



POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Architettura  
Costruzione e Città

Tesi di Laurea Magistrale

**Struttura espositiva modulare:  
tecniche di produzione additiva con materiali ecosostenibili**

Relatore:

Prof. Phd. Ing. Stefano Invernizzi

Candidato:

Federico Ciaccio

Correlatore esterno:

Ing. Paolo Nicola, Laboo srl.

Dicembre 2019

Le immagini e i grafici presentati in questo testo sono stati elaborati e realizzati dall'autore della tesi, salvo dove diversamente indicato.

Il percorso intrapreso per sviluppare e portare a termine questa mia idea non sarebbe stato possibile senza l'interesse e la passione che il prof. Stefano Invernizzi fin da subito è riuscito a dedicarmi.

Di fondamentale aiuto è stato l'ing. Paolo Nicola che mi ha permesso di interfacciarmi con l'azienda e di fornirmi il materiale affinché la sperimentazione avesse luogo.

Ringrazio tutti i collaboratori, il prof. Amedeo Manuello, il prof. Matteo Pavese, la prof.ssa Luciana Restuccia e il dottorando Daniel Suarez, per avermi dedicato il loro tempo durante le prove meccaniche in laboratorio, mettendo a disposizione le attrezzature e le proprie conoscenze.

Un ringraziamento speciale ai miei genitori, a mia sorella, ai miei zii e ai miei più cari amici, che hanno creduto in me supportandomi e, nel bisogno, consigliatomi.

# Abstract

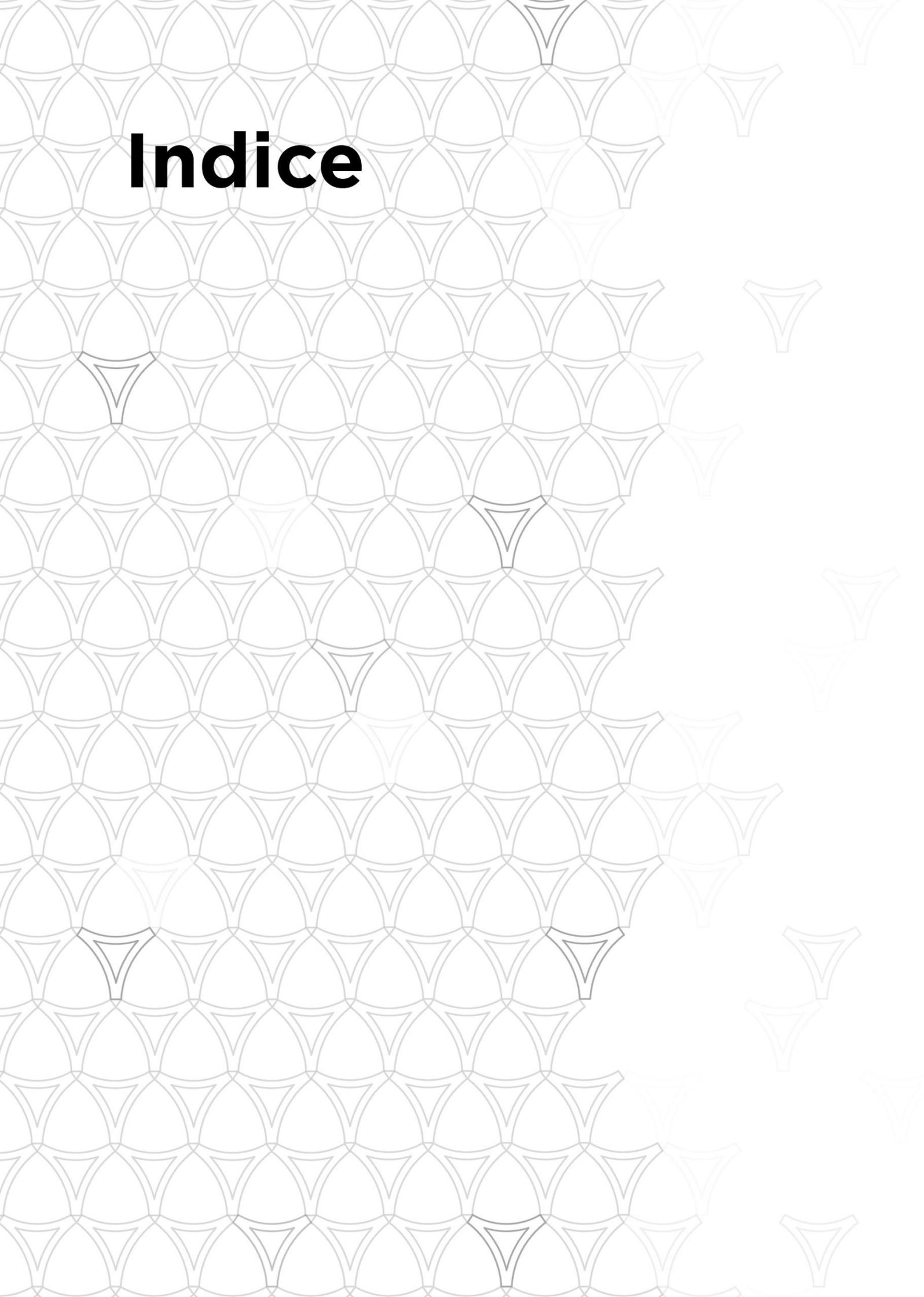
**“Waste is a design flaw  
there is no waste in nature  
design is the solution”**

- Kate Krebs -

La tesi proposta mira a indagare le capacità meccaniche del filamento HBP-HempBioPlastic®, brevetto dall'azienda italiana Kanésis, modellato attraverso la tecnica di produzione additiva (AM). Il filamento stampato 3D è stato prima testato nella prova meccanica a trazione secondo la normativa ASTM-D638 e successivamente, in base ai dati raccolti, si è passati alla fase progettuale. È stato ideato un padiglione espositivo con la concezione che fosse composto da materiali riciclabili o biodegradabili, facile da montare e da trasportare e, che per la produzione avesse un basso impatto ambientale. Tale padiglione è stato modellato partendo dalla costruzione geometrica del fullerene che si rispecchia nella struttura modulare portante e composta da montanti in HBP® prodotti mediante lo stampaggio 3D. Infine, i risultati ricavati dalla prova sperimentale sono stati comparati all'analisi FEM (Finite Element Analysis) effettuata sulla struttura portante del padiglione in caso di sisma e neve per dimostrare la possibilità di impiego di tale materiale innovativo in campo edilizio.

*This thesis aims to investigate the mechanical capabilities of the HBP-HempBioPlastic® filament, patented by the Italian company Kanésis, modeled through the additive manufacturing technique (AM). At first the 3D printed filament was tested in the mechanical traction test according to the ASTM-D638 standard and subsequently has begun the design phase based on the data collected during the tests. An exhibition pavilion was conceived with the concept that it was composed of recyclable or biodegradable materials, easy to assemble and transport and that it had a low environmental impact for production. This pavilion was modeled starting from the geometric construction of the fullerene which is reflected in the supporting modular structure composed by uprights made of HBP® and produced by 3D molding. Finally, the results obtained from the experimental test were compared to the FEM Analysis, applied in case of earthquake and snow on the bearing structure of the pavilion, to try to demonstrate the possibility of using this innovative material in the construction field.*

# Indice



<b>INTRODUZIONE .....</b>	<b>1</b>
<b>PARTE I – MATERIALE .....</b>	<b>2</b>
<b>1. LA CANAPA .....</b>	<b>5</b>
1.1. FISILOGIA .....	8
1.2. BENEFICI AMBIENTALI E PRODUZIONE .....	10
1.2.1. BENEFICI AMBIENTALI .....	10
1.2.2. PRODUZIONE.....	11
1.2.2.1. SEMINA.....	11
1.2.2.2. RACCOLTA E MACERAZIONE .....	12
1.2.2.3. LINEA DI PRODUZIONE PER FIBRA E CANAPULO .....	13
1.2.2.3.1. L’impianto di trasformazione .....	13
1.2.2.3.2. L’esplosione a vapore .....	15
1.2.2.3.3. L’alcalinizzazione .....	15
1.3. STORIA E USI .....	16
1.3.1. IN ITALIA.....	16
1.3.2. ATTUALITÀ .....	17
1.3.2.1. BIOEDILIZIA .....	17
<b>2. COMPOSITI E BIO-COMPOSITI.....</b>	<b>19</b>
2.1. IL BIOCOSPOSITO CALCE-CANAPA.....	23
2.1.1. ELEMENTI DI COMPOSIZIONE .....	25
2.1.1.1. IL CANPULO.....	25
2.1.1.2. LA CALCE .....	25
2.1.1.3. L’ACQUA.....	26
2.1.2. LA MISCELA: PRODUZIONE E USI .....	27
2.1.2.1. CAST-IN-SITU HEMPCRETE .....	27
2.1.2.1.1. Applicazione manuale .....	28
2.1.2.1.2. Applicazione meccanizzata .....	29
2.1.2.2. PRE-CAST HEMPCRETE .....	30
2.1.2.2.1. Prodotti in commercio .....	30
2.1.2.2.1.1. Blocchi .....	30
2.1.2.2.1.2. Pannelli .....	31
2.1.3. CARATTERISTICHE E PROPRIETÀ.....	32
2.1.3.1. PROPRIETÀ FISICHE.....	32

2.1.3.1.1.	Trasmittanza termica .....	32
2.1.3.1.1.1.	Ponti Termici .....	32
2.1.3.1.2.	Inerzia termica.....	33
2.1.3.1.3.	Confort interno.....	34
2.1.3.1.4.	Isolamento acustico .....	34
2.1.3.1.5.	Resistenza al fuoco.....	34
2.1.3.2.	PROPRIETÀ CHIMICHE .....	35
2.1.3.2.1.	Durabilità .....	35
2.1.3.2.1.1.	Resistenza a gelo-disgelo.....	35
2.1.3.2.1.2.	Resistenza all'esposizione ai sali .....	36
2.1.3.2.1.3.	Resistenza al deterioramento biologico .....	36
2.1.3.2.2.	Protezione da infestazioni .....	37
2.1.3.2.3.	Tossicità .....	37
2.1.3.3.	BENEFICI AMBIENTALI .....	37
2.1.3.3.1.	Embodied energy .....	38
2.1.3.3.2.	Sequestro del carbonio (CO <sub>2</sub> ) .....	38
2.1.3.3.3.	Riciclabilità e riuso.....	38
<b>2.1.4.</b>	<b>LE PROPRIETÀ MECCANICHE.....</b>	<b>39</b>
2.1.4.1.	STUDI SULLA RESISTENZA A COMPRESSIONE DEL HLC.....	39
2.1.4.1.1.	Influenza dell'acqua sulle proprietà meccaniche .....	39
2.1.4.1.2.	Conseguenze dovute alla granulometria del canapulo .....	39
2.1.4.1.3.	Considerazioni sulla quantità di canapulo all'interno della miscela.....	40
2.1.4.1.4.	Benefici dovuti all'utilizzo dell'Etilene-vinil-acetato.....	40
2.1.4.1.5.	Una compattazione maggiore per aumentare la resistenza a compressione .....	40
<b>2.2.</b>	<b>COMPOSITI A MATRICE POLIMERICA.....</b>	<b>43</b>
<b>2.2.1.</b>	<b>COMPONENTI.....</b>	<b>44</b>
2.2.1.1.	MATERIE PLASTICHE .....	44
2.2.1.1.1.	I polimeri.....	44
2.2.1.1.1.1.	Polimeri eco-compatibili.....	45
2.2.1.2.	LE FIBRE DI RINFORZO .....	46
2.2.1.2.1.	Le fibre naturali di origine vegetale .....	47
2.2.1.2.1.1.	La fibra di canapa .....	48
<b>2.2.2.</b>	<b>L'HBP - HEMPBIOPLASTIC®, KANÈSIS.....</b>	<b>50</b>
2.2.2.1.	COMPOSIZIONE E CARATTERISTICHE .....	50
2.2.2.2.	L'AZIENDA .....	51

PARTE II – TECNOLOGIA..... 52

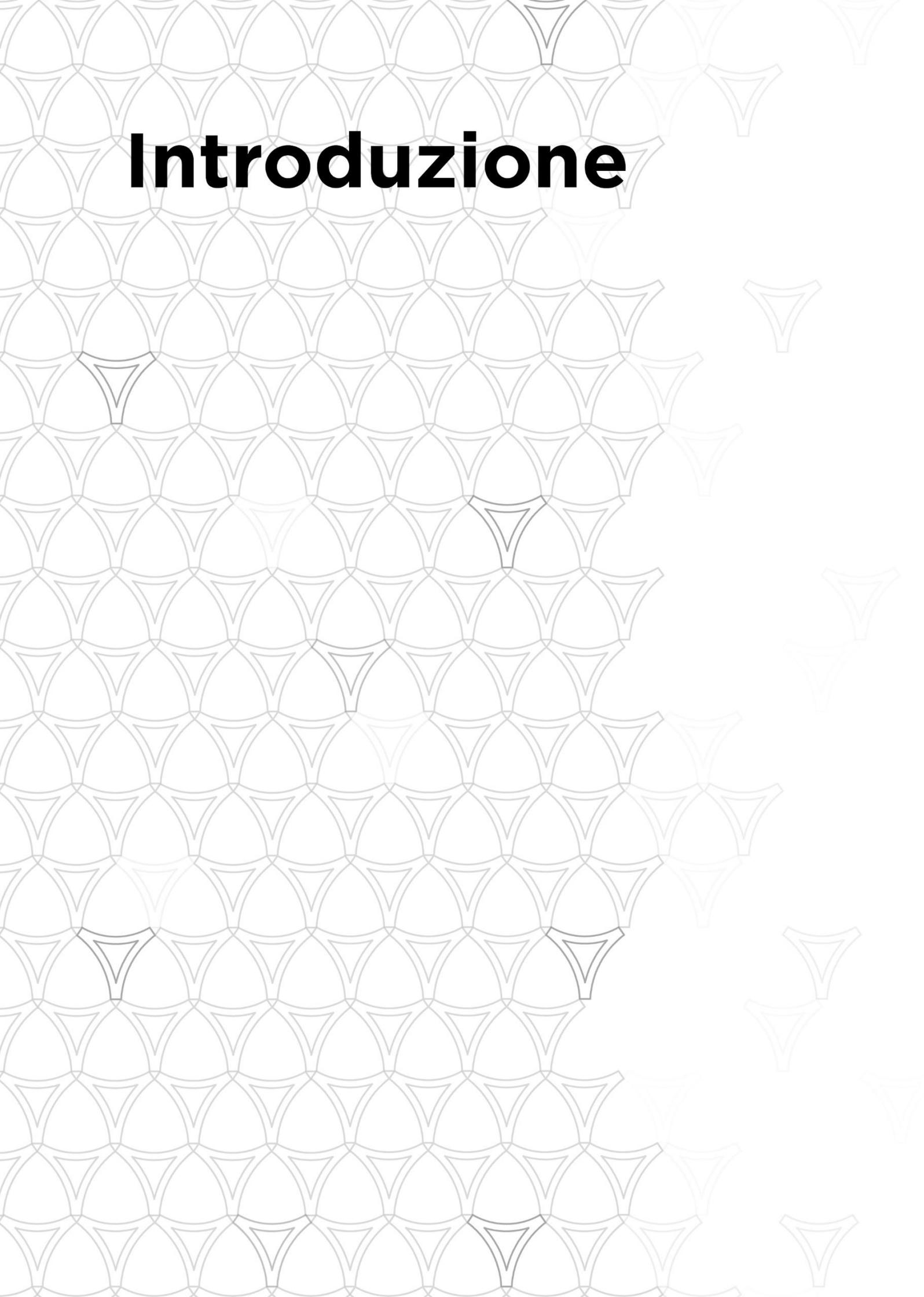
<u>3. L'ADDITIVE MANUFACTURING.....</u>	<u>55</u>
3.1. TECNOLOGIE DI PRODUZIONE.....	56
3.1.1. LE FASI DI PRODUZIONE.....	57
3.1.2. MATERIALI IMPIEGATI.....	57
3.2. PRO E CONTRO DELL'AM.....	58
3.2.1. ASPETTI POSITIVI.....	58
3.2.2. EFFETTI NEGATIVI.....	58
3.2.3. PROSPETTIVE FUTURE.....	59
3.3. LA TECNOLOGIA FDM.....	61
3.3.1. MATERIALI IMPIEGATI.....	64
3.3.2. FATTORI CARATTERIZZANTI.....	69
3.3.3. PROVE MECCANICHE SU ABS E PLA.....	71
3.3.3.1. CONSIDERAZIONI.....	76
<u>4. TEST MECCANICI.....</u>	<u>79</u>
4.1. METODO SPERIMENTALE.....	80
4.1.1. PRODUZIONE DEI CAMPIONI.....	80
4.1.2. PROVA MECCANICA.....	84
4.2. RISULTATI E DISCUSSIONE.....	86
4.2.1. ANALISI DEI RISULTATI.....	86
4.2.1.1. LA DIGITAL IMAGE CORRELATION (DIC) ESEGUITA SUI CAMPIONI IN HBP®.....	97
4.2.1.1.1. La metodologia.....	97
4.2.1.1.2. Analisi dei risultati.....	98
4.2.2. CONCLUSIONI.....	101

**PARTE III – PROGETTO ..... 102**

<b>5. PROPOSTA PROGETTUALE .....</b>	<b>105</b>
5.1. LA CUPOLA GEODETICA E IL FULLERENE .....	106
5.2. REQUISITI DI PROGETTAZIONE .....	107
5.3. COMPOSIZIONE ARCHITETTONICA.....	108
5.3.1. LA STRUTTURA PORTANTE.....	117
5.3.1.1. LA SEZIONE DELLA TRAVE .....	118
5.3.1.1.1. Le determinazioni dei profili.....	118
5.3.2. IL TAMPONAMENTO.....	121
5.3.2.1. IL BASAMENTO.....	121
5.3.2.1.1. La pavimentazione interna .....	121
5.3.2.1.2. Accessi e aperture .....	122
5.3.2.2. L’ALZATO .....	122
5.3.2.2.1. Il tamponamento trasparente .....	122
5.3.2.2.2. Il tamponamento isolante .....	122
5.3.3. IMPIANTISTICA E CONFORT INTERNO .....	123
5.3.3.1. IL SISTEMA DI RAFFRESCAMENTO .....	123
5.3.3.2. LA TRASMITTANZA TERMICA .....	124
5.3.3.2.1. Risultati .....	124
5.4. PRODUZIONE E CANTIERIZZAZIONE .....	126
5.4.1. PRODUZIONE E TRASPORTO .....	126
5.4.2. ASSEMBLAGGIO E SMONTAGGIO.....	127
5.5. CALCOLO STRUTTURALE .....	130
5.5.1. ANALISI FEM.....	130
5.5.1.1. PROCEDURA E SETTAGGIO MODELLO DI CALCOLO.....	130
5.5.2. RISULTATI E CONCLUSIONE.....	134
5.5.2.1. DEFORMAZIONI E REAZIONI VINCOLARI .....	135
5.5.2.2. SFORZI NORMALI .....	138
5.5.2.3. SFORZI A TAGLIO.....	140
5.5.2.4. MOMENTI FLETTENTI .....	143
5.6. STAMPAGGIO MODELLO.....	148
BIBLIOGRAFIA.....	150



# Introduzione



Il seguente lavoro di tesi si inserisce all'interno di uno scenario mondiale in cui le sicurezze, in fatto di risorse naturali e ambiente, vengono continuamente rese più incerte. È indispensabile apportare delle modifiche nelle attuali abitudini di produzione e sfruttamento delle materie prime col fine di riservarci un mondo migliore.

La volontà di ricercare soluzioni alternative agli attuali materiali utilizzati in campo edilizio, sempre più esigenti di energia per la loro produzione, difficili da smaltire o da riutilizzare, mi ha portato a focalizzare l'attenzione sulle opportunità e i vantaggi dati dalla coltivazione della canapa.

Le fibre di tale pianta, unite al polimero di origine naturale PLA, sono utilizzate per produrre un filamento stampabile con tecnologia FDM (stampa 3D), di concezione tutta italiana e brevettata col nome HBP-HempBioPlastic® dall'azienda siciliana Kanèsis.

Attualmente tale materiale innovativo è utilizzato per confezionare oggetti, ma mediante la sperimentazione sul filamento e sulle nuove tecniche di stampaggio 3D proposte in questa tesi, si è cercato di approfondire la conoscenza sulle proprietà meccaniche dell'HBP® per un suo possibile utilizzo come materiale da costruzione.

Il percorso sperimentale trova la propria finalità nella progettazione di un padiglione espositivo basato sulla costruzione geometrica delle cupole geodetiche alla R. B. Fuller.

L'analisi, basata sulle potenzialità di tali coperture e sulle performance fisiche e meccaniche dei materiali ecosostenibili, viene effettuata mediante il calcolo FEM in caso di sisma e neve. In questo modo la quantificazione delle sollecitazioni che interessano la struttura portante, ci guida alla proposta di una copertura con struttura stampata in 3D, modulare, componibile, smontabile e facilmente trasportabile.

# Materiale

## Parte I

La prima parte del percorso di tesi mira a descrivere le generalità botaniche e di coltivazione della canapa, soffermandosi su come le diverse parti della pianta sono sempre state utilizzate fino ai giorni nostri, e in seguito ad una sua riscoperta, si contano più di 50.000 prodotti presenti sul mercato.

Successivamente la trattazione verte sui materiali compositi ad oggi prodotti aventi come fase della miscela la fibra di canapa. In particolare, si pone l'attenzione al biocomposito Calce-Canapa in quanto su di esso sono stati eseguiti diversi studi affinché potesse essere utilizzato a fine strutturale portante in edilizia.

L'altra tipologia di compositi esaminati sono quelli a base polimerica e le varianti ecosostenibili che costituiscono una valida alternativa.

Al termine di tale prima sezione viene approfondito il biopolimero HBP-HempBioPlastic®, brevettato dall'azienda italiana Kanèsis, in quanto rappresenta il "protagonista" della sperimentazione sviluppata nella seconda parte di questa tesi.

5



## **1. LA CANAPA**

---

- 8 1.1. Fisiologia
- 10 1.2. Benefici ambientali e produzione
  - 10 1.2.1. Benefici ambientali
  - 11 1.2.2. Produzione
- 16 1.3. Storia e usi
  - 16 1.3.1. In Italia
  - 17 1.3.2. Attualità

19



## **2. COMPOSITI E BIO-COMPOSITI**

---

- 23 2.1. Il biocomposito calce-canapa
  - 25 2.1.1. Elementi di composizione
  - 27 2.1.2. La miscela: produzione e usi
  - 32 2.1.3. Caratteristiche e proprietà
  - 39 2.1.4. Le proprietà meccaniche
- 43 2.2. Compositi a matrice polimerica
  - 44 2.2.1. Componenti
  - 50 2.2.2. L'HBP-HemBioPlastic®, Kanèsis



# 1. LA CANAPA

La canapa è una pianta erbacea a crescita rapida costituita da fibre di grande resistenza. Fibre utilizzate sin dall'epoca romana per la produzione di corde, vele, vestiario e prodotti per l'edilizia [Figura 2] (ASHBY, 2009).

In botanica (CELONI, et al., 2006) si tratta di una pianta appartenente alla famiglia delle **Cannabacee** o **Cannabinacee**, a sua volta facente parte dell'ordine delle **Urticali**. Si tratta di piante legnose o erbacee con fiori poco appariscenti, in grado di produrre delle secrezioni contenenti il principio attivo **THC** (tetraidrocannabinolo) mediante la formazione di particolari ghiandole.

La canapa è caratterizzata da un'elevata varietà dovuta alla capacità di adattamento a quasi tutti i tipi di terreno, prediligendo quelli soffici, profondi e permeabili, e alle diverse metodologie di coltivazione, sviluppandosi per lo più in climi temperati con temperature dai 0°C ai 20°C.

Le varietà si distinguono tra loro tramite un aspetto differente delle foglie e dei semi, dimensioni complessive e tipologie precoci o tardive, monoiche e dioiche.

Queste varietà sono suddivise a loro volta in gruppi di specie differenti in base alle loro caratteristiche macroscopiche.



**Immagine di copertina:**  
Pianta della canapa: particolare del fiore.  
Foto: @Jose Luis Sanchez Pereyra

**Figura 1:** Morfologia delle tre specie di Cannabis (FASSIO, et al., 2013)

La prima classificazione, più utilizzata dai botanici, è quella risalente al 1924 del botanico russo D.E. Janichewsky, che le suddivise in [Figura 1]:

- **Cannabis sativa**

Alta fino a quattro metri con forma piramidale, produzione di resina non particolarmente abbondante e il periodo di fioritura varia tra le 9 e le 12 settimane;

- **Cannabis indica**

Non più alta dei 2 metri con una chioma di rami e foglie più folta, produzione di resina generosa e il periodo di fioritura è compreso tra le 6 e le 9 settimane;

- **Cannabis ruderalis**

È alta massimo mezzo metro e priva di rami, periodo di fioritura molto breve intorno alle 4 settimane ed elevata resistenza alle basse temperature che le permette di crescere spontaneamente anche ad alta quota.

La seconda classificazione, a conferma della tesi del 1753 avanzata dallo svedese Carlo Linnè, è quella proposta dai canadesi Small e Cronquist nel 1976, i quali affermarono l'esistenza di una sola specie di Cannabis composta essa stessa da due sottospecie differenti:

- **Sativa**

Tipica dei paesi settentrionali, usata per la fibra dell'olio in campo tessile e edile;

- **Indica**

Tipica dei paesi caldi, ricca di resina e THC.

Nella pagina  
successiva

Figura 2: Schema riassuntivo degli usi delle varie parti della pianta di canapa (*canapaindustrial e.it*, 2015)



# CANAPA INDUSTRIALE

fibra di canapa - semi di canapa

più di

# 50,000

differenti usi!

### I dati

**Canapa industriale** contiene meno del **1% THC** (tetraidrocannabinolo)  
La canapa non è una droga  
La canapa non è marijuana

**La canapa è una risorsa**

La canapa ha la fibra più resistente al MONDO!

**20** anni di maturazione di un albero **4** mesi di maturazione canapa

La canapa può produrre 3-8 tonnellate di fibra secca per acre

**QUATTRO VOLTE IN PIU'** rispetto ad una foresta!

La Magna carta, la Bibbia di Gutenberg e persino la prima stesura della Costituzione Americana sono state stampate su carta ricavata da canapa

Carta, fertilizzanti, nutrienti per il terreno e paglia per animali possono essere ricavati dagli scarti della canapa

Questo significa che **TUTTE** le parti della pianta vengono utilizzate e riciclate

**1** acre di canapa produce **3500** litri di metanolo

**1941** Ford produce un prototipo di auto con la scocca composta da **70%** di fibra cellulosa di canapa. L'abitacolo della macchina poteva assorbire urti 10 volte superiori l'acciaio senza subire danno. La macchina era studiata per per utilizzare carburante a base di canapa

Tutto ciò che viene prodotto con cotone, legno o petrolio può essere fatto con la canapa

**I semi di canapa** contengono **80%** di acidi grassi polinsaturi  
La più alta percentuale tra tutte le piante esistenti!

**Particolarmente nutrienti per persone e animali**

Contengono acidi grassi rari  
**E' dimostrato che l'acido gamma linoleico aiuta nel trattamento di**

- Artriti
- Neurodermatiti
- Sindrome premestruale

Nessuna altra pianta contiene così tante proteine facili da digerire, ne tantomeno così tanti oli essenziali necessari per una vita sana e vitale!

Herbal Research & Development Institute, Inc

#### Fibra



dalle fibre esterne del fusto si ricavano lunghi filamenti

può sostituire

**Prodotti in cotone - Cordame - Prodotti tessili - Tele**

può sostituire

**Isolanti - Quasi tutte le plastiche e fibra di vetro - Acrilici combinata con scarti di canapa**

può sostituire

**Carta - Cemento & altri materiali da costruzione - Quasi tutte le fibre e plastiche combinate con scarti di canapa - Letterie per animali e concimi**

Tramite il processo di **Pirolisi** gli scarti di canapa possono diventare...

**Benzina!**

Dalla **BIOMASSA** di canapa si può ricavare

- Etanolo
- Metanolo
- Metano

**LA BIOMASSA DI CANAPA PUO' PRODURRE ENERGIA!**

Gli scarti di canapa possono produrre **10 tonnellate** di biomassa per acre ogni 4 mesi. Coltivando il 6% del suolo americano è possibile produrre energia sufficiente per tutta la nazione

cosmetici e prodotti di bellezza - ottimi per la pelle e i capelli

**Iatticini, burro, latte - hamburger - birra - ...e molti altri cibi!**

istidina	leucina	<div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <div style="font-size: 2em; margin-right: 5px;">P</div> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">proteine</div> </div>	<div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <div style="font-size: 1.5em; margin-right: 5px;">A</div> <div style="font-size: 1.5em; margin-right: 5px;">B</div> <div style="font-size: 1.5em; margin-right: 5px;">C</div> <div style="font-size: 1.5em; margin-right: 5px;">D</div> </div>	
fenilalanina	lisina			
reonina	metionina			
triptofano	valina			
isoleucina				

contiene i nove aminoacidi essenziali - grosse quantità di proteine - vitamine A, B, C e D - Medicinali

#### Scarti



gli scarti della lavorazione della pianta vengono ridotti in pezzetti piccoli

In Emilia-Romagna nel 1910 vi erano **45.000** ettari di terreno coltivati a canapa.

In tutta Italia la superficie coltivata era di circa **80.000** ettari

#### Semi & olio



I semi di canapa possono essere usati grezzi o per l'olio prodotto dalla spremitura

COPYRIGHT © BRITTNEY BROTEN 2013

## 1.1. FISIOLOGIA

La canapa è una pianta particolarmente resistente e adattabile, caratterizzata da un ciclo di vita breve e dalla facilità di incroci che ne hanno permesso la diffusione in varie parti del mondo dalle più variegate condizioni climatiche, in base alle quali sviluppa caratteristiche differenti (MARACCHI, Giugno 2007).

Generalmente si tratta di una pianta erbacea, annuale e tessile (fibre idonee alla filatura) di tipo dioica, costituita da un fusto più o meno ramificato a struttura esagonale e ricoperto di peli, con una sezione variabile di tipo pieno alla base e sempre più cava verso la punta [Figura 3].

L'altezza può variare molto da 1 a 4-5 m, ma vi sono casi in cui raggiunge i 7 m come nel territorio piemontese dove vengono chiamate "lanse". Formato sia da fibre (*liberiane*<sup>1</sup>) di tiglio, tenute unite da **pectine** che le conferisce la colorazione verde della corteccia e, da un nucleo bianco molto leggero detto **canapulo**.

Composizione:

- 25-30%  
Fibra (82% cellulosa/6% lignina);
- 70-75%  
Canapulo (77% cellulosa/19% lignina).

Le **fibre** di forma rotondeggiante, allargate o a nastro, sono riunite in cordoni di varie dimensioni che s'intrecciano tra loro attorno all'asse formando una rete molto fitta. Più la pianta è di grandi dimensioni più la fibra è grossolana e robusta.

In centro  
Figura 3: Cannabis  
Sativa (KÖHLER,  
1887)

Cannabineae.



*Cannabis sativa* L.

W. Müller

<sup>1</sup> Fibre liberiane sono le fibre che derivano dallo stelo delle piante erbacee, contengono percentuali elevate di lignina solitamente e hanno fibre elementari coese. In generale le fibre liberiane sono più rigide e meno igroscopiche di quelle ottenute dalle foglie.



(A) Stelo maschile; (B) Stelo femminile.

1. Fiore maschile; 2.,3. Sacche di polline; 4. Granuli di polline; 5. Fiore femminile con petalo; 6. Fiore femminile senza petalo; 7. Grappolo di frutta femmina; 8. Frutto con petalo; 9. Frutto senza petalo; 10. Stesso; 11. Stesso in sezione trasversale; 12. Stesso in sezione longitudinale; 13. Semi senza guscio.

Distinzione delle fibre:

- **Primarie (lunghe)**  
16 mm con pareti molto ingrossate;
- **Secondarie (corte)**  
2 mm lignificate con il lume interno ostruito.

La **radice** (che può arrivare a 150 cm di profondità) è formata da un robusto fittone con esili ramificazioni laterali che si allunga per lo più nel primo mese di crescita formando il fusto. Quest'ultimo si accresce molto rapidamente fino alla fioritura, momento in cui si arresta e si sviluppano gli internodi fiorali.

Le **foglie** si originano in corrispondenza di ciascun nodo del fusto e si presentano picciolate, palmate con segmenti lanceolati, acuminati, seghettati e pelosi da 3 a 9 in base alla luce solare recepita.

I **fiori** si differenziano in maschili e femminili. I primi si sviluppano 60 gg dopo la germinazione e sono riuniti in pannocchie ascellari da un perigonio a 5 parti. Le seconde, invece, si formano sulle cime 10 gg dopo quelli maschili assumendo una forma a falsa spiga grossa, dritta e a ciuffo. In fine l'impollinazione avviene in modo anemofila (mediante il vento) dando vita al seme di canapa. Questo, se non ancora racchiuso negli involi floreali, si presenta di dimensioni 3-5 mm di lunghezza e 2-3 mm di larghezza e una superficie lucente di colore non omogeneo dal bruno all'olivastro.

La **pianta** ha un breve ciclo di vita evolutivo: circa 120 giorni (da metà marzo a metà luglio). La qualità dipende dal clima. La produzione di canapa non richiede pesticidi e fertilizzanti, non recando danno all'ambiente.

## 1.2. BENEFICI AMBIENTALI E PRODUZIONE

La canapa può essere coltivata in condizioni molto differenti ma da queste dipende la qualità del raccolto. Il terreno ideale, detto anche “*terra di canapa*”, è un terreno umido, profondo e drenante che non comporta il ristagno di acqua ma permette lo sviluppo dell’apparato radicale della pianta in profondità. È un terreno molto fertile e ricco di sostanze nutritive con un’ottima esposizione solare e una pendenza non eccessiva dovuto per lo più alla difficoltà di utilizzo dei macchinari atti alla raccolta (Canapa Valle Susa).

### 1.2.1. BENEFICI AMBIENTALI

Generalmente per la sua coltivazione non è previsto l’uso di diserbanti grazie all’azione meccanica delle radici e la presenza di sostanze battericide e insetticide insite nella pianta. Inoltre, è in grado di fornire benefici ai terreni in cui si coltiva, dovuto alla capacità della pianta di radicare in profondità dove preleva i nutrienti che vengono in parte restituiti allo strato superficiale del terreno con la perdita del fogliame. Si determina così, un’azione contro la desertificazione e un miglioramento produttivo e formativo delle coltivazioni che prendono il posto della canapa in seguito alla rotazione delle colture (LUCANAPA).

La capacità di **radicare in profondità** comporta anche un miglioramento delle prestazioni della pianta

come: una minor richiesta di apporto idrico e azoto al terreno, una resistenza maggiore a stress biotici e un maggior assorbimento di CO<sub>2</sub>.

Un’ulteriore proprietà è la **metallo-tolleranza** che ne fa un’ottima scelta per la fitodepurazione in terreni inquinati. Infatti, la canapa è in grado di crescere in terreni ricchi di metallo senza subire troppi danni durante il proprio sviluppo, perché i tessuti della pianta, degradando, immobilizzano le scorie rendendole inerti (CONRAD, et al., 2007).

Nell’articolo (TOFANI, 2014) su “CanapaIndustriale.it” il presidente di Toscanapa (associazione open source per il ripristino della filiera della canapa industriale), elenca i principali vantaggi dovuti alla coltura della canapa:

- **Capacità rinettante**  
Controllo totale sulle erbe infestanti senza bisogno di trattamenti;
- **Basse concimazioni**  
Ne fanno una coltura a bassissimo impatto energetico e adatta per l’agricoltura biologica;
- **Effetto miglioratore nelle rotazioni agricole**  
Migliora le rese delle altre colture in virtù dell’apparato radicale profondo e dell’accumulo di elevati stock di carbonio nel suolo;
- **Assenza di trattamenti antiparassitari**  
Per la scarsa incidenza di danni da parassiti.

## 1.2.2. PRODUZIONE

In base alla parte lavorata della pianta di canapa si possono ottenere diversi prodotti. È necessario avere in mente l'output della lavorazione per capire se concentrarsi sulla parte fibrosa o sui semi. Come detto precedentemente, la canapa essendo dioica (soggetti di diverso genere maschio/femmina), presenta in base al sesso della pianta stessa delle differenze caratterizzanti.

La pianta maschile genera molta più fibra mentre quella femminile permette la nascita dei semi. Invece, se la produzione mira ad entrambi, si è creata una pianta ibrida, col nome di "*canapa monoica*", che presenta i due generi insieme (Assocanapa).

In ogni caso, la raccolta e la lavorazione della canapa sono rimaste ferme come tecnologia a cinquant'anni fa, quando in Europa venne a mancare quasi del tutto l'interesse nei confronti di tale coltura (Canapicoltura).

Per il suddetto motivo, al momento si riscontrano molte difficoltà durante la lavorazione con una conseguente levitazione dei costi di produzione.

Le fasi del **processo di lavorazione** si suddividono in (Canapicoltura):

- **Acquisto dei semi**
- **Semina**
- **Crescita**
- **Raccolta**

### 1.2.2.1. SEMINA

La semina avviene mediante seminatrici da grano che posizionano le file a 20 cm tra loro (TOFANI, 2014). In base al fine della coltura la densità può variare: fino a 50 kg/ha (chilogrammi di semina in un ettaro) se le colture sono destinate all'ottenimento di fibra tecnica, maggiore per l'ottenimento di fibre tessili e fino a 25 kg/ha per le colture da seme (MARACCHI, Giugno 2007).



**Figura 4:** Semina a mano (Canapicoltura)

### 1.2.2.2. RACCOLTA E MACERAZIONE

Le prime fasi comuni a qualsiasi fine produttivo hanno lo scopo di preparare la pianta prima della serie di lavorazioni utili all'ottenimento del prodotto finito (LUCANAPA). Queste sono:

- **Raccolta / Taglio**
- **Macerazione**
- **Imballatura**

Le tecniche e i tempi con le quali vengono effettuate dipendono dall'utilizzo ultimo della pianta (MARACCHI, Giugno 2007):

- **Canapa da fibra tecnica**

Raccolta: fine agosto con falciatrice normale;

Macerazione: 30/60 giorni.

- **Canapa da seme**

Raccolta: settembre/ottobre si trebbia con mietitrebbia modificata appositamente;

- **Canapa da fibra tessile**

Raccolta: luglio (prima della fioritura) si taglia con apposito macchinario e si rotoimballa con pressa da lino;

- **Seme**

Raccolta: un mese dopo la fecondazione.

A lato  
**Figura 5:** Raccolta a mano (Canapicoltura)



A lato  
**Figura 6:** Fasci di steli dopo la raccolta (Canapicoltura)



Dopo la raccolta e il taglio [Figura 5] comincia la fase di macerazione in cui gli steli vengono raggruppati in fasci ed essiccati secondo due modalità:

- **In campo**

Gli steli, dopo la falciatura e andatura, vengono lasciati dalle 4 alle 6 settimane in campo. Con una continua rotazione degli steli, si assicura una macerazione e un'asciugatura fino al 15% di umidità [Figura 6];

- **In acqua**

Vengono immersi, in un secondo momento, in acqua ottenendo così una macerazione molto più omogenea e una qualità della fibra più alta in seguito a un costo e inquinamento maggiore della precedente.

Al termine della macerazione avviene l'imballaggio e trasporto al sito di decorticazione.

### 1.2.2.3. LINEA DI PRODUZIONE PER FIBRA E CANAPULO

L'olio estratto dai semi di canapa, molto ricco di proteine e adatto all'alimentazione per uomini e animali (oltre all'utilizzo in campo cosmetico, farmaceutico, olio per usi industriali e vernici naturali per l'edilizia), lo si preleva mediante l'utilizzo delle tecnologie già in uso per altre colture.

D'altronde, per l'ottenimento delle parti legnose della pianta, la lavorazione è più articolata e prende il nome di **processamento** suddiviso in:

- **Separazione / Decorticazione**
- **Tranciatura / Pulizia**
- **Imballaggio**

Al termine di tale lavorazione si ottengono i due sottoprodotti:

- **Fibra di canapa**  
Per tessuti, cordami, materiali geotessili, fiocchi, pannelli, feltri e materassini per l'isolamento termoacustico;
- **Canapulo**  
Per carta di alta qualità e per l'alleggerimento di conglomerati cementizi.

Attualmente esistono diverse tecnologie che ci permettono di dividere la parte fibrosa da quella più legnosa. Il metodo più utilizzato, ad oggi, è quello meccanico in quanto più economico e prevede che le fasi avvengano in continuità lungo l'**impianto di trasformazione**. Altre modalità, certamente più costose ma che garantiscono una qualità maggiore dei sottoprodotti, sono:

- **La tecnica dell'esplosione a vapore**
- **L'alcalinizzazione**

In generale è da notare che tali trattamenti se non applicati nel modo adeguato (aggressivi e prolungati) possono portare ad un peggioramento significativo nelle caratteristiche fisiche delle fibre e di conseguenza nelle qualità performative delle stesse.

Quindi, è di vitale importanza porre molta cura nei vari trattamenti (tipo e durata della macerazione, modalità di estrazione, condizioni ambientali di crescita e periodo di raccolta della pianta) per ottenere un prodotto decisamente più performante (LUCANAPA).

#### 1.2.2.3.1. L'impianto di trasformazione

Il nuovo impianto di prima trasformazione disponibile oggi in Italia è stato brevettato da AssoCanapa "Coordinamento Nazionale per la Canapicoltura in Italia" nel 2010 (Assocanapa) [Figura 7].

Viene usato per il trattamento di paglie di canapa macerata in campo per 30/40 giorni, con un'umidità massima del 13% e una purezza minima del 98%.

Si introduce una quantità di materiale pari a 6-8 q.li/ora, ottenendo inizialmente delle rotoballe di paglie di canapa alte 120 cm, con un diametro di 130/140 cm e del peso di 2.5/2.8 quintali.

Alla fine della lavorazione si estraggono il 20/25% di fibra corta, il 70/75% di canapulo e un 5% di polveri con un ottenimento di un grado di pulizia del 90/95% per le fibre e dell'87/95% per il canapulo.

L'intero impianto è composto da tre moduli più console di comando:

- **Modulo alimentazione**

Le rotoballe vengono poste mediante l'utilizzo di un muletto o di trattore con forche su un pianale elevabile idraulicamente che è incernierato alla struttura principale del modulo. La rotoballa viene sfaldata da denti metallici posizionati sulle traverse di una catenaria estesa in altezza. Le bacchette strappate cadono per gravità e vengono convogliate al modulo di separazione da un nastro trasportatore in gomma, chiuso nella parte inferiore per evitare eventuali perdite di materia prima. Sia il nastro trasportatore che la catenaria di estrazione sono posti in movimento da motori idraulici indipendenti. La velocità di estrazione della catenaria e quella di movimento del nastro trasportatore sono regolabili dall'operatore in modo da ottimizzare l'afflusso di materia prima al modulo di separazione.

- **Modulo separazione**

Le bacchette estratte dal modulo di alimentazione vengono forzate entro un sistema

costituito da un telaio perimetrale all'interno del quale sono alloggiati tre battitori e i relativi controbattitori. La materia prima proveniente dal modulo di alimentazione viene diretta verso il primo rotore che opera una prima frammentazione delle bacchette di canapa ed una prima grossolana sfibratura. La canapa viene poi convogliata al secondo battitore nel quale viene sminuzzata e separata dalla fibra.

Nel terzo battitore si ottiene la definitiva scissione della parte fibrosa dal canapulo. Il canapulo e la fibra vengono infine espulsi dal modulo di separazione e convogliati nel modulo di pulizia. L'ampiezza dello spazio tra i rulli e griglie di separazione può essere regolata in modo da permettere di lavorare diverse tipologie di prodotto. Le spranghe di contrasto sono installate singolarmente ed estraibili, in modo da consentire interventi di manutenzione in caso di rotture od usure.

- **Modulo pulizia**

Il modulo finale di pulizia è costituito da un vaglio rotante inclinato sotto il quale si muove un



**Figura 7:** Macchinario per il processamento (Assocanapa)

nastro trasportatore che raccoglie e movimentava i frammenti di canapulo. Il vaglio è posto in rotazione da un motore idraulico e da una catena con relativo tenditore che si impegna sulla corona dentata saldata lungo la circonferenza del pulitore. Il nastro trasportatore, costituito da un tappeto in gomma, convoglia il canapulo in un apposito serbatoio munito di coclea che estrae e trasporta la materia prima verso il traliccio che sostiene i contenitori di stoccaggio "big bags". Il grado di pulizia ottenuto per la fibra, pari in media al 90,4% è adeguato alla produzione di pannelli di buona qualità.

#### 1.2.2.3.2. L'esplosione a vapore

Già sviluppata negli anni 30 del '900 e migliorata successivamente, consiste nell'introdurre il vapore ed eventuali additivi ad una pressione compresa tra 0-12 bar per un tempo di 1-30 minuti all'interno di un reattore. Tale vapore si inserisce nelle piccole fessure tra le fibre e la lamella centrale della pianta ed una volta ristabilita la pressione normale nell'ambiente, per mezzo di una valvola (esplosione a vapore), avviene il distacco delle due parti. Le fibre vengono così portate alla fase di asciugatura e filatura.

Studi recenti hanno dimostrato che l'applicazione della tecnica dell'esplosione a vapore porta qualche lieve beneficio anche dal punto di vista prestazionale delle fibre.

In particolare, si è osservato nel caso delle fibre di lino un aumento di circa il 10% della forza e allungamento a rottura rispetto alle fibre in cui si è utilizzata la separazione meccanica (KORTE, et al., 2008).

#### 1.2.2.3.3. L'alcalinizzazione

Si tratta di un processo chimico, utilizzato soprattutto nelle industrie tessili, atto a migliorare le doti di aderenza delle fibre naturali.

Vengono rimosse sia le sostanze che tengono unite le fibre, come pectina e cere naturali e, alcuni componenti della parete cellulare con una conseguente trasformazione del tipo di reticolo di cellulosa; questo si traduce in una conseguente proporzione maggiore di cellulosa e quindi in valori di densità lievemente superiori alla media (0.0018- 0.0024 g/mm<sup>3</sup>) (MADSEN, et al., 2007).

Il trattamento delle fibre di canapa con la soluzione di idrossido di sodio (NaOH), a diverse concentrazioni e per durate differenti, provoca un significativo miglioramento nell'aderenza tra fibra e matrice che si sviluppa una volta che la fibra è stata inserita e incorporata al composito.

D'altro canto, si è riscontrato che tale lavorazione comporta un peggioramento significativo delle performance delle fibre, soprattutto una diminuzione di rigidità e forza a rottura del 13-30% dovuto molto probabilmente alla rimozione di sostanze amorfe.

Al microscopio ottico, invece, non si sono notate delle riduzioni apprezzabili della sezione della fibra dopo il trattamento, cosa che avviene per le fibre sottoposte a trattamenti enzimatici (non utilizzati per le fibre da rinforzo in quanto riducono le proprietà meccaniche fino al 60%) (KORTE, et al., 2008).

## 1.3. STORIA E USI

La pianta della canapa ha sempre fatto parte del quotidiano dell'uomo essendo la più antica pianta da fibra coltivata grazie alla versatilità delle sue fibre e alle proprietà fisiologiche della pianta stessa. Secondo attendibili studi, la provenienza della canapa si associa all'Asia e precisamente alla Cina dove era utilizzata per la produzione di carta. In India, invece, veniva adoperata maggiormente per le proprietà mediche e psicotrope, mentre, una volta arrivata in Europa venne impiegata principalmente per la produzione di manufatti tessili i cui scarti (rappresentati da stracci e resti delle vele, dei vestiti, delle lenzuola, delle gomene e delle tende) costituivano la materia grezza utilizzata per la produzione di carta (Canapa Valle Susa). Tale coltura non conobbe crisi fino alla fine del XIX secolo quando una richiesta maggiore di prodotti finiti fecero preferire le fibre tessili naturali più economiche come la juta o l'abaca. Tale declino incentivato anche dalla campagna denigratoria "Marijuana Tax Act" del 1937, portò in tanti paesi compresa l'Italia, la completa sparizione della coltura di canapa culminato negli anni '70 del '900.

### 1.3.1. IN ITALIA

La coltivazione della canapa in Italia ha una lunga tradizione in quanto veniva utilizzata sia per usi tessili che dalle Repubbliche Marinare per le corde e vele delle proprie imbarcazioni. L'Italia divenne agli inizi del '900 il secondo maggior produttore di canapa al mondo per quantità con 100.000 ettari coltivati, dietro all'Unione Sovietica. Invece, per qualità si collocava al primo posto con la fibra detta

"Carmagnola", la migliore sul mercato anche come resa unitaria per ettaro coltivato.

Anche in Italia la coltura della canapa finì per cessare con la dichiarazione della sua illegalità. Solo nel 1998, con l'incentivazione da parte del Ministero delle Politiche Agricole, la coltivazione di tale pianta è ritornata solo su piccola scala (SCARANTINO, 2013/2014).

Ad oggi la normativa italiana di riferimento vigente è la Legge n. 242/16 del 2 dicembre 2016, GU n. 304 del 30 dicembre 2016: "*Disposizioni per la promozione della coltivazione e della filiera agroindustriale della canapa*" (Senato della Repubblica, 2016), in cui viene determinata legale la coltivazione di canapa in cui i livelli di THC risulti superiore allo 0,2% ed entro il limite dello 0,6%, pena il sequestro o la distruzione della coltivazione stessa.



### 1.3.2. ATTUALITÀ

Ad oggi le principali motivazioni che permettono un rinato interesse verso la canapa sono (SCARANTINO, 2013/2014):

- **Potenzialità delle fibre naturali**

Secondo (DI CANDILO, et al., 2003) entro il 2050 la richiesta mondiale di fibre passerà dagli attuali 50 milioni di tonnellate ai 130 milioni, sia per uso tessile che per impieghi alternativi;

- **Sensibilità alle problematiche ambientali**

Dovuta alla ricerca del mercato mondiale sulle risorse naturali alternative che richiedono minor input energetici, diserbanti chimici e fitofarmaci;

- **Fattore economico**

Tali colture alternative divengono più remunerative per i coltivatori rispetto a quelle tradizionali (cotone).

A livello europeo la fibra di canapa ha come



destinazione principale l'industria della carta (80%). Gli altri usi riguardano i materiali compositi per l'industria automobilistica (15%), materiali per la costruzione e l'isolamento degli edifici (4,5%) e solo l'1% è destinato al settore tessile (abbigliamento e arredamento), comprese le applicazioni tradizionali (corde, ecc.) e l'agrotessile (*Fonte: Nova Institut, citata nello studio di mercato sulle nuove utilizzazioni delle fibre vegetali, realizzato da Ernst & Young per l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie francese, nel dicembre del 2005*).

Grazie ai fattori sopra elencati e le numerose associazioni promotrici, la coltura della canapa sta riacquisendo una consistente ripresa, vantando ad oggi una produzione di circa 50.000 prodotti presenti sul mercato [Figura 2] (Canapa Valle Susa).

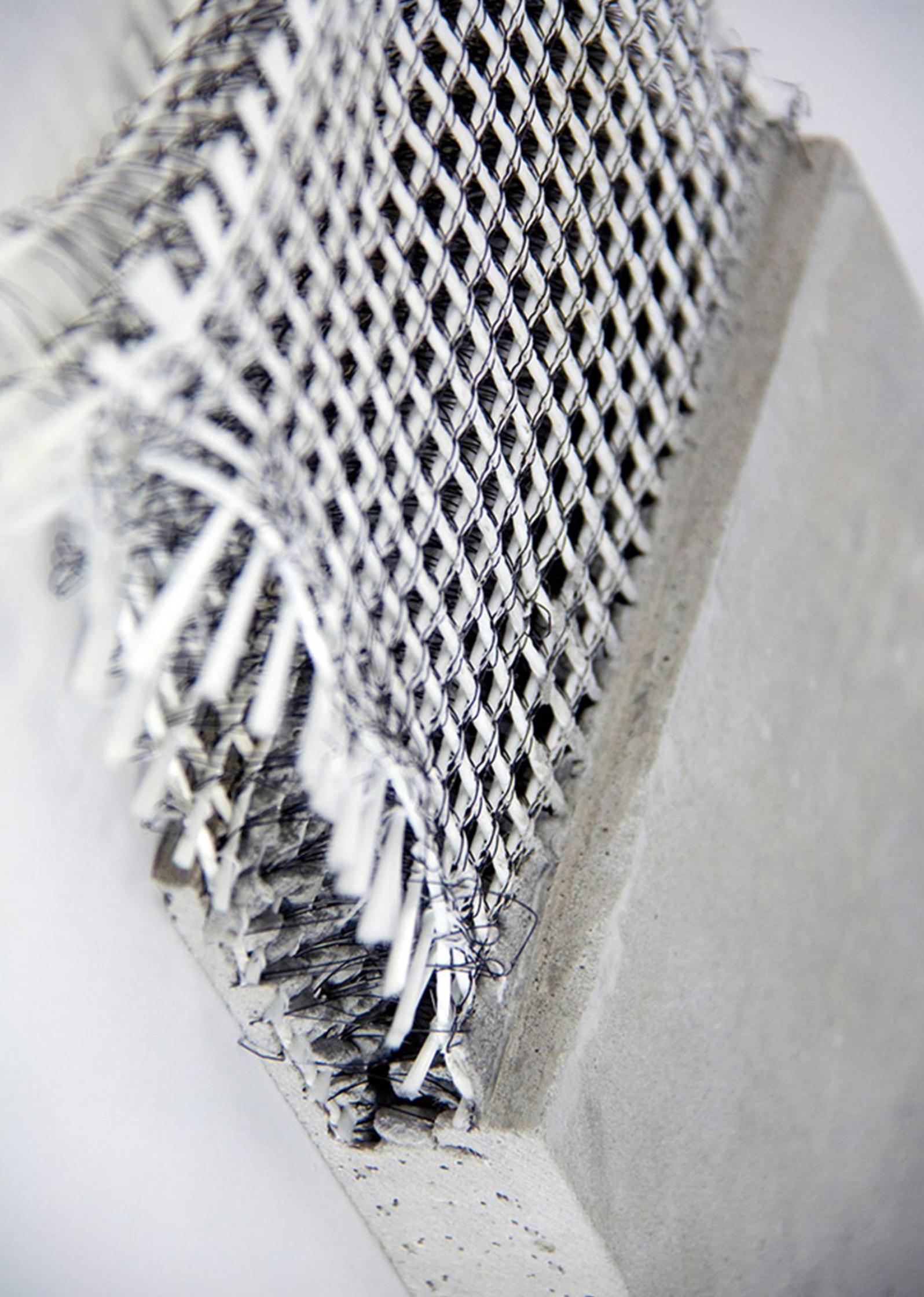
#### 1.3.2.1. BIOEDILIZIA

Dagli anni 90 in cui la canapa ha fatto la sua ricomparsa in campo edilizio sotto forma di prodotti industriali (Troyes, Francia), si è avviata una sperimentazione per testare le capacità e le proprietà di questa fibra naturale.

Le materie di scarto provenienti dalla lavorazione della canapa come: il canapulo, le fibre corte, fogliame e fiori, inutilizzabili per le industrie al di fuori dell'edilizia, divengono per quest'ultima materia di prima necessità.

La maggior parte delle industrie che operano nella bioedilizia, ne fanno uso unendole ad altre materie prime per formare compositi e realizzare prodotti atti alla costruzione ex-novo o nel recupero dell'esistente.

**In centro**  
Raccolta della canapa nell'Ottocento  
*Origine: File:Theodor von Hörmann Hanfeinlegen.jpg*  
- <https://it.wikipedia.org>



## 2. COMPOSITI E BIO-COMPOSITI

---

Molto spesso le sole fibre vegetali però non bastano a garantire gli standard meccanici e prestazionali richiesti nei vari settori industriali (edile, aerospaziale, aeronautico, difesa, sportivo e biomeccanica, per citarne alcuni) e per questo motivo si uniscono ad altri materiali di diversa natura al fine di crearne di nuovi con proprietà differenti.

L'unione di due o più micro o macro-costituenti dette "fasi", che differiscono nella forma e nella composizione chimica e sono in-solubili l'uno nell'altro, dà vita ad un prodotto che prende il nome di **composito**.

Nel caso in cui una o più fasi sono di natura biologica allora il composito viene definito **bio-composito** (MARCHETTI, et al., 1991).

Come descritto nel libro di (BRUCKNER, et al., 2001), un composito è costituito dalla combinazione di diverse fasi, queste si dividono in:

- **Fase discontinua o "rinforzo"**

Fornisce al composito le proprietà meccaniche ricercate di resistenza e rigidità;

- **Fase continua o "matrice"**

Ha la funzione di tenere insieme e proteggere le fibre e di realizzare la forma del componente. Grazie all'adesione che instaura con il rinforzo, permette il trasferimento a quest'ultimo delle forze applicate dovute alle sollecitazioni esterne.

Dalla combinazione di più fasi si ottengono materiali che hanno le proprietà richieste ai fini della progettazione, alle volte anche con la possibilità di migliorarne altre.

**Immagine di copertina:**

Fibra di vetro: la vista all'interno di un pannello di facciata in cemento tessile mostra chiaramente la struttura reticolare.

Foto: ©R. Thyroff

Le **matrici** possono essere di tipo polimerico (PMC's Polymer Matrix Composites), metallico o ceramico (GAY, et al., 2003). In base alle temperature alle quali il materiale deve sottostare, la matrice deve essere in grado di rimanere allo stato solido e per questo deve essere scelto tenendo conto della temperatura massima di esercizio [Tabella 1].

**Tabella 1:** Temperature massime di esercizio in base alla natura della matrice (CRISTALDI, et al., 2008-2011)

MATRICE	TEMPERATURA MASSIMA DI ESERCIZIO [°C]
POLIMERICA	< 250
METALLICA	< 1000
CERAMICA	> 1000

Il **rinforzo** invece, può essere di tipo particellare o fibroso costituendo così due compositi differenti:

- **Compositi rinforzati con particelle**

Ottenuti con l'aggiunta di particelle alla matrice con lo scopo di riempitivo e/o stabilizzante e per migliorare le caratteristiche elettriche, termiche, magnetiche, di resistenza all'abrasione, all'usura o all'urto. Di solito l'aggiunta delle particelle non comporta un aumento delle proprietà meccaniche della matrice (GASTALDI, et al., 2011);

- **Compositi rinforzati con fibre**

Sono i più utilizzati e le fibre hanno la funzione di conferire maggiore rigidità e resistenza meccanica alla matrice polimerica. Il rinforzo di tipo fibroso può essere caratterizzato da fibre continue, e quindi estendersi per tutta la lunghezza del componente, oppure discontinue, in questo caso possono essere disposte in modo lineare o casuale. Se le fibre presentano una medesima direzione di giacitura, il materiale è caratterizzato da un comportamento puramente anisotropo, ovvero, diverso in base alla direzione della sollecitazione (GASTALDI, et al., 2011).

Focalizzandosi sugli utilizzi della canapa e come la fibra di tale pianta può essere utilizzata grazie alle proprie caratteristiche e proprietà, vengono approfondite due tipologie di compositi di natura differente che ai fini della suddetta tesi è indispensabile trattare.

Questi sono il biocomposito Calce-Canapa e il biopolimero rinforzato con fibra di canapa HBP-Hemp-BioPlastic® brevettato dall'azienda italiana (®KANÈSIS).





## 2.1. IL BIOCOMPOSITO CALCE-CANAPA

Per poter usufruire al meglio delle proprietà fisiche della pianta garantendo le esigenze performative dell'involucro edilizio, il truciolo di canapulo mescolato con argilla o calce è già da secoli largamente impiegato a tale scopo.

L'uso della canapa miscelata con la calce idraulica ha iniziato a diffondersi nell'industria edile sotto forma di prodotti industriali in Francia, intorno ai primi anni '90. Tecnica già però conosciuta 1500 anni prima stando ai ritrovamenti archeologici di un ponte in calce-canapa durante il periodo Merovingio, tra il 500 ed il 751 d.C. (O'Flynn, 2001).

Successivamente le tecniche industriali si sono sviluppate negli Stati Uniti, Canada, Germania e Inghilterra, venendosi a definire un biocomposito dalle proprietà molteplici che ha dato il via a una lunga serie di sperimentazioni per ricavarne il maggior beneficio da tale combinazione (RONCHETTI, 2014).

Il biocomposito calce-canapa ha trovato un grande utilizzo soprattutto nell'architettura sostenibile e ad impatto zero, grazie anche alla facile e veloce installazione e messa in opera. Essendo composto da una parte riciclabile (**calce**) e una biodegradabile (**canapulo**), tale biocomposito se sgretolato e rimpastato con nuova calce e acqua in betoniera, lo si può riutilizzare per murature, sottofondi, e vespai. Tale miscela è in grado di ridurre le emissioni di diossido di carbonio all'interno degli edifici grazie alle proprietà di isolamento termico e di sequestro di CO<sub>2</sub>, rendendo l'ambiente interno molto confortevole e salubre.

Come detto precedentemente [1.1-COLTIVAZIONE E BENEFICI AMBIENTALI], la canapa è una pianta che può essere coltivata praticamente ovunque con le giuste accortezze. Questo aspetto che la rende facilmente reperibile a livello locale, comporta una riduzione dei costi di trasporto e di conseguenza un minor impatto ambientale. Un legame diretto tra industria e agricoltura porterebbe ad una ripresa economica del settore agricolo (in declino nella maggior parte dei paesi sviluppati) come fonte di guadagno e di nuovi posti di lavoro.

Con tali premesse il biocomposito è perfettamente in linea con i tre pilastri dello sviluppo sostenibile: ambientale, economico e sociale (AMODIO, 2015). Valori che hanno risvegliato un nuovo nutrito interesse per tale coltura e volontà di fare ricerca per perfezionare e migliorare a livello performativo il materiale.

Di seguito, in sintesi, le caratteristiche e le proprietà del materiale che verranno approfondite in seguito (RONCHETTI, 2014):

### Caratteristiche generali:

- **Massa volumica a secco (densità)**  
300-1200 kg/m<sup>3</sup> (dipende dall'uso e il metodo di applicazione);
- **Calore specifico**  
1.0-1.5 KJ/Kg·K;
- **Resistenza alla compressione**  
0.2-1.0 N/mm<sup>2</sup> (dipende dalle proporzioni, la compattazione, dall'applicazione e dalla destinazione d'uso) 1.3 e 3.4 MPa per i blocchi.

Immagine di copertina:  
Diversi intonaci in composito di calce-canapa (BioLevel®)

Considerazioni complessive:

- Buon isolamento termoacustico;
- Elevata traspirabilità e buon assorbimento dell'umidità;
- Modesta reazione al fuoco (Classe 2);
- Materia prima rinnovabile;
- Coltivazione sostenibile dal punto di vista ambientale;
- Dispendio energetico basso;
- Facilmente riutilizzabile e riciclabile;
- Compostabile se privo delle fibre di poliestere e con bassa quantità di ignifughi;
- Assenza di rischi per la salute;
- Facile e veloce installazione per pareti, pavimenti, controsoffitti e coperture.

## 2.1.1. ELEMENTI DI COMPOSIZIONE

Il conglomerato di canapa e calce è un materiale biocomposito e come tale è formato da una matrice e da un aggregato miscelati assieme con acqua.

La matrice legante è rappresentata dalla calce aerea, mentre l'aggregato, che funge da materiale riempitivo leggero ( $\approx 110 \text{ Kg/m}^3$ ) (ADDUCI, 2015), è costituito dalla parte legnosa della fibra di canapa (canapulo).

### 2.1.1.1. IL CANPULO

Il canapulo [Figura 8], chiamato "legno di canapa", si ricava come sottoprodotto dalla lavorazione delle fibre della canapa tramite **stigliatura**. Successivamente viene **triturato** e **sminuzzato** in piccole parti e in seguito **depolverizzato** per poter essere commercializzato con diverse granulometrie, ognuna destinata ad un preciso utilizzo (AMODIO, 2015).

- **Fine**  
Lunghezza inferiore minore di 10 mm;
- **Medio**  
Lunghezza compresa tra 10 e 20 mm;
- **Grosso**  
Lunghezza tra i 20 e i 30 mm.

Grazie alla propria natura porosa (60%), il canapulo fornisce alla miscela calce-canapa (BEVAN, et al., 2008) le proprietà termiche e acustiche ricercate. Nei microscopici alveoli, di cui è composto il tessuto del canapulo, avvengono continui processi di microcondensazione ed evaporazione che gli conferiscono un potere di assorbimento dei liquidi circa 12 volte superiore alla paglia, 3.5 volte superiore al truciolo di legno e pari a 5 volte il suo peso. È questo processo a fornire alle miscele di calce-canapa il

proprio particolare comportamento igrometrico.

La presenza in grande quantità di silice all'interno del truciolo vegetale rende ottimale l'impiego come inerte unito alla calce idrata. Infatti, miscelato con quest'ultima, il canapulo reagisce mineralizzandosi passando dallo stato vegetale a quello minerale (carbonizzazione) e acquisendo le caratteristiche di resistenza al fuoco, inappetibilità agli insetti o ai roditori e resistenza alla formazione di muffe e batteri (AMODIO, 2015).



