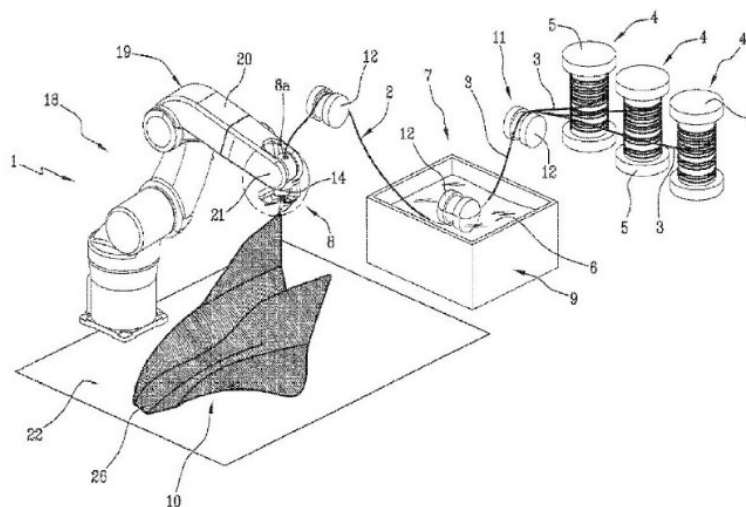


Figura 1.63: Tecnologia CFCSM [15].

Questo processo però non è ancora stato commercializzato pena i problemi legati alla sinterizzazione della resina e del trasporto della stessa lungo l'estrusore.

La stampante 3D si potrà sviluppare ulteriormente utilizzando un robot antropomorfo in cui verranno collocati all'estremità due tubi che trasporteranno **resina liquida** (epossidico, vinilestere e poliestere) che confluirà nel terminale mediante un sistema di pompaggio posto in corrispondenza dell'ultimo elemento del robot, insieme alla bobina di **Tow**, presente nella parte superiore del sistema articolato. I tubi hanno il compito di convogliare la resina liquida nell'estrusore centrale e andranno a contatto con il Tow facilitandone la bagnabilità.

Successivamente i due elementi (resina termoindurente e fibra) saranno riscaldati mediante l'Hot-end fino a far arrivare l'elemento polimerico ad una fase di gelificazione. Quest'ultima configurazione permetterà una facile deposizione dello stesso, ma non si otterranno le caratteristiche meccaniche attese. La completa reticolazione sarà ottenuta grazie all'utilizzo di **due laser** posti nelle vicinanze dei due estrusori che in poco tempo porteranno il materiale nella zona di vetrificazione, conducendo all'ottenimento di proprietà meccaniche comparabili con i sistemi tradizionali. Al termine della realizzazione del pezzo, per evitare otturazioni nell'ugello, la resina liquida sarà bloccata attraverso un sofisticato sistema di ostruzione mentre, per quanto concerne il rinforzo, sarà choppata attraverso una lama presente nel terminale del robot.

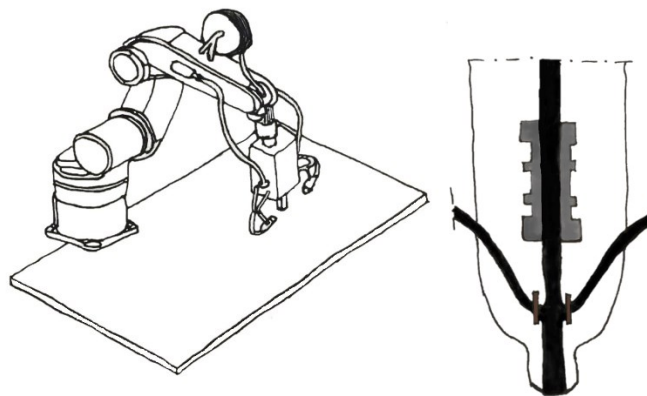


Figura 1.64: *A sinistra l'intero sistema con un robot; a destra un ingrandimento dell'estrusore*

La Stampa 3D in passato veniva utilizzata esclusivamente per la prototipazione riproducendo concretamente un prototipo virtuale, realizzato con sistemi CAD. Grazie alle ottime caratteristiche di **processabilità**, depositando dunque materiale solo dove occorre, con limitazioni in termini di spreco e riduzione del numero di fasi, sta divenendo un sistema produttivo a tutti gli effetti specialmente per i materiale compositi. Tra le problematiche riscontrate si ha: **presenza di vuoti**, **basso contenuto in % di fibre**, **difficoltà di deposizione di fibre continue** che limitano le prestazioni del materiale.

È chiaro che le caratteristiche variano in funzione del tipo di matrice e dalla % di fibre:

Technique	Materials	Fiber loading	Maximum tensile strength (MPa)	Tensile strength improvement(%) compared to that of pure polymer
FDM	Short glass fiber/ABS	18 wt%	58.6	140
	Short carbon fiber/ABS	40 wt%	70	115
		5 wt%	42	24
Direct write	Short carbon fiber/Silicon carbide whisker/epoxy	13 wt%	70.69	194
		35 wt%	66.2	127
FDM based co-extrusion	Continuous carbon fiber/nylon	34.5 vol%	464.4	446
	Continuous carbon fiber/PLA	6.6 vol%	185.2	335

Tabella 1.10: *Classificazione dei CFRTP e le diverse tecniche di stampaggio [16].*

Come si evince dal grafico le tecniche che forniscono ottime qualità, come facilmente pronosticabile sono: **in FDM co-estruite a fibre lunghe**, estrudendo Nylon e Fibre di Carbonio continue attraverso le stampanti della Markforged, si ha una tensione di rottura pari a 464,4 Mpa, carichi confrontabili all'Alluminio.

1.5 Strutture Isogrid

La ricerca di una nuova, leggera, economica e efficiente struttura per l'Aerospace è stata oggetto di studi da parte della N.A.S.A. e dell'Industria. La leggerezza, coadiuvata alla resistenza a carichi di compressione, sono fattori chiave per la realizzazione di veicoli terrestri e spaziali ma anche per la progettazione di razzi, al fine di ridurre i consumi e il peso dell'elemento.

Nel 1964, Dr. Robert R. Meyer sotto contratto della N.A.S.A. cercò di individuare una struttura che fosse in grado di resistere a carichi di compressione elevati in tutte le direzioni, limitandone il peso. Dopo anni di studio si arrivò alla realizzazione di strutture triangolari che odieramente vengono chiamate **Isogrid**.

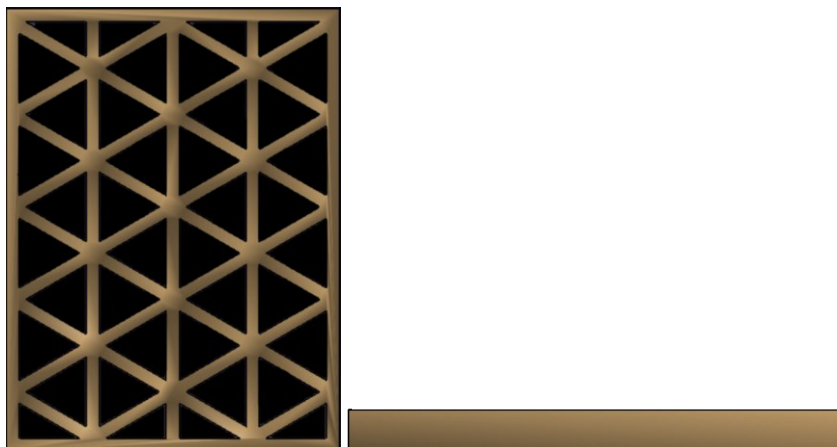


Figura 1.65: *Vista nel piano XY e in XZ di una Isogrid realizzata in CATIA.*

Queste particolari strutture vengono generalmente realizzate in **Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)** attraverso un processo di Filament Winding, formate da una griglia a triangoli equilateri, i cui lati prendono il nome di **ribs** (in italiano, **costole**)

Presentano le seguenti caratteristiche:

- Isotropia;
- Coefficiente di Poisson uguale a $\frac{1}{3}$ come le strutture metalliche omogenee;
- Ottima efficienza in compressione.

I vantaggi, invece, sono i seguenti:

- Possibilità di ottimizzarli in un ampio range di carichi;
- Facile analisi;
- Prontezza della struttura nel rispondere a carichi concentrati
- Percorsi di carico ridondanti;
- Bassi spessori.

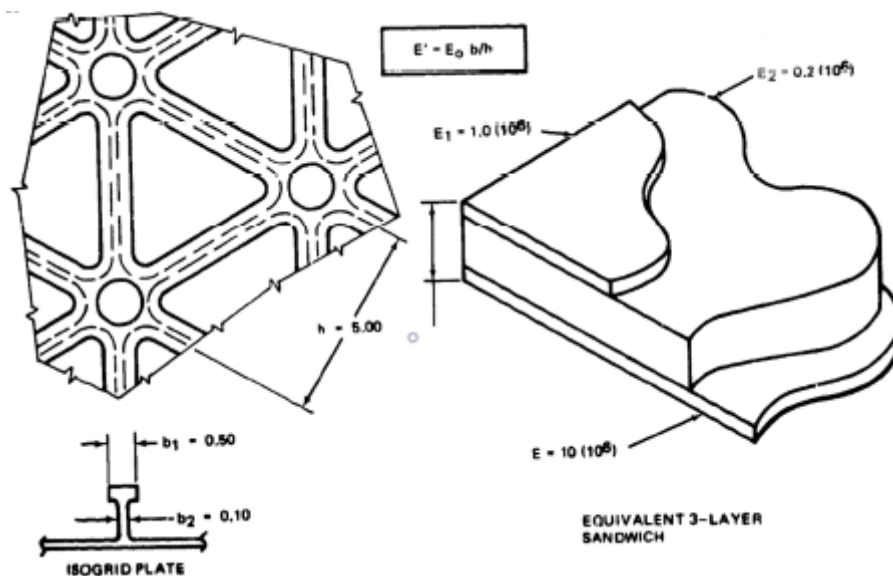


Figura 1.66: Sezioni Isogrid [17].

1.5.1 Meccanica delle Isogrid

Data la particolare forma, le tensioni e le deformazioni saranno distribuite in maniera equilibrata lungo i lati.

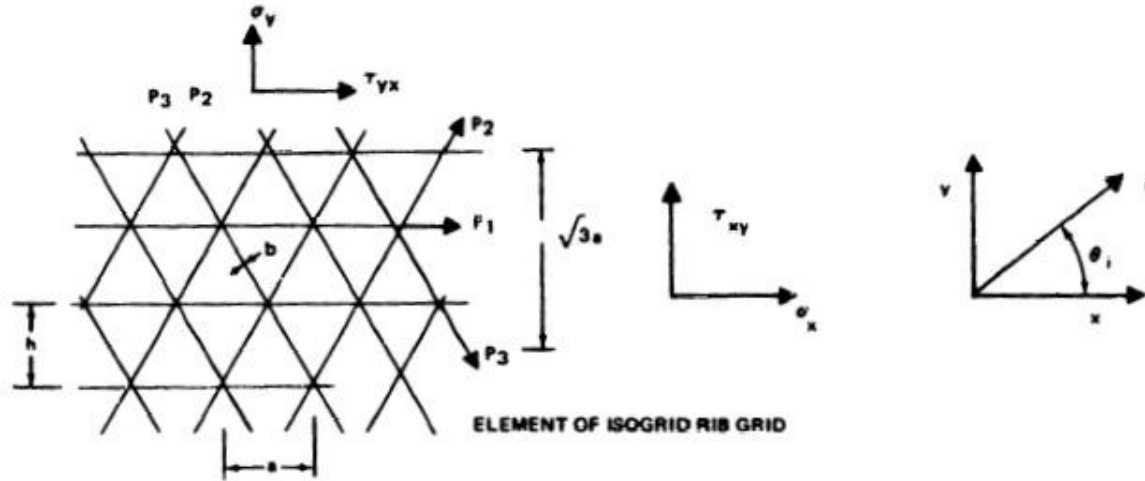


Figura 1.67: Sistema di coordinate nelle strutture Isogrid [17].

La legge di deformazione è la seguente:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_x \cos^2 \theta_i + \gamma_{xy} \cos \theta_i \sin \theta_i + \varepsilon_y \sin^2 \theta_i \quad (1.2)$$

Dalla 1.2 si ottiene la relazione tra le deformazioni uniassiali e quelle lungo i lati dei triangoli:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{Bmatrix} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 4 & 0 & 0 \\ 1 & \sqrt{3} & 3 \\ 1 & -\sqrt{3} & 3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \gamma_{xy} \\ \varepsilon_y \end{Bmatrix} \quad (1.3)$$

Considerando che la matrice della 1.3 è invertibile, nel caso in cui sono conosciute le deformazioni principali, attraverso un'operazione di inversione della matrice è possibile determinarle lungo i triangoli:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \gamma_{xy} \\ \varepsilon_y \end{Bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 3 & 0 & 0 \\ 0 & 2\sqrt{3} & -2\sqrt{3} \\ -1 & 2 & 2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{Bmatrix} \quad (1.4)$$

Conoscendo le **deformazioni lungo i lati** ε_i , il **modulo di Young E** e la **larghezza delle costole b**, è possibile determinare il carico che agisce sulle tre direzioni principali:

$$P_i = b E \varepsilon_i \quad (1.5)$$

$$i = 1, 2, 3.$$

Dati i carichi P e le deformazioni lungo le tre direzioni è possibile determinare le tensioni in x e y:

$$\sigma_x = \frac{2 P_1 + (P_2 + P_3) \cos 60}{\sqrt{3} a} = \frac{4 P_1 + P_2 + P_3}{2\sqrt{3} a} \quad (1.6)$$

$$\sigma_y = \frac{(P_2 + P_3) \sin 60}{\sqrt{3} a} = \frac{\sqrt{3}(P_2 + P_3)}{2 a} \quad (1.7)$$

$$\gamma_{xy} = \gamma_{yx} = \frac{(P_2 - P_3) \sin 60}{\sqrt{3} a} = \frac{P_2 - P_3}{2 a} \quad (1.8)$$

Trascritta nella forma compatta:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \end{Bmatrix} = \frac{9 b E}{8 h} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 3 \\ 1 & 3 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \end{Bmatrix} \quad (1.9)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \frac{3 b E}{8 h} \gamma_{xy} \quad (1.10)$$

Dove:

$$h = \frac{\sqrt{3}}{2} a \quad (1.11)$$

Molte costruzioni seppur tridimensionali possono essere approssimate a degli elementi piani o gusci elastici, ciò comporta una trasformazione da uno stato tridimensionale ad uno bidimensionale. Ingegneristicamente parlando si andrà a determinare i carichi lungo la superficie per poi integrarli lungo lo spessore.

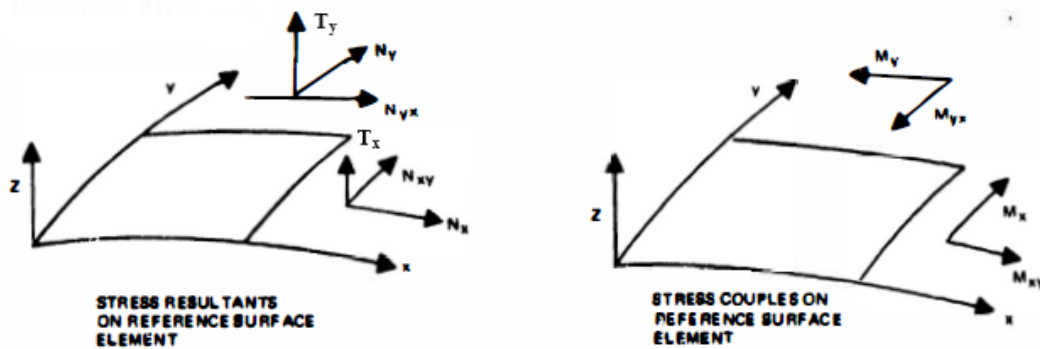


Figura 1.68: Carichi in elemento piano elastico [17].

Se si hanno piccole differenze di lunghezza tra una superficie parallela a quella di riferimento, i risultati dei carichi normali, a taglio e del momento possono essere scritti come segue:

$$\begin{pmatrix} N_x \\ N_{xy} \\ N_y \\ T_x \\ T_y \end{pmatrix} = \int_z \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \tau_{xy} \\ \sigma_y \\ \tau_x \\ \tau_y \end{pmatrix} dz \quad (1.12)$$

$$\begin{pmatrix} M_x \\ -M_{xy} \\ M_y \end{pmatrix} = \int_z \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \tau_{xy} \\ \sigma_y \end{pmatrix} Z dz \quad (1.13)$$

Ribadendo che $N_{xy} = N_{yx}$ e $M_{xy} = M_{yx}$

Usando la legge di Kirchoff-Love della Teoria delle piastre si ha:

$$\begin{pmatrix} \hat{\epsilon}_x(z) \\ \hat{\gamma}_x(z) \\ \hat{\epsilon}_y(z) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \epsilon_x(z) \\ \gamma_x(z) \\ \epsilon_y(z) \end{pmatrix} - Z \begin{pmatrix} \theta_x \\ 2\theta_{xy} \\ \theta_y \end{pmatrix} \quad (1.14)$$

Dove $\begin{pmatrix} \epsilon_x(z) \\ \gamma_x(z) \\ \epsilon_y(z) \end{pmatrix}$ sono riferite alla superficie deformata mentre $\begin{pmatrix} \theta_x \\ 2\theta_{xy} \\ \theta_y \end{pmatrix}$ sono riferite alla superficie che

cambia curvatura, insieme con un'appropriata legge di Hooke per ogni strato.

La relazione tra tensione risultante e la coppia di piani di cui una deformata e l'altra che cambia di curvatura è la seguente:

$$\begin{pmatrix} N_x \\ N_{xy} \\ -M_x \\ -M_y \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} K & \nu K & 0 & 0 \\ \nu K & K & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D & \nu D \\ 0 & 0 & \nu D & D \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \theta_x \\ \theta_y \end{pmatrix} \quad (1.15)$$

ν =coeff. di Poisson;

K è il modulo elastico dell'Isogrid:

$$K = \frac{1}{1-\nu^2} \int_z E(z) dz \quad (1.16)$$

D è la rigidezza alla piegatura:

$$D = \frac{1}{1-\nu^2} \int_z E(z) Z^2 dz \quad (1.17)$$

La superficie di riferimento è stata scelta in modo da avere:

$$\int_z E(z) z dz = 0 \quad (1.18)$$

$E(Z)$ corrisponde al modulo di Young del **ribs** ed è funzione dello spessore z . (Fonte NASA).

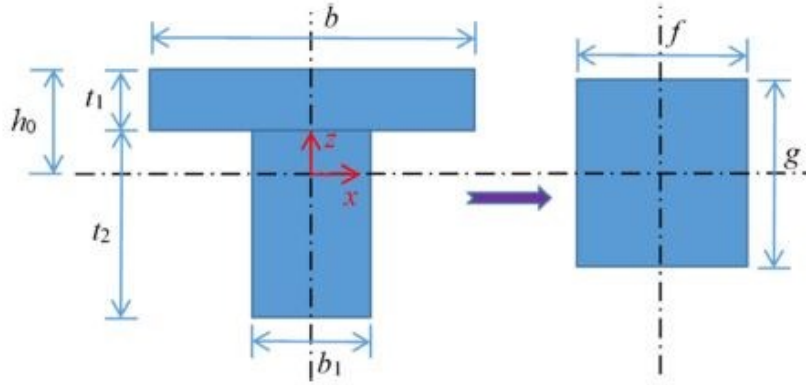


Figura 1.69: Sezione di una costola [18].

Per poter sviluppare i valori delle due rigidezze K e D bisogna considerare alcune ipotesi: ogni strato è omogeneo e quasi isotropo oltre che l'ipotesi fatta inizialmente del piano bidimensionale:

$$K = \frac{E^* t^*}{1-\nu^2} = \frac{\sum E_i^* t}{1-\nu^2} = \frac{2\sqrt{3}E_s(b t_1 + b_1 t_2)}{3(1-\mu^2)l} \quad (1.19)$$

Dove $E^* t^*$ corrispondono al modulo elastico e spessore del piano mentre E_i^* è il modulo elastico dell' i -esimo strato. Per l'Isogrid con spessore della costola b_i e lunghezza l , si ha:

$$\frac{E_i^*}{E_s} = \frac{2\sqrt{3}b_i}{3(1-\nu^2)l} \quad (1.20)$$

Per quanto riguarda la rigidezza alla piegatura D , si ha:

$$D = \frac{\sqrt{3}E_s}{18(1-\nu^2)} \frac{b^2 t_1^4 + 4 b b_1 t_1^3 t_2 + 6 b b_1 t_1^2 t_2^2 + 4 b b_1 t_1 t_2^3 + b_1^2 t_2^4}{(b t_1 + b_1 t_2)l} \quad (1.21)$$

Dove il modulo elastico equivalente è dato da:

$$E^* = \frac{K\sqrt{K}}{\sqrt{12D}} \quad (1.22)$$

Mentre per quanto riguarda lo spessore equivalente, risulta:

$$t^* = \sqrt{\frac{12D}{K}} \quad (1.23)$$

Queste particolari strutture essendo molto resistenti alla compressione vengono sottoposte a dei test di **Buckling** (in italiano, instabilità). L'instabilità è quel fenomeno che si manifesta nel momento in cui si arriva al carico critico provocando l'inflessione della struttura (**Global buckling**) o l'inflessione della singola cella (**Local Buckling**).

Considerando l'interazione tra le tensioni lungo i lati dei triangoli e le tensioni nelle direzioni principali è necessario introdurre un fattore correttivo del volume μ_v , dato dal rapporto tra il volume realmente stampato e quello calcolato:

$$\mu_v = \frac{v_{attuale}}{v_{calcolata}} \quad (1.24)$$

Di conseguenza il carico critico che manda in instabilità il materiale è:

$$P_{cr} = P\mu_v = \frac{\mu_v E^* t^* \sigma_s H}{E_s} \quad (1.25)$$

Per elementi a basso spessore il Global Buckling potrebbe verificarsi prima che le tensioni interne raggiungano il limite di cedevolezza:

$$P_{cr} = \frac{4\pi^2 D}{L^2} \quad (1.26)$$



Figura 1.70: *Global buckling*

In merito all'instabilità locale, si genera quando si hanno spessori elevati o quando gli spessori delle costole sono molto sottili. Al contrario dell'instabilità globale, quella locale può inflettersi in due modi:

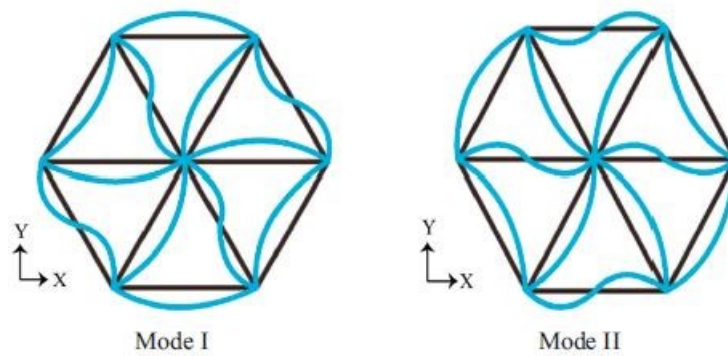


Figura 1.71: *Modalità d'inflessione* [18].

