

---

TRE PROGETTI

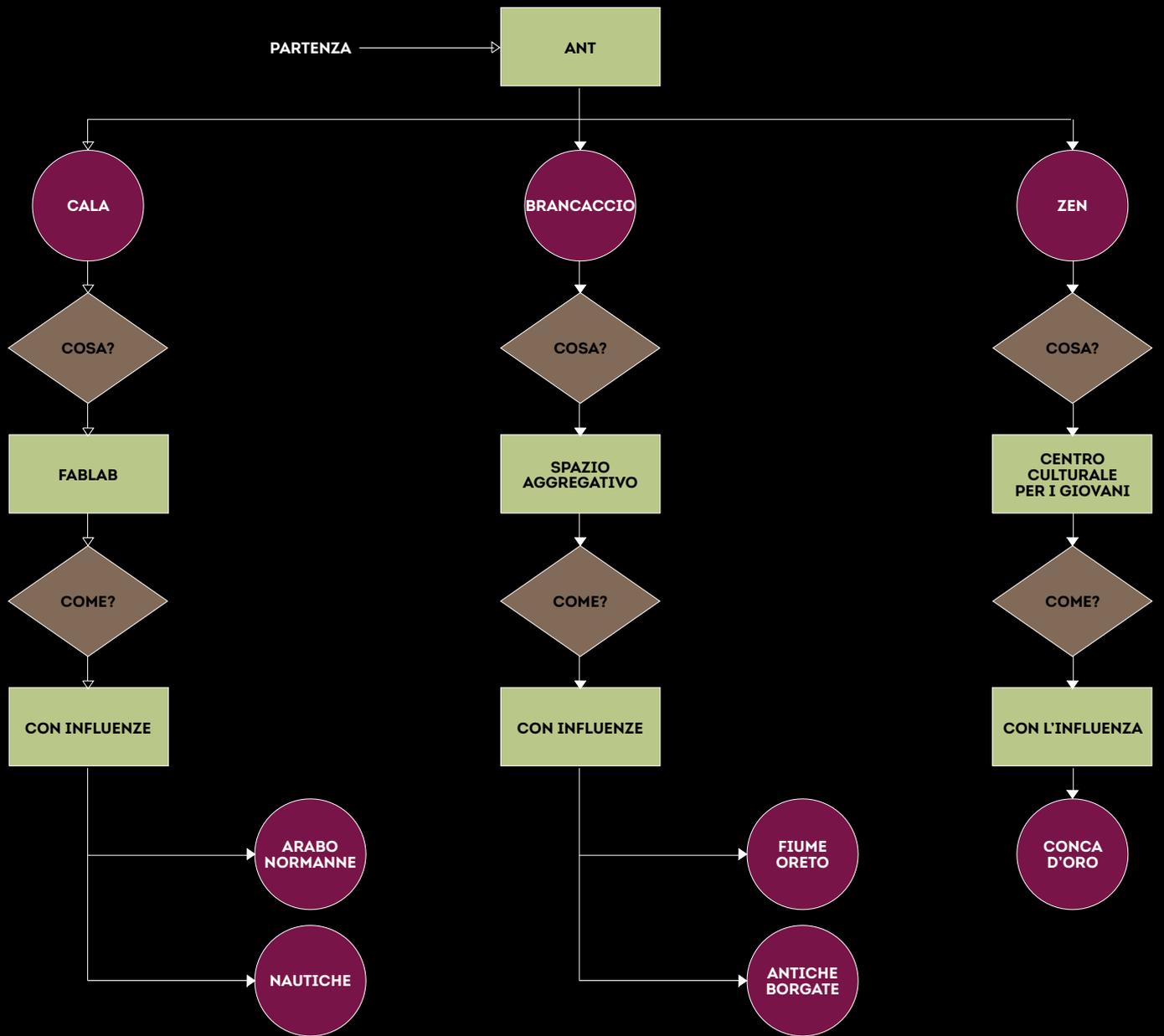
4

---

*Il mediocre non ci interessa, il bello lo conosciamo, andiamo alla ricerca del sublime.*  
— Carlo Scarpa

---

”



ANT1 CALA

38°07'08.9" N 13°21'59.8" E

### *Contaminazioni*



In uno scenario come quello palermitano le suggestioni sono molte. I segni che le popolazioni del passato hanno lasciato si sono stratificati nel tempo, dando vita ad una città ricca di storia e dalle complesse sfaccettature. La cultura Arabo-Normanna, ad esempio, ha avuto un'influenza decisiva sull'architettura di Palermo e la scelta di tradurre i suoi elementi connotativi in chiave moderna è stata alla base del processo che ha portato alla definizione del progetto architettonico. La Cattedrale di Palermo ed il Palazzo dei Normanni sono solo due esempi per capire gli aspetti tipologici più rilevanti del modo di costruire di quel tempo. Uno fra questi è l'arco a sesto acuto che, usato prevalentemente per le aperture finestrate e come struttura portante, si ritrova in molti edifici, scandendone in maniera forte il layout di facciata. Tale scansione è spesso ripetitiva, generalmente simmetrica e assolutamente riconoscibile.

Le influenze però non si sono esaurite con questo aspetto ma ne hanno toccato altri, strettamente legati all'area su cui sorge il progetto. La Cala, com'è stato ampiamente approfondito nel capitolo precedente, è l'antico porto di Palermo e questo è stato fin da subito un punto di attrazione importante per la definizione del concept. Così come è avvenuto per secoli in questa città, si è cercato quindi di contaminare l'architettura mischiando questi due mondi, rispettandone l'unicità e la forza della loro storia. Il padiglione si presenta quindi come la grande carena di una nave, dove le "costole" sono gli archi, la "ciglia" è la chiave di volta mentre il "fasciame" è la scocca esterna che racchiude gli spazi interni.

Palazzo dei Normanni [165]

↳ [www.agoda.com](http://www.agoda.com)



Porto della Cala [166]

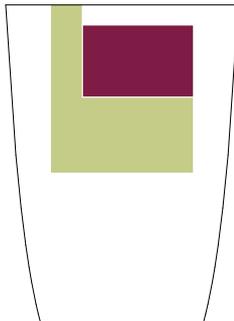
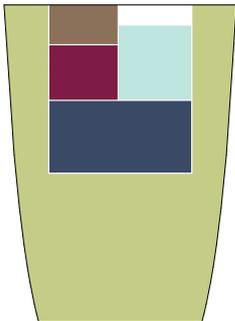


## Forma e funzione

(D)(D)(D)(D)(D)(D)(D)(D)(D)(D)(D)(D)(D)(D)(D)(D)

In un contesto come questo, estremamente eterogeneo, vissuto dai pescatori che la mattina tornano dal mare con le loro barche, e frequentato la sera per i molti locali che negli anni hanno abbracciato il litorale, bisognava inserire qualcosa che attirasse a se, in maniera trasversale, persone di ogni età. Un FabLab, in questo senso, è uno spazio assolutamente indicato poiché versatile, in grado di incuriosire la gente e di volta in volta trasformarsi per proporre iniziative, workshop ed eventi di qualsiasi genere.

La distribuzione interna del padiglione della Cala è quindi molto semplice e si divide in due nuclei principali. Sotto la scocca un cubo racchiude, al piano terra, un laboratorio di manifattura additiva, un punto accoglienza, un locale impiantistico ed i servizi igienici. Al primo piano invece vi è un ufficio con affaccio sull'open space sottostante. Questo è il fulcro della attività di comunicazione all'interno di ANT1; luogo polifunzionale in cui la gente potrà ascoltare, partecipare in prima persona alle attività che verranno organizzate e condividere le proprie idee con gli altri.



Destinazione d'uso	Superficie [m <sup>2</sup> ]
Piano terra	
1 Sala polifunzionale	142,5
2 FabLab	38,60
3 Punto accoglienza	12,2
4 Vano tecnico	9,1
5 Servizi igienici	17
Piano primo	
6 Ufficio	29,7
7 Area ricreativa	42,15

Lotto di progetto da via Cala [168]



[167]

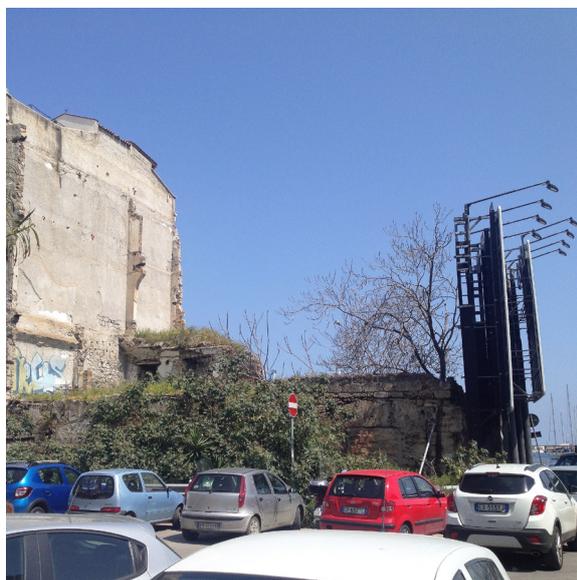


Il nuovo padiglione, insiste su un rudere preesistente, non vincolato da valore storico, fatiscente e circondato da alti cartelloni pubblicitari che lo nascondono alla vista. Si prevede quindi di rimuoverlo e così facendo di ricucire anche un tratto di marciapiede che ad oggi è del tutto inutilizzabile, ampliandolo e dotandolo di aiuola alberata con panchine.

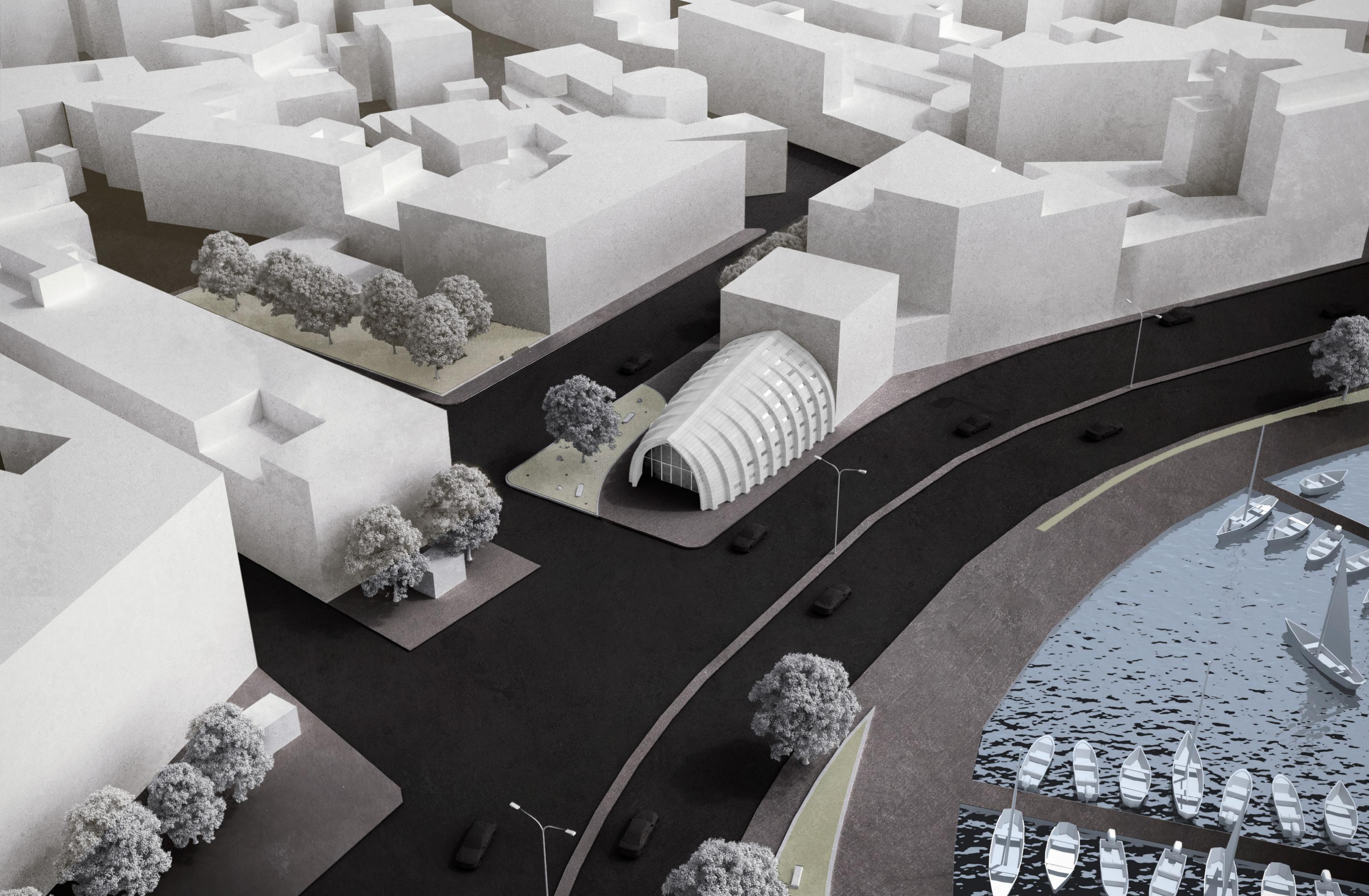
[170]



Lotto di progetto da Piazza Fonderia [169]



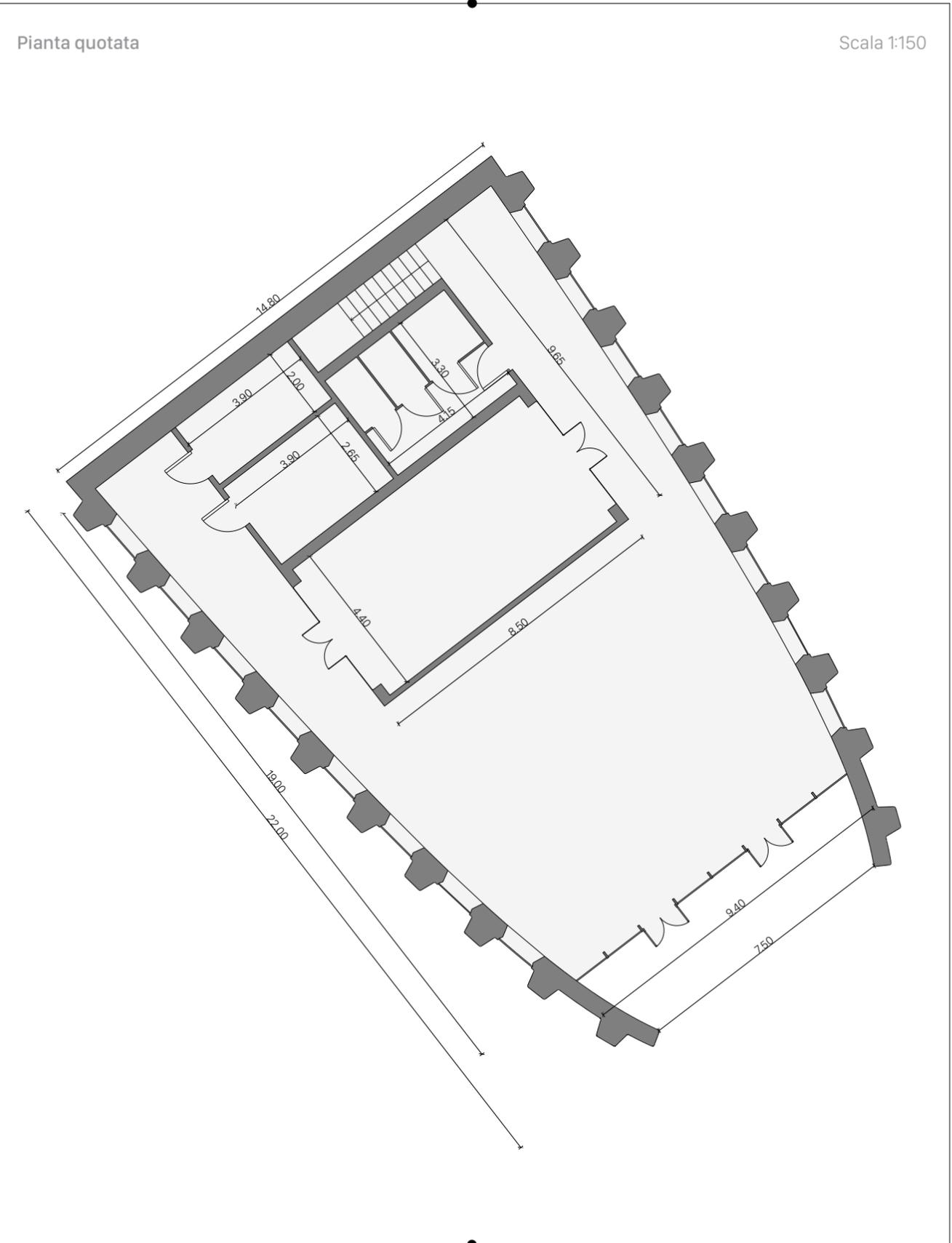
**TAVOLA 16**  
MASTERPLAN 3D



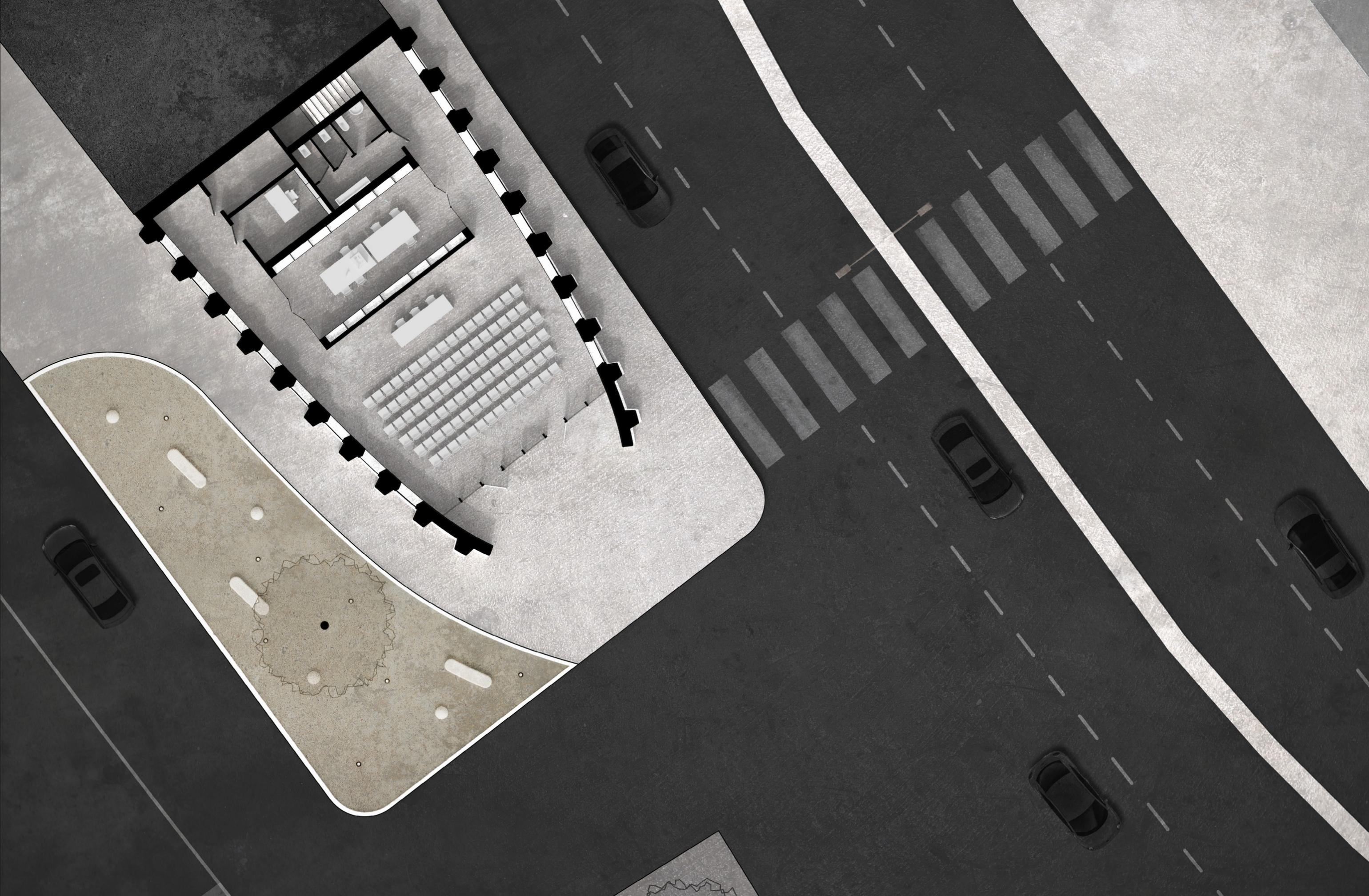
**TAVOLA 17**  
MASTERPLAN  
Scala 1:150



**TAVOLA 18**  
PIANTA PIANO TERRA  
Scala 1:150



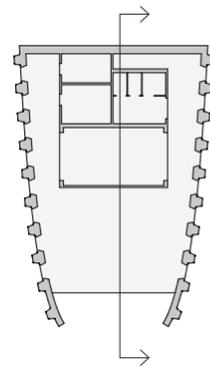
\* La scala che permette di raggiungere il primo piano del cubo centrale è stata nascosta dietro il cubo stesso, in modo da rendere la composizione più omogenea e simmetrica



**TAVOLA 19**  
PIANTA PIANO PRIMO  
Scala 1:150



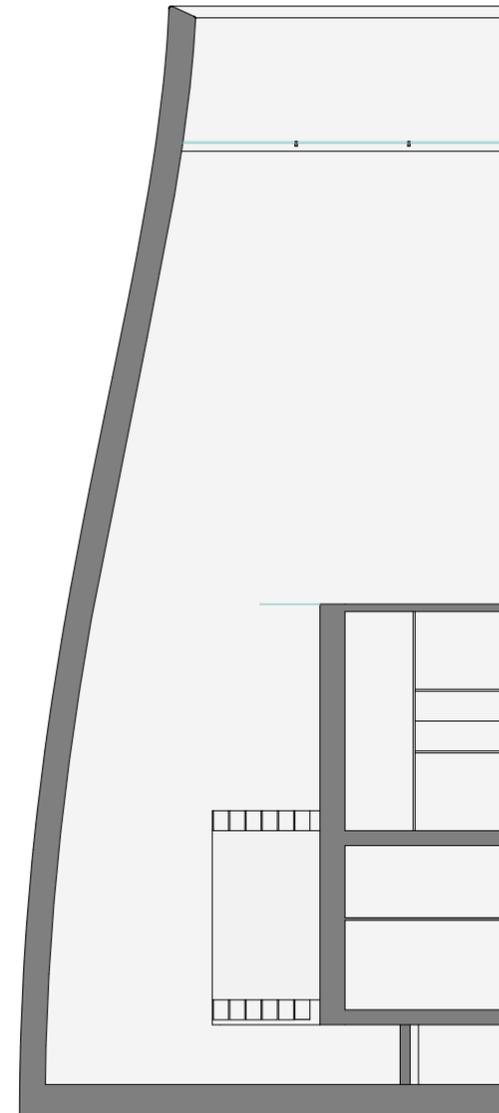
**TAVOLA 20**  
SEZIONE LONGITUDINALE  
Scala 1:150



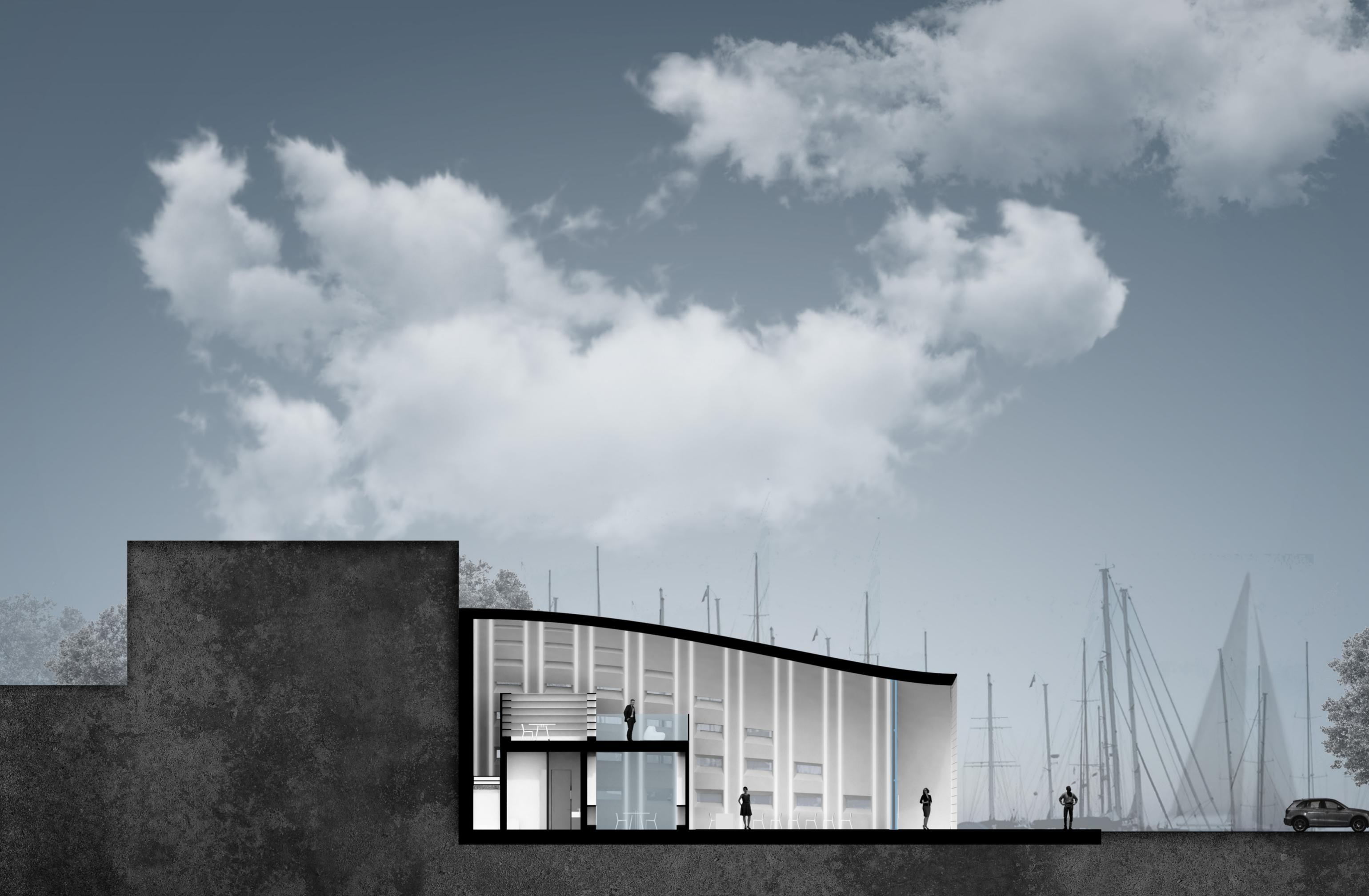
Sezione quotata

Scala 1:150

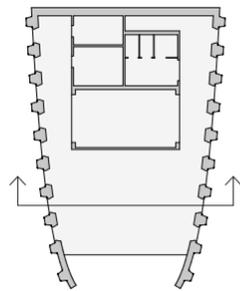
+10.00  
+8.00  
+6.50  
+4.00  
+0.00



\* La grande vetrata di ingresso, esposta a Sud, è stata indietreggiata rispetto al filo esterno della scocca in modo da ottenere un aggetto di 2 metri con la funzione di schermatura solare.



**TAVOLA 21**  
SEZIONE TRASVERSALE  
Scala 1:150



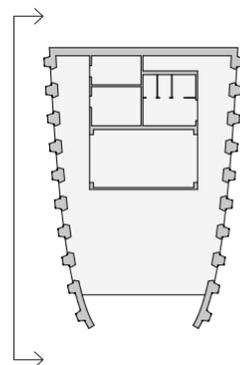
\* La larghezza massima dell'edificio è la stessa di quello retrostante sul quale si appoggia, in modo tale da mantenere la continuità dell'isolato.



# TAVOLA 22

## PROSPETTO LATERALE

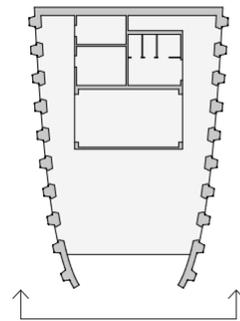
Scala 1:150



\* Pur essendo caratterizzata da una geometria complessa, la scocca dell'edificio presenta finestre tutte uguali fra loro, della dimensione di 0,40x1,20 metri. Queste seguono l'andamento della curvatura in sommità ed essendo posizionate ad altezze differenti, modulano la visibilità fra interno ed esterno. In particolare sono più basse nella parte di padiglione adibita a sala conferenza, in modo da permettere la visibilità verso l'esterno esclusivamente da seduti, bloccandola ai passanti. Viceversa, in corrispondenza del blocco centrale, cioè degli spazi destinati a FabLab, le finestre sono posizionate ad un'altezza compresa fra 1,40 e 1,80 metri, facilitando quindi la possibilità di guardare all'interno e di attirare l'attenzione.



**TAVOLA 23**  
PROSPETTO FRONTALE  
Scala 1:150





# IMMAGINE **ESTERNA 1**

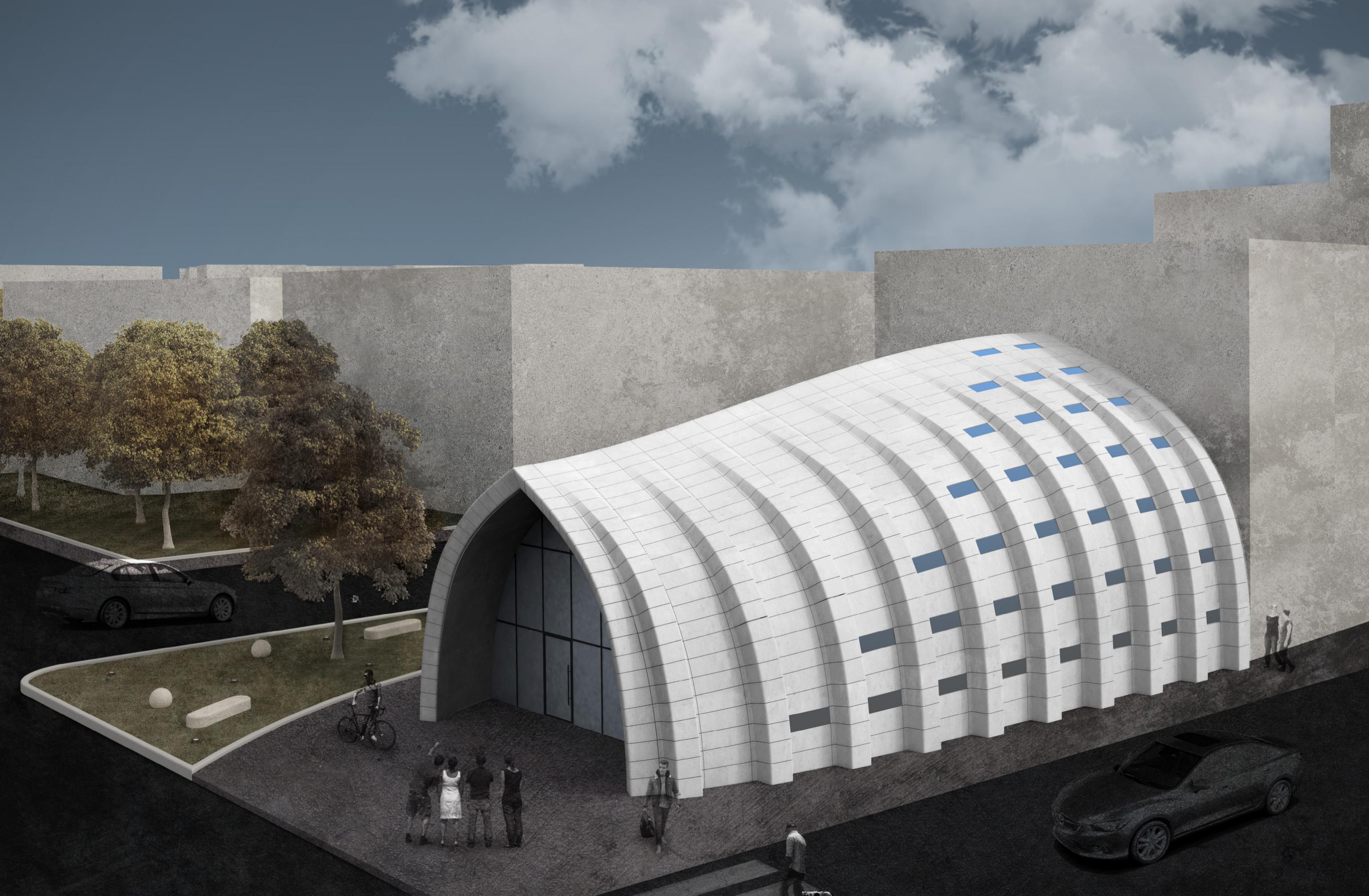
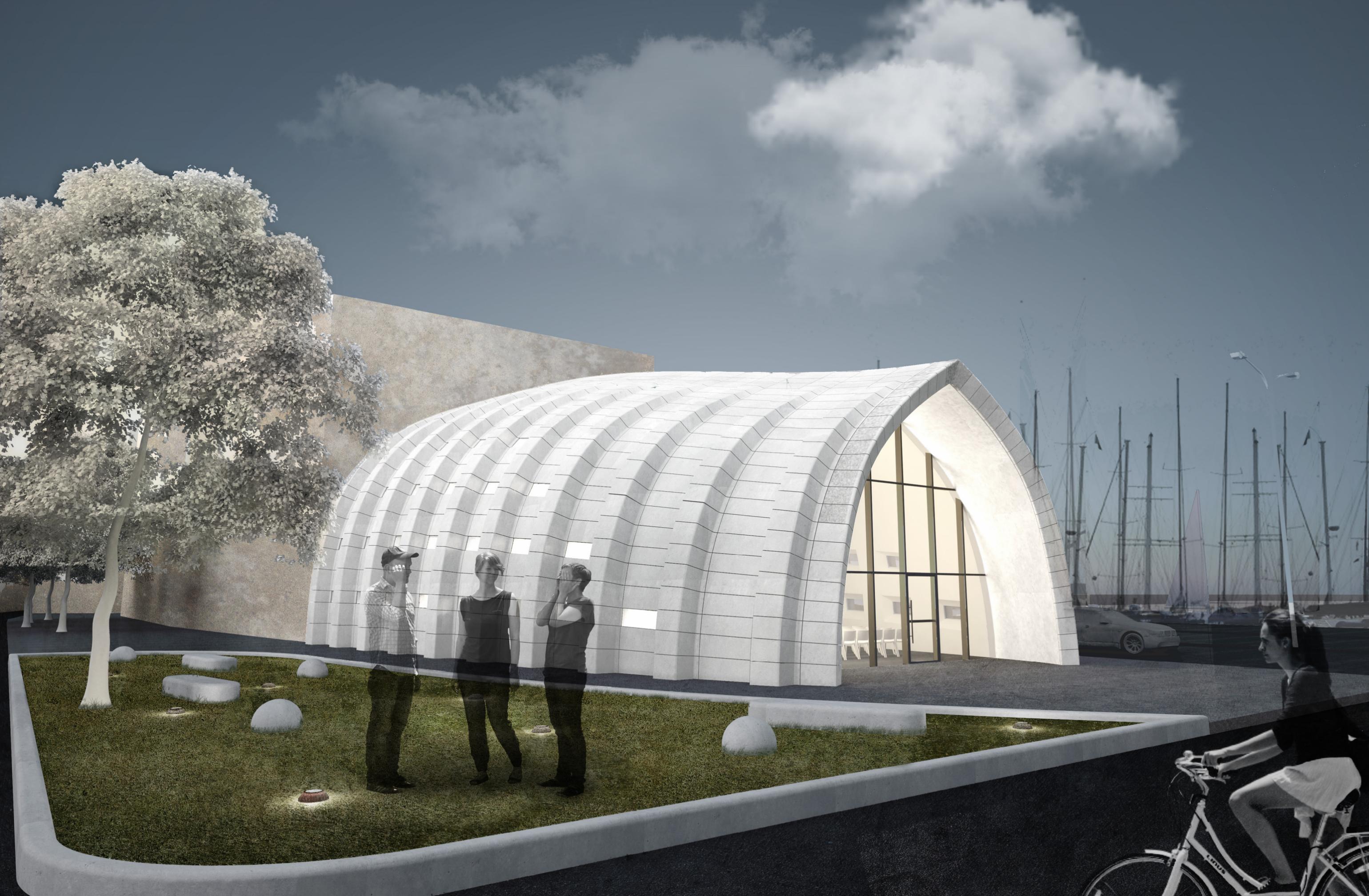


IMMAGINE **ESTERNA 2**

IMMAGINI **INTERNE**



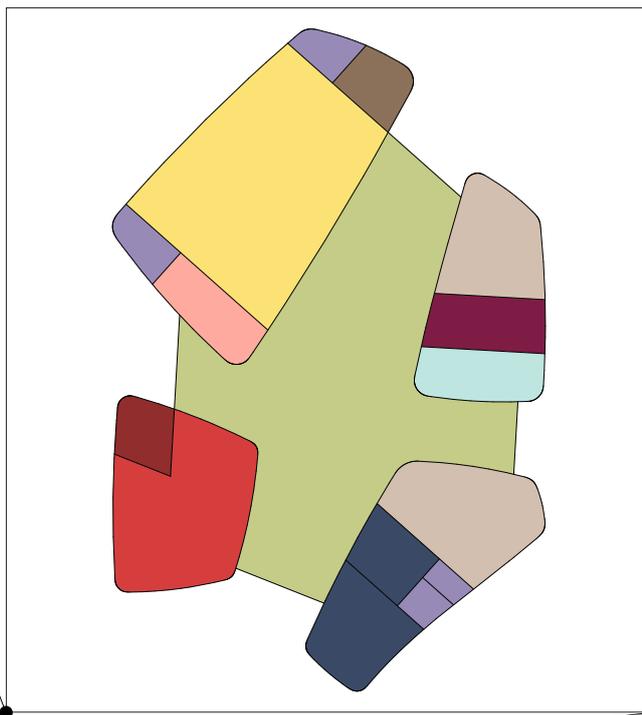






Attorno alla piazza, concepita come un grande foyer con al centro una postazione di accoglienza e referenze, si articolano 4 blocchi monolitici. Questi comprendono ambienti dai diversi usi: da sale per associazioni a un auditorium flessibile e riconfigurabile per qualsiasi tipo di evento; dalla caffetteria al FabLab. Quest'ultimo è posto vicino all'ingresso principale del padiglione (su Corso dei Mille) e funge da vetrina sulla città, per incuriosire i passanti e spingerli all'interno.

L'intervento sul lotto ha coinvolto poi una totale ri-progettazione degli spazi esterni, che si presentavano poco funzionali ed attrattivi. L'idea, in questo caso, è stata quella di un masterplan che creasse un paesaggio collinare, con zone più o meno appartate, e in grado di restituire ai palermitani un parco sfruttabile a 360°.



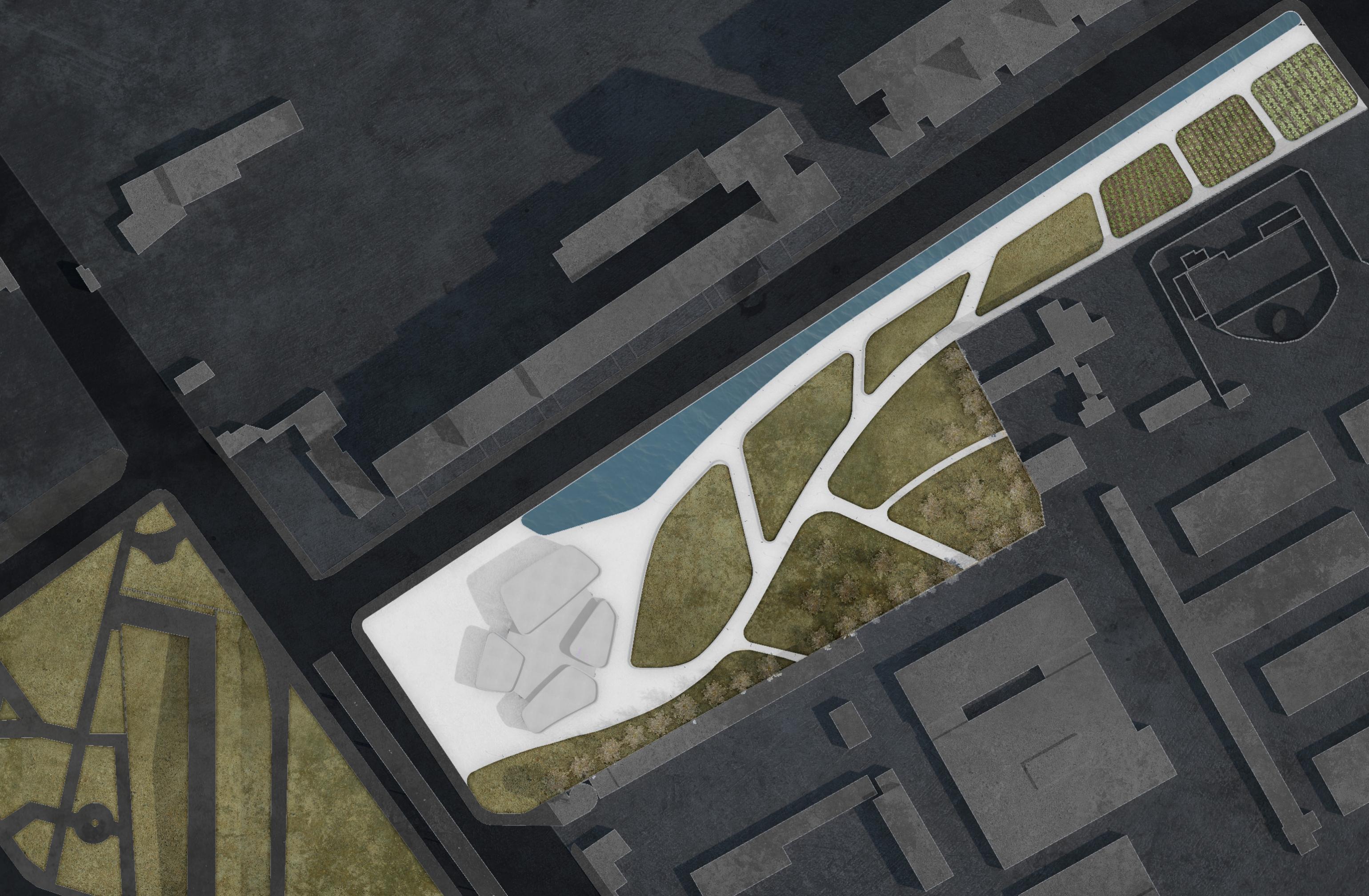
Destinazione d'uso	Superficie [m <sup>2</sup> ]
1 Piazza	430
2 FabLab	80
3 Sala associazioni 1	80
4 Sala associazioni 2	60
5 Auditorium	225
6 Sala regia	35
7 Caffetteria	115
8 Back bar	22
9 Servizi igienici	38
10 Vano tecnico	23
11 Spazi deposito	45

Area di progetto [174]



**TAVOLA 24**  
MASTERPLAN  
Scala 1:1000

\* Il parco è stato totalmente riprogettato ma si è voluta mantenere l'idea di fluidità del percorso preesistente che lo attraversava, con riferimento anche al fiume Oreto. Si configura così uno scenario diversificato, organico e caratterizzato dalla "convivenza" di 3 aree principali: le colline, gli orti urbani e lo specchio d'acqua con l'intento di creare spazi più o meno intimi all'interno del parco.



# TAVOLA 25

## PIANTA

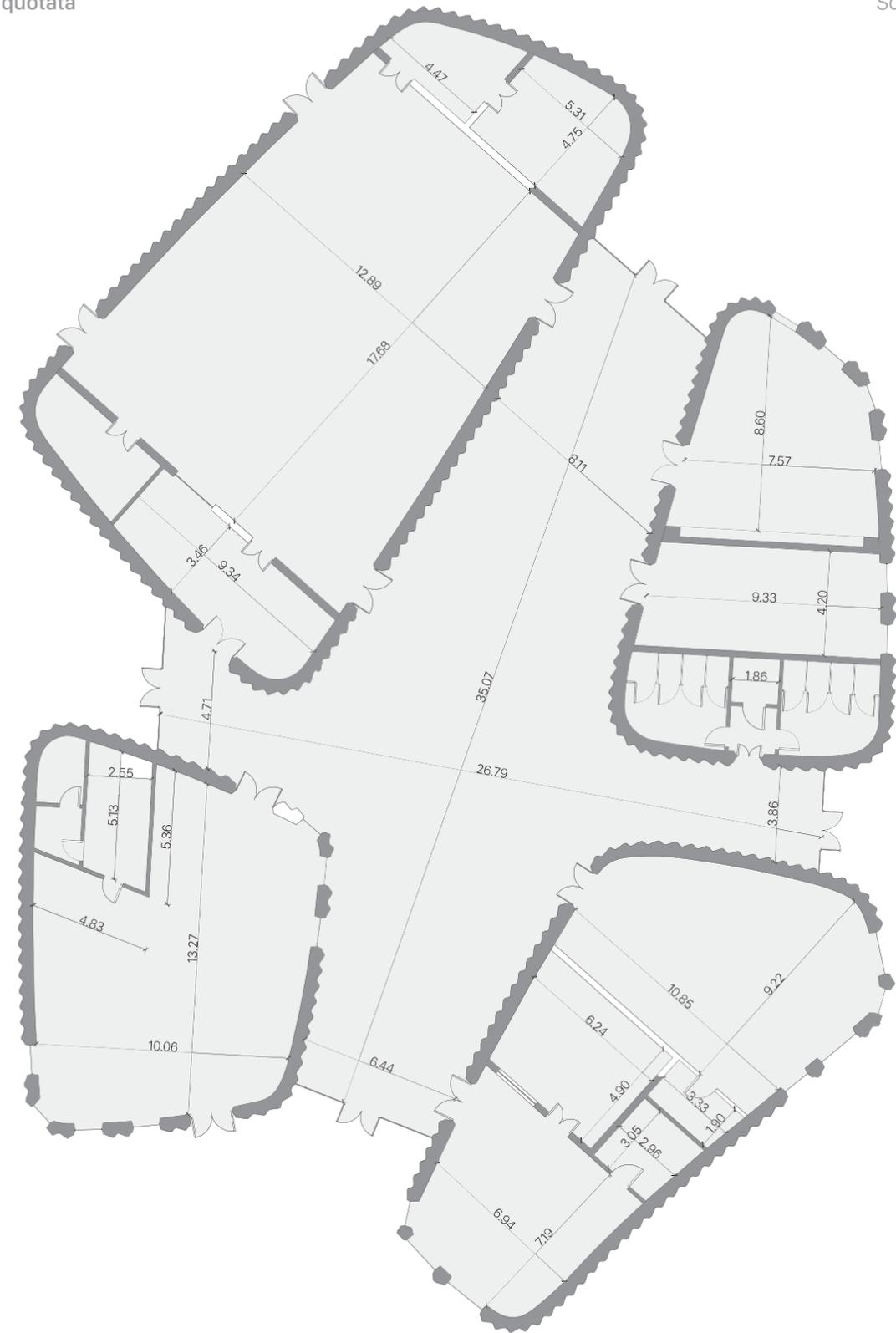
Scala 1:200

\* Gli ingressi al padiglione sono 4, 2 principali e 2 secondari. I primi si affacciano, uno sulla strada principale (Corso dei Mille), e l'altro sul nuovo parco e sono disposti in modo tale da garantire la totale permeabilità visiva e di percorso all'interno dell'edificio.

\* Il FabLab (nel volume in basso a destra) è suddiviso in due ambienti differenti. Uno più grande e verso l'esterno, dove verranno collocate le stampanti 3D più piccole, e un secondo ambiente chiuso, destinato a stampanti e macchinari più grandi e rumorosi.

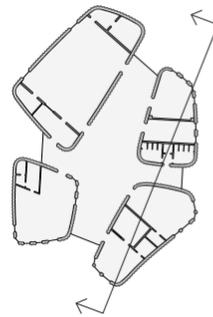
Pianta quotata

Scala 1:250





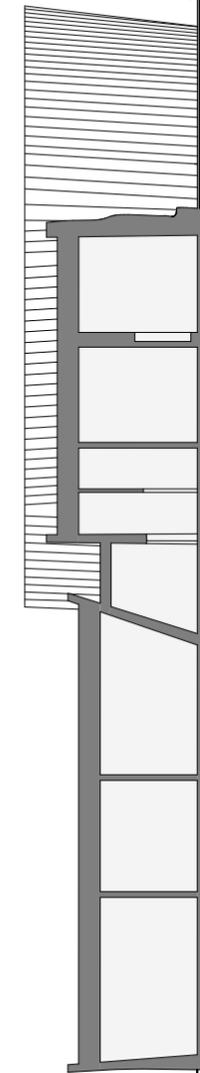
**TAVOLA 26**  
**SEZIONE**  
Scala 1:200



Sezione quotata

Scala 1:350

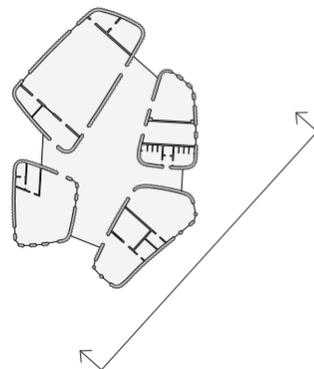
+8.00  
+6.50  
+5.50  
+4.50  
+0.00



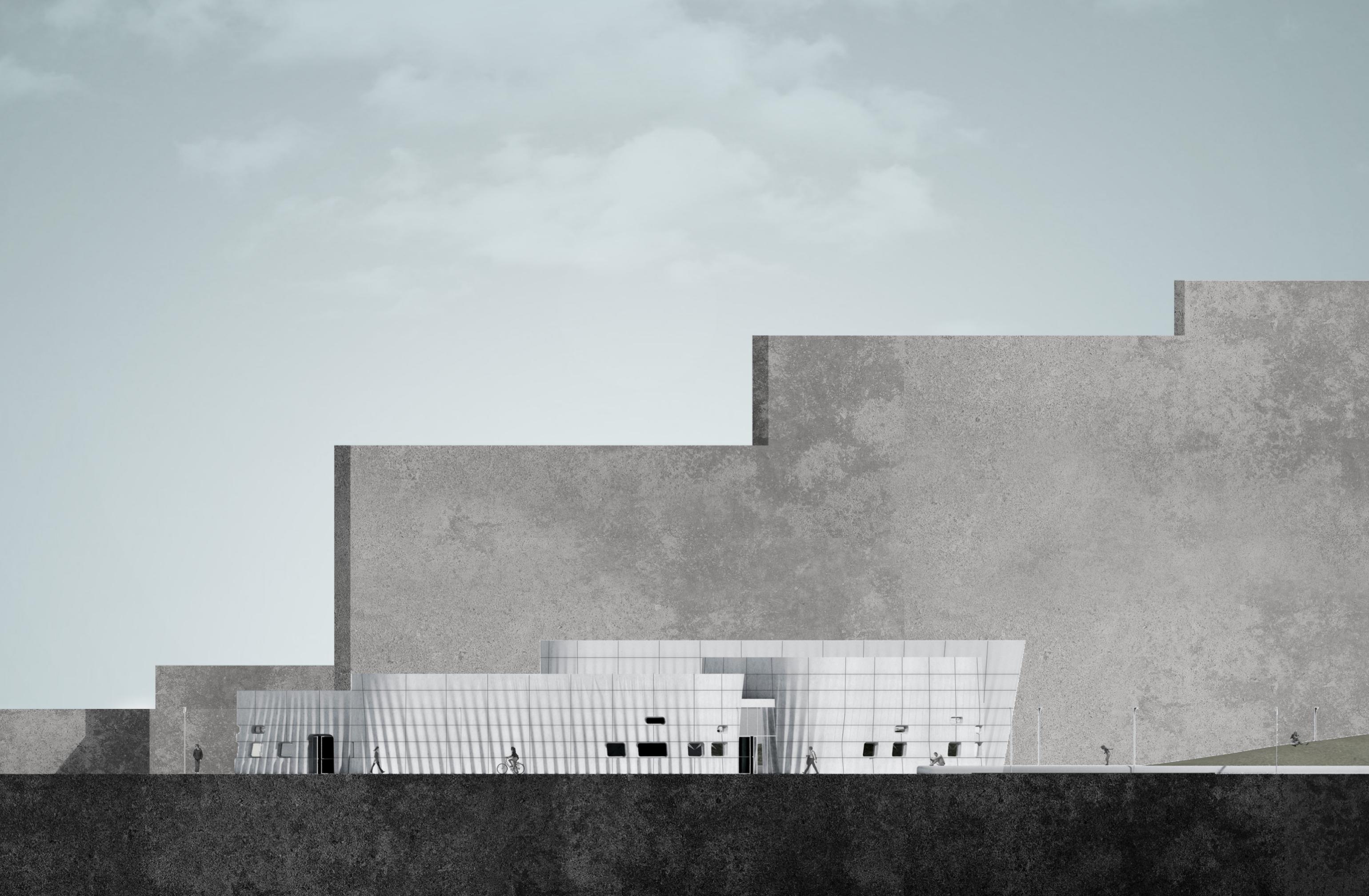
\* I quattro "sassi" di cui è composto il progetto sono stati sviluppati con diverse altezze, in base anche alle funzioni che dovevano ospitare. Questo crea un gioco di volumi che si va ad integrare con le diverse altezze delle colline del parco.



**TAVOLA 27**  
PROSPETTO LATERALE  
Scala 1:200



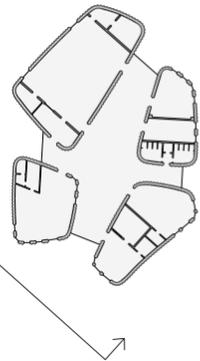
\* La pelle esterna si presenta con una caratteristica forma ondulata ad inclinazione variabile. Questa cambia, cioè, in base alle aperture: per esempio in corrispondenza delle porte di ingresso è perfettamente verticale, in modo da consentire l'alloggiamento di un infisso regolare. In corrispondenza, invece, delle finestre, sono queste ultime a seguire l'andamento inclinato della scocca ma per evitare che fossero tutte diverse, si sono stabiliti solo 3 moduli differenti che vengono ripetuti.

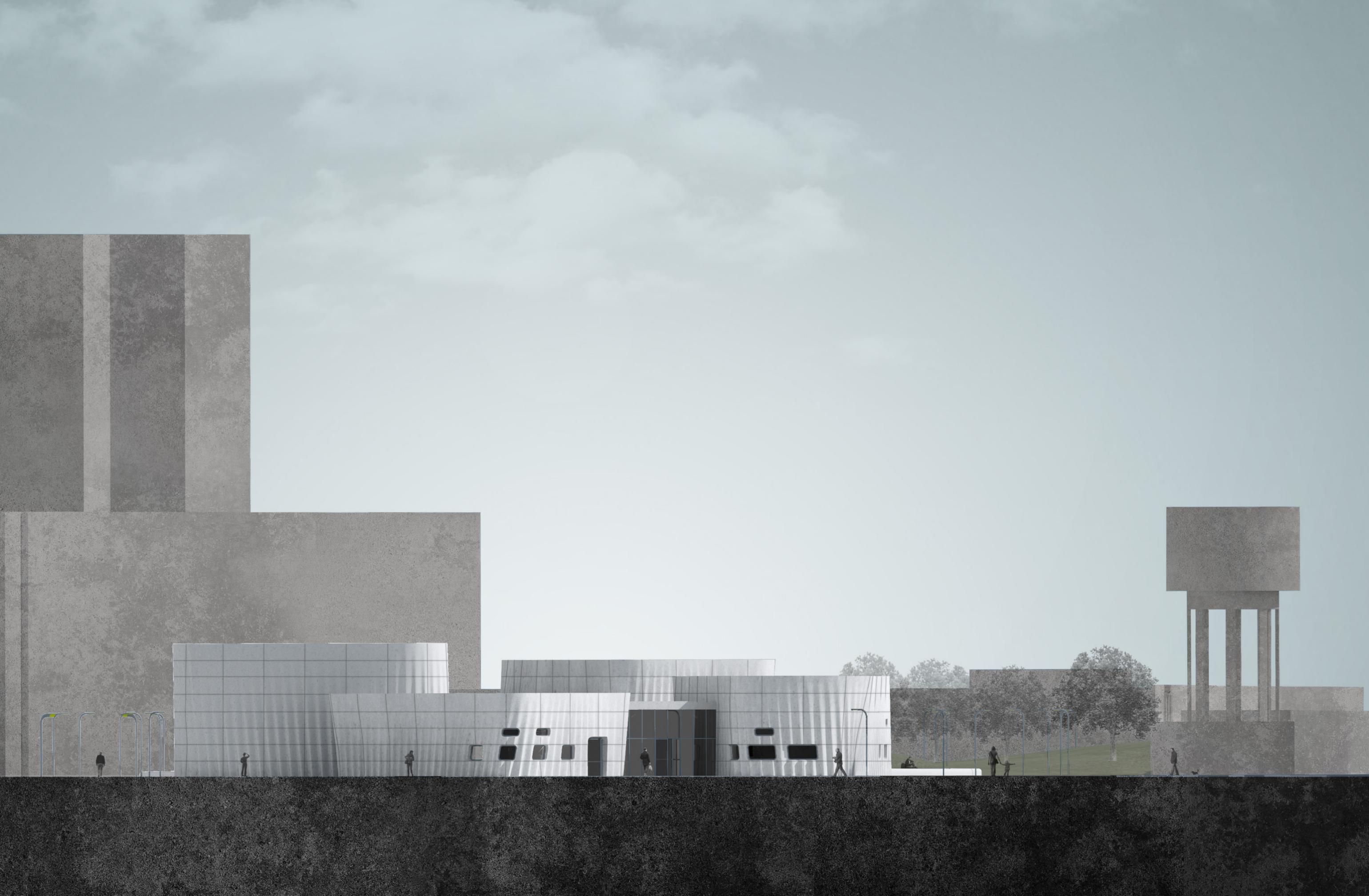


# TAVOLA 28

## PROSPETTO FRONTALE

Scala 1:200





## IMMAGINE **ESTERNA 1**

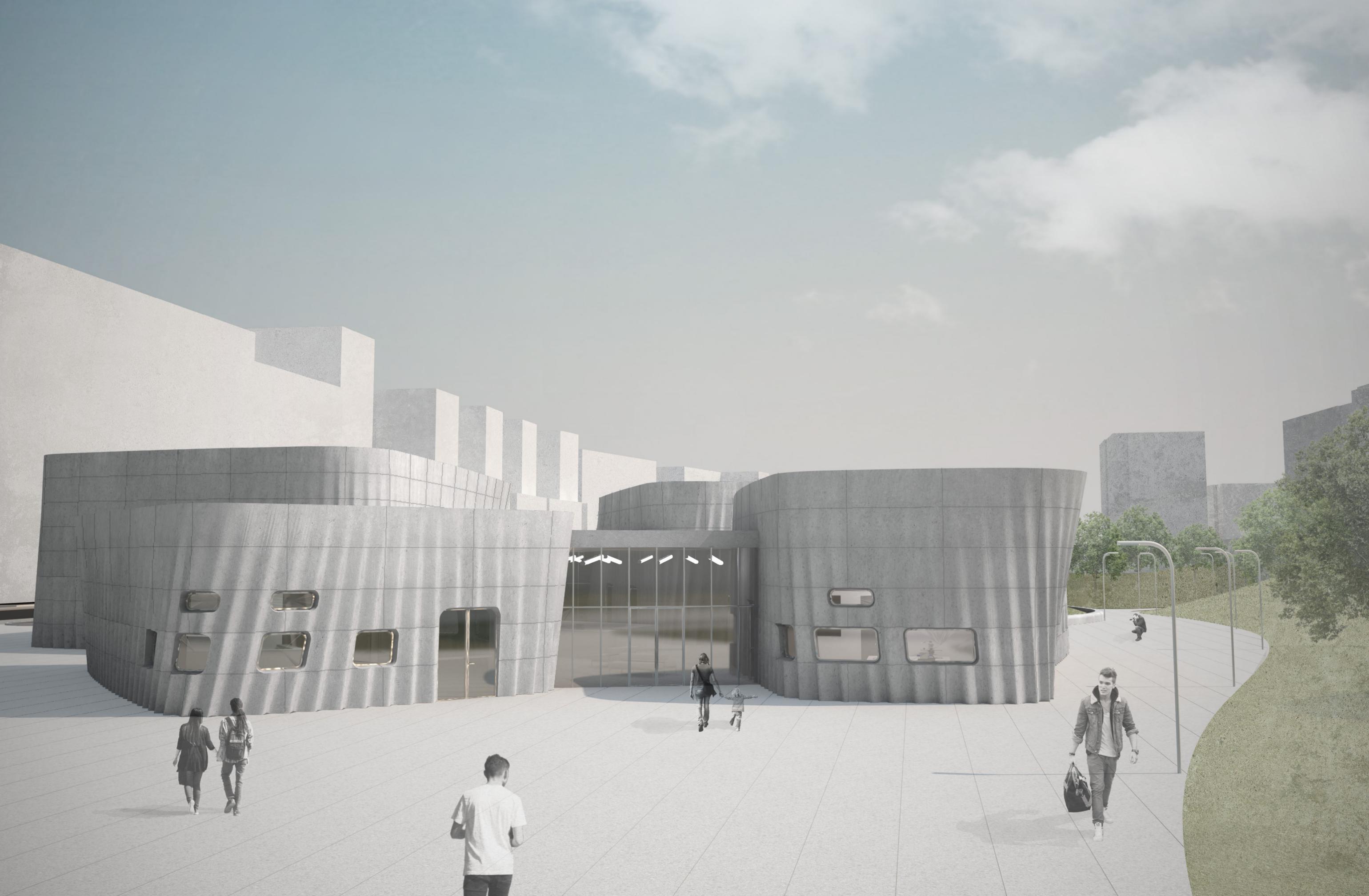
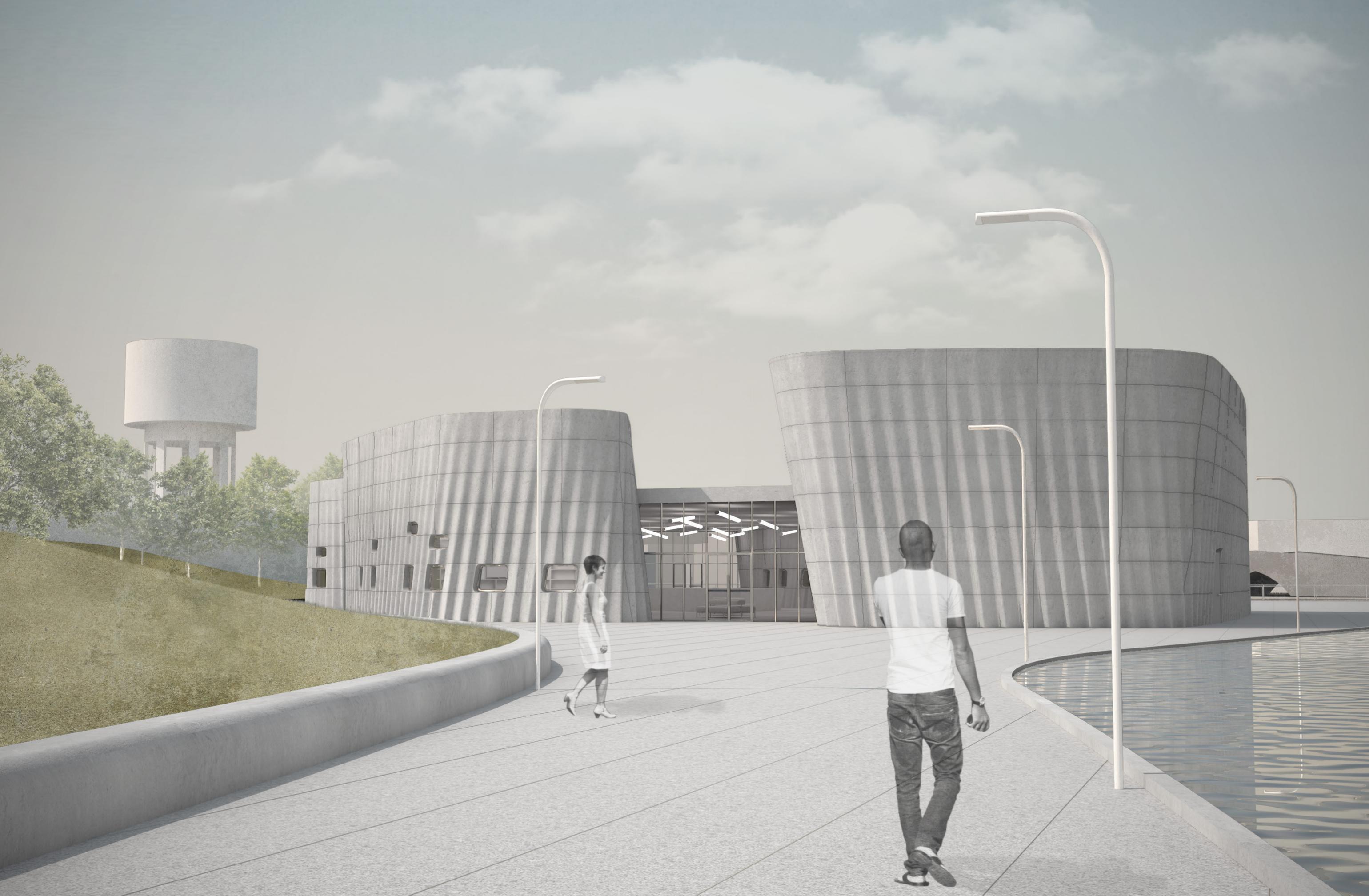
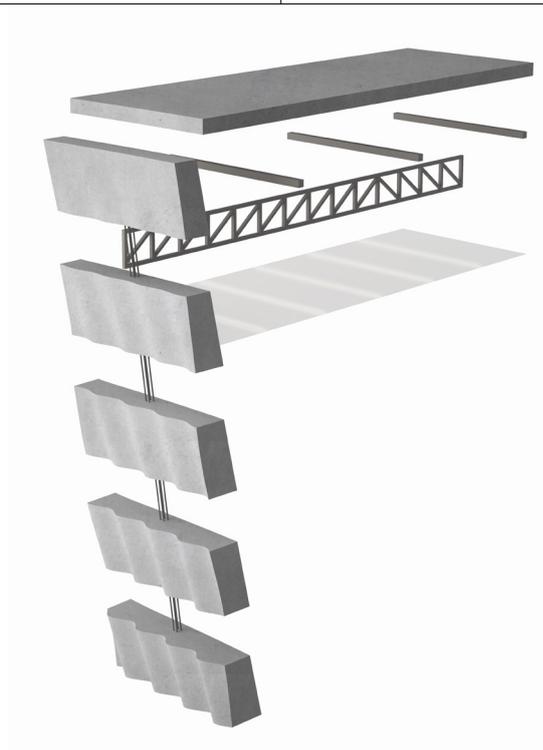


IMMAGINE **ESTERNA 2**

IMMAGINE **INTERNA**  
+  
**SPACCATO**



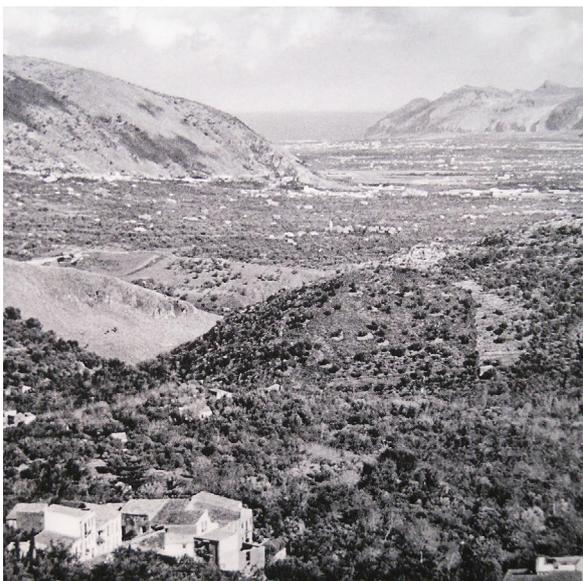


\* **Struttura portante del padiglione:** blocchi sovrapposti stampati in calcestruzzo, uniti tramite barre di acciaio a sezione variabile. Si rimanda al capitolo successivo dove verrà analizzata approfonditamente la struttura del padiglione ANT1, che può essere declinata sia a questo che al prossimo progetto.