**Figura 8:** Truciolo di canapulo  
Foto: ©Senini

### 2.1.1.2. LA CALCE

La calce da costruzione [Figura 9] è un legante che viene prodotto riscaldando il carbonato di calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) in un forno ad una temperatura di  $900^\circ\text{C}$  e viene impiegato da migliaia di anni nell'industria edile (BARNAT-HUNEK, et al., 2015). Grazie alle uniche proprietà e la grande malleabilità che offre durante la lavorazione, gli usi strutturali in cui si impiegano miscele di calce comprendono: fondazioni, muri, volte e tetti. Inoltre, la calce viene utilizzata anche per finiture (vernici e intonaci) e lavori

decorativi (cornici e stucchi modellati a mano) (RONCHETTI, 2007).

All'interno del composto calce-canapa, il legante a base di calce ha la funzione di tenere uniti i granuli di canapulo una volta cristallizzati. In questo modo il canapulo ha una barriera contro la marcescenza ma non solo, infatti, una volta miscelato con calce e acqua, il canapulo diviene anche ignifugo.

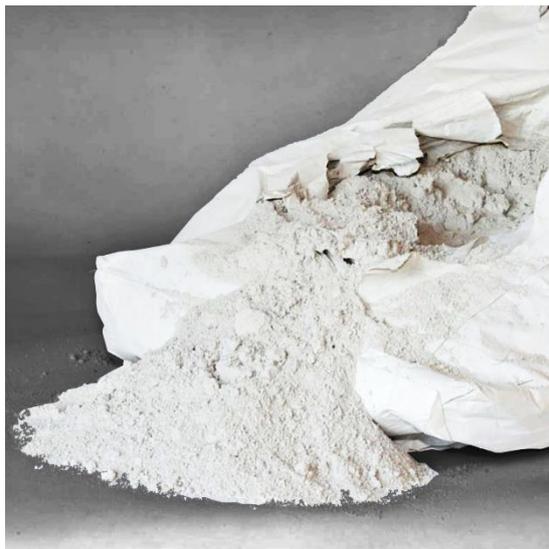
**A lato**  
**Figura 9:** Polvere di calce  
 Foto: ©BioEco-Geo

Per confezionare una miscela con la canapa, non tutti i leganti in commercio sono idonei a tale scopo.

Quelli consoni ad essere gli ingredienti principali della miscela sono:

- **Calce idraulica**
- **Calce idrata**
- **Pozzolonica e altre sabbie vulcaniche**
- **Gesso e mattoni tritati**

Ogni ingrediente ha una propria funzione e le loro proporzioni variano a seconda dell'uso. È fondamentale che tutti i componenti siano naturali e che l'applicazione impieghi dei leganti approvati e forniti con i relativi dati tecnici (AMODIO, 2015).



### 2.1.1.3. L'ACQUA

L'ingrediente fondamentale per la miscela, affinché avvenga la reazione chimica tra il legante e la canapa, è sicuramente l'acqua che determina anche la fluidità e di conseguenza la lavorabilità del materiale. Fattori importanti se si vuole che la miscela si adatti alla superficie sulla quale viene applicata penetrando in ogni angolo ed interstizio e di essere livellato e compattato in modo tale da assicurare una perfetta barriera all'aria una volta asciugato e indurito (AMODIO, 2015).

## 2.1.2. LA MISCELA: PRODUZIONE E USI

La miscelazione della canapa e del legante insieme all'acqua può essere eseguita con una varietà di tipi di miscelatori meccanici a seconda della quantità necessaria, della velocità alla quale è richiesto, del metodo di applicazione e dell'accesso al sito (STANWIX, et al., 2014).

Molte aziende rendono di dominio pubblico le quantità e proporzioni del dosaggio dei componenti in base alla funzione finale della miscela.

La [Tabella 2] seguente mostra in modo sintetico e intuitivo quanto detto precedentemente.

Si può notare come la quantità di acqua e di calce variano per rendere il materiale più consono all'impiego. Per un composto più lavorabile sono preferibili maggiori quantità di calce (intonaci), mentre una minor percentuale di legante permette di alleggerirlo al fine di non sovraccaricare ulteriormente le strutture portanti (coperture) (ALLIN, 2005).

	CANAPULO [Kg]	CALCE [Kg]	ACQUA [Kg]
INTONACI	1	8	5
MURATURE	1	2,2	3,5
SOLAI	1	2,75	5
COPERTURE	1	1	2

In base alle specificità della progettazione e delle destinazioni d'uso, il biocomposito di calce-canapa può essere applicato e prodotto con differenti tecniche. Per una prima suddivisione ci si riferisce al luogo in cui la composizione della miscela avviene, distinguendo, in questo modo, due gruppi (STANWIX, et al., 2014):

- **Cast-in-situ hempcrete**

La produzione ha luogo in cantiere e prevede, di conseguenza, la messa in opera diretta della

miscela;

- **Pre-cast hempcrete**

La miscela viene composta in azienda e trasportata in cantiere sottoforma di prodotti finiti.

### 2.1.2.1. CAST-IN-SITU HEMPCRETE

Con tale termine ci si riferisce alla miscelazione in cantiere dei diversi componenti e la sua successiva applicazione e messa in opera senza che il materiale esca dal sito.

Il biocomposito appena costituito, non avendo valenza portante, viene impiegato come:

- **Riempitivo isolante per muri (interni ed esterni)**
- **Isolante per tetto**
- **Intonaco**
- **Intonaco isolante per muri (interni ed esterni)**
- **Soletta isolante per piano terra o intermedi**
- **Massetto isolante per pavimento**

Per la messa in opera di tali elementi architettonici (esclusa l'intonacatura), si fa uso di casseformi provvisorie in legno che hanno la funzione di contenere il getto, fino ad avvenuta asciugatura, attorno ad una struttura in legno portante [Figura 10], ma anche in acciaio o cemento (STANWIX, et al., 2014).

I muri possono avere uno spessore che varia dai 20 ai 50 cm e non è necessario, se non per protezione da agenti atmosferici, di rivestimenti esterni o intonacature. Per quanto riguarda la pavimentazione, la calce-canapa è un ottimo sostituto al massetto in cemento ed è adatto al riscaldamento a pavimento (WOOLLEY, 2006). Inoltre, il rivestimento può

**A lato**  
**Tabella 2:** Dosaggi di riferimento per una corretta riuscita della miscela in base alla destinazione d'uso (Costruire en Chanvre, 2012)

essere applicato direttamente sul composito senza l'impiego di materiali tossici e sintetici (RONCHETTI, 2014).

#### 2.1.2.1.1. Applicazione manuale

Si tratta della messa in opera del materiale più utilizzata, permette una qualità dell'esecuzione maggiore e di conseguenza, un prodotto finito migliore con tempi di esecuzione maggiori ma costi ridotti (STANWIX, et al., 2014).

Le attrezzature impiegate per miscelare i vari componenti, prima che vengano applicati, possono essere: il miscelatore ad asse planetario o a vite continua oppure la betoniera a bicchiere classico. Quest'ultima, viene adoperata quando non si può disporre di molto spazio di manovra in cantiere, negli altri casi è preferibile il miscelatore in quanto possiede anche una maggiore capacità di carico ed è più conveniente per la lavorazione di materiali eterogenei.

In particolare, per quanto riguarda gli intonaci, il miscelatore a vite continua rimane la migliore scelta perché è in grado di produrre un composto più uniforme.

Prima di procedere con l'unione dei diversi elementi, il canapulo viene prima bagnato con 1/3 dell'acqua totale e successivamente vengono aggiunti in modo razionato i restanti costituenti.

Questa pratica può avvenire in due modi differenti (COLOMBO, et al., 2012):

- **Miscela di acqua e calce con aggiunta successiva del canapulo**
- **Miscela di acqua e canapulo con successiva aggiunta di calce**

La presenza, all'interno della miscela, della giusta quantità di acqua è fondamentale per l'ottenimento di un composto con le giuste caratteristiche.

Fondamentale è che il risultato presenti un prodotto finito umido e non bagnato. Si può garantire tale caratteristica, tenendo sotto controllo il materiale durante la lavorazione, prendendo un piccolo campione e sottoponendolo a compressione.

Se la miscela si espande leggermente vuol dire che ha un ottimo contenuto di acqua in quanto, con una presenza di acqua elevata il campione si presenta compatto mentre in assenza si sgretola.



In centro  
**Figura 10:** Posa a mano di tipo cast-in-situ attorno ad una struttura in legno (STANWIX, et al., 2014)

Questo risultato è possibile applicando delle accortezze come un dosaggio opportuno dell'acqua in base alle condizioni atmosferiche e di temperatura in cui avviene la preparazione.

Inoltre, se le condizioni meteorologiche e il tempo a disposizione lo consentono nel caso in cui venga utilizzata la betoniera, è opportuno svuotare il composto su dei teli plastificati per favorire l'evaporazione dell'acqua (AMODIO, 2015).

Il tempo che deve intercorrere tra l'ottenimento del prodotto finito e l'applicazione varia a seconda della

destinazione d'uso (Equilibrium srl.):

- **entro 2 ore**  
Per muri esterni;
- **entro 3 ore**  
Per tetto, sottotetto e intercapedini.

#### 2.1.2.1.2. Applicazione meccanizzata

Benché l'applicazione "standard" maggiormente preferita è quella a mano, vi sono anche metodi meccanizzati che facilitano e velocizzano il lavoro.

Il metodo più comune è quello "a spruzzo" e la sostanziale differenza è l'assenza di ulteriori attrezzature per miscelare e successivamente applicare il materiale.

Tale vantaggio è dovuto al fatto che l'intero processo non è solamente meccanizzato ma è portato a termine da un unico macchinario ideato appositamente.

La granulometria del canapulo impiegato è leggermente inferiore rispetto all'applicazione a mano per evitare che questo otturi l'ugello della macchina. Grazie all'elevata pressione, con la quale il composto viene diretto su un sostegno a perdere, ci si assicura la perfetta adesione del materiale e la formazione (a più passate) della sezione di muro desiderata. La struttura portante viene solitamente posizionata verso il profilo interno del muro, per essere utilizzata come sostegno ai pannelli di rivestimento interni definitivi.

I vantaggi nell'uso di tale tecnologia si ottengono con progetti di grande metratura, comportando la diminuzione di manodopera specializzata e dei tempi di costruzione (STANWIX, et al., 2014).



### 2.1.2.2. PRE-CAST HEMPCRETE

In alternativa alla produzione della miscela in loco, si possono scegliere una serie di prodotti finiti commercializzati da aziende specializzate. I prodotti disponibili sul mercato vedono il biocomposito di calce-canapa sottoforma di **blocchi** e **pannelli** pronti per essere applicati direttamente.

Nel libro (STANWIX, et al., 2014) gli autori riferiscono che il metodo *“pre-cast hempcrete”* comporta una diminuzione degli apporti migliorativi sul tema ambientale. La prefabbricazione, difatti, implica maggiori passaggi di produzione con un possibile maggior utilizzo di materiali e sostanze poco ecocompatibili. In verità un confronto accurato tra la calce-canapa “fusa” e pre-cast è estremamente difficile a causa di variabili come: la scala della costruzione, i dettagli di progettazione, i materiali impiegati e la distanza tra azienda agricola,

stabilimento di trasformazione, fabbrica e sito.

#### 2.1.2.2.1. Prodotti in commercio

Di prodotti commercializzati composti da calce-canapa ve ne sono principalmente di due tipi: blocchi e pannelli. Questi sono a loro volta declinati in modi differenti col fine di migliorarne la messa in opera e le performance meccaniche e fisiche.

##### 2.1.2.2.1.1. Blocchi

Per ovviare ai lunghi tempi di formatura dei setti murari tramite colatura della miscela, si sono ideati i blocchi in calce-canapa pronti per essere applicati con uno strato di malta di allettamento utile a farli aderire tra di loro. Per favorire le caratteristiche di resistenza, al fine di garantirne la solidità durante le fasi di trasporto e di lavorazione, la miscela con la quale vengono composti presenta una percentuale



**Figura 11:** SSR block® in una costruzione della Columbia Britannica (Canada)  
Foto: ©Harmless Home (NY Times)

maggiore di legante, procurando un deficit nelle capacità di isolamento termico anche se aumenta l'inerzia termica (STANWIX, et al., 2014).

Come detto precedentemente, non avendo valenza strutturale portante, i blocchi vanno uniti ad una struttura portante in legno o altri materiali che assolvono a tale funzione.

Molti blocchi in commercio presentano geometrie complesse per rendere più solidale l'incastro tra blocco e struttura portante (Chanvribloc srl.) o per evitare l'utilizzo della malta di allettamento preferendo la costruzione a secco (es. incastro maschio-femmina) (Banca della Calce).

Per cercare di unire funzione portante e caratteristiche fisiche della calce-canapa e rendere questo prodotto più accessibile ai costruttori (MAGWOOD, 2016), l'azienda canadese Just BioFiber, con sede a Calgary, ha ideato un blocco strutturale in calce-canapa con all'interno un'armatura portante in fibra di vetro o variante in legno. I SSR block® (Structural Sustainable R-value) si incastrano tra loro con la logica maschio-femmina permettendo una veloce e facile messa in opera [Figura 11]. Tali blocchi sono in grado di sopportare una pressione di 26-40 KPa (con struttura in fibra di vetro), garantendo una capacità portante maggiore rispetto alla variante in legno, ma una compatibilità ambientale molto minore a causa della difficoltà di smaltire lo scheletro in fibra di vetro (Just BioFiber srl.).

### 2.1.2.2.1.2. Pannelli

Vi possono essere due tipologie di pannellature che prevedono l'utilizzo del biocomposito (STANWIX, et al., 2014):

- **Pannelli strutturali**

Un esempio sono i prodotti dell'azienda Hem-build® in cui all'interno di un telaio in legno perimetrale viene inserito il composito.

Man mano che i pannelli vengono affiancati l'altro, si viene a costituire insieme al tamponamento anche il telaio strutturale. Sono per lo più adatti a costruzioni di massimo tre piani fuori terra e per edifici scolastici, residenziali e commerciali;

- **Pannelli di tamponamento**

La differenza con la tipologia precedente è che la struttura in legno di tali pannelli non è destinata ad essere strutturale una volta messi in opera, ma necessitano di un'ulteriore struttura portante (legno lamellare, cemento, acciaio) che li sostenga. Un esempio di pannellatura che utilizza tale principio, sono quelli tipo Hemclad®.

Tale tecnologia presenta una velocità di costruzione maggiore dovuta alla fornitura di pannelli in varie dimensioni che facilitano la messa in opera.

D'altro canto, i sistemi di ancoraggio di queste pannellature aumentano la probabilità di incorrere in ponti termici e in una scarsa ermeticità dell'involucro edilizio, fattori negativi che possono essere risolti con l'aggiunta di ulteriori elementi tecnologici.

### 2.1.3. CARATTERISTICHE E PROPRIETÀ

Ogni materiale possiede delle proprietà che dipendono dalla struttura fisica che lo compone. Alcune di queste sono strettamente legate al materiale, o al processo con cui si è prodotto (es. la densità), mentre altre dipendono dal modo in cui vengono misurate. Queste ultime si suddividono in: **meccaniche** (resistenza a trazione, a compressione, modulo elastico ecc.), **fisiche** (conducibilità termica, elettrica, trasparenza ecc.) e **chimiche** (resistenza al degrado ecc.).

Le sole proprietà intrinseche al materiale però non bastano. Infatti, ogni materiale deve soddisfare anche determinate caratteristiche dovute al costo e alla sostenibilità ambientale, come: consumo energetico (in produzione, durante l'utilizzo e in fase di dismissione), consumo di risorse e le emissioni scaturite dal processo durante tutto l'arco di vita del materiale (GASTALDI, et al., 2011).

Il nutrito interesse che sta avendo negli ultimi anni il biocomposito di calce-canapa è dovuto proprio alle caratteristiche fisiche e proprietà ambientali che possiede.

#### 2.1.3.1. PROPRIETÀ FISICHE

Le proprietà che rientrano nella suddetta categoria entrano in gioco quando il materiale viene sottoposto a delle sollecitazioni di tipo “fisico”, come: l'azione della temperatura, dei campi elettrici o magnetici e delle onde sonore o della luce. La conoscenza di tali proprietà permette di garantire e

gestire determinati confort e performance dell'edificio.

##### 2.1.3.1.1. Trasmittanza termica<sup>2</sup>

Nonostante si tratti del metodo meno efficace per comprendere appieno le capacità isolanti del materiale (WOOLLEY, 2006), i valori reperibili in letteratura riguardo tale fattore sono:

- Con un muro spesso 300 mm, il valore-U misurato è di 0.3 W/m<sup>2</sup>K, di 0.22 W/m<sup>2</sup>K per 400 mm e di 0.18 W/m<sup>2</sup>K per 500 mm (Lime Technology, 2006).
- Nel lavoro di tesi (AMODIO, 2015) vengono riportati i valori di ulteriori studi: 0.89 W/m<sup>2</sup>K per una parete di spessore 310 mm con miscela vibrata e compattata (Bütschi et al., 2004), rispetto a 0.37 W/m<sup>2</sup>K per una parete di spessore 300 millimetri e 0.23 W/m<sup>2</sup>K per una parete di spessore 500 mm (BBA, 2010), calcolato secondo la norma BS EN ISO 6946: 2007 e il rapporto BRE\* (BR 443: 2006).

##### 2.1.3.1.1.1. Ponti Termici

La natura omogenea del biocomposito non produce ponti termici lungo i nodi di giunzione tra pareti, pavimentazioni e coperture. Il che lo rende adatto per garantire un perfetto isolamento termico, senza perdita di calore generale con un unico strato di materiale che non necessita di ulteriori intercapedini interne.

<sup>2</sup> La trasmittanza U (UNI EN ISO 6946) si definisce come il flusso di calore che attraversa una superficie unitaria sottoposta a differenza di temperatura pari ad 1 grado Kelvin (o Celsius). Indica cioè quanti W di energia vengono persi da ogni m<sup>2</sup> di parete per ogni grado di variazione tra la temperatura interna e quella esterna. La sua unità di misura è [W/m<sup>2</sup>K] (Equilibrium srl., 2013).

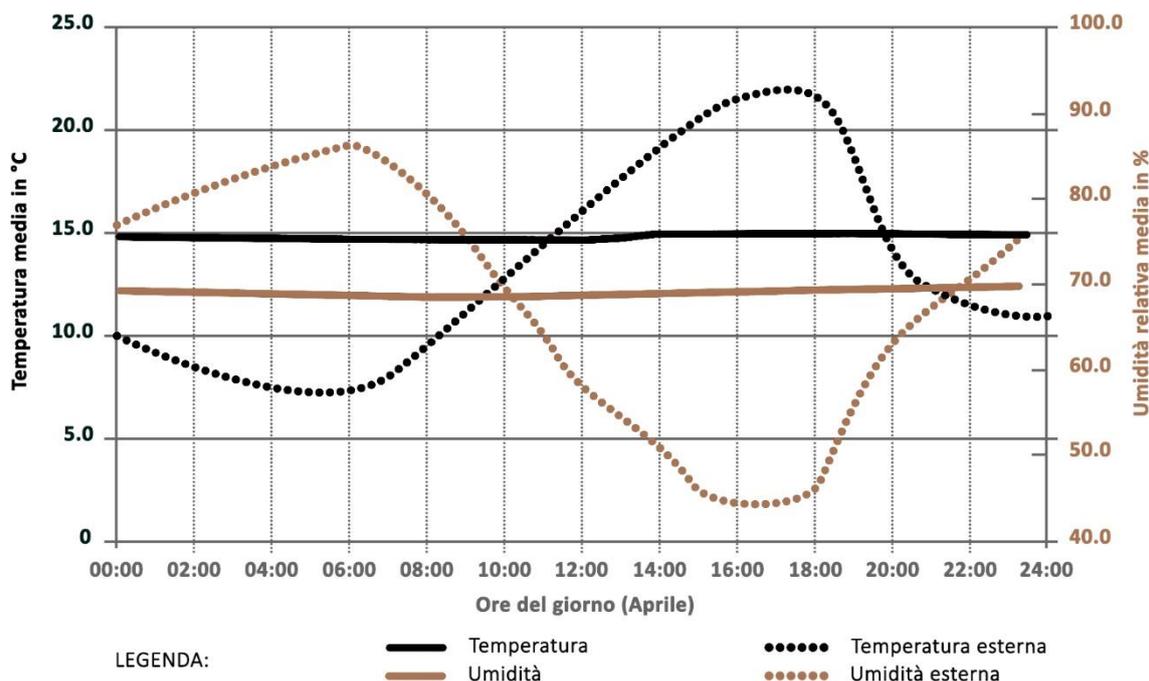


Figura 12: Temperature ed umidità (interne/esterne) (Equilibrium srl., 2013)

Lo studio condotto da (BESRaC, 2007-2013) mostra che la giunzione di un muro di tamponamento in canapa e calce ha il valore più basso ( $\psi$ ) di 0.065 ottenendo una riduzione del 26% nella perdita di calore attraverso la giunzione stessa rispetto a quella realizzata in blocchi di cemento. Inoltre, utilizzando un blocco di calce-canapa rispetto ad uno in cemento, si ottiene una riduzione del 5.7% nella perdita di calore attraverso la giunzione senza la formazione di muffa all'interno del setto dovuta a condensa.

### 2.1.3.1.2. Inerzia termica<sup>3</sup>

La capacità di rilasciare calore dilazionandolo nel tempo, fa del biocomposito un'ottima scelta per garantire come confort interno lo stesso che viene fornito da un muro in pietra e mattoni con spessore di 60 cm (Equilibrium srl., 2013). Infatti, avendo massa dai 200 ai 350 kg/m<sup>3</sup>, i muri e gli isolamenti realizzati si scaldano e raffreddano molto lentamente con

uno sfasamento termico che varia dalle 8 alle 17 ore.

Il biocomposito, esposto al sole, si riscalda molto lentamente limitando il passaggio di calore dall'esterno all'interno.

Di conseguenza, quando all'esterno la temperatura scende, il materiale è in grado di cedere calore bilanciando la differenza di temperatura tra ambiente interno ed esterno [Figura 12].

È molto importante evidenziare come i sistemi isolanti a base di canapa e calce impediscono il passaggio di calore dall'ambiente interno a quello esterno e viceversa, limitando gli sbalzi di temperatura che avvengono durante la giornata o col susseguirsi delle stagioni.

La temperatura interna all'edificio, così come il livello di umidità, vengono mantenute pressoché costanti.

<sup>3</sup> L'inerzia termica R rappresenta la capacità di un corpo di opporre resistenza al passaggio del calore e quindi ad un flusso termico. È definita come il rapporto tra lo spessore e la conduttività termica  $\lambda$  del materiale che la costituisce. L'unità di misura è [m<sup>2</sup>K/W] (Equilibrium srl., 2013).

### 2.1.3.1.3. Confort interno

Il biocomposito ha elevate capacità di assorbimento dell'umidità grazie alle azioni combinate della calce e della canapa.

La prima ha una grande permeabilità al vapore mentre la canapa ha grande igroscopicità dovuta alla particolare fattezza del canapulo descritta in precedenza.

Per questo motivo, pavimenti e pareti costituiti da tale materiale possono “respirare” assorbendo l'umidità e rilasciandola in un secondo momento tramite evaporazione.

Si evitano così, accumuli di umidità eccessivi con la possibile formazione di muffe interne che porterebbero al deterioramento degli elementi costruttivi.

**A lato**  
**Figura 13:** Grafico  
THR e FIGRA  
(SINKA, et al., 22-  
24 Giugno 2015)

In conclusione, si garantisce un ambiente più sano e naturale con una necessità inferiore a climatizzarlo (BESRaC, 2007-2013).

### 2.1.3.1.4. Isolamento acustico

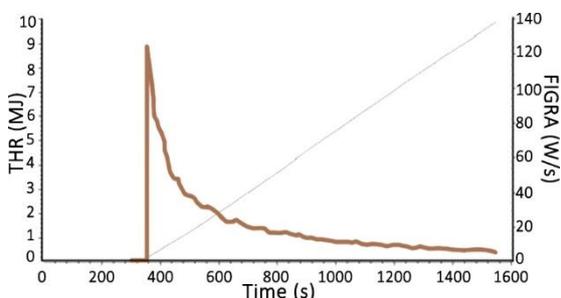
Secondo il report (Building Research Establishment Ltd (BRE), 2002) si sono ottenuti dei risultati di isolamento acustico per i muri in calce-canapa di 57-58 dB inferiori rispetto ai valori che si hanno con setti murari in muratura tradizionale che arrivano a 63-64 dB.

In ogni caso, hanno soddisfatto i requisiti minimi di resistenza acustica (53 dB) dettati dalla normativa allora vigente in Inghilterra.

Per rendere più efficiente il potere fonoassorbente del composito, è necessario lasciare la superficie allo stato grezzo senza intonacarlo (PÉRIER, 2001).

### 2.1.3.1.5. Resistenza al fuoco

Secondo (PÉRIER, 2001) il composito calce-canapa è ignifugo senza la necessità di aggiungere delle sostanze tossiche che permettono di ritardare la fiamma. Dai test condotti dal “Centre Scientifique et Technique du Batiment”, il biocomposito rientra nella classifica francese dei materiali “resistenti alla fiamma” di classe M1, in grado di non rilasciare fumi tossici o infiammabili. Inoltre, tale miscela è stata in grado di resistere a 1800°C per una durata del test di 4 ore.



Lo studio (SINKA, et al., 22-24 Giugno 2015), tramite il test di resistenza al fuoco dalla normativa inglese LVS EN 13823:2010 “Reaction to fire tests for building products”, ha ottenuto come classificazione la classe C-s1-d0. Da tale dicitura possiamo evincere che la miscela ha ottenuto la classe più alta sia nella classifica per l'assenza di fumi (s) che di scintille (d). Per quanto riguarda la classe di resistenza al fuoco, si è ottenuta la classe C a causa di alcune bruciature presenti sulla superficie. Queste si sono però formate solamente nei primi istanti del test senza però continuare a bruciare successivamente. Si afferma, quindi, che la classe B (la più alta per materiali contenenti parti organiche) sarebbe facilmente raggiungibile riducendo leggermente la reazione al fuoco in quanto, dal grafico THR e FIGRA [Figura 13] il valore registrato a 357 s è di 123.2 W/s, poco al di sopra del limite della classe B collocato a 120 W/s.

### 2.1.3.2. PROPRIETÀ CHIMICHE

La risposta del materiale a un determinato ambiente è dovuta alle condizioni chimico-fisiche che li caratterizzano. È importante, quindi, conoscere le condizioni ambientali che possono essere più o meno gravose in base alla natura del materiale. Azioni prodotte da elementi naturali come il sole, l'acqua, il vento, ma anche dovute all'azione di sostanze chimiche o causate da esseri viventi, microrganismi e anche dall'azione diretta o indiretta dell'uomo, possono causare un'accelerazione nel deterioramento del materiale e quindi, un deficit nelle performance per il quale è stato scelto (GASTALDI, et al., 2011).

#### 2.1.3.2.1. Durabilità

Il biocomposito di calce-canapa, come scritto precedentemente, viene utilizzato già da tempo in Francia senza gravi complicazioni dovute ad agenti atmosferici e altre cause. Inoltre, il materiale è considerato resistente alle muffe e agli insetti a causa dell'alcalinità della calce (BEVAN, et al., 2008).

Per questi motivi, molto probabilmente, non sono stati condotti molti studi che approfondissero la resistenza e la durabilità del biocomposito una volta messo in opera.

Per i ricercatori (WALKER, et al., 2014) i fattori che

potrebbero compromettere, in misura maggiore, la conservazione nel tempo del materiale sono: l'azione di gelo-disgelo, l'attacco dei solfati e il deterioramento biologico.

I test meccanici sono stati condotti su provini aventi miscele con composizione differente, riassunti nella [Tabella 3].

#### 2.1.3.2.1.1. Resistenza a gelo-disgelo

Non essendoci delle normative specifiche per testare i calcestruzzi o calce di canapa all'azione di gelo-disgelo, i test sono stati effettuati in accordo con la EN-15304:2010.

Per ottenere dei risultati in condizioni più sfavorevoli possibili, ovvero quando il provino è saturo d'acqua, a 9 mesi i calcestruzzi sono stati immersi nel liquido per 48 ore ottenendo un assorbimento del 90%. Successivamente, sono passati attraverso 15 cicli di gelo-disgelo con ulteriore immersione in acqua ai cicli 4 e 8 per mantenere costante la percentuale di saturazione.

Dopodiché, tutti i provini sono rimasti ad asciugare per 2.5 mesi e testati così dopo un anno esatto dalla loro formatura.

In questo modo, i risultati ottenuti sono stati messi a confronto con quelli ricavati su analoghi provini testati a compressione dopo un anno dalla loro formatura.

NOME	SIGLA	COMPOSIZIONE	RAPPORTI TRA: LEGANTE, CANAPA, ACQUA		
			L	C	A
BUILDER'S MIX	BM	70% calce, 20% NHL3, 10% PC	2	1	3,1
COMMERCIAL MIX	CM	100% legante commerciale	2	1	2,9
GGBS	G	70% calce, 30% GGBS	2	1	3,1
GGBS+WR	G+WR	70% calce, 30% GGBS, 0.5% metilcellulosa	2	1	3,1
METACAOOLINO	M	80% calce, 20% metacaulino	2	1	3,3
METACAOOLINO+WR	M+WR	80% calce, 20% metacaulino, 0.5% metilcellulosa	2	1	3,1

**Tabella 3:** Composizione dei calcestruzzi di canapa (WALKER, et al., 2014)

Risultati

Secondo i risultati reperiti, le tipologie “CM” e “BM” (in misura minore) sono le più resistenti rispetto agli altri calcestruzzi.

Possiamo dedurre che tale incremento è probabilmente dovuto alla maggiore resistenza meccanica dei loro leganti idraulici e al loro minore assorbimento d'acqua (contengono pori più piccoli riempiti di idrati), che può indurre i danni dovuti al gelo-disgelo.

**2.1.3.2.1.2. Resistenza all'esposizione ai sali**

Anche per questa prova non vi sono standard precisi per testare il biocomposito in calce-canapa, il procedimento è iniziato sottoponendo i provini di 9 mesi ad agenti atmosferici salini in una camera salina di tipo “SC1000 Open Lid Salt Fog Chamber”.

Una soluzione di NaCl (cloruro di sodio) al 5% (o 0.86 M) è stata nebulizzata attraverso gli ugelli della camera per 12 ore e per altrettante ore seguenti è avvenuta l'essiccazione. In seguito, i calcestruzzi sono stati sottoposti a 4 settimane di cicli (le prime

due settimane a 20°C e le restanti a 40°C) e lasciati asciugare per i successivi 2 mesi. Sono stati testati quattro campioni di ciascun calcestruzzo al fine di valutarne la resistenza all'esposizione ai sali.

I risultati sono stati confrontati con quelli dei campioni di riferimento a 1 anno per determinare se il deterioramento è dovuto all'azione del sale o alla saturazione dell'acqua durante il test.

Risultati

Dai test condotti non è stato riscontrato alcun danno dovuto alla cristallizzazione dei sali all'interno del calcestruzzo. Questo può essere dovuto sia alla breve esposizione al sale, ma soprattutto, all'alta duttilità del calcestruzzo nell'assorbire gli sforzi imposti dal cloruro di sodio.

Inoltre, riferendosi alla natura organica dei pori dovuti alla presenza della canapa, sono diminuiti i danni causati dall'azione dei sali su quest'ultimi, grazie anche ad una loro minor affinità rispetto ai pori che si formano all'interno di pietra e malta. Nella [Tabella 4] vengono riassunti i valori ottenuti da queste prime due prove.

**2.1.3.2.1.3. Resistenza al deterioramento biologico**

Tutti i calcestruzzi di calce-canapa studiati sono stati inoculati ripetutamente con un'alta concentrazione di microrganismi in coltura da 2 anni.

I microrganismi scelti sono tipici organismi presenti nel suolo e nell'aria tra cui i funghi *Aspergillus* e *Penicillium* e il batterio *Bacillus*.

Il test è avvenuto per i 7 mesi successivi durante i

SIGLA	CEMENTO A 1 ANNO [MPA]	CEMENTO IMBEVUTO [MPA]	GELO-DISGELO [MPA]	ESPOSIZIONE AI SALI [MPA]
BM	0,37	0,39	0,33	0,43
CM	0,36	0,63	0,57	0,81
G	0,41	0,39	0,26	0,37
G+WR	0,39	0,28	0,30	0,37
M	0,34	0,35	0,29	0,40
BM	0,32	0,38	0,38	0,28

**Tabella 4:** Resistenza a compressione dei campioni dovuta alla prova di gelo-disgelo ed esposizione ai sali (WALKER, et al., 2014)

quali i calcestruzzi sono stati conservati in una camera umida a 30°C e a un'umidità relativa dell'80%.

#### Risultati

Come già detto, il calcestruzzo di canapa è ampiamente considerato resistente alle muffe e agli insetti a causa dell'alcalinità della calce (BEVAN, et al., 2008).

Tuttavia, ci sono molti microrganismi che crescono bene in condizioni alcaline. Dopo l'inoculo e nonostante i ripetuti sforzi per mantenerli umidi, già dopo i primi 2 mesi i primi microrganismi sono morti.

Nessuno dei calcestruzzi ha mostrato alcun segno di deterioramento nonostante una pesante inoculazione di microrganismi e inoculazioni ripetute dopo la scomparsa delle popolazioni. Ciò è dovuto all'insufficiente disponibilità di nutrienti per sostenere la crescita e/o condizioni ambientali inadatte.

Tali risultati iniziali suggeriscono che il calcestruzzo di canapa è resistente al biodeterioramento a causa dell'alternanza di periodi di forte umidità e siccità. Condizioni analoghe a quelle che si riscontrano in tutta Europa.

#### **2.1.3.2.2. Protezione da infestazioni**

La canapa non è commestibile da topi e ratti e la calce è poco appetibile. Per questo motivo è stata per secoli utilizzata per mantenere certi livelli di igiene (WOOLLEY, 2006) e in aggiunta, protegge e preserva le fibre naturali da ogni tipo di infestazione (RONCHETTI, 2007).

#### **2.1.3.2.3. Tossicità**

Si tratta di un materiale poco tossico trattandosi di un materiale naturale. La tossicità è dovuta alle polveri prodotte durante la lavorazione e l'utilizzo del biocomposito che possono irritare le vie respiratorie. Invece, durante la demolizione la produzione di polveri è molto più limitata (MUNOZ VELOZA, 2017).

#### **2.1.3.3. BENEFICI AMBIENTALI**

Nel programma di ricerca (BESRaC, 2007-2013) viene chiarito l'impatto ambientale dovuto al composito e ai propri due costituenti.

L'elemento che comporta delle conseguenze negative maggiori sull'ambiente è la calce o meglio il calcare che costituisce la materia prima. Il calcare è una risorsa non rinnovabile che procura nei luoghi in cui viene estratto (cave a cielo aperto) un aumento del rumore locale, inquinamento, erosione e polveri. Inoltre, la lavorazione della calce è un'operazione che consuma energia in quanto il calcare viene bruciato in forni alimentati a combustibili fossili a una temperatura di 900-1100°C.

Per quanto riguarda la coltivazione della canapa, si tratta di una coltura che richiede bassi input aggiuntivi, ovvero bassi livelli di fertilizzanti e lavoro meccanizzato con conseguenti minori emissioni dovuti al trasporto.

La lavorazione della canapa è un'operazione a basso impatto:

- **È basata sull'energia meccanica**
- **Non richiede prodotti chimici**
- **Crea bassi prodotti di scarto**
- **Non emette sostanze inquinanti**

Gli unici rifiuti prodotti dalla lavorazione della

canapa sono le polveri che possono essere pressate in mattoni e utilizzate come biocarburanti.

Qui di seguito, vengono messi in evidenza i fattori ambientali positivi che fanno di tale materiale un'ottima scelta per il settore dell'edilizia.

#### **2.1.3.3.1. Embodied energy**

Per conoscere la quantità di energia che viene impiegata per la produzione del biocomposito, detta "*embodied energy*", è opportuno considerare i due componenti e i rispettivi filoni di produzione in modo separato.

La produzione di canapa, avente un 60% di canapulo e 40% di fibra, comporta un impiego di energia pari a 2.1-3.8 MJ/Kg. Invece, per quanto riguarda la calce calcinata (ossido di calcio) il valore è di 4.5 MJ/Kg per la sua produzione, mentre per la calce idrata e idraulica è di 5.3 MJ/Kg.

Tuttavia, va notato che l'analisi energetica incorporata dei materiali in costruzione si basa sulla densità e sulla quantità del materiale per volume e non solo sulla base del peso (BESRaC, 2007-2013).

#### **2.1.3.3.2. Sequestro del carbonio (CO<sub>2</sub>)**

Nel lavoro di tesi magistrale (MUNOZ VELOZA, 2017) viene riportato in accordo con Pervais (2003) che oltre ad assorbire diossido di carbonio durante la crescita, anche una tonnellata di canapa secca è in grado di assorbirne fino a 325 Kg.

Tramite lo studio condotto nel 2006 da Lime

Technology si è registrato un sequestro di 110 Kg di CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> nell'edificio in questione, quando il biocomposito viene applicato tramite spruzzatura. Invece, nel caso in cui venga gettato in opera all'interno delle casseformi, il sequestro di carbonio sale a 165 Kg di CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> (Lime Technology, 2006).

Un altro studio del 2007, riportato in (BESRaC, 2007-2013), dichiara che 31 Kg di CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> vengono conservati in un muro di biocomposito avente spessore di 30 cm, salendo fino a 53 Kg/m<sup>2</sup> se lo spessore del muro è di 50 cm.

Tali risultati tengono già conto della CO<sub>2</sub> emessa durante la produzione del biocomposito. Per questo motivo, si può affermare che l'utilizzo in edilizia della calce-canapa è potenzialmente ad emissioni negative di carbonio, prevenendo anche una riduzione del fabbisogno di riscaldamento dell'edificio una volta che questo viene completato.

#### **2.1.3.3.3. Riciclabilità e riuso**

L'impasto di calce-canapa può essere riutilizzato schiacciandolo e rimescolandolo con nuova acqua e calce. Tale procedimento può essere attuato per ogni campo di applicazione del composito: dai setti murari (monolitici, in mattoni o blocchi) alle pavimentazioni varie.

Il materiale può essere potenzialmente utilizzato per altre attività di riciclaggio come: il compostaggio, il rinterro o lo schiacciamento e la diffusione su aiuole o campi per aumentare il ph del terreno e introdurre un pacciame (Lime Technology, 2006).

## 2.1.4. LE PROPRIETÀ MECCANICHE

Come esplicitato precedentemente, l'HLC<sup>4</sup> viene impiegato soprattutto per la costruzione di pareti monolitiche o pavimentazioni, al fine di migliorare il confort degli ambienti interni.

Malgrado sia stata comprovata la buona rigidezza del biocomposito che gli permette di resistere alla compressione, ma non abbastanza da garantirne un valore strutturale portante accettabile (STANWIX, et al., 2014), diversi ricercatori hanno avviato delle sperimentazioni per unire le alte performance del materiale con una possibile capacità portante che eviti l'uso di ulteriori strutture.

### 2.1.4.1. STUDI SULLA RESISTENZA A COMPRESSIONE DEL HLC

Ancora nessuno studio è riuscito a raggiungere dei risultati soddisfacenti, ma grazie a tali sperimentazioni si è potuto approfondire ulteriormente sulle relazioni che legano le proprietà meccaniche del materiale e i costituenti che lo compongono.

#### 2.1.4.1.1. Influenza dell'acqua sulle proprietà meccaniche

Una delle principali cause che portano alla diminuzione delle proprietà meccaniche è la presenza eccessiva di acqua all'interno della miscela (DUBOIS, et al., 2016).

Tale problematica si riscontra soprattutto nel caso in cui si utilizzi la malta di cava all'interno della miscela, in quanto richiede molta più acqua al fine di riempire lo stampo in modo efficace durante la

posa. Questa stessa acqua però, durante la fase di essiccazione, procura il degradamento della fibra naturale e la comparsa di muffe e un conseguente deficit delle prestazioni meccaniche.

A tale problema si è ovviato con l'utilizzo di un superfluidificante all'interno di un composito di malta di cava e canapa, migliorandone anche la resistenza a flessione e la disposizione delle fibre all'interno del composito. La resistenza a compressione però non ne ha giovato, limitandone l'utilizzo per mura non portanti. Inoltre, è preferibile l'utilizzo della calce alla malta proprio per evitare il degradamento della fibra naturale a causa dell'umidità che tende ad immagazzinarsi.

#### 2.1.4.1.2. Conseguenze dovute alla granulometria del canapulo

Nello studio (SINKA, et al., 22-24 Giugno 2015) sono state condotte delle prove meccaniche su provini che si differenziano tra loro dal tipo di "shives" (canapulo) utilizzato come aggregato.

Sono stati confezionati 8 tipologie differenti di canapulo di dimensioni differenti unito a un "binder" (legante) così composto:

- 60% calce dolomitica;
- 40% metacaolino ( $2Al_2O_3 \cdot SiO_2$  ottenuto con l'attivazione termica di argilla caolinite).

Dai risultati ottenuti dai test, si è potuto evincere che la dimensione del canapulo influenza le performance termiche e meccaniche del biocomposito.

<sup>4</sup> Acronimo del termine inglese Hemp-Lime Concrete utilizzato per riferirsi al biocomposito di calce-canapa.

Più la fibra ha dimensioni maggiori, inferiori sono le capacità strutturali in quanto provocano vuoti e irregolarità all'interno del provino ottenuto. Queste fattezze provocano una deformazione più rapida e una resistenza a compressione inferiore.

Il risultato più alto che è stato ottenuto è di 0.337 MPa di resistenza a compressione con una densità del composito di 361.90 Kg/m<sup>3</sup> ottenuto mediante l'utilizzo di canapulo avente la granulometria compresa tra 0.63 e 10 mm.

#### **2.1.4.1.3. Considerazioni sulla quantità di canapulo all'interno della miscela**

La sola granulometria del canapulo non è l'unica causa di una diminuzione delle proprietà meccaniche del biocomposito. Lo studio condotto da (BENFRATELLO, et al., 2013) ha evidenziato che: all'aumentare della presenza di canapa all'interno del composito, le proprietà meccaniche compreso il modulo elastico (Young) diminuiscono e viceversa. Per quest'ultimo il 20% di canapulo è la quantità ideale per avere maggiori risultati.

Il massimo risultato di resistenza a compressione registrato è stato di 0.462 MPa con una deformazione del 2.34%. Di fondamentale importanza sono anche il livello di compattazione che riusciamo ad ottenere e anche il grado di essiccazione raggiunto (solitamente dopo 28 gg si hanno un miglioramento delle caratteristiche meccaniche del provino).

#### **2.1.4.1.4. Benefici dovuti all'utilizzo dell'Etilene-vinil-acetato**

I provini testati da (BARNAT-HUNEK, et al., 2015) sono composti da: calce, canapulo, perlite, cemento Portland, acqua, metacaolino, etilene-vinil-acetato (copolimero come un additivo plastificante e rinforzante) nella quantità dello 0.5% in relazione al peso dell'acqua. I risultati reperiti dalle prove in laboratorio hanno mostrato che le capacità meccaniche vengono a meno se aumenta la presenza di canapa all'interno del composito, mentre aumentano le capacità di isolamento termico.

Una soluzione a tal proposito è quella rappresentata dall'utilizzo dell'etilene-vinil-acetato, il quale riesce ad aumentare la resistenza a compressione del provino C4 attorno a 0.4 MPa con una presenza maggiore di fibre rispetto al provino C6 con maggiori capacità meccaniche (intorno a 0.57 MPa) ma avente una componente maggiore di cemento, calce e perlite.

#### **2.1.4.1.5. Una compattazione maggiore per aumentare la resistenza a compressione**

(TRONET, et al., 2016) dimostra che con un'elevata pressione di compattazione aumenta la resistenza alla compressione compensando una riduzione del legante. Di conseguenza, viene proposta una nuova formula per prevedere la forza di LHC che dipende da entrambi i contenuti di legante e il canapulo.

Gli aspetti che portano questo materiale a non avere grandi capacità di resistenza a compressione sono dovuti alla flessibilità delle fibre di canapa e la loro disposizione imperfetta (BOULOC, et al., 2006).

Si prendono in considerazione dalla letteratura queste due sperimentazioni:

- **Il primo metodo**

Fa uso di un additivo (es. Nozahic e Amziane) con i quali si tratta la superficie degli aggregati di girasole per migliorare i legami fibra-matrice. (KHANMA, et al., 2008) hanno usato il saccarosio per trattare il lino con rivestimento in cemento. Questo metodo dà risultati promettenti, ma richiede un'ulteriore fase di elaborazione e additivi da aggiungere.

- **Il secondo metodo**

È controllare la compattazione della miscela fresca durante la fusione. (NGUYEN, et al., 2009) ha dimostrato che la compattazione di materiale fresco può aumentare significativamente la resistenza alla compressione del calcestruzzo di canapa riducendo il volume di vuoti all'interno del materiale (densità  $850 \text{ Kg/m}^3$ ;  $\sigma_{7.5\%}$  57 MPa).

Dall'esperienza di (TRONET, et al., 2016) sono state formulate tali conclusioni:

- **Senza compattazione**

Lo sforzo di snervamento raggiunge a malapena 0.5 MPa a meno che non venga utilizzata una quantità eccessiva di legante;

- **Con una pressione di compattazione manuale**

Una diminuzione del rapporto tra legante e canapulo riduce rapidamente la resistenza allo stato indurito;

- **Per lo stesso stato di compattazione**

Aumentare la proporzione del legante migliora la forza;

- **Per lo stesso rapporto tra legante e canapulo (in massa)**

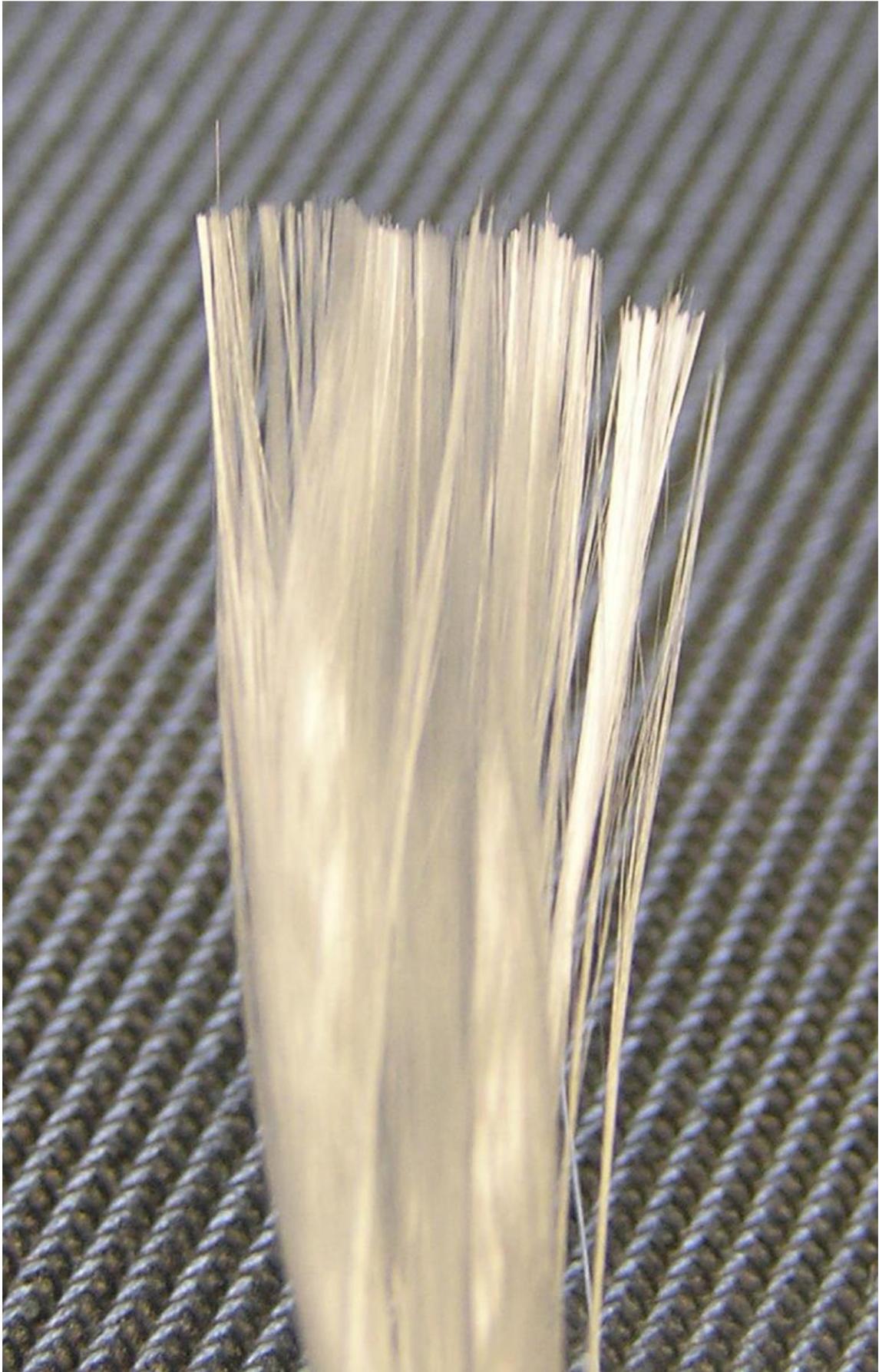
Lo stato di compattazione è il fattore dominante per migliorarne la forza;

- **Per raggiungere una resistenza di 10 MPa**

È necessario un contenuto di legante molto alto (fino a  $700 \text{ Kg/m}^3$ ) o un alto livello di compattazione (coefficiente fino a 4.5).

Inoltre:

- Per raggiungere livelli di forza nello stato indurito paragonabile a quelli di cemento o mattoni di argilla, deve essere utilizzato uno stampo per raggiungere il livello di compattazione richiesto;
- La compattazione di un blocco è un buon mezzo per migliorarne la forza quando aumenta in proporzione la quantità di canapulo;
- Il canapulo contribuisce a migliorarne la forza con la riduzione del volume delle particelle durante il processo di fusione;
- La rigidità, che dipende dal grado di compattazione, è ridotta se vi è un elevato contenuto di canapulo, in quanto le pareti della particella di canapulo sono di un ordine più flessibile delle particelle del legante.



## 2.2. COMPOSITI A MATRICE POLIMERICA

A causa della non possibilità di utilizzare il composito calce-canapa a fini strutturali portanti per progettare il prototipo di padiglione espositivo, l'attenzione è stata rivolta a quella tipologia di compositi a matrice polimerica.

Prima di entrare nel merito della bioplastica, impiegata e studiata all'interno di questa tesi, è opportuno introdurre in linea generale i due componenti di un materiale composito di tipo polimerico fibrorinforzato. Ci si sofferma sulle varianti "naturali", sia per quanto riguarda i materiali polimerici che per le fibre di rinforzo, in particolare quelle della pianta di canapa già introdotto precedentemente nel [capitolo 2.1.1.1-IL CANAPULO].

Nel libro (GASTALDI, et al., 2011) viene riportato che i materiali polimerici rinforzati con fibre continue "*Fiber Reinforced Polymers*" (F.R.P.) vengono molto utilizzati soprattutto per fini strutturali.

Tali materiali vengono progettati "ad hoc" in base alle applicazioni a cui sono destinati. Infatti,

l'inserimento di fibre resistenti e rigide, ma fragili, in una matrice polimerica più duttile, è un'applicazione molto complessa. Di conseguenza, non sempre è così semplice prevedere come i due componenti, una volta uniti, agiscono insieme.

Le proprietà di un composito non dipendono solo dalle proprietà singole dei componenti che lo costituiscono, ma sono influenzate da molti altri fattori quali: il contenuto, le dimensioni, la forma, la distribuzione, l'orientamento delle fibre e l'adesione di queste alla matrice.

In edilizia i F.R.P. fanno la loro comparsa intorno agli anni '80 del '900, sfruttando l'esperienza maturata in altri ambiti come nelle applicazioni aerospaziali.

I progettisti iniziano a ideare e realizzare, a scopo sperimentale ponti, passerelle etc., mossi soprattutto dal basso costo di produzione.

Gli F.R.P. trovano grande applicazione in ambito di rinforzo e ripristino di strutture esistenti, dovuti in seguito a degrado o sisma.

**Immagine di copertina:**

Fibra di vetro molto volte utilizzata immersa in matrici polimeriche  
*Origine file: Glasfaser Roving.jpg*  
 - <https://it.wikipedia.org>

## 2.2.1. COMPONENTI

Le due parti che costituiscono il composito sono:

- **Le fibre**  
Rappresentano l'elemento di rinforzo;
- **La materia plastica (matrice)**  
Ha la funzione di inglobare le fibre proteggendole e conferendo continuità al materiale in modo tale da trasferirne le sollecitazioni.

### 2.2.1.1. MATERIE PLASTICHE

Le materie plastiche o "*materie polimeriche*", sono costituite da macromolecole, formate dalla ripetizione di più piccoli gruppi molecolari. Se questi gruppi sono costituiti da concatenazioni di molecole tutte simili tra loro, allora si definisce "*monomero*", se sono invece differenti il termine usato è "*copolimero*" (CRISTALDI, et al., 2008-2011).

Le matrici polimeriche possono essere classificate in funzione di diversi criteri (jr. CALLISTER, 2002):

- **Natura delle materie prime**  
naturali, sintetiche, semisintetiche;
- **Natura delle unità fondamentali**  
omo- o copolimeri;
- **Meccanismo di polimerizzazione**  
addizione, condensazione;
- **Peso molecolare**
- **Tatticità**  
isotattiche, atattiche, sindiotattiche;
- **Organizzazione strutturale**  
amorfe, cristalline, semicristalline;
- **Temperatura di transizione vetrosa**  
polimeri gommosi, vetrosi;
- **Comportamento al calore**  
termoplastici, termoindurenti ed elastomeri.

Solitamente secondo l'ultimo criterio è il sistema col quale vengono più facilmente raggruppate le materie plastiche. In breve, citando (AMERIO, et al., 2009):

- **Resine termoplastiche**  
Possono essere modellate sotto l'azione del calore e mantenere la forma e la rigidità acquisite anche dopo il raffreddamento; in seguito a un nuovo riscaldamento esse rammoliscono e possono essere rimodellate;
- **Resine termoindurenti**  
Possono essere plasmate nella forma e con la rigidità volute, ma una volta raffreddate, subiscono una reazione chimica irreversibile, perdendo la possibilità di essere nuovamente rimodellate;
- **Elastomeri (gomme)**  
Possono appartenere alla classe dei termoplastici o dei termoindurenti ma sono caratterizzati dalla possibilità di subire forti deformazioni anche sotto piccoli sforzi, riacquistando spontaneamente la forma originaria al cessare delle sollecitazioni.

#### 2.2.1.1.1. I polimeri

Le materie plastiche, come detto precedentemente, sono formate da catene di polimeri. Questi a loro volta possono essere di due tipi (AMERIO, et al., 2009):

- **Polimeri di sintesi (o resine sintetiche)**  
Sono quelli più utilizzati e si ottengono mediante processi di sintesi, partendo da composti organici molto semplici ricavati dal petrolio o dal carbon fossile;

• **Polimeri naturali**

Sono quelli già presenti in natura tra i quali i più noti sono: la cellulosa, il caucciù e l'osseinina.

Al fine del suddetto lavoro di ricerca, si presta maggiore attenzione alla matrice del filamento che viene utilizzato e studiato, ovvero l'“Acido Polilattico” (PLA) appartenente alla famiglia dei polimeri eco-compatibili.

**2.2.1.1.1. Polimeri eco-compatibili**

Già dagli '80 del '900 si è dato inizio alla ricerca sui biopolimeri (GASTALDI, et al., 2011) per trovare delle alternative alle plastiche sintetiche, molto più inquinanti dal punto di vista produttivo ma anche una volta che il loro utilizzo è concluso.

Attualmente, la crescente consapevolezza a proposito delle questioni ambientali, sta portando diversi cambiamenti soprattutto sull'utilizzo di materiali

biodegradabili e che possano essere riutilizzati o smaltiti senza incidere sull'ambiente.

Nella [Figura 14] sono riportate in modo schematico tutti gli attuali polimeri biodegradabili che vengono prodotti da fonti alternative. Questi sono suddivisi in base alla natura del materiale di provenienza e come si può notare, alcuni tra questi sono ugualmente biodegradabili anche se ottenuti da materie prime non rinnovabili (es. petrolio). Altri, invece, vengono ricavati da microorganismi, biomassa e tramite l'utilizzo della biotecnologia.

Appartenenti a questi gruppi di matrici termoplastiche, compaiono ad esempio: i poli “*α*-idrossiacidi”, i poli “*acido-glicolico*” (PGA) o i poli “*acido-lattico*” (PLA), i quali sono polimeri cristallini con punti di fusione relativamente alti. Tra questi figura il PLA, il quale ha ricevuto grandi attenzioni dovute alla sua grande disponibilità da fonti rinnovabili come il mais (CRISTALDI, et al., 2008-2011).

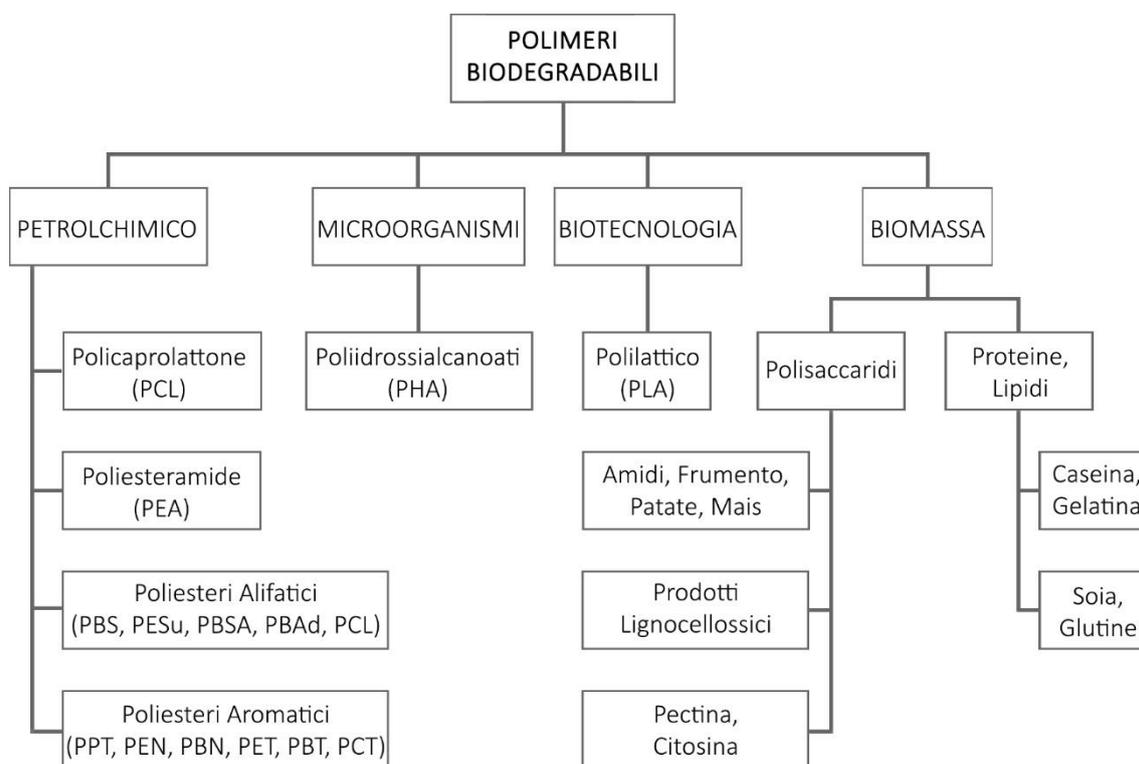


Figura 14: Matrici polimeriche biodegradabili (CRISTALDI, et al., 2008-2011)

### 2.2.1.2. LE FIBRE DI RINFORZO

L'utilizzo di un materiale sottoforma di fibre permette di ottenere una resistenza meccanica maggiore; soprattutto nel caso della resistenza a trazione la quale aumenta al diminuire del diametro della fibra stessa.

I principali fattori che influenzano le proprietà meccaniche del composito sono (GASTALDI, et al., 2011):

- **Lunghezza e diametro della fibra**

La lunghezza può variare da frazioni di millimetro ad alcuni centimetri, mentre il diametro da pochi a qualche decina di  $\mu\text{m}$  (micrometro).

Essendo che, l'efficacia dell'interfaccia tra fibre e matrice permette il trasferimento delle sollecitazioni, più le fibre sono lunghe e più tale condizione viene favorita. Unica nota negativa risiede nella difficoltà di lavorazione del composito se le fibre sono troppo lunghe;

- **Percentuale di contenuto**

Si è riscontrato che le proprietà meccaniche aumentano fino ad un 80% di presenza di fibre all'interno del composito. Al di sopra di tale valore, la matrice non è più in grado di inglobare

completamente tutte le fibre;

- **Orientamento**

Le fibre garantiscono la resistenza massima lungo la loro lunghezza. Nel caso delle fibre continue, se queste hanno un orientamento ben definito o preferenziale, danno luogo a compositi con comportamento anisotropo. Per ovviare a tale problema è indispensabile realizzare compositi con strati aventi orientamento differente delle fibre. Nel caso invece delle fibre corte, essendo orientate casualmente all'interno della matrice, forniscono un comportamento isotropo al composito.

Vi sono due tipologie di fibre che si possono impiegare per andare a costituire il composito: quelle **sinthetiche** e quelle **naturali**. Le prime sono ricavate da materie non rinnovabili e producono un inquinamento ambientale maggiore dovuto sia alla propria produzione che allo smaltimento. Le più utilizzate al momento sono: la fibra di vetro, di carbonio e aramidiche (GASTALDI, et al., 2011).

Nella [Tabella 5] sono riportate le principali fibre, impiegate sul mercato, appartenenti ad entrambe le "famiglie".

FIBRE	DENSITÀ (G/Cm <sup>3</sup> )	ALLUNGAMENTO (%)	RESISTENZA A TRAZIONE (MPa)	MODULO DI YOUNG (GPa)
COTONE	1,5-1,6	7,0-8,0	287-597	5,5-12,6
JUTA	1,3	1,5-1,8	393-773	26,5
LINO	1,5	2,7-3,2	345-1035	27,6
CANAPA	-	1,6	690	-
RAMIÈ	-	3,6-3,8	400-938	61,4-128
SISAL	1,5	2,0-2,5	511-635	9,4-22,0
COCCO	1,2	30,0	175	4,0-6,0
VISCOSA (CORDA)	-	11,4	593	11,0
KRAFT DI LEGNO TENERO	1,5	-	1000	40,0
E-GLASS	2,5	2,5	2000-3500	70,0
S-GLASS	2,5	2,8	4570	86,0
ARAMIDE	1,4	3,3-3,7	3000-3150	63,0-67,0
CARBONIO	1,4	1,4-1,8	4000	230,0-240,0

Tabella 5: Proprietà meccaniche delle fibre naturali rispetto alle fibre rinforzate convenzionali (BLEDZKI, et al., 1999)

### 2.2.1.2.1. Le fibre naturali di origine vegetale

Con l'interesse verso l'ambiente e le nuove specifiche legislazioni per la salvaguardia ambientale, hanno portato i ricercatori a rivolgere i propri studi verso lo sviluppo di materiali alternativi provenienti da fonti rinnovabili e facilmente recuperabili o degradabili a fine uso (CRISTALDI, et al., 2008-2011). Attualmente si sta cercando di sostituire nei compositi più utilizzati (a base di resine epossidiche e poliolefine), le fibre sintetiche con le fibre naturali: in grado di soddisfare maggiormente le nuove condizioni.

Le fibre naturali si suddividono ulteriormente in due gruppi (BLEDZKI, et al., 1999):

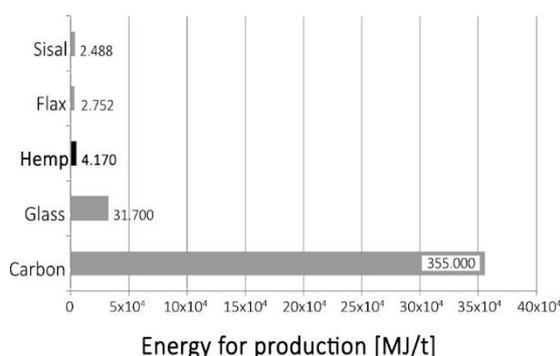
- **Fibre naturali di origine animale**
- **Fibre naturali di origine vegetale**

Le fibre più utilizzate e diffuse, tra le due tipologie, sono quelle di tipo vegetale, in quanto più facilmente reperibili e rinnovabili rispetto alle altre. Tuttavia, in passato le bio-fibre non sono state prese in considerazione come rinforzi per polimeri, a causa di alcune problematiche dovute alla loro natura e utilizzo (CRISTALDI, et al., 2010):

- **Bassa stabilità termica**  
comporta la degradazione della fibra e l'emissione di prodotti volatili a contatto con i polimeri ad alta temperatura durante la produzione;
- **Natura idrofila**  
può portare a modifiche dimensionali (rigonfiamenti) e procurare delle irregolarità nell'interfaccia con la matrice polimerica e coesione tra le fibre stesse;
- **La variabilità delle proprietà e quantità**  
dovute alla qualità del raccolto, età e

caratteristiche della pianta, la tecnica di estrazione, condizioni ambientali, località, ecc.