Per il modo I, i carichi ad instabilità sono dati da:

$$q_a \cot\left(\frac{q_a}{2}\right) + q_b \cot\left(\frac{q_b}{2}\right) + \frac{q_c^2}{2 - q_c \cot\left(\frac{q_c}{2}\right)} = 0 \quad (1.27)$$

Oppure:

$$q_a \cot\left(\frac{q_a}{2}\right) + q_c \cot\left(\frac{q_c}{2}\right) + \frac{q_a^2}{2 - q_a \cot\left(\frac{q_a}{2}\right)} = 0 \quad (1.28)$$

Per il modo II, i carichi sono:

$$q_c \cot\left(\frac{q_c}{2}\right) + q_b \cot\left(\frac{q_b}{2}\right) + \frac{q_a^2}{2 - q_a \cot\left(\frac{q_a}{2}\right)} = 0 \quad (1.29)$$

Dove q_a, q_b, q_c sono dati da:

$$q_a = l \sqrt{\frac{F_a}{D_2}} = l \sqrt{\frac{E_s S}{E^* t^* D_2} (N_x - \nu N_y)} \quad (1.30)$$

$$q_b = l \sqrt{\frac{F_b}{D_2}} = l \sqrt{\frac{E_s S}{E^* t^* D_2} \left(\frac{1-3\nu}{4} N_x - \frac{3-\nu}{4} N_y\right)} \quad (1.31)$$

$$q_c = l \sqrt{\frac{F_c}{D_2}} = l \sqrt{\frac{E_s S}{E^* t^* D_2} \left(\frac{1-3\nu}{4} N_x - \frac{3-\nu}{4} N_y\right)} \quad (1.32)$$

Dove:

$$D_2 = \frac{xb^3}{12(1-\nu^2)} + \frac{(S-xb)b_1^2}{12(1-\nu^2)} \quad (1.33)$$

F_a, F_b, F_c sono i carichi descritti in figura 1.67:

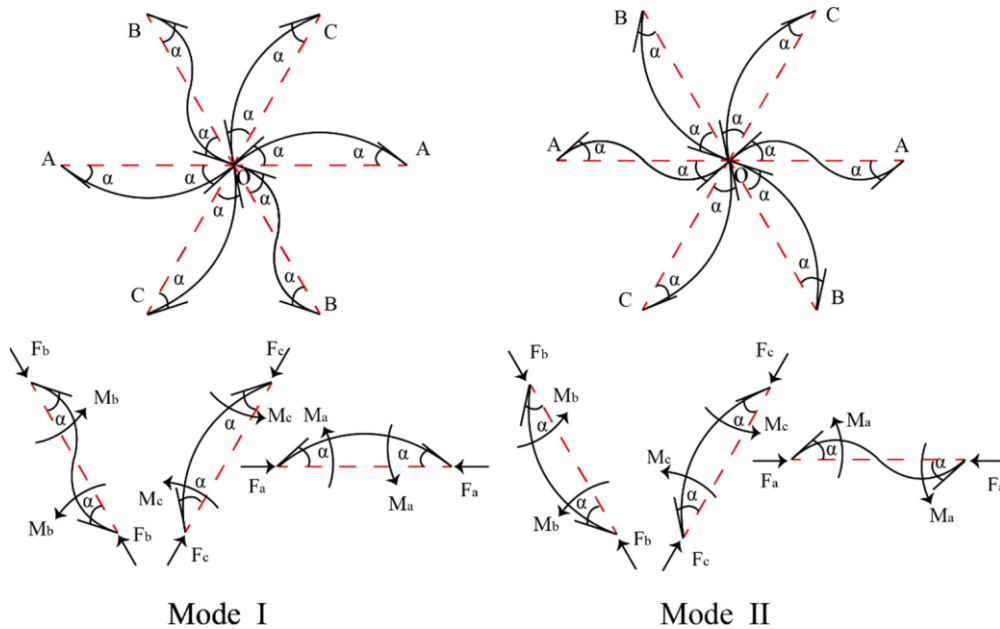


Figura 1.72: Modalità d'inflessione e carichi [19].

1.6 Rete Neurale

Le reti neurali sono un utile strumento per risolvere svariate problematiche, ad esempio di **Pattern Recognition**, analisi dei dati e di controllo. Sono molto veloci e possono trovare una soluzione tramite un insieme di esempi. Si studiano pertanto, reti di neuroni idealizzati da modelli matematici. Questo tipo di approccio è giovevole in vari campi, tra i quali quello della biologia; così dall'utilizzo di queste reti si può tentare di comprendere come funziona la computazione e la memorizzazione nei neuroni. Dal punto di vista ingegneristico invece, si creano macchine in grado di imparare. Per quanto concerne la memoria, un approccio di tipo neurale può essere funzionale, poichè una memoria di tipo "a indirizzo" non è associativa, cioè se si conosce solo un pezzo di indirizzo non è possibile risalire al dato desiderato (tuttavia esistono alcuni algoritmi in grado di ricostruire un indirizzo se vengono perdute piccole parti dello stesso), diversamente il cervello umano ha una memoria associativa, infatti attraverso il ricordo vago del viso di un individuo può presumibilmente, risalire a questo. La memoria biologica è anche molto più robusta, infatti è possibile risalire alle informazioni anche se ci vengono comunicate con degli errori. Tra tutti i tipi di reti neurali che sono state studiate, le più importanti e impiegate anche in applicazioni pratiche sono le reti **Multilayer Perceptron** e **Radial Basis Function**, le quali rientrano nella classificazione delle reti Feed-forward.

Una rete neurale di tipo **Feed-forward** può essere vista come una trasformazione non lineare, la quale è governata da alcuni parametri chiamati **pesi**, i cui valori vengono regolati da una serie di esempi dati al sistema. Il processo in cui si assegna i valori ai suddetti parametri è detto training, e può avvenire in modi diversi a seconda dell'algoritmo usato. Dopo aver assegnato i pesi in maniera consona, i nuovi dati potranno essere elaborati velocemente.

Il grande vantaggio derivante da questa tipologia di approccio, è la possibilità di risolvere problemi la cui soluzione tramite modelli matematici standard risulterebbe molto difficile.

Le reti neurali presentano altresì degli svantaggi, dunque vengono impiegate per la risoluzione di problematiche solo in presenza di determinati requisiti:

- Deve essere disponibile un grande numero di dati per il training, infatti una limitazione delle reti neurali è la necessità di avere una grande quantità di dati per addestrare la rete;
- È difficile trovare un modello adeguato alla soluzione del problema in questione;
- I dati devono essere analizzati in maniera rapida;
- Il metodo di processo dei dati deve essere abbastanza robusto, anche in presenza di un certo livello di rumore nei segnali di input.

Il neurone è l'unità cellulare costitutiva del tessuto nervoso, è capace di ricevere e inviare impulsi elettrici. Il cervello umano contiene circa 1011 neuroni, i quali servono a trasmettere informazioni

alle varie parti del corpo. Il neurone è formato da una parte centrale **soma**, da cui dipartono dei prolungamenti denominati **dendriti e assoni**, i primi sono gli “input” del neurone, i secondi fungono da “output” (vedi Figura 1.68). I collegamenti fra neuroni sono effettuati dalle sinapsi, le quali trasmettono gli impulsi tra gli assoni e gli alberi dendritici, e collegano una cellula a molte altre. Nel cervello sono quindi presenti un grandissimo numero di collegamenti possibili, che riescono a dare a un essere umano una potenza di calcolo elevatissima.

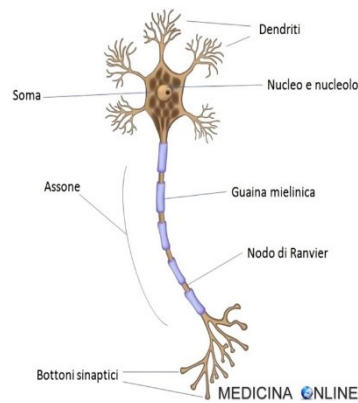


Figura 1.73: *Neurone.*

L'impulso elettrico si trasmette lungo l'assone. La depolarizzazione della membrana innesca un processo fisiologico che determina il rilascio di neurotrasmettitori nello spazio sinaptico, permettendo la comunicazione cellula-cellula. La natura eccitatoria o inibitoria, dipende dal neurotrasmettitore e quindi cresce o decresce la probabilità che il neurone successivo invii un impulso. Ogni sinapsi ha associato un peso che determina la forza dell'impulso proveniente dal neurone precedente, dunque è possibile intendere come input di una cellula neuronale, la somma pesata dei segnali provenienti dagli assoni delle altre cellule. Da questa struttura biologica si possono modellizzare i neuroni come delle funzioni non lineari che trasformano degli input ($x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$) in un output y . Come nelle cellule biologiche a ogni input è associato un peso (w_1, \dots, w_n), inoltre non bisogna trascurare un ulteriore parametro w_0 detto **bias**, il quale può essere visto come il peso dell'input x_0 che viene posto costante a 1. In questo modo è possibile definire l'attivazione del neurone come la somma pesata dei vari input:

$$a = \sum_{k=1}^N w_k x_k + w_0 \quad (1.34)$$

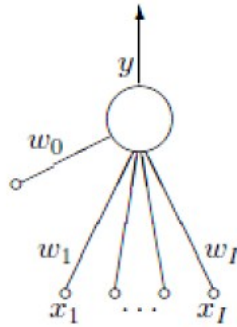


Figura 1.74: *Modello matematico del neurone.*

I pesi possono essere anche negativi, a seconda della sinapsi (che come già affermato può essere sia eccitatoria che inibitoria). Il modello non è completo solo con l'attivazione, è presente anche una funzione di attivazione $y = f(a)$, che fornisce l'output finale al neurone. Si può scegliere questa funzione in molti modi:

- Funzione lineare:

$$a = \sum_{i=0}^N w_i x_i \quad (1.35)$$

- Funzione sigmoidea nella forma di funzione logistica, quindi di equazione:

$$y(a) = \frac{1}{1+e^{-a}} \quad (1.36)$$

- Funzione tangente iperbolica:

$$y(a) = \tanh(a) \quad (1.37)$$

Viene usata spesso la funzione sigmoidea perchè garantisce la non linearità e fa rimanere i segnali entro un certo intervallo. Più specificatamente la funzione logistica è molto usata perchè possiede una relazione interessante, da $y(a)' = y(a)(1-y(a))$, invece la tangente iperbolica possiede la relazione $y(a)' = 1 - y(a)^2$.

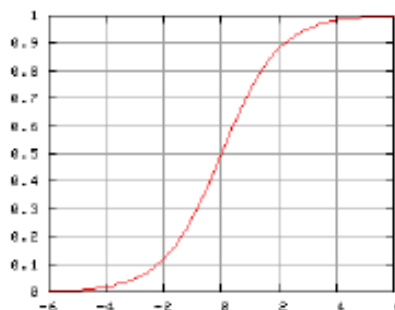


Figura 1.75: *Funzione logistica.*

Mettendo insieme le varie unità rappresentate con questo modello si possono rappresentare una classe molto ampia di funzioni, che possono essere usate per risolvere svariati problemi. Tutto ciò, unito ad un algoritmo di apprendimento che varia i pesi in maniera consona, dà vita alla rete neurale.

1.6.1 Multilayer Perceptron

Il **Perceptron** è una rete formata da un numero m di neuroni. Se considera d come il numero di input, l'output di questo tipo di rete sarà quindi dato da:

$$y_j = y\left(\sum_{i=0}^d w_{ji}x_i\right) \quad (1.38)$$

dove x_i sono gli input e w_{ji} sono i pesi di ogni input combinati con ogni output. Con questa architettura spesso si usano funzioni di attivazione del tipo funzione soglia. Sovente, questo tipo di rete risulta limitante, pertanto vengono introdotti altri livelli di neuroni e la funzione di attivazione viene sostituita con la funzione logistica (altrimenti sarebbe difficoltoso trovare un algoritmo di apprendimento). In questo modo, essendo la funzione logistica differenziabile, si possono adottare le regole del calcolo differenziale nell'algoritmo di apprendimento, dando vita a una rete detta multilayer perceptron. Si prenda in esame una rete formata da due livelli di unità di elaborazione, sempre con d ingressi e con m uscite per il primo strato, ma si sommano anche c uscite al secondo livello. Le unità del secondo livello sono dette unità nascoste, poichè le loro funzioni di attivazione non sono direttamente accessibili dall'esterno. Gli output finali della rete sono quindi dati da:

$$z_k = z\left(\sum_{j=1}^m w'_{kj}x_j\right) \quad (1.39)$$

dove z_k è l'output finale, w'_{kj} sono i pesi per ogni unità di elaborazione e y_j il segnale inviato dalle unità nascoste. Il bias sia nel caso del single layer, che nel caso del multilayer vale come coefficiente rispettivamente dell'ingresso x_0 e y_0 posti uguali a 1. La funzione di questo termine è importante, perchè ci assicura che la mappa della rete non sarà lineare. Unendo quindi le equazioni sopracitate si può giungere al risultato finale:

$$z_k = z\left(\sum_{j=1}^m w'_{kj}x_j \left(\sum_{i=0}^d w'_{ki}x_i\right)\right) \quad (1.40)$$

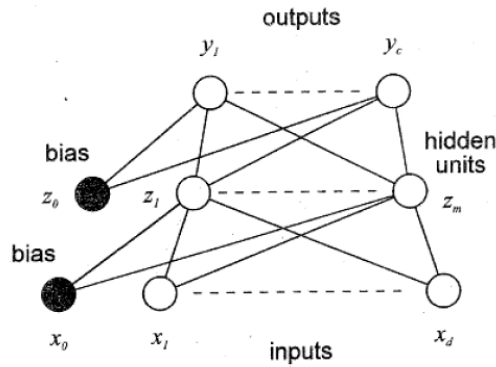


Figura 1.76: *Multilayer perceptron a 2 livelli.*

Per quanto riguarda le funzioni di attivazione se fossero entrambe lineari si potrebbe solo effettuare un prodotto tra matrici, quindi la funzione delle unità nascosta viene presa non lineare e differenziabile, così da aprire molte possibilità per l'utilizzo della rete. Per i vantaggi esposti nel capitolo precedente, viene usata la funzione sigmoidale sia nella forma *tanh*, sia come funzione logistica. La funzione di attivazione dell'uscita invece di più libera scelta, può essere sia lineare che non lineare a seconda dell'utilizzo della rete.

Una rete a più livelli ha una capacità di approssimazione molto più ampia di quella a un unico livello, infatti con un numero sufficiente di unità nascoste si può rappresentare una qualsiasi funzione continua sul dominio delle variabili d'ingresso.

1.6.2 Algoritmo di apprendimento dell'MLP

Nell'addestramento di una rete neurale, dato un insieme di vettori di input x e dei target t , l'obiettivo è far apprendere alla rete la relazione da cui sono legati input e output. Così facendo, introducendo (dopo l'addestramento) un input alla rete, l'output sarà molto vicino al target. Per comprendere come funziona l'algoritmo di apprendimento del MLP è necessario introdurre prima lo spazio dei pesi, si tratta dello spazio di dimensione dei parametri della rete. Questo spazio ha dimensione n , dove n è il numero dei pesi nella rete. Sugli assi cartesiani ci sono appunto i pesi (w_1, w_2, \dots, w_n) , e ad ogni punto del piano corrisponde una funzione della rete ben precisa. Infatti, modificando i pesi muta anche la mappa della rete.

Introdotta lo spazio dei pesi è possibile prendere in esame la funzione d'errore, cioè una funzione appartenente allo spazio dei pesi che misura quanto la rete è affidabile nella risoluzione del problema in esame. Il compito dell'algoritmo di apprendimento è quello di minimizzare questa funzione, quindi di trovare il punto nello spazio dei pesi in cui la funzione ha il punto di minimo globale, o in alcuni casi, può essere sufficiente un punto di minimo locale.

Per trovare il minimo di una funzione, il metodo più naturale è far uso del calcolo differenziale, quindi derivare la funzione d'errore rispetto ai pesi trovando il vettore gradiente $\nabla E(w)$ e agire iterativamente su di esso. Considerando ora un vettore di input $(x^q_1, x^q_2, \dots, x^q_d)$ ed un vettore di target t^q . Si prendano come errore la somma dei quadrati dei residui (che è una delle funzioni più utilizzate). Il residuo è definito come $r_{qk} = y_k(x^q, w) - t^q$, ne consegue che la funzione d'errore sarà espressa come segue:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{q=1}^n \sum_{k=1}^c \{y_k(x^q, w) - t^q\}^2 \quad (1.41)$$

Avendo a disposizione la funzione d'errore, data la derivata rispetto ai pesi che vanno dal livello nascosto all'output, essa può essere scritta nella forma:

$$\frac{\partial E^q}{\partial w_{kj}'} = \frac{\partial E^q}{\partial a_k'} \frac{\partial a_k'}{\partial w_{kj}'} \quad (1.42)$$

Dove a_k' è l'attivazione del layer finale quindi:

$$a_k' = \sum_{j=0}^m w_{kj}' z_j \quad (1.43)$$

Mentre:

$$\delta_k' = \frac{\partial E^q}{\partial a_k'} \quad (1.44)$$

Quindi l'equazione (1.42) diventa:

$$\frac{\partial E^q}{\partial w_{kj}'} = \delta_k' z_j \quad (1.45)$$

Combinando l'equazione (1.42), (1.43), (1.44) si ottiene:

$$\delta_k' = z(a'_k) \{y_k - t_k\} \quad (1.46)$$

Considerando che la 1.46 è una differenza tra valori di output e di target, si parla di **errore**. Per quanto riguarda il primo livello di unità di elaborazione, si inizia con lo scrivere l'attivazione delle unità nascoste:

$$z_j = g(a_j), a_j = \sum_{i=0}^d w_{ji} x_i \quad (1.47)$$

Operando in modo analogo al caso precedente si ottiene:

$$\frac{\partial E^q}{\partial w_{kj}'} = \delta_k x_i \quad (1.48)$$

È possibile trovare un'espressione per δ_j :

$$\delta_j = \frac{\partial E^q}{\partial a_j} = \sum_{k=1}^c \frac{\partial E^q}{\partial a_k'} \frac{\partial a_k'}{\partial a_j} \quad (1.49)$$

Unendo le equazioni (1.43), (1.44), (1.47) si ricava:

$$\delta_j = g'(a_j) \sum_{k=1}^c w_{kj}' \delta_k' \quad (1.50)$$

Sostanzialmente l'errore all'unità di processo j , è dato dalla somma degli errori δ_k' negli output moltiplicati per il loro peso, da qui il nome **backpropagation error**.

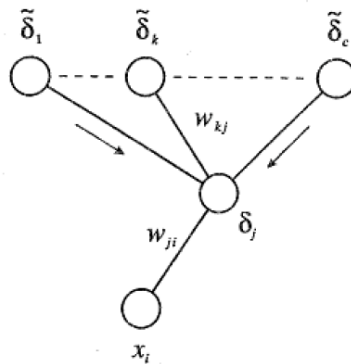


Figura 1.77: Diffusione del backpropagation error.

Riassumendo quanto detto, i passi per valutare la derivata della funzione d'errore sono:

- Per ogni input e target nell'insieme di dati che si hanno a disposizione, bisogna calcolare l'attivazione delle unità nascoste e di output, usando rispettivamente le equazioni (1.47) e (1.43);
- Trovare l'errore con l'equazione (1.46);
- Valutare l'errore delle unità nascoste con l'equazione (1.49);
- Valutare la derivata della funzione d'errore per la coppia in questione con le equazioni (1.48) e (1.45);
- Ripetere il procedimento per tutti i dati che si hanno a disposizione.

Con l'ottenimento del vettore gradiente, viene minimizzata la funzione d'errore. Per iniziare bisogna scegliere un punto nello spazio dei pesi da cui partire (potrebbe essere scelto anche a caso), in seguito viene aggiornato il vettore dei pesi muovendosi a piccoli passi nella direzione in cui il gradiente diminuisce più rapidamente. Iterando questo procedimento verrà trovata una sequenza di vettori dei pesi, le cui componenti saranno date da:

$$w^{\tau+1}_{kj} = w^{\tau}_{kj} - \eta \frac{\partial E}{\partial w_{kj}} w^{\tau} \quad (1.51)$$

dove η è un parametro denominato fattore di apprendimento. Teoricamente quindi, iterando questo procedimento è necessario trovare una sequenza di pesi che converge in un punto in cui la funzione d'errore risulta avere un minimo. η è un parametro delicato perché: se viene preso un valore troppo piccolo le variazioni saranno molto lente e quindi l'ottimizzazione avverrà in maniera poco efficiente; se viene preso un valore molto grande possono aver luogo oscillazioni divergenti.

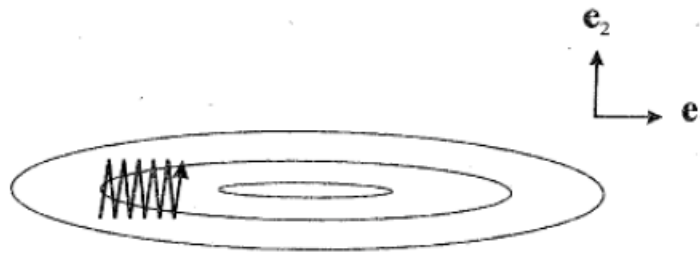


Figura 1.78: Un esempio di oscillazioni nella ricerca del minimo in una superficie d'errore.

L'ideale sarebbe rendere intercambiabile il fattore di apprendimento a seconda della situazione in cui ci si trova, e ciò è possibile introducendo un parametro nuovo μ , detto **Momento**, nell'equazione:

$$\Delta w^{\tau}_{ji} = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{kj}} w^{\tau} + \mu_{ji} w^{\tau-1} \quad (1.51)$$

Il parametro μ si può cambiare man mano ed è una costante nell'insieme $0 < \mu \leq 1$. La funzione esatta di questo parametro è aumentare il fattore di apprendimento quando nella funzione si presenta una bassa curvatura, e di diminuirlo nelle zone di alta curvatura in modo da evitare oscillazioni.

Per un metodo alternativo, è possibile anche tenere conto che l'errore è la somma dei vari termini corrispondenti al training set, pertanto al posto di procedere direttamente sulla funzione d'errore complessiva, si può agire separatamente sui diversi pattern.

In riferimento alla conclusione dell'algoritmo, non ci sono metodi fissi per decidere quando bloccarlo, dato che le funzioni d'errore non lineari possono essere molto complesse. Pertanto, sono vari i criteri per fare ciò, plausibilmente si può bloccare l'algoritmo dopo un certo numero di iterazioni, dopo un certo tempo d'esecuzione oppure quando l'errore supera una certa soglia.

1.6.3 Suddivisione del Training set e Testing set

Solitamente, l'insieme di dati a disposizione è limitato, di conseguenza è pensabile costruire un insieme di test ripetendo gli esperimenti, oltre al fatto che occorre sfruttare al meglio l'insieme dato. Esistono diversi metodi di suddivisione del training set e del testing set:

- **Metodo Resubstitution:** l'idea è quella di costruire il classificatore e di testarlo con lo stesso insieme di dati a disposizione.
- **Metodo di Cross Validation:** si basa sulla convinzione che sia necessario utilizzare due insiemi disgiunti per realizzare e per testare un classificatore.

Esistono molte tipologie del **Cross Validation**:

- **Holdout:** l'insieme dei dati viene partizionato casualmente in due sottoinsiemi disgiunti di eguale dimensione, dove uno viene usato come Learning Set e l'altro come Test Set. Questo metodo fornisce una stima superiore dell'errore.
- **Averaged Holdout:** per rendere il risultato meno dipendente dalla partizione scelta, si mediano i risultati calcolati su più partizioni holdout. Le partizioni sono costituite casualmente, oppure in modo esaustivo e questo metodo fornisce una stima superiore dell'errore.
- **Leave One-Out:** dato un insieme di dati di cardinalità N , questo metodo ne utilizza $N-1$ per costruire il classificatore, mentre il dato escluso viene usato per testarlo. Anche in questo caso si effettua una media sulle N partizioni effettuabili, questo metodo produce una stima superiore dell'errore.
- **Leave K-out:** è una generalizzazione della tecnica precedente. L'idea è quella di suddividere l'insieme dei dati in S segmenti distinti e casuali. Si realizza il classificatore utilizzando $S-1$ segmenti e parallelamente, si testa il segmento rimanente. Questa operazione viene effettuata S volte, variando a turno il segmento del Test Set e infine l'errore viene mediato tra gli S risultati.

PARTE SPERIMENTALE

Introduzione

Il presente lavoro ha come obiettivo lo studio del comportamento a buckling di strutture Isogrid realizzate in stampa 3D di materiale Carbon PA. Le stampe sono state realizzate presso il DISM, con una Roboze One +400, che ha caratteristiche sorprendentemente differenti rispetto alle comuni stampanti desktop poiché riesce a stampare tecnopolimeri e ad estruderli fino a 450°C, presenta un Beltless system cioè una trasmissione meccanica a cremagliera elicoidale che conferisce alla macchina migliori precisioni lungo i tre assi e minori vibrazioni al sistema. Inizialmente, è stato realizzato un provino di trazione seguendo la norma ASTM D638, al fine di controllare i valori definiti dal produttore (Tabella 1.3, Tabella 1.4). Successivamente sono stati realizzati dei provini Isogrid, facendo variare uno o più parametri in differenti condizioni, con lo scopo di osservare il comportamento degli stessi al buckling (o instabilità) individuando il carico massimo e come lo stesso vari in funzione dei differenti parametri. Una volta ottenuti i risultati mediante prove sperimentali, queste ultime sono state confrontate mediante analisi FEM per osservare il discostamento che quest'ultimo presenta con le prove svolte in laboratorio. Infine, è stata realizzata una rete neurale, in grado di prevedere una volta inseriti vari input e output dei provini testati, il comportamento di strutture Isogrid che abbiano differenti grandezze rispetto a quelle non testate, al fine di poter prevedere come una certa struttura sia in grado o meno di resistere a determinati carichi.

