

“The Shell” - Principi di DFMA e design algoritmico applicati alla progettazione architettonica

Politecnico di Torino

Corso di laurea magistrale in architettura per la sostenibilità

A.A. 2023-24

Sessione di laurea di Dicembre 2024



“THE SHELL”

Principi di DfMA e design algoritmico applicati alla progettazione architettonica

Relatore:

Marco Caprani

Candidato:

Meroni Gabriele

Co-relatrice:

Paola Palmero

X Nina, che ha sopportato per 5 anni un personaggio molto preoccupato

Indice	Pag. 7
00 - Introduzione	Pag. 17
Parte 1 - teoria	
Capitolo 01	
Dalla prefabbricazione ai DfMA	Pag. 23
Cosa s'intende per prefabbricazione?	Pag. 24
1.1.1 - Prefabbricazione di strutture in legno	Pag. 24
1.1.2 - Prefabbricazione di strutture in ghisa	Pag. 26
1.1.3 - Prefabbricazione del calcestruzzo e calcestruzzo armato	Pag. 28
1.1.4 - Prefabbricazione di singoli elementi	Pag. 30
1.1.5 - La prefabbricazione supportata dalla modellazione digitale	Pag. 32
1.1.6 - I DfMA oggi	Pag. 35
1.1.7 - Principi DfMA	Pag. 37
1.2 - DfMA	Pag. 40
1.2.1 - Guide linea produzione DfMA	Pag. 40
1.2.1.1 - Sfide legate all'applicazione di DfMA	Pag. 41
1.2.2 - Framework	Pag. 44
1.2.1.1 - Caratteristiche costruttive orientate ai DfMA	Pag. 47
1.2.3 - BIM e DfMA	Pag. 48
1.3 - Intervista a Federico Borello (ceo Encode)	Pag. 51
1.4 - Intervista Giuseppe Conti (Pininfarina)	Pag. 59
Fonti	Pag. 62
Capitolo 02	
Computational design	Pag. 67
2.1 - Sistemi parametrici	Pag. 70
2.1.1 - Sistemi parametrici in natura	Pag. 70
2.1.1.1 - Ramificazione	Pag. 71
2.1.1.2 - Frattali	Pag. 72

2.1.1.3 - automi cellulari	Pag. 73
2.1.2 - Gestione degli elementi in software parametrici	Pag. 73
2.2 - Metadesign e mass customization	Pag. 75
2.2.1 - Metadesign	Pag. 75
2.2.2 - Mass customization	Pag. 76
2.3 - Nuove tecniche di produzione	Pag. 77
2.3.1 - Stampa 3D	Pag. 77
2.3.1.1 - Stampa 3D applicata all'edilizia	Pag. 78
2.3.2 - CNC e taglio laser	Pag. 81
2.3.2.1 - Intervista a Thomas De Gaspari, artigiano del settore metalmeccanico	Pag. 83
2.3.3 - Design sistem in architettura	Pag. 89
2.4 - Il futuro del design algoritmico	Pag. 92
2.4.1 - Computazione spaziale	Pag. 93
2.4.2 - Visione artificiale	Pag. 93
2.4.3 - Deep learning	Pag. 94
2.5 - Nuove tecniche di fabbricazione (conferenza Fabricate 2024 e precedenti)	Pag. 96
2.5.1 - Legno e controllo numerico	Pag. 96
2.5.1.1 - Colmare il divario tra CAD e CAM	Pag. 96
2.5.1.2 - Costruire con legno e free form in larga scala, il caso del nuovo headquarter Swatch a Biel	Pag. 98
2.5.1.3 - Utilizzo del legno in elementi complessi di piccola scala	Pag. 101
2.6.1.4 - Visita e intervista presso Blumer Lehmann	Pag. 104
2.5.3 - Produzione con stampa 3D	Pag. 114
2.5.3.1 - Stampa antigravità	Pag. 114
2.5.3.2 - Stampa 3D di strutture tramite machine learning	Pag. 115
2.5.3.3 - Stampa 3D con cemento riciclato	Pag. 117
2.5.4 - Buga fibre pavilion: strutture fabbricate roboticamente	Pag. 119
Fonti	Pag. 122
Capitolo 03	
Sostenibilità ottenuta tramite approccio DfMA	Pag. 129
3.1 - Progettare pensando al fine vita DfD	Pag. 130

3.1.1 - Indicatori di circolarità applicati a dei casi studio	Pag. 130
3.1.1.1 - Caso studio 1: Studio di innovative unità abitative temporanee in legno per il ricovero e l'alloggio degli anziani	Pag. 131
3.1.1.2 - Caso studio 2: Prototipi Abitativi d'Emergenza ad Alta Efficienza Veneto (H.E.L.P. Veneto) - Residenze adattive sostenibili per la vita temporanea in situazioni di emergenza ambientale	Pag. 133
3.1.1.3 - Confronto tra casi studio	Pag. 135
3.1.2 - Politiche e strategie per il riuso circolare disponibili in Europa	Pag. 140
3.1.3 - Come coinvolgere clienti e stakeholder	Pag. 144
3.2 - Collaborazione tra BIM e DfD	Pag. 146
3.2.1 - Ampliare le opportunità attraverso il BIM	Pag. 146
3.2.1.1 - Applicazione pratica nel caso di edificio per uffici	Pag. 150
3.3 - Applicazioni concrete di metodologia DfD	Pag. 153
3.3.1 - The resource rows - Copenaghen	Pag. 153
3.3.2 - Karstadt Re-Parked - Berlin	Pag. 155
Fonti	Pag. 157

Parte 2 - “The Shell project”

Capitolo 04

Nascita del progetto: Atelier progetto e modellazione

A. A. 2021/22

4.1 - Nascita del progetto

 4.1.1 - Sviluppo della geometria dell'auditorium

4.2 - Risultato finale

Fonti

Pag. 165

Pag. 166

Pag. 170

Pag. 174

Pag. 176

Capitolo 05

Evoluzione del progetto tramite l'approccio DfMA:

“The Shell”

5.1 - Ripensare sostenibile e circolare

 5.1.1 - Permeabilità

 5.1.2 - Forme di progetto

Pag. 179

Pag. 180

Pag. 181

Pag. 183

5.1.2.1 - Prima reiterazione di progetto	Pag. 183
5.1.2.2 - Seconda reiterazione di progetto	Pag. 185
5.1.2.3 - Terza reiterazione di progetto	Pag. 186
5.1.2.4 - Versione definitiva	Pag. 188
5.2 - Il ridisegno della facciata	Pag. 191
5.3 - Rinnovare l'involucro: recupero e innovazione	Pag. 194
5.3.1 - Mattoni di recupero	Pag. 195
5.3.2 - Riutilizzare il marmo	Pag. 202
5.4 - Visione d'insieme	Pag. 206
5.4.1 - Considerazioni forma di progetto	Pag. 208
5.5 - Analisi solare	Pag. 210
5.5.1 - Equinozio di primavera 20 Marzo	Pag. 211
5.5.1.1 - Ore 9:00	Pag. 211
5.5.1.2 - Ore 12:30	Pag. 211
5.5.1.3 - Ore 18:00	Pag. 212
5.5.1.4 - Giornaliero	Pag. 212
5.5.2 - Solstizio d'estate 21 Giugno	Pag. 213
5.5.2.1 - Ore 9:00	Pag. 213
5.5.2.2 - Ore 12:30	Pag. 213
5.5.2.3 - Ore 18:00	Pag. 214
5.5.2.4 - Giornaliero	Pag. 214
5.5.3 - Equinozio d'autunno 23 Settembre	Pag. 215
5.5.3.1 - Ore 9:00	Pag. 215
5.5.3.2 - Ore 12:30	Pag. 215
5.5.3.3 - Ore 18:00	Pag. 216
5.5.3.4 - Giornaliero	Pag. 216
5.5.4 - Equinozio d'autunno 23 Settembre	Pag. 217
5.5.4.1 - Ore 9:00	Pag. 217
5.5.4.2 - Ore 12:30	Pag. 217
5.5.4.3 - Ore 18:00	Pag. 218
5.5.4.4 - Giornaliero	Pag. 218
Fonti	Pag. 220
Capitolo 06	
Definizione struttura portante	Pag. 223
6.1 - Suddivisione struttura	Pag. 228
6.2 - Archi strutturali	Pag. 230
6.2.1 - Realizzazione forme degli archi	Pag. 230
6.2.2 - Processo progettuale archi strutturali	Pag. 234
6.2.2.1 - Assemblare gli archi	Pag. 238

6.2.3 - Giunzione travi principali interne	Pag. 242
6.2.3.1 - Travi speciali	Pag. 244
6.3 - Vano scale e ascensore	Pag. 246
6.3.1 - Pilastria HEB 400	Pag. 246
6.3.2 - Travi IPE 360 e 300	Pag. 248
6.3.3 - Croci di Sant'Andrea	Pag. 249
6.3.4 - Muri di tamponamento	Pag. 249
6.3.5 - Struttura completa	Pag. 250
6.4 - Travi principali copertura	Pag. 251
6.4.1 - Generazione geometria travi principali	Pag. 251
6.4.2 - Materiali per la realizzazione delle travi	Pag. 254
6.4.3 - Assemblare le travi principali	Pag. 256
6.5 - Travi secondarie copertura	Pag. 261
6.5.1 - Generazione geometria travi secondarie	Pag. 261
6.5.2 - Assemblare le travi secondarie	Pag. 263
6.6 - Calcolo peso edificio	Pag. 266
6.6.1 - Peso strutturale	Pag. 266
6.6.1.1 - Archi strutturali	Pag. 266
6.6.1.2 - Vano scale	Pag. 268
6.6.1.3 - Travi IPE che sorreggono i solai interni	Pag. 268
6.6.1.4 - Travi speciali	Pag. 269
6.6.1.5 - Solai in lamiera grecata	Pag. 269
6.6.1.6 - Travi principali copertura	Pag. 270
6.6.1.7 - Travi secondarie copertura	Pag. 271
6.6.2 - Carico copertura	Pag. 272
6.6.3 - Altri carichi a cui è sottoposta la struttura	Pag. 275
6.6.3.1 - Peso poltroncine e mobili	Pag. 275
6.6.3.2 - Peso persone	Pag. 275
6.6.3.3 - Carico del vento	Pag. 276
6.6.3.4 - Carico neve	Pag. 276
6.6.3.5 - Carico pioggia	Pag. 276
6.6.4 - Riassunto dei carichi e conversione in KN	Pag. 277
Fonti	Pag. 280
 Capitolo 07	
Studio e realizzazione pelle esterna	Pag. 285

7.1 - Suddivisione geometrica pelle esterna	Pag. 286
7.1.1 - Pannelli opachi o trasparenti?	Pag. 287
7.1.2 - Ordinamento pannelli per montaggio	Pag. 289
7.2 - Stratigrafia dei pannelli	Pag. 290
7.3 - Realizzazione e assemblaggio	Pag. 294
7.3.1 - Pannelli opachi	Pag. 295
7.3.2 - Pannelli trasparenti	Pag. 300
7.3.3 - Pannelli di chiusura laterali	Pag. 301
7.3.4 - Pannelli di chiusura sopra l'ingresso	Pag. 302
7.4 - Vetrate e chiusure verticali	Pag. 303
Fonti	Pag. 305

Capitolo 08

Assemblaggio in opera	Pag. 309
------------------------------	-----------------

8.1 - Studio del cantiere	Pag. 310
----------------------------------	-----------------

8.1.1 - Fase 1: pulizia e preparazione area di cantiere	Pag. 310
---	----------

8.1.2 - Fase 2: Definizione mappa di cantiere	Pag. 313
---	----------

8.2 - Trasporto e assemblaggio	Pag. 317
---------------------------------------	-----------------

8.2.1 - Archi strutturali	Pag. 317
---------------------------	----------

8.2.1.1 - Trasporto	Pag. 317
---------------------	----------

8.2.1.2 - Assemblaggio	Pag. 320
------------------------	----------

8.2.2 - Travi principali	Pag. 322
--------------------------	----------

8.2.2.1 - Trasporto	Pag. 322
---------------------	----------

8.2.2.2 - Assemblaggio	Pag. 323
------------------------	----------

8.2.3 - Travi secondarie	Pag. 324
--------------------------	----------

8.2.3.1 - Trasporto	Pag. 324
---------------------	----------

8.2.3.2 - Assemblaggio	Pag. 325
------------------------	----------

8.2.4 - Pannelli di copertura	Pag. 326
-------------------------------	----------

8.2.4.1 - Trasporto	Pag. 326
---------------------	----------

8.2.4.2 - Assemblaggio	Pag. 327
------------------------	----------

8.3 - Cronoprogramma	Pag. 328
-----------------------------	-----------------

Fonti	Pag. 337
--------------	-----------------

Capitolo 09

Risultato finale di progetto	Pag. 341
-------------------------------------	-----------------

9.1 - Disegni di progetto	Pag. 342
9.1.1 - Prospetti	Pag. 342
9.1.2 - Piante	Pag. 345
9.1.3 - Sezioni	Pag. 350
9.1.4 - Render	Pag. 352
9.1.4.1 - Esterni	Pag. 352
9.1.4.2 - Interni	Pag. 360
9.2 - Fine vita edificio	Pag. 366
9.2.1 - Struttura portante	Pag. 366
9.2.1.1 - Elementi in acciaio	Pag. 366
9.2.1.2 - Elementi in Legno	Pag. 367
9.2.2 - Pelle di finitura	Pag. 368
9.3 - Considerazioni finali	Pag. 370
Fonti	Pag. 373
 Capitolo 10	
Modello fisico - scala 1:20	Pag. 377
10.1 - Progettazione modello	Pag. 378
10.1.1 - scegliere il modello	Pag. 378
10.1.2 - Ingegnerizzazione dei componenti	Pag. 379
10.2 - Verniciatura e assemblaggio	Pag. 386
10.3 - Risultato finale	Pag. 394
Fonti	Pag. 398

00

Introduzione

La tesi qui presentata, intitolata: “The Shell” - Principi di DFMA e design algoritmico applicati alla progettazione architettonica” esplora l’uso dei metodi di fabbricazione digitale e la metodologia DfMA (Design for Manufacturing and Assembly) applicata ai processi del design architettonico.

Partendo da un tema di progetto sviluppato nel corso di un atelier di composizione urbana ed architettonica del biennio di magistrale, è stata effettuata un’intera rilettura del percorso progettuale cercando di applicare laddove possibile questa metodologia.

Il DfMA prevede la progettazione e produzione di componenti prefabbricati in ambienti controllati con tecnologie di produzione e controllo avanzate, per poi assemblarli in cantiere.

Questo approccio riduce tempi, costi e imprevisti, offrendo elevata precisione e minimizzando gli sprechi in situazioni dove variabili come le condizioni climatiche o la disponibilità di manodopera possono rallentare le operazioni.

Integrando il DfMA con il computational design, che permette il controllo, la gestione e la creazione di forme complesse attraverso la modellazione algoritmica, si aprono nuove possibilità progettuali, facilitando la realizzazione di idee innovative.

Inoltre, la combinazione di DfMA e design computazionale contribuisce alla sostenibilità ambientale nella creazione di strutture e forme complesse, riducendo i margini di errore, gli sprechi di materiale e di conseguenza le emissioni.

I tre pilastri della tesi – DfMA, l’approccio computazionale alla progettazione e la sostenibilità dei processi produttivi – guidano l’intero progetto, evidenziando l’interconnessione tra innovazione costruttiva, progettazione digitale e attenzione ambientale.

I tre elementi chiave di questa tesi – DfMA, computational design e sostenibilità ambientale – non rappresentano solo i concetti teorici su cui si basa il lavoro, ma fungono anche da linee guida per l’applicazione pratica all’interno del progetto architettonico. Questi pilastri costituiscono il nucleo dell’intero lavoro, poiché mettono in luce le interconnessioni tra nuove metodologie costruttive, innovazioni nel campo della progettazione digitale e la crescente attenzione verso la sostenibilità.

Per facilitare la comprensione di questi temi, ho strutturato la tesi in due parti principali. La prima sezione, di carattere teorico, ha lo scopo di fornire una base solida sui concetti fondamentali che verranno trattati, analizzando a fondo i principi della DfMA e la loro applicazione nel contesto del computational design. La seconda parte della tesi è incentrata sull’applicazione pratica di questi concetti in un progetto architettonico, illustrando in dettaglio le scelte progettuali fatte alla luce delle considerazioni teoriche precedentemente esposte.

Per dare ulteriore solidità al lavoro, ho arricchito la parte teorica con una serie di interviste condotte con esperti del settore. Questi specialisti, attivi nel campo della prefabbricazione digitale e della DfMA, mi hanno fornito preziosi spunti che sono stati integrati nella mia analisi. Ho anche partecipato alla conferenza internazionale Fabricate 2024 a Copenaghen, un evento di rilievo che ha affrontato proprio i temi della prefabbricazione e della modellazione algoritmica. Questa esperienza mi ha permesso di acquisire una prospettiva più ampia su tali argomenti, confrontandomi con esperti internazionali e assistendo a discussioni innovative.

La seconda parte della tesi, invece, è dedicata all’applicazione pratica di questi concetti. Ho scelto un progetto architettonico sviluppato durante il percorso di laurea triennale, situato a

Torino, accanto all'Energy Center. Questo progetto, in particolare l'auditorium situato al centro, si caratterizza per la sua forma complessa, che ha reso necessario l'uso di componenti costruttivi personalizzati e molto specifici. L'idea originale è stata ulteriormente sviluppata e migliorata, rielaborando anche altri edifici del progetto per renderli più coerenti con i principi della tesi.

Per visualizzare meglio i risultati delle mie ricerche, ho realizzato dei modelli di studio in scala, prima al 750, per lo studio delle forme e successivamente in scala

1:20 per la realizzazione di uno spaccato architettonico, utilizzando tecnologie di prototipazione rapida come la stampa 3D e il taglio laser.

Questi modelli mi hanno consentito di analizzare nel dettaglio la fattibilità delle soluzioni progettuali e di migliorare ulteriormente il lavoro. Tutti gli elementi del progetto sono stati accuratamente modellati in scala 1:1, consentendo non solo la visualizzazione complessiva dell'architettura, ma anche la produzione di elaborati di dettaglio che potranno essere utilizzati in fase esecutiva.

Parte 1: Teoria

01

Dalla prefabbricazione al DFMA

1.1 - Cosa s'intende per prefabbricazione?

Con il termine prefabbricazione si intende una tecnica che punta alla realizzazione di parti di un oggetto che verranno poi assemblate in un secondo momento, in un altro luogo differente da quello di realizzazione¹.

Ha origini molto antiche, infatti i primi a utilizzarla furono probabilmente i romani che preferivano lavorare colonne e capitelli dei loro templi in botteghe artigiane per poi trasportarli sul posto per l'assemblaggio. Questa tecnica non è tipica solo dell'architettura ma al contrario viene utilizzata anche per mobili, autoveicoli e in molti altri campi.

Lo scopo è quello di semplificare e velocizzare la realizzazione delle opere, infatti è molto più semplice lavorare in una bottega artigiana, molto attrezzata piuttosto che fare tutto in cantiere. Inoltre un ulteriore vantaggio sta nella possibilità di garantire la massima

sicurezza ai lavoratori del settore, infatti lavorando con un'attrezzatura più adatta ma difficilmente trasportabile sul sito si semplifica di molto la lavorazione.

Nel corso del tempo le modalità di prefabbricazione si sono molto evolute sia dal punto di vista dei materiali utilizzati e soggetti ai processi di prefabbricazione, ma soprattutto dal punto di vista della progettazione, passando da oggetti disegnati a mano da progettisti e realizzati da artigiani, fino ad arrivare a disegni realizzati per i macchinari a controllo numerico come stampanti 3D, laser cutter e CNC per legno che consentono una produzione in serie anche degli elementi più complessi. In questo capitolo verranno analizzate diverse fasi dell'evoluzione del processo prendendo come esempio per ognuna di queste fasi un'architettura che ne racchiuda le caratteristiche principali.

1.1.1 - Prefabbricazione di strutture in legno

I primi casi di edifici prefabbricati, escludendo ovviamente il caso dei romani, risalgono al 1700 circa durante la colonizzazione inglese dell'Australia, in questo contesto vi era necessità di costruire in fretta delle abitazioni temporanee per consentire la sopravvivenza dei coloni.

In particolare nel nuovo Galles del sud, si dice che sia stato costruito un ospedale nel 1790 interamente prefabbricato in Inghilterra e trasportato via mare, composto da una struttura in legno pregiato e da assi che venivano fissati in loco.

costruttore inglese John Manning, il quale pensò questo cottage di facile costruzione per il figlio che era prossimo a trasferirsi in Australia.

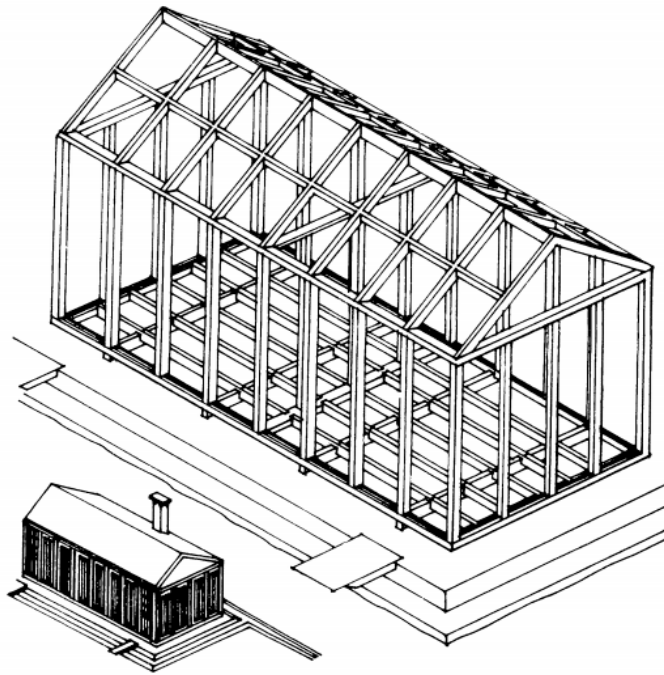
Questo cottage (1) grazie alla possibilità di interscambiare facilmente le sue parti e alla semplicità con cui poteva essere assemblato divenne la base di moltissime architetture utilizzate dai coloni, infatti poteva essere utilizzato come ospedale, scuola, magazzino o semplicemente come abitazione (2).

Il cottage consisteva essenzialmente di pali scanalati alloggiati e imbullonati a una piastra del pavimento la quale

1 - BAUM STUDIO - prefabbricazione tra storia e nuovi bisogni, pp. 1-3

2 - Gilbert Herbert, The Portable Colonial Cottage, Journal of the Society of Architectural Historians, pp. 261-275.

3 - Colin Davies, The prefabricated home - pp. 44-49.



(1)- Il portable cottage di John Manning (Fonte: the portable colonial cottage)



era portata su appositi supporti, i pali a loro volta portavano una piastra a muro che sosteneva semplici capriate triangolari³.

Tra i montanti scanalati, in modo molto simile al tamponamento delle tradizionali costruzioni con pareti in assi, venivano montati vari pannelli di dimensioni standard. I componenti standard del sistema di presidio erano costituiti da un pensile comprendente telaio esterno, montanti e pannelli di tamponamento; una porta vetrata, una porta interna solida e una finestra. Il tutto era poi assemblato tramite incastri e chiodi rudimentali.

Successivamente intorno al 1840 venne creata una nuova versione del portable cottage che comprendeva anche una veranda e dei pilastri in metallo.

(2) - Diversi utilizzi del cottage, dall'alto verso il basso: Ospedale, scuola, magazzino. (Fonte: BAUM studio)

1.1.2 - Prefabbricazione di strutture in ghisa



(3) Coalbrookdale Company Bridge, 1779 [Fonte: Wikidata.org]

Il secondo contributo che gli inglesi fornirono alla prefabbricazione fu la lavorazione della ghisa che divenne possibile nell'era industriale grazie alle fornaci alimentate a carbone che consentivano di raggiungere temperature molto elevate.

Il primo esempio concreto fu il Coalbrookdale Company Bridge nel 1779 (3), per la prima volta i pezzi furono standardizzati, prodotti in serie e spediti sul posto con l'obiettivo di realizzare il ponte nel minor tempo possibile e con l'aiuto di lavoratori poco esperti, garantendo un risparmio sia sul tempo che sui costi rispetto a legno e calcestruzzo⁴.

Questo fu seguito da una serie di ponti simili in Inghilterra, ma soprattutto dimostrò le possibilità offerte dai metalli che stupirono e impressionarono moltissimi cittadini inglesi che accorsero a vedere il ponte non appena fu completato⁵. Questo entusiasmo diede il via ad una vera e propria rivoluzione nel campo architettonico infatti nei decenni successivi si moltiplicarono le applicazioni di questa nuova soluzione, in particolare

durante le esposizioni universali, nelle quali veniva messo in mostra tutto il progresso raggiunto dalla nazione ospitante. In particolare, ci furono due esposizioni che portarono come manifesto assoluto la costruzione di due edifici iconici in ghisa tramite processi di prefabbricazione.

La prima esposizione universale fu quella di Londra nel 1851, in cui il protagonista indiscusso fu il Crystal palace⁶, un enorme palazzo, lungo 564 m di lunghezza e 138 m di larghezza, realizzato con una struttura prefabbricata in ghisa e assemblata sul posto con una copertura interamente vetrata, l'idea veniva infatti da un costruttore di serre, Joseph Paxton, che di fatto realizzò un enorme serra che ebbe il compito di ospitare durante i giorni dell'expo alcune specie botaniche particolari al suo interno, oltre a spettacoli, esposizioni e rappresentazioni, rendendo la visita un'esperienza imperdibile (4). Le dimensioni erano davvero ragguardevoli per l'epoca, infatti misurava ben 564 metri di lunghezza, 124 metri di larghezza e nel punto più alto circa 40 metri di altezza (5).

4 - BAUM STUDIO - prefabbricazione tra storia e nuovi bisogni, pp. 3 - visto il 4/03/2024

5 - Ironbridge.org.uk - the Ironbridge - visto il 6/03/2024

6 - BAUM STUDIO - prefabbricazione tra storia e nuovi bisogni, pp. 4-5 - visto il 4/03/2024

7 - MarcoCrupi.it - le foto e la storia della costruzione della tour Eiffel - visto il 6/03/2024



(4) Interno del Crystal palace durante la cerimonia di chiusura dell'esposizione universale del 1851, (Fonte: Domusweb)

La struttura in ghisa prefabbricata era composta da moduli replicati, giunti tra loro attraverso un sistema di incastri a dado e perno che garantiva una Un altro edificio che ha caratterizzato l'esposizione universale del 1889 fu la tour Eiffel anch'essa un edificio di straordinaria grandezza, progettata dall'ingegnere Alexandre Gustave Eiffel, tutti gli elementi furono preparati nella fabbrica di Eiffel, per un totale di 18.000 pezzi.



(5) Vista esterna del Crystal Palace (Fonte: Domusweb)

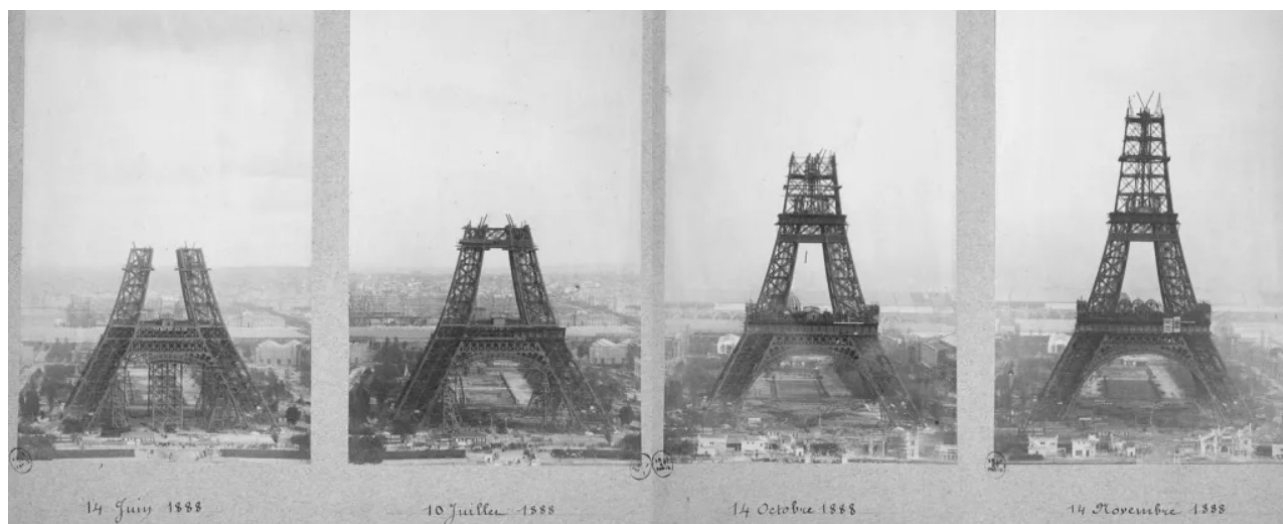


(6) Fondazioni tour Eiffel (Fonte: MarcoCrupi.it)

Vennero realizzati con una precisione di un decimo di millimetro⁷.

Tutti i pezzi sono tenuti insieme tramite rivetti, un metodo costruttivo molto efficace, anche se in principio i pezzi vennero parzialmente assemblati in fabbrica tramite bulloni e solo successivamente.

Tutti i pezzi sono tenuti insieme tramite rivetti, un metodo costruttivo molto efficace, anche se in principio i pezzi vennero parzialmente assemblati in fabbrica tramite bulloni e solo successivamente assemblati



(7) Fasi costruzioni tour Eiffel, 1779 (Fonte: MarcoCrupi.it)

definitivamente sul posto con dei rivetti termici. Per ogni rivetto era necessaria una squadra di 4 uomini, uno che tenesse il pezzo in posizione, un secondo che lo saldasse e un terzo che ne modellasse la testa e il quarto per batterlo con una mazza (6).

I montanti della torre poggiano su fondamenta in calcestruzzo istallate pochi metri sotto il livello del suolo sopra ad uno strato di ghiaia molto compatto che permette di distribuire il carico (7). Nonostante l'idea iniziale fosse quella di utilizzare la torre come ingresso monumentale alla fiera universale, ben

presto l'enorme successo riscosso dalla struttura fece ottenere a Eiffel il diritto di mantenere la struttura per vent'anni, ma nel 1909 si rivelò molto importante per le trasmissioni militari francesi e di conseguenza non venne abbattuta, e ancora oggi è il simbolo più noto della città di Parigi.

Ovviamente questo metodo costruttivo divenne uno dei più utilizzati nel 1800 e per tutte le opere di grandi dimensioni, ne è un esempio la stazione di Milano centrale la cui copertura è realizzata proprio con questo sistema.

1.1.3 - Prefabbricazione del calcestruzzo e calcestruzzo armato

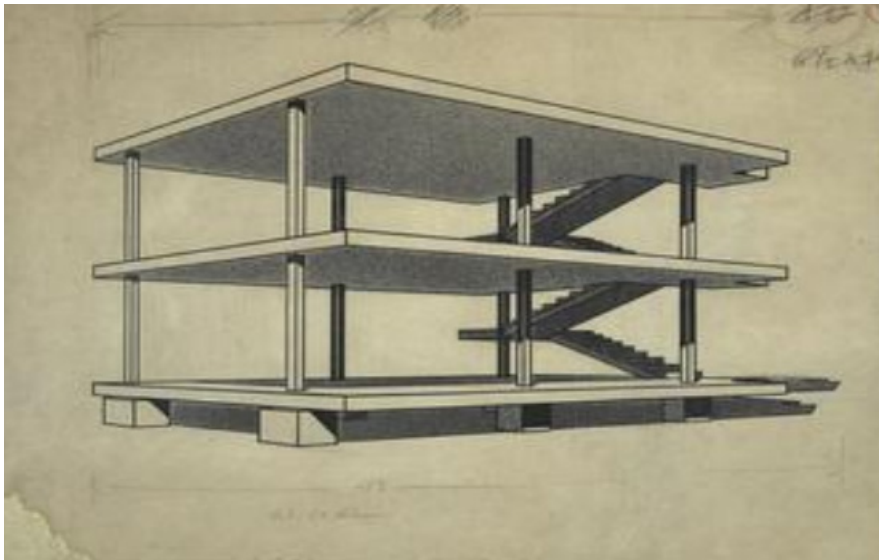
Nel 1914 Le Corbusier affascinato dalle possibilità offerte dalla prefabbricazione del calcestruzzo, decise di esplicitare una sua idea per massimizzare la produzione di abitazioni in calcestruzzo armato, nacque così la maison Domino, presentata per la prima volta all'interno del libro **"Vers une architecture"** attraverso un piccolo disegno prospettico della struttura portante (8).

Questa abitazione essenziale, simbolo del primo razionalismo, era composta da 6 pilastri, 3 solette e un corpo scale che collegava i vari piani, oltre ovviamente alle fondazioni.

Secondo Le Corbusier il futuro dell'edilizia era strettamente legato a quello dell'industria e avrebbero dovuto collaborare per sviluppare dei modelli di abitazione prefabbricabili e veloci da

8 - BAUM STUDIO - prefabbricazione tra storia e nuovi bisogni, pp. 6-7 - visto il 4/03/2024

9 - Colin Davies, The prefabricated home, Londra, 2005, Londra, pp. 14-20.



[8] Maison Domino, Le Corbusier, 1914 (Fonte: BAUMstudio)

Le Corbusier progettò diverse versioni della Maison Citrohan [9], ma tutte dispongono di un soggiorno a doppia altezza illuminato da una grande finestra che riempiva quasi un'intera parete.

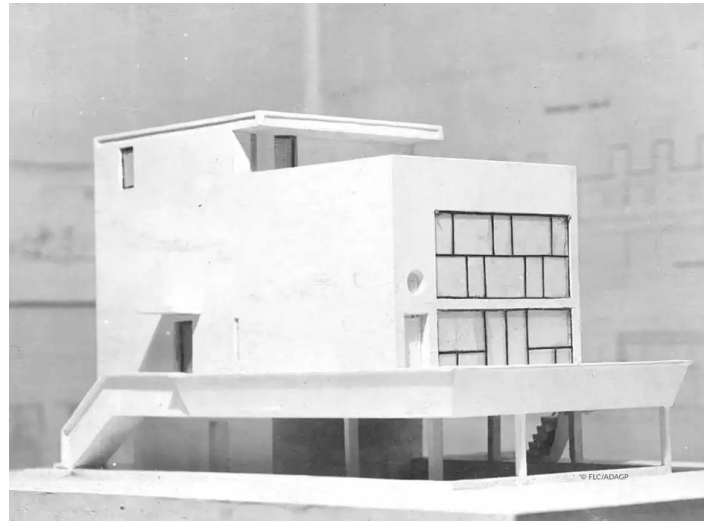
Nelle versioni successive l'intera casa viene sollevata da terra su colonne di cemento o "pilotis", che implicano un telaio in calcestruzzo armato.

Tuttavia, in realtà Le Corbusier prevedeva più una razionalizzazione del cantiere piuttosto che spostare l'intero processo produttivo in fabbrica, almeno per quanto riguarda la struttura portante dell'edificio.

Tuttavia, l'aspetto più intrigante di questo progetto è la standardizzazione dei componenti, la quale secondo Le Corbusier era un concetto sia filosofico che artistico prima che ovviamente pratico.

Gli elementi base della Citrohan furono standardizzati e assemblati in diverse combinazioni per formare appartamenti familiari e bifamiliari a due e tre piani oppure case a schiera. La costruzione è stata razionalizzata, utilizzando una pianificazione di 5 metri per 2,5 seguendo una griglia. Vent'anni dopo il prototipo Citrohan venne riadattato alla famosa Unité d'Habitation a Marsiglia, il massiccio

produrre⁸. Successivamente venne sviluppata sempre da Le Corbusier la Citrohan house che voleva richiamare il marchio automobilistico, in quanto il processo di produzione doveva risultare molto simile alla catena di montaggio di un'automobile, "the house is a machine for living".



[9] Modello della Maison Citrohan, (Fonte: Thecollector)

complesso residenziale che è stato l'ispirazione per moltissimi grattacieli degli anni '60 e '70. Gli appartamenti Unité sono molto stretti e si estendono attraverso l'edificio in modo che siano rivolti su due direzioni. Su un solo lato sono alti due piani, in modo da accogliere nuclei familiari; tuttavia, in questo caso l'intera struttura fu costruita sul sito e non prefabbricata principalmente a causa delle difficoltà riscontrate nella ricerca di personale all'altezza del compito⁹.

Queste teorie non divennero mai realtà nei fatti, se non per alcuni prototipi da esposizione; tuttavia, queste idee contribuirono ad alimentare il movimento razionalista e molti di questi principi sono evidenti all'interno delle opere realizzate da alcuni dei principali esponenti del movimento come Gropius o Van Der Rohe.

Inoltre, le teorie di Le Corbusier furono fondamentali nell'immediato secondo dopo guerra, le tecniche di prefabbricazione, infatti, consentirono di ricostruire le città in breve tempo garantendo dei requisiti di qualità

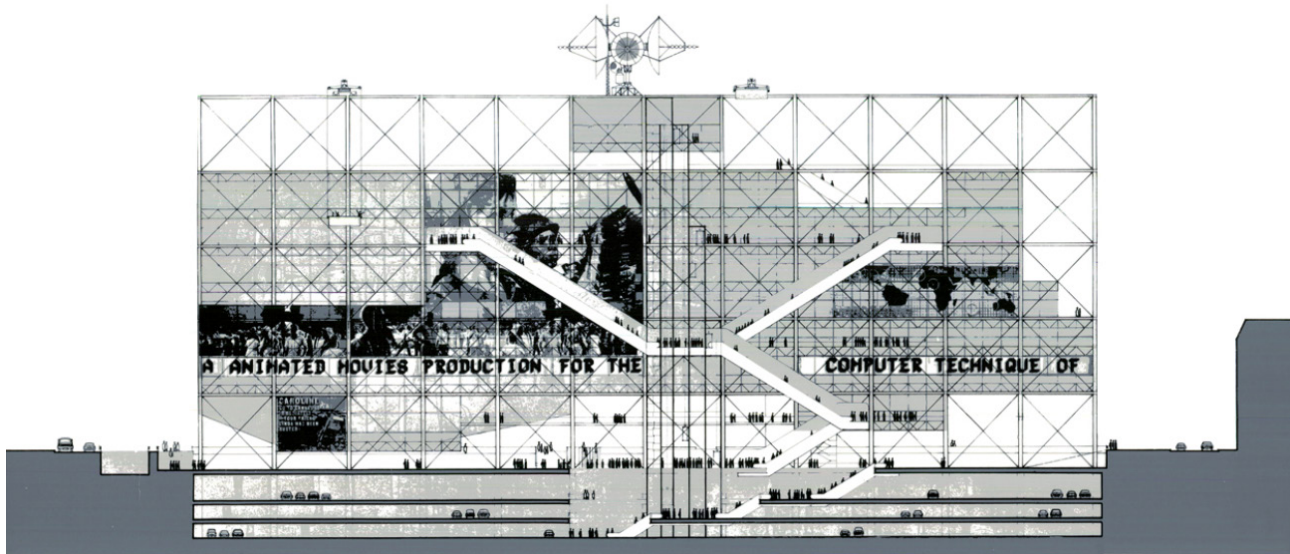
indispensabili, non a caso molte di queste architetture ancora oggi esistenti sono molto simili tra loro, proprio perchè i componenti utilizzati erano spesso i medesimi.

1.1.4 - Prefabbricazione di singoli elementi

Il centre Pompidou di Parigi, realizzato nel 1977 da Renzo Piano e Richard Rogers può forse ritenersi un primo tentativo, quanto meno il più noto di una progettazione affine al DfMA, questo per via del progetto su misura delle travi principali che sorreggono la struttura spostata interamente all'esterno in modo da lasciare molto spazio libero all'interno e di dare forza all'aspetto da "macchina urbana" voluto dai progettisti.

La struttura (10) è composta da 5 elementi principali¹⁰:

- travi trasversali costituite da 2 Gerber incernierate a una Warren
- due ordini di pilastri su cui scaricano le Gerber (12)
- due ordini di tiranti posti alle estremità delle Gerber
- Controventi
- Fondazioni



(10) Sezione del Centre Pompidou (Fonte: Corriere della sera - Living)

La tripartizione delle travi consente di individuare 3 aree funzionali, l'interno, i due percorsi laterali e la parte esterna a cui è appeso il percorso di accesso composto da una scala mobile spezzata¹¹. Un altro aspetto molto importante di questa architettura è la forte presenza di

colori, infatti tutti gli impianti non sono molto evidenti nel prospetto, ma sono anche colorati con colori sgargianti a seconda delle funzioni svolte:

- blu per i flussi d'aria
- Giallo per l'elettricità
- Verde per i circuiti idraulici

10 - Igor Malgrati - La struttura del centre pompidou

11 - centrepompidou.fr/ourbuilding

- Rosso per il flusso pedonale

Inoltre, molti di questi componenti sono anch'essi realizzati su misura come le travi, essendo le loro dimensioni molto importanti e non presenti nei normali cataloghi.

L'elemento più interessante di questa architettura sono sicuramente le travi

reticolari lunghe ben 50 metri che non sono assemblate, bensì sono dei pezzi unici, questo per garantire le prestazioni - strutturali adeguate a una struttura senza pilastri nel mezzo.

Durante le fasi progetto si ebbe difficoltà a capire come produrre delle travi di tali dimensioni; infatti nessun produttore francese era in grado di esaudire questa



(11) Trasporto delle travi reticolari per le strade di Parigi (Fonte: Corriere della sera - Living)

richiesta a causa delle complicazioni derivate dalla gestione del peso e delle dimensioni. Alla fine, l'unica azienda in grado di soddisfare le richieste fu la Krupp, un'azienda tedesca.

Una volta realizzate le travi furono trasportate inizialmente tramite imbarcazioni fin lungo la Senna e successivamente portate di notte attraverso trasporti speciali che richiedevano la chiusura di alcune strade di Parigi (11).

Da questo punto di vista, sicuramente le travi del Centre Pompidou non rispondono appieno alle logiche di una progettazione "DfMA", in quanto una delle caratteristiche principali sta proprio nel fatto di poter trasportare con facilità i componenti al cantiere e assemblarli velocemente, cosa che sicuramente non avvenne in questo caso, in quanto oltre al trasporto speciale, fu necessaria anche una gru di



(12) Trave Gerber del prospetto principale del centro (Fonte: Corriere della sera - Living)

dimensioni notevoli per sollevare le travi e posizionarle. Un'altra "mancanza" di queste travi rispetto al concetto di DfMA sta nella difficoltà che richiederebbe smontare una trave e sostituirla, un'operazione praticamente impossibile senza smantellare gran parte della struttura. Tuttavia, questo è sicuramente un esempio molto valido di come

un'industria, in questo caso la Krupp possa contribuire alla realizzazione di un componente su misura per un'architettura. Ovviamente anche tutti gli altri componenti che compongono la struttura sono prefabbricati in apposite officine; tuttavia, rispetto alle travi risultano essere elementi molto più convenzionali.

1.1.5 - La prefabbricazione supportata dalla modellazione digitale

Quando nel 1990 la città di Bilbao decise di mettere a punto un ampio piano di sviluppo per migliorarne la fruibilità sia a livello di vita che a livello di attrattività turistica, ingaggiò alcuni dei migliori architetti al mondo per la progettazione dei vari elementi della città.

In particolare, venne ingaggiato Norman Foster per la progettazione della metropolitana, Santiago Calatrava per il ponte pedonale sopra il Nervion e per la struttura della stazione dell'aeroporto, Cesar Pelli per alcuni edifici e appartamenti. Infine, il vero fulcro di questa progettazione, ovvero il museo di arte contemporanea, un piccolo faro per l'arte dei giorni nostri.