Tali fattori hanno reso meno attrattive le bio-fibre rispetto alle fibre sintetiche, le quali hanno un'effettiva capacità meccanica ma a scapito di un'ammontare superiore di energia impiegata per la loro produzione. Energia in minima parte recuperata attraverso l'incenerimento delle fibre del composito a fine uso.



**Figura 15:** Energia impiegata per la produzione di alcune fibre naturali e sintetiche (SachsenLeinen, 1999)

Nella [Figura 15] è messa a confronto l'energia impiegata per la produzione delle principali fibre naturali e sintetiche (in ordine dall'alto verso il basso: sisal, lino, canapa, vetro e carbone).

Come si può notare dal grafico, le fibre naturali hanno dei valori molto più bassi di Embodied Energy [MJ/t], fattore che unito ai numerosi ulteriori vantaggi fa delle fibre naturali una scelta praticabile come materiale di rinforzo nei compositi (KALIA, et al., 2009).

Di seguito, sono riportati i vantaggi positivi delle fibre naturali (CRISTALDI, et al., 2008-2011):

- Costi inferiori;
- Reperibili in grandi quantità;
- Causano meno problemi respiratori e dermatologici per gli addetti alla lavorazione;
- Sono biodegradabili e biocompatibili,

- combustibili e riciclabili con varie matrici;
- Il bilancio tra CO<sub>2</sub> catturata in fase di crescita ed emessa in fase di combustione è nullo;
- Sono meno abrasive per le apparecchiature di lavorazione;
- Hanno una densità minore (rispetto alle fibre di vetro e alle aramidiche) o uguali (rispetto al carbonio) delle fibre convenzionali;
- Grazie alla loro natura cellulare e cava, incrementano l'isolamento acustico e termico dei compositi.

### 2.2.1.2.1.1. La fibra di canapa

Come è stato già affermato, la canapa è composta dalla fibra e dalla parte legnosa detta canapulo. Mentre il canapulo, precedentemente trattato nell'omonimo capitolo [2.1.1.1-IL CANAPULO], viene impiegato in edilizia insieme alla calce, in questo caso la fibra viene utilizzata anche come rinforzo nelle matrici polimeriche.

In [Tabella 6] è riportata la composizione delle fibre di canapa in accordo con (LAMPKE, 2001).

Come descritto in (BISMARCK, et al., 2002), la microstruttura delle fibre è estremamente complicata, di fatti, comprende diverse microstrutture gerarchiche [Figura 16].

**A lato**  
**Tabella 6:** Composizione chimica della fibra di canapa (LAMPKE, 2001)

Ciascuna fibra “*cellula allungata*”, oltre ad essere caratterizzata da un foro centrale detto “*lumen*” che le conferisce la caratteristica leggerezza e traspirabilità, possiede una “*parete primaria*” sottile circondata da una “*parete secondaria*” costituita a sua volta da tre strati:

- **La parete cellulare primaria**

È costituita da pectina che può essere irrigidita e disidratata dall'aggiunta di lignina. Diventa quindi parte del sistema adesivo che tiene insieme le cellule;

- **Nella parete cellulare secondaria**

Le molecole di cellulosa sono sintetizzate da enzimi che galleggiano nella membrana cellulare, facendo roteare le fibrille primarie di circa 5 nm di diametro ciascuna contenente circa 40 molecole.

Mentre le fibrille primarie sono assemblate in microfibrille di circa 20-40 nm di diametro che

COMPONENTI	CANAPA [%]
CELLULOSA	~67
EMICELLULOSA	~16
PECTINA	0,8
LIGNINA	3,3
PROTEINE, CENERE E MINERALI	2,1
GRASSI E CERE	0,7
ACQUA	10

presentano emicellulosa che decora l'esterno, le emicellulose fungono da connessione tra le microfibrille creando la "rete strutturale primaria".

La lignina può essere depositata all'interno di questa rete in due modi:

- **Come grumi isolati**

Quando agisce per limitare il movimento delle microfibre, aumentando così la rigidità per impedimento sterico;

- **Come matrice continua "in seguito"**

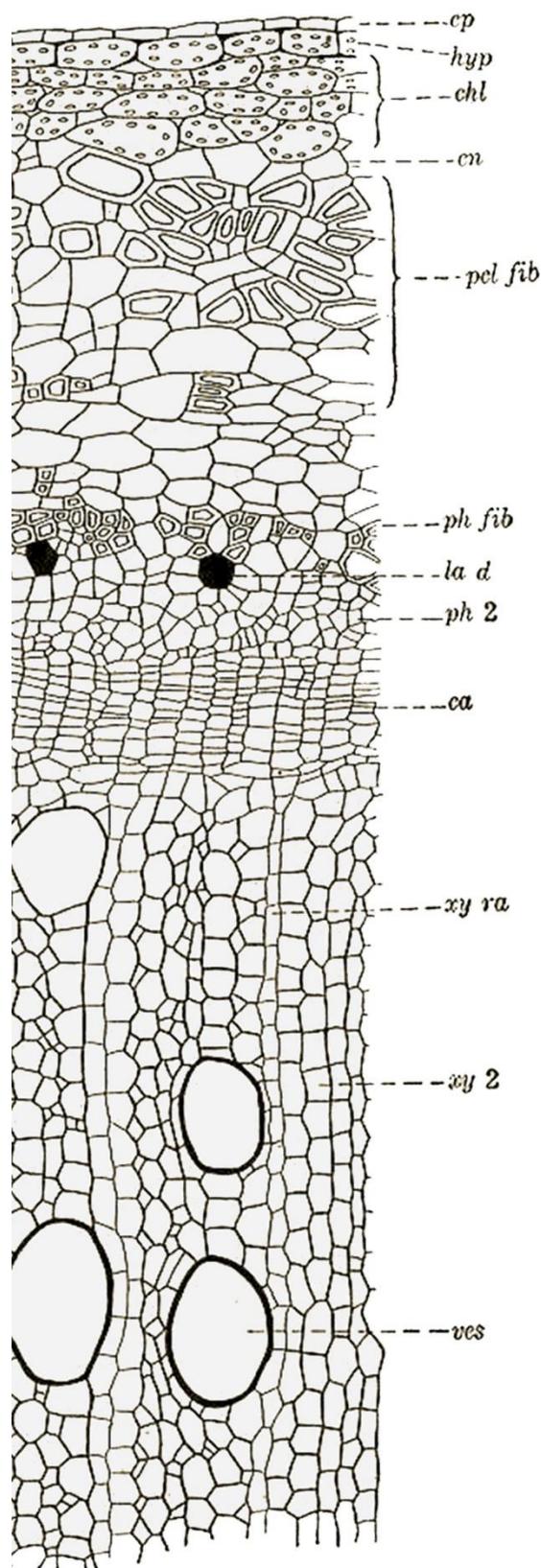
Integra e presumibilmente sostituisce l'emicellulosa in importanza come connettore delle microfibrille di cellulosa.

Per far sì che le fibre di canapa vengano utilizzate in diverse applicazioni, bisogna che queste debbano essere lavorate al fine di garantirne:

- Omogeneità delle proprietà
- Grado di elementarizzazione e degumificazione
- Grado di polimerizzazione e cristallizzazione
- Buona adesione tra fibra e matrice
- Idrorepellenza
- Proprietà ignifughe

Queste proprietà possono essere parzialmente influenzate dalle diverse procedure di separazione e di trattamento delle fibre, ma anche da altri fattori agronomici quali l'epoca di raccolta, la densità di investimento e la scelta varietale.

Rimane fondamentale conoscere tutti questi dati in modo tale da controllare la qualità della materia prima, soprattutto per fini sperimentali e di ricerca (CRISTALDI, et al., 2008-2011).



SPIEGAZIONE DELLE ABBREVIAZIONI:

ca, cambio; chl, clorenchima; en, endoderma; ep, epidermide; hyp, ipodermide; la d, condotto in lattice; pcl fib, fibre pericliche; ph fib, fibre del floema; ph 2, floema secondario; ves, vaso; xy ra, xilema ray; xy 2, xilema secondario. Lo xilema primario, il midollo e la cavità centrale non sono mostrati.

Figura 16: Un settore di sezione dello stelo quasi maturo che mostra lo sviluppo di fibre pericliche e floema (HAYWARD, Novembre, 1938)

## 2.2.2. L’HBP - HEMPBIOPLASTIC®, KANÈSIS

In seguito alle precedenti supposizioni in linea con le finalità della suddetta tesi, è stato scelto come materiale per la progettazione della struttura del padiglione, un biocomposito avente come matrice il PLA e come rinforzo il canapulo.

Si tratta di un materiale con grandi potenzialità brevettato col nome di HBP® [Figura 17] dalla start-up italiana KANÈSIS, con la quale abbiamo collaborato. Essendo un materiale coperto da brevetto, molte informazioni sono riservate e quelle riportate di seguito sono state reperite dal sito ufficiale



Figura 17: Filamento HBP®

A lato  
Tabella 7: Proprietà meccaniche del filamento HBP® (KANÈSIS, 2017)

(®KANÈSIS) e dal nostro collaboratore, l’ing. Paolo Nicola (3D designer della start-up LABOO<sup>5</sup>).

### 2.2.2.1. COMPOSIZIONE E CARATTERISTICHE

La parte della pianta di canapa utilizzata è il **canapulo** che, dopo essere stato essiccato per evitare la formazione di muffe e funghi, viene micronizzato in modo che con la **fibra corta** si possa realizzare un compound di canapulo di canapa.

Questo compound viene poi miscelato con del **PLA vergine** in una percentuale compresa tra il 15 e il 20% ottenendo così, il filamento di canapa.

Si tratta di un eco-polimero con colorazione bruno/beige naturale, biodegradabile e compostabile ma anche dalle ottime proprietà meccaniche maggiori del PLA naturale.

Nella [Tabella 7] sottostante sono riportati i valori pubblicati dalla stessa azienda e reperiti dal documento (KANÈSIS, 2017).

Inoltre, tale materiale può essere stampato con tutte le stampanti che stampano PLA ma con maggiore semplicità potendolo fondere a una temperatura di 20-30 gradi inferiore alla media.

#### PROPRIETÀ MECCANICHE DEL FILAMENTO ®HBP

YIELD STRESS	[Mpa]	41,8
ELONGATION AT YIELD	[%]	1,5
STRESS AT BREAK	[Mpa]	33,6
ELONGATION AT BREAK	[%]	3,5
TENSILE MODULUS	[Mpa]	4420

<sup>5</sup> Laboo è un laboratorio di progettazione che vede nell’unione tra territorio, sostenibilità e tecnologia, il giusto connubio per creare innovazione dal basso impatto ambientale. L’obiettivo è attivare un processo di economia circolare che crei prodotti dal design unico e accessibile a tutti. Per farlo studia le proprietà agronomiche ed ingegneristiche del bamboo (LABOO s.r.l.).

### 2.2.2.2. L'AZIENDA

È una start-up siciliana fondata da Giovanni Milazzo e Antonio Caruso i quali dal 2014 attuano ricerca sul composito di PLA con fibra corta di canapulo.

Dopo diverse sperimentazioni riescono a presentare la domanda di brevetto il 5 aprile del 2015, ottenendolo qualche tempo dopo.

Inizia così una collaborazione con le rinomate aziende LATI spa. e FiloAlfa, già attive nel campo della produzione additiva e dello stampaggio 3D, con le quali affrontano un periodo di tre mesi di sperimentazioni che portano al concepimento del primo prototipo di filamento per stampa 3D col nome di HBP®, Hemp-Bio-Plastic.

Presto si vedono impegnati nella promozione del proprio progetto nell'evento internazionale di EXPO Milano 2015 dove riescono ad ottenere delle ulteriori collaborazioni con aziende e privati che hanno portato la realtà Kanèsis ad ampliarsi e crescere.



Attualmente la start-up rappresenta un incubatore di idee e progetti sostenibili: focus che risiede nello sviluppo di processi industriali e materiali naturali a partire dall'agricoltura, dai prodotti agricoli fino al riuso delle biomasse di scarto.

Basandosi sul modello dell'economia circolare, Kanèsis ha avviato una rivoluzione del sistema di approvvigionamento industriale, recuperando le eccedenze e gli scarti di produzione e trasformandoli in nuovi materiali "green" funzionali alle esigenze dell'industria contemporanea.

A tale scopo, Kanèsis ha ideato un processo produttivo in cui tali scarti uniti all'acido polilattico sono alla base delle caratteristiche meccaniche ed estetiche identificative dei propri materiali: resi unici in base allo scarto vegetale impiegato.



# Tecnologia

## Parte II

In seguito al preambolo sui materiali a base di canapa e le relative sperimentazioni che sono state fatte su di essi, la trattazione si sposta sulla tecnologia che viene impiegata per applicare il biopolimero HBP®.

Prima di entrare nel merito della stampa 3D, viene proposto un excursus sulla grande famiglia del “Additive Manufacturing” e sulle molteplici potenzialità che tali tecnologie di produzione hanno da offrire.

Viene approfondito così, lo stampaggio 3D o “Fused Deposition Modeling” illustrando nello specifico: il macchinario, i vari filamenti che possono essere impiegati e i molteplici settaggi delle variabili che comportano la modifica delle proprietà fisiche e meccaniche dell’elemento stampato. Tale ultimo aspetto viene analizzato proponendo diversi studi sperimentali e le rispettive normative di riferimento eseguiti soprattutto sui filamenti a base di ABS e PLA, i più utilizzati attualmente.

Approfondimenti che hanno permesso la sperimentazione, secondo la normativa ASTM-D638, eseguita sui provini in HBP®. Lavoro sperimentale che ha portato all’extrapolazione di dati e risultati interessanti da permettere di passare alla terza e ultima parte del lavoro di tesi, la progettazione.

### **3. L'ADDITIVE MANUFACTURING**

---

- 56 3.1. Tecnologie di produzione
- 57 3.1.1. Le fasi di produzione
- 57 3.1.2. Materiali impiegati
- 58 3.2. Pro e contro dell'AM
- 58 3.2.1. Aspetti positivi
- 58 3.2.2. Effetti negativi
- 59 3.2.3. Prospettive future
- 61 3.3. La tecnologia FDM
- 64 3.3.1. Materiali impiegati
- 69 3.3.2. Fattori caratterizzanti
- 71 3.3.3. Prove meccaniche su ABS e PLA

### **4. TEST MECCANICI**

---

- 80 4.1. Metodo sperimentale
- 80 4.1.1. Produzione dei campioni
- 84 4.1.2. Prova meccanica
- 86 4.2. Risultati e discussione
- 86 4.2.1. Analisi dei risultati
- 101 4.2.2. Conclusioni



### 3. L'ADDITIVE MANUFACTURING

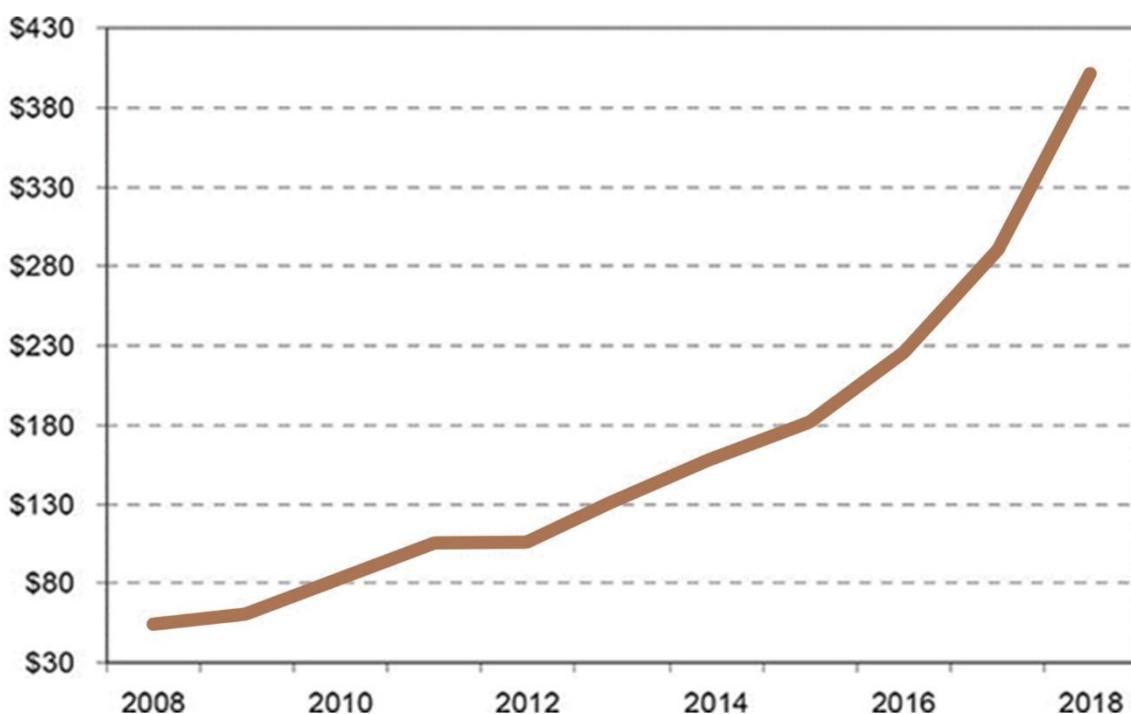
La tecnologia di prototipazione rapida, “*Rapid Prototyping*” (RP), risalente alla metà degli anni '80 del '900, chiamata anche: manifattura additiva “*Additive Manufacturing*” (AM) e più comunemente stampa 3D “*3D Printing*” (3DP), è una modalità di produzione basata sull'aggiunta di materiale, in grado di modellare nello spazio dei componenti aventi forme geometriche complesse.

Infatti, attualmente l'AM viene utilizzata in casi in cui si richiedono delle soluzioni a design complessi in tempi di consegna brevi. L'applicazione di tale tecnologia viene richiesta nei campi delle costruzioni, abbigliamento, medicina, elettronica, automobilismo, robotica, militare, oceanografica, aerospaziale ed altri (DIZON, et al., 2018).

Stando al “*Wohlers Report 2019*” (WONG, 2019) l'utilizzo della tecnologia AM è in continuo aumento

in quanto, monitorando la crescita e le vendite di 177 produttori attivi in questo settore, i cui costi sono pari o superiori a \$ 5.000, ha riscontrato un incremento nello sviluppo e ricerca nel settore dei materiali di stampa 3D durante il 2018: in particolare, sui materiali termoplastici ad alte prestazioni. La società americana sottolinea che i metalli della stampa 3D hanno registrato la crescita più forte in tale anno crescendo del 41.9% circa e del 40% considerato un lasso di tempo di cinque anni.

Inizialmente l'AM, infatti, era nata solamente per i polimeri, ma la tecnologia è stata estesa anche ad altri materiali quali: ceramici, compositi e diversi metalli come alluminio e titanio. Fino al 2017, i polimeri rimanevano comunque i più utilizzati (51%) seguiti dai metalli con polimeri (29.2%) e in fine solo dai metalli (19.8%) (WONG, 2017).



**Immagine di copertina:**  
Macchinario AM,  
particolare  
dell'ugello  
Foto: © Nian-Tech

**Figura 18:** La vendita di materiali polimerici per il power bed fusion ha raggiunto il massimo storico nel 2018. Le cifre sono espresse in milioni di dollari (WONG, 2019)

### 3.1. TECNOLOGIE DI PRODUZIONE

La tecnologia AM viene impiegata in diversi campi industriali, da quello aerospaziale a quello biomedico in cui viene adoperata per la produzione di protesi (SQUAME, et al., 2018).

L’Additive Manufacturing comprende 7 categorie di formatura differenti.

La suddivisione seguente [Figura 19] è fedele alla normativa ISO/ASTM 52900 (INTERNATIONAL STANDARD, 2015), mentre la descrizione delle medesime è tratta da (3D HUBS):

- **Material Extrusion (FDM)**  
Il materiale viene erogato selettivamente attraverso un ugello;
- **Vat Polymerization (SLA & DLP)**  
Il fotopolimero liquido all’interno di una vasca viene polimerizzato selettivamente da raggi UV;
- **Powder Bed Fusion (SLS, DMLS/SLM)**  
Una fonte ad alta energia fonde selettivamente particelle di polvere;
- **Material Jetting (MJ)**  
Piccole gocce di materiale vengono depositate e polimerizzate selettivamente;
- **Binder Jetting (BJ)**  
L’agente legante liquido lega selettivamente le regioni di un letto di polvere;
- **Direct Energy Deposition (LENS, LBMD)**  
Una fonte ad alta energia fonde il materiale quando viene depositato;
- **Sheet Lamination (LOM, UAM)**  
Fogli di materiale sono incollati e formati strato per strato.

A lato  
Figura 19: Schema delle sette categorie che fanno parte dell’AM (3D HUBS)

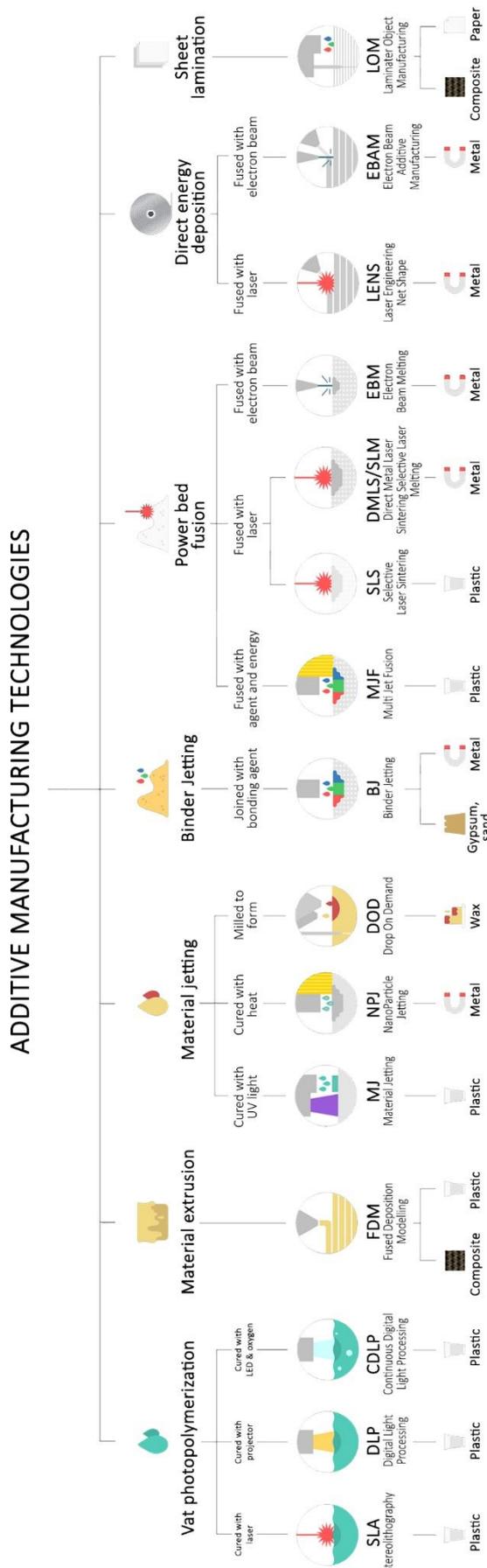




Figura 20: Schema del processo di produzione AM

### 3.1.1. LE FASI DI PRODUZIONE

I passaggi che fanno parte del processo di produzione di componenti tramite AM si susseguono in questo modo (MEHRAEIN, 2018) [Figura 20]:

#### 1) Modellazione CAD

Per avviare il processo, tutte le parti devono iniziare da un software che descrive la geometria del modello.

È possibile utilizzare qualsiasi software "CAD - Computer-Aided Design" (CANTRELL, et al., 2016) professionale di modellazione solida;

#### 2) Conversione del modello in un file STL

Dal CAD è possibile convertire il modello nel formato file STL, che è lo standard per le stampanti 3D. Questo viene elaborato dal software della stampante che lo scansiona e suddivide in livelli creati tramite la selezione selettiva di materiale (e/o energia di un materiale), per formare una stampa primitiva (RODRIGUEZ, et al., 2003);

#### 3) Trasferimento del file STL in una macchina di produzione additiva e manipolazione del file

Il file STL deve essere trasferito sulla macchina. In questa fase, potrebbe essere necessario modificare il file con le dimensioni, la posizione e l'orientamento corretti;

#### 4) Impostazione macchina

In questa fase, la macchina deve essere configurata prima del processo di formatura. I parametri che devono essere impostati sono lo spessore dello strato, la temperatura dell'ugello e del letto, la densità di riempimento, ecc.;

#### 5) "Building"

Questo passaggio è principalmente un processo automatizzato e la macchina può continuare con un controllo umano minimo; tuttavia, l'unico contributo umano richiesto per questa fase è quello di assicurarsi che la macchina abbia abbastanza materiale e potenza affidabile;

#### 6) Rimozione e post-elaborazione

Una volta conclusa la stampa l'oggetto viene rimosso dalla macchina e successivamente passa attraverso delle operazioni di pulizia o rimozione del materiale di supporto, che potrebbero richiedere più tempo e attenzione;

#### 7) Applicazione:

In questa fase, la parte è pronta per l'uso; tuttavia, l'oggetto potrebbe richiedere un trattamento aggiuntivo come adescamento e pittura a seconda del suo utilizzo.

### 3.1.2. MATERIALI IMPIEGATI

La scelta del materiale da impiegare è strettamente legata al processo di stampa che si vuole adoperare in quanto, ogni processo di stampa è compatibile con materiali diversi.

Le **Materie plastiche** sono le più utilizzate, i termoplastici (FDM, SLS) per applicazioni più funzionali mentre, i termoindurenti (SLA, DLP, MJ) per applicazioni che richiedono una resa estetica maggiore.

I **Metalli**, invece, sono utilizzati per applicazioni che richiedono elevate proprietà meccaniche (DMLS/SLM, BJ).

## 3.2. PRO E CONTRO DELL'AM

### 3.2.1. ASPETTI POSITIVI

I principali vantaggi che si possono ottenere adottando questa tecnologia si riscontrano su diversi fronti:

- **Progettazione**
- **Precisione**
- **Risorse impiegate**
- **Impatto ambientale**
- **Costi**
- **Quantità di materiale utilizzato**

La libertà di progettazione che si può ottenere facilmente utilizzando un programma CAD 3D è dovuta alla possibilità di avere una visione e percezione completa dell'oggetto in ogni sua minima parte.

In questo modo si possono prevedere e risolvere diverse problematiche, fino nei più piccoli dettagli, prima che si avvii la produzione vera e propria.

Inoltre, trattandosi di tecnologie basate sull'aggiunta di materiale, ci permette di evitarne, nella maggior parte dei casi, lo spreco ed utilizzarne nella giusta quantità richiesta (MEHRAEIN, 2018).

Il risparmio di materiale, ovviamente, si ripercuote in una diminuzione dei costi generali di produzione e in una compatibilità ambientale migliore rispetto alle tecnologie di formatura tradizionali (RODRIGUEZ, et al., 2003).

### 3.2.2. EFFETTI NEGATIVI

Nonostante i molti aspetti positivi nell'utilizzo della tecnologia AM, vi sono comunque degli effetti negativi che ancora richiedono studio e ricerca per essere appianati. Uno tra questi è la **resa estetica** dell'oggetto stampato. È stato appurato che più si suddivide l'oggetto con un numero di layer maggiore, più alta è la precisione e accuratezza del componente, ma allo stesso tempo aumentano esponenzialmente i tempi di produzione. Quindi, per oggetti molto grandi si preferisce utilizzare una suddivisione ridotta per poi rimediare con operazioni di post-produzione mediante utensili e macchinari.

La fase di post-produzione può avvenire comunque anche per oggetti più piccoli ma che presentano delle geometrie complesse che richiedono dei **supporti provvisori**, in quanto senza di questi le parti dell'oggetto cadrebbero senza trovare il giusto supporto durante la fase di formatura. Tale tipologia di supporti, nei casi migliori, possono essere composti da materiale solubile in acqua non lasciando traccia una volta immerso l'oggetto nel liquido. Ma in caso contrario dovranno essere rimossi utilizzando soluzioni differenti (RODRIGUEZ, et al., 2003).

Altre problematiche sono dovute alla **natura del materiale**, dalla **limitata scelta** di varietà per quanto riguarda ad esempio la tecnologia FDM e l'inevitabile **anisotropia** dovuta alla **difficoltà di adesione** tra i vari strati che possono essere la causa di deficit nelle proprietà meccaniche (MEHRAEIN, 2018).

### 3.2.3. PROSPETTIVE FUTURE

Riguardo questo relativo nuovo metodo di produzione, ricercatori e studiosi attribuiscono a tale tecnologia la possibilità di proiettarci nella **“terza rivoluzione industriale”**. I vari scenari e miglioramenti che si potranno realizzare sono descritti di seguito (RODRIGUEZ, et al., 2003):

- Produzione additiva per "desktop fabrication "**  
 Attualmente l'utilizzo di tale tecnologia è ristretto a produttori e specialisti del settore, ma questo non esclude che in un futuro queste tipologie di stampanti faranno la loro comparsa nelle nostre case accanto alla stampante 2D e che di conseguenza ognuno potrà stampare l'oggetto desiderato senza doverlo andare a comprare all'esterno.
- Ricerca del giusto equilibrio fra materiali, processi e macchine**  
 Il design per la produzione additiva (DfAM) è un campo emergente nella progettazione ingegneristica. Attualmente sono ancora inutilizzate le

funzionalità uniche di AM come: la capacità geometrica illimitata e la composizione eterogenea di materiali, che fornirebbero prodotti con prestazioni migliori. Con i futuri sistemi DfAM, i progettisti potranno generare complessi oggetti multi-materiali semplicemente specificando le prestazioni del progetto. In questo modo, per quanto riguarda la fedeltà e l'economicità, sono necessari algoritmi teorici per analizzare e sintetizzare forme, vincoli e specificazioni complesse in fisica, movimento e altre funzionalità. Generare disegni che possono avere forme sempre più complesse e composizione materiale è una questione di ricerca aperta. Inoltre, altri aspetti in continua crescita, grazie a ricerche e sperimentazioni, riguardano i materiali biologici (non inquinanti) e l'auto-assemblamento [Figura 21].

La ricerca inoltre, sta guardando a un contesto più ampio, che punta all'integrazione dei processi AM con i processi tradizionali, per arrivare all'ottimizzazione della logistica della produzione dei prodotti.

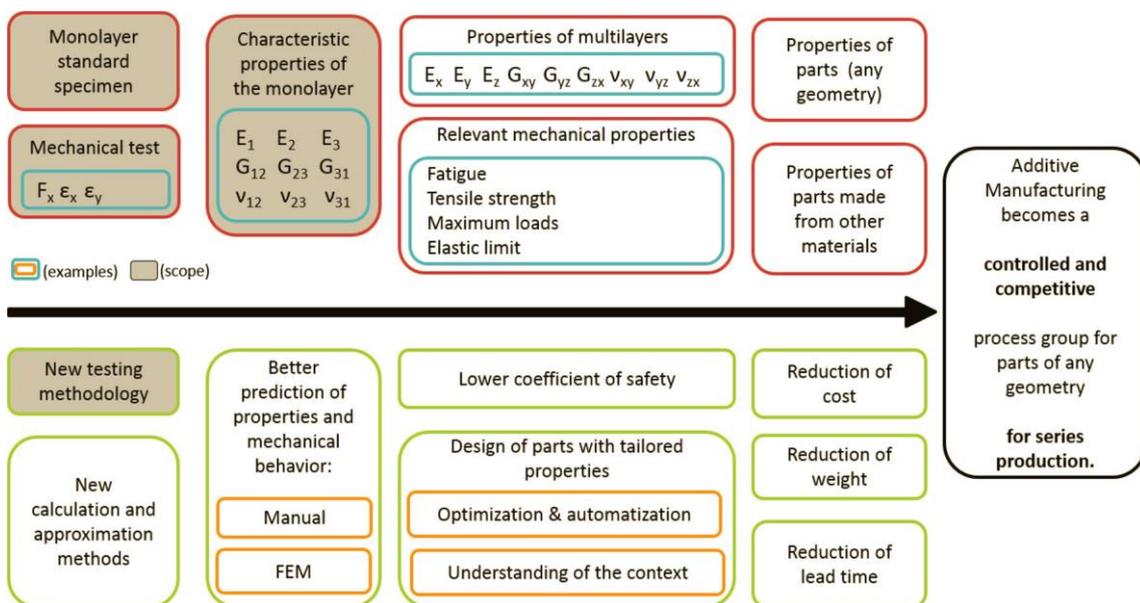
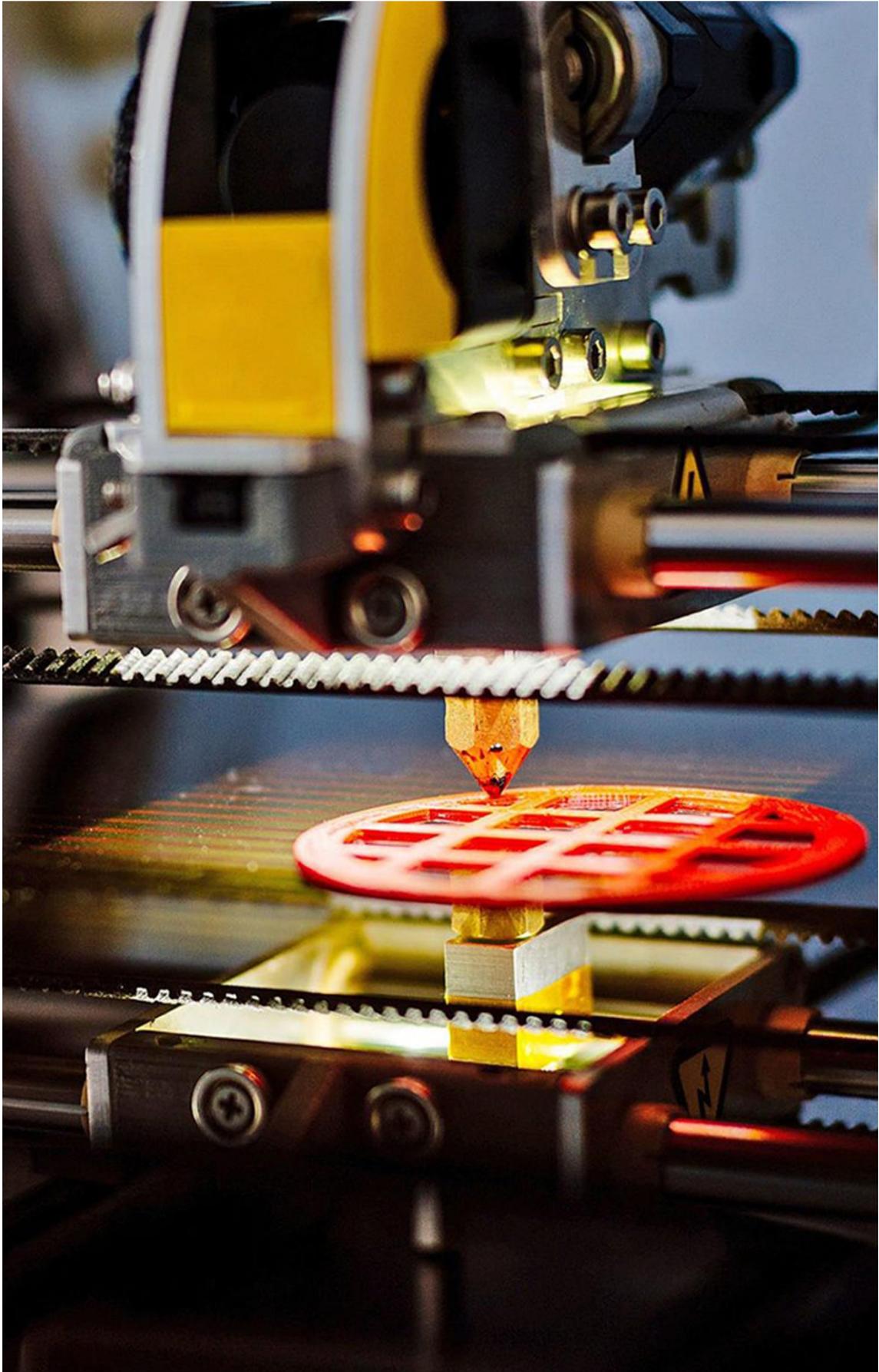


Figura 21: Visione globale: test meccanici standardizzati portano a processi AM controllati e competitivi (WENDT, et al., 2015)



### 3.3. LA TECNOLOGIA FDM

Per le finalità di tale tesi la tecnologia che viene trattata e approfondita è la “*Fused Deposition Modeling*” (FDM), in quanto si tratta della tecnologia adatta per lo stampaggio della bio-plastica HBP® (®KANÈSIS) sottoforma di filamento.

Il metodo FDM è una tecnologia AM, ideata nel 1989 dall’inventore Steven Scott Crump [Figura 22] (CRUMP, 1989), che consiste nel rilasciare su un piano di stampa una serie di “*layer*” (strati) di materiale polimerico fuso tramite un ugello. Quest’ultimo è libero di spostarsi in qualsiasi direzione sul piano XY lungo un percorso tracciato da un software “*CAM- Computer-Aided Manufacturing*”, nel quale viene elaborato un modello solido 3D ottenuto con un software CAD.

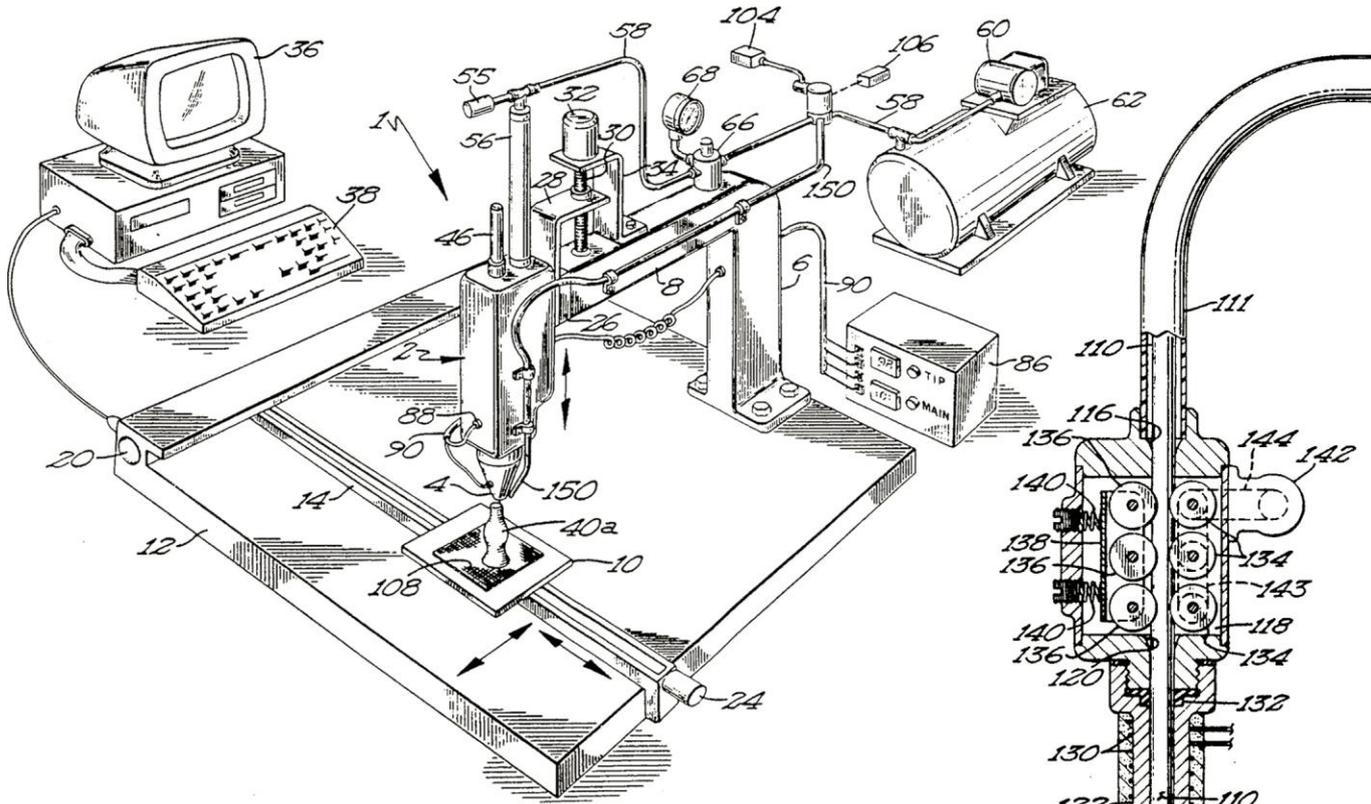
Man mano che il piano di stampa si abbassa lungo l’asse Z, vengono depositati i successivi livelli sopra di una base di schiuma che serve per far aderire il

modello alla piastra, in alcuni casi riscaldata (TOO, et al., 2002).

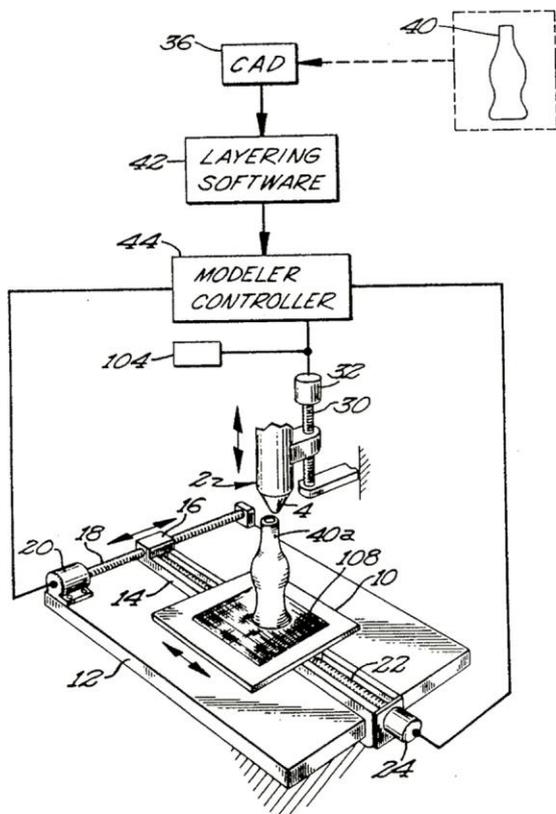
Nel caso in cui il modello presenti delle parti in aggetto, bisogna provvedere alla realizzazione di supporti che garantiscono, durante la fase di stampa, il sostegno del filamento fuso. Successivamente, tale materiale in eccesso viene rimosso. Questo tipo di strutture provvisorie vengono modellate mediante un secondo filamento di un materiale facilmente asportabile.

Anche se come processo di formatura è molto lento rispetto alle tecnologie tradizionali (estrusione, stampo, etc.), prevede comunque un risparmio di tempo, di attrezzature e di costi (GEBHARDT, 2011). Infatti, inviando subito l’oggetto alla stampante si evita di dover provvedere alla progettazione di un estrusore o di uno stampo “ad hoc” che in molti casi sono la causa dell’aumento dei costi di produzione, trattandosi di componenti molto complessi.

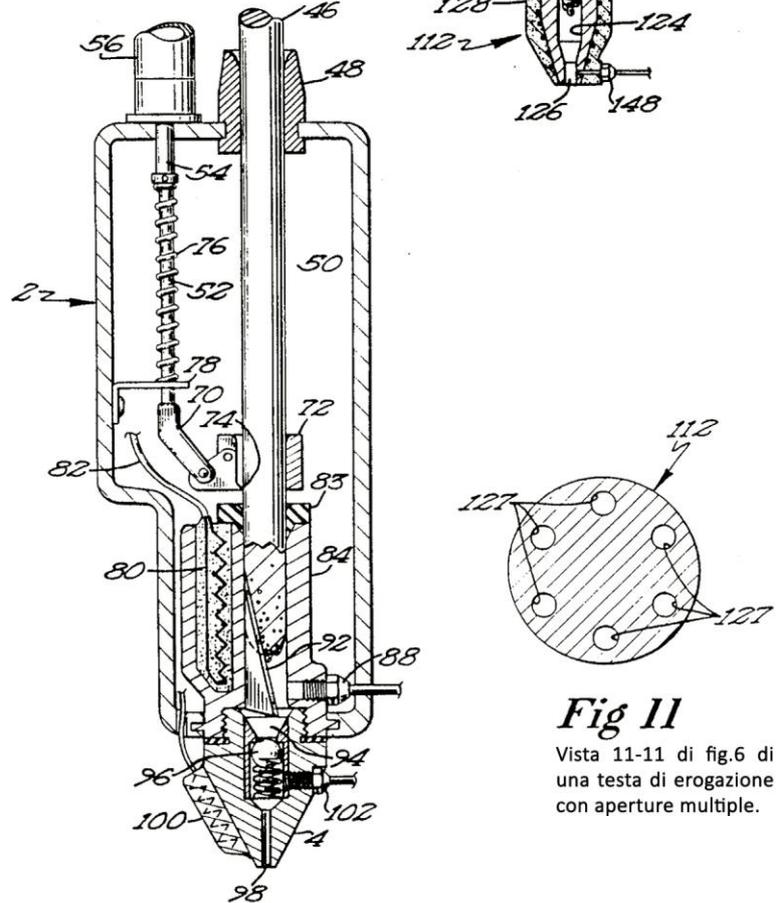
Immagine di copertina:  
Stampante FDM  
Foto: Shutterstock



**Fig 1** Vista prospettica di una versione dell'apparato per formare oggetti tridimensionali.



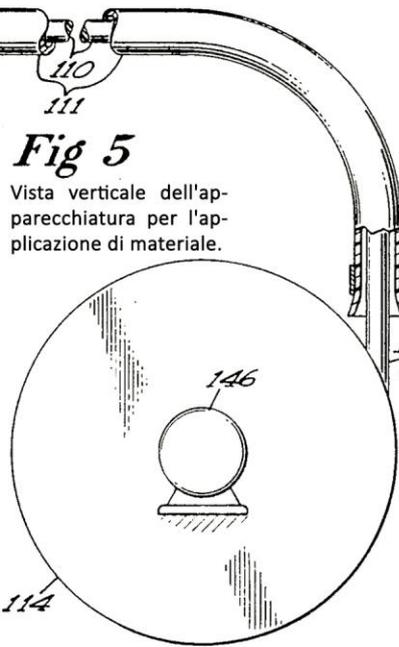
**Fig 2** Vista schematica del sistema di progettazione assistita da computer per il funzionamento.



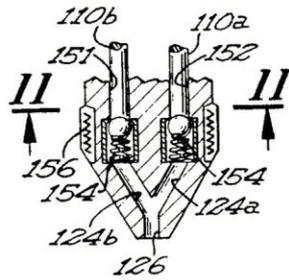
**Fig 3** Vista in sezione verticale della testa di erogazione di fig.1.

**Fig 11**

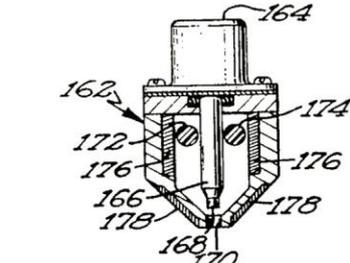
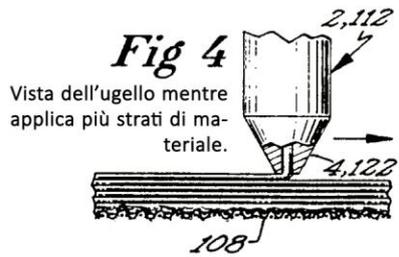
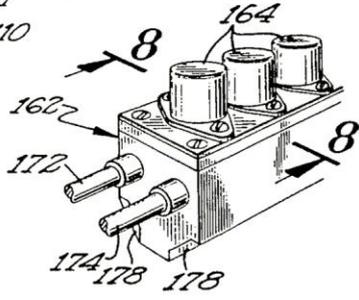
Vista 11-11 di fig.6 di una testa di erogazione con aperture multiple.



**Fig 6** Sezione di ugello per erogare più flussi.



**Fig 7** Vista parziale di distributore multiplo.

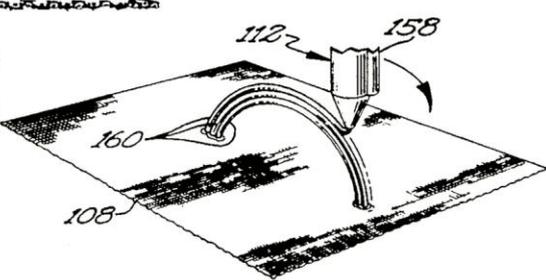


**Fig 8** Sezione verticale del gruppo collettore e valvola della fig.7.

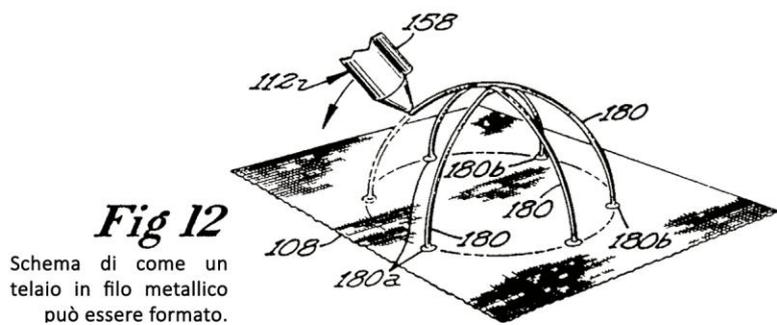


**Fig 9**

Schema delle possibili altezze e spessori dei vari livelli di materiale.



**Fig 10** Schema di come il materiale può essere erogato e distribuito nello spazio libero.



**Fig 12**

Schema di come un telaio in filo metallico può essere formato.

**DIDASCALIA ESPLICATIVA**

- 1: apparecchio; 2: testa di erogazione; 4: ugello;
- 6: piedistallo; 8: braccio; 10: piastra; 12: piano X-Y;
- 14: asta di scorrimento; 16: blocco unità; 18: guida;
- 20: motore di azionamento; 22: guida; 24: motore di azionamento;
- 26: cuscinetto a micro-slitta; 28: supporto; 30: vite di scorrimento;
- 32: motore di azionamento; 34: supporto; 36: software CAD;
- 38: tastiera; 40: progetto dell'oggetto da stampare;
- 40.a: oggetto stampato; 42: layering software;
- 44: machine controller; 46: asta di alimentazione;
- 48: manicotto; 50: camera di alimentazione;
- 52: guida; 54: pistone; 55: valvola di sfiato;
- 56: martinetto; 58: condotti aria pressurizzata;
- 60: compressore d'aria; 62: serbatoio; 64: valvola solenoide;
- 66: valvola di regolazione della pressione; 68: manometro;
- 70: connettore; 72: testa a cricchetto; 74: denti a cricchetto;
- 76: molla di ritorno; 78: staffa; 80: resistenza;
- 82: cavo di alimentazione; 83: anello di tenuta;
- 84: testa riscaldata; 86: controller di temperatura;
- 88: termocoppia; 90: cavo elettrico;
- 92: lama; 94: condotta flusso; 96: valvola di ritegno a sfera caricata a molla;
- 98: foro di uscita regolabile; 100: riscaldatore elettrico supplementare;
- 102: termocoppia; 106: timer; 108: strato di adesione;
- 110: filo flessibile; 110.a-110.b: materiali supplementari;
- 111: manicotto; 112: testa di erogazione;
- 114: bobina di alimentazione; 116: apertura di ingresso;
- 118: alimentatore; 120: guida apertura inferiore;
- 122: ugello di scarico; 124: condotto; 124.a-124.b: condotti supplementari;
- 126: foro di uscita regolabile; 127: fori; 128: riscaldatore;
- 130: batteria di riscaldamento a resistenza elettrica;
- 132: anello di tenuta; 134: rulli guida; 136: rulli;
- 138: pedana a pressione; 140: molle; 142: motore;
- 143: trasmissione a cinghia; 144: catena; 146: motore;
- 148: termocoppia; 150: linea di fornitura separata;
- 151: alimentatore; 152: alimentatore; 154: valvole;
- 156: riscaldatore a resistenza; 158: vibratore ad ultrasuoni;
- 160: filamenti di materiale; 162: serbatoio; 164: collettore;
- 166: pistone; 168: valvola inferiore; 170: foro di uscita;
- 172-174: filamenti materiale; 178: riscaldatori a strisce;
- 180: filamenti indipendenti; 180.a-180.b: basi distanziate.

**Figura 22:** Macchinario per la stampa 3D: disegni originali tratti dal brevetto (CRUMP, 1989)

### 3.3.1. MATERIALI IMPIEGATI

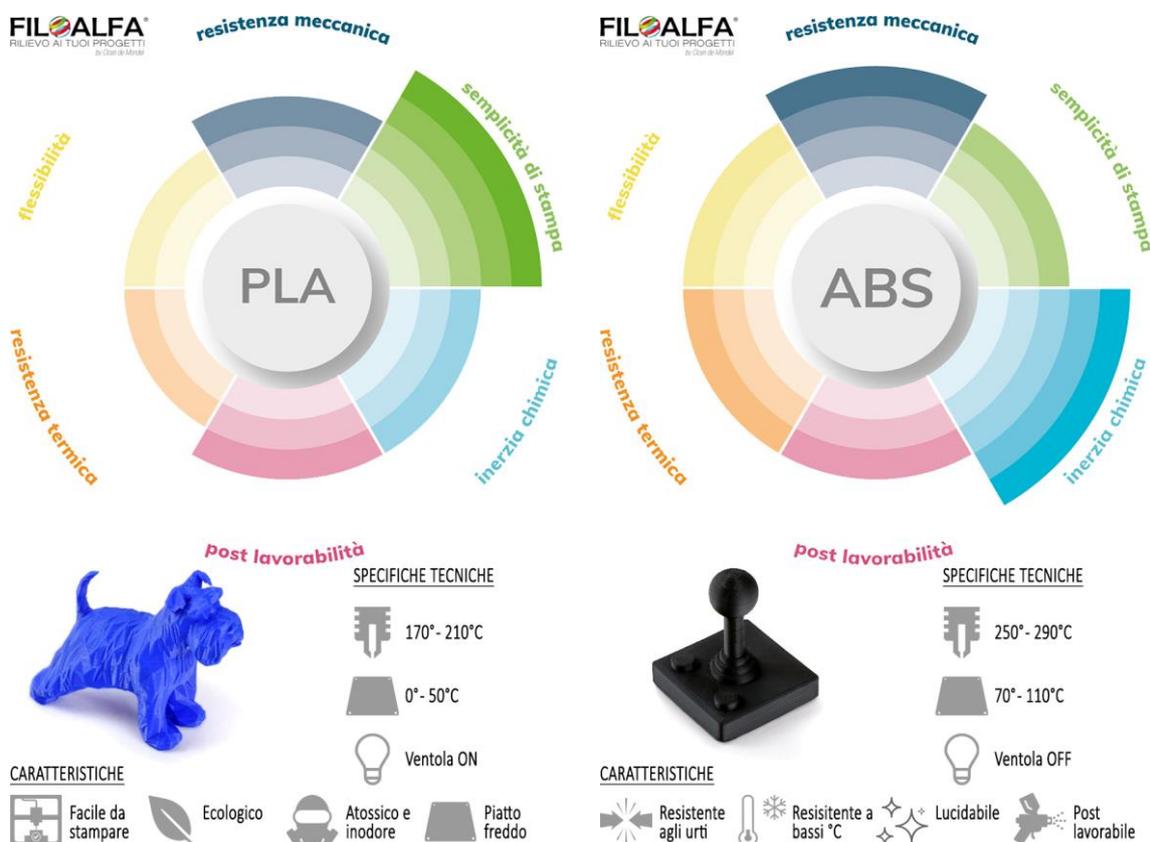
Le materie plastiche più utilizzate in questo processo di formatura sono (MEHRAEIN, 2018):

#### PLA; acido polilattico ( $C_3H_4O_2$ )<sub>n</sub>

Ha una temperatura di fusione compresa tra i 160°C-220°C e fa parte dei polimeri della famiglia dei Poliesteri caratterizzati da una struttura semi-cristallina. Questa famiglia comprende due tipologie di polimeri: i termoplastici e i termoindurenti. È favorito per la sua biodegradabilità, l'assenza di odori sgradevoli se riscaldato e per la sua compatibilità ambientale complessiva in tutti gli aspetti del suo ciclo di vita. Inoltre, il PLA emette dieci volte meno particelle ultra-fini potenzialmente pericolose rispetto all'ABS (STEPHENS, et al., 2013). È fatto da risorse rinnovabili (amido di mais o della patata) e richiede meno energia per il processo rispetto alle plastiche tradizionali (YAN, 2016);

#### • ABS; acrilonitrile-butadiene-stirene ( $C_8H_8-C_4H_6-C_3H_3N$ )<sub>n</sub>

Si tratta di un polimero amorfo formato da tre monomeri con una temperatura di fusione di 230°C e temperatura di transizione vetrosa tra i 107°C-115°C. È meglio utilizzato per realizzare parti durevoli che devono resistere a temperature più elevate. Può anche essere post-elaborato con acetone per fornire una finitura lucida. Quando si utilizza un filamento ABS, si consiglia di utilizzare una superficie di stampa riscaldata, poiché la plastica ABS si contrarrà quando si raffredda portando a parti deformate. L'ABS è principalmente noto per i prodotti Lego (YAN, 2016);

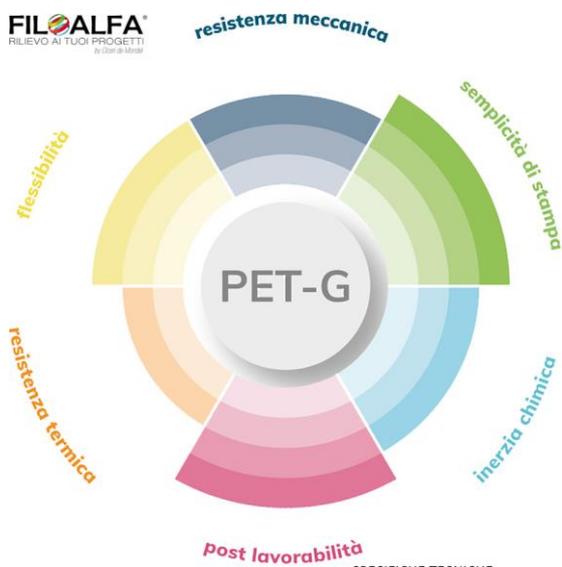


• **Polietilene (PE)**

Di questo polimero vi sono sei categorie differenti in base a come viene prodotto: “*ultra-low-density polyethylene*” (ULDPE), “*very low-density polyethylene*” (VLDPE), “*linear low-density polyethylene*” (LLDPE), “*low-density polyethylene*” (LDPE), “*medium-density polyethylene*” (MDPE) e “*high-density polyethylene*” (HDPE). È commercializzato sottoforma di filamento con punto di fusione a 130°C. Viene impiegato soprattutto in campo biomedico per impianti di protesi;

• **NYLON**

È un materiale di stampa 3D incredibilmente forte, durevole e versatile. Flessibile quando sottile, ma con un'adesione interstrato molto alta che fa sì che si presti bene a componenti come cerniere e altre parti funzionali. Le stampe di filamenti di nylon sono comunemente bianche con una superficie traslucida e possono essere colorate tramite un processo di colorazione fatto con i coloranti a base di acido. Il filamento di nylon è estremamente sensibile all'umidità, pertanto è consigliabile adottare misure di asciugatura durante lo stoccaggio e la stampa immediatamente precedente per ottenere risultati migliori (YAN, 2016). Ha una temperatura di fusione compreso tra i 235°C-270°C;

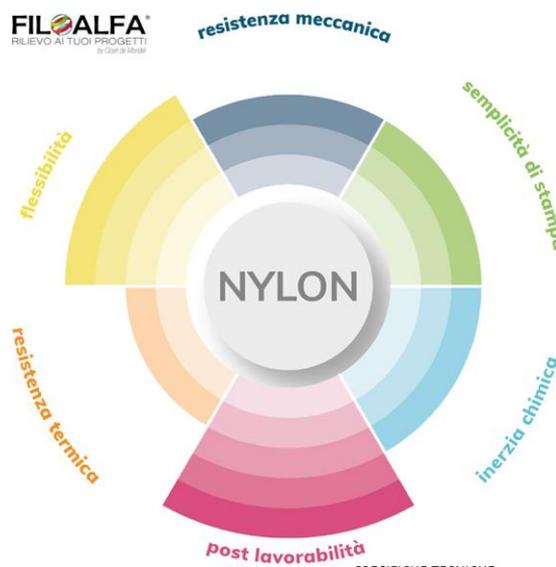


**SPECIFICHE TECNICHE**

- 230° - 250°C
- 0° - 70°C
- Ventola OFF

**CARATTERISTICHE**

- Facile da stampare
- Resistente agli urti
- Lucido e trasparente
- Inodore



**SPECIFICHE TECNICHE**

- 200° - 240°C
- 60° - 80°C
- Ventola OFF

**CARATTERISTICHE**

- Resistente agli urti
- Prestazioni elevate
- Resiste agli agenti chimici
- Filamento tecnico

- **Policarbonato (PC)**

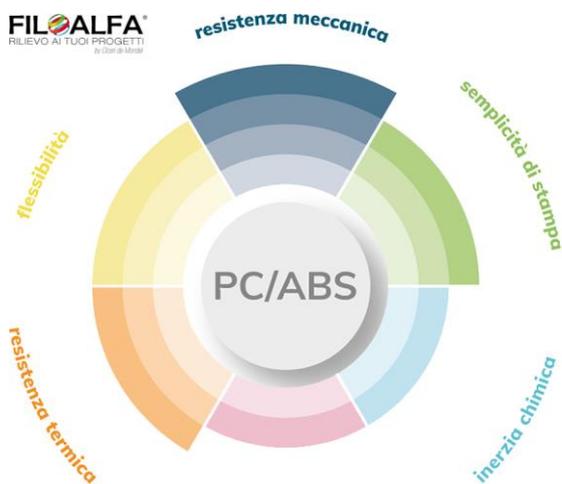
È un tipo di poliestere formato dalla reazione di bis-fenolo A e acido carbonico. Il PC è disponibile per uso commerciale nella tecnica FDM e ha una temperatura di fusione di 255°C-300°C e una temperatura di transizione vetrosa di 145-148°C;

- **Policaprolattone (PCL)**

È un altro poliestere biodegradabile e biocompatibile. Il filamento PCL ha una temperatura di fusione compresa tra 150°C-250°C e una temperatura di transizione vetrosa di -60°C con un punto di fusione di 60°C;

- **FLEX (TPE, TPU)**

Un materiale di stampa molto simile per comportamento alla gomma flessibile. Il filamento in TPE può essere utilizzato per realizzare parti che hanno la necessità di adattarsi piegandosi e flettendosi (molle, custodie per telefoni, zerbini, cinture e altro) (YAN, 2016);



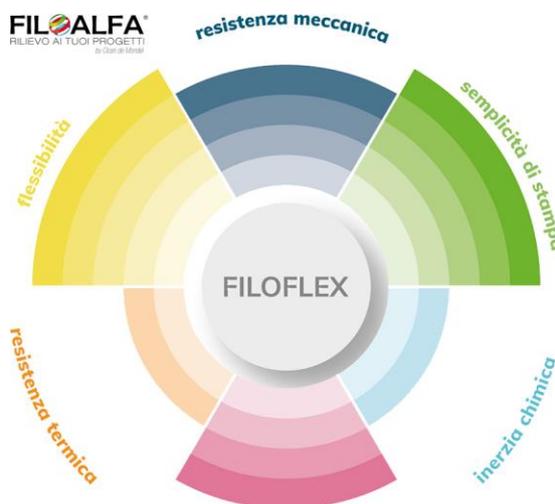
**post lavorabilità**

**SPECIFICHE TECNICHE**

- 240° - 260°C
- 80° - 110°C
- Ventola OFF

**CARATTERISTICHE**

- Resistente agli urti
- Resistente all'usura
- Finitura lucida
- Cromabile



**post lavorabilità**

**SPECIFICHE TECNICHE**

- 190° - 230°C
- 0° - 50°C
- Ventola OFF

**CARATTERISTICHE**

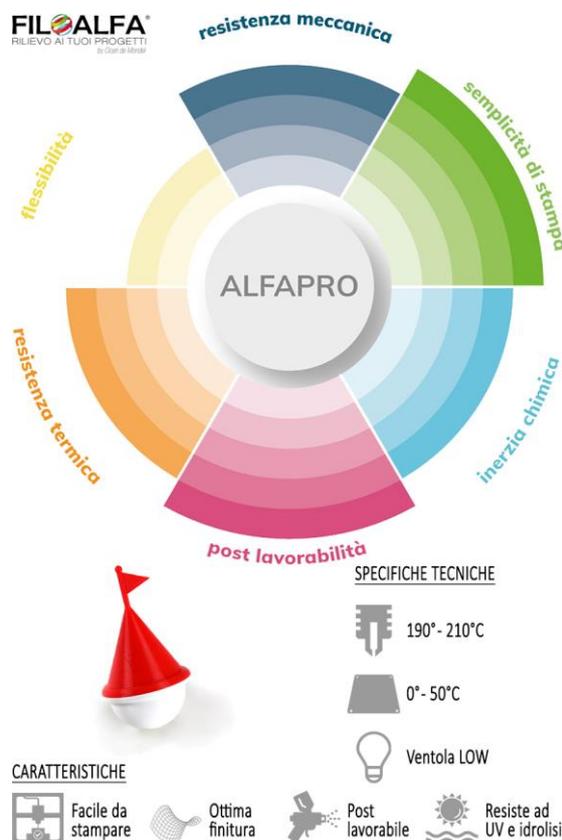
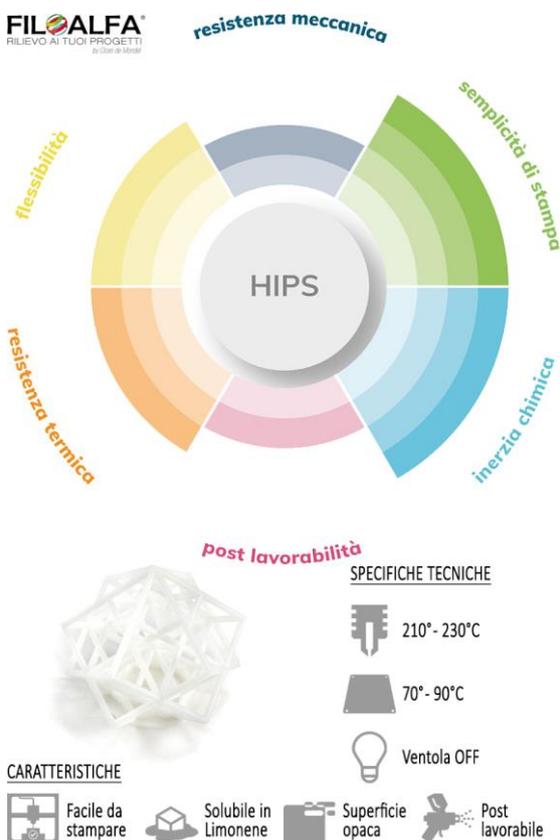
- Flessibile e resistente
- Adatto per uso medico
- Migliore adesione
- Resistenza chimica

• Solubili (PVA, HIPS)

Sono filamenti che vengono utilizzati soprattutto per la formazione dei sostegni provvisori atti a sostenere il materiale definitivo che costituisce il componente. Si tratta di filamenti solubili in quanto, ad esempio per il tipo HIPS, se immerso in una soluzione di "Limonene" si scioglie non lasciando traccia sull'oggetto stampato (FILOALFA);

• PP (Polipropilene)

Ha tre tipi principali: omopolimeri, copolimeri random e copolimeri ad impatto. Il tipo più comune utilizzato nella tecnologia FDM è l'omopolimero che è disponibile per uso commerciale e si fonde a 230-260°C.