Foto della Conca d'Oro nel 1957

[175] ← dal libro "La Sicilia Antica", Stringa Editore, Genova



Si è così arrivati alla definizione del concept il quale, ispirato ai percorsi sinuosi delle creazioni di Richard Serra, vede il districarsi di un "nastro" all'interno di una forma a C, definendone gli spazi interni in un movimento sinuoso ma deciso.

Opera di Richard Serra "Inside Out" 2013

[176] ← © Gagosian Gallery



Area di progetto [177] [178]



## Forma e funzione



Il padiglione si articola in due aree differenti; una destinata ai più giovani e l'altra rivolta ai ragazzi. Questi blocchi comprendono al loro interno spazi e attrezzature molto varie fra loro e si differenziano tra aule corsi a una biblioteca con zona di co-working, da una sala video a un piccolo FabLab. Quest'ultimo è il filo conduttore che accomuna i 3 progetti ma qui ha una valenza ancora maggiore, poiché introduce presto i bambini al mondo della manifattura additiva e i riscontri positivi delle passate Maker Faire a Roma dimostrano come questo possa essere davvero un valore aggiunto che li stimoli e li motivi per il futuro.



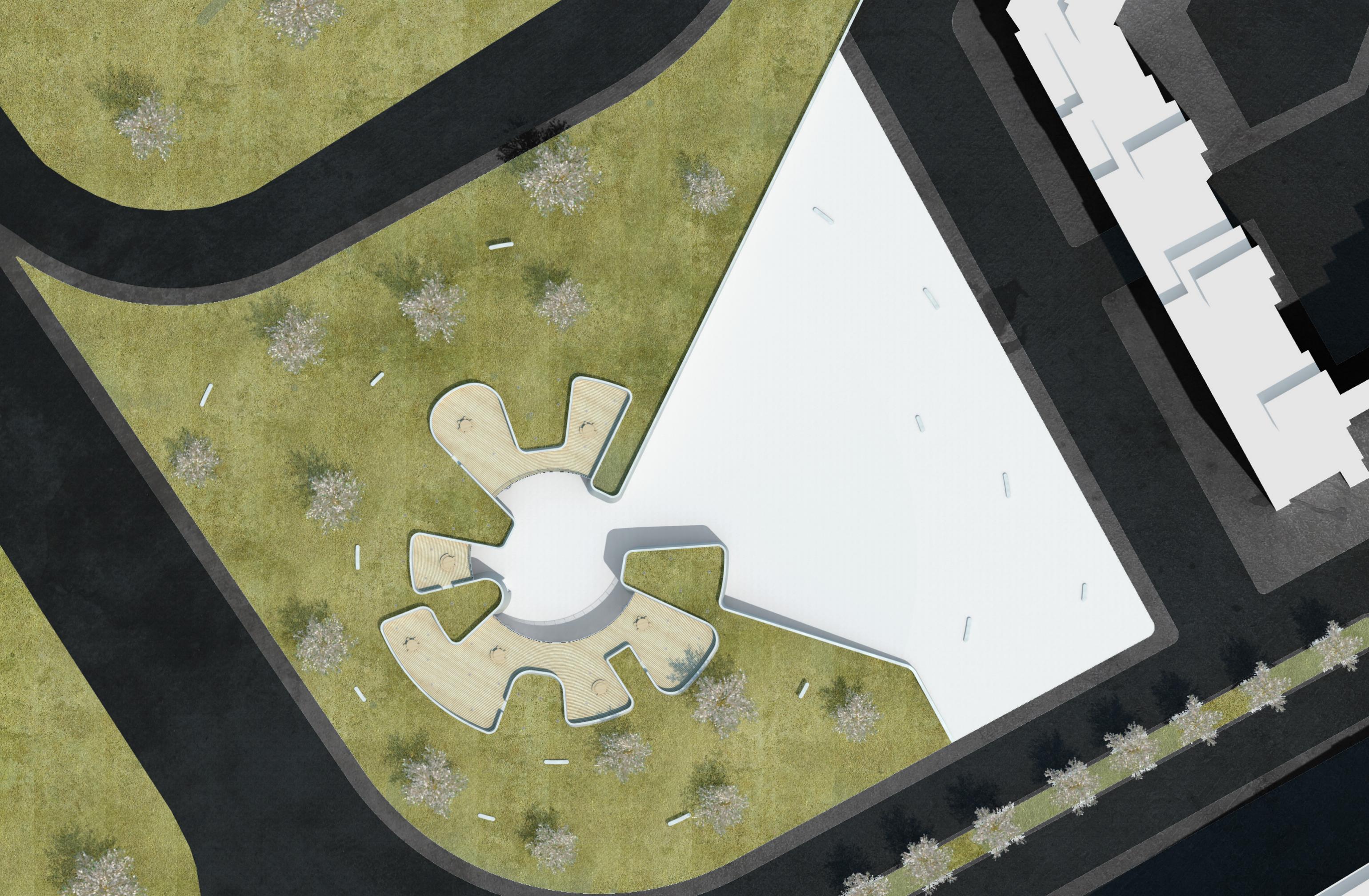
Destinazione d'uso	Superficie [m <sup>2</sup> ]
1 Ingresso	65
2 Ufficio + accoglienza	50
3 Locale tecnico	20
4 Servizi igienici	50
<b>Area ragazzi</b>	
5 Biblioteca	135
6 Emeroteca	55
7 Sala co-working	100
8 Zona computer + relax	30
9 Sala video	75
10 Aula didattica 1	80
11 FabLab	40
<b>Area bambini</b>	
12 Zona racconto	127
13 Sala gioco	
14 Zona creativa + computer	130
15 Aula polifunzionale	65
16 Aula didattica 2	100

# TAVOLA 29

## MASTERPLAN

Scala 1:1000

\* Per integrarsi meglio nel lotto, è stato scelto di interrare il padiglione. Questo ha consentito di mantenere il verde presente nell'area e, una volta riprogettato, poterlo utilizzare come parco pubblico. Questo non è però slegato dall'edificio in quanto la copertura di quest'ultimo, praticabile e dotata di tavoli per lo svago e lo studio, si integra perfettamente con esso. Si è inoltre deciso di apportare una lieve modifica al sistema viario limitrofo rimuovendo due isole verdi poste davanti l'ingresso dello ZEN1, in modo da ampliare la piazza e garantire una circolazione veicolare più idonea.



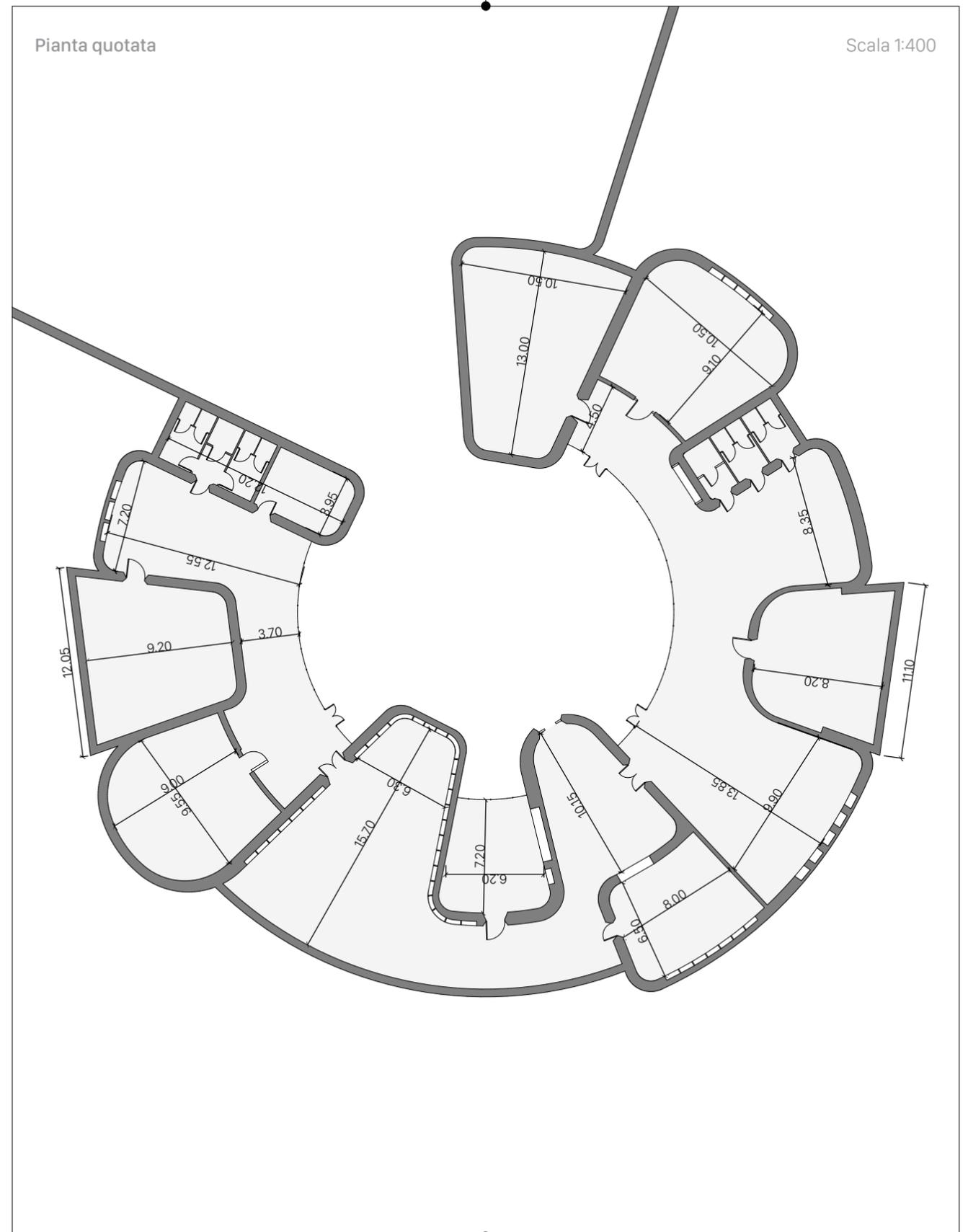
# TAVOLA 30

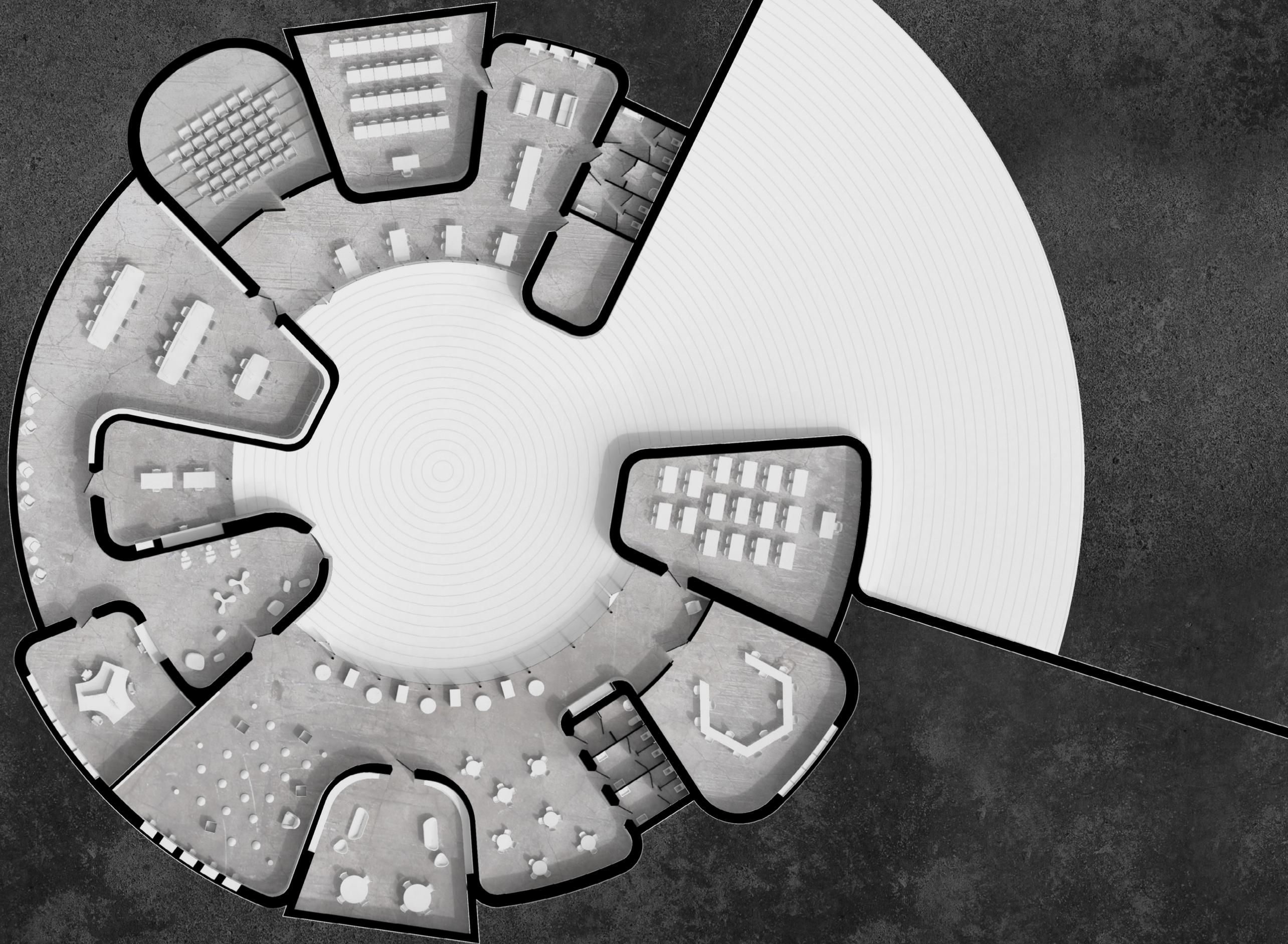
## PIANTA

Scala 1:200

\* L'ingresso del padiglione è stato configurato come luogo di informazione e d'attesa. Una postazione di reference all'interno dell'office è posta in collegamento con questo attraverso una finestra, ottimizzando così gli spazi ma anche la necessità di personale. L'ambiente presenta inoltre postazioni internet per la consultazione veloce dell'archivio bibliotecario.

\* L'utilizzo della stampa 3D ha permesso di realizzare un setto murario che presentasse una serie di cavità nelle quali poter inserire direttamente componenti di arredo: gli scaffali per i libri della biblioteca o per i fascicoli dell'office, piani per postazioni computer e televisori ed elementi di seduta.

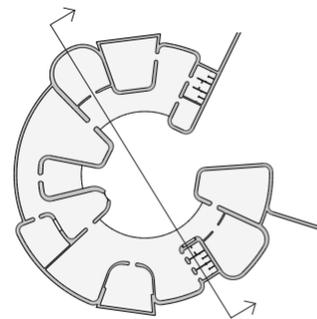




# TAVOLA 31

## SEZIONE LONGITUDINALE

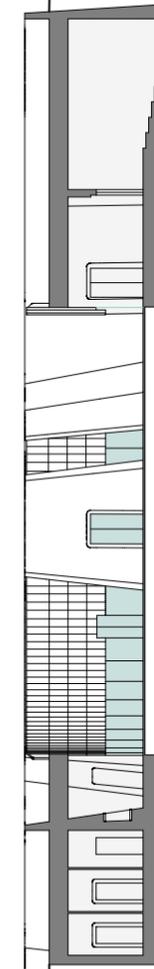
Scala 1:200



Sezione quotata

Scala 1:400

+3.90  
+2.60  
-2.40  
-3.15



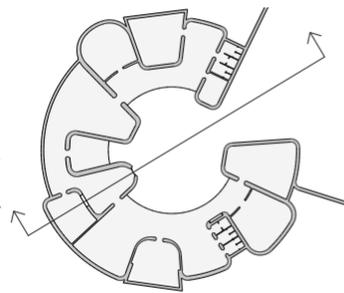
\* Le grandi vetrate della piazza centrale vengono schermate mediante un sistema di frangisole in listelli lignei posizionati verticalmente. Questi hanno sezione di 1,5x5 cm, altezza pari a 4 m e sono agganciati con 3 traversi alla facciata esterna e con 1 al parapetto della copertura, fungendo così anche da ringhiera. Essendo i listelli in legno, è stato anche previsto l'utilizzo di una protezione metallica sulla testata superiore di questi, dove cioè sono visibili le fibre, in modo da evitarne il degrado dovuto all'acqua.



# TAVOLA 32

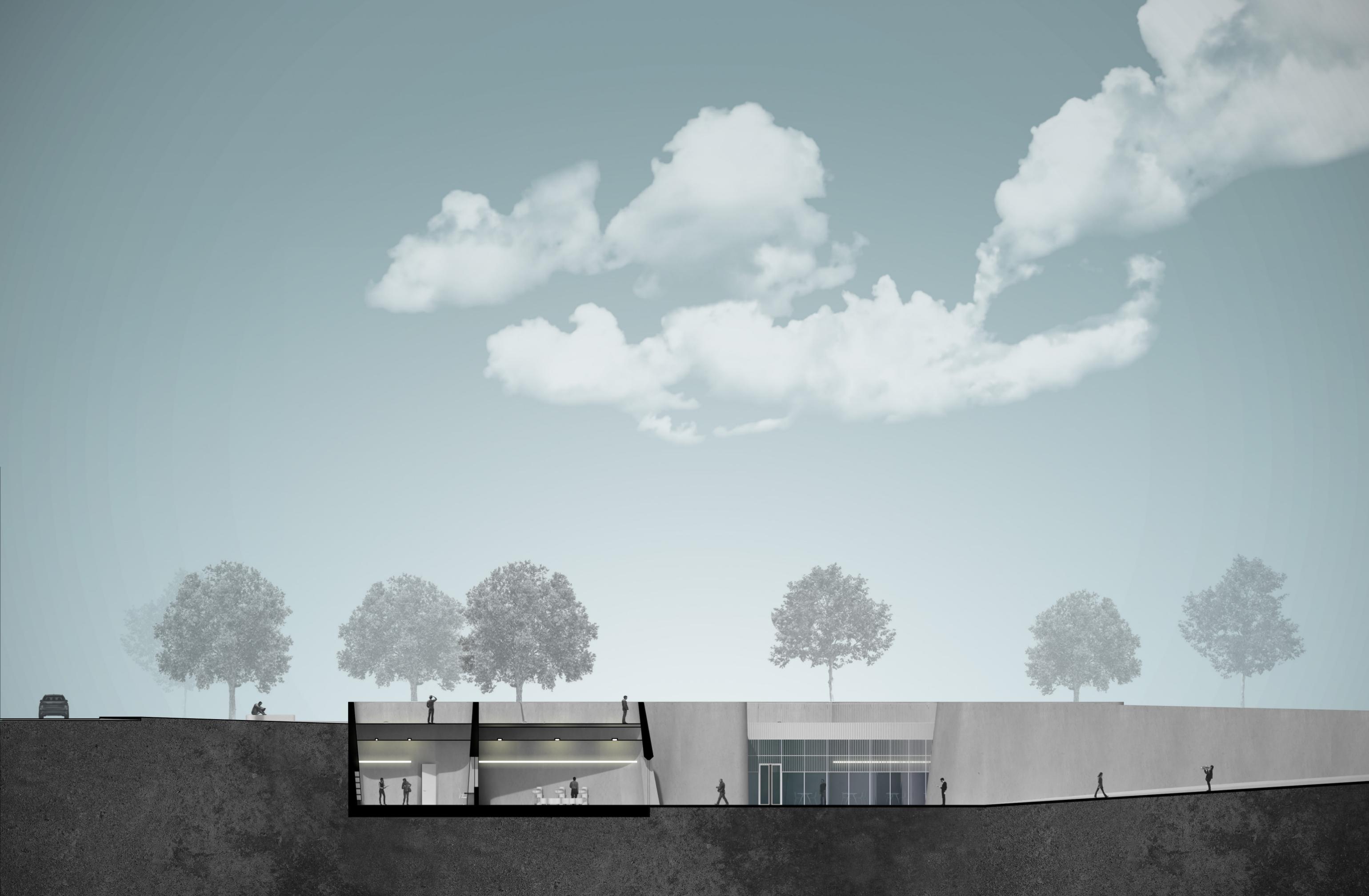
## SEZIONE TRASVERSALE

Scala 1:200



\* La piazza parte dalla quota di via Ludovico Bianchini, posta di fronte l'ingresso dello ZEN1 (assunta a  $\pm 0,00$  metri) e si abbassa fino a raggiungere lo spiazzo centrale posto a quota  $-2,40$  metri, dove si trova l'ingresso del padiglione. Dalla parte opposta, il lotto è delimitato da via Lanza di Scalea che si trova a quota  $+3,00$  rispetto allo 0 preso in considerazione. Il padiglione si inserisce quindi all'interno di un lotto in pendenza e ne sfrutta il dislivello per mantenere la continuità fra le due vie, non sporgendo oltre la quote di via Lanza di Scalea.

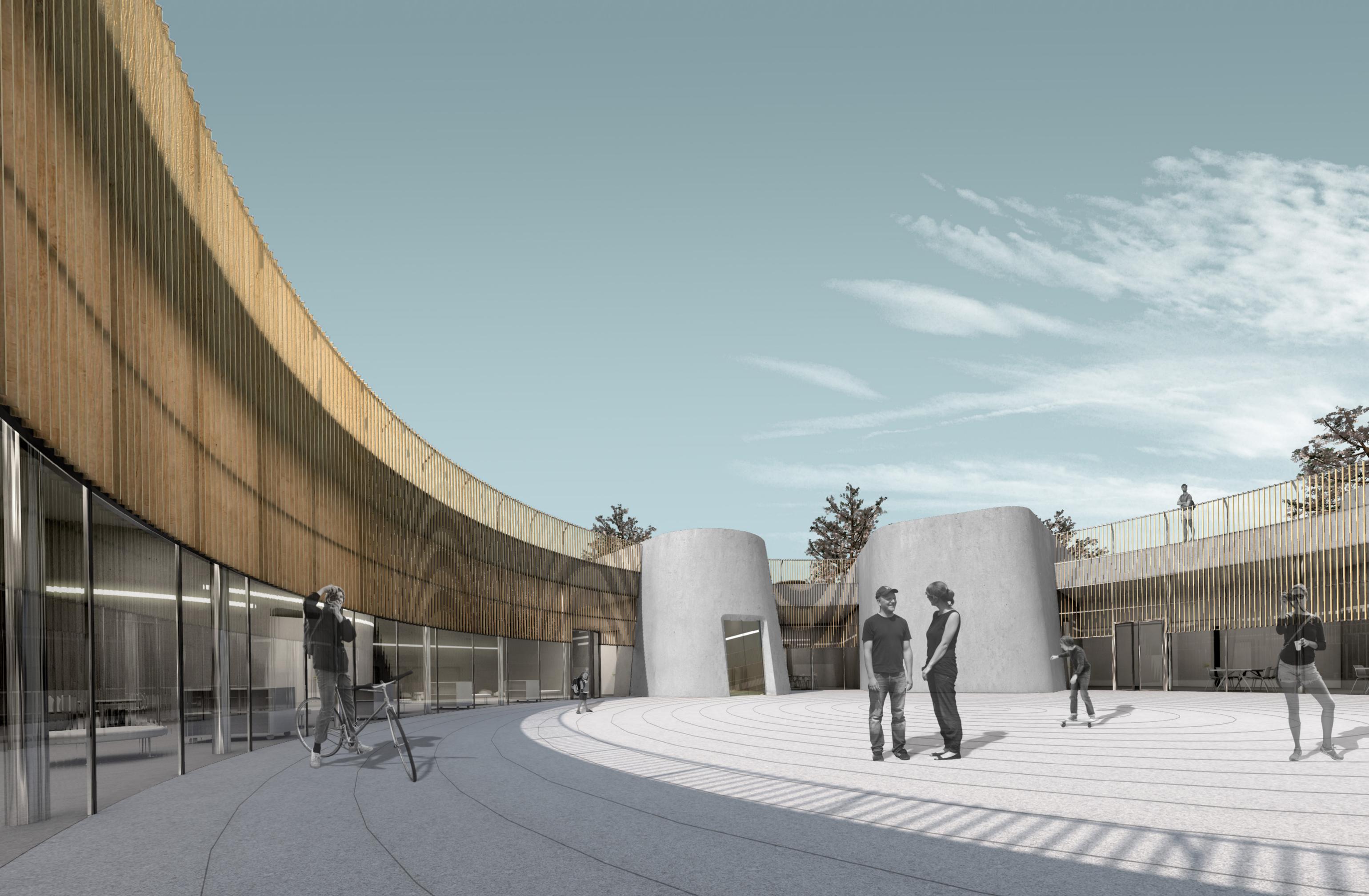
\* Benché il progetto presenti, in corrispondenza della piazza centrale, ampie facciate vetrate, la profondità di alcuni ambienti non consentiva un adeguato afflusso della luce naturale. Oltre al sistema di illuminazione artificiale si è quindi pensato di integrare dei lucernari ma dato lo spessore considerevole della copertura si è poi optato per dei tunnel solari, tipo Velux. Questi, all'intradosso si confondono con le luci artificiali (di forma circolare) perché caratterizzati dallo stesso diametro, mentre in copertura presentano cupolini in acrilico trasparente protetti da ghiera metallica contro il vandalismo.



## IMMAGINE **ESTERNA 1**



## IMMAGINE **ESTERNA 2**



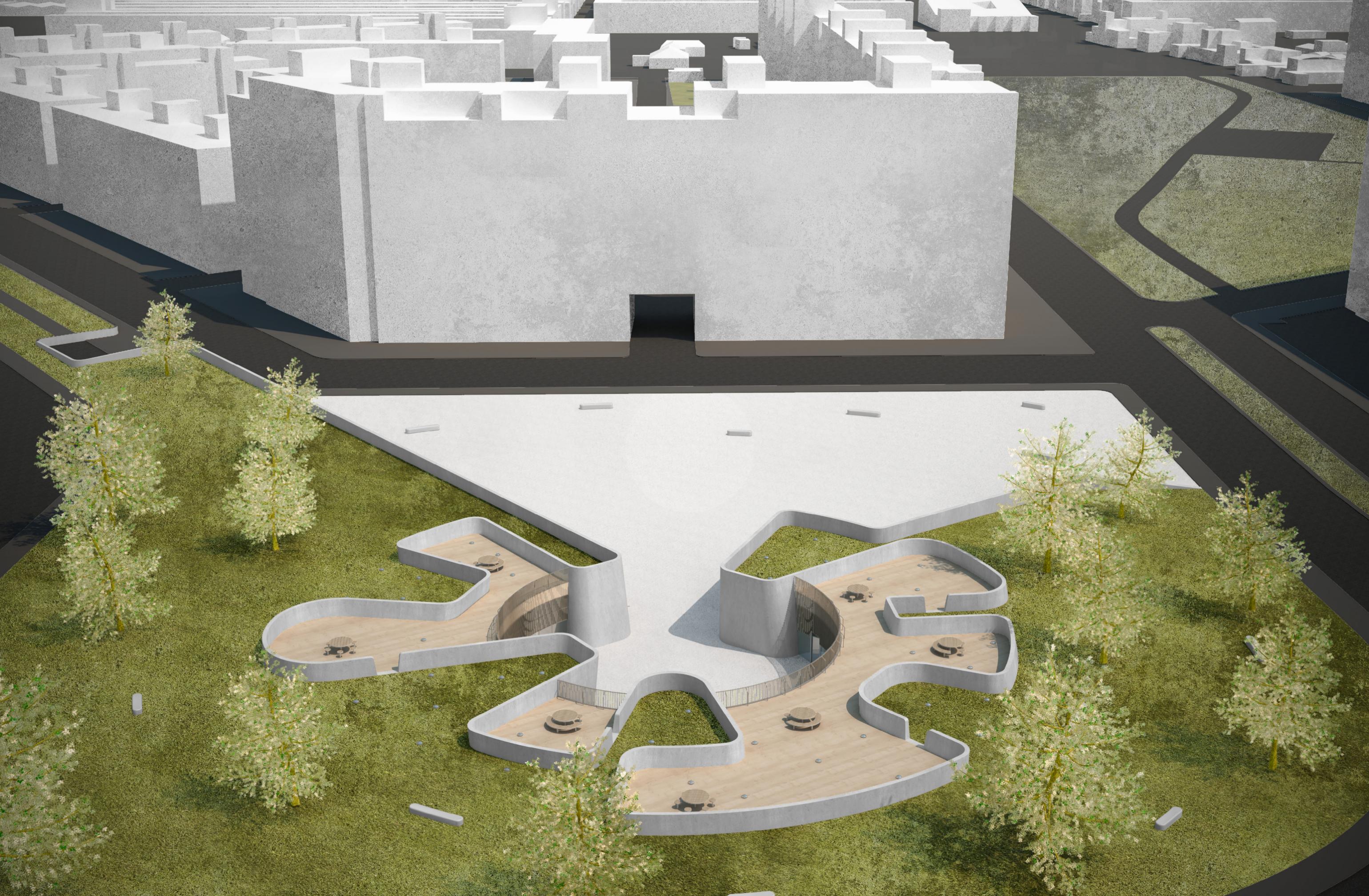
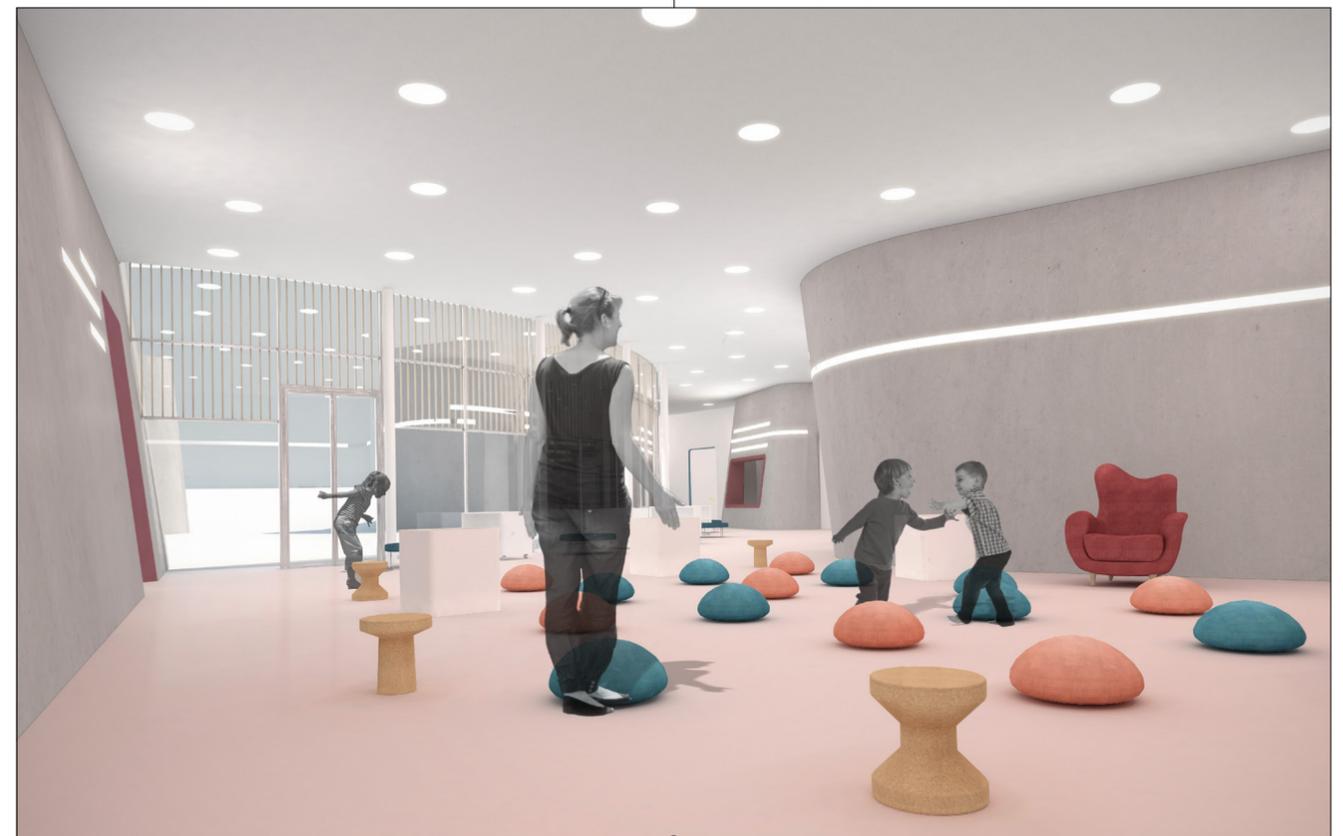
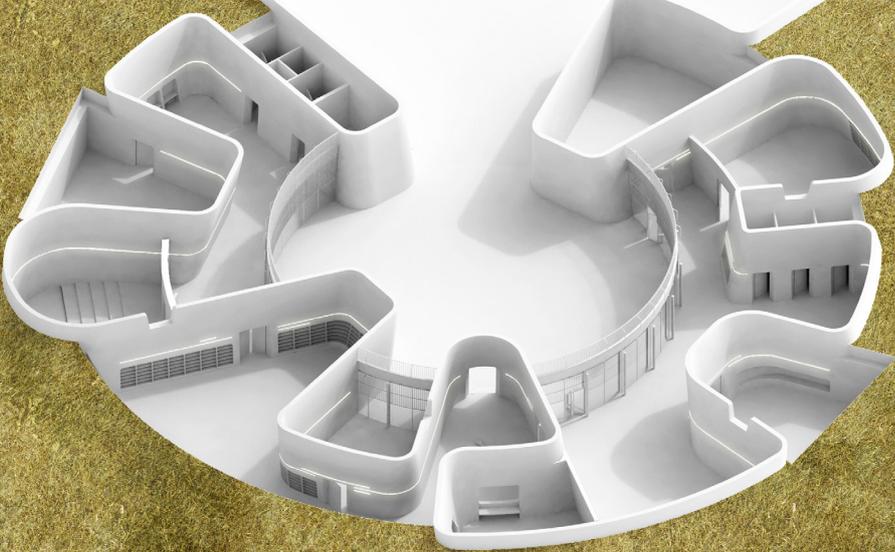
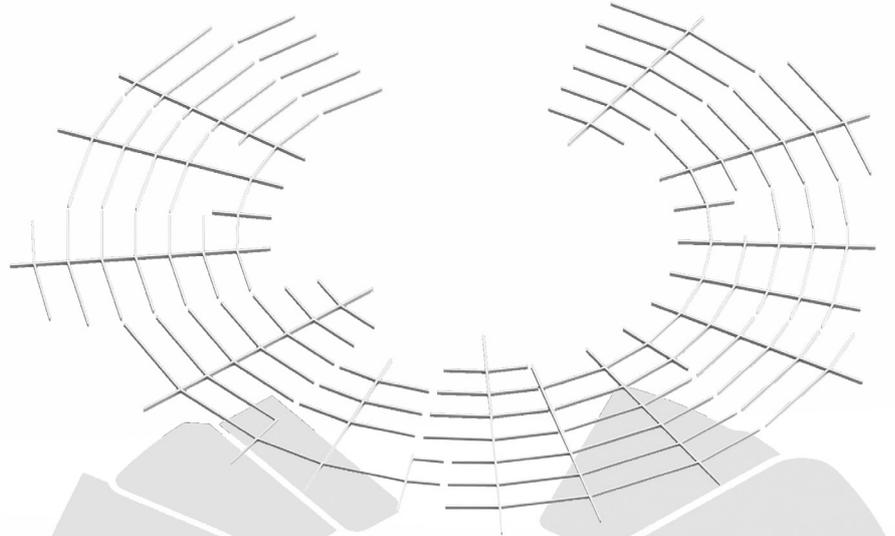
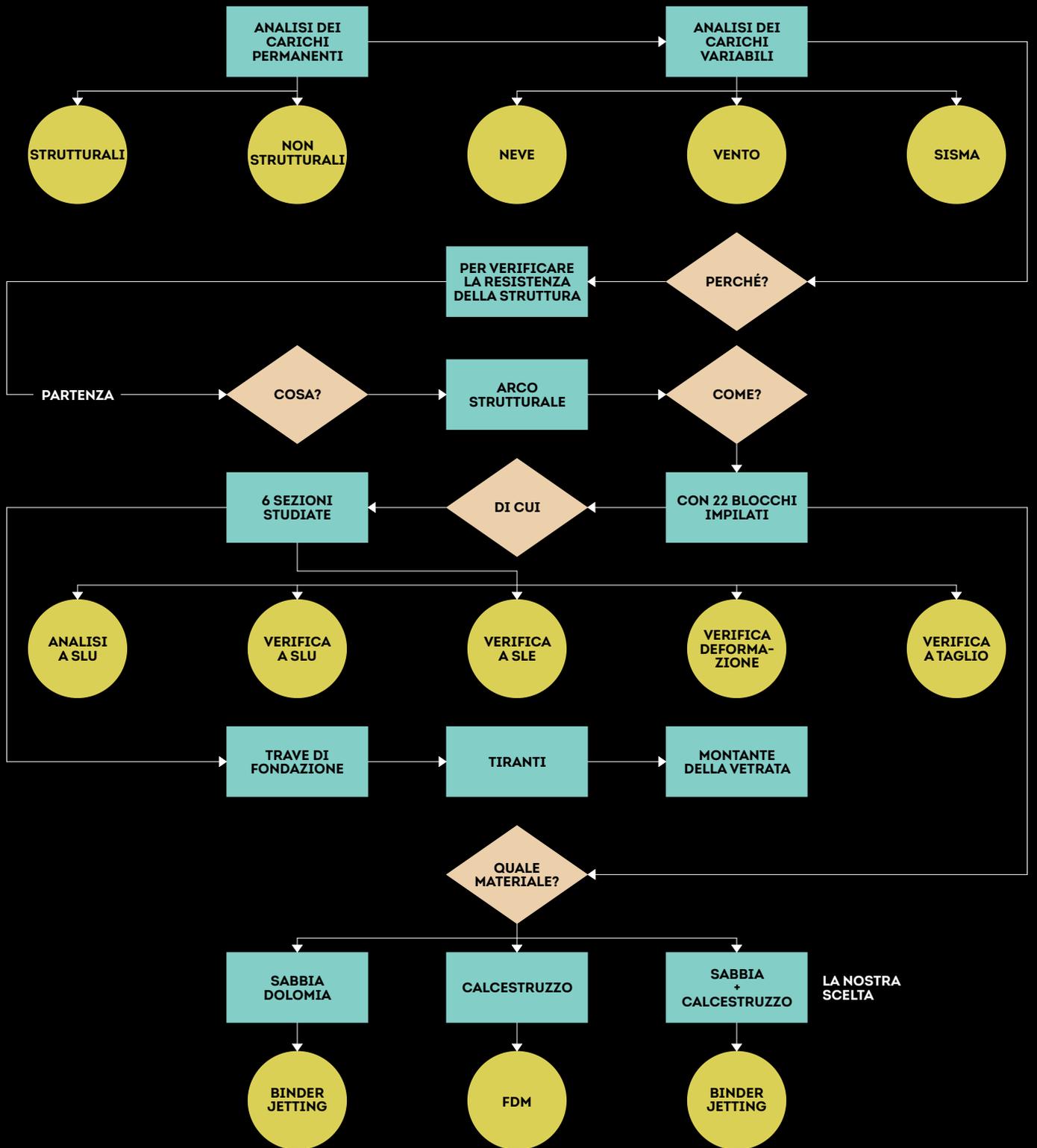


IMMAGINE ESTERNA 3

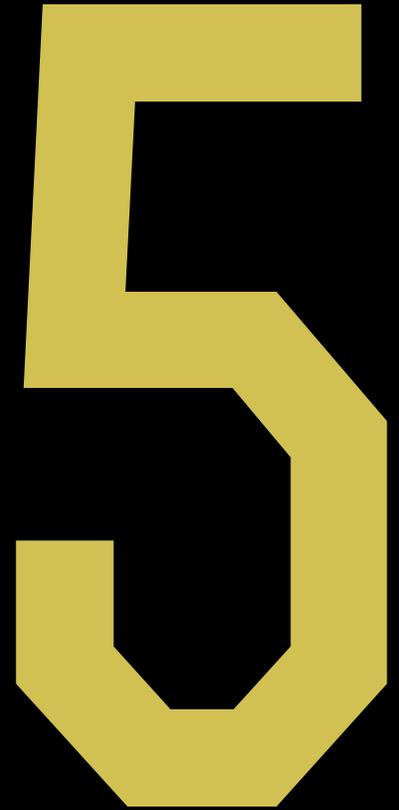






---

**FORMA & STRUTTURA**



---

*Prendete in mano la vostra vita e fatene un capolavoro.*  
— Papa Giovanni Paolo II

---

”

L'approfondimento strutturale ha interessato il primo dei tre progetti del capitolo 4, cioè ANT1\_Cala. L'approccio adottato discosta dal tradizionale iter che porta dall'ideazione del concept architettonico al dimensionamento strutturale del progetto. In questo caso infatti, avendo utilizzato una tecnologia per molti aspetti ancora nuova, la stampa 3D, un simile modo di lavorare risultava inadeguato. Si è scelto quindi di far procedere contemporaneamente e sinergicamente entrambi gli ambiti, arrivando ad una sintesi formale e tecnologica credibile ed omogenea, poiché inscindibile nei suoi aspetti chiave.

genea, poiché inscindibile nei suoi aspetti chiave.

#### Documenti utilizzati

- Norme tecniche per le costruzioni (NTC) approvate con il decreto del 14 gennaio 2008;
- Circolare n.617 del 2 febbraio 2009 (per i calcoli di verifica delle strutture in calcestruzzo);
- Eurocodice 2 valido a livello europeo, relativo alle strutture in calcestruzzo non armato, armato e precompresso.

## ANALISI DEI CARICHI PERMANENTI

La definizione dei carichi nominali e/o caratteristici è stato il primo passo. Le azioni permanenti, legate alla forza gravitazionale, sono determinate a partire dalle dimensioni geometriche e dai pesi dell'unità di volume dei materiali di cui è composta la costruzione, sia nelle parti strutturali, sia in quelle non strutturali.

**10 archi autoportanti** costituiscono la struttura di ANT1; questi sono di altezze e luci variabili e sono composti da tanti elementi curvi in calcestruzzo armato, ideati in modo da poter essere prefabbricati attraverso l'utilizzo di una stampante 3D. A tal fine si è ipotizzata la forma di una sezione che soddisfasse le esigenze di resistenza, impiantistiche ed estetiche ed è stato calcolato il peso proprio della struttura secondo le NTC (3.1.3.1), considerando i carichi tramite i pesi riportati nella Tabella 3.1.I o confrontando la coerenza dei valori nominali forniti dalle schede tecniche dei materiali con i valori di densità dati dalla normativa UNI EN ISO 10351. Questi carichi vengono quindi definiti come:

- $G_1$  carichi permanenti strutturali;
- $G_2$  carichi permanenti non strutturali e non removibili.

### CARICHI PERMANENTI STRUTTURALI

Per la determinazione dei pesi propri strutturali dei principali materiali da costruzione, possono essere assunti i valori dei pesi dell'unità di volume riportanti nella Tabella 3.1.I delle NTC.

Materiale	Peso unità di volume [N/m <sup>3</sup> ]
Calcestruzzo armato (e/o precompresso)	25,00

I calcoli sono stati effettuati ipotizzando un calcestruzzo ordinario (NSC-Normal Streinght Concrete) di Classe C25/30, caratterizzato dalle seguenti proprietà meccaniche:

- $f_{ck}$ : 25 MPa resistenza caratteristica a compressione;
- $R_{ck}$ : 30 MPa resistenza cubica a compressione.

Prendendo in esame l'arco maggiormente sollecitato fra i 10, si è calcolato il peso proprio moltiplicando la superficie di calcestruzzo armato per il suo peso per unità di volume.

Oggetto	Arco strutturale
Superficie materiale [m <sup>2</sup> ]	0,31
Densità [kN/m <sup>3</sup> ]	25,00
Lunghezza [m]	29,32
$G_0$ [kN]	227,23
$G_0$ [kN/m]	7,75

### CARICHI PERMANENTI NON STRUTTURALI E NON REMOVIBILI

Il secondo tipo di azioni agenti sono i carichi non strutturali, cioè i pesi non removibili durante il normale esercizio

della costruzione. Essi sono quelli relativi a tamponature esterne, divisori interni, massetti, isolamenti, pavimenti e rivestimenti del piano di calpestio, intonaci, controsoffitti, impianti e altro. Nel caso in esame, essendo un edificio ad un unico piano fuori terra, si considerano come tali esclusivamente i tamponamenti esterni (che fungono contemporaneamente da copertura), gli impianti e le parti vetrate.

	Materiale			
	Cls	Lana di vetro	Lana di roccia	
Superficie [m <sup>2</sup> ]	0,15	0,58	0,35	
Densità [kN/m <sup>3</sup> ]	25,00	0,30	1,00	
Lunghezza [m]	29,32	29,32	29,32	
G <sub>1</sub> [kN]	110,00	5,14	7,03	
G <sub>2</sub> [kN/m]	3,75	0,18	0,24	Tot: 4,17

# ANALISI DEI CARICHI VARIABILI

I carichi variabili sono quelli che variano nel tempo e/o nello spazio e comprendono i carichi legati alla destinazione d'uso dell'opera. Essendo il caso di uno spazio destinato ad ospitare aree suscettibili ad affollamento, con sale convegni, laboratori manifatturieri, uffici e magazzini ubicati in un unico piano fuori terra e aventi una copertura non praticabile ma accessibile a sola manutenzione, si è fatto riferimento ai valori riportati nella Tabella 3.1.II delle NTC.

Cat.	Ambienti	q <sub>k</sub> [kN/m <sup>2</sup> ]	Q <sub>k</sub> [kN]	H <sub>k</sub> [kN/m]
H1	Coperture e sottotetti accessibili per sola manutenzione	0,50	1,20	1,00

## AZIONE DELLA NEVE

La copertura deve sopportare il carico da neve che viene valutato secondo l'espressione:

$$q_s = \mu_i \cdot q_{sk} \cdot C_E \cdot C_t$$

dove

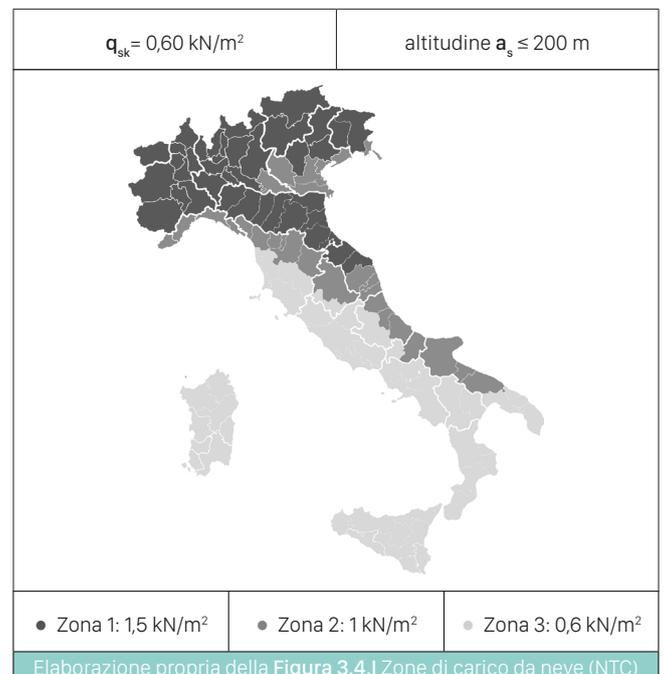
$\mu_i$  coefficiente di forma della copertura;

$q_{sk}$  valore caratteristico di riferimento del carico da neve al suolo, fornito al successivo per un periodo di ritorno di 50 anni;

$C_E$  coefficiente di esposizione;

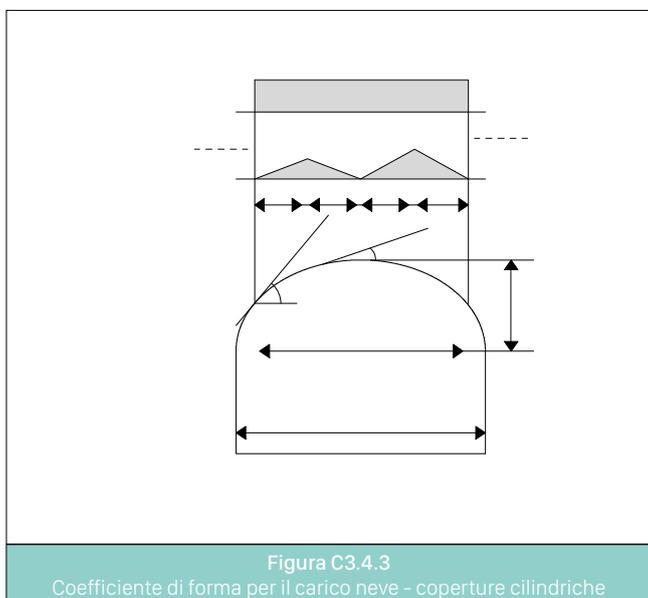
$C_t$  coefficiente termico.

Si ipotizza che il carico agisca in direzione verticale e lo si riferisce alla proiezione orizzontale della superficie della copertura. Il carico da neve al suolo, dipende dalle condizioni locali di clima e di esposizione, considerata la variabilità delle precipitazioni nevose da zona a zona. La normativa prevede la suddivisione del territorio italiano in 4 zone: tra queste, Palermo ricade nella Zona III.



Il coefficiente di forma  $\mu_1$  si definisce in base alla tipologia di copertura: a una, a due o a più falde o al variare dell'angolo  $\alpha$  di inclinazione della falda sull'orizzontale, espresso in gradi sessagesimali. In questo caso, avendo una copertura assimilabile ad una forma cilindrica, si assume che la neve non sia impedita di scivolare. In base alla Circolare n.617 del 2 febbraio 2009, si deve considerare:

- La condizione Caso (i), per il caso di carico da neve depositata in assenza di vento;
- La condizione Caso (ii), per il caso di carico da neve depositata in presenza di vento.



I valori dei **coefficienti di forma** sono dati dalle seguenti espressioni:

$$\begin{aligned}\mu_1 &= 0,80 \\ \mu_2 &= 0,50 \cdot \mu_3 \\ \mu_3 &= 0,20 + 10(h/b)\end{aligned}$$

quindi:

$$\begin{aligned}\mu_1 &= \mathbf{0,80} \\ \mu_2 &= 0,50 \cdot 1,96 = \mathbf{0,98} \\ \mu_3 &= 0,20 + 10(2,5/14,15) = \mathbf{1,96}\end{aligned}$$

con

$h = 2,5$  m per  $\alpha = 40^\circ$

Il **coefficiente di esposizione**  $C_E$  può essere utilizzato per modificare il valore del carico da neve in copertura, in funzione delle caratteristiche specifiche dell'area in cui sorge l'opera. Dato che nell'area di progetto non è presente una significativa rimozione di neve sulla costruzione prodotta dal vento, a causa del terreno, altre costruzioni o alberi, si è assunto  $C_E$  pari a 1, come da Tabella 3.4.I delle NTC.

Il **coefficiente termico**  $C_t$  può essere utilizzato per tener conto della riduzione del carico da neve a causa dello

scioglimento della stessa, dovuto alla perdita di calore della costruzione. Tale coefficiente tiene conto delle proprietà di isolamento termico del materiale utilizzato in copertura. In assenza di uno specifico e documentato studio esso viene utilizzato pari a 1. Il carico provocato dalla neve sulla copertura vale quindi:

- $q_{s1} = 0,80 \cdot 0,6 \cdot 1 \cdot 1 = 0,48$  kN/m<sup>2</sup>
- $q_{s2} = 0,98 \cdot 0,6 \cdot 1 \cdot 1 = 0,59$  kN/m<sup>2</sup>
- $q_{s3} = 1,96 \cdot 0,6 \cdot 1 \cdot 1 = 1,18$  kN/m<sup>2</sup>

## AZIONE DEL VENTO

La determinazione dell'azione del vento agente sull'edificio è stata effettuata seguendo le procedure di calcolo fornite dalle NTC 2008 a partire dall'ubicazione del sito di progetto.

Localizzazione	Lat.	Long.	Altezza s.l.m.	Zona climatica
Palermo, via Cala	38,119128 deg	13,366659 deg	14 m	B

Dati climatici di riferimento

Velocità media annuale del vento [m/s]	Direzione prevalente	Valore medio annuale delle precipitazioni [mm]
3,6	Sud-Ovest	550

La velocità di riverimento  $v_b$  è il valore caratteristico della velocità del vento a 10 m dal suolo, su un terreno di categoria di esposizione II, mediata su 10 minuti e riferita a un periodo di ritorno di 50 anni. Tale velocità è data dalla formula seguente:

$$v_b = v_{b,0} \quad \text{per } a_s \leq a_0$$

$$v_b = v_{b,0} + k_a \cdot (a_s - a_0) \quad \text{per } a_0 < a_s \leq 1500\text{m}$$

dove

$v_{b,0}$ ,  $a_0$ ,  $k_a$  sono parametri forniti dalla Tabella 3.3.I delle NTC 2008 e sono legati alla regione in cui sorge la costruzione in funzione delle zone che la normativa definisce;  $a_s$  è l'altitudine sul livello del mare (in metri) del sito di progetto. Nel caso in esame valgono i seguenti valori.

Zona	Descrizione	$v_{b,0}$ [m/s]	$a_0$ [m]	$k_a$ [l/s]
4	Sicilia e provincia di Reggio Calabria	28	500	0,02

Siccome Palermo ha un'altitudine sul livello del mare pari a 14 m, si è assunto  $v_b = v_{b,0} = 28 \text{ m/s}$ .  
La pressione del vento è data dalla seguente espressione:

$$p = q_b \cdot c_e \cdot c_p \cdot c_d$$

dove

$q_b$  pressione cinetica di riferimento;

$c_e$  coefficiente di esposizione;

$c_p$  coefficiente di forma (o coeff. aerodinamico), funzione della tipologia e della geometria della costruzione e del suo orientamento rispetto alla direzione del vento;

$c_d$  coefficiente dinamico con cui si tiene conto degli effetti riduttivi associati alla contemporaneità delle massime pressioni locali e degli effetti amplificativi, dovuti alle vibrazioni strutturali.

La pressione cinetica di riferimento  $q_b$  è data dalla seguente espressione:

$$q_b = 1/2 \cdot \rho \cdot v_b^2$$

dove

$v_b = 28 \text{ m/s}$  velocità precedentemente calcolata;

$\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$  densità dell'aria assunta convenzionalmente costante. Quindi  $q_b = 490 \text{ N/m}^2$ .

Il coefficiente di esposizione  $c_e$  dipende dall'altezza  $z$  dal suolo del punto considerato, dalla topografia del terreno e dalla categoria di esposizione del sito di progetto. Tali parametri si determinano facendo riferimento alle Tabelle delle NTC 2008 di cui si riporta in seguito solo l'estratto di interesse.

Tabella 3.3.III	
Classe di rugosità del terreno	Descrizione
B	Aree urbane (non di classe A), suburbane, industriali e boschive



Tabella 3.3.II Parametri per la definizione del coefficiente di esposizione			
Categorie di esposizione del sito	$k_r$	$z_B$ [m]	$z_{min}$ [m]
III	0,20	0,10	5,00

Quindi, dopo aver determinato a categoria del sito di progetto e i relativi i coefficienti, si è calcolato il coefficiente di esposizione tramite le formule seguenti, poichè la quota considerata ha un'altezza dal suolo non maggiore di  $z = 200 \text{ m}$ . La prima formula è stata utilizzata per la valutazione della pressione del vento sulla facciata per altezze  $z < z_{min}$  (ovvero per la porzione di edificio con un'altezza inferiore o uguale a 4 m) e la seconda per altezze  $z > z_{min}$ .

$$c_e(z) = c_e(z_{min}) \cdot k_r^2 \cdot c_t \cdot \ln(z/z_0) \cdot [7 + c_t \cdot \ln(z/z_0)]$$

dove

$k_r$ ,  $z_0$ ,  $z_{min}$  sono parametri assegnati dalla tabella precedente in funzione della categoria di esposizione del sito di progetto;

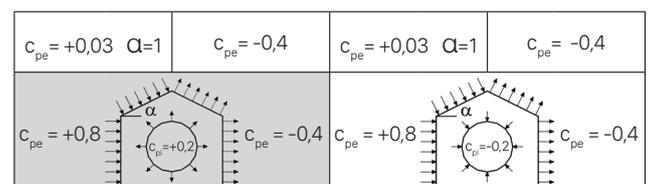
$c_t$  è il coefficiente di topografia che è posto generalmente pari a 1, sia per le zone pianeggianti, sia per quelle ondulate, collinose e montane.

L'edificio oggetto di studio ha un'altezza massima di 10 metri e una minima di 7 m. La facciata principale è larga circa 22 metri. Il coefficiente di esposizione risulta costante da 0 a 5 metri di altezza, mentre per altezze maggiori esso aumenta in conformità con quanto definito dalla normativa. Avendo preso in esame l'arco strutturale di altezza pari a 9,7 m, il coefficiente  $c_e = 2,10$ .

Il coefficiente dinamico  $c_d$  può essere assunto cautelativamente pari a 1 nelle costruzioni di tipologia ricorrente, quali gli edifici di forma regolare non eccedenti gli 80 m di altezza ed i capannoni industriali.

Il coefficiente di forma  $c_p$  è un particolare coefficiente funzione della direzione del vento e della morfologia della copertura e può essere determinato da prove in galleria del vento. In assenza di valutazioni più precise, suffragate da opportuna documentazione o prove sperimentali, per tale coefficiente si assumono i valori riportati nella Circolare 617 del 2 febbraio 2009.

Per la valutazione della pressione esterna, essendo l'edificio caratterizzato da una superficie curva direttamente investita dal vento, con inclinazione sull'orizzontale  $\alpha \geq 60^\circ$ , si assumerà un valore di  $c_{pe} = +0,8$ , mentre per la facciata sottovento un valore  $c_{pe} = -0,4$ .



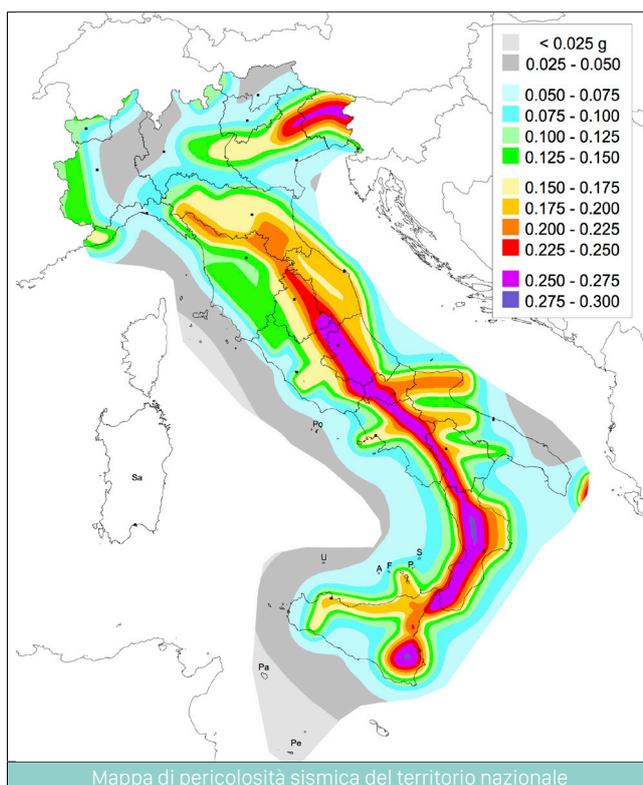
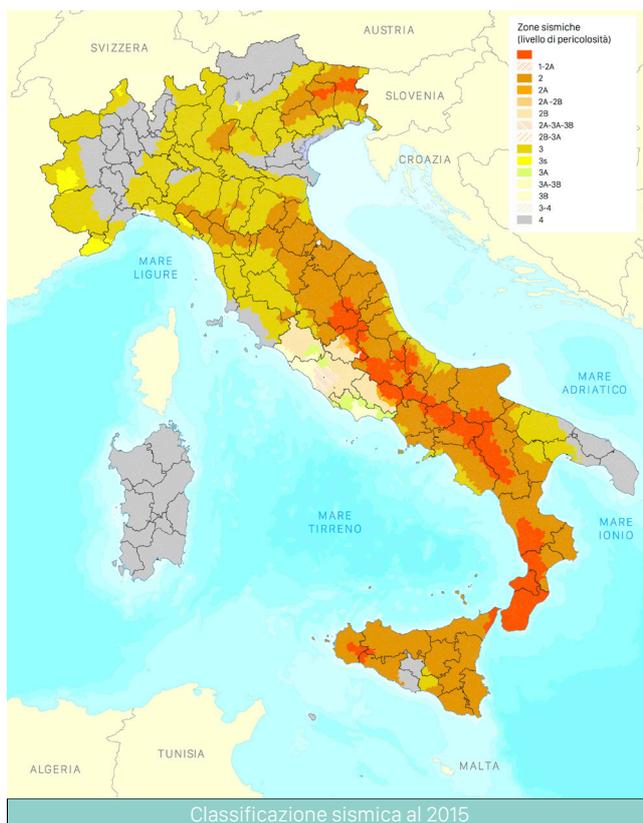
In definitiva si riportano i valori della pressione del vento calcolati rispettivamente per la facciata sopravvento e per quella sottovento.

Z [m]	$c_p$	$c_e$	P [kN/m]
9,7	+0,8	2,1	8
9,7	-0,4	2,1	-4

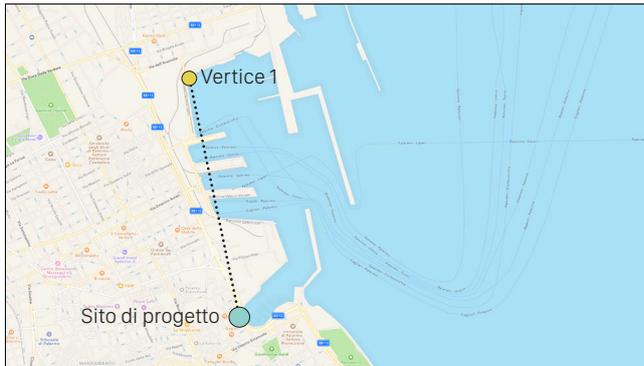
### AZIONE DEL SISMA

La nuova normativa sismica, cioè il PC.M. n. 3274 del 20 marzo 2003, aggiornata al 16 gennaio 2006 con le indicazioni delle regioni, suddivide il territorio nazionale in 4 zone sismiche in base al valore del parametro  $a_g$  definito come accelerazione orizzontale massima su suolo di categoria A (formazioni litoidi o suoli omogenei molto rigidi) ed è espresso come frazione dell'accelerazione di gravità  $g$ . Inoltre il territorio nazionale è stato suddiviso mediante una maglia di punti notevoli, al pazzo di 10 km, per ognuno dei quali sono noti i parametri necessari alla costruzione degli spettri di risposta per i diversi stati limite di riferimento. Questa suddivisione, sviluppata su scala nazionale, costituisce una macrozonizzazione sismica del territorio, che non tiene conto degli effetti locali legati alle caratteristiche geologico-strutturali litologiche, geomorfologiche e idrogeologiche del territorio comunale.