Questo museo (13) realizzato nel 1997 da Frank Gehry, grazie alla sua forma fortemente impattante e a una collezione d'arte al suo interno di notevole valore, mette di fatto Bilbao tra le mete europee più importanti.

L'edificio è caratterizzato da una notevole quantità di forme molto libere e particolari che sembrano richiamare forme di piante o pesci con una fluidità molto naturale, tutto questo è aiutato anche dalla pelle esterna che rende l'edificio molto più interessante dal punto di vista progettuale¹².

Poiché è proprio la pelle esterna ad

essere l'elemento prefabbricato innovativo, infatti la realizzazione sia delle lastre in titanio che delle vetrate, così come la pietra che ricopre alcune parti dell'edificio è stata possibile solo grazie ai più moderni sistemi di modellazione digitale.

Per capire il processo che ha portato alla realizzazione dell'edificio è necessario però comprendere come sono state create le curve, le quali si sviluppano attorno a un nucleo centrale di forma circolare da cui si dipanano le famose curve con forze centrifughe orientate in tre direzioni.

La prima fase di progetto ha comportato la realizzazione di un modello di programmazione formato da scatole colorate, le quali rappresentavano i vari spazi funzionali necessari all'edificio.

Il passo successivo è stato quello di piegare questi volumi semplici attraverso la modellazione manuale per ottenere delle forme funzionali e che rendessero gli ambienti interni molto belli da usufruire. Questo tipo di manipolazione viene detto topologico e consiste nel modificare una forma realizzata attraverso un foglio di gomma piegandola, stirandolo, ma senza strapparla o tagliarla (14).

Tramite questo processo di modellazione l'architettura riesce a liberarsi dalla rigidità della geometria euclidea e assume

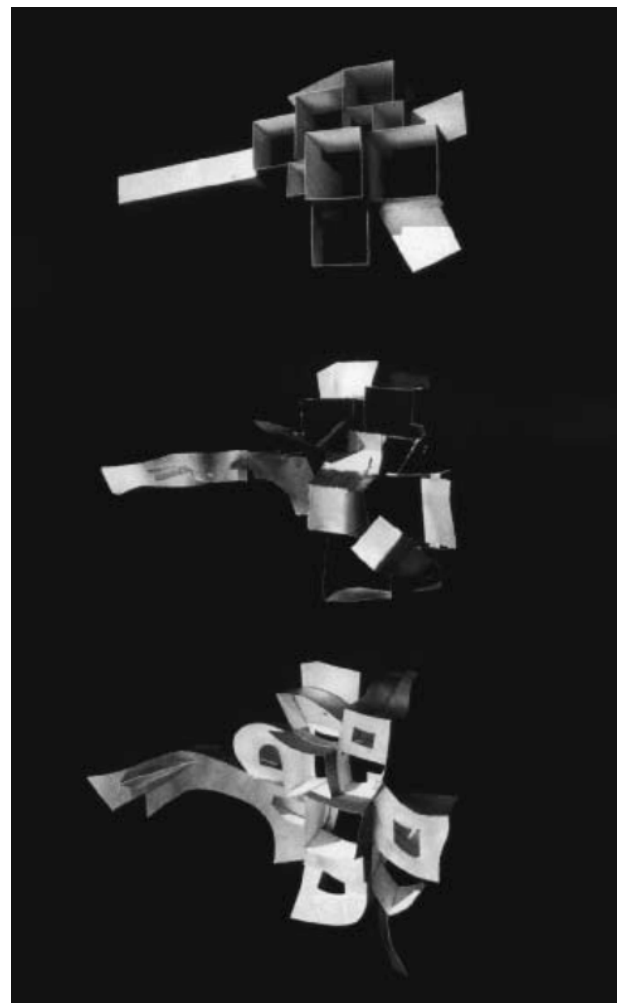
12 - Paul Schnabel, *Kunstals zware industrie*, pp.

13 - Michele Emmer, *The visual mind 2*



(13) Vista frontale Guggenheim museum (Fonte: The visual mind 2 pp. 170)

le caratteristiche di un corpo plastico¹³. Un ulteriore aspetto interessante da notare è come nonostante i singoli elementi che compongono l'edificio abbiano uno sviluppo indipendente dal resto, l'intero edificio è organizzata secondo una disposizione a fulcro centrale (15). Una volta ottenuta la forma definitiva è stato necessario informatizzarla, in modo tale da poter elaborare il suo lavoro e realizzarlo, per farlo Gehry ha utilizzato il programma francese CATIA, software studiato dall'azienda francese Dassault Systèmes. Questo programma in genere è utilizzato nell'industria aerospaziale, per questo motivo ne è stata utilizzata una versione leggermente rivisitata e pensata per l'architettura ovvero Digital project, pensata appositamente dallo studio Gehry in collaborazione con Dassault Systèmes per la realizzazione di architetture di architetture complesse. Questo programma ha permesso di correggere le curve e regolarizzarle in modo semplice e veloce, evitando problematiche di lettura delle geometrie che per l'epoca risultavano essere estremamente complesse. Da qui è possibile intuire che anche la struttura è realizzata interamente su



(14) Evoluzione del modello di studio (Fonte: The visual mind 2 pp. 167)

misura per consentire le curve presenti nel progetto, quindi quasi tutta la struttura portante può essere considerata un sistema DfMA (Design for Manufacturing and Assembly). Questa struttura è stata prodotta interpretando le curve e scomponendole attraverso un processo di decomposizione simpliciale dei sistemi lineari. I sistemi approssimativi di punti e segmenti retti corrispondono alla griglia strutturale dell'edificio di aste e giunzioni nello spazio, caratterizzata dalla sua discontinuità (16).

Essi si basano sulla geometria discreta nel senso che gli elementi di cui sono composti, distinti, numerabili e coordinati secondo la logica additiva.

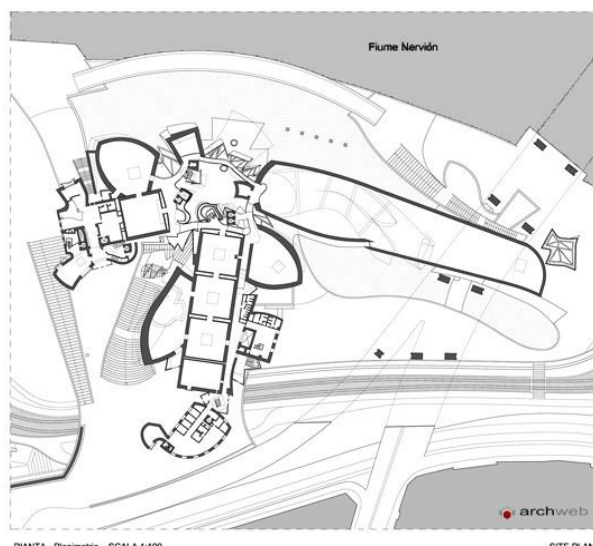
La griglia strutturale portante (17) ha anche una struttura secondaria composta da profili curvi assemblati in un modello rettangolare, su cui sono montati l'isolamento termico, l'impermeabilizzazione e il rivestimento esterno.

Il rivestimento in titanio è composto da molte piccole squame, consentendogli di seguire la curvatura delle superfici, per realizzare questa pelle in titanio ovviamente è stato necessario suddividere attraverso i software tutte le varie parti della geometria e realizzare i disegni da mandare poi ai macchinari a controllo numerico per il taglio delle lastre.

Lo stesso discorso vale anche per le ampie pareti vetrate, le quali pur sembrando curve sono in realtà composte da una struttura lineare che le racchiude.

Tra le lastre in titanio e quelle in vetro sono stati realizzati circa 20.000 componenti tra i quali si hanno circa 2000 tagli diversi tra loro.

Questo edificio proprio grazie a tutte queste caratteristiche può essere considerato uno dei primissimi esempi di DfMA supportato dalla modellazione digitale,

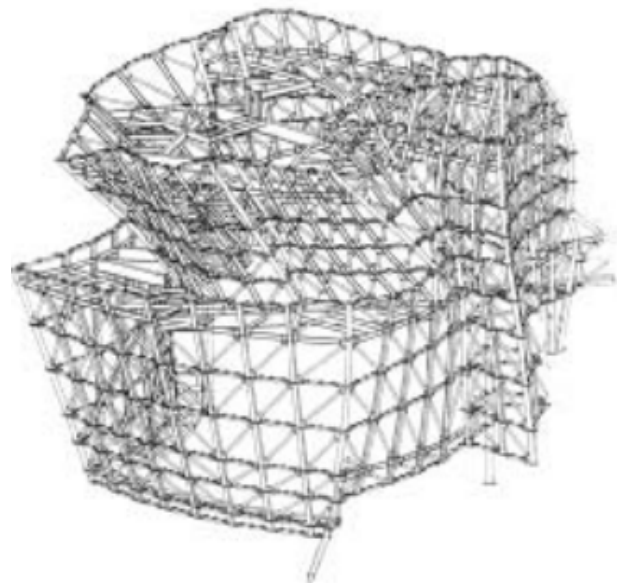


(15) Pianta museo Guggenheim Bilbao (Fonte: Pinterest)



(16) Vetrata e finitura esterna (Fonte: Kunstals zware industrie pp. 96)

senza la quale non sarebbe stato possibile realizzarlo.



(17) Struttura dell'atrio (Fonte: The visual mind 2 pp. 180)

1.1.6 - I DfMA oggi

Ad oggi i DfMA sono sempre più utilizzati all'interno delle architetture, in particolare grazie all'utilizzo di modellazione parametrica all'interno dei progetti. Un esempio di ciò è dato dal centre pompidou di metz 2010 (18), realizzato dall'architetto Shigeru Ban. Anche questo edificio così come il centro di Parigi è un centro culturale adibito principalmente a museo ed è inoltre dotato di un auditorium e un ristorante. I tre principali spazi espositivi sono composti da tubi rettangolari in calcestruzzo armato, con delle vetrate panoramiche poste alle estremità, come collegamento verticale si ha una torre in acciaio e vetro realizzata con una struttura in tubolari metallici che contiene gli ascensori e le scale e che consente durante la salita di godere della bellissima vista della copertura in legno lamellare intrecciato. La parte più interessante di questo edificio è sicuramente la copertura, realizzata in legno e intrecciata su due strati tramite processi di modellazione parametrica additiva. Questi elementi in legno sono stati realizzati in legno lamellare in una fabbrica tedesca, successivamente sono stati trasportati e assemblati sul luogo (19).

Le assi sono sovrapposte in tre direzioni ed è quindi possibile aumentare la resistenza aggiungendo uno strato di assi con blocchi realizzata con una struttura in tubolari metallici che contiene gli ascensori e le scale e che consente durante la salita di godere della bellissima vista della copertura in legno lamellare intrecciato.

Ogni singolo asse è stato curvato con una curvatura specifica e successivamente fresato tramite una CNC allo scopo di introdurre una torsione secondaria. Sarebbe stato possibile stratificare gli assi di legno in due direzioni ma per semplificare il processo di produzione è stato preferito l'approccio esposto precedentemente.

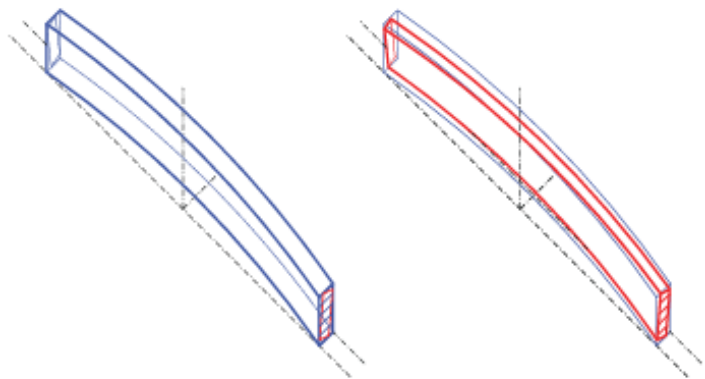
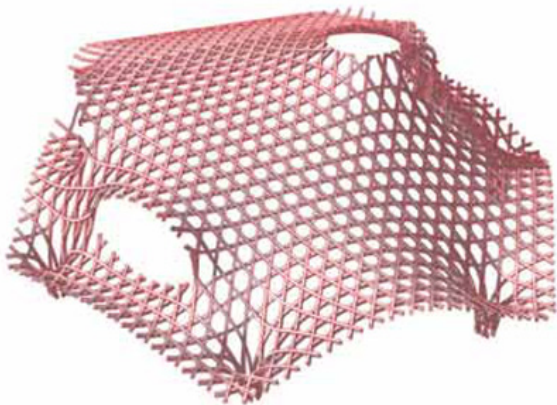
Altri elementi prefabbricati appositamente per questa architettura sono sicuramente le travi di colmo in legno lamellare, che seguono il profilo ondulato della copertura¹⁴.

Le colonne a traliccio (20) in cui si conclude la copertura forniscono un'eccellente rigidità strutturale e resistenza al vento, verificata attraverso dei test in una galleria del vento. Infine, lo strato finale che ricopre la

struttura in legno è realizzata in PTFE, ovvero una membrana impermeabile realizzata in materiale plastico polimerico anch'essa è stata realizzata attraverso software di taglio che consentono di imitare perfettamente la forma del legno, successivamente è applicata su elementi in acciaio a forma di T che consentono di mantenerla a 30 cm dalla struttura in legno consentendo così il passaggio dell'aria.



(18) Centre Pompidou Metz (Fonte: Structural Engineering for Architects pp. 196)



(19) Griglia copertura in legno e dettaglio torsione travi (Fonte: Structural Engineering for Architects pp. 196)

A differenza del centre Pompidou di Parigi in questo caso i principi di DfMA sono completamente rispettati; infatti, tutti gli elementi che compongono la copertura sono facilmente sostituibili e inoltre il trasporto non ha comportato particolari problematiche, grazie alla possibilità di scomporre in varie parti le travi.



(20) Dettaglio pilastro copertura (Fonte: Structural Engineering for Architects pp. 197)

1.1.7 - Principi DfMA

La progettazione per la produzione e l'assemblaggio (DFMA) consiste in principi e approcci impiegati nell'ingegneria e nella progettazione di prodotti per razionalizzare i processi di fabbricazione e di assemblaggio di un prodotto. L'obiettivo è ridurre le spese, migliorare la qualità e abbreviare i tempi di produzione tenendo conto delle esigenze di fabbricazione e assemblaggio fin dalle prime fasi del processo di progettazione.

Il termine DfMA è stato coniato dagli ingegneri americani Geoffrey Boothroyd e Peter Dewhurst negli anni '80 consiste di due concetti fondamentali:

Design for Manufacturing (DFM): sottolinea la creazione di prodotti che sono semplici ed economici da produrre. DFM supporta i progettisti in:

- Ridurre al minimo i passaggi e i costi di assemblaggio riducendo la quantità dei componenti.
- Standardizzare in modo uniforme i componenti e utilizzare parti condivise tra prodotti, il che può ridurre le spese di inventario.
- Scegliere materiali semplici da maneggiare e adatti al metodo di produzione.
- Creare progetti su misura per la lavorabilità concentrandosi su processi particolari come stampaggio, fusione o lavorazione.
- Ridurre le tolleranze strette per abbreviare i tempi di produzione e mantenere una qualità costante.

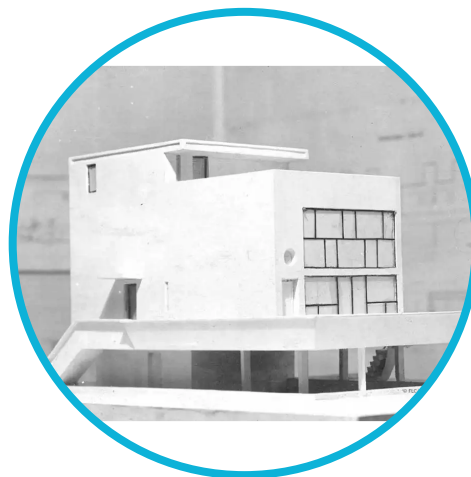
Design for Assembly (DFA): si concentra sullo sviluppo di prodotti che possono essere assemblati facilmente, sia manualmente o tramite automazione. principi DFA promuovono:

- Ridurre il numero di parti per ridurre i tempi e gli sforzi necessari per assemblare il prodotto.
- Creazione di componenti che siano auto-allineanti e semplici da gestire, spesso incorporando elementi come smussi o lead-in.
- Impedisce il riposizionamento dei componenti durante l'assemblaggio, risparmiando tempo e riducendo al minimo gli errori.
- Utilizzando elementi di fissaggio in modo minimo o incorporando disegni snap-fit, che riducono sia la durata del montaggio e le spese.

L'integrazione di DFM e DFA in DFMA garantisce che i prodotti siano creati non solo per prestazioni di punta, ma anche per una produzione e un assemblaggio efficaci. Applicando questi principi, le imprese possono ottenere una riduzione delle spese, tempi di produzione più rapidi e una migliore qualità dei prodotti. In particolare, questa metodologia è stata ampiamente impiegata in aziende che si occupano di produzione di automobili, come ad esempio l'italiana Pininfarina, che negli ultimi anni sta cercando di trasportare questa abilità dalla produzione di automobili alla realizzazione di architetture.



1700 - Prefabbricazione con elementi in legno, edificio che rappresenta questa fase: Portable cottage di Joe Manning



1920 - Prefabbricazione con calcestruzzo armato, edificio che rappresenta questa fase: Maison Citrohan

1780

1700

1920



1780 - Prefabbricazione con elementi in ghisa, edificio che rappresenta questa fase: The iron bridge

Linea del tempo riassuntiva

1980

1980 - Prefabbricazione con prefabbricazione di elementi di dettaglio, edificio che rappresenta questa fase: Centre Pompidou



1990 - Prefabbricazione assistita da modelli digitali, edificio che rappresenta questa fase: Guggenheim museum Bilbao



2020

2020 - Prefabbricazione con approccio DfMA, edificio che rappresenta questa fase: Centre Pompidou Metz



1990

1.2 - DfMA

1.2.1 - Linee guida alla metodologia DfMA

Il Design for manufacturing and assembly è in realtà la combinazione di due termini, design for manufacture (DfM) (21) e Design for assembly (DfA), questo approccio all'interno dell'industria artigianale esiste da decenni e consiste nel progettare i prodotti in modo che siano semplici da trasportare ed assemblare una volta giunti a destinazione (22).

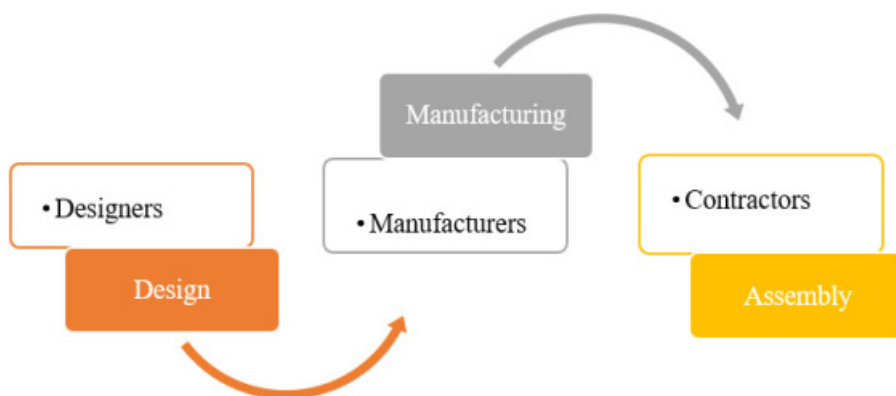
La Royal institute of British Architects (RIBA) ha avviato i primi studi sull'applicazione dei DfMA al mondo delle costruzioni circa dieci anni fa e nel 2013 dopo averne riconosciuto la validità aggiunse una sovrapposizione dedicata ai DfMA al suo piano di lavoro. Successivamente nel 2020 la RIBA pubblicò una versione aggiornata del piano di lavoro in cui inseriva delle linee

guida basate sui DfMA per portare a termine i progetti, definendo anche un grado di livelli di realizzazione fuori sito:

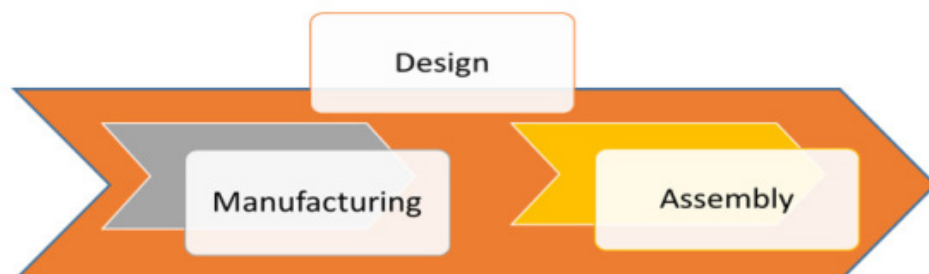
- produzione di componenti
- sub-assemblaggio
- pre-assemblaggio non volumetrico
- pre-assemblaggio volumetrico
- edificio modulare realizzata con una struttura in tubolari metallici che contiene gli ascensori e le scale e che consente durante la salita di godere della bellissima vista della copertura in legno lamellare intrecciato.

Il DfMA orientato alla costruzione richiede ovviamente dei criteri precisi, ovvero la razionalizzazione della tecnologia, l'integrazione del prodotto e del processo, l'ottimizzazione della logistica e le

(21) Classico processo di prefabbricazione anche detto "over the wall"
(Fonte: DfMA for a Better Industrialised Building System pp. 3)



(22) Principio DfMA in cui il design accompagna la realizzazione e l'assemblaggio.
(Fonte: DfMA for a Better Industrialised Building System pp. 3)



15 - DfMA for a Better Industrialised Building System - pp. 3-4

16 - Developing a Construction-Oriented DfMA Deployment Framework - pp. 2-3

17 - Developing a Construction-Oriented DfMA Deployment Framework - pp. 5-6

specifiche dei materiali¹⁵. Ad oggi, tuttavia, si ha una scarsa organizzazione tra produttori e progettisti per quanto riguarda i DfMA, in quanto non vi è una corretta procedura che coinvolga tutti gli stakeholder, questa deriverebbe da tre aspetti fondamentali: struttura organizzativa, linee guida contrattuali e sistemi operativi e processi operativi standardizzati.

Un esempio sono gli study sull'integrated project delivery (IPD), il quale si propone di coinvolgere precocemente gli appaltatori per collaborare con i progettisti, migliorando l'integrazione organizzativa¹⁶.

Un DfMA secondo uno studio svolto nell'articolo **"Design for manufacture and assembly in construction: A review. Build."**

nel dominio della costruzione il DfMA deve comprendere tre prospettive:

- un processo olistico con un insieme di principi di progettazione

- un sistema di valutazione per l'efficienza di produzione e assemblaggio

- una filosofia per migliorare i processi di prefabbricazione e costruzione modulare.

Tuttavia, un'altra ricerca del 2023 **"Design for Manufacture and Assembly of Digital Fabrication and Additive Manufacturing in Construction"**

ha dimostrato quali sarebbero sia i vantaggi di questo approccio, ovvero riduzione di tempo, costi, inquinamento di produzione, maggiore qualità e affidabilità aumentata. Ma anche degli svantaggi dovuti principalmente a una mancanza di persone in grado di interagire tra le due discipline, ovvero quella dell'artigianato e quella dell'architettura, oltre a questo ci sono anche i limiti di standardizzazione del design, strategie contrattuali non adeguate, mancanza di formazione, mancanza di un coinvolgimento precoce dei fornitori.

1.2.1.1 - Sfide legate all'applicazione di DfMA

Nell'articolo scientifico preso in esame: **"Developing a Construction-Oriented DfMA Deployment Framework"** i ricercatori hanno provato a creare un elenco di ostacoli all'utilizzo dei DfMA, ricercando articoli su molte piattaforme come Scopus, Google scholar e web of science.

Dopo aver filtrato circa 232 articoli in base a dei criteri di inclusione o esclusione, ne sono stati ritenuti validi 52 e questi ha fornito i dati per la creazione di questo elenco¹⁷.

Il risultato prodotto da questo studio è portato alla realizzazione di un elenco di sfide da affrontare nei prossimi anni per poter implementare al meglio un processo ben delineato.

La prima sfida risulta sicuramente essere la formazione dei nuovi designer, che dovranno essere in grado di gestire il processo di produzione per elementi riferiti al campo architettonico.

La seconda sfida riguarda la mancanza di ambienti collaborativi, infatti il mancato coinvolgimento degli stakeholder del

progetto durante la fase di progettazione rende complesso l'inserimento della procedura DfMA. Rende complesso l'inserimento della procedura DfMA. La terza sfida riguarda la mancanza di quadri legislativi, codici, linee guida e standard specifici, questo porta a una carenza di metriche di progettazione sistematiche e inibisce lo sviluppo delle migliori pratiche DfMA. Alcune ricerche hanno evidenziato un'ulteriore problematica ovvero i costi di produzione più elevati rispetto alle tecniche tradizionali di produzione; tuttavia, questo potrebbe essere dovuto alle esigenze iniziali di adattamento dei sistemi produttivi e della richiesta di manodopera inferiore a livello numerico ma con un'elevata specializzazione. Inoltre, anche i prototipi richiesti inizialmente possono aver influenzato questo dato.

Alla fine della ricerca sono state identificate 45 sfide che a loro volta sono suddivise in 8 categorie: contrattuali, tecnologiche, procedurali, culturali,

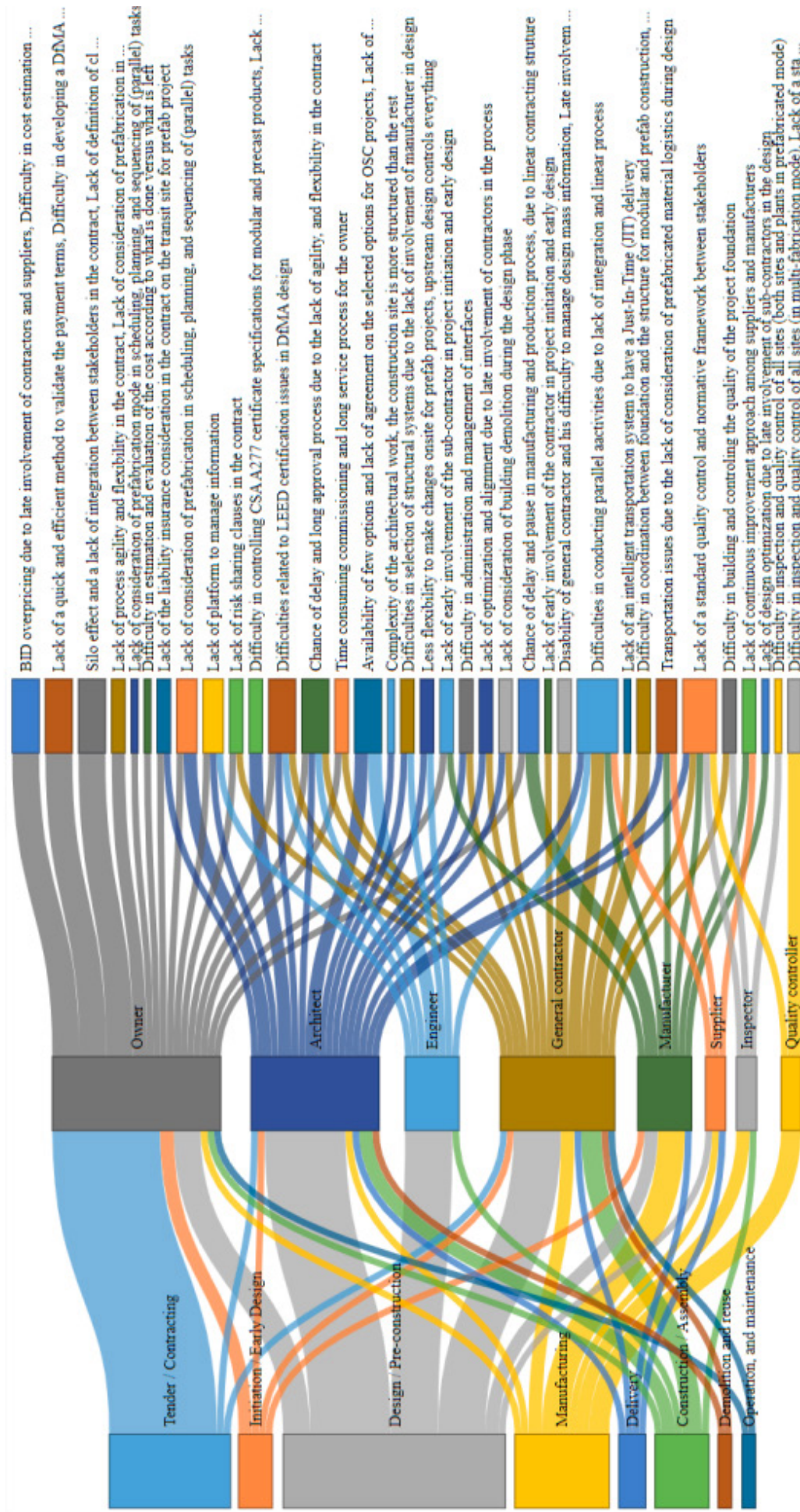
Categories	Code	Challenges (<i>Italics Represent Additional Challenges Identified by the FGDs</i>)	Reference
Legal	L1	<i>Lack of prefab and IC consideration in tenders</i>	FGD#1
Contractual	L2	<i>BID overpricing and difficulty in cost estimation</i>	FGD#1
	L3	Lack of risk/reward sharing consideration in the contract	[6]
	L4	Lack of clarity in terms of guarantees and insurance	[5]
	L5	Lack of DfMA platforms which conform with the CCDC contracts	[16]
	L6	Lack of clear scope of work, confusions, and duplications	[36]
	L7	Lack of references to several manufacturers in the contract	[11]
	L8	Lack of vertical, and horizontal integration between stakeholders	[35]
	L9	<i>Lack of longitudinal integration, teams disband at project termination</i>	FGD#1
	L10	Lack of clear roles and responsibilities of stakeholders	[39]
	L11	Complex litigation and long negotiations between key stakeholders	[4]
	L12	<i>Lack of agility and flexibility in the contract</i>	FGD#1
Technological	T1	Management of interfaces with subsystems	[15]
	T2	Difficulty in identifying appropriate DfMA tools/techniques in each phase	[4]
	T3	Lack of coordination between phases and contractors	[44]
	T4	<i>Lack of capabilities to manage the module configuration process</i>	FGD#1
	T5	Lack of coordination and collaboration between stakeholders	[22]
Procedural	P1	Need to evaluate performance at every design stage	[43]
	P2	<i>Lack of innovation as product architecture is locked</i>	FGD#1
	P3	Management of assembly works and interface tolerances	[8]
	P4	Need for additional project planning and design efforts	[36]
	P5	Necessity of first-run prototypes	[35]
	P6	Management of customer expectation in design	[40]
Cultural	Cu1	Customer rejection due to poor image of industrialized construction	[35]
	Cu2	Early commitment requirements and communication among stakeholders	[1]
	Cu3	<i>High criticality of the know-how that must be shared with other stakeholders</i>	FGD#1
	Cu4	Conflicting cultures between engineering and design teams	[22]
	Cu5	<i>Lack of trust and collaboration between buyers and their suppliers</i>	FGD#1
Commercial	Co1	Few market options available	[18]
	Co2	Lack of competition among prefabricated and modular solutions	[22]
	Co3	<i>Increased organizational complexities and investment requirements</i>	FGD#1
Geographical	G1	Requires both trade and location-based division of procurement	[15]
	G2	Complex code compliance and inspection process	[21]
	G3	<i>Few local options available</i>	FGD#1
	G4	<i>Logistics and transportation management complexities</i>	FGD#1
	G5	Scarce availability of resources for component development	[29]
Economic	F1	Higher capital costs and investment requirement	[23]
Financial	F2	<i>Difficulty in financial management and lack of an efficient payment method</i>	FGD#1
	F3	Higher design costs than the traditional design methods	[30]
Technical	Tc1	<i>Specialized labour requirements</i>	FGD#1
Cognitive	Tc2	Definition of standard details and connections	[43]
	Tc3	Limited DfMA knowledge and experiences	[39]
	Tc4	Reduced performance in the first few installations due to learning curve	[5]
	Tc5	Inability to exercise early design freeze	[15]
	Tc6	Lack of awareness of DfMA benefits among owners/developers	[36]

[23] Sfide necessarie per implementare i DfMA (fonte: Developing a Construction-Oriented DfMA Deployment Framework pp. 7-8)

commerciali, geografiche, finanziarie e tecniche cognitive. Le sfide sono riportate per intero nella tabella che segue. Come risulta evidente da questa lista, la maggior parte delle sfide si presenta nelle fasi di progettazione, produzione e contrattazione¹⁸. Di fatto i proprietari, gli

architetti e i general contractor sono gli stakeholder più presenti negli studi sui DfMA, questo perchè a loro spettano sicuramente la maggior parte delle decisioni che portano poi al superamento o meno degli obiettivi necessari.

18 - Developing a Construction-Oriented DfMA Deployment Framework - pp. 7-9



(24) Relazione tra le sfide, gli stakeholder e le fasi di progetto (fonte: Developing a Construction-Oriented DfMA Deployment Framework pp. 8)

1.2.2 - Framework

Il DfMA in realtà racchiude in se diverse strategie di design elaborate nel corso degli anni come, ad esempio, design for excellence (DfX), design for reliability (DfR), design for additive manufacturing (DfAM) e design for disassembly (DfD). Ovviamente grazie a tutte queste considerazioni da fare per il progetto di un DfMA è abbastanza evidente che ogni progetto sarà in grado di prevenire errori, incrementando la capacità produttiva. La maggior parte dei progettisti per svolgere un lavoro di questo tipo si affida ad un processo a doppio diamante, ovvero un processo che crea più opzioni all'inizio del lavoro e va a restringersi in seguito scartando le ipotesi ritenute meno valide, utilizzato spesso anche nei normali processi di progettazione ma in questo caso non è ancora ben chiaro nel dettaglio come questo processo venga utilizzato a sostegno della progettazione¹⁹.

Proprio per questo motivo nell'articolo scientifico "Design for manufacture and assembly (DfMA) in architectural design meetings: from a case study to knowledge-to-action framework" si è cercato di ricostruire la strategia di processo che potesse essere più efficace possibile.

Per fare questo la ricerca ha analizzato alcuni casi studio recenti e ha prodotto un possibile workflow per la progettazione di DfMA.

Il flusso di lavoro rimane comunque quello a diamante multiplo, la cui differenza da quello a diamante è semplicemente la ripetizione multipla di questo processo in più fasi di progetto, in cui vengono svolte molte attività come visita al cantiere,

schizzi, modellazione, discussione, ricerca, negoziazione e determinazione per arrivare al progetto finale.

In questa fase per gli architetti è molto importante dialogare con le altre figure professionali come gli artigiani, in modo da risolvere insieme tutte le problematiche; infatti, una delle cose più intelligenti da fare in questi casi è essere aperti di mente e accogliere le idee diverse dalle proprie in modo da evolvere il proprio modo di elaborare il progetto²⁰. Tuttavia, per gli architetti non è possibile realizzare un edificio sfruttando i DfMA senza l'aiuto di specialisti di vari settori, come ad esempio la procedura di produzione e connessione dei montanti. Anche i corrieri sono importanti per stabilire il processo di trasporto e capire se le dimensioni, la forma e il peso dei componenti prodotti sono idonei al trasporto in cantiere.

Nella realtà, includere ogni idea in una singola proposta di progettazione è difficilmente possibile. L'approccio deve essere pesato e bilanciato con altri criteri del progetto, come le richieste del cliente, le condizioni del sito, l'armonia con la comunità circostante e il budget. Questa decisione multicriterio è sempre una compensazione. Significa che il team decide di migliorare alcune caratteristiche compromettendo o riducendo altri aspetti.

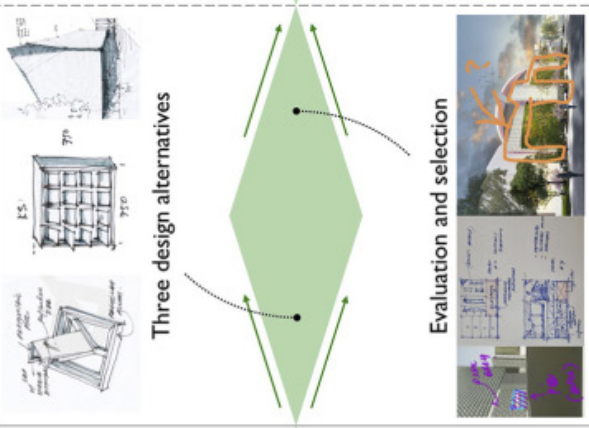
19 - Design for manufacture and assembly (DfMA) in architectural design meetings: from a case study to knowledge-to-action framework - pp. 4-8

20 - Design for manufacture and assembly (DfMA) in architectural design meetings: from a case study to knowledge-to-action framework - pp. 10-12

21 - Design and application of a DFMA-based modular library of precast concrete components for assembled buildings - pp. 5-7

22 - Design and application of a DFMA-based modular library of precast concrete components for assembled buildings - pp. 10-15

Architectural concept design development in the case study

Design Stages	1. Preparation and brief	2. Concept design	3. Spatial coordination	4. Technical design
Tasks (RIBA, 2020)	After receiving the brief, these requirements are considered in more detail to develop the project information.	An architectural design concept is developed from the project information, and aligned with spatial needs.	The architectural and engineering information is developed and spatially coordinated.	All building information for manufacturing and assembly is finalized and documented.
Case study	Step 1: Introduction Step 2: Research on the project information  The project data, information, and knowledge expansion	Step 3: Preliminary and schematic design Step 4: Design development Step 5: Finalization and documentation  Three design alternatives The building concept and information development The building concept and information finalization 		
The amount of knowledge during the DfMA implementation	The critical project criteria identification and prioritization 			

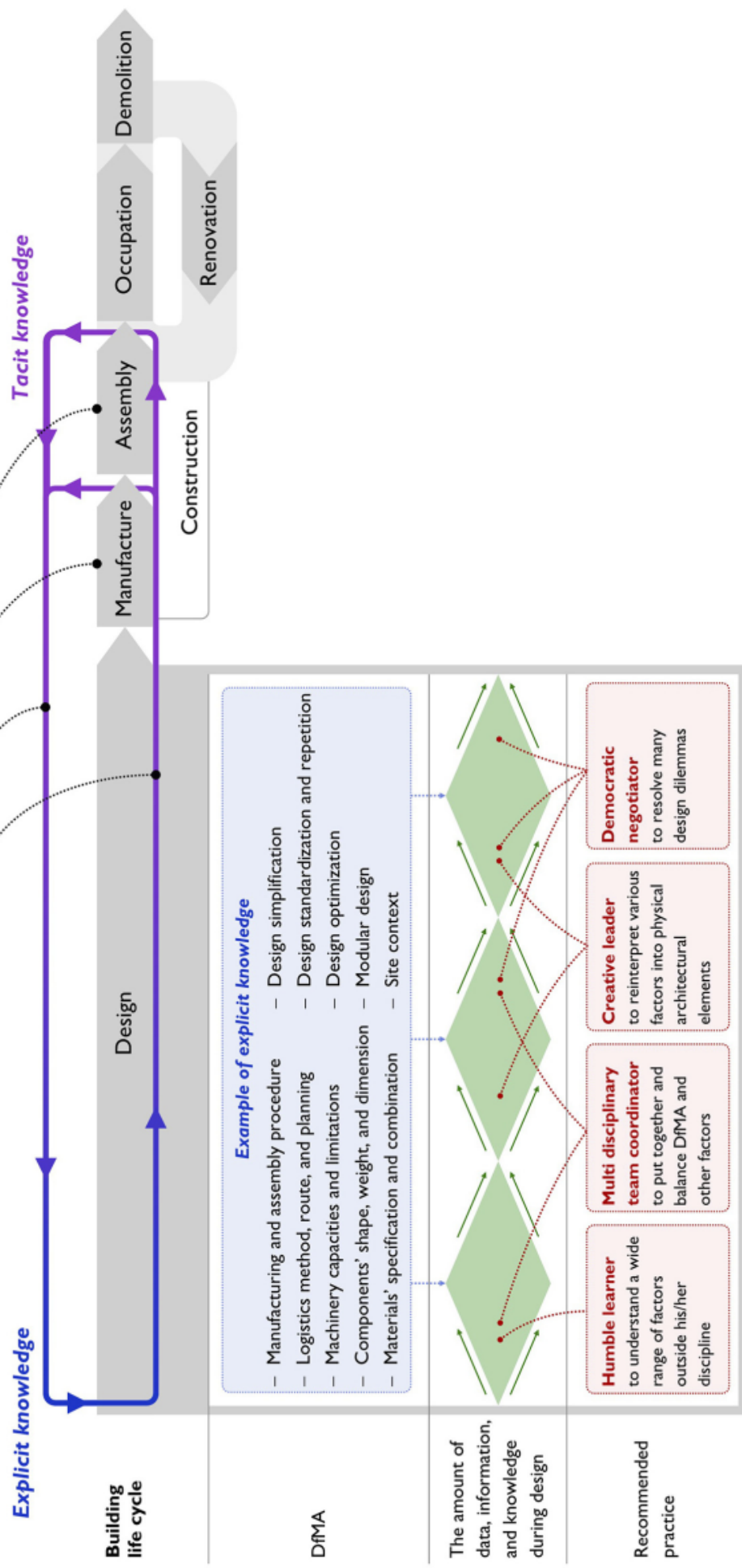
(25) Processo di sviluppo del progetto architettonico [Fonte: Architectural concept development process in the case study pp. 1127]

DfMA knowledge-to-action cycle

1. Knowledge origin

2. Knowledge conversion and transfer

3. Knowledge implementation



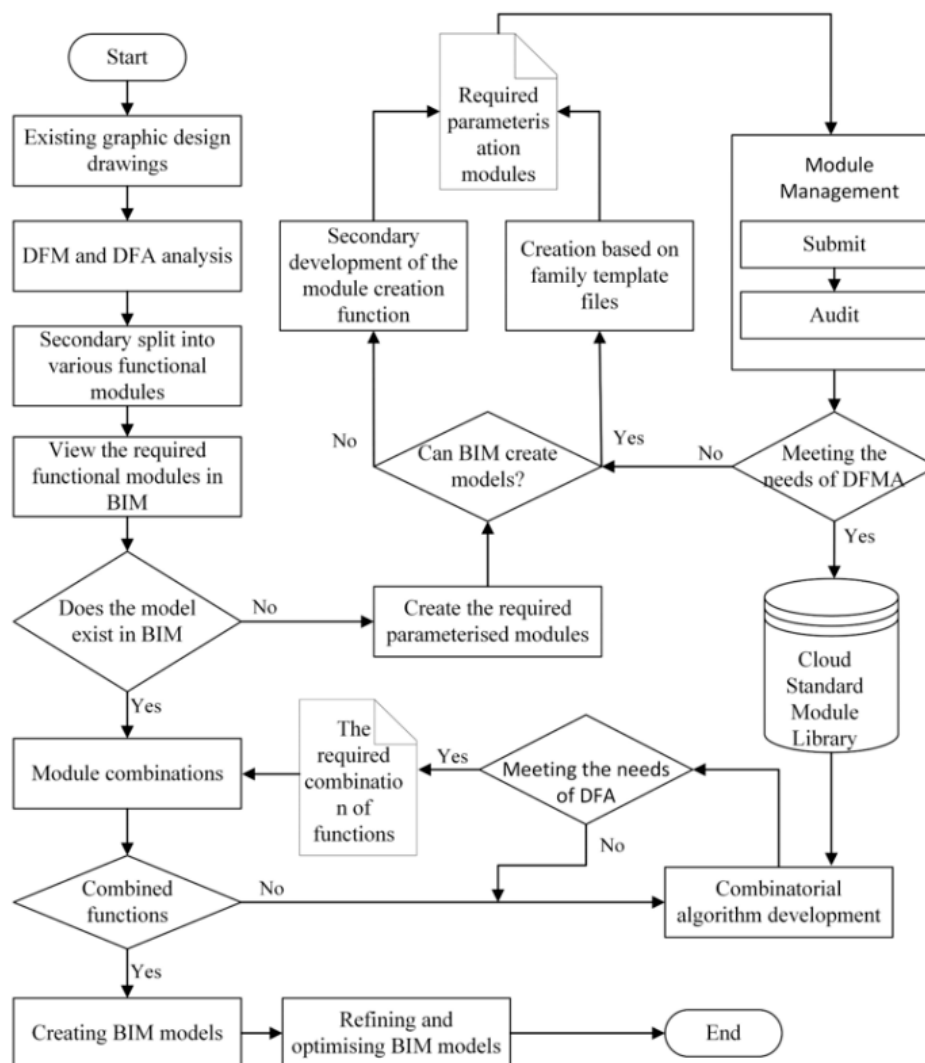
[26] Framework knowledge to action per architetti [Fonte: Architectural concept development process in the case study pp. 1128]

1.2.1.1 - Caratteristiche costruttive orientate ai DfMA

La standardizzazione dei componenti consente di velocizzare la produzione e di evitare difetti, rendendo più semplice l'elaborazione dei componenti e abbassando i costi. Tuttavia, ogni componente richiede una progettazione, una realizzazione di prova prima di essere messo in funzione, di conseguenza più pezzi diversi tra loro si hanno più sarà difficile e costoso realizzare i componenti²¹.