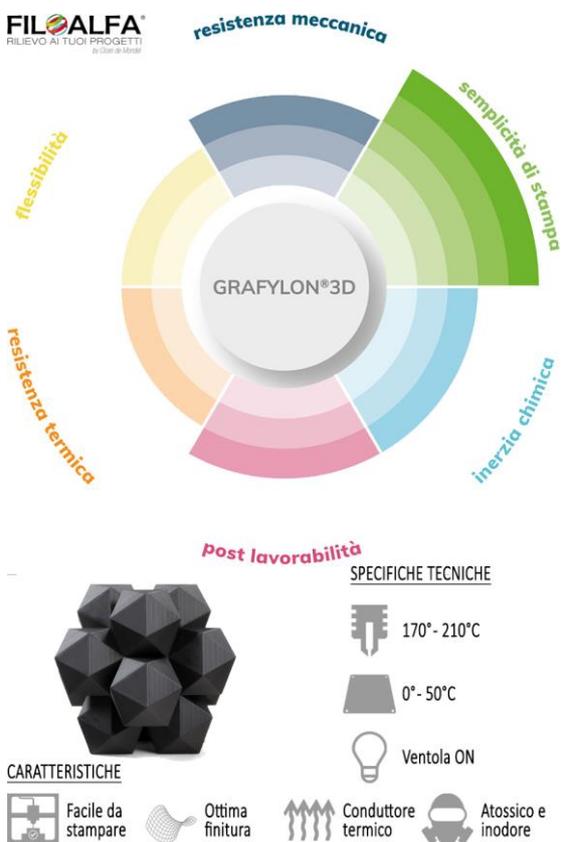
Inoltre, i polimeri PLA, ABS e PETG vengono utilizzati come matrice per filamenti compositi con rinforzi di natura differente. Questi possono essere di tipo:

- **Minerale**

Per costituire filamenti metallici con possibili proprietà conduttive (grafite), magnetiche (ferro) e ad alte capacità meccaniche (fibra di carbonio e fibra di vetro), quest'ultime molto resistenti ma di difficile riutilizzo e smaltimento;

- **Vegetale**

Come legno, bambù, canapa e addirittura provenienti dal materiale di risulta della lavorazione del pomodoro (<sup>®</sup>KANÈSIS).



### 3.3.2. FATTORI CARATTERIZZANTI

I polimeri più utilizzati sono il PLA e l'ABS ed è proprio su tali polimeri che si sono effettuati diversi test meccanici per studiarne le proprietà fisiche e il comportamento in seguito allo stampaggio tramite tecnologia FDM. Trattandosi di un campo ancora inesplorato o comunque poco conosciuto, la gran parte delle informazioni a riguardo provengono da test svolti in laboratorio ma anche e soprattutto dagli errori dovuti all'esperienza dei singoli laboratori. In generale i fattori in accordo con (LANZOTTI, et al., 2015) e (AHN, et al., 2002), che influenzano sulla qualità e proprietà del componente stampato, sono i seguenti [Figura 23]:

**a) Orientation [degree]**

È la giacitura del componente secondo gli assi X, Y, Z. Il piano XY corrisponde al piano della stampa mentre l'asse Z è la direzione di stampaggio del componente (SOOD, et al., 2010);

**b) Layer thickness [mm]**

È lo spessore dello strato di materiale che viene depositato dall'ugello della stampante (SOOD, et al., 2010);

**c) Nozzle diameter [mm]**

Si riferisce alla grandezza dell'ugello dal quale esce il filamento fuso;

**d) Road or Raster Width [mm]**

È la larghezza del filamento una volta depositato dall'ugello;

**e) Fill density [%]**

È la quantità di materiale presente nell'oggetto. Le proprietà meccaniche migliorano con l'aumentare della percentuale di materiale presente, ma aumentano anche il tempo di stampaggio e ovviamente la quantità di materiale usato;

**f) Raster or Infill Orientation [degree]**

È la rotazione nel piano XY del filamento di materiale estruso e va da un valore di 0° a 180°;

**g) Air Gap [mm]**

È la distanza tra i filamenti appartenenti allo stesso livello (SOOD, et al., 2010). Il valore di default è 0 che significa che i filamenti si toccano appena. Tale parametro se presenta un valore positivo vuol dire che vi è uno spazio tra loro che non li permette di toccarsi, mentre con un valore negativo il componente è caratterizzato da una struttura più densa in quanto i filamenti si sovrappongono in minima parte;

**h) Number of shell perimeters [-]**

Rappresenta il numero di strati che vanno a costituire la pelle esterna. Va da un minimo di 1 ad un massimo uguale al numero di filamenti estrusi con diametro uguale all'ugello;

**i) Flow rate [%]**

È la quantità di materiale estruso dall'ugello espresso in percentuale sul numero di rivoluzioni dello stesso per formare uno strato di 1 mm di spessore;

**j) X-Y and Z deposition speed [mm/min]**

È la velocità di spostamento dell'ugello. Più è lento, maggiore è la qualità di esecuzione ma anche il tempo impiegato per lo stampaggio;

**k) Bed temperature [°C]**

È la temperatura del piano di stampa e viene settato in base alle caratteristiche del materiale. Un'impostazione corretta permette un'adesione efficace dello stesso, evitando i fenomeni di deformazione;

**l) Model Build Temperature [°C]**

Si riferisce alla temperatura dell'elemento

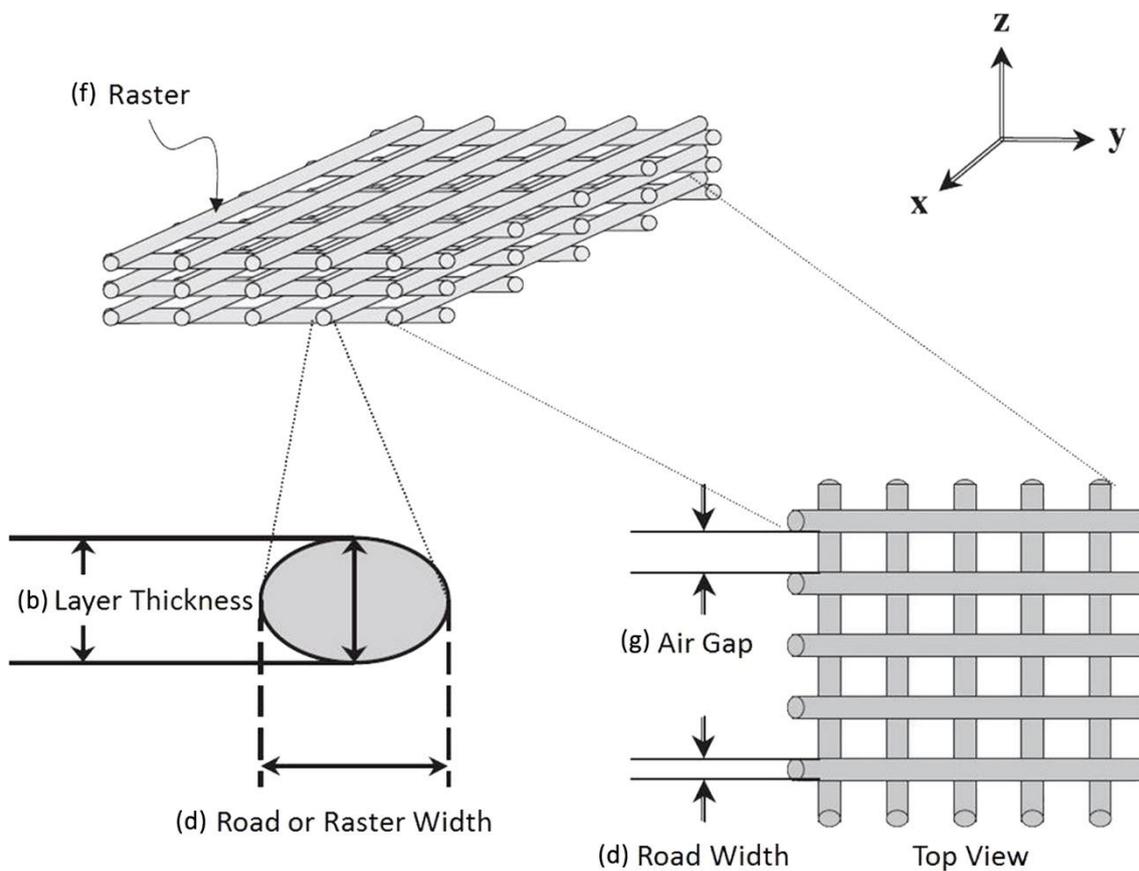
riscaldante della stampante. Controlla la viscosità del materiale fuso in uscita dall'ugello;

**m) Outline overlap [%]**

È il parametro che permette di diminuire o aumentare la percentuale di vuoti tra il riempimento interno e il perimetro;

**n) Color [-]**

Alcuni filamenti sono disponibili in diversi colori di stampa oltre al pigmento naturale del materiale.



**Figura 23:** Diagramma dei differenti parametri di stampa tipo FDM (KALITA, et al., 2003)

### 3.3.3. PROVE MECCANICHE SU ABS E PLA

Come detto precedentemente, i due polimeri maggiormente utilizzati e testati sono il PLA e l'ABS in quanto, entrambi i materiali posseggono delle ottime proprietà meccaniche.

Possiamo dire, mediante il lavoro di ricerca di (KUZNETSOV, et al., 2018), che i principali vantaggi del **polilattide (PLA)**, rispetto ai polimeri alternativi usati per la stampa 3D, sono:

- **Basso grado di restringimento**  
Implica minori tensioni residue nelle parti stampate, con una conseguente assenza di deformazione e delaminazione;
- **Inferiore temperatura di fusione (190-230°C)**  
Comporta una maggiore produttività del processo di stampa.

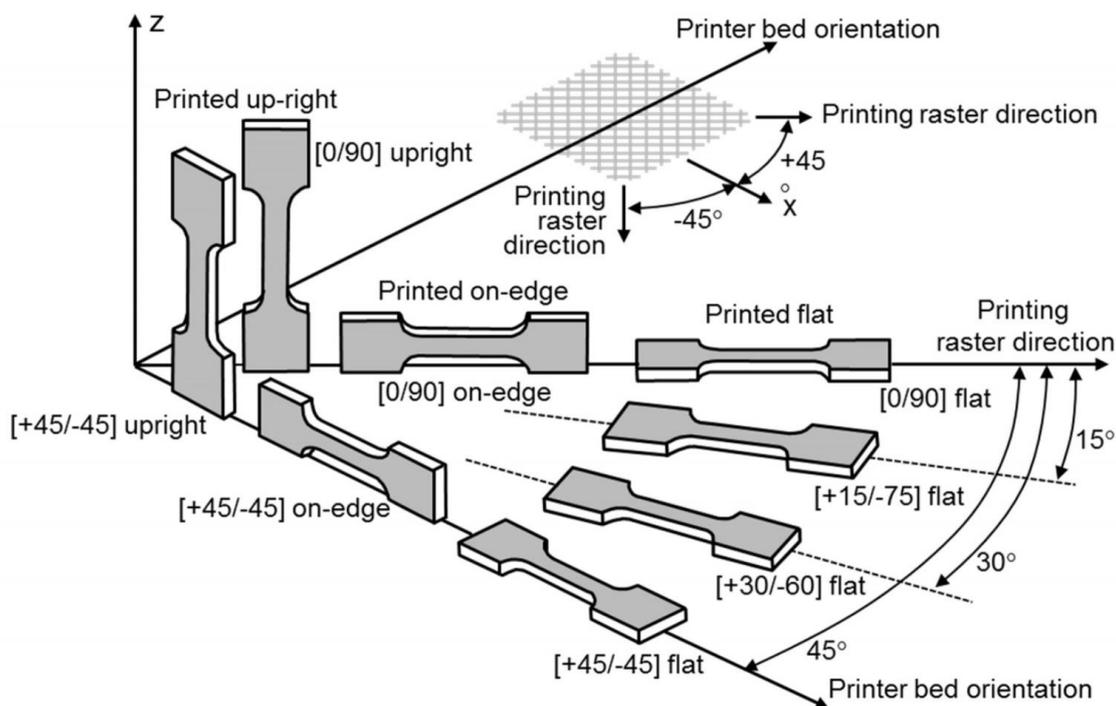
Il PLA è per lo più criticato a causa della sua bassa durabilità (< dell'ABS) in condizioni di temperature

molto elevate, ma ad una temperatura ambiente normale non si incorre in problematiche.

Nel caso dell'**ABS**, che ha una temperatura di applicazione maggiore (220-245°C), si possono verificare con più probabilità delle tensioni residue a causa di un rapido restringimento del polimero durante il processo di raffreddamento.

Si incorre così alla delaminazione di una parte del componente ancor prima che la stampa si sia conclusa o comunque anche in assenza di carichi applicati.

In tutti i test esaminati, i risultati che ne sono derivati descrivono (anche se con valori diversi) uno stesso comportamento sotto sforzo dei due polimeri e mirano a comprendere come alcuni fattori, a parità degli altri, influiscono maggiormente sulle capacità meccaniche del materiale stampato.



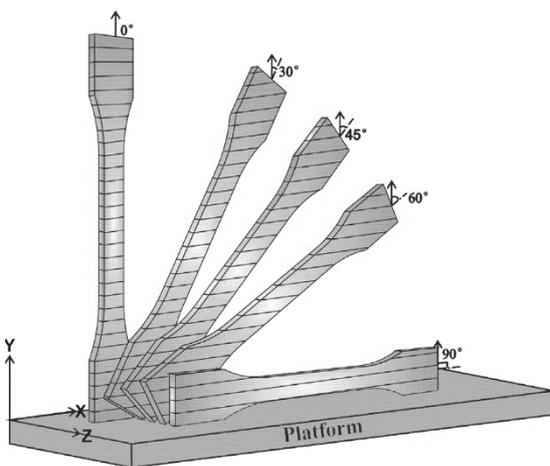
**Figura 24:** Rappresentazione degli orientamenti di stampa e raster orientation (CANTRELL, et al., 2016)

(1) Come possiamo evincere dallo studio (CANTRELL, et al., 2016), dove test fatti su diversi provini (dieci per ogni caso) in Policarbonato (PC) e ABS. Le varianti esaminate presentano, a parità di tutti gli altri fattori, quattro gradi di “infill orientation” sul piano XY ([+45/-45], [+30/-60], [+15/-75] e [0/90]), e tre differenti “orientation” (flat, on-edge, and up-right) [Figura 24].

Secondo la normativa ASTM D-638 “Standard Test Methods for Tensile Properties of Plastics” e ASTM D-5379 “Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method”, i provini di ABS hanno riscontrato una natura isotropa legata al rapporto di Poisson e al modulo di Young, ma una natura anisotropa confrontando la resistenza massima, la deformazione al cedimento e la deformazione della densità energetica dei campioni.

I risultati migliori si sono ottenuti con i campioni del tipo [+45/-45]-Flat e [0/90]-Flat che messi a confronto, il secondo presenta valori leggermente maggiori di Yield Strength (32.0 MPa), Ultimate Strength (33.5 MPa) e Breaking Strength (30.7 MPa).

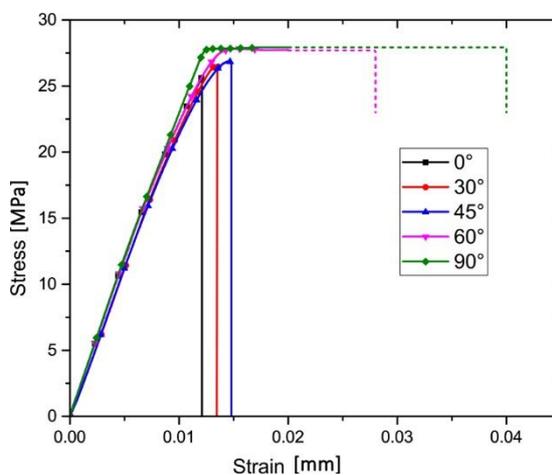
**A lato**  
**Figura 25:** Forza a trazione in relazione all'allungamento nella prova di tensione uniassiale; Le deformazioni a  $\theta > 60^\circ$  sono state approssimate in quanto superavano il valore dell'estensimetro. La deformazione limite di  $\theta = 90^\circ$  è maggiore di  $\theta = 60^\circ$  (ZOU, et al., 2016)



**Figura 26:** Vista schematica dell'orientamento di stampa dei provini (ZOU, et al., 2016)

(2) Risultati confermati anche dallo studio (ZOU, et al., 2016) in cui provini in ABS con diversi orientamenti dell'infill hanno mostrato (NB. in questo studio le modalità di stampa fanno sì che l'angolazione di  $90^\circ$  corrisponda alla situazione in cui l'infill è longitudinale all'applicazione della forza [Figura 26]) [Figura 25]:

- Il modulo elastico cambia leggermente in base agli angoli di stampa;
- I campioni si rompono poco dopo aver raggiunto il limite massimo e con una piccola deformazione plastica fino a  $\theta = 45^\circ$  ma che incrementa con  $\theta > 60^\circ$ ;
- La deformazione della plasticità aumenta quando l'angolo di stampa è  $\theta = 60^\circ$ ;
- L'allungamento dei campioni stampati con FDM aumenta con l'incremento dell'angolo di stampa;
- Il materiale di stampa in fase di deformazione plastica si comporta come un materiale elasto-plastico. La resistenza e l'allungamento del campione aumentano con l'incremento dell'angolo di stampa;
- Il valore massimo si è riscontrato con  $\theta = 90^\circ$  con resistenza a trazione pari a 28.02 MPa.



(3) Presso l'Università di Napoli Federico II lo studio (LANZOTTI, et al., 2015), seguendo la normativa ASTM D-638, ha testato provini in PLA in cui variassero lo spessore, l'orientamento dell'infill e il numero di perimetri.

I ricercatori hanno trovato opportuno modificare la geometria del provino in corrispondenza dei due profili laterali. Il provino originale della normativa sopracitata presenta, infatti, degli angoli arrotondati di rastremazione dalla sezione maggiore alla sezione inferiore. Per i valori di raggio di curvatura suggeriti dalla normativa, però, tali angoli presentano delle zone di alta concentrazione di stress in quanto, vi è una discretizzazione dei filamenti stampati. Questi difetti procurano un collasso precoce e di conseguenza risultati non soddisfacenti.

L'accortezza proposta dagli studiosi è di un **profilo parabolico continuo tangente alla sezione più corta** mantenendo le dimensioni originali del provino. Accortezza che migliora la disposizione dei filamenti stampati e garantisce la rottura del provino nella sezione centrale [Figura 27].

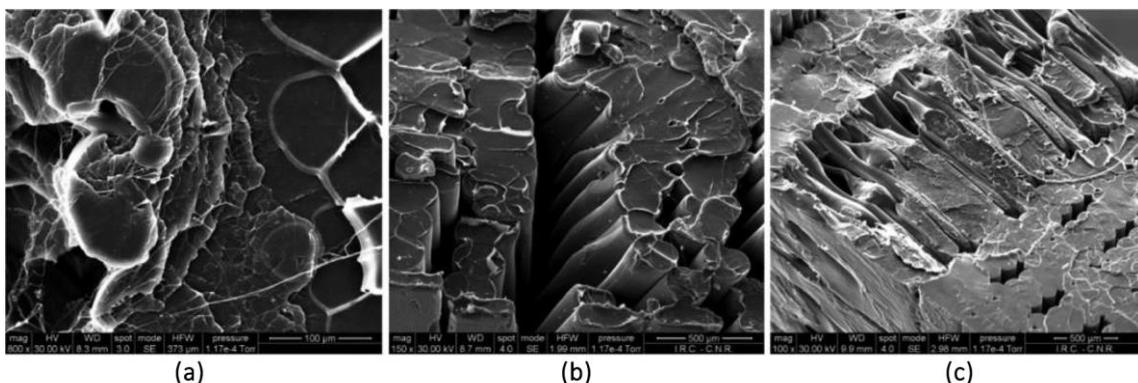
Dalle varie prove effettuate si è riscontrato che:

- Al diminuire dell'angolo dell'infill, la forza aumenta in modo maggiore rispetto all'aumentare

del "layer thickness";

- Aumentando il numero di perimetri, quando l'"infill orientation" è diverso da  $0^\circ$ , ha un effetto positivo sulla resistenza del provino in quanto, si hanno un numero maggiore di filamenti disposti longitudinalmente rispetto alla direzione di applicazione della forza;
- La resistenza a trazione aumenta con l'aumentare del "layer thickness" dovuto al fatto che un valore maggiore comporta un numero inferiore di layers per la medesima sezione del componente e di conseguenza minor probabilità di incorre in distorsioni.
- Il massimo valore ottenuto per UTS è di 55.6 MPa, con uno spessore di 0.15 mm, angolo  $\Theta=0^\circ$  e un numero di filamenti pari a 4. Un altro parametro che è utile monitorare è quello del modulo elastico E. Il valore massimo che si ottiene per esso è di 3.736 GPa (spessore=0.12 mm,  $\Theta=0^\circ$  e n° filamenti=3).

Ragionando sulla geometria del provino tipo proposto dalla normativa ASTM D-638, alcuni ricercatori si sono distaccati dal seguirla, preferendo la ASTM D-3039 nella quale il provino presenta una geometria più regolare (rettangolare).



**Nota:** Le viste al microscopio delle superfici di frattura di tre campioni testati, evidenziano il verificarsi dei fenomeni precedentemente descritti. Esistono piani di taglio con legame discontinuo tra le fibre (a). L'insufficienza duttile si verifica su piani diversi paralleli alle superfici di frattura, sfalsate l'una dall'altra. Nella figura (b) le fibre vengono tirate fino al loro restringimento e cedono successivamente con la rottura del materiale in corrispondenza del piano normale alla direzione del carico. L'orientamento del riempimento vicino a  $90^\circ$  riduce la resistenza e la rigidità, poiché parte del carico di trazione viene assorbito dalle superfici di legame tra le fibre, che sono più deboli e più soggette a frattura (c).

**Figura 27:** Superfici di frattura mediante immagini SEM: (a) Piani di rottura a taglio; (b) Vuoti all'interno dei filamenti dell'infill; (c) Frattura in corrispondenza delle fibre più deboli (LANZOTTI, et al., 2015)

(4) In (AHN, et al., 2002) viene riportato che i provini aventi geometria secondo ASTM D-638, anche se in ABS, tendevano a collassare prematuramente proprio a causa dell'eccessiva concentrazione delle forze in corrispondenza degli angoli arrotondati dovuta a irregolarità nella posa dei filamenti. I migliori risultati si sono ottenuti con:

- **Angolazione di tutti i layer a 0°**

Anche mettendo a confronto provini con layer sovrapposti aventi orientamenti opposti;

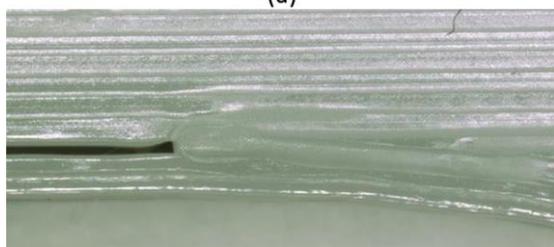
- **Air gap negativo (-0,0508 mm)**

Per migliorarne la resistenza e rigidità in quanto il componente presenta legami più forti.

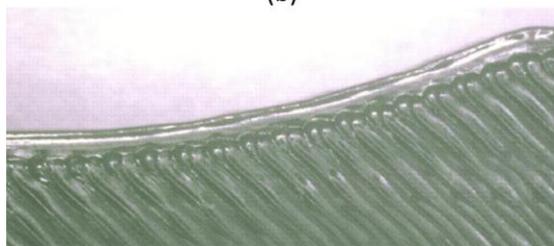
(5)



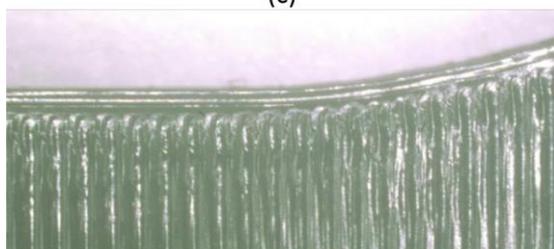
(a)



(b)



(c)



(d)

**Figura 28:** (a) Problemi di discontinuità agli angoli con orientamento dell'infill di 0°. (b) Vuoto tra il "guscio" esterno del campione e il corpo principale con orientamento dell'infill di 0°. (c) Vista radiale del provino con infill a 90°. (d) Vista radiale del provino con infill a 45° (LETCHER, et al., Dicembre 2014)

Interessanti risultati sono stati reperiti all'interno della sperimentazione (LETCHER, et al., Dicembre 2014) testando provini in PLA tramite tre tipologie di test conformi alle normative ASTM D-638, ASTM D-790 "Standard test method for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials" e PLA "Filament Tensile Testing", quest'ultimo test considera il singolo filamento senza essere stampato in una determinate forma.

- **Prova ASTM D-638**

Si evince che i provini con angolazione di 45° hanno ottenuto risultati migliori rispetto a quelli a 0° e 90°, con un valore medio di "Ultimate Stress" di 64.03 MPa, "Elongation at Break" 2.50% e "Modulus of Elasticity" 3.60 GPa;

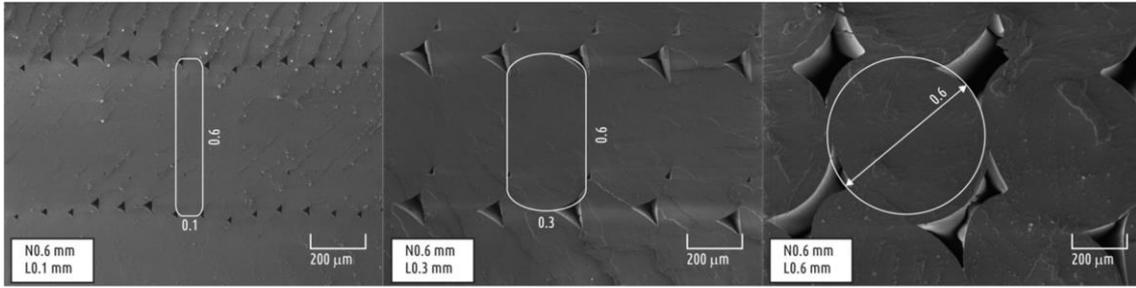
- **Prova ASTM D-790**

I risultati migliori si sono ottenuti con provini aventi angolazione 0° ma poco differenti da quelli a 45°, con un valore medio di "Ultimate Stress" di 102.203 MPa prima dell'avvenuta rottura;

- **PLA Filament Tensile Testing**

Ha mostrato risultati simili ai risultati dei campioni stampati, da tali valori possiamo dedurre che i lavori di stampa falliti possono essere riciclati in un nuovo filamento per essere nuovamente stampati senza perdita di proprietà.

Inoltre, le valutazioni al microscopio [Figura 28] hanno permesso di determinare le dimensioni degli spazi lasciati nei campioni dal processo di stampa (181.47µm). Spazi riscontrati nelle zone curve del provino soprattutto in quelli a 0°, dove si è verificato il distacco del filo esterno (non contribuendo attivamente al test), mentre con le angolazioni di 45° e 90° questo tipo di difetti non si verificano.



**Figura 29:** Trasformazione di una sezione trasversale al crescere del layer thickness: sovrapposizione del profilo idealizzato all'immagine SEM (KUZNETSOV, et al., 2018)

(6) Basandosi sul fatto che l'efficacia dei legami tra i vari filamenti, gestibile tramite il settaggio della stampante, sia il fattore determinante sulle capacità del provino e non solamente la resistenza del materiale stesso che va a costituire il filamento, anche lo studio (KUZNETSOV, et al., 2018) propone la normativa ASTM D-790 come procedimento per comprendere più a fondo le capacità di un elemento stampato con tecnologia FDM, rispetto alla prova a trazione descritta nella D-638. Questo perché nella prova a trazione i carichi vengono applicati lungo il piano XY di giacitura dei filamenti, in cui il provino presenta maggiore resistenza rispetto all'asse Z (come già dimostrato: più la condizione  $\theta=0^\circ$  è garantita più si ottengono migliori risultati). Così per studiare maggiormente i legami che si instaurano tra i diversi layers e di conseguenza migliorarne le performance, si è trovato più opportuno applicare la forza lungo il piano Z come avviene nella prova a flessione per "tre punti" (ASTM D-

790). Per tale scopo sono stati testati provini in PLA cavi, con sezione rettangolare (10x20 mm) e angoli arrotondati di raggio 2 mm e una lunghezza totale di 150 mm. Lo spessore della parete di involucro è di 2.4 mm stampato con tre diversi spessori di filamento (0.4; 0.6; 0.8 mm) e il rispettivo numero di perimetri (6, 4, 3) [Figura 29]. La giacitura del provino è con la base minore sul piano XY e la dimensione 150 sull'asse Z.

Dalle prove si è riscontrato che [Figura 30]:

- Lo spessore del layer influenza sulla coesione intra-strato. Con l'aumentare dello spessore del layer, per tutti gli ugelli esaminati, si ha una diminuzione della forza di 3.5 volte;
- Con uno spessore del layer costante la stampa con ugello maggiore ha dimostrato, seppur di poco, più alte capacità meccaniche (0.8mm-70.7 MPa; 0.6mm-68.0 MPa; 0.4mm-67.8 MPa).

**Nota:** Il seguente diagramma a dispersione nel sistema di coordinate UFS/(N/L) mostra che tutte le osservazioni possono essere rappresentate da una singola curva. La curva, che adatta i dati sperimentali con adeguata precisione, può essere rappresentata dalla formula:

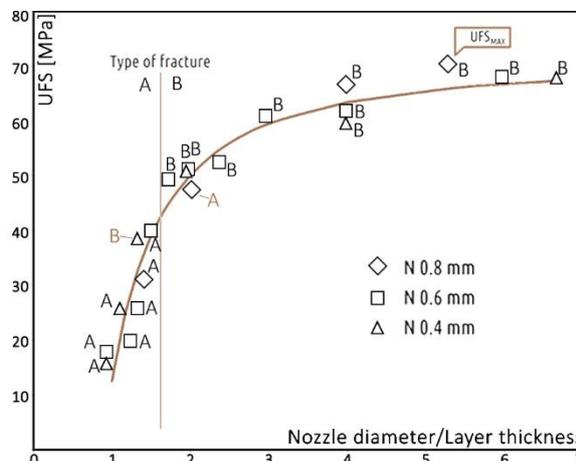
$$UFS = UFS_{MAX} - 58.19 / (r^{1.5})$$

Dove ( $UFS_{MAX}$ ) è il massimo UFS osservato nell'esperimento, ( $r$ ) è il rapporto tra il diametro ugello e altezza dello strato e ( $UFS$ ) è la forza risultante della parte.

Questa formula è stata ottenuta utilizzando l'approccio di adattamento della curva con l'implementazione del pacchetto Scikit-learn in Python come risultato dell'ottimizzazione per la seguente formula:

$$UFS = a - b / (r^c)$$

Il rapporto (N/L) non solo determina la resistenza della parte quantitativamente, ma anche qualitativamente. Il valore del rapporto di circa 1,6 divide tutte le osservazioni (tranne due valori anomali contrassegnati con il colore rosso) in due tipi di rottura: attraverso i layer (A) e nello spessore (B).



**Figura 30:** Grafico che mette in relazione l'UFS (Ultimate Flexural Strength) con il rapporto tra il diametro dell'ugello e lo spessore del layer (KUZNETSOV, et al., 2018)

### 3.3.3.1. CONSIDERAZIONI

Dai vari studi, anche se condotti alcuni sul filamento di PLA e altri sul filamento ABS, possiamo elaborare una serie di considerazioni generali atti a migliorarne le performance dei provini da studiare per ottenere dei risultati il più attendibili possibile. In primis, ciò che emerge è il fatto che non vi è ancora una normativa specifica da seguire sulla quale basarsi per testare tali elementi stampati con tecnologia FDM. Come si può notare, diversi studi hanno riscontrato delle problematiche nel seguire determinate normative che hanno portato alcuni di loro ad apportare delle modifiche al provino stesso affinché potesse essere sottoposto agli standard già in uso. Altri, hanno optato per utilizzare diverse tipologie di prove meccaniche per mettere in evidenza le diverse declinazioni del comportamento del materiale una volta stampato.

La prova meccanica più utilizzata è quella descritta nella normativa ASTM-D638 *“Standard Test Methods for Tensile Properties of Plastics”* che prevede la prova a trazione di provini a forma di clessidra, oppure l’analoga prova a trazione secondo la normativa ASTM-D3039 *“Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials”* nella quale varia la geometria del campione da testare. Le altre normative utilizzate con le relative prove meccaniche sono: a flessione come nelle normative ASTM-D790 *“Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials”* e ISO-R178 *“Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials”*, a taglio con la ASTM-D5379 *“Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-*

*Notched Beam Method”* e ad impatto come nella ISO-179 *“Standard Test Method for Charpy impact strength of plastics”*.

Nei vari studi, tra tutti i fattori caratterizzanti la stampa quelli che sono stati presi in esame, perché considerati tra i più influenti sulle proprietà meccaniche del provino in quanto al loro variare queste presentavano valori molto diversi, sono: *“Orientation”*, *“Layer Thickness”*, *“Nozzle Diameter”*, *“Raster Degree”* e *“AirGap”*. Ciò che è emerso è:

- La resistenza a trazione maggiore si è ottenuta per la maggior parte dei casi con i filamenti orientati lungo la direzione di applicazione della sollecitazione ( $\theta=0^\circ$ ). All’aumentare di tale angolo le proprietà meccaniche peggiorano gradualmente con valori più bassi a  $\theta=90^\circ$ . Nel caso del PLA si è ottenuto però con  $\theta=45^\circ$  valori poco dissimili rispetto all’angolazione di  $0^\circ$  e per questo si suggerisce di approfondire con ulteriori studi (LETCHER, et al., Dicembre 2014);
- La geometria del provino può influire sulla buona riuscita del test in quanto il provino FDM, non essendo omogeneo, può presentare in particolari zone “scomode” delle irregolarità di stesura del materiale che provocano, una volta sollecitate, distaccamenti e conseguente collasso prematuro del provino. Forme più regolari o angoli con raggi di curvatura maggiori sono preferibili per evitare tali situazioni soprattutto con angolazioni dell’infill  $\theta=0^\circ$ ;
- La combinazione tra i valori di *“layer thickness”* e *“nozzle diameter”* modificano in modo sensibile la resistenza meccanica del provino. Con valori maggiori di ugello si hanno meno layer e minor possibilità di imperfezioni durante la fase di stesura che potrebbero compromettere il test.

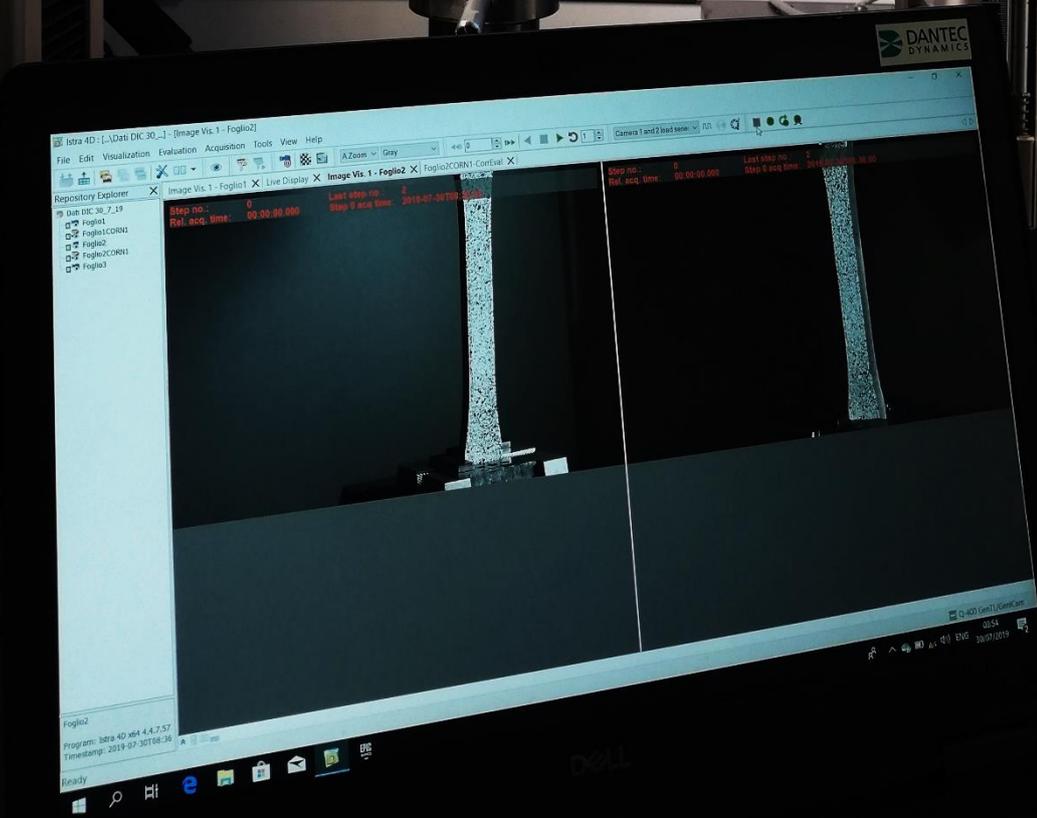
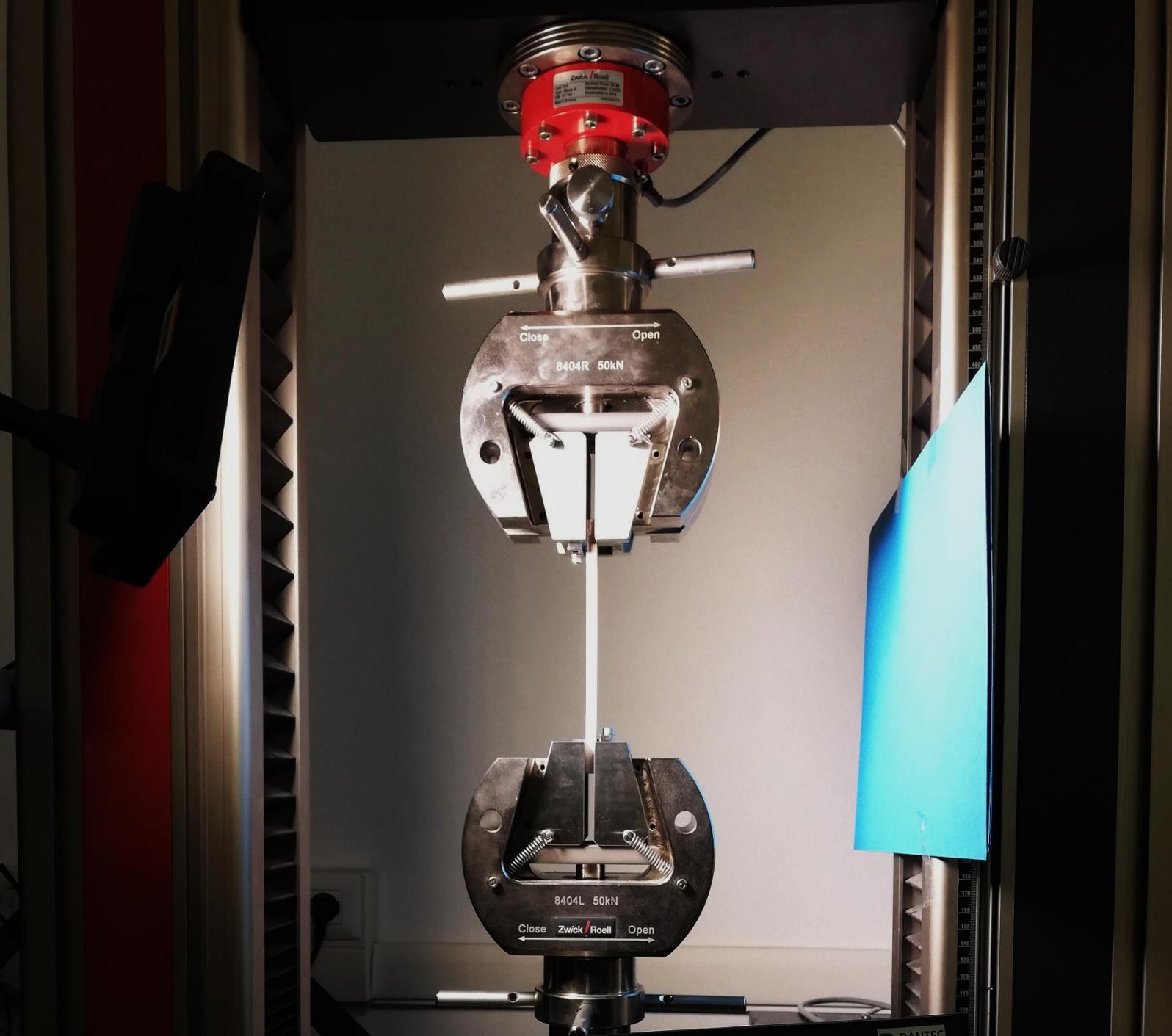
Inoltre, un valore di “*layer thickness*” basso facilita la coesione tra i vari filamenti che è fondamentale per ottenere dei risultati di resistenza migliori. Tuttavia, vi sono dei limiti nell’esecuzione degli strati e per questo motivo lo spessore non può eccedere gli 0.5 mm. Lo spessore ideale di uno strato è nell’ordine dei 0.2 mm;

- Di conseguenza, meno porosità residue sono presenti all’interno del provino, maggiori saranno le caratteristiche meccaniche;
- Riguardo il fattore di “*AirGap*”, ovvero lo spazio che intercorre tra un filamento e l’altro (strettamente legato alla densità del materiale nel

provino), si è riscontrato che è preferibile un valore leggermente negativo per favorire la coesione tra i vari filamenti.

Per far fronte a richieste performative maggiori, soprattutto legate a campi di applicazione di tipo industriale, tali matrici polimeriche sono state legate con fibre di rinforzo di tipo artificiale ma anche di tipo naturale.

Tali combinazioni portano ad un miglioramento delle proprietà meccaniche in modo tale da ottenere le caratteristiche desiderate in una o nell’altra direzione (TORRADO PEREZ, et al., 2014).



## 4. TEST MECCANICI

---

Per venire a conoscenza delle effettive capacità meccaniche del bio-polimero HBP®-HempBioPlastic e se queste sono coerenti con un possibile impiego in campo edilizio come materiale portante, è indispensabile testare tale composito in prove meccaniche in laboratorio.

La fase sperimentale verte su tali prove, più nello specifico, si è scelto il test a trazione basandosi sulle esperienze condotte negli studi esplicitati precedentemente.

Per effettuare i test della prova sperimentale, si è dovuto scegliere la normativa più consona e le caratteristiche che dovessero avere i provini una volta stampati in 3D.

In secondo luogo, si è proceduto alla prova pratica dei test portando a rottura tutti i provini testati. Infine, i dati ricavati mediante il software del macchinario sono stati analizzati ed elaborati utilizzando i fogli di calcolo.

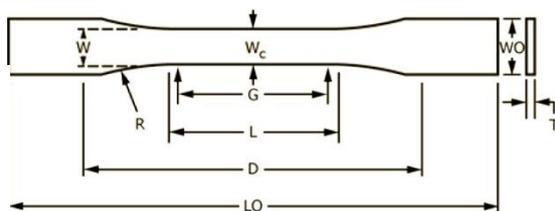
**Immagine di copertina:**

Dettaglio della postazione di lavoro per il testaggio dei provini in HBP® con strumentazione DIC, Politecnico di Torino  
*Foto: @Federico Ciaccio*

## 4.1. METODO SPERIMENTALE

Come affermato da (KUZNETSOV, et al., 2018), non vi sono ancora normative specifiche per testare provini prodotti con la tecnologia FDM. Tenendo conto di tale condizione e basandosi sulle esperienze condotte da altri gruppi di ricerca, si è deciso di seguire come normativa la ASTM-D638 per la tipologia di test da effettuare.

**Figura 31:** Schema delle dimensioni dei provini (ASTM-D638\_14, 2014)



TEST SPECIMENS GEOMETRY (SEE DRAWING)		[mm]
<b>W</b>	- Width of narrow cross section	13.00
<b>L</b>	- Length of narrow cross section	57.00
<b>WO</b>	- Overall width	19.00
<b>LO</b>	- Overall length	165.00
<b>G</b>	- Gauge length c	50.00
<b>D</b>	- Distance between clamps	115.00
<b>R*</b>	- Rounding-off radius	141.67
<b>T</b>	- Thickness	7.00

**Tabella 8:** Dimensioni dei provini testati (ASTM-D638\_14, 2014)

### 4.1.1. PRODUZIONE DEI CAMPIONI

In accordo con la normativa ASTM-D638, vi sono 5 tipologie di provino con caratteristiche dimensionali differenti. La tipologia di provino scelto è la "Type I", adatto nel caso in cui si desidera testare provini con uno spessore fino a 7 mm.

Le dimensioni del provino tipo sono mostrate nella [Tabella 8] e relativa [Figura 31]. Il fattore (R) è contrassegnato con un asterisco (\*), in quanto da normativa presenta un valore troppo basso che comporta le medesime problematiche evidenziate nei casi studi (AHN, et al., 2002) e (LANZOTTI, et al., 2015). Così, si è proposto un profilo parabolico, continuo e tangente alla sezione più corta mantenendo le

dimensioni originali del provino. L'azienda italiana ragusana <sup>®</sup>Kanèsis ha prodotto in "HBP<sup>®</sup> for 3d-printing" (code: PLA A/17 NAT), utilizzando la stampante del tipo TEVO (modello: TORNADO), numero 5 provini dello stesso tipo per ogni variazione fatta su quello di partenza (ASTM-D638\_14, 2014), per un totale di 35 provini.

La [Tabella 9], della pagina seguente, riassume le caratteristiche fisiche e di stampaggio di ciascun provino testato. In generale i provini presentano 2 strati perimetrali per ogni faccia e le caratteristiche del filamento estruso rimangono invariate per tutte le stampe.

Ogni provino prima di essere testato è stato misurato, per accertarsi che le misure fossero concordi alla normativa, e pesati. In questo modo è stato possibile ricavare la densità di ogni campione.

I due fattori variabili hanno portato alla definizione di 7 classi di provini differenti, denominati con le lettere dalla A alla G. I due parametri caratterizzanti scelti in vista della progettazione del modulo espositivo, sono:

- **Orientation**

L'orientamento base dei campioni sul piano di stampa XY è fissato a 0° per tutte le serie di provini, a differenza della classe B in cui per avere un infill con direzioni 45°/-45°, si sono orientati i campioni di 45°;

- **Raster Configuration**

Caratteristica che denota la configurazione della struttura interna del provino. Riguardo a tale variabile sono state scelte le più interessanti da indagare per ogni tipologia di struttura interna (Struttura 2D; Struttura 3D).

I fattori variabili sono stati scelti per capire quanto, effettivamente, la modalità di stampa e la giacitura dei filamenti nel piano XYZ influiscono sulla resistenza dell'elemento e in che modo.

L'orientamento sul piano di stampa XY del filamento varia solamente per il caso di "*Raster Configuration*" (struttura interna) di tipo "lines" (45°) mentre per tutte le altre tipologie di struttura l'orientamento è analogo. Come già detto, sono state scelte delle strutture interne di diversa natura e conformazione, di seguito descritte brevemente e mostrate in [Figura 32]:

- **Strutture 2D**

Rientrano in questa categoria quelle strutture in cui i vari layer con texture differenti vengono sovrapposti perfettamente senza alcune variazione dell'"*air gap*" tra un livello e l'altro. Ogni strato si differenzia dall'altro, solamente, per una direzione di stampa opposta a quella precedente;

- **Lines (linee)**

La texture di ogni layer si forma con la giustapposizione dei vari filamenti con un "*air gap*" negativo, fino ad occupare tutta la superficie del provino. Ogni livello ha una rotazione sul piano di un angolo di 90°;

- **Grid (griglia)**

La concezione è la medesima della precedente, ma in questo caso la struttura presenta una texture a griglia quadrata dovuta ad un allontanamento dei singoli filamenti di una certa distanza;

- **Tri-Hexagon (Triangoli ed esagoni)**

Il riempimento è caratterizzato da una struttura formata da esagoni e triangoli. Questo

avviene perché l'angolo di rotazione sul piano dei layer è di 60° e le due texture aventi orientamenti differenti hanno anche una leggera traslazione sul piano XY;

- **Triangles (Triangoli)**

Struttura concepita con le stesse fattezze della precedente ma non avendo la traslazione sul piano XY, le due texture formano triangoli equilateri;

- **Strutture 3D**

Si differenziano dalle precedenti perché ogni layer presenta una texture con un "*air gap*" differente da quello precedente. Così, si viene a concepire una struttura più articolata lungo l'asse Z che possiamo definire tridimensionale.

- **Cube (Cubo)**

Come concezione si rifà alla struttura della "*Tri-Hexagon*" ma con una variazione dell'"*air gap*" andando a formare una struttura a celle chiuse;

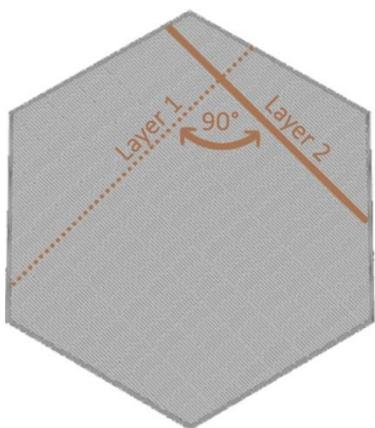
- **Octagonal (Ottagonale)**

Questa struttura tridimensionale, invece, si basa sulla costruzione della struttura "*Grid*" ma anche in questo caso la variazione dell'"*air gap*" lungo l'asse Z produce una struttura alveolare interna.

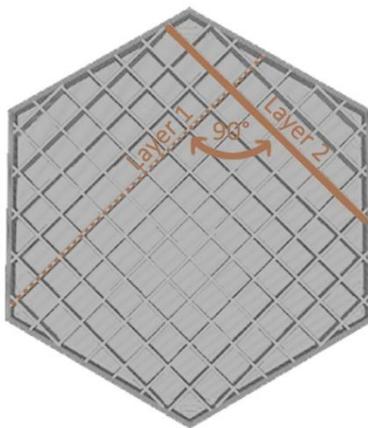
Dalle misurazioni effettuate la struttura che produce, a parità di tutti gli altri fattori, un provino più leggero è la "*Grid*" (categoria C), con una densità media di 630.10 Kg/m<sup>3</sup>.

Viceversa, la serie di provini aventi un peso maggiore sono quelli appartenenti alla categoria E, con un valore medio di 833.28 Kg/m<sup>3</sup>.

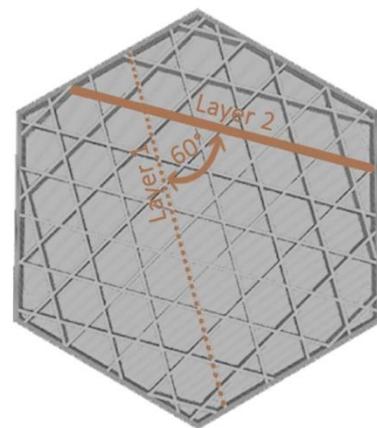
n°		PHYSICAL CHARACTERISTICS					Orientation [degree]	Layer height [mm]	Nozzle diameter [mm]	Filament diameter [mm]	Infill [%]	
		Weight [g]	Weight [kg]	Cross section [m2]	Volume [m3]	Density [Kg/m3]						
2D STRUCTURE	A	1	12,032	0,012	9,04E-05	1,78E-05	676,13	0	0,20	0,80	1,75	100
		2	12,038	0,012	9,04E-05	1,78E-05	676,46	0	0,20	0,80	1,75	100
		3	11,994	0,012	9,04E-05	1,78E-05	673,99	0	0,20	0,80	1,75	100
		4	11,950	0,012	9,04E-05	1,78E-05	671,52	0	0,20	0,80	1,75	100
		5	11,860	0,012	9,04E-05	1,78E-05	666,46	0	0,20	0,80	1,75	100
		Media					672,91					
	Standard deviation					4,11						
	B	6	11,876	0,012	9,04E-05	1,78E-05	667,36	45	0,20	0,80	1,75	100
		7	11,954	0,012	9,04E-05	1,78E-05	671,74	45	0,20	0,80	1,75	100
		8	11,542	0,012	9,04E-05	1,78E-05	648,59	45	0,20	0,80	1,75	100
		9	11,759	0,012	9,04E-05	1,78E-05	660,78	45	0,20	0,80	1,75	100
		10	11,607	0,012	9,04E-05	1,78E-05	652,24	45	0,20	0,80	1,75	100
		Media					660,14					
	Standard deviation					9,78						
	C	11	10,870	0,011	9,04E-05	1,78E-05	610,83	0	0,20	0,80	1,75	25
		12	11,194	0,011	9,04E-05	1,78E-05	629,04	0	0,20	0,80	1,75	25
		13	11,347	0,011	9,04E-05	1,78E-05	637,63	0	0,20	0,80	1,75	25
		14	11,320	0,011	9,04E-05	1,78E-05	636,12	0	0,20	0,80	1,75	25
		15	11,334	0,011	9,04E-05	1,78E-05	636,90	0	0,20	0,80	1,75	25
		Media					630,10					
	Standard deviation					11,31						
	D	16	14,186	0,014	9,04E-05	1,78E-05	797,17	0	0,20	0,80	1,75	88
		17	13,702	0,014	9,04E-05	1,78E-05	769,97	0	0,20	0,80	1,75	88
		18	13,736	0,014	9,04E-05	1,78E-05	771,88	0	0,20	0,80	1,75	88
		19	14,131	0,014	9,04E-05	1,78E-05	794,08	0	0,20	0,80	1,75	88
20		14,074	0,014	9,04E-05	1,78E-05	790,87	0	0,20	0,80	1,75	88	
Media						784,79						
Standard deviation					12,87							
E	21	14,951	0,015	9,04E-05	1,78E-05	840,16	0	0,20	0,80	1,75	88	
	22	14,941	0,015	9,04E-05	1,78E-05	839,59	0	0,20	0,80	1,75	88	
	23	14,888	0,015	9,04E-05	1,78E-05	836,62	0	0,20	0,80	1,75	88	
	24	14,762	0,015	9,04E-05	1,78E-05	829,54	0	0,20	0,80	1,75	88	
	25	14,601	0,015	9,04E-05	1,78E-05	820,49	0	0,20	0,80	1,75	88	
	Media					833,28						
Standard deviation					8,31							
3D STRUCTURE	F	26	13,916	0,014	9,04E-05	1,78E-05	782,00	0	0,20	0,80	1,75	88
		27	14,045	0,014	9,04E-05	1,78E-05	789,24	0	0,20	0,80	1,75	88
		28	13,974	0,014	9,04E-05	1,78E-05	785,25	0	0,20	0,80	1,75	88
		29	14,033	0,014	9,04E-05	1,78E-05	788,57	0	0,20	0,80	1,75	88
		30	14,190	0,014	9,04E-05	1,78E-05	797,39	0	0,20	0,80	1,75	88
		Media					788,49					
	Standard deviation					5,75						
	G	31	11,298	0,011	9,04E-05	1,78E-05	634,88	0	0,20	0,80	1,75	60
		32	11,660	0,012	9,04E-05	1,78E-05	655,22	0	0,20	0,80	1,75	60
		33	11,438	0,011	9,04E-05	1,78E-05	642,75	0	0,20	0,80	1,75	60
		34	11,262	0,011	9,04E-05	1,78E-05	632,86	0	0,20	0,80	1,75	60
		35	11,573	0,012	9,04E-05	1,78E-05	650,33	0	0,20	0,80	1,75	60
		Media					643,21					
	Standard deviation					9,64						



A-B: Lines



C: Grid



D: Tri-Hexagon



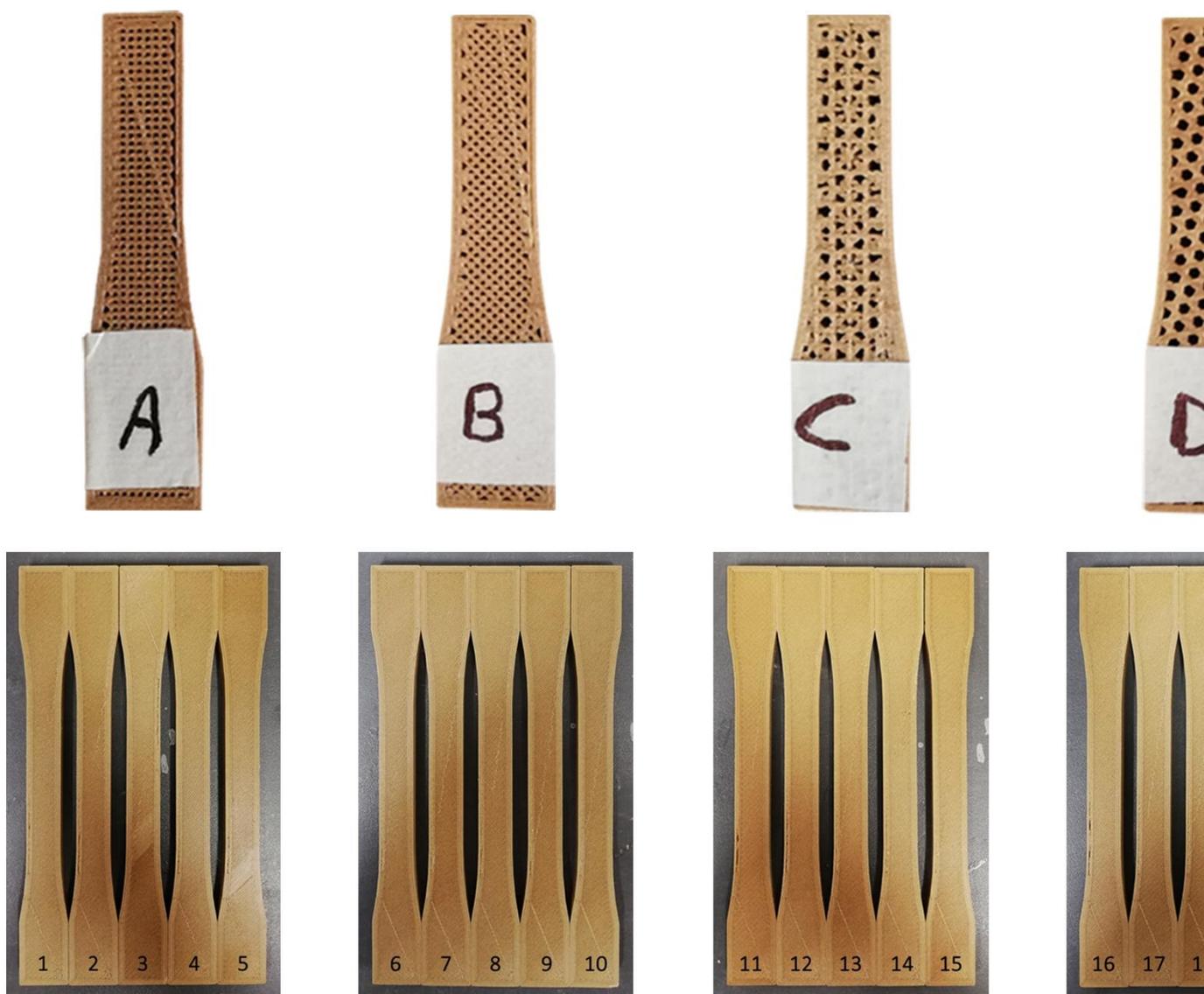
### 4.1.2. PROVA MECCANICA

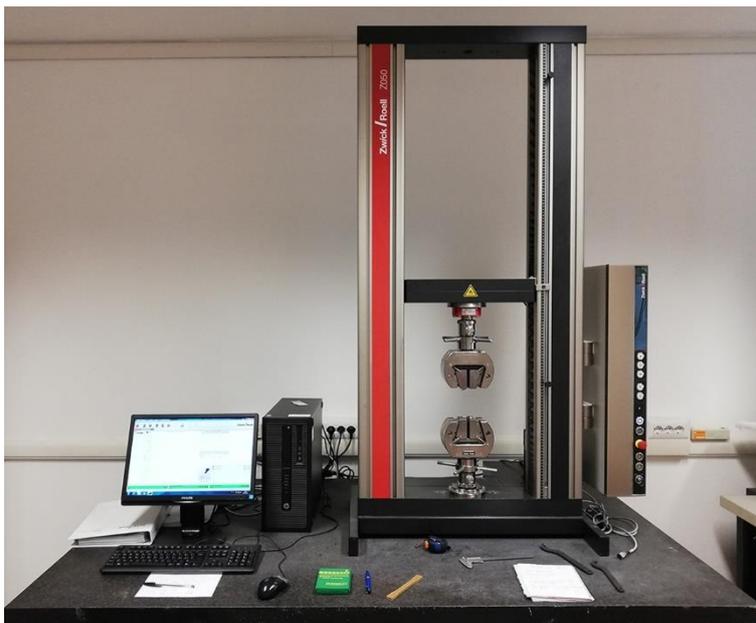
I provini sono stati testati presso il laboratorio del DISEG (Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica) del Politecnico di Torino [Figura 33]. L'ambiente è stato mantenuto, secondo normativa (ASTM-D638\_14, 2014), ad una temperatura costante di 23°C e un'umidità del 50%. Le prove sono state condotte con il macchinario ZWICK/Roell-Z050 ad una velocità costante di applicazione della forza di 5 mm/min. Per una buona parte dei provini testati è stata utilizzata la strumentazione DIC System Q-400 (Dantec Dynamics A/S) e sono state

effettuate delle riprese della fase di rottura utilizzando una GoPro-HERO5 con un'acquisizione di immagini di 200 fps.

I provini presentano una superficie liscia (a contatto col piano di stampa) caratterizzata da due linee di filamento oblique e una superficie leggermente più ruvida. Durante la sperimentazione sono stati testati, portandoli a rottura, 27 provini su un totale di 35 prodotti [Figura 34].

Il loro posizionamento all'interno delle morse prevede un "grip" (presa) di 2 cm per parte e con la superficie liscia rivolta verso destra e la linea obliqua più corta collocata in basso [Figura 35].





**Figura 34:** Postazione di lavoro per il testaggio dei provini in HBP®, Politecnico di Torino  
Foto: ©Federico Ciaccio

**Figura 35:** Particolare relativo al posizionamento del provino all'interno delle ganasce  
Foto: ©Federico Ciaccio



**Figura 33:** Sequenza di immagini raffiguranti le diverse categorie di provini  
Foto: ©Federico Ciaccio

## 4.2. RISULTATI E DISCUSSIONE

In base ai fattori precedentemente elencati, per i quali si sono ottenuti 7 tipologie di provini differenti, sono stati ottenuti i risultati dei provini sollecitati a trazione fino a rottura avvenuta.