L'azione sismica sulle costruzioni è valutata a partire da una "pericolosità sismica di base" in condizioni ideali di sito di riferimento che deve essere rigido con superficie topografica orizzontale.



Il sito di progetto si trova ad Est di Palermo, in via Cala. Dalla cartina sismica si evince che la zona di riferimento è a medio rischio sismico e presenta un valore di picco di accelerazione al suolo compreso tra 0,175 e 0,200 [m/s<sup>2</sup>].



L'immagine indica la posizione dell'area di progetto in riferimento al più vicino vertice del reticolo sismico, identificato sul suolo siciliano e in particolare:

Vertice 1 (ID = 47175)  $d_1 = 2\text{ km}$

$d_1$  distanza dal vertice 1

Le tabelle dell'allegato B della Normativa Tecnica restituiscono, in funzione della latitudine e longitudine del sito e del tempo di ritorno considerato ( $T_R = 101$  anni), i valori  $\mathbf{p}(a_g; F_o; T_c^*)$  di ogni vertice del reticolo.

Dato che l'area di progetto non corrisponde a uno dei poli della griglia sismica, ma a una latitudine di 38,119128 deg e longitudine 13,366659 deg, si è provveduto alla determinazione dei valori  $\mathbf{p}$  secondo l'allegato A delle NTC. In questo caso, avendo trovato un solo vertice del reticolo, si sono considerati i dati relativi ad esso:

ID Vertice	d [km]	$a_g$	$F_o$	$T_c^*$ [s]
47175	2	0,872	2,32	0,27

$a_g$  accelerazione orizzontale massima del terreno, espressa in  $g/10$ ;

$F_o$  valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale adimensionale;

$T_c^*$  periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale, espresso in secondi.

#### DETERMINAZIONE DELLA CLASSE D'USO

Verificando sulle NTC, al capitolo 2.4.2, si è riscontrato che l'edificio in esame ricade in Classe IV, che definisce le costruzioni con funzioni pubbliche o strategiche importanti, anche con riferimento alla gestione della protezione civile in caso di calamità.

#### DETERMINAZIONE DELLA VITA NOMINALE

La vita nominale di un'opera strutturale  $V_N$  è intesa come il numero di anni nel quale la struttura, purché soggetta alla manutenzione ordinaria, deve poter essere usata per lo scopo al quale è stata destinata. In particolare si considera per l'edificio una vita nominale maggiore o uguale a 50 anni.

#### DETERMINAZIONE DEL PERIODO DI RIFERIMENTO PER L'AZIONE SISMICA

Le azioni sismiche su ciascuna costruzione vengono calcolate in relazione ad un periodo di riferimento  $V_R$  che si ricava moltiplicando la vita nominale della costruzione per il coefficiente d'uso:

$$V_R = V_N \cdot C_U$$

Il valore del coefficiente d'uso  $C_U$  è definito al variare della classe d'uso.

Classe d'uso	I	II	III	IV
Coeff. $C_U$	0,7	1,0	1,5	2,0

$$V_R = 50 \cdot 2 = 100 \text{ anni}$$

#### PROBABILITÀ DI SUPERAMENTO NEL PERIODO DI RIFERIMENTO

Il rispetto dei vari stati limite si considera conseguito:

- Nei confronti di tutti gli stati limite di esercizio, qualora siano rispettate le verifiche relative al solo SLD;
- Nei confronti di tutti gli stati limite ultimi, qualora siano rispettate le indicazioni progettuali e costruttive necessarie e siano soddisfatte le verifiche relative al solo SLV.

Fanno eccezione a quanto detto le costruzioni di Classe d'uso III e IV, infatti per gli elementi non strutturali e gli impianti è richiesto anche il rispetto delle verifiche di sicurezza relative allo SLO.

Stati limite		$P_{v_k}$ : probabilità di superamento nel periodo di riferimento $V_k$
Stati limite ultimi	SLV	10%

## CATEGORIE DI SOTTOSUOLO E CONDIZIONI TOPOGRAFICHE

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto è necessario valutare l'effetto della risposta sismica locale mediante specifiche analisi. In assenza di tali analisi, per la definizione dell'azione sismica, si può fare riferimento ad un approccio semplificato, che si basa sull'individuazione di categorie di sottosuolo di riferimento (Tab. 3.2.II da NTC). Nel caso di studio è stata individuata da tabella la categoria C di sottosuolo, facendo riferimento a un documento dell'Autorità Portuale del Comune di Palermo, che riporta come valore  $V_{s_{30}} = 335$  m/s.

Tabella 3.2.II Categorie di sottosuolo	
Categoria	Descrizione
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s_{30}}$ compresi tra 180 m/s e 360 m/s (ovvero $15 < N_{SPT30} < 50$ nei terreni a grana grossa e $70 < c_{U30} < 250$ kPa nei terreni a grana fina).

Le caratteristiche della superficie topografica del terreno del lotto possono essere considerate appartenenti alla categoria T1.

Tabella 3.2.IV Categorie topografiche	
Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$

## AMPLIFICAZIONE STRATIGRAFICA

Per le categorie di sottosuolo B, C, D ed E, i coefficienti  $S_s$  e  $C_c$  possono essere calcolati in funzione dei valori di  $F_o$  e  $T_c^*$  relativi al sottosuolo di Categoria A, mediante le espressioni fornite dalla seguente tabella, nelle quali  $g$  è l'accelerazione di gravità e il tempo è espresso in secondi. Dato che la categoria del sottosuolo dell'area considerata è di tipo C, si calcolano i coefficienti attraverso le seguenti formule.

Tabella 3.2.V Espressioni di $S_s$ e $C_c$		
Categoria sottosuolo	$S_s$	$C_c$
C	$1,00 \leq 1,70 - 0,60 \cdot F_o \cdot a_g/g \leq 1,50$	$1,05 \cdot (T_c^*)^{-0,33}$

Quindi  
 $S_s = 1,50$   
 $C_c = 1,62$

## PERIODO DI OSCILLAZIONE

Il periodo di oscillazione di un'opera si calcola attraverso le formule riportate nel P.C.M. del 20 marzo 2003.

$$T_1 = C_1 \text{ per } H^{3/4}$$

$$T_1 = 0,05 \cdot (9,7)^{3/4} = 0,26 \text{ sec}$$

dove

$H$  altezza della costruzione in metri dal piano di fondazione;  
 $C_1$  vale 0,05 per costruzioni con qualsiasi tipo di struttura.

## DETERMINAZIONE DEI PERIODI

$T_c$  è il periodo corrispondente all'inizio del tratto a velocità costante dello spettro, dato da:

$$T_c = C_c \cdot T_c^*$$

$$T_c = 1,62 \cdot 0,26 = 0,44 \text{ sec}$$

$T_b$  è il periodo corrispondente all'inizio dello spettro di accelerazione:

$$T_b = T_c / 3 = 0,15 \text{ sec}$$

$T_d$  è il periodo corrispondente all'inizio del tratto a spostamento costante dello spettro, espresso in secondi, mediante la relazione:

$$T_d = 4 \cdot a_g/g + 1,6 = 1,95 \text{ sec}$$

Tutti i valori dei periodi sono stati calcolati in base alle Normative Tecniche delle Costruzioni.

## SPETTRO DI RISPOSTA ELASTICO IN ACCELERAZIONE DELLE COMPONENTI ORIZZONTALI

Lo spettro di risposta elastico è definito dall'Allegato 2 delle Norme Tecniche per il progetto, la valutazione e l'adeguamento sismico degli edifici e dal P.C.M. del 20 marzo 2003, tramite le seguenti espressioni:

$$0 < T < T_b$$

$$T_b \leq T < T_c$$

$$T_c \leq T < T_d$$

$$T_d \leq T$$

Dato che il periodo di oscillazione dell'edificio presenta un valore  $T = 0,26$  sec, compreso tra i periodi  $T_c = 0,15$  sec e  $T_d = 0,44$  sec, è stata utilizzata l'equazione corrispondente per definire l'ordinata dello spettro sismico  $S_e(T)$ .

$$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o$$

con

$a_g$  accelerazione orizzontale massima del terreno, espressa in  $g/10$ ;

$F_o$  valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale, adimensionale;

$S$  coefficiente che tiene conto della categoria di sottosuolo

e delle condizioni topografiche mediante la seguente relazione:  $S = S_S \cdot S_T = 1,50$ .

Essendo  $S_S$  il coefficiente di amplificazione strategica e  $S_T$  il coefficiente di amplificazione topografica;  $\eta$  è il fattore che altera lo spettro elastico per coefficienti di smorzamento viscosi convenzionali  $\varepsilon$  diversi dal 5%, mediante la relazione:

$$\eta = \sqrt{[10/(5 + \varepsilon)]} \geq 0,55$$

$\varepsilon = 5\%$  (valore ammesso per le strutture il calcestruzzo),  
quindi  $\eta = 1$  cioè **spettro inalterato**.

Pertanto inserendo tutti questi valori nell'equazione di riferimento si ottiene:

$$S_e(T) = 3$$

### FATTORE DI STRUTTURA Q

Il valore del fattore di struttura da utilizzare per ciascuna direzione dell'azione sismica, dipende dalla tipologia strutturale, dal suo grado di iperstaticità e dai criteri di progettazione adottati e tiene conto delle non linearità di materiale. Esso può essere calcolato tramite la seguente espressione da NTC:

$$Q = q_0 \cdot K_R$$

con

$K_R = 0,8$  fattore riduttivo per costruzioni non regolari in altezza;

$q_0$  valore massimo del fattore di struttura che dipende dal livello di duttilità attesa, dalla tipologia strutturale e dal rapporto  $a_u / a_1$  tra il valore dell'azione sismica per il quale si verifica la formazione di un numero di cerniere plastiche, tali da rendere la struttura labile e quello per il quale il primo elemento strutturale raggiunge la plasticizzazione a flessione. Nelle NTC viene definito per ciascuna tipologia strutturale il valore massimo di riferimento per  $q_0$ . Nel caso in esame si assume il valore:

$$q_0 = 3 \cdot a_u / a_1 = 3,3$$

con

$a_u / a_1 = 1,1$   
quindi

$$Q = 2,64$$

A conclusione di questo studio, avendo notato che il sito di progetto si trova in un'area sismica che non presenta problematiche di rilievo, e verificato che la sollecitazione orizzontale del vento è maggiormente significativa poiché più gravosa rispetto all'azione del sisma, si è scelto di trascurare quest'ultima.

# STRUTTURA AD ARCO

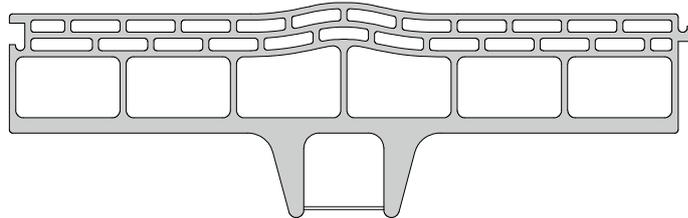
## EVOLUZIONE

Si è più volte voluto evidenziare l'importanza della sinergia fra architettura e struttura all'interno dell'iter progettuale di ANT. Questa commistione di "mondi", apparentemente separati, trova probabilmente la sua massima espressione nello studio che ha portato alla definizione della forza di sezione del modulo di base che compone l'arco struttura di ANT1\_Cala. Se apparentemente può sembrare semplice, la progettazione ha subito più volte dei ripensamenti, dovuti alla progressiva acquisizione di dati sempre più accurati che hanno portato alla definizione della sezione definitiva del modulo in esame. Come è stato ampiamente trattato in precedenza, all'origine della forma del padiglione della Cala vi era l'idea della carena di una nave. Si era pensato quindi ad una scocca che prevedesse nelle sporgenze interne che assolvessero alle funzioni strutturale e contenimento degli impianti. Queste prime idee si sono però subito

scontrate con le analisi che si possono vedere più avanti ed hanno portato a ripensare il concept iniziale, spostando i rilievi dall'interno all'esterno. Si seguito si riportano gli step di evoluzione della sezione del nostro "mattone" al quale seguirà quella definitiva.

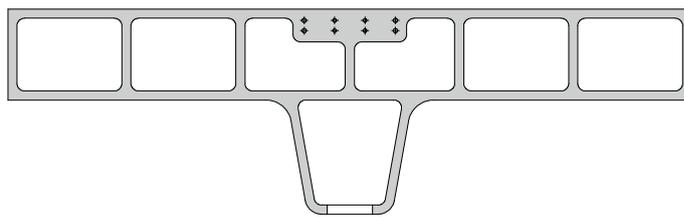
Evoluzione della sezione del blocco strutturale (scala 1:25) [179]

Prima versione



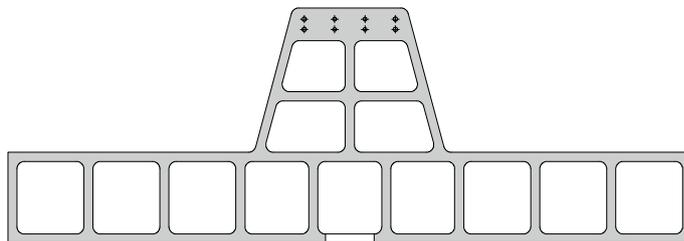
Struttura interna  
Isolamento interno agli alveoli del blocco  
Rigonfiamento superiore puramente estetico

Seconda versione



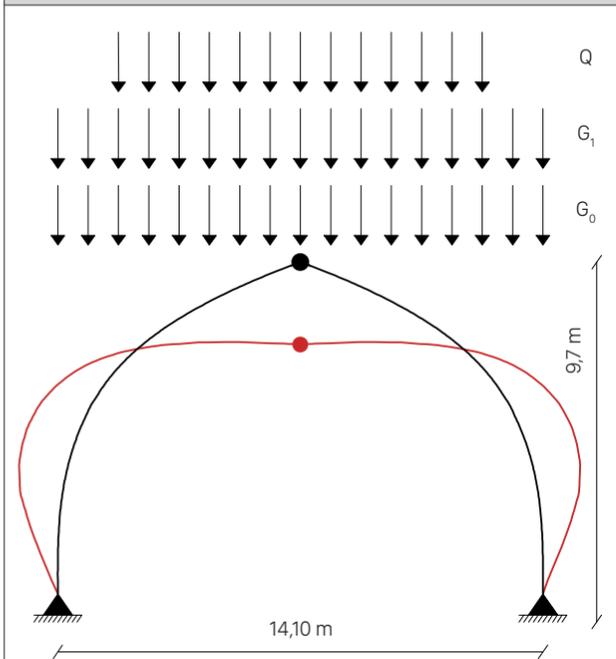
Struttura esterna  
Isolamento esterno a cappotto + alveoli  
Sporgenza interna per impianti

Terza versione



Struttura esterna  
Isolamento esterno a cappotto + alveoli + impianti

### Arco a 3 cerniere



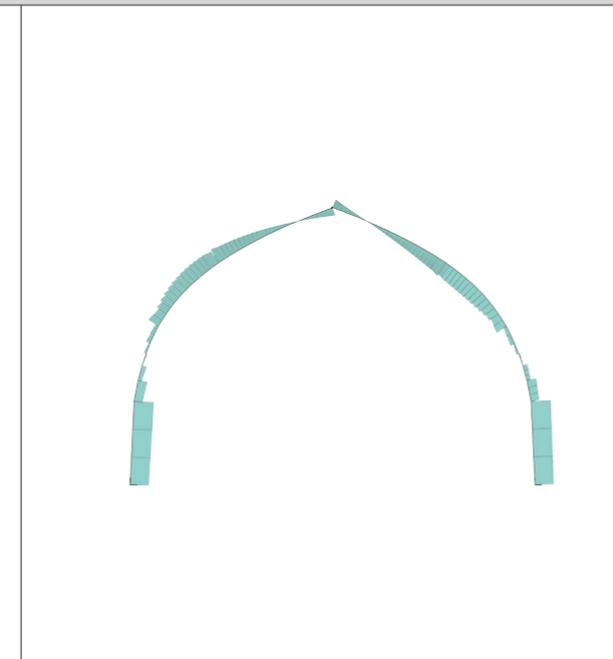
Schema di carico [180]

Q [kN/m <sup>2</sup> ]	G <sub>1</sub> [kN/m]	G <sub>0</sub> [kN/m]
0,48	4,17	7,75



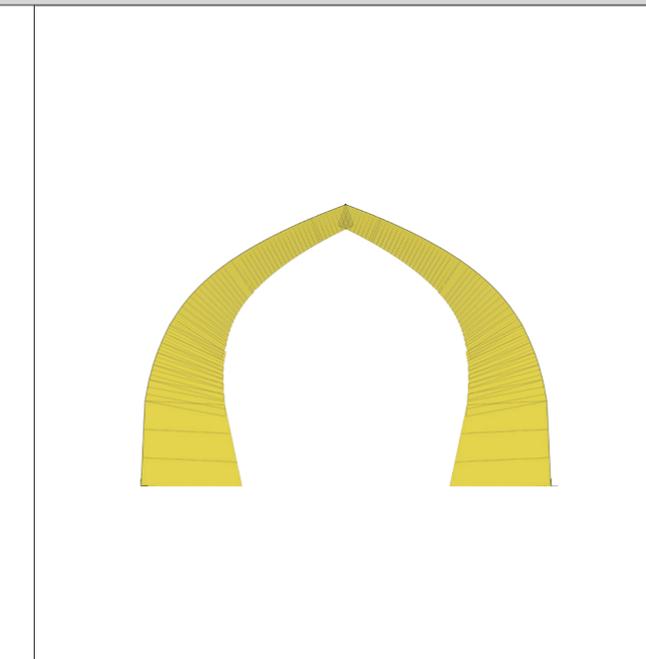
Momento [181]

[kN · m]	Min	Max
	-144,8210	11,5381



Taglio [182]

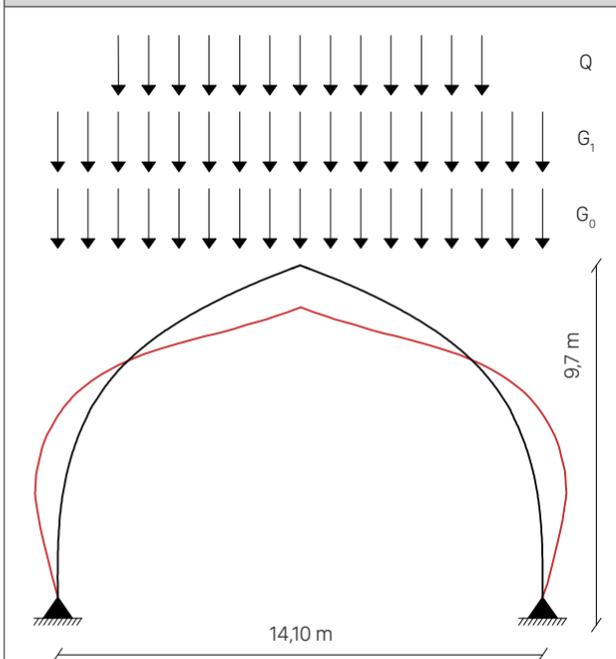
[kN]	Min	Max
	-43,5295	43,5295



Sforzo normale [183]

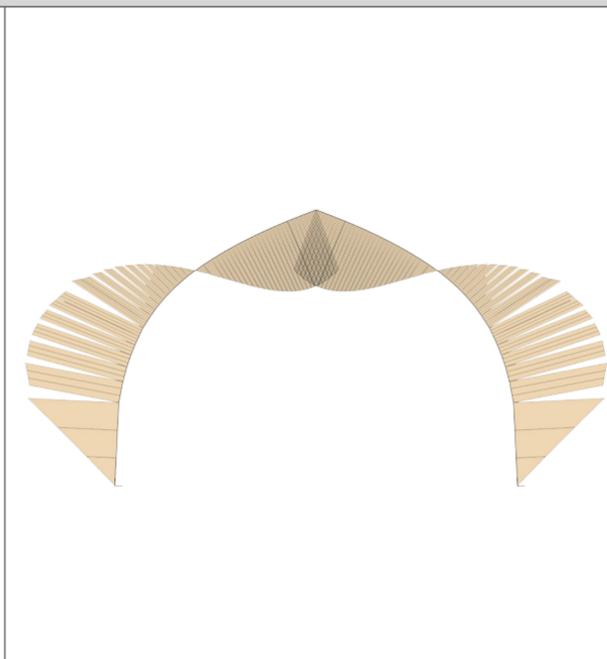
[kN]	Min	Max
	-222,2527	-48,5720

### Arco appoggio-appoggio



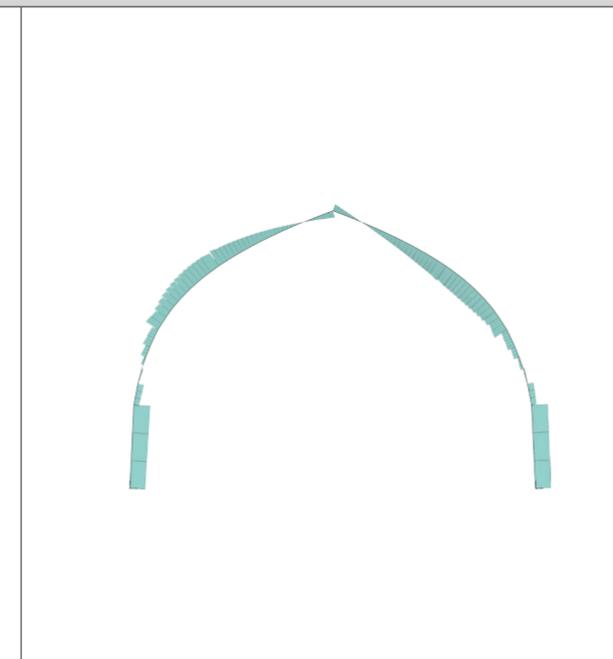
Schema di carico [184]

Q [kN/m <sup>2</sup> ]	G <sub>1</sub> [kN/m]	G <sub>0</sub> [kN/m]
0,48	4,17	7,75



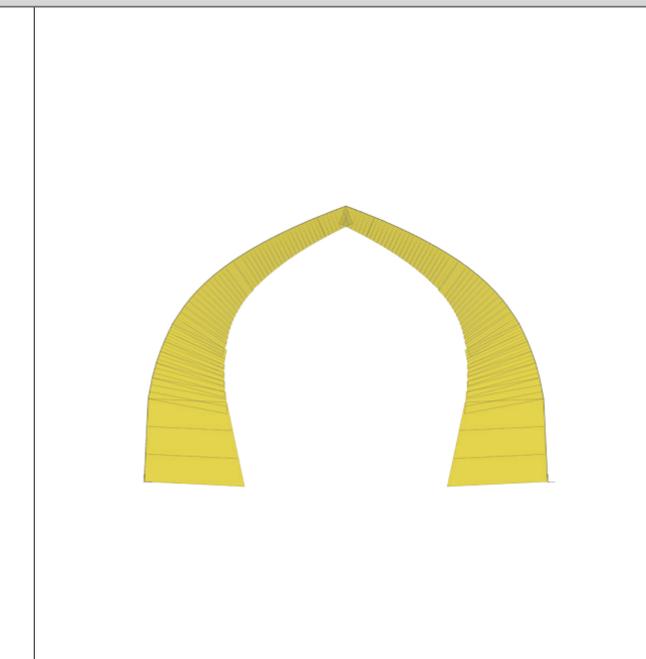
Momento [185]

[kN · m]	Min	Max
	-112,3663	79,5303



Taglio [186]

[kN]	Min	Max
	-40,1457	40,1457



Sforzo normale [187]

[kN]	Min	Max
	-220,4317	-41,3777

# PROCESSO DI OTTIMIZZAZIONE

## SCHEMA STATICO DI DIMENSIONAMENTO

Note le premesse sopra argomentate, si presenta ora lo schema statico dell'arco strutturale. In seguito si farà riferimento  $G_0$  per i carichi permanenti strutturali, a  $G_1$  per i carichi permanenti non strutturali e a  $Q$  per quelli variabili.

Data la complessità della forma da analizzare, si è scelto di utilizzare un programma ad elementi finiti FEA, quale STRAUSS7, per il calcolo delle azioni sollecitanti e dello stato deformativo. Per garantire un maggiore controllo del modello e dei risultati si è ritenuto opportuno analizzare una porzione della struttura, sulla quale è stata anche compiuta la valutazione della correttezza dello schema statico utilizzato; questi ragionamenti sono ovviamente estensibili a tutto il resto della struttura. È stato quindi preso in esame uno dei 10 archi che compongono la struttura del padiglione, precisamente quello costituito da una luce pari a 14,28 metri e una freccia di 9,8 m, e si è così considerata la situazione peggiore, cioè a favore di sicurezza. In questa prima fase si sono confrontati due differenti schemi statici: quello ad arco a 3 cerniere e quello a 2.

Il confronto è stato effettuato sulle azioni interne di taglio, momento flettente e sulla freccia (sforzo normale). Osservando i risultati ottenuti, si può vedere come le differenze siano molto significative; in particolare si nota come il momento flettente sia nullo in sommità nella prima soluzione, proprio perché in presenza di una cerniera, e come invece sia abbastanza elevato nella seconda soluzione. Si può inoltre osservare come la deformabilità sia maggiore nell'arco a 3 cerniere rispetto a quella dell'arco appoggio-appoggio poiché, per esempio, il cedimento verticale di una cerniera di estremità può essere assorbito dalle rotazioni sviluppate dalla cerniera di estremità opposta.

Si sceglie, quindi, di utilizzare la seconda soluzione (arco appoggio-appoggio) perché la continuità dell'arco in sommità ci consente di poter collegare i due semiarchi attraverso un unico elemento continuo che facilita anche il montaggio e, inoltre, questa configurazione permette di avere spostamenti verticali minori.

## ANALISI ALLO STATO LIMITE ULTIMO (SLU)

Preso in esame il caso dell'arco appoggio-appoggio, dal grafico dei momenti flettenti si nota come le fibre tese dell'arco siano esterne dalla base fino al punto dove si annulla il momento, per poi diventare interne da questo punto fino al vertice. Pertanto la distribuzione dei ferri di armatura ha determinato la forma caratteristica delle sezioni degli elementi che compongono l'arco, che devono essere armate esternamente nella prima porzione di arco suddetta, mentre internamente nella successiva. Nel realizzare le sezioni si è tenuto conto, inoltre, della rastremazione dell'arco dalla base alla sommità. Dopo aver eseguito l'analisi precedentemente riportata, si sono individuate le sezioni dell'arco maggiormente sollecitate qui sotto riportate (scala 1:50). Ipotizzando, poi, un copriferro di 3 cm, sono state misurate le distanze utili  $d$  di ogni sezione e, tramite la seguente formula (da NTC) si sono calcolate le aree dei ferri da inserire nelle stesse.

$$A_s = M_{sd} / (0,9 \cdot f_{yd} \cdot d)$$

con

$M_{sd}$  momento di progetto (SLU) in corrispondenza della relativa sezione;  $f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s$  tensione di progetto dell'acciaio;  $f_{yk} = 450$  MPa resistenza di snervamento caratteristica dell'acciaio;  $\gamma_s = 1,15$  coefficiente di sicurezza.

Sezione 1 d = 740 mm	Sezione 2 d = 610 mm	Sezione 3 d = 480 mm
Sezione 4 d = 310 mm	Sezione 5 d = 270 mm	Sezione 6 d = 270 mm

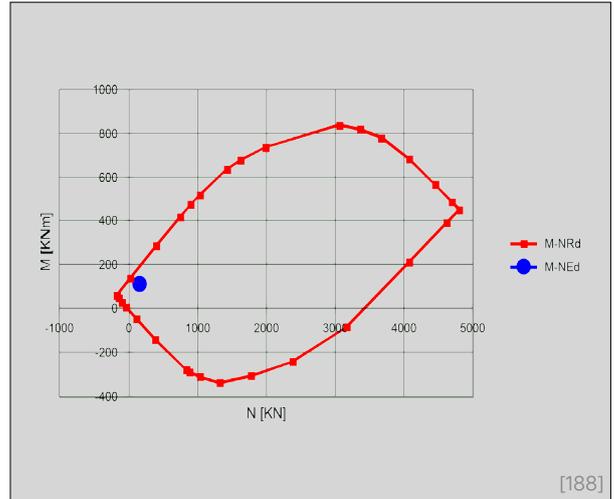
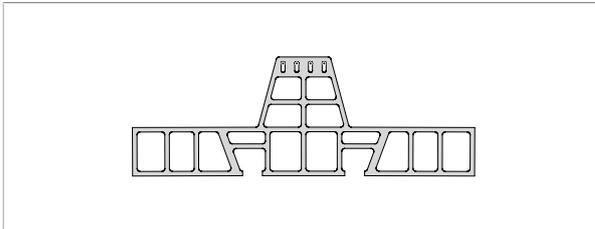
## VERIFICA A SLU

Ciascuna delle sezioni è stata successivamente verificata a SLU, confrontando il dominio M-N resistente con i carichi agenti, in modo da poter valutare, allo stesso tempo, tutte le diverse configurazioni di carico. Questa verifica è stata

effettuata tramite il software **VcaSlu**. Di seguito vengono riportati i valori ottenuti e quindi il dimensionamento di ciascuna sezione. Da questi si può affermare che le sezioni sono tutte verificate a SLU perché con l'area dei ferri ipotizzata, l' $M_{sd}$  e l' $N_{sd}$  (valori di progetto) risultano all'interno del dominio M-N.

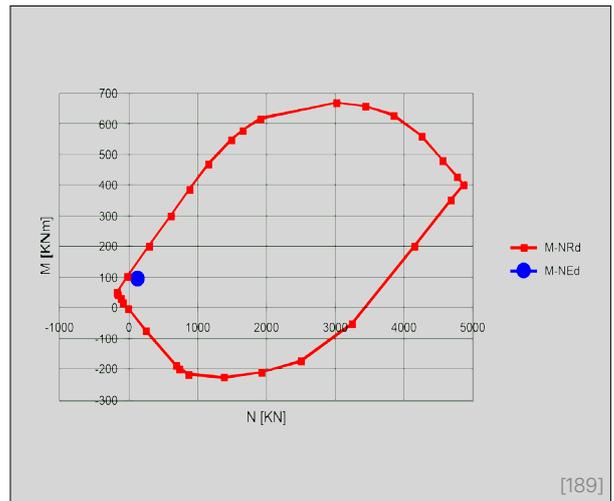
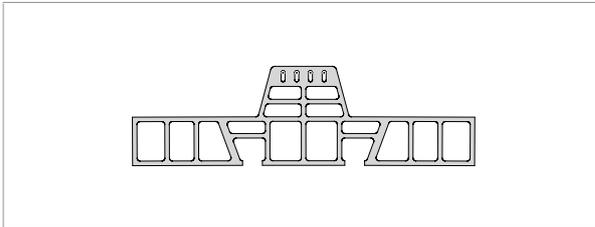
**Dominio M-N Sezione 1 740 mm** [ $M_{Rd} = 191,3 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ]

Sollecitazioni		
N.	$N_{sd}$ [kN]	$M_{sd}$ [kN · m]
1	156,0230	112,3663



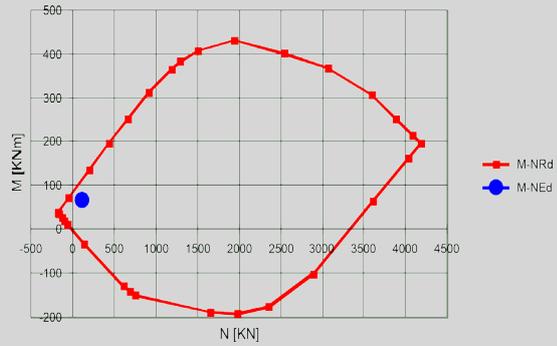
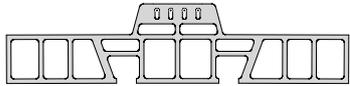
**Dominio M-N Sezione 2 610 mm** [ $M_{Rd} = 150,4 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ]

Sollecitazioni		
N.	$N_{sd}$ [kN]	$M_{sd}$ [kN · m]
2	132,2881	95,6648



**Dominio M-N Sezione 3 480 mm** [ $M_{Rd} = 113,9 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ]

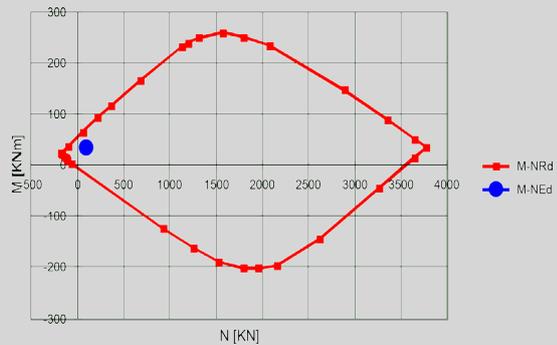
Sollecitazioni		
N.	$N_{sd}$ [kN]	$M_{sd}$ [kN · m]
3	113,3692	65,7191



[190]

**Dominio M-N Sezione 4 310 mm** [ $M_{Rd} = 71,46 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ]

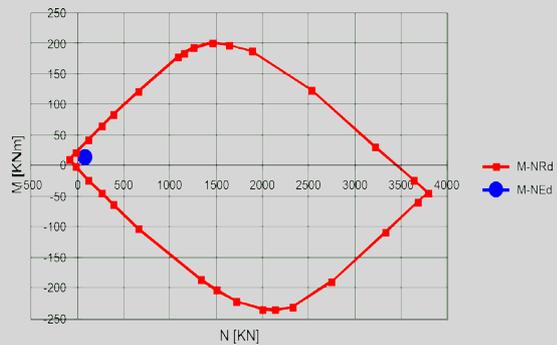
Sollecitazioni		
N.	$N_{sd}$ [kN]	$M_{sd}$ [kN · m]
4	98,1304	35,1225



[191]

**Dominio M-N Sezione 5 270 mm EXT** [ $M_{Rd} = 37,37 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ]

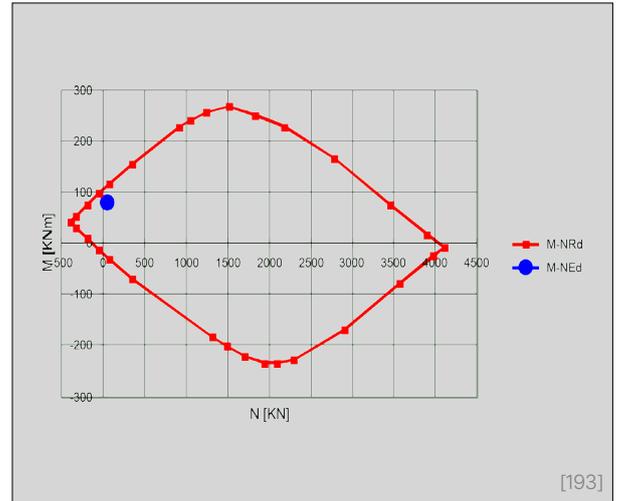
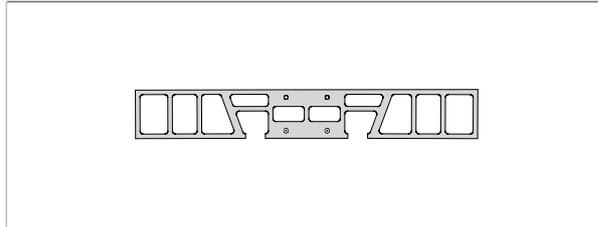
Sollecitazioni		
N.	$N_s$ [kN]	$M_s$ [kN · m]
5	86,0703	13,2265



[192]

**Dominio M-N Sezione 6 270mm INT** [ $M_{Rd} = 112 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ]

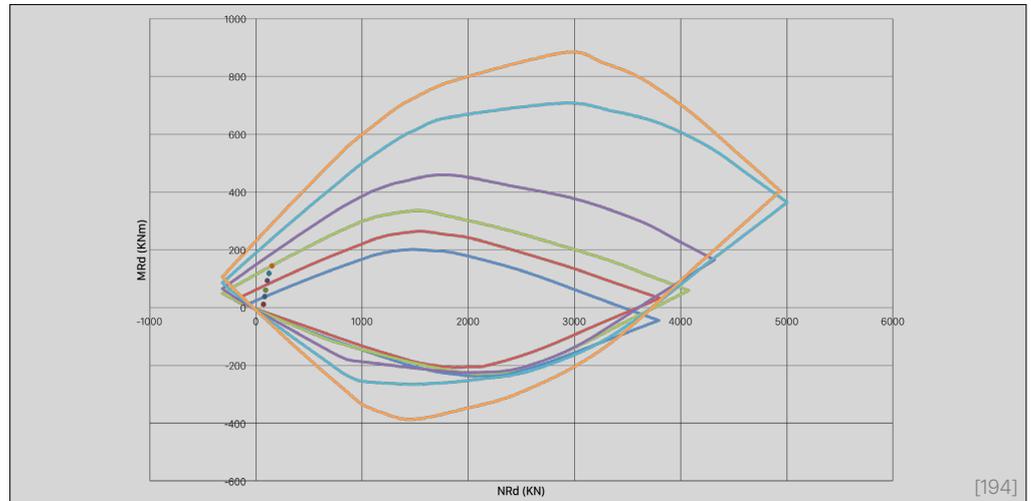
Sollecitazioni		
N.	$N_{sd}$ [kN]	$M_{sd}$ [kN · m]
6	46,6878	79,5303



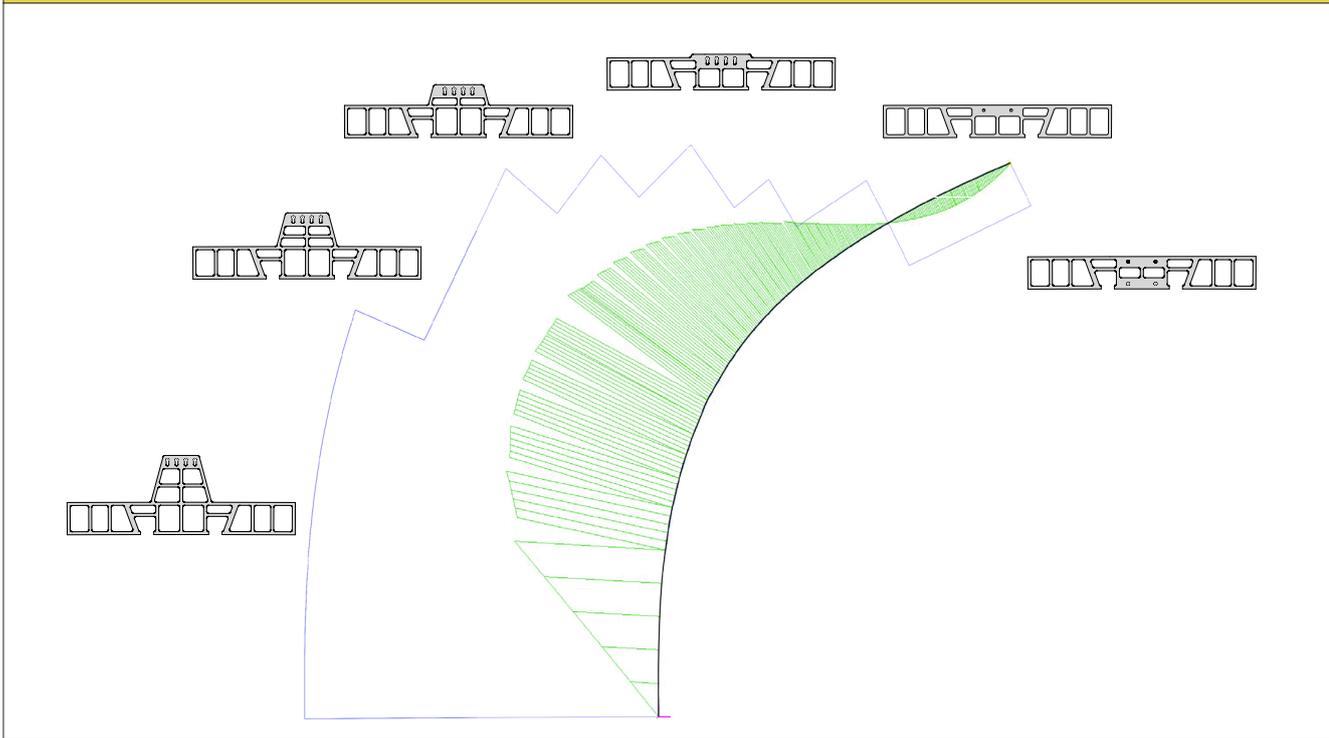
**Dominio M-N**

- Sezione 1
- Sezione 2
- Sezione 3
- Sezione 4
- Sezione 5
- Sezione 6

Le linee rappresentano i domini M-N delle varie sezioni, mentre i punti sono le azioni interne M-N di progetto.



## Confronto $M_{Rd} - M_{Sd}$ [195]



### VERIFICA A SLE

Anche in questo le verifiche si sono limitate alle sole sezioni in corrispondenza dei punti maggiormente sollecitati, in quanto si è certi che nelle altre sezioni il momento agente sarà inferiore. Si riporta quindi di seguito solamente la verifica per le sezioni dove il momento è maggiore.

#### SFORZO LIMITE PER VERIFICA ALLE TENSIONI DI ESERCIZIO

Facendo riferimento al paragrafo 4.1.2.2.5 delle NTC, si vedono i limiti imposti da normativa sugli sforzi per quanto riguarda SLE rara e SLE quasi permanente, sia per il calcestruzzo che per le barre di armatura. Per SLE rara, la formula (4.1.40) definisce:

$$\sigma_c \leq 0,60 \cdot f_{ck} = 15 \text{ MPa}$$

Per SLE quasi permanente, la formula (4.1.41) definisce:

$$\sigma_c \leq 0,45 \cdot f_{ck} = 11,25 \text{ MPa}$$

Mentre per l'acciaio d'armatura, la formula (4.1.42):

$\sigma_s \leq 0,80 \cdot f_{yk} = 360 \text{ MPa}$  Per quanto riguarda le tensioni ammissibili, l'acciaio deve quindi avere uno sforzo inferiore a 360 MPa. Dal lato calcestruzzo, con  $f_{ck} = 25 \text{ MPa}$ , si deve

avere uno sforzo di compressione  $\leq 15 \text{ MPa}$  a SLE rara e  $\leq 11,25 \text{ MPa}$  per SLE quasi permanente.

#### VERIFICA DELLA SEZIONE 1

È stata verificata la sezione alla base dell'arco con le configurazioni di carico a SLE quasi permanente e SLE rara. Sono quindi presenti, a seconda della combinazione utilizzata, le seguenti azioni interne:

4 $\phi 12$	N [kN]	M [kN · m]
SLE rara	131,2401	175,0640
SLE quasi permanente	108,2821	102,0264

Si sono quindi valutati gli sforzi agenti nella sezione:

4 $\phi 12$	$\sigma_c$ [MPa]	$\sigma_s$ [MPa]
SLE rara	4,318	384,8
SLE quasi permanente	2,283	108,1

Come si può notare, i risultati ottenuti per SLE quasi permanente sono irrilevanti ai fini della verifica perché questo

tipo di configurazione presuppone dei carichi inferiori e quindi le sezioni risulteranno essere tutte verificate. Mentre, se si focalizza l'attenzione sui valori ottenuti per SLE rara, si può notare come lo sforzo dell'acciaio superi il valore limite di 360 MPa. La sezione **non** è quindi **verificata** alle tensioni di esercizio, di conseguenza bisognerà aumentare l'armatura presente arrivando a un numero totale di barre pari a 4 di diametro 16 mm.

Si sono riportati i valori di sforzo calcolati in configurazione SLE rara; la valutazione a SLE quasi permanente è stata trascurata in quanto presenta gli stessi limiti ma con valori di carico minori ed è quindi automaticamente verificata se verica l'altra.

4 $\phi$ 16	$\sigma_c$ [MPa]	$\sigma_s$ [MPa]
SLE rara	3,809	219,1

### VERIFICA DELLA SEZIONE 2

È stata effettuata la stessa verifica per la sezione a quota 5,55 metri.

4 $\phi$ 12	N [kN]	M [kN · m]
SLE rara	123,2664	174,8953
SLE quasi permanente	86,8088	88,2135

Gli sforzi agenti nella sezione:

4 $\phi$ 12	$\sigma_c$ [MPa]	$\sigma_s$ [MPa]
SLE rara	5,042	508,9
SLE quasi permanente	2,259	129,8

Per quanto riguarda i valori ottenuti per SLE rara, si può notare come lo sforzo dell'acciaio superi di molto il valore limite di 360 MPa. La sezione **non** è quindi **verificata** alle tensioni di esercizio, di conseguenza si è aumentata l'armatura ponendo 4 barre di diametro 16 mm.

4 $\phi$ 16	$\sigma_c$ [MPa]	$\sigma_s$ [MPa]
SLE rara	4,376	288,7

La verifica alle tensioni di esercizio, sia lato acciaio che calcestruzzo, è soddisfatta in quanto lo sforzo è minore del valore limite.

### VERIFICA DELLA SEZIONE 3 (a 6,37 m)

4 $\phi$ 12	N [kN]	M [kN · m]
SLE rara	108,8409	153,0788
SLE quasi permanente	75,9039	70,3840

4 $\phi$ 12	$\sigma_c$ [MPa]	$\sigma_s$ [MPa]
SLE rara	6,473	598,7
SLE quasi permanente	2,657	139,3

La sezione **non** è **verificata** lato acciaio, quindi si sono aumentate le barre di armatura arrivando a 4 barre di diametro 16 mm.

4 $\phi$ 16	$\sigma_c$ [MPa]	$\sigma_s$ [MPa]
SLE rara	5,63	339,6

### VERIFICA DELLA SEZIONE 4 (a 6,98 m)

4 $\phi$ 12	N [kN]	M [kN · m]
SLE rara	96,2511	119,5398
SLE quasi permanente	60,5953	31,0408

4 $\phi$ 12	$\sigma_c$ [MPa]	$\sigma_s$ [MPa]
SLE rara	10,61	1094
SLE quasi permanente	2,246	138,7

Per SLE rara, lo sforzo dell'acciaio supera di parecchio il valore limite. La sezione **non** è **verificata** alle tensioni di esercizio, di conseguenza l'armatura è stata aumentata a 4 barre di diametro 18 mm.

4 $\phi$ 18	$\sigma_c$ [MPa]	$\sigma_s$ [MPa]
SLE rara	7,043	348,2

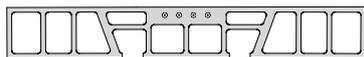
**VERIFICA DELLA SEZIONE 5** (a 7,35 m)

2 $\phi$ 12	N [kN]	M [kN · m]
SLE rara	85,8218	98,7047
SLE quasi permanente	52,1080	10,8351

2 $\phi$ 12	$\sigma_c$ [MPa]	$\sigma_s$ [MPa]
SLE rara	12,22	1456
SLE quasi permanente	1,126	54,91

In questo caso lo sforzo dell'acciaio supera in maniera sproporzionata in maniera limite. La sezione **non è verificata** e di conseguenza si è aumentata l'armatura con 4 barre di diametro 18 mm.

4 $\phi$ 18	$\sigma_c$ [MPa]	$\sigma_s$ [MPa]
SLE rara	7,258	333,1

**VERIFICA DELLA SEZIONE 6** (a 7,57 m)

4 $\phi$ 18	N [kN]	M [kN · m]
SLE rara	29,5788	71,5686
SLE quasi permanente	40,1498	8,1992

4 $\phi$ 18	$\sigma_c$ [MPa]	$\sigma_s$ [MPa]
SLE rara	5,03	260,7
SLE quasi permanente	0,8238	40,78

Lo sforzo dell'acciaio è minore del valore limite e quindi la sezione è **verificata**.

**VERIFICA A TAGLIO**

Il passo successivo è stato quello di verificare la struttura dell'arco a taglio, di conseguenza sono state verificate tutte le sezioni prese in considerazione come elementi senza armature trasversali resistenti a taglio, secondo il paragrafo (4.1.2.1.3.1) delle NTC. La verifica di resistenza a SLU si pone:

$$V_{Rd} \geq V_{Ed}$$

dove

$V_{Ed}$  valore di calcolo dello sforzo di taglio agente.

Con riferimento all'elemento fessurato da momento flettente, la resistenza a taglio è stata valutata con:

$$V_{Rd} = \{0,18 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} / v_c + 0,15 \cdot \sigma_{cp}\} \cdot b_w \cdot d \geq (v_{min} + 0,15 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d$$

con

$$k = 1 + (200 / d)^{1/2} \leq 2$$

$$v_{min} = 0,035 \cdot k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2}$$

e dove

$d$  altezza utile della sezione in millimetri;

$\rho_1 = A_s / (b_w \cdot d)$  rapporto geometrico di armatura longitudinale  $\leq 0,02$ ;

$\sigma_{cp} = N_{Ed} / A_c$  tensione media di compressione nella sezione  $\leq 0,2 \cdot f_{cd}$ ;

$b_w$  larghezza minima della sezione in millimetri.

Di seguito si riporta la tabella riassuntiva delle verifiche effettuate:

Sezioni	$V_{Rd}$ [kN]	$V_{Ed}$ [kN]	$v_{min}$
1	42,84	35,91	26,86
2	38,15	31,81	22,70
3	44,56	36,03	24,93
4	96,23	40,00	45,06
5	89,45	39,178	40,18
6	108,00	31,53	58,76

Si può notare come tutte le sezioni risultino verificate a taglio perché tutti i valori dello sforzo di taglio agente sono minori dei valori di quello resistente. La verifica è soddisfatta anche nel caso di preventiva presenza di fessurazione da momento flettente.

## DIMENSIONAMENTO DELLA LUNGHEZZA DI ANCORAGGIO

Tutto ciò presentemente detto vale soltanto se le barre di armatura delle sezioni presentano un'adeguata lunghezza di ancoraggio, che dipende dalle caratteristiche dei due materiali, calcestruzzo e ferro. Per assicurare la completa collaborazione dell'armatura metallica con le sezioni di cemento, prima delle sezioni, il ferro deve essere ancorato nel calcestruzzo per un tratto pari a:

$$L_b = \varphi \cdot f_{sd} / 4 \cdot f_{bd}$$

con:

$L_b$  lunghezza di ancoraggio;

$f_{sd} = f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s$  tensione di snervamento di calcolo;

$f_{bd} = f_{bk} / \gamma_c$  tensione tangenziale di aderenza di calcolo;

$f_{bk} = 2,25 \cdot \eta \cdot f_{ctk}$  tensione tangenziale di aderenza caratteristica;

$f_{ctk} = 0,7 \cdot f_{ctm}$  resistenza caratteristica a trazione del calcestruzzo;

$f_{ctm} = 0,4 \cdot f_{ck}^{2/3}$  resistenza media a trazione del calcestruzzo;

$f_{ck}$  resistenza caratteristica a compressione del calcestruzzo;

$\gamma_s = 1,15$  coefficiente di sicurezza per l'acciaio d'armatura;

$\eta = 1$  per barre con  $\varphi \leq 32$  mm;

$f_{yk}$  tensione di snervamento caratteristica.

Si riporta di seguito il dimensionamento della lunghezza di ancoraggio per le due tipologie di barre utilizzate: diametro  $\varphi$  16 e  $\varphi$  18.

$f_{sd}$ [MPa]	391
$f_{ck}$ [MPa]	25
$f_{ctm}$ [MPa]	3,42
$f_{ctk}$ [MPa]	2,4
$\eta$	1
$f_{bk}$ [MPa]	5,4
$\gamma_c$	1,5
$f_{bd}$ [MPa]	3,6

$\varphi$ [mm]	16	18
$L_b$ [mm]	434,44	488,75

## VERIFICA DI DEFORMABILITÀ ALLO SLE

Una delle verifiche da compiere su una struttura di questo tipo, a causa del vincolo importante che per essa può diventare, è la verifica della deformabilità allo stato limite di esercizio ed in condizioni di carico frequente. A tal proposito, per quello che riguarda i carichi gravanti sulla struttura, si considerano i pesi permanenti rispettivamente propri e portati. Trattandosi di una copertura non praticabile situata in una zona praticamente non soggetta a carico di neve, come carichi variabili si registrano solo quello relativo all'azione del vento che agisce in direzione ortogonale alla copertura e quello associato alla manutenzione. Riassumendo, i carichi considerati sono:

**Peso permanente proprio:** si considera una densità  $\delta = 2500$  kg/m<sup>3</sup> che, per un'area di 0,31 m<sup>2</sup>, equivale a un carico per unità di lunghezza pari a  $G_1 = 775$  kg/m (valore che cambia in base all'altezza dell'arco, calcolato comunque in automatico dal programma);

**Peso permanente portato:** dato dallo spessore dell'isolante inserito in ciascun blocco che forma l'arco, dell'isolante a cappotto esterno e dei blocchi di rivestimento in calcestruzzo; si considera una densità di circa  $\delta = 30$  kg/m<sup>3</sup> (valore di riferimento da scheda tecnica del prodotto lana di vetro) per un'area di 0,5844 m<sup>2</sup>, ottenendo così un carico  $G_2 = 17,53$  kg/m. Si considera una densità di circa  $\delta = 100$  kg/m<sup>3</sup> (valore di riferimento da scheda tecnica del prodotto lana di roccia) per un'area di 0,24 m<sup>2</sup>, ottenendo così un carico  $G_2 = 24$  kg/m. Infine si considera una densità  $\delta = 2500$  kg/m<sup>3</sup> (valore di riferimento da normativa per il calcestruzzo armato) per un'area di 0,15 m<sup>2</sup>, ottenendo quindi un carico  $G_2 = 375$  kg/m. Sommando tutti i valori si ottiene un carico complessivo  $G_2 = 417$  kg/m;

**Carico variabile di vento:** per la valutazione della pressione esterna, essendo l'edificio di progetto caratterizzata da una superficie curva direttamente investita del vento, con un'inclinazione sull'orizzontale  $\alpha \geq 60^\circ$ , si è assunto un valore di  $c_{pe} = +0,8$  per la facciata sopravvento; mentre per quella sottovento un valore di  $c_{pe} = -0,4$ . In definitiva i valori della pressione del vento, calcolati per l'altezza massima dell'arco considerato (9,7 m) saranno rispettivamente pari a:  $p = 8$  kN/m e  $p = -4$  kN/m;

**Carico variabile di manutenzione:** da normativa tecnica italiana NTC 2008 si ha che per la categoria di coperture e sottotetti accessibili per sola manutenzione (cat. H<sub>1</sub>) il carico da considerare vale  $q = 0,15$  kN/m<sup>2</sup>. La combinazione di questi carichi in condizione di SLE frequente, sempre da NTC, risulta essere pari a:

$$G_1 + G_2 + \psi_{11} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots$$

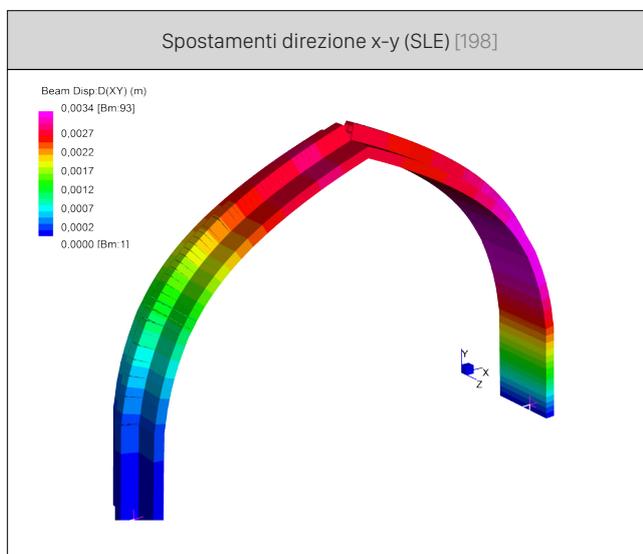
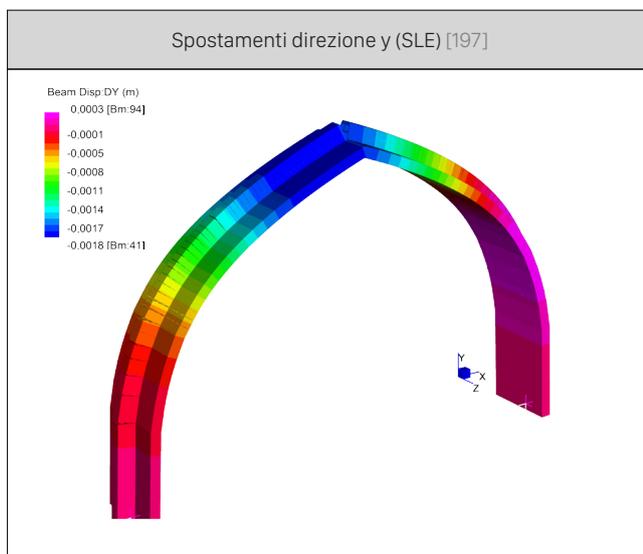
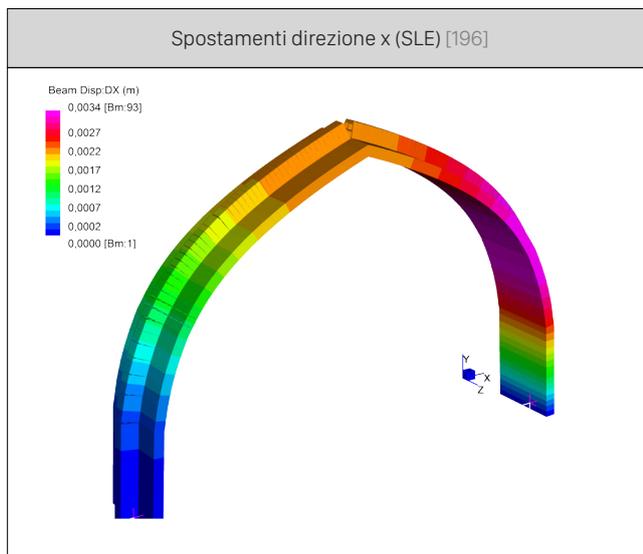
con  $\psi_{1j}$  e  $\psi_{2j}$  nulle per il carico variabile di manutenzione, quindi non considerato, e rispettivamente 0,2 e 0 per il carico di vento. Per valutare la deformabilità allo SLE, risulta quindi determinante la somma dei soli due carichi permanenti e quello del vento ( $G_1 + G_2 + 0,2 \cdot Q_{k1}$ ). Abbiamo dunque valutato il comportamento della struttura in esercizio con l'ausilio del software ad elementi finiti STRAUSS7. Inizialmente lo schema di vincoli adottato prevedeva il classico arco a 3 cerniere con due cerniere a terra e una in sommità. Anche se con tale schema di vincolo e con la combinazione di carico e la geometria precedentemente illustrati, si sono ottenuti dei valori di deformazione accettabili, come si è detto all'inizio, si è preferito optare per la seconda combinazione di vincolo, quella cioè con solo 2 cerniere a terra, per mantenere la continuità in sommità e per facilitare la posa in opera dell'arco. In questo caso analizzato si ottengono uno spostamento verticale al vertice dell'arco pari a  $\delta = 0,0017$  m e uno orizzontale, calcolato in corrispondenza del punto dell'arco situato ad un'altezza da terra pari a 5 m,  $\delta = 0,0033$  m. Così è stata attuata la verifica dell'arco in termini sia di spostamenti verticali che orizzontali, facendo riferimento rispettivamente alle tabelle 4.2.X e 4.2.XI della normativa, dove le massime deformazioni verticali nel caso di semplici coperture sono:

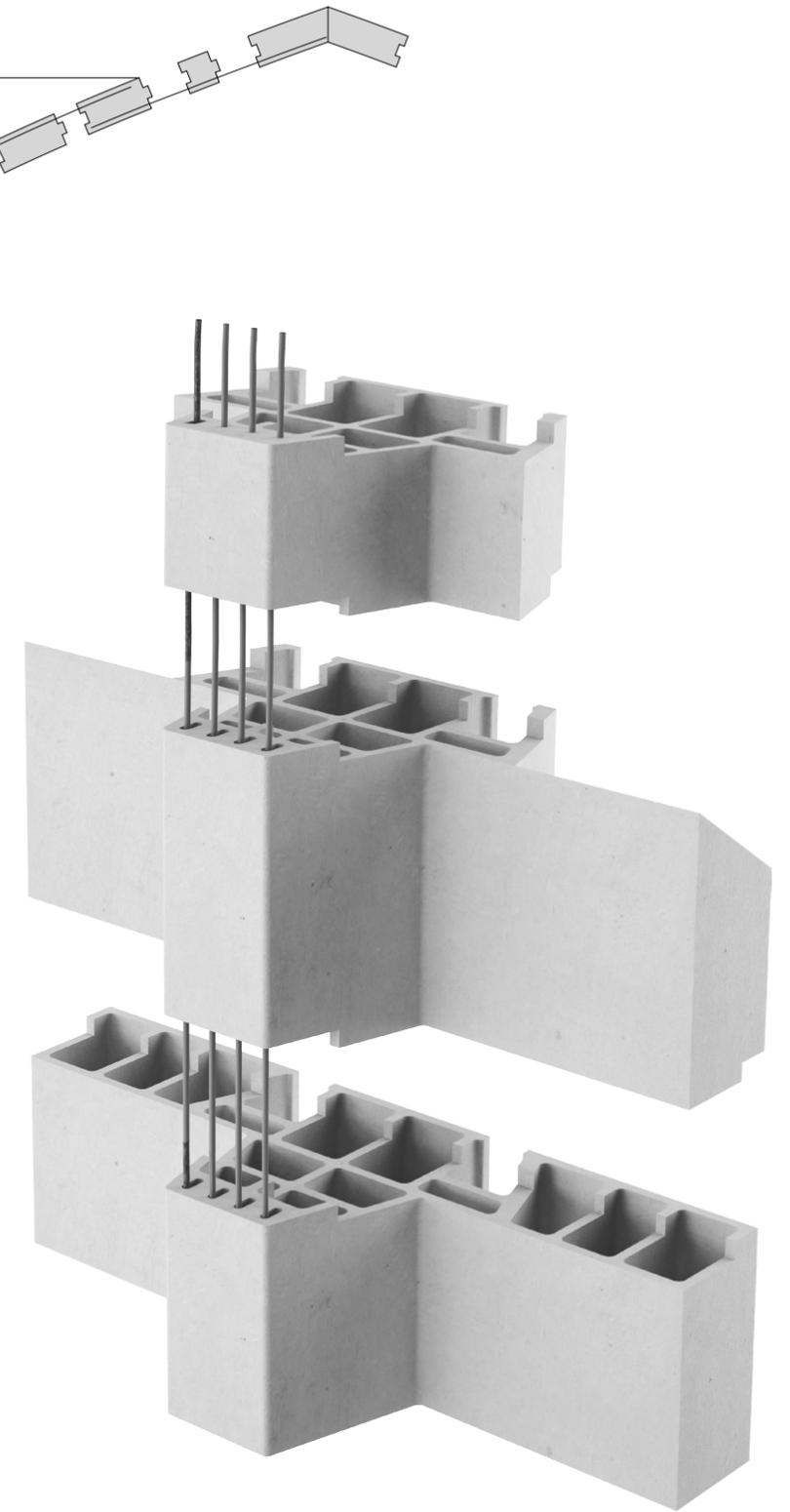
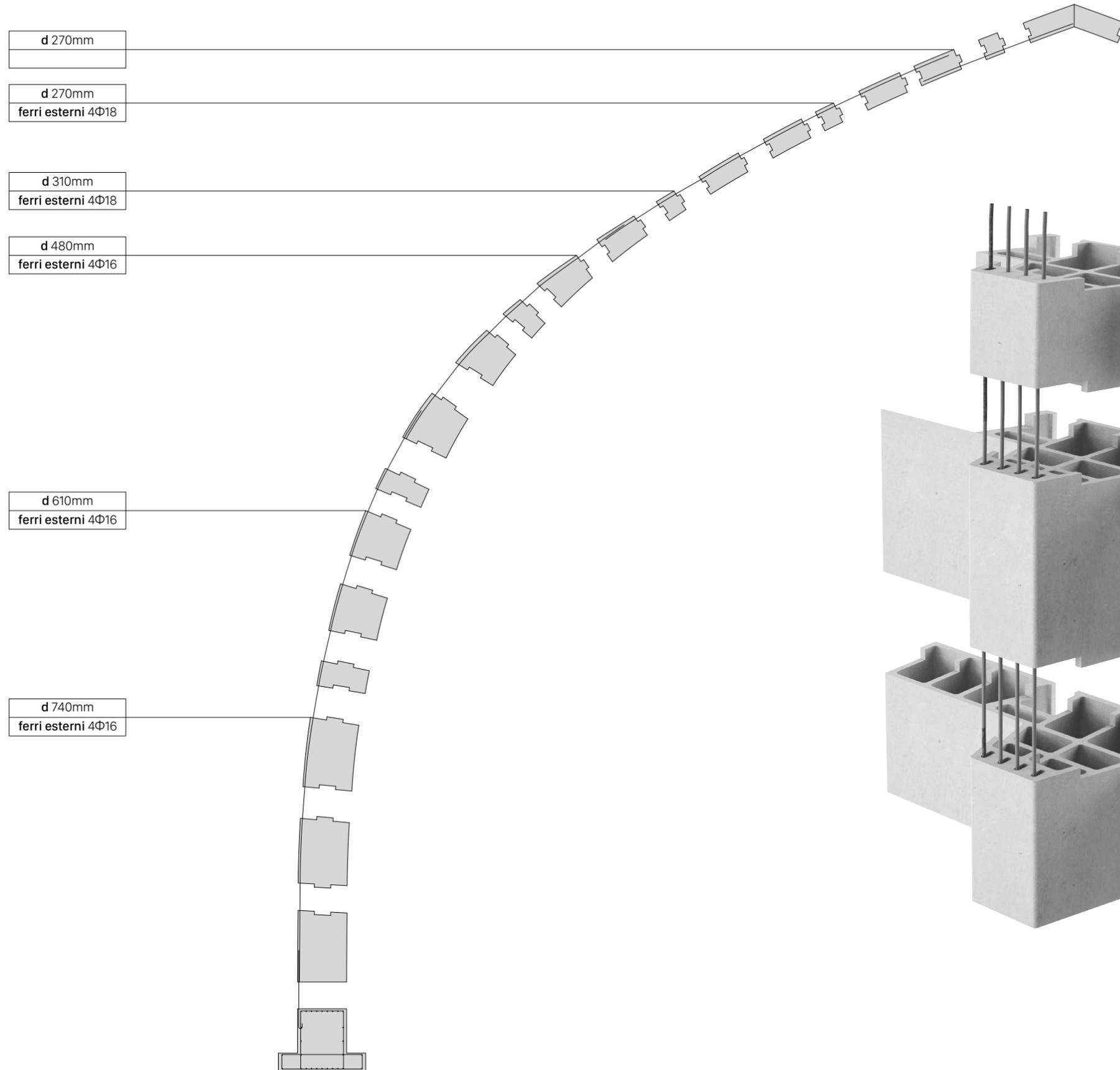
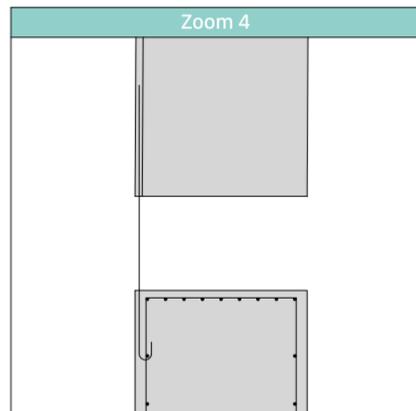
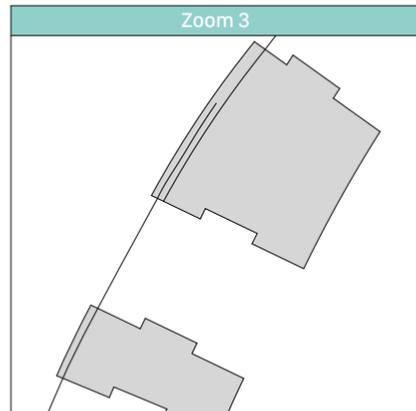
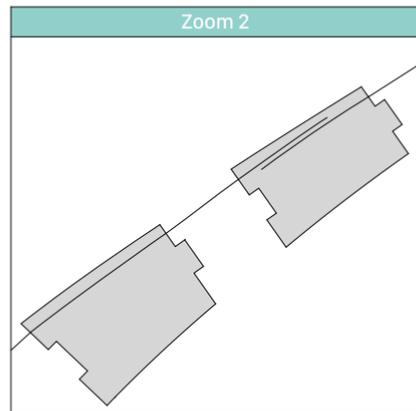
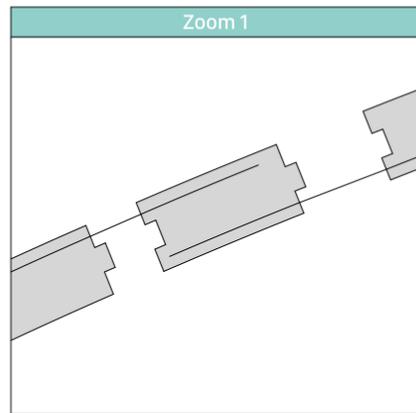
$$\delta_{\max} = L/200 = 0,7 \text{ m}$$

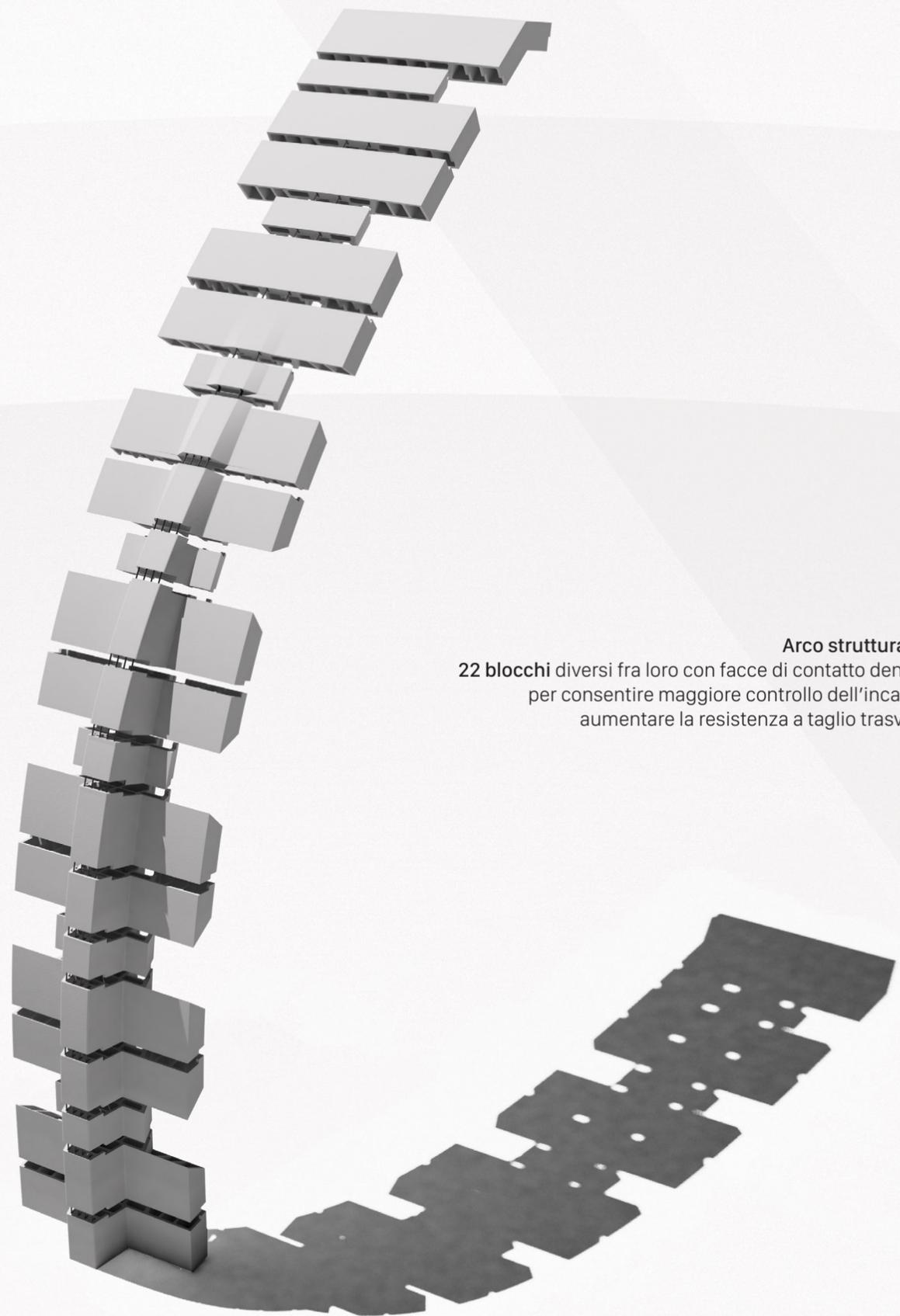
mentre quelle orizzontali sono

$$\delta_{\max} = h/150 = 0,3 \text{ m}$$

come si può notare, l'arco preso in esame è ampiamente verificato per entrambi i tipi di spostamento. Il fatto di riportare valori così bassi sta ad indicare che i carichi a cui è sottoposto, sia propri che variabili, sono di piccola entità, anche perché si tratta di una struttura ad un unico piano fuori terra, curva e con ottimi requisiti di resistenza.