2.1 Prova di trazione

Una delle più comuni prove meccaniche **sforzo-deformazione** è la prova di trazione. La prova di trazione viene utilizzata per determinare diverse proprietà del materiale, che sono estremamente importanti ai fini della progettazione. Generalmente il provino in esame viene deformato fino a rottura mediante incremento graduale del carico, il quale viene applicato in maniera uniassiale lungo l'asse più lungo del provino. Durante la prova, la deformazione è confinata nella zona centrale del provino, che ha sezione costante lungo la sua lunghezza. Il provino così ottenuto, viene sottoposto alla prova inserendo le sue due estremità nella testa di afferraggio della macchina. La macchina di trazione è configurata in maniera tale da garantire che il provino subisca un allungamento a velocità costante; inoltre misura continuamente e simultaneamente durante la prova, sia il carico istantaneamente applicato (mediante una cella di carico) che l'allungamento risultante (mediante l'impiego di estensimetri).

In genere la prova dura qualche minuto ed è una prova di tipo distruttivo, ovvero il provino viene deformato in maniera permanente e, molto spesso, fratturato.

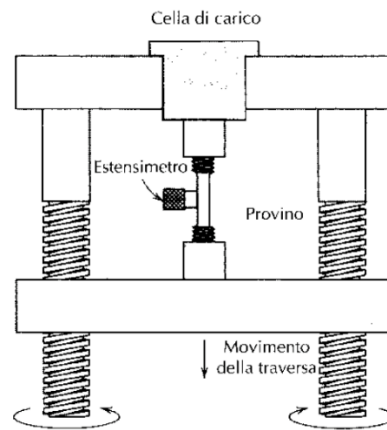


Figura 2.1: Prova di trazione.

I valori misurati durante la prova sono il carico o la forza in funzione dell'allungamento. Le caratteristiche carico-deformazione dipendono dalle dimensioni del provino, infatti, se ad esempio, si raddoppia la sezione di un provino, la forza necessaria a causare il medesimo allungamento è doppia. A questo proposito, al fine di rendere la prova indipendente dai parametri geometrici del provino, il carico e l'allungamento vengono normalizzati in modo da ottenere i parametri: sforzo nominale e deformazione nominale. Lo sforzo nominale σ è definito dalla relazione:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

nella quale F è il carico istantaneamente applicato perpendicolarmente alla sezione del provino ed ha le dimensioni di una forza (Newton, N) mentre A è l'area iniziale della sezione del provino, cioè prima che venga applicato il carico (mm^2). Le unità di misura dello sforzo nominale sono i Megapascal (Mpa)

La deformazione nominale ε è definita dalla:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (2.2)$$

L è la lunghezza originale misurata a provino scarico (mm), mentre Δl è la differenza tra la lunghezza iniziale e quella finale (mm), mentre, la deformazione nominale è adimensionale.

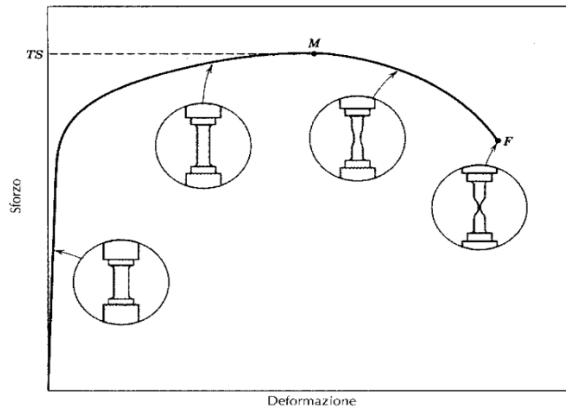


Figura 2.2: *Diagramma sforzo-deformazione con variazione di sezione del provino.*

Seguendo la norma ASTM D638 è stato realizzato il provino e successivamente stampato.

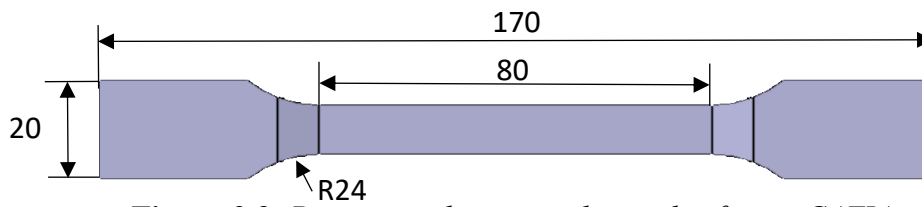


Figura 2.3: *Provino realizzato mediante il software CATIA.*



Figura 2.4: *Roboze One +400.*

Dalla prova ne deriva il seguente grafico sforzo-deformazione stampato a 0°:

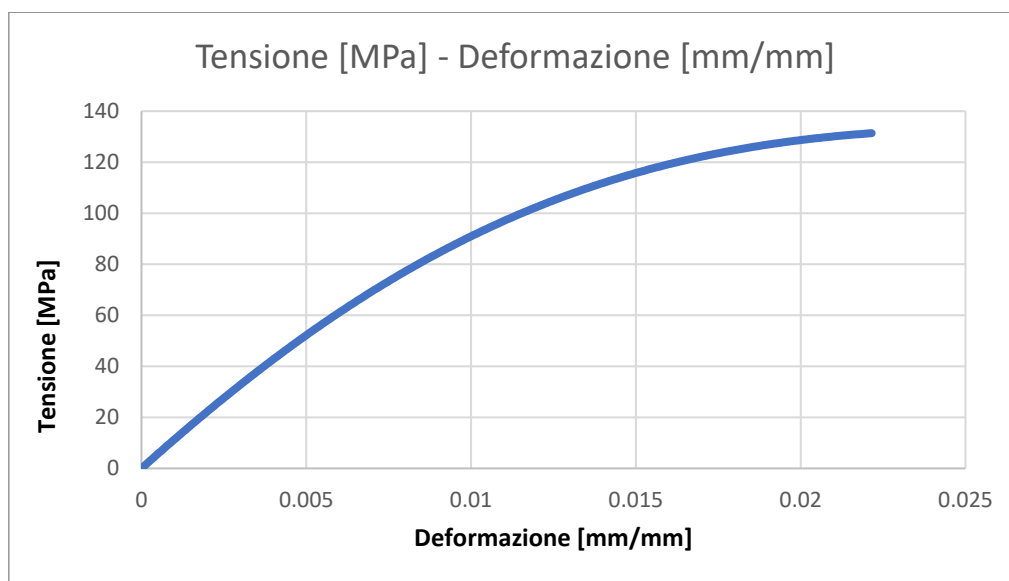


Figura 2.5: Grafico sforzo deformazione.

In funzione dell'angolazione di deposizione, saranno influenti i valori di tensione [20].

2.2 Prova di instabilità

Uno degli aspetti principali da tenere ben presente nella progettazione delle strutture reticolari è quello legato ai problemi di stabilità dell'equilibrio. L'elevata resistenza dei materiali compositi, rispetto ad altri materiali quali: l'acciaio, il calcestruzzo ed altri materiali consente infatti, a parità di sollecitazioni, di adottare per gli elementi strutturali sezioni molto ridotte con notevole risparmio di materiale. Gli elementi strutturali in composito sono pertanto molto snelli, cosicché nelle membrane compresse o pressoinflesse occorre prestare attenzione ai fenomeni di instabilità. Un'asta semplicemente compressa, a sezione costante e sufficientemente snella, vincolata alle sue estremità, per qualunque valore del carico, si trova in una configurazione di equilibrio che corrisponde ad una configurazione rettilinea. Data una configurazione iniziale, indicata con C_0 , ossia alla situazione in assenza di carico, al crescere del carico, prima di raggiungere la resistenza a compressione del materiale, è possibile che la trave improvvisamente si disponga in una configurazione diversa da quella iniziale, in cui la linea d'asse si è incurvata, e che corrisponde ancora ad una configurazione di equilibrio per la struttura (configurazione che si indica con C_1). Supponendo che gli spostamenti siano sufficientemente piccoli (e quindi che lo spostamento trasversale $y(x)$ non sia troppo elevato), si può ricostruire la forma della configurazione deformata imponendo la condizione di equilibrio.

A differenza dell'approccio "lineare", in cui si pensa che la configurazione che assume un qualunque corpo a seguito di una deformazione causata da carichi esterni sia talmente vicina a quella iniziale da

ritenere le due configurazioni praticamente coincidenti, occorre avvicinarsi al problema secondo un procedimento “non lineare” o “del secondo ordine”; si rimuove quindi l’ipotesi di linearità tra carico applicato e deformazione e si studia l’equilibrio tenendo conto dell’influenza dello stato di spostamento sullo stesso equilibrio.

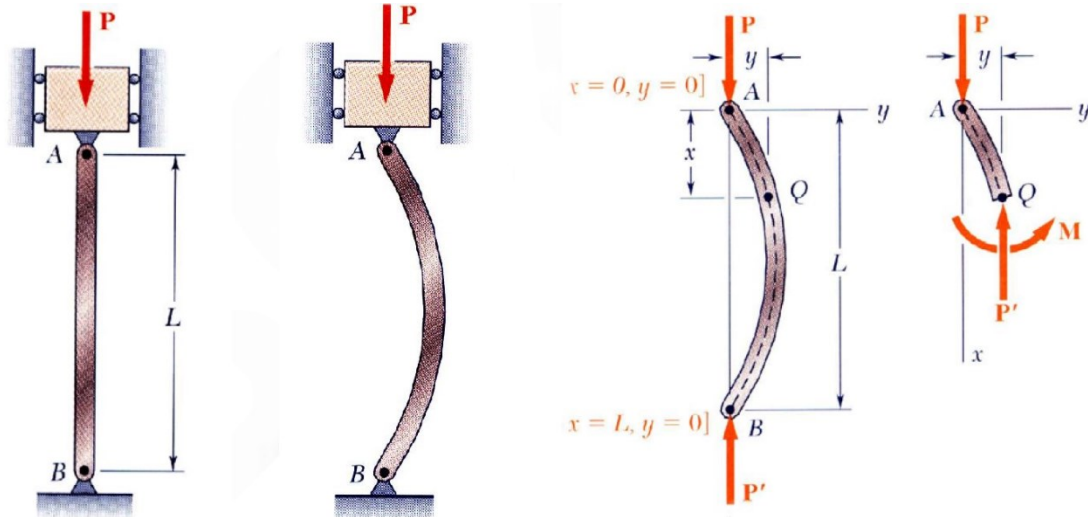


Figura 2.6: *Trave snella inflessa.*

Con si evince dalla situazione in figura, nella configurazione C_1 il carico assiale induce, a causa dello spostamento trasversale, un momento sollecitante (che chiameremo “esterno”), che nella generica sezione a distanza x è pari:

$$M_{est} = P y(x) \quad (2.3)$$

L’equilibrio impone che il materiale (supposto ancora elastico lineare) tenda ad opporsi a tale sollecitazione deformandosi, reagendo quindi con un momento “interno” che, secondo le consuete equazioni delle travi inflesse, vale:

$$M_{int} = -EJ y''(x) \quad (2.4)$$

La condizione di equilibrio che:

$$M_{est} = M_{int} \rightarrow -EJ y''(x) = P y(x) \quad (2.5)$$

L’equilibrio differenziale che si ottiene è quindi del tipo:

$$y''(x) + \frac{P}{EJ} y(x) = 0 \quad (2.6)$$

Che si può riscrivere nella forma:

$$y''(x) + \alpha^2 y(x) = 0 \quad (2.7)$$

Dopo aver posto:

$$\alpha = \sqrt{\frac{P}{EJ}} \quad (2.8)$$

L'equazione ammette una soluzione generale del tipo:

$$y(x) = A \sin(\alpha x) + B \cos(\alpha x) \quad (2.9)$$

Dove le costanti A e B possono essere esplicitate imponendo le condizioni al contorno offerte dai vincoli. Nel caso in esame (estremità incernierate), le condizioni al contorno impongono che:

$$\begin{cases} y(0) = 0 \\ y(L) = 0 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} B = 0 \\ A \sin(\alpha L) + B \cos(\alpha L) = 0 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} B = 0 \\ A \sin(\alpha L) = 0 \end{cases} \quad (2.10)$$

Il sistema ammette due soluzioni: la prima (banale) corrisponde a A=0, B=0, ossia alla configurazione indeformata (la configurazione iniziale, C₀); la seconda (supponendo A≠0) si ottiene annullando l'argomento della funzione seno, ossia:

$$\alpha L = \pi \rightarrow \pi = L \sqrt{\frac{P}{EJ}} \rightarrow P = \frac{\pi^2 EJ}{L^2} \quad (2.11)$$

Il valore del carico critico così ottenuto si chiama carico critico (euleriano) della trave, e rappresenta il più piccolo valore del carico assiale per il quale la trave caricata di punta può assumere una configurazione di equilibrio diversa dalla configurazione indeformata C₀. Qualunque siano le condizioni vincolari di estremità, per una trave snella si può dimostrare che il carico critico assume sempre la forma:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EJ}{L_0^2} \quad (2.12)$$

In cui si indica con L₀ la **lunghezza libera di inflessione**, definita come la distanza tra due flessi consecutivi nella deformata "critica" della trave, ossia la deformata che la trave assume nella configurazione deformata C₁.

Il valore della lunghezza libera di inflessione dipende esclusivamente dal tipo di vincolo agli estremi della trave, e viene spesso espresso in funzione della luce L della trave, attraverso l'introduzione di

un coefficiente di vincolo β :

$$L_0 = \beta L \quad (2.13)$$

Il carico critico viene spesso espresso nella forma:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EJ}{L_0^2} = \frac{\pi^2 E A \rho^2}{L_0^2} = \pi^2 EA \left(\frac{\rho}{L_0}\right)^2 = \frac{\pi^2 EA}{\lambda^2} \quad \lambda = \frac{L_0}{\rho} \quad (2.14)$$

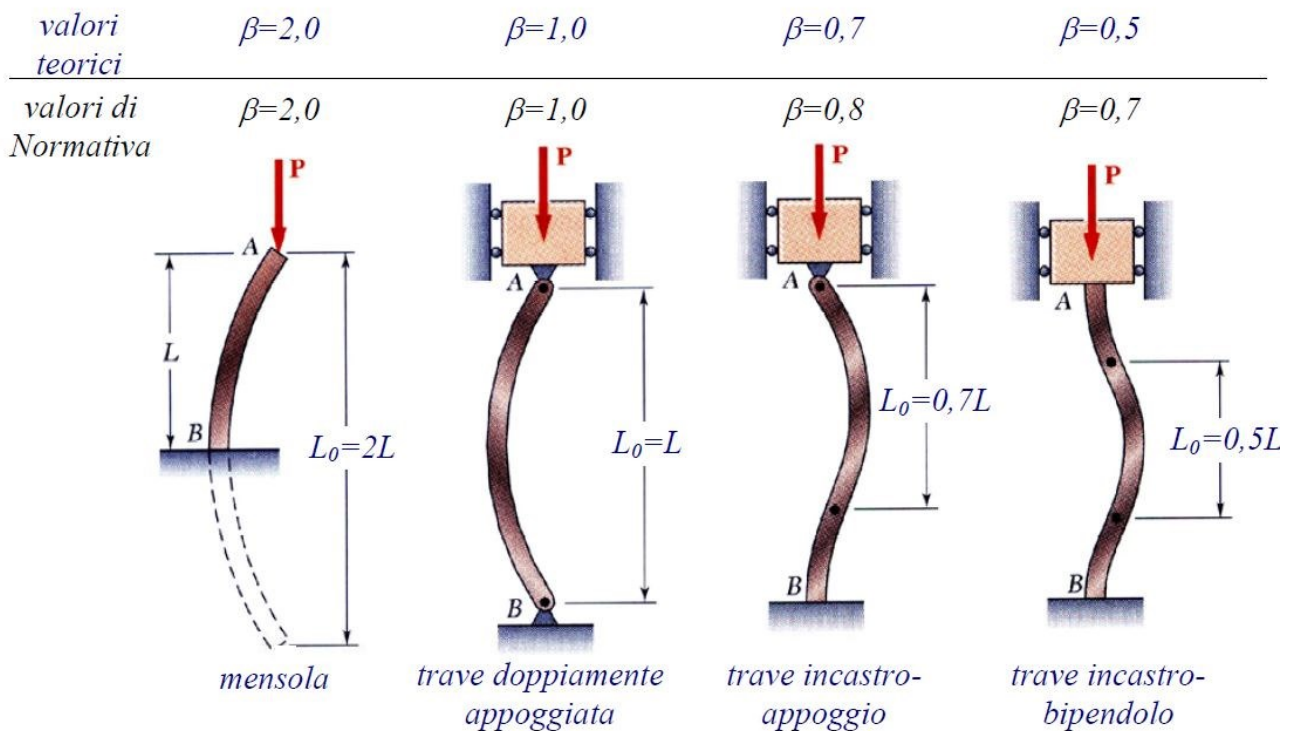


Figura 2.7: Diversi valori di β in base al tipo di vincolo.

I valori di Normativa delle lunghezze libere di inflessione tendono ad essere maggiori di quelli teorici, perché tengono conto del fatto che nella realtà i vincoli non sono perfetti.

Nel presente lavoro, considerando quanto appena descritto e la meccanica delle Isogrid (vedi Capitolo 1.5.1) sono stati realizzati i seguenti provini:

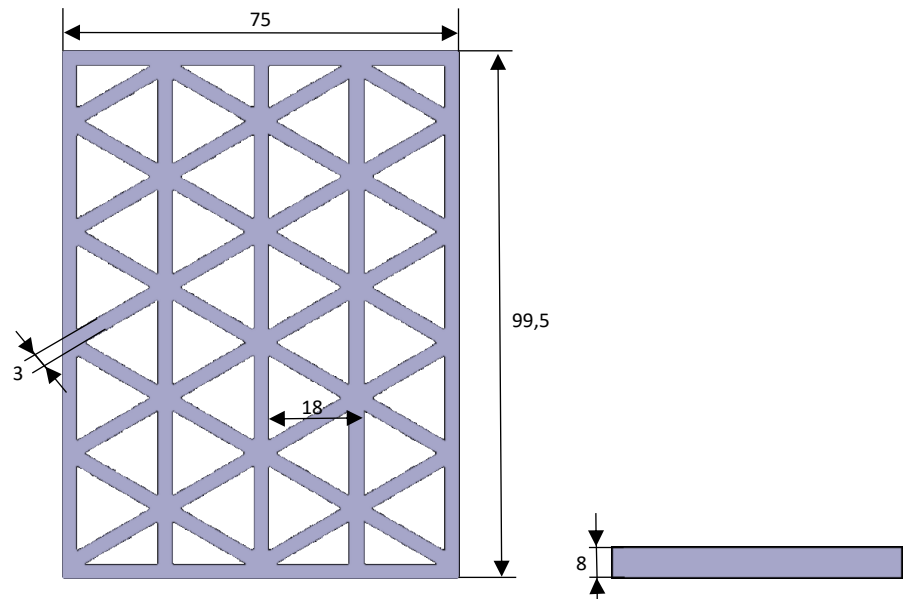


Figura 2.8: *Provino Isogrid denominato 3x8 per la larghezza della costola e l'altezza del provino.*