Esistono due approcci principali per la standardizzazione dei componenti per edifici assemblati, il primo consiste nell'adattare gli stampi o le dime utilizzate in modo che siano flessibili in caso di misure differenti.

Il secondo consiste nella standardizzazione dei componenti. Da questa esigenza di avere pezzi standardizzati ma adattabili nasce l'idea di avere delle librerie di moduli standard adattabili a seconda delle esigenze di progetto. Questo aiuta ad avere un collegamento e una condivisione di informazioni tra i vari processi di produzione, produzione e assemblaggio. Il sistema di creazione di una di queste librerie è alquanto complesso ma è stato semplificato dall'applicazione del concetto di modellazione parametrica fornito dal BIM, questi supportati anche da big data, servizi cloud e internet, rendono queste librerie estremamente efficienti²².



[27] Processo di creazione di una libreria di moduli orientata ai DfMA (Fonte: Design and application of a DfMA-based modular library of precast concrete components for assembled buildings pp. 22)

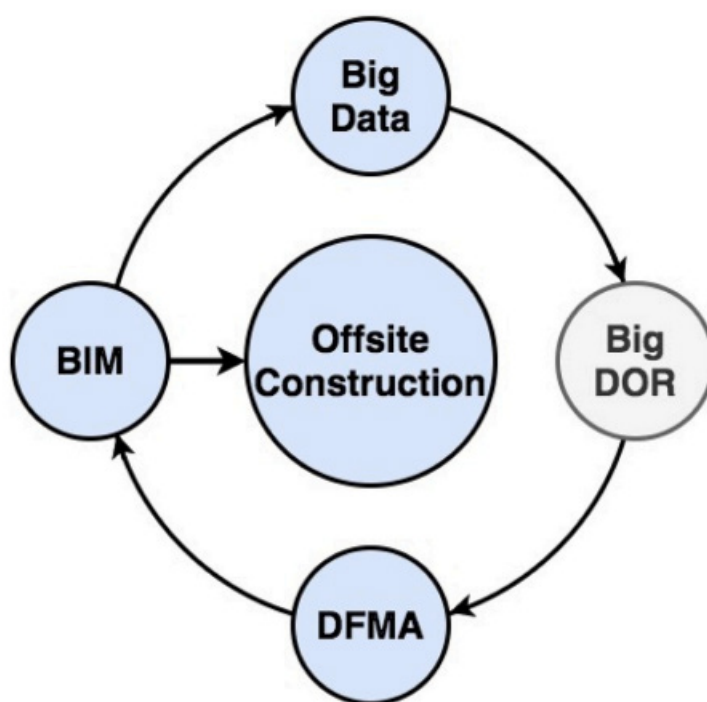
Una volta che i moduli corrispondono a tutte le caratteristiche richieste dal progetto vengono salvati in una libreria online in modo che siano accessibili sia dai progettisti che da coloro che dovranno realizzare i componenti. Una volta che questi moduli sono salvati in questa libreria è possibile attraverso un algoritmo di combinazione corrispondente per reclutare i moduli divisi in seconda

battuta nella libreria di moduli e combinarli in componenti completi. I componenti riorganizzati vengono verificati per la conformità ai requisiti della DFA e l'algoritmo di combinazione viene aggiornato se non soddisfa i requisiti. A questo punto la successiva produzione di disegni di progetto ed elenchi di materiali può essere effettuata.

1.2.3 - BIM e DfMA

L'integrazione tra BIM e DfMA può diventare molto importante per risolvere le problematiche che rendono difficilmente realizzabili i DfMA, infatti la possibilità offerta dai DfMA di realizzare componenti su misura può sopperire alla mancanza del BIM di dati adeguati durante le considerazioni di progettazione. Il BIM consente di simulare tutta la

fase di cantiere su pc e di conseguenza è sicuramente efficace, inoltre, nel corso degli anni ha dimostrato di poter notevolmente migliorare i processi fuori cantiere rendendo più veloci le consegne, migliorando la qualità del prodotto e gestendo meglio il ciclo di vita e il team di lavoro²³.



[28] Aspetti della costruzione offsite in relazione ai big-DOR (Fonte: Big data for Design Options Repository: Towards a DFMA approach for offsite construction pp. 2)

23 - Big data for Design Options Repository: Towards a DFMA approach for offsite construction - pp. 2-3

24 - Big data for Design Options Repository: Towards a DFMA approach for offsite construction - pp. 4-5

L'implementazione del DfMA ai BIM rende possibile migliorare l'economia di scala e amplia le possibilità di produzione in maniera significativa, consentendo anche la fornitura **just in time** dei componenti, la minimizzazione di sprechi e ambienti di lavoro più puliti e sicuri.

Per ottenere questo è necessario un framework di big data per fornire le informazioni necessarie per consentire una valutazione basata su DfMA. Il sistema Big-DOR, ovvero sfruttare componenti prefabbricati complessi, progettati in BIM e realizzati secondo i principi di DFMA, con l'obiettivo di ridurre i tempi di costruzione, migliorare l'efficienza e assicurare una maggiore precisione nella realizzazione dell'opera. Attenuerà le barriere dei costi di capitale elevati, della mancanza di certezza dei costi e dei tempi di consegna, consentendo un flusso illimitato di dati tra fornitori e progettisti. Il sistema sarà anche il collegamento mancante tra big data e DfMA e fornirà l'accesso alle informazioni necessarie per supportare il DfMA, basandosi su un framework di big data che acquisisce, elabora, analizza e applica dati dai database esistenti e disgiunti dei fornitori di prefabbricati per fornire le informazioni necessarie per valutare le opzioni di progettazione. I dati acquisiti dai sistemi Big-DOR corrispondono alla definizione di big data in termini di volume, velocità, varietà e veridicità. Pertanto, un approccio di ingegneria dei big data consentirà l'accesso a database distribuiti esistenti. L'integrazione del BIM rivoluzionerà ulteriormente il processo di progettazione per le costruzioni nelle aree di generazione automatica di dettagliati disegni di lavoro per componenti prefabbricati da modelli 3D, rispetto all'approccio tradizionale di disegnare sezioni e viste da piani 2D. La sfida odierna è abilitare l'integrazione del BIM per la coordinazione delle attività della catena di approvvigionamento al fine di integrare la decisione dei fornitori e

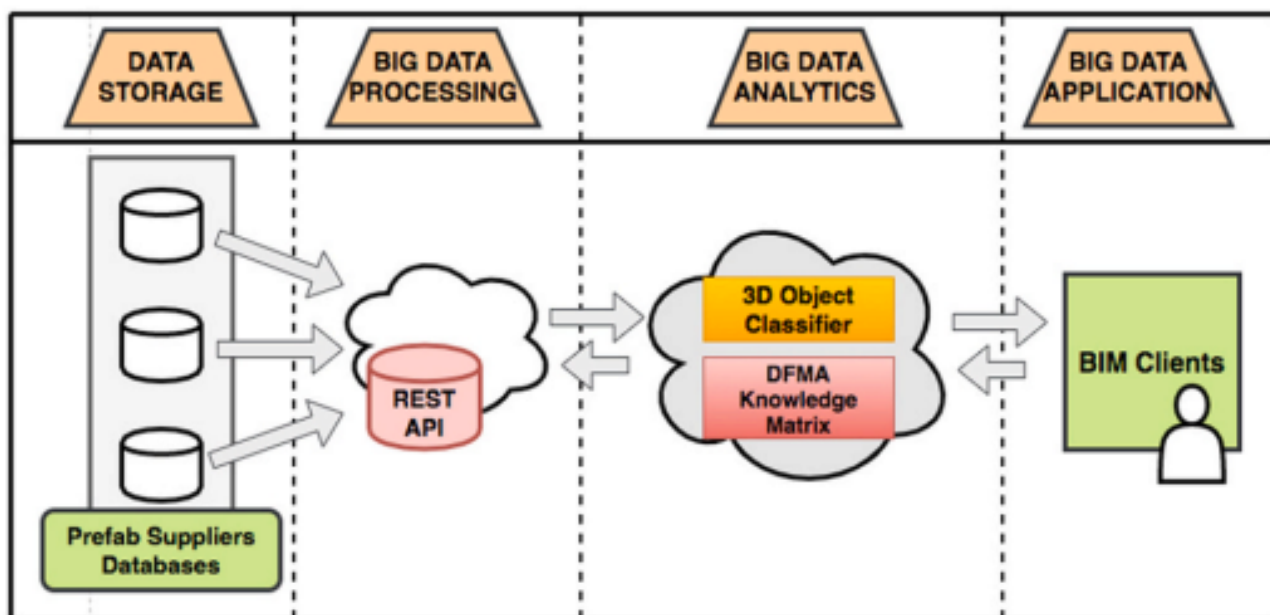
identificare le interdipendenze esistenti per minimizzare il costo totale della gestione dei materiali²⁴.

L'adozione del DfMA nella costruzione porterà all'obiettivo desiderato di processi di costruzione standardizzati, un aumento dell'uso di componenti prefabbricati e, in ultima analisi, all'adozione della costruzione fuori cantiere.

Il BIM rappresenta una vera opportunità nell'industria AECO per abilitare una pianificazione efficiente della costruzione attraverso la modellazione parametrica e la condivisione delle informazioni.

Pianificatori ed estimatori di quantità nella costruzione hanno adottato anche il BIM 4D e 5D rispettivamente per la pianificazione delle attività di costruzione e la stima dei costi del progetto. Alcuni studi hanno integrato i principi del DfMA con il BIM a causa della capacità del BIM di modellare parametricamente oggetti e di integrare informazioni di progettazione. hanno identificato alcuni driver dell'uso del BIM per l'integrazione di principi che migliorano l'efficienza della costruzione. Questi driver includono: esistenza di software di autorevolezza e gestione BIM (ad es. Revit, ArchiCAD, Navisworks, AutodeskQTO, ConstructSim, Bentley, EnergyPlus); dati esistenti nelle librerie di componenti BIM (ad es. BIMObject, SmartBIM, NBS Library e Object depository) e robusti standard di interoperabilità (ad es. interoperabilità sintattica, tecnica, semantica e organizzativa). Nonostante l'esistenza di questi driver, l'implementazione del BIM è ancora limitata principalmente alla modellazione parametrica, mentre l'integrazione del DfMA è ancora al di sotto della media a causa della mancanza di dati adeguati e di un uso inefficiente del big data.

Un altro aspetto del requisito di big data basato su BIM per DfMA sono le considerazioni strutturali, dove fattori come il peso dei materiali, la resistenza strutturale, i requisiti di sollevamento e la necessità di supporti temporanei saranno



(29) Architettura per sistemi big-DOR (Fonte: Big data for Design Options Repository: Towards a DFMA approach for offsite construction pp. 5)

considerati nella fase di progettazione. L'architettura concettuale di un sistema Big-DOR per l'integrazione di big data nella costruzione fuori cantiere utilizzando DfMA basato su BIM.

Il sistema faciliterà l'uso di big data per ottimizzare il DfMA utilizzando fattori essenziali come costo, produttività e vincoli. Il sistema Big-DOR include quattro componenti principali all'interno di un'architettura di big data a quattro livelli:

Livello di archiviazione di Big Data: Questo livello include due fonti di big data, tra cui fornitori di costruzioni fuori cantiere e utenti BIM;

Livello di elaborazione di Big Data: Questo livello ospita il repository di opzioni DfMA, che utilizza uno schema di mediazione di big data per coordinare l'integrazione del database peer-to-peer;

Livello di analisi di Big Data: Questo livello conterrà il classificatore di oggetti 3D

basato su opzioni DfMA, che utilizza caratteristiche e relazioni DfMA per classificare gli oggetti 3D BIM in varie opzioni di

progettazione e supportare la presa di decisioni ottimali;

Livello di applicazione di Big Data: Questo livello integra l'interfaccia utente con uno strumento di authoring BIM per consentire la valutazione dei modelli di progettazione BIM.

In pratica l'integrazione tra BIM e DfMA seppur ancora in fase di sviluppo porterà entro breve tempo alla possibilità di creare famiglie di componenti personalizzati e realizzabili da artigiani piuttosto che industrie, inseribili direttamente all'interno del progetto BIM, rendendolo accessibile a tutti i fruitori del processo attraverso l'utilizzo dei Big Data. Questo aspetto sarà fondamentale anche per integrare all'interno del modello degli elementi realizzati tramite modellazione algoritmica, attraverso tecniche innovative che verranno trattate nel capitolo successivo.

1.3 - Intervista a Federico Borello (CEO Encode)

Federico Borello, dopo la laurea in architettura presso il Politecnico di Torino, ha frequentato un master a Londra presso l'architecture association, per poi lavorare per circa cinque anni presso il team Zaha code, ovvero il team di ricerca e sviluppo dello studio Zaha Hadid.

Nello specifico occupandosi di ricerca e sviluppo per conto dello studio.

Negli ultimi tre anni, assieme ad un altro ex studente del Politecnico, Massimiliano Manno, ha fondato Encode, ovvero uno studio che ha lo scopo di creare una continuità tra il design e la messa in produzione, che in genere nella filiera tipica dell'architettura sono disconnesse. Nello specifico si occupano della progettazione in scala 1:1 di tutti i componenti dell'architettura, pensando anche alla messa in produzione e in alcuni casi anche ai disegni destinati ai macchinari (CAM).

Buongiorno, grazie per la disponibilità, come prima cosa volevo chiedere, quali sono le modalità con cui si organizza un cantiere come quello per "Tumbalong Green", di cui vi siete occupati, in particolare in relazione alla manifattura. La quale essendoci componenti metalliche e in legno suppongo sia anche di diverso tipo; quindi, ci sarà un'azienda addetta alla prefabbricazione del legno lamellare e una alla fabbricazione delle parti metalliche. Come vengono coordinate nel momento in cui si arriva in cantiere?

I vari sistemi (ovvero parti di progetto ed elementi da assemblare) in genere ci sono dei fornitori che realizzano gli elementi autonomamente.

Nel caso specifico del progetto, vi era una sola azienda che si occupava della lavorazione, la quale si riforniva da due aziende, una per quanto riguarda il legno lamellare e una per i componenti in metallo.

Nel caso delle piastre metalliche, più di 200 componenti tutti diversi tra loro,

erano realizzati dai fratelli Muzza di Lodi. Ogni volta che realizzava una piastra (I1) questa veniva spedita al produttore dei componenti in legno, ovvero un'azienda lituana, che provava ad assemblare le travi in officina, in modo da verificare che tutto funzionasse a dovere.



(I1) Piastra completa pronta per essere spedita al realizzatore degli elementi in legno per le verifiche. (Fonte: Immagine mostrata a schermo durante l'intervista).

Questo fa parte anche del progetto DfMA in generale, infatti, rientra a tutti gli effetti nel processo di design dell'architettura. Infatti spesso un componente viene modificato proprio in relazione alle necessità di assemblaggio e trasporto. Questo ovviamente consente di lavorare in maniera molto più efficiente, apportando da subito tutte le modifiche necessarie a inizio progetto e non dover modificare tutto in corso d'opera, come avviene in genere.

Il fornitore poi è colui a cui spetta il compito di gestire la spedizione; tuttavia, noi aiutiamo anche in questa fase; infatti, cerchiamo di studiare gli elementi in modo che sia possibile trasportarli con il minor tipo di container e pallet possibili. Quindi gli elementi oltre i 12 metri non potevano essere realizzati, infatti la dimensione standard dei container navali.

Mi vorrei soffermare un attimo sul fatto che avete realizzato tutti i componenti del progetto in Europa; infatti, sul vostro sito ho letto che il progetto

si trova a Sydney, come mai avete fatto questa scelta? Immagino abbia comportato un impatto ambientale, comunque, maggiore in termini di trasporti.

Certo assolutamente, l'embodied carbon sicuramente non ne ha giovato, però la motivazione è molto semplice, ovvero l'Australia non ha questa capacità di realizzazione a livello di manifattura. Inoltre, non c'è il legno, infatti la maggior parte della produzione del legno è fatta in Europa. Quindi fondamentalmente la ancora non c'è il Know how che c'è in Europa e quindi lo importano di fatto.

Per quanto riguarda i disegni da voi prodotti, arrivate fino ai disegni CAM, quindi che vanno direttamente in macchina, oppure realizzate semplicemente i file CAD che poi vengono convertiti in CAM dalle aziende produttrici?

Nella maggior parte dei casi forniamo anche il file macchina, quindi CAM, ovviamente questo dipende dagli accordi contrattuali, anche perchè fornire direttamente il file macchina aumenta ulteriormente il rischio di errore. Però l'intento è proprio questo, accorciare la fase di progettazione e sviluppo di tutti i componenti, tutte queste figure sono condensate in una sola figura, che però ha delle grosse responsabilità, questa è un po' la parte negativa del nostro servizio.

Come funziona in genere il vostro work flow tipico, quali step seguite e come approcciate un nuovo progetto in genere?

Prima di tutto questo dipende dal tipo di incarico che ci viene assegnato, al momento infatti non ci è mai stato chiesto di seguire tutto il processo dall'inizio alla fine. A volte ci fermiamo anche alla



(I2)Progetto Tumbalong Green durante la fase di cantiere. (Fonte: En-code.io).

gara d'appalto, quantificando elementi e volumi, stimando costi e possibili problematiche.

Nel caso del progetto di cui parlavamo prima, ovvero il progetto "Tumbalong Green (I2)", o anche della piscina su cui stiamo lavorando ora, si tratta del processo completo; quindi, abbiamo iniziato il progetto dall'inizio dopo essere stati incaricati dal gestore del legno e dell'acciaio.

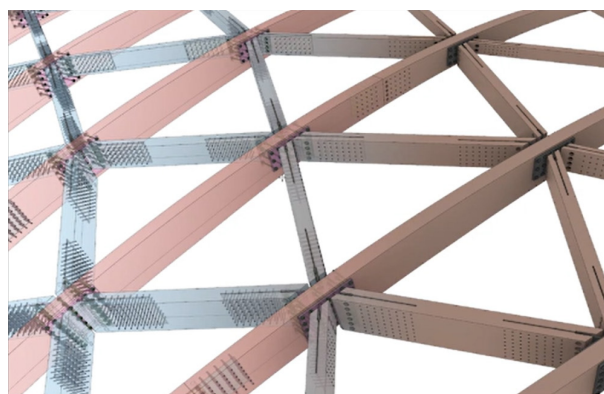
Nello specifico siamo subentrati ancor prima della gara d'appalto; ovvero, ad uno stadio preliminare, in cui c'era solo un modello 3D realizzato dall'architetto e alcuni dettagli tipici.

Da qui si doveva stimare dei costi per la gara d'appalto, quindi abbiamo iniziato a rappresentare il progetto secondo i nostri metodi in modo da poter stimare tutte le informazioni necessarie.

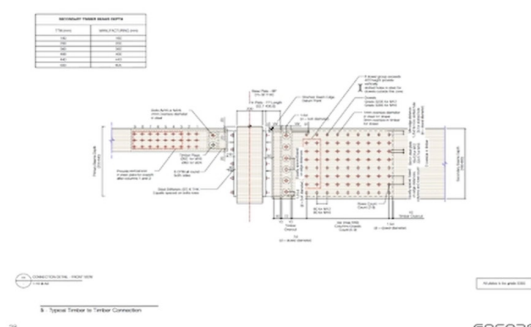
Quindi quanti elementi in acciaio ci sono, quanti elementi in legno, quanti container devono essere inviati ed eventuali problematiche relative ad alcuni di questi elementi. In questo caso le piastre in acciaio avevano degli angoli per via dei quali la saldatura sarebbe stata problematica; quindi, è stata svolta un'analisi in cui si verificava quale di questi angoli sarebbe stato inaccessibile alla torcia di saldatura.

Questo faceva sì che parlando con i fabbricatori delle piastre potessimo studiare un sistema sia di saldatura, ma anche di documentazione di queste condizioni, in modo che la problematica e la relativa soluzione fossero comprensibili. Questa era un po' la prima fase che seguiamo di solito, in caso di vittoria della gara di appalto, inizia tutta la fase di sviluppo del progetto, ovvero la fase di sviluppo costruttivo questa fase che nello specifico è durata tre mesi e mezzo, in cui si ha un grado di dettaglio approssimabile alla scala 1:1.

Questo livello di dettaglio (I3) ovviamente va poi anche documentato per tutto il team di lavoro e inoltre vi è una parte di documentazione che viene utilizzata per



(I3) Livello di dettaglio raggiunto dal modello in fase di sviluppo costruttivo (Fonte: Immagine mostrata a schermo durante l'intervista).



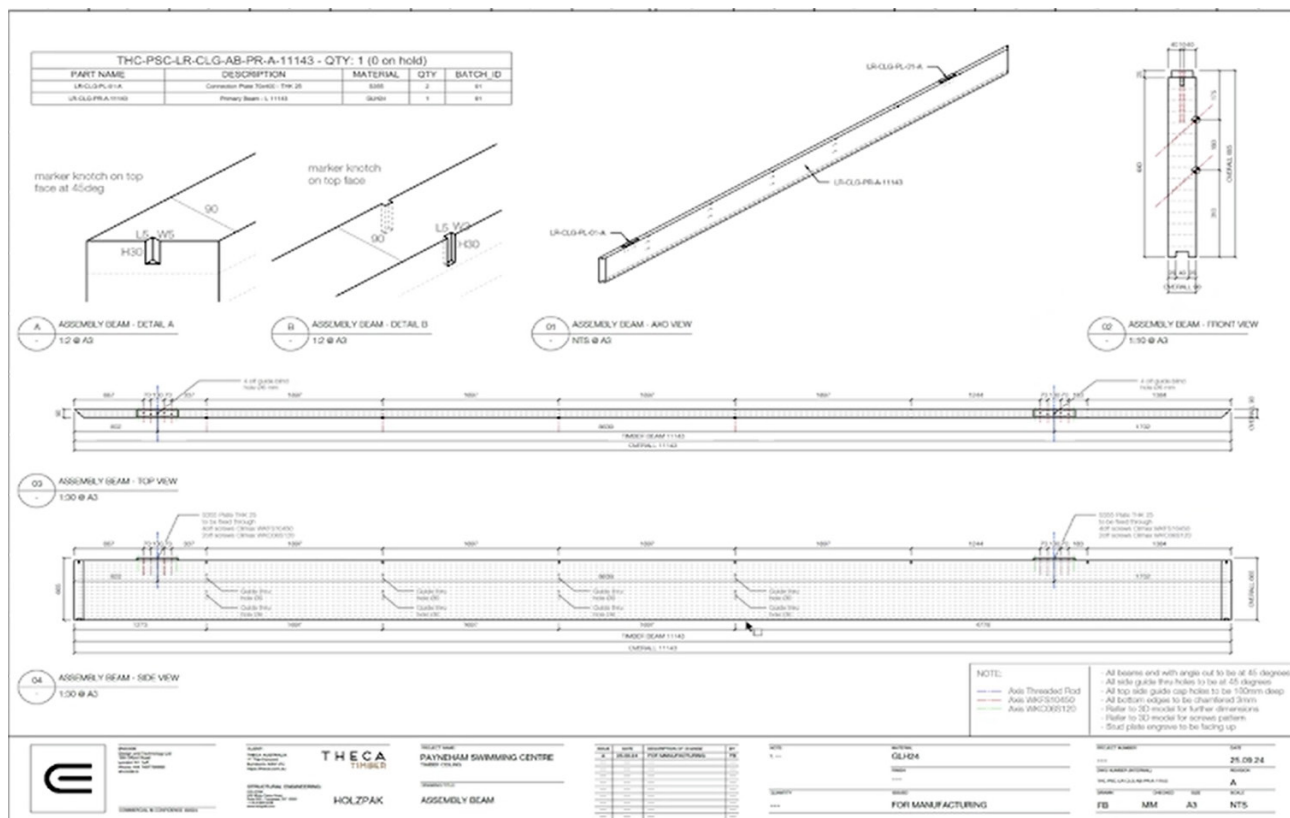
(I4) Dettagli di costruzione dei componenti (Fonte: Immagine mostrata a schermo durante l'intervista).

l'approvazione del progetto anche a livello contrattuale, ovvero dettagli di costruzione (I4), che disegni di produzione (I5).

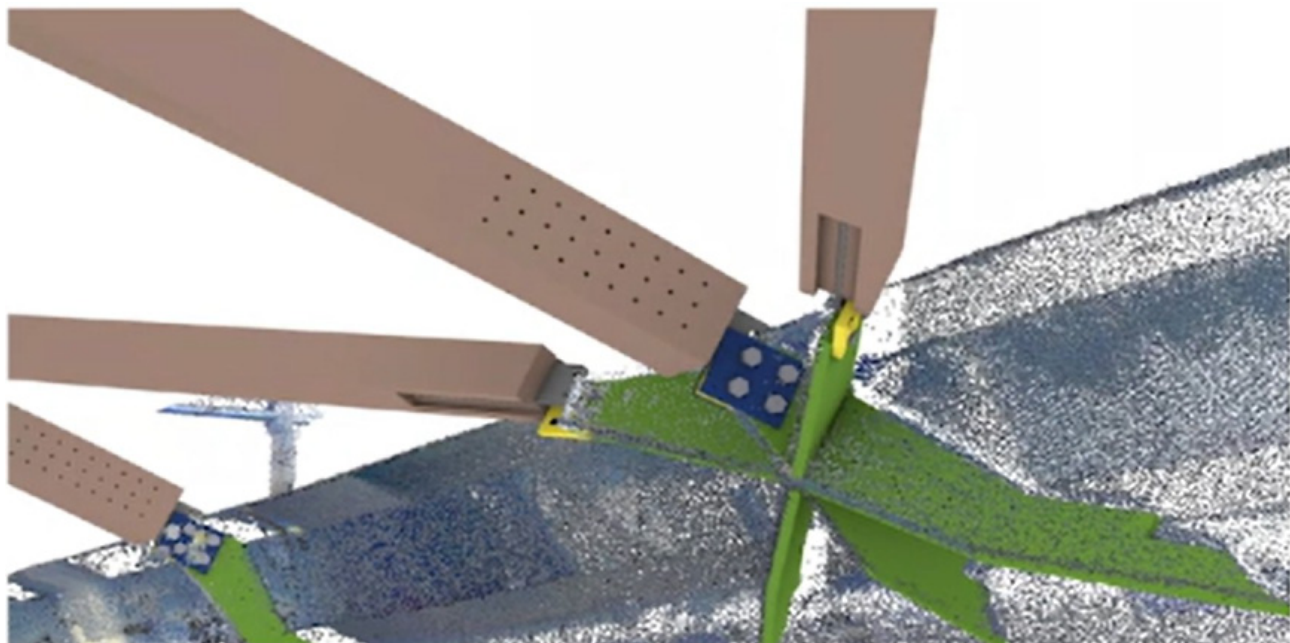
Questi disegni di produzione devono elencare tutte le lavorazioni che devono essere effettuate su ogni singolo elemento, la componentistica che deve essere attaccata e tutta questa documentazione viene firmata dal produttore che approva la messa in produzione.

Quindi ultimata questa fase si passa poi alla fase di produzione; quindi, i disegni vengono inviati al produttore che inizia a realizzare i pezzi.

In questa fase ovviamente si studiano anche le sequenze di installazione, di montaggio, che incidono nel design perché dovendo essere poi montati nello spazio, quindi l'elemento andrà ruotato, spostato e posizionato correttamente nello spazio. L'ultima fase, tipicamente chiamata



(15)Tavola esecutiva di un elemento di progetto (Fonte: Immagine mostrata a schermo durante l'intervista).



(16) Scansione con nuvola di punti del progetto durante la fase di cantierizzazione (Fonte: Immagine mostrata a schermo durante l'intervista).

as-built, in cui si scansiona attraverso nuvole di punti (I6) tutto quello che è stato costruito e viene comparato col modello digitale.

Questo fa sì che durante la fase di costruzione o a posteriori si possa intervenire per eventuali rettifiche, ad esempio la struttura potrebbe muoversi, l'edificio nel caso specifico, per esempio, ogni volta che veniva aggiunto un sistema di travi l'edificio si muoveva leggermente per via del peso delle travi e dell'acciaio. Questa fase di controllo serve proprio ad evitare problemi una volta che l'edificio è completamente assemblato, ovviamente in questa fase è stato necessario trovare delle soluzioni ad hoc, per risolvere proprio alcune di queste problematiche, con degli elementi che potessero fare da "cuscinetto" tra il modello digitale e l'edificio realizzato.

Per quanto riguarda i software che utilizzate, presumo che utilizziate principalmente Rhino e Grasshopper, ma è efficace anche per collaborare con le aziende, come ad esempio le maestranze, oppure per dialogare integrate tutto in un modello BIM in seguito?

Ad oggi purtroppo, c'è la richiesta di avere modelli Revit, che per la maggior parte dell'industria corrisponde al BIM, che è completamente sbagliato.

Revit è un software di modellazione, il processo BIM può essere fatto su qualsiasi piattaforma, incluso Rhino. Questo è il motivo per cui noi lavoriamo esclusivamente in Rhino e Grasshopper; quindi, tutti i modelli che vengono prodotti sono interamente in ambiente Rhino. In seguito in base alle varie necessità dei singoli collaboratori, noi trasportiamo le operazioni in base a quello che serve a quel preciso collaboratore.

Questo in genere si fa con IFC, che è il formato standard per passare informazioni da un software di modellazione ad un altro, ma vale anche per file di taglio, macchina, ecc. Questa possibilità di trasportare i file in vari formati è fondamentale quando si lavora in team, perché magari l'ingegnere lavora in SUP o FEM, l'architetto lavora in Revit, l'impiantista in Revit advance, e così via, per cui tutti questi dati devono convogliare in un unico modello.



(I7) Schematizzazione di tutti i software con cui viene effettuata la gestione dei modelli (Fonte: Immagine mostrata a schermo durante l'intervista).

Comunque sia il nostro approccio è di tipo agnostico, ovvero noi non utilizziamo un software specifico, ma forniamo le informazioni necessarie a quel determinato processo.

Nel tempo abbiamo anche sviluppato una nostra libreria (l7) , un contenitore di funzioni, metodi, comandi che servono per automatizzare certi processi.

Rimanendo sul tema dei programmi, so che adesso molti programmi stanno integrando anche loro funzionalità analoghe a quelle di Grasshopper, come ad esempio Revit e Blender, sono alternative valide, oppure c'è ancora una netta superiorità da parte di Grasshopper?

Io farei una distinzione sostanziale tra ogni sistema, più che metterli in parallelo li distinguerei perchè sono sistemi diversi, Dynamo ad esempio ha come principale scopo quello di utilizzare le funzioni dell'EPI di Revit, quindi interagisci con la parte non esposta ai comandi classici di Revit.

Questo è un pò lo stesso principio di Grasshopper, ma fondamentalmente, dipendono dall'ambiente in cui si trovano, quindi hai accesso a determinate funzioni, in Revit hai un altro tipo di accesso.

Quello che li accumuna è che abbassano il livello di ingresso alla modellazione algoritmica, cioè tu non hai bisogno di saper scrivere codice ma hai processi logici e visuali.

In realtà Grasshopper è il software a più alta curva di apprendimento che io conosca; infatti, tanti lo usano ma pochissimi lo sanno usare bene.

Inoltre, il fatto che offre una libertà di modellazione molto ampia rende sempre possibile trovarsi ad avere a che fare con nuove funzionalità ecc.

Tuttavia rimango un convinto sostenitore

di Rhino, perchè rispetto agli altri software ha un costo esiguo rispetto alle sue potenzialità, ma anche all'utilizzo nel nostro settore; infatti, chiunque ha Rhino e quindi puoi sempre trasmettere informazioni a chiunque grazie ai vari formati in cui è possibile convertire le informazioni.

Permette inoltre di creare plug-in e processi ad hoc; quindi, è molto aperto a sperimentazioni personali. Inoltre, ha una comunità molto vasta che consente di ricevere aiuto in caso di necessità.

Per quanto riguarda invece la conoscenza del linguaggio macchina, ovvero il cosiddetto coding, per cosa può tornare utile nel lavoro di tutti i giorni?

Secondo me è fondamentale, non è necessario essere degli ingegneri informatici, per sviluppare strumenti utili nel nostro campo; infatti, tutta la gente che ho conosciuto ha iniziato da sola con cose semplici, andando poi a incrementare la difficoltà.

Comunque sia nella nostra quotidianità è fondamentale per realizzare elementi completamente diversi tra loro in poco tempo. Noi, ad esempio, abbiamo creato un'intera tabella di comandi personalizzata, che ci consente di semplificare una serie di operazioni che altrimenti sarebbero molto dispendiose in termini di tempo.

Abbiamo comandi per la fabbricazione, per l'impaginazione, alcuni relativi alle facciate, altri per le strutture in legno, ecc.

Il modo più efficace per utilizzare questi elementi è crearli in base al tuo modo di lavorare, ovvero una volta che hai risolto un problema manualmente, puoi replicarlo tramite coding in modo da

renderlo automatico e non perderci più tempo.

Ad oggi secondo me saper leggere un pò di codice e saperlo navigare e sapere un minimo come imbastire del codice è veramente fondamentale.

Ma quindi in questo caso per aggiungere i comandi siete entrati nel codice di Rhino e avete apportato modifiche al programma per poter aggiungere questi programmi?

Non è proprio così, il nostro approccio è sempre quella di avere una parte agnostica; quindi, indipendente dal codice in cui viene usato il codice e poi delle parti specifiche che usano la parte agnostica ma la specificano sul programma. Quindi tutti i comandi da noi creati hanno alla base una parte di codice scollegata da Rhino e una parte di codice che invece è scollegata da Rhino.

In pratica quello che si va a fare è di prendere in prestito l'API che Mcneel fornisce, che sono alcune funzionalità del programma non visibili nell'interfaccia classica.

Quindi in realtà non si modifica il codice di Rhino ma si prendono in prestito delle funzioni per creare dei nuovi componenti. Ad esempio, tutti i disegni siamo in grado di impaginarli nello stesso modo utilizzando solo tre o quattro comandi e quindi in caso di progetti molto complessi diventa fondamentale per risparmiare moltissimo tempo.

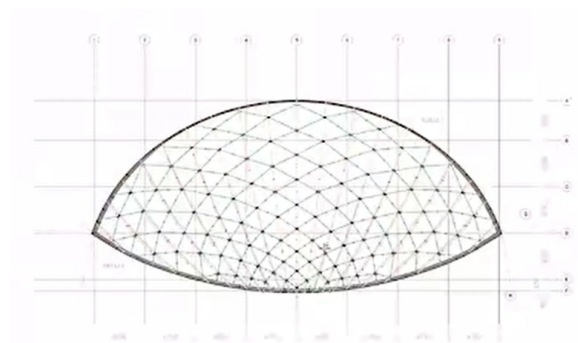
Cambiando un pò argomento, quando si utilizza questa metodologia DfMA si tiene in considerazione anche come smontare ed eventualmente recuperare le parti dell'edificio anche per il recupero e la sostenibilità dei materiali. La tenete in considerazione all'interno del progetto?

Questo è un tema molto interessante, però essendo totalmente onesto, nei progetti reali noi abbiamo zero input, nel senso che non è il nostro ruolo decidere i materiali nel sistema e quindi c'è poco che

possiamo fare in questa direzione, è più un discorso da affrontare col progettista. Finora però non mi è ancora capitato ed è uno dei temi su cui i miei studenti qui a Londra fanno spesso le loro tesi, che non è solo DfMA ma è DfD, design for disassembly. Però nella pratica non ci è ancora capitato di fare qualcosa in questa direzione.

Per quanto riguarda i singoli giunti, avendo a che fare con giunture tutte diverse tra loro, c'è un problema anche ingegneristico nel dover effettuare test di resistenza su tutti i giunti o vengono adottate delle semplificazioni per poter risolvere il tutto più semplicemente?

Io non sono ingegnere quindi non posso entrare nei dettagli tecnici, però l'approccio in genere è che ci sono degli stati limite per cui si considera il sistema della connessione. Prima si studia localmente e poi si applica all'intera



(I8) Esempio di modello composto da grafi (Fonte: Immagine mostrata a schermo durante l'intervista).

struttura e si studia il caso peggiorativo. Di solito poi si usano i modelli FEM (final element models) che sono dei grafi (I8) che sono fondamentalmente un insieme di barre e nodi, per cui la modellazione ingegneristica di solito è fatta a questo livello molto astratto e queste informazioni numeriche vengono trasportate sugli elementi di dettaglio. Per cui in base alla forza a cui ogni singolo elemento in legno doveva resistere si basava la quantità di bulloni da inserire sulla trave.

Questo ovviamente diventa poi uno dei parametri di progetto, così come la tolleranza concessa agli incastri delle travi con i giunti e come molte altre cose. Un altro studio interessante che abbiamo realizzato è quello sulla resistenza delle lamelle da 40 mm allo strido del legno, in quanto una volta incollate e lavorate a macchina a controllo numerico andavano piegate, per cui era importante che la curva seguisse la piegatura massima delle lamelle, in modo tale da doverle fresare il meno possibile.

Per quanto riguarda lo sviluppo futuro di questa metodologia, sia per quanto riguarda la collaborazione con l'intelligenza artificiale, ma anche in altri sensi, come potrebbe evolversi? Potrebbe essere diventare più comune?

Il tema dell'AI è un tema enorme, ma sicuramente in questo ambito della fase di costruzione non ho ancora visto nulla di eccitante, anche perchè sono fasi con molte variabili non prevedibili. Quel poco che ho visto finora sono relative alla certificazione ma non alla messa in opera, solo per aspetti di tipo contrattuale e rispetto di codici legati alla sicurezza. Inoltre, attraverso alcuni processi si riesce a segnalare un eventuale malfunzionamento o deterioramento dell'edificio nel corso del tempo. Ovviamente nel giro di qualche anno qualcosa ci sarà, ma è molto diverso tra usare questi modelli per il design che per la parte di messa in opera, o di ingegneria. Anche perchè la sicurezza delle informazioni che danno deve essere molto elevata essendo dati molto sensibili, per cui al momento può essere un valido aiuto se non per aspetti marginali di progettazione. Ovviamente nelle fasi iniziali di concept ne

riconosco il valore perchè ovviamente hai una velocità di esplorazione e di concept molto più rapida, per cui fino a qualche anno fa era necessario modellare e renderizzare tutto mentre ora basta scrivere quattro righe.

Per quanto riguarda invece la sicurezza in cantiere, quali sono i rischi che vengono annullati, quali risultano meno impattanti ecc. rispetto ad un cantiere tradizionale?

Per quanto riguarda la mia esperienza il cambio sostanziale è legato alla prefabbricazione, cioè la gestione degli aspetti da considerare, infatti la logistica deve essere ben pensata in modo da trovare facilmente gli elementi. Naturalmente se tu lavori in un ambiente circoscritto, come appunto una fabbrica, il livello di rischio direttamente diminuisce. Quindi la sicurezza di chi li monta e soprattutto chi li produce. Inoltre, avendo elementi sui bancali misurazioni e controlli possono essere fatti con più precisione, inoltre c'è molto meno movimento in sito, a livello di macchinari ecc. Ovviamente a questo punto la logistica diventa un vero e proprio parametro del design; infatti, deve essere ben studiata per evitare confusione. Un altro aspetto molto importante è quello di marciare gli elementi in modo che siano riconoscibili e facilmente assegnabili ai loro incastri, e ovviamente anche questo fa parte della logistica. Ovviamente i disegni devono essere facili da interpretare in modo che sia intuitivo e facilmente replicabile in sito.

Secondo te ci sono altri temi interessanti che non abbiamo ancora affrontato?

No secondo me gli argomenti fondamentali li abbiamo toccati tutti.

Ok grazie ancora per la disponibilità!

1.4 - Intervista a Giuseppe Conti (Pininfarina)

Giuseppe Conti al momento sta svolgendo PHD industriale, ovvero un corso supervisionato da Pininfarina e Politecnico di Milano con tema di partenza trasferimento tecnologico da automotive ad architettura.

L'idea di questo corso è quella di trasferire il Know how di Pininfarina nella produzione automobilistica in architettura. Questo è stato poi declinato in 2 modi, ovvero in primis sulle strategie DfMA in termini di produzione e assemblaggio dei componenti, e dall'altro di elaborare un processo DfMA a supporto della supply chain, ovvero una ricerca su quali sono le metodologie più avanzate e gli studi di architettura e ingegneria che lavorano in questo campo.

Inoltre, con la digitalizzazione dell'industria si stanno studiando dei software ad hoc che consentano di migliorare il processo produttivo e manifatturiero.

Il lavoro si è poi svolto considerando i gap dell'attuale letteratura scientifica, ovvero alla modularità e sulla grande scala, che è un po' lontana dal metodo di lavoro di Pininfarina; infatti, l'idea non è quella di trasferire questa conoscenza su tutto l'edificio, ma su una parte di edificio che può essere considerata come un prodotto e che si presta a questo tipo di logiche.

Quindi si sta lavorando su un concetto di unicità e non di modularità come spesso avviene, gestendo geometrie complesse che derivano dal settore automotive.

Da questo punto di vista alcuni studi di riferimento sono Shop architects e Braidenwood che fornisce molte informazioni sul tema DfMA dal punto di vista delle piattaforme interessate all'approccio DfMA, scalando il tema dall'automotive all'architettura.

Un aspetto interessante di questo tema è la complessità necessaria a realizzare un progetto unico, rispetto a quella che si ha quando di quello stesso progetto se ne realizzano migliaia di copie. Infatti, in

questo secondo caso ci devono essere dei meccanismi che funzionano velocemente e producano diverse parti della stessa architettura più volte commettendo il minor numero di errori possibili.

Quindi Pininfarina sta cercando di allontanarsi dai grandi numeri per concentrarsi su elementi unici.

Lavorare sull'idea di macro-componenti, ovvero di Platform che possono essere virtuali, come Dasso systems, dove posso caricare file IFC che poi vengono gestiti da vari attori.

Poi c'è il processo fisico che deriva dall'idea di avere delle vere piattaforme derivanti dal settore automotive che si occupano di realizzare un processo utilizzato poi da diversi modelli di auto differenti, creando una struttura applicabile in diversi modelli.