**Arco strutturale** [201]  
 22 blocchi diversi fra loro con facce di contatto dentellate, per consentire maggiore controllo dell'incastro ed aumentare la resistenza a taglio trasversale.

# TRAVE DI FONDAZIONE

## CENNI STORICI

Per dimensionare la trave di fondazione dell'edificio è necessario far riferimento al modello di trave elastica su suolo elastico, governata dall'equazione differenziale seguente:

$$-EI \cdot (d^4v / dx^4) + p(x) = 0$$

dove

$$p(x) = q(x) - r(x)$$

con

$q(x)$  carico distribuito sulla trave;

$r(x)$  reazione del terreno.

Si ipotizza che il terreno reagisca con una reazione vincolare distribuita verso l'alto, assimilando perciò la trave rovescia a una trave su più appoggi, con carico distribuito variabile. La reazione vincolare del terreno,  $r(x)$ , è pari a:

$$r(x) = k(x) \cdot b \cdot v$$

dove

$v$  spostamento verticale;

$b$  larghezza della trave;

$k(x)$  rigidezza del suolo.

Esistono 2 ipotesi per rendere plausibile il modello:

- la  $k$  del terreno è costante (ogni molla non trasmette sforzi tangenziali a quelle laterali);
- gli spostamenti sono tutti verso il basso dato che il terreno non è un vincolo bilatero (cioè non lavora a trazione).

Se tali ipotesi vengono rispettate, si può utilizzare il modello di suolo alla Winkler:

$$-EI \cdot (d^4v / dx^4) + (kb) \cdot v = q(x)$$

ponendo  $\alpha = \sqrt[4]{(kb / 4EI)}$  si ottiene:

$$(d^4v / dx^4) + 4\alpha^4 v = q(x) / EI$$

La risoluzione dell'equazione differenziale è composta dall'integrale particolare e dall'omogenea associata:

$$v = v_g + v_p$$

Risolvendo la seguente omogenea associata  $v_g$ :

$$(d^4v_g / dx^4) + 4\alpha^4 v_g = 0$$

si trovano le 4 soluzioni (2 reali e 2 immaginarie) e inoltre, utilizzando l'identità di Eulero, riordinando e rinominando le costanti di integrazione si ottiene:

$$v_g = e^{\alpha x} [A \cdot \sin(\alpha x) + B \cdot \cos(\alpha x)] + e^{-\alpha x} [C \cdot \sin(\alpha x) + D \cdot \cos(\alpha x)]$$

mentre l'integrale particolare è il seguente:

$$v_p = q(x) / EI$$

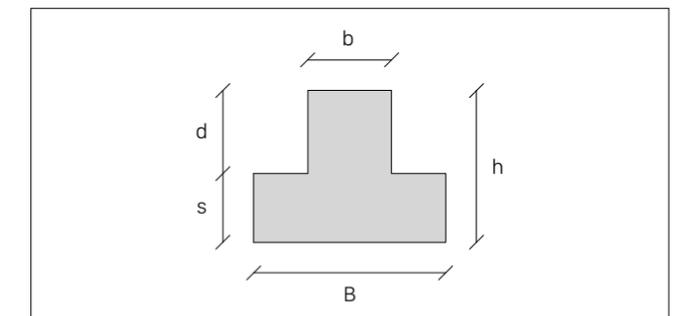
Viene anche definita la grandezza  $\lambda$ , lunghezza d'onda, che è la distanza oltre la quale la soluzione non risente più del carico: oltre tale distanza la soluzione dell'equazione differenziale si semplifica dato che due costanti di integrazione diventano nulle:

$$\lambda = 2\pi \sqrt[4]{(4EI / kb)}$$

Tuttavia, in generale, per le travi di fondazione l'interesse è sempre ben minore della lunghezza d'onda, oltre la quale la soluzione si smorza.

## CALCOLO DELLA SEZIONE MINIMA AMMISSIBILE DELLA TRAVE DI FONDAZIONE

Le fondazioni dell'edificio in esame sono costituite da travi che seguono l'andamento della struttura in elevazione. In corrispondenza dei pilastri di estremità, la trave viene prolungata di uno sbalzo per conferire una migliore distribuzione dei carichi. Nello schema seguente è riportata l'ipotesi di sezione trasversale.



Per il calcolo della larghezza del sottofondo B si utilizza la seguente relazione, ipotizzando che la trave sia infinitamente rigida e che i carichi centrati sulla trave non abbiano rilevante eccentricità; inoltre viene trascurato il peso proprio della stessa.

$$B = (\sum N) / \sigma \cdot L_{TOT}$$

dove

$\sum N$  sommatoria dei carichi applicati alla trave;  
 $\sigma$  tensione media sul terreno accettabile allo SLU;  
 $L_{TOT}$  lunghezza totale della trave.

Si assume come carico ammissibile sul terreno  $\sigma_t = 0,17$  N/mm<sup>2</sup>; si ottiene quindi:

$$B = 1609705 / (0,17 \cdot 24000) = \mathbf{394,5 \text{ mm}}$$

Per tenere conto dell'effettiva flessibilità della trave reale, il valore ottenuto può essere aumentato del 15-20%. Quindi  $B = 473,4 \text{ mm} \approx 500 \text{ mm}$ . Si assume quindi:

$$B = \mathbf{50 \text{ cm}}$$

L'altezza  $h$  della fondazione viene dimensionata con riferimento alla verifica a taglio. Il taglio massimo può essere stimato come il 60% della massima forza applicata alla trave; cioè:

$$V_{Rd} = 0,6 \cdot 184,55 = \mathbf{110,73 \text{ kN}}$$

La resistenza a taglio di una sezione si calcola nel seguente modo (par. 4.1.2.1.3.2 NTC):

$$V_{Rd} = 0,9 \cdot b \cdot d \cdot f'_{cd} \cdot \lambda_1 / (1 + \lambda_1^2)$$

dove

$b$  larghezza dell'anima della trave;  
 $d = h - s$  altezza dell'anima;  
 $f'_{cd}$  resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo che, per un calcestruzzo C25/30 è pari a:  
 $f'_{cd} = f_{ck} / \lambda_c = 12,97 \text{ MPa}$

con

$f_{ck} = 0,83 \cdot 25$   
 $\lambda_c$  coefficiente parziale caratteristico della resistenza a compressione uniassiale delle rocce, pari a 1,6;  
 $\lambda_1 = \cotg\theta = 2$  (par. 4.1.2.1.3.2 NTC)

dove

$\theta < 45^\circ$  orientamento del flusso delle compressioni d'anima.

Quindi:

$$V_{Rd} = 0,4 \cdot 0,9 \cdot b \cdot d \cdot 6,48$$

$$110730 = 2,33 \cdot b \cdot d$$

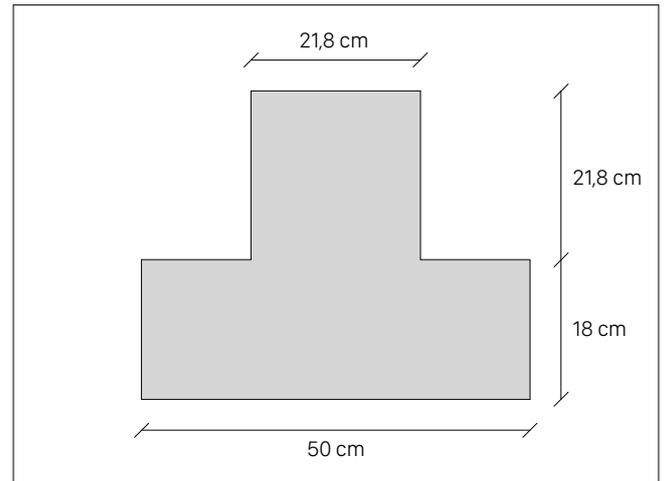
$$b \cdot d = 47523,6 \text{ mm}^2$$

$$\sqrt{475,236} = 21,8 \text{ cm}$$

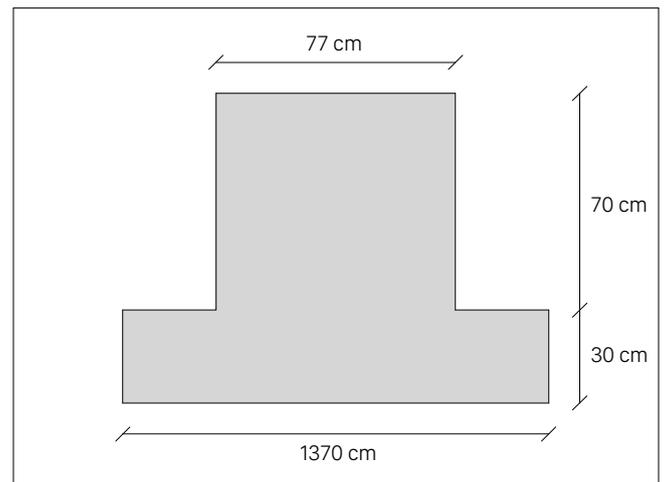
$$b = 21,8 \text{ cm}$$

$$d = 21,8 \text{ cm}$$

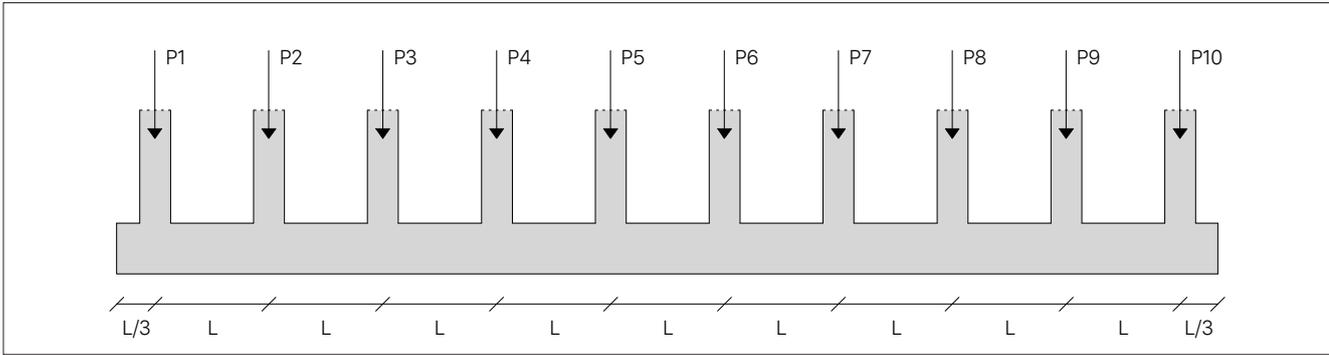
Il seguente grafico mostra le dimensioni complessive della sezione minima ammissibile della trave di fondazione (scala 1:10).



Ma, poiché la dimensione trasversale massima della base dell'arco strutturale è di 770 mm, la sezione della trave di fondazione deve essere conforme e quindi si ipotizza la seguente. Questa, essendo maggiore di quella calcolata, va anche a favore della sicurezza (scala 1:25).



Successivamente è stata schematizzata la trave nel seguente modo e si è assegnata ad ogni campata una coordinata differente, che identifica la relativa funzione: v1 (x1), v2 (x2), v3 (x3), v4 (x4), v5 (x5), v6 (x6), v7 (x7), v8 (x8), v9 (x9), v10 (x10), v11 (x11), con relative costanti di integrazione Ai, Bi, Ci, Di, con i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11.



## RISOLUZIONE DELL'EQUAZIONE DIFFERENZIALE

Per definire le costanti di integrazione si è dovuto porre 40 condizioni al contorno:

$$\begin{aligned}
 v_1'''(0) &= 0 \\
 v_1''''(0) &= 0 \\
 v_1(L/3) - v_2(0) &= 0 \\
 v_1'(L/3) - v_2'(0) &= 0 \\
 v_1'''(L/3) - v_2'''(0) &= P_1/EI \\
 v_1''''(L/3) - v_2''''(0) &= 0 \\
 v_2(L) - v_3(0) &= 0 \\
 v_2'(L) - v_3'(0) &= 0 \\
 v_2'''(L) - v_3'''(0) &= P_2/EI \\
 v_2''''(L) - v_3''''(0) &= 0 \\
 v_3(L) - v_4(0) &= 0 \\
 v_3'(L) - v_4'(0) &= 0 \\
 v_3'''(L) - v_4'''(0) &= P_3/EI \\
 v_3''''(L) - v_4''''(0) &= 0 \\
 v_4(L) - v_5(0) &= 0 \\
 v_4'(L) - v_5'(0) &= 0 \\
 v_4'''(L) - v_5'''(0) &= P_4/EI \\
 v_4''''(L) - v_5''''(0) &= 0 \\
 v_5(L) - v_6(0) &= 0 \\
 v_5'(L) - v_6'(0) &= 0 \\
 v_5'''(L) - v_6'''(0) &= P_5/EI \\
 v_5''''(L) - v_6''''(0) &= 0 \\
 v_6(L) - v_7(0) &= 0 \\
 v_6'(L) - v_7'(0) &= 0 \\
 v_6'''(L) - v_7'''(0) &= P_6/EI \\
 v_6''''(L) - v_7''''(0) &= 0 \\
 v_7(L) - v_8(0) &= 0 \\
 v_7'(L) - v_8'(0) &= 0 \\
 v_7'''(L) - v_8'''(0) &= P_7/EI \\
 v_7''''(L) - v_8''''(0) &= 0 \\
 v_8(L) - v_9(0) &= 0 \\
 v_8'(L) - v_9'(0) &= 0 \\
 v_8'''(L) - v_9'''(0) &= P_8/EI \\
 v_8''''(L) - v_9''''(0) &= 0 \\
 v_9(L) - v_{10}(0) &= 0 \\
 v_9'(L) - v_{10}'(0) &= 0 \\
 v_9'''(L) - v_{10}'''(0) &= P_9/EI
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 v_9''(L) - v_{10}''(0) &= 0 \\
 v_{10}'(L) - v_{11}'(0) &= 0 \\
 v_{10}(L) - v_{11}(0) &= 0 \\
 v_{10}'''(L) - v_{11}'''(0) &= P_{10}/EI \\
 v_{10}''''(L) - v_{11}''''(0) &= 0 \\
 v_{11}'(L) - v_{12}'(0) &= 0 \\
 v_{11}(L) - v_{12}(0) &= 0
 \end{aligned}$$

dove \$v, v', v''\$ e \$v'''\$ sono le seguenti (ottenute mediante programma di calcolo):

### Spostamento \$v\$

$$b \cdot e^{ax} \cdot \cos(ax) + a \cdot e^{ax} \cdot \sin(ax) + d \cdot e^{ax} \cdot \cos(ax) + c \cdot e^{ax} \cdot \sin(ax)$$

### Curvatura \$v''\$

$$a \cdot a \cdot e^{ax} \cdot \cos(ax) + b \cdot a \cdot e^{ax} \cdot \cos(ax) + a \cdot a \cdot e^{ax} \cdot \sin(ax) - b \cdot a \cdot e^{ax} \cdot \sin(ax) + c \cdot a \cdot e^{ax} \cdot \cos(ax) - d \cdot a \cdot e^{ax} \cdot \cos(ax) - c \cdot a \cdot e^{ax} \cdot \sin(ax) - d \cdot a \cdot e^{ax} \cdot \sin(ax)$$

### Momento \$v'''\$

$$2 \cdot a \cdot a^2 \cdot e^{ax} \cdot \cos(ax) - 2 \cdot b \cdot a^2 \cdot e^{ax} \cdot \sin(ax) - 2 \cdot c \cdot a^2 \cdot e^{ax} \cdot \cos(ax) + 2 \cdot d \cdot a^2 \cdot e^{ax} \cdot \sin(ax)$$

### Taglio \$v''''\$

$$2 \cdot a \cdot a^3 \cdot e^{ax} \cdot \cos(ax) - 2 \cdot b \cdot a^3 \cdot e^{ax} \cdot \cos(ax) - 2 \cdot a \cdot a^3 \cdot e^{ax} \cdot \sin(ax) - 2 \cdot b \cdot a^3 \cdot e^{ax} \cdot \sin(ax) + 2 \cdot c \cdot a^3 \cdot e^{ax} \cdot \cos(ax) + 2 \cdot d \cdot a^3 \cdot e^{ax} \cdot \cos(ax) + 2 \cdot c \cdot a^3 \cdot e^{ax} \cdot \sin(ax) - 2 \cdot d \cdot a^3 \cdot e^{ax} \cdot \sin(ax)$$

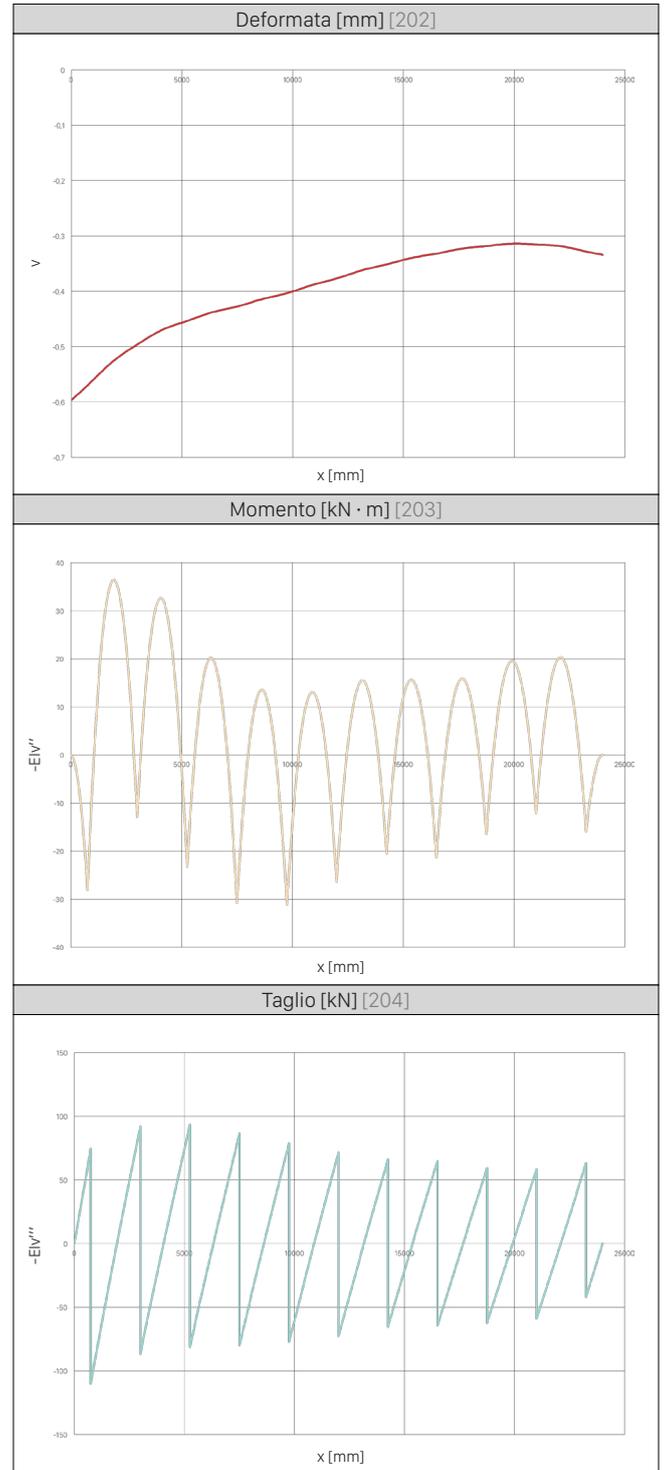
e riorganizzando i coefficienti relativi alle costanti di integrazione, si ottiene la matrice A con la relativa matrice dei termini noti B. (in allegato)

Per trovare la matrice C delle costanti di integrazione si è utilizzata la seguente formula:

$$[C] = [A]^{-1} \cdot [B]$$

Matrice C delle costanti di integrazione	
a1	0,02610469
b1	-0,272106515
c1	0,02610469
d1	-0,324315896
a2	-0,064326617
b2	-0,144935472
c2	-0,103581346
d2	-0,424053512
a3	-0,060649668
b3	-0,141298745
c3	-0,078618628
d3	-0,354076999
a4	-0,056371364
b4	-0,134174334
c4	-0,088863429
d4	-0,318916718
a5	-0,052002745
b5	-0,125187729
c5	-0,094999867
d5	-0,302092656
a6	-0,048551334
b6	-0,11495014
c6	-0,092100462
d6	-0,288198811
a7	-0,046751594
b7	-0,1058399
c7	-0,083612862
d7	-0,270682817
a8	-0,044683933
b8	-0,102104298
c8	-0,07334044
d8	-0,249059316
a9	-0,045180462
b9	-0,095144469
c9	-0,074956809
d9	-0,236661454
a10	-0,048660532
b10	-0,09297852
c10	-0,071612947
d10	-0,225234312
a11	-0,052955694
b11	-0,09930567
c11	-0,069802538
d11	-0,216004562
a12	-0,03805402
b12	-0,12759019
c12	-0,060240407
d12	-0,200444082

Una volta trovate le costanti di integrazione, si è calcolata l'omogenea associata per l'equazione differenziale ( $v_g$ ). È anche presente la soluzione particolare che, associata a quella omogenea, risolve in modo completo l'equazione differenziale. Perciò è possibile trovare la deformata, i momenti e i tagli in funzione delle coordinate:  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}$ .



## CALCOLO DELLE ARMATURE LONGITUDINALI DELL'ANIMA DELLA TRAVE

Posto un copriferro di 4 cm, l'area dei ferri non deve essere minore dei seguenti minimi da normativa:

$$A_{S_{min}} = 0,26 \cdot f_{ctm} / f_{yk} \cdot b \cdot d$$

o comunque, non deve essere minore di  $0,0013 \cdot b \cdot d$ .

dove

$b = 77$  cm;

$d = 100 - 4 = 96$  cm;

$f_{ctm} = (0,27 \cdot \sqrt{R_{ck}}^2) / \gamma_c = 2,61$  resistenza media a trazione del calcestruzzo ( $R_{ck} = 30$ );

$f_{yk} = 450$  tensione caratteristica dell'acciaio (da ferro B450C).

Quindi:

$$A_{S_{min}} = 0,26 \cdot 2,61 / 450 \cdot 77 \cdot 96 = 11,15 \text{ cm}^2 > 0,0013 \cdot 77 \cdot 96 = 9,61 \text{ cm}^2$$

Calcolo dell'area reale dei ferri di armatura a flessione:

$$A_s = M_{sd} \cdot 1,43 / 0,9 \cdot f_{yd} \cdot d$$

dove

$$f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s = 450 / 1,15 = 391,3 \text{ MPa}$$

Sezione	$M_{sd}$ [kN · m]	$A_s$ [cm <sup>2</sup> ]	Armatura	$A_s$ effettiva [cm <sup>2</sup> ]
Appoggio B	28,08	118,86	3φ8	151
Campata BC	36,3	153,65	4φ8	201
Appoggio C	18,85	54,39	2φ6	56,5
Campata CD	32,53	137,69	3φ8	151
Appoggio D	23	97,35	2φ8	101
Campata DE	20,13	85,2	2φ8	101
Appoggio E	30,76	130,20	3φ8	151
Campata EF	13,25	56,08	3φ6	84,8
Appoggio F	31,16	131,9	3φ8	151
Campata FG	12,94	54,77	3φ6	84,8
Appoggio G	26,37	111,62	3φ8	151
Campata GH	15,48	65,52	3φ6	84,8
Appoggio H	20,5	86,77	2φ8	101
Campata HI	15,67	66,33	3φ6	84,8
Appoggio I	21,3	90,16	2φ8	101
Campata IL	15,86	67,13	3φ6	84,8
Appoggio L	16,42	69,5	3φ6	84,8
Campata LM	19,53	82,66	2φ8	101
Appoggio M	12,05	51	3φ6	84,8

## CALCOLO DELLE ARMATURE TRASVERSALI DELL'ANIMA DELLA TRAVE

Per calcolare le armature trasversali della trave, come da normativa (cap.4, par.4.1.2.1.3.1 NTC), si deve verificare la resistenza a taglio (SLU), ipotizzando elementi senza armature trasversali resistenti a taglio. Se questa verifica viene soddisfatta, l'elemento non necessiterà di armature trasversali a meno di quelle minime da normativa. La verifica di resistenza (SLU) si pone con:

$$V_{Rd} \geq V_{Ed}$$

dove  $V_{Ed}$  è il valore di calcolo dello sforzo di taglio agente. Con riferimento all'elemento fessurato da momento flettente, la resistenza al taglio si valuta con:

$$V_{Rd} = [0,18 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{1/2} / \gamma_c] \cdot b \cdot d \geq v_{min} \cdot b \cdot d$$

con

$$k = 1 + (200/d)^{1/2} = 1,44 \leq 2;$$

$$v_{min} = 0,035 \cdot k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2};$$

$f_{ck}$  tensione caratteristica a rottura del calcestruzzo (25 MPa);

$$\gamma_c = 1,5;$$

$\rho_1 = A_{sl} / (b \cdot d)$  rapporto geometrico di armatura longitudinale ( $\leq 0,02$ );

$d$  altezza utile della sezione;

$b$  larghezza minima della sezione.

Nella seguente tabella vengono riportati i valori massimi di taglio per ogni campata della trave con relativa verifica:

Campata	Lunghezza [cm]	$V_{sd}$ [kN]	$A_{sl}$ [cm <sup>2</sup> ]	$\rho_1$	$V_{Rd}$ [kN]	Verifica $V_{Rd} \geq V_{sd}$
AB	75	74,311	151	0,02	473,9	si
BC	225	110,24	201	0,027	521,3	si
CD	225	93,38	151	0,02	473,9	si
DE	225	86,42	101	0,014	414,4	si
EF	225	79,87	84,8	0,011	391	si
FG	225	77,4	84,8	0,011	391	si
GH	225	72,8	84,8	0,011	391	si
HI	225	65,34	84,8	0,011	391	si
IL	225	64,52	84,8	0,011	391	si
LM	225	62,27	101	0,014	414,4	si

Dai calcoli effettuati si evince che la trave non necessita di armatura a taglio, ma solo del minimo da normativa.

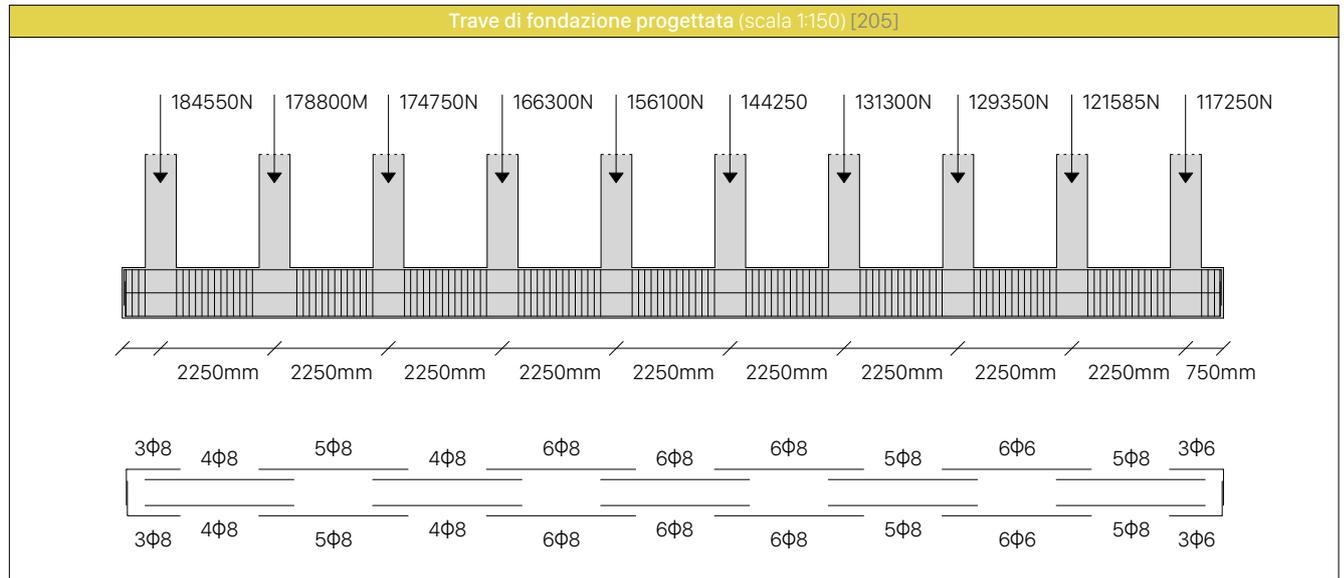
### CALCOLO STAFFATURA MINIMA DA NORMATIVA

Come da normativa (cap.4, par.4.1.8.2.2 NTC), nella trave dovranno disporsi staffe aventi sezione complessiva  $\geq 1,5 \cdot b$  ( $\text{mm}^2/\text{m}$ ), essendo  $b$  lo spessore minimo dell'anima in mm, con un minimo di 3 staffe al metro e comunque con un passo non superiore a 0,8 volte l'altezza utile della sezione ( $d$ ). Quindi:

$$A_{s\text{min}} = 77 \cdot 1,5 = 115,5 \text{ cm}^2/\text{m}$$

il passo  $< 0,8 \cdot d = 0,8 \cdot 96 = 76,8 \text{ cm}$ .

Si sono adottate quindi 8 staffe di diametro  $\phi 10$  a 2 bracci di area  $A_{sw} = 1,58 \text{ cm}^2$  l'una. L'area complessiva risulta essere  $126,4 \text{ cm}^2/\text{m}$ , che è maggiore di  $A_{s\text{min}}$ . Il passo al metro risulta  $100/8 = 12,5 \text{ cm}$ , che è minore di  $76,8 \text{ cm}$ . Nel caso in esame, in ciascuna campata di lunghezza 225 cm si disporranno 18 staffe con passo di  $12,5 \text{ cm}$ .



## TIRANTE FRA LE TRAVI DI FONDAZIONE

Per precauzione, per contrastare al massimo la spinta laterale degli archi che compongono la struttura, si è pensato di inserire dei tiranti all'imposta dell'arco. Il tipo di acciaio scelto in questo caso è quello di qualità S275JR, che è un acciaio da costruzione molto diffuso con buone capacità di saldabilità e discrete caratteristiche meccaniche. Per dimensionare la sezione del tirante si è fatto sempre riferimento all'arco studiato in precedenza, seguendo quanto riportato in normativa:

$$A_s = V_{sd} / (f_{yk} / \gamma_{M0})$$

dove

$V_{sd}$  valore del taglio di progetto valutato alla base dell'arco (SLU), pari a 33,61 kN;

$f_{yk}$  coefficiente di tensione caratteristica di snervamento dell'acciaio utilizzato ed è pari a 275 N/mm<sup>2</sup>;

$\gamma_{M0}$  fattore parziale relativo al modello di resistenza delle sezioni di classe 1,2,3,4 ed è pari a 1,05.

Quindi:

$$A_s = 128,3 \text{ mm}^2$$

Si è considerato, perciò, un tirante di diametro  $\phi 16$  in corrispondenza di ogni arco componente la struttura. Esso presenta le seguenti caratteristiche tecniche:

- Limite di snervamento  $R_{ek} = 275 \text{ MPa}$  minimo;
- Resistenza a trazione minima  $R_m = 410 \text{ MPa}$ ;
- Resistenza a trazione massima  $R_M = 560 \text{ MPa}$ ;
- Allungamento minimo  $A = 23\%$

# CALCOLO SEZIONE MONTANTE VETRATA

La vetrata del padiglione è caratterizzata da:

$$h_{MAX} = 7 \text{ m};$$

$$L_{vetri} = 1,42 \text{ m}.$$

## CALCOLO PRESSIONE DEL VENTO OGNI METRO

Come detto in precedenza, la velocità di riferimento del vento è:

$$V_b = 28 \text{ m/s}$$

Pressione del vento:

$$p = q_b \cdot c_e \cdot c_p \cdot c_d$$

dove

$$q_b = 1/2 \cdot \rho \cdot V_b^2;$$

$\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$  densità dell'aria;

quindi  $q_b = 490 \text{ N/m}^2$ .

Nella tabella seguente si riportano i valori del coefficiente di esposizione  $c_e$  per ogni metro di altezza della vetrata:

Z [m]	$c_e$	$p$ [kN/m <sup>2</sup> ]
1	0,8556	0,50
2	1,20	0,71
3	1,4144	0,83
4	1,5836	0,93
5	1,70	1,00
6	1,82	1,07
7	1,92	1,13

Il carico di vento calcolato con il software STRAUSS7 è il seguente:

$$Q_{SLE} = 7,84 \text{ kN/m}$$

$f = 1/200$  freccia.

$$f = (5 \cdot Q_{SLE} \cdot L^4) / 384 \cdot E \cdot J$$

da cui:

$$J = (5 \cdot 200 \cdot Q_{SLE} \cdot L^4) / 384 \cdot E = 3,335 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4.$$

$Q_{SLU} = 11,76 \text{ kN/m}$  (valore da STRAUSS7).

La verifica si effettua tramite la seguente disuguaglianza:

$$M_{Ed} / M_{c,Rd,1} \leq 1$$

Il valore di progetto  $M_{Ed} = 48,02 \text{ kNm}$ .

$$W_{pl} = (M_{c,Rd,1} \cdot \gamma_{M0}) / f_{yk} = (M_{Ed} \cdot \gamma_{M0}) / \gamma_{yk} = 0,0183 \text{ m}^3$$

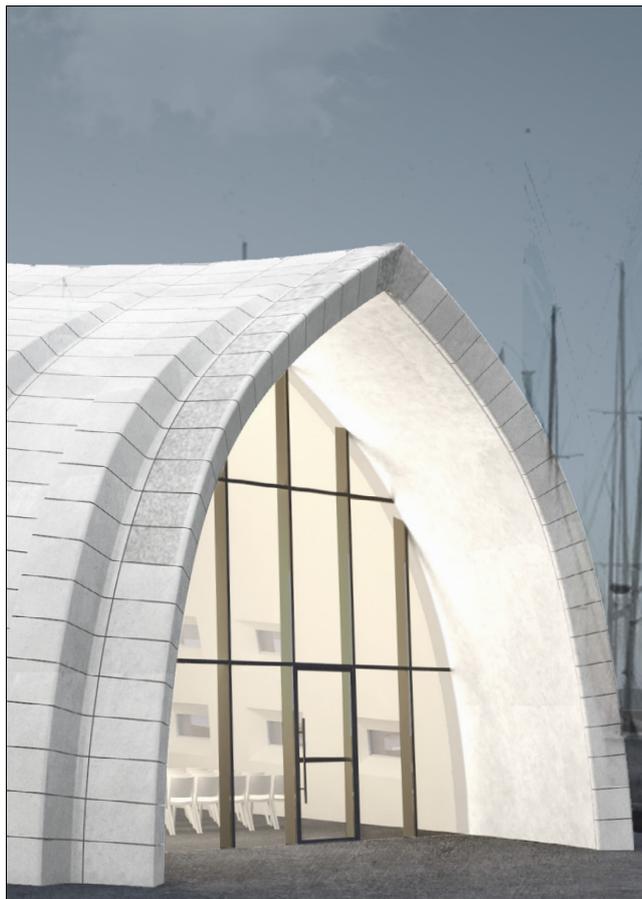
Da questi calcoli si ottiene un profilo di dimensioni 300x100 mm.

Il modulo plastico del profilo = 227,48 cm<sup>3</sup>.

$$M_{cRd} = (W_{pl} \cdot f_{yk}) / \gamma_{M0} = 59,6 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed} / M_{c,Rd,1} = 48,02 / 59,6 = 0,8 \leq 1$$

Il profilo definito precedentemente è verificato.



[206]

# MATERIALI A CONFRONTO

Per meglio capire se l'ipotesi di realizzare dei manufatti architettonici in calcestruzzo è realizzabile, sono stati compiuti degli studi sullo stato dell'arte relativo all'impiego di questo materiale attraverso la stampa 3D. La nostra ricerca, oltre ad indagare ed approfondire ulteriormente questo aspetto, si focalizza nel mettere a confronto differenti materiali che sono stati provati e messi in opera, portand in luce i relativi pregi e difetti.

I documenti scientifici da cui sono tratti i paragrafi seguenti sono:

- A. Jakupovic, Large scale additive manufacturing, Università degli studi di Trieste, Tesi di laurea, 2012/2013
- D. Asprone, F. Auricchio, M. Iuorio, C. Menna, M. Pellecchia, Stampa 3D di elementi strutturali in c.a.: tecnologia ed approccio progettuale, Articolo di giornale, Novembre 2015.

## **MATERIALE 1 : SABBIA DOLOMIA STAMPA CON TECNOLOGIA BINDER GETTING (D-SHAPE)**

All'inizio l'Ingegnere Enrico Dini aveva brevettato un sistema basato sull'uso di una resina epossidica spruzzata da un ugello su uno strato di sabbia depositato su un perimetro chiuso. Subito ha ottenuto ottimi risultati in termini di risoluzione di stampa, ma il prodotto finale era un oggetto costoso, infiammabile e molto inquinante. Le resine epossidiche e poliuretane possono fungere perfettamente da legante ma non sono ecosostenibili sia per ragioni di produzione, sia per gli sprechi durante la lavorazione e inoltre producono una materia finale infiammabile e rilasciano un gas tossico; necessitano anche di un preciso rapporto fra il legante e il materiale granulare che aumenta notevolmente i costi di produzione delle testine atte a depositare il legante stesso, gli ugelli hanno bisogno di una frequente manutenzione, pulizia e sostituzione periodica delle componenti nelle quali si mescolano i leganti. Un altro svantaggio dell'uso di resine come legante è il basso modulo di elasticità del conglomerato finale, il quale crea una forte deformabilità della struttura.

Perciò Dini, abbandonato questo metodo, ha iniziato una ricerca di un legante che potesse essere inorganico, economico ed ecologico e con bassa viscosità per poterlo

utilizzare come "inchiostro" e capace di dare le giuste caratteristiche meccaniche al conglomerato. Questo "inchiostro" si costituisce di due componenti chimici che diventano un adesivo resistente quando sono mescolati assieme. Viene inoltre aggiunto un aggregato alla miscela per dare al prodotto finale una struttura che viene catturata dalla matrice adesiva. Il volume finale è per lo più composto dall'aggregato (70-75%), con solamente una piccola frazione di materiale adesivo (10-20%), mentre la percentuale rimanente è fatta di vuoti, che sono un aspetto caratteristico delle tecnologie della Manifattura Additiva. Il sistema attuale usa tre tipi di sabbia aggregante per la procedura di stampa:

sabbia di calcari dolomitici;

sabbia di granito;

sabbia pozzolanica.

Sebbene questi materiali sono considerati semplicemente strutturali, data la loro gradazione di terra fine e le loro proprietà chimiche, esse possono potenzialmente interferire con il processo di compattazione ed inoltre aumentarne l'effetto. Questo può comportare un aumento delle proprietà meccaniche e comunque queste reazioni devono ancora essere studiate e il sistema non fa affidamento sul loro contributo.

Come suddetto, il collante è composto da due materiali separati; il primo è ossido di magnesio in polvere e quindi viene mescolato insieme all'aggregato per formare il letto di polvere. La miscela di polvere è composta dal 16% di ossido di magnesio e dall'84% di sabbia. Un componente opzionale di circa l'1% di fibre può essere aggiunto nella miscela per aumentare le proprietà meccaniche. Il secondo componente è una soluzione acquosa di cloruro di magnesio che può essere ottenuto dall'acqua di mare. Il materiale che si forma dalla reazione chimica dei due composti è noto come Sorel Cement o Magnesia Cement. La reazione è estremamente rapida e il materiale indurisce in poche ore producendo una sostanziale resistenza alla compressione di parecchio superiore a quella del tradizionale Cemento Portland. Tuttavia esso presenta un grande svantaggio nella scarsa resistenza all'acqua.

L'ossido di Magnesio può essere ottenuto attraverso il processo di calcinazione del carbonato di magnesio, dove le caratteristiche del prodotto finale variano a seconda del-

le dimensioni delle particelle, della temperatura e dalla presenza di impurità. I cementi a base di magnesio sono in grado di legare con una grande varietà di aggregati, come: fibre di legno, ghiaia, sabbia, fibre varie, ecc.) Essi si trovano di solito nel settore delle costruzioni per la preparazione del marmo artificiale, pannelli, isolanti termici, ecc.

Questo materiale è stato già abbondantemente testato per realizzare costruzioni ad alta scala, ma presenta ancora qualche difetto che lo rende inadatto. Come spiegato in precedenza, uno dei maggiori problemi è l'alta porosità dalla quale nascono varie altre complicazioni. È stata quindi ipotizzata una procedura di impregnazione per migliorare le caratteristiche del materiale e sarebbe inoltre necessaria una ricerca per quantificare alcune altre caratteristiche, come l'anisotropia. A questo scopo, Anes Jakupovic (studente dell'Università di Trieste), nel 2013, ha effettuato dei test specifici sul materiale. In particolare ha eseguito diverse prove per valutare l'assorbimento di acqua da parte del materiale, la resistenza a compressione, la resistenza a flessione e il modulo elastico. Queste sono state condotte su 37 provini, ottenuti da due pezzi stampati in 3D da Dinitech SpA, la compagnia che possiede le stampanti D-Shape e per migliorarne le proprietà meccaniche e idrauliche, questi sono stati impregnati con un primer. I risultati sono stati ottenuti mettendo a confronti i provini impregnati e quelli senza primer.

Dalle prove di compressione monoassiale, Anes ha ottenuto i risultati riportati nella tabella della pagina seguente e ha notato un sostanziale incremento della resistenza a compressione rispetto agli studi precedenti su cui si è basato per iniziare la sua ricerca. C'è inoltre una certa oscillazione tra i valori di differenti provini, poiché gli strati che li compongono si sono induriti diversamente. Il materiale ha ancora un certo grado di eterogeneità che è stata probabilmente una delle maggiori cause di influenza sui valori delle prove. Ci sono stati alcuni provini che hanno raggiunto valori di resistenza significativamente più bassi, probabilmente a causa di mancanza di uniformità. La presenza di strati deboli all'interno dei provini ha contribuito alla formazione e alla propagazione di fratture. La più grande differenza è stata notata sui provini con gli strati orientati ortogonalmente alle forze di carico.

Anes si aspettava valori più bassi in questa particolare direzione, prevedendo una resistenza a trazione indiretta ridotta tra gli strati. Comunque i risultati delle prove hanno mostrato completamente l'opposto. I valori sono stati non solo nell'ordine di grandezza dei provini con il carico parallelo, ma generalmente sono stati più alti. È stato molto probabile che una buona forza di coesione tra gli strati è avvenuta quando è stato depositato il componente liquido del materiale D-Shape. È stata notata, inoltre, una differenza nel comportamento a frattura, poiché i provini

	Provino	Superficie compressa [mm]	Resistenza del provino [kg]	Resistenza del provino [N]	Forza uniassiale di compressione [N/mm <sup>2</sup> ]	
Forza ortogonale agli strati	Senza primer	1	2544,9	9500	93195	36,6
		2	2431,0	12150	119192	49,0
		3	2442,3	13550	132926	54,4
		·	2502,5	13850	135869	54,3
	Con primer	4	2432,9	11950	117230	48,2
		5	2465,1	7850	77009	31,2
		6	2435,1	11350	111344	45,7
		:	2454,4	10800	105948	43,2
Forza parallela agli strati	Senza primer	1	2443,5	15500	152055	62,2
		2	2448,7	16350	160394	65,5
		3	2429,4	10050	98591	40,6
		·	2456,4	16600	162846	66,3
	Con primer	4	2422,8	14950	146660	60,5
		5	2466,1	7700	75537	30,6
		6	2449,3	15900	155979	63,7
		:	2421,9	15550	152546	63,0

Risultati della prova a compressione ← A. Jakupovic, *Large scale additive manufacturing*, Università degli studi di Trieste, Tesi di laurea, 2012/2013

impregnati avevano una spaccatura meno istantanea e i frammenti erano più predisposti a stare incollati insieme quando avveniva il punto di frattura. Il comportamento può essere approssimativamente descritto come più viscoso, con una più lenta e meno dirimpante propagazione delle fratture. Tuttavia il comportamento non è assolutamente plastico, poiché la frattura è stata fragile, con una sostanza adesiva viscosa che manteneva i frammenti insieme. Questo insolito comportamento potrebbe essere causato da un'interazione chimica tra il primer e il materiale.

In generale, i risultati delle prove sono stati soddisfacenti, specialmente per il grande aumento della resistenza a compressione e per la riduzione dell'anisotropia. Nella prova a flessione, sotto carico concentrato (tabella pagina seguente), ha notato che i valori di resistenza sono stati più che raddoppiati e la qualità del materiale si è rivelata eccezionale, così come la struttura interna più

compatta. Non ci sono forze di scissione che possono agire tra gli strati, ma esse agiscono sullo stesso piano. La sola differenza è un certo effetto di scorrimento tra gli strati dei provini con gli strati ortogonali. Ciò è causato dalle forze di taglio generate dentro i provini stessi, ortogonalmente al carico concentrato. Pertanto la vera natura anisotropica del materiale non può essere descritta usando solo queste 2 direzioni, ma sarebbe necessario un test nella terza. Alcuni provini non si sono rotti vicino al punto di carico, dove erano presenti i più alti valori di tensione.

Questo può essere stato causato dalla loro eterogeneità e dai loro numerosi punti di debolezza localizzati. I valori dei provini trattati con il primer sono stati sostanzialmente più bassi di quelli non trattati; inoltre il componente adesivo era presente all'interno della fessura di flessione e stesso manteneva uniti i due pezzi di provino.

Pressa Galdabini [207]



Provino non impregnato [208]



Provino impregnato [209]



Pressa Galdabini [210] ↔ A. Jakupovic, Large scale additive manufacturing, Università degli studi di Trieste, Tesi di laurea, 2012/2013

↔ A. Jakupovic, Large scale additive manufacturing, Università degli studi di Trieste, Tesi di laurea, 2012/2013

Infine dai risultati ottenuti dalla prova di impregnazione, Anes ha notato il colorante all'interno del primer si spingeva per non più di 1 cm all'interno del provino. Questo voleva dire che il materiale risultava maggiormente impermeabile.

	Provino		Resistenza totale [kN]	Valore a cella 0 [N]	Resistenza del provino [N]	Sforzo a flessione [N/mm <sup>2</sup> ]
Forza ortogonale agli strati	Senza primer	1	3,81	0,046	3807	13,8
		2	3,03	0,046	3027	11,0
		3	4,32	0,046	4322	15,8
	Con primer	4	2,68	0,046	2680	9,7
		5	2,53	0,046	2527	9,3
		6	2,12	0,046	2125	7,9
Forza parallela agli strati	Senza primer	1	4,31	0,046	4315	16,1
		2	4,07	0,046	4072	14,5
		3	3,88	0,046	3881	14,3
	Con primer	4	1,94	0,046	1938	7,1
		5	2,51	0,046	2511	9,3
		6	2,51	0,046	2507	9,2

Risultati della prova a flessione ← A. Jakupovic, Large scale additive manufacturing, Università degli studi di Trieste, Tesi di laurea, 2012/2013

Provino	Provini senza primer				Provini con primer			
	Massa asciutta [g]	Densità [g/cm <sup>2</sup> ]	Massa impregnata [g]	Assorbimento [%]	Massa asciutta [g]	Densità [g/cm <sup>2</sup> ]	Massa impregnata [g]	Assorbimento [%]
1	1424	1,99	1506	5,76	1436	2,01	1497	4,25
2	1430	2,00	1511	5,66	1440	2,02	1501	4,24
3	1399	1,96	1473	5,29	1407	1,97	1467	4,26
4	1409	1,97	1487	5,54	1417	1,98	1479	4,38

Risultati della prova a impregnazione ← A. Jakupovic, Large scale additive manufacturing, Università degli studi di Trieste, Tesi di laurea, 2012/2013

## MATERIALE 2 : CALCESTRUZZO STAMPA CON TECNOLOGIA FDM (WASP)

Altre persone, in Italia, che stanno portando avanti la ricerca sull'Additive Manufacturing in campo dell'edilizia, sono il team di insegnanti e ricercatori dell'Università Federico II di Napoli. La loro ricerca si basa sulla realizzazione di componenti strutturali di un manufatto edile, come travi, pilastri, ecc. in cemento armato. Il team ha realizzato una trave reticolare in blocchi di un materiale a base cementizia e rinforzata con armatura in acciaio. Di seguito si riportano i risultati della loro ricerca derivanti dall'articolo: "Stampa 3D di elementi strutturali in c.a.: tecnologia e approccio progettuale" di Domenico Asprone, Ferdinando Auricchio, Marco Iuorio, Costantino Menna e Marcello Pellicchia.

Il materiale che hanno utilizzato per la realizzazione della trave è sostanzialmente una malta cementizia che è stata progettata al fine di rispondere ad alcune esigenze in termini di proprietà fisico-meccaniche:

- una viscosità ottimale al fine di rendere la malta estraibile e "costruibile" (capace di essere stabilmente impilata a strati senza bisogno di supporto laterale, fun-

zione normalmente assicurata dai casseri)

- un'elevata resistenza, al fine di compensare il potenziale indebolimento nei punti di discontinuità lungo la linea di contatto tra layer adiacenti
- una dimensione massima dell'aggregato compatibile con il foro di estrusione pari a 25mm.

Considerati questi limiti, hanno progettato la malta è stata progettata e realizzata utilizzando un CEM 42,5R/A-LL, con un rapporto a/c=0,4 e un  $D_{max} = 2$  mm (dimensione massima dell'aggregato). Al fine di garantire un sufficiente mantenimento della viscosità più efficace per il tempo utile allo stampaggio la malta è stata additivata con un superfluidificante acrilico mentre sono state aggiunte fibre in polipropilene, 0,5% in peso, per controllare eventuali fenomeni di ritiro.

Al fine di valutare l'influenza del processo di stampaggio negli elementi stampati, i professori hanno modellato alcuni cilindri cavi al fine di stamparli e testarli a compressione in direzione assiale. Questi cilindri cavi sono stati progettati con una sezione trasversale, a parete singola con spessore di 25 mm, con un diametro di 200 mm, e con

un'altezza di 200 mm composta da 10 layer e dopo essere stati opportunamente rettificati, sono stati testati a compressione con una macchina a controllo di carico. Per ogni cilindro cavo è stata calcolata la sezione trasversale media, misurando e mediando più misure dei diametri interni ed esterni lungo l'altezza del cilindro, per poterla impiegare per calcolare lo sforzo massimo e quindi la resistenza a compressione media del materiale stampato risultata pari a  $f_{cpm}$  37,2 MPa. I valori di  $f_{cpm}$  misurati sono risultati inferiori del 16% rispetto alla resistenza a compressione cilindrica del materiale non stampato,  $f_{cm}$ . La riduzione di resistenza potrebbe essere funzione dei punti di criticità tra layer contigui. Da questi risultati, i professori hanno ipotizzato i fenomeni che potrebbero giustificare la riduzione di resistenza:

- un legame imperfetto tra i layer in grado di facilitare l'inizio della frattura del campione;

Cilindri in calcestruzzo stampato [211] [212] [213]



↳ D. Asprone, F. Auricchio, M. Iuorio, C. Menna, M. Pellicchia, *Stampa 3D di elementi strutturali in c.a.*, Novembre 2015



↳ D. Asprone, F. Auricchio, M. Iuorio, C. Menna, M. Pellicchia, *Stampa 3D di elementi strutturali in c.a.*, Novembre 2015

- una riduzione dello spessore della parete che può condurre ad una concentrazione di sforzo dando inizio alla rottura del campione.

Questa ricerca ha messo in evidenza alcuni aspetti critici che bisognerebbe approfondire, come le proprietà meccaniche del calcestruzzo stampato in FDM che possono risultare ridotte o variate a seguito del processo di stampa.

## ANT : PROVE EFFETTUATE IN LABORATORIO

### CONTROLLO DELLE TOLLERANZE DI STAMPA

Scegliere la tecnologia additiva da adottare per la stampa di elementi architettonici 3D, benché sembri una scelta semplice ed immediata, in realtà è un processo molto più complesso. Abbiamo quindi effettuato alcune prove, non relative alle proprietà meccaniche dei materiali, ma che servono a controllare le tolleranze di precisione di stampa, parametro importante per la realizzazione dei blocchi strutturali del progetto ANT.

Studiando a fondo le varie tecniche di stampa 3D siamo arrivati a sostenere che la migliore per la realizzazione di elementi prefabbricati ad hoc in cemento, o comunque con qualsiasi materiale granulare roccioso, come quelli da noi pensati, sia la Binder Getting (SLS), usata dall'ingegnere Enrico Dini con la sua stampante D-Shape. Sebbene questa tecnica sia la più idonea e la più precisa, si è riscontrato un forte problema di tolleranze dovuto sì alla precisione di stampa della macchina stessa, ma anche al materiale e soprattutto al legante utilizzato. Il nostro studio è consistito nel mettere a confronto provini realizzati con materiali differenti, sia granulari che leganti.

### MATERIALI TESTATI

Per fare le prove si sono utilizzate 5 miscele di materiali differenti:

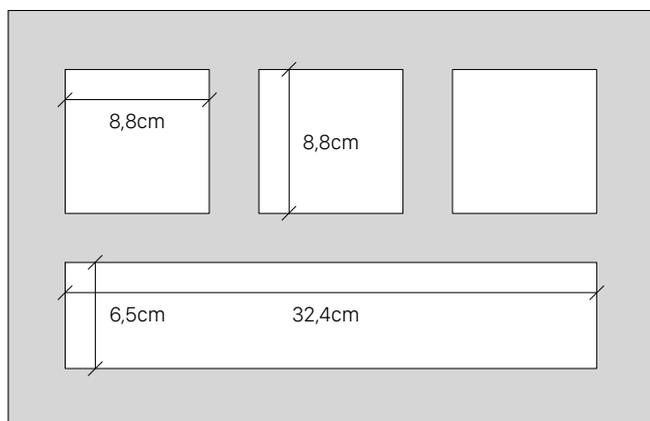
1. La miscela descritta all'inizio del capitolo e testata e utilizzata dall'azienda Dinitech SpA; composta cioè da 800 g di sabbia di fiume, 150 g di polvere di Magnesio e 50 g di cemento bianco additivato con acqua gettata a media pressione;
2. Una miscela di 800 g di sabbia di fiume caratterizzata da una granulometria fine e 200 g di cemento bianco (Italcementi), additivata con la minima quantità di acqua gettata alla minima pressione consentita dalla macchina;
3. Una miscela di 800 g di sabbia e 200 g di cemento bianco e l'1% di fibre di vetro additivata col minimo quantitativo d'acqua;
4. Una miscela di 800 g di sabbia e 200 g di cemento bianco, additivata con la massima quantità di un legante di origine alimentare in polvere diluito in acqua.

5. Una miscela di 800 g di sabbia, 200 g di cemento bianco e l'1% di fibre di vetro, additivata con 100 g di un legante di origine alimentare in 600 ml di acqua.

L'utilizzo di quest'ultimo legante di origine alimentare (di cui non è possibile svelare il nome perché è attualmente sottoposto a test) è stato pensato per verificare l'ipotesi che potesse accelerare di molto la presa del materiale granulare, riuscire a compattarlo meglio e quindi ad ottenere il minimo di tolleranza nello stampaggio.

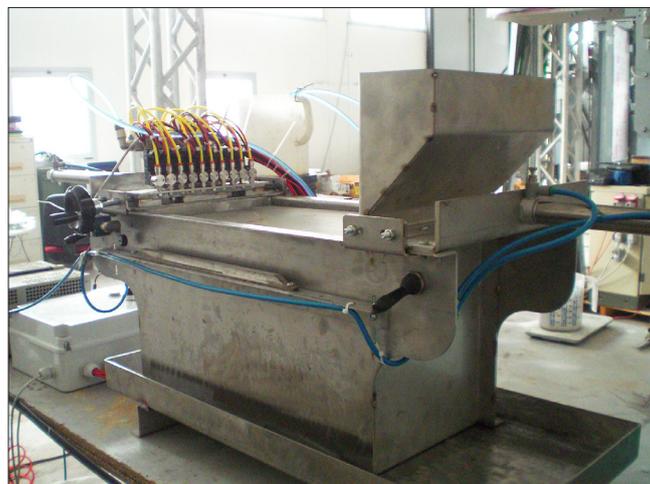
### LA PROVA

Le prove dei vari materiali sono state condotte realizzando dei provini inserendo una maschera delle seguenti dimensioni:



All'interno della Miniprinter D-Shape: macchina con area di stampa di 45x25 cm, azionata a motore elettrico, che riproduce la tecnica della Binter Getting che si realizza con la stampante più grande. Su uno dei due lati minori della stampante vi è una sorta di "imbuto" dove viene inserito il materiale granulare e, dopo averlo azionato, questo si

Mini printer D-Shape [214]



sposta verso la direzione opposta depositando uno strato di 5 mm di materiale. Nel lato opposto si trovano una serie di ugelli che, quando azionati, si spostano verso il lato opposto al loro gettando il legante liquido.

Con questa tecnica si sono realizzati vari provini e se ne sono considerati 5 (facenti riferimento ai 5 materiali di cui sopra) di diverse dimensioni e messi a confronto. Come dal grafico raffigurante la maschera, si può notare che la dimensione del provino di forma quadrata dovrebbe essere di 8,8x8,8 cm e quello di forma rettangolare di 6,5x32,4 cm, mentre i provini realizzati sono delle seguenti dimensioni:

Provino	Dimensioni [cm]
1	11,5x13,5
2	11x11
3	8 (lato corto del parallelepipedo)
4	8,5x8,5
5	7 (lato corto del parallelepipedo)

Da questi risultati si può notare quali siano i materiali migliori (tra quelli provati) per ottenere una risoluzione di stampa più precisa ed accurata. Sicuramente la miscela di sabbia, cemento e fibre di vetro additivata con acqua (3) risulta essere la migliore sia per caratteristiche meccaniche che per precisione di stampa perché si ottiene una tolleranza di 0,375 cm per lato. Alla fine si è constatato che la miscela realizzata dall'azienda (1) risulta sì più resistente, come visto dalle prove dello studente Anes Jacupovich, ma con delle tolleranze dell'ordine di 1,02 cm per lato. Mentre la classica miscela di inerte additivata col nuovo legante (4) ha dato il risultato che ci si aspettava sulla precisione di stampa perché le tolleranze sono praticamente nulle, ma purtroppo danneggia la resistenza del materiale perché, essendo il legante più denso dell'acqua, ritarda di parecchio il tempo di presa del calcestruzzo.

### CONCLUSIONI

Da tutti questi studi, prove e ricerche, si può capire come la stampa 3D non ponga limiti di utilizzo di materiali; certo, come si è visto, dalle prove sono scaturiti anche molti problemi; tuttavia, a nostro avviso, nessuna delle problematiche evidenziate in questo capitolo può limitare l'utilizzo e lo sviluppo di questa tecnologia in quanto possono essere immaginate e studiate una serie di soluzioni per ciascuna di esse.