Le curve sforzo/deformazione, registrate dal software del macchinario per ogni provino, sono state suddivise in base alla categoria di appartenenza. In seguito, per ogni serie è stata tracciata la curva media e quest'ultime sono state messe a confronto in un unico grafico [Figura 39; Figura 40; Figura 41; Figura 42; Figura 43; Figura 44; Figura 45].

Dai valori di carico applicato e delle differenze di lunghezza ( $\Delta L$ ) in seguito alla deformazione, entrambi registrati nel punto di "Yield stress" e nel punto di rottura (break), ci si è potuto ricavare i valori richiesti dalla normativa (ASTM-D638\_14, 2014):

- **Tensile Strength ( $\sigma_t$ )**

Rappresenta il carico di rottura del materiale oltre al quale il esso stesso diventa inefficace in termini di resistenza. Si calcola dividendo il carico massimo sostenuto ( $F_{max}$ ) per la superficie della sezione minima originaria del provino ( $S_{cs}$  – Surface Cross Section).

$$\sigma_t = \frac{F_{max}}{S_{cs}} [MPa];$$

- **Percent Elongation at Yield ( $P_{eY}$ )**

È la percentuale di allungamento nel punto di snervamento del provino. Si calcola dividendo l'allungamento nel punto di snervamento ( $\Delta L_Y$ ) per la lunghezza iniziale ( $L_i$ ) e moltiplicando tutto per 100.

$$P_{eY} = 100 \cdot \left( \frac{\Delta L_Y}{L_i} \right) [\%];$$

- **Percent Elongation at Break ( $P_{eB}$ )**

È la percentuale di allungamento nel punto di

rottura del provino. Si calcola dividendo l'allungamento nel punto di rottura ( $\Delta L_B$ ) per la lunghezza iniziale ( $L_i$ ) e moltiplicando tutto per 100.

$$P_{eB} = 100 \cdot \left( \frac{\Delta L_B}{L_i} \right) [\%];$$

Per ciascuno di questi valori è stata calcolata:

- **La media aritmetica ( $\bar{X}$ )**

È il valore medio tra tutti i valori osservati.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=0}^n X_i}{n};$$

- **La deviazione standard ( $s$ )**

Rappresenta la stima della variabilità di una serie di valori intorno alla media dei valori.

$X$  = valore della singola osservazione;

$n$  = numero delle osservazioni;

$\bar{X}$  = media aritmetica dei valori osservati.

$$s = \sqrt{\frac{(\sum X^2 - n\bar{X}^2)}{(n-1)}};$$

### 4.2.1. ANALISI DEI RISULTATI

Tutti i risultati sono stati riportati, riassumendoli, nella [Tabella 10] e nel grafico in [Figura 36]

Le curve riportate sono molto simili tra loro a parte qualche scivolamento del provino all'interno delle morse che hanno provocato degli artefatti nella prova. In ogni caso il comportamento del materiale sollecitato a trazione si presenta uniforme a tutte le serie di provini anche se con valori di resistenza e deformazione differenti.

Il campione che ha registrato il risultato maggiore per quanto riguarda alla resistenza a trazione, è l'F2(27) con 1.36E+07 MPa, mentre il provino con maggiore deformazione, tolto l'F4(29) a causa della presenza di artefatti, è l'F5(30) con una deformazione di 2.44 mm a rottura avvenuta.

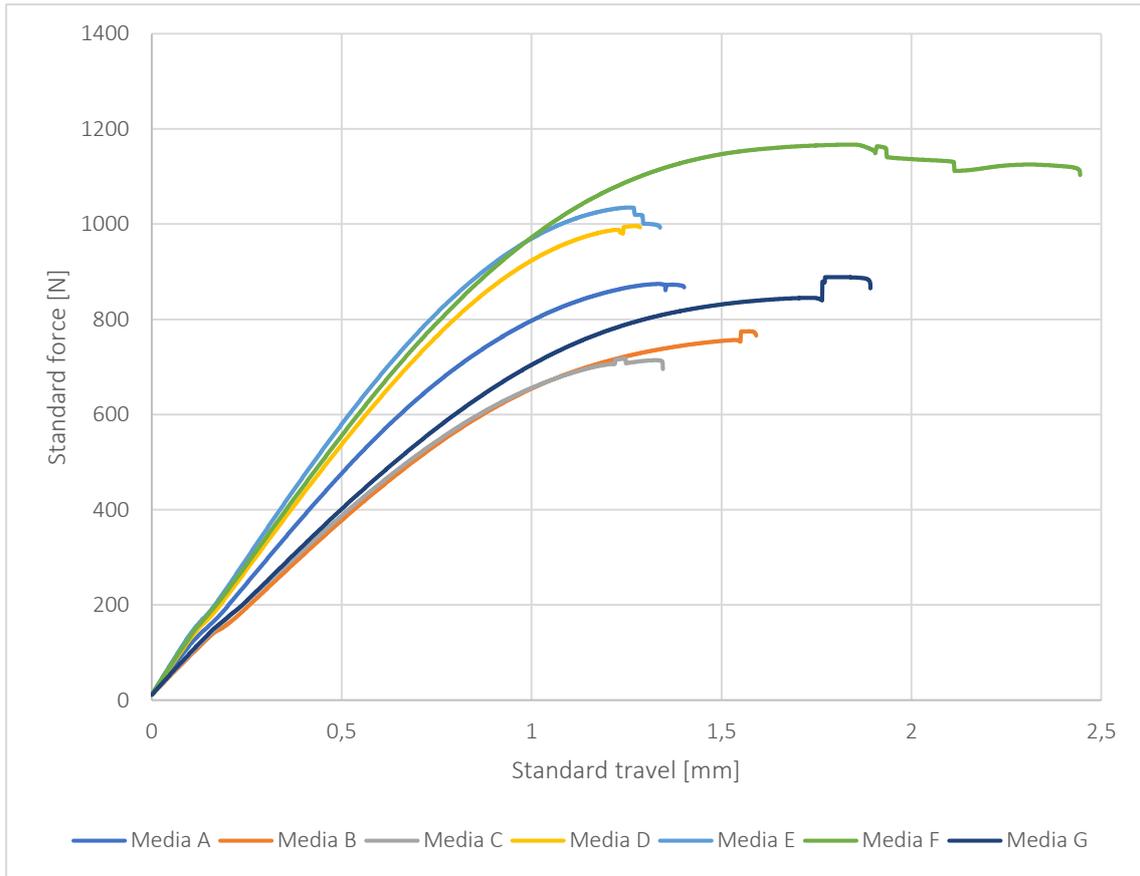


Figura 36: Grafico di comparazione tra le curve medie di sforzo/deformazione di ogni categoria di provini

n°	RESULTS										
	F <sub>max</sub> [N]	F <sub>break</sub> [N]	dL at F <sub>max</sub> at Yield point [m]	All. Break [m]	L <sub>max</sub> at Yield point [m]	L <sub>max</sub> at Break [m]	TENSILE STRENGTH [MPa]	PERCENT ELONGATION AT YIELD [%]	PERCENT ELONGATION AT BREAK [%]		
2D STRUCTURE	A	1	8,43E+02	8,25E+02	1,54E-03	1,58E-03	1,665E-01	1,666E-01	9,33E+06	0,93	0,96
		2	8,85E+02	8,39E+02	1,29E-03	1,35E-03	1,663E-01	1,663E-01	9,79E+06	0,78	0,82
		3	9,24E+02	9,05E+02	1,33E-03	1,40E-03	1,663E-01	1,664E-01	1,02E+07	0,81	0,85
	Media s					1,66E-01	1,66E-01	9,78E+06	0,84	0,88	
	B	6	7,52E+02	7,46E+02	1,60E-03	1,61E-03	1,666E-01	1,666E-01	8,33E+06	0,97	0,97
		7	7,99E+02	7,79E+02	1,56E-03	1,59E-03	1,666E-01	1,666E-01	8,85E+06	0,94	0,96
		8	7,23E+02	7,11E+02	1,52E-03	1,55E-03	1,665E-01	1,665E-01	8,00E+06	0,92	0,94
	Media s					1,67E-01	1,67E-01	8,39E+06	0,95	0,96	
	C	11	7,38E+02	7,38E+02	1,25E-03	1,25E-03	1,662E-01	1,662E-01	8,17E+06	0,76	0,76
		12	6,85E+02	6,81E+02	1,20E-03	1,22E-03	1,662E-01	1,662E-01	7,58E+06	0,73	0,74
		13	7,40E+02	7,04E+02	1,33E-03	1,34E-03	1,663E-01	1,663E-01	8,19E+06	0,81	0,81
	Media s					1,663E-01	1,664E-01	7,61E+06	0,81	0,82	
	D	16	1,02E+03	1,02E+03	1,35E-03	1,38E-03	1,663E-01	1,664E-01	1,13E+07	0,82	0,83
		17	9,76E+02	9,68E+02	1,26E-03	1,29E-03	1,663E-01	1,663E-01	1,08E+07	0,76	0,78
		18	1,01E+03	1,00E+03	1,21E-03	1,23E-03	1,662E-01	1,662E-01	1,11E+07	0,73	0,75
Media s					1,662E-01	1,662E-01	1,07E+07	0,74	0,75		
E	21	1,05E+03	1,04E+03	1,36E-03	1,41E-03	1,664E-01	1,664E-01	1,16E+07	0,83	0,86	
	22	1,08E+03	1,05E+03	1,24E-03	1,27E-03	1,662E-01	1,663E-01	1,20E+07	0,75	0,77	
	23	1,06E+03	1,05E+03	1,27E-03	1,29E-03	1,663E-01	1,663E-01	1,17E+07	0,77	0,78	
Media s					1,663E-01	1,663E-01	1,06E+07	0,76	0,81		
3D STRUCTURE	F	26	1,17E+03	1,09E+03	1,85E-03	1,89E-03	1,668E-01	1,669E-01	1,29E+07	1,12	1,15
		27	1,23E+03	1,21E+03	1,82E-03	1,93E-03	1,668E-01	1,669E-01	1,36E+07	1,10	1,17
		28	1,19E+03	1,15E+03	1,90E-03	2,11E-03	1,669E-01	1,671E-01	1,31E+07	1,15	1,28
	Media s					1,667E-01	1,689E-01	1,33E+07	\	\	
	G	31	8,57E+02	8,24E+02	1,82E-03	1,89E-03	1,668E-01	1,669E-01	9,48E+06	1,10	1,15
		32	9,21E+02	8,98E+02	1,79E-03	1,89E-03	1,668E-01	1,669E-01	1,02E+07	1,09	1,15
		33	8,62E+02	8,55E+02	1,74E-03	1,77E-03	1,667E-01	1,668E-01	9,54E+06	1,06	1,07
	Media s					1,667E-01	1,668E-01	8,24E+06	1,03	1,07	
						1,67E-01	1,67E-01	9,36E+06	1,07	1,11	
						4,95E-05	7,19E-05	8,15E+05	0,03	0,04	

Tabella 10: Tabella riassuntiva di tutti i risultati dei provini testati

Considerando la media di tutte le tipologie di struttura riguardo la resistenza a trazione [Figura 38], in ordine decrescente abbiamo: il tipo E con  $1.15E+07$  MPa, il tipo D con  $1.10E+07$  MPa. Con valori nettamente inferiori rispetto al provino più resistente abbiamo: il tipo A con  $9.78E+06$  MPa, il tipo G con  $9.36E+06$  MPa, il tipo B con  $8.39E+06$  MPa e infine il tipo C con un valore di  $7.89E+06$  MPa.

Per quanto riguarda la deformazione [Figura 37], la categoria che si colloca subito al di sotto della F con una percentuale di allungamento a rottura di 1.27% è la tipologia G con 1.11%. Di seguito, sempre in ordine decrescente, vi è il tipo B con 0.96%, la A con 0.88%, la E con 0.81% e infine poco discordanti la C con 0.78% e la D con 0.77%.

Per le classi di provino di tipo A e B (le più simili tra loro) vengono riconfermati i medesimi risultati degli

studi riportati nel capitolo precedente [3.3.3 - PROVE MECCANICHE SU ABS E PLA].

Di fatti, con la texture avente direzioni  $0^\circ/90^\circ$  si ha una resistenza maggiore ma d'altra parte una deformazione inferiore rispetto alla medesima texture ruotata sul piano di stampa XY di  $45^\circ$ .

Suddividendo in due gruppi le tipologie di struttura interna, quelli con struttura alveolare a quadrati (A, B, C, G) e il gruppo con struttura a triangoli (D, E, F), notiamo che il primo comporta valori di resistenza inferiori rispetto al secondo.

Possiamo dedurre che l'angolo di rotazione sul piano XY dei diversi layer di  $60^\circ$ , e di conseguenza una struttura composta in prevalenza da triangoli, dota la struttura di un reticolo più solido e resistente rispetto alle altre tipologie.

Figura 38: Grafico di comparazione delle strutture interne dei provini in base alla resistenza a trazione

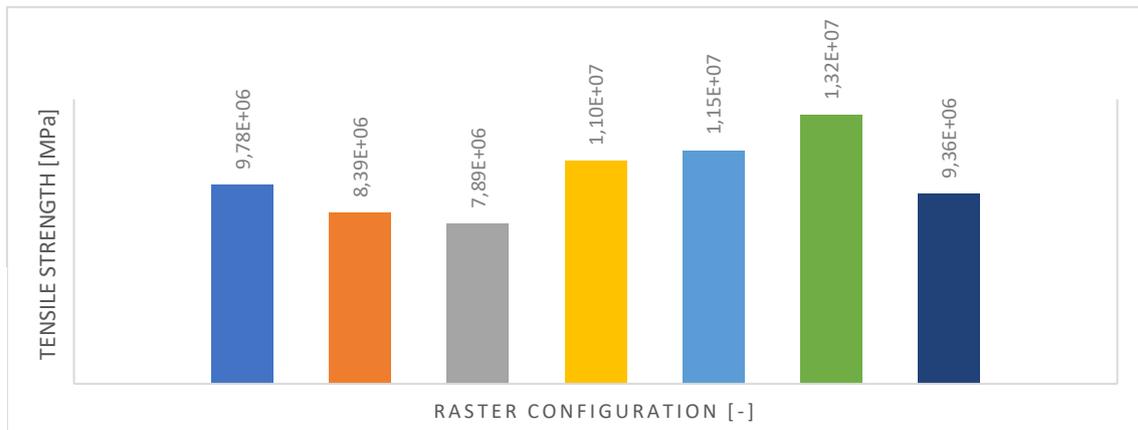
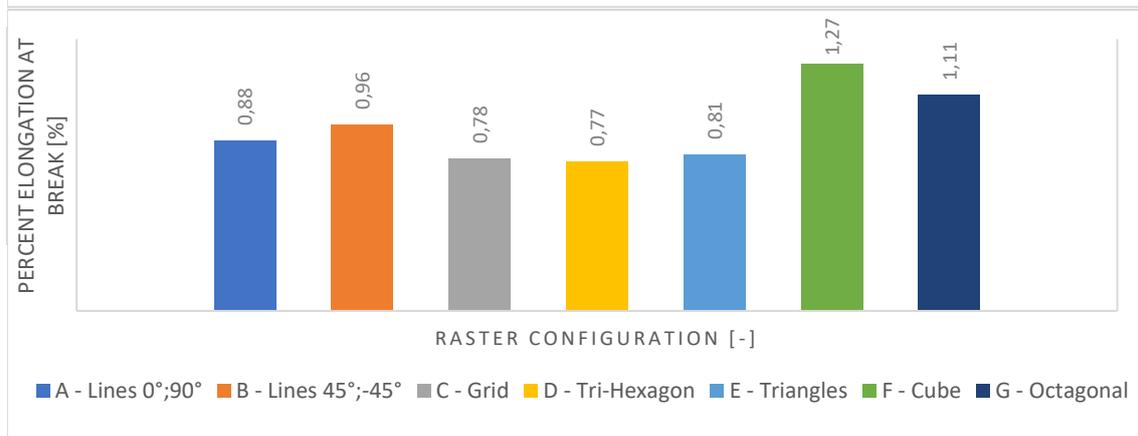
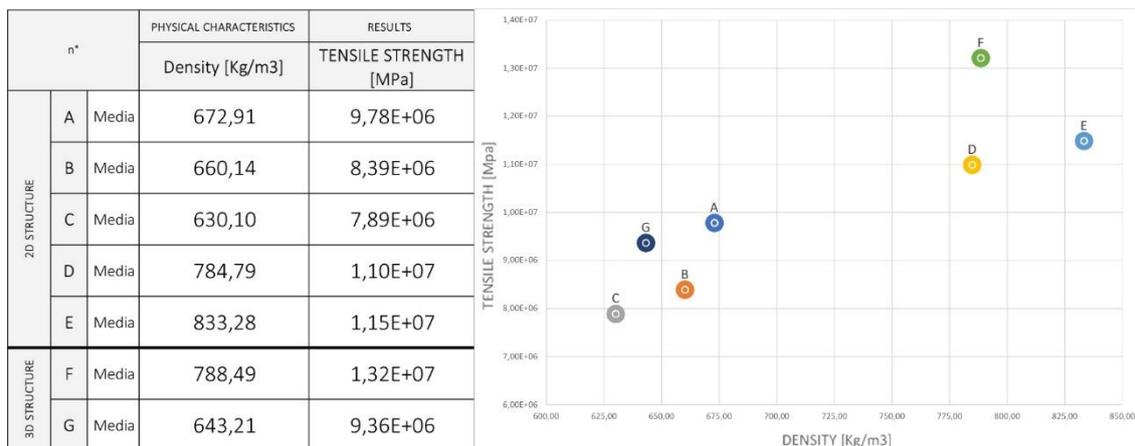


Figura 37: Grafico di comparazione delle strutture interne con la percentuale di allungamento a rottura





**Tabella 11:** Correlazione tra la densità e la resistenza a trazione delle diverse categorie di provini

Ponendo in relazione la densità media e la resistenza a trazione media di ogni serie di provini in un grafico a dispersione [Tabella 11], è possibile venire a conoscenza delle effettive correlazioni tra i fattori di densità, resistenza a trazione e struttura interna.

Come è evidente dal grafico, le due tipologie di struttura (quadrata e triangolare) occupano nettamente due zone del grafico differenti:

- Struttura a griglia quadrata (ABCG)**  
 Si collocano nella parte bassa a sinistra del grafico, ovvero rappresentano i provini più “leggeri” ma allo stesso tempo meno resistenti. La classe C si colloca al gradino più basso sia di resistenza che di densità, mentre la classe A è il più resistente e denso del suddetto gruppo;
- Struttura a griglia triangolare (DEF)**  
 Occupano la parte alta a destra del grafico costituendo il gruppo dei provini più resistenti a trazione ma anche i più “pesanti”. In questo caso la serie di provini con densità maggiore (classe E) non consiste nella classe più resistente rappresentata dalla F.

La categoria D, invece, è sia la meno resistente che la meno densa del gruppo di appartenenza.

Da queste considerazioni possiamo dedurre che in parte la presenza di materiale all’interno della struttura giova al suo aumentare ad un incremento nelle proprietà meccaniche del provino stesso.

D’altra parte, un netto contributo è dovuto alla scelta della struttura che l’infill va a costituire all’interno del provino.

Tale constatazione la si può dedurre prendendo in considerazione la classe C, G e B che essendo costituite dalla stessa tipologia di struttura base, la serie di provini G occupa una posizione più alta in fattore di resistenza a trazione anche se contiene minor quantità di materiale rispetto alla classe B.

Tale incremento nelle capacità meccaniche in base alla struttura dell’infill scelto è ancora più evidente nel confronto tra la classe D ed F. Infatti, queste due classi di provini hanno una differenza sulla densità di soli 4.00 Kg/m<sup>3</sup> ma una netta differenza di resistenza meccanica.

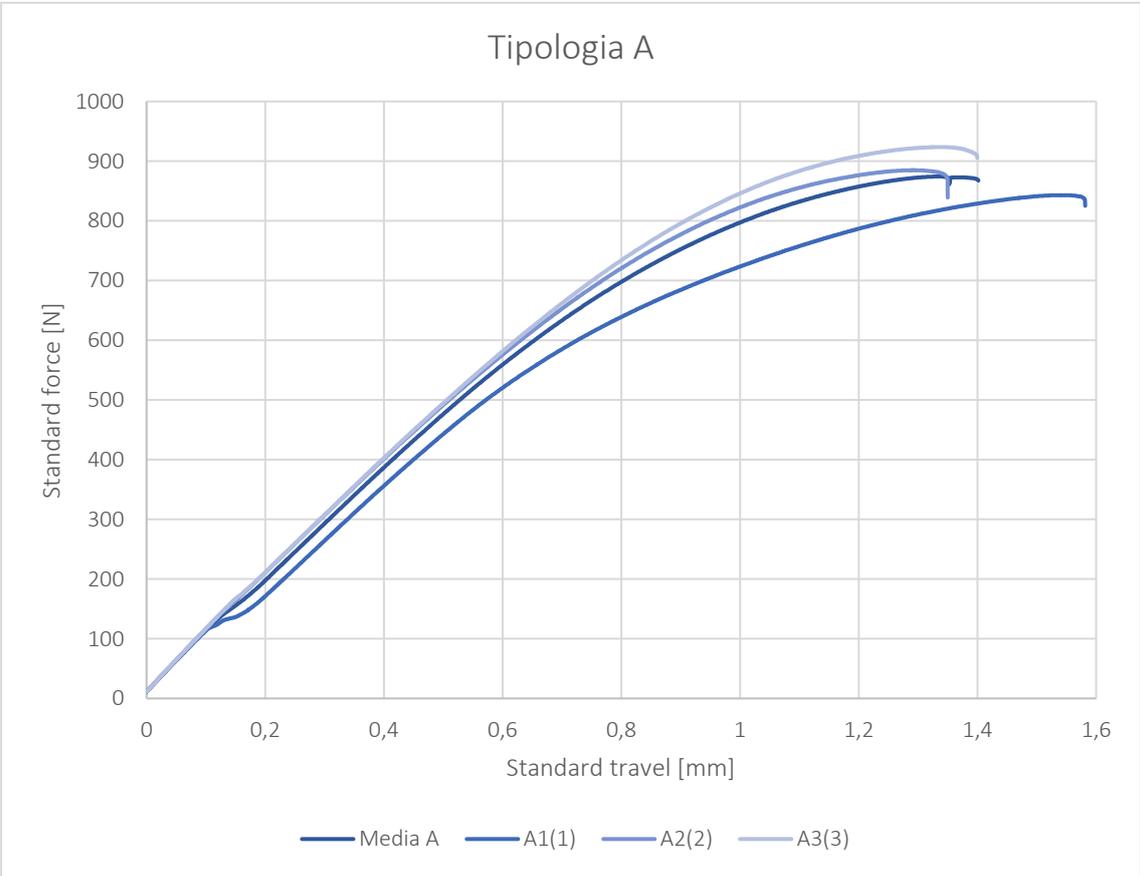


Figura 39: (in alto) provini dopo la prova a trazione; (a lato) grafico complessivo delle curve Sforzo/Deformazione del tipo A di provino

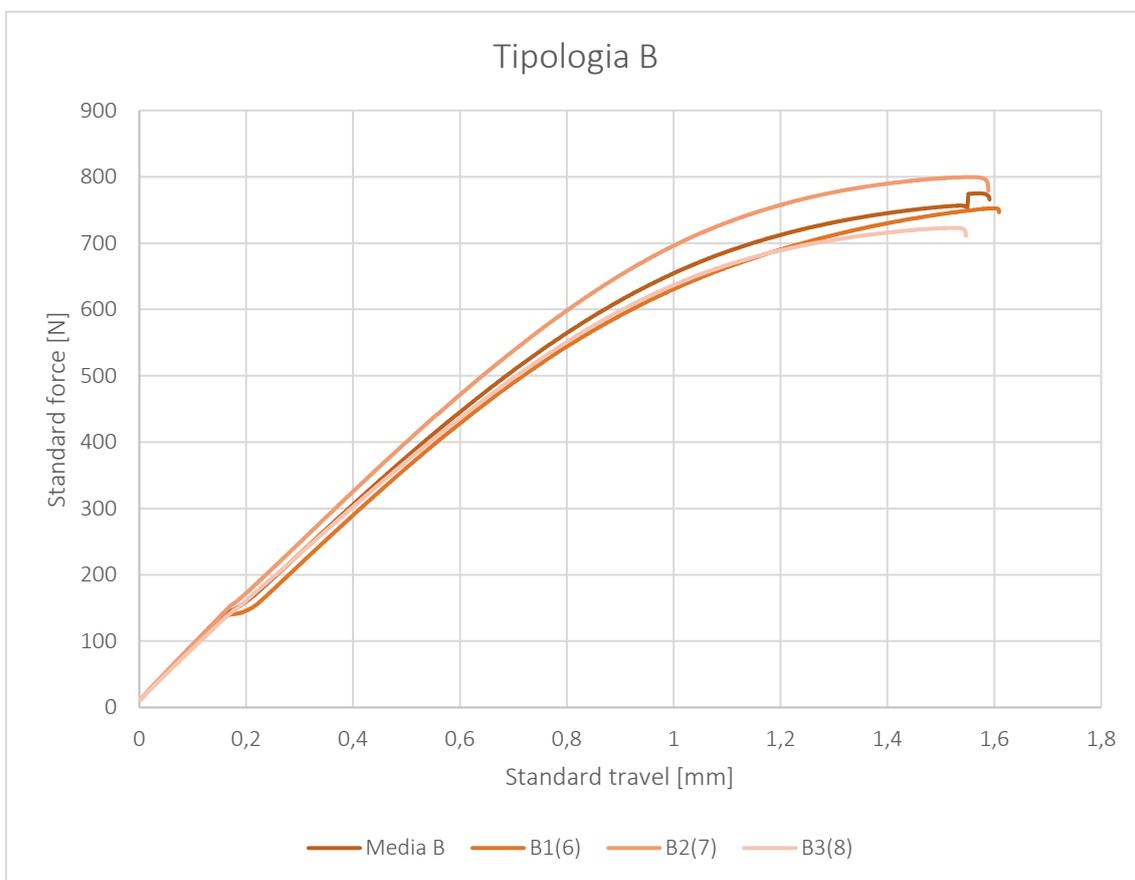


Figura 40: (in alto) provini dopo la prova a trazione; (a lato) grafico complessivo delle curve Sforzo/Deformazione del tipo B di provino

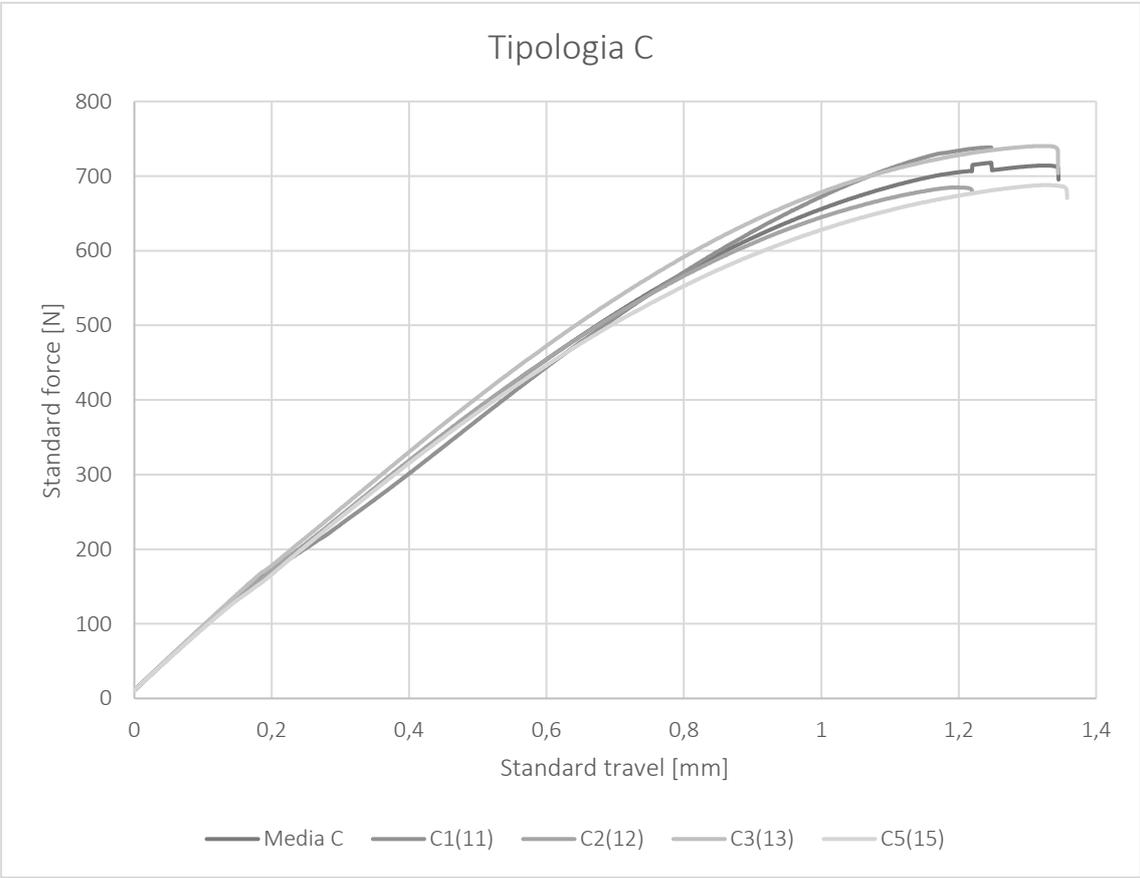
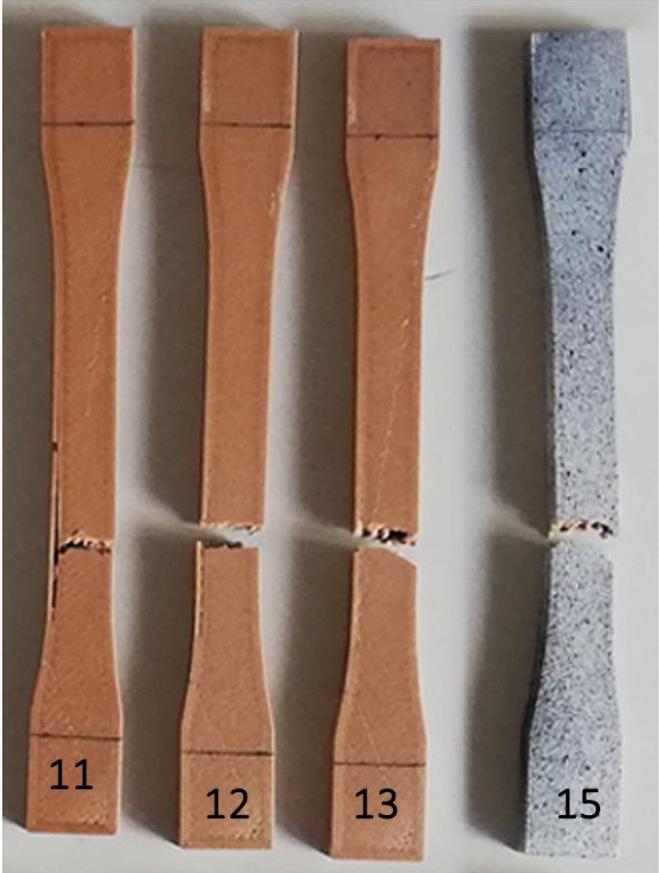


Figura 41: (in alto) provini dopo la prova a trazione; (a lato) grafico complessivo delle curve Sforzo/Deformazione del tipo C di provino

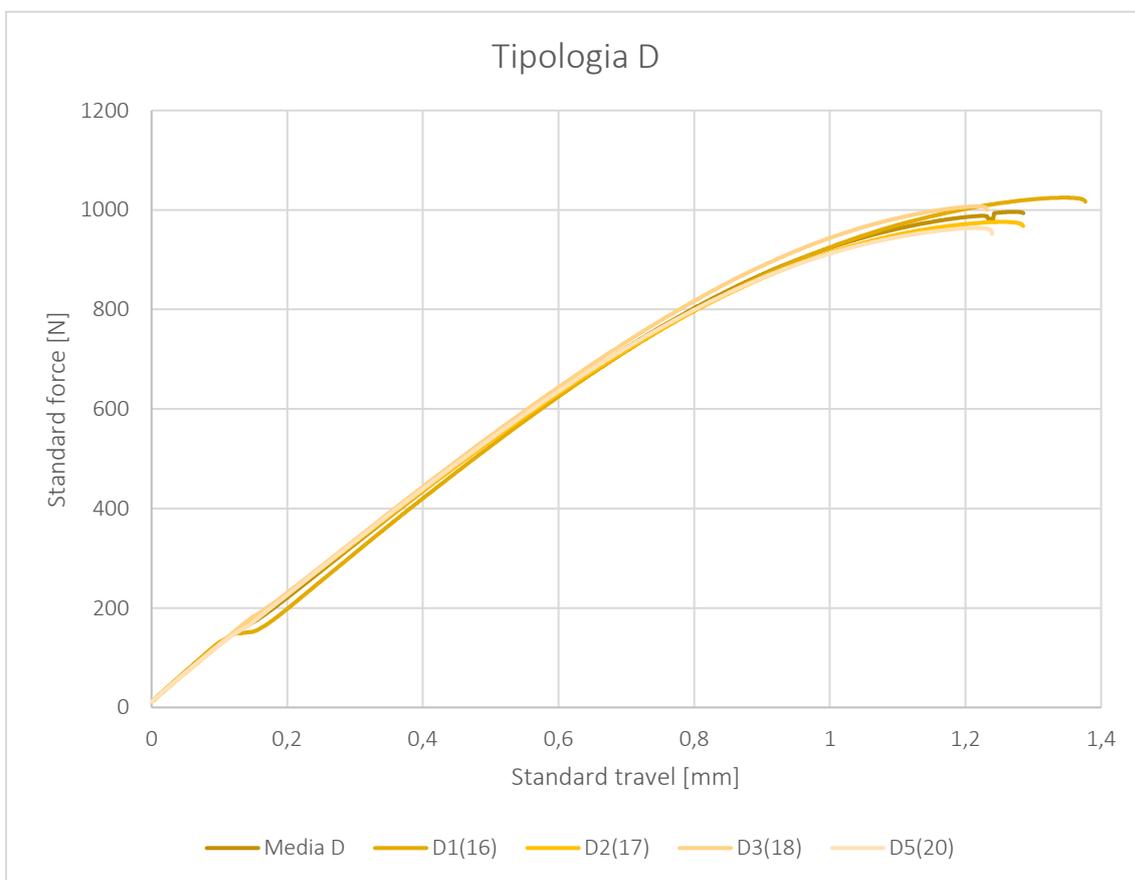
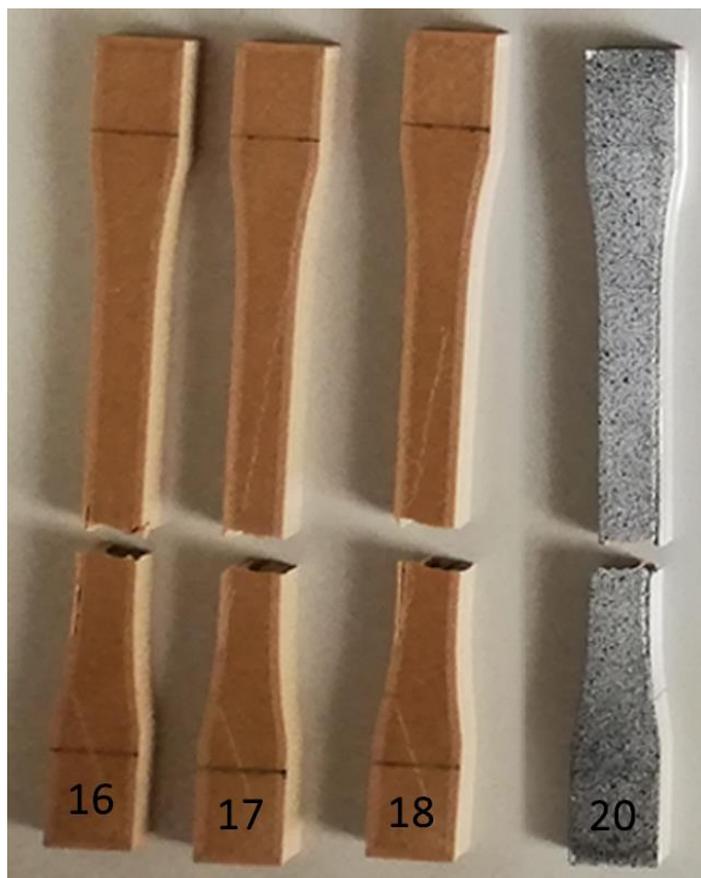


Figura 42: (in alto) provini dopo la prova a trazione; (a lato) grafico complessivo delle curve Sforzo/Deformazione del tipo D di provino

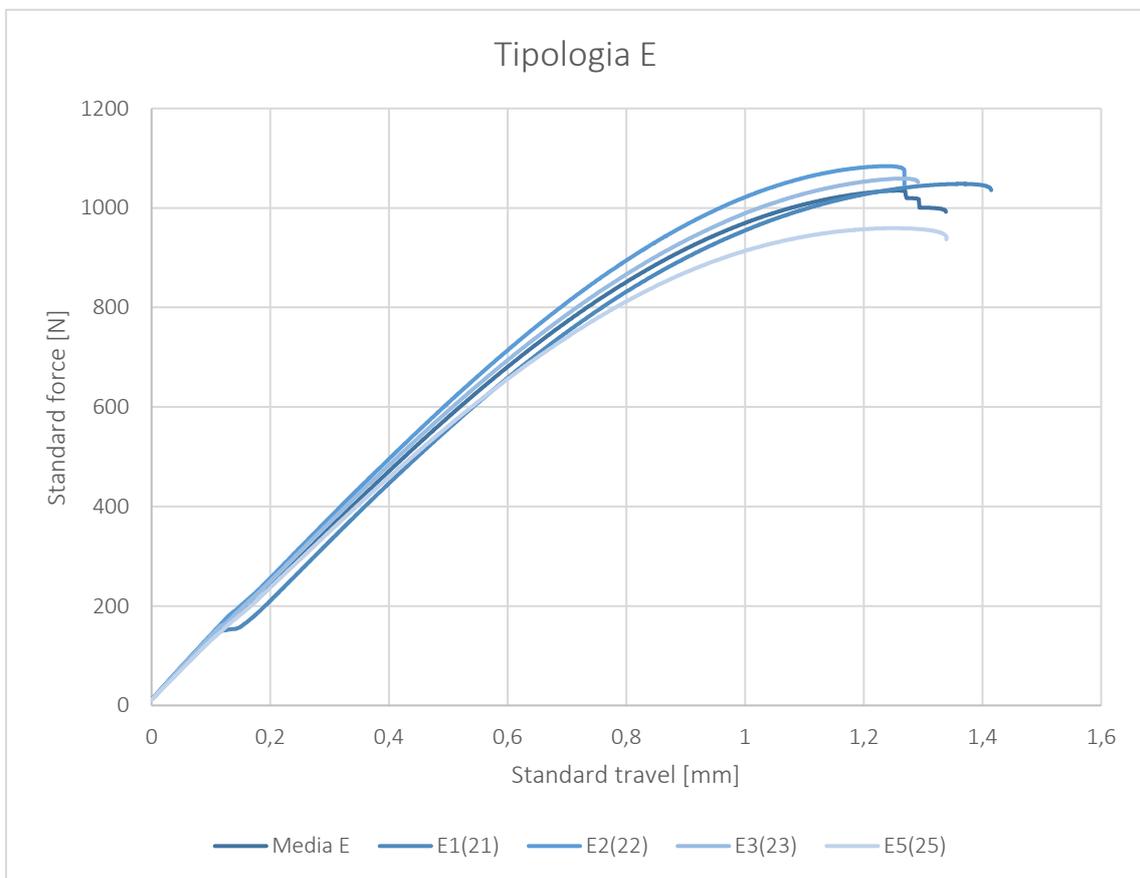


Figura 43: (in alto) provini dopo la prova a trazione; (a lato) grafico complessivo delle curve Sforzo/Deformazione del tipo E di provino

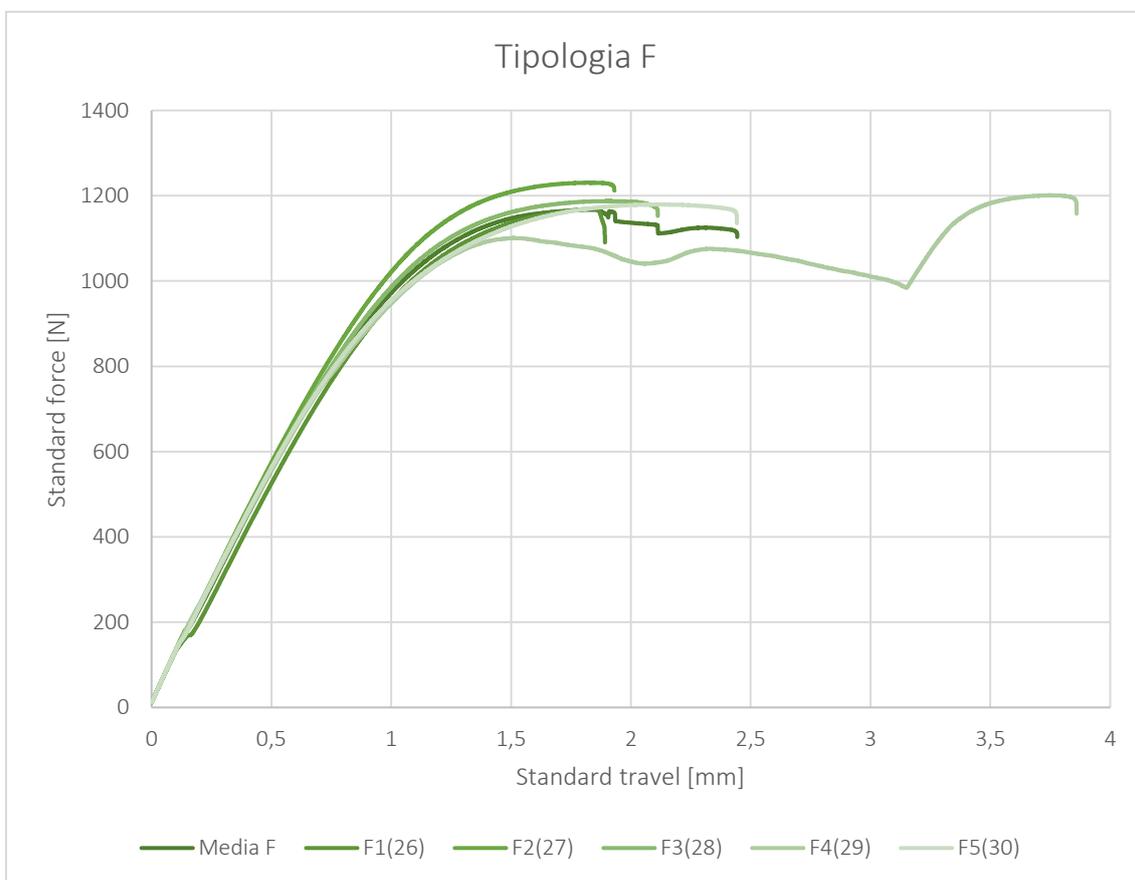
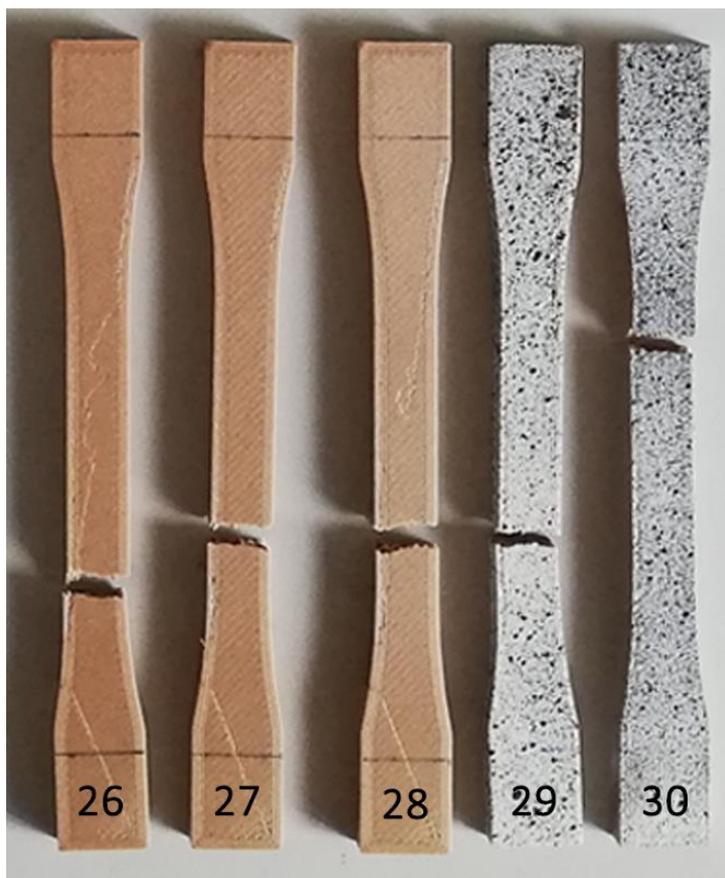


Figura 44: (in alto) provini dopo la prova a trazione; (a lato) grafico complessivo delle curve Sforzo/Deformazione del tipo F di provino

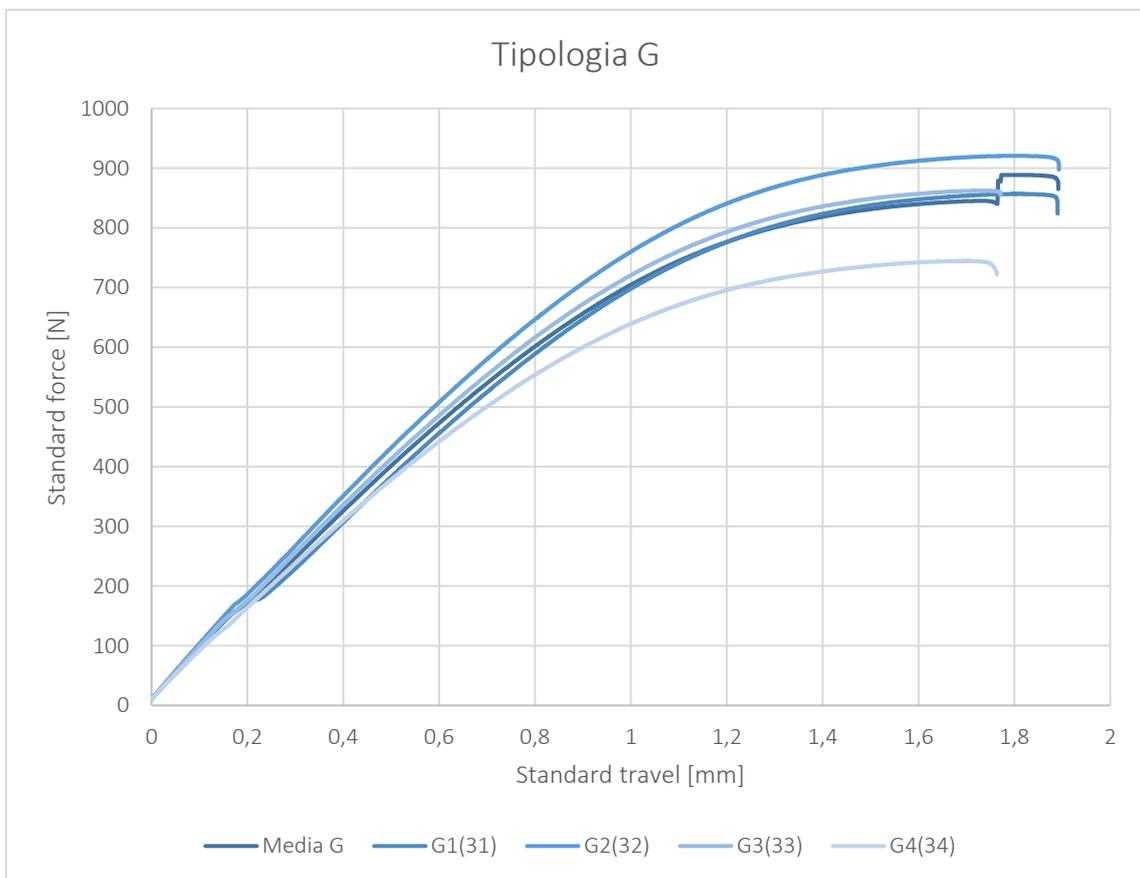
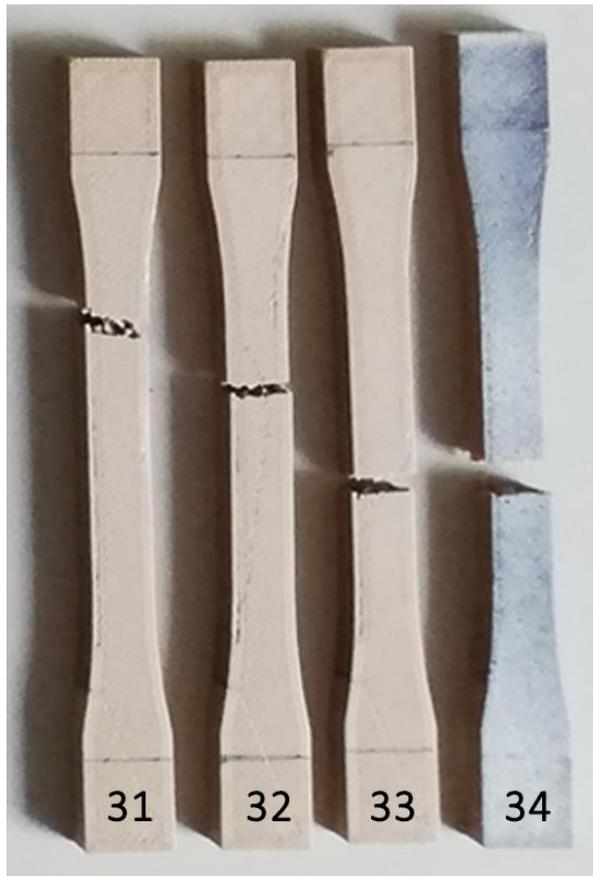


Figura 45: (in alto) provini dopo la prova a trazione; (a lato) grafico complessivo delle curve Sforzo/Deformazione del tipo G di provino

#### 4.2.1.1. LA DIGITAL IMAGE CORRELATION (DIC) ESEGUITA SUI CAMPIONI IN HBP®

La tecnica “*Digital Image Correlation*” (DIC), è un metodo ottico basato sulla correlazione di immagini digitali, sia 2D che 3D, acquisite in istanti successivi [Figura 47]. Questo metodo viene utilizzato per misurare lo spostamento e le deformazioni a tutto campo, ed è applicato in molte aree della scienza e dell'ingegneria. Rispetto agli estensimetri, la quantità di informazioni raccolte sui dettagli precisi della deformazione durante i test meccanici è aumentata grazie alla capacità di fornire dati sia locali che medi utilizzando la correlazione dell'immagine digitale.

All'interno di questa tesi è stata eseguita un'analisi DIC per valutare il comportamento del campione HBP® durante la deformazione dovuta all'applicazione del carico di trazione. In particolare, gli assestamenti del provino, che avvengono durante la prova meccanica a trazione, sono individuati dalla strumentazione con una serie di fotogrammi sequenziali che comportano il tracciamento complessivo finale dei vari spostamenti e di conseguenza la loro misurazione.

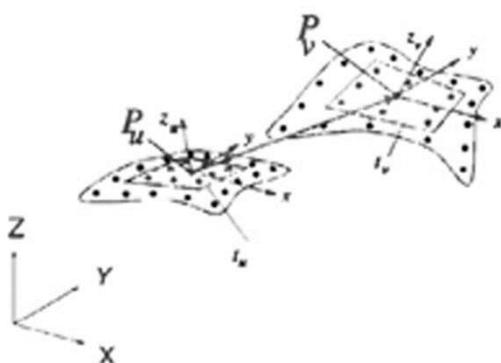


Figura 46: Provini in HBP® una volta applicato lo strato di vernice

##### 4.2.1.1.1. La metodologia

In [Figura 46] sono mostrati due esemplari di provini ai quali è stato applicato una texture puntinata di vernice acrilica bianca su un sottile strato omogeneo di vernice nera applicata a spruzzo. Il fine di tale colorazione è l'individuazione di tali punti bianchi da parte del macchinario DIC e misurarne lo spostamento durante la prova a sforzo.

Per valutare la curva di deformazione durante la prova a trazione, è stata utilizzata la strumentazione DIC System Q-400 (Dantec Dynamics A/S) e la 3D-DIC.



(a)

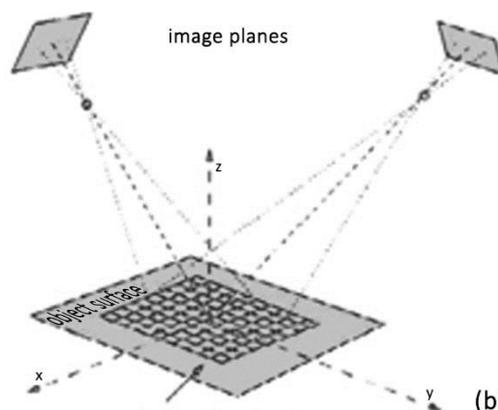


Figura 47: (a) Determinazione del vettore di spostamento tridimensionale. (b) Principio di correlazione di immagini 3D con 2 telecamere.

**Figura 48:** (a) HBP campione F5 (30) FASE 1 (test iniziale); (b) FASE 51 (condizione di collasso); (c) Distanza dal piano più adatto del campione F5(30)



L' algoritmo di correlazione adottato si basa sul tracciamento del modello di valori di grigio negli intorni locali.  $G(x, y)$  è il valore di grigio di un pixel con coordinate  $x$  e  $y$ , facente parte di un sottoinsieme o sfaccettatura, di cui l'algoritmo di correlazione ha minimizzato la risoluzione:

$$\sum_{x,y} (G_t(x_t, y_t) - G(x, y))^2$$

Dove  $G_t(x_t, y_t) = g_0 + g_1 G(x_t, y_t)$ ;  $x_t = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy$  e  $y_t = a_4 + a_5x + a_6y + a_7xy$ . Con la variazione dei parametri di illuminazione ( $g_0, g_1$ ) e dei parametri della trasformazione affine ( $a_0... a_7$ ) è possibile ottenere una precisione per un adattamento migliore di 0,01 pixel. Una volta determinato il contorno 3D, il secondo passo nella correlazione 3D digitale è la misurazione e la determinazione della deformazione tridimensionale della superficie dell'oggetto.

Questo processo viene eseguito per correlazione delle immagini, acquisite da entrambe le telecamere con le loro immagini di riferimento originali. In [Figura 48] viene mostrata l'applicazione DIC insieme all'impostazione sperimentale.

Si nota il provino F5(30) nella situazione iniziale del test e il medesimo campione a collasso avvenuto.

#### 4.2.1.1.2. Analisi dei risultati

Vengono riportate le immagini [Figura 50] e i grafici [Figura 49, Figura 51] relativi all'analisi DIC effettuata sul campione F5(30) scelto per la chiarezza dei risultati ottenuti e l'efficacia dei grafici estrapolati dal software.

Dalla serie di immagine riportate in [Figura 50] si nota in corrispondenza del corpo centrale del provino, una concentrazione della deformazione (aree in gradazione di rosso) in fasce oblique. In corrispondenza della concentrazione maggiore, visibile nello "step 50", avviene successivamente la rottura del provino mostrato nell'ultimo "step 55".

Tali fasce oblique si collocano in corrispondenza dei vuoti della trama strutturale interna tracciata dall'infill in quanto, permettono al provino di deformarsi maggiormente

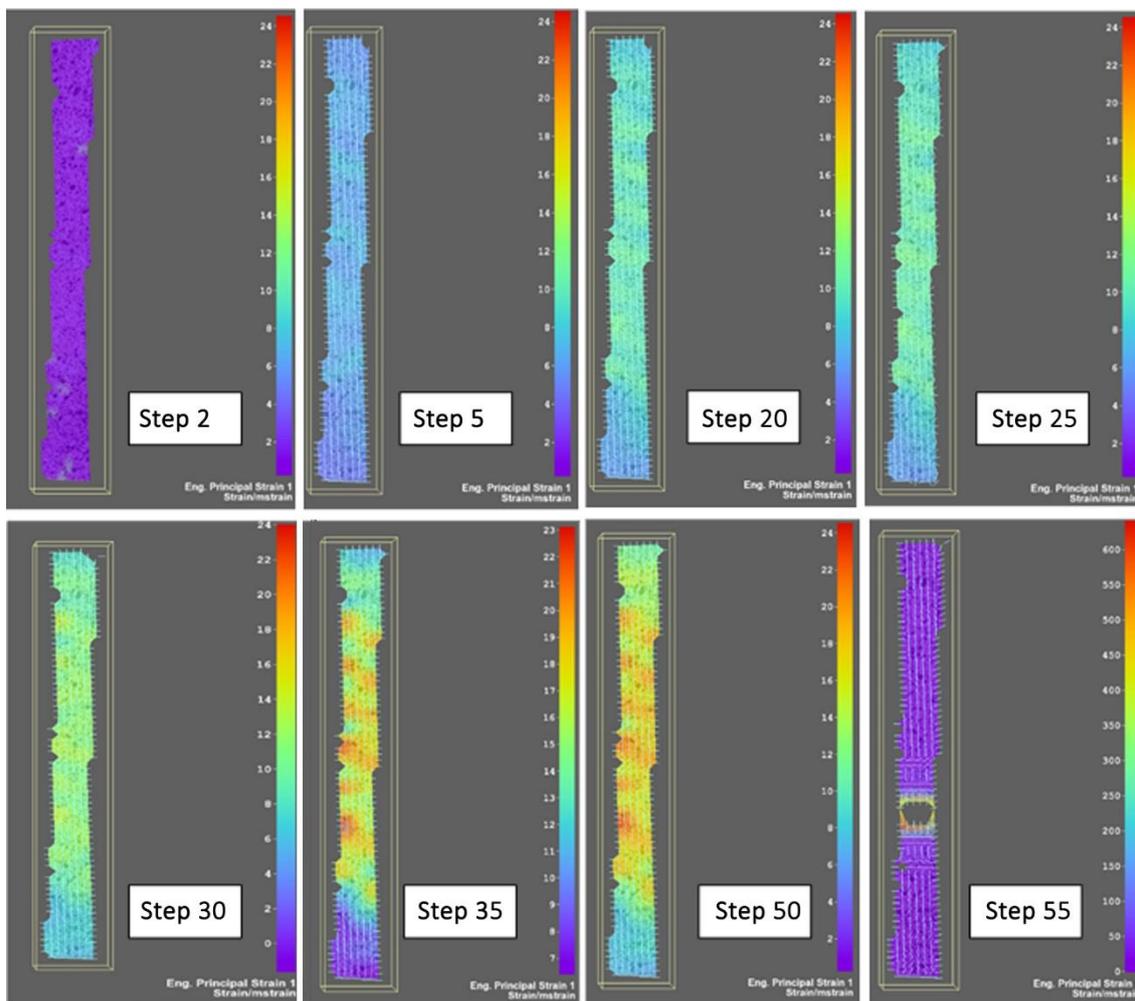


Figura 49: Step in cui si è deciso di effettuare l'analisi DIC del campione F5(30)

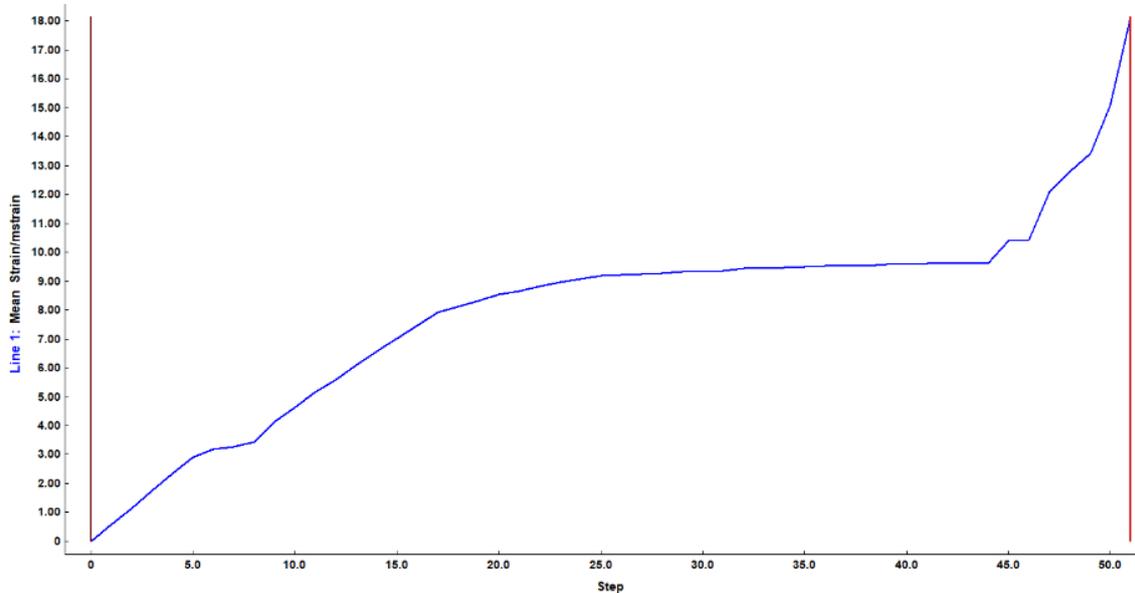


Figura 50: Grafico della deformazione principale rispetto al tempo fino al raggiungimento delle condizioni di collasso del campione F5 (30)

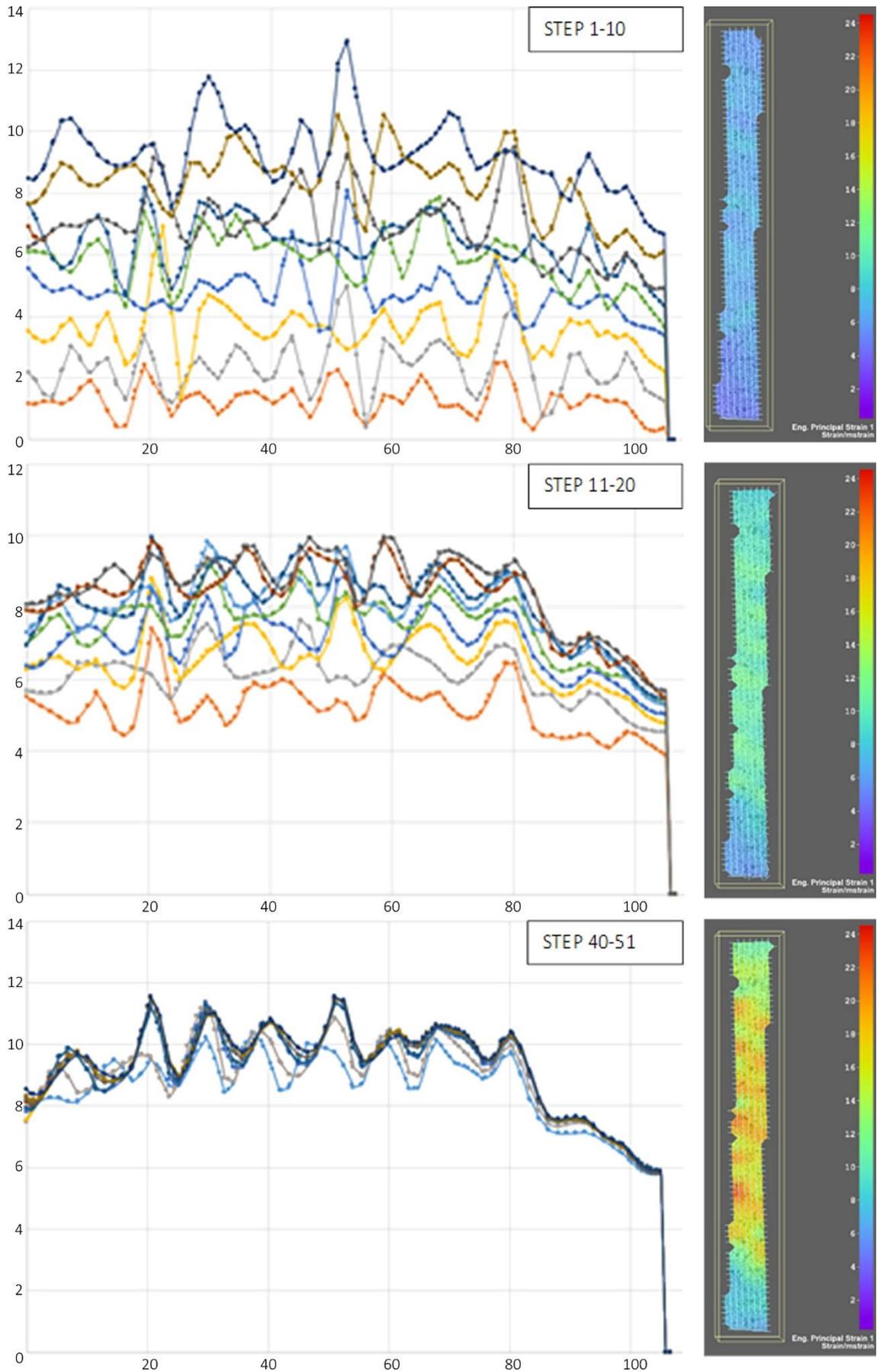


Figura 51: Deformazione/Tempo in diversi passaggi del campione F5(30)

#### 4.2.2. CONCLUSIONI

Dalle prove, effettuate sul filamento HBP® stampato in 3D sottoforma di provini conformi alla normativa (ASTM-D638\_14, 2014), e le analisi che ne sono derivate possiamo dedurre che:

- La resistenza cresce al crescere della densità del materiale all'interno del provino;
- Per un incremento notevole nelle prestazioni del materiale e di conseguenza nelle capacità di resistenza del provino, la scelta della struttura interna formata dall'infill è decisiva;
- Tra le tipologie differenti di strutture interne, testate all'interno del programma sperimentale della suddetta tesi, hanno dimostrato un maggior riscontro quelle con i filamenti dei diversi layer ruotati sul piano XY di 60° rispetto a quelli con i filamenti perpendicolari tra loro;

- Dall'analisi DIC è stato possibile notare che la concentrazione delle sollecitazioni avviene lungo i filamenti trasversali più corti rispetto a quelli longitudinali;
- Tra i provini di tipo A e B si sono confermati i risultati che anche altri studi analoghi sono stati effettuati sul PLA e ABS. Ovvero, la griglia con andamento 0°-90° dimostra maggiori prestazioni meccaniche con valori di resistenza a trazione maggiore rispetto a quelli ruotati di 45°.