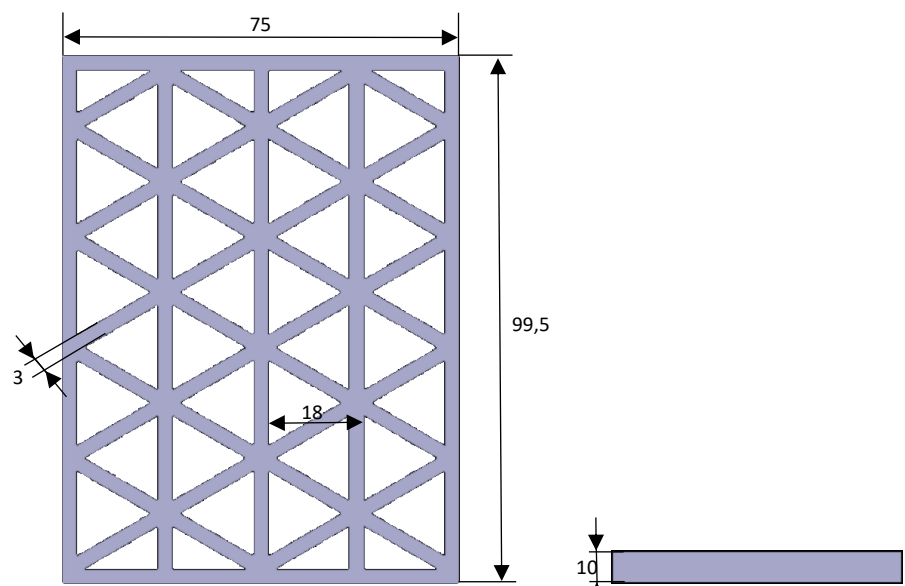


Figura 2.9: *Provino Isogrid denominato 3x10.*

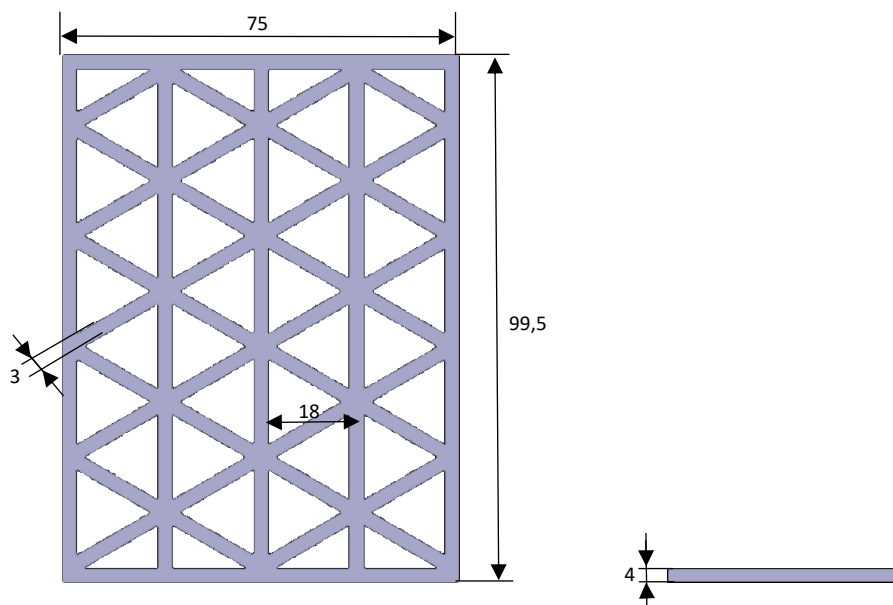


Figura 2.10: *Provino Isogrid denominato 3x4.*

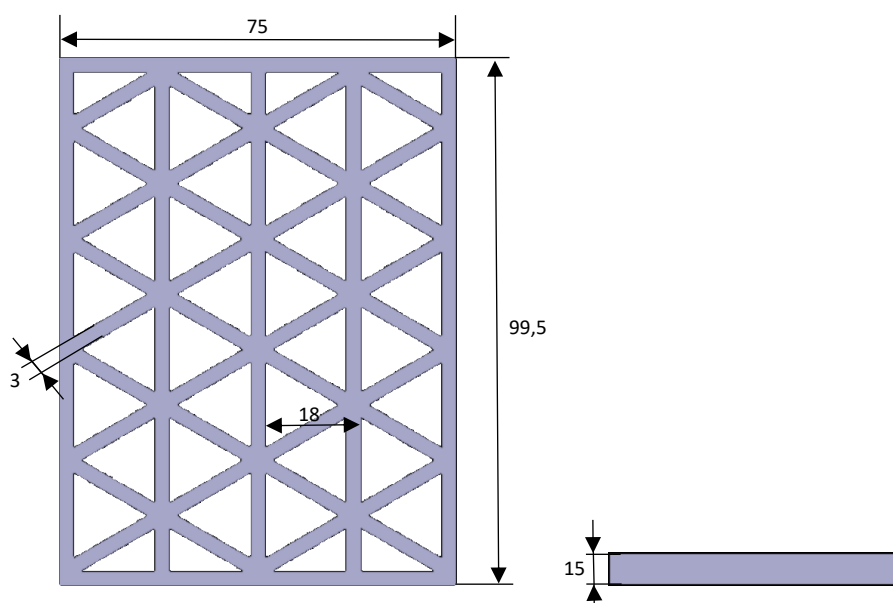


Figura 2.11: *Provino Isogrid denominato 3x15.*

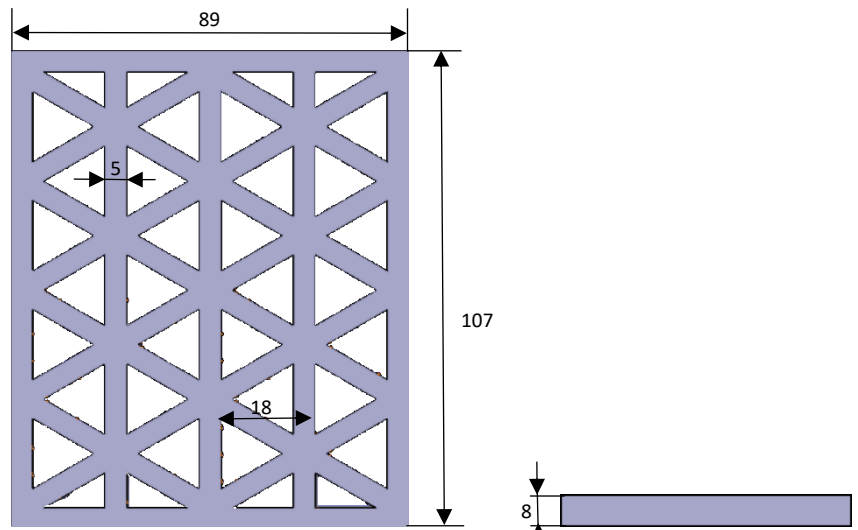


Figura 2.12: *Provino Isogrid denominato 5x8.*

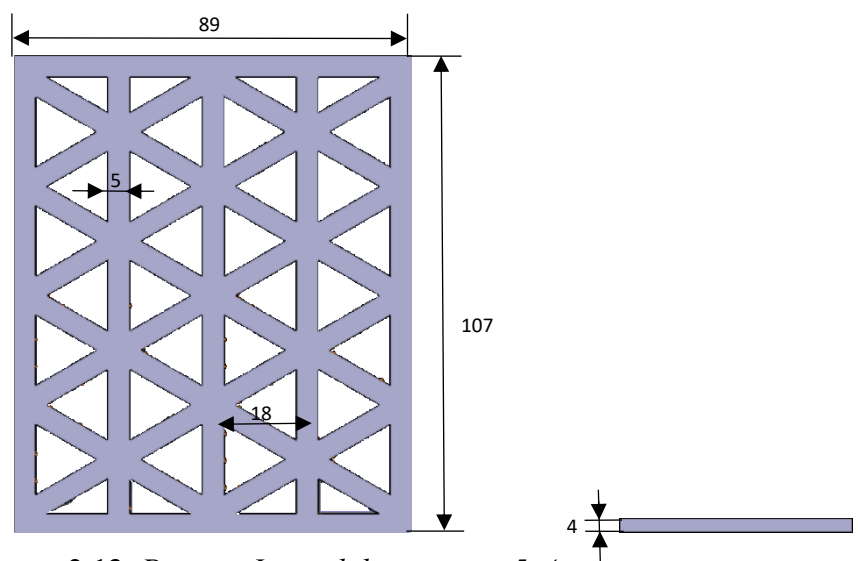


Figura 2.13: *Provino Isogrid denominato 5x4.*

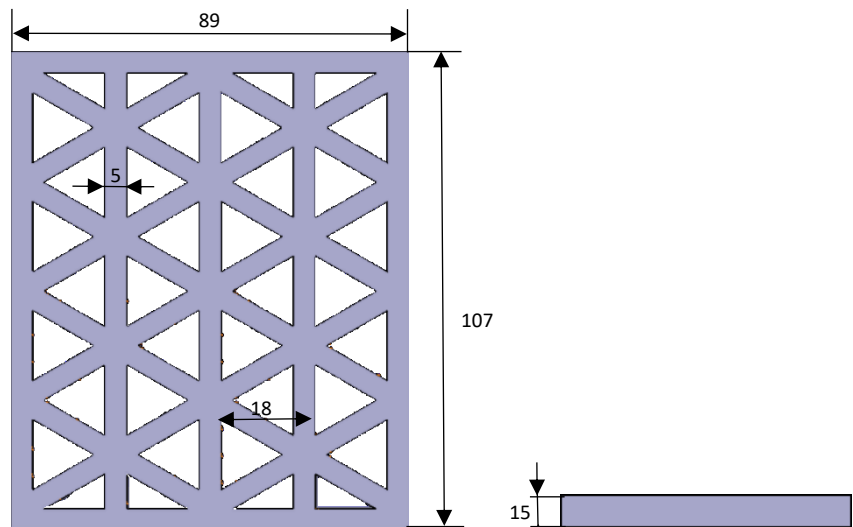


Figura 2.14: *Provino Isogrid denominato 5x15.*

Per la realizzazione dei provini è fondamentale illustrare i passaggi preliminari svolti per la stampa. Il primo step, consiste nel riscaldare in un forno, la bobina di Carbon PA a 120 °C per 4 ore al fine di asciugare la stessa tale da rendere il materiale più fragile e resistente.



Figura 2.15: *Forno utilizzato per l'eliminazione dell'umidità nella bobina.*

Successivamente la bobina sarà inserita all'interno di un ambiente controllato a 70°C per tutta la durata della stampa al fine di evitare che il materiale si inumidisca e che la stampa venga con alte rugosità.

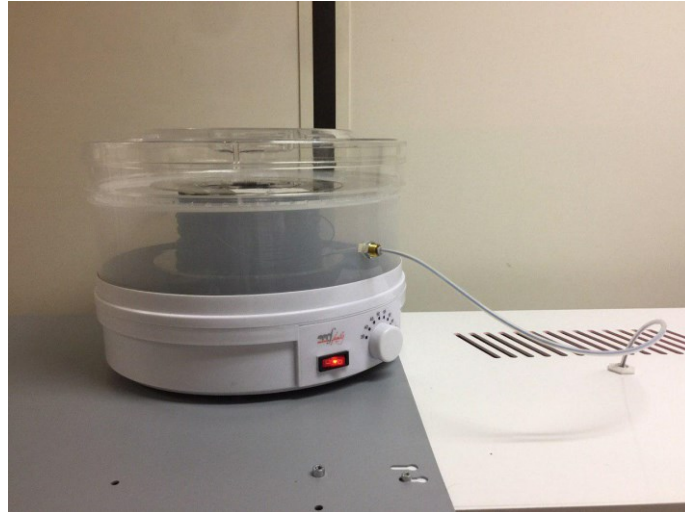


Figura 2.16: Ambiente controllato, dove viene posizionata la bobina.

Dopo di che, il materiale sarà preriscaldato nell'estrusore a 240°C, mentre il piano di stampa sarà riscaldato a 45°C per far aderire maggiormente il filamento estruso allo stesso. Infine sarà inserito un file **Gcode**, precedentemente realizzato mediante un programma di slicing, in questo caso **Simplify** e verrà avviata la stampa.

Una volta realizzati, i provini sono stati eliminati del **raft**, elemento al disotto degli stessi utilizzato nella stampa 3D per distaccare il piatto di stampa con il provino vero e proprio e pesato.

Il provino viene pesato per poter osservare una condizione molto importante poiché va ad incidere sulle prestazioni del materiale stesso, cioè: la presenza di **vuoti**, che inumidisce il provino. Per poter eliminare l'umidità, il provino sarà riscaldato per 120°C per 4 ore e ripeso di nuovo, quest'ultimo passaggio permetterà di confrontare la differenza di peso e di conseguenza l'umidità eliminata.

Di conseguenza è possibile sottolineare come le prove sono state condotte con provini:

1. **Umidi:** una volta stampati non hanno subito alcun processo;
2. **Secchi:** hanno subito un processo di eliminazione dell'umidità attraverso un riscaldamento a 120°C per 4 ore.

Successivamente vengono messi a confronto:

- I valori di Carico a compressione nelle due condizioni;
- % di umidità eliminata;
- La rottura che può essere duttile o fragile.

Come si può notare nei successivi grafici, i provini che hanno subito il trattamento termico a 120°C per 4 ore hanno un comportamento e rottura fragile ma anche dei carichi massimi maggiori rispetto a quelli non trattati, infatti, questi ultimi nella maggior parte dei casi subiscono una deformazione plastica con rotture o meno duttili.

Isogrid 3x4

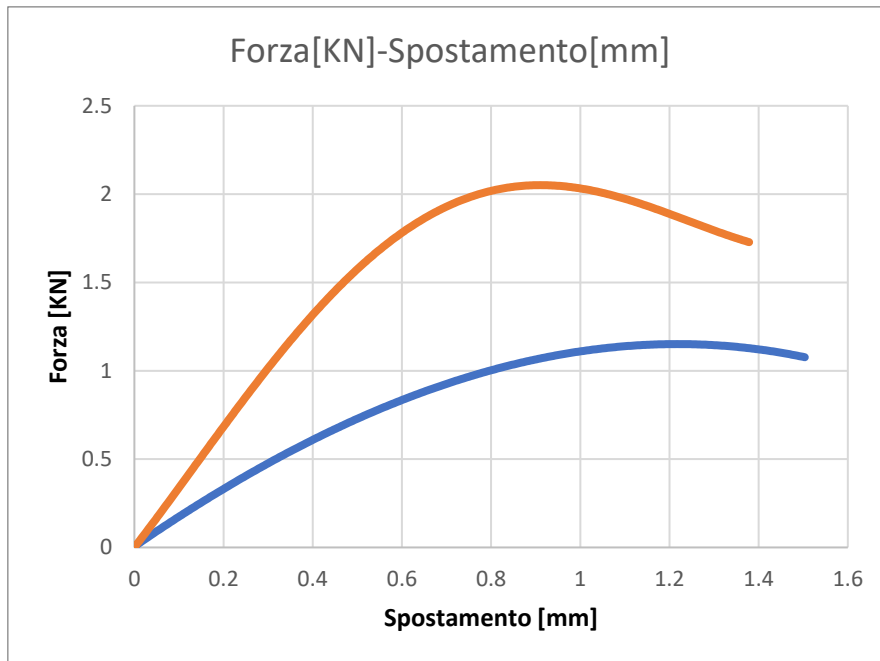


Figura 2.17: Comparazione del carico massimo della struttura Isogrid, nelle due differenti condizioni attraverso il grafico Forza-Spostamento.

Prova	Peso iniziale	Peso prova	F massima	% umidità
1°	22	22	1.1	
2°	22.37	22.11	2.07	-1.16227

Tabella 2.1: La 2° prova (in giallo) fa riferimento al provino che ha subito, successivamente alla sua realizzazione, il trattamento termico; nella 1° prova non viene eseguita questo ulteriore trattamento.

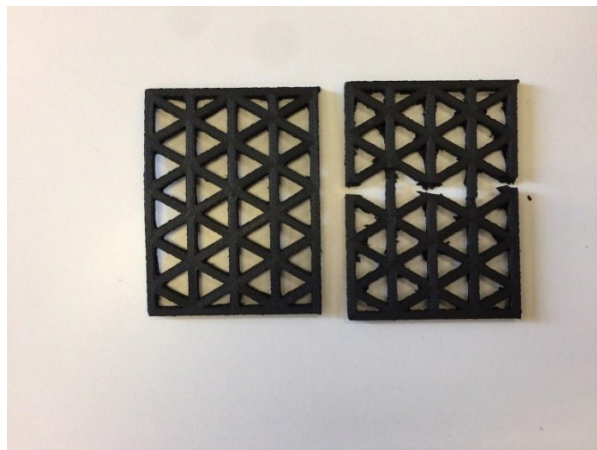


Figura 2.18: Comparazione dei due provini al termine della prova di compressione, a destra il provino che ha subito il trattamento in forno.

Isogrid 3x8

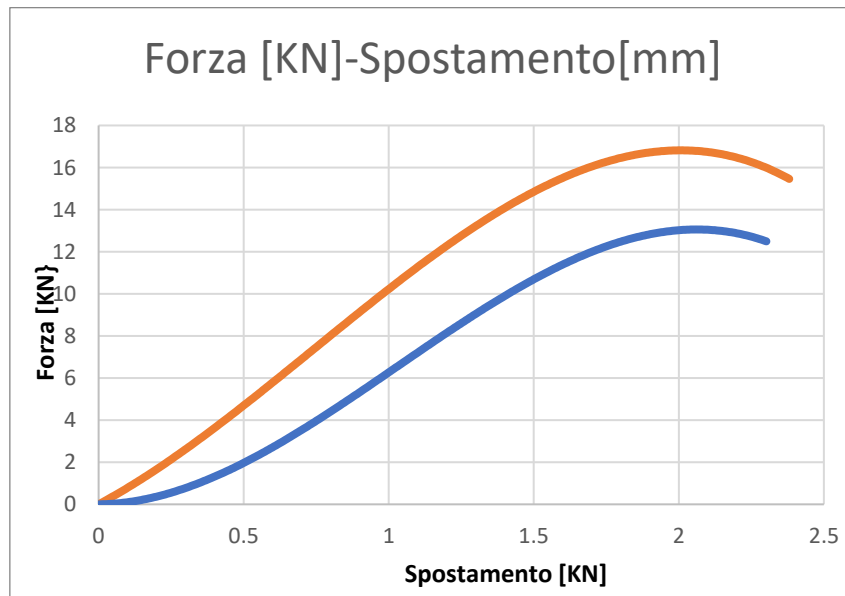


Figura 2.19: Comparazione del carico massimo della struttura Isogrid attraverso il grafico Forza-Spostamento, la curva in arancione è quella che ha subito il trattamento termico.

Prova	Peso iniziale	Peso prova	F massima	% umidità
1°	44.95	44.95	13.2	
2°	44.89	44.49	17.02	-0.89107

Tabella 2.2: La 2° prova (in giallo) fa riferimento al provino che ha subito, successivamente alla sua realizzazione, il trattamento termico; nella 1° prova non viene eseguito questo ulteriore trattamento.

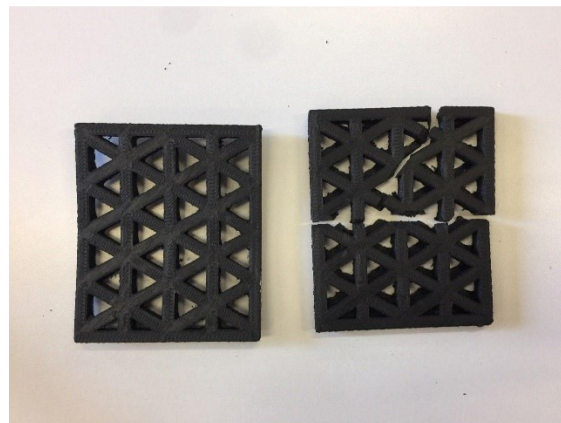


Figura 2.20: Comparazione dei due provini al termine della prova di compressione, a destra il provino che ha subito il trattamento in forno.

Isogrid 3x10

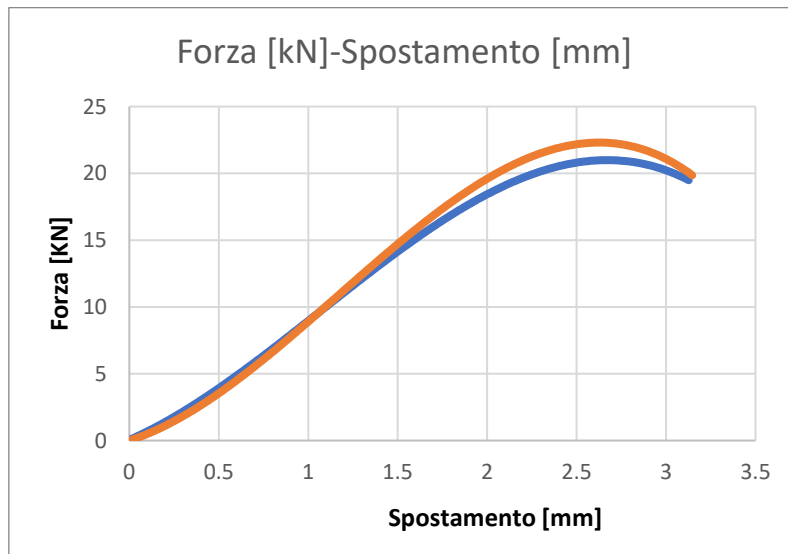


Figura 2.21: Comparazione del carico massimo della struttura Isogrid attraverso il grafico Forza-Spostamento, la curva in arancione è quella che ha subito il trattamento termico.

Prova	Peso iniziale	Peso prova	F massima	% umidità
1°	54.9	54.9	21.3	
2°	54.73	54.24	22.25	-0.8953

Tabella 2.3: La 2° prova (in giallo) fa riferimento al provino che ha subito, successivamente alla sua realizzazione, il trattamento termico; nella 1° prova non viene eseguito questo ulteriore trattamento.

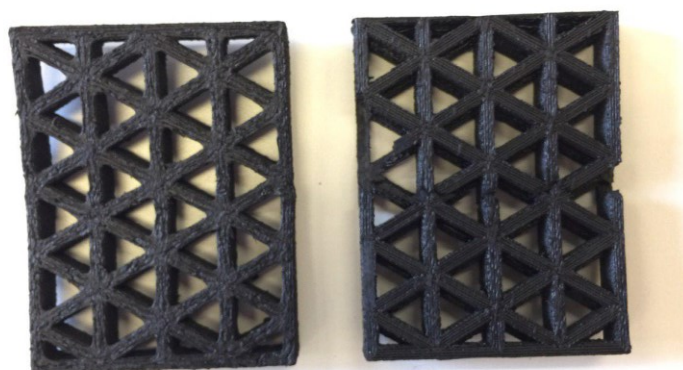


Figura 2.22: Comparazione dei due provini al termine della prova di compressione, a destra il provino che ha subito il trattamento in forno.

Isogrid 3x15

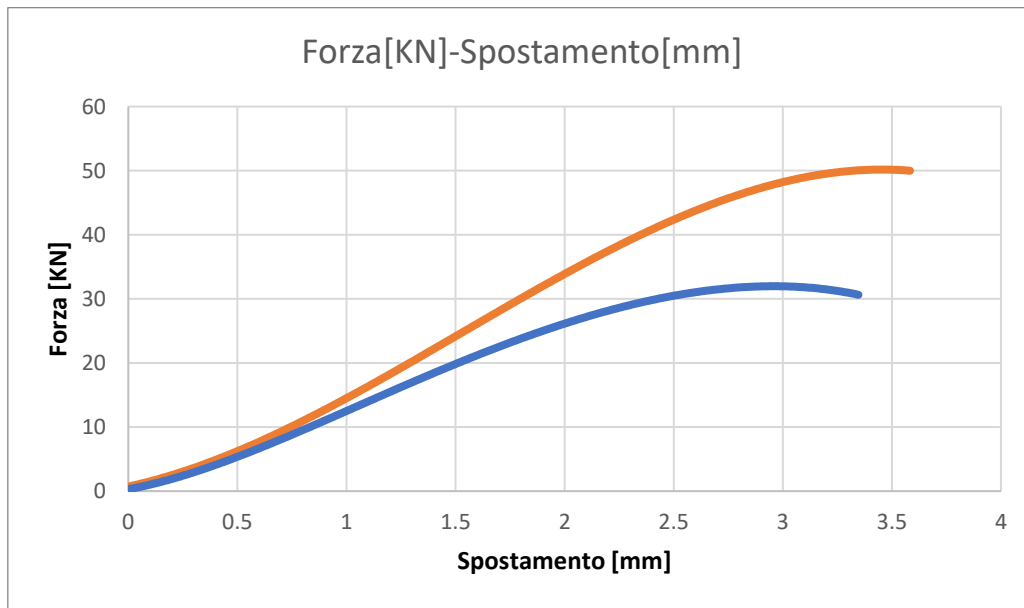


Figura 2.23: *Comparazione del carico massimo della struttura Isogrid attraverso il grafico Forza-Spostamento, la curva in arancione è quella che ha subito il trattamento termico.*

Prova	Peso iniziale	Peso prova	F massima	% umidità
1°	81.9	81.9	32.1	
2°	83.32	82.59	50.63	-0.87614

Tabella 2.4: *La 2° prova (in giallo) fa riferimento al provino che ha subito, successivamente alla sua realizzazione, il trattamento termico; nella 1° prova non viene eseguito questo ulteriore trattamento.*

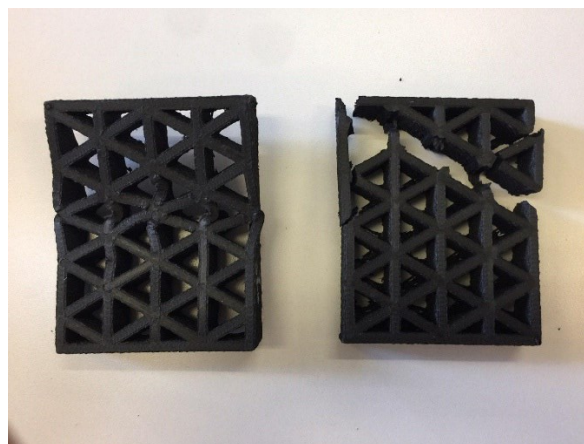


Figura 2.24: *Comparazione dei due provini al termine della prova di compressione, a destra il provino che ha subito il trattamento in forno.*

È importante notare che dato l'elevato spessore, il provino subisce un'instabilità locale.

Isogrid 5x4

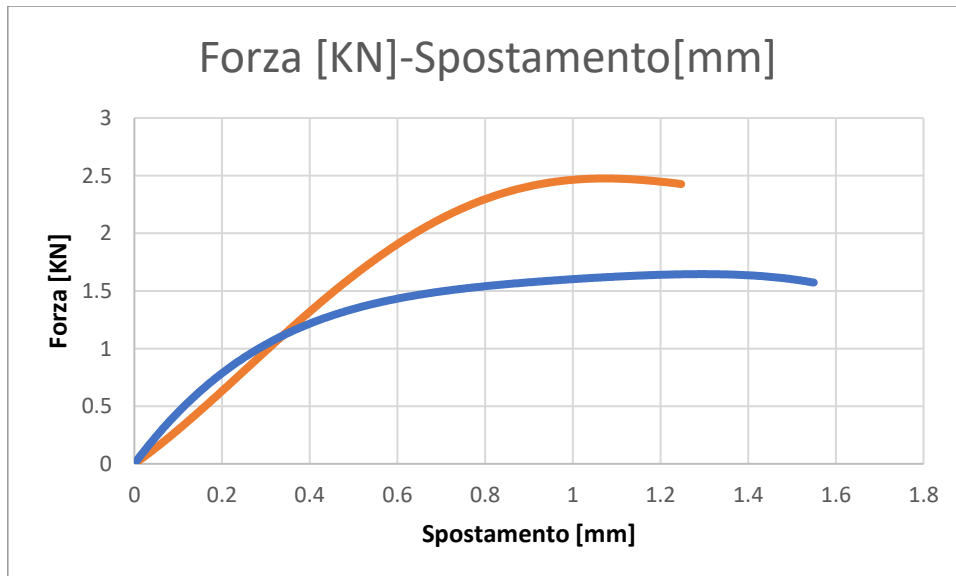


Figura 2.25: Comparazione del carico massimo della struttura Isogrid attraverso il grafico Forza-Spostamento, la curva in arancione è quella che ha subito il trattamento termico.

Prova	Peso iniziale	Peso prova	F massima	% umidità
1°	36.93	36.93	1.68	
2°	37.18	36.82	2.48	-0.96826

Tabella 2.5: La 2° prova (in giallo) fa riferimento al provino che ha subito, successivamente alla sua realizzazione, il trattamento termico; nella 1° prova non viene eseguito questo ulteriore trattamento.

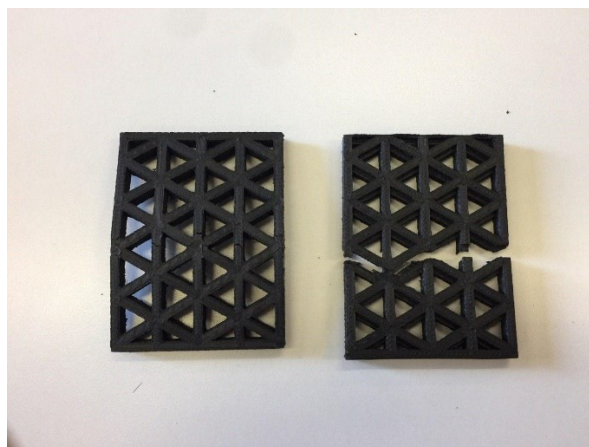


Figura 2.26: Comparazione dei due provini al termine della prova di compressione, a destra il provino che ha subito il trattamento in forno.