Provino 1 [215]



Provino 2 [216]



Provino 3 [217]



Provino 4 [218]



Provino 5 [219]



Funzionamento



Ugelli per il getto del legante [220]

Imbuto contenente il materiale [221]

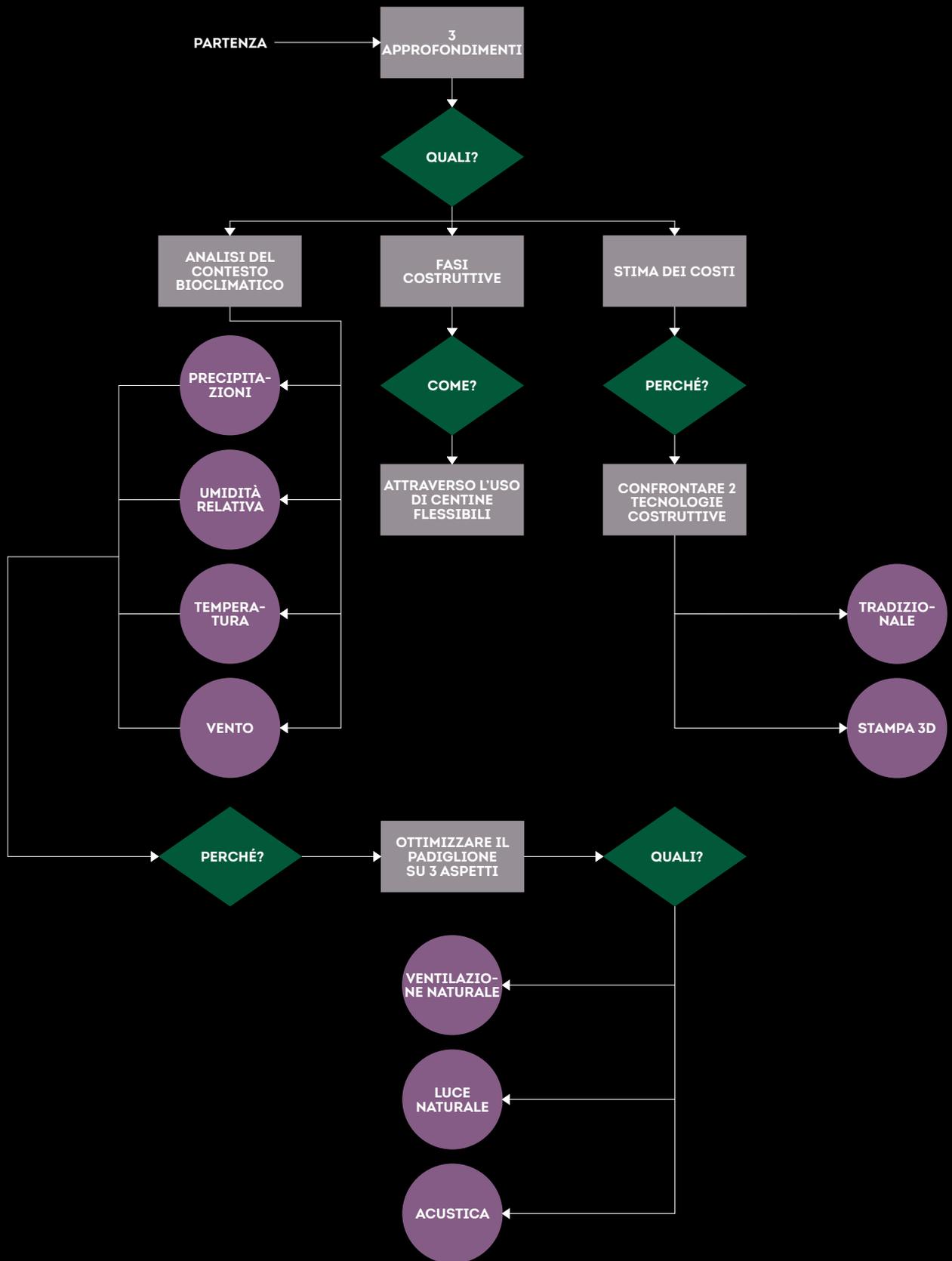


Getto del legante [222]



Risultato della stampa [223]





---

## TECNOLOGIA



---

*Quando i cacciatori giunsero in cima al monte, di fra i tamerici e i sugheri radi apparve l'aspetto vero della Sicilia, quello nei cui riguardi città barocche ed aranceti non sono che fronzoli trascurabili. L'aspetto di una aridità ondulante all'infinito, in groppe sopra groppe, sconfortate ed irrazionali delle quali la mente non poteva afferrare le linee principali, concepite in una fase delirante della creazione; un mare che si fosse pietrificato in un attimo in cui un cambiamento di vento avesse reso dementi le onde. Oltre le colline, da una parte, la macchia indaco del mare, ancora più duro e infecundo della terra. Il vento lieve passava su tutto, cancellava, ricomponeva ogni cosa nel proprio trascorrere incurante*  
— Giuseppe Tomasi di Lampedusa

---

”

**P**rima di poter procedere con lo studio di un edificio che possa essere energeticamente efficiente, è necessario raccogliere tutti i dati inerenti alla situazione climatica dell'area in cui questo è collocato.

La conoscenza di questi valori rappresenta un input necessario per individuare le strategie da attuare per progettare le caratteristiche dell'involucro. Saranno quindi considerati i dati relativi a:

- Temperature medie giornaliere, mensili, e massime e minime mensili;
- Umidità relativa media mensile;
- Precipitazioni e giorni di pioggia;
- Irradiazione media giornaliera a diversi orientamenti;
- Direzioni e intensità dei venti;
- Percorso solare e ombreggiamento dell'area di progetto, dovuto agli edifici presenti nell'immediato contesto.

# ANALISI

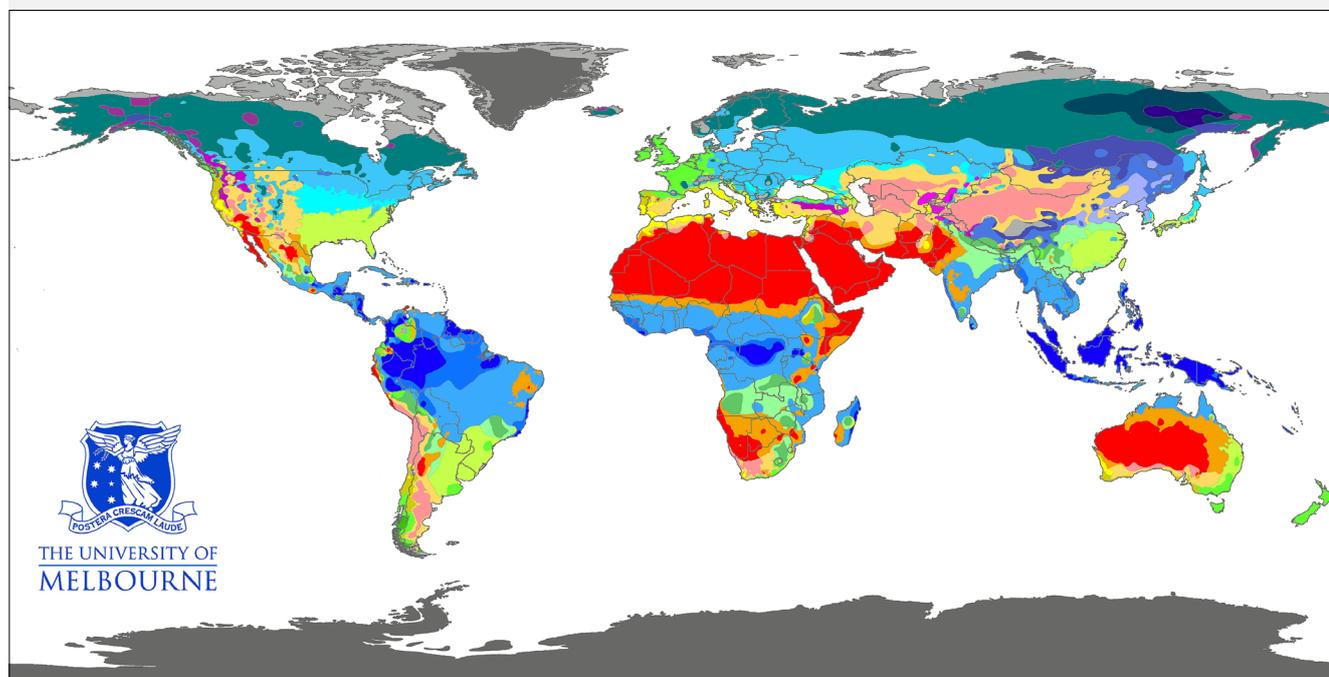
## CONTESTO BIOCLIMATICO

In generale il clima di Palermo è quello tipico siciliano che, secondo la Classificazione di Koppen, è di tipo mediterraneo con estati calde ed inverni brevi e miti (Csa). Le ore di sole sono in media 2500, contro le 2000 dell'Italia peninsulare e le 1800 della Francia meridionale. Le precipitazioni, poco abbondanti, si concentrano nei mesi invernali, da ottobre a marzo e questa scarsa piovosità si ripercuote sull'approvvigionamento idrico.

La temperatura massima (in media 26°C) si registra in luglio e agosto, mentre la minima (in media 10-14°C) tra

dicembre e febbraio. Si sottolinea, infine, che, anche se il clima della Sicilia risulta essere mite, negli ultimi decenni le estati sono divenute sempre più calde e, anche nelle altre stagioni dell'anno, il vento di Scirocco, proveniente dall'Africa, ha fatto sentire maggiormente il proprio influsso creando anche improvvise variazioni di temperatura. I dati climatici relativi alla città, sono stati analizzati in maniera approfondita, date le condizioni climatiche particolarmente avverse riguardo le problematiche legate al surriscaldamento delle superfici esposte al sole di queste

Classificazione climatica mondiale secondo il sistema Koppen-Geiger [224]



- LEGENDA
- Af ● Am ● Aw ● BWh ● BWk ● BSh ● BSk ● Csa ● Csb ● Cwa ● Cwb ● Cwc ● Cfa ● Cfb ● Cfc ● Dsa ● Dsb ● Dsc ● Dsd ● Dwa ● Dwb ● Dwc ● Dwd ● Dfa ● Dfb ● Dfc ● Dfd ● ET ● EF

latitudini. Da una loro attenta lettura appare chiara l'influenza dell'orografia circostante nel bloccare la penetrazione dei venti in determinate direzioni, così come risulta evidente l'apertura ai venti verso il mare e la presenza delle cosiddette "termiche" di mare e di terra dovute agli scambi termici tra la massa d'acqua del mare e la terra ferma.

#### DATI E COORDINATE GEOGRAFICHE DI PALERMO

Latitudine	38°6'43" N
Longitudine	13°20'11" E
Altitudine	14 m s.l.m.
Zona altimetrica	pianura

### PRECIPITAZIONI

La città di Palermo non è interessata da precipitazioni considerevoli e, in estati particolarmente torride, risultano molto frequenti i problemi di carenza di acqua. Le precipitazioni medie annue si attestano intorno agli 855 mm, mediamente distribuite in 81 giorni di pioggia, con minimo in estate, picco massimo in inverno e massimo secondario in autunno dovuto agli accumuli. In generale il regime pluviometrico è caratterizzato da un valore medio minimo nel mese di luglio (5mm) ed un massimo nel mese di ottobre (100mm).

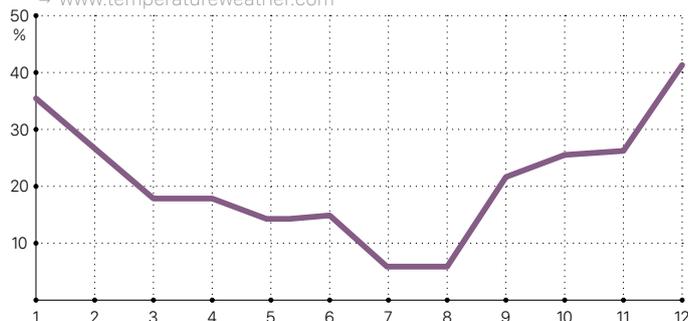
#### PRECIPITAZIONI MEDIE MENSILI [225]

↳ [www.allmeteosat.com](http://www.allmeteosat.com)



#### PROBABILITÀ DI PIOGGIA IN 1 ANNO [226]

↳ [www.temperatureweather.com](http://www.temperatureweather.com)

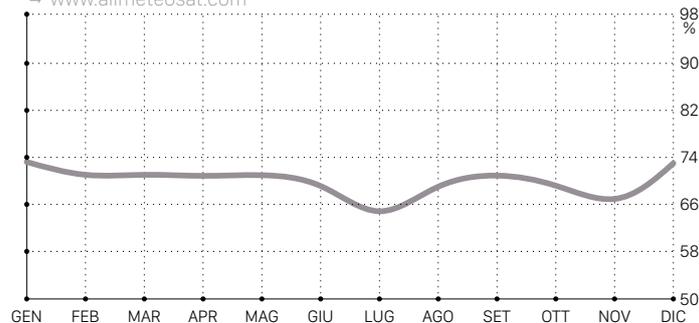


### UMIDITÀ RELATIVA

L'umidità relativa è la quantità d'acqua presente nell'aria ad una data temperatura, rispetto alla quantità massima di vapore acqueo che l'aria può contenere a quella temperatura quando è satura. A 21°C 1 kg d'aria secca può contenere fino ad un massimo di circa 15,8 g di vapore acqueo, pari al 100% di umidità relativa (U.R.). La quantità d'acqua che l'aria può contenere cambia con il variare della temperatura e cresce se la temperatura dell'aria aumenta. L'umidità dell'aria è dunque uno dei quattro parametri ambientali da cui dipende il benessere termoigrometrico negli ambienti abitati. Un livello troppo alto o troppo basso dell'umidità dell'aria può influire negativamente sul corpo umano, in particolare sull'apparato respiratorio. In condizioni di umidità relativa superiore al 70% l'ambiente riduce la capacità di accumulare il sudore emesso dal corpo umano (utilizzato come mezzo di raffreddamento evaporativo), impedendo il meccanismo naturale di regolazione della temperatura corporea, quindi accentuando la sensazione di caldo. Al contrario, in una situazione di umidità relativa inferiore al 20%, le membrane mucose si seccano aumentando le possibilità di infezione. Il grafico seguente mostra l'andamento dell'umidità relativa media mensile della nostra città.

#### UMIDITÀ RELATIVA MEDIA MENSILE [227]

↳ [www.allmeteosat.com](http://www.allmeteosat.com)



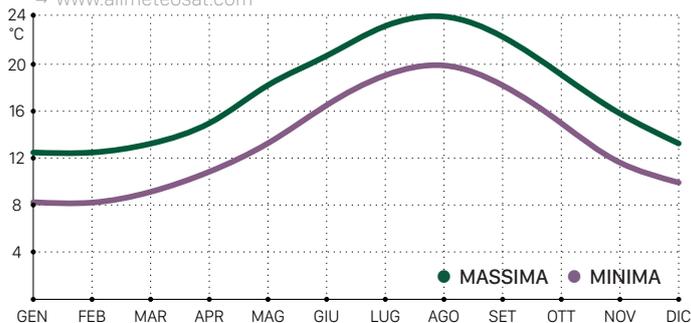
### TEMPERATURA DELL'ARIA ESTERNA

Le temperature medie annue variano dai 12,1°C per le minime ai 25,2°C per le massime. La media mensile minore si è verificata nei mesi di gennaio e febbraio (10°C), mentre la maggiore nel mese di agosto (29°C). Si riportano le tabelle e i grafici che illustrano la temperatura media giornaliera, le temperature medie mensili e il calcolo dei gradi giorno.

### TEMPERATURE MEDIE MENSILI [228]

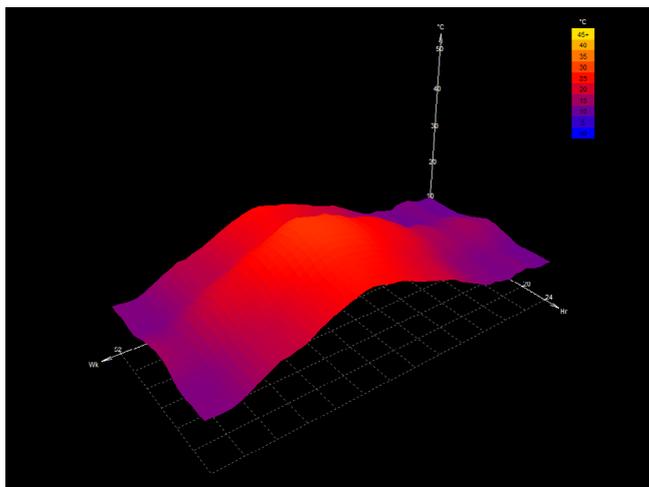
Le temperature medie mensili dell'aria esterna seguono l'andamento tipico del clima siciliano, cioè mediterraneo.

↳ www.allmeteosat.com



### TEMPERATURE MEDIE SETTIMANALI [229]

L'andamento delle temperature è influenzato dai valori di intensità della radiazione solare, che risultano meno intensi nei mesi invernali e più pronunciati durante la stagione estiva.



### CALCOLO DEI GRADI GIORNO

Per gradi giorno di una località si intende la somma, estesa a tutti i giorni di un periodo convenzionale di riscaldamento, delle sole differenze positive giornaliere tra la temperatura dell'ambiente, convenzionalmente fissata a 20°C, e la temperatura media esterna giornaliera.

Località	Palermo
Gradi giorno	751
Zona climatica	B
Periodo annuale di riscaldamento	1 dicembre - 31 marzo

## VENTO

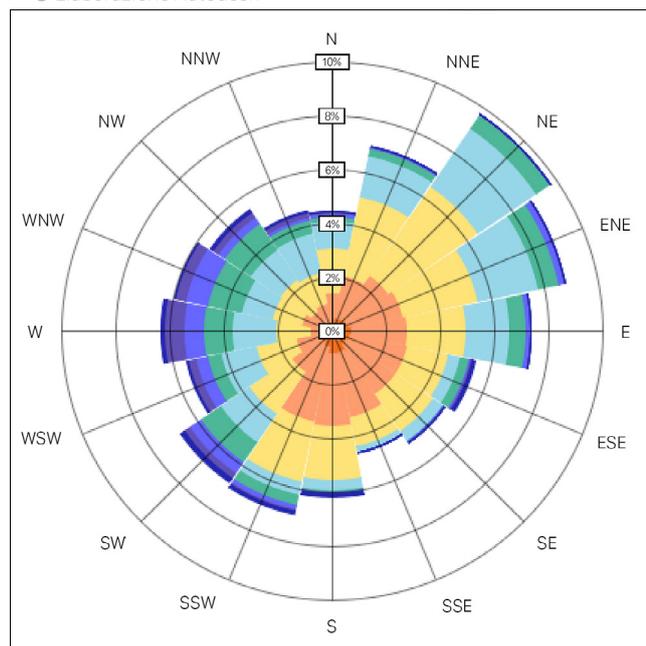
I venti che caratterizzano il clima siciliano sono prevalentemente il Maestrale e lo Scirocco, ma frequenti sono anche il Libeccio, nelle stagioni intermedie, e la Tramontana in inverno. Lo Scirocco, in estate, è causa di grandi ondate di caldo con cieli spesso arrossati dalla presenza di pulviscolo proveniente dai deserti Nord Africani. I venti settentrionali sono invece causa di intense piogge sui versanti Nord ed Est dell'isola specialmente in inverno. Nei grafici seguenti si riportano i venti insistenti sul territorio palermitano. Essi sono descritti attraverso i parametri di direzione e velocità. La direzione del vento viene espressa in gradi sessagesimali, indicando l'ampiezza dell'angolo rispetto allo 0, posto convenzionalmente a Nord. I grafici della rosa dei venti evidenziano con quale frequenza il vento spira da una determinata direzione: le zone colorate del grafico sono quelle dove percentualmente si sono verificate più spesso le direzioni di provenienza.

### DISTRIBUZIONE ANNUALE DELLE VELOCITÀ [230]

VELOCITÀ DEL VENTO (km/h) - Scala radiale in % di tempo

● 46+ ● 34-40 ● 29-34 ● 23-29 ● 17-23 ● 11-17 ● 6-11 ● 0-6

↳ © Elaborazione Autodesk

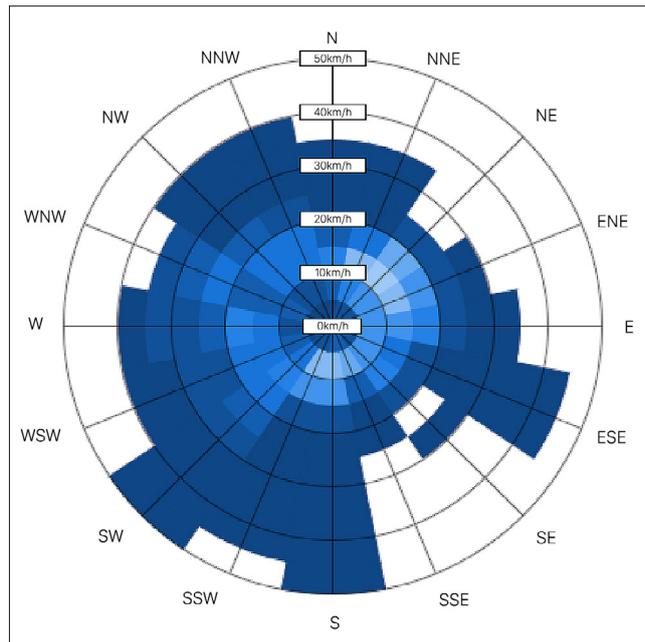


## DISTRIBUZIONE ANNUALE DELLA FREQUENZA [231]

FREQUENZA DEL VENTO (h)

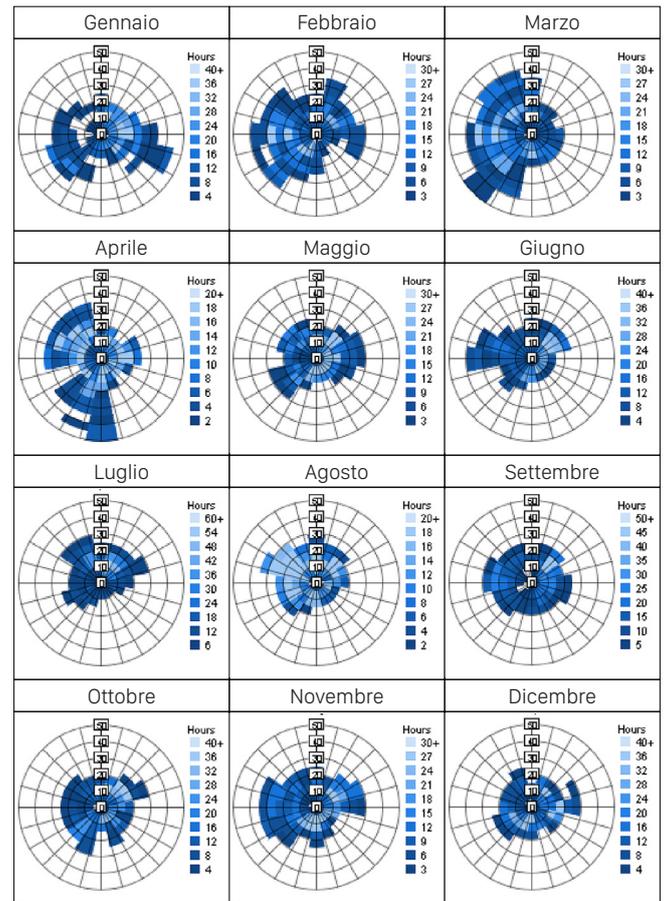
- 340+ ● 272-306 ● 238-272 ● 204-238 ● 170-204
- 136-170 ● 102-136 ● 68-102 ● 34-68 ● 1-34

← © Elaborazione Autodesk



## ROSA DEI VENTI MENSILI [232]

FREQUENZA DEL VENTO (h)



# VENTILAZIONE

## NATURALE

Come è stato detto in precedenza, in un clima caldo - umido le temperature sono sempre abbastanza elevate come pure il tasso di umidità. Necessariamente le strategie di benessere ambientale sono:

- Difendersi dall'umidità;
- Realizzare spazi d'ombra;
- Massimizzare la ventilazione interna;
- Difendersi dalle piogge.

Le tecniche di raffrescamento naturale per ventilazione più avanzate sono quelle sviluppate dalle civiltà come quella Araba. Si sa che la Sicilia e soprattutto la città di Palermo è stata dimora di queste genti, le quali hanno lasciato esempi emblematici delle loro architetture così avanguardiste. Quello più significativo è sicuramente il **Palazzo della Zisa** (dall'arabo al-'Azīza, cioè "la splendida", Patrimonio dell'Umanità Unesco dal 2015), fatto costruire per volere dei re normanni Guglielmo I e Guglielmo II da maestranze musulmane, che ospita il cosiddetto "raffrescamento evaporativo" associato alla ventilazione.

## SISTEMA DI RAFFRESCAMENTO EVAPORATIVO [233]

← Flickr © Foto di Supervito



Quindi le risposte costruttive tipiche di questi edifici sono:

- Spazi abitati ampi e alti;
- Grandi tetti e schermature solari;
- Involucro massiccio che costituisce una frontiera per proteggere gli ambienti interni dalla forte radiazione solare.

Il progetto segue tutte queste indicazioni: la copertura ha un'altezza media di 8,5 m consentendo così lo stratificarsi dell'aria; le aperture in sommità consentono lo smaltimento dell'aria calda che naturalmente tende a salire, mentre quelle laterali portano ad una completa permeabilità alle correnti. Il volume chiuso interno è dotato di doppia aper-

tura sui lati opposti, in modo da garantire un passaggio delle correnti d'aria privo di ostacoli.

## MECCANICA CONTROLLATA

Nonostante questo argomento non rientri negli approfondimenti di questa tesi, dalle analisi dei dati caratteristici del luogo e dal fatto che il progetto rientri nella categoria di ambienti destinati al pubblico, è evidente che la ventilazione naturale da sola non è sufficiente ed è quindi necessario introdurre un meccanismo di ventilazione controllata poiché un ricambio d'aria costante, in ambienti di questo tipo, risulta essere indispensabile per ottenere il comfort ottimale. In particolare si potrebbe pensare di utilizzare uno scambiatore d'aria con recuperatore di calore per, appunto, recuperare il calore in inverno (o il fresco in estate) contenuto nell'aria viziata che viene espulsa e trasferirlo, quindi, all'aria nuova entrante. Questa tecnologia, a flussi incrociati, permette di raggiungere un rendimento di circa il 90%, evitando quindi sprechi di energia dovuti al ricambio d'aria derivante dall'apertura delle finestre.

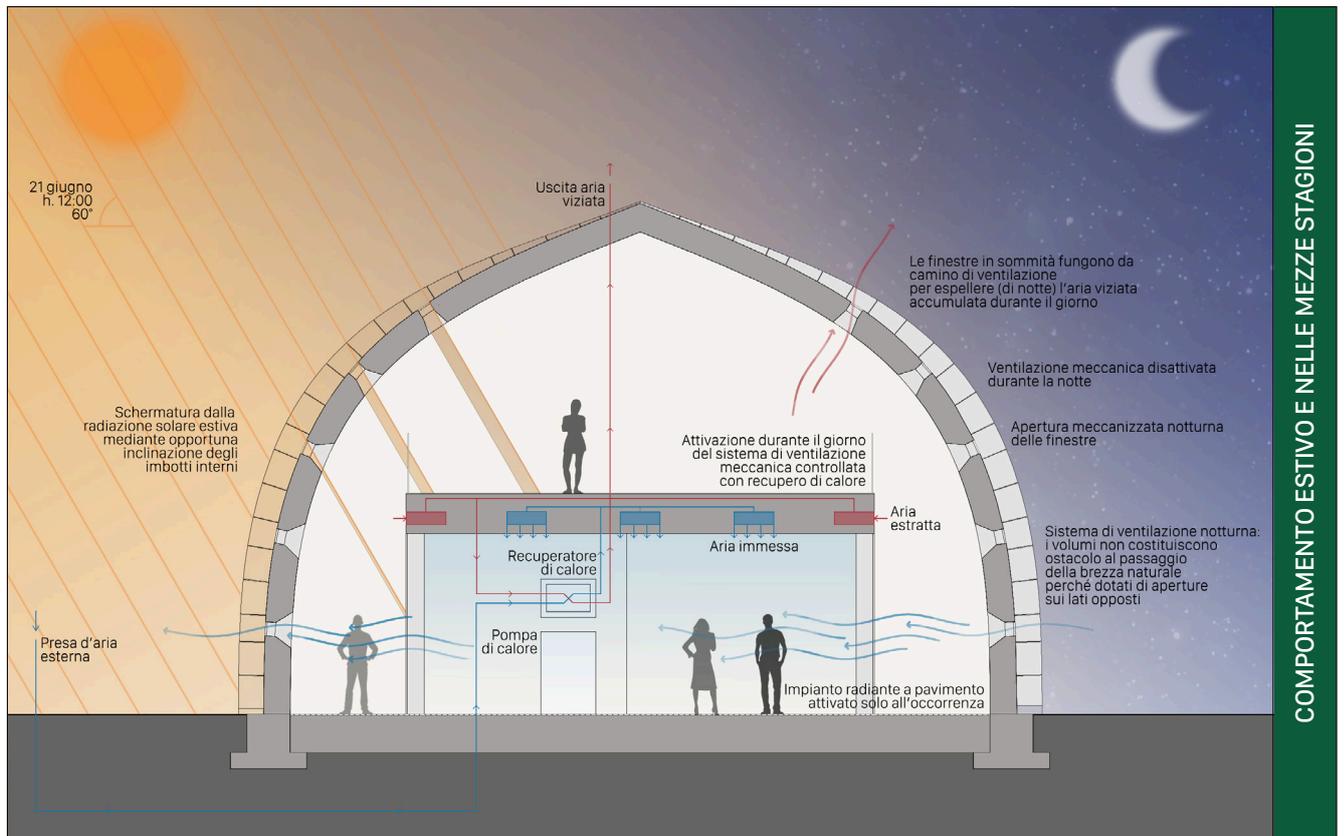
Nella progettazione architettonica dell'edificio ANT\_1 è stato previsto un ambiente adibito all'installazione di tali macchinari, all'interno del cubo centrale. Si suppone, infine, che le bocchette di espulsione e recupero dell'aria verranno implementate all'interno del controsoffitto impiantistico del cubo stesso. Nella pagina seguente si riportano gli Schematic design che riguardano il funzionamento dell'edificio in estate e in inverno.

# LUCE NATURALE

In Europa, oggi, si trascorre il 90% del tempo al chiuso, in edifici che consumano oltre il 40% del totale di energia; per giunta più del 30% del patrimonio edilizio non garantisce livelli di comfort interno accettabili. Puntando lo sguardo al futuro delle costruzioni e delle ristrutturazioni è necessario iniziare a prendere in considerazione i cambiamenti climatici e l'esaurimento delle fonti di energia tradizionali in vista anche di standard di benessere sempre crescenti. La luce è un argomento delicato e centrale in questa ottica, in quanto interessa entrambe le sfere, sia quella energetica che quella della vivibilità, dove ottimizzare un aspetto significa spesso penalizzare l'altro. Per definizione con luce si intende solo la parte del visibile, quindi solo

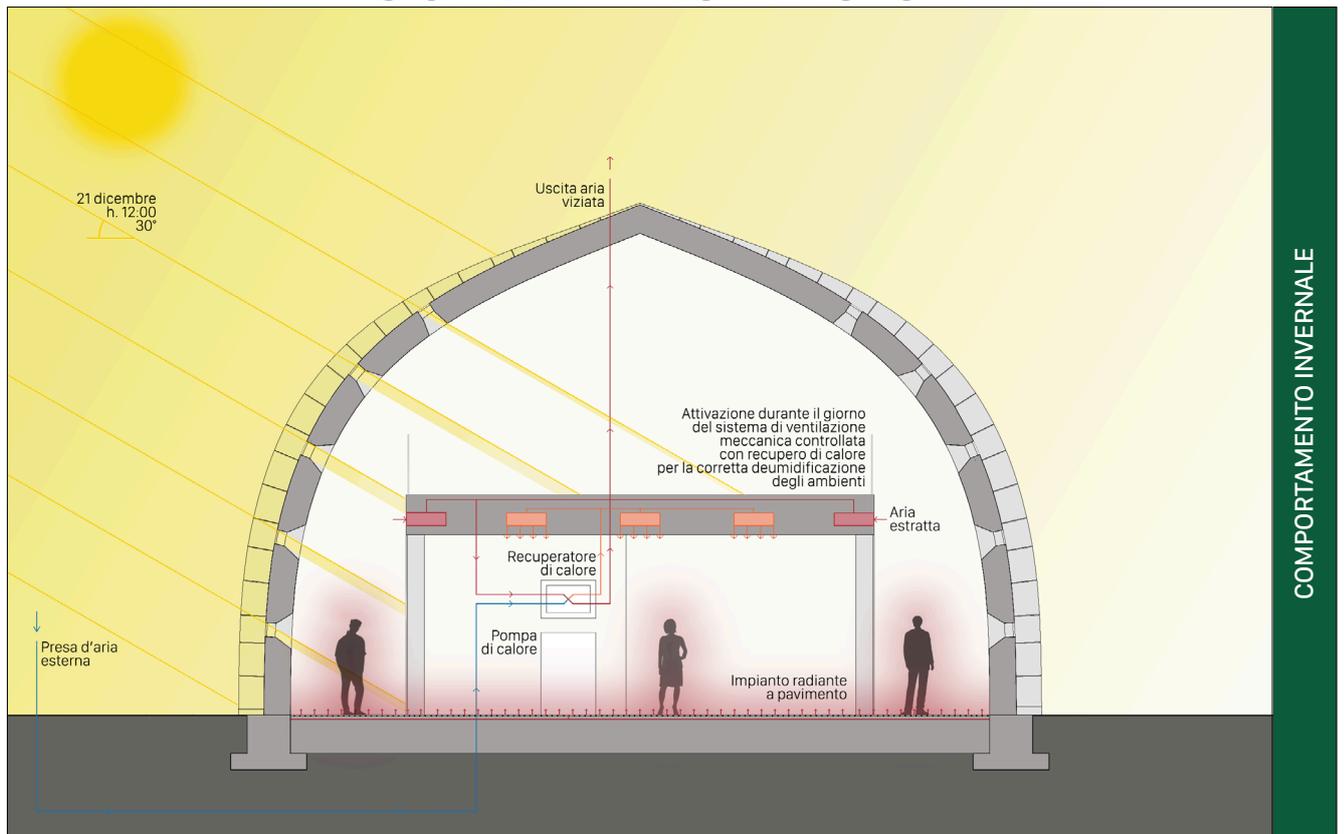
una porzione dello spettro elettromagnetico trascurando le altre lunghezze d'onda, come i raggi infrarossi, responsabili del surriscaldamento degli ambienti illuminati. In questo paragrafo si tratterà proprio questa doppia valenza della luce, soffermandosi in particolare sul controllo della stessa all'interno della sala conferenze di ANT1, questione centrale per quanto riguarda l'attenzione delle persone e l'abbigliamento.

La radiazione solare ha un'azione fondamentale sulla psiche umana perché, in primo luogo, favorisce la produzione di serotonina, un ormone che dà la sensazione di benessere e che, allo stesso tempo, riduce la concentrazione nel sangue di ormoni come la noradrenalina e adrenalina,



COMPARTAMENTO ESTIVO E NELLE MEZZE STAGIONI

## SCHEMATIC DESIGN



COMPARTAMENTO INVERNALE

responsabili dello stress. Ecco perché la carenza di luce, come in inverno ai poli o in una giornata piovosa alle nostre latitudini, ci rende tristi e depressi.

Dal punto di vista del benessere, studi compiuti dalla Northwest Energy Efficiency Alliance hanno dimostrato come una costante e abbondante esposizione alla luce porta a:

- Aumento del 25% della capacità di concentrazione;
- Riduzione del 30% delle malattie influenzali;
- Aumento del 30% della resa lavorativa e una riduzione del 60% dell'assenteismo (Sick Building Syndrome "Sindrome dell'edificio malato");
- Regolazione dei ritmi circadiani (ciclo sonno - veglia);
- Riduzione delle malattie depressive (ogni giorno dovrebbe essere garantita un'esposizione alla luce solare di almeno 30 minuti a 10000 lux o 120 minuti a 2500 lux).

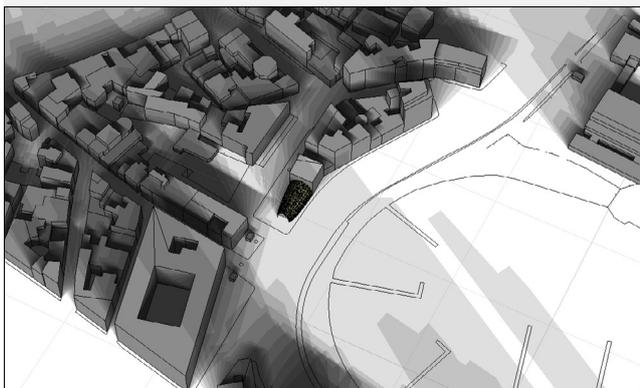
Per quanto riguarda il risparmio energetico di un edificio a basso consumo, i costi per l'illuminazione rappresentano fino al 20% dei consumi. Negli edifici scolastici, direzionali, collettivi o commerciali, il consumo di elettricità per l'illuminazione aumenta e può rappresentare il 25-40% dei consumi complessivi. La luce naturale è diventata quindi la principale o la sola fonte di luce necessaria durante le ore diurne per l'illuminamento degli spazi interni.

## VARIABILI DELLA LUCE

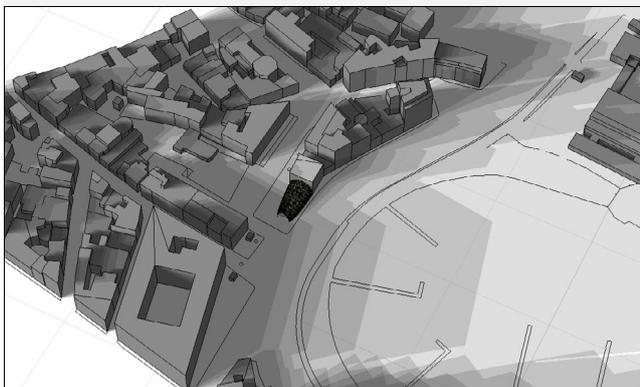
La disponibilità di luce naturale varia in funzione dell'apporto di luce solare, che può essere diretta, diffusa e/o riflessa: quella diretta può superare i 100000 lux, quella diffusa (data dal cielo) può superare i 10000 lux mentre quella riflessa varia in funzione delle superfici riflettenti. Poiché in contesti densamente edificati la somma della luce riflessa e di quella diffusa sono superate da quella diretta, è necessario studiare il sito e valutare/misurare la quantità di luce naturale disponibile prima di pensare alla forma dell'edificio stesso e alla distribuzione degli spazi interni. Il caso specifico di progetto è abbastanza favorevole, avendo poche superfici assorbenti nelle vicinanze e la presenza di acqua e vegetazione che incrementano la componente riflessa. La disponibilità di luce naturale varia poi in funzione della località di progetto, dipendendo in particolare dalla latitudine e dall'orientamento. Altre due variabili progettuali sono: la geometria, in quanto la disponibilità di luce naturale varia in funzione della forma dell'ambiente considerato, dipendendo dalle dimensioni dello stesso, dagli angoli formati dalle superfici, dalla profondità, dal rapporto con gli edifici circostanti e dalle superfici di rivestimento, dove un materiale più chiaro e liscio rifletterà più luce di un materiale scuro e scabro.

## STUDIO DELLE OMBRE IN INVERNO

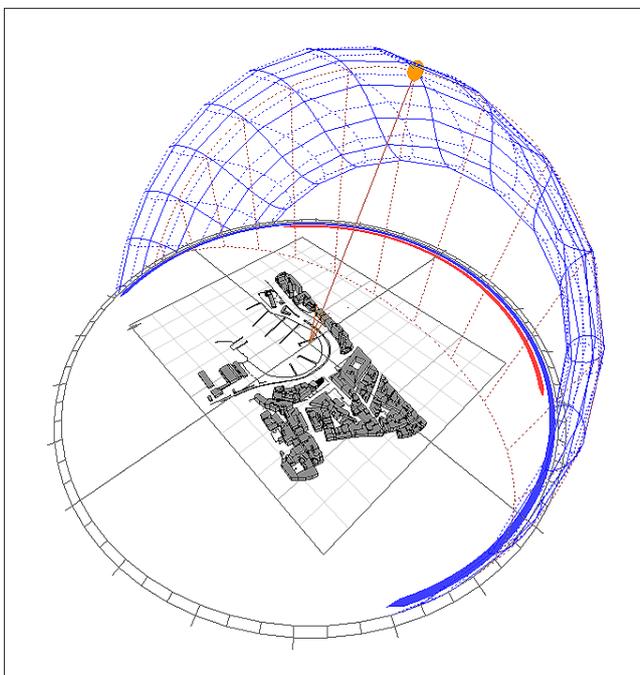
21 DICEMBRE (ORE 7:00 - 13:00) [235]



21 DICEMBRE (ORE 14:00 - 19:00) [236]

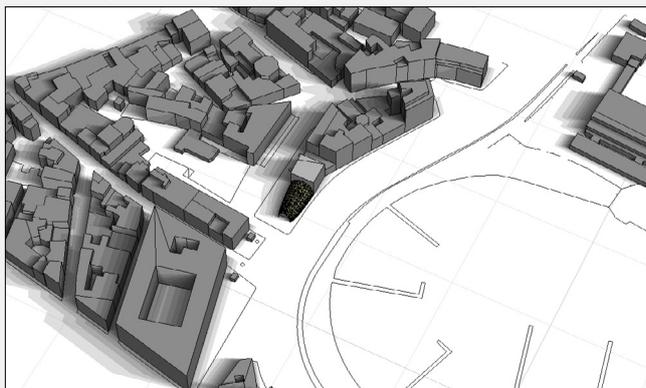


## PERCORSO SOLARE ANNUALE [234] RESTITUZIONE IN 3 DIMENSIONI

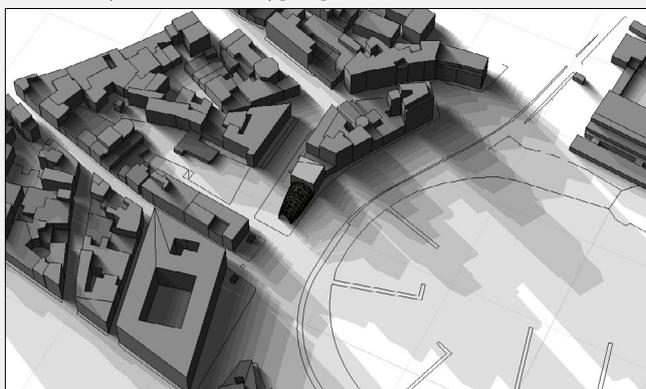


## STUDIO DELLE OMBRE IN ESTATE

21 GIUGNO (ORE 7:00 - 13:00) [237]



21 GIUGNO (ORE 14:00 - 19:00) [238]



L'ipotesi di usare come materiale da costruzione un calcestruzzo bianco si inserisce proprio in questi ragionamenti servendo ad incrementare la componente di luce diffusa all'interno della scocca. In queste pagine sono riportati e analizzati i dati relativi al percorso solare annuale che si verifica nell'area di progetto e il calcolo dell'ombreggiamento di questa dovuto alla presenza di altri edifici nelle strette vicinanze. Tali analisi e restituzioni grafiche sono state effettuate con l'utilizzo del software *Autodesk Ecotect*, importando il file climatico relativo alla città di Palermo.

### GRANDEZZE DELLA LUCE

La luce naturale viene calcolata misurando principalmente 3 parametri: illuminanza, luminanza e fattore medio di luce diurna. Sapendo che il LUMEN è l'unità di misura del flusso luminoso, si definisce **illuminanza** la quantità di luce che incide su una superficie e la si calcola utilizzando come unità di misura il LUX, pari a 1 lumen/1 m<sup>2</sup>. Solitamente la misurazione si effettua su un piano di lavoro posto ad un'altezza di 85 cm. Ovviamente, in funzione delle attività svolte nei locali, andrebbe garantito un intervallo

di illuminamento compreso, ad esempio, tra 100 e 200 lux per compiti con semplici requisiti visivi, mentre fra 300 e 750 lux per compiti di precisione propri ad esempio di un laboratorio manifatturiero.

Si definisce **luminanza** la quantità di luce riflessa da una superficie e la si calcola utilizzando come unità di misura le candele/m<sup>2</sup>. Tale quantità misura la sensazione di abbagliamento percepita dall'occhio. La distribuzione delle luminanze nello spazio può essere descritta in relazione alla posizione di un osservatore e ad una direzione di osservazione. Importante per il comfort visivo è la "mappatura" delle luminanze all'interno di un ambiente. Tale comfort è garantito da un'adeguata gradazione dei contrasti nel campo visivo. Se le differenze di luminanza all'interno di questo diventano eccessive, si verifica il fenomeno dell'abbagliamento, causando fastidio o diminuzione delle capacità visive. La disponibilità di luce naturale varia con il passare delle ore, delle stagioni o delle condizioni climatiche e per questo motivo l'illuminanza interna, da sola, non fornisce informazioni sufficienti per una corretta progettazione.

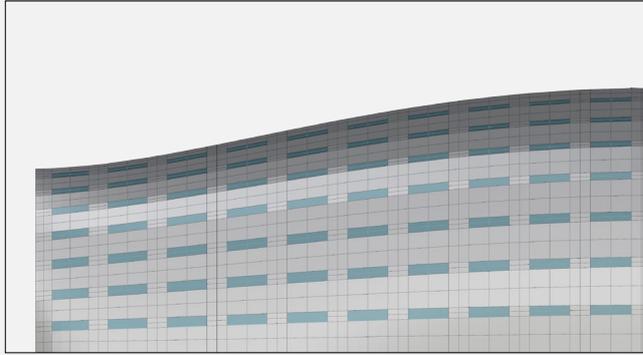
Il **fattore di luce diurna** esprime invece il rapporto fra l'illuminamento che si ha in un punto interno di un edificio in un dato momento e l'illuminamento naturale che si ha simultaneamente su un piano esterno, calcolati con cielo coperto; trascurando cioè il contributo dell'irraggiamento diretto. EFLD è poi la media matematica delle misurazioni all'interno dell'ambiente considerato.

### IL PROGETTO

In Italia è previsto dal DM 5/7/75 che negli alloggi vi sia un valore del fattore di luce diurna medio non inferiore al 2%. La prescrizione di rapporto aeroilluminante pari a 1/8, nel nostro caso abbondantemente rispettato avendo due lati opposti dell'edificio ampiamente vetrati, rappresenta soltanto un valore dimensionale minimo del serramento; è solo con il fattore medio di luce diurna, invece, che è possibile valutare la quantità della luce negli ambienti. Dalle rappresentazioni che seguono, effettuate attraverso il software *Velux Daylight Visualizer*, si nota la distribuzione delle isolinee e si riscontra un valore medio di FLD accettabile, pari al 4%.

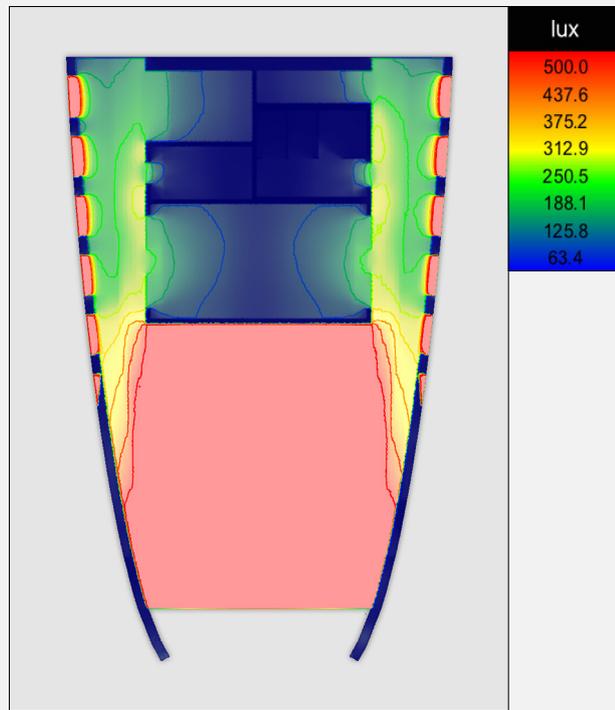
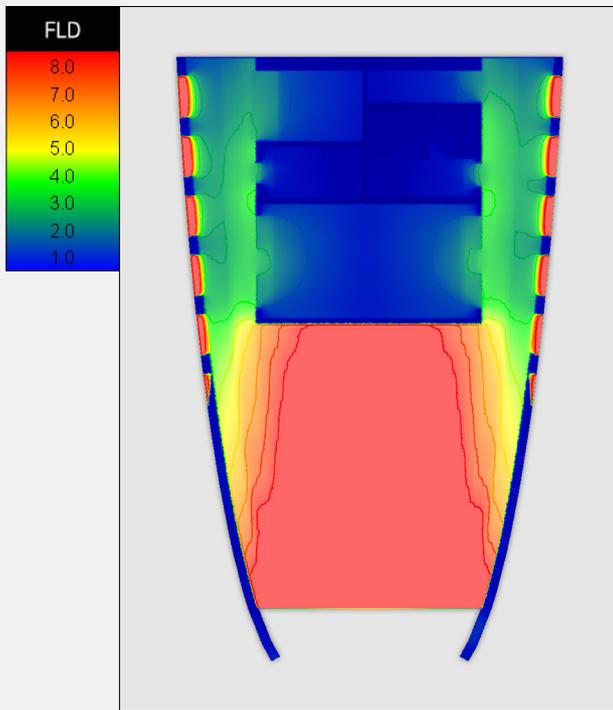
Studiando più approfonditamente la scocca, abbiamo però individuato **due potenziali problematiche** che creavano discomfort all'interno dell'edificio, dovute alla conformazione delle finestre laterali e alla grande vetrata esposta a Sud. Le prime, anche se inizialmente distribuite uniformemente su tutta la superficie non consentivano il corretto ingresso della luce poiché di dimensioni (larghezza 1,20m ed altezza 0,40m) troppo piccole rispetto allo spessore della scocca; la seconda invece si comportava esattamente all'opposto, creando un forte abbagliamento interno.

CONFIGURAZIONE INIZIALE LUGLIO ORE 12:00 [239]

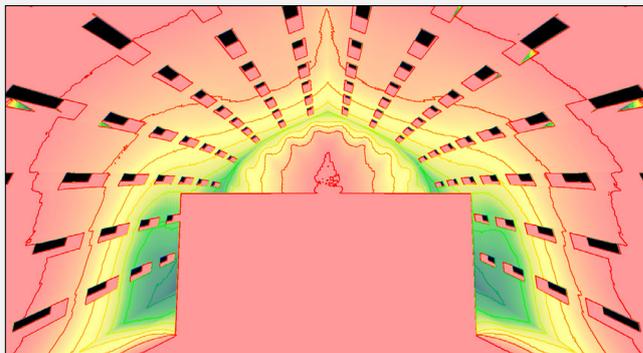


FATTORE DI LUCE DIURNA [240]

ILLUMINANZA [241]



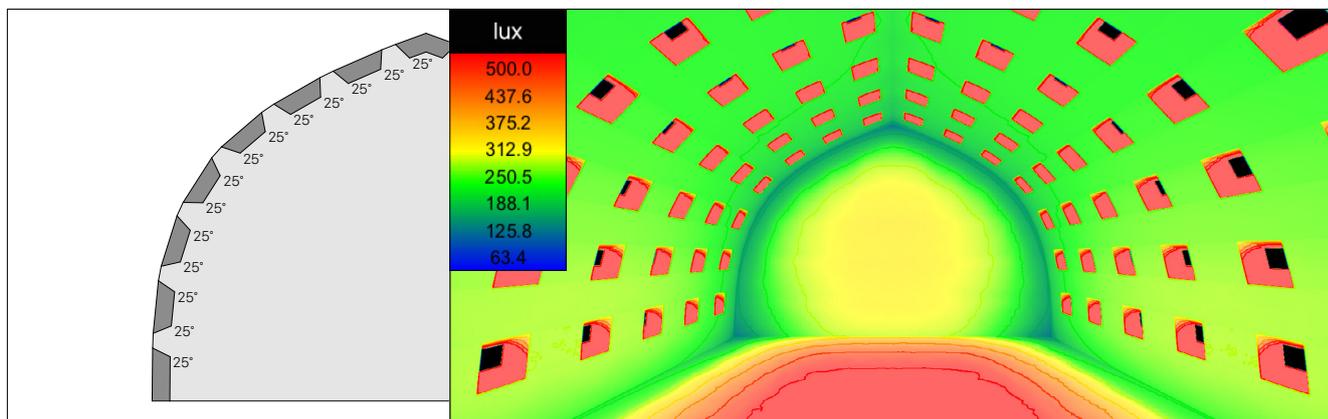
ILLUMINANZA [242]



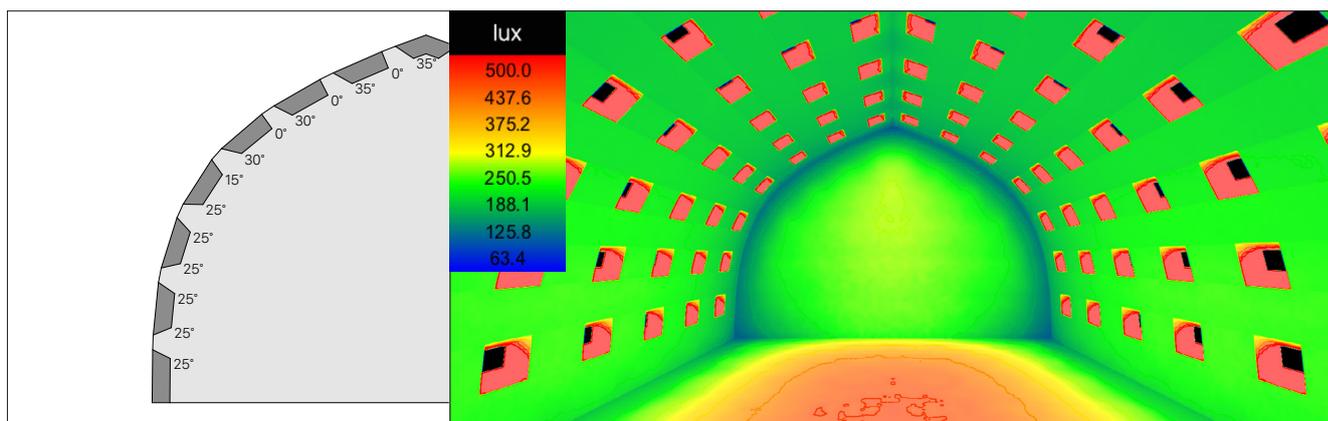
È seguito quindi uno studio per cercare di risolvere queste problematiche che si è tradotto dapprima nelle **tre prove** riportate qui sotto, dalle quali si nota come cambia l'ingresso della luce al variare delle inclinazioni delle imbotti superiori e inferiori delle finestre. In base ai risultati ot-

tenuti è stata poi scelta la configurazione della Prova 1, poiché rispondeva meglio alle richieste di progetto. Questa configurazione è stata ulteriormente ottimizzata, intervenendo anche sull'inclinazione delle imbotti laterali, passando da 0° a 15°.

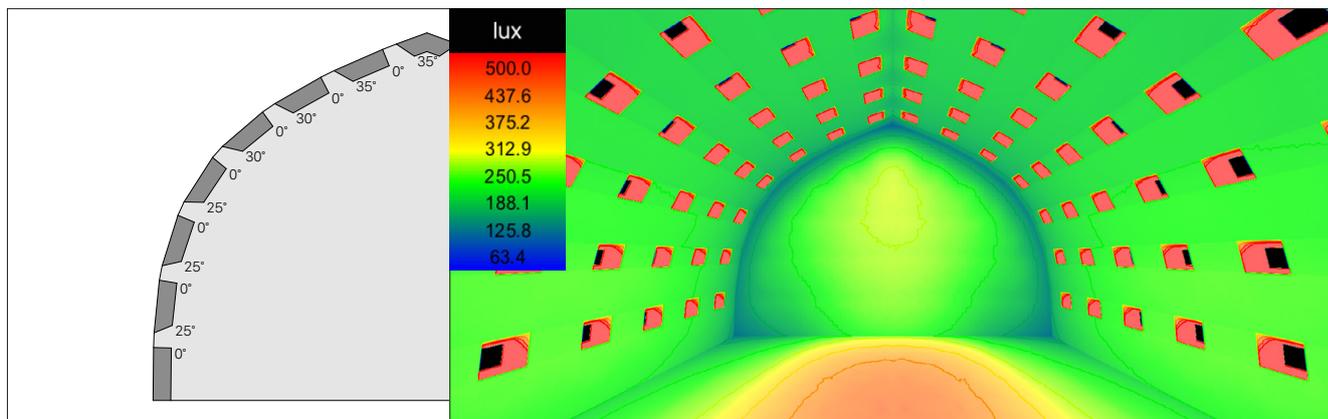
PROVA 1 LUGLIO ORE 12:00 / SEZIONE ARCO - ILLUMINANZA [243]



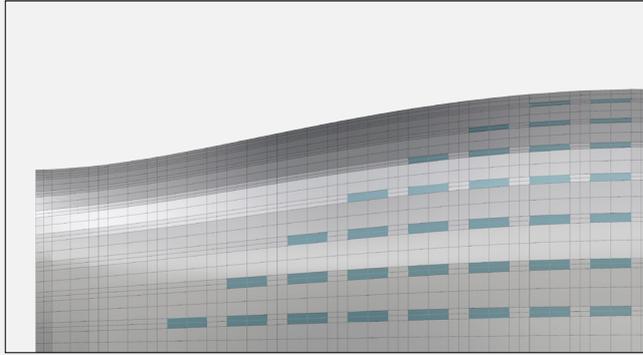
PROVA 2 LUGLIO ORE 12:00 / SEZIONE ARCO - ILLUMINANZA [244]



PROVA 3 LUGLIO ORE 12:00 / SEZIONE ARCO - ILLUMINANZA [245]

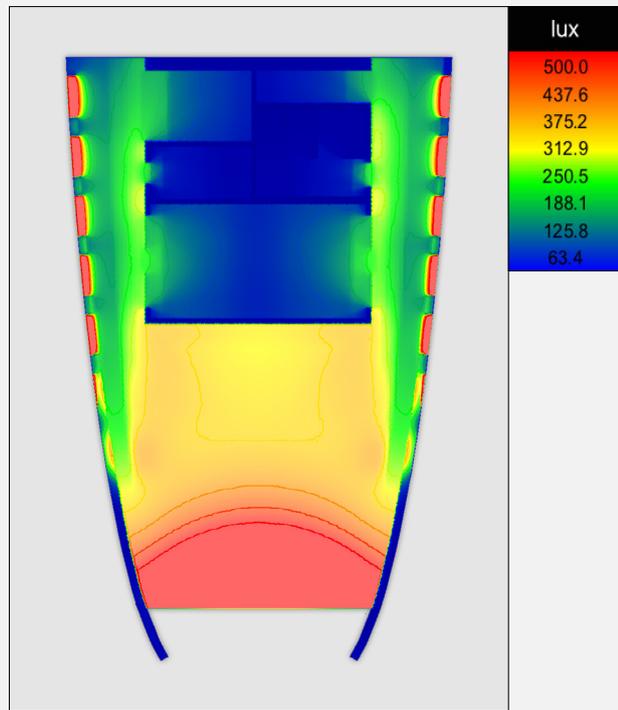
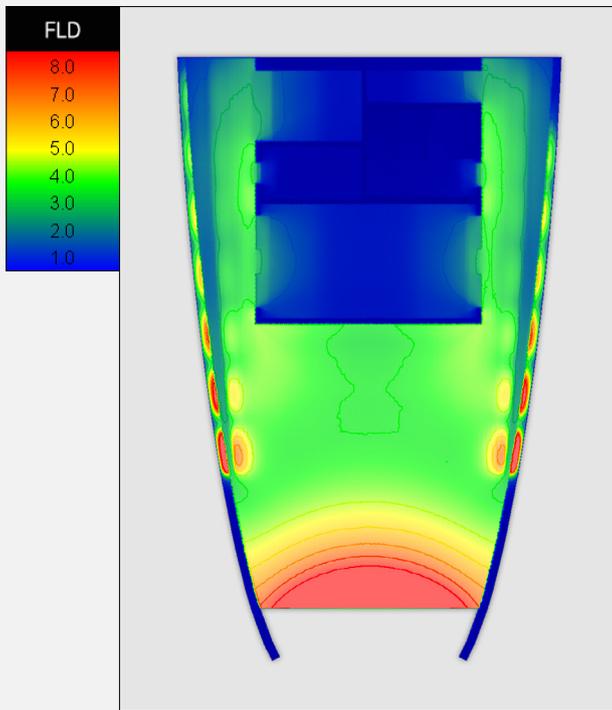


CONFIGURAZIONE INIZIALE LUGLIO ORE 12:00 [246]

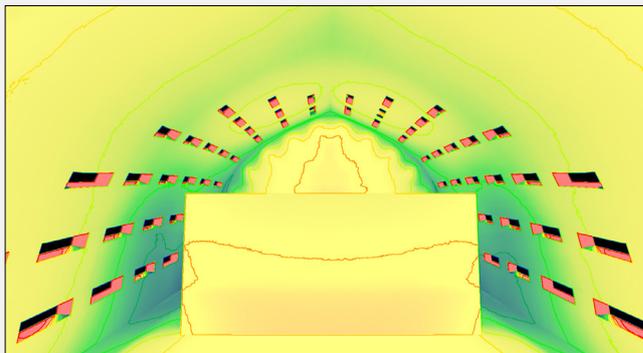


FATTORE DI LUCE DIURNA [247]

ILLUMINANZA [248]



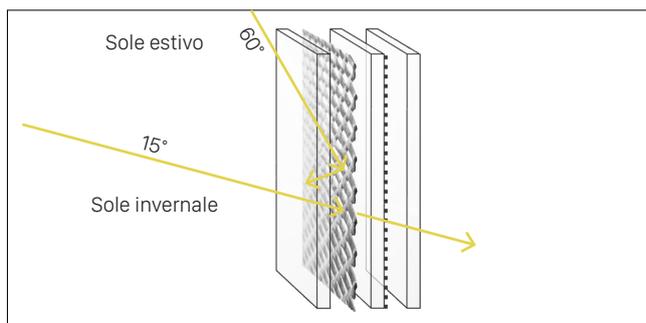
ILLUMINANZA [249]



Tutte queste soluzioni hanno caratterizzato una ulteriore modifica del blocco strutturale (trattato nel capitolo precedente) che presenta adesso delle caratteristiche sezioni oblique, le cui inclinazioni seguono i valori degli angoli scelti in precedenza. A essere modificata non è stata però solo la sezione poiché l'inserimento di imbotti inclinati ha posto il problema di valutare un'adeguata geometria in termini tridimensionali, legata all'impilabilità dei blocchi e alla facilità di posizionamento e stoccaggio. Due sono state le alternative prese in esame.

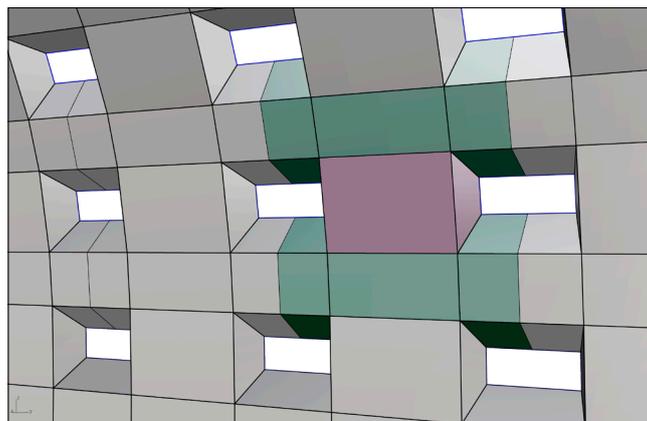
Alla prima è stata preferita la seconda, perché, anche presentando blocchi con forme più complesse e diversificate, questi ultimi hanno facce piane che forniscono una maggiore maneggevolezza.

Successivamente si è passati alla soluzione del problema della facciata a Sud, diminuendo il numero delle finestre laterali in prossimità della vetrata ed adottando in questa un sistema schermante in metallo forato disposto in intercapedine (tipo OcaTech di **Ocalux**). In questo, le perforazioni del metallo sono disposte asimmetricamente e funzionano come un sistema selettivo per direzionare la luce diurna, fornendo un efficace controllo solare termico senza pregiudicare la visibilità verso l'esterno.

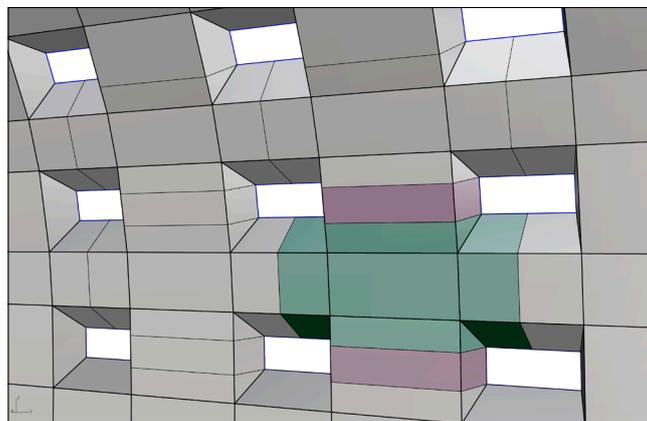


[252] ← Elaborazione propria da [www.okalux.de](http://www.okalux.de)

VARIANTE 1 FORME TRAPEZZOIDALI [250]



VARIANTE 2 FORMA A "+" e PARALLELEPIPEDA [251]



# ACUSTICA

In un edificio di questo tipo, adibito a sala conferenze e laboratori artigianali 2.0, l'inquinamento acustico, originato da sorgenti interne quali la confusione d'affollamento e il rumore delle stampanti 3D, o esterne (causate dal traffico della strada ad alto scorrimento che costeggia il lotto di progetto), può creare delle situazioni non confortevoli per il lavoro o l'attenzione delle persone. Si è eseguita, così, un'analisi opportuna per poter capire quali materiali per le

finiture superficiali potessero essere i più idonei a limitare il riverbero. Per fare ciò è stato calcolato il tempo di riverbero mediante la "formula di Sabine" che è una formula esemplificativa perché si riferisce ad ambienti di forma regolare e ad un campo sonoro perfettamente diffuso.