L'obiettivo alla fine sarà quello di lavorare su tre fronti:

- Design: perchè l'obiettivo era quello di lavorare su geometrie complesse

- Processi: perchè vanno integrati dei processi di gestione avanzati, come il processo shape che in Pininfarina si occupa di gestire la produzione dell'auto dalla parte di disegno fino alla fine.

- Materiali: attraverso l'utilizzo di tecnologie cutting age, che è un limite dei DfMA, infatti in molti si sono focalizzati su sistemi modulari, come bagni che possono essere sostituiti in blocco all'interno delle architetture, oppure su sistemi di facciata basati sulla ripetizione di elementi modulari. Il problema in questo senso sarà fare il passo avanti tra la metodologia dedicata ad una singola architettura ai grandi numeri, quindi applicare quella metodologia su architetture "per tutti". Questa è un po' un'introduzione del lavoro che sta realizzando Giuseppe in questo momento per Pininfarina, a questo punto ho voluto porre alcune domande per capire meglio il modo in cui lavora.

Da quanto tempo vi occupate di questa metodologia?

Ho iniziato un anno fa col Phd, ma parlando di Pininfarina c'era la necessità di diversificare il lavoro dell'azienda negli ultimi vent'anni e quindi hanno iniziato a prestare attenzione a questi aspetti, e negli ultimi due anni sta cercando di applicare questa metodologia alle sue architetture.

Hai qualche progetto su cui avete lavorato con questa metodologia da mostrarmi?

Un progetto sicuramente interessante è un pop up store realizzato in Turchia, interessante perchè come principio DfMA vi erano tutte le bullonature assemblate e un sistema di paneling in Alucobond con una sottostruttura in alluminio (I9). In questo caso vi era un esoscheletro

realizzato con dei tagli al plasma, con delle finiture in lamiera che venivano fissate su di esse.

La struttura secondaria è composta da degli scatolari in alluminio, dei pannelli in legno che fanno da supporto per i pannelli di alucobond tagliati con una CNC (I10-I11-I12-I13).

Lo skyline era realizzato offsite, tuttavia applicare questa tecnologia è molto complesso, per cui la difficoltà è stata trovare delle aziende in grado di realizzarle.

Infatti, alla fine è stato realizzato in un altro modo un pò più semplice che fosse alla portata della manodopera locale.

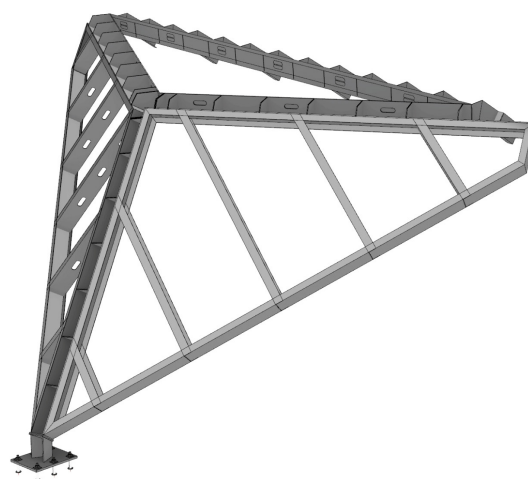
Un esempio di manifattura molto elevata è CIG architecture, i quali lavorano con Zaha Hadid e molti altri studi all'avanguardia, su progetti molto complessi in panelling in alluminio.



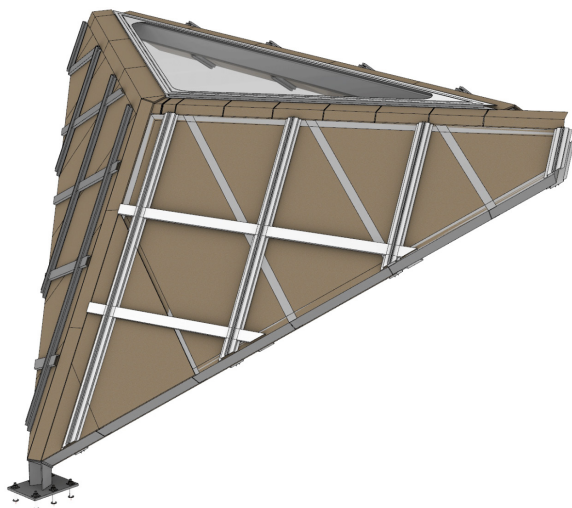
(I9) Immagine del padiglione (Fonte: Encode.io).



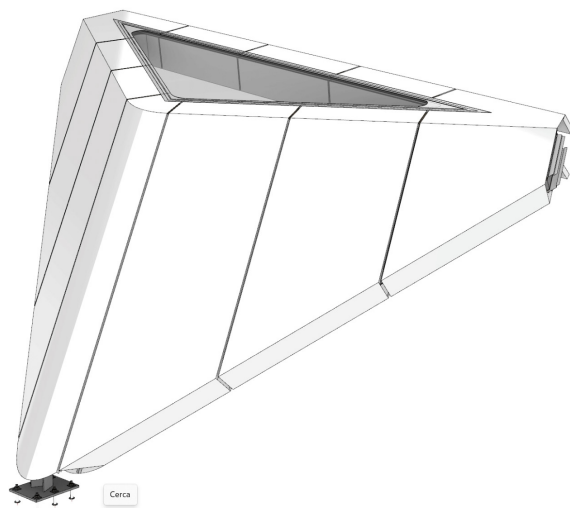
(I10) Telaio principale del padiglione (Fonte: Encode.io).



(I11) Telaio principale e secondario del padiglione (Fonte: Encode.io).



(I12) Elementi di supporto e relativa struttura per assemblare i pannelli di finitura (Fonte: Encode.io).



(I13) Pannelli di finitura posizionati sulla struttura (Fonte: Encode.io).

Fonti

Libri (in ordine di citazione)

- Colin Davies, The prefabricated home, Reaktion Books Ltd, Londra, 2005
- Michele Emmer, The visual mind 2, The MIT Press, Cambridge, 2006

Articoli (in ordine di citazione)

- BAUM STUDIO - prefabbricazione tra storia e nuovi bisogni, Svizzera, 2018
- Gilbert Herbert, The Portable Colonial Cottage, university of California Press on behalf of the Society of Architectural Historians, estratto da: Journal of the Society of Architectural Historians, Dec., 1972, Vol. 31, No. 4 (Dec., 1972), pp. 261-275.
- Igor Malgrati, La struttura del centre pompidou, Open project workshop, 2002.
- Paul Schnabel, Kunstals zware industrie Het Guggenheim Museum Bilbao, Università di Utrecht, 2000.
- Mohammed Izrai Abd Razak, Muhamad Azry Khoiry, Wan Hamidon Wan Badaruzzaman and Afifuddin Husairi Hussain - DfMA for a Better Industrialised Building System, Universiti Kebangsaan Malaysia, 2022.
- Sara Rankohi, Mario Bourgault, Ivanka Iordanova and Carlo Carbone - Developing a Construction-Oriented DfMA Deployment Framework, Università di Montreal, Canada, 2023.
- Vikrom Laovisutthichai, Weisheng Lu - Design for manufacture and assembly (DfMA) in architectural design meetings: from a case study to knowledge-to-action framework, Hong Kong university, China, 2022.

- Pete Silver, Will McLean, and Peter Evans, Structural Engineering for Architects: A Handbook, Laurence King Publishing Ltd, Londra, 2013

- Daode Dong, Yiquan Zou, Han Pan - Design and application of a DFMA-based modular library of precast concrete components for assembled buildings, Changsha University, Hubei University, China State Construction Engineering, 2023

- Abdul-Quayyum Gbadamosia, Lukumon Oyedelea, Abdul-Majeed Mahamadub, Habeeb Kusimoo, Muhammad Bilala, Juan Manuel Davila Delgadoa, Naimah Muhammed-Yakubua - Big data for Design Options Repository: Towards a DFMA approach for offsite construction,

Siti web (in ordine di citazione)

- Ironbridge valley of invention, www.ironbridge.org.uk, visto in data: 6/03/2024
- le foto e la storia della costruzione della tour Eiffel - www.marcocrupi.it - visto il 6/03/2024
- our building, www.centrepompidou.fr - visto il 6/03/2024

Elenco immagini con fonti complete

- (1) - Il portable cottage di John Manning (Fonte: Gilbert Herbert, The Portable Colonial Cottage, university of California Press on behalf of the Society of Architectural Historians, estratto da: Journal of the Society of Architectural Historians , Dec., 1972, Vol. 31, No. 4 [Dec., 1972], pp. 265).
- (2) - Diversi utilizzi del cottage, dall'alto verso il basso: Ospedale, scuola, magazzino. (Fonte: BAUM STUDIO - prefabbricazione tra storia e nuovi bisogni, Svizzera, 2018)
- (3) - Coalbrookdale Company Bridge, 1779 (fonte: Wikidata.org)
- (4) - Interno del Crystal palace durante la cerimonia di chiusura dell'esposizione universale del 1851, (Fonte: www.Domusweb.it/edifici/crystalpalace)
- (5) - Vista esterna del Crystal Palace (Fonte: www.Domusweb.it/edifici/crystalpalace)
- (6) - Fondazioni tour Eiffel (Fonte: marcocrupi.it - le foto e la storia della costruzione della tour Eiffel 1887-1889)
- (7) - Fasi costruzioni tour Eiffel, 1779 (Fonte: marcocrupi.it - le foto e la storia della costruzione della tour Eiffel 1887-1889)
- (8) - Maison Domino, Le Corbusier, 1914 (Fonte: BAUM STUDIO - prefabbricazione tra storia e nuovi bisogni, Svizzera, 2018)
- (9) - Modello della Maison Citrohan, (Fonte: Le Corbusier: Get to Know the Pioneer of Modern Architecture - Thecollector.com)
- (10) - Sezione del Centre Pompidou (Fonte: Corriere della sera - Living)
- (11) - Trasporto delle travi reticolari per le strade di Parigi (Fonte: Corriere della sera - Living)
- (12) - Trave Gerber del prospetto principale del centro (Fonte: Corriere della sera - Living)
- (13) - Prospetto principale Guggenheim museum (Fonte: Michele Emmer, The visual mind 2, The MIT Press, Cambridge, 2006, pp. 174)
- (14) - Evoluzione del modello di studio (Fonte: Michele Emmer, The visual mind 2, The MIT Press, Cambridge, 2006, pp. 167).
- (15) Pianta museo Guggenheim Bilbao (Fonte: Pinterest.com)
- (16) - Vetrata e finitura esterna (Fonte: Paul Schnabel, Kunstals zware industrie, Het Guggenheim Museum Bilbo, Università di Utrecht, 2000, pp. 96)
- (17) - Struttura dell'atrio (Fonte: Michele Emmer, The visual mind 2, The MIT Press, Cambridge, 2006, pp. 180).
- (18) - Centre Pompidou Metz (Fonte: Pete Silver, Will McLean, and Peter Evans, Structural Engineering for Architects: A Handbook, Laurence King Publishing Ltd, Londra, 2013, pp. 195)
- (19) - Griglia copertura in legno e dettaglio torsione travi (Fonte: Pete Silver, Will McLean, and Peter Evans, Structural Engineering for Architects: A Handbook, Laurence King Publishing Ltd, Londra, 2013, pp. 196)
- (20) - Dettaglio pilastro copertura (Fonte: Pete Silver, Will McLean, and Peter Evans, Structural Engineering for Architects: A Handbook, Laurence King Publishing Ltd, Londra, 2013, pp. 197)

[21] - Classico processo di prefabbricazione anche detto “over the wall” (Fonte: Mohammed Izrai Abd Razak, Muhamad Azry Khoiry, Wan Hamidon Wan Badaruzzaman and Afifuddin Husairi Hussain - DfMA for a Better Industrialised Building System, Universiti Kebangsaan Malaysia, 2022, pp. 3).

[22] - Principio DfMA in cui il design accompagna la realizzazione e l'assemblaggio. (Fonte: Mohammed Izrai Abd Razak, Muhamad Azry Khoiry, Wan Hamidon Wan Badaruzzaman and Afifuddin Husairi Hussain - DfMA for a Better Industrialised Building System, Universiti Kebangsaan Malaysia, 2022, pp. 3).

[23] - Sfide necessarie per implementare i DfMA (Fonte: Sara Rankohi, Mario Bourgault, Ivanka Iordanova and Carlo Carbone - Developing a Construction-Oriented DfMA Deployment Framework, Università di Montreal, Canada, 2023, pp. 7-8).

[24] - Relazione tra le sfide, gli stakeholder e le fasi di progetto (Fonte: Sara Rankohi, Mario Bourgault, Ivanka Iordanova and Carlo Carbone - Developing a Construction-Oriented DfMA Deployment Framework, Università di Montreal, Canada, 2023, pp. 8).

[25] - Processo di sviluppo del progetto architettonico (Fonte: Vikrom Laovisutthichai, Weisheng Lu - Design for manufacture and assembly (DfMA) in architectural design meetings: from a case study to knowledge-to-action framework, Hong Kong university, China, 2022, pp. 1127).

[26] - Framework knowledge to action per architetti (Fonte: Vikrom Laovisutthichai, Weisheng Lu - Design for manufacture and assembly (DfMA) in architectural design meetings: from a case study to knowledge-to-action framework, Hong Kong university, China, 2022, pp. 1128).

[27] - Processo di creazione di una libreria di moduli orientata ai DfMA (Fonte: Daode Dong, Yiquan Zou, Han Pan - Design and application of a DFMA-based modular library of precast concrete components for assembled buildings, Changsha University, Hubei University, China State Construction Engineering, 2023, pp.22)

[28] - Aspetti della costruzione offsite in relazione ai big-DOR (Fonte: Abdul-Quayyum Gbadamosia, Lukumon Oyedelea, Abdul-Majeed Mahamadub, Habeeb Kusimoo, Muhammad Bilala, Juan Manuel Davila Delgadoa, Naimah Muhammed-Yakubua - Big data for Design Options Repository: Towards a DFMA approach for offsite construction, university of Bristol, UK, 2020, pp. 2)

[29] - Architettura per sistemi big-DOR (Fonte: Abdul-Quayyum Gbadamosia, Lukumon Oyedelea, Abdul-Majeed Mahamadub, Habeeb Kusimoo, Muhammad Bilala, Juan Manuel Davila Delgadoa, Naimah Muhammed-Yakubua - Big data for Design Options Repository: Towards a DFMA approach for offsite construction, university of Bristol, UK, 2020, pp. 5)

Elenco immagini interviste con fonti complete

(I1) Piastra completa pronta per essere spedita al realizzatore degli elementi in legno per le verifiche. (Fonte: Immagine mostrata a schermo durante l'intervista).

(I2) Progetto Tumbalong Green durante la fase di cantiere. (Fonte: En-code.io).

(I3) Livello di dettaglio raggiunto dal modello in fase di sviluppo costruttivo (Fonte: Immagine mostrata a schermo durante l'intervista).

(I4) Dettagli di costruzione dei componenti (Fonte: Immagine mostrata a schermo durante l'intervista).

(I5) Tavola esecutiva di un elemento di progetto (Fonte: Immagine mostrata a schermo durante l'intervista).

(I6) Scansione con nuvola di punti del progetto durante la fase di cantierizzazione (Fonte: Immagine mostrata a schermo durante l'intervista).

(I7) Schematizzazione di tutti i software con cui viene effettuata la gestione dei modelli (Fonte: Immagine mostrata a schermo durante l'intervista).

(I8) Esempio di modello composto da grafi (Fonte: Immagine mostrata a schermo durante l'intervista).

(I9) Immagine del padiglione (Fonte: Encode.io).

(I10) Telaio principale del padiglione (Fonte: Encode.io).

(I11) Telaio principale e secondario del padiglione (Fonte: Encode.io).

(I12) Elementi di supporto e relativa struttura per assemblare i pannelli di finitura (Fonte: Encode.io).

(I13) Pannelli di finitura posizionati sulla struttura (Fonte: Encode.io).

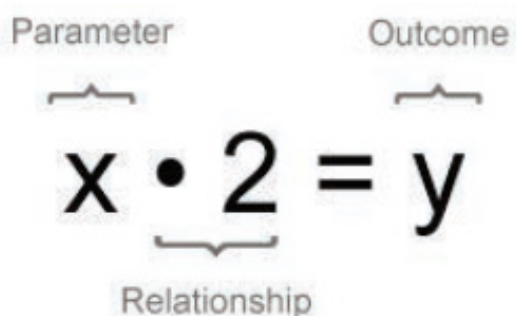
02

Computational design

In questo secondo capitolo verranno analizzati alcuni aspetti tecnologici fondanti e necessari per lo sviluppo di una buona metodologia DfMA, ovvero la modellazione algoritmica e parametrica e parti della più vasta disciplina del computational design. Questo tipo di modellazione nasce nel 1987, quando il dottor Samuel P. Geisberg rilasciò il sistema Pro/Engineer.

Questo particolare tipo di modellazione si basa sulla creazione di un vero e proprio algoritmo, che può essere scritto anche da architetti o designer, grazie a programmi come Grasshopper o Dynamo che semplificano il processo di scripting, per il quale in genere sono necessari programmatori molto esperti.

Questo tipo di modellazione funziona attraverso dei parametri, che non sono altro che variabili dipendenti collegate a



(30) Esempio di relazione esplicita (Fonte: architectonics and parametric thinking pp. 10)

un risultato per mezzo di una relazione esplicita (30) come quella nell'immagine qui sotto.

Come si può intuire il parametro in questo caso risulta essere x, per semplificare potrebbe indicare un parallelepipedo, x2 è invece la relazione che li viene applicata, potrebbe ad esempio indicare che il parallelepipedo deve ripetersi 2 volte. L'outcome invece è il risultato ottenuto tramite questa relazione, ovvero i 2

parallelepipedi, di conseguenza non è possibile modificarlo direttamente ma sarà necessario intervenire direttamente sulla formula precedentemente descritta²⁶.

Una possibile modifica potrebbe essere quella di sostituire il parallelepipedo con un cubo, ad esempio, ottenendo quindi 2 cubi come risultato finale. In alternativa si può intervenire sulla relazione x2 sostituendo la x oppure il numero, ad esempio, potrebbe diventare +2, oppure x4.

La forza reale delle equazioni parametriche, tuttavia, sta nel fatto che più equazioni possono essere correlate tra loro (31), infatti se il mio parallelepipedo (x) per

$$z / 4 = x$$

$$x \cdot 2 = y$$

(31) Esempio di equazione esplicita (Fonte: architectonics and parametric thinking pp. 10)

esistere dovesse dipendere a sua volta da una relazione, ad esempio l'unione di 2 cubi, x sarebbe a sua volta il risultato di una relazione.

Ma quindi a questo punto come potremmo definire un modello parametrico? Secondo Daniel Davis **“un modello parametrico è un insieme di equazioni che esprimono un modello geometrico come funzioni esplicite di un certo numero di parametri”**.

La differenza principale rispetto alla modellazione “classica” sta nel fatto che le modifiche non devono essere fatte applicando delle azioni all'oggetto in questione, bensì sarà sufficiente modificare numericamente uno dei parametri per

26 - Architectonics and parametric thinking pp. 10-12

27 - Architectonics and parametric thinking pp. 13-16

ottenere il medesimo risultato.

L'innovazione che sta portando questo nuovo modo di modellare all'interno dei processi creativi, sta nel fatto che ora i progettisti dovranno partire dai parametri di progettazione e non più dalle soluzioni di progetto predefinite, mettendo il progettista in una condizione di tranquillità in merito alle scelte effettuate; infatti, essendo basate su parametri difficilmente risulteranno errate.

Di fatto questo approccio ridefinisce il ruolo del progettista da designer di singoli oggetti a designer di sistemi a loro volta in grado di creare molti oggetti. Il termine che definisce questi sistemi è appunto algoritmo ovvero una sequenza di azioni che creano un risultato, un po' come una ricetta.

Il vantaggio principale di questo tipo di modellazione sta nel fatto che le modifiche che in ogni progetto si rendono necessarie in fase di progettazione, con un modello classico richiederebbe ore di lavoro per ottenere dei cambiamenti spesso minimi sul risultato finale. Con la modellazione algoritmica tutto questo si riduce alla modifica di alcuni numeri all'interno dell'algoritmo e in pochi minuti si ottiene il medesimo risultato.

Tuttavia, anche questi modelli hanno dei limiti, infatti se un modello risulta troppo complesso rischia di rompersi o portare risultati errati, per questo motivo è importante che ci sia la dovuta selezione e

suddivisione delle caratteristiche inserite all'interno di un singolo modello.

Così come riferito da Rick Smith (responsabile del processo di sviluppo e dell'implementazione del flusso di lavoro digitale presso Gehry and partners) in merito al metodo utilizzato per la progettazione del Guggenheim museum e per la Walt Disney concert hall ha affermato che i programmi utilizzati in ambito aeronautico da loro utilizzati non sono in grado di gestire tutte le parti dell'aereo in una volta sola e infatti non viene fatto, ma viene suddiviso per componenti.

Questo aspetto rende estremamente semplice creare versioni molto simili ma con piccole differenze dello stesso oggetto, allo scopo di confrontarle e scegliere poi la migliore da realizzare. Questo processo è detto versioning e rende molto facile individuare l'alternativa migliore all'interno di diverse opzioni.

Inoltre, questa stessa strategia consente di creare elementi personalizzati a livello industriale, rendendoli quindi adatti alla produzione di massa. Questo processo è detto mass-customization e dipende dalla capacità di passare senza soluzione di continuità dal virtuale al fisico, lo scambio di informazioni deve essere diretto tra macchina e computer eliminando l'apporto umano e consentendo così di evitare errori o perdite di dettagli come avviene spesso nelle fabbriche.

2.1 - Sistemi parametrici

2.1.1 - Sistemi parametrici in natura

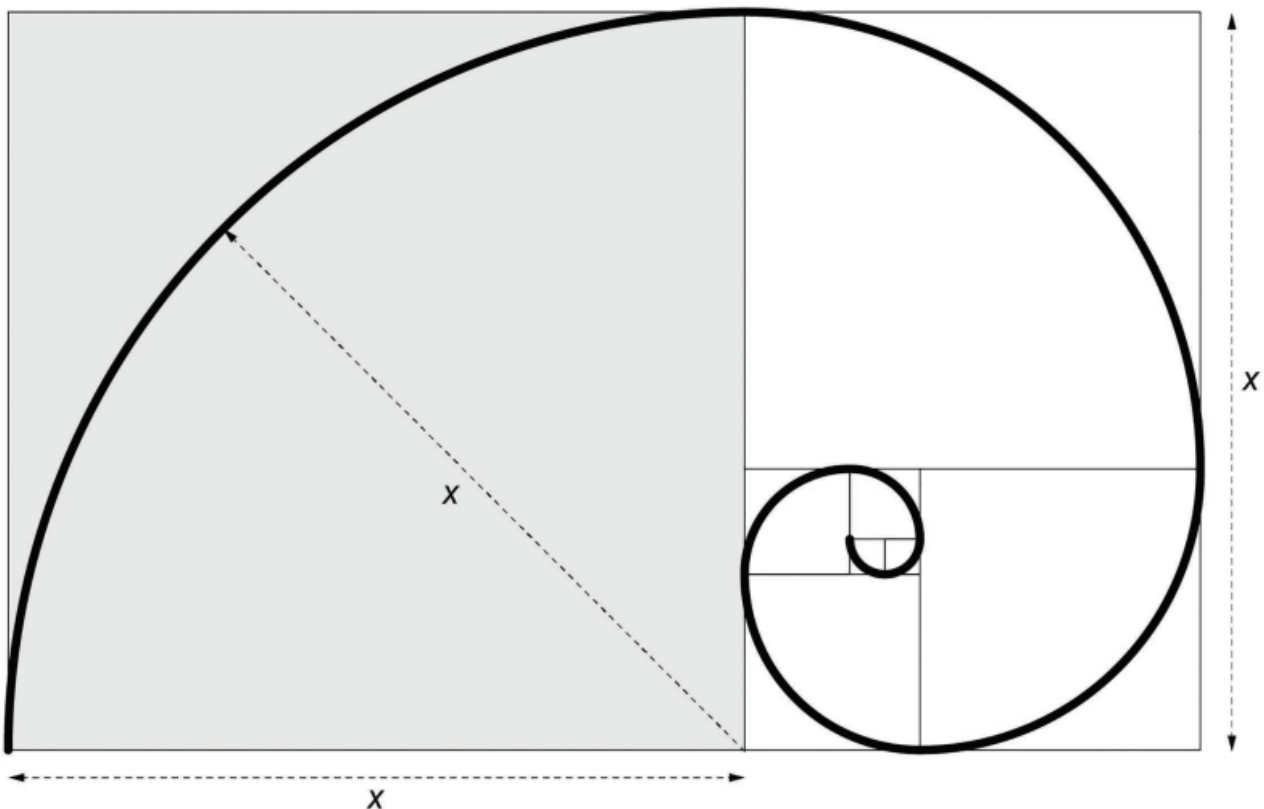
La maestra universale del linguaggio parametrico di fatto è la natura, difatti tutti i principi fondamentali del design parametrico traggono ispirazione, o cercano di imitare la natura.

Alcuni esempi possono ritrovarsi nella crescita degli alberi, fiocchi di neve o nel percorso dei funghi alla ricerca di cibo.

Fondamentalmente le regole parametriche in natura si esprimono attraverso dei pattern che sono presenti ovunque nelle simmetrie naturali, nelle dune dei deserti e nelle onde oceaniche.

Un esempio di sistema parametrico basato su forme naturali è la sequenza di Fibonacci (32) che basa ogni numero sulla somma dei due precedenti; quindi, partendo da 1 si può ottenere un rapporto del tipo: 1,1,2,3,5,8,13, ecc. Questa sequenza si può facilmente ritrovare nei con delle pigne o negli ananas, inoltre fornisce anche le basi di alcuni algoritmi informatici come la tecnica di ricerca di Fibonacci²⁸.

Questi sistemi vengono seguiti anche dall'espansione delle città, rendendone



(32) Segmento aureo (Fonte: architectonics and parametric thinking pp. 20)

28 - architectonics and parametric thinking pp. 18-20

29 - architectonics and parametric thinking pp. 18-20

prevedibile la crescita futura, un esempio di questo riguarda la città medioevale, la quale si espande avendo come indicatori o per meglio dire relazioni il clima, topografia, i nodi di trasporto e la presenza di materiali edificabili.

Le città greche invece utilizzavano dei punti focali per orientare l'edificato, punti che nella modellazione parametrica sono detti "attrattivi".

Guardando elementi più piccoli come, ad esempio, le automobili è possibile notare come ci siano degli elementi fissi che non possono essere modificati, come ad esempio il numero delle ruote o la posizione del parabrezza. Questi elementi forniscono appunto dei vincoli all'interno di un sistema di modellazione parametrico

che può essere adattato sfruttando tutti gli altri parametri variabili presenti all'interno del progetto.

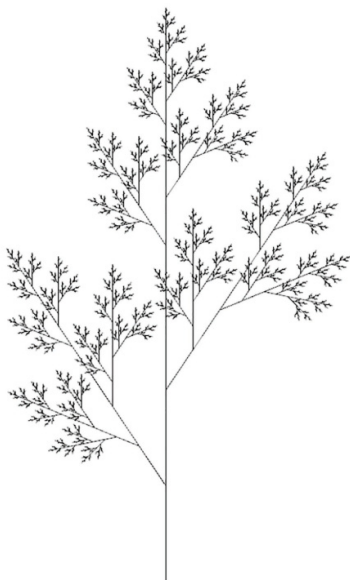
Inoltre, anche l'ergonomia stessa dei sedili o più in generale di una seduta viene ottenuta seguendo quelle che sono le proporzioni naturali del corpo umano, di fatto l'ergonomia è un sistema parametrico che utilizza le proporzioni del corpo umano come input e cercando di migliorarne la postura come output.

Studiando appunto questi algoritmi naturali i ricercatori hanno prodotto degli algoritmi che li riproducono in maniera fedele, alcuni tra i più comuni sono elencati all'interno dei seguenti sotto paragrafi.

2.1.1.1 - Ramificazione

La crescita di un albero è uno degli esempi più semplici di ricorsione, che in informatica indica un processo in cui una funzione si richiama direttamente. In questo caso l'albero continuerà a crescere fino a quando non gli verrà detto di fermarsi, o meglio il peso diventerà eccessivo da sostenere per la struttura. Le regole sono 2: prendere un elemento e dividerlo in 2 o più sub-elementi; ripetere questo processo per ogni sub elemento fino a quando non viene soddisfatta una regola²⁹.

Un ottimo esempio di algoritmo di ramificazione è un L-system, descritto da Aristid Lindermayer nel 1968 per descrivere il processo di crescita delle piante. È costituito da un sistema di riscrittura di fibre parallele, un testo iniziale potrebbe essere dato dalle uguaglianze $x = xy$ e $y = yx$, in questo modo si ottiene che a inizio testo si avrà x , che alla prima interazione diventerà xy , alla seconda $xyyx$ e così via [33].



(33) Esempio di parametrizzazione di un albero attraverso Grasshopper
(Fonte: architectonics and parametric thinking pp. 25)

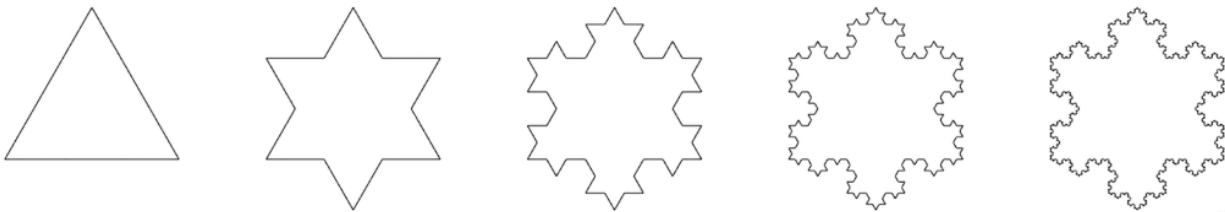
2.1.1.2 - Frattali

Gli L-system appartengono alla categoria dei frattali, termine coniato da Benoit Mandelbrot nel 1975 che deriva dal latino fractus (rotto o fratturato). Secondo Mandelbrot un frattale è una forma geometrica ruvida o frammentata che può essere divisa in parti, ciascuna delle quali è una copia ridotta delle intere²⁸.

I frattali aiutano a definire geometrie troppo irregolari per essere descritte in termini euclidei semplici, inoltre presentano una struttura più fine a scale, una natura auto simile e definizione semplice e ricorsiva.

I frattali aiutano a definire geometrie troppo irregolari per essere descritte in termini euclidei semplici, inoltre presentano una struttura più fine a scale, una natura auto simile e definizione semplice e ricorsiva.

Uno dei primi frattali ad essere descritto è il fiocco di koch, che viene costruito su più interazioni, partendo da un triangolo equilatero (34) e aggiungendo nuovi triangoli sui lati. Utilizzando un input triangolare le istruzioni dell'algoritmo causano un perimetro infinitamente lungo e complesso.



(34) Esempio di creazione di frattali (Fonte: architectonics and parametric thinking pp. 26)

Un esempio concreto dell'applicazione di questo tipo di modellazione lo si può ritrovare nei progetti del professor Benjamin Dillenburger, docente presso l'ETH di Zurigo, che propone opere d'arte stampate in 3D, utilizzando proprio i frattali come base per le sue opere.

Attraverso la stampa 3D, infatti, è possibile sfuggire ai vincoli di dettagli molto complessi da fabbricare e riuscire a realizzare opere di infinita complessità come appunto possono essere le stampe realizzate dal professor Dillenburger (35).



(35) Digital grotesque 2, esempio di applicazione di frattali (Fonte: Designboom.com)

28 - architectonics and parametric thinking pp. 25

29 - architectonics and parametric thinking pp. 26

2.1.1.3 - automi cellulari

Questi sistemi sono basati sugli studi di Stanislaw Ulam e John Von Neumann negli anni 40 su concetti di robot autosufficienti²⁹.

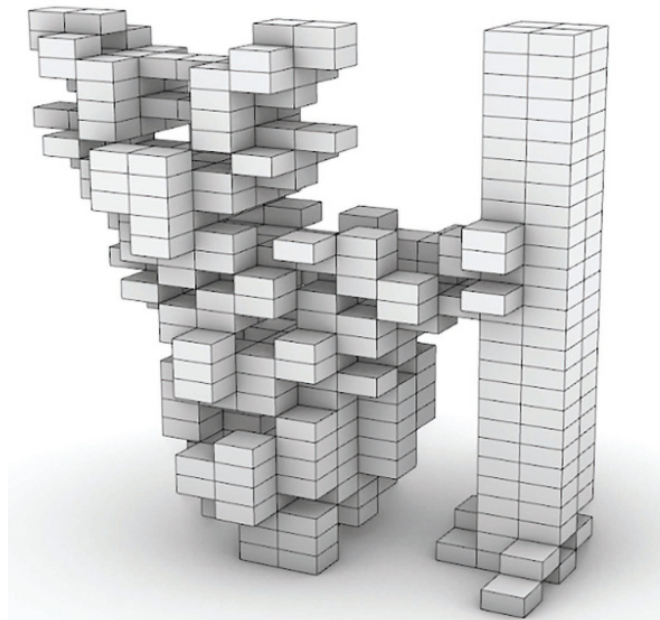
Un automa cellulare include tre fattori:

- Una griglia di celle
- Ogni cella con uno stato acceso/spento o vero/falso
- Ogni cella con una relazione con quelle vicine in un cluster.

Ogni cellula, in questo modo, cambierà il suo stato in base alla regola di input e agli stati nelle sue vicinanze.

Un esempio noto di questo processo è il "game of life" di John Horton Conway nel 1970 [36], l'evoluzione di questo sistema si basa sull'input iniziale, l'esito si ottiene tramite più interazione nel set di regole.

- Una cellula viva con due o tre vive vicine non sopravviverà
- Una cellula morta con tre vicine vive si anima
- Altrimenti la cellula muore o rimane morta



(36) Esempio di modello realizzato con automi cellulari (Fonte: architectonics and parametric thinking pp. 26)

2.1.2 - Gestione degli elementi in software parametrici

Ogni elemento architettonico o in generale relativo ad un progetto è composto da criteri parametrici che ne compongono le dimensioni, ognuno di questi sarà dotato di un'altezza, una lunghezza e una larghezza. Il software parametrico ci offre la possibilità di iterare velocemente questi cambiamenti in questo modo il progettista sarà in grado di comprendere appieno i cambiamenti visivi che questo cambiamento porterà complessivamente nel progetto³⁰.

Un primo tipo di oggetti sono gli oggetti planari, possono essere cornici o solidi e possono essere suddivisi in tre categorie:

- composti da estrusioni dritte
 - composti da estrusioni formate (curve)
 - composti da estrusioni dritte e formate
- Organizzare questi elementi significa mettere ordine tra elementi che prima non si parlavano tra loro. Esistono sistemi di ordinamento grazie ai quali i progettisti mettono ordine all'interno di sistemi

Ogni elemento architettonico o in generale relativo ad un progetto è composto da criteri parametrici che ne compongono le dimensioni, ognuno di questi sarà dotato di un'altezza, una lunghezza e una larghezza. Il software parametrico ci offre la possibilità di iterare velocemente questi cambiamenti in questo modo il progettista sarà in grado di comprendere appieno i cambiamenti visivi che questo cambiamento porterà complessivamente nel progetto.

Organizzare questi elementi significa mettere ordine tra elementi che prima non si parlavano tra loro. Esistono sistemi di ordinamento grazie ai quali i progettisti mettono ordine all'interno di sistemi parametrici, questi sistemi possono essere ridotti a tre tipologie primarie: primari, centri, linee e reti.

Una caratteristica di un insieme ordinato è se gli elementi sono disposti regolarmente o irregolarmente all'interno di sistemi di ordinamento centrici, lineari o a rete.

Oltre alle dimensioni un altro elemento fondamentale è la distanza tra gli oggetti, che di fatto è un parametro e contribuisce in maniera fondamentale al risultato finale di progetto.

Tutti gli oggetti architettonici sono forniti di elementi formali limitati che possono essere: equilibrio, scala, proporzione, simmetria, luce, spazio, forma, linea colore, materiale, ritmo e texture. Questi possono essere influenzati parametricamente, in seguito sono elencati dei metodi con cui questi possono contribuire ed essere trasformati seguendo un processo parametrico.

Equilibrio: il peso visivo di una parte del progetto è uguale all'altro lato, all'interno di un software parametrico questi elementi possono essere proporzionati separatamente.

Scala: è la relazione di un oggetto e un altro, o le dimensioni relative di un oggetto rispetto ai nostri corpi. In un modello parametrico può essere riassetata con un semplice scorrimento.

Proporzione: si riferisce anche alle dimensioni ma si differenzia dalla scala in quanto è una relazione tra due parti di un interno rispetto all'esterno, può essere definita all'interno di un modello parametrico come un membro unico, in modo da modificarla facilmente senza influenzare le altre parti del modello.

Simmetria: Corrispondenza esatta tra due lati di un oggetto lungo un asse centrale, all'interno di un modello si può creare uno script parametrico che permetta il controllo degli elementi di un oggetto.

Spazio: Lo spazio è l'elemento essenziale all'interno di un'architettura ed è possibile modificarlo attraverso processi di scalatura, aggiunta, sottrazione, ecc.

Forma: La forma è un contorno chiuso e viene definita all'interno del modello parametrico sia attraverso lo script che attraverso azioni fisiche.

Linea: le linee sono il collegamento tra due punti, all'interno di un modello parametrico è possibile lavorare a scala della linea, del punto o dell'elemento individuale.

Ritmo: si crea grazie all'interazione schematica di tutti gli attributi formali, il modello parametrico ne consente una gestione diretta delle dimensioni degli elementi.

Tuttavia, le potenzialità della modellazione

30 - architectonics and parametric thinking pp. 28-37

31 - architectonics and parametric thinking pp. 39-40

32 - Vans.it

parametrica non si limitano ad un campo strettamente formale, bensì possono essere gestite questioni inerenti ai costi di produzione, alla materialità, alla programmazione e allo sviluppo, per

questo motivo la progettazione e la modellazione parametrica dovrebbero andare di pari passo, per integrare al meglio questo nuovo sistema all'interno del metodo di lavoro di ogni progettista.

2.2 - Metadesign e mass customization

La modellazione parametrica come accennato nei precedenti paragrafi ha un ruolo fondamentale nell'aiutare i progettisti a velocizzare le variabili dei loro progetti, avvicinando i dati al mondo del design.

Di conseguenza proprio grazie ai nuovi software di modellazione parametrica sono nati questi nuovi modi di produrre, il metadesign e la mass-customization

2.2.1 - Metadesign

Per spiegare in parole semplici cosa sia il metadesign, possono essere presi ad esempio i moderni social media o i servizi di streaming musicale. Questi servizi non fanno altro che vedere i contenuti o i brani preferiti da un determinato utente e riproporne in primo piano altri simili, in modo da migliorare la sua esperienza e tenerlo per più tempo possibile collegato al servizio³¹.

Difatti il metadesign è proprio la creazione di una modalità di integrazione al fine di creare ambienti in cui le persone possono creare oggetti seguendo delle indicazioni ben precise, un po' come fanno gli algoritmi dei social apprendendo informazioni sugli utenti.

L'effetto causato da questo metodo di lavoro è evidente negli esiti che si connotano di forme sempre più particolari e un'evoluzione pressochè continua negli esiti dei prodotti.

Grazie a questo approccio potrebbe delinearsi un futuro in cui il ruolo dell'architetto possa essere integrato a pieno dal gusto personale del committente; infatti, potrebbe ridursi a fornire i parametri necessari a un buon funzionamento dell'edificio e lasciare al cliente la totale libertà di scelta su tutti gli aspetti possibili, garantendo in ogni caso, grazie ai parametri impostati, la realizzabilità dell'opera.

Un esempio di metadesign anche se non a scala architettonica, possono essere ad

esempio tutti quei brand di abbigliamento o di altro tipo che consentono la personalizzazione di un colore o di più parti di un capo.

Un esempio³² molto noto e da tutti usufruibile è la personalizzazione di scarpe, in particolare sul sito di Vans è possibile creare quasi da zero il proprio paio di scarpe (37).

Vengono imposti solo alcuni vincoli, come ad esempio il tipo di modello (che deve essere già in produzione) e per ogni singola parte della scarpa si possono scegliere solo un certo numero di colori che possono essere da un minimo di 2 per l'interno della scarpa ad un massimo di 22 per altre parti come ad esempio la tomaia.



(37) Punto di partenza da cui personalizzare le proprie Vans (Fonte: Vans.it)

2.2.2 - Mass-customization

Le tecniche di produzione negli ultimi due decenni sono notevolmente progredite, ad oggi risultano essere principalmente suddivise in tre categorie:

Prodotto standardizzato: ha attributi predefiniti, dando una sola scelta al cliente.

Prodotto configurato: consente di scegliere tra poche opzioni messe a disposizione

Prodotto parametrizzato: questo prodotto essendo progettato tramite processi di modellazione parametrica consente al cliente di modificare ampiamente le sue componenti, questo dà importanza alla scelta del cliente tenendo comunque il budget di produzione invariato³³.

Negli ultimi anni diverse grandi aziende hanno sperimentato questa strategia di produzione, ad esempio la Toyota ha prodotto un modello di autovettura, la Scion [38], interamente basata sulla personalizzazione del cliente.

Negli ultimi anni diverse grandi aziende hanno sperimentato questa strategia di produzione, ad esempio la Toyota ha prodotto un modello di autovettura, la Scion, interamente basata sulla personalizzazione del cliente. Anche il gruppo Lego ha consentito di creare digitalmente dei pezzi personalizzati da farsi consegnare a casa.

In un talk TED dedicato alla stampa 3D, Lisa Hauruni ha descritto la produzione additiva come un processo mediante il quale gli utenti elaborano dati digitali e parametrici, per arrivare al risultato da loro voluto.

L'approccio che si sta tentando di fatto volge a portare gli utenti a mettere a frutto le loro idee, pensando loro stessi al design del prodotto senza avere nessuna competenza specifica, competenza che viene introdotta dai programmi di modellazione.



[38] Toyota Scion (Fonte: it.motor1.com)

33 - architectonics and parametric thinking pp. 41-42

34 - architectonics and parametric thinking pp. 44-46

2.3 - Nuove tecniche di produzione

Grazie alla modellazione parametrica oltre a cambiare le strategie di produzione sono state rese possibili o migliorate nuove tecniche di produzione che verranno presentate nel seguente capitolo e che

sono state approfondite anche attraverso la visita in prima persona della conferenza Fabbricate, organizzata nell'aprile 2024 a Copenaghen.

2.3.1 - Stampa 3D

Come detto in precedenza il mestiere dell'architetto si sta evolvendo nella progettazione di oggetti personalizzati e singolari per ogni cliente³⁴.

Gli strumenti digitali contemporanei come, ad esempio, stampa 3D e CNC integrate in un processo di produzione parametrico possono portare a innovazioni non indifferenti a livello visivo tra un oggetto e l'altro seppur prodotti in serie.

Infatti, il software parametrico funge da "differenziatore" all'interno di un sistema di dati, consentendo così la modifica in brevissimo tempo di un prodotto, in questo senso sia la stampa 3D che le CNC, ma anche i laser cutter sono molto efficienti.

Attualmente nel campo della stampa 3D si stanno ottenendo risultati molto importanti riuscendo a stampare sempre più materiali.

Il fatto di dover lavorare con una stampante 3D ci impone delle riflessioni necessarie e dei vincoli in merito alla modellazione dell'oggetto, in particolare uno dei punti critici degli attuali sistemi di stampa 3D è

di dover necessariamente stampare seguendo un solo asse.