Dai risultati ottenuti e dalle considerazioni finali fatte, viene presa in considerazione, per la fase progettuale del padiglione, la tipologia F di stampa 3D. Ciò comporta l'utilizzo nella successiva fase di calcolo strutturale FEM, l'utilizzo dei relativi dati di densità e resistenza a trazione misurati e registrati nelle prove sotto sforzo descritte.

# Progetto

## Parte III

A conclusione del suddetto lavoro di tesi, si è ideata una struttura portante stampata in HBP® atta a sostenere un padiglione espositivo di modeste dimensioni. Si tratta di una prima applicazione progettuale in campo edilizio di tale materiale innovativo ed ecosostenibile.

La trattazione inizia con la descrizione complessiva del padiglione e successivamente si articola ad approfondire tutti gli elementi che lo compongono con l'ausilio di elaborati tecnici e schemi. Inoltre, viene presentata la successione delle fasi di produzione, trasporto, costruzione e smontaggio del padiglione.

La presentazione del progetto prosegue con la descrizione del calcolo FEM (Finite Element Analysis) applicato all'intera struttura sia nel caso di neve che di sisma.

Infine, grazie alla collaborazione avvenuta con l'azienda, è stato possibile produrre (a scala ridotta) un prototipo degli elementi che compongono la struttura portante.



## 5. PROPOSTA PROGETTUALE

---

- 106 5.1. La cupola geodetica e il fullerene
- 107 5.2. Requisiti di progettazione
- 108 5.3. Composizione architettonica
  - 117 5.3.1. La struttura portante
  - 121 5.3.2. Il tamponamento
  - 123 5.3.3. Impiantistica e confort interno
- 126 5.4. Produzione e cantierizzazione
  - 126 5.4.1. Produzione e trasporto
  - 127 5.4.2. Assemblaggio e smontaggio
- 130 5.5. Calcolo strutturale
  - 130 5.5.1. Analisi FEM
  - 134 5.5.2. Risultati e conclusione
- 148 5.6. Stampaggio modello



Duplastica

Anello

Scalet

## 5. PROPOSTA PROGETTUALE

---

In seguito ai risultati ottenuti dalla prova sperimentale dei provini sotto sforzo (normativa ASTM-D638), si è proseguito il suddetto lavoro di tesi nella progettazione di una struttura portante prodotta con la tecnologia FDM, che prevede l'utilizzo dell'**HBP®-HempBioPlastic** come materiale costituente. Inoltre, per le parti opache di tamponamento, vengono utilizzate due tipologie di prodotti a base di fibra di canapa precedentemente esplicitati: il **biocomposito di calce-canapa** come materiale riempitivo e isolante della pavimentazione e i **pannelli in fibra di canapa** come strato isolante per le parti opache della costruzione.

La volontà di andare incontro alle attuali problematiche ambientali, ha portato la fase di progettazione ad un approccio di natura funzionalista riconducibile a Richard Buckminster Fuller e Jean Prouvé, i quali possono essere considerati gli ispiratori di una ricerca architettonica volta alla sopravvivenza. Un

funzionalismo legato all'ambiente naturale e all'autosufficienza, all'economia e alla semplicità realizzativa, condizionata dal pensiero industriale e ai sistemi di prefabbricazione (PECOLLO, et al., 2018).

La tipologia architettonica scelta è quella di una copertura in grado di svolgere, in un primo momento, attività espositive con ottimi standard interni di confort termico e acustico, ma non si preclude una possibile destinazione futura ad uso abitativo.

Tale copertura si rifà alle biosfere dell'architetto R. Buckminster Fuller, ovvero la cupola geodetica.

La scelta è stata dettata dalla necessità di costruire una struttura leggera con la massima resistenza e il minimo spreco di materiale. Si tratta infatti, di una struttura autoportante, caratteristica chiave che permette a queste cupole di coprire ampi volumi senza bisogno di pilastri, consentendo inoltre, l'adattamento alla forma del terreno e la regolazione delle variabili climatiche interne.

## 5.1. LA CUPOLA GEODETICA E IL FULLERENE

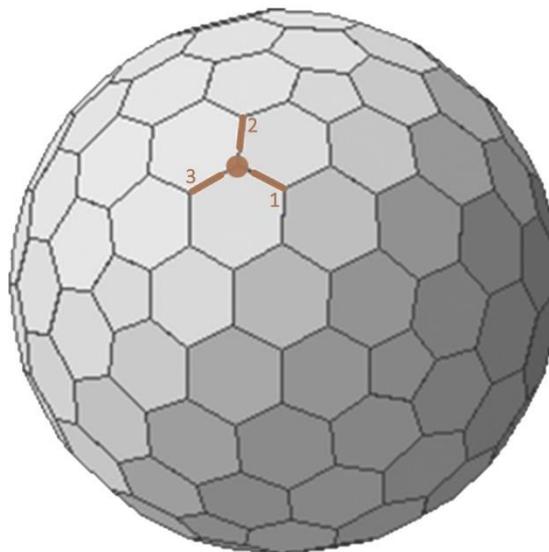
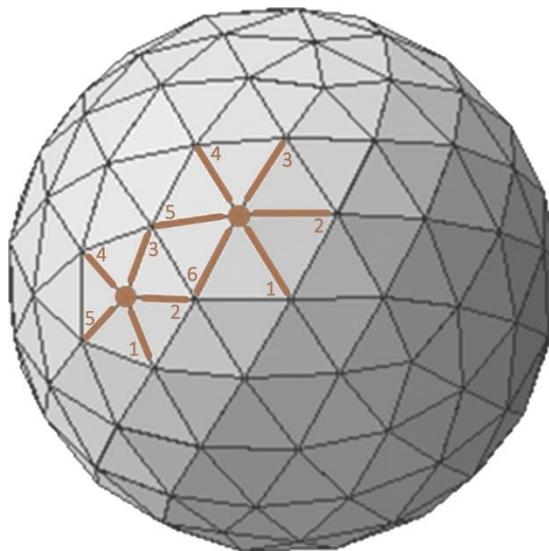
Brevetto 2.682.235 rilasciato il 29 Giugno 1954 riguarda le strutture spaziali basate sulla simmetria bi-tri-quinaria o icosaedrica e nasce dalla ripartizione delle facce dell'icosaedro in modo che ogni punto di vertice appartenga alla superficie della sfera circoscritta (PUCCI, et al., 2007/2008).

Più precisamente, citando (CARLUCCI, et al., 2006/2007) le definizioni che risolvono la descrizione delle cupole geodetiche e del fullerene sono:

- Una **cupola geodetica** è una triangolazione della sfera con vertici di grado 5 e 6 [Figura 52];
- Un **fullerene** è un poliedro costituito da sole facce esagonali e pentagonali e vertici di grado 3 [Figura 53].

Nella suddetta tesi, la struttura concepita è stata ricavata basandosi sul fullerene, il quale rappresenta il duale<sup>6</sup> della cupola geodetica.

Per questo motivo ne conserva le caratteristiche, ovvero, i lati del poligono giacciono su circonferenze massime della sfera dette linee geodetiche (SCANDELLA, et al., 2014/2015).



A lato  
Figura 52: Cupola  
geodetica

A lato  
Figura 53: Fullere-  
rene

<sup>6</sup> In geometria, il poliedro duale di un poliedro  $P$  è un altro poliedro  $Q$ , tale che ad ogni vertice di  $P$  corrisponde una ed una sola faccia di  $Q$ . In altre parole, lo si ottiene scambiando i ruoli dei vertici e delle facce di  $P$ . Il duale di  $Q$  è di nuovo  $P$ . (Origine: Poliedro duale - <https://it.wikipedia.org>)

## 5.2. REQUISITI DI PROGETTAZIONE

Per poter garantire le caratteristiche sopracitate al padiglione, si sono ricercati i requisiti da soddisfare basandosi sulle condizioni riportate nel libro (MASOTTI, 2010) riguardanti le installazioni provvisorie atte alla sopravvivenza:

- **Adattabilità**  
a qualsiasi tipo di condizione o terreno;
- **Minima compromissione**  
del suolo per fondazioni, impianti a rete e allacciamenti;
- **Comfort interno**  
garantire livelli di isolamento termico e acustico per un'ottima abitabilità interna;
- **Finiture esterne**  
in modo adeguato;
- **Compatibilità dimensionale**

dei componenti ai mezzi di trasporto;

- **Leggerezza degli elementi e della struttura**  
abitativa finita per facilitare il trasporto
- **Assemblaggio**  
per garantire la sicurezza e ridurre i costi;
- **Riduzione di mano d'opera e attrezzature**  
per l'assemblaggio dei componenti;
- **Possibilità di smontaggio e rimontaggio**  
in altri siti per analoghi motivi.

Oltre a tali motivazioni, si sono volute aggiungere le condizioni di **compatibilità ambientale** attuali.

A tale scopo, si sono scelti dei materiali il più possibili ecocompatibili, conformi agli standard di biodegradabilità e riciclabilità oltre alla facile reperibilità e basso impatto ambientale per la loro produzione.

### 5.3. COMPOSIZIONE ARCHITETTONICA

Per concepire la struttura portante e i vari componenti, si è partiti dall'idea di progettare un sistema che potesse essere riconducibile ad una forma organica con elementi curvilinei, per sottolineare la finalità ambientale che l'ha promossa e alla quale mira.

D'altro canto, i **principi funzionali** che hanno regolato la progettazione sono stati:

- Numero limitato di elementi costitutivi;
- Autocostruzione in situ senza utilizzo di malte o colle;
- Facilità di trasporto dal luogo di produzione al cantiere;
- Smontaggio e rimontaggio semplificato.

Il padiglione [Figura 54], poggiante su **plinti** posti in corrispondenza del piano di taglio del fullerene coincidente con la base degli esagoni del terzo ordine, si compone di una struttura portante e assemblabile mediante elementi ripetitivi che possiamo chiamare **montanti**.

Le due tipologie di montante vanno a costituire un telaio tridimensionale e curvilineo che delinea dei **vuoti** di diversa forma geometrica.

Ogni tipologia di vuoto è stata trattata in modo differente, fornendo precise funzioni ad ognuno di esse.

Nell'alzato, si possono notare dei **vuoti circolari**, di due ampiezze differenti, che costituiscono la pannellatura isolante e delle **aree triangolari**, con i lati leggermente concavi, che permettono alla luce di raggiungere l'interno.

Alla base, invece, mediante la modifica nella parte inferiore degli spazi circolari, si sono ricavate delle **aperture** più grandi e altre più piccole. Queste ultime hanno la funzione di permettere il ricambio d'aria interno, mentre quelle più ampie sono destinate ad essere gli accessi al padiglione.

In fine, a protezione dell'intera struttura vi è un **rivestimento** in materiale polimerico.

DATI DIMENSIONALI PADIGLIONE

N° VERTICI	40	[-]
RAGGIO	3,474	[m]
DIAMETRO (LARGHEZZA MAX)	6,948	[m]
ALTEZZA DEL CENTRO	1,789	[m]
ALTEZZA TOTALE	5,263	[m]
DIAMETRO ALLA BASE	5,956	[m]
SUPERFICIE DI PAVIMENTO	27,863	[m <sup>2</sup> ]
SUPERFICIE CALOTTA	114,880	[m <sup>2</sup> ]
VOLUME INTERNO	149,650	[m <sup>3</sup> ]

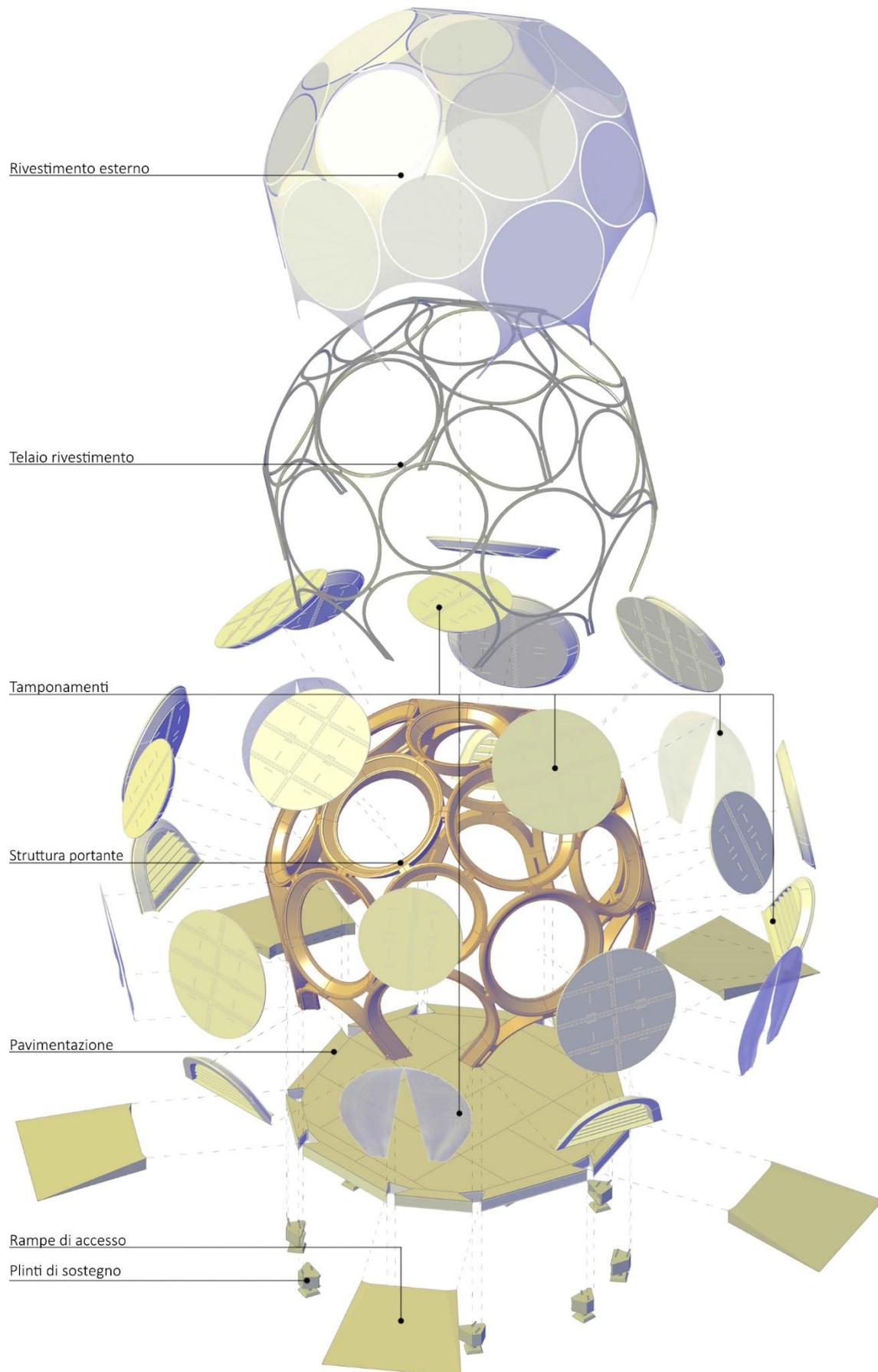
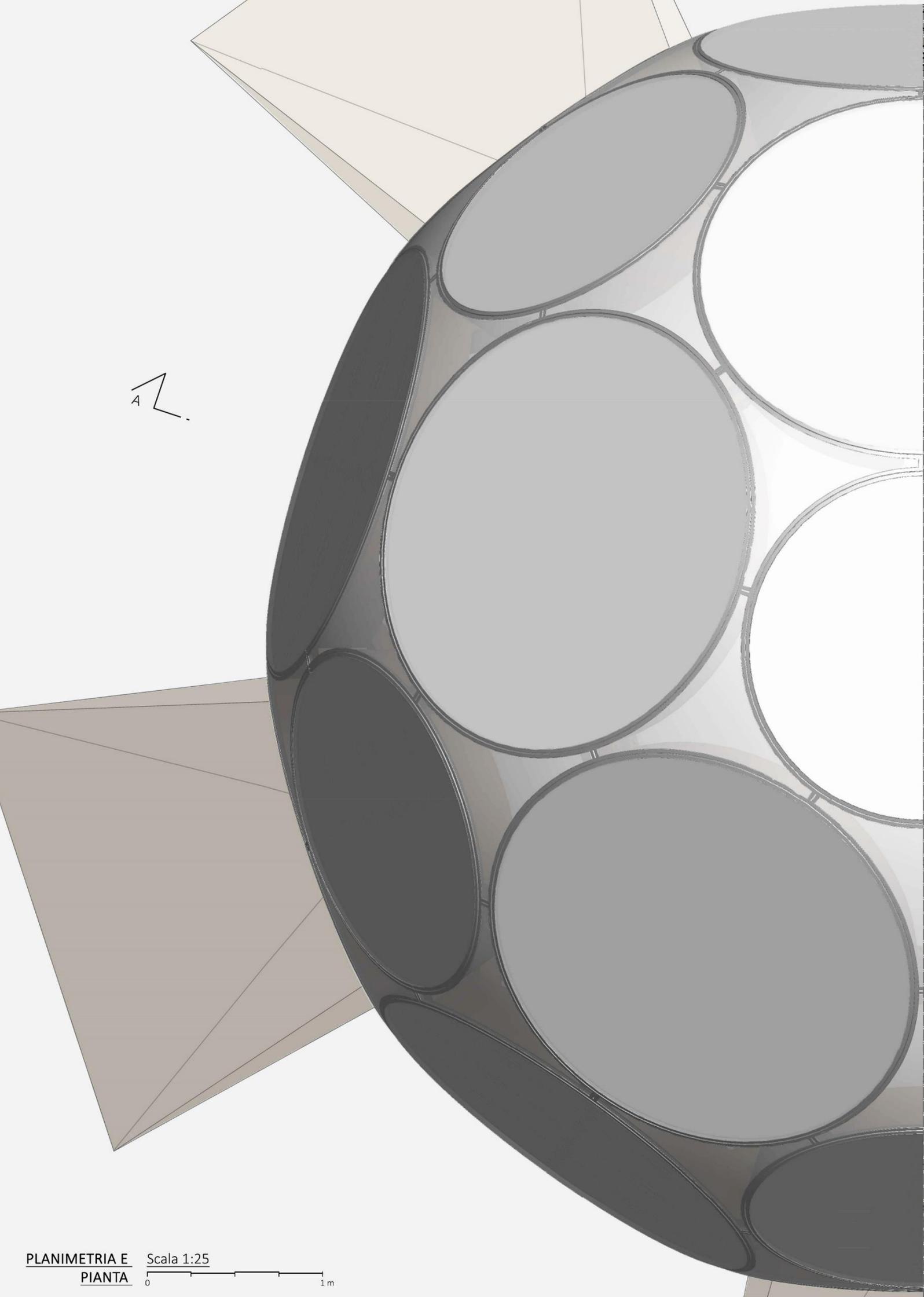
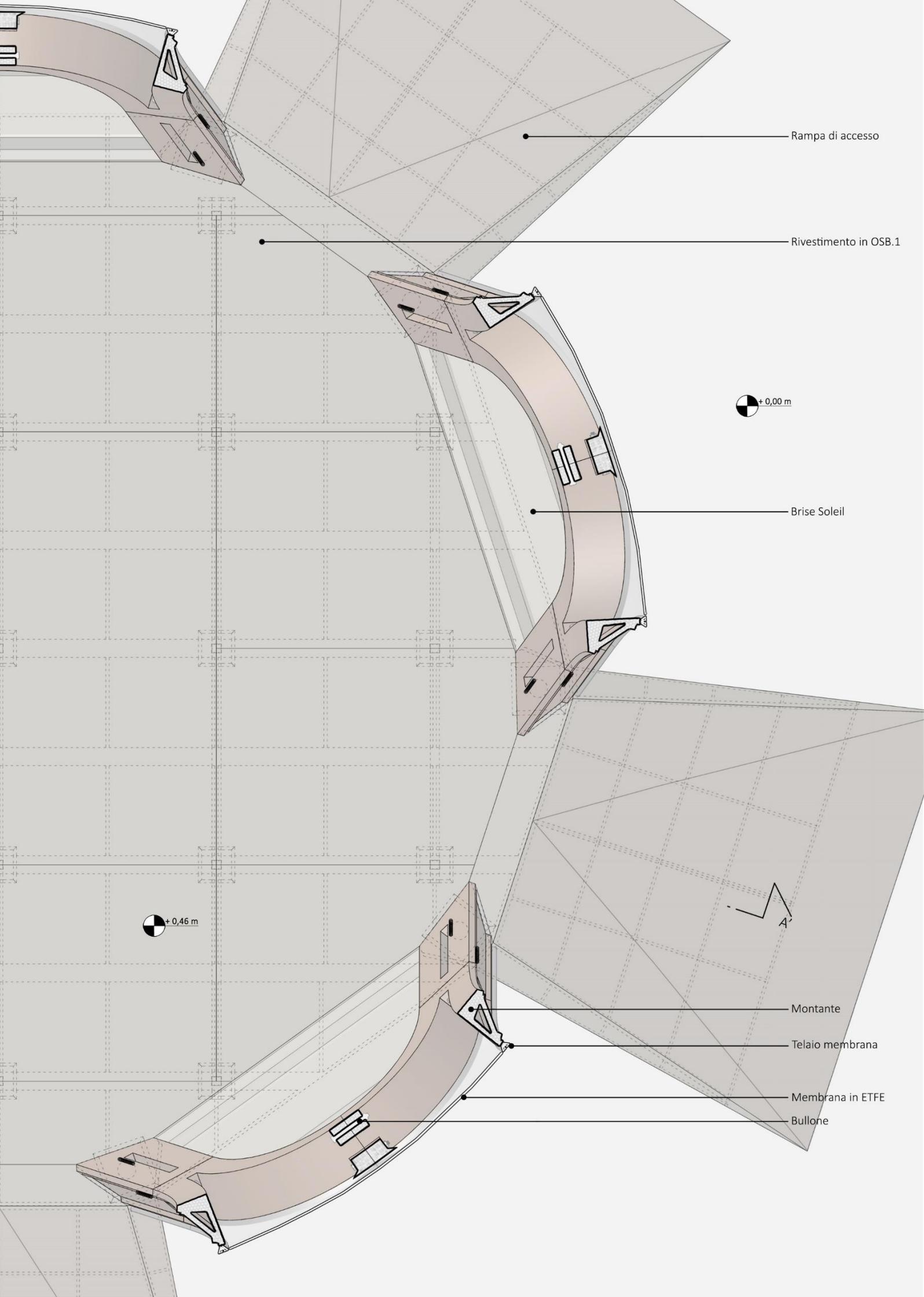


Figura 54: Esploso  
assonometrico





Rampa di accesso

Rivestimento in OSB.1

+0,00 m

Brise Soleil

+0,46 m

Montante

Telaio membrana

Membrana in ETFE

Bullone

A-A'

+ 5,27 m



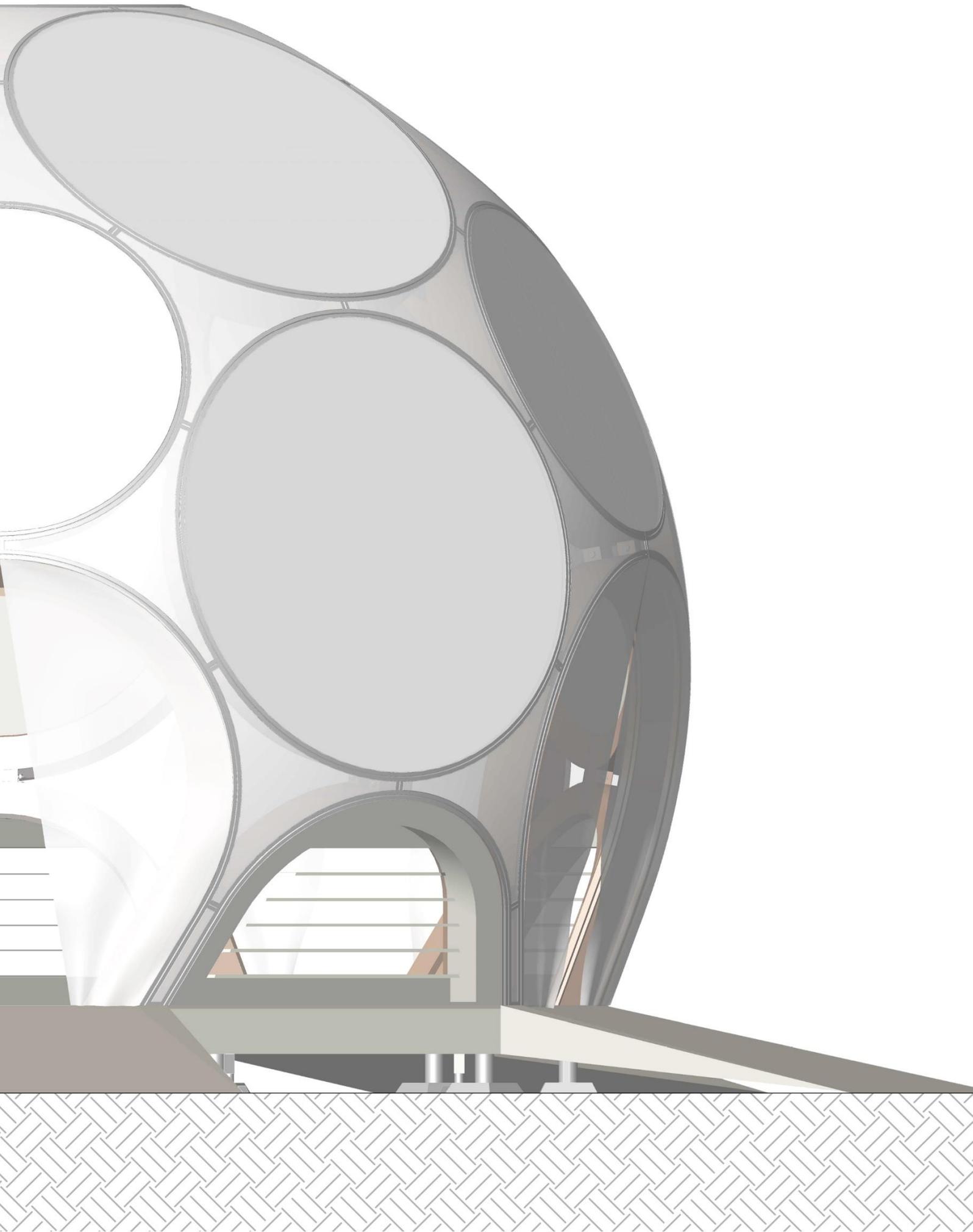
+ 0,46 m

+ 0,00 m

PROSPETTO  
SU INGRESSO

Scala 1:25





+ 5,27 m

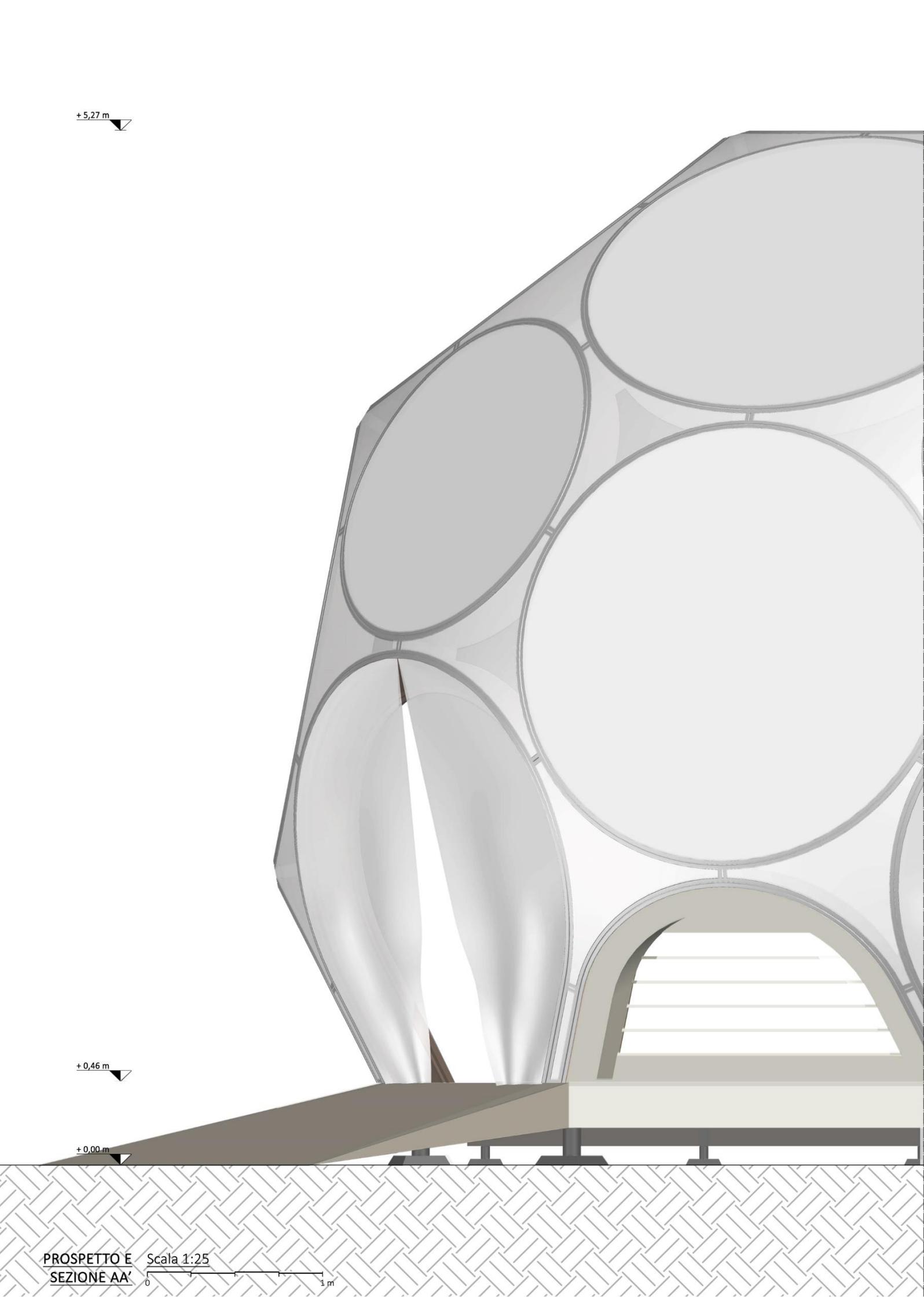
+ 0,46 m

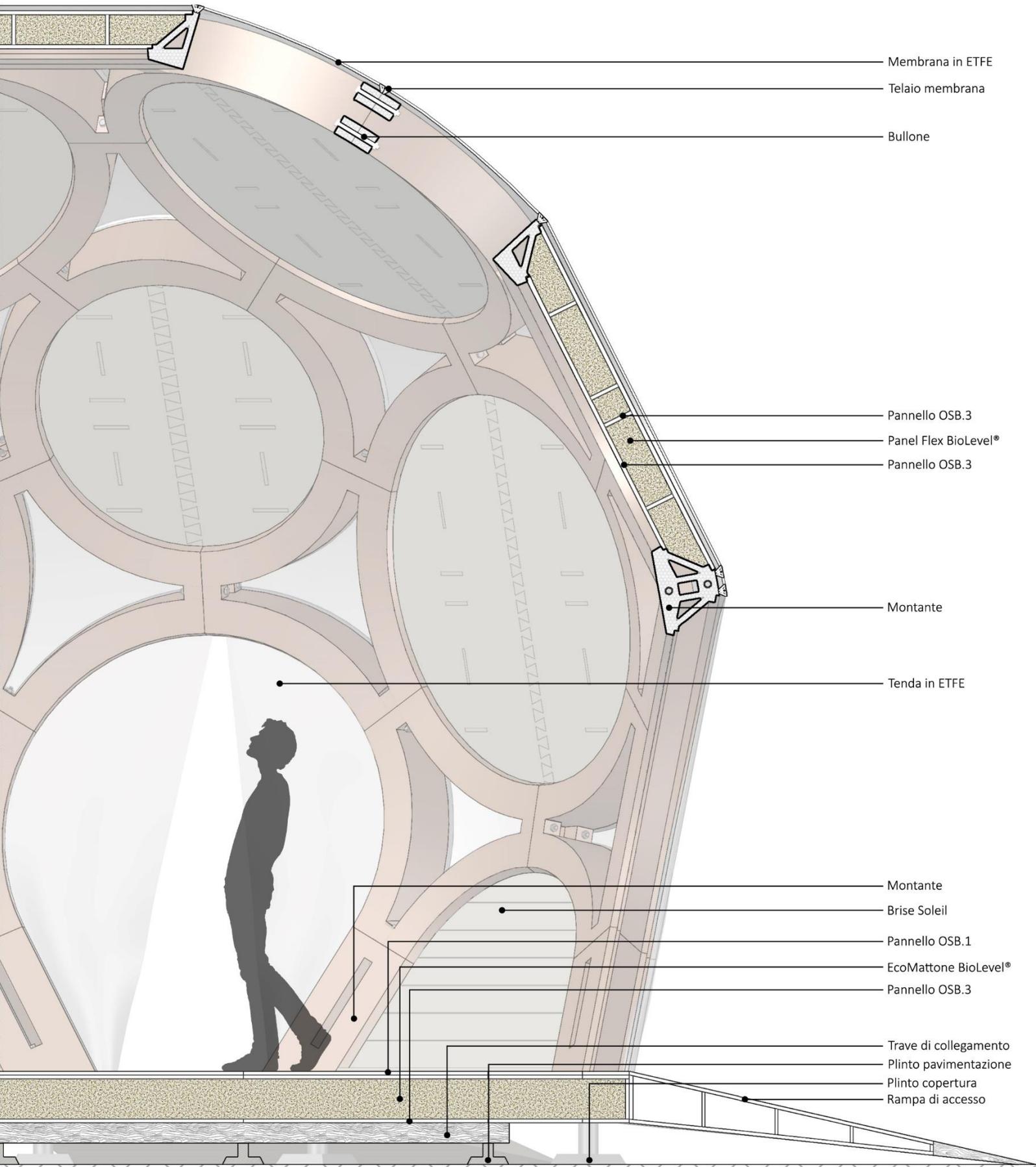
+ 0,00 m

PROSPETTO E  
SEZIONE AA'

Scala 1:25

0 1 m





Membrana in ETFE

Telaio membrana

Bullone

Pannello OSB.3

Panel Flex BioLevel®

Pannello OSB.3

Montante

Tenda in ETFE

Montante

Brise Soleil

Pannello OSB.1

EcoMattone BioLevel®

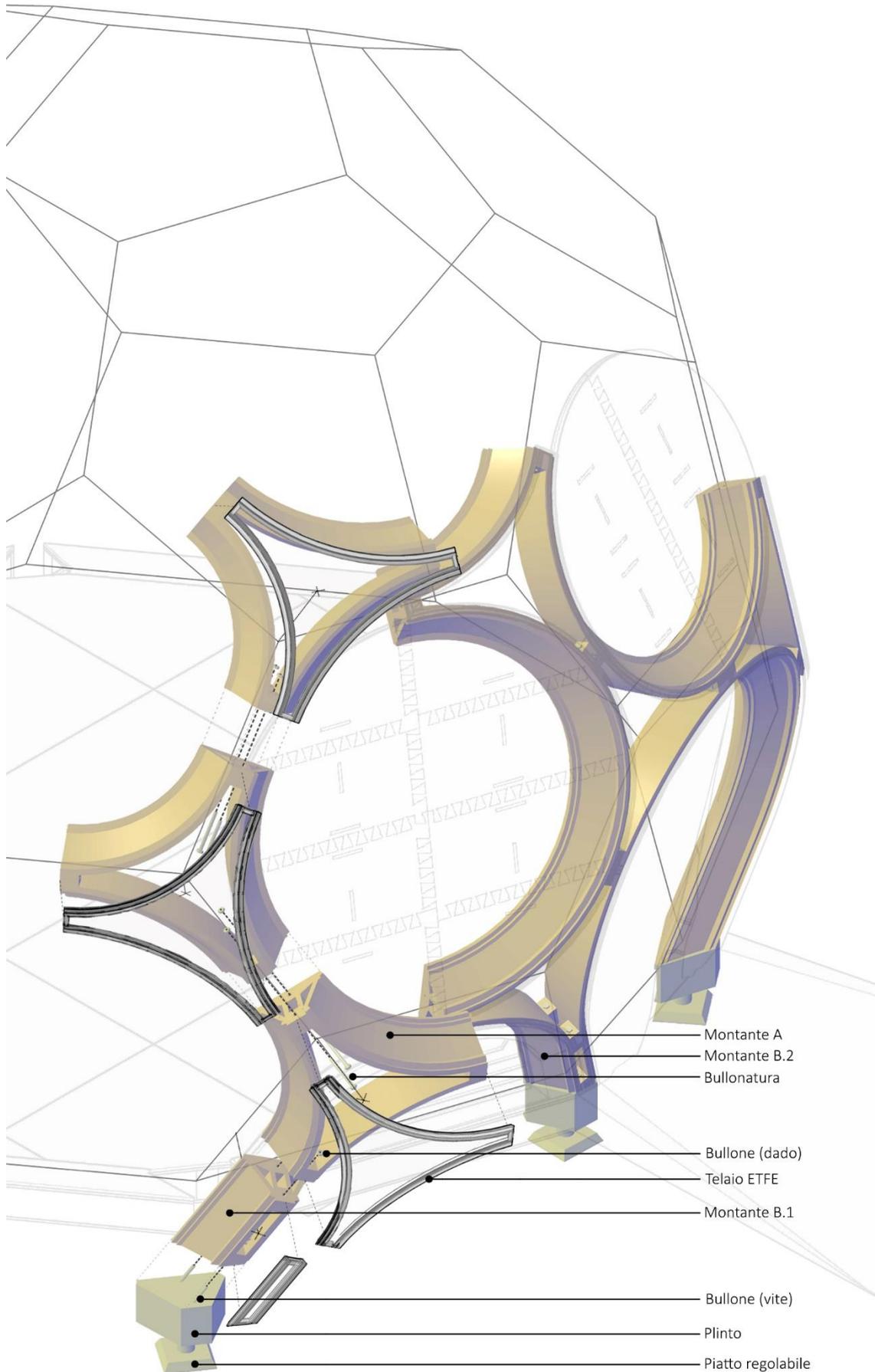
Pannello OSB.3

Trave di collegamento

Plinto pavimentazione

Plinto copertura

Rampa di accesso



**Figura 55:** Esploso  
assonometrico  
parziale relativo  
alla sola struttura  
portante

### 5.3.1. LA STRUTTURA PORTANTE

La struttura portante [Figura 55] del padiglione, stampata in HBP®-HempBioPlastic, è costituita da due tipologie di montante prodotte in serie tramite la tecnologia FDM [Figura 56]. Tali parti costitutive, una volta assemblate tra loro, hanno la funzione di sostenere tutti gli altri componenti e resistere alle sollecitazioni esterne. Inoltre, devono possedere le caratteristiche tali da poter essere facilmente assemblabili e smontabili da un limitato numero di persone impiegate. Per di più, ogni elemento deve presentare un ingombro tale da essere compatibile per un corretto trasporto mediante container.

- **Montante triangolare (A)**

La prima tipologia di montante si basa sull'idea di creare un unico nodo strutturale che fondesse le tre travi convergenti in un vertice compreso tra due esagoni e un pentagono (situazione comune tutti i vertici del fullerene). Per permettere e migliorare ulteriormente la ripetibilità del montante, ogni asta del "trio" di riferimento è stata divisa a metà. Tali punti corrispondono ai baricentri dei rispettivi profili delle travi e le sezioni di arco di circonferenza, tangenti ad ognuna delle semi-aste, determinano le direttrici delle tre travi. In corrispondenza dei tre vertici del montante, in cui le tre travi curvilinee convergono, sono stati inseriti degli elementi rettangolari distanziati tra loro per permettere il passaggio di possibili impianti.

Questi, hanno il compito di unire le travi a formare un unico elemento (il montante) e inoltre, mediante i due fori, permettere il fissaggio con gli altri montanti della struttura. Fissaggio garantito da un sistema di bulloni che permette in un secondo momento anche lo smontaggio della stessa copertura.

#### DATI DIMENSIONALI MONTANTE A (n° 40 pz)

INGOMBRO IN PIANTA	1,358x1,295	[m]
INGOMBRO VERTICALE	0,374	[m]
L. ASTA ESAGONO	1,174	[m]
L. ASTA PENTAGONO	1,092	[m]
VOLUME	0,114	[m <sup>3</sup> ]

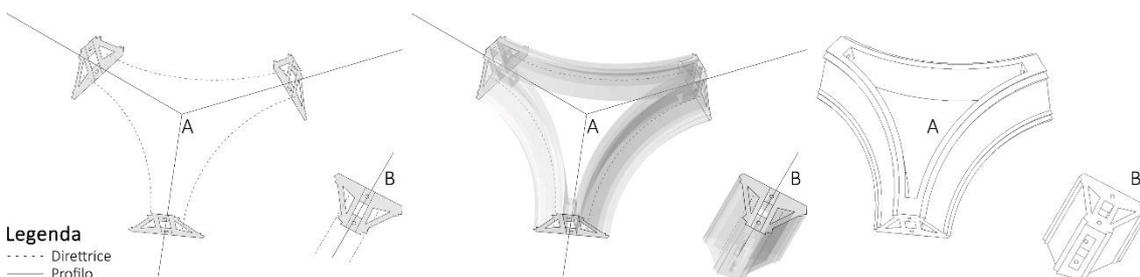
- **Montante lineare (B)**

Per quanto riguarda il secondo tipo di montante, ovvero quello posto alla base e che per tale motivo possiamo definire "gamba", si differenzia per l'andamento rettilineo e per essere composto da sole due travi.

Per questa tipologia di montante ve ne sono di due tipologie differenti (B.1, B.2) aventi medesime fattezze, ma una è la simmetrica dell'altra. Questi fungono da collegamento della volta ai plinti ai quali vengono assicurati mediante bullonatura.

#### DATI DIMENSIONALI MONTANTE B (n° 10 pz)

INGOMBRO IN PIANTA	0,790x0,471	[m]
INGOMBRO VERTICALE	0,725	[m]
LUNGHEZZA MEDIA	0,744	[m]
VOLUME	0,048	[m <sup>3</sup> ]



**Figura 56:** Schema esplicativo delle fasi di modellazione dei due montanti A e B

### 5.3.1.1. LA SEZIONE DELLA TRAVE

Ogni trave ha una sezione a triangolo rettangolo resa cava in buona parte per diminuire la quantità di materiale utilizzato e di conseguenza anche il peso del montante in sé. In questo modo si permette una maneggiabilità maggiore durante le fasi di costruzione.

#### 5.3.1.1.1. Le determinazioni dei profili

La sezione presenta un profilo, in corrispondenza dell'ipotenusa, modellato in base alla necessità di incastrare e alloggiare in sede, i pannelli "sandwich" che compongono il tamponamento. Agevolando così, gli operatori durante la fase di assemblaggio. Di seguito, vengono riportati e descritti i passaggi che sono stati studiati per ricavare la sezione del montante in modo geometrico e parametrico [Figura 57]:

##### 1) Determinazione dei piani

Congiungendo il centro del pentagono ( $O_{PE}$ ) con il punto medio (O) della relativa asta e ripetendo lo stesso per il centro dell'esagono ( $O_{ES}$ ), si possono ricavare i due piani di giacitura (piano ES, piano PE) rispetto all'asse Z, passante dal centro della sfera ( $O_c$ ) per il punto

(O). Come si può notare, le angolazioni sono leggermente differenti, per tale motivo, la medesima costruzione geometrica deve essere ripetuta sia per il profilo delle aste dell'esagono (ES) e sia per quello dell'asta del pentagono (PE);

##### 2) Impostazione degli strati

Una volta decisi gli spessori che devono avere i vari strati del pannello sandwich, si effettua l'offset dei due piani, n volte in base al numero di interfacce degli strati del pannello. Così facendo, sappiamo di certo che questi ultimi sono paralleli ai due piani di riferimento (ES, PE). Lo spessore dei due pannelli strutturali esterni in OSB è di 18 mm e per lo strato isolante interno lo spessore è di 150 mm. Inoltre, si è ritenuto opportuno garantire uno spessore continuo minimo di 30 mm del profilo del montante in HBP®;

##### 3) Definizione delle proporzioni

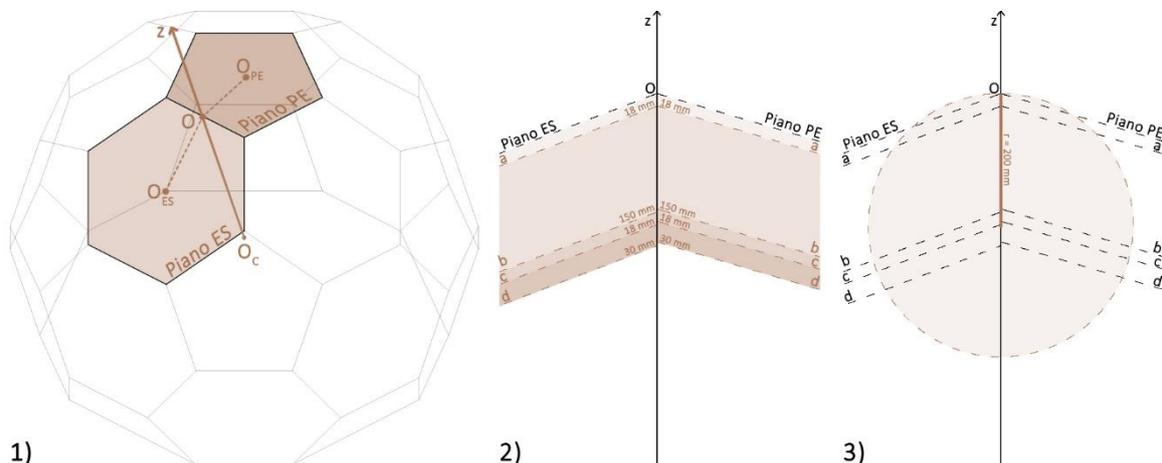
In questo passaggio, si imposta il raggio della circonferenza, passante per O e centro giacente sull'asse Z, dalla quale dipende la grandezza dei due rispettivi profili (ES, PE) e il peso complessivo dell'intero montante.

Facendo riferimento al D. Lgs. 81/08, redatto dal (Tavolo di lavoro nazionale MSK, 2014-

Figura 57: Schema rappresentativo delle fasi di costruzione per l'ottenimento dei profili ES e PE delle travi

**Legenda:**

- Linee di costruzione
- Linee profilo sezione trave



2018), si è optato per avere un montante con peso di 75 Kg, così da essere facilmente manovrabile da 3 “operai”. Difatti, è riportato come massa di riferimento per le condizioni ideali di sollevamento, e per la popolazione lavorativa “sana”, il valore di 25 Kg per gli uomini di età compresa tra i 18 e 45 anni.

Per favorire tale condizione, la misura del raggio della circonferenza è di 200 mm;

#### 4) Ottenimento dei due profili - passaggio A

In questo passaggio si tracciano i segmenti che congiungono il punto (O) con i due punti (A) e (B) in cui la circonferenza interseca le due rette (d) inferiori. Inoltre, si effettua un ulteriore offset delle due rette (a) per garantire lo spessore del montante di 30 mm al di sotto del pannello. A questo punto, è stato possibile delineare l'andamento seghettato dei due profili e gli incavi utili per il corretto posizionamento dei pannelli in OSB;

#### 5) Ottenimento dei due profili - passaggio B

Per garantire uno spessore laterale di 30 mm, si traslano i due profili seghettati in modo tale, che il punto più vicino all'asse Z giaccia lungo le rette di costruzione (f), equidistanti da tale asse.

In base al profilo ES, il maggiore tra i due, si

costruiscono le due rette perpendicolari all'asse Z che sono rispettivamente, i limiti superiore e inferiore dei due profili e di conseguenza anche del montante;

#### 6) Disegno degli incastri

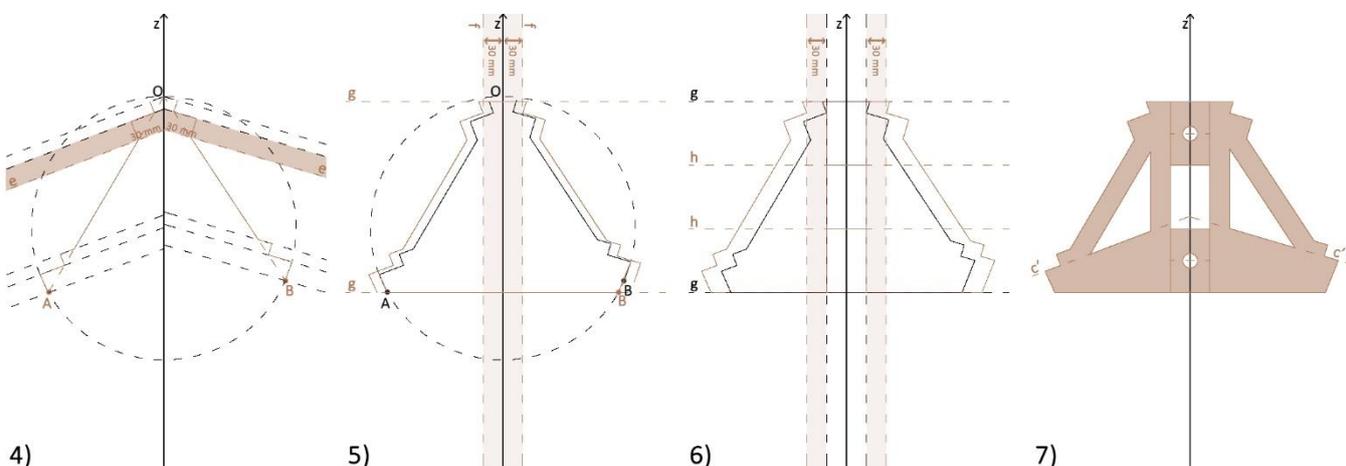
In questo passaggio si ottengono i due incastri rettangolari, posizionati tra i due profili, mediante una ulteriore traslazione di questi ultimi di 30 mm dall'asse Z.

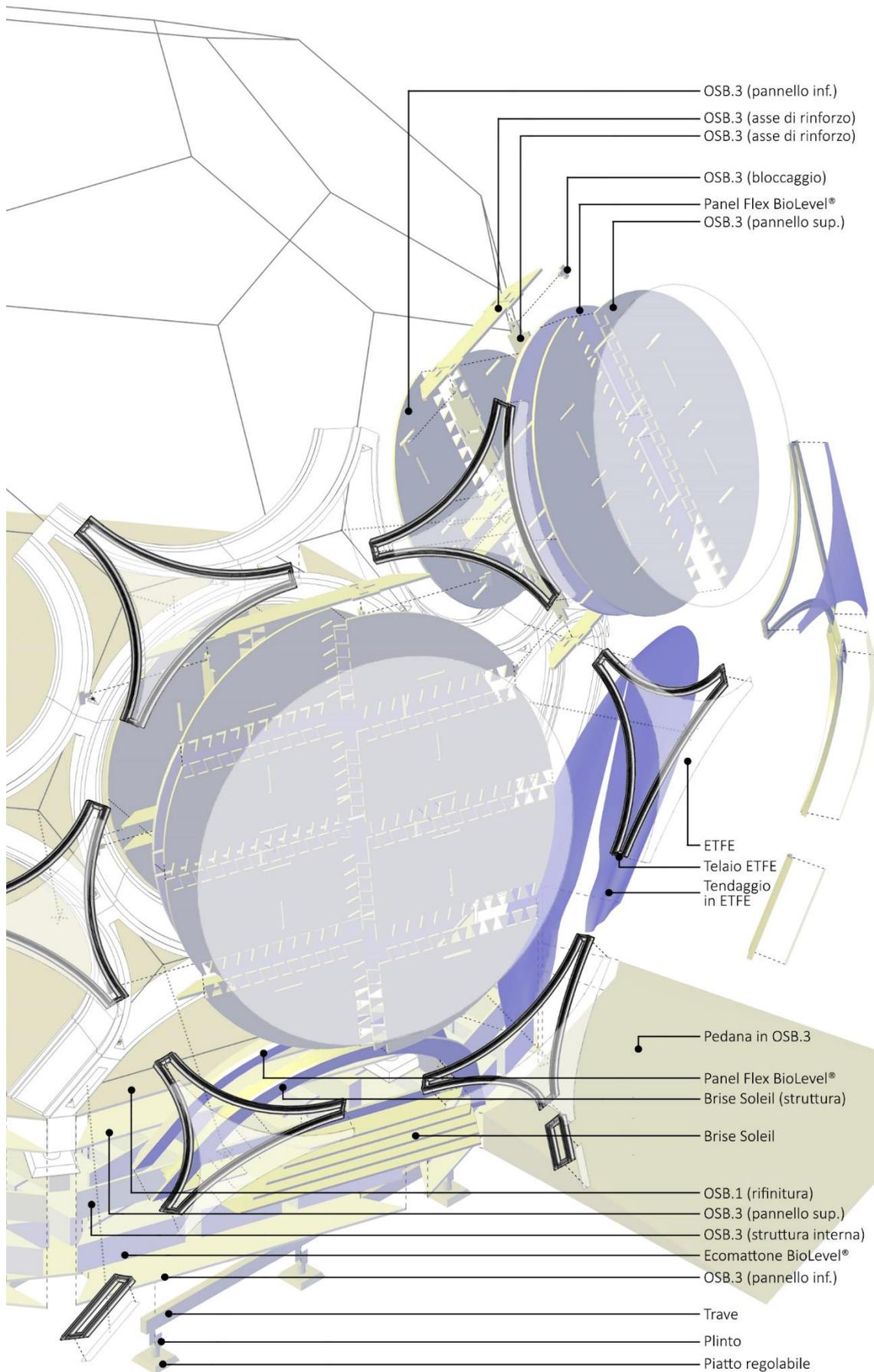
Per quanto riguarda l'altezza degli incastri, essa viene ricavata dividendo la distanza tra le rette (g) in tre parti uguali. Le due rette di costruzione (h) così ricavate delimitano superiormente e inferiormente il vuoto centrale, utile per il passaggio degli impianti;

#### 7) Alleggerimento della sezione

Ultima fase è quella che prevede lo “svuotamento” o alleggerimento del montante mediante dei vuoti interni ottenuti attraverso l'offset di 30 mm, verso l'interno, dell'intero profilo e l'intersezione di questo con le rette (c').

Per quanto riguarda gli incastri, in corrispondenza dei rispettivi baricentri, vengono posizionati i vuoti ( $\varnothing=22$  mm) per permettere il passaggio del bullone ( $\varnothing=20$  mm), atto all'assemblaggio con gli altri montanti.





**Figura 58:** Esploso assometrico parziale relativo agli elementi di tamponamento del padiglione

### 5.3.2. IL TAMPONAMENTO

La struttura portante, una volta assemblata, forma una copertura alveolare con vuoti che possiamo suddividere, in base alla loro posizione, in due gruppi [Figura 58]:

- **Alla base**

Il basamento è formato da vuoti con un profilo circolare nella parte alta e uno poligonale nella parte bassa, per via della presenza delle gambe della copertura. Tali vuoti hanno la funzione di permettere l'accesso alla struttura e il ricambio d'aria interno;

- **Nell'alzato**

La parte alta della copertura presenta dei vuoti di forma circolare e triangolare alla quale è affidato il compito dell'isolamento termoacustico e l'illuminamento naturale dell'interno.

Per la struttura dei diversi tamponamenti che costituiscono il padiglione, sono stati scelti i **pannelli OSB "Orientated Strand Board"**, assemblati tra loro mediante la tecnologia <sup>®</sup>WikiHouse<sup>7</sup>.

#### 5.3.2.1. IL BASAMENTO

La parte bassa della copertura si torva a una quota maggiore per evitare il contatto con il terreno e le problematiche che ne possono derivare, soprattutto, per quanto riguarda il deterioramento dei materiali. Il basamento poggia su un sistema di

pedistalli in acciaio e CLS di due tipologie differenti: quelli di dimensioni maggiori sostengono l'intera copertura mentre, quelli di dimensioni inferiori portano la struttura della pavimentazione.

##### 5.3.2.1.1. La pavimentazione interna

La pavimentazione interna, pensata come una struttura a sé autoportante, viene rialzata dal terreno di 20.5 cm, portando il piano di calpestio ad una quota di 46 cm (20.5 più lo spessore della pavimentazione).

La separazione dal terreno è possibile mediante, dei piccoli sostegni puntuali costituiti da: un piatto in CLS e da una staffa in acciaio ad U, dove vengono collocate le travi primarie in legno di orditura. La pavimentazione presenta uno spessore di 25.4 cm e una stratigrafia comprendente 4 layers:

- 1) **Rifinitura interna**

sp. 18 mm in OSB.3 (WikiHouse Foundation, 2016);

- 2) **Superiore**

sp. 18 mm in OSB.3 (WikiHouse Foundation, 2016);

- 3) **Intermedio**

sp. 200 mm in blocchi tipo ECOMATTONE (BioLevel<sup>®</sup>). In questo spessore vengono inglobate le travi strutturali in OSB.3;

- 4) **Inferiore**

sp. 18 mm in OSB.3 (WikiHouse Foundation, 2016).

<sup>7</sup> Ogni pannello è costituito da lamelle irregolari di legno incollati a strati con orientamenti differenti e pressati in modo tale da rendere il pannello compatto. Di pannellature OSB ne esistono 4 tipologie differenti in funzione della resistenza meccanica e dell'umidità del luogo di impiego del prodotto: **OSB 1**, non strutturale; **OSB 2**, pannelli strutturali a uso luogo asciutto; **OSB 3**, pannelli strutturali a uso luogo umido (collante melaminico); **OSB 4**, pannelli strutturali a uso luogo umido e per carichi pesanti (collante poliuretano). La tipologia di OSB scelta, conforme alla funzione da ricoprire all'interno del padiglione, è la tipologia "OSB 3". La tecnologia di formatura impiegata è la "digitally-manufactured", ogni elemento viene tagliato a laser e presenta delle estremità frastagliate che permettono l'incastro tra loro. In questo modo è più semplice il trasporto sottoforma di tavolati che, una volta giunti a destinazione, possono essere montati (WikiHouse Foundation, 2016).

### 5.3.2.1.2. Accessi e aperture

Le 10 aperture, che costituiscono il basamento, si trovano anch'esse ad una quota di 46 cm rispetto al terreno.

- **Le 5 più grandi**

Basate sugli esagoni del fullerene di partenza, sono destinate ad essere gli accessi al padiglione garantendo un passaggio di dimensioni al netto dei montanti di 2.15 m di altezza e 0.86 m di larghezza. Ad esse si accede mediante delle piccole rampe esterne che facilitano l'entrata anche da parte di persone portatori di handicap.

L'entrata è realizzata con un tendaggio in ETFE trasparente, apribile in corrispondenza della mezzeria e di uguale grandezza dell'apertura;

- **Le 5 più piccole**

Costruite sui pentagoni tagliati del fullerene, presentano un infisso caratterizzato da un "brise soleil" regolabile in OSB che permette, mediante la propria apertura, il passaggio dell'aria o viceversa il mantenimento della temperatura interna.

### 5.3.2.2. L'ALZATO

La parte alta della copertura è caratterizzata esternamente da uno strato in "Etilene-Tetrafluoro Etilene" (ETFE)<sup>8</sup> di 2 mm di spessore a protezione dagli agenti atmosferici.

La composizione della tamponatura della copertura è stata studiata in modo tale da permettere:

- L'illuminamento naturale e il riscaldamento passivo dell'interno mediante "effetto serra";
- L'isolamento termoacustico.

A questo scopo, alle due tipologie di vuoti delineati dalla struttura portante vengono affidate in modo separato tali due funzioni:

- **Tamponamento trasparente**
- **Tamponamento isolante**

#### 5.3.2.2.1. Il tamponamento trasparente

Gli elementi trasparenti, che garantiscono il passaggio della luce solare e il conseguente riscaldamento dell'interno mediante l'effetto serra, sono i vuoti di forma triangolare con i lati concavi che rappresentano lo spazio interstiziale tra le tre aste del montante.

Mantenendoli liberi da ogni tamponamento, fatta eccezione della sola rifinitura esterna in ETFE, permettono una superficie trasparente complessiva di 17 m<sup>2</sup>.

#### 5.3.2.2.2. Il tamponamento isolante

I vuoti circolari iscritti ai pentagoni ed esagoni del fullerene di partenza, con diametro rispettivamente di 1.74 m e di 2.24 m, rappresentano lo strato di tamponamento per l'isolamento termoacustico.

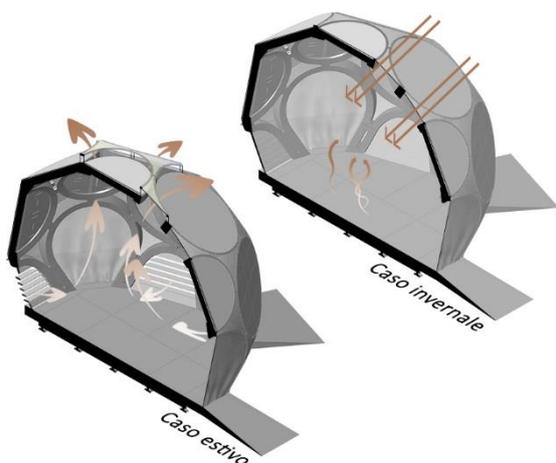
<sup>8</sup> Si tratta di un polimero termoplastico che garantisce i seguenti vantaggi oltre a quelli di impermeabilizzazione (QUARATO, 2016): **Trasparenza**, fattore che può arrivare al 94-97% e permettere una permeabilità maggiore ai raggi UV; **Leggerezza**, ha un peso specifico di 0,35 Kg/m<sup>2</sup>, peculiarità che comporta minori costi di trasporto e di montaggio senza gravare in modo eccessivo sulla struttura; **Resistenza chimica**, è una sostanza autopulente con un'alta resistenza termica intorno ai 170°C senza mostrare alterazioni nelle sue proprietà fisiche; **Ignifugo e autoestinguento**, caratteristica dovuta alla presenza del fluoro; **Durabilità**, a differenza delle altre plastiche, che ingialliscono e si deteriorano a causa dell'esposizione solare, questa non ne risente e con la dovuta manutenzione può arrivare a 40 anni di utilizzo; **Riciclabilità**, percentuale di riciclaggio del 100% in quanto, al termine del ciclo di utilizzo, la membrana può essere fusa e riutilizzata interamente; **Isolamento termico**, può essere utilizzato sottoforma di membrana o cuscinetto pneumatico.

Tale tamponamento è stato pensato come una pannellatura sandwich componibile mediante tecnologia <sup>®</sup>WikiHouse, con spessore complessivo di 18.6 centimetri e tre strati:

- 1) **Superiore**  
sp. 18 mm in OSB.3 (WikiHouse Foundation, 2016);
- 2) **Intermedio**  
sp. 150 mm in pannelli tipo PANEL FLEX (BioLevel<sup>®</sup>);
- 3) **Inferiore**  
sp. 18 mm in OSB.3 (WikiHouse Foundation, 2016).

I due pannelli esterni (1) e (3) vengono uniti tra loro da una struttura a telaio interna, delle stesse caratteristiche materiche, che permette il rinforzo del pannello. Per quanto riguarda lo strato (2), vengono alloggiati all'interno della struttura in OSB.3, dei pannelli PANEL FLEX<sup>9</sup> prodotti dall'azienda italiana Bio-Level<sup>®</sup>.

I pannelli, una volta assemblati, hanno un peso di 130 kg i più grandi e di 80 kg i più piccoli.



### 5.3.3. IMPIANTISTICA E CONFORT INTERNO

All'interno della presente tesi, non è stato possibile approfondire in modo dettagliato tali aspetti tecnologici del padiglione ma, sono stati fatti dei ragionamenti riguardanti il possibile posizionamento degli impianti elettrici per l'illuminazione e la movimentazione del sistema di raffrescamento.