Nel caso specifico si è esaminata la sala conferenze immaginandola come un ambiente di forma parallelepipedica di altezza 7,5 metri (h media della parte di copertura che

ricopre lo spazio).

Il **riverbero** è un fenomeno nel quale un'onda sonora emessa in un ambiente abbastanza grande continua a riflettersi sulle pareti, che non riescono a smorzarla, creando così effetti fastidiosi se questa permane per un periodo maggiore del tempo limite che dipende dalla destinazione d'uso del locale.

Il **tempo di riverbero**, invece, è il tempo (calcolato in secondi) necessario affinché il livello della pressione sonora diminuisca di 60 dB rispetto al valore che esso ha nell'istante in cui viene disattivata la sorgente. Il valore di riverberazione è funzione della frequenza sonora, dato che quasi tutti i materiali assorbono il suono in funzione di essa. Nel caso in esame si è preso come riferimento il valore di 1000 Hz perché è la frequenza caratteristica del parlato umano e performance musicali.

### Formula di Sabine

$$T_{60} = 0,16 \cdot V / (\sum \alpha_i \cdot S_i)$$

dove

V volume (m<sup>3</sup>);

$\alpha_i$  coefficiente di assorbimento delle superfici dell'ambiente;

$S_i$  somma delle superfici dell'ambiente (m<sup>2</sup>);

$\sum \alpha_i \cdot S_i$  unità di assorbimento secondo Sabine.

### DIMENSIONI AMBIENTE

Lx	9,3 m
Ly	12,5 m
Lz	7,5 m
Volume	871,88 m <sup>3</sup>

### CARATTERISTICHE DEI MATERIALI SCELTI

Superficie	m <sup>2</sup>	Materiale	Coefficiente di assorbimento $\alpha_i$ [1000 Hz]
Pavimento	116,25	Tatami vinilico	0,17
Soffitto	116,25	Intonaco di calce	0,04
Parete sx	69,75	Intonaco di calce	0,04
Parete dx	69,75	Intonaco di calce	0,04
Parete Nord	93,75	Topakustik	0,85
Parete Sud	93,75	Vetro	0,12
Finestre	9,6	Vetro	0,12

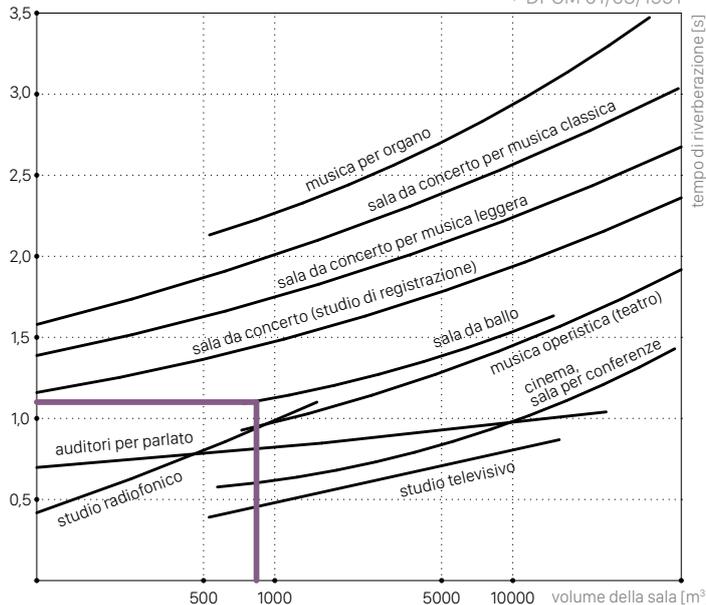
$$T_{60} = 1,2 \text{ sec}$$

Dal grafico seguente si può notare come il tempo ottimale massimo per una sala conferenze risulta intorno a 1,5 se-

condi mentre il tempo di riverbero calcolato in una situazione comune è pari a 1,2 secondi. È possibile quindi concludere che, in condizioni normali, non ci si deve aspettare riverbero e probabilmente anche in situazioni sfavorevoli (stanza non arredata) questo sarebbe tollerabile.

### GRAFICO DEL TEMPO DI RIVERBERAZIONE

← DPCM 01/03/1991



Come si può notare dalla tabella precedente, sono stati scelti due particolari materiali per raggiungere un livello di comfort acustico accettabile ai fini delle funzioni che si svolgeranno negli spazi di ANT1. Questi sono particolari tipi di rivestimento ed in particolare il **Tatami vinilico** è un tessuto ad effetto stuovia per pavimentazione ad uso interno realizzato con filo continuo tinto in massa, a sezione piatta contenente plastificanti non ftalati ed ha un supporto in PVC e fibra di vetro.

Il secondo invece, il **Topakustic**, è realizzato con pannelli di legno microforati dallo spessore di appena 0,5 mm ed è caratterizzato da un alto valore di assorbimento dell'onda sonora, garantendo così prestazioni ottimali all'interno della sala conferenze e del FalLab.

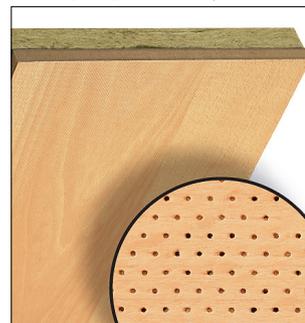
### TELO DI TATAMI VINILICO

[253] ← [www.liuni.com](http://www.liuni.com)



### PANNELLO DI TOPAKUSTIC

[254] ← [www.topakustik.ch](http://www.topakustik.ch)



# STRATEGIE INVOLUCRO

A livello mondiale l'IPCC stima che gli edifici consumino circa il 30% di energia con un ritmo che cresce del 3% ogni anno. Le costruzioni sono responsabili del 21% delle emissioni globali di CO<sub>2</sub>, per 1732 Mt equivalenti ogni anno. Solo nei paesi più industrializzati l'aumento di emissioni è inferiore al consumo di energia, grazie al passaggio a fonti meno inquinanti (esempio metano) e a migliori isolamenti degli edifici. Quindi, sia per ragioni ambientali evidenti che per ragioni economiche, questi paesi hanno intrapreso un percorso legislativo di miglioramento delle prestazioni energetiche degli edifici. In materia di contenimento dei consumi energetici, in Italia il D.Lgs. n.192 del 19/08/2005 e il successivo D.Lgs. n.311 del 29/12/2006 hanno dettato i criteri per un'edilizia energeticamente consapevole. Questa tendenza al miglioramento di tali prestazioni è stata trainata dai paesi del Nord Europa che per primi hanno dettato lo standard della "Passive House".

Fino a non molti anni fa si pensava che questo modello fosse esportabile in tutto il continente ma in realtà, dati alla mano, sono emerse molte problematiche. Se da un lato funziona molto bene nei climi nordici (oggi si preferisce comunque parlare di "Active House"), nei paesi meridionali occorre completamente ripensarlo a causa delle condizioni climatiche differenti dove, alla questione riscaldamento invernale, va aggiunta anche quella del raffrescamento estivo. Questi paesi infatti coprono i 2/3 dell'energia elettrica consumata nel periodo estivo in Europa e in Italia ad esempio, si ha il picco del sistema elettrico in estate. Tale crescita dei consumi di elettricità pro-capite è per la maggior parte dovuta al settore civile ed è connessa all'impennata negli acquisti di condizionatori da parte degli utenti del settore residenziale e terziario, i quali normalmente non conoscono alternative sostenibili ed efficaci ai dispositivi di raffrescamento attivo e vengono fortemente attratti dai loro costi bassi.

Volendo trasferire questi ragionamenti alla città di Palermo, si può dire che anche qui la questione energetica è traslata nel periodo estivo con l'evidente problema del raffrescamento. Si riportano i valori di trasmittanza che la normativa vigente (D.Lgs. n.311/2006) impone a partire dal 1 gennaio del 2010 per le chiusure verticali e orizzontali.

	Valore limite di trasmittanza (Zona B) [W/m <sup>2</sup> K]
Chiusure verticali	0,48
Chiusure orizzontali	0,49

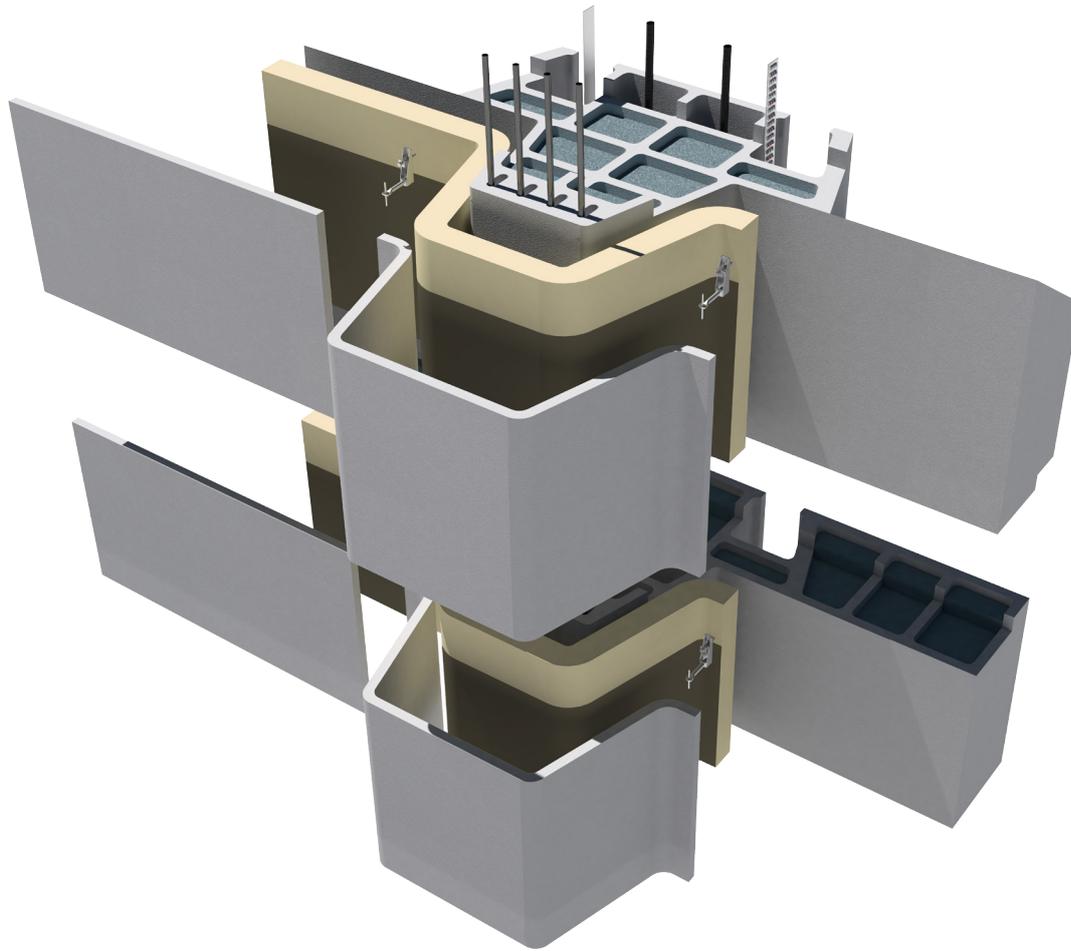
Il DPR 59/2009 introduce poi una grandezza utile proprio per i contesti caldi. Definisce cioè la **trasmittanza termica periodica**  $\gamma_E$  come il parametro che valuta la capacità di una parete opaca di sfasare ed attenuare il flusso termico che la attraversa nell'arco delle 24 ore, determinata secondo la normativa UNI EN ISO 13786:2008. Viene stabilito che, relativamente a tutte le pareti verticali opache, sia rispettato che il valore del modulo della trasmittanza termica periodica sia inferiore a 0,12 W/m<sup>2</sup>K mentre, relativamente a tutte le pareti opache orizzontali ed inclinate, sia inferiore a 0,20 W/m<sup>2</sup>K.

Prima di analizzare le stratigrafie impiegate si definiscono gli obiettivi che si vogliono raggiungere in termini qualitativi. Il problema principale, si sa, è tenere il calore all'esterno e mantenere, con il minore dispendio energetico, le condizioni di comfort interne raggiunte inevitabilmente artificialmente. Infatti le strategie passive adottate, come ad esempio il doppio affaccio per consentire la ventilazione trasversale naturale, come già detto, non sono sufficienti a garantire il comfort interno in un clima caldo-umido, anche se indubbiamente utili per risparmiare sull'impianto di raffrescamento in alcuni momenti del giorno e/o in alcuni periodi dell'anno. L'idea è allora quella di avere un involucro massivo, la scocca esterna, dotata di elevata inerzia termica per smorzare il flusso di calore entrante.

# STRATIGRAFIA 3D

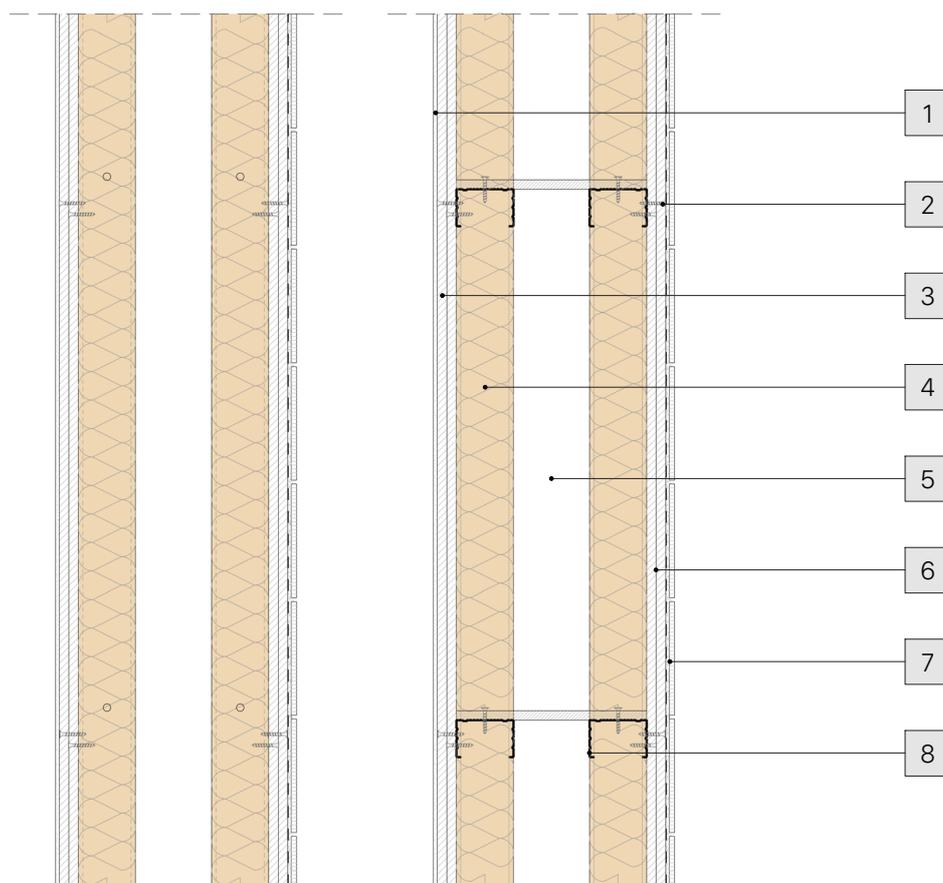
SCOSSA ESTERNA

[255]



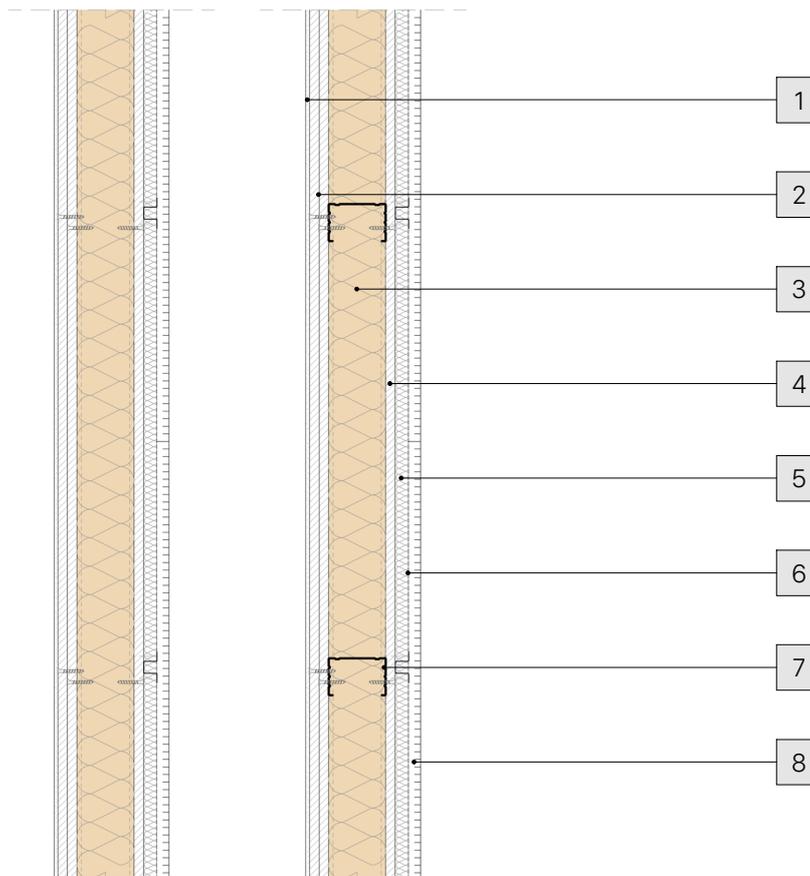
Il pacchetto di chiusura esterna è formato dal blocco strutturale in calcestruzzo stampato in 3D, nei cui cavetti si inseriscono i ferri strutturali (4 barre con  $\phi$  variabili in altezza), l'isolamento termico (perle di polistirene,  $\lambda= 0,032$  W/mK, tipo Basf Neopor) e l'impianto elettrico. A questo viene poi applicato un cappotto esterno con isolante in lana di roccia (sp. 8cm, tipo Knauf DP7), guaina impermeabilizzante bituminosa (impermeabilità all'acqua= 60 kPa, tipo Weber Dry) e rivestimento in lastre di calcestruzzo stampato (sp. 3cm) agganciate mediante sostegni regolabili in acciaio inossidabile (portata massima 1300 N, tipo Halfen BA Body Anchors, fissati alla struttura portante mediante tassello Fischer a espansione).

PV01 Parete con intercapedine (bagni), sp.31,5cm

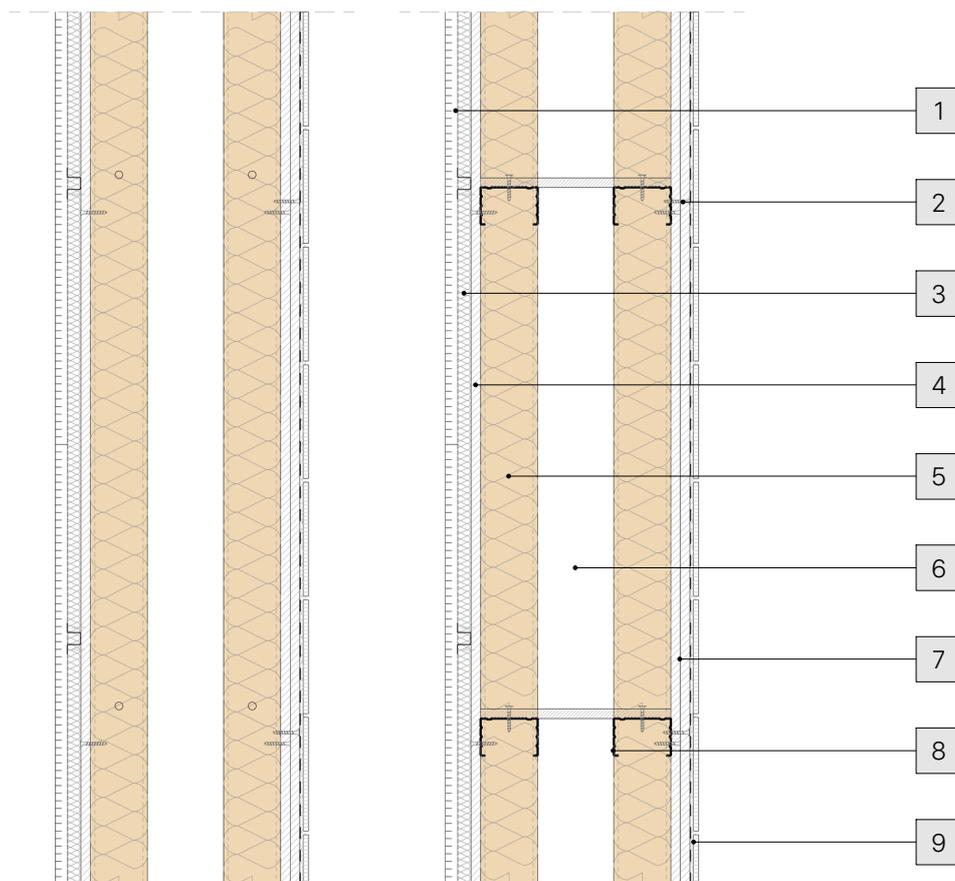


- 1 Strato di finitura: tinteggiatura
- 2 Elemento di fissaggio: vite a montaggio rapido in acciaio con filettatura a passo fine e punta a chiodo, dim. 0,35x3,5 cm, tipo Fischer VPC
- 3 Strato di rivestimento: 2 pannelli in cartongesso, dim. 120x120x1,25, tipo Knauf idrolastra H
- 4 Strato di isolamento termo-acustico: pannello in lana di canapa e fibra di poliestere, dim. 140x60x6 cm, tipo Celenit LC30
- 5 Cavedio impiantistico, sp. 10cm
- 6 Strato di rivestimento: 2 pannelli in cartongesso, dim. 120x120x1,25 cm, tipo Knauf idrolastra h
- 7 Strato di finitura: rivestimento impermeabilizzante Knauf Flaechendicht, colla Knauf Bau-und Fliesenkleber, rivestimento in piastrelle
- 8 Struttura portante: guide e montanti con profili a U e C in acciaio zincato, sp. 0,6 mm, tipo Knauf U 40x75x40 cm, C 50x75x50 cm

## PV02 Parete con singolo strato isolante e topakustic, sp.15cm

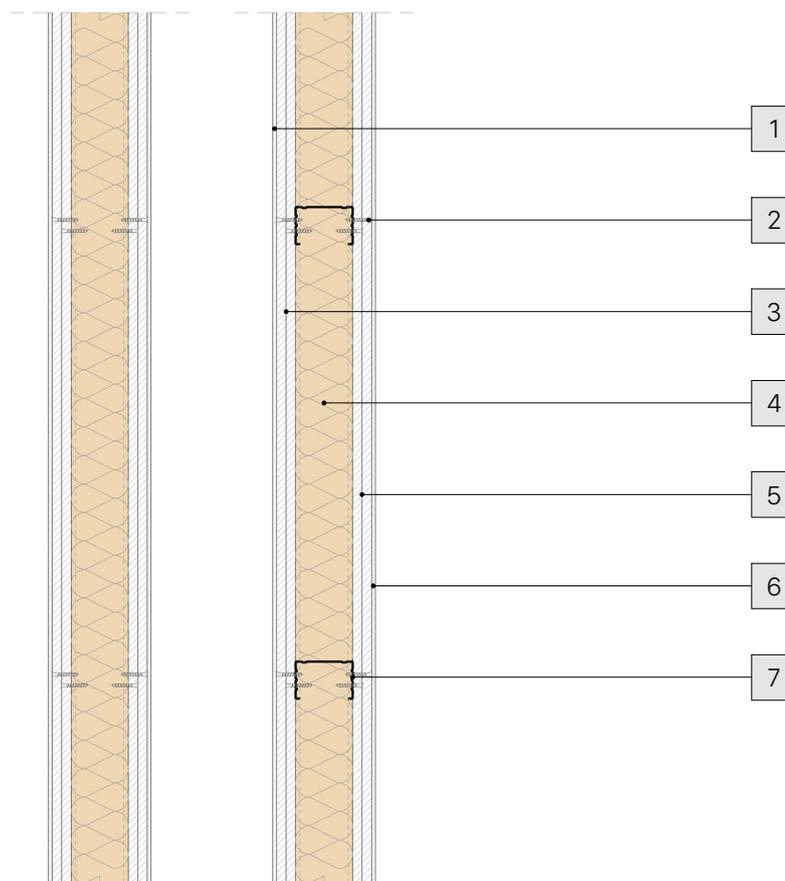


- 1 Strato di finitura: tinteggiatura
- 2 Strato di rivestimento: 2 pannelli in cartongesso, dim. 120x120x1,25, tipo Knauf lastra A
- 3 Strato di isolamento termo-acustico: pannello in lana di canapa e fibra di poliestere, dim. 140x60x6 cm, tipo Celenit LC30
- 4 Aquapanel indoor Knauf
- 5 Strato di isolamento in fibra minerale, sp. 1,75 cm
- 6 Strato di tessuto-non-tessuto in poliestere
- 7 Struttura portante: guide e montanti con profili a U e C in acciaio zincato, sp. 0,6 mm, tipo Knauf U 40x75x40 cm, C 50x75x50 cm
- 8 Strato di finitura: pannelli fonoassorbenti Topakustik Topperfo Type Micro, sp. 16 mm



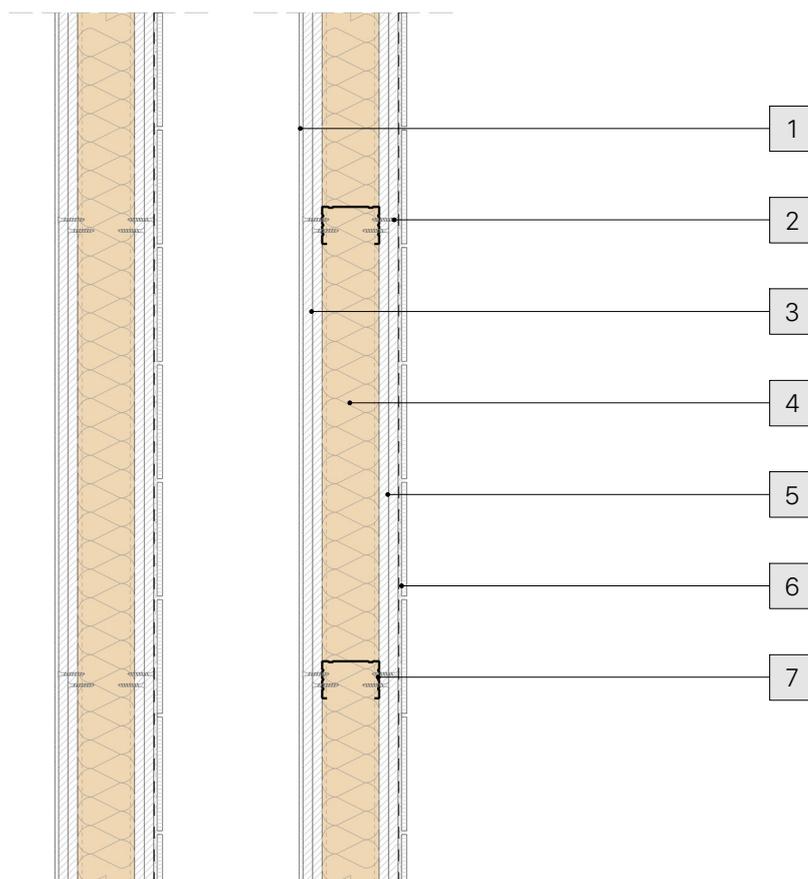
- 1 Strato di finitura: pannelli fonoassorbenti Topakustik Topperfo Type Micro, sp. 16 mm
- 2 Strato di isolamento termo-acustico: pannello in lana di canapa e fibra di poliestere, dim. 140x60x6 cm, tipo Celenit LC30
- 3 Elemento di fissaggio: vite a montaggio rapido in acciaio con filettatura a passo fine e punta a chiodo, dim. 0,35x3,5 cm, tipo Fischer VPC
- 4 Strato di isolamento in fibra minerale, sp. 1,75 cm
- 5 Aquapanel indoor Knauf
- 6 Strato di isolamento termo-acustico: pannello in lana di canapa e fibra di poliestere, dim. 140x60x6 cm, tipo Celenit LC30
- 7 Cavedio impiantistico, sp. 10cm
- 8 Strato di rivestimento: 2 pannelli in cartongesso, dim. 120x120x1,25, tipo Knauf lastra A
- 9 Struttura portante: guide e montanti con profili a U e C in acciaio zincato, sp. 0,6 mm, tipo Knauf U 40x75x40 cm, C 50x75x50 cm
- 9 Strato di finitura: rivestimento impermeabilizzante Knauf Flaechendicht, colla Knauf Bau-und Fliesenkleber, rivestimento in piastrelle

PV04 Parete con singolo strato di isolante, sp.13,5cm



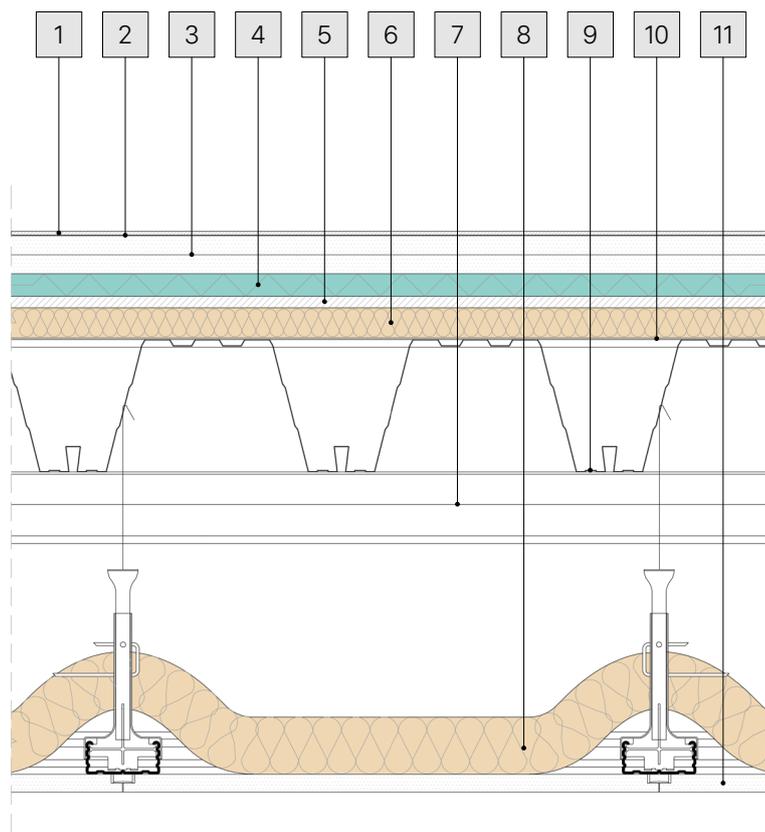
- 1 Strato di finitura: tinteggiatura
- 2 Elemento di fissaggio: vite a montaggio rapido in acciaio con filettatura a passo fine e punta a chiodo, dim. 0,35x3,5 cm, tipo Fischer VPC
- 3 Strato di rivestimento: 2 pannelli in cartongesso, dim. 120x120x1,25, tipo Knauf lastra A
- 4 Strato di isolamento termo-acustico: pannello in lana di canapa e fibra di poliestere, dim. 140x60x6 cm, tipo Celenit LC30
- 5 Strato di rivestimento: 2 pannelli in cartongesso, dim. 120x120x1,25, tipo Knauf lastra A
- 6 Strato di finitura: tinteggiatura
- 7 Struttura portante: guide e montanti con profili a U e C in acciaio zincato, sp. 0,6 mm, tipo Knauf U 40x75x40 cm, C 50x75x50 cm

PV05 Parete con singolo strato isolante (bagni), sp.14cm



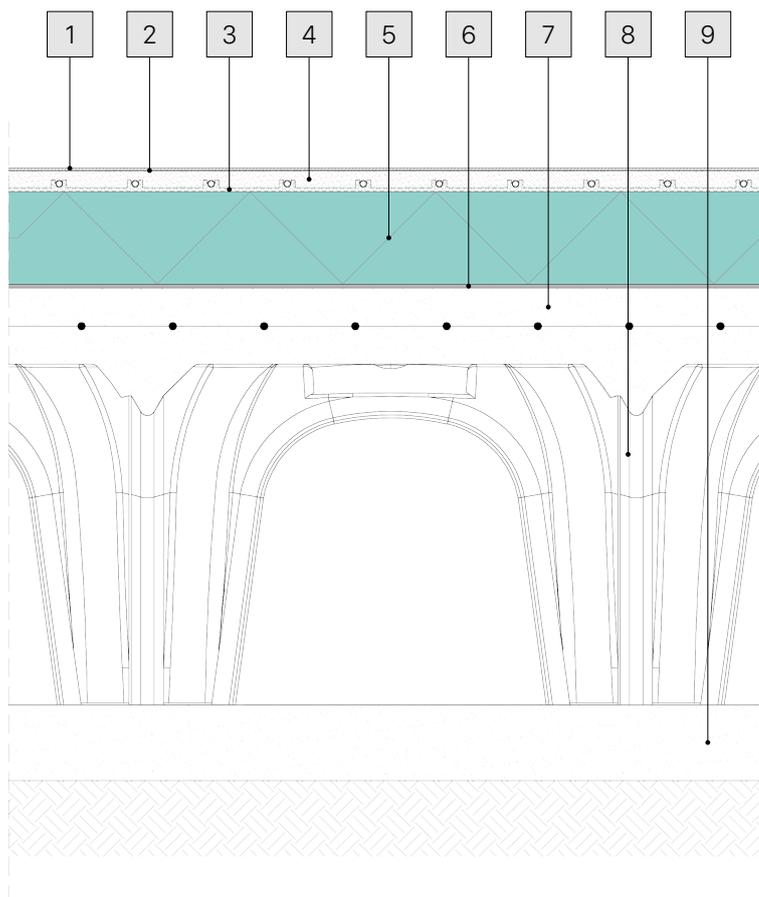
- 1 Strato di finitura: integgiatura
- 2 Elemento di fissaggio: vite a montaggio rapido in acciaio con filettatura a passo fine e punta a chiodo, dim. 0,35x3,5 cm, tipo Fischer VPC
- 3 Strato di rivestimento: 2 pannelli in cartongesso, dim. 120x120x1,25, tipo Knauf lastra A
- 4 Strato di isolamento termo-acustico: pannello in lana di canapa e fibra di poliestere, dim. 140x60x6 cm, tipo Celenit LC30
- 5 Strato di rivestimento: 2 pannelli in cartongesso, dim. 120x120x1,25, tipo Knauf lastra A
- 6 Strato di finitura: rivestimento impermeabilizzante Knauf Flaechendicht, colla Knauf Bau-und Fliesenkleber, rivestimento in piastrelle
- 7 Struttura portante: guide e montanti con profili a U e C in acciaio zincato, sp. 0,6 mm, tipo Knauf U 40x75x40 cm, C 50x75x50 cm

C001 Solanio con controsoffitto (cubo), sp.74cm



- 1 Strato di finitura: rivestimento in tessuto vinilico, dim 2x25 teli/ml, sp. 0,26cm, tipo Liuni Tatami Flow (Pearl)
- 2 Supporto: colla per pavimenti in tessuto vinilico, tipo Wulff GmbH Multi-Coll
- 3 Lastre in gesso rivestito per sottofondo a secco, dim. 125x200cm, sp. 2,5cm
- 4 Strato di isolante in pannelli rigidi di polistirene espanso estruso, dim. 60x125cm, sp. 3cm, tipo Knauf Polyfoam
- 5 Pannello OSB, dim. 200x200cm, sp. 3cm, tipo Dataholz
- 6 Strato isolante in lana di vetro, dim. 60x135cm, sp. 4cm, tipo Knauf Insulation TP138
- 7 Elemento strutturale: trave in acciaio IPE 270
- 8 Strato di isolamento termo-acustico: pannello in lana di canapa, dim. 60x140cm, sp. 6cm, tipo Celenit LC30
- 9 Lamiera grecata in acciaio, h. 17,5cm, sp. 0,12cm, tipo Marcegaglia EGB 2000GL
- 10 Strato di separazione: Velovetro, tipo Teknowool
- 11 Sistema di controsoffitto: sospensione in acciaio preverniciato antisismico, tipo Knauf - sottostruttura in traversini di acciaio ad incastro, dim. 60x1,5x4,3cm, tipo Armstrong Prelude 15 Universal - pannelli fotoassorbenti, tipo Topakustic Tipperfo Type Micro

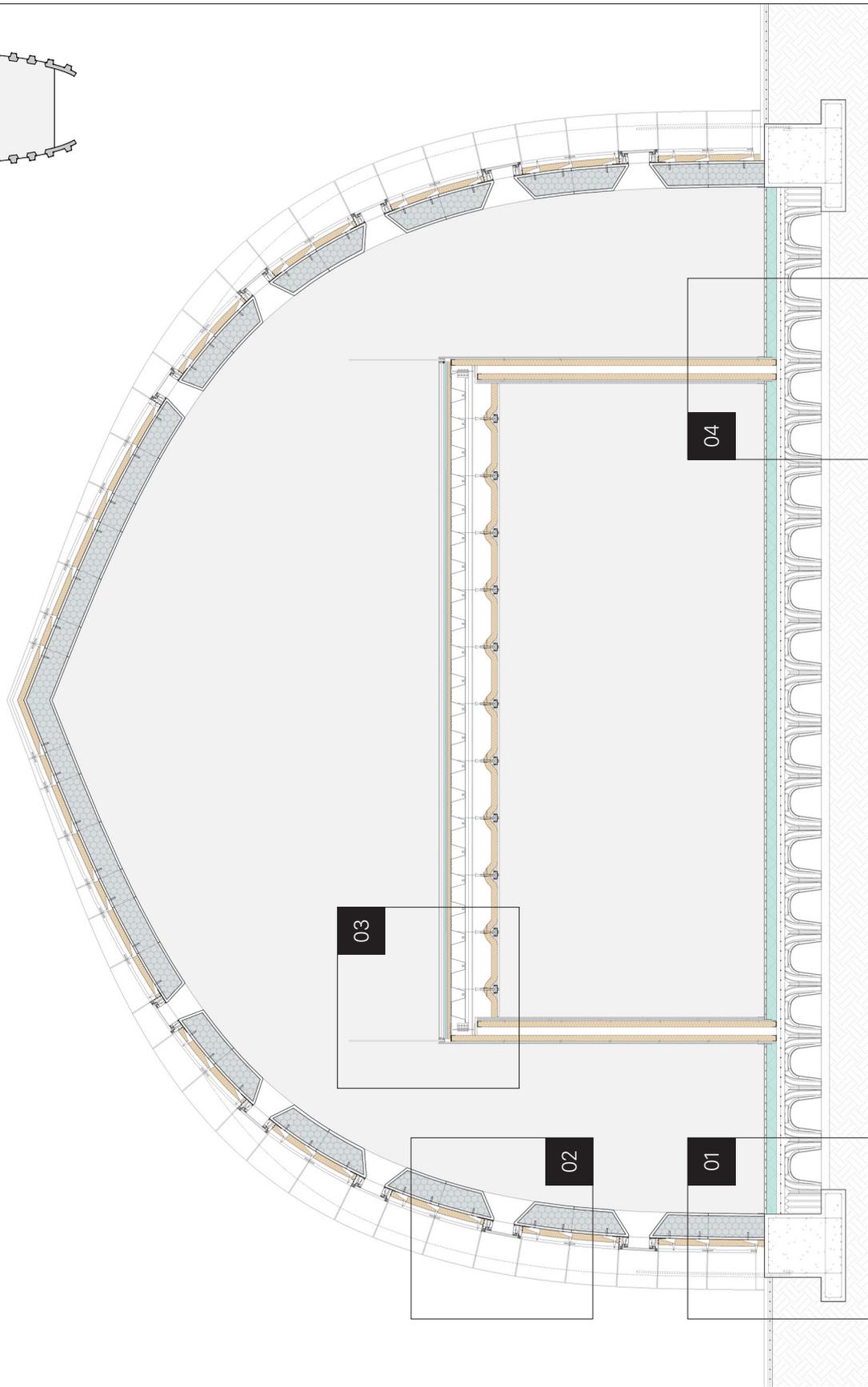
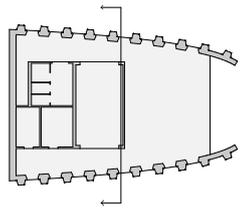
## CO02 Solanio controterra, sp.81cm



- 1 Strato di finitura: rivestimento in tessuto vinilico, dim 2x25 teli/ml, sp. 0,26cm, tipo Liuni Tatami Flow (Pearl)
- 2 Supporto: colla per pavimenti in tessuto vinilico, tipo Wulff Gmbh Multi-Coll
- 3 Climatizzazione: sistema radiante, pannello presagomato in EPS, tipo Kermi Xnet C11 - tubi  $\phi$ 16mm, sp. tot. 2,7cm
- 4 Massetto autolivellante a rapido indurimento, sp. 3cm, tipo Mapei Ultraplan Maxi
- 5 Strato di isolamento termico: pannello in fibre di legno pressate, dim. 60x135 cm, sp. 12cm,  $\lambda=0,040$  W/mK, tipo Celenit FL 150
- 6 Strato di tenuta all'acqua: membrana impermeabilizzante a base di legante vegetale rinforzata, impregnata con coating acrilico, con pellicola autoadesiva rimovibile, sp. 0,4cm, tipo Derbipure
- 7 Strato portate: getto di calcestruzzo collaborante con rete elettrosaldata in acciaio (maglia 12x12 cm), sp. 10cm
- 8 Camera di areazione: cassero a perdere per vespai aerati in resina termoplastica impermeabile all'umidità e gas Radon, dim. 50x50x45 cm, tipo Solido Igloo
- 9 Strato di livellamento: magrone in calcestruzzo, sp. 10cm

# SEZIONE TECNOLOGICA

SCALA 1:75



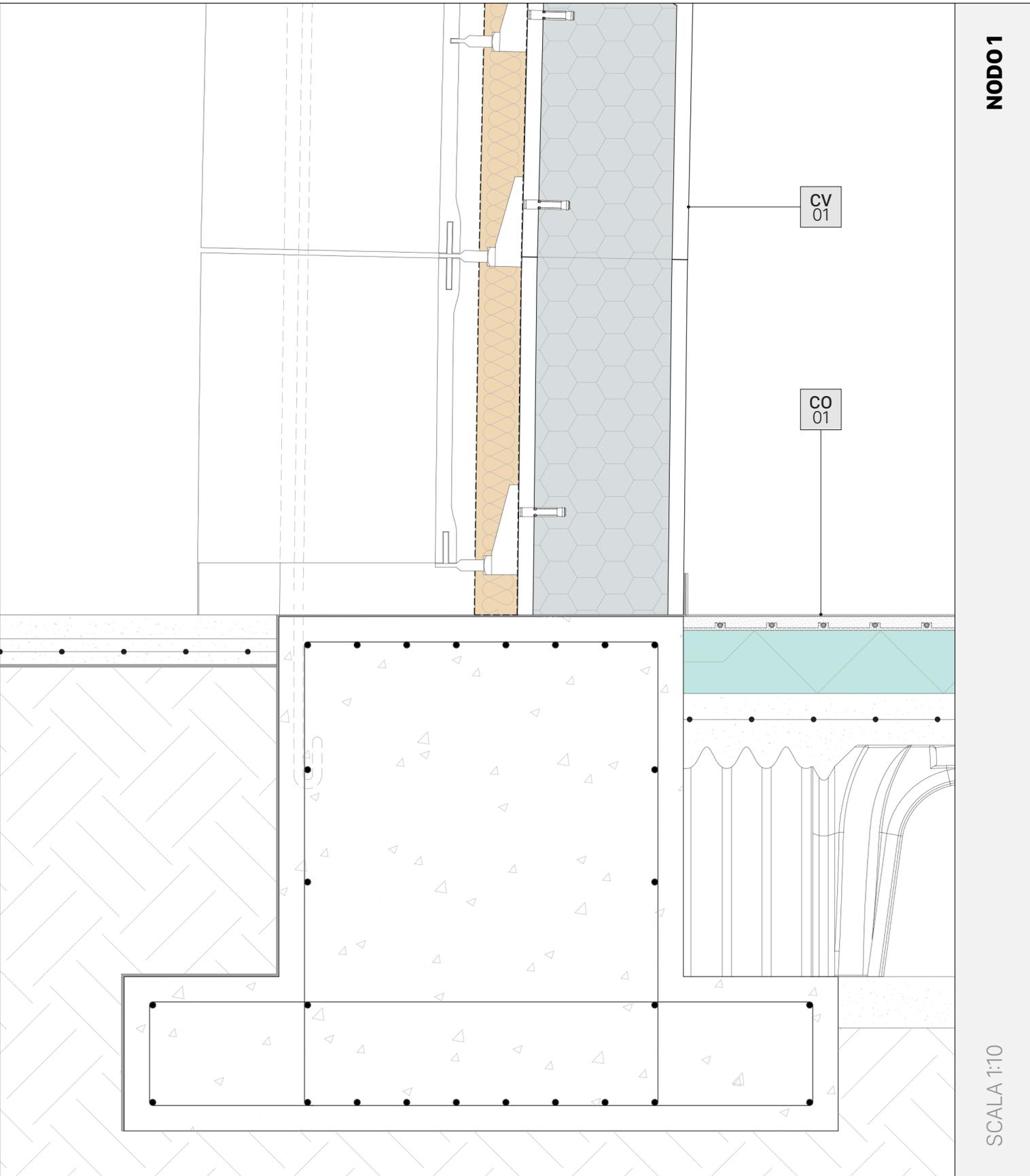
**NODI**  
COSTRUTTIVI

### **CV01**

- 1 Rivestimento esterno: lastre di calcestruzzo stampate in 3D, sp. 3cm
- 2 Membrana impermeabile bituminosa, tipo Weber Dry
- 3 Strato di isolamento in lana di roccia, sp. 8cm, tipo Knauf DP7
- 4 Membrana impermeabile bituminosa, tipo Weber Dry
- 5 Blocco in calcestruzzo stampato in 3D, sp. 3cm + isolamento in perle di polistirene posto in intercapedine, sp. 13 cm,  $\lambda= 0,032$  W/mK, tipo Basf Neopor

### **CO02**

- 1 Strato di finitura: rivestimento in tessuto vinilico, dim 2x25 teli/ml, sp. 0,26cm, tipo Liuni Tatami Flow (Pearl)
- 2 Supporto: colla per pavimenti in tessuto vinilico, tipo Wulff GmbH Multi-Coll
- 3 Climatizzazione: sistema radiante, pannello presagomato in EPS, tipo Kermy Xnet C11 - tubi  $\phi 16$ mm, sp. tot. 2,7cm
- 4 Massetto autolivellante a rapido indurimento, sp. 3cm, tipo Mapei Ultraplan Maxi
- 5 Strato di isolamento termico: pannello in fibre di legno pressate, dim. 60x135 cm, sp. 12cm,  $\lambda=0,040$  W/mK, tipo Celenit FL 150
- 6 Strato di tenuta all'acqua: membrana impermeabilizzante a base di legante vegetale rinforzata, impregnata con coating acrilico, con pellicola autoadesiva rimovibile, sp. 0,4cm, tipo Derbipure
- 7 Strato portate: getto di calcestruzzo collaborante con rete elettrosaldata in acciaio (maglia 12x12 cm), sp. 10cm
- 8 Camera di areazione: cassero a perdere per vespai aerati in resina termoplastica impermeabile all'umidità e gas Radon, dim. 50x50x45 cm, tipo Solido Igloo + compensatore laterale, tipo Cupolex Beton Stop
- 9 Strato di livellamento: magrone in calcestruzzo, sp. 10cm



NODO 1

CV  
01

CO  
01

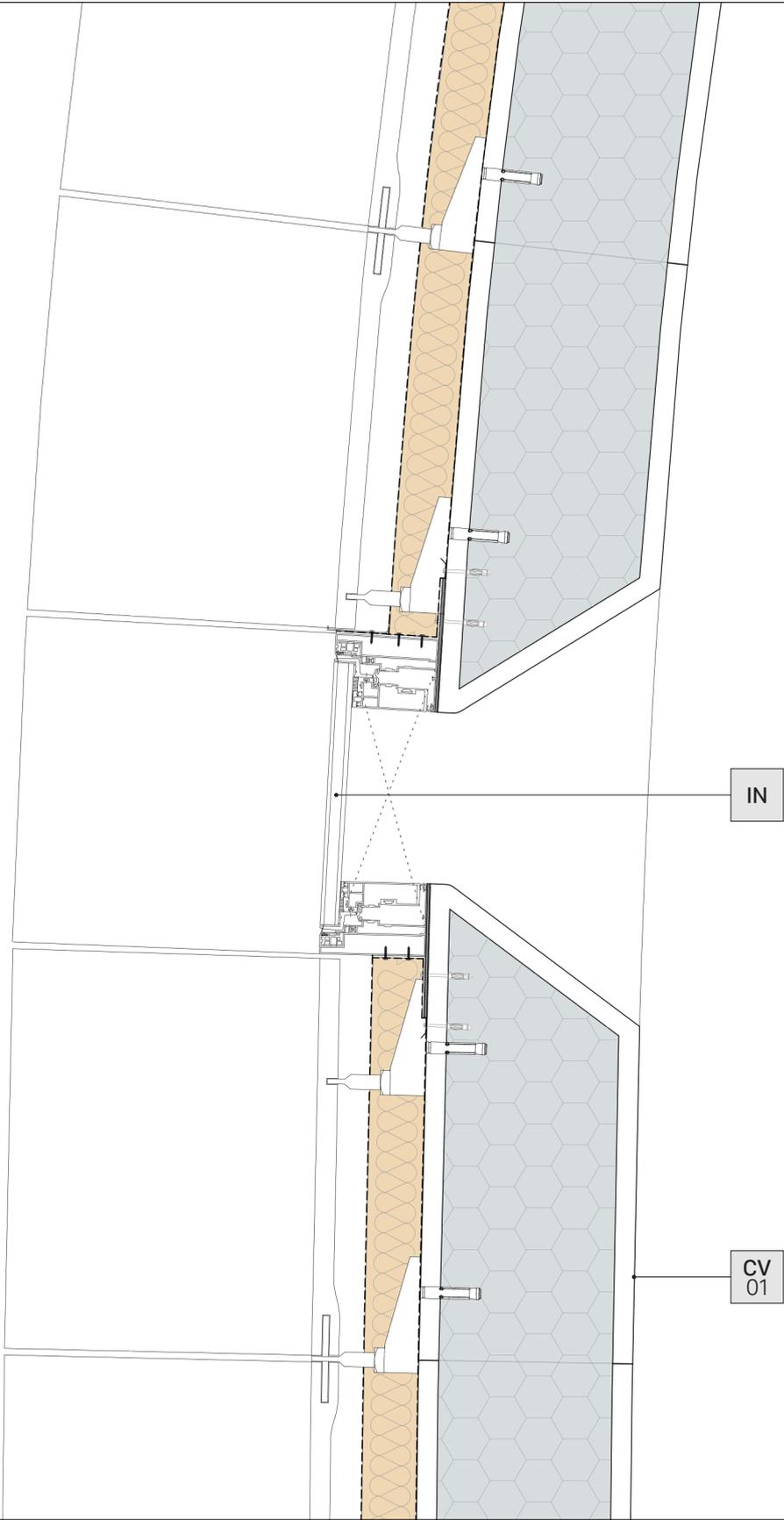
SCALA 1:10

### **CV01**

- 1 Rivestimento esterno: lastre di calcestruzzo stampate in 3D, sp. 3 cm
- 2 Membrana impermeabile bituminosa, tipo Weber Dry
- 3 Strato di isolamento in lana di roccia, sp. 8 cm, tipo Knauf DP7
- 4 Membrana impermeabile bituminosa, tipo Weber Dry
- 5 Blocco in calcestruzzo stampato in 3D, sp. 3 cm + isolamento in perle di polistirene posto in intercapedine, sp. 13 cm,  $\lambda = 0,032 \text{ W/mK}$ , tipo Basf Neopor

### **INFISSO**

- Dimensioni: 40x110 cm
- Telaio in alluminio
- Vetrocamera doppio con trasmittanza  $U = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Meccanismo di apertura automatizzata a pantografo
- Tipo Wicona WICLINE 90SG



**NODO 2**

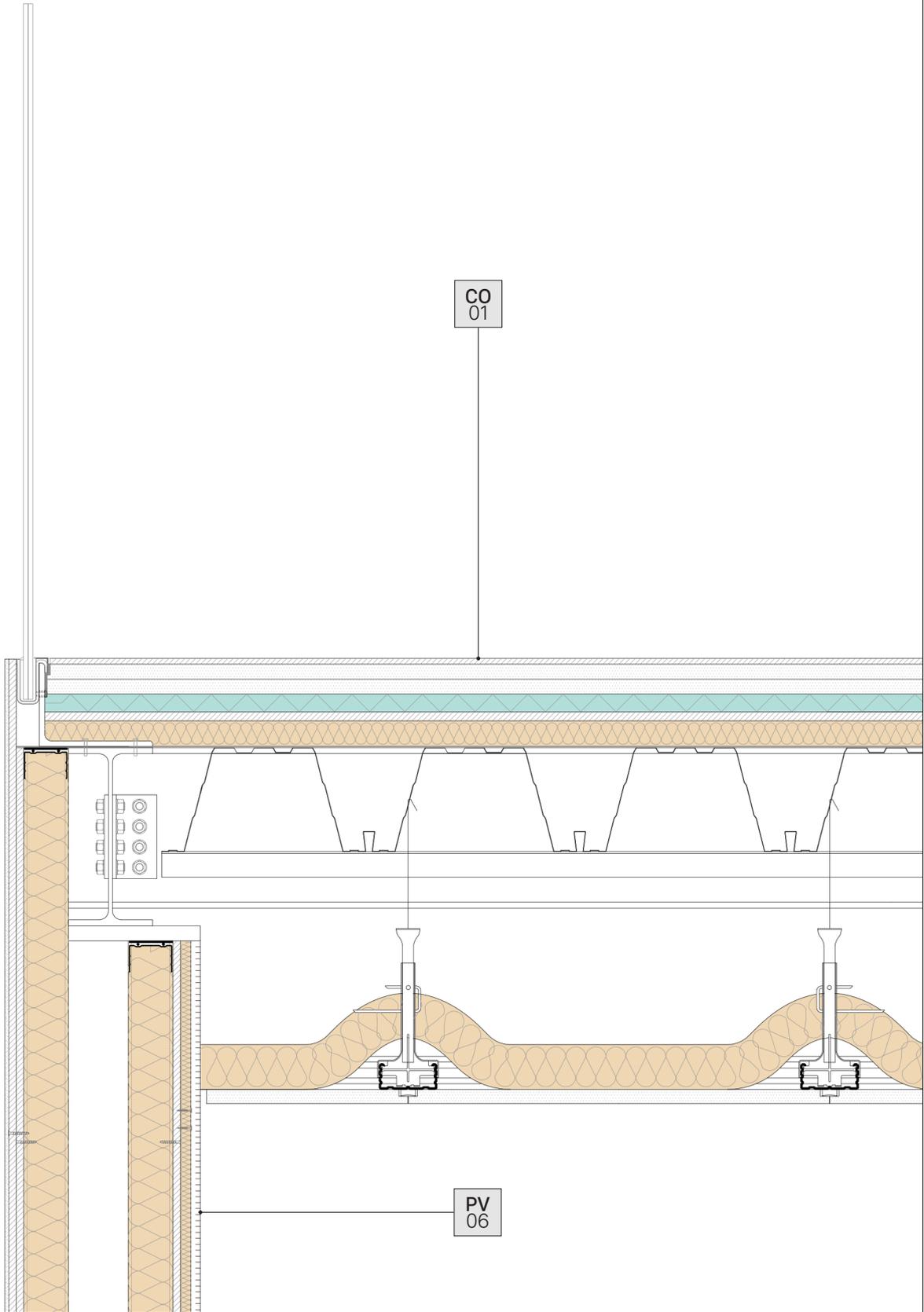
SCALA 1:10

## **CO01**

- 1 Strato di finitura: rivestimento in tessuto vinilico, dim 2x25 teli/ml, sp. 0,26 cm, tipo Liuni Tatami Flow (Pearl)
- 2 Supporto: colla per pavimenti in tessuto vinilico, tipo Wulff Gmbh Multi-Coll
- 3 Lastre in gesso rivestito per sottofondo a secco, dim. 125x200 cm, sp. 2,5 cm
- 4 Strato di isolante in pannelli rigidi di polistirene espanso estruso, dim. 60x125 cm, sp. 3 cm, tipo Knauf Polyfoam
- 5 Pannello OSB, dim. 200x200 cm, sp. 3 cm, tipo Dataholz
- 6 Strato isolante in lana di vetro, dim. 60x135 cm, sp. 4 cm, tipo Knauf Insulation TP138
- 7 Elemento strutturale: trave in acciaio IPE 270
- 8 Strato di isolamento termo-acustico: pannello in lana di canapa, dim. 60x140cm, sp. 6 cm, tipo Celenit LC30
- 9 Lamiera grecata in acciaio, h. 17,5 cm, sp. 0,12 cm, tipo Marcegaglia EGB 2000GL
- 10 Strato di separazione: Velovetro, tipo Teknowool
- 11 Sistema di controsoffitto: sospensione in acciaio preverniciato antisismico, tipo Knauf - sottostruttura in traversini di acciaio ad incastro, dim. 60x1,5x4,3 cm, tipo Armstrong Prelude 15 Universal - pannelli fotoassorbenti, tipo Topakustic Tipperfo Type Micro

## **PV06**

- 1 Strato di finitura: pannelli fonoassorbenti Topakustik Topperfo Type Micro, sp. 16 mm
- 2 Strato di isolamento termo-acustico: pannello in lana di canapa e fibra di poliestere, dim. 140x60x6 cm, tipo Celenit LC30
- 3 Elemento di fissaggio: vite a montaggio rapido in acciaio con filettatura a passo fine e punta a chiodo, dim. 0,35x3,5 cm, tipo Fischer VPC
- 4 Strato di isolamento in fibra minerale, sp. 1,75 cm
- 5 Aquapanel indoor Knauf
- 6 Strato di isolamento termo-acustico: pannello in lana di canapa e fibra di poliestere, dim. 140x60x6 cm, tipo Celenit LC30
- 7 Cavedio impiantistico, sp. 10 cm
- 8 Strato di rivestimento: 2 pannelli in cartongesso, dim. 120x120x1,25 cm, tipo Knauf lastra A
- 9 Struttura portante: guide e montanti con profili a U e C in acciaio zincato, sp. 0,6 mm, tipo Knauf U 40x75x40 cm, C 50x75x50 cm
- 10 Strato di finitura: tinteggiatura



**NODO 3**

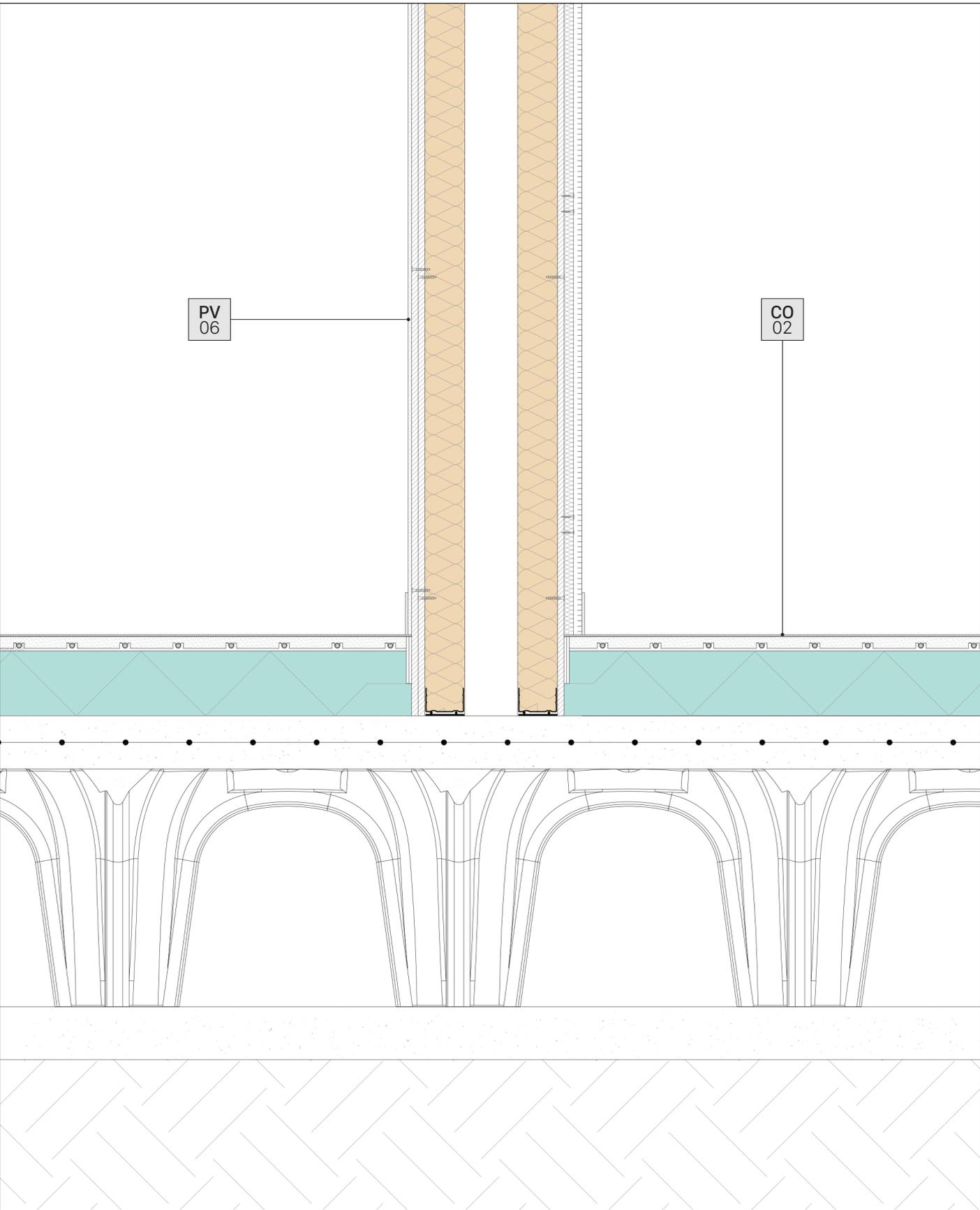
SCALA 1:10

## **PV06**

- 1 Strato di finitura: pannelli fonoassorbenti Topakustik Topperfo Type Micro, sp. 16 mm  
Strato di isolamento termo-acustico: pannello in lana di canapa e fibra di poliestere, dim. 140x60x6 cm, tipo Celenit LC30
- 2 Elemento di fissaggio: vite a montaggio rapido in acciaio con filettatura a passo fine e punta a chiodo, dim. 0,35x3,5 cm, tipo Fischer VPC
- 3 Strato di isolamento in fibra minerale, sp. 1,75 cm
- 4 Aquapanel indoor Knauf
- 5 Strato di isolamento termo-acustico: pannello in lana di canapa e fibra di poliestere, dim. 140x60x6 cm, tipo Celenit LC30
- 6 Cavedio impiantistico, sp. 10cm
- 7 Strato di rivestimento: 2 pannelli in cartongesso, dim. 120x120x1,25 cm, tipo Knauf lastra A
- 8 Struttura portante: guide e montanti con profili a U e C in acciaio zincato, sp. 0,6 mm, tipo Knauf U 40x75x40 cm, C 50x75x50 cm
- 9 Strato di finitura: tinteggiatura

## **CO02**

- 1 Strato di finitura: rivestimento in tessuto vinilico, dim 2x25 teli/ml, sp. 0,26cm, tipo Liuni Tatami Flow (Pearl)
- 2 Supporto: colla per pavimenti in tessuto vinilico, tipo Wulff GmbH Multi-Coll
- 3 Climatizzazione: sistema radiante, pannello presagomato in EPS, tipo Kermy Xnet C11 - tubi  $\phi$ 16mm, sp. tot. 2,7cm
- 4 Massetto autolivellante a rapido indurimento, sp. 3cm, tipo Mapei Ultraplan Maxi
- 5 Strato di isolamento termico: pannello in fibre di legno pressate, dim. 60x135 cm, sp. 12cm,  $\lambda=0,040$  W/mK, tipo Celenit FL 150
- 6 Strato di tenuta all'acqua: membrana impermeabilizzante a base di legante vegetale rinforzata, impregnata con coating acrilico, con pellicola autoadesiva rimovibile, sp. 0,4 cm, tipo Derbipure
- 7 Strato portate: getto di calcestruzzo collaborante con rete elettrosaldata in acciaio (maglia 12x12 cm), sp. 10 cm
- 8 Camera di areazione: cassero a perdere per vespai aerati in resina termoplastica impermeabile all'umidità e gas Radon, dim. 50x50x45 cm, tipo Solido Igloo
- 9 Strato di livellamento: magrone in calcestruzzo, sp. 10 cm



PV  
06

CO  
02

**NODO 4**

SCALA 1:10

# FASI COSTRUTTIVE

REALIZZAZIONE

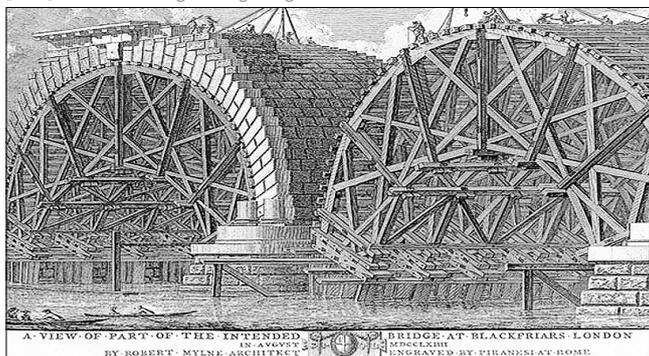
La complessità del progetto non si è esaurita con la definizione del blocco strutturale. Come si è più volte detto, infatti, questi blocchi vengono sovrapposti per formare una struttura ad arco. È però evidente che, fino a quando un arco non è completo, non può compiere il proprio lavoro e non può neanche sostenere se stesso; c'è quindi bisogno di una struttura temporanea che abbia la forma in negativo dell'arco stesso, che potrà essere rimossa solo al completamento dell'intero sesto dell'elemento strutturale.