Per trovare delle risposte al tema, il modo migliore è provare a realizzare un oggetto stampandolo in 3D, in questo caso verrà presa ad esempio una sedia realizzata interamente con la stampa 3D.

Questa sedia detta "Type chair" è costituita da lettere intrecciate tra loro formando una specie di nido (39).

L'aspetto parametrico di questa sedia consentiva agli utenti di inserire all'interno qualsiasi lettera volessero, inoltre è possibile scegliere anche il carattere desiderato, ottenendo un risultato sempre simile ma ovviamente con lettere differenti. Il risultato si ottiene in tempo reale consentendo una rapida visualizzazione delle modifiche applicate, inoltre erano forniti anche tempi e costi di stampa.

I vincoli impostati riguardano principalmente le capacità meccaniche della sedia; infatti, le gambe dovevano essere necessariamente più dense rispetto allo schienale, per evitare dei cedimenti.



(39) Sedia stampata in 3D con lettere come pattern (Fonte: architectonics and parametric thinking pp. 46)

Questo processo si è dimostrato molto efficace fornendo diverse soluzioni valide [40] con diversi design ma risultando sempre equiparabili e immediatamente riconducibili alla stessa “linea di oggetti”, questo garantisce ai clienti di inserire una propria scelta stilistica nell’oggetto senza dover perdere troppo tempo nelle fasi di progettazione che normalmente necessita

un qualsiasi tipo di progetto.

I progettisti parametrici avranno un’enorme responsabilità nei progetti futuri, comprendendone al meglio il DNA e comprendendo le implicazioni di ogni variante di progetto. Di fatto avranno il compito di progettare le regole che comporranno un oggetto.



[40] Diverse versioni della sedia stampata in 3D (Fonte: architectonics and parametric thinking pp. 45)

2.3.1.1 - Stampa 3D applicata all’edilizia

Ad oggi la stampa 3D sta trovando le prime applicazioni concrete nel campo edilizio con alcuni esempi di case già stampate e disponibili sul mercato.

I materiali ad oggi più utilizzati sono argilla e cemento in quanto sono i materiali che più facilmente si adattano ad essere estrusi senza particolari consumi di energia, come avviene ad esempio nel caso dell’acciaio.

Il workflow tipico per stampare una casa in 3D in realtà è molto simile a quello utilizzato in qualsiasi altro campo, ovvero si parte

da un modello realizzato tramite un software CAD, per poi passare ad un file STL che a sua volta viene letto ed elaborato da uno slicer che trasforma il modello in un percorso che la stampante può seguire per realizzare la stampa³⁵.

Le stampanti più utilizzate ad oggi sono montate in modo da consentire l’innalzamento graduale dell’ugello di stampa per seguire lo sviluppo della stampa tramite l’asse Z e da dei binari laterali su cui scorre l’ugello per seguire gli assi del piano cartesiano X e Y³⁶.

35 - A Critical Review of Construction Using 3D Printing Technology pp. 2-3

36 - Development of 3D printers for concrete structures: mix proportion design approach and laboratory testing pp. 3-8

37 - Toward automated construction: The design-to-printing workflow for a robotic insitu 3D printed house

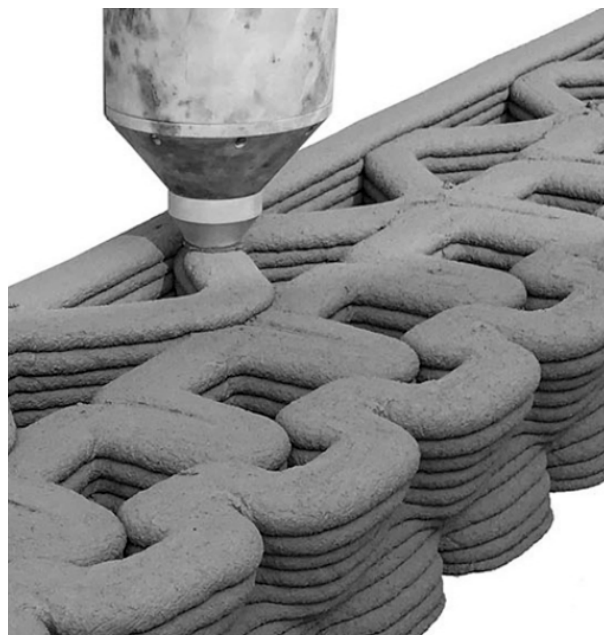
Il vantaggio principale di questo modello di produzione è la riduzione dei tempi, in particolare esistono esempi di case negli emirati arabi stampate in appena 17 giorni, tuttavia non è l'unico vantaggio offerto. Un altro aspetto molto importante è la necessità di avere pochissima manodopera in cantiere riducendo in questo modo sia i rischi legati alla sicurezza, sia il costo di produzione.

Tuttavia, la manodopera impiegata dev'essere altamente specializzata, infatti avrà il compito di formare i supporti necessari alla stampa in maniera estremamente precisa, in caso di imprecisioni, la stampa potrebbe fallire costringendo l'impresa a ricominciare il lavoro da capo e a buttare quello svolto fino a quel momento³⁷.

Le pareti forate e realizzate delle case stampate in 3D in genere sono forate e sono realizzati con un disegno interno pensato appositamente per garantirne la stabilità strutturale. Questo si traduce in un ulteriore vantaggio sia dal punto di vista del risparmio del materiale, sia perchè consente di inserire in queste aperture tutti gli impianti, i rinforzi in acciaio necessari al calcestruzzo e altre applicazioni necessarie.

La velocità di estrusione del calcestruzzo varia da 50 mm/s a 500 mm/s ed è controllato applicando diversi tassi di pressione, che aiutano a ottenere la forma desiderata. Nella stampa 3D, vengono utilizzati numerosi additivi chimici per ottenere le prestazioni necessarie al cemento al fine di ottenere una stampa. La forma e le dimensioni dell'ugello sono fondamentali, infatti da questo può variare il rapporto acqua su cemento (a/c) necessario, che viene regolato attraverso il mix design (di solito intorno a 0,4) e le dimensioni dell'aggregato non devono superare i 4-6 mm per evitare il blocco dell'ugello che a sua volta può misurare da 20 a 40 mm.

Gli strati si comprimono sotto il peso proprio e la pressione idrostatica aumenta con l'altezza dell'edificio aumenta, il che



[41] Stampa 3D di una parete (Fonte: Toward automated construction: The design-to-printing workflow for a robotic in-situ 3D printed house pp. 10)

aumenta la distanza tra l'ugello e superficie di lavoro, modificando così la forma del depositato [41].

Inoltre, additivi acceleranti, che aiutano ad accelerare l'indurimento il processo dello strato inferiore per sopportare un carico crescente, dovrebbero essere aggiunti per evitare deformazioni strutturali. Uno degli elementi fondamentali per la buona riuscita di una stampa in 3D è sicuramente il mix design, ovvero il progetto della miscela adatta non più solo per raggiungere gli standard di resistenza meccanica e durabilità ma anche di avere la necessaria fluidità e resistenza della pasta fresca durante la fase di stampa. il MIX DESIGN assume un significato nuovo giusta miscela tra cemento e suoi aggregati che devono essere in grado di garantire un'ottima fluidità e una presa molto rapida per evitare che il peso degli strati successivi possa portare al crollo della stampa, l'aggiunta di additivi organici quali i plasticizzanti, aggiunte minerali (quali cenere volante) ed eventuali fibre naturali o sintetiche di rinforzo permette di raggiungere tali obiettivi.

Anche nel caso di stampa 3D, così come nel caso di un getto tradizionale di

cemento fresco è buona norma praticare degli slump test, per verificare che le prestazioni del calcestruzzo corrispondano a quanto voluto dal progettista.

Le tecniche di stampa 3D ovviamente non si limitano al cemento e hanno applicazioni con moltissimi materiali differenti tra loro, che possono essere sia metallici che polimerici, ma anche naturali, come ad esempio nel caso dell'azienda WASP³⁸ che stampa utilizzando l'argilla [42]. Un'altra tecnica molto interessante riguarda la stampa con scarti di materiali lapidei come marmo o lo stesso cemento tritato finemente e riattivato tramite additivi.

In questo senso una start up pugliese chiamata TRIP ha iniziato a stampare dei piccoli elementi decorativi utilizzando scarti di produzione provenienti dal marmo e additivi leganti, con ottimi risultati.

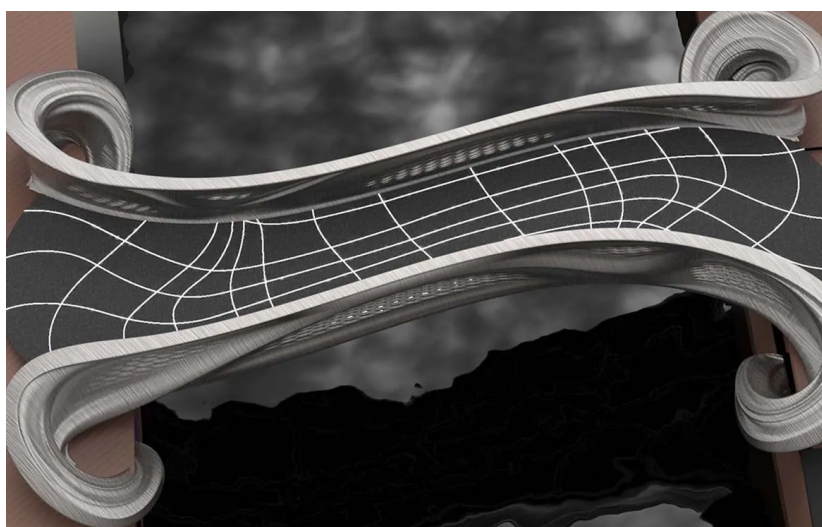
Ovviamente la stampa 3D in architettura può essere utile anche stampando metalli o polimeri, ma se nel secondo caso le applicazioni sono limitate quasi esclusivamente alla stampa di modelli 3D in scala, nel primo è possibile pensare a giunzioni o a parti importanti di edificio



[42] Casa stampata in argilla dall'azienda WASP (Fonte: Replicatore.it)

in metallo interamente stampate in 3D.

Un esempio di questo è il ponte realizzato ad Amsterdam, si tratta di un ponte di 12 m stampato attraverso un sistema di stampa multi asse, ovvero in grado di lavorare su più piani contemporaneamente [43]. La lega in acciaio integrata con dei sensori che consentono allo studio di progettazione di monitorare la situazione a livello strutturale, spostamento e vibrazione e misureranno fattori ambientali come la qualità dell'aria e la temperatura³⁹.



[43] Ponte stampato in 3D Amsterdam (Fonte: Calcolostrutturale.com)

38 - www.replicatore.it

39 - MX3D.com

40 - architectonics and parametric thinking pp. 64-73

2.3.2 - CNC e taglio laser

Con lo sviluppo della tecnologia informatica a partire dagli anni 60 le industrie aereeospaziali e automobilistiche hanno iniziato a implementare la tecnologia a controllo numerico all'interno delle loro catene di montaggio, la differenza fondamentale rispetto alla stampa 3D sta nel fatto che questi lavorano per sottrazione e non per addizione.

Inizialmente il sistema era molto lento e laborioso dovendo basarsi su schede forate che venivano poi lette dal macchinario; tuttavia, qui l'errore umano e la lentezza nel creare le schede rendevano il sistema non eccessivamente vantaggioso rispetto ai sistemi classici.

Fu possibile sfruttare appieno le potenzialità del controllo numerico solo con l'arrivo dei sistemi CAD, per il disegno assistito e CAM per la produzione assistita al computer.

Dagli anni 70, ovvero da quando il costo dei computer ha iniziato a diminuire, le vere potenzialità del controllo numerico sono apparse immediatamente evidenti.

Queste tecnologie ad oggi sono presenti all'interno di tutte le industrie artigianali e industriali e ogni anno apportano miglioramenti e rapidità allo svolgimento del lavoro.

Fin dalla loro nascita i primi software CAD, nello specifico Sketchpad hanno da subito iniziato ad utilizzare formule parametriche che erano dette vincoli atomici, tuttavia con l'arrivo di autocad questi vennero totalmente rimossi.

I vincoli parametrici torneranno in uso in campo architettonico solo a metà degli anni 90 grazie al lavoro di Frank Gehry, ma non saranno di uso comune prima degli anni 2000 con l'arrivo di software come Rhinoceros e Grasshopper.

Utilizzando le tecnologie CNC e CAM dell'epoca i progettisti dovevano obbligatoriamente essere in grado di riconoscere i vincoli imposti dalla fabbricazione.

Tuttavia, lavorare attraverso software

parametrici e macchine a controllo numerico consente la creazione di forme molto variabili e differenti anche nello stesso edificio, realizzando un elevato numero di componenti tutti diversi l'uno dall'altro.

Un esempio di sistema che beneficia molto di questa tecnologia è quello delle abitazioni modulari, infatti le piccole variazioni necessarie alla realizzazione di edifici modulari, come ad esempio un posizionamento differente dei fori per i bulloni, oppure la necessità di variare leggermente le dimensioni di un tramezzo, sono facilmente gestibili tramite sistemi parametrici, inoltre una macchina a controllo numerico è in grado di eseguire lo stesso processo anche con dimensioni leggermente diverse senza grandi variazioni in termini di tempo.

La fabbricazione tramite sistemi CNC, come nel caso della stampa 3D consente di lavorare con moltissimi tipi di materiali, ma questo non sempre è un vantaggio; infatti, per poter lavorare efficacemente un materiale è necessario conoscerne molto bene i limiti e le potenzialità.

I materiali attualmente più utilizzati con questo tipo di processo sono i materiali metallici; infatti, è possibile tagliare tramite taglio laser lastre di metallo in particolare laminati (che possono essere in acciaio, ferro o altre leghe) con estrema facilità sfruttando un sistema basato sul piano cartesiano. Ma non solo, infatti di recente si stanno utilizzando anche tagli laser a controllo numerico anche per tubolari nei quali possono essere inserite asole o fori con estrema semplicità. Inoltre, questa tecnologia può essere applicata anche a macchinari per la piegatura dei materiali metallici.

Un'altra industria che beneficia in maniera molto importante di questa tecnologia è sicuramente quella del legno, ormai in tutte le falegnamerie esistenti sono presenti macchinari a controllo numerico in grado di fresare, forare e tagliare il legno⁴¹.

La Riva 1920 in particolare utilizza una macchina a controllo numerico a 6 assi (il numero degli assi indica su quanti piani la macchina è in grado di lavorare) per produrre degli sgabelli interamente ricavati da blocchi di legno massello di cedro (44-45).

Altri materiali che possono essere lavorati

con una macchina a controllo numerico sono la pietra, e i materiali polimerici. Tuttavia questi vengono utilizzati principalmente per realizzare degli stampi o delle dime per la lavorazione di altri materiali, questo anche a causa del fatto che richiedono tempi più lunghi per la lavorazione.



(44-45) Esempi di sedute realizzate dalla Riva 1920 (Fonte: Riva1920.it)

2.3.2.1 - Intervista a Thomas De Gaspari, artigiano del settore metalmeccanico

L'intervista che segue è stata realizzata a Thomas De Gaspari, che da circa venticinque anni lavora nel settore metalmeccanico dirigendo le aziende OMAL e SMAT, entrambe aziende lissonesi, che si occupano di taglio piega e saldatura di elementi semi lavorati in metallo (dal classico ferro all'acciaio).

Queste aziende hanno iniziato a lavorare in questo settore circa quaranta anni fa, per questo motivo hanno avuto modo di sperimentare sia i metodi di lavorazione "classici", sia i metodi innovativi che sfruttano tecnologia a controllo numerico. Nello specifico come macchinari a controllo numerico dispongono di un taglio laser per fogli di lamiera, un taglio laser per lamiere tubolari, una piegatrice e una piega tubi. Questa intervista è molto importante per capire quali sono i vantaggi concreti portati dall'avvento dei macchinari a controllo numerico, ma anche per comprenderne i limiti e le difficoltà relative al loro utilizzo.

Quali sono i vantaggi, in termini di risparmio di tempo, errori e precisione, ottenuti grazie ai macchinari a controllo numerico, rispetto ai macchinari classici?

La velocità in termini di produzione e la possibilità di margine di errore, ovvero abbassa esponenzialmente rispetto ad un metodo classico. Anche un pezzo molto semplice, se fatto a mano è soggetto a errori compiuti dall'operatore di vario tipo, ad esempio un operatore poteva montare il pezzo al contrario sul fermo e tagliarlo in maniera errata o invertita.

Con la macchina invece una volta realizzato il disegno, fa esattamente quello che tu gli dici, non è possibile farlo al contrario. Ovviamente di base c'è sempre da considerare l'errore umano in fase di progettazione, ovvero se sbaglia un disegno che viene poi replicato 1000 volte dalla

macchina, la macchina sbaglierà il pezzo 1000 volte. Per evitare questo tipo di errori c'è un procedimento molto specifico da seguire:

- Si fa una pre-campionatura, ovvero realizzo un disegno, lo mando in macchina, realizzo un paio di pezzi, verifico che tutte le dimensioni siano congruenti al disegno.
- Faccio una campionatura per vedere che in fase di montaggio, ovvero assemblato con le altre parti, vada tutto bene.
- A questo punto faccio la serie di pezzi con il numero esatto richiesto dal cliente.

Questo all'inizio ti porta via del tempo ma alla lunga porta dei grossi vantaggi.

Ovviamente nel momento in cui si vanno a cambiare delle geometrie che creeranno un nuovo file, è necessario annotare le modifiche effettuate nel cartiglio del disegno, questo perché se il cliente volesse tornare indietro sarebbe molto semplice recuperare la forma originale.

Inoltre, c'è il fattore di controllo che è molto importante; infatti, se ad esempio di realizzano 1000 pezzi, capita spesso che un pezzo presenti dei difetti di fabbricazione, dovuti a un piccolo malfunzionamento del macchinario, nel caso del taglio laser potrebbero crearsi dei bordi irregolari; ad esempio, o non tagliarsi completamente.

Questi errori possono essere causati da un ugello consumato o da altri piccoli difetti causati dall'usura dei componenti del macchinario.

Questo controllo consente di mantenere uno standard qualitativo del prodotto più alto.

Il vantaggio di avere una macchina a controllo numerico è che comunque tutti questi passaggi si velocizzano, portando altra produttività, permettendo alla persona che fa andare la macchina di fare altre lavorazioni mentre la macchina porta a termine il lavoro.

Questo ovviamente riduce i costi, ovviamente d'altra parte hai dei costi aggiuntivi che le macchine normali non

hanno, come ad esempio un prezzo di acquisto più elevato, gli alti consumi rispetto alle macchine tradizionali e la manutenzione.

Infatti, i costi dei singoli componenti è molto più alta, banalmente un pezzo che sostiene l'ugello può costare fino a 90 euro. Il gioco comunque vale la candela perchè la tecnologia ti dà una grossa mano nel controllo della lavorazione.

Prima del taglio laser era necessario realizzare degli stampi, e per pochi pezzi non ne valeva la pena perchè il costo dello stampo era estremamente elevato e non si riusciva ad ammortizzare, per cui i costi dei singoli pezzi sarebbero stati molto elevati. Inoltre, se il cliente ti chiede una modifica devi modificare lo stampo e nel momento in cui si torna alla versione precedente va cambiato e rifatto da capo, con tutti i costi che ne conseguono.

Noi che abbiamo sempre rifornito gli stampisti abbiamo notato che ormai anche i lotti da 6 o 7000 pezzi vengono richiesti fatti a laser, perchè non si vuole più fare gli stampi, visti i costi molto superiori, inoltre la possibilità di modificare un particolare rende inclini ad utilizzare un taglio laser.

Negli anni in cui ho iniziato a lavorare, nel '98, si utilizzavano gli stampi e non si cambiavano mai, poi con l'ingresso nel mercato dei macchinari a controllo numerico i clienti hanno avuto la possibilità di richiedere piccole variazioni ai prodotti, anche per un singolo pezzo che magari era destinato ad uno specifico cliente che aveva un'esigenza particolare.

Di fatto il lavoro ad oggi è più difficile in ufficio che in officina, perchè non c'è più la difficoltà di dover preparare più macchine, però dovrò preparare più disegni per una sola macchina.

Inoltre, con i programmi che abbiamo

adesso che calcolano da soli cose come il fattore K, ovvero la quantità di materiale da aggiungere ad un pezzo per evitare che piegandolo diventi più corto; tuttavia, ogni software ha il proprio fattore che è leggermente diverso rispetto a quello degli altri.

Inoltre, il fattore K non tiene conto della rigidità del materiale; infatti, calcola lo spessore del materiale e quanto è il raggio di piega.

Quindi se faccio la stessa piega con un materiale diverso devo avere l'esperienza necessaria per capire come regolare il fattore, magari facendo delle prove specifiche per il progetto in questione.

Per quanto riguarda poi dei progetti in cui si hanno varie tipologie di pezzi simili tra loro è fondamentale incidere o comunque segnare i pezzi con delle sigle immediatamente riconoscibili per evitare di confondere chi assembla poi i vari pezzi. Questo vale anche per l'inclinazione dei pezzi, perchè se ad esempio una trave viene montata al contrario ovviamente è possibile che non si giunti con i rispettivi incastri, o comunque crei altri problemi.

Ad esempio, a noi è capitato un cliente che ci ha chiesto diversi staffaggi per diversi tipi di automobili, mi ha chiesto di fare tutti i tagli e per esigenze di costo mi ha detto di dargli tutto mischiato e poi avrebbe diviso lui i pezzi, si parla di 600 piastre tutte diverse, il suo operatore ha dovuto misurare ogni singola piastra per capire a quale modello appartenesse, ovviamente ha perso moltissimo tempo.

Quindi abbiamo deciso di incidere a laser su ogni pezzo il codice del modello ed è stato sufficiente leggere il codice per dividere in maniera corretta tutti i pezzi.

Una cosa che in futuro sicuramente potrebbe tornare utile anche in ottica di di calcolare il risparmio energetico potrebbe essere l'intelligenza artificiale, che secondo me anche una piccola impresa sarà avvantaggiata nel gestire delle questioni più o meno complesse, semplificando e velocizzando molti processi.

Secondo te c'è qualche altro argomento interessante di cui non abbiamo ancora parlato?

Secondo me la cosa importate da illustrare è come è cambiato il modo di lavorare negli ultimi anni, cioè adesso una cosa molto importante è che la parte progettuale conta molto di più rispetto a trenta anni fa, rispetto al lavoro manuale.

Cioè un'azienda in generale va bene se c'è

Come viene gestita la messa in macchina dei pezzi, in modo da utilizzare il minor spazio possibile?

Questo processo è interamente gestito dal software, ti dà la possibilità di creare nesting perfettamente funzionali in pochi secondi, ovviamente è possibile farlo manualmente, ma io probabilmente per disporre

una volta i pezzi ci metterei cinque minuti, lui in un minuto produce 30 alternative valide. Inoltre mi consente di scegliere quali pezzi utilizzare in quali fogli, quindi se ho magari 10 disegni diversi posso scegliere quali mettere in un foglio e quali in un altro, tutto in pochi secondi.

Per quanto riguarda la sicurezza, rispetto ad un macchinario "classico" quanto è più sicuro un macchinario a controllo numerico?

È sicuramente molto più sicuro, anche per via delle leggi molto restrittive che regolarizzano questo tipo di macchinari, una volta si lavorava senza prestare troppa attenzione all'aspetto della sicurezza.

Una macchina come il taglio laser ha una

sicurezza molto elevata, come ad esempio i vetri che monta il taglio laser sono pensati apposta per essere infrangibili, non riflettenti per il raggio laser, e in teoria dovrebbero anche evitare che in caso di guasto il raggio laser non lo penetri, anche se in realtà lo penetra essendo un laser pensato per tagliare l'acciaio.

Inoltre deve garantire anche la possibilità di osservare il lavoro senza dare fastidio agli occhi, cosa indispensabile per controllare il corretto taglio dei vari pezzi.

Oltre a questo ci sono le fotocellule per il movimento, che sono posizionate ai lati del piano di taglio e il pulsante per disattivarle è posto ad una distanza tale che una persona non è in grado di disattivarle senza scendere dal piano di taglio.

Dopodiché ci sono le pedane che percepiscono il movimento, quindi se qualcuno ci sale sopra mentre la macchina è in lavorazione questa si bloccherà nel giro di pochi secondi.

Per quanto riguarda le polveri invece c'è un'aspiratore che non manda in giro le polveri che potrebbe essere nocivo se respirato ma lo mantiene all'interno della macchina, funziona con carboni attivi a sottovuoto e garantisce la respirabilità dell'aria. Inoltre da quest'anno è obbligatorio per legge avere una canalizzazione dell'aria che porta fuori l'aria di scarto.

La macchina è proprio pensata per preservare prima di tutto il lavoratore e subito dopo se stessa, infatti anche volendo il lavoratore per farsi male deve chiudersi dentro di propria volontà ed avere qualcuno che disattiva le fotocellule dall'esterno, ovviamente è abbastanza improbabile succeda per errore.

Anche le stesse macchine a controllo numerico hanno avuto un'evoluzione negli anni, infatti ad esempio il vecchio laser che utilizzavamo fino a qualche anno fa non aveva tutte queste attenzioni a riguardo dell'aspirazione dell'aria.

Per quanto riguarda la ricerca di personale in grado di lavorare con questi macchinari, è semplice trovare del personale qualificato, oppure no?

La questione del personale ogni anno è sempre peggio, si trova se si va a rubare personale a un tuo concorrente, se cerco una persona in grado di far funzionare questa macchina devo andare da uno che ha la mia stessa macchina e chiedere a quello che la fa andare di venire a lavorare da me, magari offrendo di più.

Insegnare a qualsiasi persona ad utilizzare una macchina di questo tipo è molto complesso, ci sono tantissimi fattori da tenere a mente ed è facile scordarsi qualche dettaglio fondamentale per il corretto funzionamento.

Anche a noi a volte ci capita qualche lacuna perchè il fattore intellettuale umano in questo tipo di lavorazioni è veramente molto più importante della semplice lavorazione manuale.

Per quanto riguarda i macchinari che voi utilizzate, ovvero taglio laser, taglio laser per tubolari, piegatrice e piega tubi, quali sono le fasi da seguire e i software da utilizzare per passare dal disegno realizzato a cad al lavoro finito?

Ogni macchinario ha un software dedicato, ci sono delle aziende che fanno software che producono anche dei software di terze parti che producono per un pò tutti i macchinari, ma non si sa mai come funzionano è sempre meglio utilizzare il software originale.

Quindi ogni macchina tendenzialmente ha un proprio software dedicato e prodotto

dall'azienda che produce il macchinario.

Quindi una volta che si ha il disegno realizzato su CAD lo si inserisce nel software dedicato al macchinario, che è un software CAM che lo elabora appositamente per essere letto dal macchinario, dopodichè effettuato il nesting si può mandare il disegno in macchina.

Per quanto riguarda il disegno per i macchinari che lavorano a tre dimensioni, come ad esempio il taglio laser per i tubi, è necessario avere un modello 3D fatto su autocad, invece che un disegno, perchè il macchinario deve essere in grado di lavorare ovviamente su tutti i lati del pezzo.

Rispetto ai macchinari classici il tipo di alimentazione per i macchinari a controllo numerico è differente? e in quantità risulta essere maggiore?

È difficile calcolare l'incremento di prezzi in relazione al macchinario perchè avendo acquistato da poco il nuovo taglio laser, con l'aumento dei prezzi conseguente alla guerra in Russia viene difficile fare un calcolo preciso sulla differenza.

Comunque, rispetto ai vecchi macchinari consuma di più da una parte, in termini di energia elettrica, o meglio, questo è un laser a fibra, ad esempio, e rispetto a quello precedente che funzionava a CO2, questo consuma il 65% in meno.

Inoltre, con l'avanzamento tecnologico sono riusciti a gestire bene anche il consumo di gas, degli oli di raffreddamento che non ci sono più, prima consumavo circa quaranta litri di olio ogni mese circa, ora non devo più farlo ed è un risparmio significativo, ora per raffreddarlo è sufficiente una vasca d'acqua.

Inoltre, vi erano degli specchi che rifletteva

no, il laser e che ogni tanto si rompevano, e quella era un'altra spesa significativa, questa macchina invece non ne ha, di contro però ha una testa che porta il cavo in fibra che quando si rompe costa decine di migliaia di euro per la sostituzione, quindi alla fine si risparmia comunque, perchè sul lungo periodo i costi sono effettivamente diminuiti, però sono comunque macchinari molto costosi.

Comunque, a livello di consumi è decisamente migliorato, passando da 150 Kw a 60 Kw, ovviamente solo per la testa della macchina, che a livello economico, considerati anche gli aumenti dei prezzi, vuol dire comunque spendere circa la metà. Inoltre, non avendo più le spese delle bombole e la spesa dell'olio consente di risparmiare delle cifre non indifferenti.

Ovviamente più si va avanti più questi aspetti sono destinati a migliorare sempre più.

un ottimo studio che si occupa della progettazione, le aziende vanno bene se l'ufficio funziona bene. Una volta invece l'ufficio era una parte collaterale che si occupava di questioni esterne alle lavorazioni, non faceva produzione, mentre ora di fatto è la parte più produttiva. Molte aziende hanno più gente che lavora in ufficio che fuori, anche perchè una macchina ti consente di fare più lavori, avere meno gente che si occupa del loro funzionamento, ma all'interno ci devono essere più persone che si occupano nel disegno.

Il tempo che si lavora in ufficio vale almeno come quattro ore fuori dall'ufficio.

Un'altra cosa importante è che il lavoro è ciclico, e i cicli si sono abbreviati, una volta uno specifico ciclo di lavoro (con ciclo s'intende uno specifico modo di effettuare il lavoro) durava dieci anni ed era sempre lo stesso con piccole evoluzioni.

Fino a prima del covid i cicli si può dire che durassero intorno ai 5 anni, adesso ogni anno il modo in cui si lavora continua a cambiare.

Questo è dovuto a diversi fattori, ad esempio al miglioramento delle comunicazioni, una

volta ci si sentiva per telefono, si prendeva l'ordine a mano, anche trovare i fornitori era difficile perchè bisognava andare sulle pagine gialle ecc.

Adesso invece è sufficiente andare su internet, trovare il fornitore che mi serve e mandare un'e-mail con la descrizione del materiale che mi interessa, questo ha velocizzato moltissimo il modo di lavorare. La progettazione deve essere molto più evoluta, devo avere personale formato per utilizzare i macchinari complessi come il taglio laser e concentrare le proprie forze e investimenti nella parte in ufficio. Se io devo investire dei soldi preferisco investirlo in ufficio perchè il lavoro fatto bene dall'ufficio poi semplifica il lavoro che viene fatto fuori. Di fatto l'ufficio è diventata la parte più produttiva delle aziende.

Come conclusione dell'intervista ho mostrato la struttura del progetto (che verrà illustrato nei seguenti capitoli) a Thomas e ho chiesto un suo parere sulla realizzabilità dell'opera dal punto di vista meccanico, in particolare l'attenzione è stata posta sugli archi e sui giunti realizzati per le travi sia principali che secondarie.

Allora per quanto riguarda le travi mi sembra che i giunti possano funzionare, però ricordati sempre di specificare sempre bene il codice sia sui disegni guida, sia sulle travi e sui giunti in modo che chi li assembla in cantiere sia in grado di trovare facilmente le parti corrette da unire. Inoltre, per quanto riguarda le travi sarebbe ottimo indicare anche il senso in cui vanno montate, magari mettendo una A sul lato che va montato verso il basso e una B sul lato che va montato verso l'alto.

Per quanto riguarda la produzione, il fatto che ogni piastra sia differente dalle altre porta via un sacco di tempo a livello progettuale, ma non a livello di produzione, se ad esempio tu ci dovessi mandare tutti i disegni completi di ogni piastra, realizzarle sarebbe semplicissimo e veloce, ma

realizzare i disegni sicuramente è un'altra storia.

realizzare i disegni sicuramente è un'altra storia.

Anche gli archi mi sembra che possano funzionare e vale lo stesso discorso per le piastre, si perderà molto tempo nei disegni ma nella produttività non più di tanto.

Mi sorge solo una domanda, come mai non avete pensato di utilizzare dei tubolari per questi archi?

Ho scelto di utilizzare questi archi perchè mi sembrava una soluzione innovativa rispetto a dei semplici tubolari, inoltre lavorare con un taglio laser a due dimensioni ci ha consentito di disegnare ogni particolare degli archi esattamente come volevamo, massimizzando la velocità e la semplicità degli incastri e assicurandoci la smontabilità dell'opera. Inoltre, anche il fatto di sperimentare una tecnica strutturale diversa dal solito era un aspetto interessante.

Grazie mille per la disponibilità!

2.3.3 - Design system in architettura

Il design system in termini architettonici si riferisce alla realizzazione di un sistema costruttivo progettato spesso per la prima volta da subappaltatori, nel caso del design parametrico il progettista può definire una facciata con dei profili che variano in lunghezza e dimensione per ospitare gli oggetti necessari.

Un sistema parametrico efficace, può facilmente adattarsi a alla maggior parte delle soluzioni necessarie senza avere nessun riscontro negativo, e deve definire i parametri e lo spazio dei parametri in cui il sistema rimane valido.

In questo caso uno degli aspetti più critici sta nell'assemblabilità dei sistemi; infatti, lo spessore dei materiali che nel caso dei metalli può variare anche solo di pochi millimetri diventa importantissimo e determinante per rendere valido o meno un sistema di assemblaggio; quindi, si viene a creare un ulteriore vincolo da considerare all'interno del sistema.

Concettualizzando le possibili soluzioni adottabili e configurandole parametricamente è possibile iterare rapidamente le idee e testarle in modo da validarne o meno l'efficacia. Un esempio molto valido di questo processo è fornito dal progetto "Tumbalong Green Stage Upgrade" realizzato da Encode, studio gestito da Federico Borello e Massimiliano Manno nel quale le travi di legno che compongono la copertura necessitavano di un'ampia varietà di giunture metalliche (46-49) con differenze in molti casi assai minime l'una dall'altra, e che dipendevano principalmente dalla differenza di inclinazione di ciascuna trave⁴².

Sulla loro pagina dedicata al progetto è possibile osservare una gif che mostra tutte le differenti tipologie di giunture metalliche utilizzate durante la realizzazione del progetto, ognuna accompagnata da alcune indicazioni riassunte in una tabella.

Tutte queste differenze sono in alcuni casi impercettibili, ma un determinato

incastro potrebbe non risultare efficiente o inutilizzabile al posto di un altro molto simile.

Per questo motivo il lavoro svolto tramite software parametrico per realizzare tutte le varianti di giunzione risulta fondamentale per la realizzazione del progetto.

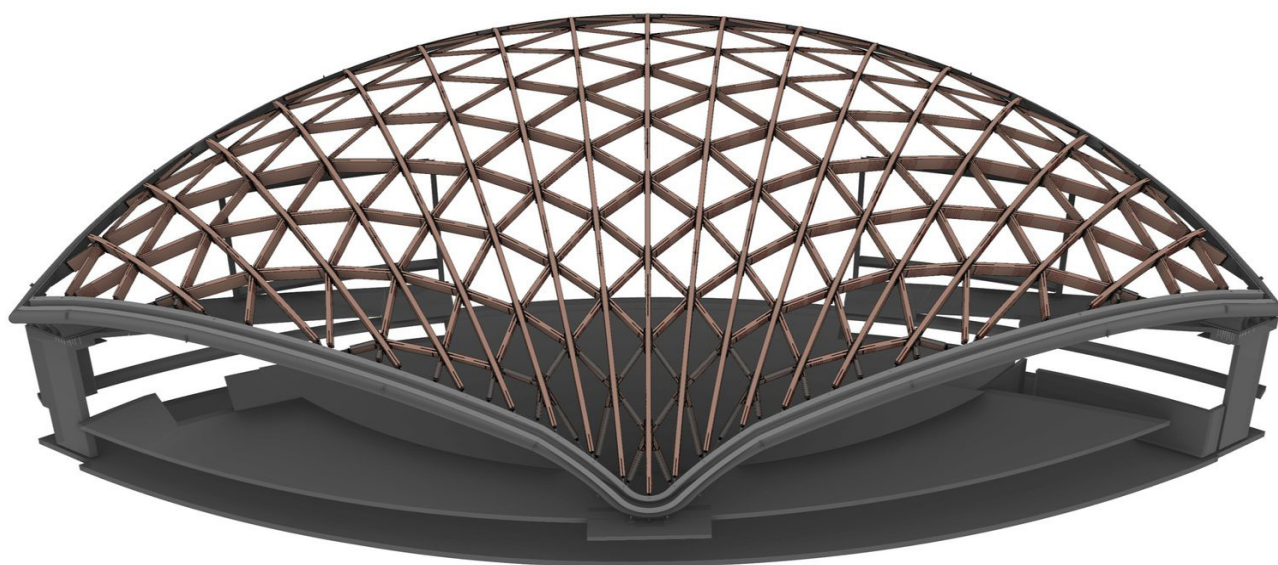
Ovviamente poi un processo analogo sarà svolto anche per tutti gli elementi che compongono il sistema di travi rendendo il progetto un esempio perfetto di collaborazione tra la modellazione algoritmica e i DfMA (50).

In tutto questo il modello 3D assume un ruolo fondamentale per verificare in prima battuta il design finale del progetto realizzato seguendone tutte le fasi della progettazione, inoltre una volta ultimato il progetto, il modello è molto utile per stimare le quantità di materiali necessarie e redigere dei preventivi, infine nel caso sia di elementi lavorati con CNC che con programmi di stampa 3D è possibile avere delle stime dirette di quelli che sono i tempi di lavorazione per ogni singolo elemento.

Infatti, la maggior parte dei software CAM, sono in grado di leggere modelli 3D e creare quindi delle anteprime di tutte le parti che verranno realizzate, per questo motivo i rischi inerenti le capacità di costruzione di un elemento vengono praticamente meno nel caso di un modello che tenga perfettamente conto delle tolleranze di costruzione corrette e senza collisione, rendendo le variabili sconosciute praticamente nulle.

Tuttavia, nonostante gli enormi vantaggi che un modello di questo tipo può apportare alla fabbricazione di un edificio, produrre un modello adatto sia alla rappresentazione architettonica che alla fabbricazione digitale è molto complesso.

Per esperienza personale posso affermare che un modello realizzato su Revit difficilmente può essere adatto alla realizzazione di modelli fisici architettonici stampati in 3D o realizzati tramite taglio laser.



(50) Struttura completa del progetto Tumbalong Green Stage Upgrade (Fonte: en-code.io)

considerevoli perdite di tempo, in quanto oltre a dover realizzare 2 modelli differenti e quindi a raddoppiare il lavoro di modellazione, inoltre costringe l'azienda che si occupa di produrre ad attendere che il modello sia verificato anche dall'architetto prima di procedere con la realizzazione. Probabilmente l'opzione ideale per una società di costruzione nei prossimi anni sarebbe quella di avere al proprio interno un team dedicato alla fabbricazione e dotato di macchinari a controllo numerico e di stampa 3D in modo da velocizzare il processo ed essere in grado di gestire il lavoro nel modo più conveniente. In alternativa l'architetto potrebbe produrre

lui stesso tutti i disegni esecutivi per i macchinari a controllo numerico ma anche questa opzione richiede una preparazione non indifferente e ad oggi gli architetti in grado di farlo risultano molto pochi. Tuttavia, ad oggi l'industria architettonica rimane uno dei settori meno sviluppato a livello tecnologico, integrandola con la modellazione parametrica sarà possibile sicuramente utilizzare delle nuove tecniche disponibili che attualmente sono ancora in fase di studio e che verranno approfondite nel paragrafo successivo, grazie anche alla visita della conferenza "Fabricate 2024" tenutasi a Copenhagen.

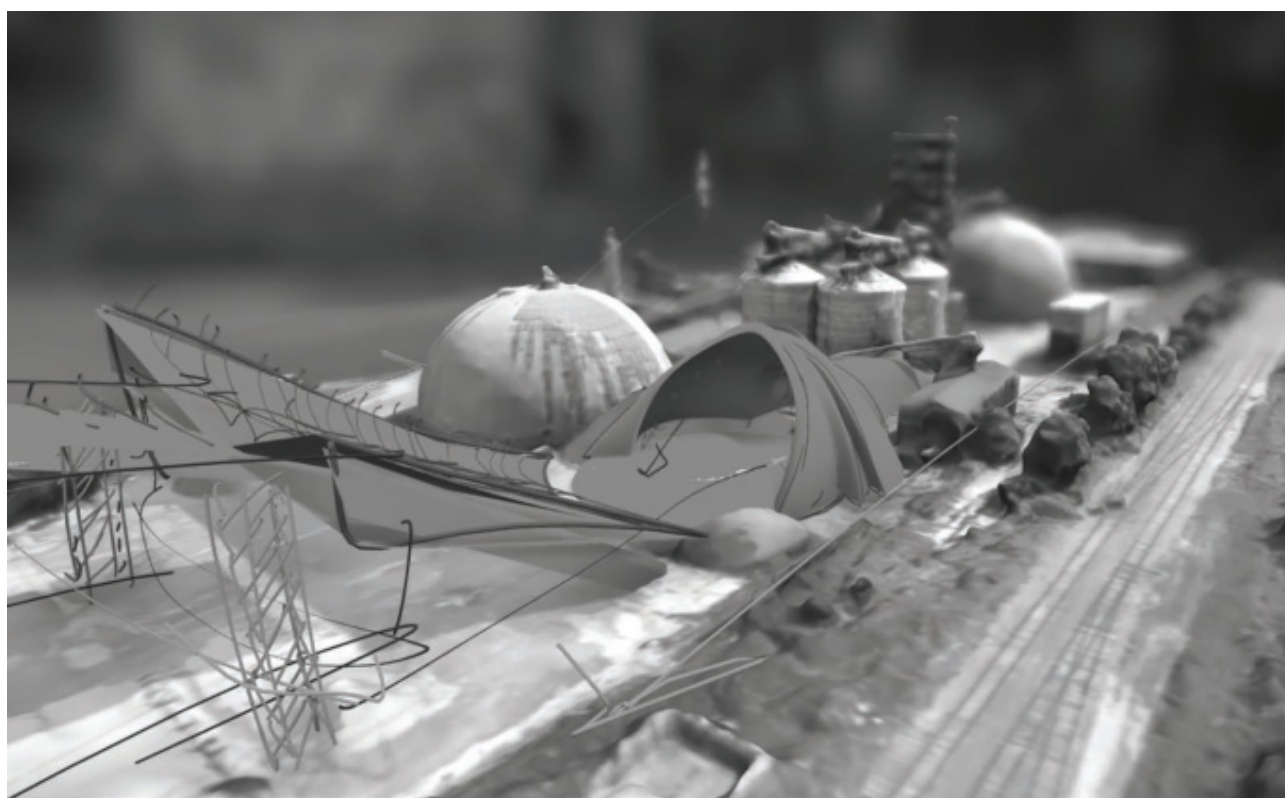
2.4 - Il futuro del design algoritmico

Come già accennato nei precedenti paragrafi comunicare con le macchine diventerà sempre più indispensabile per gli architetti, il modo migliore per farlo attualmente disponibile è attraverso i linguaggi di programmazione come Python o Java. Questi ci consentono di dare istruzioni alla macchina e nonostante la rapidità dei cambiamenti tecnologici questo modo di comunicare pare non voler cambiare. Ovviamente lo scripting visuale, usato da programmi come Grasshopper e Dynamo non fa altro che questo usando una sintassi user friendly che consente di programmare pur non essendo programmatori esperti.

Per questo non è illogico pensare che

programmi come questi diventino ancora più semplici e più coinvolti nei processi di produzione. Questo potrebbe avvenire attraverso la comprensione del linguaggio naturale da parte dei programmi, potenziata ovviamente dall' IA.