Con la separazione in due placche del piatto di giunzione tra i diversi montanti, è stato possibile predisporre ad un livello intermedio nello spessore della struttura portante, un eventuale passaggio per la condotta impiantistica. Questa, potrebbe raggiungere tutte le parti dell'intera copertura senza modificare l'intradosso della stessa. Così nei vuoti triangolari dei montanti potrebbe essere alloggiata un'illuminazione a LED che, oltre ad illuminare l'interno, doterebbe la copertura di un effetto scenico luminoso visibile dall'esterno.

#### 5.3.3.1. IL SISTEMA DI RAFFRESCAMENTO

Il ricambio di aria [Figura 59] è garantito dal "brise-soleil" inferiore, che lavorando insieme alla corona di triangoli apribili (mediante un sistema automatizzato) posti in cima alla copertura, permette nei mesi più caldi di innescare i moti convenzionali e consentire così il raffrescamento interno.

Nei mesi più freddi, la chiusura dell'intero sistema consente il mantenimento della temperatura interna più calda, prodotta dall'effetto serra per mezzo della membrana in ETFE.

**A lato**  
**Figura 59:** Schema raffigurante il sistema di controllo della temperatura interna durante il periodo estivo ed invernale

<sup>9</sup> Si tratta di pannelli isolanti in fibre di canapa termofissate con fibre di poliestere riciclato (10%), grazie all'assenza di proteine, elemento gradito ai parassiti, risulta inattaccabile da roditori e insetti, resistente alle muffe e completamente riutilizzabile a fine ciclo (BioLevel<sup>®</sup>).

### 5.3.3.2. LA TRASMITTANZA TERMICA

Utilizzando lo strumento di calcolo online, per la trasmittanza termica e verifica di condensa con metodo di Glaser (PONTAROLO ENGINEERING SPA), si è potuto venire a conoscenza delle proprietà dei pacchetti stratigrafici della pavimentazione e dei pannelli di tamponamento. Invece, non è stato possibile studiare nel dettaglio la porzione di copertura in corrispondenza del telaio della struttura e le problematiche termiche che si sviluppano.

Nelle tabelle, rispettivamente la [Tabella 13] per la pavimentazione e la [Tabella 14] per il tamponamento, sono riportati i risultati di tali calcoli.

Le caratteristiche dei materiali sono state ricavate dai manuali tecnici dei relativi prodotti e, tutti i dati ricavati dalla misurazione sono stati rapportati ai limiti imposti dalla legislazione nazionale in vigore dal 2019 (MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO, 2015) [Tabella 12].

per una fascia climatica del tipo “E” con i limiti imposti a 0.26 W/m<sup>2</sup>K per i pavimenti e 0.22 W/m<sup>2</sup>K per le coperture. Valori facilmente raggiungibili con un leggero incremento nello spessore dell’isolante. La zona climatica, in cui rientra effettivamente il padiglione, è la “D” [Figura 60], con i limiti imposti a 0.20 W/m<sup>2</sup>K per le pavimentazioni e di 0.26 W/m<sup>2</sup>K per le coperture.



Legenda GG = Gradi Giorno

- Zona A** GG<600  
(Lampedusa, Porto Empedocle)

**Zona B** 601<GG<900  
(Agrigento, Reggio Calabria, Messina, Trapani)

**Zona C** 901<GG<1400  
(Napoli, Imperia, Taranto, Cagliari)
- Zona D** 1401<GG<2100  
(Firenze, Foggia, Roma, Ancona, Oristano)

**Zona E** 2101<GG<3000  
(Aosta, Torino, Milano, Bologna, L'Aquila)

**Zona F** 3001<GG  
(Belluno, Cuneo)

#### 5.3.3.2.1. Risultati

Da tale studio si è potuto calcolare la trasmittanza termica “U” per entrambe le tipologie di pacchetti isolanti:

- **Pavimentazione** 0.27 W/m<sup>2</sup>K;
- **Tamponamento** 0.23 W/m<sup>2</sup>K.

Possiamo notare che entrambi i pacchetti stratigrafici sono di poco maggiori dei limiti di legge imposti

A lato  
**Figura 60:** Mappa della suddivisione del suolo italiano in zone climatiche

**Tabella 12:** Requisiti e prescrizioni specifici per gli edifici di nuova costruzione o soggetti a ristrutturazioni importanti di primo livello. Requisiti degli edifici a energia quasi zero

DATI ZONA CLIMATICA IN ACCORDO CON IL D.M. (Decreto Ministeriale) 26/6/2015			
ZONA CLIMATICA	U Pavimenti	U Pareti	U Coperture
A	0,44	0,43	0,35
B	0,44	0,43	0,35
C	0,38	0,34	0,33
D	0,29	0,29	0,26
E	0,26	0,26	0,22
F	0,24	0,24	0,20

PARAMETRI TERMICI DELLA PAVIMENTAZIONE		STRATIGRAFIA				
TIPO DI STRUTTURA	PARETE					
Spessore (s)	25,4 cm					
Massa superficiale (m)	95 Kg/m <sup>2</sup>					
Trasmittanza termica (U)	0,270 W/m <sup>2</sup> K					
Resistenza termica (R)	3,702 m <sup>2</sup> K/W					
PARAMETRI TERMICI DINAMICI		MODULO				
Trasmittanza termica periodica (Y <sub>ie</sub> )	0,041 W/m <sup>2</sup> K					
Capacità termica areica interna (K <sub>i</sub> )	30,9 kJ/m <sup>2</sup> K					
Capacità termica areica esterna (K <sub>e</sub> )	31,5 kJ/m <sup>2</sup> K					
Fattore di attenuazione (f)	0,152					
Sfasamento (φ)	24,00 h					
Ammettenza termica interna (Y <sub>ii</sub> )	2,239 W/m <sup>2</sup> K					
Ammettenza termica esterna (Y <sub>ee</sub> )	2,289 W/m <sup>2</sup> K					
Massa superficiale esclusi intonaci	95 Kg/m <sup>2</sup>					

DESCRIZIONE STRATIGRAFICA	s [mm]	ρ [Kg/m <sup>3</sup> ]	μ [-]	c [J/KgK]	λ [W/mK]	R [m <sup>2</sup> K/W]
Strato liminare esterno						0,04
1) Pannello OSB.3	18	650	40	1700	0,13	0,14
2) Ecomattone bio level®	200	300	4	1770	0,065	3,08
3) Pannello OSB.3	18	650	40	1700	0,13	0,14
4) Pannello OSB.1 (rifinitura)	18	650	40	1700	0,13	0,14
Strato liminare interno						0,17

**Tabella 13:** Verifica dei parametri termici igrometrici e termici dinamici della pavimentazione

PARAMETRI TERMICI DEL TAMPONAMENTO		STRATIGRAFIA				
TIPO DI STRUTTURA	PARETE					
Spessore (s)	23,8 cm					
Massa superficiale (m)	32 Kg/m <sup>2</sup>					
Trasmittanza termica (U)	0,231 W/m <sup>2</sup> K					
Resistenza termica (R)	4,328 m <sup>2</sup> K/W					
PARAMETRI TERMICI DINAMICI		MODULO				
Trasmittanza termica periodica (Y <sub>ie</sub> )	0,179 W/m <sup>2</sup> K					
Capacità termica areica interna (K <sub>i</sub> )	24,7 kJ/m <sup>2</sup> K					
Capacità termica areica esterna (K <sub>e</sub> )	22,8 kJ/m <sup>2</sup> K					
Fattore di attenuazione (f)	0,773					
Sfasamento (φ)	5,38 h					
Ammettenza termica interna (Y <sub>ii</sub> )	1,649 W/m <sup>2</sup> K					
Ammettenza termica esterna (Y <sub>ee</sub> )	1,525 W/m <sup>2</sup> K					
Massa superficiale esclusi intonaci	32 Kg/m <sup>2</sup>					

DESCRIZIONE STRATIGRAFICA	s [mm]	ρ [Kg/m <sup>3</sup> ]	μ [-]	c [J/KgK]	λ [W/mK]	R [m <sup>2</sup> K/W]
Strato liminare interno						0,17
1) Pannello OSB.3	18	650	40	1700	0,13	0,14
2) Panel flex bio level®	150	60	1,5	1700	0,04	3,75
3) Pannello OSB.3	18	650	40	1700	0,13	0,14
4) Camera d'aria non ventilata	50	1	1	1000	0,313	0,16
5) Membrana in ETFE	2	0,35	10000	1298	1,96	0,001
Strato liminare esterno						0,04

**Tabella 14:** Verifica dei parametri termici igrometrici e termici dinamici della copertura

**s** | Spessore dello strato  
**ρ** | Massa volumica  
**μ** | Fattore di resistenza alla diffusione del vapore

**c** | Calore specifico del materiale  
**λ** | Conducibilità termica del materiale  
**R** | Resistenza termica degli strati

## 5.4. PRODUZIONE E CANTIERIZZAZIONE

Tutta la progettazione ha tenuto conto delle modalità di produzione dei vari materiali impiegati, al loro trasporto nel modo più agevole e la modalità di assemblaggio nelle diverse fasi del cantiere.

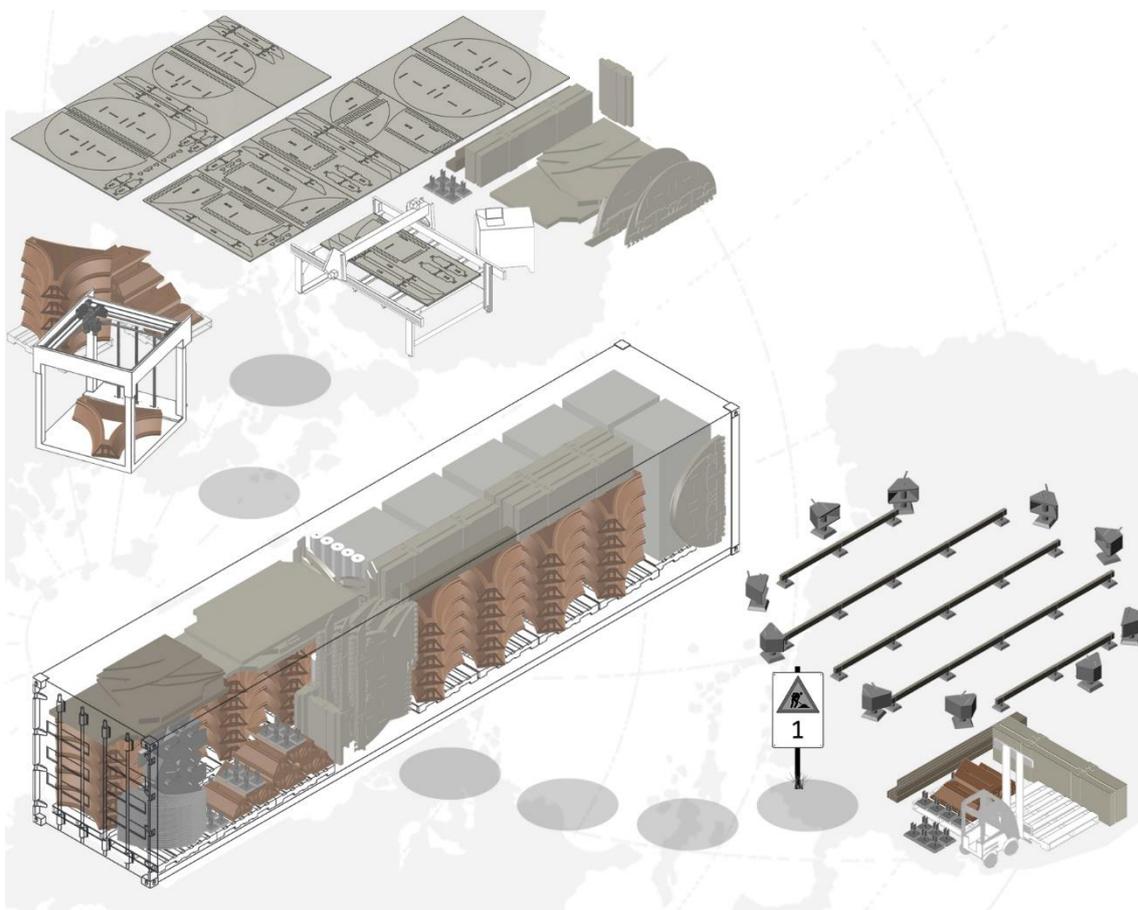
Alla base vi è la volontà di dotare l'intera copertura di quelle caratteristiche che le permettono di essere trasportata, montata ed eventualmente smontata, in tempi brevi per un riutilizzo tempestivo.

### 5.4.1. PRODUZIONE E TRASPORTO

La produzione dei vari componenti avviene in modo separato a causa del loro differente ciclo di

produzione. Ma, hanno in comune il fatto che le proprie linee di produzione occupano poco spazio e non necessitano di elevati apporti di energia:

- **Montanti in HBP-HempBioPlastic®**  
Stampaggio 3D mediante tecnologia FDM con filamento;
- **Elementi in OSB.3**  
Taglio laser su pannelli standard in OSB.3 di dimensioni 2400x1200 mm (WikiHouse Foundation, 2016). Per un pannello ES sono necessari 6 tavolati, mentre per uno del tipo PE 4 tavolati (TOT = 80 pannelli);
- **Panel flex BIO LEVEL e Ecomattone BIO LEVEL**  
Formatura a freddo, seguita da una essiccazione



e stagionatura anche all'aria aperta (BioLevel®);

- **Membrana in ETFE**

In ordine: estrusione, tessitura, rifinitura e taglio (DE VECCHI, et al., 2015-2016);

- **Struttura della membrana in ETFE**

Fusione ed estrusione;

- **Plinti**

Fusione e formatura in stampi.

Una volta prodotti tutti gli elementi si procede al loro posizionamento all'interno di un container del tipo "Container 40 feet High Cube" di dimensioni massime (lunghezza 12.192 m, larghezza 2.438 m e altezza 2.896 m).

In questo modo, si garantisce un trasporto adeguato con qualsiasi modalità di trasporto in modo rapido ed efficace.

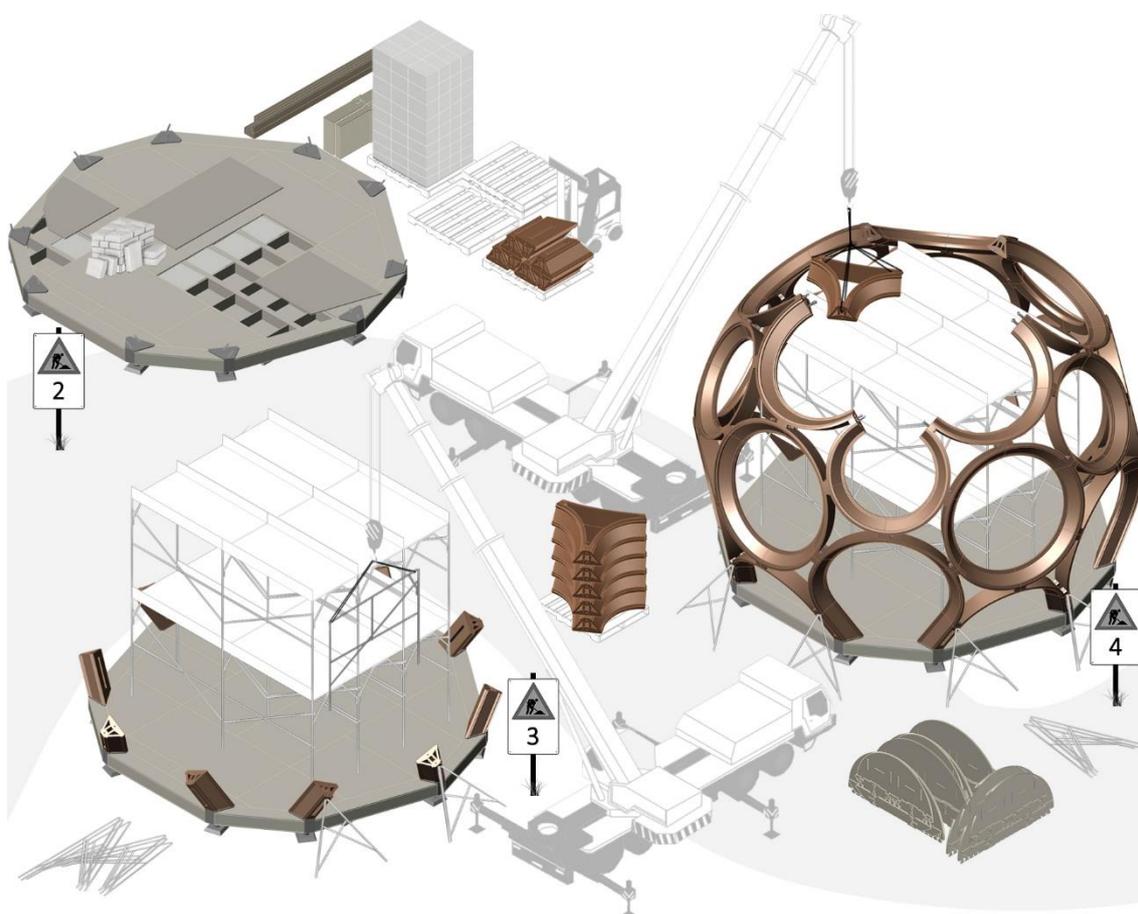
## 5.4.2. ASSEMBLAGGIO E SMONTAGGIO

Una volta che i due container (contenenti tutto il materiale necessario per l'assemblaggio del padiglione) giungono a destinazione, si procede alla fase di cantiere che può essere portata a termine con l'impiego di sole 3 persone e una piccola gru.

Il cantiere per l'assemblaggio dell'intera copertura è stato studiato per fasi:

### 1) Posa plinti

La prima fase è sicuramente la posa dei plinti di sostegno della copertura e della pavimentazione. Una volta garantita la messa in piano mediante la loro calibrazione, si procede con la collocazione delle travi di unione in corrispondenza dei sostegni ad U;



**2) Pavimentazione**

Si assemblano tutti gli elementi che costituiscono la pavimentazione (in ordine dal basso verso l'alto) ad esclusione del tavolato di rifinitura;

**3) Attrezzature cantiere e montanti B**

Vengono fissati ai plinti i montanti della base e si procede con l'installazione delle attrezzature provvisorie funzionali alla costruzione del padiglione. Sulla pavimentazione si poggia l'impalcatura interna, mentre all'esterno, viene posizionata una piccola gru da cantiere per aiutare nella movimentazione del materiale;

**4) La struttura portante**

Partendo dal basso verso l'alto, si completa inizialmente l'anello inferiore di montanti, con l'ausilio di piccoli puntoni atti ad assicurare la

stabilità delle gambe durante il montaggio.

Una volta che l'anello inferiore è completo, si rimuovono i puntoni e si continua la posa dei montanti in modo graduale;

**5) I pannelli isolanti**

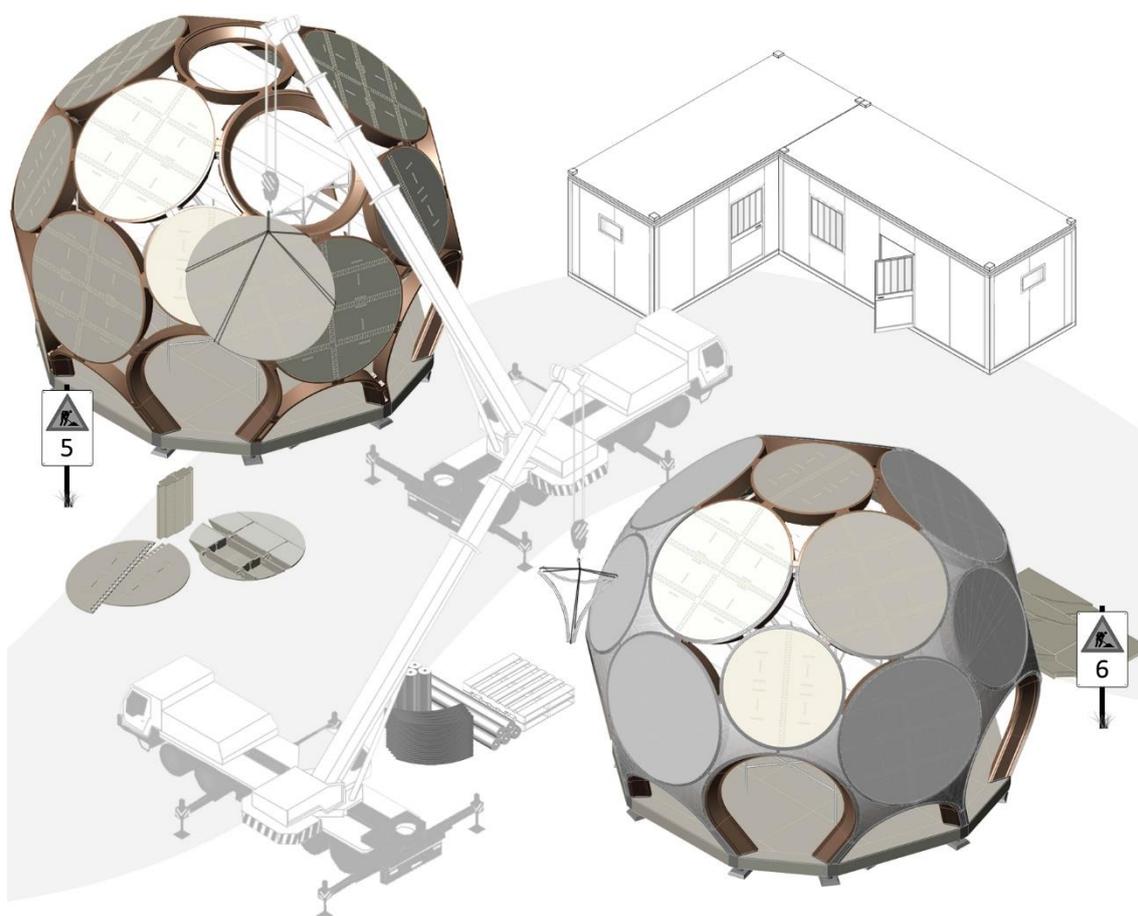
Completata la struttura portante, vengono assemblati (a terra) i vari pannelli isolanti, seguendo la stessa metodologia e sequenza utilizzata per la pavimentazione;

**6) La membrana esterna**

Per usufruire ancora dell'impalcatura e della gru prima del loro smontaggio (programmato alla fine della seguente fase), si procede ad installare la membrana in ETFE con il relativo telaio di sostegno e gli eventuali impianti;

**7) Le rifiniture**

A smontaggio avvenuto delle attrezzature da



cantiere, viene completata la rifinitura superficiale della pavimentazione con gli allestimenti espositivi interni.

In concomitanza, vengono installate le pannellature strutturali delle aperture alla base, con il relativo strato isolante;

### 8) Le aperture

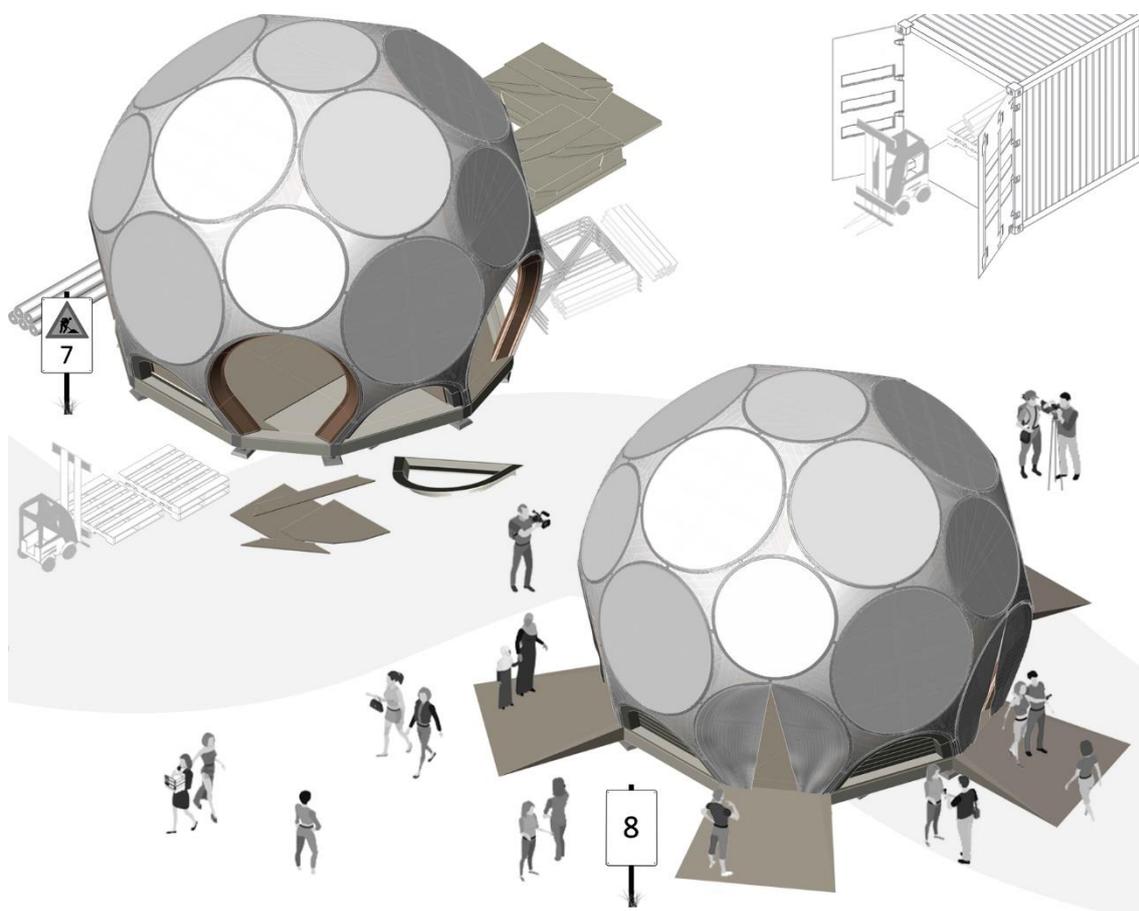
L'ultima fase di costruzione prevede il completamento del "brise soleil" e degli accessi con la giustapposizione alla base delle 5 pedane d'accesso.

### 9) Smontaggio

Utilizzando le metodologie di assemblaggio "a secco, ovvero senza l'utilizzo di malte o colle, il processo precedentemente descritto è perfettamente reversibile. Così, l'intero padiglione può essere spostato e utilizzato nuovamente;

### 10) Recupero

Nella seguente tesi non è stato possibile studiare a fondo la durata di esercizio di tutte le sue parti e di conseguenza la vita del padiglione. Possiamo affermare che, dopo diversi utilizzi, tutti i materiali che lo compongono possono essere al 100% riciclati o riutilizzati.



## 5.5. CALCOLO STRUTTURALE

### Il materiale innovativo HBP può essere utilizzato per strutture portanti?

Per rispondere a tale domanda, concludendo in modo esaustivo la fase progettuale e raggiungendo la finalità della suddetta tesi. Ci si è serviti dell'analisi FEA (Finite Element Analysis)<sup>10</sup>, applicata all'intera struttura portante del padiglione ed eseguita mediante il software "Diana FEA" (Displacement ANALyzer)<sup>11</sup>.

In questo modo, è possibile verificare che il materiale studiato e testato durante la fase sperimentale, effettivamente è in grado di resistere alle tensioni che si sviluppano all'interno del padiglione progettato.

#### 5.5.1. ANALISI FEM

Prima di procedere sul software di analisi degli elementi finiti, si sono calcolati, servendosi del software AutoCAD e il foglio di lavoro EXCEL, i momenti d'inerzia della sezione della trave dell'esagono nel piano di riferimento baricentrico locale YZ (più piccola e più presente rispetto a quella del pentagono).

$$J_y = \int z^2 dA; J_z = \int y^2 dA; J_{yz} = \int yz dA$$

#### 5.5.1.1. PROCEDURA E SETTAGGIO MODELLO DI CALCOLO

I primi passaggi dell'analisi consistono nell'inserimento di tutte le direttrici della struttura in un piano di lavoro di coordinate XYZ globale [Figura 61]. Tali linee sono state tracciate, per ogni piano di riferimento locale, in modo tale che la direzione seguisse l'asse X e il piano della sezione della trave (generatrici) giacesse sul piano YZ con l'asse Z uscente dal fullerene.

Successivamente, è stata associata ad ogni asse di trave la tipologia di sezione "Class-III beams 3D" con un unico profilo "□" (rettangolare) per le giunzioni (GN) e il profilo ad "L" (elle) con dimensioni conformi ad una corretta approssimazione dei profili reali di ciascuna asta (ES, PE) [Tabella 15].

Semplificazione riconducibile ai valori dei momenti d'inerzia della sezione della trave effettiva e che ha permesso l'ottenimento di un'analisi, il più possibile in accordo con l'analogo modello reale.

Una volta definita la struttura portante, sono state modellate le superfici circolari delle rispettive pannellature di tamponamento. A questo punto, si è proceduto ad associare ad ogni elemento le

<sup>10</sup> È una tecnica di simulazione a computer usata nelle analisi ingegneristiche. Questa tecnica di simulazione utilizza il Metodo degli elementi finiti (o FEM), il cui obiettivo è essenzialmente la risoluzione in forma discreta e approssimata di generali sistemi di equazioni alle derivate parziali (o PDE). (Origine: Analisi agli elementi finiti - <https://it.wikipedia.org>)

<sup>11</sup> DIANA FEA BV (precedentemente TNO DIANA BV) è stata fondata nel 2003 come società spin-off dal dipartimento di meccanica computazionale del TNO Building and Construction Research Institute a Delft, Paesi Bassi. Si tratta di un ampio pacchetto software multiuso a elementi finiti dedicato, ma non esclusivo, a una vasta gamma di problemi che sorgono nell'ingegneria civile, comprese le discipline strutturali, geotecniche, tunneling, terremoti e ingegneria petrolifera e del gas. La funzionalità del programma include modelli di materiali estesi, librerie di elementi e procedure di analisi, che si basano sulle più recenti e più avanzate tecniche di analisi degli elementi finiti (DIANA FEA bv., 2019).

caratteristiche fisiche e meccaniche (densità, modulo di Young) dei corrispondenti materiali che li compongono e la corretta stratigrafia per quanto riguarda la pannellatura [Figura 62].

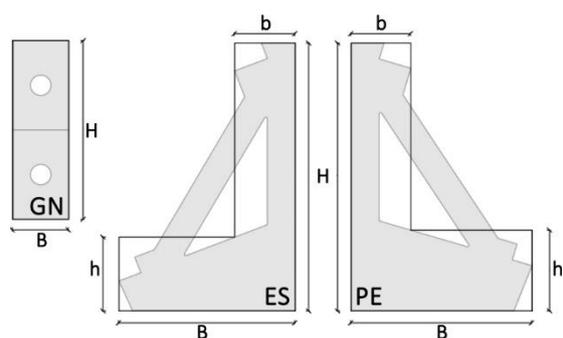
Da ultimo, si sono inseriti i vincoli alla base come incastri al piede, il **carico della neve di 250 Kg/m<sup>3</sup>** (in accordo con le normative previste per un ipotetico posizionamento del padiglione a Torino) e una simulazione di **azione sismica orizzontale** (con segno negativo lungo l'asse X) di valore 0.3 g, in riferimento alla normativa del Decreto Ministeriale "N.T.C.-2018" (MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE E DEI TRASPORTI, 2018) [Figura 64].

Concluso il settaggio del modello con l'inserimento di tutte le variabili, il programma converte il modello in un'unica "mesh" con diversi punti in cui si effettua il calcolo [Figura 63].

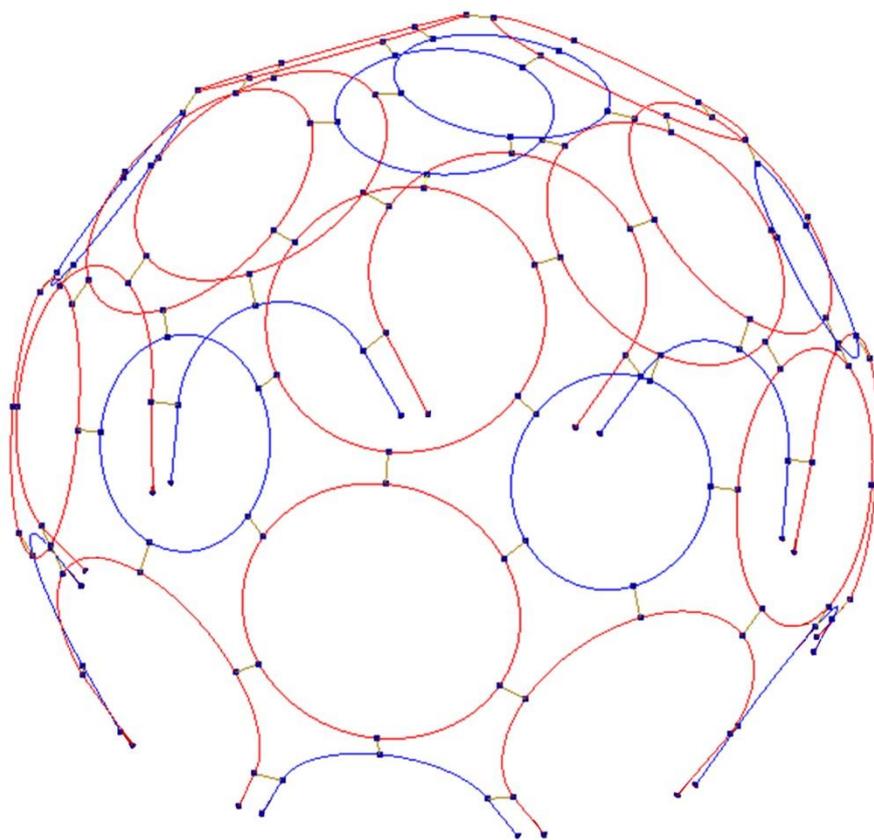
Infine, si sono eseguite le analisi per due casi differenti di combinazione di carichi e azioni apportati alla struttura:

- **Caso 1 (PP+CN)**  
Peso Proprio + Carico Neve;
- **Caso 2 (PP+AS)**  
Peso Proprio + Azione Sismica.

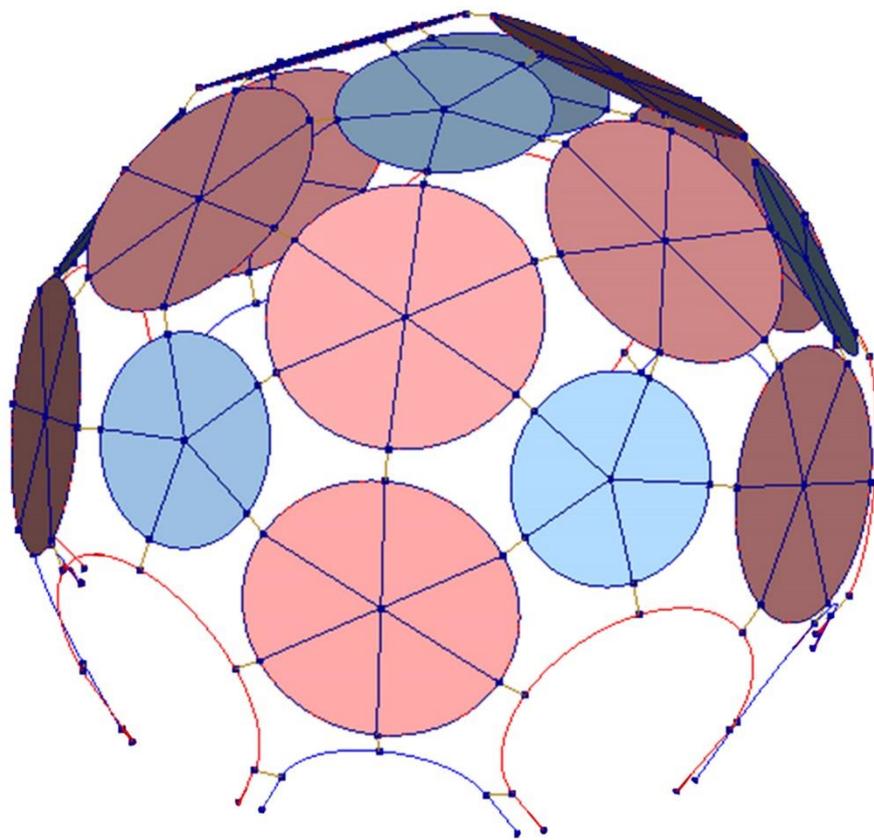
CLASS-III BEAMS 3D	ES	PE	GN
<b>B [cm]</b>	18,9	19,4	6,0
<b>H [cm]</b>	28,9	28,9	19,3
<b>b [cm]</b>	6,5	6,4	-
<b>h [cm]</b>	7,9	8,7	-
<b>Larco [cm]</b>	118,0	110,0	20,0
<b>Lgamba [cm]</b>	75,0	66,0	-



**Tabella 15:** Lunghezze relative alle sezioni dei vari elementi costitutivi della struttura portante



**Figura 62:** Modello di studio con tutte le direttrici degli elementi strutturali presenti: in rosso le aste degli esagoni; in blu le aste dei pentagoni; in nero le giunzioni



**Figura 61:** Modello DIANA del padiglione con struttura e tamponamenti portati

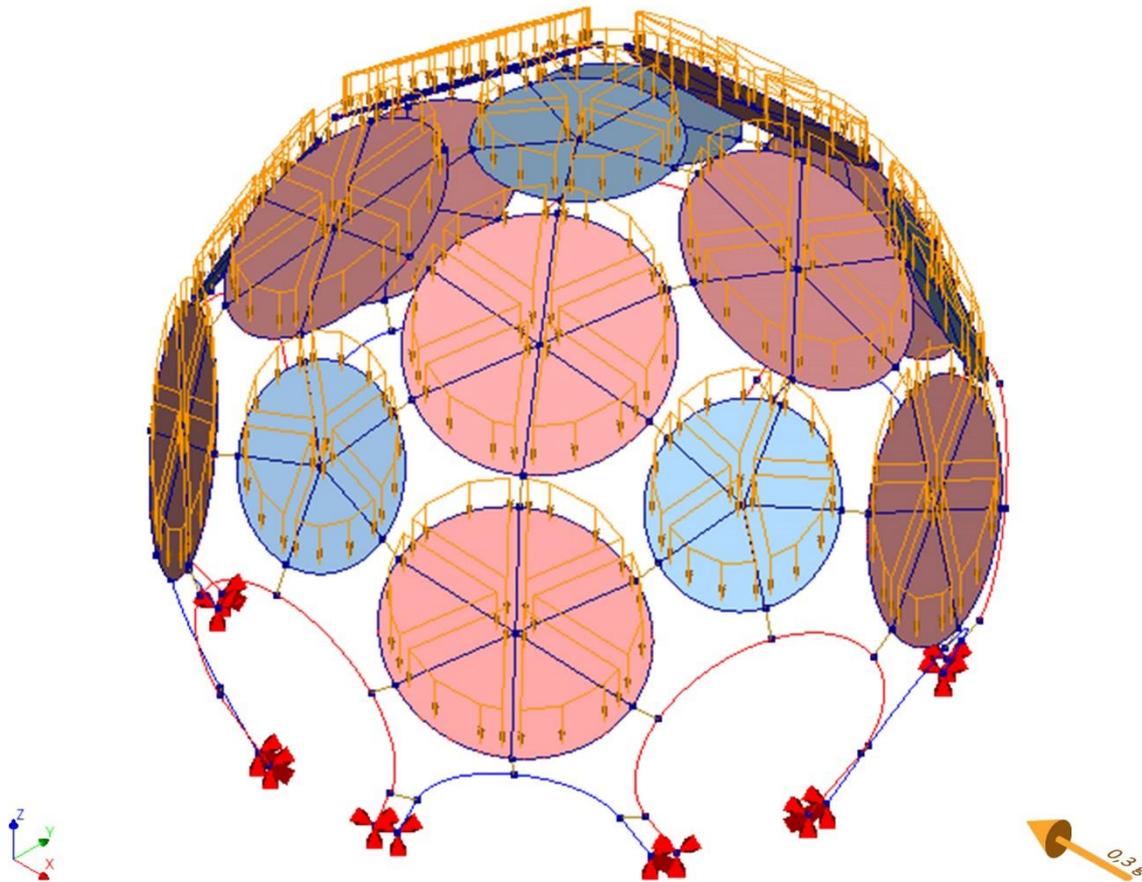


Figura 64: Modello DIANA completo con simbologia dell'applicazione carico neve e azione sismica

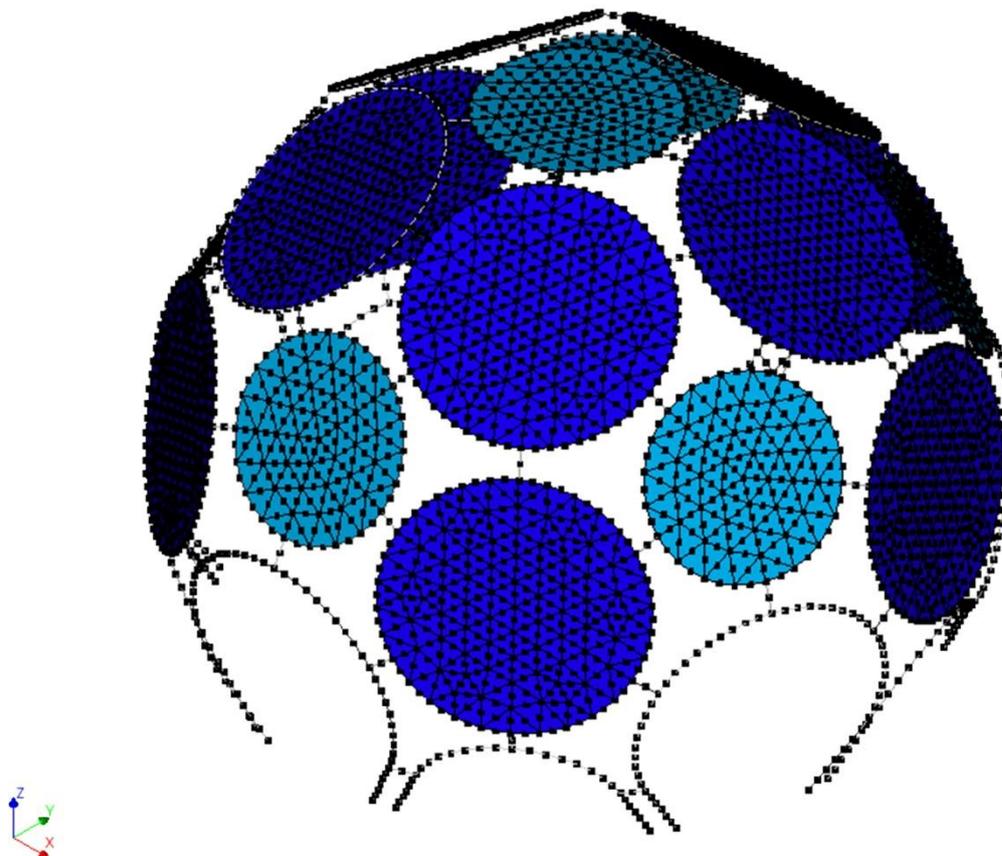


Figura 63: Modello di calcolo prodotto dal software DIANA con mesh e punti

### 5.5.2. RISULTATI E CONCLUSIONE

Il software DIANA FEA effettua il calcolo delle tensioni in tutti i punti che costituiscono la “mesh” della struttura [Figura 63].

I diversi risultati reperiti nei punti della “mesh” e suddivisi per caso, sono stati elaborati per calcolare le sollecitazioni nei punti (P1, P2, P3, P4) della sezione della trave di tipo “ES” [Figura 65]. Questi punti sono stati scelti perché più distanti dal baricentro e di conseguenza più critici.

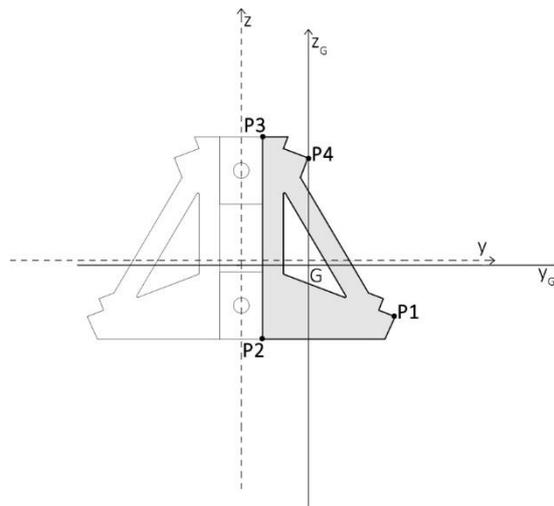


Figura 65: Sezione di trave (tipo ES) con segnati i punti in cui sono state calcolate le tensioni

Per il calcolo delle tensioni è stata utilizzata la formula della pressoflessione deviata ma, scritta rispetto ad un sistema di riferimento baricentrico generico e non necessariamente principale d’inerzia (CICALA, 1981).

$$\sigma_z = \frac{M_z^*}{J_z} \cdot y + \frac{M_y^*}{J_y} \cdot z + \frac{N}{A}$$

Con le rispettive formule dei momenti:

$$M_y^* = \frac{M_y - i_z \cdot M_z}{1 - i_y \cdot i_z}; M_z^* = \frac{M_z - i_y \cdot M_y}{1 - i_y \cdot i_z}$$

E delle inerzie:

$$i_z = \frac{J_{yz}}{J_z}; i_y = \frac{J_{yz}}{J_y}$$

Risultati:

Per ogni caso, compreso quello con solo il Peso Proprio (PP), si sono riportati nella [Tabella 16] i valori massimi e minimi di tensione calcolati per ciascuno dei 4 punti della sezione. Come si può notare, i valori più alti si riscontrano nel punto (P2) della sezione della trave ma, in tutti e tre i casi le tensioni sono sensibilmente inferiori alla resistenza a trazione di 1.32E+07 MPa, dei provini di tipo “F” (testati durante la prova meccanica in laboratorio).

In conclusione, possiamo affermare che vi possono essere positivi riscontri futuri, a seguito di ulteriori studi, riguardo la realizzazione di tale padiglione espositivo con struttura portante in HBP®.

Pn	$\sigma_z$	Tensile strength		$\sigma_z$	Tensile strength	
	caso (PP) [MPa]	Specimens [MPa]	Specimens [MPa]	caso (PP+CN)) [MPa]	specimens [MPa]	specimens [MPa]
P1	6,27E+05	<	1,32E+07	1,88E+06	<	1,32E+07
	-9,76E+05			-2,88E+06		
P2	<b>1,10E+06</b>	<	1,32E+07	<b>3,22E+06</b>	<	1,32E+07
	-7,64E+05			-2,40E+06		<b>-2,11E+06</b>
P3	4,22E+05	<	1,32E+07	1,52E+06	<	1,32E+07
	-5,62E+05			-1,76E+06		-9,80E+05
P4	5,85E+05	<	1,32E+07	1,71E+06	<	1,32E+07
	-8,80E+05			-2,59E+06		-1,50E+06

Tabella 16: Valori massimi e minimi delle tensioni calcolati nei punti (P1, P2, P3, P4) della sezione della trave e riportati alla resistenza dei provini di categoria F

### 5.5.2.1. DEFORMAZIONI E REAZIONI VINCOLARI

In entrambe le analisi, i valori degli spostamenti della struttura, dovuti ai carichi imposti ad essa, sono dell'ordine del millimetro (i dati sono riportati in metri).

- **Caso (PP+CN)**

La vista utilizzata per la resa dei risultati dell'analisi è quella secondo il piano YZ, in questo modo grazie alla conformazione del padiglione, ci permette di non avere elementi sovrapposti in secondo piano.

Dall'elaborato [Figura 67] si nota uno spostamento massimo di  $4.14e-3$  m evidenziato, soprattutto, in corrispondenza dei primi archi di pentagono posti lungo la circonferenza maggiore. Invece, l'abbassamento della cima del padiglione lungo l'asse Z è di  $3.62e-3$  m.

Dall'analisi sulle reazioni vincolari [Figura 66], si può notare che ai vincoli in corrispondenza delle aste del pentagono è richiesta una resistenza maggiore ( $1.05e+4$  N) rispetto a quelli in corrispondenza delle aste dell'esagono ( $5.12e+3$  N);

- **Caso (PP+AS)**

Per questo caso è stata scelta la vista rispetto il piano XZ in quanto, rende più chiara la lettura dei risultati dell'analisi.

La deformazione simmetrica lungo l'asse X [Figura 69], in quanto direzione in cui è applicata l'azione sismica, si è registrato come valore massimo  $1.95e-3$  m di spostamento, presente negli elementi nella posizione opposta rispetto al verso della sollecitazione orizzontale. L'abbassamento, in questo caso, della parte alta del padiglione è di soli  $1.71e-3$  m nel piano XZ.

Dal grafico [Figura 68], notiamo che la resistenza richiesta da parte dei vincoli aumenta in direzione opposta al verso della forza applicata sull'asse X. I vincoli più sollecitati devono sottostare ad una forza di  $4.74e+3$  N, mentre la sollecitazione minore è di  $0.56e+3$  N.

Gli spostamenti e le reazioni vincolari maggiori si verificano soprattutto nel caso con il carico della neve applicato.

Analysis 1  
 Load-combination (PP+CN)  
 Displacements DfXYZ  
 min: 0,00e+0m max: 4,14e-3m

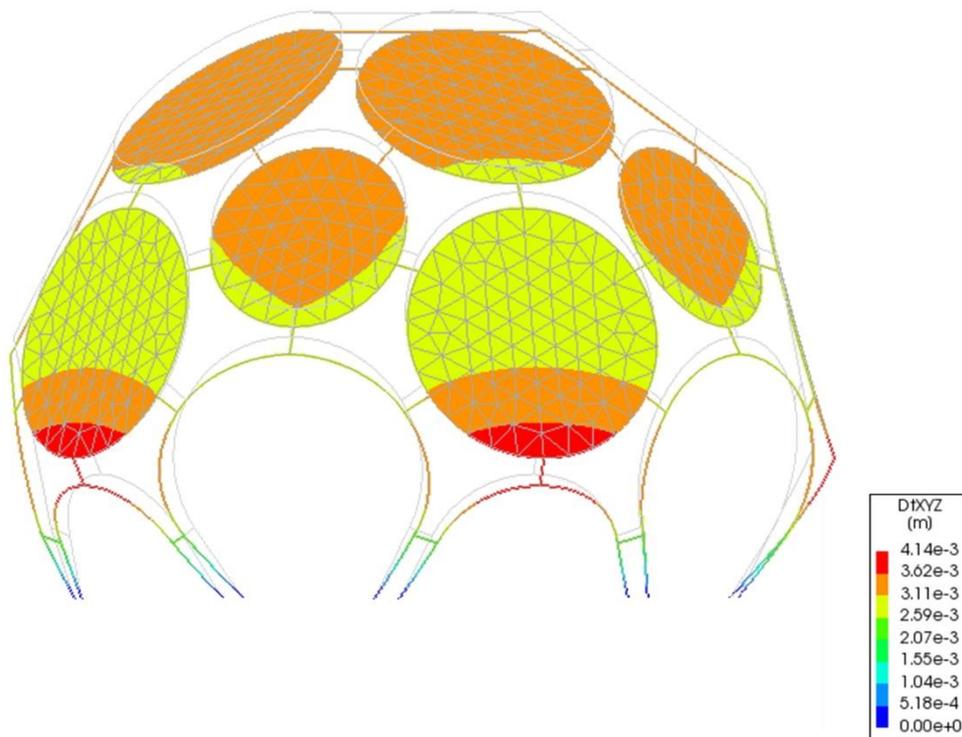


Figura 67: Analisi degli spostamenti nel caso (PP+CN) con ingrandimento di 50 volte

Analysis 1  
 Load-combination (PP+CN)  
 Reaction Forces FBXYZ  
 min: 5,12e+3N max: 1,05e+4N

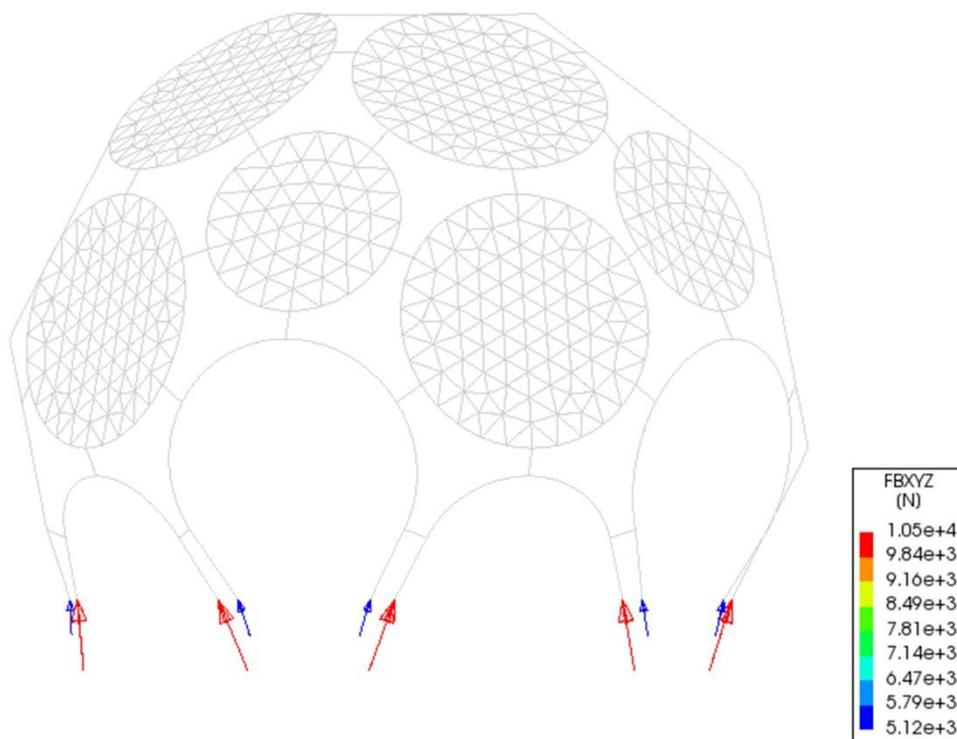


Figura 66: Rappresentazione delle reazioni vincolari del caso (PP+CN)

Analysis 1  
 Load-combination (PP+AS)  
 Displacements DfXYZ  
 min: 0,00e+0m max: 1,95e-3m

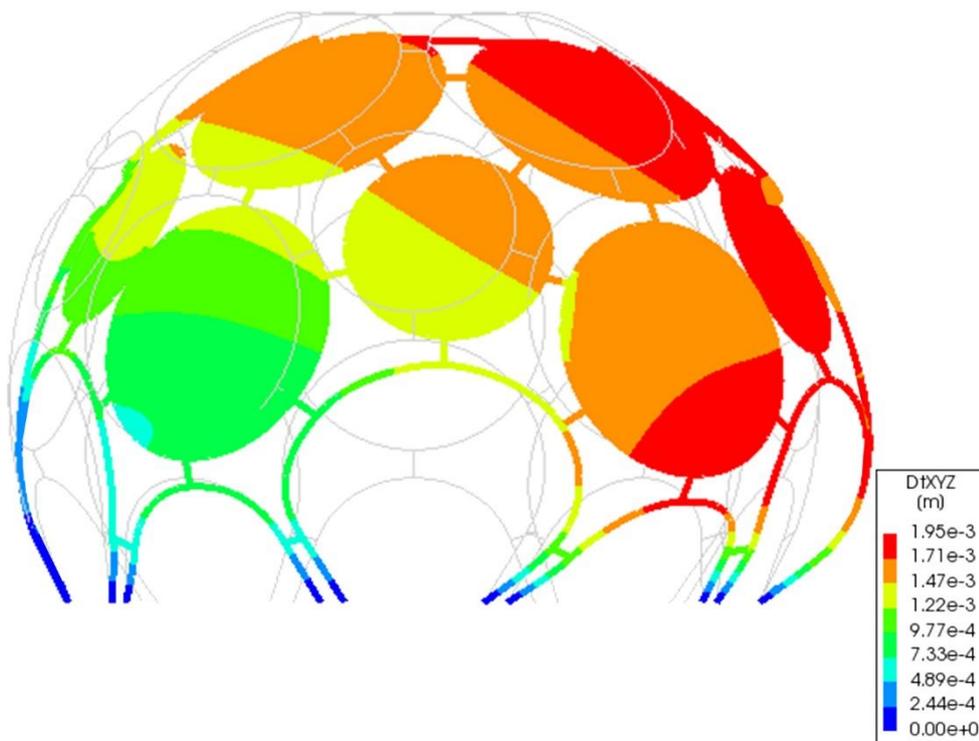


Figura 69: Analisi degli spostamenti nel caso (PP+AS) con un fattore di aumento di 500 volte

Analysis 1  
 Load-combination (PP+AS)  
 Reaction Forces FBXYZ  
 min: 564,26N max: 4739,20N

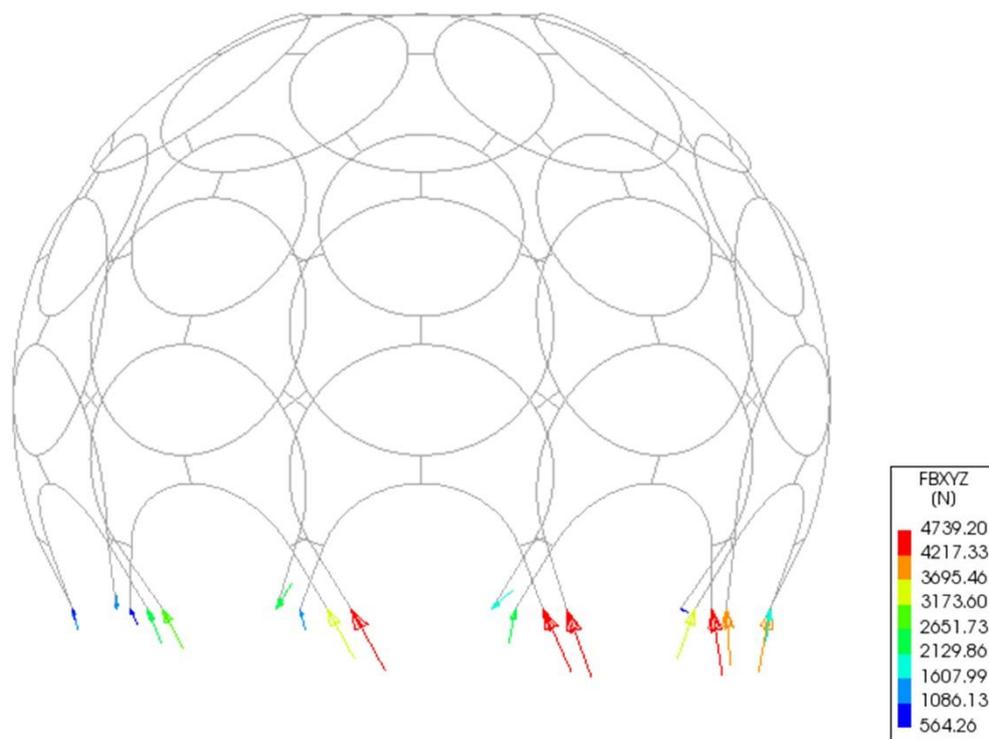


Figura 68: Grafico delle reazioni vincolari nel caso (PP+AS)

### 5.5.2.2. SFORZI NORMALI

Mediante l'analisi degli sforzi normali (N) possiamo venire a conoscenza di come le fibre del materiale vengono allungate o compresse<sup>12</sup>.

- **Caso (PP+CN)**

La parte alta della copertura è poco sollecitata con valori di trazione intorno a  $4.15e+2$  N. Dalla prima corona di pentagoni invece, i cerchi formati dalle aste presentano, quelle poste in alto e in basso, sempre in trazione mentre, quelle poste lateralmente sono compresse [Figura 71].

Nelle aste del basamento poste in corrispondenza della circonferenza più ampia, si registrano i valori maggiori di trazione con valore massimo di  $7.86e+3$  N.

La parte più bassa del basamento, invece, è tutta compressa con valori compresi tra  $7.03e+3$  N e  $1.20e+4$  N.

Si nota che le aste delle aperture più piccole sono tutte compresse, questo dovuto anche alla posizione ideale delle gambe inferiori che, seguendo il flusso delle forze, forniscono rigidità a tali archi.

Per quanto riguarda le giunzioni tra le aste, queste sono per lo più compresse a differenza di quelle che si trovano in corrispondenza delle aste più sollecitate a trazione. Le giunzioni più compresse sono quelle che poste longitudinalmente lungo l'asse Z.

- **Caso (PP+AS)**

In caso di sisma, essendo la forza applicata orizzontalmente, comporta ad una asimmetria secondo l'asse Z. Infatti, tutte le aste poste in senso opposto al verso della sollecitazione sono compresse mentre le altre vengono allungate. Il valore massimo a trazione è di  $2.81e+3$  N e a compressione è di  $4.87e+3$  N [Figura 70].

Come era previsto, le sollecitazioni maggiori a trazione si verificano in corrispondenza della circonferenza maggiore del fullerene, mentre le aste più compresse si trovano, ovviamente, alla base.

<sup>12</sup> L'azione assiale N si considera positiva (+) e si definisce **trazione** quando tende ad allungare le fibre della trave e quindi tende ad allontanare ogni sezione da quelle adiacenti. Viceversa, l'azione assiale N si considera negativa (-) e si definisce **compressione** quando tende ad accorciare le fibre della trave per cui tende ad avvicinare ogni sezione a quelle adiacenti.

Analysis 1  
 Load-combination (PP+CN)  
 Cross-section Forces Nx  
 min: -1,20e+4N max: 7,86e+3N

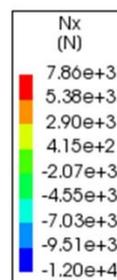
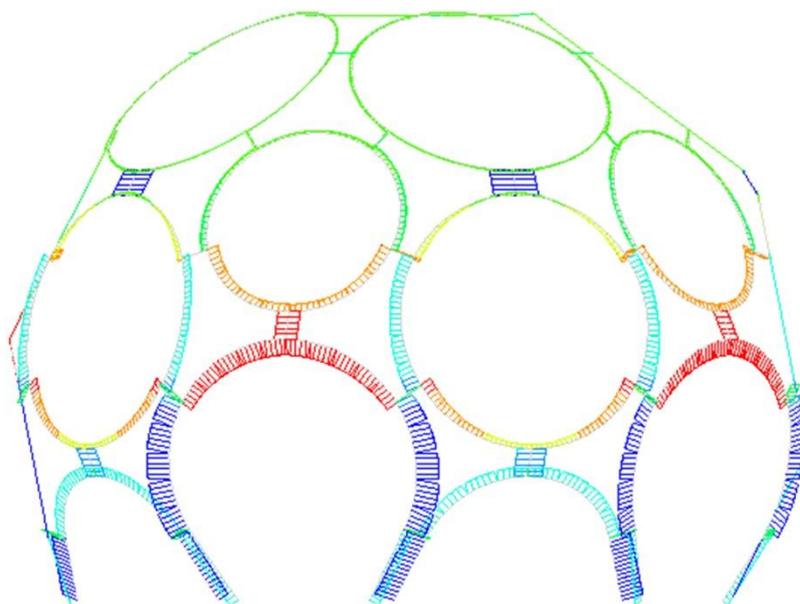


Figura 71: Analisi degli sforzi normali secondo l'asse X (Nx) del caso (PP+CN)

Analysis 1  
 Load-combination (PP+AS)  
 Cross-section Forces Nx  
 min: -4863,13N max: 2805,48N

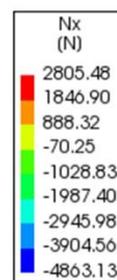
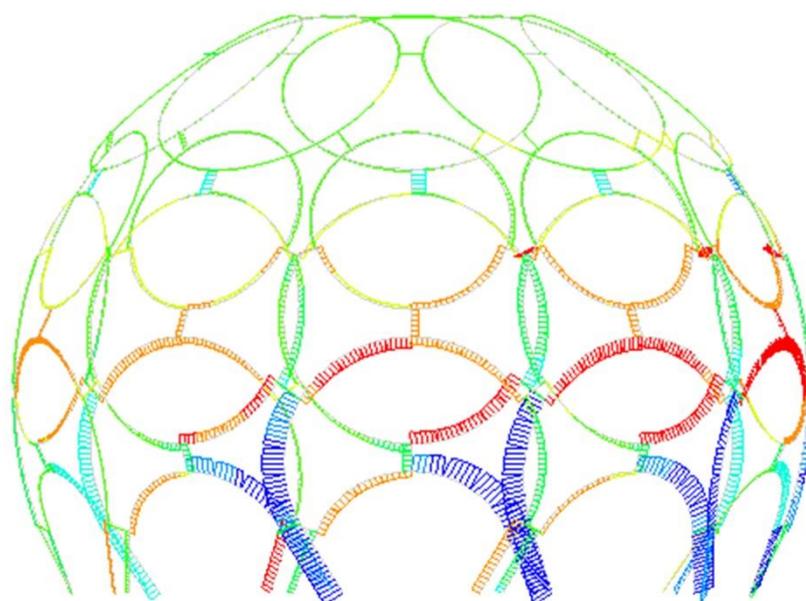


Figura 70: Analisi degli sforzi normali secondo l'asse X (Nx) del caso (PP+AS)

### 5.5.2.3. SFORZI A TAGLIO

Lo sforzo di taglio ( $T$ )<sup>13</sup> in una determinata sezione è dato dalla somma algebrica di tutte le forze o componenti di forze parallele al piano della sezione e applicate a sinistra o a destra della sezione. I grafici proposti riguardano il taglio secondo gli assi Y e Z, il taglio riferito all'asse X è stato omissso perché poco rilevante.