## CENTINA

La centina è uno strumento estremamente antico nell'edilizia, che risale ai tempi in cui si incominciò ad usare strutture ad arco e a volta. I primi esempi di archi furono descritti da C. L. Wodei nelle sue opere sugli scavi di Ur in Mesopotamia, nelle quali data al 1400 a.C. il primo esempio di arco fuoriterra. Si può quindi dedurre che l'uso delle prime centine si collochi nel II millennio a.C. anche se il primo impiego monumentale di strutture che richiedano il loro utilizzo è dovuto alla civiltà Etrusca. I maggiori esperti nell'uso di questa struttura furono i Romani perché solo un uso frequentissimo di queste può aver consentito la costruzione dei numerosi acquedotti o i celebri ponti.

## ARCHI ROMANI IN INGHILTERRA

[256] ← [www.cadoganlodge.org.uk](http://www.cadoganlodge.org.uk)



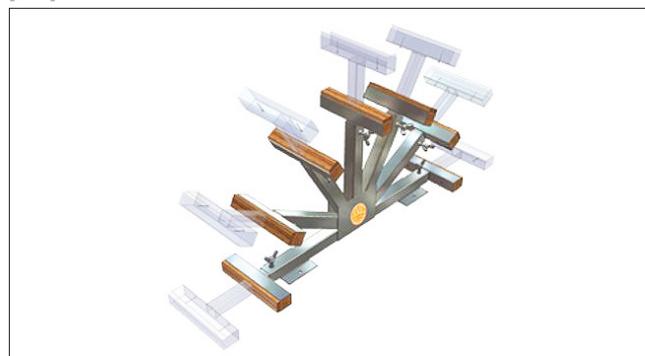
Questa tecnica non ha mai subito nei secoli particolari modifiche o innovazioni, fino a quando, nell'era Rinascimentale, ci si scontra con la necessità di disporre di travi lignee di dimensioni sempre più grandi, in particolare in Italia per le costruzioni di grandi opere come la cupola della cat-

tedrale di Santa Maria del Fiore a Firenze. A tutt'oggi la centina viene spesso realizzata in legno, perché può essere facilmente montata in opera, successivamente rimossa a pezzi e può essere "adattata" in caso di particolari esigenze di forma. Nell'antichità si realizzavano anche centine di terra, soprattutto per la costruzione di edifici complessi. Si formavano grandi cumuli di terra che, in superficie, venivano regolarizzati con assi di legno o con della paglia, sulla cui superficie concava venivano allettati i conci della volta (per centine di terra si parla in genere di volte e non di archi) fino al completamento del sesto e, in seguito, la terra veniva rimossa. Per edifici con molti archi o volte delle stesse dimensioni, si può realizzare un'unica centina in acciaio o in cemento armato per essere riutilizzata volta per volta.

Nel caso di ANT1, essendo l'edificio formato da più archi uguali per forma ma diversi per dimensione, si è optato per l'utilizzo di una nuova tipologia di centina che consenta di poter essere utilizzata per la posa in opera di ogni arco senza essere smantellata. Si tratta, in questo caso, di una **centina bilatera flessibile** in acciaio formata da 48 supporti regolabili in base alla conformazione dell'arco.

## ESEMPIO DI CENTINA FLESSIBILE

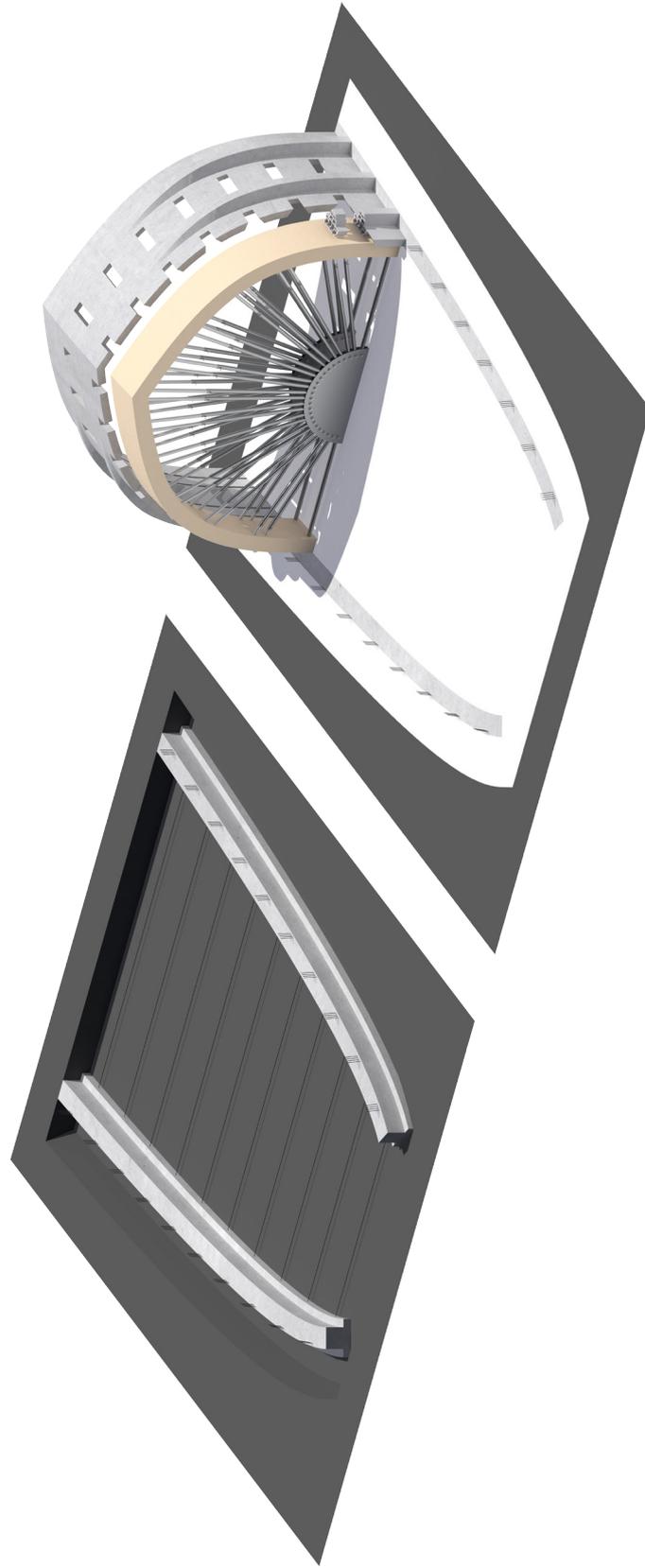
[257] ← [www.veroniedilizia.com](http://www.veroniedilizia.com)



Insieme alla struttura della centina si utilizzano, poi, dei pannelli di legno poco pregiato (unico elemento non riutilizzabile a causa del cambiamento di forma degli archi) a formare le dime di sostegno per i blocchi; questi possono essere però anche realizzati su misura in polistirolo. Di seguito di riportano le sequenze costruttive del progetto e l'aggancio della chiave di volta in sommità ottenuto tramite l'utilizzo di connessioni metalliche maschio-femmina filettate di tipo *HALFEN HBS-05 SCREW CONNECTIONS*.

# SCAVO + TRAVE DI FONDAZIONE

CON RICHIAMO DEI FERRI DI IMPOSTA DEGLI ARCHI



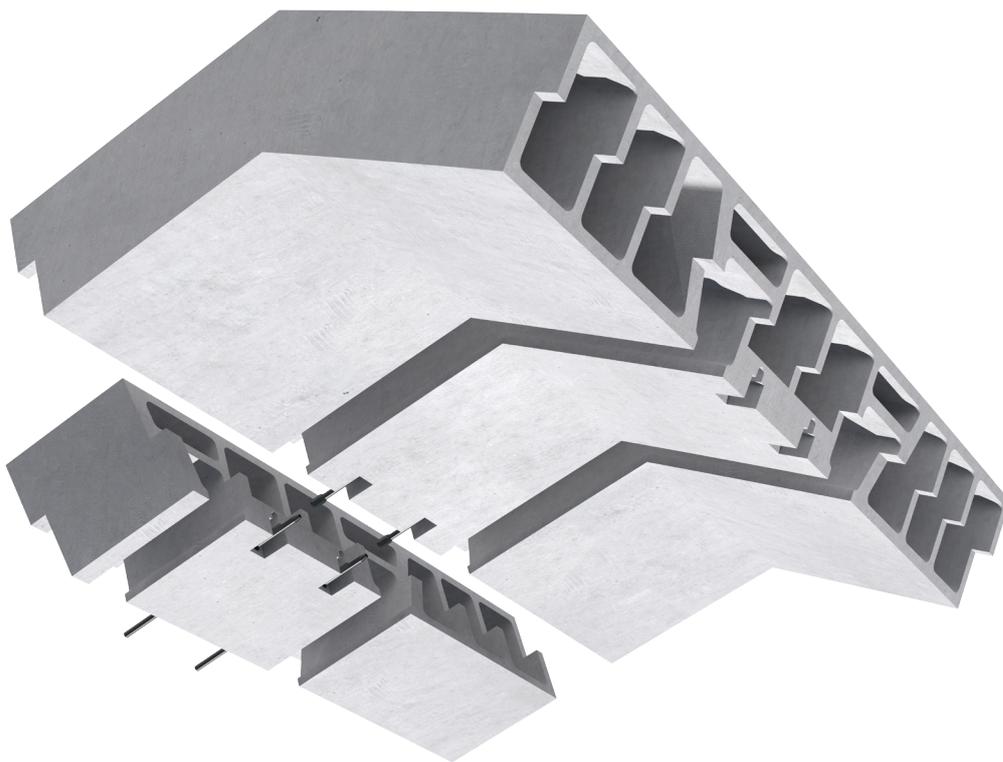
## CENTINA + CONCI

IMPILATI UNO SOPRA L'ALTRO CON SUCCESSIVO GETTO DI MALTA  
PER RENDERLI SOLIDALI TRA LORO E CON I FERRI DI ARMATURA INTERNI

[258]

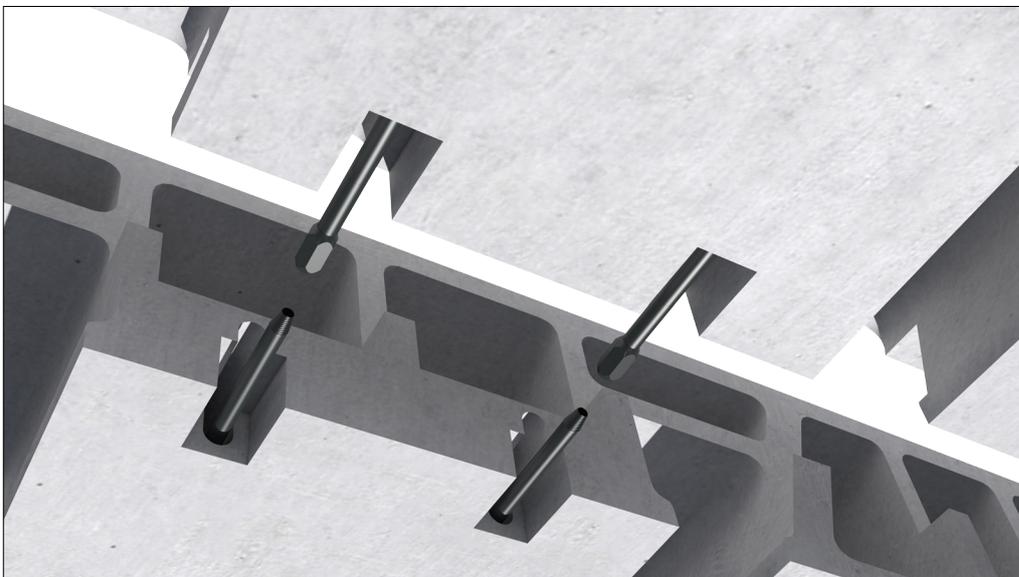
# CHIAVE DI VOLTA

SISTEMA DI AGGANCIO



[259]

Per mantenere la continuità dell'arco fra l'ultimo blocco e la chiave di volta, e per agevolare la posa in opera di quest'ultima, si è reso necessario realizzare degli incavi nel calcestruzzo stampato per consentire un più agevole avvvitamento manuale del giunto tra i ferri di armatura. Questi incavi vengono poi ripristinati attraverso un getto di malta.



[260]

# COMPUTO

## STIMA DEI COSTI

Un problema non trascurabile quando si parla di stampa 3D è quanto effettivamente costi un'opera realizzata sfruttando questa tecnologia. È una delle domande con le quali chi vuole intraprendere questa strada deve, prima o poi, scontrarsi e certamente non è una strada facile da percorrere. Benché gli esempi di utilizzo di manifattura additiva in ambito edile non manchino, sono per la maggior parte ancora delle sperimentazioni e questo non consente di delineare in maniera precisa quanto potrebbe costare un edificio. Alla luce però dei ragionamenti fatti in questo e nei precedenti capitoli, è possibile tracciare una guida, anche se assolutamente parziale e puramente orientativa, su questo argomento cruciale, che potrebbe giocare un ruolo rilevante nel successo o insuccesso della stampa 3D nel mondo delle costruzioni. Si è cercato quindi di condurre un confronto fra il costo di costruzione del padiglione con la

tecnologia Binder Jetting e quanto invece verrebbe a costare con gli attuali metodi di costruzione e l'esito è stato particolarmente interessante; secondo i calcoli si riuscirebbe a risparmiare circa il 20% sui costi totali e ridurre la durata di circa il 70%. È bene precisare però che alcuni dati propri della tecnologia di stampa 3D risultando ancora incerti, e più in generale alcune categorie di opere non sono state valutate, non facendo parte degli approfondimenti condotti in questa tesi. Nonostante ciò, questo lavoro è indubbiamente utile per comprendere, in buona approssimazione, le differenze esistenti fra i due modi di realizzare lo stesso progetto. Si riporta in questa pagina una sintesi del computo, mettendo in evidenza i soli costi necessari per la realizzazione dei blocchi che compongono gli archi, significativi per il confronto, poiché molto differenti fra loro. Si rimanda poi all'allegato per la stima completa dei costi di costruzione.

## TRADIZIONE VS STAMPA 3D

Elemento	Prezzo lavorazione [€]
Arco 1 (h = 10 m)	17.064,86
Arco 2 (h = 9,93 m)	16.699,01
Arco 3 (h = 9,8 m)	16.447,63
Arco 4 (h = 9,5 m)	16.259,32
Arco 5 (h = 9,2 m)	15.648,52
Arco 6 (h = 8,8 m)	14.966,12
Arco 7 (h = 8,36 m)	14.208,11
Arco 8 (h = 7,9 m)	14.037,10
Arco 9 (h = 7,5 m)	13.527,01
Arco 10 (h = 7 m)	13.252,86
TOT	152.110,55
Valori ottenuti considerando oltre il materiale (calcestruzzo) anche casseformi su misura per ogni blocco e tubi in pvc per la realizzazione dei fori per contenimento struttura, dell'isolante e degli impianti.	
Costo manodopera (4 persone)	84.782,80
Durata [giorni]	70

Elemento	Prezzo lavorazione [€]
Arco 1 (h = 10 m)	7.600
Arco 2 (h = 9,93 m)	7.300
Arco 3 (h = 9,8 m)	7.100
Arco 4 (h = 9,5 m)	9.000
Arco 5 (h = 9,2 m)	8.800
Arco 6 (h = 8,8 m)	8.600
Arco 7 (h = 8,36 m)	8.400
Arco 8 (h = 7,9 m)	8.000
Arco 9 (h = 7,5 m)	7.500
Arco 10 (h = 7 m)	7.300
TOT	79.600
Valori ottenuti considerando il solo materiale (calcestruzzo) poiché casseformi e tubi in pvc non necessari: tutti i fori vengono direttamente realizzati dalla stampante.	
Costo manodopera (3 persone)	17.512
1 operaio per il controllo da computer, 1 operaio per l'inserimento del materiale e 1 per il controllo della macchina durante la stampa.	
Durata [giorni]	19
Valore stimato in base ai tempi di ciclo della stampante D-Shape con capacità di stampa di 4m <sup>3</sup> in 8 ore	

CONCLUSIONI

Al termine di questo percorso, il mondo della stampa 3D appare, forse, un po' più chiaro. È un mondo nuovo, nato non molti anni fa ma che è riuscito in breve tempo a raggiungere incredibili risultati, soprattutto in ambiti come la prototipazione, il design e la medicina. Per farlo ha scelto una strategia ben precisa, cioè quella di puntare alla gente, senza nessuna distinzione ma insistendo invece sull'inclusione e soprattutto sulla forza delle connessioni. Si tratta comunque di ambiti che potremmo definire "piccoli" e questo spiega perché, su larga scala, la manifattura additiva sia ancora indietro. Più grande è l'ambito, più grandi sono i problemi. È chiaro che, la possibilità di utilizzare una stampante 3D in ambito edile è indubbiamente un argomento affascinante e, a dispetto della generare diffidenza, le ricerche e le sperimentazioni condotte da alcuni imprenditori, artigiani e note università, come ad esempio il MIT di Boston, hanno chiarito alcun dubbi in merito.

#### ***Perché costruire un edificio con una stampante 3D?***

Una considerevole diminuzione degli sfridi, dei costi di costruzioni ma anche le agevolazioni nel trasporto e nella gestione del cantiere sono solo alcune delle risposte. A queste si aggiunge la semplificazione delle lavorazioni da effettuare, dovute anche alla possibilità di evitare l'utilizzo di strutture di supporto (casseformi) da dover poi smontare alla fine della costruzione dell'opera. Se da una parte però i vantaggi sembrerebbero incoraggianti, dall'altra si riscontrano ancora parecchi ostacoli.

#### ***Quali sono i limiti della stampa 3D oggi?***

Benchè ormai si sia capito che qualsiasi materiale può essere estruso, a patto di modifiche nei meccanismi di stampa e sull'ugello dell'estrusore, si sta ancora studiando come ottimizzare le loro caratteristiche meccaniche di resistenza, dato che queste vengono purtroppo alterate durante processo di stampa. Ad oggi le due tecnologie che si prestando allo scopo di poter realizzare manufatti edili solo la FDM e la SLS (in particolare la Binder Jetting) ma entrambe hanno dei pregi e dei difetti. La prima, in particolare, si basa sul processo di estrusione di materiale fluidodensso layer-by-layer, in cui le fasi di presa e indurimento tra uno strato e quello successivo sono le più delicate, poiché comportano modifiche nella resistenza del materiale stesso. A questo si aggiungono una componente estetica, poiché tale tecnologia porta ad ottenere sulle superfici un caratteristico effetto "dentifricio" (dovuto alle alte tolleranze del materiale stampato) e la necessita di utilizzare supporti per la realizzazione di sbalzi più o meno importanti. La Binder Jetting di contro, utilizzando materiale granulare, presenta una maggiore precisione e non obbliga all'utilizzo

di supporti poiché il materiale non stampato funge esso stesso da supporto. Le difficoltà in questo caso stanno nel mix design della "polvere" e nell'ingegnerizzazione e ottimizzazione della macchina che esegue la stampa. Entrambi i sistemi però vanno avanti a passi da gigante e questo sembra un buon auspicio per il futuro.

#### ***Quanto tempo occorrerà prima che la stampa 3D si affermi nel campo dell'edilizia?***

È difficile fare previsioni sulle tempistiche perché a questa scala i tempi si dilatano e le continue ricerche non è detto che portino ai risultati sperati. In altri ambiti, come quello delle nanotecnologie o del biomedicale, la "rivoluzione" è già avvenuta ma non è altrettanto assicurato che sarà così anche per il mondo edile. Costruire è un processo molto complesso, i parametri in gioco sono tanti e questo spiega, forse, perché ancora poche persone sperimentino in questo ambito. Non è detto quindi che un domani si potrà costruire un manufatto stampandolo interamente e in alcuni casi non avrebbe neanche senso, come in quello della realizzazione delle fondazioni di un edificio. È forse più utile pensare ad un utilizzo incrociato di sistemi tradizionali e quelli basati sul 3D printing in modo che si compensino a vicenda.

#### ***Dove conviene usare la stampa 3D e dove non ha senso?***

Architetture ardite richiedono parametrizzazioni complesse, che loro volta necessitano di un lavoro ingegneristico impressionante. In questo senso l'uso di tecnologie di manifattura additiva può liberare le forme, rendendo più semplice il processo che porta dall'ideazione alla realizzazione di un'opera. È però soprattutto nella sinergia che si instaura fra ambiti apparentemente slegati dell'iter progettuale, cioè quello architettonico, ingegneristico e tecnologico, che si comprende il vero contributo forte che la stampa 3D può dare a questo settore. Può anche concentrarsi, ed in parte lo sta facendo, su dei componenti come gli elementi di giunzione che ancora soffrono di complessità realizzative ed imprecisioni non trascurabili. Maggiore precisione porta a minori problematiche e queste a loro volta portano a maggiore efficienza. Ottimizzazione ed efficienza sono quindi le chiavi di lettura con le quali andrebbe interpretata ogni tecnologia, manifattura additiva compresa, e questo, secondo noi, è lo scenario futuro più interessante verso il quale rivolgere lo sguardo. Questo scenario non è però statico, varia da luogo a luogo, da contesto a contesto, da progetto a progetto e ha la forza di adattare i suoi strumenti, in questo caso la stampa 3D, per rispondere al meglio ai problemi e alle esigenze che il mondo di oggi chiede e di cui il mondo di domani avrà bisogno.

VIAGGIO

Se guardiamo indietro ora, alla fine di questo percorso, ci rendiamo conto di quanto non sia stato facile. Siamo partiti da una semplice curiosità verso questo “nuovo mondo”, senza nessun tipo di conoscenza sulla manifattura additiva ne tantomeno sui makers, le “formiche operaie” che fanno muovere tutto quanto e che danno il titolo a questa tesi. È un mondo in continuo fermento e sorprende il fatto che parta dal basso. Probabilmente l’idea più incredibile sta proprio nella rivoluzione della filiera produttiva: si parte da un’idea, la si progetta (talvolta sbagliando e riprovando), e alla fine la si produce. Tutto da sé.

Il percorso di questa tesi non è poi così diverso perché la stampa 3D ci ha dato la possibilità di pensare ad ANT in ogni suo aspetto. La difficoltà iniziale è stata quella di dover, inizialmente, mettere da parte il bagaglio di conoscenze e *strumenti* che avevamo ed entrare nel “formicaio” per cercare di capirne i meccanismi attingendo quante più informazioni possibili. Non si sapeva a priori la strada da percorrere, non c’erano basi sicure; non si sapeva nemmeno se quanto ipotizzato potesse essere veramente realizzato. Questa tesi, sicuramente, non basta per rispondere a questa domanda e più in generale non è sufficiente per allontanare lo scetticismo che ancora oggi c’è quando si parla di “stampare una casa in 3D”. Molte domande infatti restano ancora aperte e molte problematiche sono ancora irrisolte ma solo guardando avanti e continuando a sperimentare si capirà qualcosa in più su questo mondo.

ANT vuole essere proprio un *passo*, seppur piccolo, di questa ricerca e di questo ottimismo verso un modo diverso di pensare ad un progetto. Una piccola parte che ci ha permesso di conoscere *uomini* che hanno una straordinaria voglia di fare e che la loro rivoluzione la stanno già facendo, dalle piccole alle grandi cose.

La Maker Faire di Roma del 2014 è stato il primo vero contatto con questa realtà fino ad allora sconosciuta ed è lì che nomi come Massimo Moretti o Enrico Dini, iniziavano a diventare familiari. Quello che era certo è che conoscere queste persone sarebbe stato fondamentale per andare avanti. Questa consapevolezza ci ha portato in vari *luoghi* d’Italia, vere e proprie officine artigiane, con l’unica differenza che c’erano molti più computer rispetto a quelle tradizionali. A Massa Lombarda, ad esempio, nella sede di WASProject, Massimo Moretti ci ha raccontato la sua personale visione di quella storia che oggi i makers stanno scrivendo, spiegandoci quell’obiettivo che lo portò a fondare la sua azienda più di 3 anni fa, ovvero quello di utilizzare la sua stampante più grande, la “BigDelta”, per fornire alloggi, stampati in argilla, alle popolazioni

africane. Altra sosta di questo viaggio è stata quella alla Dini-Tech SPA, in provincia di Pisa, dove finalmente abbiamo avuto l’opportunità di vedere in azione la stampante più grande del mondo (D-Shape) e abbiamo testato personalmente i pro e i contro di materiali differenti. A Pavia, invece ci siamo confrontati con il Professore Ferdinando Auricchio, che oltre ad insegnare Scienza delle Costruzioni all’Università, sta investendo tempo, risorse ed energie nella ricerca di soluzioni strutturali in cemento armato che possano essere stampate in 3D.

Non si può pensare di portare avanti un lavoro di questo tipo senza instaurare questo tipo di rapporti. Le esperienze accumulate ci hanno consentito di riempire quel bagaglio di conoscenze necessarie per realizzare il nostro progetto.

Questo ci ha consentito anche di esporre a *parole* lo stato dell’arte della nostra ricerca durante un workshop al FaberLab di Varese dal titolo “Stampa 3d in edilizia: innovazione tecnologica per costruire su misura” e, tra a tante domande e allo scetticismo di cui parlavamo prima, ci siamo accorti che c’era invece tanta curiosità, voglia di conoscere i *fatti* e di sperimentare queste nuove frontiere del “fare” [252].

Mentre scriviamo la conclusione di questo lavoro, la ricerca continua a raggiungere *traguardi* importanti; già ad alcune domande è riuscita a dare una risposta, altre la aspettano e tante ancora devono essere formulate. Nessuna delle persone che abbiamo conosciuto ci ha mai detto “Non si può fare”, al contrario ci hanno aiutato a capirne le potenzialità al di là dei limiti che ancora permangono. Soltanto una continua ricerca permetterà, forse, di superare questi problemi.



# ALLEGATI

## CAPITOLO 1

## CONTOUR CRAFTING E DR. BEHROKN KHOSHNEVIS + USC UNIVERSITY OF SOUTHERN CALIFORNIA

📄 Iakupovic A., *Large scale additive manufacturing*, Università degli Studi di Trieste, Tesi di Laurea, 2012/2013

🌟 Contour Crafting: Automated Construction (Behrokh Khoshnevis at TEDxOjai): [www.youtube.com/watch?v=JdbJP8Gxqog](http://www.youtube.com/watch?v=JdbJP8Gxqog)

🌟 Contour Crafting: [www.youtube.com/watch?v=ln85woMsgTE](http://www.youtube.com/watch?v=ln85woMsgTE)

🌐 [www.contourcrafting.org](http://www.contourcrafting.org)

🌐 [www.3dprint.com/17647/3d-printing-countour-crafting/](http://www.3dprint.com/17647/3d-printing-countour-crafting/)

Nel 1996 Behrokn Khoshnevis, professore di ingegneria presso la University of Southern California, ha trovato un modo rivoluzionario per costruire abitazioni in meno di un giorno con una stampante 3D gigante, usando strati di cemento invece che plastica. Il professore ha progettato un metodo di costruzione idoneo a questo tipo di attività. Il macchinario, sulla base di un disegno CAD, con un sistema di stratificazione del cemento chiamato Contour Crafting, in meno di un giorno costruisce un intero edificio dalle fondamenta in calcestruzzo, i muri e l'impianto idraulico. Resta da aggiungere soltanto porte e finestre.

Contour Crafting viene definito come una tecnologia di fabbricazione additiva che usa il controllo di un computer per sfruttare la capacità di formare superfici spatolate lisce, sia piane che di qualsiasi forma. Dalla definizione si evince che il meccanismo più importante di questo sistema è rappresentato dal sistema di spatolata che pressa sulla pasta cementizia e le conferisce una superficie accuratamente liscia strato su strato. Il meccanismo robotico mima accuratamente i movimenti fatti dai metodi manuali tradizionali per la finitura delle superfici, per cui vengono usati specifici utensili come spatole, scalpelli e altri, con il medesimo scopo di creare una superficie liscia anche se curva. La stampante 3D che viene utilizzata è dotata di due grandi braccia simili a gru e di una trave trasversale che trasporta le testine di stampa; un robot che scorre attraverso binari ed è in grado di lavorare simultaneamente su tutte le parti della casa, costruendone una su due piani in appena 24 ore; purché lo spazio circostante sia preparato e le fondamenta già al loro posto.

L'idea principale alla base del progetto è quella di creare i contorni dell'oggetto e poi riempire la parte interna per iniezione o colata di cemento. Questo crea un sistema ibrido: il Contour Crafting opera in qualità di stampo per altro materiale. L'estrusione crea il bordo esterno che viene spianato e può anche essere leggermente angolato se il progetto lo richiede. Questo comunque è soggetto a limitazioni dovute alla forza di gravità che potrebbe compromettere la stabilità del materiale non polimerizzato sporgente.

Sebbene il Contour Crafting può usare una vasta varietà di materiali (polimeri, impasto ceramico, cemento e molti altri, purché siano in forma pastosa) e può essere usato in un vasto campo di funzioni, il potenziale più grande è stato mostrato nel campo delle costruzioni e per applicazioni in situ. Essendo un sistema a portale, può essere trasportato interamente direttamente sul posto, riducendo considerevolmente i tempi di costruzione. La struttura del portale è stata progettata per essere montata su due corsie parallele costruite sul posto, sulle quali si può muovere e trasportare l'ugello di estrusione in tutte e tre le direzioni.

Il materiale utilizzato per essere stampato in 3D in edilizia, come già detto, è il calcestruzzo che però è composto da una miscela di polimeri di cemento e fibre, il che significa che è tre volte più forte del calcestruzzo utilizzato normalmente. Inoltre al calcestruzzo si aggiungono resine chimiche per controllare la viscosità e il tempo di stagionatura del materiale. I benefici di questa tecnologia, in edilizia, sono:

- Flessibilità di progettazione;
- Materiali multipli;
- Condotti funzionali;
- Superfici pronte per essere pitturate e pitturazione automatica;
- Rinforzo automatico;
- Automatismi aggiuntivi;
- Impianto idraulico automatizzato.

### Flessibilità di progettazione

La tecnologia permette di costruire forme complesse con vuoti funzionali che sono difficili da realizzare con i metodi tradizionali.

### Materiali multipli

Il sistema può utilizzare differenti materiali che possono essere usati sia per le superfici che per il riempimento dei vuoti e può anche essere alimentato con sostanze chimicamente reattive mescolate nell'ugello per formare un miscuglio prima della deposizione. La quantità può essere accuratamente controllata e ottimizzata dal computer, rendendo pos-

sibile avere differenti design per diverse sezioni e avere esattamente la giusta miscela e averla solo dove c'è bisogno (le parti strutturali possono avere un materiale più resistente, mentre altre parti possono avere materiali più performanti per l'isolamento termica).

### **Condotti funzionali**

I vuoti funzionali possono essere costruiti dentro il muro seguendo accuratamente i dati specifici del CAD, eliminando così il bisogno di forature addizionali e di installazioni dopo che la struttura è stata costruita.

### **Superfici pronte per essere pitturate e pitturazione automatica**

La qualità delle superfici nel Contour Crafting è superiore alle altre tecnologie di manifattura additiva. Poiché questa qualità è dovuta al meccanismo della spatolatura, essa non cambia con le dimensioni dell'ugello. Anche con l'aggiunta di altri materiali, come la sabbia, la ghiaia, le fibre di rinforzo e similari, l'accuratezza della superficie rimane tale da non richiedere ulteriori finiture, e può essere pitturata direttamente, velocizzando così il processo di finitura delle superfici. È possibile anche installare un meccanismo di pitturazione automatico che renda il sistema ancora più veloce.

### **Rinforzo automatico**

Una rete di rinforzo di acciaio può essere integrata dentro ciascuno strato usando semplici componenti modulari forniti da un sistema di alimentazione montato sul portale. Una volta che la maglia di acciaio è stata costruita dal Contour Crafting, il calcestruzzo può essere colato dentro per riempire i vuoti. Questo sistema può essere integrato con il sistema di estrusione creando un muro finito, liscio e funzionale con una struttura di rinforzo, tutto in una sola operazione. Possono essere usati materiali di rinforzo innovativi, come fibre di carbonio o di vetro, che possono essere direttamente alimentate attraverso l'ugello per formare strutture continue di rinforzo dentro la matrice di materiale depositato. Inoltre il calcestruzzo può essere estruso direttamente con un materiale di rinforzo a spirale per dare una presa più forte agli strati aumentandone le proprietà meccaniche complessive.

### **Automatismi aggiuntivi**

Nel sistema può essere integrata una piastrellata automatica di pavimenti e pareti (uno speciale braccio robotico può essere installato sulla stessa struttura che utilizza l'ugello del Contour Crafting).

### **Impianto idraulico automatizzato**

Contour Crafting è in grado di produrre vuoti funzionali all'interno della struttura che possono essere facilmente usati per automatizzare l'impianto idraulico. Dopo l'estrusione di alcuni strati, un tratto di impianto viene inserito nello spazio vuoto e si attacca al tratto precedentemente installato.

Uno dei problemi principali del sistema Contour Crafting è la stretta dipendenza dalle forze gravitazionali. Poiché il sistema non si basa su un materiale di supporto, le sue capacità sono limitate a 2,5 libertà dimensionali. Al fine di creare forme veramente tridimensionali il sistema si basa su alcune possibili soluzioni:

- Travi e sistemi di pavimentazione prefabbricati;
- Estrusione non planare per le strutture senza sostegno;
- Generazione automatica di supporti sacrificali.

### **Travi e sistemi di pavimentazione prefabbricati**

Una delle soluzioni possibili per sfuggire al vincolo orizzontale è quella di usare elementi prefabbricati disponibili in loco. Questi elementi potrebbero essere posizionati da bracci robotici installati sul sistema. Per le finestre e per le porte si potrebbe posizionare un'architrave sulla quale estrudere lo strato successivo. Per le strutture del pavimento e del soffitto si potrebbe posizionare un sistema completamente prefabbricato. Questi sistemi facilmente integrabili, sono già disponibili in edilizia.

### **Estrusione non planare per le strutture senza sostegno**

L'ugello del Contour Crafting ha un alto grado di libertà di movimenti nello spazio, che gli permettono di operare con differenti angoli di inclinazione piuttosto che essere vincolato ad un metodo di stratificazione orizzontale. Imitando i metodi di costruzione manuale delle forme tradizionali, come le cupole e le volte, dove archi inclinati vengono depositati uno su l'altro, è possibile generare automaticamente la struttura dal basso verso l'alto.

### Generazione automatica di supporti sacrificali

In alcuni casi la struttura non potrebbe essere costruita senza essere supportata, poiché cadrebbe durante la costruzione. Tuttavia, la stessa struttura sarebbe stabile una volta che il materiale è polimerizzato ed è tutto assemblato (come nel caso delle strutture ad arco). Quindi si dovrebbe usare un sistema di supporti smontabili dopo che la costruzione si è stabilizzata e l'utilizzo di questi supporti dovrebbe essere fatto ed ottimizzato da un algoritmo computerizzato che dovrebbe essere in grado di gestire la riduzione del materiale e il tempo di costruzione, giustapponendolo alla minimizzazione delle sollecitazioni e deformazioni che potrebbero causare crolli. La rimozione degli elementi di supporto provvisori potrebbe essere agevolata usando materiali più facilmente smaltibili e smontabili dagli elementi strutturali con spruzzi di cera o prodotti simili.

La tecnologia Contour Crafting, è attualmente supportata dalla NASA che un giorno si suppone potrà costruire in breve



[261] ← [www.contourcrafting.org](http://www.contourcrafting.org)



[262] ← [www.stampa3d.it](http://www.stampa3d.it)

## WINSUN (YINGCHUANG BUILDING TECHNOLOGY)

- \* [www.youtube.com/watch?v=SObzNdyRTBs](http://www.youtube.com/watch?v=SObzNdyRTBs)
- \* Chinese Firm Prints Future of Home Construction: [www.youtube.com/watch?v=UkQSaM43nNw](http://www.youtube.com/watch?v=UkQSaM43nNw)
- \* [www.3ders.org/articles/20140401-10-completely-3d-printed-houses-appears-in-shanghai-built-in-a-day.html](http://www.3ders.org/articles/20140401-10-completely-3d-printed-houses-appears-in-shanghai-built-in-a-day.html)
- \* [www.yhbm.com](http://www.yhbm.com)
- \* [www.inhabitat.com/chinese-company-assembles-ten-3d-printed-concrete-houses-in-one-day-for-less-than-5000-each/winsun-3d-printed-houses-7/](http://www.inhabitat.com/chinese-company-assembles-ten-3d-printed-concrete-houses-in-one-day-for-less-than-5000-each/winsun-3d-printed-houses-7/)
- \* [www.3dprint.com/57764/winsun-3d-print-fake/](http://www.3dprint.com/57764/winsun-3d-print-fake/)
- \* [www.telegraph.co.uk/news/worldnews/asia/china/11356322/Shanghai-company-unveils-3D-printed-villa.html](http://www.telegraph.co.uk/news/worldnews/asia/china/11356322/Shanghai-company-unveils-3D-printed-villa.html)

In Cina, nel 2004, l'azienda WinSun Decoration Engineering Co. ha progettato una stampante 3D in grado di costruire solide pareti in calcestruzzo, ideali, quindi, per realizzare edifici abitabili a basso costo. Così sono state stampate 10 strutture che sono state poste nella zona di Shanghai destinate ad uffici. Il progetto è stato realizzato usando 4 stampanti 3D, larghe 10 metri e alte quasi 7 metri. La materia prima era costituita da scarti di materiale da costruzione e rifiuti industriali miscelati col cemento. Questo materiale si asciuga in fretta e con questa miscela hanno creato i muri strato per strato. Le case, quindi, sono di veloce produzione, ma sono anche ecologiche ed economiche. Infatti, secondo l'azienda costruttrice, i materiali utilizzati sono molto più rispettosi dell'ambiente se confrontati con quelli tradizionali perché utilizzano queste nuove tecnologie e non vengono prodotti rifiuti, e quel poco che viene scartato può essere di nuovo riutilizzato per la costruzione di un altro edificio. Il costo, poi, di ogni edificio si aggira sui 20-30.000 yuan, ossia fra 2.500 - 3.000 euro; pertanto appare evidente il vantaggio economico rispetto ad un tradizionale cantiere edile.

Vi sono pareri contrastanti riguardo alla resistenza di questi edifici agli agenti atmosferici e a quelli sismici, ma Ma Yihe, presidente della ditta di costruzioni, assicura che sono notevolmente più resistenti dei normali edifici e si pone come obiettivo per il futuro la costruzione dei grattacieli. Attualmente l'azienda Win Sun ha dimostrato, con la recente edificazione del condominio di 5 piani nel SIP (Industrial Park di Suzhou, Cina orientale) e con la villa residenziale di 1100 m<sup>2</sup>, di poter realizzare un'edilizia a basso costo con l'utilizzo della tecnologia applicata alle stampanti 3D. Se nei 10 edifici stampati in 24 ore si limitava alla realizzazione delle parti strutturali, ora realizza ogni parte di edificio: dai blocchi strutturali, agli arredi, a tutti gli elementi decorativi interni ed esterni.

Secondo quanto dichiarato dalla Winsun, la tecnica di costruzione da loro usata consentirebbe di ridurre gli scarti di costruzione del 30-60%, i tempi di costruzione dal 50% al 70% ed il costo del lavoro dal 50% all'80%. Ne risulta un prezzo di costruzione di circa 139.400 euro per la villa di 1100 m<sup>2</sup>, a fronte degli 1,15 milioni di euro per uno stesso edificio di 700 m<sup>2</sup> realizzato con tecniche tradizionali.



[263] ← [www.denieuwestad.nl](http://www.denieuwestad.nl)

[264] ← [www.english.gov.cn](http://www.english.gov.cn)

## D-SHAPE (ENRICO DINI)

📄 Iakupovic A., *Large scale additive manufacturing*, Università degli Studi di Trieste, Tesi di Laurea, 2012/2013

🌐 Maker Faire Rome tour (Enrico Dini @D-Shape, Pisa): [www.youtube.com/watch?v=LikqzQomAZk](http://www.youtube.com/watch?v=LikqzQomAZk)

🌐 Large Scale 3D Printing (Enrico Dini at TEDxBocconiU): [www.youtube.com/watch?v=L65QKBDQ6mc](http://www.youtube.com/watch?v=L65QKBDQ6mc)

🌐 [www.dinitech.it](http://www.dinitech.it)

🌐 [www.d-shape.com](http://www.d-shape.com)

🌐 [www.chefuturo.it/2014/08/make-in-italy3-enrico-dini-e-il-sogno-di-colonizzare-la-luna-stampando-case-in-3d/](http://www.chefuturo.it/2014/08/make-in-italy3-enrico-dini-e-il-sogno-di-colonizzare-la-luna-stampando-case-in-3d/)

🌐 [www.leultime20.it/enrico-dini-linventore-che-stampa-case-in-3d/](http://www.leultime20.it/enrico-dini-linventore-che-stampa-case-in-3d/)

Nel 2006 in Italia, l'Ingegnere Enrico Dini ha intuito che, per creare un edificio in scala reale, era necessaria soltanto una stampante dalle giuste dimensioni e un buon legante. Con l'introduzione della tecnologia D-Shape, Dini ha dato il via all'applicazione di questo processo dichiarando: «con il D-Shape faremo in modo che gli architetti possano realizzare le costruzioni progettate utilizzando una macchina robotica che si serve della tecnologia di progettazione CAD, CAE e CAM e che è in grado di costruire opere architettoniche. Questo permetterà un livello di precisione e di libertà mai avuto prima e le limitazioni dei costruttori e dei muratori non saranno più di intralcio alla visione degli architetti».

La tecnologia D-Shape differisce sostanzialmente dagli altri metodi di Manifattura Additiva su larga scala, sia nei materiali usati che nella tecnica di deposizione. D-Shape usa un approccio che utilizza un letto di polvere (in questo caso sabbia) e deposita solo il materiale legante sulla sua superficie, solidificando solo le parti del progetto, mentre le altre fanno da supporto. Il processo è una trasposizione diretta del brevetto sviluppato dal Massachusetts Institute of Technology (MIT).

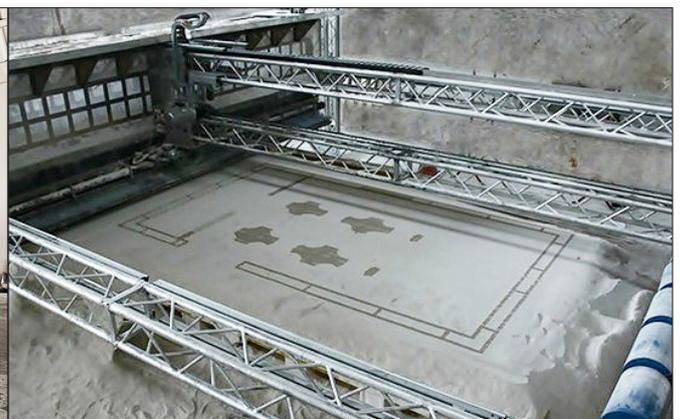
### La Stampante

Vista dall'esterno D-Shape appare come una grande struttura in alluminio al cui interno verrà realizzata la costruzione. Il CAD-CAM software guida il macchinario durante il processo di realizzazione e questa struttura sorregge il braccio di stampa che è il cuore di questa tecnologia. La macchina è composta da un piano rigido di dimensioni 6x6 metri che si solleva lungo 4 colonne di alluminio di sezione quadrata di 30 cm di lato. Queste colonne possono avere una lunghezza che può raggiungere i 12 metri. Il braccio di un portale lungo 6 metri è sospeso sul telaio orizzontale e può muoversi lungo un asse per mezzo di un elettromotore. Tale braccio sorregge la testa della stampante composta da 300 valvole che spruzzano un inchiostro che solidifica la sabbia. Gli ugelli sono posizionati con un interasse di 20 mm (ciascun ugello copre un'area di circa 5mm) e possono creare un tracciato di stampa la cui larghezza dipende dalla velocità con cui si muove il braccio di stampa, dalla pressione con cui viene spruzzato il legante e dal diametro degli ugelli. Malgrado le sue dimensioni la struttura è leggera, di facile trasporto e assemblaggio, può essere assemblata e disassemblata da due operai. Un piccolo recipiente per la distribuzione del legante è posizionato sul medesimo sistema, mentre uno più grande esterno è connesso con un tubo e rifornisce il recipiente più piccolo attraverso una pompa. Un motore elettrico aggiuntivo è montato su ciascuna colonna, permettendo al telaio di muoversi su e giù in modo da stampare i vari strati. Lo spessore degli strati è determinato dall'aggregato e dalla capacità del legante di penetrare e raggiungere lo strato precedentemente stampato. L'altezza standard dello strato è comunque di circa 5 mm.

L'intero processo è altamente automatizzato; l'unica attività manuale è la deposizione del letto di polvere che è stata, però, parzialmente automatizzata con l'aggiunta di un alimentatore di sabbia ad un'estremità del portale in una successiva edizione della macchina. Comunque il riempimento dell'alimentatore rimane un processo esterno alle operazioni del sistema, ma può essere facilmente fatto da altri sistemi automatizzati già disponibili sul mercato.



[265] ← [www.3dmasterminds.com](http://www.3dmasterminds.com)



[266] ← [www.wotsdabuzz.com](http://www.wotsdabuzz.com)

## Il materiale

All'inizio della sua ricerca, Dini ha brevettato un sistema basato sull'uso di una resina epossidica spruzzata da un ugello su uno strato di sabbia depositato su un perimetro chiuso. Subito ha ottenuto ottimi risultati in termini di risoluzione di stampa, ma quello finale era un oggetto costoso, infiammabile e molto inquinante. Le resine epossidiche e poliuretane possono fungere perfettamente da legante ma non sono ecosostenibili sia per ragioni di produzione, sia per gli sprechi durante la lavorazione e inoltre producono una materia finale infiammabile e rilasciano un gas tossico; ancora le resine necessitano anche di un preciso rapporto fra il legante il materiale granulare che aumenta notevolmente i costi di produzione delle testine che depositano il legante, gli ugelli necessitano di una frequente manutenzione, pulizia e sostituzione periodica delle componenti nelle quali si mescolano i leganti. Un altro svantaggio dell'uso di resiste come legante è il basso modulo di elasticità del conglomerato finale, il quale crea una forte deformabilità della struttura. Perciò Dini, abbandonato questo metodo, ha iniziato una ricerca di un legante che potesse essere inorganico, economico ed ecologico e con bassa viscosità per poterlo utilizzare come inchiostro e capace di dare le giuste caratteristiche meccaniche al conglomerato.

## Progetti

### • Radiolaria

La prima esperienza di stampa 3D di una roccia è del 2008 e si chiama "Radiolaria" ed è stata realizzata a partire dal file grafico dell'architetto Andrea Morgante, titolare dello Shiro Studio di Londra, che ha disegnato e messo in produzione un primo prototipo (di 2 m di altezza) di Radiolaria, una forma ispirata all'omonimo organismo monocellulare.

Radiolaria, quindi, è una struttura monolitica stampata con la stampante D-Shape, usando strati di sabbia tenuti insieme dal legante inorganico. La struttura è quindi realizzata in arenaria artificiale e non presenta alcun rinforzo interno. Il materiale risultante ha ottime proprietà, con alcune caratteristiche prestazionali superiori al cemento Portland e non danneggia l'ambiente. La struttura è stata progettata utilizzando tecnologie di modellazione CAD-CAE e software CAD-CAM che controlla il plotter durante la stampa. Il processo inizia dal basso e procede in strati di 5/10mm alla volta. Il processo di solidificazione dura 24 ore e il surplus di materiale può essere riutilizzato. Il padiglione Radiolaria rappresenta il modello in scala del padiglione finale che è alto 10m e avrebbe dovuto essere posizionato su una rotonda a Pontedera.

L'obiettivo finale della realizzazione di questo prototipo era di dimostrare le capacità innovative di questa tecnologia; innanzitutto la capacità di produrre qualsiasi geometria, senza armatura interna, ma realizzata con materiali intrinsecamente resistenti a diverse sollecitazioni statiche, infatti il nuovo materiale (inorganico binder + sabbia o polvere minerale) è stato sottoposto a trazione, compressione e prove di flessione dimostrando eccellenti proprietà di resistenza; il legante trasforma qualsiasi tipo di sabbia o polvere di marmo in un materiale lapideo con una resistenza a trazione maggiore e per questo non è necessario usare il ferro per rinforzare la struttura. Inoltre con questo sistema si possono costruire geometrie complesse senza l'uso di cassaforme temporanee o monouso o costosi stampi.



[267] ← [www.progettarearchitettura.it](http://www.progettarearchitettura.it)



[268] ← [www.arrevol.com](http://www.arrevol.com)

### ► La casa tutta d'un pezzo

Oltre ad Andrea Morgante, sono molti gli architetti e designer che hanno collaborato con l'ingegner Dini. Ad esempio l'architetto designer Marco Ferreri che, nell'ambito della sua mostra personale alla Triennale di Milano del 2010, ha presentato il progetto di abitazione realizzato in un pezzo unico. La casa è il risultato completo di quello che inizialmente era solo un disegno di una casa minima da costruire e che è stata realizzata grazie all'innovativa tecnica di produzione dell'Ingegnere Dini. La casa è stata, praticamente, realizzata in un pezzo unico senza bisogno di casseformi, centine o stampi, risparmiando così in tempi e costi. Utilizzando D-Shape, la casa tutta d'un pezzo è stata costruita in 2 settimane, usando come materia prima 35 m<sup>3</sup> di una particolare sabbia miscelata di cui ben il 90% è recuperabile per altre stampe. La sua struttura è facilmente trasportabile e misura 2,4x4x3,5 m di altezza ed è tutta in cemento.



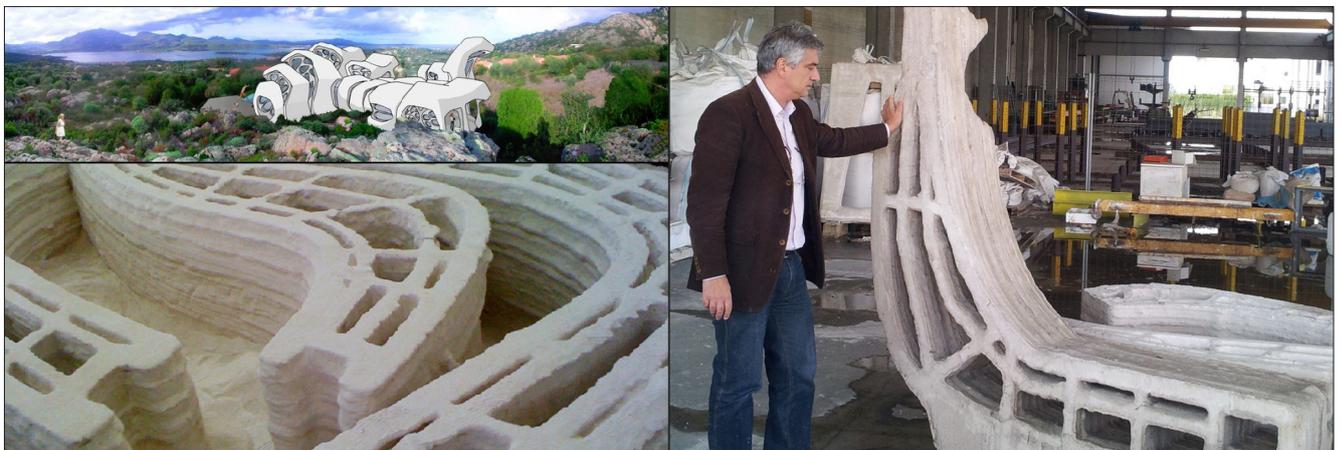
[269] ← [www.arketipomagazine.it](http://www.arketipomagazine.it)

[270] ← [www.milano.repubblica.it](http://www.milano.repubblica.it)

### ► Villa Rocce

Progetto sviluppato in collaborazione con l'architetto australiano James Gardiner di Faan Studio. Si tratta di un edificio residenziale di 300 m<sup>2</sup> che avrebbe dovuto essere costruito a Porto Rotondo in Sardegna. Per l'aspetto esteriore i progettisti hanno tratto ispirazione dal contesto circostante e, grazie sempre a strumenti di progettazione digitale, hanno disegnato forme che sembrano rocce naturali erose dagli agenti atmosferici nel corso di millenni. Il risultato è che la casa si mimetizza perfettamente nel paesaggio tanto da meritare la definizione di "architettura invisibile". Anche per la soluzione strutturale i progettisti si sono ispirati alla natura; traendo spunto dalla biologia, propongono per gli elementi strutturali il modello dello scheletro animale che riesce a sopportare il consistente peso del corpo con una massa ridotta grazie al sistema delle trabecole, cioè dei pieni e dei vuoti che ne ottimizzano la funzionalità.

Questa villa purtroppo non è stata realizzata poiché, nel momento in cui fu progettata, gli ostacoli posti dalle normative e dallo scetticismo della committenza sembravano insormontabili.



[271] ← [www.biomimetic-architecture.com](http://www.biomimetic-architecture.com)

[272] ← [www.progettarearchitettura.it](http://www.progettarearchitettura.it)

### ► Landscape House

D-Shape è stata presa in considerazione per eseguire un progetto dell'architetto tedesco Janjaap Ruijssenaars dello studio olandese Universe Architecture. L'edificio di circa 1000 m<sup>2</sup>, chiamato Landscape House o Endless House, consiste in una superficie continua che, come un nastro di Mobius o un disegno di Escher, si piega, avvolge e svolge trasformando i pavimenti in soffitti, il dentro in fuori. La casa sarà costituita da pezzi di 6 m per 9 m che vengono assemblati per realizzare l'intera struttura. Le cornici della casa, che ospiteranno pannelli in fibra di vetro, saranno un mix di sabbia e leganti inorganici che, stando alle parole di Dini, costituiranno un materiale più forte del cemento. L'idea del progetto è frutto della collaborazione di Janjaap Ruijssenaars con il matematico e artista Rinuss Roelofs con l'intento di creare una casa che si inserisca nell'ambiente circostante riflettendo la bellezza del paesaggio.



[273] ← [www.architizer.com](http://www.architizer.com)

### ► Riqualficazione del Waterfront di New York

La New York City Economic Development Corporation (NYCEDC) ha lanciato, nel 2012, il concorso per la costruzione del Waterfront di New York. Tale concorso è stato indetto per fornire soluzioni innovative e di risparmio di costi per il completamento di progetti di costruzioni marine e della manutenzione dell'infrastruttura del lungomare a New York.

D-Shape è stata la prima dei tre vincitori del concorso presentando il progetto intitolato "Concrete Digital". Tale progetto risolve una serie di questioni riguardanti il restauro di pilastri, pali e dighe che popolano il lungomare di New York perché, attraverso l'uso della stampante 3D, tali pilastri vengono dotati di strutture di protezione in calcestruzzo molto leggero in modo da poterli preservare dal logoramento dovuto al diretto contatto con l'acqua del mare. Come funziona?

Fase 1: Il molo e i pali vengono puliti e poi scansioni con uno scanner 3D.

Fase 2: I dati vengono elaborati dai software per poi poter progettare e disegnare i vari rivestimenti e le estensioni dei pali accuratamente e su misura.

Fase 3: I rivestimenti vengono stampati e vengono stuccati prima della spedizione in situ. (D-Shape riesce a stampare più di 50 rivestimenti o estensioni per partita in 5 giorni)

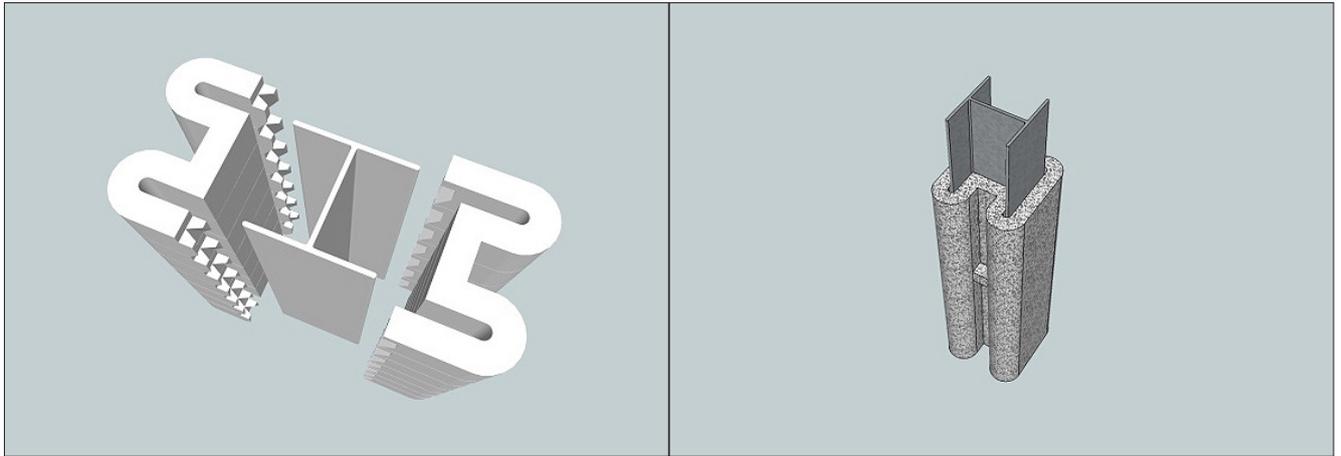
Fase 4: I vari pezzi vengono montati in loco con il seguente processo:

1. Viene posto un collare per tenerli fermi;
2. Viene pompata dentro una malta a presa rapida;
3. Viene collegato un collare in acciaio per tenere ogni pezzo al suo posto.

I materiali utilizzati per i pali sono stampati con una formula speciale di cemento a base di magnesio.



[274] ← [www.3ders.org](http://www.3ders.org)



[275] ← [www.3ders.org](http://www.3ders.org)

#### ► Barriere coralline

“Le case per i pesci” sono in realtà pezzi di barriera corallina che Dini vende in giro per il mondo dove c’è bisogno di ricreare gli habitat della fauna ittica. Il suo sistema richiede soltanto della sabbia e degli agenti chimici da usare come collanti. La Boskalis, società olandese di servizi marittimi, in collaborazione con Fondazione Principe Alberto II di Monaco, AMPN (Association Monegasque pour la Protection de la Nature) e D-Shape stanno lavorando all’ambizioso progetto pilota per creare nuovi ecosistemi per gli animali sottomarini con barriere coralline artificiali stampate in 3D. La Boskalis è stata scelta perché usa un materiale particolare per la realizzazione di queste barriere: un tipo di sabbia dolomitica di qualità superiore rispetto ai materiali utilizzati precedentemente, come ad esempio il cemento. Tante barriere coralline artificiali usate prima di queste avevano fallito perché poco adatte alla location specifica ove venivano collocate; invece l’idea di Dini di usare sabbia per stampare la barriera, si è rivelata vincente soprattutto perché la stampa di barriere con sabbia dragata ha precisi principi ecologici e scientifici.

Questa idea, nel maggio del 2014, ha vinto il Boskalis Innovation Challenge che ha permesso di trasformare il progetto in realtà. Così si sono realizzate sei strutture stampate in 3D; ogni struttura, realizzata con la speciale sabbia dolomitica e particolari sostanze adesive, richiede 13 ore per essere stampata e misura 1,2 m x 2 m per 2 tonnellate di peso. Le barriere coralline artificiali sono state posizionate a 27 m di profondità a largo delle coste del Principato durante l’inverno 2015 e posizionate accanto alla naturale barriera corallina esistente, nell’area naturale del Larvotto; in questo modo gli scienziati potranno studiare le dinamiche ecologiche che si sviluppano in una barriera corallina artificiale posizionata accanto ad una naturale. L’osservazione di questo nuovo equilibrio ecologico durerà almeno due anni, al fine di poter tracciare dei trend di medio-lungo periodo.



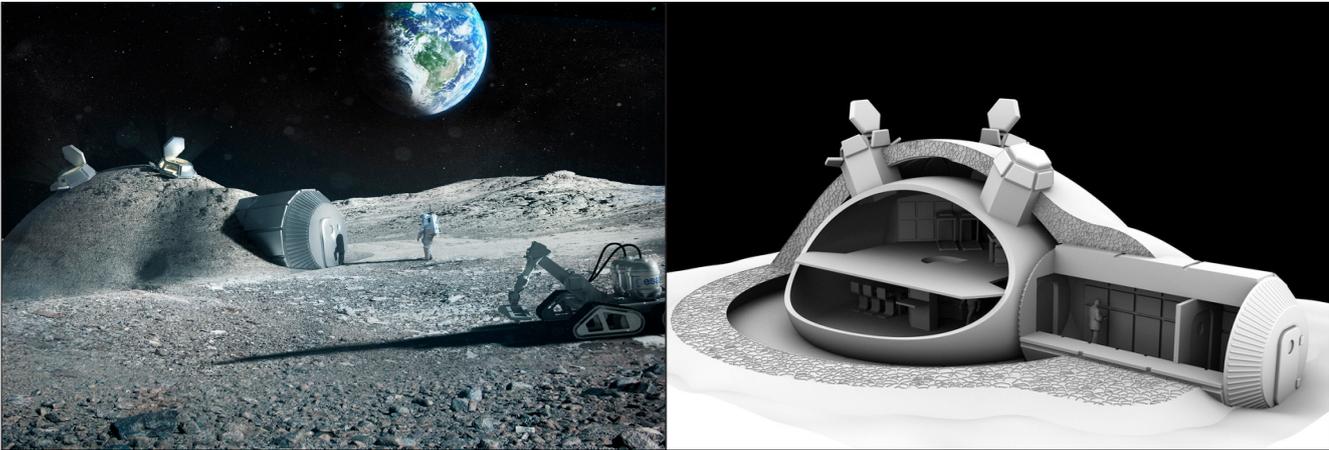
[276] ← [www.3dnatives.com](http://www.3dnatives.com)



[277] ← [www.takepart.com](http://www.takepart.com)

## ► Abitazioni sulla luna

L'Agenzia Spaziale Europea (ESA), lo studio d'architettura Foster + Partners, la società di ricerca aerospaziale Alta SpA, l'Università d'Ingegneria Scuola Superiore Sant'Anna di Pisa e D-Shape sono tutte coinvolte in un progetto concreto per colonizzare la Luna. L'idea è di stampare in 3D una base lunare e, per quanto possa sembrare solo un'utopia, in realtà è un progetto reale. Tale progetto consiste in un modulo tubolare che viene spedito ed adagiato sul suolo lunare dal quale esce una tensostruttura gonfiabile che contiene in sé l'abitazione e che può essere utilizzata massimo da quattro persone. Ovviamente per problemi di mancanza di atmosfera, rischio di impatto di meteoriti, raggi γ e per la forte fluttuazione delle temperature, si è pensato di stampare sopra questa struttura un involucro proprio composto di suolo lunare per proteggere l'abitazione. Così la stampante 3D, spedita anch'essa sul satellite, impasterà la regolite (polvere lunare) con un legante, ricavandone roccia sintetica.



[278] ← [www.esa.int](http://www.esa.int)

[279] ← [www.esa.int](http://www.esa.int)

## DUS ARCHITECTS

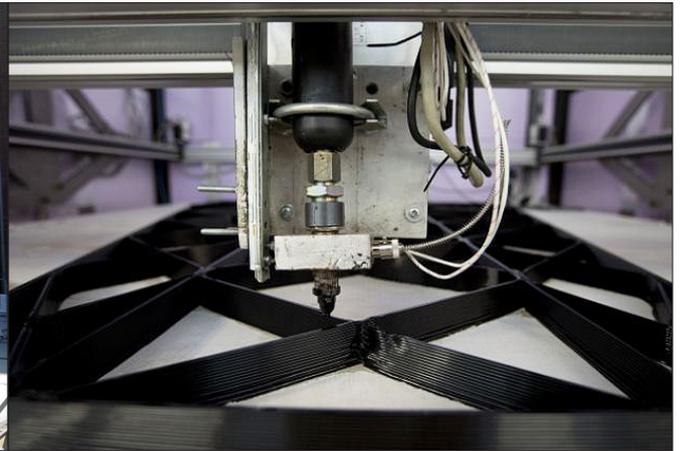
DUS Architects sono un gruppo di architetti olandesi che si sono appassionati alla tecnica della stampa 3D e hanno voluto progettare "The Canal House", un'abitazione in perfetto stile olandese lungo un canale di Amsterdam. Il progetto è stato presentato ad Amsterdam nel 2013 e consta di un complesso di 13 camere che dovrà diventare una sede museale contenente anche vari laboratori che verranno utilizzati per portare avanti la ricerca su questo ambito. Il processo di costruzione ha l'obiettivo di realizzare i vari blocchi che compongono l'edificio e poi impilarli ed assemblarli in situ come mattoncini lego. Ogni blocco, al suo interno, possiede un rinforzo strutturale costituito da un reticolo a nido d'ape e, all'interno di queste intercapedini, possono passare i relativi impianti oppure può essere inserito lo strato isolante; mentre nei blocchi che fungono da fondazioni, queste intercapedini vengono interamente riempite di calcestruzzo alleggerito per garantirne la stabilità.