Gli sviluppi recenti di strumenti per la realtà aumentata e virtuale fanno pensare alla possibilità di un'interazione diretta dei progettisti con i loro modelli virtuali⁴³, questo porterebbe alla combinazione della precisione, la rapidità e l'efficienza del disegno CAD alle qualità esperienziali della lavorazione artigianale lavorando di fatto manualmente ad un progetto digitale (51).



(51) Schizzo realizzato su un rilievo in realtà aumentata (Fonte: architectonics and parametric thinking pp.76)

44 - architectonics and parametric thinking pp. 76-81

2.4.1 - Computazione spaziale

Con il termine computazione spaziale si intende definire l'iterazione uomo macchina in cui il computer acquisisce e restituisce dati relativi a oggetti spaziali e reali, ovvero realtà aumentata e virtuale.

Essendo un insieme di input e output la computazione spaziale è essenzialmente un sistema parametrico. Gli strumenti di progettazione hanno immediatamente iniziato a sfruttare questa interazione attraverso applicazioni tridimensionali e di pittura, modellazione e scultura.

Di fatto gli ambienti di collaborazione virtuale stanno diventando sempre più diffusi, inoltre i progettisti parametrici potrebbero sfruttare le enormi potenzialità offerte da questi software per integrarli con grandi quantità di dati. Ad esempio, se si combina un sistema parametrico ad una curva disegnata in VR, un progettista può accedere a tutti i vantaggi del design computazionale insieme all'artigianato manuale e allo schizzo manuale, applicando in tempo reale superfici, strutture o ulteriori elementi di design su un

modello estremamente flessibile.

Un'altra possibilità è quella di utilizzare AR, per realizzare il progetto di un edificio direttamente sul sito tenendo conto di input come gli edifici adiacenti, posizione solare e punti di accesso.

Infine, l'ultima possibilità attualmente in fase di sviluppo riguarda la cattura della realtà, conosciuta anche come scansione 3D, si occupa di tradurre lo spazio fisico in spazio digitale per consentirne l'interazione con le macchine.

Questa è una tecnologia in rapido miglioramento, di fatto i sistemi LiDAR (light detection and ranging) ora sono parte integrante delle camere degli iPhone. Essendo la computazione spaziale basata su questi input ambientali, la cattura della realtà è un elemento fondamentale nei processi di computazione spaziale. Questi risultano fondamentali anche per i veicoli senza pilota che basano i loro percorsi proprio su questi dati⁴⁴.

2.4.2 - Visione artificiale

Così come la computazione spaziale, anche la visione artificiale utilizza l'ambiente circostante come input, tuttavia questa riguarda un campo dell'intelligenza artificiale che consente a degli algoritmi di estrarre informazioni da immagini e video. Il vantaggio sta nella capacità di elaborare i dati in maniera molto veloce e molto più oggettivo, in generale consente alle macchine di identificare e rispondere agli elementi che "vede".

A livello architettonico questi casi potrebbero riguardare problemi di sicurezza all'interno di un cantiere, violazioni del codice edilizio in un modello architettonico e altri parametri definibili.

Un altro utilizzo di questi sistemi riguarda l'integrazione uomo-macchina che può essere svolta collegando una telecamera ad un robot, consentendogli così di adattarsi ad un ambiente esterno.

2.4.3 - Deep learning

Il deep learning espande l'applicazione dell'IA nella visione artificiale utilizzando il concetto di dati di addestramento e reti neurali. Fondamentalmente consiste in un apprendimento automatico promosso dalla ripetizione di un'azione più volte, un po' come uno sportivo che si allena per eseguire al meglio una prestazione.

I metodi per gestire la complessità dei progetti architettonici che diventano sempre più elevati, integrando un gran numero di tecnologie differenti tra loro, ma grazie al deep learning applicato ad un sistema parametrico imparando da un progetto precedentemente realizzato sono in grado di semplificare quelli futuri, di conseguenza sarà in grado di seguire progetti sempre più complessi.

Inoltre, un programma di deep learning è in grado di fornire moltissime informazioni su quello che potrebbe essere lo sviluppo futuro del progetto, animando schemi e fornendo dati sui costi, forniture e quantità necessarie per la realizzazione.

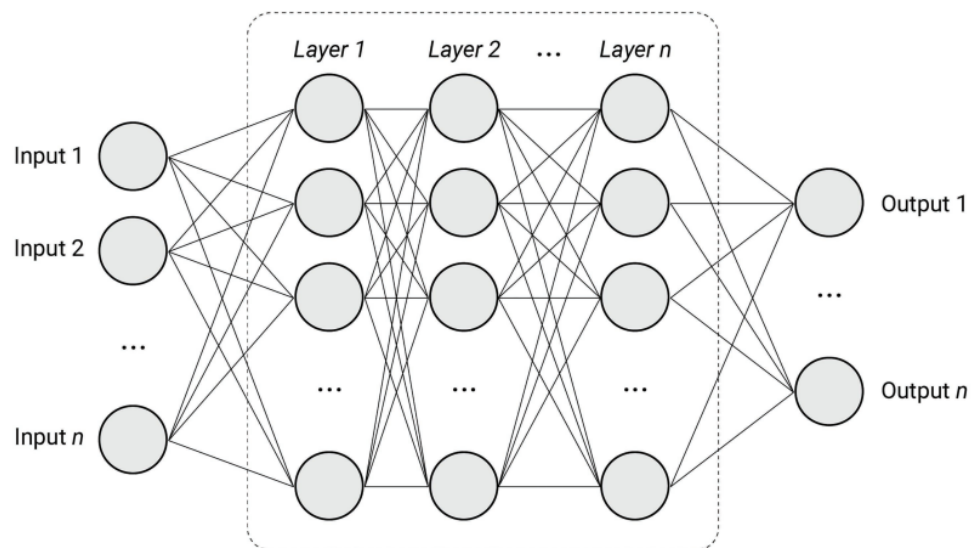
Di fatto gli algoritmi di deep learning presentano una possibilità senza precedenti in particolare per gli architetti con decenni di esperienza, i quali hanno decine se non in alcuni casi centinaia di

lavori passati alle spalle, che difficilmente trovano un utilizzo al di là di riempire la memoria di qualche hard disk, bene grazie a questi algoritmi sarà possibile utilizzare quei dati per far apprendere l'algoritmo e renderlo in grado di riapplicare gli stessi concetti a qualsiasi altro caso, ovviamente senza il rischio di auto emulazione.

Ovviamente il rischio di essere "comandati" dagli algoritmi in questo caso potrebbe porsi e qui starà al progettista essere in grado di dominare l'algoritmo e portarlo sulla strada da lui scelta, altrimenti il rischio è quello di generare edifici troppo simili tra loro.

Grazie a queste nuove tecnologie e soprattutto all'integrazione tra algoritmi, pensiero umano e IA siamo chiaramente vicini a un nuovo modo di sviluppare il progetto, riducendo le barriere tra virtuale e realtà e collegando la modellazione digitale alla mano umana [52].

Grazie a questo se la tecnologia sarà utilizzata nel modo corretto sarà sempre più lei che lavora per noi e non il contrario, velocizzando i processi di progettazione, disegno e soprattutto realizzazione.



(52) Esempio di diagramma di rete neurale, che riduce al minimo l'influenza umana (Fonte: architectonics and parametric thinking pp. 79)

2.5 - Nuove tecniche di fabbricazione (conferenza Fabricate 2024 e precedenti)

Questo paragrafo includerà delle nuove tecniche di fabbricazione portate alla luce dalla conferenza Fabricate, che si tiene ogni 4 anni e che promuove le nuove tecniche di produzione possibili tramite la modellazione parametrica. Ho avuto la possibilità di partecipare a questa conferenza a Copenaghen nell'Aprile 2024

e qui in ogni sottoparagrafo sono riportate delle nuove tecnologie che ho trovato molto interessanti, non solo dell'edizione del 2024 ma anche delle precedenti; infatti, sul sito web della conferenza è possibile consultare un archivio con documenti pdf che presentano le varie innovazioni esposte in quell'edizione.

2.5.1 - Legno e controllo numerico

2.5.1.1 - Colmare il divario tra CAD e CAM

Come analizzato anche nei precedenti paragrafi uno dei punti critici attualmente nell'industria digitalizzata è il passaggio dal design alla realizzazione, in questo paragrafo verranno analizzate nello specifico le problematiche inerenti il settore del legno e delle possibili soluzioni future.

Nonostante l'avvento di programmi CAD specifici per il settore del legno, la fabbricazione di forme complesse mediante CNC risulta ancora molto macchinosa, infatti la procedura standard consiste nel definire la geometria standard su CAD e poi importarla in un software CAM [53].

Durante questa procedura il software analizza il modello e decide quali operazioni svolgere per realizzare il lavoro richiesto, sebbene questo funzioni correttamente con geometrie semplici, diventa impossibile quando le cose diventano più complesse. Infatti, le informazioni geometriche diventano insufficienti e il modello deve essere rivisto dal CAM rendendo il processo molto lento.

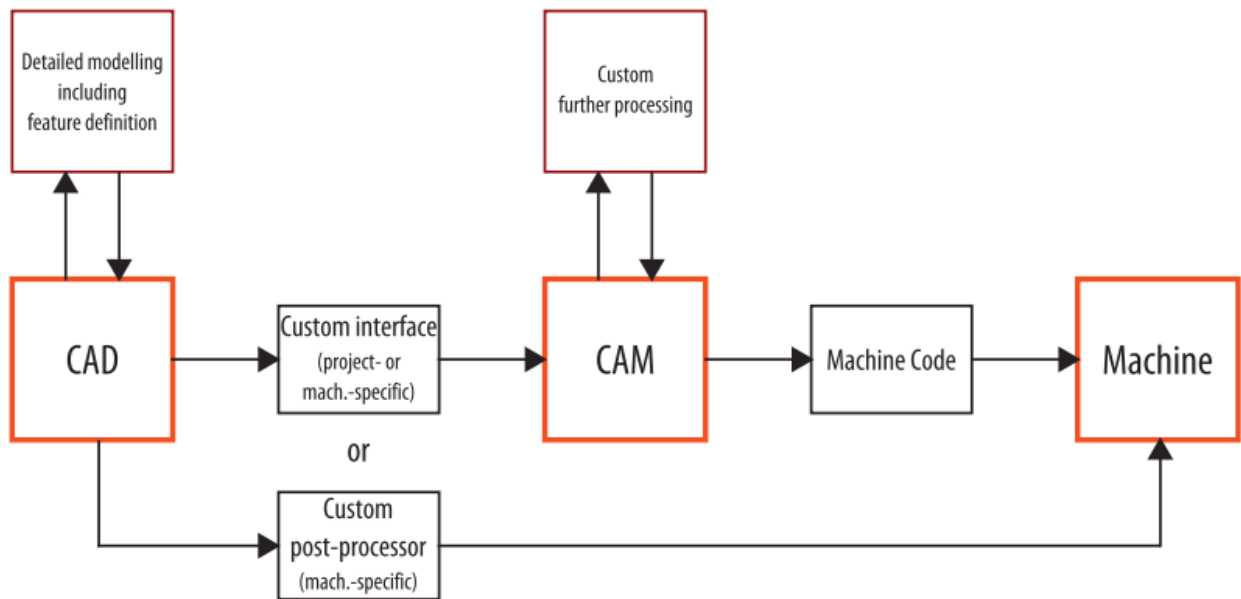
Tuttavia, se il modello CAD è stato realizzato seguendo un disegno parametrico sarà molto probabile che tutti i componenti seguano le medesime regole parametriche e richiedano sequenze di lavorazione simili tra loro, questo apre la porta a delle interfacce personalizzate tra CAD e CAM.

Si può pensare ad un'organizzazione del modello geometrico in modo concordato per ottimizzare il processo di importazione o alla programmazione di post-processor che generano direttamente il codice macchina dal modello CAD⁴⁵.

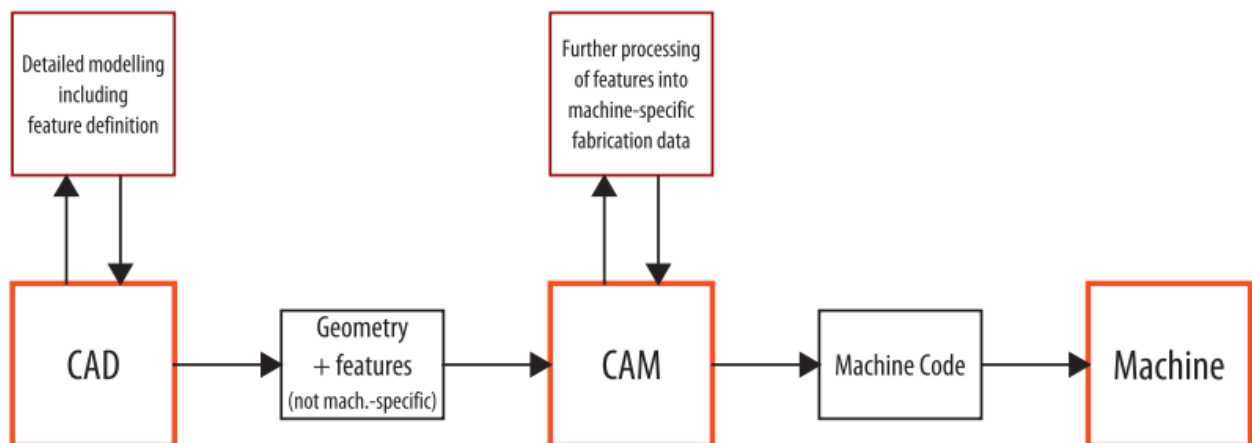
Il primo può ridurre lo sforzo ma fino ad un certo punto rimanendo basato comunque su un modello geometrico, il secondo invece risulta molto più laborioso e richiede persino che la macchina di produzione sia nota da subito, per questo motivo richiede una stretta collaborazione tra le parti ed è attuabile solo in caso di grandi quantità di pezzi [54].

Per gestire al meglio la fabbricazione del legno il formato del file deve essere in grado di gestire correttamente parametri

45 - bridging the gap from cad to cam: concepts, caveats and a new grasshopper plug-in



(53) Workflow fabbricazione digitale utilizzando specifiche interfacce di progetto (Fonte: bridging the gap from cad to cam: concepts, caveats and a new grasshopper plug-in pp. 5)



(54) Workflow fabbricazione digitale utilizzando macchine indipendenti come descritto (Fonte: bridging the gap from cad to cam: concepts, caveats and a new grasshopper plug-in pp. 5)

specifici del legno, come la direzione delle fibre, inoltre dovrebbe mantenere una distinzione netta tra CAD e CAM, tutto questo può essere ottenuto dal formato BTL.

Il linguaggio BTL (building transfer language) questo linguaggio sviluppato da SEMA e cadwork, contiene 46 operazioni di lavorazione individuale o processings.

Altri vantaggi sono la possibilità di non conoscere la macchina CNC a inizio progetto e inoltre è uno standard aperto e senza vincoli; infatti, tutte le informazioni inerenti il programma sono disponibili

online. Per integrare in questo sistema anche le forme più complesse vi era la necessità di un sistema che coinvolgesse in qualche modo Grasshopper e per questo motivo è nato Woodpecker, ovvero un plug-in di esportazione in BTL per Grasshopper. Attraverso questo plug-in tutte le modifiche possono essere effettuate in ambiente CAD rendendo inutile il passaggio su CAM (55). Questo plug-in può essere utilizzato in 2 modi molto diversi ma entrambi efficaci, il primo consiste nell'importare il file CAD in Rhinoceros e tramite Woodpecker si

analizza la geometria e si stabiliscono le caratteristiche, infine viene esportato un BTL. Il secondo metodo di utilizzo trasforma le superfici di riferimento e le geometrie nei componenti di Woodpecker e che le trasforma in dati BTL. Questo plug-in sicuramente rappresenta un passo in avanti nella produzione tramite modellazione algoritmica. Ovviamente i concetti espressi per il legno in questo paragrafo sono validi anche per quanto riguarda i sistemi a controllo numerico per la lavorazione di metalli come laser cutter o macchinari per la piega dei tubi automatizzata.



[55] Esempio di trave lavorata a controllo numerico (Fonte: bridging the gap from cad to cam: concepts, caveats and a new grasshopper plug-in pp. 8)

2.5.1.2 - Costruire con legno e free form in larga scala, il caso del nuovo headquarter Swatch a Biel

Parlando di strutture in legno di grandi dimensioni è impossibile non citare Shigeru Ban che sin dal 2010 con il suo centre Pompidou di Metz, ha dato il via alla costruzione con gusci di legno anche in larga scala.

Successivamente nella sala da concerto Seine a Parigi, sempre Shigeru Ban realizza una struttura in legno con una trama molto simile a quella del centre Pompidou ma in questo caso le travi invece che appoggiarsi appena tra loro, si incastrano sorreggendo una struttura in vetro.

Questa tecnologia basa la sua forza sulla possibilità offerta dai macchinari CNC di fresare il legno curvo con estrema precisione e di renderlo così applicabile al mondo dell'architettura in maniera precisa e relativamente veloce.

Questo tipo di strutture sono

obbligatoriamente ricavate da modelli 3D, infatti tutti i punti di incastro e di incollaggio devono essere obbligatoriamente ben collocati e studiati, per essere poi in grado di fornire ai macchinari a controllo numerico le informazioni necessarie alla realizzazione⁴⁵.

Prendendo ad esempio il caso del nuovo quartier generale di Swatch a Biel, Svizzera (56), il modello è stato ricavato da curve nurbs, inizialmente sono state tracciate 8 sezioni trasversali, con 10 punti di controllo ciascuna, questi sono stati poi interpolati in una rete di controllo da 126 x 10. Questa è stata la base di partenza per l'algoritmo di ottimizzazione successivo che ha spostato i punti di controllo in modo da raggiungere requisiti e spazi strutturali.

Tuttavia, un'impresione all'interno di questo algoritmo la si può notare dalla

45 - large-scale free-form timber grid shell



(56) Vista esterna Swatch headquarter (Fonte: geniuslociarchitettura.it)

testa dell'edificio la quale non si abbassa in presenza di spazi a un piano solo rendendo fondamentalmente inutile tutto lo spazio superiore che rimane così inutilmente alto. I balconcini laterali che bucano la griglia sono un tratto distintivo dell'architettura di Shigeru Ban, questi sono stati realizzati successivamente forando la struttura ormai completa e intersecandola con degli elementi ellissoidali.

Per evitare di sovradimensionare la struttura è stato necessario studiare i diversi comportamenti delle travi in diverse condizioni di inclinazione e di carico, e alla fine sono state definite diverse altezze di sezione delle travi per via di punti in cui il carico era nettamente superiore ad altre.

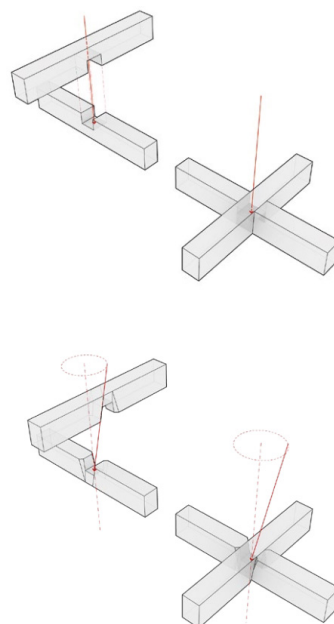
Per assemblare l'edificio si è suddivisa la superficie in 13 zone, le quali sono state assemblate in successione, è stata utilizzata una struttura di supporto in legno, la quale seguiva gli spostamenti della lavorazione.

I punti cruciali di questo progetto tuttavia sono fondamentalmente 2, ovvero il giunto incrociato e il giunto a sbalzo (57), i quali hanno semplificato notevolmente l'assemblaggio.

Il giunto incrociato è uno degli elementi

base della fabbricazione del legno e si basa sulla rimozione di metà dello spessore di ciascuna delle due travi.

Tuttavia, in questo caso le giunture non essendo verticali rendevano impossibile la giunzione; quindi, si è pensato di sfalsare le facce, ovvero le facce si aprono nella direzione di incastro con un angolo predefinito ottenendo un cono di assemblaggio. Per evitare di avere centinaia di angolature diverse grazie ad un algoritmo di normalizzazione è stato possibile stabilire solo 4



(57) Esploso dell'incastro a cono (Fonte: *large-scale free-form timber grid shell* pp. 8)

angoli standard da utilizzare per tutti gli incastri.

Nel caso dei giunti a sbalzo invece utilizza una piastra scanalata, una piastra di acciaio collega entrambi i segmenti delle travi tramite perni di acciaio.

Per evitare di avere le travi in tensione al momento dell'assemblaggio è stata utilizzata una terza piastra che consentiva di evitare la tensione durante le fasi di assemblaggio e tramite il suo posizionamento finale a mettere in opera le travi.

Nelle regioni concave della struttura invece si aveva il problema che entrambe le estremità si chiudevano invece che aprirsi, di conseguenza è stato pensato un taglio inclinato molto simile a quello dell'incastro a sbalzo per risolvere il problema.

La natura a forma libera del progetto ha reso impossibile riunire i vari modelli 3D di ogni progettista per riassumere il risultato

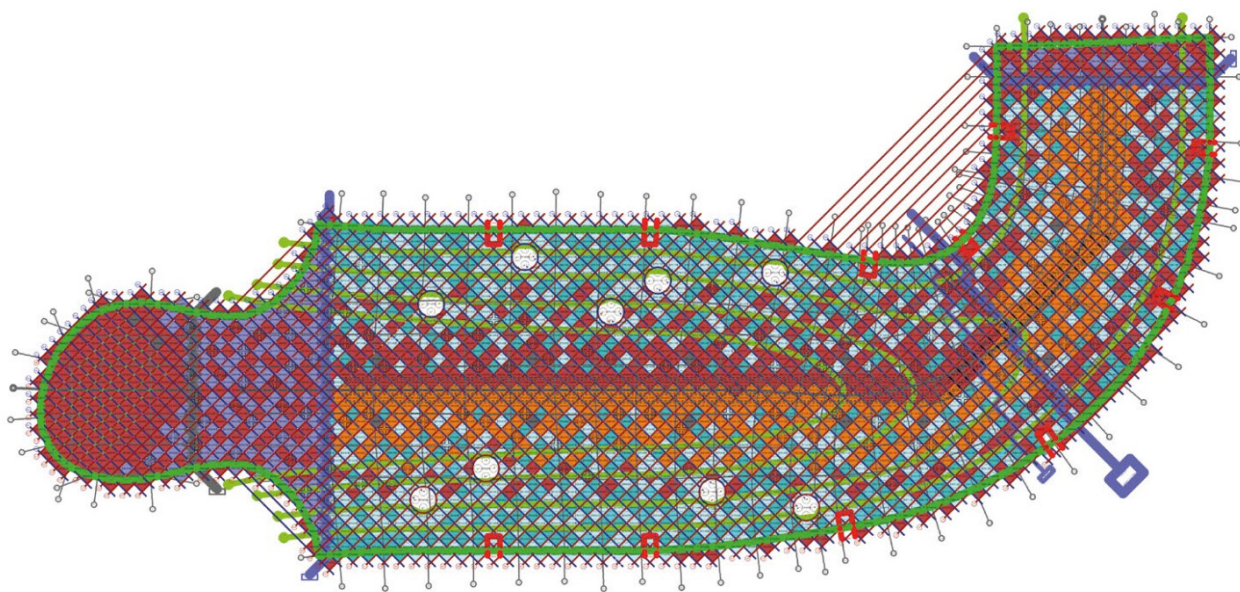
finale, per questo è stata sviluppata una tecnica di mappatura, che riproduce la struttura con un disegno 2D in cui i pilastri e le travi rette formano una griglia (58).

Questo processo ha consentito di fatto la mappatura 2D di una struttura 3D molto complessa che altrimenti non sarebbe risultata possibile.

Ovviamente anche tutti i dettagli come viti, incastri, bulloni ecc, sono stati resi parametrici per, anche perchè era l'unico modo di gestirli tutti all'interno del modello in tempi ragionevoli.

Per quanto riguarda quegli elementi differenti rispetto alla maggioranza, che non è stato possibile parametrizzare, si è modellato manualmente risolvendo il problema.

Infine, è stato eseguito un controllo qualità a tre fasi per verificare che tutte le parti del modello fossero perfettamente corrispondenti tra loro.



[58] Mappatura 2D dell'edificio (Fonte: large-scale free-form timber grid shell pp. 6)

45 - large-scale free-form timber grid shell

46 - marina spa prototype

2.5.1.3 - Utilizzo del legno in elementi complessi di piccola scala

Questo progetto nasce con l'idea di creare uno spazio in cui prendersi cura del corpo umano, derivato dal design del Marina Abramovic's spa⁴⁶.

Le indicazioni iniziali del processo di produzione riguardavano principalmente il materiale che doveva essere legno di recupero.

Questa linea guida affiancata alle geometrie complesse possibili grazie a Grasshopper, ha portato alla definizione di una geometria basata su intersezioni di elementi in legno e ad un gruppo di tecnici provenienti da diversi campi di studio.

Il primo passo ovviamente è stato quello di creare un modello unico a cui potessero riferirsi tutte le informazioni, e che sarebbe man mano cresciuto a livello di dettagli.

Quindi si passò dal generare una superficie attraverso un loft di alcune linee guida, su cui poi proiettare le linee di costruzione della struttura in legno (56).

Le fasi successive inerenti alla modellazione del modello digitale hanno comportato la materializzazione dei travetti in legno

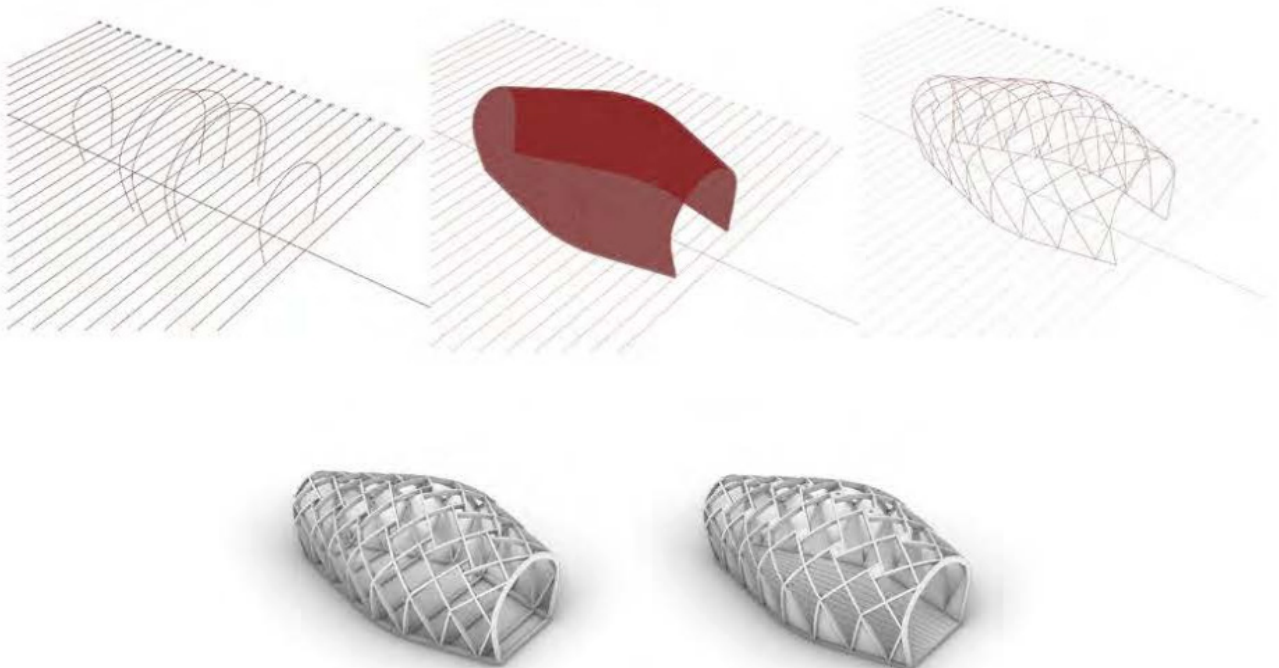
come estrusioni delle linee proiettate sulla superficie, in questa fase è stata anche studiata la giunzione delle varie parti.

Nella quarta fase vennero decise le proporzioni degli elementi in relazione anche alle necessità delle giunture e alla possibilità di realizzare delle geometrie più o meno complesse e con spessori che dovevano garantire la possibilità di inserire le giunture.

L'ultima fase ha riguardato la modellazione dettagliata del progetto ed è stato necessario trovare un parametro per tutti i giunti all'interno, avendo come base la geometria prodotta fino a quel momento (59).

Ognuno di questi giunti alla fine risultava leggermente diverso dagli altri generando complessivamente 9 tipi di giunto, ciascuno dei quali con piccole variazioni dimensionali, per unire ben 140 giunzioni.

Per quanto riguarda il tipo di legno utilizzato all'interno del progetto, sono state scelte delle travi curve di quercia, che



(59) Fasi di modellazione (Fonte: Fabricate 2024 pp. 101)

in genere vengono scartate dalla produzione e che quindi possono essere considerate materiale di recupero.

Questi assi sono stati scansionati da uno scanner tridimensionale che attraverso un algoritmo inserisce le travi all'interno della geometria progettata con un metodo di best-fit.

Per quanto riguarda invece le geometrie dei sedili interni della struttura che appaiono come forme organiche, si basano su superfici avvolte intorno ad una pila di quercia scartata.

Ognuno degli elementi che compone il progetto è stato realizzato intrecciando le assi di legno, e creando dunque degli assi di legno lamellare (60).

Di fatto i 114 elementi che compongono il progetto sono a loro volta composti da oltre 1000 lastre di legno incollate tra loro per formare elementi lamellari e soprattutto non anisotrope.

Il metodo utilizzato nello specifico è detto Winther A/S e consiste nel laminare il pezzo in strati sfalsati di pezzi corti e dritti, in cui la deviazione della direzione delle fibre dipende dalla curvatura.

Tutti i pezzi di legno recuperato utilizzati per formare i blank curvi nel progetto sono stati lavorati individualmente. Il fabbricante ha sviluppato il suo programma controllato parametricamente per gli elementi curvi che, basato su una forma esterna del blank e una divisione desiderata, ha generato programmi parziali per i singoli segmenti del blank. Il progetto richiedeva ulteriori sviluppi di questa configurazione per incorporare forme arbitrariamente curve invece di semplici linee, archi ed ellissi. I blank curvi infine sono stati lavorati con un macchinario a controllo numerico a 5 assi.

Le piastre di collegamento sono realizzate in legno di betulla (61-62), in quanto le



(60-62) Esplosi archi e incastri strutturali (Fonte: fabricate 2024 pp. 102)

forze agiscono in direzioni diverse tra loro. Un altro punto molto importante di questo progetto è la possibilità di essere smontato e riassembleato innumerevoli volte, infatti i giunti sono a incastro a secco e quindi facilmente smontabili.

Questo progetto ha sicuramente tra i suoi meriti quello di aver permesso ad un team formato da persone che lavorano in campi molto differenti di collaborare in un unico campo.

Di fatto il risultato finale che si può vedere

nell'immagine [63], non corrisponde per forza ad un campo di ricerca specifico, di fatto non si può considerare puramente architettonico, ma lascia ben leggibili le relazioni interdisciplinari che hanno portato alla sua realizzazione.

Infine, il progetto esprime sicuramente un approccio sostenibile e che strizza l'occhio alla circolarità dei materiali, attuando un riuso di materiali di scarto e allo stesso tempo rendendo quei materiali smontabili e facilmente riutilizzabili.



[63] Risultato finale struttura (Fonte: Fabricate 2024 pp. 99)

2.5.1.4 - Visita e intervista presso Blumer Lehmann

Grazie alla conferenza Fabricate 2024, ho potuto conoscere da vicino i progetti realizzati da Blumer Lehmann, un'azienda svizzera, per la precisione di Gossau, leader mondiale della lavorazione del legno lamellare, avendo realizzato progetti incredibili come il già citato Swatch HQ.

Per questo motivo a seguito della conferenza ho deciso di contattarli chiedendo se fosse possibile visitare l'azienda e realizzare un'intervista da inserire all'interno della tesi. Fortunatamente la risposta è stata positiva e il giorno 5 Novembre mi è stata concessa la possibilità di visitare l'azienda accompagnato da Kai Strehlke, ovvero Responsabile dei Processi Digitali dell'azienda.

Appena arrivato sono stato subito accolto da Kai e abbiamo deciso di iniziare subito con la visita all'azienda durante la quale ho avuto la possibilità non solo di vedere tutte le fasi produttive, ma anche di fare qualche diverse domande specifiche sui metodi di lavorazione.

La visita è iniziata nella sede storica dell'azienda, che attualmente è suddivisa in due sedi, la prima appunto è quella in cui si realizzano tutte le lavorazioni iniziali per la fabbricazione del legno e i progetti di case modulari realizzate dalla compagnia, mentre la seconda è dedicata all'architettura free form.

Il primo macchinario che ci è stato mostrato è quello con cui vengono tagliati i tronchi degli alberi (I14), tutti raccolti in un raggio di 100 Km di distanza dall'azienda.

I tronchi vengono posizionati tramite un braccio meccanico su un apposito nastro trasportatore (I15), il quale suddivide i

tronchi tra grandi e piccoli in base al diametro in modo da posizionarli successivamente sulla macchina da taglio più adatta, infatti i tronchi possono avere dei diametri che variano da un minimo di 30 cm a un massimo di 60 cm e in genere hanno un'età che si aggira intorno ai 40 anni.

Inoltre, se la forma del tronco non è perfettamente uniforme su tutta la lunghezza, come ad esempio in caso di rastremazioni, la parte più spessa viene tagliata prima di entrare nel macchinario, questo per evitare dei tagli non corretti o dei malfunzionamenti del macchinario.

I tronchi vengono tagliati due volte, la prima a metà, dopodiché le due metà tornano indietro e vengono nuovamente tagliate (I16) rimuovendo da entrambe la parte più esterna e tondeggiante, che viene scartata. L'azienda taglia circa 150000 tronchi d'albero ogni anno, infatti tutto quello che è possibile vedere all'interno dell'immagine (I16) corrisponde a meno di dieci giorni di lavoro.

In questa fase viene rimossa anche la corteccia esterna del legno, effettuando una specie di pulizia dei tronchi.

Vengono lavorati sia legni duri che morbidi, in particolare Quercia per quanto riguarda i legni duri e Pino per quanto riguarda i legni morbidi. Ovviamente capita di lavorare anche altre tipologie di legno ma queste due sono quelle più utilizzate dall'azienda. Il passaggio successivo consiste nel tagliare i due strati di legno ottenuti nelle lamelle di dimensioni standard, seguendo un rigoroso (I17) schema di taglio che consente di minimizzare il legno scartato,



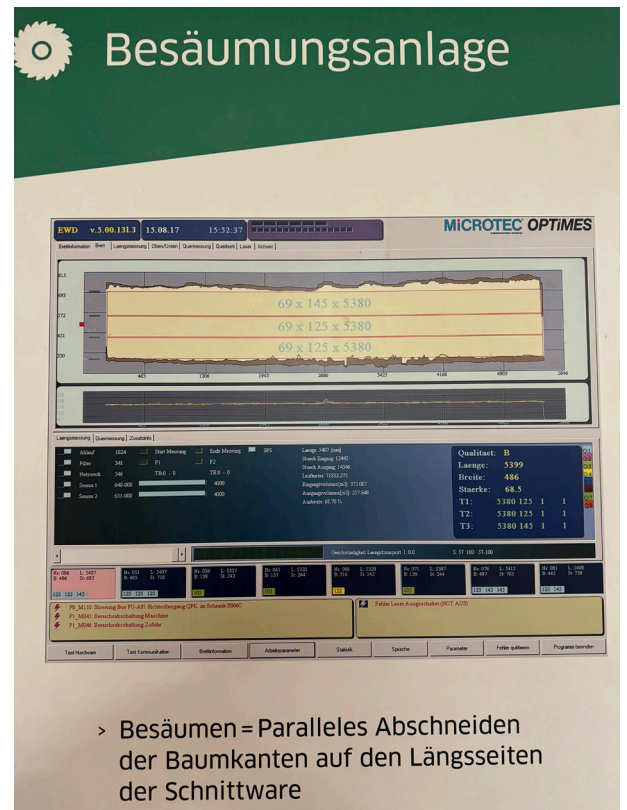
(I14) Macchinario che posiziona i tronchi sulla macchina di taglio



(I15) Macchinario per trasportare i tronchi alle macchine di taglio



(I16) Macchinario per il taglio e la pulizia dei tronchi



(I17) Schema di taglio delle lastre di legno

queste misure ovviamente sono pensate per essere pratiche da utilizzare successivamente nella realizzazione di progetti.

Tuttavia spesso capita che per via delle dimensioni irregolari dei tronchi avanzino delle lamelle fuori misura che ovviamente non possono essere inserite all'interno dei bancali di dimensioni standard.

Per questo motivo prima di arrivare alla realizzazione dei bancali si ha una specie di deposito per tutte queste lamelle fuori misura, che vengono posizionate su una ruota suddivisa in molti scomparti (I18), ogni scomparto contiene una dimensione differente di lamelle e quando si ha un sufficiente numero di lamelle, viene creato un bancale apposito per questa misura.

A questo punto della lavorazione si è già perso circa il 40% del legno che componeva in origine i tronchi, questo ovviamente corrisponde ad una percentuale molto elevata di legno scartato, considerando il fatto che si è solo all'inizio del processo.

A questo punto il legno viene posizionato sui bancali e trasportato nella camera dedicata alla stagionatura (I19), per essere essiccato per circa 60 ore in modo da ottenere un'umidità intorno al 12%.

Una volta terminato il processo di essiccazione il legno è pronto all'utilizzo e può essere portato agli stabilimenti per la realizzazione di due tipologie di lavori di cui si occupa l'azienda, ovvero case modulari in legno, ovvero l'attività principale dell'azienda e in piccola parte di architettura free form, della quale vengono realizzati al massimo due progetti all'anno.

Produzione di case modulari

Il primo passaggio una volta che il legno arriva in bottega è quello di applicare ad un'estremità un cartellino con un numero



(I18) Ruota dove vengono posizionati gli assi irregolari in attesa di misure simili



(I19) Camera di essiccazione del legno



(I20) Listelli in legno con codice personale



(I21) CNC per la lavorazione dei listelli



(I22) Tavolo per assemblaggio pareti

univoco (I20) che identifica quel preciso pezzo di legno, i pezzi sprovvisti di numero posso essere solo da buttare. posso essere solo da buttare.

Il secondo passaggio è quello di passare tutti i pezzi da un macchinario a controllo numerico che predispone tutti i fori e forme necessarie a realizzare gli incastri per tutti gli elementi che compongono l'architettura (I21).

Per gestire tutti i giunti necessari al corretto funzionamento della struttura viene utilizzato un software specifico, ovvero **CUT WORK** che in base al tipo di connessione che si vuole ottenere calcola in automatico il dimensionamento e la forma corretta per l'incastro. Di fatto è una specie di software CAM ma estremamente intelligente e soprattutto efficiente.

Infatti grasshopper viene utilizzato solo per la realizzazione delle free form iniziali, successivamente gli incastri e le giunture vengono elaborati con questo software.

Una volta che i pezzi sono pronti per essere assemblati vengono ordinati nelle vicinanze del tavolo di assemblaggio e montati molto semplicemente (I22), prestando la massima attenzione ai codici in modo da non sbagliare mai i pezzi da utilizzare.

Su questi tavoli vengono assemblate le singole pareti che poi verranno trasportate direttamente sul posto e assemblate tra loro molto rapidamente.

Architettura free form

Nel secondo stabilimento che abbiamo visitato, che si trova a circa un Km dal precedente, l'azienda ha posizionato sia gli uffici che i macchinari destinati alla produzione di architettura free form.

Sono circa dodici anni che l'azienda si occupa di architettura free form, tuttavia risulta essere ancora molto complessa, infatti rappresenta un rischio per l'azienda, in quanto richiede moltissimo lavoro, spesso si commettono errori e soprattutto ogni singolo pezzo viene prototipato e di conseguenza richiede test e verifiche non semplici prima di essere utilizzato.

Per questo motivo è fondamentale per l'azienda tutta la parte più classica che consente di produrre molti pezzi standard, praticamente uguali tra loro in pochissimo tempo. Infatti, ogni anno si occupano di circa 80 progetti "tradizionali" e massimo 3 progetti di architettura free form.

Questo secondo stabile è dotato anch'esso di un macchinario CNC ma rispetto al precedente è tutta un'altra storia; infatti, si tratta di una CNC a 5 assi con una lunghezza di **60 m** (I23-I24), le punte e le frese sono posizionate ai lati, sotto e sopra la macchina (I25-I26-I27-I28) ed è il pezzo in fase di lavorazione che viene spostato in modo da andare incontro alle punte e non la testa della macchina che si muove come in una classica CNC.

Per vederla meglio siamo saliti nella "cabina di controllo" posta sopra al macchinario (la cabina rossa visibile nell'immagine I24), dalla quale grazie al pavimento trasparente ho potuto realizzare le foto successive a punte e frese.

Questa tipologia di macchinario ha sicuramente numerosi vantaggi, come la possibilità di lavorare su pezzi di grandissime dimensioni ottenendo una precisione molto elevata, non dovendo mai staccare il pezzo dal supporto e potendo forare da sopra e da sotto nello stesso punto preciso.

Tuttavia, ha anche degli svantaggi, come ad esempio la difficoltà nella pulizia.

Questa macchina viene utilizzata per tagliare pezzi lunghi anche 27 m, ovviamente i pezzi non potranno essere lunghi 60 m perchè altrimenti la macchina non avrebbe spazio residuo per muoversi avanti e indietro.

Inoltre, in genere i pezzi che vengono tagliati hanno dimensioni molto inferiori, intorno ai 12 m, ovvero le dimensioni adatte ad un trasporto convenzionale su ruota.



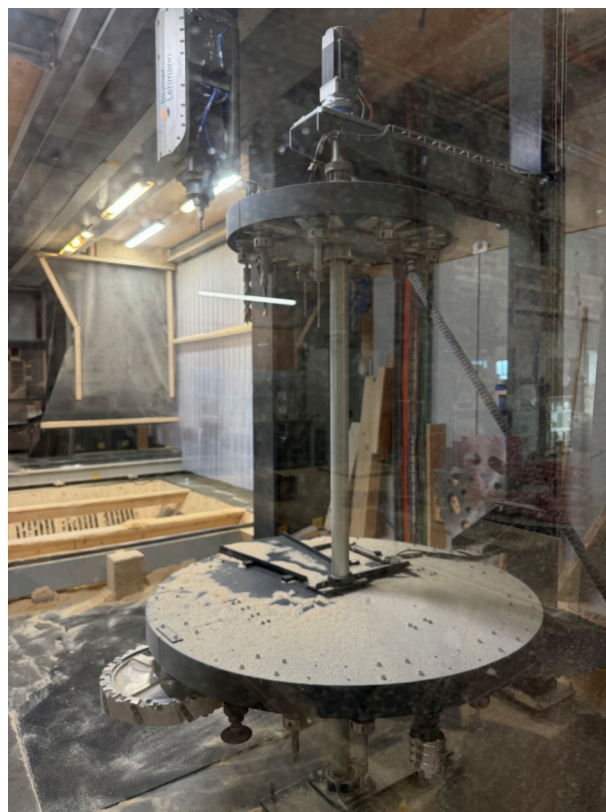
(I23) CNC per pezzi free form vista dall'alto



(I24) CNC per pezzi free form vista frontale



(I25) CNC per pezzi free form testa con attrezzi lato sx



(I26) CNC per pezzi free form testa con attrezzi lato dx



(I27) CNC per pezzi free form testa con attrezzi retrostante



(I28) CNC per pezzi free form testa per fori sottos-tante

A questo punto siamo entrati in una specie di piccolo museo dedicato a tutte le architetture free form realizzate dall'azienda

nel corso degli anni, purtroppo ci è stato chiesto di non fare foto a questa parte dell'azienda essendo presenti modelli in scala 1:1 di varie architetture, oltre ai disegni tecnici accurati.