Isogrid 5x8

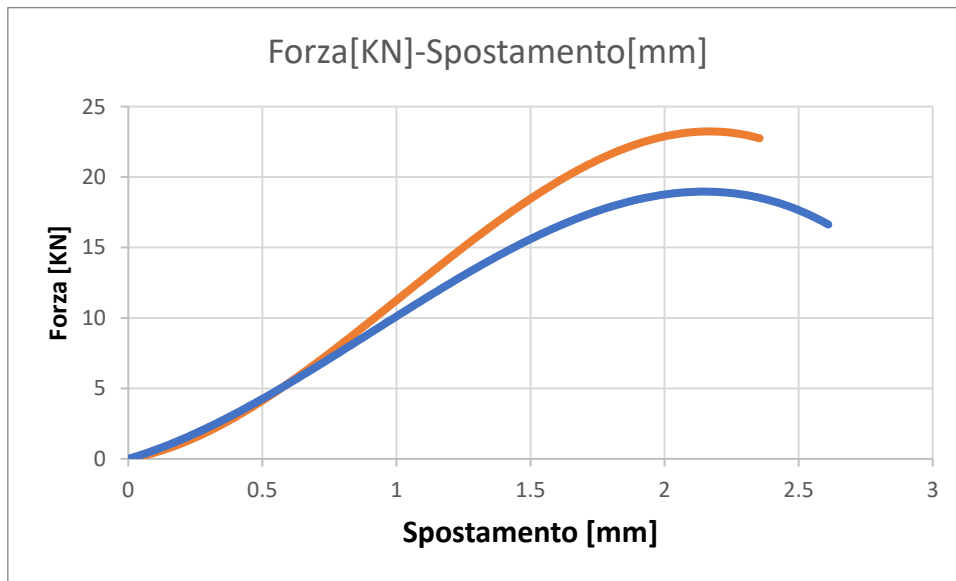


Figura 2.27: *Comparazione del carico massimo della struttura Isogrid attraverso il grafico Forza-Spostamento, la curva in arancione è quella che ha subito il trattamento termico.*

Prova	Peso iniziale	Peso prova	F massima	% umidità
1°	68	68	19.37	
2°	70.02	69.5	23.56	-0.742644

Tabella 2.6: *La 2° prova (in giallo) fa riferimento al provino che ha subito, successivamente alla sua realizzazione, il trattamento termico; nella 1° prova non viene eseguito questo ulteriore trattamento.*

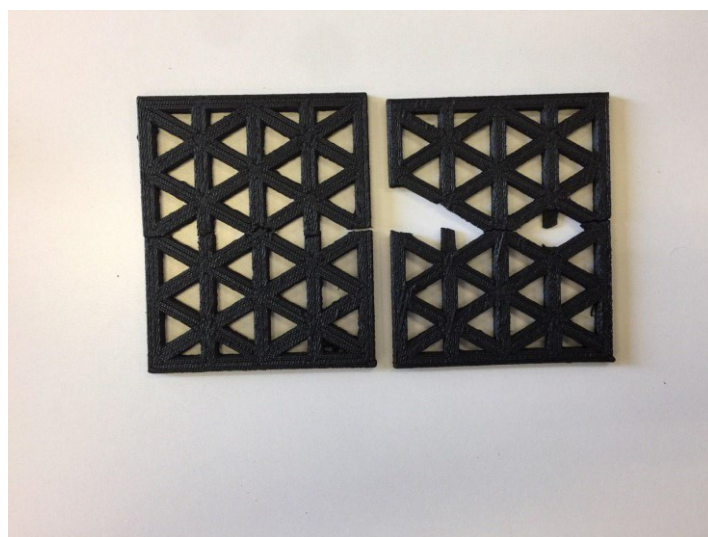


Figura 2.28: *Comparazione dei due provini al termine della prova di compressione, a destra il provino che ha subito il trattamento in forno.*

Isogrid 5x15

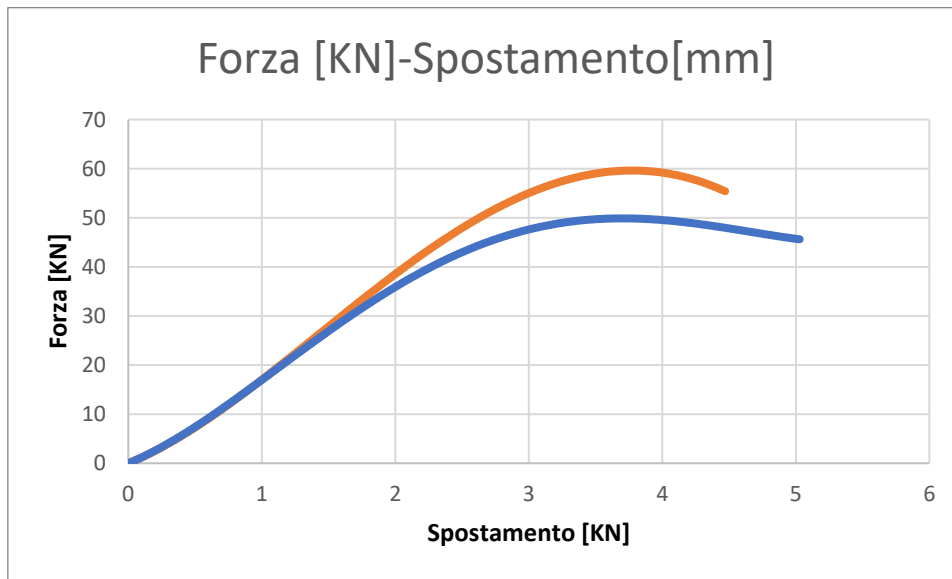


Figura 2.29: *Comparazione del carico massimo della struttura Isogrid attraverso il grafico Forza-Spostamento, la curva in arancione è quella che ha subito il trattamento termico.*

Prova	Peso iniziale	Peso prova	F massima	% umidità
1°	127.37	127.37	49.73	
2°	127.93	127.01	59.25	-0.71914

Tabella 2.7: *La 2° prova (in giallo) fa riferimento al provino che ha subito, successivamente alla sua realizzazione, il trattamento termico; nella 1° prova non viene eseguito questo ulteriore trattamento.*

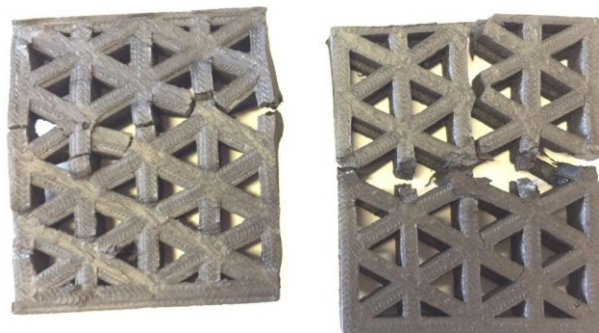


Figura 2.30: *Comparazione dei due provini al termine della prova di compressione, a destra il provino che ha subito il trattamento in forno.*

Isogrid 4x9

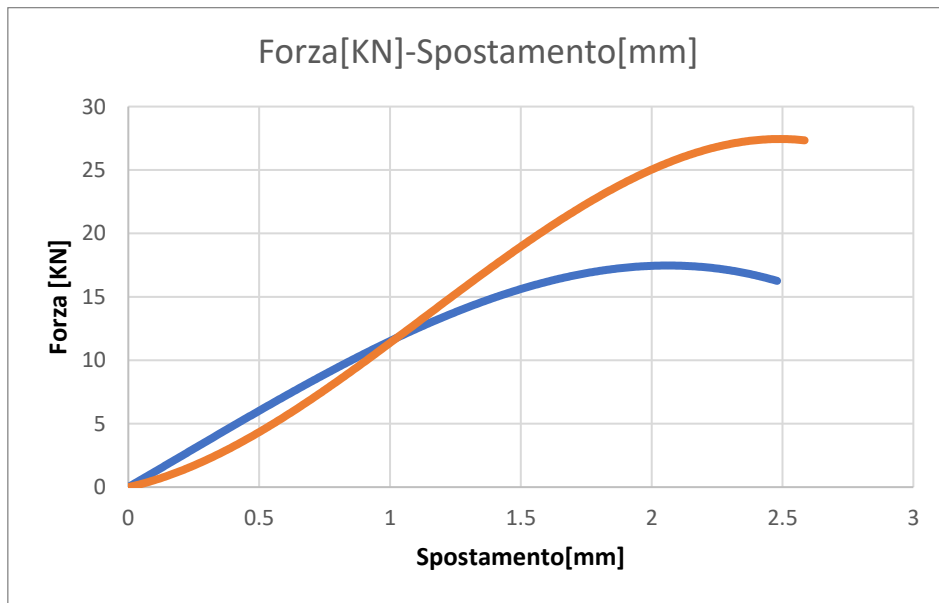


Figura 2.31: *Comparazione del carico massimo della struttura Isogrid attraverso il grafico Forza-Spostamento, la curva in arancione è quella che ha subito il trattamento termico.*

Prova	Peso iniziale	Peso prova	F massima	% umidità
1°	58.03	58.03	17.72	
2°	58.18	57.61	27.44	-0.97972

Tabella 2.8: *La 2° prova (in giallo) fa riferimento al provino che ha subito, successivamente alla sua realizzazione, il trattamento termico; nella 1° prova non viene eseguito questo ulteriore trattamento.*

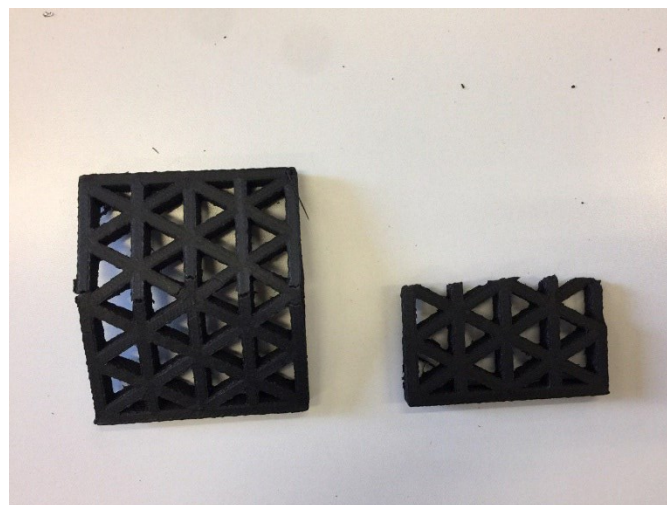


Figura 2.32: *Comparazione dei due provini al termine della prova di compressione, a destra il provino che ha subito il trattamento in forno.*

Una volta descritti i carichi per ogni singolo provino è possibile andare ad interpolare per ogni condizione, come il carico massimo varia al variare dei parametri indipendenti mantenendo tutti gli altri fissi. I parametri indipendenti sono:

- Spessore provino;
- Larghezza della costola;
- Altezza della cella.

L'ultimo parametro indipendente è stato fissato, mentre i primi sono stati variati da provino a provino. Si può notare inoltre, come l'interpolazione dei dati scientifici sia lineare indipendentemente dal parametro studiato.

I provini che hanno subito il trattamento termico, hanno il seguente comportamento:

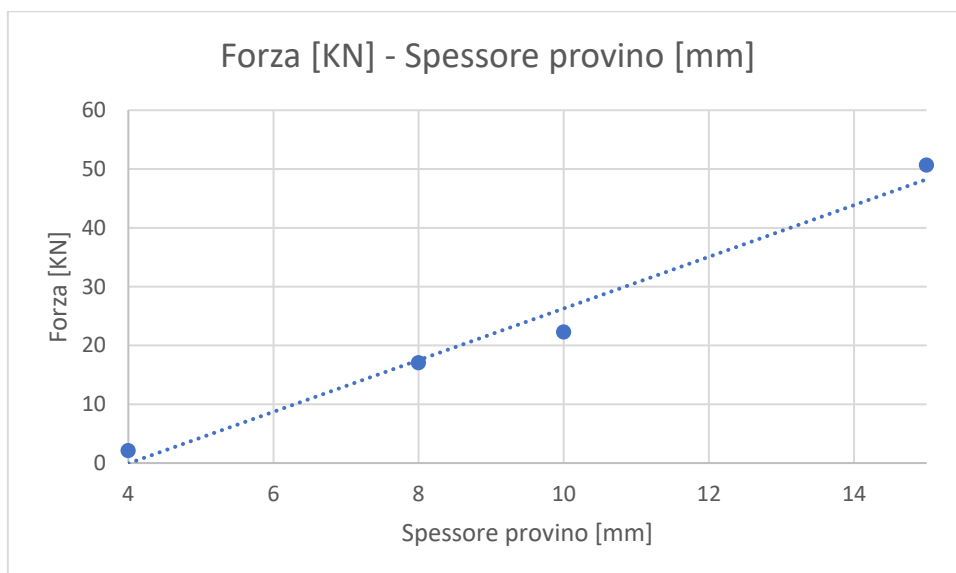


Figura 2.33: *Comparazione dei provini aventi stessa larghezza della costola pari a 3.*

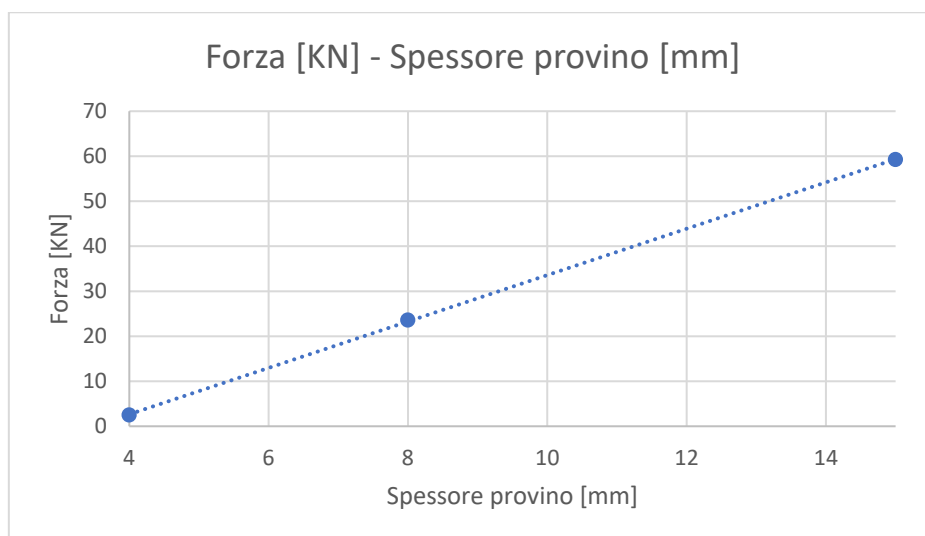


Figura 2.34: *Comparazione dei provini aventi stessa larghezza della costola pari a 5.*

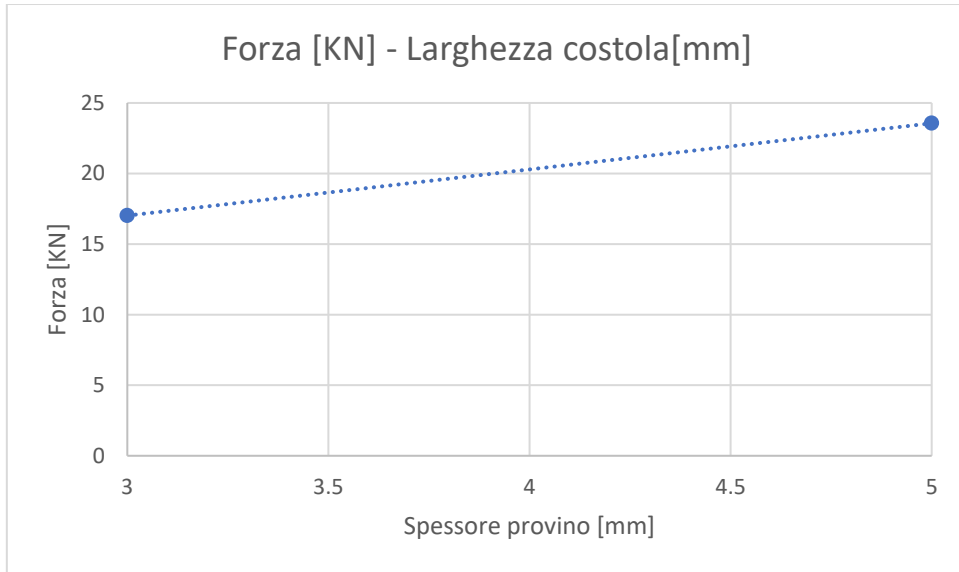


Figura 2.35: *Comparazione dei due provini aventi stesso spessore: Isogrid 3x8 e 5x8.*

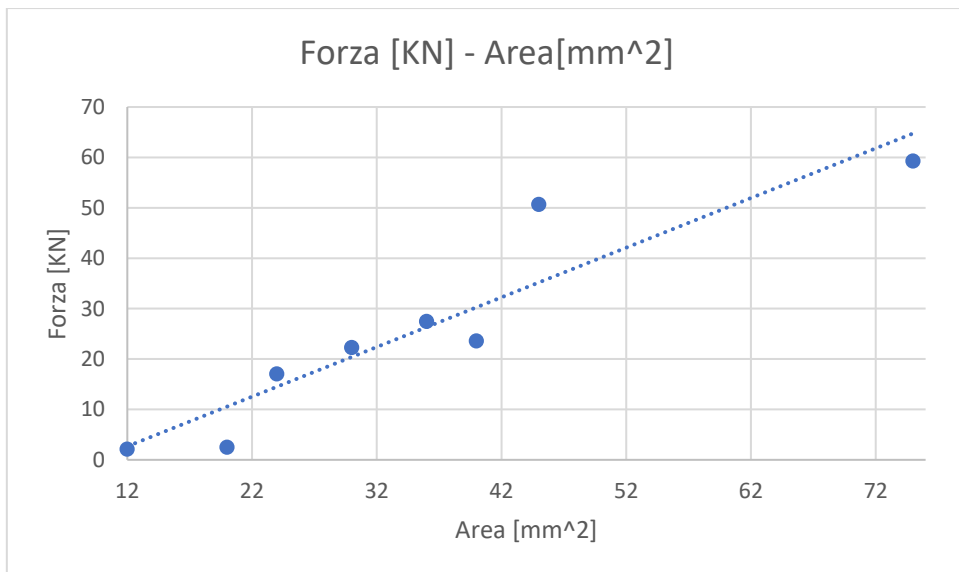


Figura 2.36: *Comparazione di tutti i provini attraverso l'area.*

I provini che non hanno subito il trattamento termico, hanno il seguente comportamento:

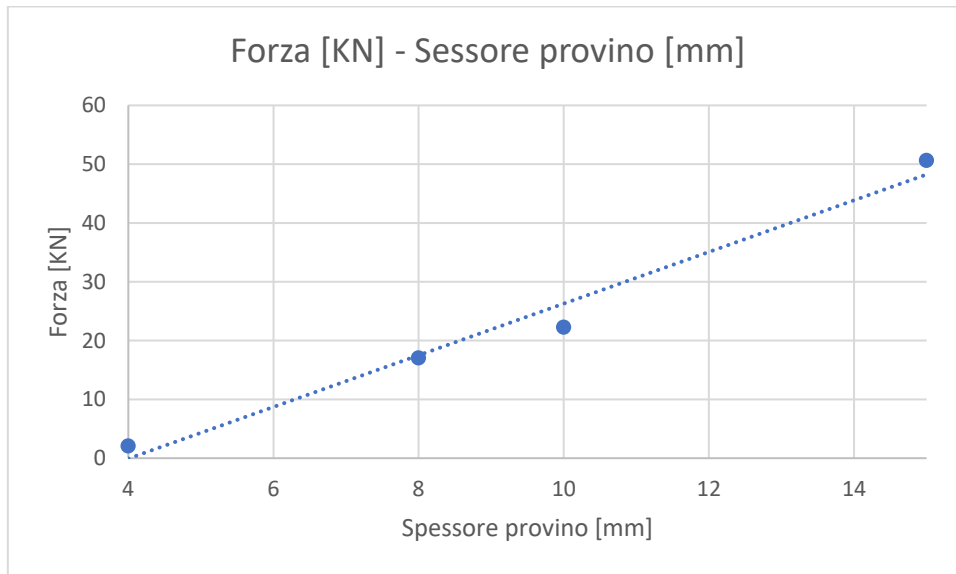


Figura 2.37: *Comparazione dei provini aventi stessa larghezza della costola pari a 3.*

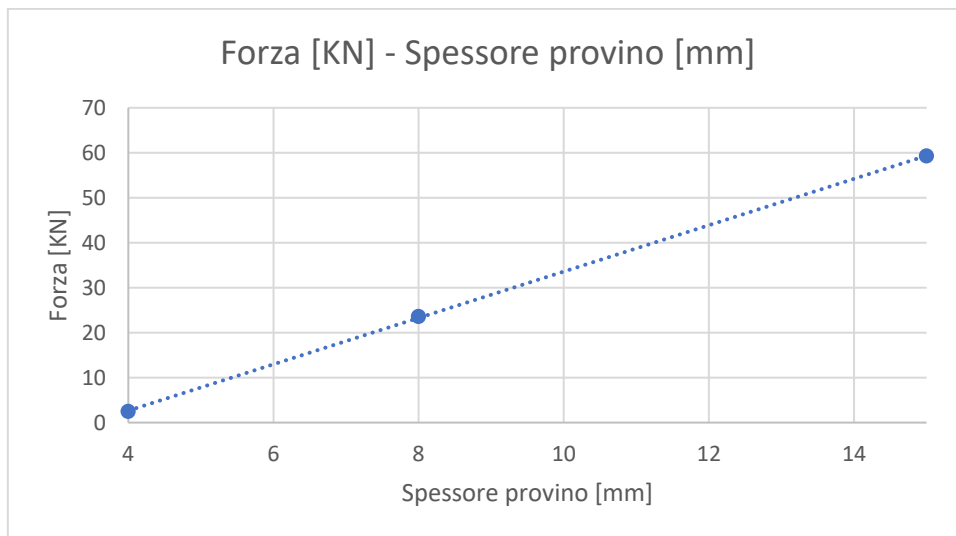


Figura 2.38: *Comparazione dei provini aventi stessa larghezza della costola pari a 5.*

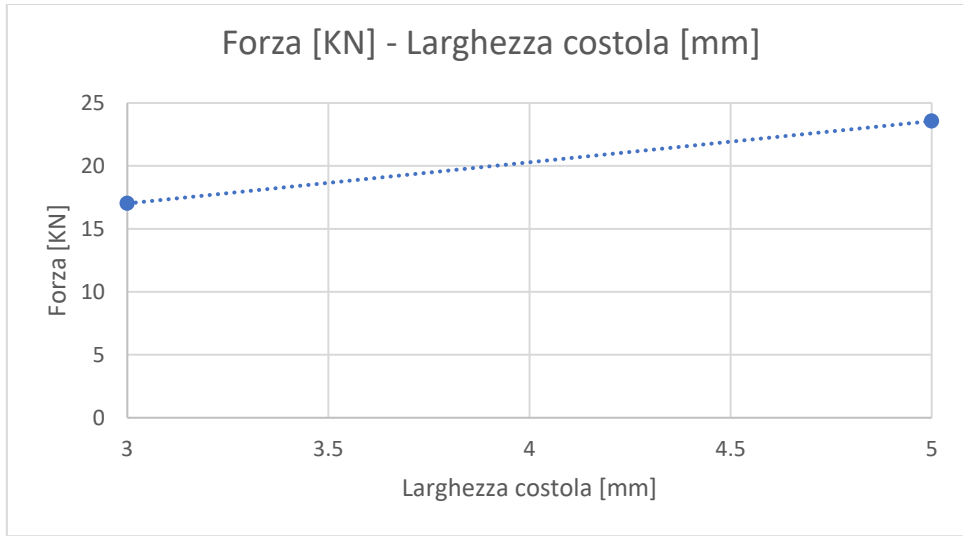


Figura 2.39: *Comparazione dei due provini aventi stesso spessore: Isogrid 3x8 e 5x8.*