Questi giovani architetti, non solo hanno progettato l'edificio, ma hanno anche realizzato la stampante che hanno chiamato "Kamer Maker", cioè proprio "Costruttore di Camere" che ha le seguenti dimensioni: 15x10x6 m (LxPxH) e un volume stampabile di: 2,2x2,2x3,5 m (LxPxH).

Nel 2014 si è iniziato il lavoro di stampa e già, dopo circa tre settimane, era stato realizzato un angolo campione alto 3m. Il materiale di stampa pensato proprio per l'involucro dei vari blocchi che compongono la casa è una bioplastica Macromelt, prodotta dalla Henkel, che contiene il 75% di olio vegetale; questa plastica viene a sua volta additivata con microfibre. Ma gli architetti hanno sperimentato ulteriori rinforzi: organici, come le bucce di banana, e di riciclo, come le bottigliette di plastica. I progettisti sono convinti che, stampando serie di blocchi invece di costruire con i materiali convenzionali, potranno eliminare gli sprechi e ridurre i costi di trasporto. Essendo realizzata a blocchi, la casa potrà anche essere riasssemblata modificandone la struttura. Nel 2014 l'ha visitata anche il Presidente degli Stati Uniti, Barack Obama, che ne è rimasto particolarmente colpito. Tuttavia la casa non è stata ancora completata perché, come asserito anche dagli architetti progettisti, ci vorranno almeno tre anni prima che l'intero processo di stampa e montaggio venga completato.



[280] ← [www.contourcrafting.org](http://www.contourcrafting.org)



[281] ← [www.stampa3d.it](http://www.stampa3d.it)

## WASP PROJECT

✿ Startup Juice (Massimo Moretti di WASProject): [www.youtube.com/watch?v=Ixi-IJ\\_dNpk](https://www.youtube.com/watch?v=Ixi-IJ_dNpk)

✿ Big clay 3d printer by Wasproject: [www.youtube.com/watch?v=\\_BZiPn5UrnI](https://www.youtube.com/watch?v=_BZiPn5UrnI)

✿ Delta Wasp the 3d printer for clay houses: [www.youtube.com/watch?v=iioCNSYWBtI](https://www.youtube.com/watch?v=iioCNSYWBtI)

📄 [www.wasproject.it](http://www.wasproject.it)

📄 [www.3ders.org/articles/20160322-wasp-and-municipality-of-massa-lombarda-to-begin-building-3d-printed-sustainable-village.html](http://www.3ders.org/articles/20160322-wasp-and-municipality-of-massa-lombarda-to-begin-building-3d-printed-sustainable-village.html)

Il fondatore e protagonista della start-up è Massimo Moretti. Il suo sogno è quello di stampare case economiche per le popolazioni africane e in generale per i paesi in via di sviluppo. Prendendo esempio dalla vespa vasaia, che dà forma alla sua casa prelevando la terra che trova in giro e depositandola come una piccola e perfetta stampante, il progetto WASP si propone di diffondere un nuovo modello di sviluppo dove le case a basso prezzo sono costruite con materiali a km0 utilizzando argilla e fibre naturali coltivate lì dove si costruirà la casa. La vespa ha quindi ispirato il progetto, cosicché gli ideatori hanno cominciato a pensare a grandi stampanti a deposizione che possano costruire abitazioni a basso impatto ambientale, sane ed economiche. La ricerca è autofinanziata tramite la vendita di stampanti più piccole, ad uso professionale e amatoriale, presenti nel catalogo dell'azienda. Ogni 4 mesi il team riesce a raddoppiare le dimensioni di stampa ed è già stata realizzata una stampante per stampare argilla.

### La stampante

Per la realizzazione della macchina, i due punti cardine sono stati l'estrusione dei materiali e la trasportabilità ed energia della macchina. Ognuno di questi ha richiesto delle soluzioni tecniche specifiche. La trasportabilità della macchina implica, per esempio, che il materiale sia leggero e che essa possa essere tarata in base alla conformazione del territorio. La questione del consumo di energia è determinante poiché in vaste aree del pianeta manca l'elettricità; occorre quindi l'utilizzo di energie rinnovabili. La stampante realizzata da WASP è caratterizzata da 3 assi verticali che consentono bassi consumi energetici per l'estrusione del materiale, infatti quello che si muove è esclusivamente quello che porta l'estrusore. I bracci della BigDelta trasportano all'incirca 70 kg, perfettamente gestibili quindi con una batteria e pochi m<sup>2</sup> di pannelli solari. Inoltre la stampante è stata progettata per essere montata in tempi brevi: a 3 persone occorrono circa 2 ore. L'ostacolo più grande verso la realizzazione della BigDelta è stata l'estrusione dei materiali. Il team doveva capire come estrudere, ma anche come ricaricare e tenere attivo il sistema. Grazie al confronto con esperti del settore edile, sono arrivati alla conclusione che l'estrusore più adatto fosse quello con ugello rotante. L'attuale estrusore è in grado, infatti, di gestire addirittura la ritrazione, può cioè interrompere il lavoro e ritirare il materiale estruso. In poche parole sono passati dall'estrusione continua al controllo preciso dei flussi, alla possibilità di interrompere e riprendere l'erogazione in maniera micrometrica. Il nuovo estrusore può essere montato e smontato rapidamente, si pulisce automaticamente, necessita di un quantitativo di energia minimo e ha un controllo costante a tutte le velocità.



[282] ← [www.wasproject.it](http://www.wasproject.it)

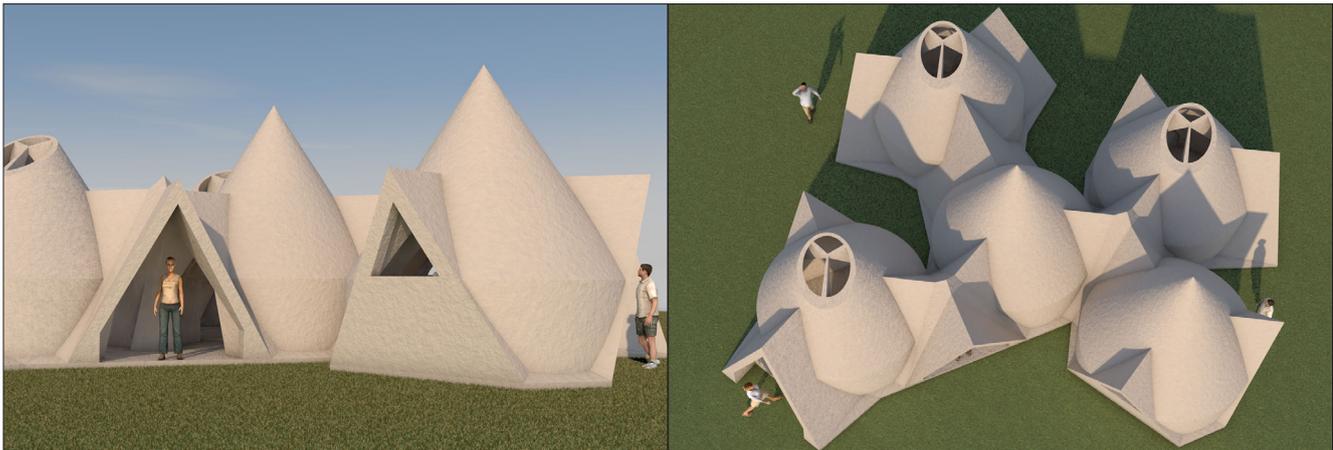


[283] ← [www.wasproject.it](http://www.wasproject.it)

## Progetti

### ► TOC ThinkInProgress Future 3D Printed Home

È un progetto che consiste nella realizzazione di abitazioni in argilla. Queste sono composte da elementi modulari dalla caratteristica forma a cono che ha funzione strutturale autoportate, essendo lo sfalsamento massimo fra i vari strati di materiale depositato non superiore ai 30-40°. Ciò permette inoltre di non utilizzare strutture di appoggio ausiliarie da rimuovere ad opera finita.



[284] ← [www.wasproject.it](http://www.wasproject.it)

È recente la notizia dell'accordo che l'amministrazione comunale di Massa Lombarda (dove ha sede WASP) ha firmato con l'azienda stessa, con la concessione di un'area nella quale verrà sperimentata la costruzione di una cittadella eco-friendly interamente stampata in 3D. Questo parco tecnologico, chiamato "Shambalha", vede come protagonista la stampante BigDelta da 10 metri e comprenderà: «case, ma anche sistemi di coltivazione verticale di diverse dimensioni. Inoltre ci sarà un laboratorio con stampanti compatte per creare oggetti, dal complemento d'arredo al biomedicale, all'oreficeria, alla ceramica. E grazie alla collaborazione di alcuni artisti intendiamo sviluppare anche un progetto culturale», come annunciato dallo stesso Massimo Moretti.



[285] ← [www.wasproject.it](http://www.wasproject.it)



[286] ← [www.wasproject.it](http://www.wasproject.it)

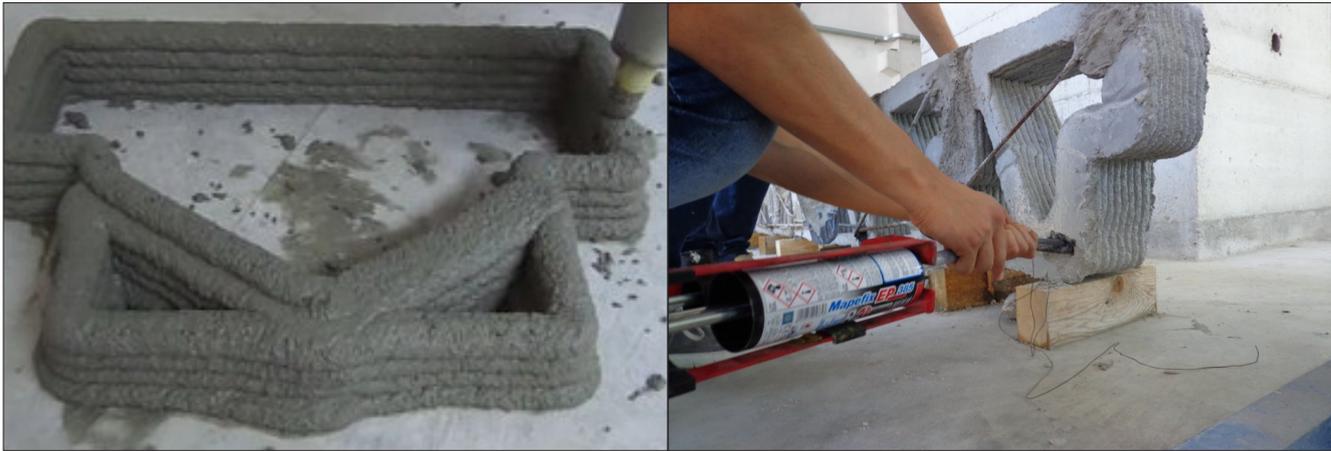
Il progetto WASP ha partecipato dal 7 al 9 novembre 2015 al 3D Printshow di Londra dove si è aggiudicato il 3D Green Award.

## ELEMENTI STRUTTURALI IN CEMENTO ARMATO

ASPRONE D., AURICCHIO F., IUORIO M., MENNA C., PELLECCIA M. Stampa 3D di elementi strutturali in c.a.: tecnologia ed approccio progettuale, articolo, Università Federico II, Napoli, 2015

Il Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura dell'Università di Napoli Federico II, capitanato dal Professore Domenico Asprone, il Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura dell'Università di Pavia con a capo il Professore Ferdinando Auricchio, insieme ai professori Marco Iuorio, Costantino Menna e Marcello Pellecchia stanno portando avanti un'attività di ricerca presso il dipartimento tecnologico STRESS, che mira allo sviluppo di un nuovo approccio alla produzione di elementi in calcestruzzo armato basato sull'additive manufacturing. L'obiettivo di questa ricerca è quello di produrre elementi di trave in cemento armato utilizzando la stampa 3D, al fine di realizzare elementi strutturali aventi forme complesse. In particolare, i professori di cui sopra, hanno realizzato una trave strutturale reticolare composta da vari blocchi uniti tra di loro attraverso barre di acciaio trasversali e oblique. Questo tipo di trave richiede oggi, con il processo realizzativo tradizionale, l'utilizzo di un complesso sistema di casseri e, conseguentemente, elevati costi. Questo approccio innovativo consente quindi di ottenere travi parzialmente cave con conseguente riduzione della quantità di materiale adoperato e un peso finale dell'elemento ridotto, pur garantendo adeguate proprietà meccaniche. Ciascun concio della trave è stato stampato nella direzione trasversale al piano dell'asse di quest'ultima, ovvero lungo il suo spessore. Ciò consente di stampare solo elementi prismatici senza la necessità di avere uno "sbalzo" strato dopo strato, per realizzare elementi curvi. L'armatura in acciaio è installata all'esterno della trave solo dopo che i conci sono stati assemblati insieme, ancorando le barre in fori specifici, ottenuti durante il processo di stampa. L'armatura è quindi progettata oltre che per garantire resistenza a trazione, anche per vincolare i conci tra loro in un unico elemento monolitico.

Per la stampa è stata impiegata una stampante BigDelta WASP, la cui area massima di stampa è un triangolo di 4 metri circa di lato. L'estrusore è sorretto da 3 bracci in acciaio che sono mossi e controllati attraverso un meccanismo installato nei 3 montanti della struttura principale. Attraverso il controllo dei tre bracci, l'estrusore può essere mosso nel piano e nello spazio con un'altezza massima raggiungibile di 1,5 m. L'estrusore è composto da un serbatoio per il calcestruzzo fresco di circa 20 litri, all'interno del quale è montata una vite senza fine che facilita la miscelazione della malta cementizia e di conseguenza la sua estrusione attraverso il foro terminale a diametro variabile.



[287] [288] ← ASPRONE D., Stama 3D di elementi strutturali in c.a.: tecnologie ed approccio progettuale, articolo, 2015

## LA STAMPA 3D PER IL RESTAURO

📄 [www.archdaily.com/551053/how-3d-printing-is-saving-a-frank-lloyd-wright-treasure](http://www.archdaily.com/551053/how-3d-printing-is-saving-a-frank-lloyd-wright-treasure)

📄 [www.3ders.org/articles/20140909-3d-printing-restores-frank-lloyd-wright-annie-pfeiffer-chapel.html](http://www.3ders.org/articles/20140909-3d-printing-restores-frank-lloyd-wright-annie-pfeiffer-chapel.html)

Ormai la tecnologia di stampa 3D viene spesso citata come il “futuro” della produzione manifatturiera, concentrandosi sulla sua capacità di creare cose nuove in modo rapido ed economico. Questa nuova tecnologia, però, ha anche qualcosa da offrire al passato; per esempio nell’ambito del restauro architettonico.

In Florida centrale, nel campus del Florida Southern College, si trova la più grande collezione di opere nel famoso architetto Frank Lloyd Wright. I lavori di restauro di queste opere, gestiti dall’azienda Albany Mesick Cohen Wilson Baker Architects, non si sono rivelati particolarmente difficili come quelli per la cappella Annie Pfeiffer. Questa è infatti dotata di un sistema di “blocco tessile”, distintivo di Wright, che andava in parte sostituito ma che avrebbe conseguentemente portato a costi eccessivi. Inoltre, sarebbero stati difficili da riprodurre perché gli stampi originali furono realizzati da un artigiano e la conoscenza della loro messa in opera non fu mai stata registrata in modo sistematico. La soluzione alla quale la squadra di Baker è arrivata è stata quindi quella di utilizzare i disegni originali di Wright e da quelli creare dei modelli base con un software 3D e successivamente i negativi dei blocchi. Gli elementi degli stampi sono stati isolati per rientrare nei letti delle stampanti 3D e infine sono stati stampati.



[289] [290] ← [www.3dprintingindustry.com](http://www.3dprintingindustry.com)

# ALLEGATI

## CAPITOLO 5

MATRICE A (DEI COEFFICIENTI RELATIVI ALLE COSTANTI DI INTEGRAZIONE)







# ALLEGATI

## CAPITOLO 5

MATRICE A DEI TERMINI NOTI

T. noti
0
0
0
0
6,12919E-11
0
0
0
5,93823E-11
0
0
0
5,80372E-11
0
0
0
5,52308E-11
0
0
0
5,18432E-11
0
0
0
4,79077E-11
0
0
0
4,36068E-11
0
0
0
4,29591E-11
0
0
0
4,03803E-11
0
0
0
3,89406E-11
0
0
0
3,50282E-11
0
0
0

# ALLEGATI

## CAPITOLO 6

COMPUTO ESTIMATIVO



prezzo parziale	% mdo	prezzo totale	piano	PREZZO della voce d'opera	"UTILE D'IMPRESA (10% del prezzo)"	"SPESE GENERALI (15% del prezzo)"	COSTO della voce d'opera (manodopera + noli e trasporti + materiali)	incidenza % manodopera	Costo della MANODOPERA	ORE GIORNALIERE standard di lavoro
€ 171,27	46,00%		terra	€ 171,27	€ 15,57	€ 20,31	€ 135,39	46%	€ 62,28	8
€ 171,27	46,00%		terra	€ 171,27	€ 15,57	€ 20,31	€ 135,39	46%	€ 62,28	8
€ 1.023,54	46,00%		terra	€ 1.023,54	€ 93,05	€ 121,37	€ 809,12	46%	€ 372,20	8
€ 46,96	46,00%		terra	€ 46,96	€ 4,27	€ 5,57	€ 37,12	46%	€ 17,07	8
totale		€ 1.413,04	totale	€ 1.413,04	€ 128,46	€ 167,55	€ 1.117,02	100%	€ 1.117,02	8
€ 298,39	48,00%		terra	€ 298,39	€ 27,13	€ 35,38	€ 235,88	48%	€ 113,22	8
totale		€ 298,39	totale	€ 298,39	€ 27,13	€ 35,38	€ 235,88	48%	€ 113,22	8
€ 5.778,05	48,00%		terra	€ 5.778,05	€ 525,28	€ 685,14	€ 4.567,63	48%	€ 2.192,46	8
totale		€ 5.778,05	totale	€ 5.778,05	€ 525,28	€ 685,14	€ 4.567,63	48%	€ 2.192,46	8
€ 6.490,93	23,00%		terra	€ 6.490,93	€ 590,08	€ 769,68	€ 5.131,17	23%	€ 1.180,17	8
		€ 6.490,93	totale	€ 6.490,93	€ 590,08	€ 769,68	€ 5.131,17	23%	€ 1.180,17	8

COSTO ORARIO manodopera	COSTO GIORNALIERO della manodopera	UOMINI GIORNO (arrotondati all'unità superiore)	NUMERO componenti la squadra operativa standard	durata "NORMALE" della voce d'opera	decremento % della durata in condizioni OTTIMISTICHE	durata "OTTIMISTICA"	incremento % della durata in condizioni PESSIMISTICHE	durata "PESSIMISTICA"	DURATA MEDIANA "Dme"	variabile aleatoria s
€ 33,00	€ 264,00	1	4,00	0,25	1%	0,25	10%	0,3	1,00	0,00
€ 33,00	€ 264,00	1	4,00	0,25	1%	0,25	10%	0,3	1,00	0,00
€ 33,00	€ 264,00	2	4,00	0,50	1%	0,50	10%	0,6	1,00	0,01
€ 33,00	€ 264,00	1	4,00	0,25	1%	0,25	10%	0,3	1,00	0,00
€ 33,00	€ 264,00	5	4,00	1,25	1%	1,24	10%	1,4	2,00	0,02
€ 33,00	€ 264,00	1	4,00	0,25	1%	0,25	10%	0,3	1,00	0,00
€ 33,00	€ 264,00	1	4,00	0,25	1%	0,25	10%	0,3	1,00	0,00
€ 33,00	€ 264,00	9	4,00	2,25	1%	2,23	10%	2,5	3,00	0,04
€ 33,00	€ 264,00	9	4,00	2,25	1%	2,23	10%	2,5	3,00	0,04
€ 33,00	€ 264,00	5	4,00	1,25	1%	1,24	10%	1,4	2,00	0,02
€ 33,00	€ 264,00	5	4,00	1,25	1%	1,24	10%	1,4	2,00	0,02

categoria	voce di lavoro	descrizione	dettagli	addetto competente	voce da prezzario Regione Lombardia	dettagli da prezzario Regione Lombardia	localizzazione	unità di misura	quantità	prezzo unitario
opere di finitura	rivestimenti di tipo ceramico	posa di piastrelle in grès (orizzontale bagni)		piastrellista	B25030	40x40, sp. 8,7 mm, tinta unita	piano terra	m2	13,7	€ 77,97
		posa di piastrelle di rivestimento (verticale bagni)		piastrellista	B35003	20x20	piano terra	m2	89,72	€ 41,23
	pavimentazioni di tipo non ceramico	posa del pavimento vinilico (Bolon Tatami Liuni)		posatore pavimentista	B25079b	telo spessore 2,6mm	piano terra	m2	218,7	€ 50,00
	opere da intonacatore	intonaco interno verticale con finitura al rustico		intonacatore	B15001a	intonaco con malta di calce spenta e sabbia composta da 500 Kg di calce per mc di sabbia	piano terra	m2	376,14	€ 17,04
		intonaco interno verticale con finitura al civile		intonacatore	B15004a	intonaco con malta di calce spenta con sabbia composto da 500 kg di calce per mc di sabbia	piano terra	m2	376,14	€ 22,52
		rasatura interna su blocchi		intonacatore	B15007	sp. min. 5mm	piano terra	m2	376,14	€ 7,16
	opere da tinteggiatore	tinteggiatura interna su intonaco verticale		tinteggiatore	B55012b	tinteggiatura con idropittura traspirante idrorepellente	piano terra	m2	376,14	€ 6,88
		tinteggiatura interna verticale, su cartongesso		tinteggiatore	B55001	primer isolante acrilico all'acqua	piano terra	m2	70,44	€ 1,75
	opere di facciata (manodopera specializzata)	pannelli in cemento	protezione acustica	facciatista			scocca esterna	m3	16,45	€ 146,57
	opere da cartongessista	controsoffitti		cartongessista	B75033a	pannelli in gesso rivestito a superficie non forata, reazione al fuoco B-S1, d0, sp. 9,5mm	controsoffitti cubo interno	m2	58,13	€ 25,15
			protezione antiumidità	cartongessista	B75033a	pannelli in gesso rivestito a superficie non forata, reazione al fuoco B-S1, d0, sp. 9,5mm	controsoffitto bagni	m2	13,7	€ 25,15
		Fissaggio lastre cartongesso pareti verticali		cartongessista	B75039b	cartongesso in lastre di dim. 2000 ÷ 3,500 x 1200mm, reazione al fuoco euroclasse A1 - s1 d0: sp. 12,5mm doppia lastra (2+2)	pareti cubo	m2	150,8	€ 34,85

prezzo parziale	% mdo	prezzo totale	piano	PREZZO della voce d'opera	"UTILE D'IMPRESA (10% del prezzo)"	"SPESE GENERALI (15% del prezzo)"	COSTO della voce d'opera (manodopera + noli e trasporti + materiali)	incidenza % manodopera	Costo della MANODOPERA	ORE GIORNALIERE standard di lavoro
€ 1.068,19	44,00%		terra	€ 1.068,19	€ 97,11	€ 126,66	€ 844,42	44%	€ 371,54	8
totale		€ 1.068,19	totale	€ 1.068,19	€ 97,11	€ 126,66	€ 844,42	44%	€ 371,54	8
€ 3.699,16	79,00%		terra	€ 3.699,16	€ 336,29	€ 438,64	€ 2.924,23	79%	€ 2.310,14	8
totale		€ 3.699,16	totale	€ 3.699,16	€ 336,29	€ 438,64	€ 2.924,23	79%	€ 2.310,14	8
€ 10.935,00	34,00%		terra	€ 10.935,00	€ 994,09	€ 1.296,64	€ 8.644,27	34%	€ 2.939,05	8
totale		€ 10.935,00	totale	€ 10.935,00	€ 994,09	€ 1.296,64	€ 8.644,27	34%	€ 2.939,05	8
€ 6.409,43	94,00%		terra	€ 6.409,43	€ 582,68	€ 760,01	€ 5.066,74	94%	€ 4.762,74	8
totale		€ 6.409,43	totale	€ 6.409,43	€ 582,68	€ 760,01	€ 5.066,74	94%	€ 4.762,74	8
€ 8.470,67	95,00%		terra	€ 8.470,67	€ 770,06	€ 1.004,43	€ 6.696,18	95%	€ 6.361,37	8
totale		€ 8.470,67	totale	€ 8.470,67	€ 770,06	€ 1.004,43	€ 6.696,18	95%	€ 6.361,37	8
€ 2.693,16	42,00%		terra	€ 2.693,16	€ 244,83	€ 319,35	€ 2.128,98	42%	€ 894,17	8
totale		€ 2.693,16	totale	€ 2.693,16	€ 244,83	€ 319,35	€ 2.128,98	42%	€ 894,17	8
€ 2.587,84	83,00%		terra	€ 2.587,84	€ 235,26	€ 306,86	€ 2.045,73	83%	€ 1.697,95	8
totale		€ 2.587,84	totale	€ 2.587,84	€ 235,26	€ 306,86	€ 2.045,73	83%	€ 1.697,95	8
€ 123,27	72,00%		terra	€ 123,27	€ 11,21	€ 14,62	€ 97,45	72%	€ 70,16	8
totale		€ 123,27	totale	€ 123,27	€ 11,21	€ 14,62	€ 97,45	72%	€ 70,16	8
€ 2.411,08	50,00%		terra	€ 2.411,08	€ 219,19	€ 285,90	€ 1.905,99	50%	€ 952,99	8
totale		€ 2.411,08	totale	€ 2.411,08	€ 219,19	€ 285,90	€ 1.905,99	50%	€ 952,99	8
€ 1.461,97	40,00%		cubo	€ 1.461,97	€ 132,91	€ 173,36	€ 1.155,71	40%	€ 462,28	8
totale		€ 1.461,97		€ 1.461,97	132,9063182	€ 173,36				
€ 344,56	40,00%		cubo	€ 344,56	€ 31,32	€ 40,86	€ 272,38	40%	€ 108,95	8
totale		€ 344,56	totale	€ 344,56	€ 31,32	€ 40,86	€ 272,38	40%	€ 108,95	8
€ 5.255,38	43,00%		cubo	€ 5.255,38	€ 477,76	€ 623,17	€ 4.154,45	43%	€ 1.786,41	8

COSTO ORARIO manodopera	COSTO GIORNALIERO della manodopera	UOMINI GIORNO (arrotondati all'unità superiore)	NUMERO componenti la squadra operativa standard	durata "NORMALE" della voce d'opera	decremento % della durata in condizioni OTTIMISTICHE	durata "OTTIMISTICA"	incremento % della durata in condizioni PESSIMISTICHE	durata "PESSIMISTICA"	DURATA MEDIANA "Dme"	variabile aleatoria s
€ 33,00	€ 264,00	2	3,00	0,67	1%	0,66	10%	0,7	1,00	0,01
€ 33,00	€ 264,00	2	3,00	0,67	1%	0,66	10%	0,7	1,00	0,01
€ 33,00	€ 264,00	9	3,00	3,00	1%	2,97	10%	3,3	4,00	0,06
€ 33,00	€ 264,00	9	3,00	3,00	1%	2,97	10%	3,3	4,00	0,06
€ 33,00	€ 264,00	12	3,00	4,00	1%	3,96	10%	4,4	5,00	0,07
€ 33,00	€ 264,00	12	3,00	4,00	1%	3,96	10%	4,4	5,00	0,07
€ 33,00	€ 264,00	19	3,00	6,33	1%	6,27	10%	7,0	7,00	0,12
€ 33,00	€ 264,00	19	3,00	6,33	1%	6,27	10%	7,0	7,00	0,12
€ 33,00	€ 264,00	25	3,00	8,33	1%	8,25	10%	9,2	9,00	0,15
€ 33,00	€ 264,00	25	3,00	8,33	1%	8,25	10%	9,2	9,00	0,15
€ 33,00	€ 264,00	4	3,00	1,33	1%	1,32	10%	1,5	2,00	0,02
€ 33,00	€ 264,00	4	3,00	1,33	1%	1,32	10%	1,5	2,00	0,02
€ 33,00	€ 264,00	7	2,00	3,50	1%	3,47	10%	3,9	4,00	0,06
€ 33,00	€ 264,00	7	2,00	3,50	1%	3,47	10%	3,9	4,00	0,06
€ 33,00	€ 264,00	1	2,00	0,50	1%	0,50	10%	0,6	1,00	0,01
€ 33,00	€ 264,00	1	2,00	0,50	1%	0,50	10%	0,6	1,00	0,01
€ 33,00	€ 264,00	4	3,00	1,33	1%	1,32	10%	1,5	2,00	0,02
€ 33,00	€ 264,00	4	3,00	1,33	1%	1,32	10%	1,5	2,00	0,02
€ 33,00	€ 264,00	2	4,00	0,50	1%	0,50	10%	0,6	1,00	0,01
€ 33,00	€ 264,00	1	4,00	0,25	1%	0,25	10%	0,3	1,00	0,00
€ 33,00	€ 264,00	1	4,00	0,25	1%	0,25	10%	0,3	1,00	0,00
€ 33,00	€ 264,00	7	4,00	1,75	1%	1,73	10%	1,9	2,00	0,03



prezzo parziale	% mdo	prezzo totale	piano	PREZZO della voce d'opera	"UTILE D'IMPRESA (10% del prezzo)"	"SPESE GENERALI (15% del prezzo)"	COSTO della voce d'opera (manodopera + noli e trasporti + materiali)	incidenza % manodopera	Costo della MANODOPERA	ORE GIORNALIERE standard di lavoro
€ 24.881,66	29,00%		terra	€ 24.881,66	€ 2.261,97	€ 2.950,39	€ 19.669,30	29%	€ 5.704,10	8
totale		€ 24.881,66	totale	€ 24.881,66	€ 2.261,97	€ 2.950,39	€ 19.669,30	29%	€ 5.704,10	8
€ 2.391,25	62,00%		terra	€ 2.391,25	€ 217,39	€ 283,55	€ 1.890,31	62%	€ 1.171,99	8
		€ 2.391,25	totale	€ 2.391,25	€ 217,39	€ 283,55	€ 1.890,31	62%	€ 1.171,99	8
€ 4.234,46	40,00%		terra	€ 4.234,46	€ 384,95	€ 502,11	€ 3.347,40	40%	€ 1.338,96	8
		€ 4.234,46	totale	€ 4.234,46	€ 384,95	€ 502,11	€ 3.347,40	40%	€ 1.338,96	8
€ 313,60	42,00%		terra							
totale		€ 313,60	totale	€ 313,60	€ 28,51	€ 37,19	€ 247,91	42,00%	€ 104,12	8
€ 15.017,69	24,00%		terra	€ 15.017,69	€ 1.365,24	€ 1.780,75	€ 11.871,69	24%	€ 2.849,21	8
totale		€ 15.017,69	totale	€ 15.017,69	€ 1.365,24	€ 1.780,75	€ 11.871,69	24%	€ 2.849,21	8

totale		€ 101.023,39
--------	--	--------------

COSTO ORARIO manodopera	COSTO GIORNALIERO della manodopera	UOMINI GIORNO (arrotondati all'unità superiore)	NUMERO componenti la squadra operativa standard	durata "NORMALE" della voce d'opera	decremento % della durata in condizioni OTTIMISTICHE	durata "OTTIMISTICA"	incremento % della durata in condizioni PESSIMISTICHE	durata "PESSIMISTICA"	DURATA MEDIANA "Dme"	variabile aleatoria s
€ 33,00	€ 264,00	22	2,00	11,00	1%	10,89	10%	12,1	12,00	0,20
€ 33,00	€ 264,00	22	2,00	11,00	1%	10,89	10%	12,1	12,00	0,20
€ 33,00	€ 264,00	5	3,00	1,67	1%	1,65	10%	1,8	2,00	0,03
€ 33,00	€ 264,00	5	3,00	1,67	1%	1,65	10%	1,8	2,00	0,03
€ 33,00	€ 264,00	6	3,00	2,00	1%	1,98	10%	2,2	3,00	0,04
€ 33,00	€ 264,00	6	3,00	2,00	1%	1,98	10%	2,2	3,00	0,04
€ 33,00	€ 264,00	1	3,00	0,33	1%	0,33	10%	0,4	1,00	0,01
€ 33,00	€ 264,00	11	4,00	2,75	1%	2,72	10%	3,0	3,00	0,05
€ 33,00	€ 264,00	11	4,00	2,75	1%	2,72	10%	3,0	3,00	0,05

# BIBLIOGRAFIA

# 1 RIVOLUZIONE 3.0



Jakupovic A., Large scale additive manufacturing, Università degli studi di Trieste, Tesi di laurea, 2012/2013

Reinhardt K., Uso della stereofotografia per la realizzazione di elementi strutturali: progettazione tramite metodologia TNA, Università degli studi di Firenze, Tesi di laurea, 2011/2012

Gauntlett D., La società dei Makers, Marsilio Editore, 2013

Anderson C., Makers:il ritorno dei produttori, per una nuova rivoluzione industriale, Rizzoli Etas Edizioni, Trebaseleghe (PD), 2014

Acanfora M., Maker A-Z, Arduino, stampanti 3D, Fab Lab: La rivoluzione degli artigiani Digitali per una tecnologia democratica, Altreconomia Edizioni, Milano, 2014

Lan J., Design and fabrication of a modular multi-material 3D printer, Massachusetts Institute of Tecnology,Tesi di Master, 2011

Lang D., Zero to Maker: Learn (Just Enough) to Make (Just Ebout) Anything, Maker Media Edizioni, 2013

Isaacson W., Gli innovatori, Mondadori Edizioni, 2014

Bush V., Manifesto per la rinascita di una nazione, Bollati Boringhieri, Torino, 2013

Levy S., Hackers, gli errori della rivoluzione informatica, Shake Edizioni underground, Milano, 1996

Licklider J. R., The Libraries of the future, M.I.T. Press, Cambride (MA), 1965

Luna R., Cambiamo tutto! La rivoluzione degli innovatori, Editori Laterza, Milano 2013

Computer Idea, Stampanti 3d: la guida completa, Sprea Editori, 2014



[www.wired.it](http://www.wired.it)

[www.i.materialise.com](http://www.i.materialise.com)

[www.dinitech.it](http://www.dinitech.it)

[www.d-shape.com](http://www.d-shape.com)

[www.dusarchitects.com](http://www.dusarchitects.com)

[www.wasproject.it](http://www.wasproject.it)

[www.3ders.org](http://www.3ders.org)

[www.contourcrafting.org](http://www.contourcrafting.org)

[www.yhbm.com](http://www.yhbm.com)

[www.piulab.it](http://www.piulab.it)

[www.lumindustries.com](http://www.lumindustries.com)

[www.kentstrapper.com](http://www.kentstrapper.com)

[www.crea3dstore.com](http://www.crea3dstore.com)

[www.sharebot.it](http://www.sharebot.it)



IMPALA Project: [www.youtube.com/watch?v=fQjgHszJVLs](http://www.youtube.com/watch?v=fQjgHszJVLs)

Trumpf - Direct Metal Deposition: [www.youtube.com/watch?v=iLndYWw5\\_y8](http://www.youtube.com/watch?v=iLndYWw5_y8)

4D Printing Self-Building Space Stations: [www.youtube.com/watch?v=RfW1NYvV0PM](http://www.youtube.com/watch?v=RfW1NYvV0PM)

Lunar Base Using 3D Printing: [www.youtube.com/watch?v=YCmqN0YbgCA](http://www.youtube.com/watch?v=YCmqN0YbgCA)

Lunar Base, 3D printed lunar habitation: [www.youtube.com/watch?v=DBZopB4356U](http://www.youtube.com/watch?v=DBZopB4356U)

Architects plan to build a house with a 3D printer: [www.youtube.com/watch?v=05ThxOqS\\_kl](http://www.youtube.com/watch?v=05ThxOqS_kl)

Fully-customized, modular solar house is 3D printed prefab: [www.youtube.com/watch?v=3R1CBFBxuew](http://www.youtube.com/watch?v=3R1CBFBxuew)

Constructing Buildings Using 3D Printer: [www.youtube.com/watch?v=92gbXwz6Q1Q](http://www.youtube.com/watch?v=92gbXwz6Q1Q)

Objet 3D Printing Functional Bike Parts - TREK Bicycles: [www.youtube.com/watch?v=7w2wB6hW-OI](http://www.youtube.com/watch?v=7w2wB6hW-OI)

3D Printer With 107 Materials | Objet Connex Range: [www.youtube.com/watch?v=LvuXKS6i4iw](http://www.youtube.com/watch?v=LvuXKS6i4iw)

Ecco come funziona una stampante 3D - Fab Lab - Hub Giugliano: [www.youtube.com/watch?v=6ydDzvjv1tc](http://www.youtube.com/watch?v=6ydDzvjv1tc)

Contour Crafting: Automated Construction: Behrokh Khoshnevis at TEDxOjai: [www.youtube.com/watch?v=JdbJP8Gx-qog](http://www.youtube.com/watch?v=JdbJP8Gx-qog)

3D Print Canal House: [www.vimeo.com/87843940](http://www.vimeo.com/87843940)

Watch the 3D Printing of a Canal House in Amsterdam: [www.youtube.com/watch?v=RPGK-F74-dl](http://www.youtube.com/watch?v=RPGK-F74-dl)

Startup Juice: Massimo Moretti di WASProject: [www.youtube.com/watch?v=Ixi-IJ\\_dNpk](http://www.youtube.com/watch?v=Ixi-IJ_dNpk)

Big clay 3d printer by Wasproject: [www.youtube.com/watch?v=\\_BZiPn5UrnI](http://www.youtube.com/watch?v=_BZiPn5UrnI)

Sharebot Pro, la Stampante 3D italiana: [www.youtube.com/watch?v=JfKb5F8cJFo](http://www.youtube.com/watch?v=JfKb5F8cJFo)

Oluwaseyi Sosanya's 3D weaving machine: [www.youtube.com/watch?v=rhRctXcioiA](http://www.youtube.com/watch?v=rhRctXcioiA)

Sculptify David 3D Printer Demo: [www.youtube.com/watch?v=49IK9EdTU8Y](http://www.youtube.com/watch?v=49IK9EdTU8Y)

## 2 PALERMO È TANTE STORIE



Cancela O., Palermo, Laterza Editori, Roma - Bari, 1999

De Seta C., Palermo città d'arte, in Guida ai monumenti di Palermo, a cura di M. A. Spadaro e S. Troisi, Ariete Edizioni, Palermo, 1998

Inzerillo S. M., Urbanistica e società negli ultimi duecento anni a Palermo: crescita della città e politica amministrativa dalla ricostruzione al piano del 1962, STASS Editori, Palermo, 1981

## 3 TRE PERIFERIE



Costa G. S. J., Periferie alla ribalta, in Aggiornamenti sociali, Milano, Gennaio 2015

Azzolina L., Governare Palermo storia e sociologia di un cambiamento mancato, Donzelli Editore, Roma, 2009

Palermo e i suoi quartieri, Centro studi Città di Palermo, Maggio 1980

La Duca R., Palermo ieri e oggi il territorio e i quartieri, Sigma Edizioni, Palermo 1990

Sciascia A., Tra le modernità dell'architettura - la questione del quartiere ZEN 2 di Palermo, L'Epos, Palermo, 2003

Badami A., Picone M., Città nell'emergenza. Progettare e costruire tra Gibellina e lo Zen, a cura di F. Schilleci, Palumbo Editore, Palermo, 2008

Fava F., Lo Zen di Palermo. Antropologia dell'esclusione, FrancoAngeli Editori, Milano, 2008

Gregotti V., Periferie: una rinascita senza ghetti, in Corriere della Sera, Milano, 2015, pag. 27

Carta M., Valorizzare le periferie per non intasare il centro storico, in Giornale di Sicilia, Palermo, 2015, pag. 22

Puglisi E., Il territorio oltre l'Oreto - dalla periferia introversa alla città policentrica, Università degli studi di Palermo, Tesi di laurea, 2010/2011

Conigliaro F., Periferia e smart city: il ruolo degli spazi pubblici nel quartiere Borgo Nuovo a Palermo, Università degli studi di Palermo, Tesi di laurea, 2012

Formoso R., Raccuglia A., Analisi delle trasformazioni storico-urbanistiche che hanno determinato i quartieri Borgo Nuovo e San Filippo Neri, Università degli studi di Palermo, Tesi di laurea, 2007/2008

Caritas Italiana, Caritas Diocesana, Università Cattolica del Sacro Cuore di Milano, Il Quartiere San Filippo Neri - ZEN di Palermo, a cura di G. Mattina, Dicembre 2006

Piano R., Periferie: diario del rammendo delle nostre città, in Sole 24 Ore, Milano, 1014

Giuffrida R., Giuffrè M., La Palazzina Cinese e il Museo Pitrè, Palermo, 1987

De Seta C., Spadaro M. A., Spatafora F., Palermo città d'arte. Guida illustrata ai monumenti di Palermo e Monreale, Kalòs Edizioni, Palermo 1998



.....  
[www.villaalliatocardillo.it](http://www.villaalliatocardillo.it)

[www.villadecordova.it](http://www.villadecordova.it)

[www.palermoweb.com](http://www.palermoweb.com)

[www.palermotourism.com](http://www.palermotourism.com)

[www.comune.palermo.it](http://www.comune.palermo.it)

## 4 TRE PROGETTI



.....  
Pawlyn M., Biomimicry in Architecture, RIBA Publishing, 2011

Saggio A., Urbanvoids, Proposte della Cattedra di Progettazione Architettonica e Urbana, a cura di M. Moccia e V. Ballini, Sapienza Università di Roma, Maggio 2010

## 5 FORMA & STRUTTURA



.....  
Decreto Ministeriale 14/01/2008: Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni

CIRCOLARE del 2 febbraio 2009, n. 617: Istruzioni per l'applicazione delle «Nuove norme tecniche per le costruzioni» di cui al decreto ministeriale 14 gennaio 2008.

Colombo M., Tecnica delle costruzioni, Facoltà di Ingegneria Edile-Architettura, Politecnico di Milano, A.A. 2011-2012

Di Prisco M., Progetto di strutture, Facoltà di Ingegneria Edile-Architettura, Politecnico di Milano, A.A. 2012-2013

Toniolo G., Di Prisco M., Cemento armato, calcolo agli stati limite, Terza Edizione, Tecnica delle costruzioni Vol. 2A, Zanichelli, 2010

Toniolo G., Di Prisco M., Cemento armato, calcolo agli stati limite, Terza Edizione, Tecnica delle costruzioni Vol. 2B, Zanichelli, 2010

UNI ENV 1992-1-1:1993: Eurocodice 2 - Progettazione delle strutture di calcestruzzo.

## 6 TECNOLOGIA



Allen E., *How Buildings Works. The Nature Order of Architecture*, Oxford university press, 1980

Banham R., *The Architecture of the Well-Tempered Environment*, Chicago university press, 1969

Bonomi M., De Flumeri C., Lavagna M., *Edifici a consumo energetico zero Orientamenti normativi, criteri progettuali ed esempi di zero energy e zero emission buildings*, Maggioli Editore, 2012

Colombo M., *Tecnica delle costruzioni*, Facoltà di Ingegneria Edile-Architettura, Politecnico di Milano, A.A. 2011-2012

Imperadori M., *Progettazione e Innovazione Tecnologica*, Facoltà di Ingegneria Edile-Architettura, Politecnico di Milano, A.A. 2012-2013

Masera G., *Progettazione degli elementi costruttivi*, Facoltà di Ingegneria Edile-Architettura, Politecnico di Milano, A.A. 2009-2010

Olgay V., *Design with climate*, Princeton university press, 1958

Poli T., Fiori M., *Architettura Tecnica II*, Facoltà di Ingegneria Edile-Architettura, Politecnico di Milano, A.A. 2010-2011

Salvalai G., *Sistemi edilizi ad alta efficienza energetica*, Facoltà di Ingegneria Edile-Architettura, Politecnico di Milano, A.A. 2012-2013



[www.actis-isolation.com](http://www.actis-isolation.com)

[www.alveox.it](http://www.alveox.it)

[www.celenit.com](http://www.celenit.com)

[www.deezen.com](http://www.deezen.com)

[www.flickr.com](http://www.flickr.com)

[www.fondationlecorbusier.fr](http://www.fondationlecorbusier.fr)

[www.impresatrecolli.com](http://www.impresatrecolli.com)

[www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)

[www.i-nova.net](http://www.i-nova.net)

[www.rpbw.com](http://www.rpbw.com)

[www.smg.gov.mo](http://www.smg.gov.mo)

[www.italcementi.it](http://www.italcementi.it)

[www.velux.com](http://www.velux.com)

[www.costruire.laterizio.it](http://www.costruire.laterizio.it)

[www.niemeyer.org.br](http://www.niemeyer.org.br)

[www.lacatonvassal.com](http://www.lacatonvassal.com)

[www.isotiss.com](http://www.isotiss.com)

# INDICE IMMAGINI

# 1 RIVOLUZIONE 3.0

[1]	Telaio meccanico - Prima rivoluzione industriale	16
[2]	Catena di montaggio Ford T - Seconda Rivoluzione Industriale	16
[3]	Maker Faire Roma	18
[4]	Brevetto apparato stampante di S. Crump	21
[5]	Emerging Technology Hype Cycle, Gartner	29
[6]	Modello di cuore stampato in 3D	30
[7]	Calotta cranica stampata in 3D	30
[8]	exViver 3D Liver	31
[9]	Motore di aereo stampato in 3D, AvioAero	31
[10]	Pneumatico Vision, Michelin	32
[11]	Maniglia stampata in 3D, Alexander Pelikan	32
[12]	Sedia a rotelle GO, Layer Design	33
[13]	Chiave anti copia, UrbanAlps	33
[14]	Scarpe Futerecraft stampate in 3D, Adidas	34
[15]	Collana stampata in 3D	34
[16]	Kinematics dress, Nervous System	34
[17]	Vent'anni di Stampa 3d	35
[18]	Contour Crafting	38
[19]	Muro stampato in calcestruzzo, WinSun	39
[20]	Case stampate in 3D, WinSun	39
[21]	La più grande palazzina al mondo stampata in 3D, WinSun	39
[22]	Dubai Government Office, WinSun	39
[23]	Abitazione di 38m <sup>2</sup> , Apis Cor	40
[24]	Stampante a gru, Apis Cor	40
[25]	Stampante a braccio meccanico, CyBe	40
[26]	Padiglione per la Dubai Electricity and Water Authority, CyBe	40
[27]	Un blocco della Canal House ad Amsterdam, DUS Architects	41
[28]	La stampante 3D KamerMaker, DUS Architects	41
[29]	Urban Cabin, mini-casa di 8m <sup>2</sup> , DUS Architects	41
[30]	Stampante BigBigBig Delta, WASP	42
[31]	Argilla stampata in 3D, WASP	42
[32]	La stampante più grande del mondo, D-Shape	43
[33]	Arco a 3 cerniere di Villa Rocca progettata per la Sardegna, D-Shape	43
[34]	Radiolaria, D-Shape	43

[35]	Ponte pedonale a Madrid, D-Shape	43
[36]	Blocchi di una trave reticolare in calcestruzzo stampata in 3D	44
[37]	Trave reticolare in calcestruzzo stampata in 3D	44
[38]	Trave reticolare in calcestruzzo stampata in 3D con rinforzo di armatura metallica	44
[39]	Ponte ciclabile e sito di stampa, Bam Infra	45
[40]	Giunto siliconico, 3D Wiver	45
[41]	Giunto in acciaio stampato in 3D, ARUP	46
[42]	Giunto in acciaio e calco di sabbia , ARUP e 3Dealise	46

## 2 PALERMO È TANTE STORIE

[43]	Veduta di Palermo, R. La Duca	49
[44]	La cattedrale di Palermo, incisione di Antonio Bova	52
[45]	Litografia dei Quattro Canti di Palermo di Benoist	53
[46]	Stampa d'epoca della Palermo Punico-Romana (254 a.C.)	56
[47]	Stampa d'epoca della Palermo Araba (831 d.C.)	56
[48]	Stampa d'epoca di Palermo dal secolo XI al secolo XIV (1320)	57
[49]	Stampa d'epoca di Palermo prima del taglio di via Maqueda, C. De Seta (1412)	58
[50]	Stampa d'epoca di Palermo dopo il taglio di via Maqueda, C. De Seta (1570)	58
[51]	Stampa d'epoca di Palermo prima del taglio di via Maqueda, R. La Duca (1600)	59
[52]	Stampa d'epoca di Palermo nel XVIII secolo (1713)	60
[53]	Stampa d'epoca di Palermo e il territorio circostante nel XVIII secolo (1759)	61
[54]	Veduta della città di Palermo (1761)	62
[55]	Pianta geometrica di Palermo del Marchese di Villabianca (1777)	63
[56]	Planimetria di Palermo (1761)	64
[57]	Palermo agli inizi del XIX secolo (1818)	65
[58]	Aggiornamento della pianta del Marchese di Villabianca (1822)	66
[59]	Pianta di Palermo (1856)	67
[60]	Piano Regolatore Giarrusso (1885)	68
[61]	Piano Regolatore e di Ampliamento di Palermo (1886)	69
[62]	Progetto del Gruppo Caracciolo (1939)	70
[63]	Piano di Ricostruzione (1947)	71
[64]	I quartieri dell'edilizia sociale (1958)	72
[65]	Piano Regolatore Generale Salerno/Lima (1956)	73
[66]	Piano Particolareggiato Esecutivo (1993)	74

## 3 TRE PERIFERIE

[67]	Lotto alla Cala	81
[68]	Lotto a Brancaccio	81
[69]	Lotto allo Zen	81
[70]	Lotto a Palazzo Reale	82
[71]	Lotto a Borgonuovo	82
[72]	Lotto a Malaspina/Palagonia	82
[73]	Porto della Cala	83
[74]	Google Earth Porto della Cala	83
[75]	Progetto del Lungomare della Cala	87
[76]	Planimetria progetto lungomare della Cala	87
[77]	Veduta del porto della Cala	87
[78]	Lungomare della Cala	87
[79]	Barche nel porto della Cala	87
[80]	Chiesa della Catena	89
[81]	Palazzo Abatellis	89
[82]	Chiesa di S. Giorgio dei Genovesi	89
[83]	Monumento alle XIII Vittime	89
[84]	Palazzo Chiaramonte Steri	90
[85]	Villa Whitaker	90
[86]	Castello a Mare	90
[87]	Mercato della Vucciria	90
[88]	Chiesa di S. Cita	90
[89]	Foro Umberto I, passerella	92
[90]	Foro Umberto I, sedute	92
[91]	Veduta verso via Messina Marine	92
[92]	Piazza di Villa Garibaldi	92
[93]	Ficus in Piazza Garibaldi	92
[94]	Vista di Corso Vittorio Emanuele da Porta Felice	94
[95]	Via Messina Marine	94
[96]	Via Cala	94
[97]	Vista del Porto di Palermo	94
[98]	Veduta della Conca d'Oro	98
[99]	Google Earth quartiere Brancaccio	98
[100]	Foto evoluzione quartiere di Brancaccio	100

[101]	Cisterna di Brancaccio	101
[102]	Targa su un muro del quartiere di Brancaccio	101
[103]	Ponte dell'Ammiraglio	102
[104]	Veduta del quartiere Settecannoli	102
[105]	Edilizia popolare a Brancaccio	102
[106]	Castello di Maredolce	104
[107]	Chiesa di Maredolce	104
[108]	Chiesa di S. Giovanni dei Lebbrosi, vista frontale	104
[109]	Chiesa di S. Giovanni dei Lebbrosi, vista laterale	104
[110]	Ponte dell'Ammiraglio	105
[111]	Foto storica del ponte dell'Ammiraglio	105
[112]	Ecomuseo Mare Memoria Viva, visto dalla strada	105
[113]	Ecomuseo Mare Memoria Viva, visto dal cortile interno	105
[114]	Esedre di Villa Giulia	107
[115]	Viale di ingresso di Villa Giulia	107
[116]	Ingresso dell'Orto Botanico	107
[117]	Serra Maria Carolina dell'Orto Botanico	107
[118]	Nuovo ponte sull'Oreto	110
[119]	Biforcazione di Corso dei Mille	110
[120]	La nuova linea tramviaria	110
[121]	Nello Musumeci in una scuola di Brancaccio	113
[122]	Rifiuti in una via di Brancaccio	113
[123]	Volontari che ripuliscono Brancaccio	113
[124]	Veduta del quartiere ZEN dall'alto	116
[125]	Google Earth del quartiere ZEN	116
[126]	Veduta della piana dei Colli di Giacomo Brogi	118
[127]	PPE del Centro Storico (1912)	118
[128]	Ipotesi di espansione della città verso Est (1927)	119
[129]	Piano di Ricostruzione (1947)	119
[130]	Palazzi dello ZEN1	120
[131]	PPE del Centro Storico (1987)	120
[132]	PPE del Centro Storico (1989)	121
[133]	I tre nuclei dello ZEN	122
[134]	Quartiere Pallavicino	122
[135]	Palazzo dello ZEN 1	123
[136]	Prospetti delle Insulae dello ZEN	123
[137]	Progetto originario dello ZEN2	124
[138]	Progetto realizzato dello ZEN2	124

[139]	Villa Lampedusa ai Colli	126
[140]	Villa Florio Pignatelli	126
[141]	Villa Maletto Bonocore	126
[142]	Villa Boscogrande	127
[143]	Villa De Cordova	127
[144]	Villa Alliata Cardillo	127
[145]	Villa Spina	127
[146]	Fontana d'Ercole all'interno della Favorita	129
[147]	Grotta Conza	129
[148]	Riserva di Capo Gallo	129
[148]	Via Patti allo ZEN	131
[150]	Via Pensabene allo ZEN	131
[151]	Via Senocrate allo ZEN	131
[152]	Una via interna dello ZEN2	131
[153]	Retro di un'insulae	133
[154]	Bambini che giocano allo ZEN2	133
[155]	Insulae dello ZEN2	133
[156]	Via interna dello ZEN2	133
[157]	Rifiuti allo ZEN	133
[158]	Ingresso dello ZEN1	133
[159]	Volontari allo ZEN2	135
[160]	Spiazzo centrale dello ZEN2	135
[161]	Via interna alle Insulae dello ZEN2	135
[162]	Un palazzo dello ZEN1	136
[163]	Carcassa di auto allo ZEN2	136
[164]	Stendino appeso a un'insulae	137

## 4 TRE PROGETTI

[165]	Palazzo dei Normanni	143
[166]	Vista sul porto della Cala	144
[167]	Vista cartelloni pubblicitari sul lotto di progetto della Cala	145
[168]	Stato di fatto lotto di progetto della Cala	145
[169]	Vista laterale del lotto di progetto della Cala	145
[170]	Altra vista dello stato di fatto del lotto di progetto della Cala	145

[171]	Fiume Oreto	167
[172]	Mercato della Vucciria	168
[173]	Progetto del Mercato Barceló di Nieto Sobejano Arquitectos	168
[174]	Stato di fatto del lotto di progetto di Brancaccio	169
[175]	Veduta della Conca d'Oro nel 1957	186
[176]	Opera scultorea "Inside Out" di Richard Serra	186
[177]	Stato di fatto dell'area di progetto dello ZEN	186
[178]	Vista laterale dell'area di progetto dello ZEN	186

## 5 FORMA & STRUTTURA

[179]	Evoluzione della sezione del blocco strutturale	213
[180]	Schema di carico e deformata dell'arco a 3 cerniere	214
[181]	Diagramma dei momenti dell'arco a 3 cerniere	214
[182]	Diagramma del taglio dell'arco a 3 cerniere	214
[183]	Diagramma dello sforzo normale dell'arco a 3 cerniere	214
[184]	Schema di carico e deformata dell'arco appoggio-appoggio	214
[185]	Diagramma dei momenti dell'arco appoggio-appoggio	214
[186]	Diagramma del taglio dell'arco appoggio-appoggio	214
[187]	Diagramma dello sforzo normale dell'arco appoggio-appoggio	214
[188]	Grafico del dominio M-N della sezione da 74 cm	216
[189]	Grafico del dominio M-N della sezione da 61 cm	216
[190]	Grafico del dominio M-N della sezione da 48 cm	217
[191]	Grafico del dominio M-N della sezione da 31 cm	217
[192]	Grafico del dominio M-N della sezione da 27 cm, con ferri esterni	217
[193]	Grafico del dominio M-N della sezione da 27 cm, con ferri interni	218
[194]	Grafico riassuntivo dei domini M-N delle sezioni	218
[195]	Grafico del confronto tra momenti flettenti e momenti resistenti	219
[196]	Grafico degli spostamenti SLE in direzione x	223
[197]	Grafico degli spostamenti SLE in direzione y	223
[198]	Grafico degli spostamenti SLE in direzione x-y	223
[199]	Grafico dell'arco raffigurante i ferri interni	224
[200]	3D dei blocchi impilati	224
[201]	Raffigurazione semiarco strutturale	224
[202]	Grafico della deformata della trave di fondazione	228

[203]	Grafico dei momenti della trave di fondazione	228
[204]	Grafico del taglio della trave di fondazione	228
[205]	Trave di fondazione con ferri longitudinali e staffe	230
[206]	Vetrata progetto ANT1	231
[207]	Pressa Galdabini per compressione	234
[208]	Provino non impregnato di primer	234
[209]	Provino impregnato di primer	234
[210]	Pressa Galdabini per flessione	234
[211]	Stampo provino cilindrico in calcestruzzo	236
[212]	Provino cilindrico in calcestruzzo	236
[213]	Provini cilindrici in calcestruzzo	236
[214]	Miniprinter 3D D-Shape	237
[215]	Provino in pietra dolomia e magnesio	238
[216]	Provino di sabbia, cemento e acqua	238
[217]	Provino di sabbia, cemento, fibre di vetro e acqua	238
[218]	Provino con legante di origine alimentare	238
[219]	Provino con legante alimentare e fibre di vetro	238
[220]	Ugelli della Miniprinter 3D D-Shape	238
[221]	Imbuto della Miniprinter 3D D-Shape	238
[222]	Getto del legante	238
[223]	Risultato di stampa	238

## 6 TECNOLOGIA

[224]	Classificazione Climatica Mondiale Koppen	241
[225]	Grafico precipitazioni medie mensili di Palermo	242
[226]	Grafico delle probabilità di pioggia in un anno a Palermo	242
[227]	Grafico dell'umidità relativa media mensile a Palermo	242
[228]	Grafico delle temperature medie mensili di Palermo	243
[229]	Grafico delle temperature medie settimanali a Palermo	243
[230]	Distribuzione annuale delle velocità del vento a Palermo	243
[231]	Distribuzione annuale della frequenza del vento a Palermo	244
[232]	Rosa dei venti mensili	244
[233]	Sistema di raffrescamento della Zisa a Palermo	245
[234]	Grafico del percorso solare annuale nel lotto di progetto della Cala	247

[235]	Studio ombre in inverno nel lotto di progetto della Cala (ore 7:00 - 13:00)	247
[236]	Studio ombre in inverno nel lotto di progetto della Cala (ore 14:00 - 19:00)	247
[237]	Studio ombre in estate nel lotto di progetto della Cala (ore 7:00 - 13:00)	248
[238]	Studio ombre in estate nel lotto di progetto della Cala (ore 14:00 - 19:00)	248
[239]	Grafico di distribuzione iniziale aperture finestrate del progetto	249
[240]	Grafico in pianta del Fattore di Luce Diurna (1° caso)	249
[241]	Grafico in pianta dell'Illuminanza (1° caso)	249
[242]	Grafico in 3D dell'illuminanza (1° caso)	249
[243]	Inclinazione imbotti ed illuminanza (caso 1)	250
[244]	Inclinazione imbotti ed illuminanza (caso 2)	250
[245]	Inclinazione imbotti ed illuminanza (caso 3)	250
[246]	Grafico di distribuzione finale delle aperture finestrate del progetto	251
[247]	Grafico in pianta del Fattore di Luce Diurna (2° caso)	251
[248]	Grafico in pianta dell'Illuminanza (2° caso)	251
[249]	Grafico in 3D dell'illuminanza (2° caso)	251
[250]	Forma trapezoidale dei blocchi	252
[251]	Forma a + dei blocchi	252
[252]	Schema Okalux	252
[253]	Telo Tatami Vinilico per pavimento	253
[254]	Pannello di Topakustik per pareti interne	253
[255]	Spaccato del blocco di progetto	255
[256]	Centine lignee su archi romani in Inghilterra	273
[257]	Esempio di centina flessibile	273
[258]	Sequenza costruttiva	274
[259]	Vista tridimensionale della chiave di volta del progetto	275
[260]	Particolare dell'aggancio della trave di volta con il resto della struttura	275

## ALLEGATI CAPITOLO 1

[261]	Ricostruzione 3D della stampa di una casa con tecnologia Contour Crafting	284
[262]	Setti murari con inserimento di impianti e struttura, Contour Crafting	284
[263]	Posa in opera di una casa stampata in Cina, WinSun	285
[264]	La più grande villa al mondo stampata in 3D, WinSun	285
[265]	Stampante, D-Shape	286
[266]	Processo di stampa, D-Shape	286

[267]	Costruzione di Radiolaria, D-Shape	287
[268]	Radiolaria, D-Shape	287
[269]	La casa tutta di un pezzo alla Triennale di Milano (2011), D-Shape	288
[270]	Interno della casa tutta di un pezzo, D-Shape	288
[271]	Progetto di Villa Rocce, D-Shape	288
[272]	Pezzo di un arco a 3 centiere di Villa Rocce, D-Shape	288
[273]	Landscape House, D-Shape	289
[274]	Fasi di posa in opera degli elementi di protezione del waterfront di New York, D-Shape	289
[275]	Rivestimento dei pali del waterfront di New York, D-Shape	290
[276]	Pezzo di barriera corallina appena stampato, D-Shape	290
[277]	Pezzo di barriera corallina immerso, D-Shape	290
[278]	Progetto di abitazioni sulla Luna, Foster+Partners e D-Shape	291
[279]	Distribuzione degli spasi interni di un'abitazione lunare, Foster+Partners e D-Shape	291
[280]	Blocchi stampati della Canal House, DUS Architects	292
[281]	Stampa di un blocco della Canal House, DUS Architects	292
[282]	Massimo Moretti alla Maker Faire di Roma, WASP	293
[283]	BigDelta in azione alla Maker Faire di Roma, WASP	293
[284]	Progetto TOC, WASP	293
[285]	BigDelta montata a Massa Lombarda, WASP	294
[286]	Workshop a Massa Lombarda, WASP	294
[287]	Stampa di un pezzo di una trave reticolare in calcestruzzo	295
[288]	Iniezione di malta in un foro della trave reticolare	295
[289]	Blocco tessile della cappella Annie Pfeiffer di Frank Lloyd Wright	295
[290]	Stampa 3D di un prototipo del blocco tessile della cappella Annie Pfeiffer di Frank Lloyd Wright	295

# INDICE TAVOLE

[1]	Attrezzature e servizi ANT1_Cala	88
[2]	Aree verdi ANT1_Cala	91
[3]	Viabilità e accessibilità pubblica ANT1_Cala	93
[4]	Piani fuori terra ANT1_Cala	95
[5]	Pieni e vuoti ANT1_Cala	96
[6]	Attrezzature e servizi ANT2_Brancaccio	103
[7]	Aree verdi ANT2_Brancaccio	106
[8]	Viabilità e accessibilità pubblica ANT2_Brancaccio	108
[9]	Piani fuori terra ANT2_Brancaccio	111
[10]	Pieni e vuoti ANT2_Brancaccio	112
[11]	Attrezzature e servizi ANT3_ZEN	125
[12]	Aree verdi ANT3_ZEN	128
[13]	Viabilità e accessibilità pubblica ANT3_ZEN	130
[14]	Piani fuori terra ANT3_ZEN	132
[15]	Pieni e vuoti ANT3_ZEN	134
[16]	Masterplan 3D ANT1_Cala	146
[17]	Masterplan ANT1_Cala	148
[18]	Pianta piano terra ANT1_Cala	150
[19]	Pianta piano primo ANT1_Cala	152
[20]	Sezione longitudinale ANT1_Cala	154
[21]	Sezione trasversale ANT1_Cala	156
[22]	Prospetto laterale ANT1_Cala	158
[23]	Prospetto frontale ANT1_Cala	160
[24]	Masterplan ANT2_Brancaccio	170
[25]	Pianta ANT2_Brancaccio	172
[26]	Sezione ANT2_Brancaccio	174
[27]	Prospetto laterale ANT2_Brancaccio	176
[28]	Prospetto frontale ANT2_Brancaccio	178
[29]	Masterplan ANT3_ZEN	188
[30]	Pianta ANT3_ZEN	190
[31]	Sezione longitudinale ANT3_ZEN	192
[32]	Sezione trasversale ANT3_ZEN	194
[33]	Dettaglio tecnologico 1	266
[34]	Dettaglio tecnologico 2	268
[35]	Dettaglio tecnologico 3	270
[36]	Dettaglio tecnologico 4	272

**RINGRAZIAMENTI**

Questa tesi la dedico..

*“Ai folli, agli anticonformisti, ai ribelli, ai piantagrane. A tutti coloro che vedono le cose in modo diverso.  
Costoro non amano le regole, specie i regolamenti e non hanno alcun rispetto per lo status quo.*

*Potete citarli, essere in disaccordo con loro. Potete glorificarli o denigrarli;  
ma l'unica cosa che non potrete mai fare è ignorarli, perché riescono a cambiare le cose.*

*Perché fanno progredire l'umanità.*

*E mentre qualcuno potrebbe definirli folli, noi ne vediamo il genio.  
Perché solo coloro che sono abbastanza folli da pensare di poter cambiare il mondo,  
lo cambiano davvero”*

Think different, TBWA\Chiat\Day, 1997

..a Mariuccia e a tutti gli altri !

”

*So long, and thanks for all the fish*  
— Douglas Adams