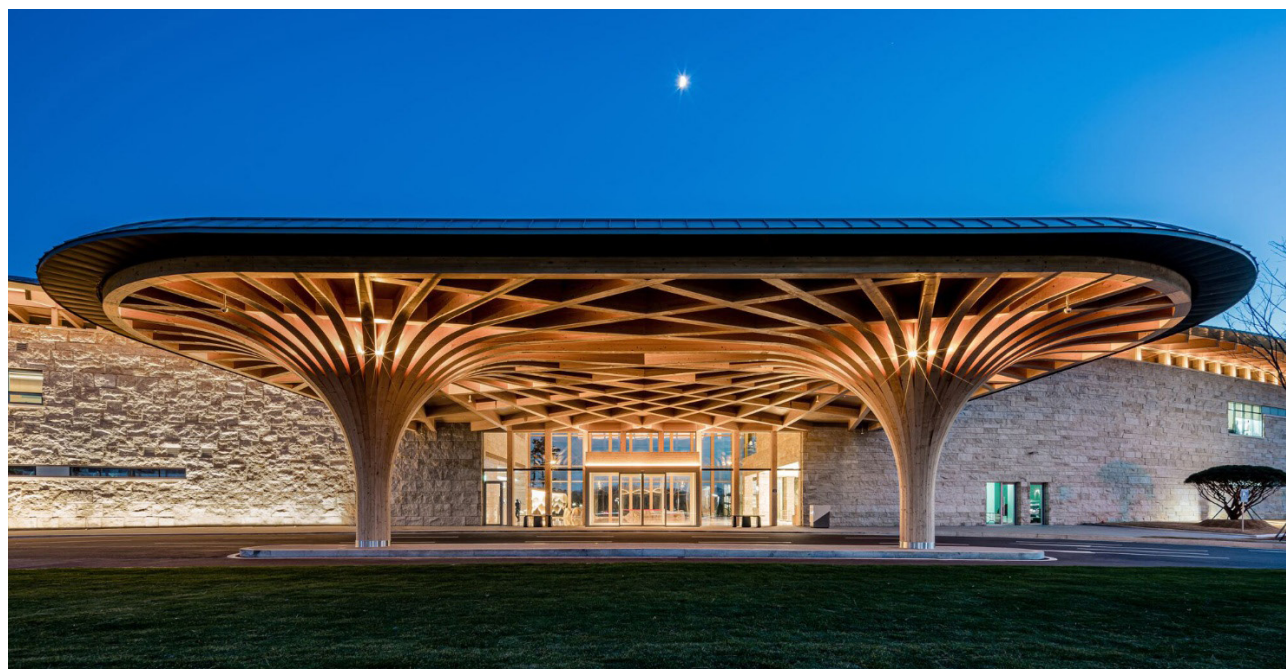
Nello specifico ho avuto la possibilità di vedere da vicino uno dei riquadri che compongono la struttura dello Swatch HQ (I29), che il giorno successivo ho colto l'occasione di visitare, trovandosi a solo un paio d'ore di macchina da Gossau, realizzato in collaborazione con Shigeru Ban.

Oltre a questo, vi erano dei particolari del nuovissimo progetto che verrà realizzato in collaborazione con Norman Foster, ovvero Free Form wooden roof for the golf clubhouse in South Korea (I30).

A questo punto Kai mi ha illustrato le varie



(I29) Swatch HQ, Biel, Svizzera - prospetto principale



(I30) Free Form wooden roof for the golf clubhouse in South Korea (Fonte: Blumer Lehmann)

modalità con le quali sono stati ottenuti i elementi, partendo dallo Swatch HQ, le travi, che viste di persona risultano essere veramente molto spesse, lo spessore infatti si aggira sui 60 cm.

Per ottenere tutte le curve necessarie senza spezzare il legno, sono state curvate in due fasi. prima di tutto sono state utilizzate delle lamelle da 6-8 mm di spessore, le quali sono state piegate a secco per mezzo di una pressa e delle dime. In seguito, i vari strati sono stati incollati tra loro, uno sopra l'altro e pressati nuovamente tutti insieme. Questo doppio passaggio si rende necessario per evitare di rompere le fibre del legno e quindi fratturare l'elemento, in questo modo la curvatura risulta essere più sopportabile per il materiale.

A questo punto l'elemento ottenuto risulta essere molto grezzo, per questo motivo infatti la trave viene realizzata più spessa in tutte le direzioni, in questo modo alla fine del processo è possibile tagliare il materiale in eccesso, ottenendo la sezione completa e pulita. Infine, se necessario viene stuccata in qualche punto se necessario, levigata ed eventualmente forata tramite CNC, come ultimo tocco viene data una mano di impermeabilizzante e la trave è pronta per essere trasportata e assemblata.

Durante tutto questo processo in realtà lo studio di architettura non ha nessun ruolo, se non quello di verificare che i primi prototipi mantengano le richieste date dal progetto in termini di design.

Ad esempio, nel caso dell'architettura realizzata in collaborazione con Norman Foster, quando hanno presentato il prototipo, che mi è stato mostrato anche a me, l'architetto era molto preoccupato della distanza tra le lamelle più chiare e quelle più scure interne, perchè dovevano mantenere il disegno di facciata, ma non si è interessato a come stesse insieme la struttura.

Questo aspetto infatti è totalmente nelle mani del costruttore che, assistito da ingegneri progetta e produce l'intera

struttura.

Sempre parlando del Free form wooden roof for the golf club house questa struttura è stata molto complessa da realizzare in quanto richiedeva una piegatura in senso trasversale delle fibre del legno.

Per questo motivo le lamelle non erano adatte alla realizzazione di questa piega e quindi si è scelto di piegare dei listelli, ovvero dei parallelepipedi, di circa un cm di spessore e larghezza e successivamente incollarli tra loro, ottenendo così le lamelle con l'inclinazione necessaria.

Ovviamente per poter effettuare queste piegature è necessario conoscere il rapporto tra la lunghezza e la possibilità di essere piegato di quello specifico legno, ad esempio nel caso specifico i listelli potevano essere piegati di 30° ogni 2 m di lunghezza.

Un altro esempio che mi è stato mostrato è quello degli incastri ottenuti per la realizzazione della Viewing tower with resource (I31), ovvero degli incastri ottenuti da dei tagli obliqui lungo il bordo del legno, alternati in modo regolare e rafforzati con



(I31) Viewing tower with resource (Fonte: Blumer Lehmann)

delle spine interne.

Questo sistema consente di ottenere delle pareti movimentate pur utilizzando degli elementi completamente dritti e che non richiedono piegature, risparmiando così moltissimo tempo durante la produzione.

Un aspetto estremamente negativo di questo tipo di produzione, tuttavia, è la quantità di legno che viene sprecata per la realizzazione di questi componenti; infatti, una volta arrivati alla fine del processo il legno che compone l'elemento finito è solo il 10% di quello utilizzato in partenza.

Quindi si ha uno scarto di circa il **90%** del tronco preso all'inizio, per questo motivo l'azienda ha deciso di riutilizzare tutti questi scarti. Per quanto riguarda il legno massello che viene tagliato all'inizio del processo viene riutilizzato per la creazione di pannelli di MDF o PDP, mentre il materiale lavorato, magari coperto di colle o altre sostanze chimiche viene termovalorizzato per produrre energia elettrica all'interno dell'azienda.

A questo punto ci siamo spostati in una sala riunione dove mi è stato possibile porre qualche altra domanda specifica.

Quali sono le tipologie di legno che usate maggiormente? e per quale motivo usate queste e non altre tipologie?

L'80% del legno che usiamo è abete, perché è economico e molto facile da trovare, il resto del legno che utilizziamo è principalmente quercia, il quale ovviamente è più bello esteticamente, ma è molto più costoso in quanto richiede molti anni per crescere, mentre l'abete in circa 40 anni è pronto per essere tagliato.

Tuttavia a volte è necessario utilizzare il

legno di quercia in particolare quando si ha a che fare con ambienti umidi questo legno è molto più resistente.

Realizzate tutti i processi internamente, oppure qualche processo lo realizzate esternamente?

L'unico processo che non gestiamo noi è la curvatura, così come il processo di incollaggio, questo perché al momento ci risulta più comodo avendo degli ottimi collaboratori in questo settore.

Quali sono i principali problemi che sorgono durante la lavorazione delle tavole di legno?

Questi sono differenti tra l'architettura standard e non standard, in generale i problemi più fastidiosi sono quelli legati ai nodi e alla resina che creano dei punti deboli all'interno di travi o pannelli e molto spesso non si ha idea che ci sono fino a quando non si taglia la trave.

Vi occupate anche dello studio degli elementi metallici all'interno delle architetture?

Si abbiamo degli ingegneri interni che si occupano di calcolare e realizzare il design dei giunti metallici, che poi vengono fatti realizzare esternamente da ditte specializzate in questo campo, tuttavia il processo di design è interamente gestito da noi.

Come gestite un elevato numero di giunti tutti leggermente differenti tra loro?

Questo aspetto è molto complesso e viene gestito in maniera molto semplice grazie ai software parametrici come CUTWORK, andando ad adattare la geometria del giunto scelto all'andamento delle travi che devono connettere.

Quando tutte le parti del progetto sono complete, come organizzate il trasporto e l'assemblaggio? Vi aiutate con qualche software in particolare?

No in realtà qualche volta se ci sono parti molto complesse ci aiutiamo con grasshopper, tuttavia nella maggiorparte dei casi ci limitiamo a ordinare i pezzi in ordine di assemblaggio e li facciamo partire in sequenza, in modo da avere sempre in cantiere i pezzi che ci servono in un determinato momento.

E per aiutare le persone che dovranno assemblare preparate dei disegni specifici per aiutare gli operatori a non commettere errori in fase di assemblaggio?

No, noi lavoriamo con i software e ogni pezzo ha un numero specifico, e ogni volta che assembliamo un edificio mandiamo una nostra squadra ad eseguire i lavori; quindi, sanno esattamente come è composto l'edificio e come assemblarlo.

Ovviamente poi ci sono dei disegni che ci aiutano ad eseguire il lavoro correttamente, ma sono comunque sempre prodotti da noi e comunque spesso chi realizza i disegni è presente anche in cantiere al momento dell'assemblaggio.

Prendete anche in considerazione dei modi per riutilizzare i materiali da costruzione utilizzati per realizzare l'edificio una volta giunto al fine vita, oppure non vi occupate di questo aspetto?

Per quanto riguarda l'architettura modulare si può provare a fare questo ragionamento essendo elementi standardizzati che potrebbero essere riutilizzati in un altro edificio. Per quanto riguarda l'architettura, l'architettura parametrica invece questo non è possibile per via delle forme estremamente particolari che la compongono.

Potresti riassumere le fasi per realizzare un edificio complesso come lo swatch HQ?

Sì, si parte dal design e si cerca di capire quali potrebbero essere le applicazioni possibili e quelle non possibili, nel caso specifico Shigeru Ban ha creato il design ma successivamente abbiamo sviluppato la geometria per la produzione. Successivamente ci sono una serie di test da fare come i test antincendio, test strutturali, e molti altri controlli.

Infine, si procede con la realizzazione dei componenti provando tutti gli incastri in casa prima di procedere per il cantiere e in questa fase in genere si trovano degli elementi che non funzionano o che comunque risultano problematici, quindi vanno rivisti, corretti e alla fine si procede con il trasporto e l'assemblaggio in cantiere.

Secondo te c'è qualche argomento fondamentale del tuo lavoro di cui non abbiamo ancora discusso?

Penso che abbiamo discusso più o meno di tutto, l'unica cosa che mi viene in mente è come questo tipo di architettura potrebbe svilupparsi in futuro.

Infatti, solo 10 anni fa questa tipologia di architettura era impensabile, per cui credo che il ruolo del legno sia molto cambiato negli ultimi anni e penso che la cosa molto interessante sia cercare di capire in che modo potrebbe cambiare nuovamente in futuro.

Magari trovare un modo di realizzare questo tipo di architetture senza tutti gli scarti che vengono prodotti oggi, che rappresenta un vero limite di questo tipo di produzione.

Sicuramente in questo le tecnologie avranno un ruolo fondamentale anche se al momento non è facile dire come, anche per via dei continui cambiamenti nel settore.

Ad esempio, attualmente alcune università stanno provando a separare le fibre dal legno, piegarlo e poi reinserire le fibre in modo da renderlo nuovamente resistente, tuttavia sono cose ancora in fase di sviluppo ed è difficile dire se porteranno effettivamente a qualcosa di concreto.

Grazie mille per la disponibilità!

2.5.3 - Produzione con stampa 3D

2.5.3.1 - Stampa antigravità

Anche nel campo della stampa 3D si stanno facendo enormi passi avanti, anche più che in molti altri campi, questo settore infatti gode di notevoli innovazioni nell'ultimo decennio, una delle ultime è appunto la possibilità di stampare ignorando la gravità⁴⁷.

Con le classiche stampanti 3D oggi in commercio non è possibile stampare oggetti in direzione diversa rispetto a quella verticale; tuttavia, questi macchinari vanno spesso incontro a necessità che ne allungano i tempi di fabbricazione, come la necessità di un apposito piano e orizzontale.

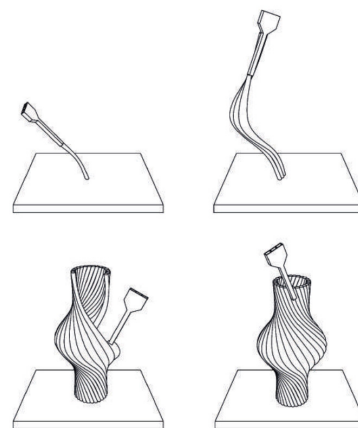
Questo nuovo sistema di stampa ha l'obiettivo di stampare su qualsiasi superficie di lavoro e con qualsiasi inclinazione del piano di stampa, senza la necessità di supporti che rischiano di rovinare l'oggetto in fase di rimozione.

Per questo processo è fondamentale un determinato polimero termoindurente che consente una rapida presa proprio grazie al calore fornito dalla stampante, i componenti di questo polimero vengono miscelati mediante un mixer statico e una vite estrusore e l'estrusione avviene ad un millimetro esatto dall'apertura della boccola.

Il primo esperimento riguardava una spirale stampata su una superficie verticale, dopo questo esperimento riuscito è stato possibile migliorare anche la velocità di stampa, che nella produzione additiva è sempre un punto critico, grazie a due riscaldatori collegati alla boccola che hanno consentito l'indurimento più rapido da parte del materiale, questo

miglioramento ha portato la velocità di stampa ottenuta ad un metro in 5 minuti. Una volta ottenuto il risultato sperato si è passati alla ricerca di un metodo di produzione che ne sfruttasse a pieno le potenzialità, a questo scopo è stato scelto un braccio robotico ABB 2400L. Poiché non esisteva un software in grado di gestire sia i movimenti del robot che la velocità di stampa, questo è stato reso disponibile tramite un plug-in personalizzato per Rhinoceros che è poi stato scriptato tramite linguaggio python. Grazie a questo software è stato inoltre possibile scongiurare eventuali collisioni del braccio con il pezzo già prodotto, cosa che porterebbe ad un fallimento immediato della stampa.

Questa innovativa tecnologia potrebbe avvicinare ulteriormente il mondo dell'architettura a quello della produzione digitale, rendendo disponibili robot che stampano case o che si occupano del restauro di un edificio con una precisione altrimenti impossibile da ottenere.



(64) Processo libero di estrusione (Fonte: anti-gravity additive manufacturing pp. 4)

47 - anti-gravity additive manufacturing

48 - optimisation of robotic printing paths for structural stiffness

2.5.3.2 - Stampa 3D di strutture tramite machine learning

La stampa 3D sulle strutture è ottimale se si vuole ottenere un risultato omogeneo in gran parte ma con delle piccole variazioni puntuali.

Questo metodo computazionale vuole esporre le possibilità di progettare contemporaneamente dal basso verso l'alto, che si occupa dell'ottimizzazione dei moduli locali, e dall'alto verso il basso che si occupa dell'ottimizzazione della forma globale, sfruttando le potenzialità della ricerca metaeuristica e dell'apprendimento automatico⁴⁸.

Lo studio Foster + partners dove si è tenuto l'esperimento si concentrano in primo luogo sulla programmazione delle proprietà strutturali locali degli elementi portanti. Questo team in particolare aveva già testato la stampa 3D in acciaio ma su più strati, quindi le differenze a livello di densità dei materiali erano notevoli.

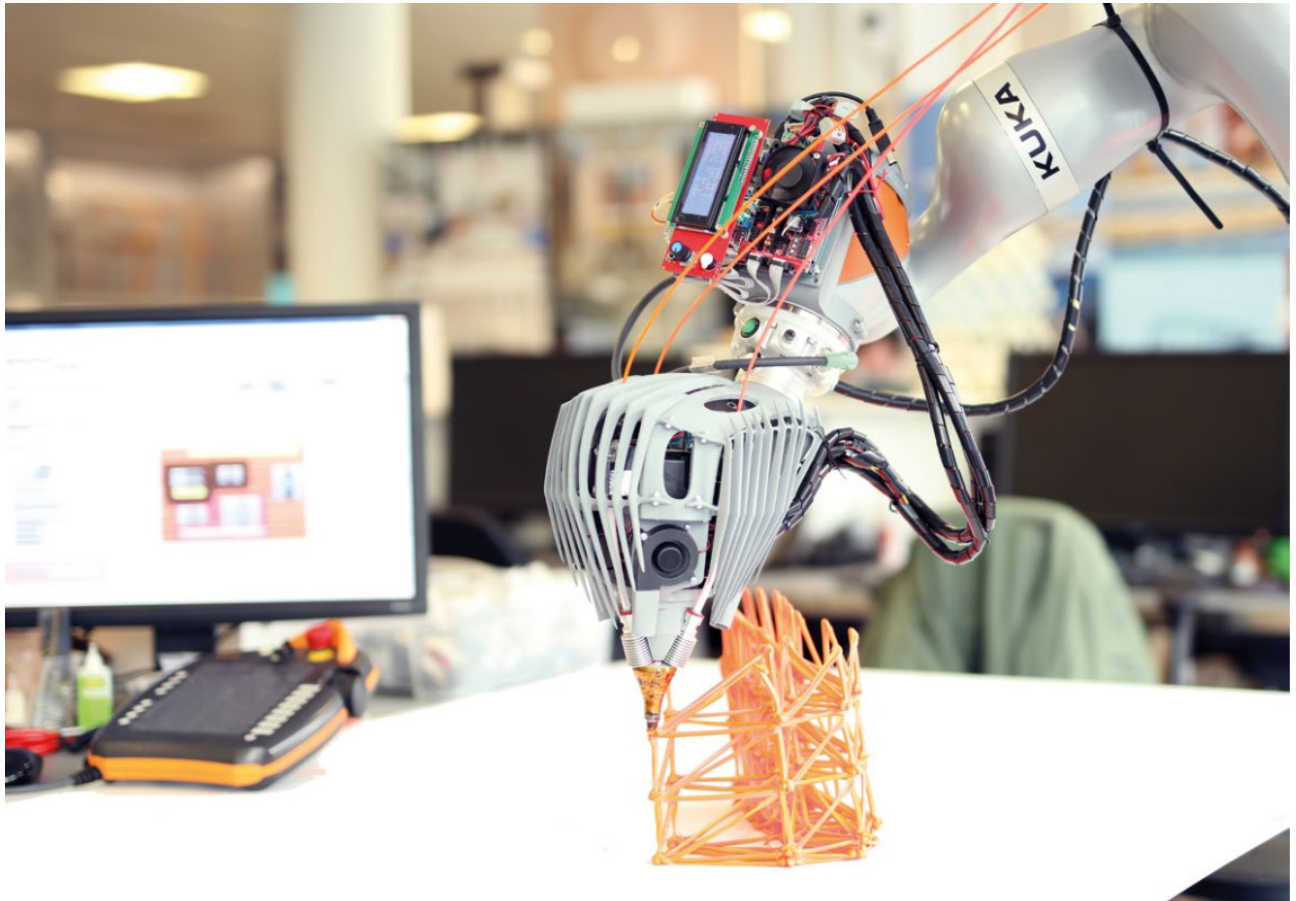
La libertà offerta dal braccio meccanico

unita alla stampa 3D hanno offerto un approccio totalmente innovativo verso le strutture a traliccio.

Comenelcasopresentatoprecedentemente infatti anche in questo caso il materiale viene estruso lungo l'asse e senza supporti, sfruttando la tecnica introdotta nel paragrafo precedente [65].

L'esperimento nello specifico utilizza un braccio meccanico a sette assi, la plastica utilizzata (ABS) viene spinta attraverso l'estrusore che lo fonde a 250° e lo fa uscire dall'ugello, il quale ha una forma a stella per consentire un maggiore flusso d'aria all'interno e il conseguente raffreddamento più rapido da parte del polimero, oltre a questo ci sono anche 6 ventole che soffiano aria sul materiale.

La fabbricazione della trave è stata ultimata in 40 ore per una lunghezza totale di 2,5 m con circa 9 kg di filamento.



[65] Stampa di un traliccio (Fonte: optimisation of robotic printing paths for structural stiffness pp. 24)

Nel campo della stampa di strutture spaziale, ci sono già alcune ricerche molto interessanti in corso come, ad esempio, quello condotto da Gilles Retsin e Manuel Garcia presso UCL, i quali hanno approfondito ulteriormente la stampa spaziale con una strategia che hanno chiamato “fabbricazione discreta”. Questo metodo propone di creare la geometria tramite voxel, una specie di pixel tridimensionale, che viene calibrato con un determinato livello di topologie prendendo in considerazione le connessioni agli altri voxel. In questo modo il percorso dell’utensile viene semplificato e i tempi si accorciano.

Sean Hanna invece investiga la possibilità di stampa 3D di strutture di piccola scala, tramite un campionamento di “unità cubiche”, per generare topologie a traliccio ottimali considerando il livello di stress corrispondente a ciascuna cubica. Grazie a questo campionamento è possibile utilizzare i dati raccolti per produrre un’iterazione dei dati e ottenere il risultato migliore possibile per la realizzazione della trave.

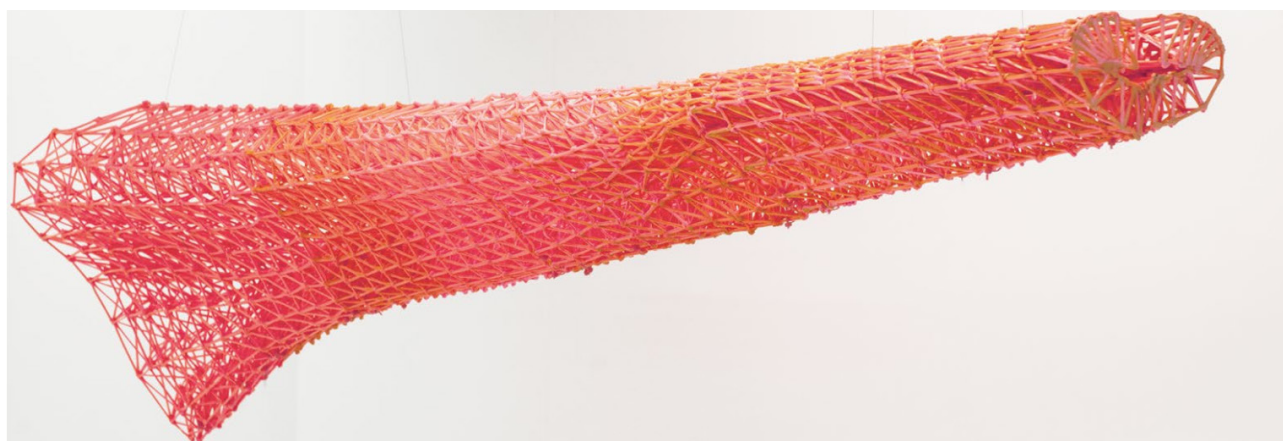
Queste tecnologie non tengono tuttavia conto della ricerca di una sinergia tra il design globale e il design modulare, in cui entrambi i processi si informano

reciprocamente. Qualsiasi corpo continuo può essere convertito in una struttura a traliccio che è generata orientando elementi del traliccio a elementi strutturali, le cui geometrie sono collegate alle proprietà della superficie [66].

Il problema di progettazione di questi elementi si dispone su due scale differenti, l’approccio dall’alto verso il basso considera la trave anche come un elemento di design oltre che strutturale, mentre l’approccio dal basso verso l’alto si preoccupa solo di ottimizzare la capacità di carico.

Probabilmente nel classico caso di una trave con un carico all’estremità questo non sarebbe un grosso problema, ma con una struttura più complessa sicuramente questo risulterebbe un problema non indifferente a livello di interferenza nelle scelte. Per risolvere questa problematica si è pensato di ricorrere ad un workflow computazionale, il quale raggruppa in sottoinsiemi indipendenti i sottoinsiemi globali e locali.

La geometria complessiva è stata elaborata e valutata da un risolutore metaeuristico che controlla i parametri globali, ma considera anche quelli locali per valutare le possibili soluzioni. In questo modo entrambi i processi sono stati eseguiti allo stesso tempo, consentendo al team di



[66] Esempio di trave stampata (Fonte: optimisation of robotic printing paths for structural stiffness pp. 6)

progettare tramite lo stesso modello computazionale in entrambi i modi.

Il flusso di lavoro computazionale complessivo ha seguito un processo iterativo automatizzato:

1. Inizializzare i parametri globali per generare un nuovo solido per la trave.
2. Simulare la distribuzione dello stress nel solido utilizzando il programma FEA Karamba3d, produrre linee di stress principali.
3. Convertire la trave in un traliccio regolare e simulare le forze della sezione trasversale utilizzando Karamba3d.
4. Inserire le proprietà strutturali locali del traliccio regolare e le linee di stress principali nell'ANN, produrre il percorso di stampa.
5. Inserire la soluzione nel risolutore evolutivo per calcolare la deformazione strutturale e la massa da valutare.
6. Iterare.

2.5.3.3 - Stampa 3D con cemento riciclato

Il ponte Striatus è stato progettato e realizzato nel 2021 con lo scopo di essere installato, smontato, riassetato e riproposto, dimostrando così che le 4 R della circolarità (ridurre, riutilizzare, riparare e riciclare) possono essere applicate tutte ad un unico progetto⁴⁹.

I blocchi di cemento sono stati realizzati con cemento ad alta resistenza (90 MPa) con sabbia avente granulometria inferiore a 1 mm.

Gli obiettivi di questo ponte fondamentalmente erano 3: ottimizzare l'impronta di carbonio, ridurre la dipendenza da risorse vergini ed estendere la vita progettuale della struttura.

La seconda vita di Striatus ad oggi si chiama Phoenix ed è stato stampato recuperando il materiale utilizzato per il primo ponte e ristampandolo andando a tritare il vecchio.

La superficie che rappresenta la geometria globale è stata campionata in moduli che condividono la stessa topologia ma possono differenziarsi nella morfologia. Questi moduli rappresentano le dimensioni massime accomodate dalla stampa 3D, ma sono stati regolati considerando i criteri di ottimizzazione tra distanze massime e minime stampabili.

Ovviamente un altro aspetto fondamentale da comprendere quando si vuole realizzare una struttura di questo tipo sono le proprietà intrinseche del materiale ed è fondamentale scegliere il migliore in base a criteri ben noti.

Un aspetto molto interessante di questo algoritmo detto ANN che è in grado di apprendere informazioni, è che una volta addestrato è possibile utilizzarlo in diversi processi di stampa ottenendo sempre dei risultati ottimali.

Questo esperimento è senza dubbio una dimostrazione di come l'ANN possa aiutare a generare un elemento efficace a livello tecnologico ma senza tralasciare il design e la cura dei particolari, velocizzando tutto il processo.

La prima operazione necessaria è stata un'analisi strutturale, grazie alla quale si è riusciti a definire una geometria più semplice che creasse meno spinta sulla struttura.

Successivamente si è deciso di realizzare più parti, in modo tale da semplificare il trasporto e l'assemblaggio in opera.

Infine, si è resa necessaria anche un'analisi dei limiti locali allo stress, ovvero come reagisce il cemento a delle sollecitazioni in punti specifici della struttura.

I risultati dei test sono stati estremamente positivi e solo in alcuni punti si è arrivati ad avere uno stress di circa 9 MPa, ovvero un decimo del massimo supportato.

La progettazione dei singoli elementi stampati in 3D ha richiesto attenzione anche per la resistenza a compressione.

A differenza del primo ponte in cui si è

utilizzato un sistema di stampa a doppio strato, in questo caso è stato sostituito da un singolo percorso con spessore raddoppiato (67). Alla fine, grazie a tutti gli accorgimenti inseriti nel progetto è stato possibile utilizzare circa un terzo di materiale completamente riciclato e metà del materiale era proveniente dal luogo di stampa. Inoltre, è stata utilizzata una tecnologia 2k, ovvero di stampa con due componenti diversi per garantire una lavorabilità ottimale e fare in modo che il materiale sia ancora fluido alla fine della miscelazione e la costruibilità della struttura sia regolabile in base alle necessità. Complessivamente per stampare tutti i blocchi in calcestruzzo sono state necessarie ben 67 ore, contro le 84 del primo ponte, quindi con un conseguente risparmio di tempo ed energia. Tuttavia, uno degli scopi principali del nuovo ponte era quello di utilizzare meno elementi monouso possibile nella fase di assemblaggio e questo obiettivo è stato raggiunto riducendo la profondità del nido d'ape e minimizzando il numero di elementi. Questo ha permesso di posizionare i pannelli a questo punto più leggeri con maggiore precisione (68). Per controllare eventuali imprecisioni l'assemblaggio è stato eseguito dal centro verso l'esterno, lasciando 2,5 cm di spazio dal terreno. Confrontando i risultati ottenuti risulta evidente che il secondo ponte abbia consentito un risparmio a livello di impatto climatico di circa il 40% rispetto al primo ponte. Questo ponte sicuramente rappresenta un esperimento molto interessante per cercare di capire l'affidabilità a livello strutturale degli elementi stampati in 3D e in particolar modo della stampa di calcestruzzo riciclato, cosa che a livello ambientale sarebbe sicuramente molto vantaggiosa (69).



(67) Percorso di stampa del ponte Phoenix (Fonte: Fabricate 2024 pp. 95)



(68) Fase di assemblaggio del ponte Phoenix (Fonte: Fabricate 2024 pp. 95)



(69) Il ponte Phoenix appena terminato (Fonte: Fabricate 2024 pp. 96)

2.5.4 - Buga fibre pavilion: strutture fabbricate roboticamente

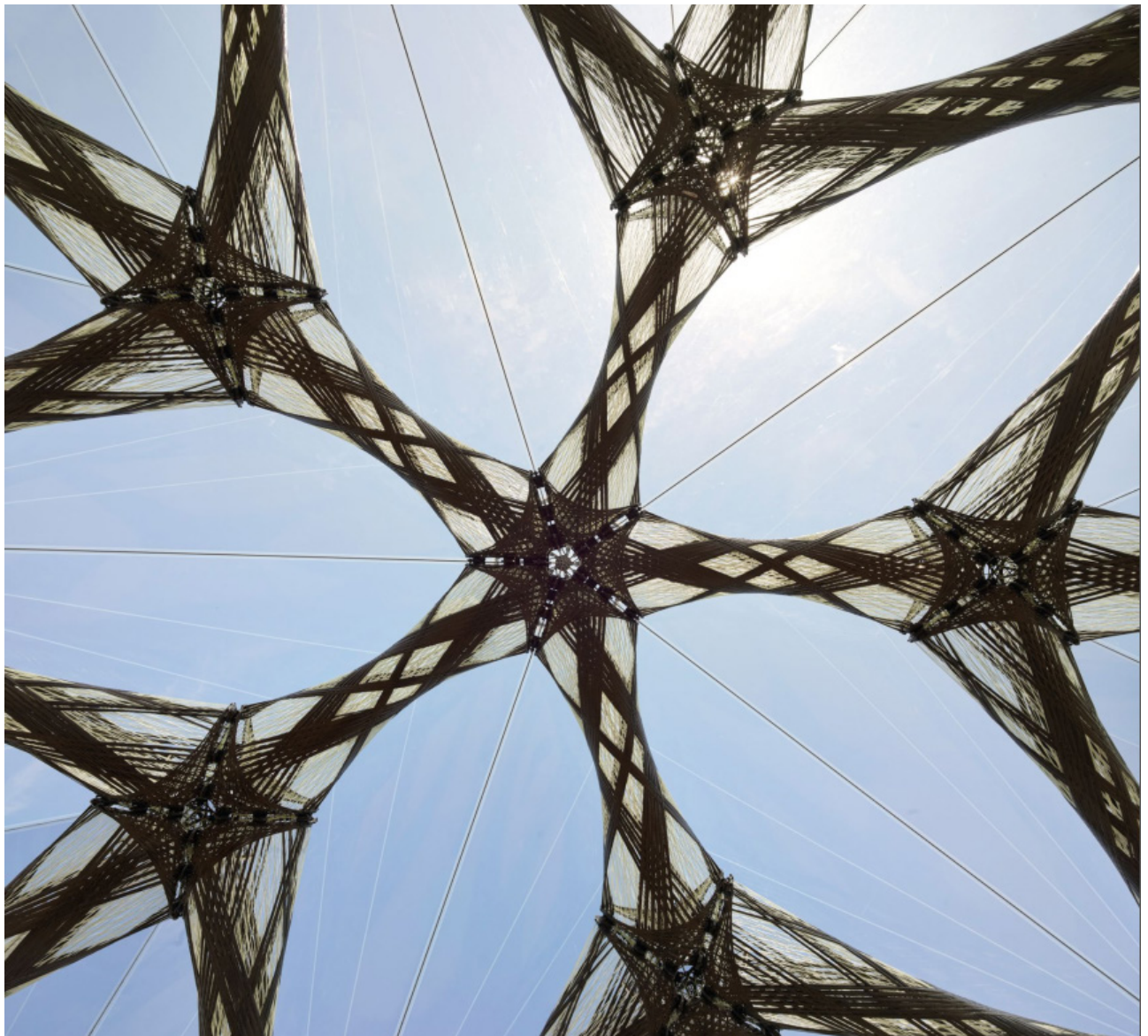
Il progetto del BUGA fibre pavilion realizzato dall'istituto per design e costruzione computazionale e l'istituto di strutture edilizie e progettazione strutturale (ITKE) si propone di realizzare un edificio in cui l'intera struttura portante è stata sviluppata roboticamente con G/CFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer).

Il nuovo sistema di costruzione in composto di fibre è stato integrato e interfacciato con una gerarchia di sottosistemi adattati alle esigenze della struttura. Il componente dell'edificio, ovvero un corpo fibroso iperbolico portante è riuscito ad essere sia leggero che su larga scala, bilanciando la

complessità morfologica della griglia fibrosa con la fattibilità economica della fabbricazione (70).

La struttura è composta da 60 componenti edilizi di dodici tipi, assemblati mediante connettori in acciaio ad angolo variabile, con la struttura portante che trasferiva direttamente il carico alla struttura in cemento. L'involucro dell'edificio era costituito da una membrana EFTE (Ethylene Tetrafluoroethylene) trasparente.

La ricerca dietro a questo edificio si basa principalmente sulle reti Anigrosid, avvolte nella fibra, di fatto anche i componenti delle stazioni spaziali sono realizzati tramite



(70) Interno (Fonte: buga fibre pavilion: towards robotically-fabricated composite building structures pp. 3)

fibra di carbonio su scanalature lavorate su un rivestimento in schiuma applicato ad un mandrino⁵⁰.

Di fatto questo tipo di design è particolarmente adatto per strutture che necessitano di una leggerezza estrema e che non sono soggette a carichi eccessivi, come potrebbe appunto essere un padiglione.

Questo padiglione può benissimo essere preso ad esempio come metodo di lavoro per iniziare a realizzare strutture in fibra, essendo di fatto un esperimento riuscito in questo campo.

Il processo di design che ha portato alla realizzazione del padiglione si basa sulla necessità di avere uno spazio ampio e luminoso, ideale per eventi all'aperto.

Un emisfero è stato discretizzato geodeticamente in cinque settori identici e la griglia tridimensionale risultante, successivamente ottimizzata strutturalmente.

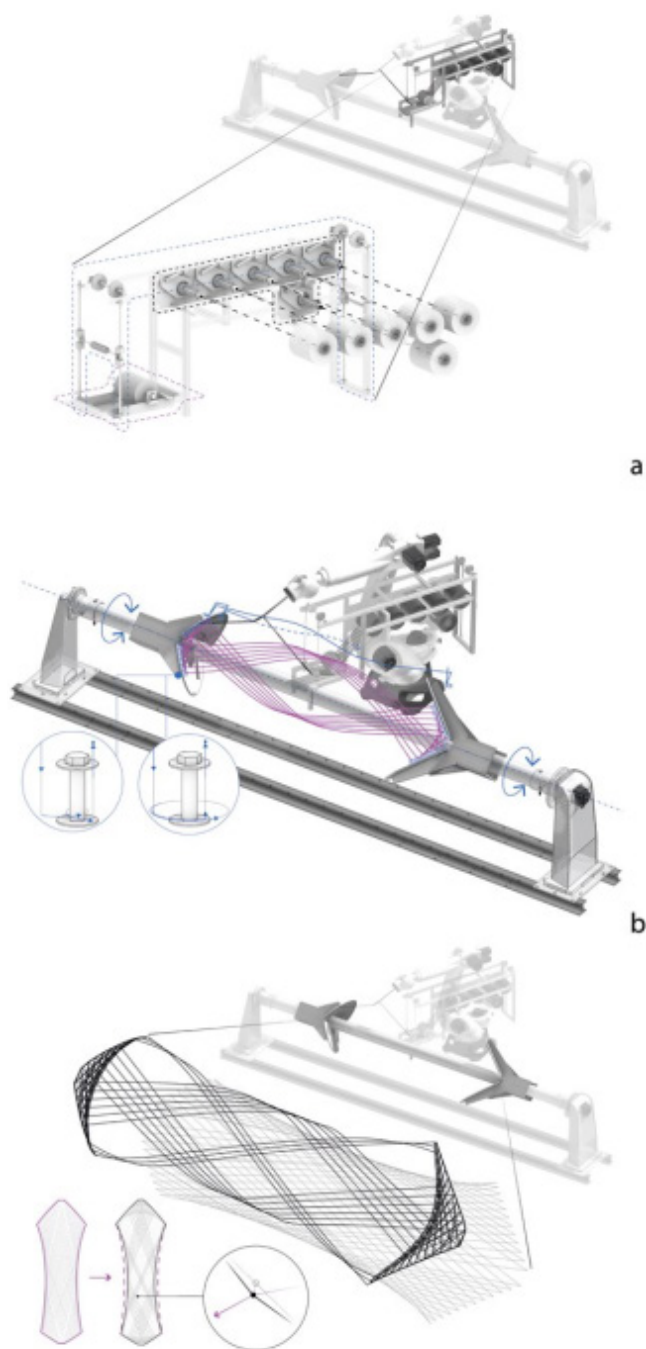
La morfologia delle fibre dei componenti consisteva in strati continui e multifunzionali, codificati come sintassi, che comprendevano richieste strutturali, proprietà dei materiali e requisiti architettonici.

Le fibre sono state avvolte sotto tensione, ancorandole a perni di avvolgimento, quando le fibre si posano su quelle esistenti si deformano gli incroci e dopo molte iterazioni la griglia diventa strutturale [71].

Per comprendere il comportamento di migliaia di filamenti sono stati utilizzati sistemi di simulazione e rilassamento dinamico sviluppati da ICD/ITKE e sono stati integrati nel flusso di lavoro di progettazione computazionale per trovare la geometria dei componenti [72].

Gli sviluppi di programmazione dei

robot sul movimento adattivo per l'avvolgimento dei filamenti senza anima ottenuti dall'ICD hanno consentito la fabbricazione delle parti del padiglione.



[71] Processo di produzione delle gambe del padiglione (Fonte: buga fibre pavilion: towards robotically-fabricated composite building structures pp. 6)

50 - buga fibre pavilion: towards robotically-fabricated composite building structures

Eseguendo una combinazione di avvolgimento automatizzato e movimenti di spostamento, il robot aggiungeva sequenzialmente le fibre, tirandolo attraverso un bagno di resina epossidica e ancorandole attorno ai perni di avvolgimento fissati.

Per determinare i movimenti del robot sono state utilizzate le sintassi delle fibre come punto di partenza, generando così il codice macchina.

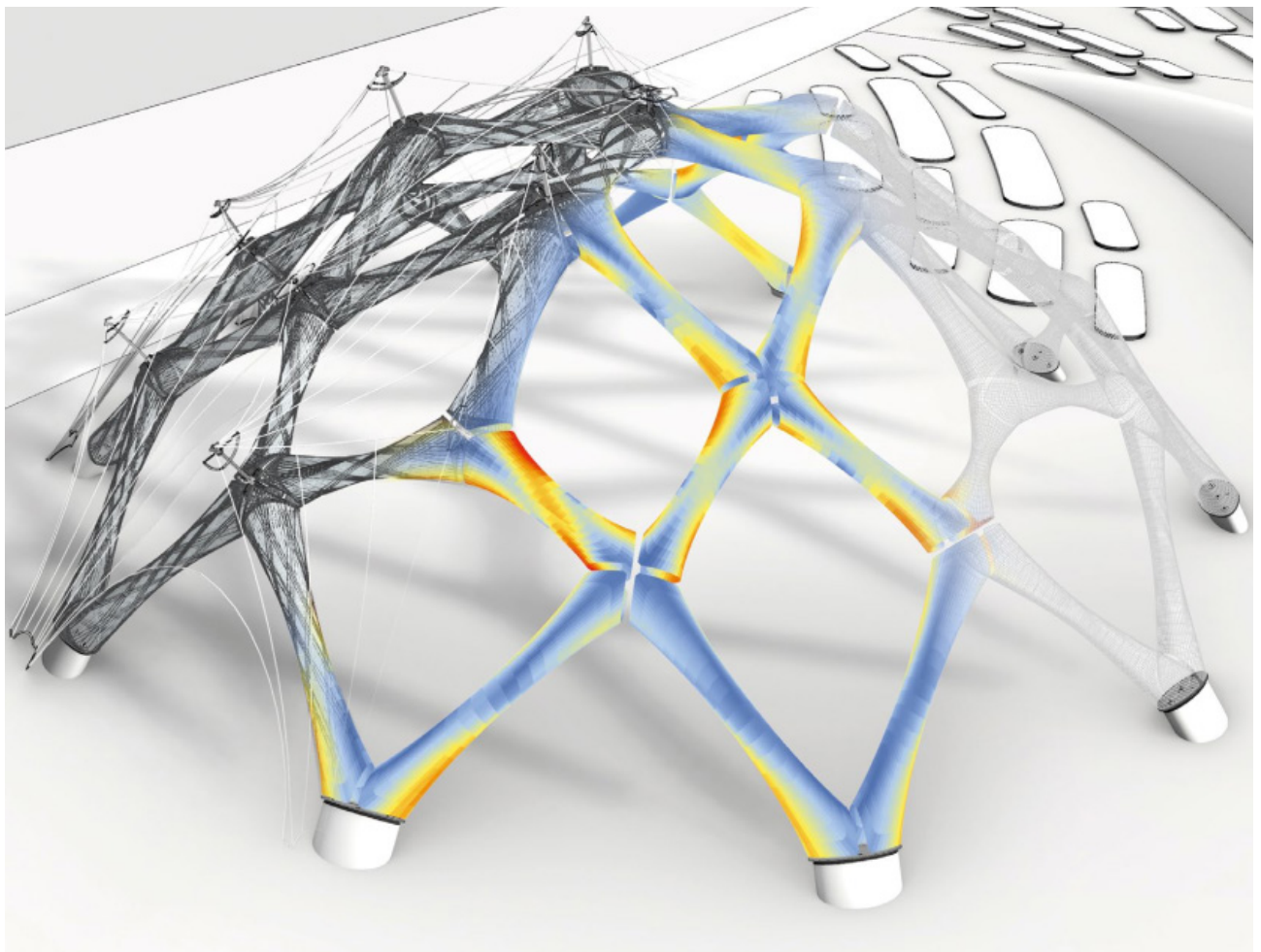
A livello fisico il processo includeva l'assemblaggio di tre componenti, la griglia di fibra di vetro traslucida, il rinforzo in fibra di carbonio e la resina epossidica.