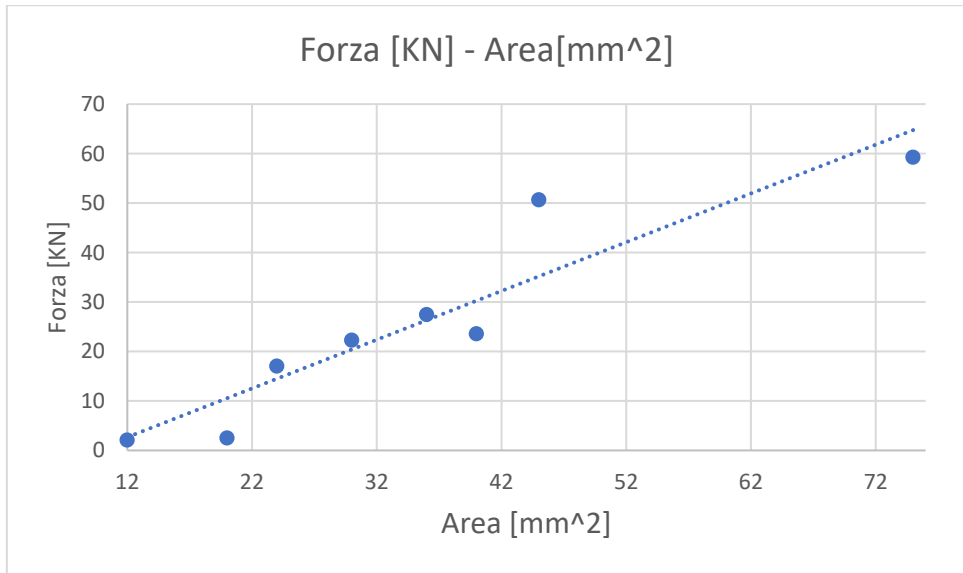


Figura 2.40: *Comparazione di tutti i provini attraverso l'area.*

Al fine di comparare i risultati nelle due condizioni, si possono inserire negli stessi grafici:

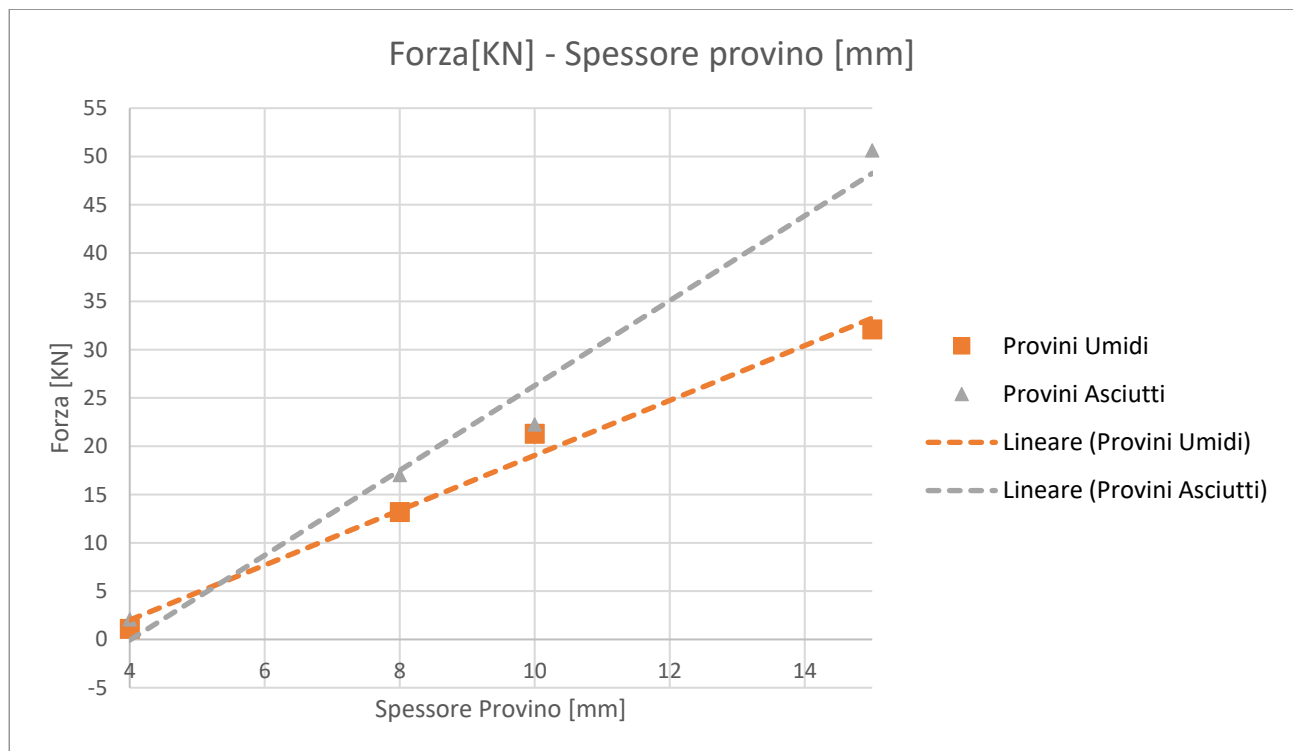


Figura 2.41: *Comparazione dei provini nelle diverse condizioni aventi stessa larghezza della costola pari a 3.*

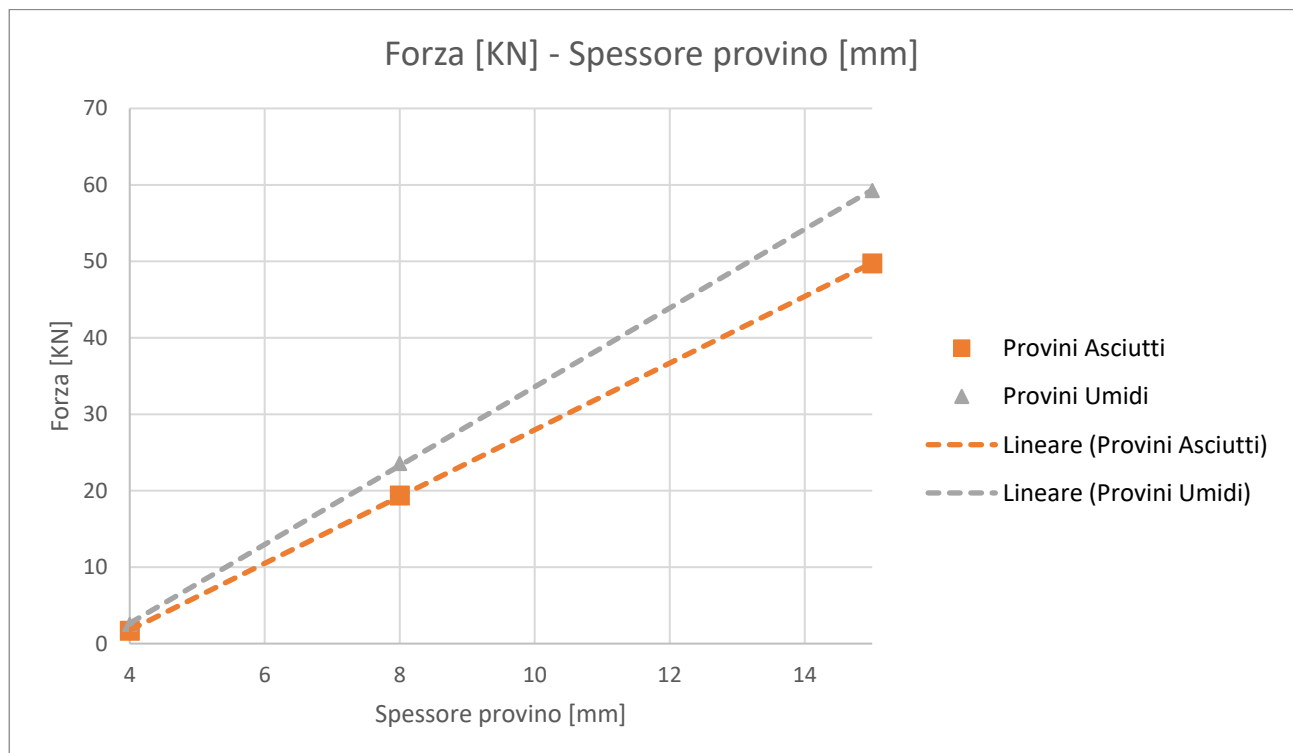


Figura 2.42: *Comparazione dei provini aventi stessa larghezza della costola pari a 5.*

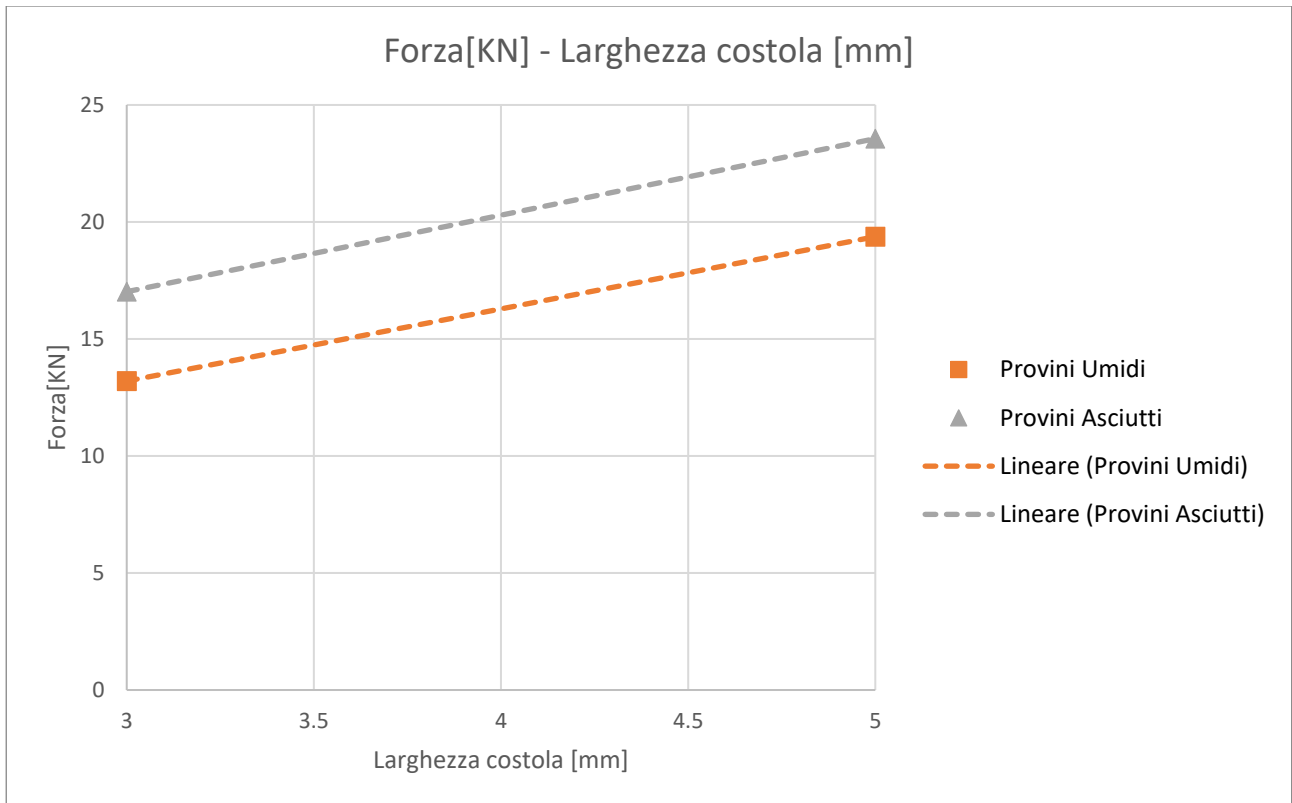


Figura 2.43: *Comparazione dei provini nelle due condizioni aventi stesso spessore: Isogrid 3x8 e 5x8.*

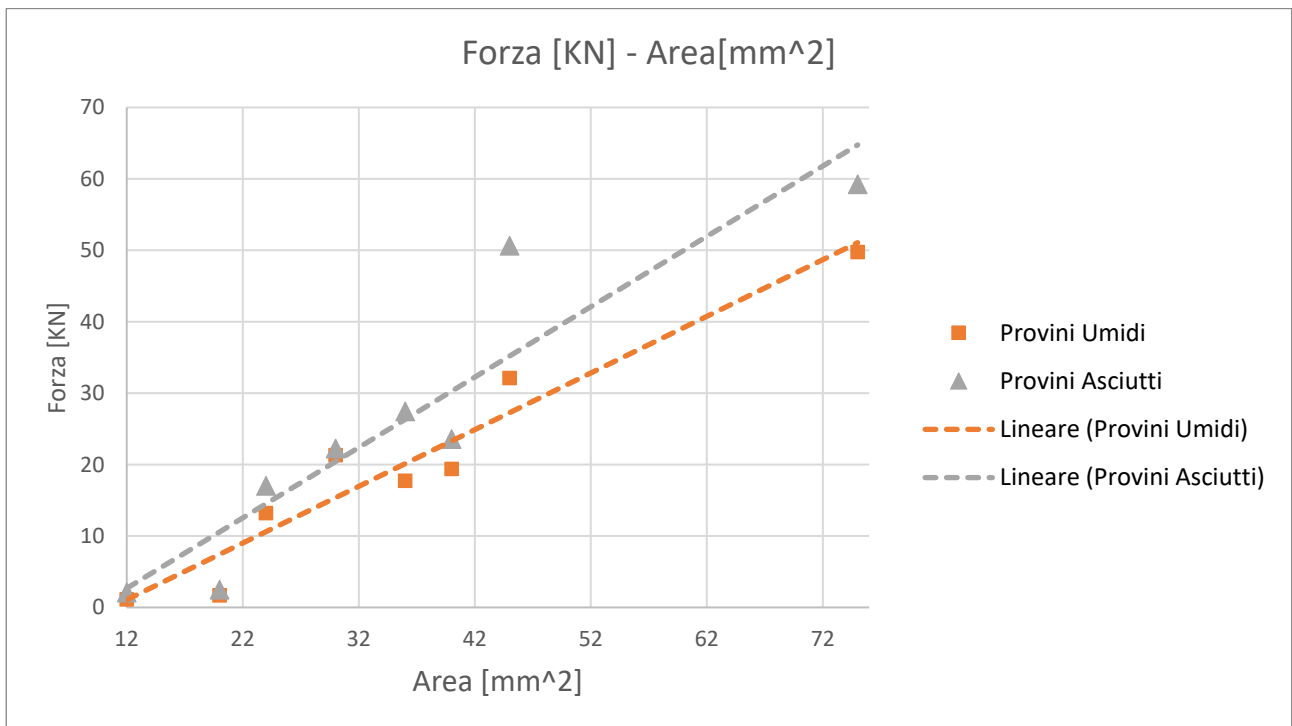


Figura 2.44: *Comparazione di tutti i provini attraverso l'area.*

Dopo aver studiato i vari provini in differenti condizioni, è stata fatta variare l'altezza della cella, mantenendo gli altri parametri identici ai provini realizzati in precedenza in un'unica condizione, cioè senza subire il trattamento termico successivo.

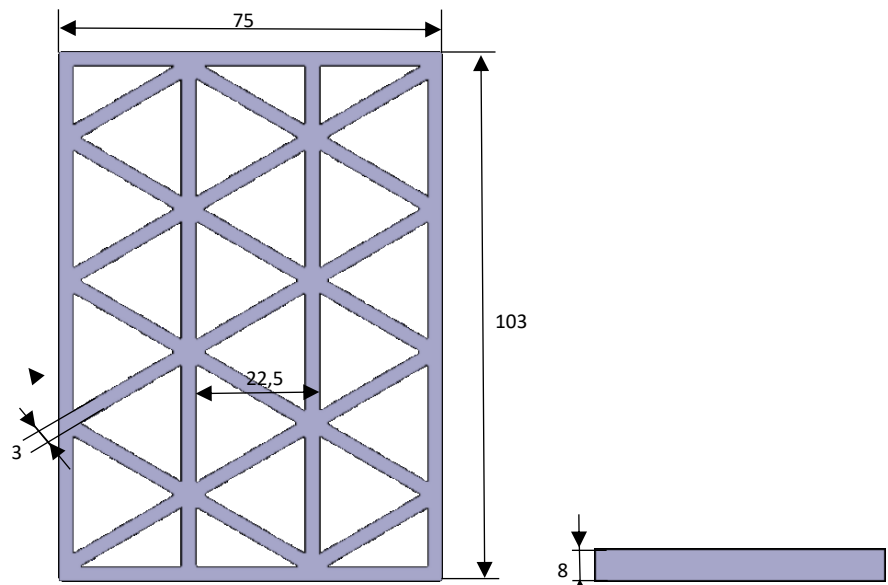


Figura 2.45: *Provino Isogrid denominato 3x8 per la larghezza della costola e l'altezza del provino.*

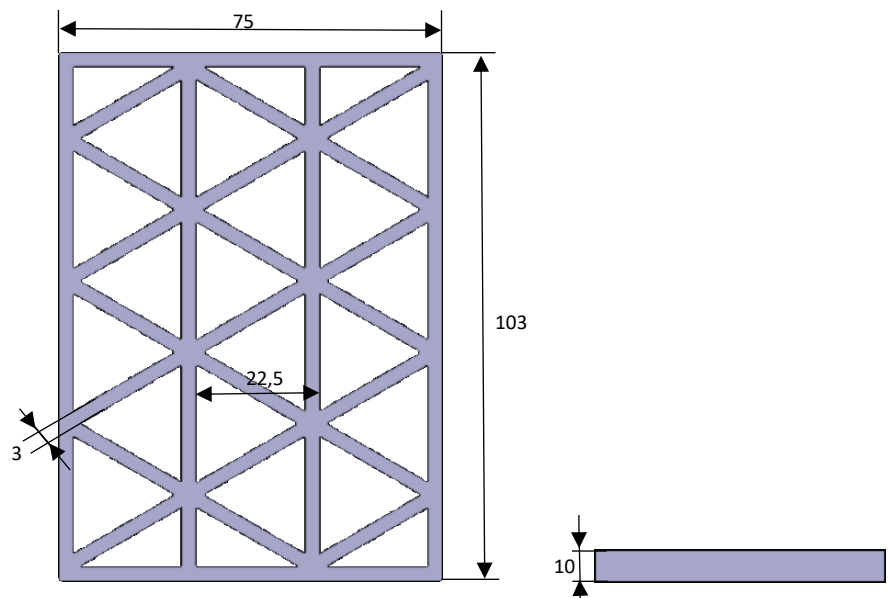


Figura 2.46: *Provino Isogrid denominato 3x10.*

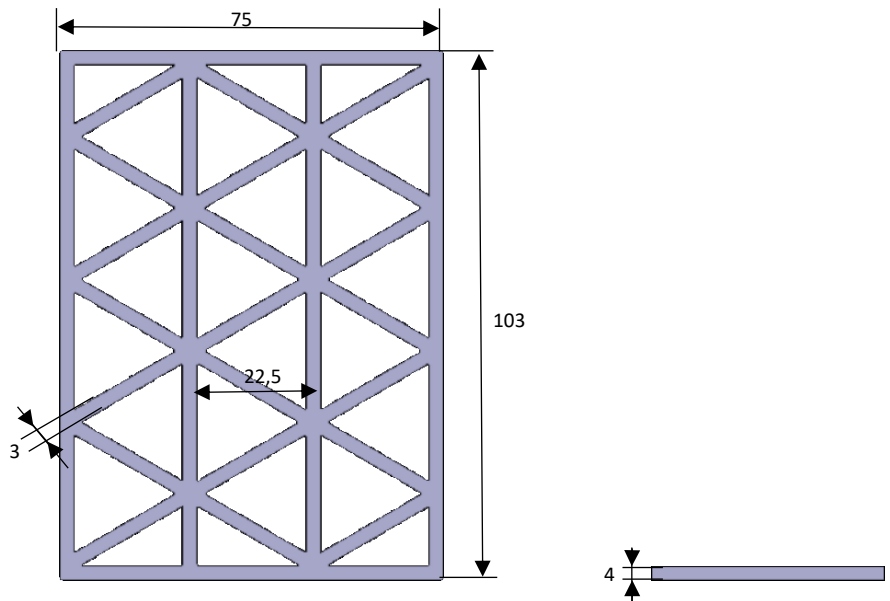


Figura 2.47: *Provino Isogrid denominato 3x4.*

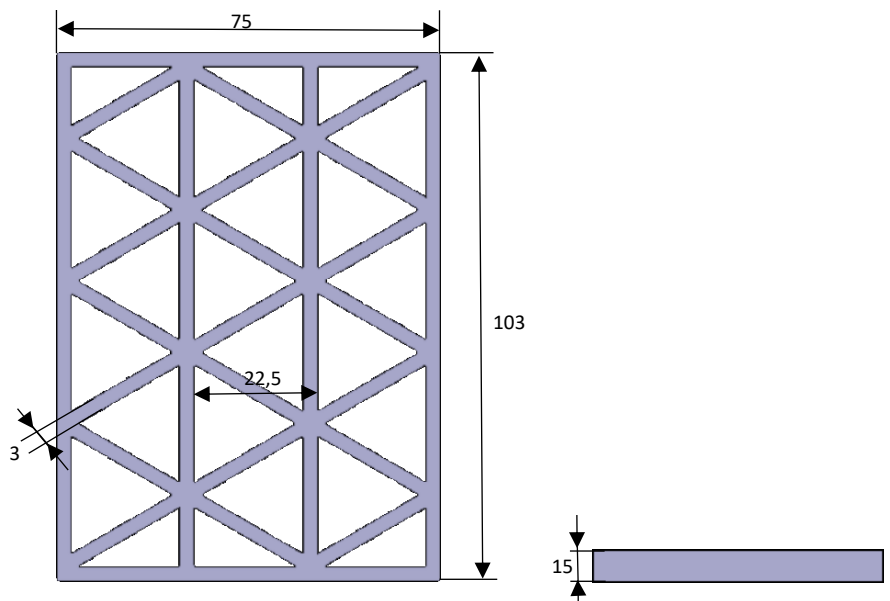


Figura 2.48: *Provino Isogrid denominato 3x15.*

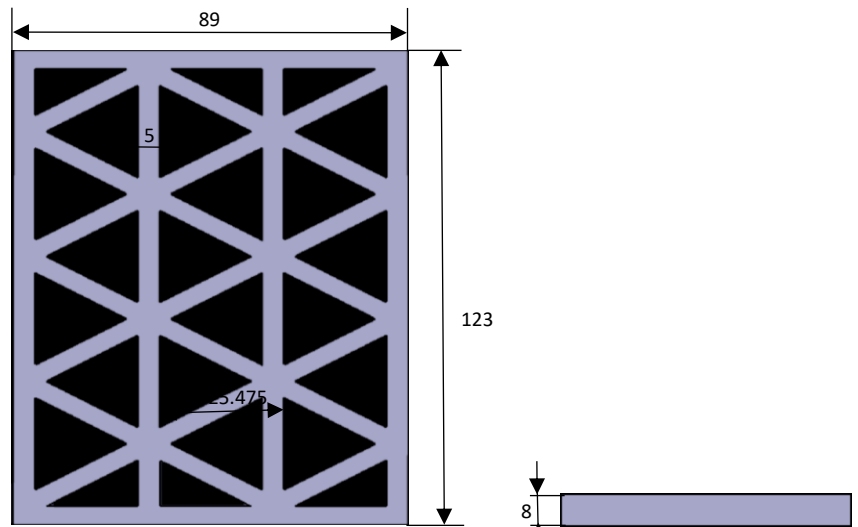


Figura 2.49: *Provino Isogrid denominato 5x8.*

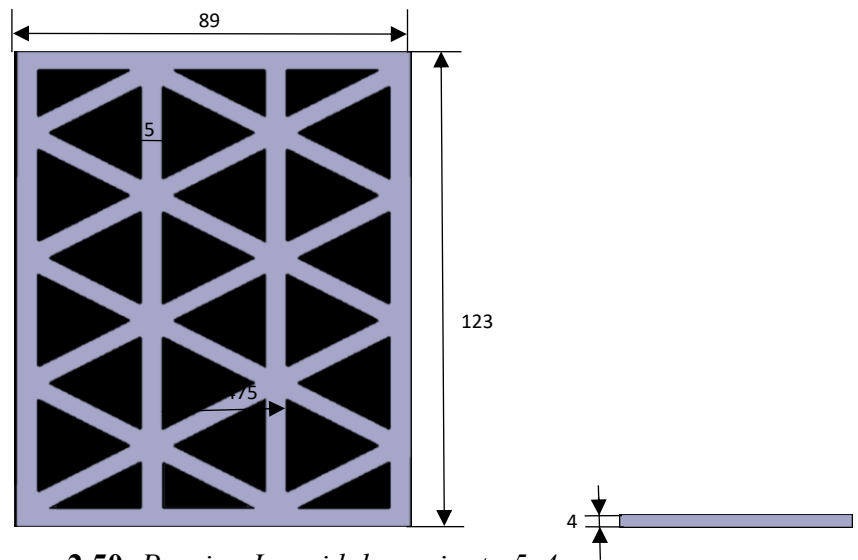


Figura 2.50: *Provino Isogrid denominato 5x4.*

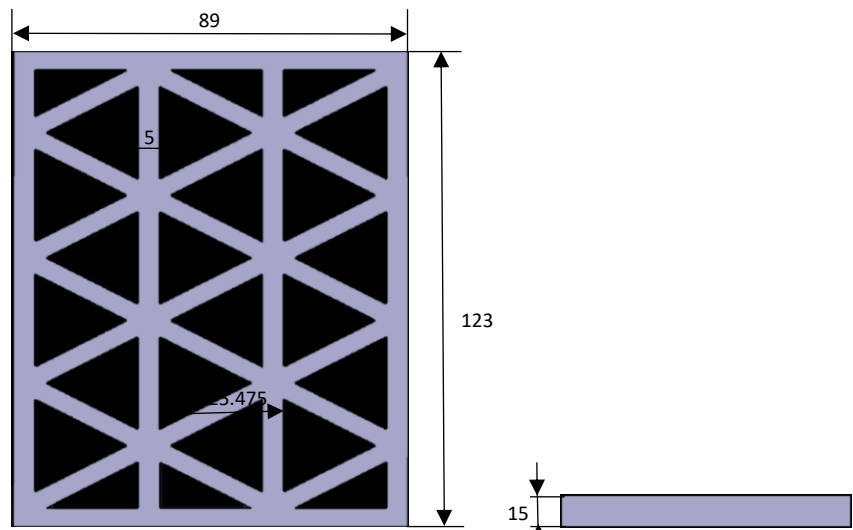


Figura 2.51: *Provino Isogrid denominato 5x15.*

I grafici ottenuti sono i seguenti:

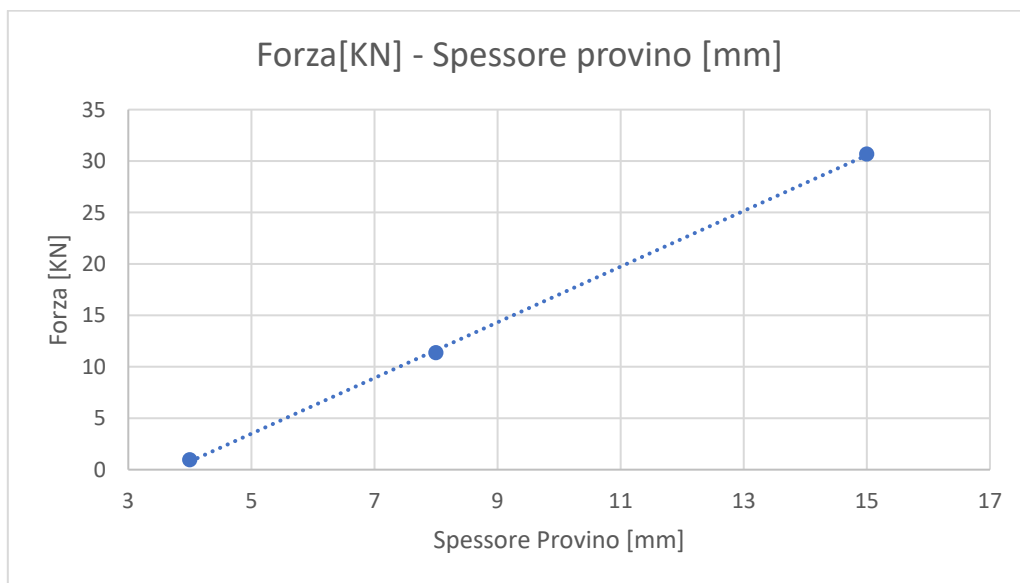


Figura 2.52: *Comparazione dei provini aventi stessa larghezza della costola pari a 3.*

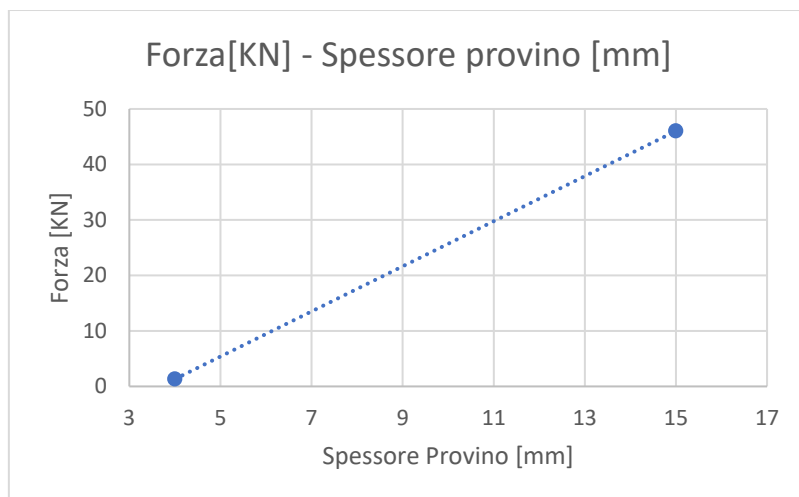


Figura 2.53: *Comparazione dei provini aventi stessa larghezza della costola pari a 5.*

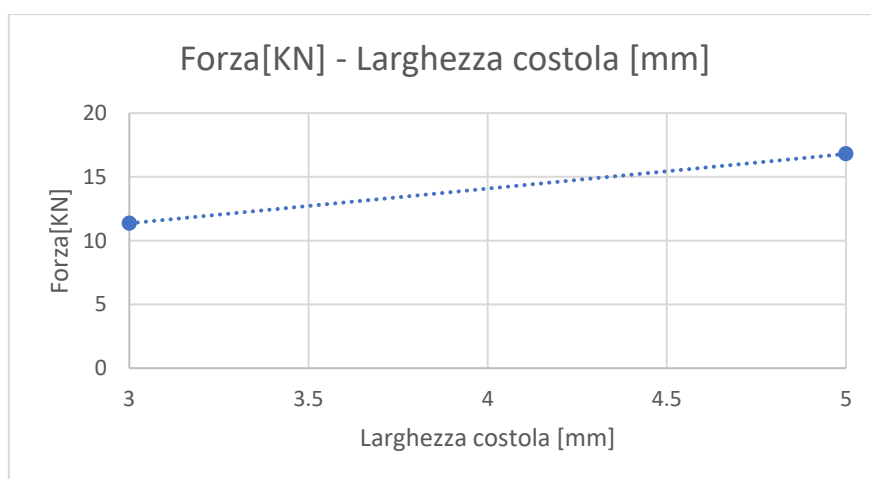


Figura 2.54: *Comparazione dei provini nelle due condizioni aventi stesso spessore: Isogrid 3x8 e 5x8.*

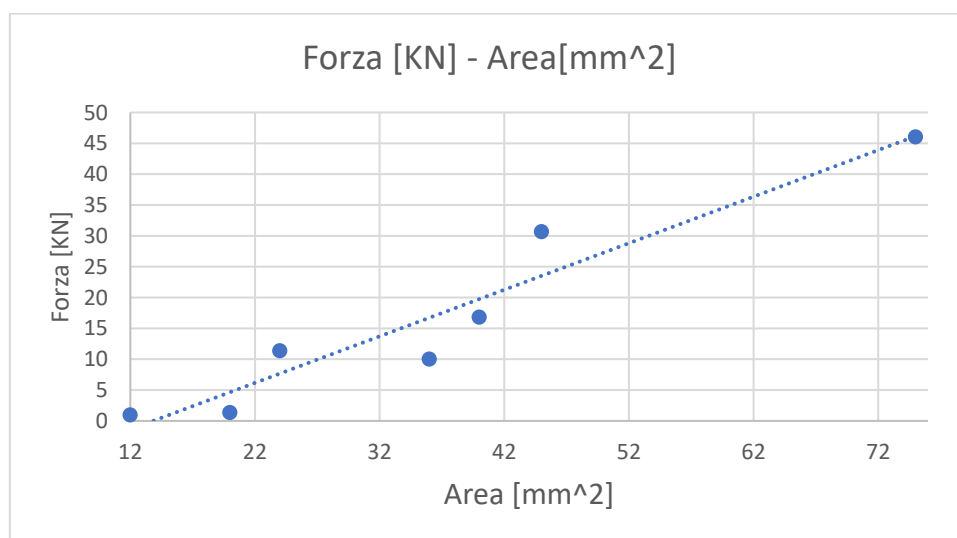


Figura 2.55: *Comparazione di tutti i provini attraverso l'area.*

Oltre alla presenza di umidità, un aggiuntivo aspetto che limita fortemente l'utilizzo di stampanti 3D nella produzione cellulare, è rappresentato dalle forti tolleranze che si creano a causa della bassa precisione delle stesse e dalle elevate rugosità ottenute durante l'estrusione. Infatti, prendendo come esempio alcuni provini realizzati, è possibile confrontare le dimensioni nominali e reali nelle due condizioni:

Provini	Grandezze nominali				Grandezze reali			
	spessore [mm]	larghezza costola [mm]	lunghezza provino [mm]	larghezza provino [mm]	spessore [mm]	larghezza costola [mm]	lunghezza provino [mm]	larghezza provino [mm]
3x8	8	3	99.529	75	8.2	4.2	100.7	75.8
3x8	8	3	99.529	75	8.5	4.2	100.7	76.3
3x10	10	3	99.529	75	10.3	3.8	100.8	76
3x10	10	3	99.529	75	10.6	4.1	100.7	75.9
3x4	4	3	99.529	75	4.2	3.9	100.7	75.8
3x4	4	3	99.529	75	4.5	3.9	100.1	76.1
3x15	15	3	99.529	75	15.4	4.1	100.8	76.2
3x15	15	3	99.529	75	15.4	4	100.7	76.5
5x8	8	5	106.993	89	8.6	5.8	107.8	90
5x8	8	5	106.993	89	8.7	5.8	107.8	89.7

Tabella 2.9: *Grandezze nominali e reali di alcuni provini.*

2.3 Rete Neurale

Considerando il basso numero di dati in input e output, si è cercato di realizzare una rete neurale validata con il metodo del **Leave K-Out**.

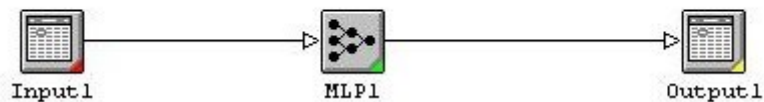


Figura 2.56: Schema della rete neurale.

Inizialmente sono stati inseriti tramite foglio Excel i vari parametri indipendenti, quali:

- Spessore provino;
- Larghezza della costola;
- L'altezza della cella;
- L'umidità con il valore 0 o con il valore 1 se il provino risultava secco, cioè se trattato a 140°C per 4 ore;

Infine è stato individuato per ogni provino il Target che corrisponde alla Forza massima ottenuta durante la prova sperimentale.

	Integer	Integer	Integer	Integer	Float
	Spessore	Larghezza Costola	Altezza Cella	Wet(0)_Dry(1)	Forza Massima
1	8	3	18	0	13.2
2	10	3	18	0	21.3
3	4	3	18	0	1.1
4	15	3	18	0	32.1
5	8	5	18	0	19.37
6	9	4	18	0	17.72
7	4	5	18	0	1.68
8	15	5	18	0	49.73
9	8	3	18	1	17.02
10	10	3	18	1	22.25
11	4	3	18	1	2.07
12	15	3	18	1	50.63
13	8	5	18	1	23.56
14	9	4	18	1	27.44
15	4	5	18	1	2.48
16	15	5	18	1	59.25
17	8	3	22	0	11.36
18	4	3	22	0	0.95
19	15	3	22	0	30.66
20	15	5	25	0	46.02
21	9	4	24	0	10
22	4	5	25	0	1.32
23	8	5	25	0	16.8

Figura 2.57: Dati di input.

Considerando un numero di dati pari a 22, sono stati individuati 20 dati di **Training** necessari ad allenare la rete, 1 dato necessario alla validazione, scelto al fine di minimizzare l'errore mentre il restante dato di Test, viene confrontato con il risultato ottenuto dalla rete neurale per poi individuare l'errore commesso dalla stessa.

Il modello utilizzato è stato il **Multi-Layer Perceptron**, avente una funzione **Tanh** e algoritmo **Conjugate Gradient**.

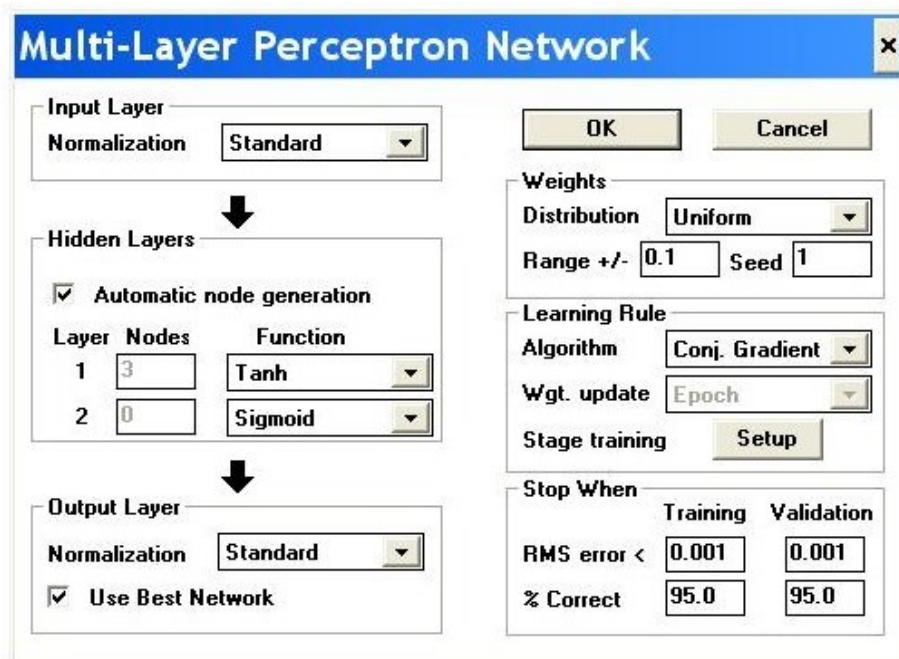


Figura 2.58: Multi-Layer Perceptron Network.

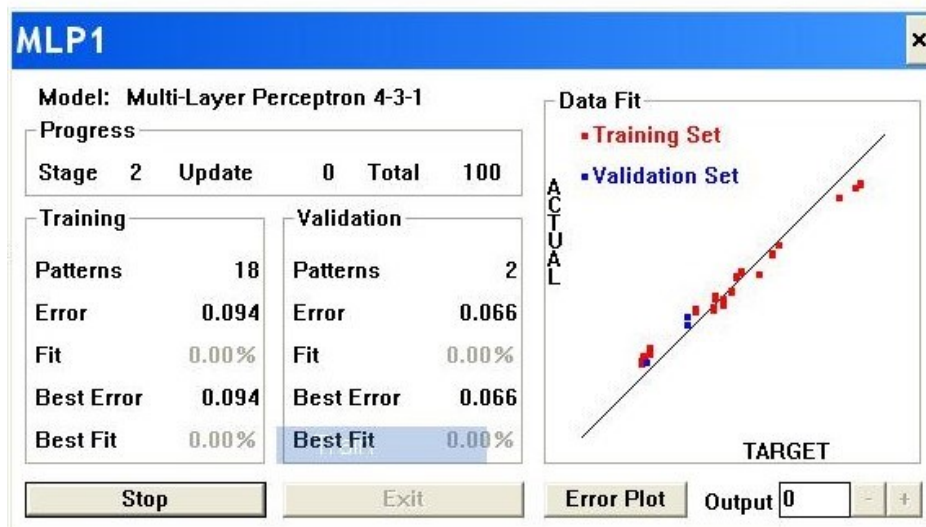


Figura 2.59: Elaborazione dell'MLP.

Questo procedimento, seguendo il metodo del Leave K-out è stato ripetuto per ogni dato, individuando 22 valori con i rispettivi errori.

	Integer var_0001	Integer var_0002	Integer var_0003	Integer var_0004	Float var_0005	Float MTarget1	Float Output1
1	8	3	18	0	13.2	13.2	12.623252
2	10	3	18	0	21.3	21.299999	19.128685
3	4	3	18	0	1.1	1.1	1.426029
4	15	3	18	0	32.1	32.099998	34.24028
5	8	5	18	0	19.37	19.370001	16.34337
6	9	4	18	0	17.72	17.719999	17.488361
7	4	5	18	0	1.68	1.68	2.236961
8	15	5	18	0	49.73	49.73	51.048149
9	8	3	18	1	17.02	17.02	14.689743
10	10	3	18	1	22.25	22.25	24.155241
11	4	3	18	1	2.07	2.07	1.554564
12	15	3	18	1	50.63	50.630001	47.909355
13	8	5	18	1	23.56	23.559999	26.738014
14	9	4	18	1	27.44	27.440001	24.992695
15	4	5	18	1	2.48	2.48	7.353097
16	15	5	18	1	59.25	59.25	60.161549
17	8	3	22	0	11.36	11.36	11.345066
18	15	3	22	0	30.66	30.66	31.879894
19	15	5	25	0	46.02	46.02	44.990543
20	9	4	24	0	10	10.0	14.630081
21	8	5	25	0	16.8	16.799999	12.162416
22							
23							

Figura 2.60: Output dei dati di Training.

	Integer var_0001	Integer var_0002	Integer var_0003	Integer var_0004	Float var_0005	Float MTarget1	Float Output1
1	4	3	22	0	0.95	0.95	0.738209
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							
19							
20							
21							
22							
23							

Figura 2.61: Output dei dati di Validation.

	Integer var_0001	Integer var_0002	Integer var_0003	Integer var_0004	Float var_0005	Float MTarget1	Float Output1
1	4	5	25	0	1.32	1.32	0.830557
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							
19							
20							
21							
22							
23							

Figura 2.62: Output dei dati di Test.

Di seguito vengono individuati i risultati elaborati dalla rete neurale:

Provinci	Variabile 1	Variabile 2	Variabile 3	Variabile 4	Target	Output		
	spessore [mm]	larghezza costola [mm]	Altezza cella (b)	Wet(0)/Dry(1)	Forza massima [KN]	Forza massima [KN]	Errore %	Errore Assoluto %
3x8 (0)	8	3	18	0	13.2	12.74	3.484848	3.484848485
3x10 (0)	10	3	18	0	21.3	22.99	-7.93427	7.9342723
3x4 (0)	4	3	18	0	1.1	1.095	0.454545	0.454545455
3x15 (0)	15	3	18	0	32.1	30.3	5.607477	5.607476636
5x8 (0)	8	5	18	0	19.37	18.28	5.627259	5.627258647
4x9 (0)	9	4	18	0	17.72	18.15	-2.42664	2.426636569
4x5 (0)	4	5	18	0	1.68	1.84	-9.52381	9.523809524
5x15 (0)	15	5	18	0	49.73	45.3	8.908104	8.90810376
3x8 (1)	8	3	18	1	17.02	16.98	0.235018	0.235017626
3x10 (1)	10	3	18	1	22.25	21.73	2.337079	2.337078652
3x4 (1)	4	3	18	1	2.07	2.21	-6.76329	6.763285024
3x15 (1)	15	3	18	1	50.63	45.3	10.52736	10.52735532
5x8 (1)	8	5	18	1	23.56	21.74	7.724958	7.724957555
4x9 (1)	9	4	18	1	27.44	24.85	9.438776	9.43877551
5x15 (1)	15	5	18	1	59.25	55.77	5.873418	5.873417722
3x8 (0)	8	3	22.5	0	11.36	10.97	3.433099	3.433098592
3x4 (0)	4	3	22.5	0	0.95	0.88	7.368421	7.368421053
3x15 (0)	15	3	22.5	0	30.66	31.28	-2.02218	2.022178735
5x15 (0)	15	5	25.475	0	46.02	48.29	-4.93264	4.932637983
5x4 (0)	4	5	25.475	0	1.32	1.47	-11.3636	11.36363636
5x8 (0)	8	5	25.475	0	16.8	16.3	2.97619	2.976190476

Tabella 2.10: Dati sviluppati dalla rete neurale.

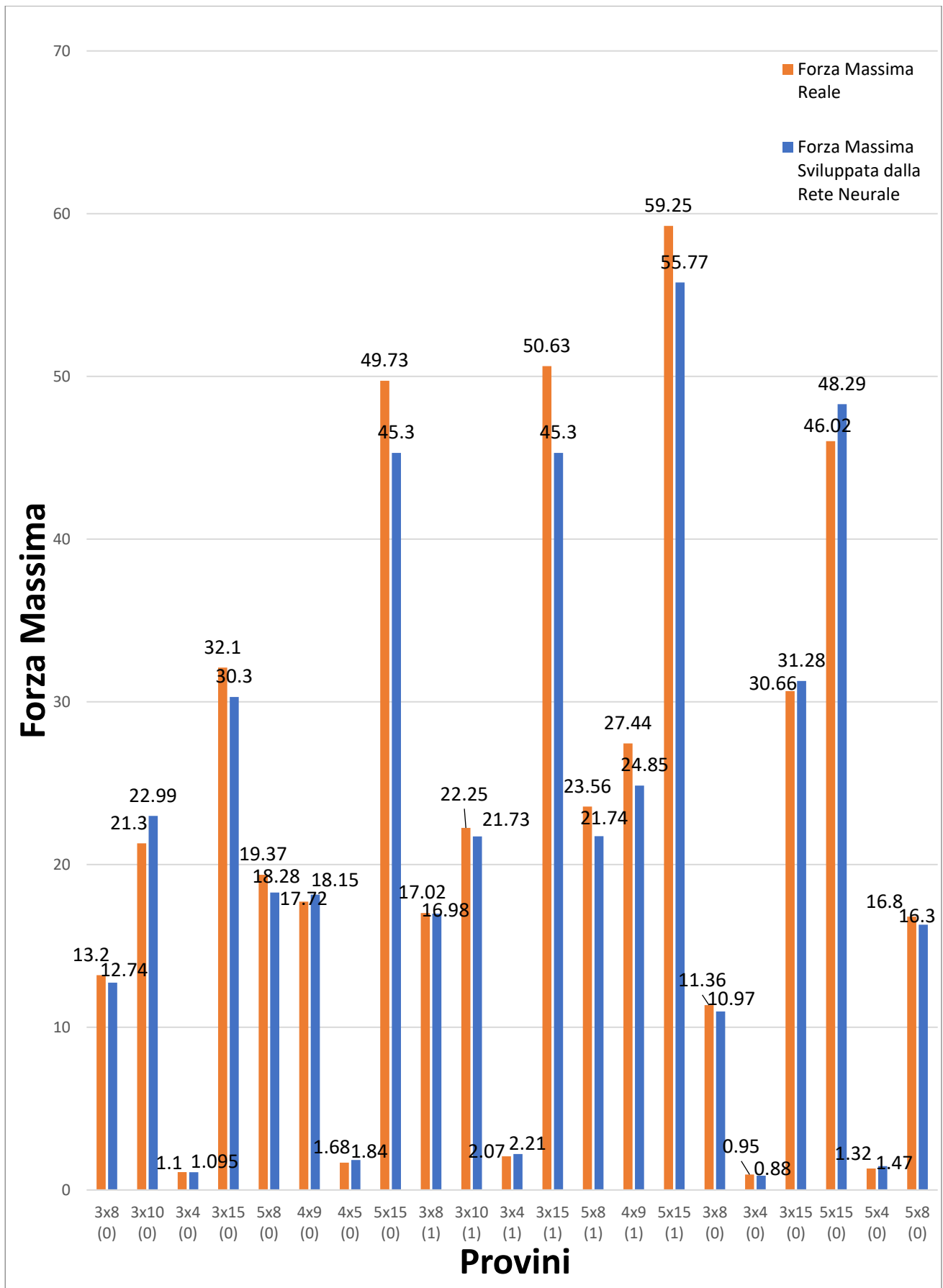


Figura 2.63: Confronto tra Forza reale e Forza generata dalla rete neurale.