- **Caso (PP+CN)**

Essendo il taglio asimmetrico, nella [Figura 72] le linee del grafico in corrispondenza degli archi si sovrappongono. Quindi, bisogna tenere a mente che il grafico appartenente alla vista in figura è uno dei due andamenti proposti. Possiamo notare che, le aste in questo piano sono maggiormente sollecitate a taglio con i picchi in corrispondenza delle giunzioni con valori di  $\pm 6.25e+3$  N.

La [Figura 73] mostra che in questo caso, ad essere più sollecitate a taglio, sono le giunzioni con picchi maggiori rispetto a quelli che interessano le aste, di valore  $\pm 1.48e+4$  N.

- **Caso (PP+AS)**

Nelle [Figura 74] e [Figura 75] si nota che in caso di sisma i valori del taglio sono nettamente inferiori rispetto al caso precedente e che l'andamento del taglio è più irregolare. In ogni caso, i picchi si riscontrano in corrispondenza delle giunzioni tra le aste ( $Q_y$ ) con valori compresi tra  $3.74e+3$  N e  $4.62e+3$  N e, nelle giunzioni stesse ( $Q_z$ ) con valori tra  $5.86e+3$  N e  $4.95e+3$  N.

In sintesi, dall'analisi del taglio che interessa la copertura, si nota che gli elementi maggiormente sollecitati a ( $T$ ) sono le giunzioni tra le aste e le zone più critiche sono proprio gli incastri tra i diversi montanti.

---

<sup>13</sup> Si indica che uno sforzo di taglio è positivo (+) se  $T$  è diretto verso l'alto a sinistra della sezione e verso il basso a destra della sezione; al contrario lo sforzo di taglio è negativo (-) quando  $T$  è diretto verso il basso a sinistra della sezione e verso l'alto a destra della sezione.

Analysis 1  
 Load-combination (PP+CN)  
 Cross-section Forces Qy  
 min:-6253,87N max: 6253,85N

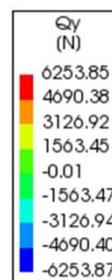
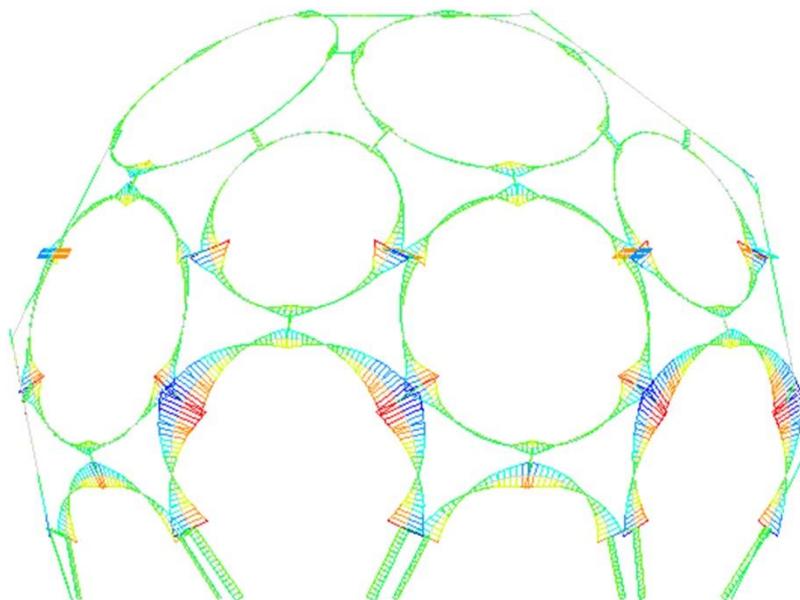


Figura 73: Analisi del taglio (Qy) del caso (PP+CN)

Analysis 1  
 Load-combination (PP+CN)  
 Cross-section Forces Qz  
 min:-1,48e+4N max: 1,48e+4N

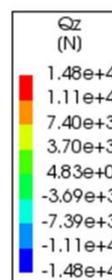
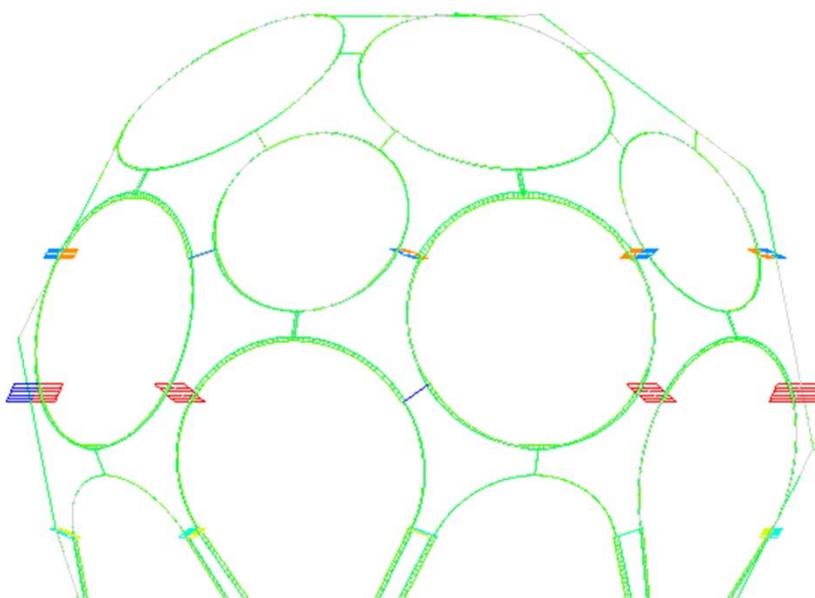


Figura 72: Analisi del taglio (Qz) del caso (PP+CN)

Analysis 1  
 Load-combination (PP+AS)  
 Cross-section Forces Qy  
 min:-4626,70N max: 3738,20N

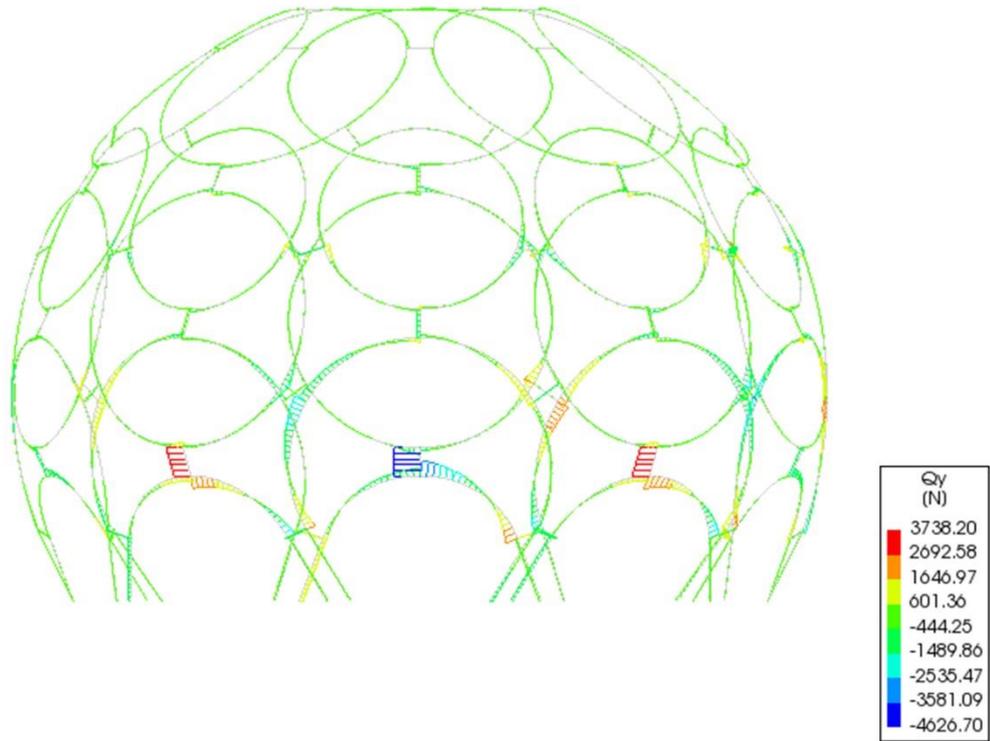


Figura 74: Analisi del taglio (Qy) del caso (PP+AS)

Analysis 1  
 Load-combination (PP+AS)  
 Cross-section Forces Qz  
 min:-4951,08N max: 5863,27N

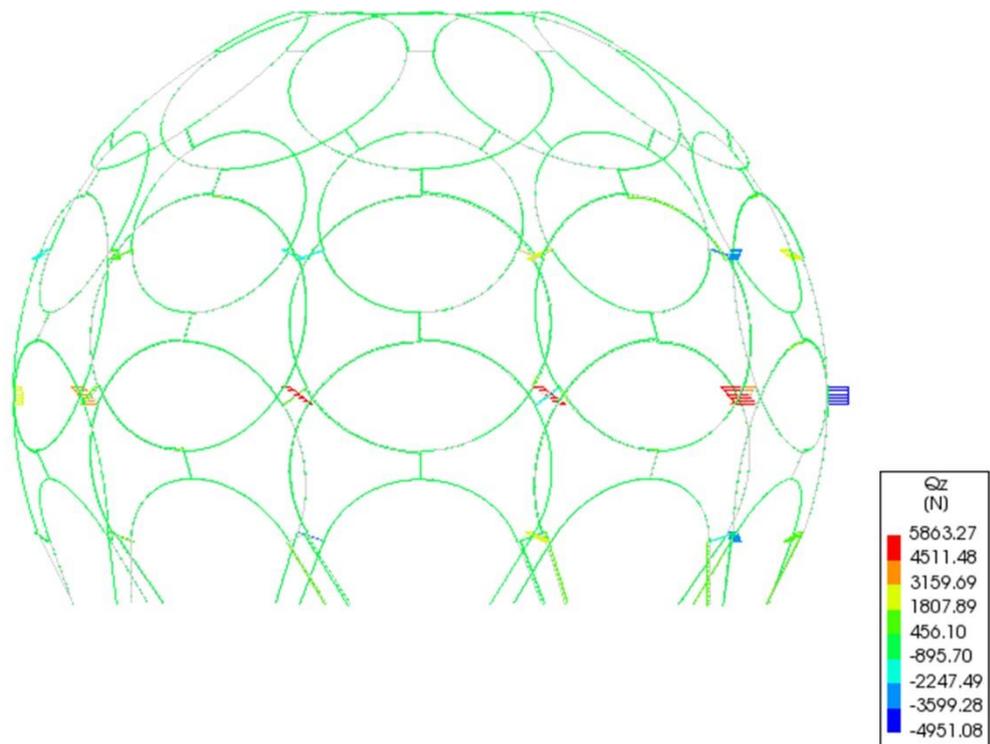


Figura 75: Analisi del taglio (Qz) del caso (PP+AS)

#### 5.5.2.4. MOMENTI FLETTENTI

Il Momento flettente ( $M$ )<sup>14</sup> induce alle facce di una sezione una rotazione, queste ruotano reciprocamente e la trave necessariamente si inflette.

- **Mx**

È il momento che agisce lungo l'asse X di ogni asta provocandone la torsione su sé stessa [Figura 76].

- **Caso (PP+CN)**

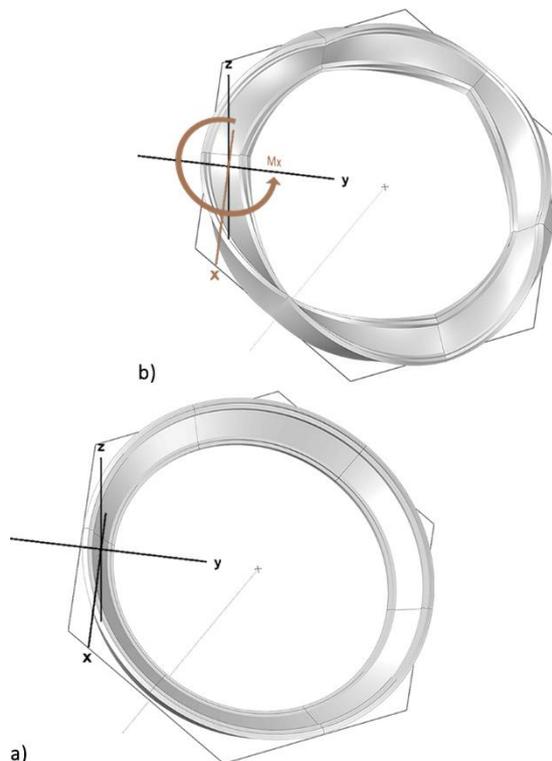
A causa dell'asimmetria, la restituzione grafica presenta sovrapposti sia le curve delle aste in secondo piano [Figura 79]. In ogni caso, le aste più sollecitate sono quelle poste lateralmente agli accessi al padiglione. I valori registrati vanno da  $\pm 7.96e+2$  Nm.

Per quanto riguarda, invece, le "gambe" della struttura non presentano momento torcente, mentre le aste alla sommità mostrano un momento torcente compreso tra  $\pm 1.98e+2$  Nm;

- **Caso (PP+AS)**

Analogamente al caso precedente, le aste più soggette a torsione sono le ste poste sulla circonferenza maggiore del fullerene.

I valori estrapolati dall'analisi [Figura 78] sono compresi tra  $3.46e+2$  Nm e  $3.36e+2$  Nm;



**Figura 76:** Schema sull'azione del momento flettente  $M_x$  sulle aste giacenti sul medesimo piano

<sup>14</sup> Se una trave in semplice appoggio si deforma presentando la convessità verso il basso, ne consegue che le fibre inferiori della trave sono tese, quelle superiori si comprimono. Quando l'inflessione è di questo tipo, il momento flettente ha per convenzione il segno positivo (+). Invece, nel caso in cui l'inflessione della trave è con la convessità verso l'alto, le fibre superiori sono tese e quelle inferiori sono compresse. Di conseguenza il momento flettente è di segno negativo (-).

- **My**

Tale momento agisce sul piano Y e di conseguenza si riferisce alle deformazioni che avvengono al di fuori del piano di giacitura delle aste attorno ai relativi cerchi andando a quantificare lo “spanciamento” degli stessi [Figura 77].

- **Caso (PP+CN)**

Presenta una conformazione simmetrica rispetto l’asse Z [Figura 81]. Concentrandosi sulle aste poste in corrispondenza del basamento, notiamo che le aste laterali delle aperture tendono a mostrare la convessità verso l’esterno, mentre per quelle poste in cima all’apertura mostrano la convessità verso l’interno;

- **Caso (PP+AS)**

Anche in caso di sima, la struttura viene sollecitata in modo analogo al precedente non presentando però la simmetria a causa dell’applicazione della forza orizzontalmente [Figura 80];

**Mz**

Si tratta del momento che, a differenza del My, agisce nel piano Z. L’azione di tale momento sull’asta provoca la propria concavità o convessità e di conseguenza la deformazione dei cerchi [Figura 77].

- **Caso (PP+CN) e caso (PP+AS)**

In entrambi i casi, l’analisi del momento flettente (Mz) mostra che i cerchi delle aperture alla base tendono in modo maggiore ad ovalizzarsi lungo l’asse con direzione dal basso verso l’alto [Figura 83] e [Figura 82].

In conclusione, dallo studio sui momenti flettenti, possiamo constatare che quello più influente è l’My, provocando lo “spanciamento” della struttura in corrispondenza della sua ampiezza maggiore.

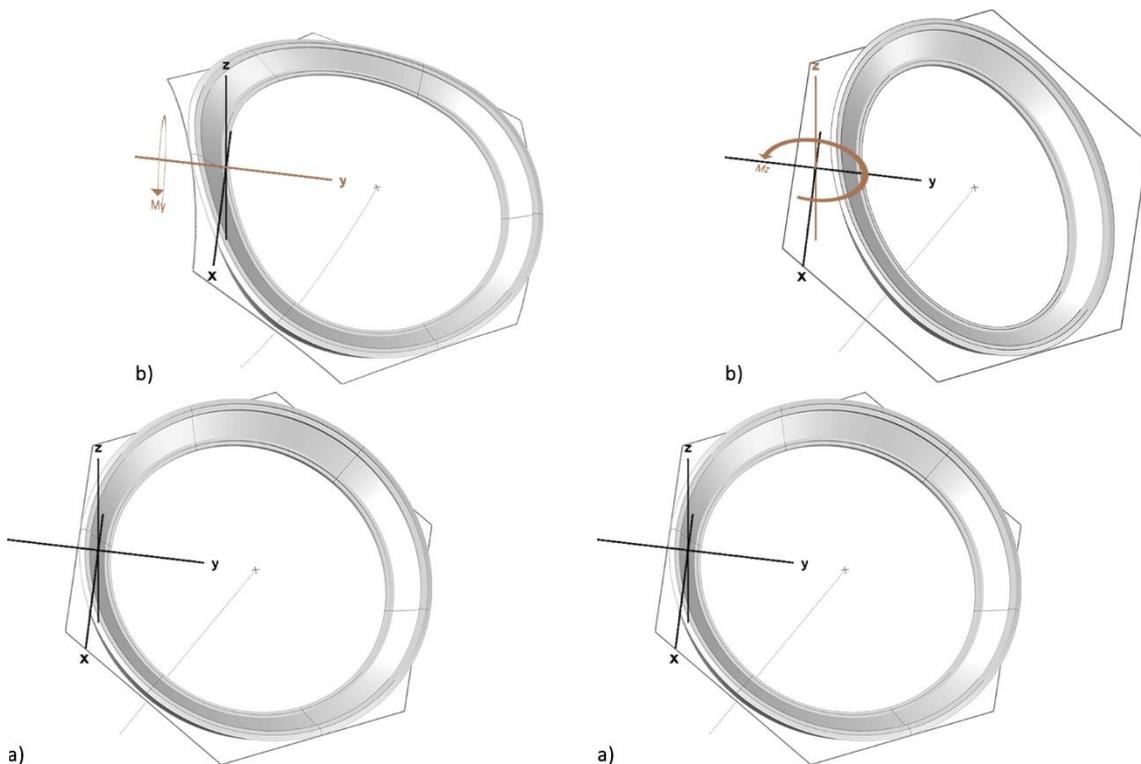


Figura 77: Schemi sull'azione dei momenti flettenti My e Mz sulle aste del medesimo piano

Analysis 1  
 Load-combination (PP+CN)  
 Cross-section Moments Mx  
 min: -795,55Nm max: 795,5Nm

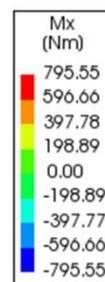
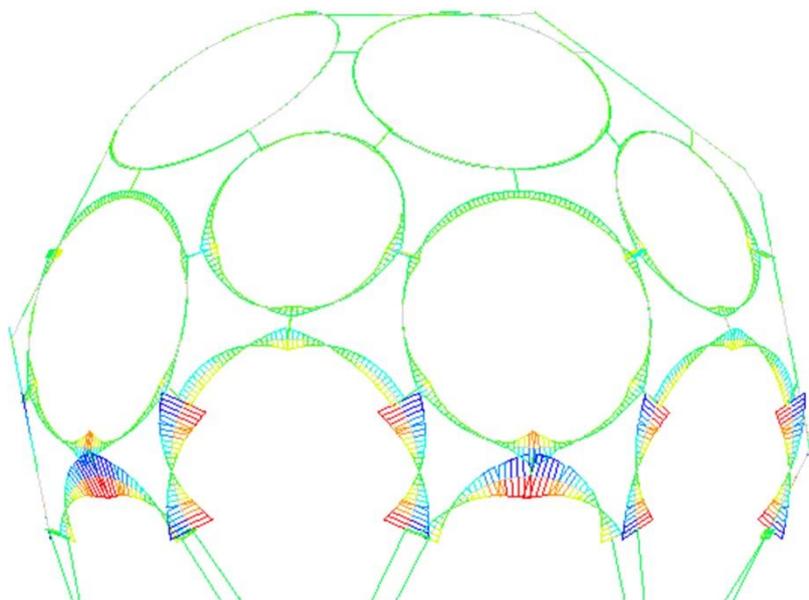


Figura 79: Analisi Mx nel caso (PP+CN)



Analysis 1  
 Load-combination (PP+AS)  
 Cross-section Moments Mx  
 min: -346,99Nm max: 336,47Nm

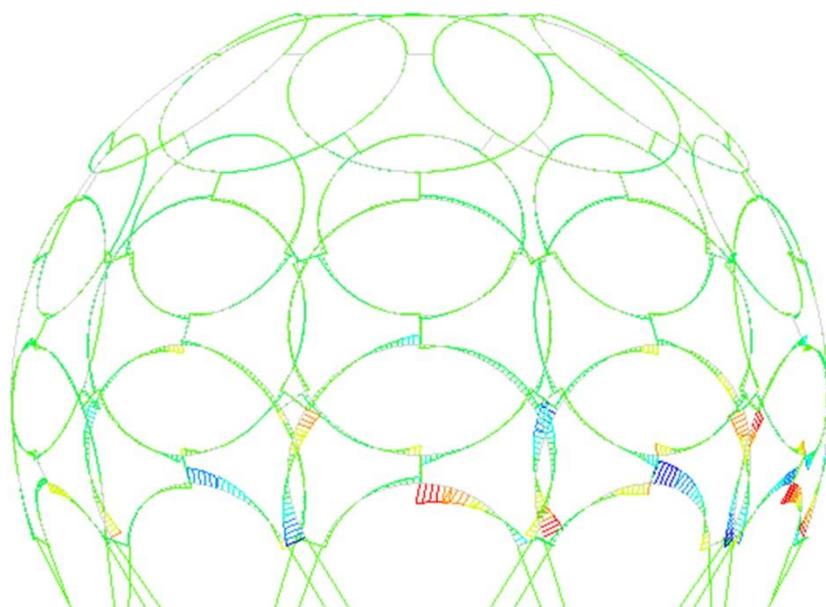


Figura 78: Analisi Mx nel caso (PP+AS)



Analysis 1  
 Load-combination (PP+CN)  
 Cross-section Moments My  
 min:-256,30Nm max: 1618,00Nm

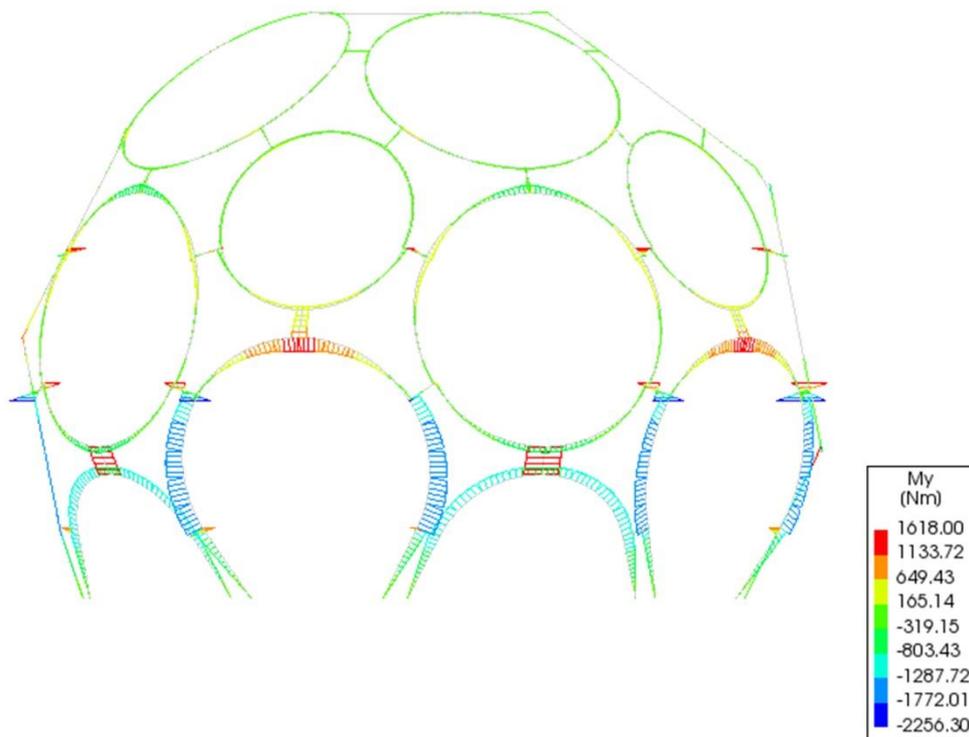


Figura 81: Analisi My nel caso (PP+CN)

Analysis 1  
 Load-combination (PP+AS)  
 Cross-section Moments My  
 min:-904,04Nm max: 628,73Nm

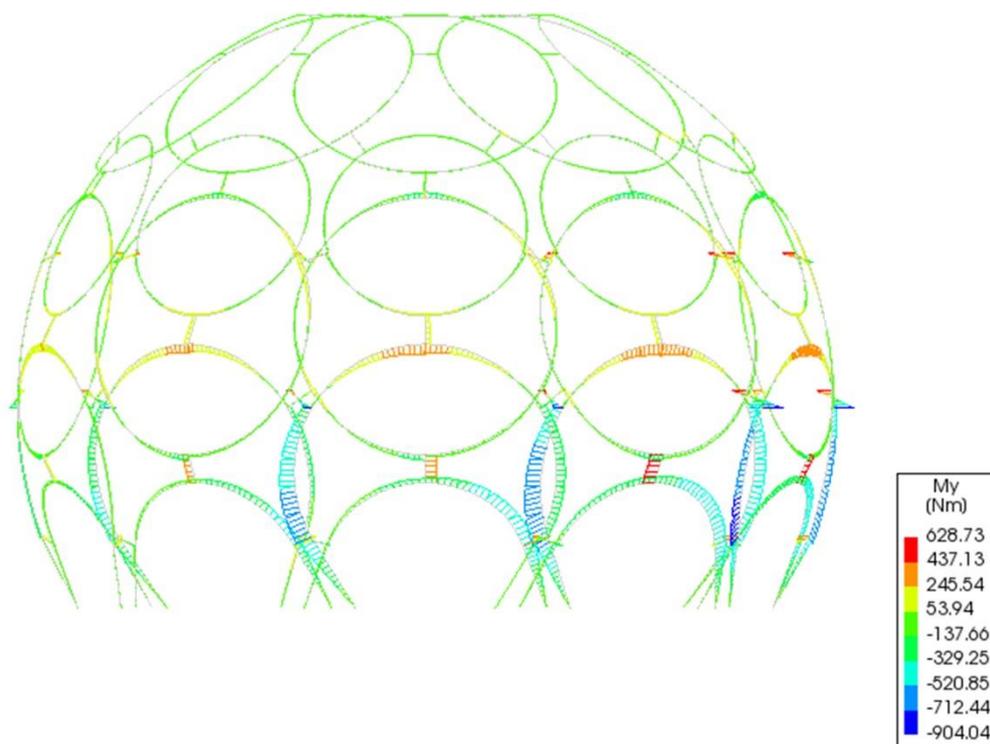


Figura 80: Analisi My nel caso (PP+AS)

Analysis 1  
 Load-combination (PP+CN)  
 Cross-section Moments Mz  
 min: -1498,69Nm max: 936,67Nm

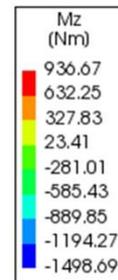
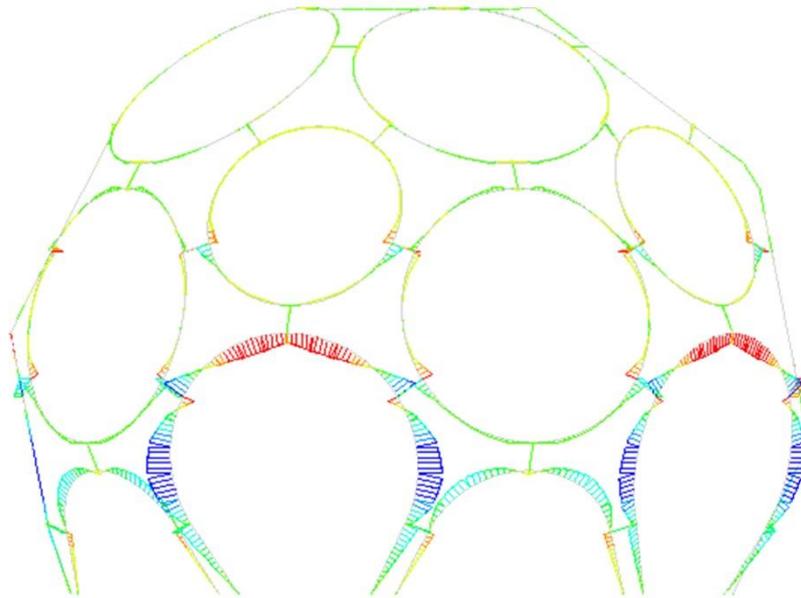


Figura 82: Analisi Mz nel caso (PP+CN)



Analysis 1  
 Load-combination (PP+AS)  
 Cross-section Moments Mz  
 min: -899,07Nm max: 726,25Nm

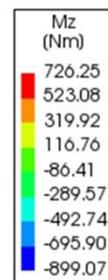
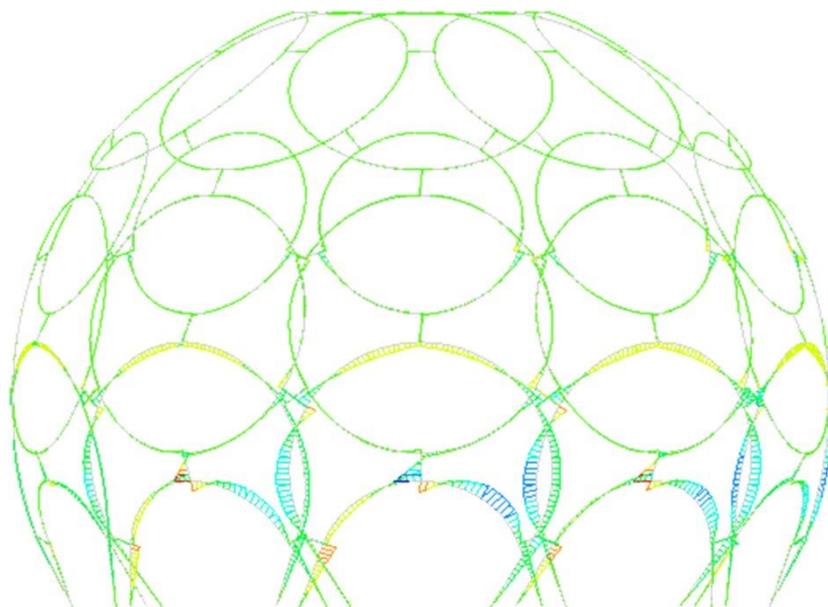


Figura 83: Analisi Mz nel caso (PP+AS)



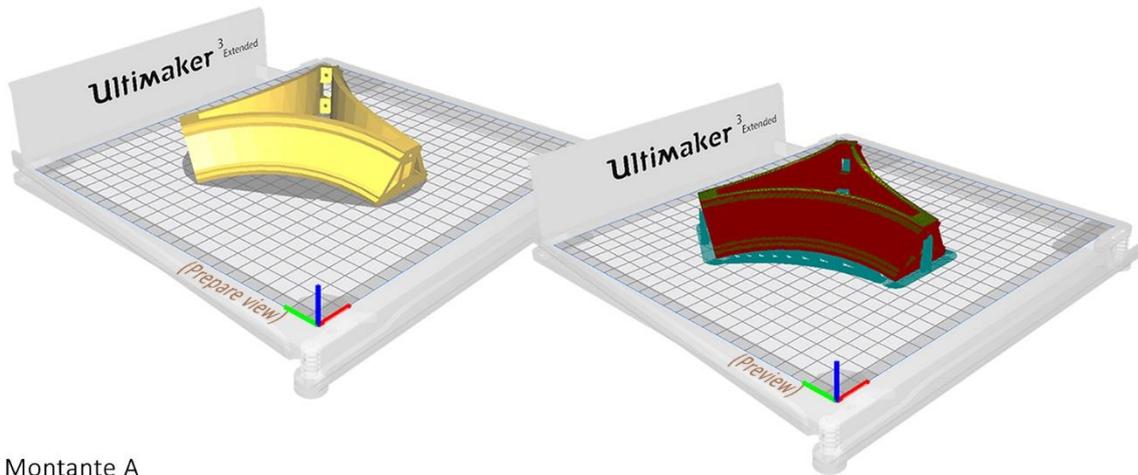
## 5.6. STAMPAGGIO MODELLO

Grazie alla collaborazione con la start-up Laboo srl., che collabora con Kanèsis, è stato possibile produrre in scala ridotta le tipologie di montanti che costituiscono la struttura portante del padiglione. In questo modo si è potuto sperimentare una prima procedura di produzione che ha comportato uno studio sulla giacitura ottimale dei campioni sul piano di stampa per una efficace formatura mediante lo stampaggio 3D.

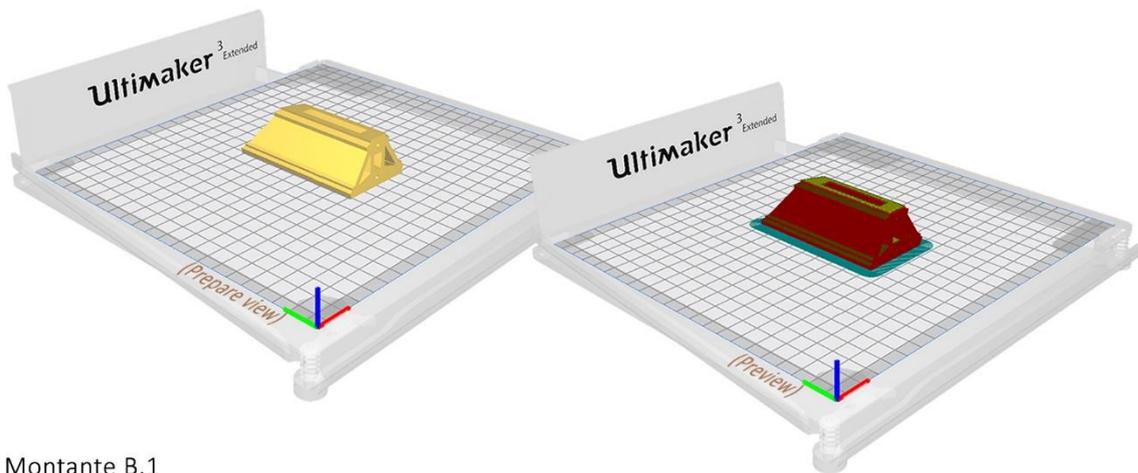
Dalle immagini qui riportate [Figura 84], in particolare nelle rispettive “*preview*” possiamo notare che la stampa non prevede grandi strutture di supporto (in blu) al filamento definitivo in HBP® (in rosso). Di conseguenza, la giacitura dei due montanti proposta in questo primo approccio alla tecnologia FDM, comporta il minor spreco di materiale di supporto ed una stabilità generale dell’elemento durante la sua formatura.

La procedura consiste nel trasferire il modello 3D-CAD dei tre montanti nel software di stampa 3D gratuito “Ultimaker CURA 4.4” convertendoli dal formato “\*.dwg” al formato litografico “\*.stl”. Una volta importati è stato possibile settare tutti i parametri di stampa al fine di ottimizzarne la produzione avvenuta con la stampante TEVO (modello: TORNADO).

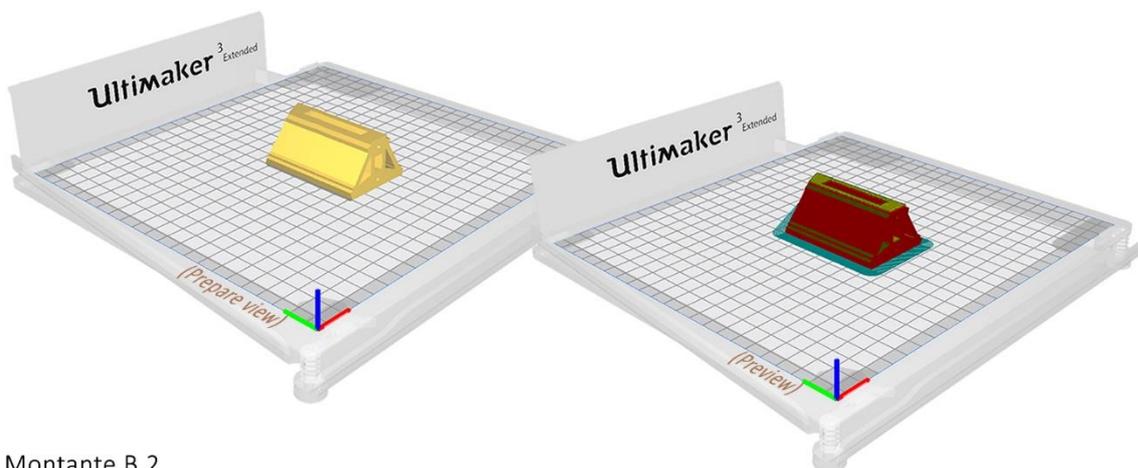
Tale ultimo approccio pratico, presente all’interno del suddetto lavoro di tesi, pone le basi per una futura produzione ad una scala maggiore di tali componenti strutturali al fine di poterli effettivamente testare in laboratorio mediante le prove meccaniche sotto sforzo.



Montante A

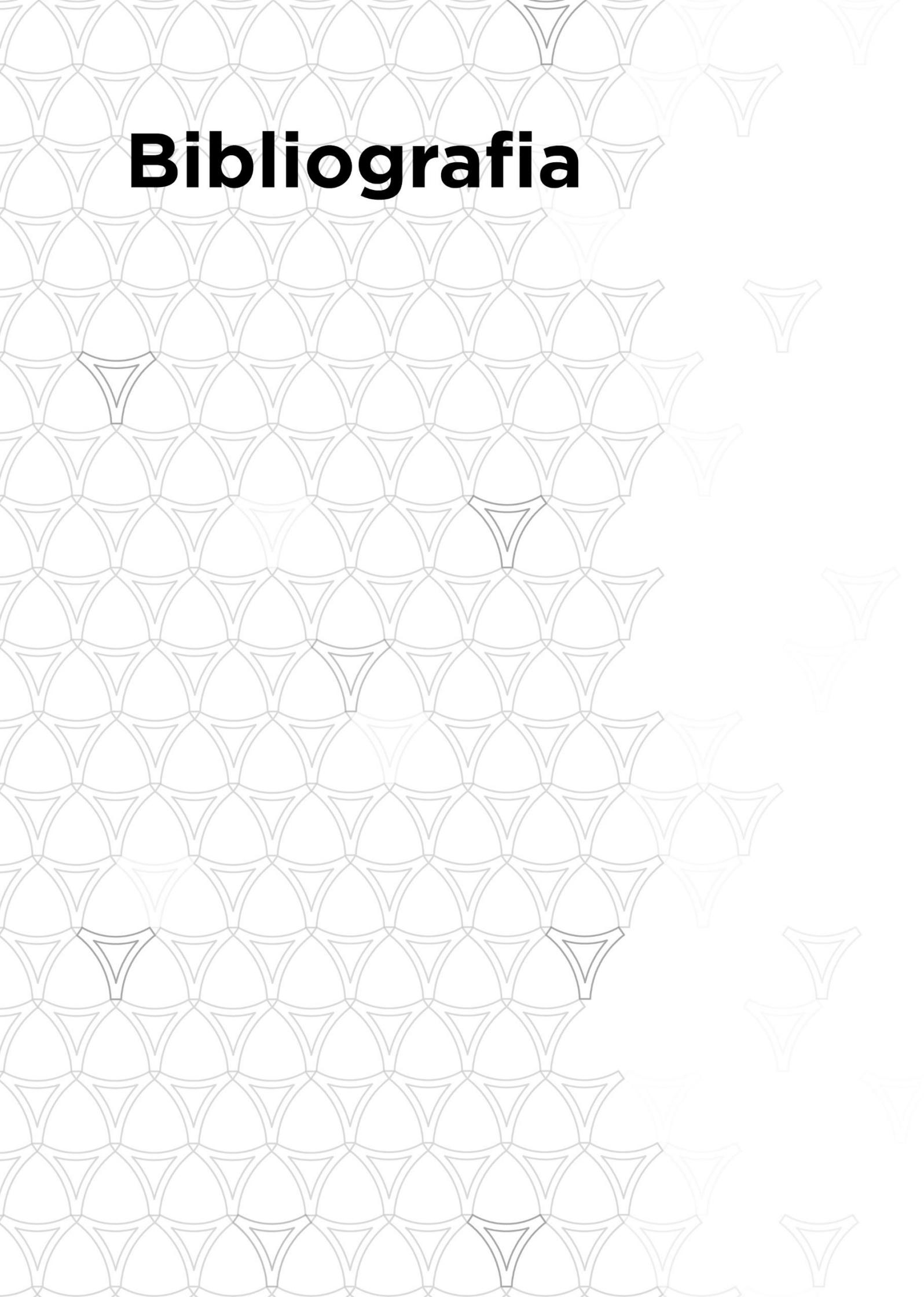


Montante B.1



Montante B.2

Figura 84: Viste assometriche prospettiche delle due view di settaggio proposte dal software di stampa gratuito "Ulmaker Cura"



# **Bibliografia**

- KANÈSIS** <https://www.kanesis.it/> [Online] // KANÈSIS. - Novembre 17, 2018.
- 3D HUBS** What is 3D printing? The definitive guide [Book].
- ADDUCI A.** Innovazione tecnologica dei conglomerati: il conglomerato a base di canapa posato a spruzzo [Report] / Architettura ; Università la Sapienza di Roma. - Roma : [s.n.], 2015.
- AHN S. H. [et al.]** Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS [Journal] // Emerald. - [s.l.] : MCB UP Limited, 2002. - 4 : Vol. 8. - pp. 248–257.
- ALLIN S.** Building with Hemp [Book]. - Rusheens : Seed Press, 2005.
- AMERIO C. and CANAVESIO G.** Materiali per l'edilizia [Book]. - Torino : Società Editrice Internazionale, 2009.
- AMODIO GIANPIERO** Il biocomposto in calce-canapa [Report]. - 2015.
- ASHBY MICHAEL F.** Materials and the environment: eco-informed material choice [Book]. - Oxford : [s.n.], 2009. - pp. 231-245.
- Assocanapa** <http://www.assocanapa.org/> [Online]. - Aprile 9, 2019.
- ASTM-D638\_14** Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. - [s.l.] : © ASTM International, 2014.
- Banca della Calce** <http://www.bancadellacalce.it> [Online] // Banca della Calce. - Novembre 25, 2018.
- BARNAT-HUNEK DANUTA, SMARZEWSKI PIOTR and FIC STANISLAW** Mechanical and thermal properties of hemp-lime composites [Report] / Faculty of Economics and Technical Sciences Institute of Technical Sciences ; Pope John II State School of Higher Education. - Białą Podlaska : ResearchGate, 2015. - pp. 21-27.
- BENFRATELLO S. [et al.]** Thermal and structural properties of a hemp–lime biocomposite [Report] / Dipartimento dell'Energia ; Università degli Studi di Palermo. - Palermo, Italia : Elsevier, 2013. - pp. Construction and Building Materials 48 (2013) 745–754.
- BESRaC** Hemp Lime Bio-composite as a Building Material in Irish Construction / ed. DALY PATRICK, RONCHETTI PAOLO and WOOLLEY TOM. - Johnstown Castle : Environmental Protection Agency, 2007-2013.
- BEVAN B. and WOOLLEY T.** Hemp lime construction: A guide to building with hemp lime composites [Report]. - Bracknell, (UK) : IHS BRE Press, 2008.
- BioLevel®** Bio Level: Building green [Online] // Bio Level: Building green, costruzioni in canapa e calce. - Agosto 27, 2019. - <http://www.biolevel.it/it>.
- BISMARCK A. [et al.]** Surface Characterization of Flax, Hemp and Cellulose Fibers; Surface Properties and the Water Uptake Behavior [Journal] // Polymer Composites. - Berlino : ResearchGate, Ottobre 2002. - 5 : Vol. 23.
- BLEDZKI A. K. and GASSAN J.** Composites reinforced with cellulose based fibres [Journal] // Elsevier. - Universitat (Gh) Kassel, Institut fur Werkstofftechnik, Kunststoff-und Recyclingtechnik, Kassel, Germany : Elsevier Ltd., 1999. - 24 : Vol. Progress in Polymer Science. - pp. 221–274.
- BOULOC P., ALLEGRET S. and ARNAUD L.** Le chanvre industriel : production et utilisations [Report]. - Paris : France Agricole, 2006.

- BRUCKNER S. [et al.]** Scienza e tecnologia dei materiali polimerici [Book]. - [s.l.] : EdiSES Napoli, 2001.
- Building Research Establishment Ltd (BRE)** Final Report on the Construction of the Hemp Houses at Haverhill [Report] : Client Report number 209-717 Rev.1. - Suffolk : [s.n.], 2002.
- Canapa Valle Susa** [http://www.canapavallesusa.it/Joomla\\_3/botanica](http://www.canapavallesusa.it/Joomla_3/botanica) [Online] // Canapa Valle Susa. - Aprile 6, 2019.
- canapaindustriale.it** Canapa: I principali utilizzi della pianta dalle mille risorse [Journal] // CanapaIndustriale / ed. Redazione. - [s.l.] : canapaindustriale.it, Aprile 22, 2015.
- Canapicoltura** <http://www.canapicoltura.it/canapa/botanica/> [Online] // Canapicoltura. - Aprile 6, 2019.
- CANTRELL J. [et al.]** Experimental Characterization of the Mechanical Properties of 3D-Printed ABS and Polycarbonate Parts [Journal] // Advancement of Optical Methods in Experimental Mechanics. - University of Florida, Gainesville, FL (USA) : The Society for Experimental Mechanics, 2016. - Vol. 3. - pp. 89-105.
- CARLUCCI L., D'IPPOLITO F. and GALLINA P.** R. Buckminster Fuller e le cupole reticolari geodetiche: metodi e modelli a confronto [Report] : Tesina / Corso di Matematica, Laurea specialistica in PA ; Facoltà di Architettura Roma Tre. - Roma : [s.n.], 2006/2007.
- CELONI M., BOCCHIETTO E. and TODESCHI S.** Il grande atlante delle piante medicinali [Book]. - [s.l.] : Tecniche Nuove, 2006.
- Chanvribloc srl.** <http://chanvribloc.com> [Online] // Chanvribloc, isolation et construction. - Novembre 25, 2018.
- CICALA P.** Scienza delle costruzioni [Book]. - Torino : Levrotto & Bella, 1981. - Vol. 1 e 2.
- COLOMBO C. and RUGGIERI O.** Edilizia a basso impatto ambientale: Analisi del ciclo di vita di materiali naturali a base di calce canapulo [Report] / Facoltà di Ingegneria per l'Ambiente e il territorio ; Politecnico di Milano. - Milano : [s.n.], 2012.
- CONRAD C.** Cannabis. I mille usi di una pianta miracolosa [Book]. - Roma : Castelvechi, 1998.
- CONRAD K. and HANSEN HANS C. B.** Sorption of zinc and lead on coir [Article] // Bioresource Technology. - [s.l.] : Elsevier Ltd., Gennaio 2007. - 1 : Vol. 98. - pp. 89-97.
- Costruire en Chanvre** Règles professionnelles d'exécution d'Ouvrage en Béton de Chanvre [Book]. - [s.l.] : SEBTP, 2012.
- CRISTALDI G. [et al.]** Composites based on natural fibre fabrics [Report] / Dipartimento di fisica e metodologia chimica per l'ingegneria ; Università di Catania. - Catania : ResearchGate, 2010.
- CRISTALDI G., CICALA G. and TRUPPI C.** Sviluppo di materiali compositi rinforzati con fibre naturali per l'ingegneria civile [Report] : Dottorato di Ricerca / Dipartimento di ingegneria industriale e meccanica ; Università degli Studi di Catania. - Catania : [s.n.], 2008-2011.
- CRUMP S. SCOTT** Apparatus and method for creating three-dimensional objects [Patent] : U.S. Patent 5121329. - Stratasys, Inc., Minneapolis, Minn. (USA), Ottobre 30, 1989.
- Dantec Dynamics A/S** Q-400 DIC Standard 3D [Online] // Dantec Dynamics: Turns Measurement into Knowledge. - Dantec Dynamics A/S. - novembre 18, 2019. - <https://www.dantecdynamics.com/q-400-dic>.

**DE VECCHI L. and ZANELLI A.** L'impiego dell'ETFE in architettura: studio dell'evoluzione delle pressostrutture, valutazione delle prestazioni e analisi di progetti rilevanti [Report] : Tesi di laurea / Scuola di Architettura Urbanistica Ingegneria delle costruzioni ; Politecnico di Milano. - Milano : [s.n.], 2015-2016.

**DI CANDILO M., RANALLI P. and LIBERALATO D.** Gli interventi necessari per la reintroduzione della canapa in Italia [Journal] // Agroindustria. - 2003. - 1 : Vol. II. - pp. 27-36.

**DIANA FEA bv.** DIANA FEA BV: easy for simple analyses and powerful for complex analyses [Online]. - 2019. - novembre 12, 2019. - <https://dianafea.com/index.php/>.

**DIZON JOHN RYAN C. [et al.]** Mechanical characterization of 3D-printed polymers [Journal] // Elsevier. - [s.l.] : Elsevier Ltd., Marzo 1, 2018. - 20 : Vol. Additive Manufacturing. - pp. 44-67.

**DUBOIS V. [et al.]** Fresh and hardened state properties of hemp concrete made up of a large proportion of quarry fines for the production of blocks [Report] / Université Lille Nord de France. - Lille, Francia : Elsevier Ltd, 2016. - pp. Construction and Building Materials 102 (2016) 84-93.

**Equilibrium srl.** Biomattone®: manuale tecnico e di posa [Report]. - [s.l.] : Editoria Grafica Colombo, 2013.

**Equilibrium srl.** <http://www.equilibrium-bioedilizia.it/> [Online] // Equilibrium - Equilibrio Naturale Costruito. - Giugno 27, 2019.

**FASSIO A., CERETTA S. and RODRIGUEZ M. J.** Cáñamo (Cannabis sativa L.) [Book]. - Montevideo : Unidad de Comunicación y Transferencia de Tecnología de INIA, 2013. - Vol. Boletín de Divulgación : 103.

**FILIALFA** FILIALFA: Rilievo ai tuoi progetti [Online]. - Giugno 17, 2019. - <https://www.filoalfa3d.com/it/content/11-hips>.

**GASTALDI M. and BERTOLINI L.** Introduzione ai materiali per l'architettura [Book]. - Novara : De Agostini Scuola SpA, 2011.

**GAY D., HOA S. V. and TSAI S. W.** Composite Materials: Design and Applications [Book]. - Boca Raton : CRC Press, 2003.

**GEBHARDT Andreas.** Understanding Additive-Manufacturing [Book]. - Monaco : Hanser Publishers, 2011.

**HAYWARD HERMAN E.** The structure of Economic Plants [Book Section] = Moraceae Cannabis Sativa. - Chicago : [s.n.], Novembre, 1938.

**INTERNATIONAL STANDARD** ISO/ASTM 52900 // Additive Manufacturing - General principles - Terminology. - [s.l.] : ISO/ASTM International 2015, Dicembre 15, 2015.

**jr. CALLISTER WILLIAM D.** Scienza e tecnologia dei materiali, una introduzione [Book]. - [s.l.] : EdiSES, 2002.

**Just BioFiber srl.** [http://justbiofiber.ca/?page\\_id=612](http://justbiofiber.ca/?page_id=612). [Online] // JustBioFiber. - Novembre 25, 2018.

**KALIA S., KAITH B. S. and KAURA I.** Pretreatments of natural fibers and their application as reinforcing material in polymer composites - A review [Journal] // Polymer Engineering and Science. - [s.l.] : Published online in Wiley InterScience ([www.interscience.wiley.com](http://www.interscience.wiley.com)), 2009. - Vol. 49. - pp. 1253-1272.

**KALITA S. J. [et al.]** Development of controlled porosity polymer-ceramic composite scaffolds via fused deposition modeling [Article] // Materials Science and Engineering. - [s.l.] : ResearchGate, 2003. - 5 : Vol. 23.

- KANÈSIS** Technical Data Sheet: HBP® for 3d-printing (code: PLA A/17 NAT) / ed. SRL Superlab. - Novembre 21, 2017.
- KHANMA M. [et al.]** Influence of sucrose addition on the performance of a lignocellulosic composite with a cementitious matrix [Report]. - [s.l.] : Compos. Part A 39 (2008) 1901-1908, 2008.
- KÖHLER H.** Köhler's Medizinal-Pflanzen in naturgetreuen Abbildungen mit kurz erläuterndem Texte: Atlas zur Pharmacopoea germanica [Book] / ed. MÜLLER WALTHER O.. - Untermyhaus : Gustav Pabst, 1887.
- KORTE SANDRA and STAIGER MARK P.** Effect of processing route on the composition and properties of hemp [Journal] // *Fibers and Polymers*. - 2008. - 5 : Vol. 9. - pp. 593-603.
- KUZNETSOV V. E. [et al.]** Strength of PLA Components Fabricated with Fused Deposition Technology Using a Desktop 3D Printer as a Function of Geometrical Parameters of the Process [Journal] // *Polymers*. - [s.l.] : MDPI AG, Maggio 13, 2018. - 313 : Vol. 10.
- LABOO s.r.l.** LABOO [Online]. - Settembre 21, 2019. - <https://www.laboodesign.com/>.
- LAMPKE TH.** Beitrag zur Charakterisierung naturfaserverstärkter Verbundwerkstoffe mit hochpolymerer Matrix, Schriftenreihe Werkstoffe und werkstofftechnische Anwendungen [Report] / Lehrstuhl für Verbundwerkstoffe ; Technische Universität Chemnitz. - [s.l.] : B. Wielage, 2001. - p. Vol. 9.
- LANZOTTI A. [et al.]** The impact of process parameters on mechanical properties of parts fabricated in PLA with an open-source 3-D printer [Journal] // *Rapid Prototyping Journal*. - Università di Napoli Federico II, Napoli, Italia : Emerald Group Publishing Limited, Giugno 16, 2015. - 5 : Vol. 21. - pp. 604–617.
- LETCHER T. and WAYTASHEK M.** Material property testing of 3D-printed specimen in PLA on an entry-level 3D printer [Conference] // *Proceedings of the ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress & Exposition*. - Montreal, Quebec, Canada : ASME, Dicembre 2014.
- Lime Technology** Tradical® Hemcrete® Information Pack [Book]. - 2006.
- LUCANAPA** Lucanapa [Online] // *Lucanapa: tutela del territorio e salvaguardia ambientale*. - Gennaio 22, 2019. - <https://www.lucanapa.com/>.
- MADSEN BO [et al.]** Hemp yarn reinforced composites – Yarn characteristics [Journal] // *Composites, Part A*. - 2007. - 38 : Vol. Science and Manufacturing. - pp. 2194 – 2203.
- MAGWOOD CHRIS** Essential hempcrete construction : the complete step-by-step guide [Book]. - Gabriola Island : New Society Publishers, 2016.
- MARACCHI G.** Manuale di coltivazione e prima lavorazione della canapa da fibra. - [s.l.] : Regione Toscana, Giugno 2007.
- MARCHETTI M. and CUTOLO D.** Tecnologie dei materiali compositi [Book]. - [s.l.] : editoriale ESA Milano, 1991.
- MASOOD SALEEM HASHMI** Advances in Fused Deposition Modeling [Book]. - Oxford : Elsevier Ltd., 2014. - pp. 69–91.
- MASOTTI C.** Manuale di architettura di emergenza e temporanea: alloggi, rifugi, insediamenti abitativi, materiali, prodotti, sistemi, tecnologie. [Book]. - [s.l.] : Sistemi Editoriali, 2010.

**MEHRAEIN HOOTAN** Impact of process parameters on mechanical properties of 3d printed polycaprolactone parts [Report] : Tesi / Department of Industrial and Manufacturing Engineering ; Wichita State University. - 2018.

**MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE E DEI TRASPORTI** Norme tecniche per le costruzioni // Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni». - Roma : Ministero della Giustizia - Ufficio pubblicazione leggi e decreti, febbraio 20, 2018. - Vol. Gazzetta Ufficiale n°42.

**MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO** Decreto del Ministero dello sviluppo economico 26 giugno 2015 // Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici. (15A05198). - Roma : Ministero dello sviluppo economico - Ufficio pubblicazione leggi e decreti, giugno 26, 2015. - Vol. Gazzetta Ufficiale n°162.

**MUNOZ VELOZA MONICA A.** La canapa in edilizia: uso della canapa nei componenti edilizi per lo sviluppo di un modulo abitativo rurale nel dipartimento del Cauca-Colombia [Report] : Tesi Magistrale in Architettura per il progetto Sostenibile / Architettura ; Politecnico di Torino. - Torino : [s.n.], 2017.

**NGUYEN T. T. [et al.]** Effect of compaction on mechanical and thermal properties of hemp concrete [Report]. - [s.l.] : Eur. J. Environ. Civ. Eng. 13 (2009) 1039-1050., 2009.

**PECOLLO F. and MASPOLI R.** Progettare per la sopravvivenza: modelli architettonici e tecnologici per un approccio alla sopravvivenza, linee guida e prototipo di unità abitativa [Report] : Tesi di laurea / Laurea Magistrale in Architettura per il Restauro e la Valorizzazione del Patrimonio ; Politecnico di Torino. - Torino : [s.n.], 2018.

**PÉRIER F.** Isochanvre Technical Document. - Le Verger : [s.n.], 2001.

**PONTAROLO ENGINEERING SPA** Calcolo della trasmittanza e diagramma di Glaser [Online] // Pontarolo Engineering. - Ottobre 10, 2019. - <https://www.pontarolo.com>.

**PUCCI F. [et al.]** Coperture di grande luce in legno lamellare: progetto strutturale con gli eurocodici della copertura di un palazzetto dello sport polivalente [Report] : Tesi di laurea / Facoltà di Ingegneria, Laurea specialistica in ingegneria civile ; Università degli Studi di Firenze. - Firenze : [s.n.], 2007/2008.

**QUARATO L.** Il materiale del futuro: ecco l'ETFE [Journal] // BuildingCuE. - [s.l.] : Close-up Engineering Network, Settembre 9, 2016.

**RODRIGUEZ J. F., THOMAS J. P. and RENAUD J. E.** Design of fused-deposition ABS components for stiffness and strength [Journal] // Mechanical Design Journal. - [s.l.] : ASME, Settembre 2003. - 3 : Vol. 125. - pp. 545-551.

**RODRIGUEZ J. F., THOMAS J. P. and RENAUD J. E.** Mechanical behavior of acrylonitrile butadiene styrene fused deposition materials modeling [Journal] // Rapid Prototyping Journal. - Caracas, Venezuela : MCB UP Ltd, 2003. - 4 : Vol. 9. - pp. 219-230.

**RONCHETTI PAOLO** Canapa e calce in bio-edilizia: storia, applicazioni e proprietà [Article] // Canapa Industriale. - Luglio 11, 2014.

**RONCHETTI PAOLO** The barriers to the mainstreaming of lime-hemp: a systemic approach [Report] / Department of Environment and Planning ; Dublin Institute of Technology. - Dublino : [s.n.], 2007.

**SachsenLeinen** / compl. BAFA [et al.]. - [s.l.] : Daimler, 1999.

**SCANDELLA B. and BELLOTTI C.** Pneugeo: ipotesi per la realizzazione di un geode automatico [Report] : Tesi di laurea / Corso di Studi di Design Engineering, Facoltà di Design ; Politecnico di Milano. - Milano : [s.n.], 2014/2015.

**SCARANTINO I.** L'ecosostenibilità delle produzioni agricole: la coltivazione della canapa [Report] : Saggio finale / Dipartimento di Economia e Impresa ; Università degli Studi di Catania. - Catania : [s.n.], 2013/2014.

**Senato della Repubblica** Senato della Repubblica [Online] // Senato.it / ed. Legislatura XVII. - Novembre 22, 2016. - Agosto 19, 2019. - <http://www.senato.it/leg/17/BGT/Schede/Ddliter/46232.htm>.

**SINKA M. [et al.]** Enhancement of lime hemp concrete properties using different manufacturing technologies [Report] / Faculty of Civil Engineering, Institute of Materials and Structures ; Riga Technical University. - Clermont-Ferrand, France : ICBBM (First International Conference on Bio-based Building Materials), 22-24 Giugno 2015.

**SOOD A. K., OHDAR R. K. and MAHAPATRA S. S.** Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling [Journal] // Elsevier. - Ranchi, India : Elsevier Ltd., Gennaio 2010. - 1 : Vol. Material and Design 31. - pp. 287-295.

**SQUAME G. and ATZENI E.** Sviluppo di un sistema di proiezione laser applicato alla fabbricazione additiva [Report] : Tesi Magistrale / Ingegneria Meccanica ; Politecnico di Torino. - Torino : [s.n.], 2018.

**STANWIX WILLIAM and SPARROW ALEX** The Hempcrete Book, Designing and building with hemp-lime [Book]. - Cambridge : UIT Cambridge Ltd, 2014.

**STEPHENS B. [et al.]** Ultrafine particle emissions from desktop 3D printer, Atmos [Journal] // Elsevier. - Chicago, IL, USA : Elsevier Ltd., Giugno 26, 2013. - 79 : Vol. Atmospheric Environment. - pp. 334-339.

**Tavolo di lavoro nazionale MSK** Piano Nazionale della Prevenzione 2014-2018: linee di indirizzo per l'applicazione del titolo VI e all. XXXIII° del D. Lgs. 81/08 e per la valutazione e gestione del rischio connesso alla Movimentazione Manuale di Carichi (MMC). - 2014-2018.

**TOFANI C.** Le tecniche di coltivazione della canapa secondo il presidente di Toscanapa Cesare Tofani [Article] // Canapa Industriale. - [s.l.] : Canapaindustriale.it, Febbraio 5, 2014.

**TOO M. [et al.]** Investigation of 3D non-random porous structures by fused deposition modeling [Journal] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. - Singapore : Springer-Verlag London Limited, Febbraio 2002. - 3 : Vol. 19. - pp. 217-223.

**TORRADO PEREZ ANGEL R., ROBERSON DAVID A. and WICKER RYAN B.** Fracture Surface Analysis of 3D-Printed Tensile Specimens of Novel ABS-Based Materials [Journal] // ASM International. - University of Texas, El Paso, USA : Springer, Marzo 20, 2014. - pp. 343-353.

**TRONET P. [et al.]** Study of lime hemp concrete (LHC) e Mix design, casting process and mechanical behavior [Report] / LIMATB (Laboratoire d'Ingénierie des MATériaux de Bretagne) ; Université de Bretagne-Sud. - Lorient, Francia : Elsevier, 2016. - pp. Cement and Concrete Composites 67 (2016) 60-72.

**TYMRAK B. M., KREIGER M. and PEARCE J. M.** Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions [Journal] // Elsevier. - Houghton, MI, United State : Elsevier Ltd., Febbraio 19, 2014. - 1 : Vols. Materials and Design, 58. - pp. 242-246.

**VEGA V. [et al.]** The effect of layer orientation on the mechanical properties and microstructure of a polymer [Journal] // Journal of Materials Engineering and Performance. - Loyola Marymount University : ASM International, Luglio 18, 2011. - 6 : Vol. 20. - pp. 978-988.

**WALKER R., PAVIA S. and MITCHELL R.** Mechanical properties and durability of hemp-lime concretes [Journal] // Elsevier. - [s.l.] : Elsevier Ltd., Aprile 9, 2014. - 61 : Vol. Construction and Building Materials. - pp. 340–348.

**WENDT C. [et al.]** Preliminary design and analysis of tensile test samples developed by Additive Manufacturing [Journal] // ScienceDirect / ed. The Manufacturing Engineering Society International Conference MESIC 2015. - [s.l.] : Elsevier Ltd., 2015. - 132 : Vol. Procedia Engineering. - pp. 132-139.

**WikiHouse Foundation** WikiHouse [Online]. - Gennaio 2016. - v1.5 CC-BY-ND. - Aprile 20, 2019. - [www.wikihouse.cc](http://www.wikihouse.cc).

**WONG K.** Wohlers 2017 Report on 3D Printing Industry Points to Softened Growth [Online] // DE247 Digital Engineering. - DE Editors, Aprile 11, 2017. - Maggio 29, 2019. - <http://www.rapidreadytech.com/2017/04/wohlers-2017-report-on-3d-printing-industry-points-to-softened-growth/>.

**WONG K.** Wohlers Report 2019: Record Growth in Additive Manufacturing Materials [Online] // DE247 Digital Engineering. - DE Editors, Marzo 26, 2019. - Maggio 29, 2019. - <https://www.digitalengineering247.com/article/wohlers-report-2019-record-growth-in-additive-manufacturing-materials>.

**WOOLLEY T.** Natural Building: A Guide to Materials and Techniques [Book]. - Ramsbury, Marlborough, Wiltshire, UK : The Crowood Press Ltd, 2006.

**YAN CHRIS SHANGQING** 3D Printing Design Research [Report]. - Halifax, Nova Scotia, Canada : NSCAD University Press, 2016.

**ZOU R. [et al.]** Isotropic and anisotropic elasticity and yielding of 3D printed material [Journal] // Elsevier. - Cina : Elsevier Ltd., Giugno 6, 2016. - 99 : Vol. Composites Part B. - pp. 506-513.