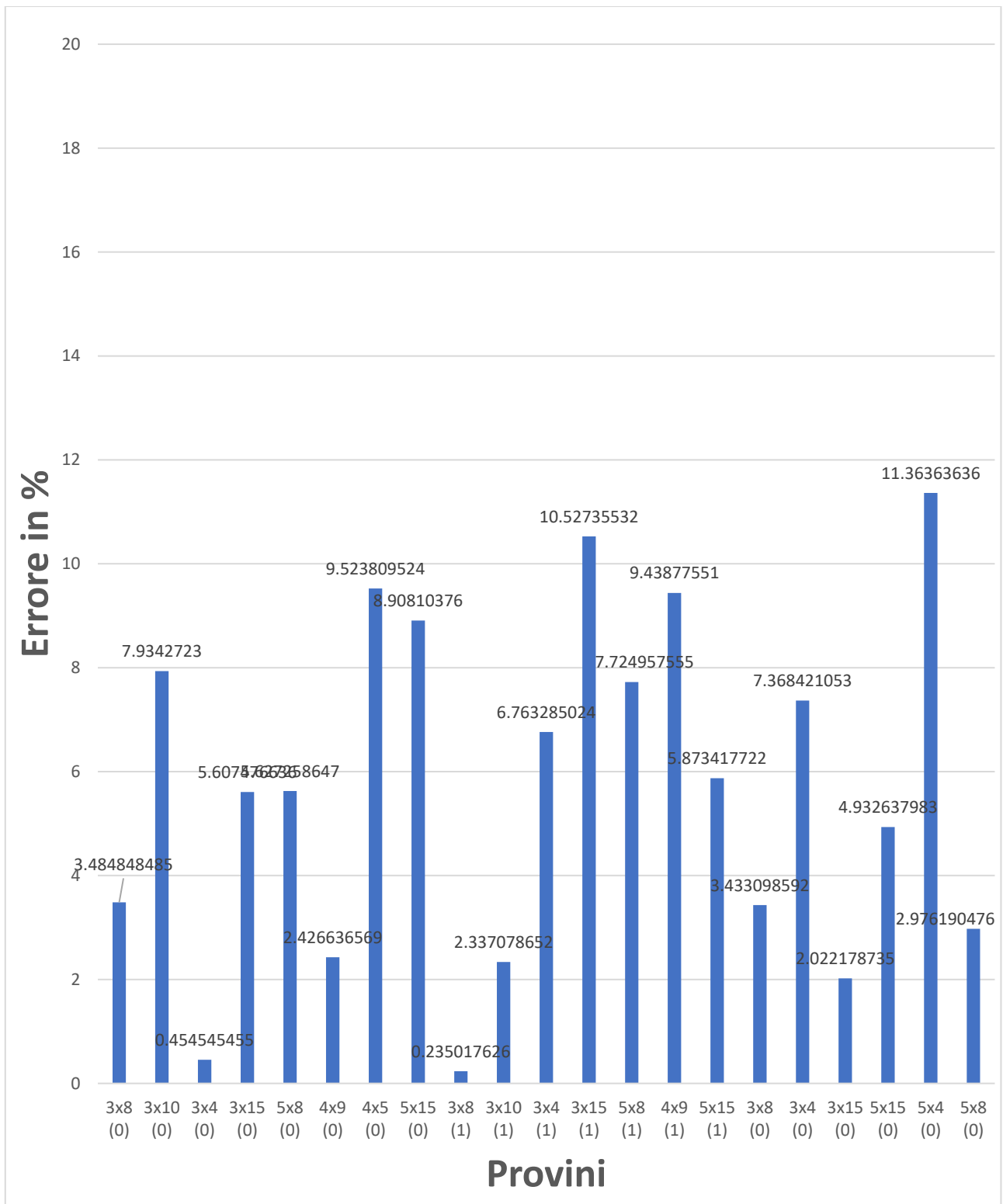


Figura 2.64: Errori per ogni provino.

Infine è possibile confrontare graficamente per le tre condizioni: umido, secco e altezza della cella variabile, i valori di forza massima al variare dei parametri quali: spessore e larghezza della costola.

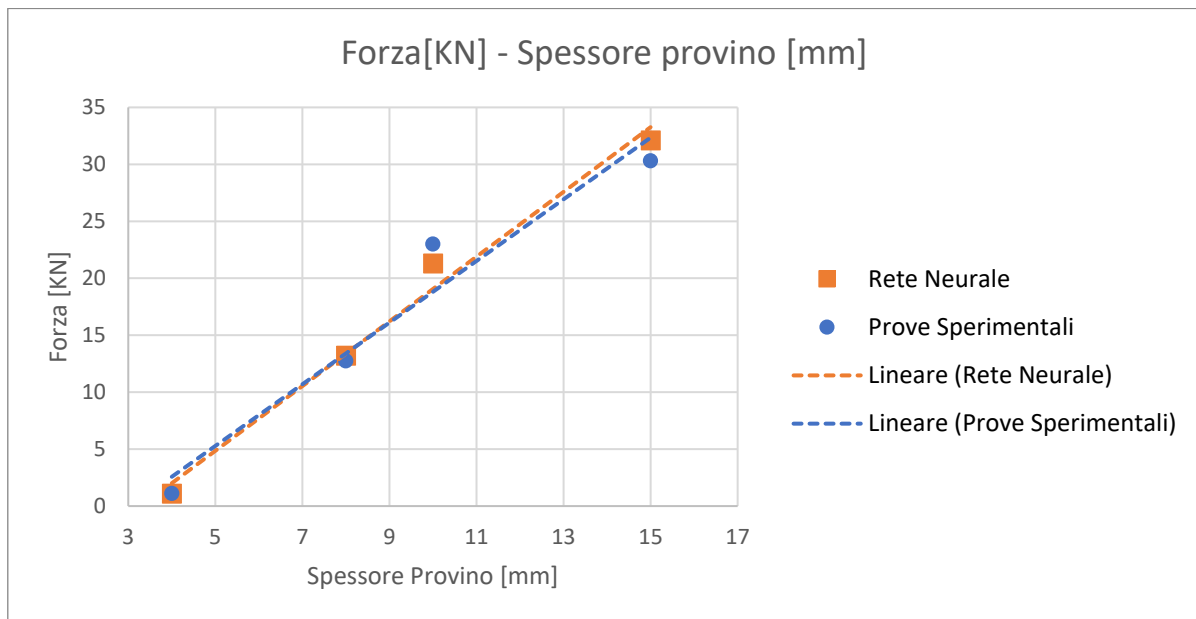


Figura 2.65: *Andamento della forza al variare dello spessore dei provini umidi.*

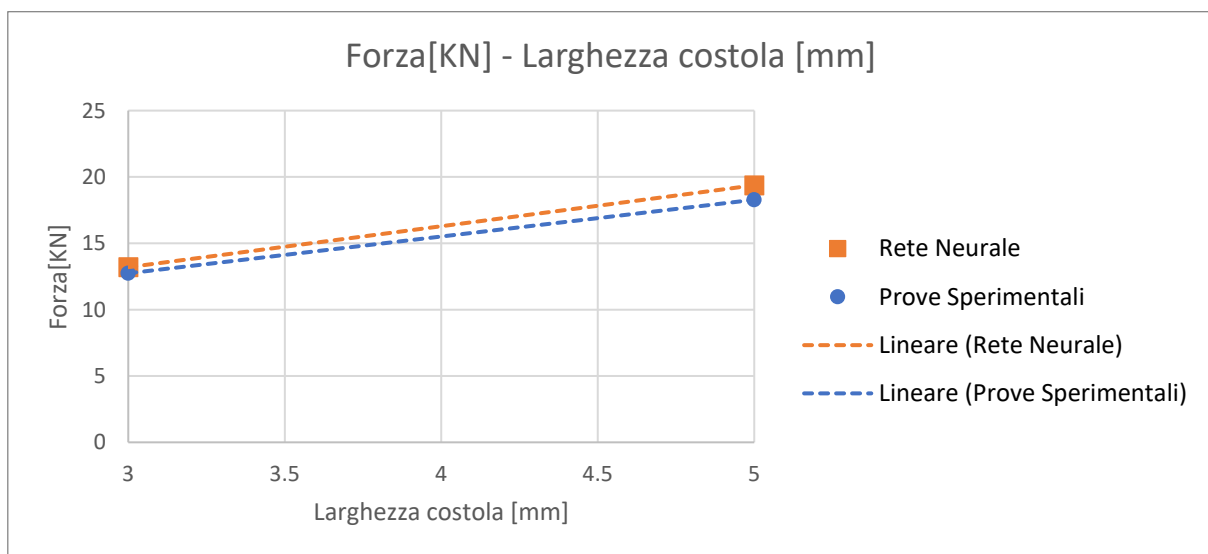


Figura 2.66: *Andamento della forza al variare della larghezza della costola dei provini umidi.*

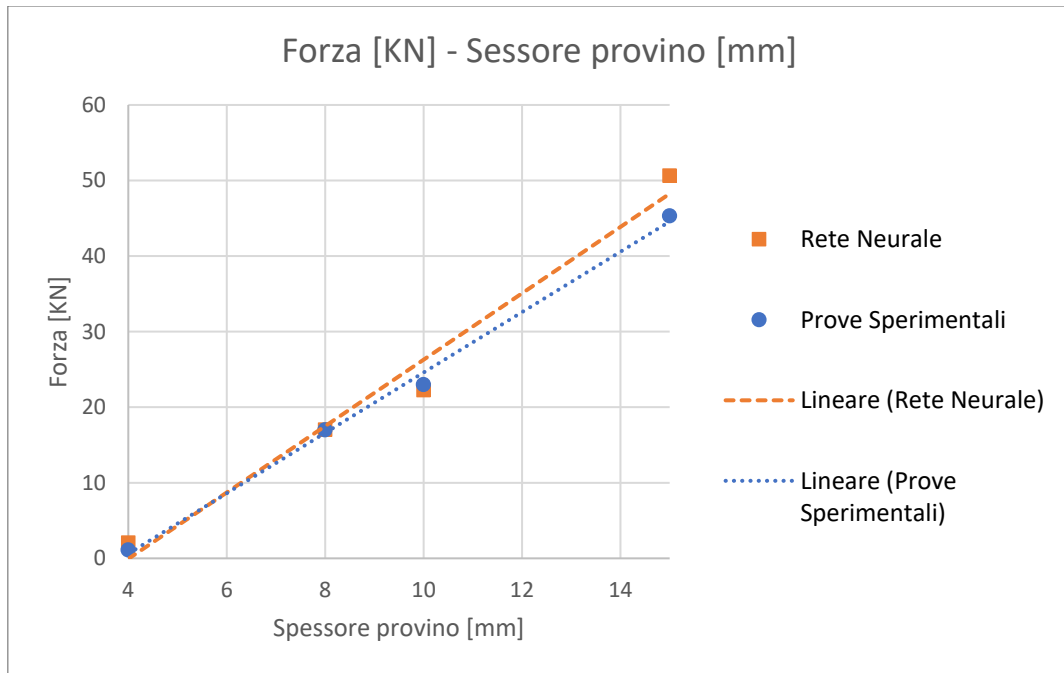


Figura 2.67: *Andamento della forza al variare dello spessore dei provini secchi.*

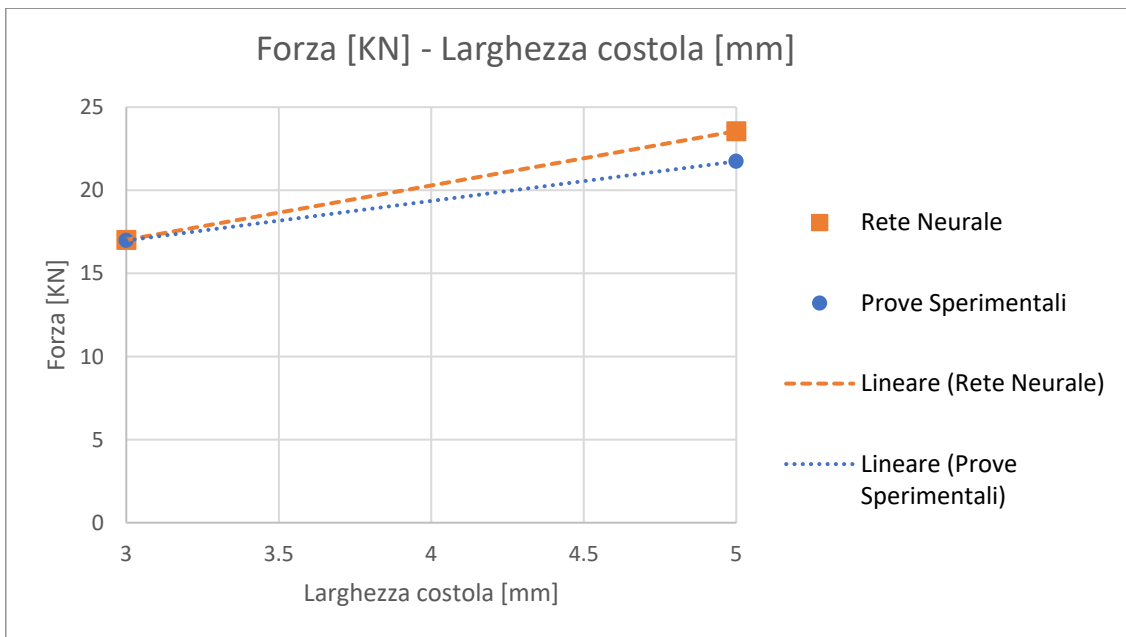


Figura 2.68: *Andamento della forza al variare della larghezza della costola dei provini secchi.*

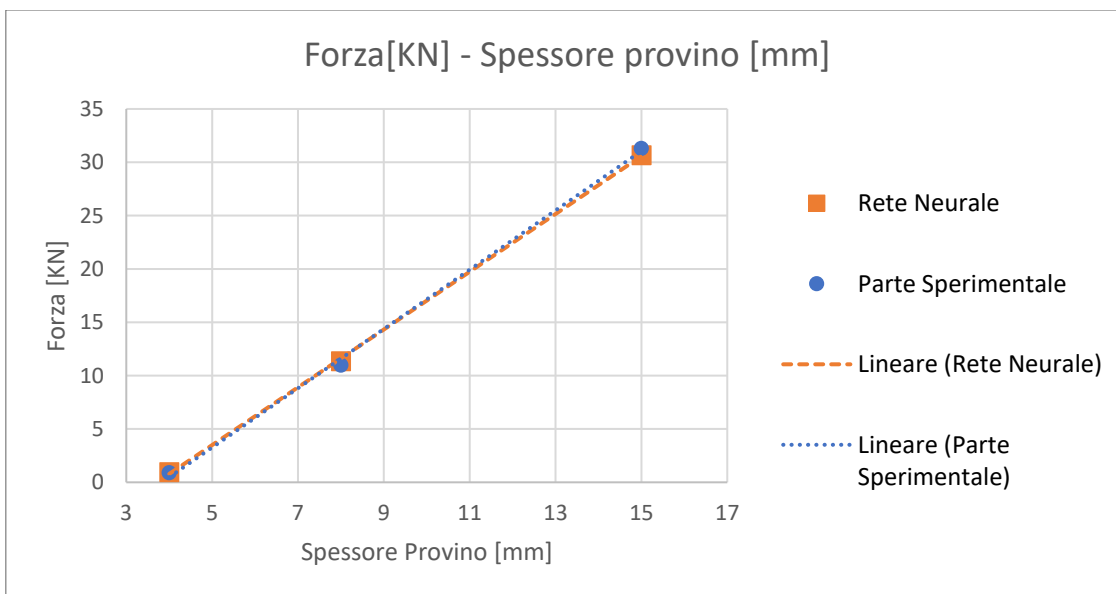


Figura 2.69: *Andamento della forza al variare dello spessore dei provini con altezza cella variabile.*

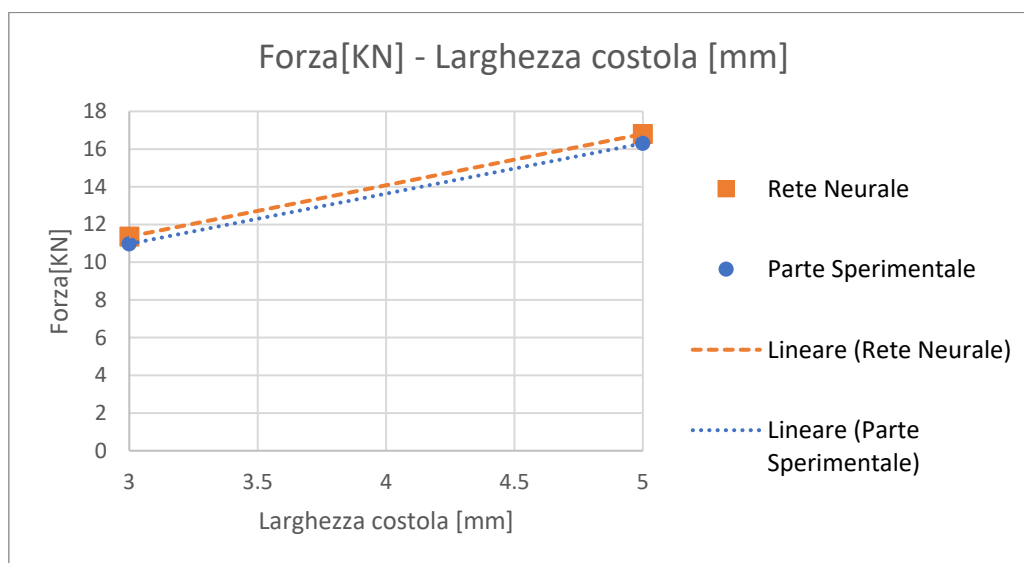


Figura 2.70: *Andamento della forza al variare della larghezza dei provini con altezza cella variabile.*

ANALISI DEI RISULTATI

Durante la fase di sperimentazione, prima di procedere con le prove di instabilità sono stati realizzati dei provini seguendo la Norma ASTM D638, per poter confrontare i valori descritti dal fornitore con le reali prestazioni del materiale. Si evince che il modulo di Young e la tensione ultima sono le stesse con scarto di qualche Pa nel caso in cui la deposizione avviene in direzioni parallela a quella di sollecitazione del provino; la differenza di valore aumenterà con il variare dell'angolazione di deposizione. Una volta confrontati i valori di trazione si è passati all'individuazione delle forze di compressione che mandano in instabilità il materiale. Come era prevedibile ottenere, considerando i vincoli al provino, il modo con cui esso si inflette è unico, con valori di forza che aumentano in maniera lineare all'aumentare dello spessore e della larghezza della costola. Per quanto riguarda l'instabilità locale, si verifica esclusivamente con i provini che presentano elevato spessore e in particolar modo per quelli a 15 mm. Dopo aver valutato la prima serie di provini, si è cercato di analizzare se la formazione di umidità avveniva durante la deposizione o dopo 10/15 giorni dalla realizzazione, infatti, i provini sono stati realizzati e dopo 15 giorni circa, sono stati testati. Questa ha comportato dei valori di resistenza più bassi ma la differenza era ingegneristicamente trascurabile, tale per cui si è passati a riscaldare il materiale per 4 ore a 120°C riscontrando degli incrementi di forza massima maggiori rispetto ai provini "umidi", ponendo due condizioni differenti: "secco" e "umido". Infine, per poter arricchire maggiormente i dati, è stata selezionata un'ulteriore tipologia di provini avente le stesse caratteristiche di spessore e larghezza della costola senza trattamento successivo, ma diminuendo il numero di celle da 4 a 3, di conseguenza è stato possibile aumentarne l'altezza, ciò ha comportato un valore di forza leggermente inferiore ai provini con altezza inferiore. Dato un discreto numero di dati in input e output e un elevato numero di parametri, si è giunti a poter sviluppare una rete neurale in grado di prevedere la forza critica con un errore massimo percentuale dell'11% attraverso il metodo del Leave k-out ottimo quando non si ha una base dati sufficientemente ampia. Quest'ultimo step verrà tuttavia sviluppato in fieri, infittendo i dati al fine di far prevedere il comportamento di un determinato provino senza l'utilizzo del Leave k-out ma impiegando il Resubstitution, cosicché i dati di training e validazione siano sempre gli stessi e il valore del test venga calcolato con la rete e verificato successivamente.

CONCLUSIONI

Il presente lavoro ha l'obiettivo di verificare e valutare nel lungo termine il potenziale della stampa tridimensionale, questo potente processo impiegato a livello industriale per le produzioni unitarie o cellulari poiché ne riduce le fasi ma anche gli scarti al fine di rendere quel determinato prodotto maggiormente competitivo sul mercato. Nello specifico si è cercato di valutare come possa comportarsi una struttura Isogrid, impiegata principalmente nell'ambito aerospaziale, realizzata mediante Stampa 3D con materiale termoplastico e quindi riciclabile, con ottime caratteristiche meccaniche grazie al rinforzo in carbonio. Il confronto può essere fatto con il Filament Winding, processo utilizzato per la realizzazione di queste particolari strutture in CFRP. Dai valori ottenuti, è possibile sottolineare come la Stampa 3D sia un processo di produzione per strutture Isogrid in grado di resistere a carichi non eccessivamente alti ma con il vantaggio di utilizzare materiale riciclabile oltre che trattarsi di un processo produttivo molto flessibile con tolleranze pari o inferiori al tradizionale Filament Winding.

Certamente, con il passare degli anni queste tecnologie si svilupperanno e daranno luogo a sistemi molto più sofisticati utilizzando il **Machine Learning** per il controllo della posizione dell'estrusore e delle condizioni di stampa; oltre che la possibilità di stampare materiale termoindurente andando a soppiantare processi produttivi quali il Bag Molding in grado di ottenere migliori caratteristiche ma una bassissima flessibilità a causa di una produzione artigianale che necessita di elevatissimi tempi di realizzazione e grossi investimenti iniziali per l'acquisto di autoclavi e stampi nonché una elevata forza lavoro non sempre in grado di far fronte alla forte variazione della domanda di mercato.

RIFERIMENTI

- [1] Scienza e Ingegneria dei Materiali Callister.
- [2] Smith - Scienza e tecnologia dei materiali.
- [3] Edition T. Fiber- Reinforced. 2007.
- [4] La R, Aeronautica I, Romano C. Synthesis of carbon nanotubes and their application in "Anisogrid lattice structures".
- [5] Prabhakaran RTD, Ormondroyd GA, Zhongwei G. Simulation of Flexural Stresses on Layered Natural Fibre/Epoxy Composite Beams
- [6] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D638 – 14. Stand Test Method Tensile Prop Plast 2014.
- [7] ASTM. D790-03-Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulation Materials. ASTM Stand 2015.
- [8] Golushko S, Semisalov B. Calculation and design of lattice cylindrical shells manufactured of unidirectional CFRPs. J Phys Conf Ser 2017.
- [9] Ning F, Cong W, Qiu J, Wei J, Wang S. Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling.
- [10] Ferraro GA, Corcione A, Nicoletti G, Rossano F, Perrotta A, D'Andrea F. Blepharoplasty and otoplasty: Comparative sedation with remifentanil, propofol, and midazolam.
- [11] Liu S, Li Y, Li N. A novel free-hanging 3D printing method for continuous carbon fiber reinforced thermoplastic lattice truss core structures.
- [12] Kim YM, Kim H, You S, Yim D. (12) Patent Application Publication (10) Pub . No .: US 2014 / 0332121.
- [13] Tian X, Liu T, Wang Q, Dilmurat A, Li D, Ziegmann G. Recycling and remanufacturing of 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites. J Clean Prod 2017.
- [14] Simpson JT, Us TN. (12) United States Patent 2019.
- [15] Patent Application Publication (10) Pub. No.: US 2018/0370129 A1.
- [16] Wang X, Jiang M, Zhou Z, Gou J, Hui D. 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective.
- [17] NASA, Isogrid Design Handbook
- [18] Li M, Lai C, Zheng Q, Han B, Wu H, Fan H. Design and mechanical properties of hierarchical isogrid structures validated by 3D printing technique.
- [19] Jam JE, Noorabadi M, Taghavian SH, Abad MRAA, Namdaran N. Design of anisogrid composite lattice conical shell structures.

- [20] Tekinalp HL, Kunc V, Velez-Garcia GM, Duty CE, Love LJ, Naskar AK, et al. Highly oriented carbon fiber-polymer composites via additive manufacturing.