La prima ad essere avvolta è stata la fibra di vetro, seguita poi da quella di carbonio, alla quale si devono le capacità strutturali e infine la resina epossidica ha fatto da collante tra le due. L'analisi strutturale numerica ha consentito la modellazione

dei carichi portati dalla struttura, i fasci di fibre sono quindi stati modellati seguendo queste indicazioni.

Questo tipo di tecnologia rispetto ad esempio a legno, acciaio o cemento risulta molto limitata dal punto di vista delle connessioni tra elementi, per questo motivo tutti i giunti utilizzati sono stati sperimentati per la prima volta durante questo processo di realizzazione e sono stati certificati uno ad uno per resistere a carichi dai 60 agli 80 kN.

Il processo inizialmente molto dispendioso in termini di tempo man mano che avanzava ha raggiunto un'ottimizzazione tale da essere in grado di produrre un componente in sole 8 ore, questo lascia ben sperare per possibili applicazioni in campo architettonico più estese, che siano realizzabili in tempi relativamente brevi.



(72) Analisi strutturale del padiglione (Fonte: buga fibre pavilion: towards robotically-fabricated composite building structures pp. 7)

Fonti

Libri (in ordine di citazione)

- Frank Jacobus, Angela Carpenter, Rachel Smith Loerts, Antonello Di Nunzio, Francesco Bedeschi, Architectonics and parametric thinking - computational modeling for beginning design, Routledge, New York, 2023

- Fabio Gramazio, Matthias Kohler, Silke Langenberg, Fabricate 2014 - Negotiating Design & Making, UCL Press, UK, 2014

- Jane burry, Jenny Sabin, Bob Sheil, Marilena Skavara, Fabricate 2020 - Making Resilient Architecture, UCL Press, UK, 2020.

- Phil Ayres, Mette Ramsgaard Thomsen, Bob Sheil, Marilena Skavara, Fabricate 2024 - Creating resourceful futures, UCL Press, UK, 2024.

Articoli (in ordine di citazione)

- Ahmed Hunbus, Bandar AlMangour, A Critical Review of Construction Using 3D Printing Technology, ASME Journal of Engineering for Sustainable Buildings and Cities, Marzo 2023.

- Loan Thi Pham, Thu Nguyen, Thanh Trinh, Anh Nguyen, Quang Do and Bien Bui, Jianzhuang Xiao, Development of 3D printers for concrete structures: mix proportion design approach and laboratory testing, Emerald Insight, Agosto 2022.

- Weiguo Xu, Shuyi Huang, Dong Han, Zhiling Zhang, Yuan Gao, Peng Feng, Daobo Zhang, Toward automated construction: The design-to-printing workflow for a robotic in-situ 3D printed house, Case Studies in Construction Materials, Agosto 2022.

Siti web (in ordine di citazione)

- www.vans.it/custom-shoes - visto in data 15/04/2024.

- WASP mostra Gaia, la prima casa stampata in 3D usando solo terra, acqua e riso - www.replicatore.it - visto in data 16/04/2024.

- MX3D Bridge - www.mx3d.com/industries/mx3d-bridge/ - visto in data 16/04/2024.

- Riva 1920 - riva1920.it/prodotti/sgabelli - visto in data 17/04/2024.

- En-code design and tecnologia - www.en-code.io/tgs - visto in data 17/04/2024.

Elenco immagini con fonti complete

(30) - Esempio di relazione esplicita (Fonte: Frank Jacobus, Angela Carpenter, Rachel Smith Loerts, Antonello Di Nunzio, Francesco Bedeschi, Architectonics and parametric thinking - computational modeling for beginning design, pp. 19)

(31) - Esempio di equazione esplicita (Fonte: Frank Jacobus, Angela Carpenter, Rachel Smith Loerts, Antonello Di Nunzio, Francesco Bedeschi, Architectonics and parametric thinking - computational modeling for beginning design, pp. 19)

(32) - Segmento aureo (Fonte: Frank Jacobus, Angela Carpenter, Rachel Smith Loerts, Antonello Di Nunzio, Francesco Bedeschi, Architectonics and parametric thinking - computational modeling for beginning design, pp. 20)

(33) - Esempio di parametrizzazione di un albero attraverso Grasshopper (Fonte: Frank Jacobus, Angela Carpenter, Rachel Smith Loerts, Antonello Di Nunzio, Francesco Bedeschi, Architectonics and parametric thinking - computational modeling for beginning design, pp. 25)

(34) - Esempio di creazione di frattali (Fonte: Frank Jacobus, Angela Carpenter, Rachel Smith Loerts, Antonello Di Nunzio, Francesco Bedeschi, Architectonics and parametric thinking - computational modeling for beginning design, pp. 26)

(35) - Digital grotesque 2, esempio di applicazione di frattali (Fonte: Designboom.com - visto in data 18/04/2024.)

(36) - Esempio di modello realizzato con atomi cellulari (Fonte: Frank Jacobus, Angela Carpenter, Rachel Smith Loerts, Antonello Di Nunzio, Francesco Bedeschi, Architectonics and parametric thinking - computational modeling for beginning

design, pp. 26)

(37) - Punto di partenza da cui personalizzare le proprie Vans (Fonte: Vans.it - visto in data 18/04/2024.)

(38) - Toyota Scion (Fonte: it.motor1.com - visto in data 18/04/2024.)

(39) - Sedia stampata in 3D con lettere come pattern (Fonte: Frank Jacobus, Angela Carpenter, Rachel Smith Loerts, Antonello Di Nunzio, Francesco Bedeschi, Architectonics and parametric thinking - computational modeling for beginning design, pp. 46)

(40) - Diverse versioni della sedia stampata in 3D (Fonte: Frank Jacobus, Angela Carpenter, Rachel Smith Loerts, Antonello Di Nunzio, Francesco Bedeschi, Architectonics and parametric thinking - computational modeling for beginning design, pp. 45)

(41) - Stampa 3D di una parete (Fonte: Frank Jacobus, Angela Carpenter, Rachel Smith Loerts, Antonello Di Nunzio, Francesco Bedeschi, Architectonics and parametric thinking - computational modeling for beginning design, pp. 26)

(42) - Casa stampata in argilla dall'azienda WASP (Fonte: WASP mostra Gaia, la prima casa stampata in 3D usando solo terra, acqua e riso - Replicatore.it - visto in data 19/04/2024.)

(43) - Ponte stampato in 3D Amsterdam (Fonte: In Olanda il primo ponte in acciaio realizzato con stampa 3D - Calcolostrutturale.com - visto in data 19/04/2024.)

(44-45) - Esempi di seduta realizzata dalla Riva 1920 (Fonte: riva1920.it/sgabelli/ - visto in data 20/04/2024.)

[46-49] - Esempi di piastre metalliche utilizzate all'interno del progetto di Encode (Fonte: www.en-code.io - visto in data 20/04/2024.)

[50] - Struttura completa del progetto Tumbalong Green Stage Upgrade (Fonte: en-code.io - visto in data 20/04/2024.)

[51] - Schizzo realizzato su un rilievo in realtà aumentata (Fonte: Frank Jacobus, Angela Carpenter, Rachel Smith Loerts, Antonello Di Nunzio, Francesco Bedeschi, *Architectonics and parametric thinking - computational modeling for beginning design*, pp. 76)

[52] - Esempio di diagramma di rete neutrale, che riduce al minimo l'influenza umana (Fonte: Frank Jacobus, Angela Carpenter, Rachel Smith Loerts, Antonello Di Nunzio, Francesco Bedeschi, *Architectonics and parametric thinking - computational modeling for beginning design*, pp. 79)

[53] - Workflow fabbricazione digitale utilizzando specifiche interfacce di progetto (Fonte: Fabio Gramazio, Matthias Kohler, Silke Langenberg, *Fabricate 2014 - Negotiating Design & Making*, UCL Press, UK, 2014 - Articolo: bridging the gap from cad to cam: concepts, caveats and a new grasshopper plug-in, pp. 5.

[54] - Workflow fabbricazione digitale utilizzando macchine indipendenti come descritto (Fonte: Fabio Gramazio, Matthias Kohler, Silke Langenberg, *Fabricate 2014 - Negotiating Design & Making*, UCL Press, UK, 2014 - Articolo: bridging the gap from cad to cam: concepts, caveats and a new grasshopper plug-in, pp. 5.

[55] - Esempio di trave lavorata a controllo numerico (Fonte: Fabio Gramazio, Matthias Kohler, Silke Langenberg, *Fabricate 2014 - Negotiating Design & Making*, UCL Press, UK, 2014 - Articolo: bridging the gap from cad to cam: concepts, caveats and a new grasshopper plug-in, pp. 5.

[56] - Vista esterna Swatch headquarter (Fonte: geniuslociarchitettura.it - visto in data 22/04/2024.)

[57] - Esploso dell'incastro a cono (Fonte: Jane burry, Jenny Sabin, Bob Sheil, Marilena Skavara, *Fabricate 2020 - Making Resilient Architecture*, UCL Press, UK, 2020 - large-scale free-form timber grid shell: digital planning of the new swatch headquarters in biel, Switzerland, pp.8).

[58] - Mappatura 2D dell'edificio (Fonte: Jane burry, Jenny Sabin, Bob Sheil, Marilena Skavara, *Fabricate 2020 - Making Resilient Architecture*, UCL Press, UK, 2020 - large-scale free-form timber grid shell: digital planning of the new swatch headquarters in biel, Switzerland, pp.6).

[59] - Fasi di modellazione (Fonte: Phil Ayres, Mette Ramsgaard Thomsen, Bob Sheil, Marilena Skavara, *Fabricate 2024 - Creating resourceful futures*, UCL Press, UK, 2024 - Marina spa prototype small-scale agility and timber waste streams for complex timber structures, pp.101).

[60-62] - Esplosi archi e incastri strutturali (Fonte: Phil Ayres, Mette Ramsgaard Thomsen, Bob Sheil, Marilena Skavara, *Fabricate 2024 - Creating resourceful futures*, UCL Press, UK, 2024 - Marina spa prototype small-scale agility and timber waste streams for complex timber structures, pp.102).

[63] - Risultato finale struttura (Fonte: Phil Ayres, Mette Ramsgaard Thomsen, Bob Sheil, Marilena Skavara, Fabricate 2024 - Creating resourceful futures, UCL Press, UK, 2024 - Marina spa prototype small-scale agility and timber waste streams for complex timber structures, pp.99).

[64] - Processo libero di estrusione (Fonte: Fabio Gramazio, Matthias Kohler, Silke Langenberg, Fabricate 2014 - Negotiating Design & Making, UCL Press, UK, 2014 - anti-gravity additive manufacturing, pp. 4).

[65] - Stampa di un traliccio in plastica (Fonte: Jane burry, Jenny Sabin, Bob Sheil, Marilena Skavara, Fabricate 2020 - Making Resilient Architecture, UCL Press, UK, 2020 - Optimisation of robotic printing paths for structural stiffness using machine learning, pp. 4).

[66] - Esempio di trave stampata (Fonte: Jane burry, Jenny Sabin, Bob Sheil, Marilena Skavara, Fabricate 2020 - Making Resilient Architecture, UCL Press, UK, 2020 - Optimisation of robotic printing paths for structural stiffness using machine learning, pp. 6).

[67] - Percorso di stampa del ponte Phoenix (Fonte: Phil Ayres, Mette Ramsgaard Thomsen, Bob Sheil, Marilena Skavara, Fabricate 2024 - Creating resourceful futures, UCL Press, UK, 2024 - striatus 2.0 phoenix - improving circularity of 3d-concrete-printed unreinforced masonry structures, pp. 95).

[68] - Fase di assemblaggio del ponte Phoenix (Fonte: Phil Ayres, Mette Ramsgaard Thomsen, Bob Sheil, Marilena Skavara, Fabricate 2024 - Creating resourceful futures, UCL Press, UK, 2024 - striatus 2.0 phoenix - improving circularity of 3d-concrete-printed unreinforced masonry structures, pp. 95).

[69] - Il ponte Phoenix appena terminato (Fonte: Phil Ayres, Mette Ramsgaard Thomsen, Bob Sheil, Marilena Skavara, Fabricate 2024 - Creating resourceful futures, UCL Press, UK, 2024 - striatus 2.0 phoenix - improving circularity of 3d-concrete-printed unreinforced masonry structures, pp. 96).

[70] - Vista interna (Fonte: Jane burry, Jenny Sabin, Bob Sheil, Marilena Skavara, Fabricate 2020 - Making Resilient Architecture, UCL Press, UK, 2020 - Buga fibre pavilion: towards robotically-fabricated composite building structures, pp. 3).

[71] - Processo di produzione delle gambe del padiglione (Fonte: Jane burry, Jenny Sabin, Bob Sheil, Marilena Skavara, Fabricate 2020 - Making Resilient Architecture, UCL Press, UK, 2020 - Buga fibre pavilion: towards robotically-fabricated composite building structures, pp. 6).

[72] - Analisi strutturale del padiglione (Fonte: Jane burry, Jenny Sabin, Bob Sheil, Marilena Skavara, Fabricate 2020 - Making Resilient Architecture, UCL Press, UK, 2020 - Buga fibre pavilion: towards robotically-fabricated composite building structures, pp. 7).

Elenco immagini interviste con fonti complete

(I14) Macchinario che posiziona i tronchi sulla macchina di taglio	(I24) CNC per pezzi free form vista frontale
(I15) Macchinario per trasportare i tronchi alle macchine di taglio	(I25) CNC per pezzi free form testa con attrezzi lato sx
(I16) Macchinario per il taglio e la pulizia dei tronchi	(I26) CNC per pezzi free form testa con attrezzi lato dx
(I17) Schema di taglio delle lastre di legno	(I27) CNC per pezzi free form testa con attrezzi retrostante
(I18) Ruota dove vengono posizionati gli assi irregolari in attesa di misure simili	(I28) CNC per pezzi free form testa per fori sottostante
(I19) Camera di essiccazione del legno	(I29) Swatch HQ, Biel, Svizzera - prospetto principale - foto realizzata durante la visita il giorno 6/11/2024
(I20) Listelli in legno con codice personale	
(I21) CNC per la lavorazione dei listelli	(I30) Free Form wooden roof for the golf clubhouse in South Korea (Fonte: Blumer Lehmann.com)
(I22) Tavolo per assemblaggio pareti	
(I23) CNC per pezzi free form vista dall'alto	(I31) Viewing tower with resource (Fonte: Blumer Lehmann.com)

03

DFMA: verso una progettazione circolare e sostenibile

3.1 - Progettare pensando al finevita - DfD*

3.1.1 - Indicatori di circolarità applicati a dei casi studio

Negli ultimi anni l'economia circolare sta diventando un aspetto sempre più importante da tenere presente quando si progetta.

Adottando un approccio DfMA questo risulta particolarmente efficace consentendo di suddividere i vari materiali in maniera molto semplice una volta giunti al fine vita e consentono di riciclarli o riutilizzarli più facilmente.

Di fatto l'utilizzo cercando di utilizzare un approccio circolare ha contribuito alla ricerca inerente nuove soluzioni per l'assemblaggio a secco che consente di smontare gli edifici e recuperare dei materiali.

Tuttavia, ad oggi la letteratura scientifica non è ancora stata in grado di approfondire il rapporto tra economia circolare e architettura, rendendo evidente il fatto che in genere l'economia circolare è pensata solo come un processo inerente la sostenibilità e non come un vero e proprio modo di concepire il design⁵¹.

Questa mancanza di letteratura, a fronte di un mondo che di fatto si sta muovendo in questa direzione potrebbe non sembrare un grosso problema, ma di fatto lo è per via della mancanza di informazione a disposizione di stakeholder e clienti, che non riescono quindi a informarsi correttamente su costi e modalità di esecuzione.

Un altro aspetto molto importante per consentire a questo tipo di design di funzionare al meglio è quello di prevederne l'utilizzo fin dalle prime fasi di progettazione come il concept-design.

La fondazione Elle MacArthur si occupa di

guidare l'avanzamento inerente ai principi di "valutazione della circolarità", attraverso un protocollo chiamato: "Indicatore Circolarità dei materiali" (MCI).

$$MCI_p = 1 - LFI \times F(X)$$

(73) Equazione che esprime le prestazioni del processo MCI (Fonte: Circularity Indicators as a Design Tool for Design and Construction Strategies in Architecture pp. 5).

In questo processo le prestazioni circolari sono espresse dall'equazione: (73)

Se in questa formula viene utilizzato il valore 1 significa che tutti i materiali utilizzati all'interno dell'opera architettonica sono riciclati o riutilizzati, indicando di fatto una circolarità perfetta.

LFI sta ad indicare l'indice di flusso lineare, ovvero tutti i materiali che provengono da fonti vergini e che confluiranno direttamente in discarica.

Infine, F(X) indica il fattore di utilità, ovvero l'efficienza del prodotto, che è oggetto della valutazione in termini di durata di vita del prodotto rispetto alla media di prodotti di quello stesso settore.

Per ottenere un calcolo corretto dell'MCI è necessario conoscere a fondo le caratteristiche di tutti i materiali, grazie alle quali è possibile calcolare in maniera precisa il valore di LFI, che a sua volta necessita di un'accurata conoscenza del flusso e del conto dei materiali.

Anche la commissione europea ha voluto promuovere un suo sistema di valutazione della sostenibilità degli edifici, emettendo il protocollo di valutazione Level(s) con

51 - Circularity Indicators as a Design Tool for Design and Construction Strategies in Architecture pp. 1-9

*Design for disassembly

l'obiettivo di stabilire un quadro inerente la sostenibilità di un edificio attraverso la valutazione delle fasi di vita di un edificio (fase concettuale, progettazione dettagliata, costruzione e fase in uso). In particolare, si tiene in considerazione l'indicatore di progettazione per la decostruzione, che funziona in modo molto simile al MCI.

La classe di circolarità viene individuata attraverso alcuni termini ben definiti, ovvero:

- facilità di smontaggio
- facilità di riutilizzo
- facilità di riciclo

Le strategie di fine vita si basano poi su una classificazione della tipologia di rifiuti che viene fatta analizzando ogni singolo materiale presente nel sito.

Ad esempio, ai materiali direttamente riutilizzati viene dato un coefficiente di circolarità pari a 1, mentre ai materiali che hanno necessitato delle operazioni di preparazione viene dato 0,75.

Ovviamente le classi con un punteggio minore sono quelle che finiscono in discarica, che in base al fatto che siano o meno pericolose possono valere 0,01 o 0.

Ovviamente il punteggio di circolarità è

$$\text{overall circularity score (mass)} = \frac{\sum_{k=1}^n (CF_k \times M_k)}{\sum_{k=1}^n M_k}$$

$$\text{overall circularity score (cost)} = \frac{\sum_{k=1}^n (CF_k \times C_k)}{\sum_{k=1}^n C_k}$$

3.1.1.1 - Caso studio 1: Studio di innovative unità abitative temporanee in legno per il ricovero e l'alloggio degli anziani

L'obiettivo di questo progetto era l'esplorazione della riutilizzabilità del modulo e la massimizzazione della reversibilità delle connessioni strutturali adottate.

L'unità modulare è costituita da pannelli in legno massello in CLT (Cross-Laminated Timber) e pannelli intelaiati per le partizioni verticali e i pavimenti [75].

La copertura è realizzata con elementi strutturali in legno lamellare e piastre di irrigidimento realizzate con pannelli OBS

dato da tutte queste voci espresse in forma di: [74]

La differenza fondamentale tra questi due indicatori di circolarità è data dal fatto che nel protocollo *levels* viene data la possibilità di inserire ciascun indicatore di circolarità di essere inserito per ogni voce di materiale, fornendo un approccio più semplificato rispetto a quello del MCI.

Le nuove strategie di costruzione come BAMB (*buildig as material banks*) e DfD (design for disassembly) stanno portando innovazioni importanti nella connettività col tessuto edilizio e facilitano di fatto la circolarità dei materiali indipendentemente dalla loro composizione.

Di fatto i DfD costituiscono la base per la realizzazione di un edificio che sia rivolto alla circolarità, di fatto i tre principi base dei DfD sono:

- adattabilità della struttura
- modularità degli elementi
- intercambiabilità fisica delle parti

Per esplicitare al meglio il funzionamento di questi sistemi sono stati analizzati due differenti casi studio provando a darne una valutazione seguendo i parametri fin qui elencati.

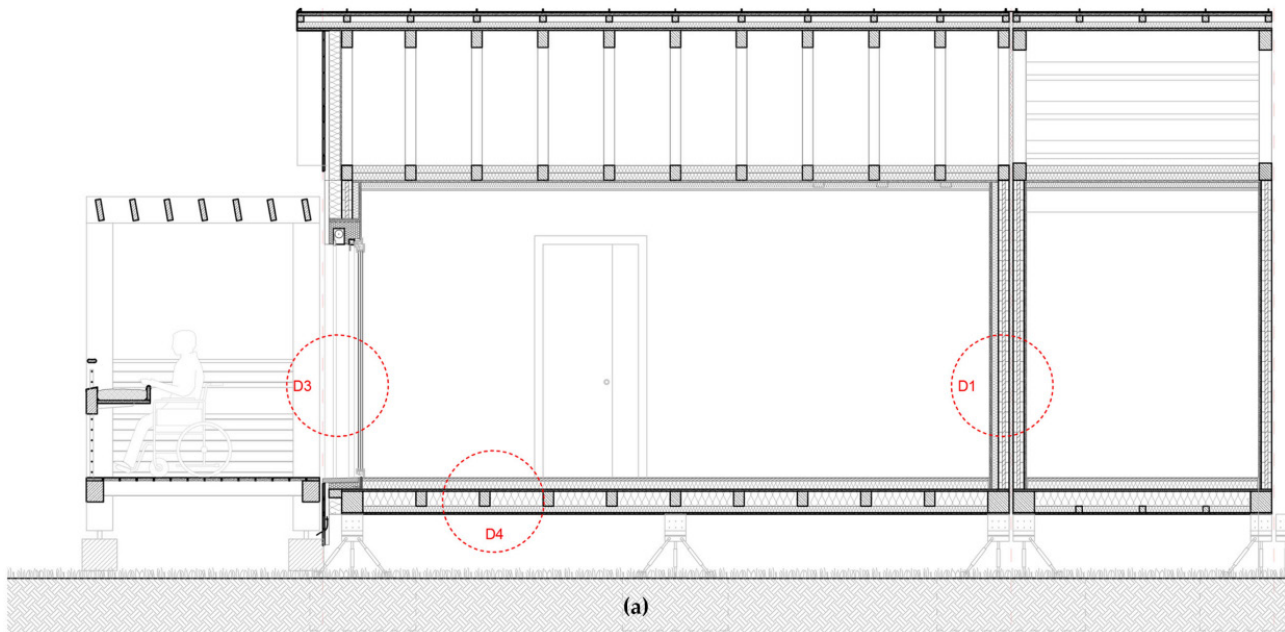
Entrambi gli esempi seguono la metodologia DfD con approcci alternativi e sono il risultato di due progetti di emergenza della regione Veneto.

[74] Espressione del punteggio di circolarità

(Fonte: Circularity Indicators as a Design Tool for Design and Construction Strategies in Architecture pp. 6).

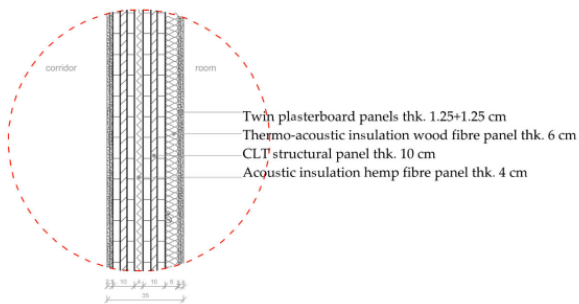
[76]. Il team di progettazione si è incentrato sulla possibilità di intercambiare le parti come principale strategia di riutilizzo, concentrandosi quindi sull'interfaccia di connessione tra le singole parti.

Quest'unità è pensata per essere smontata e rimontata almeno 5 volte in un periodo di 50 anni, una volta giunto al termine di questo periodo di utilizzo le parti che compongono la struttura possono essere facilmente riutilizzate semplicemente

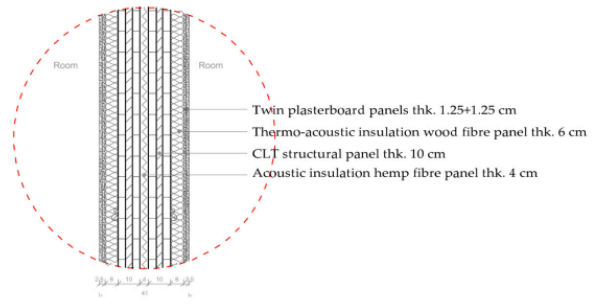


(75) Sezione dell'edificio modulare (Fonte: Circularity Indicators as a Design Tool for Design and Construction Strategies in Architecture pp. 11).

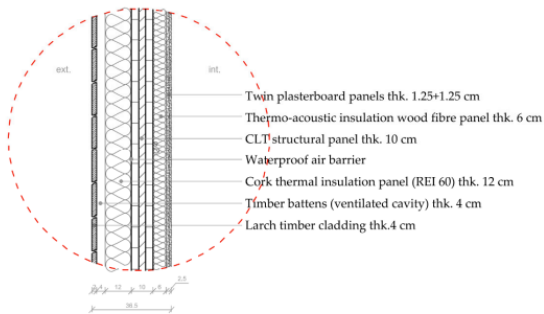
D1 - PARTITION WALL BETWEEN CORRIDOR AND BEDROOM



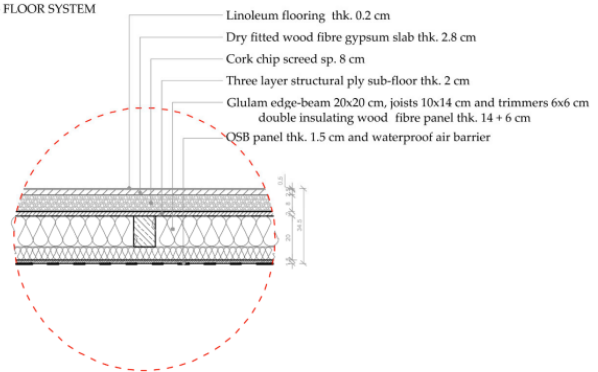
D2 - PARTITION BETWEEN ADJACENT BEDROOMS



D3 - EXTERNAL WALL ENVELOPE



D4 - FLOOR SYSTEM



(b)

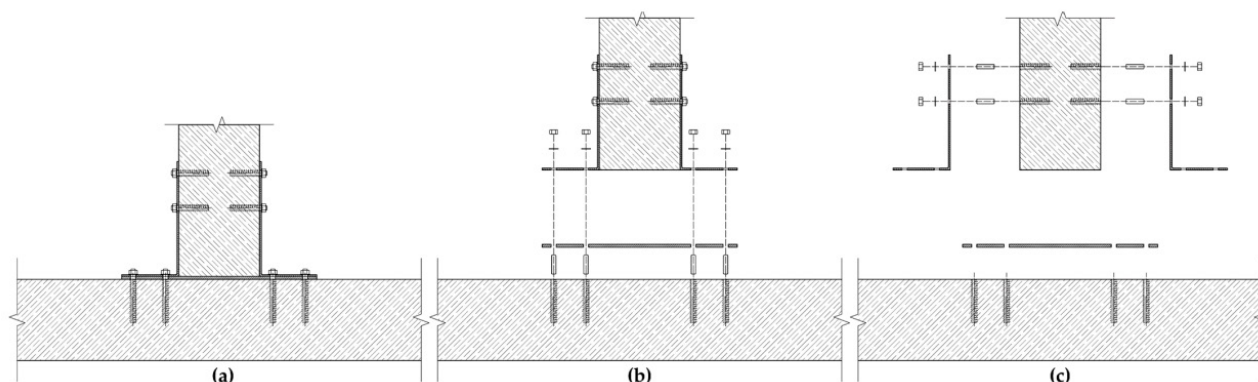
(76) Dettagli costruttivi dell'edificio (Fonte: Circularity Indicators as a Design Tool for Design and Construction Strategies in Architecture pp. 11).

svitando i bulloni che compongono i giunti (77).

La maggior parte dei giunti di questa

struttura è stato realizzato proprio con sistemi a secco simili a quelli in figura, che consentono un completo riutilizzo delle

52 - Circularity Indicators as a Design Tool for Design and Construction Strategies in Architecture pp. 10-15



(77) Fasi di disassemblaggio di una partizione verticale (Fonte: Circularity Indicators as a Design Tool for Design and Construction Strategies in Architecture pp. 12).

parti assemblate, inoltre in questo modo il design consente la riconfigurazione strutturale e riduce al minimo lo spreco di materiale⁵².

Anche le fondamenta sono state progettate per aderire ai principi di riutilizzo, infatti i plinti di fondazione sono prefabbricati appositamente per occupare meno spazio possibile e per essere riadattati in futuro su altri edifici senza particolari modifiche. Questa attenzione è molto importante in quanto consente non solo di risparmiare

materiale, ma anche di prevenire un futuro consumo di suolo, essendo di fatto in grado di ospitare un altro edificio.

Un punto debole di questa strategia è stato rilevato nel sistema di assemblaggio, in cui a causa di imprecisioni degli operatori o errori di produzione è stato conteggiato un 4% di rifiuti tra chiodi, punti e viti.

Tuttavia, il 96% del materiale utilizzato è stato classificato come non destinato alla discarica e dunque in grado di ridurre l'impatto ambientale.

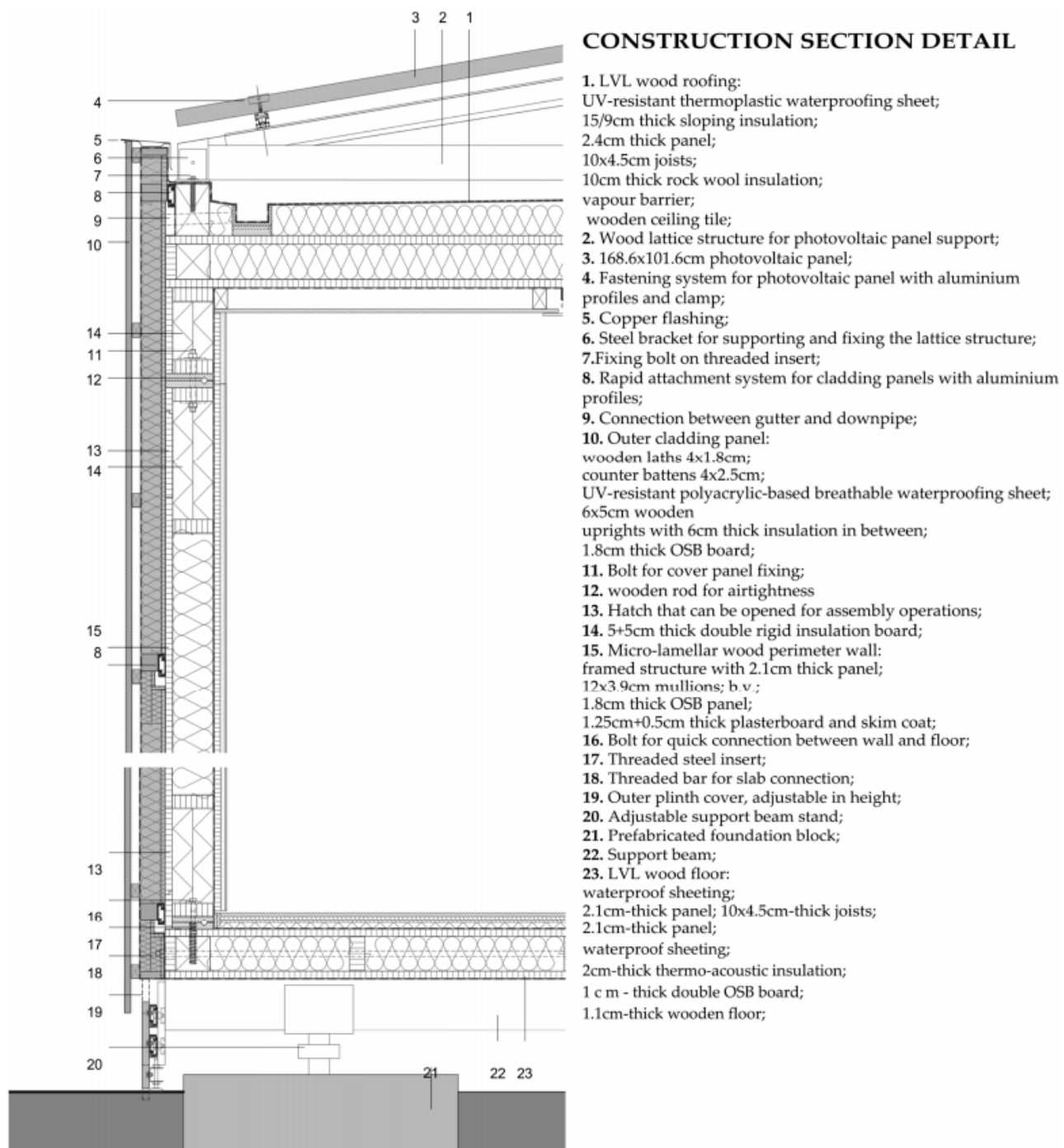
3.1.1.2 - Caso studio 2: Prototipi Abitativi d'Emergenza ad Alta Efficienza Veneto (H.E.L.P. Veneto) - Residenze adattive sostenibili per la vita temporanea in situazioni di emergenza ambientale.

L'unità modulare H.E.L.P. è stata progettata come abitazione modulare di emergenza per un uso residenziale temporaneo, consente flessibilità e adattabilità degli spazi interni in base alle esigenze degli occupanti. Il modulo presenta inoltre un involucro che può essere adattato in base alle esigenze termo-igrometriche all'altitudine di costruzione.

Le unità modulari di H.E.L.P. sono state progettate per privilegiare l'intercambiabilità fisica degli elementi strutturali, garantendo la loro facile disassemblaggio, anche per cicli di vita ripetuti, utilizzando connessioni ibride legno-acciaio con un alto grado di disassemblaggio.

Anche in questo caso le fondazioni sono facilmente riutilizzabili per altri edifici, il coinvolgimento degli stakeholder nel

processo di progettazione ha portato all'implementazione di varie soluzioni innovative. Alcune delle soluzioni di connettività strutturale di H.E.L.P. si basavano anche sull'uso di connessioni ibride acciaio-legno attraverso la collaborazione con stakeholder appartenenti alla catena di approvvigionamento del legno e dell'emergenza nella regione italiana del Veneto. Analogamente al primo caso studio, implementa i principi del DfD ai livelli di assemblaggio e sistema, il che significa che lo sforzo principale di progettazione è stato concentrato nell'ideare soluzioni reversibili a questi livelli del tessuto edilizio mediante l'applicazione di connessioni ibride con un alto livello di smontaggio tra assemblaggi e sistemi, ricorrendo all'uso di metodi comuni per unire le parti e i



(78) Sezione del modulo H.E.L.P Veneto (Fonte: Circularity Indicators as a Design Tool for Design and Construction Strategies in Architecture pp. 14).

materiali insieme.

Infatti, nel sistema di pavimentazione, che quest'ultimo è dettagliato come un sistema di pavimentazione standard, ad eccezione

della giunzione a pressione alle estremità, utilizzata per collegare il pavimento all'elemento della parete (78).

3.1.1.3 - Confronto tra casi studio

La valutazione dei casi studio viene eseguita utilizzando come indicatori le unità funzionali, intese come numero minimo di assemblaggi necessari per installare un modulo operativo.

In secondo luogo, vengono valutati gli elenchi dei materiali per entrambe le unità funzionali.

Ad ogni livello di montaggio viene prevista una quantità di danni irreversibili costituita dal tipo di assemblaggio utilizzato.

Per quanto riguarda l'efficienza del riciclo dei materiali, viene calcolata dello 0,5 al momento attuale e 0,7 tra cinquanta anni, supponendo che le abilità nel riciclo miglioreranno tra 50 anni.

Per ciascuna tipologia di giunture utilizzata in questi casi studio è stata prodotta una tabella [79] che illustra quanto sono sostenibili questi processi⁵³.

Questa procedura inizia con l'identificazione degli assemblaggi e la categorizzazione di ciascun elemento contenuto nell'assemblaggio stesso, successivamente viene ripetuto attraverso una suddivisione dell'assemblaggio in elementi e l'identificazione di parti incluse in ciascuna di esse.

Inoltre, preliminarmente viene effettuato un calcolo della percentuale di massa riutilizzata come punto di riferimento da confrontare con i risultati ottenuti attraverso MCI e levels. Questo calcolo è

$$\%reuse = \frac{M_0 - M_{Rc} - M_{Lf}}{M_0}$$

[80] Formula utilizzata per il calcolo della percentuale di massa riutilizzata (Fonte: Circularity Indicators as a Design Tool for Design and Construction Strategies in Architecture pp. 17).

eseguito attraverso la formula: [80]

Dove M_0 è la massa totale prima che vengano eseguite le lavorazioni sull'elemento, M_{Rc} è la massa riciclata dell'elemento alla fase di fine vita e M_{Lf} è la massa che viene scaricata o danneggiata in modo irreversibile. Sia M la massa di un pannello CLT vergine.

Vengono dunque restituiti dei punteggi sulla circolarità dei materiali, suddivisi in 4 livelli gerarchici [81] che sono i seguenti:

- 1 - Punteggio di circolarità a livello di assemblaggio (ACS): strategia di fine vita dell'assemblaggio

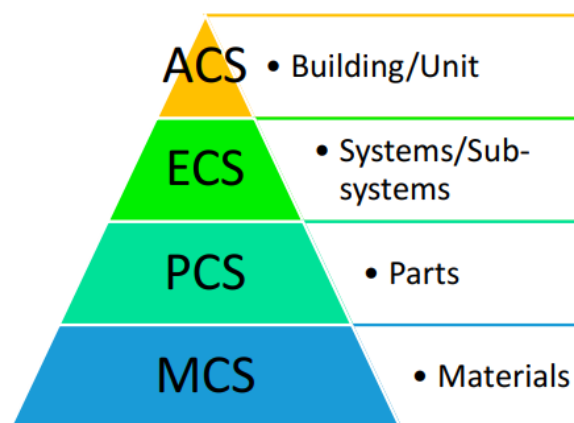
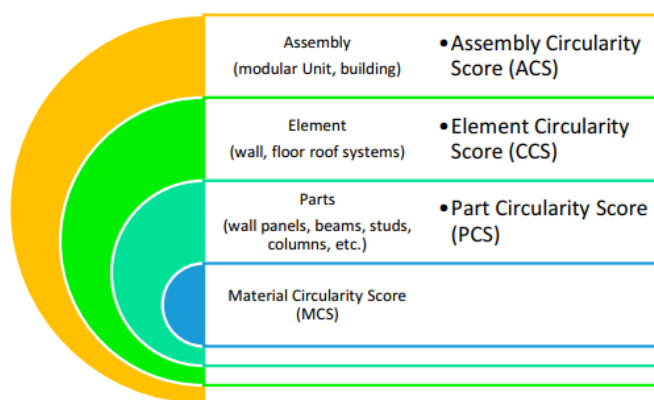
- 2- Punteggio di circolarità a livello di elementi (ECS): strategia di fine vita di ciascun elemento o sistema.

- 3 - Punteggio di circolarità a livello di parti (PCS): strategia di fine vita di ciascuna parte.

- 4 - Punteggio di circolarità a livello di materiali (MCS): strategia di approvvigionamento e fine vita di ciascun

Type of Connection	Waste Hierarchy in Level(s)	Fraction of Material Reuse (MCI)
Chemical or mechanical bond	Hazardous waste disposal (circularity coefficient = 0.00)	0.00
	Inert or non-hazardous landfill (circularity coefficient = 0.01)	0.01
	Energy recovery (circularity coefficient = 0.15)	0.15
Nails	Pure stream recycling (circularity coefficient = 0.75)	0.75
	Mixed-stream recycling (circularity coefficient = 0.5)	0.5
Staples	Preparing for reuse (circularity coefficient = 0.90)	0.90
Screws	Preparing for reuse (circularity coefficient = 0.90)	0.90
Bolts	Direct reuse (circularity coefficient = 1.00)	1.00
Inserts	Direct reuse (circularity coefficient = 1.00)	1.00
Clasps	Direct reuse (circularity coefficient = 1.00)	1.00
Pressure joint	Direct reuse (circularity coefficient = 1.00)	1.00

[79] Tabella che racchiude i tipi di connessioni e effetti sui materiali connessi (Fonte: Circularity Indicators as a Design Tool for Design and Construction Strategies in Architecture pp. 16).



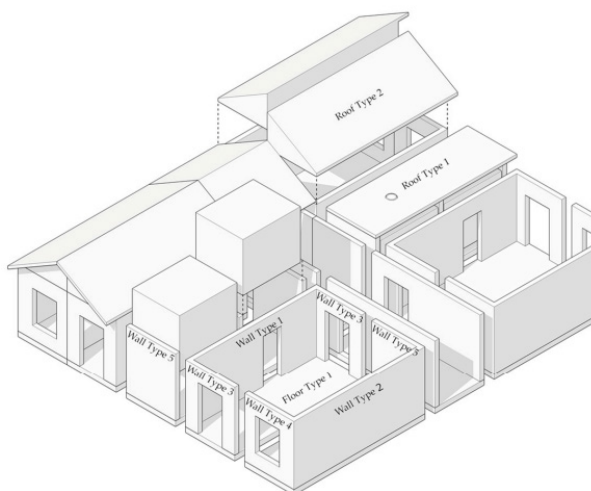
[81] Diagramma gerarchico delle procedure di valutazione (Fonte: Circularity Indicators as a Design Tool for Design and Construction Strategies in Architecture pp. 18).

materiale.

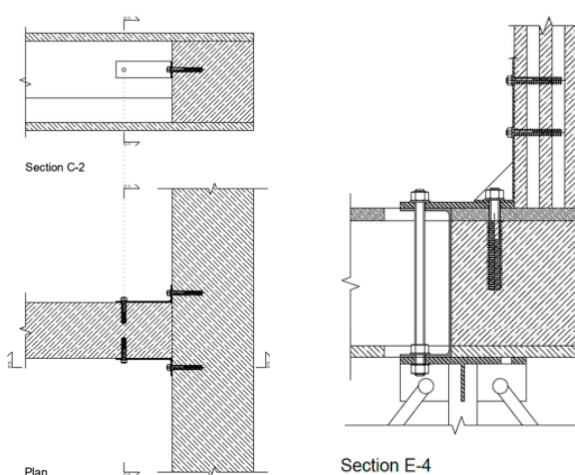
L'unità abitativa del primo caso studio è stata realizzata unendo cinque sottoinsiemi: due usci a forma di C, che comprendono pareti e pavimento, due moduli a falda singola per la copertura.

Di fatto è possibile discretizzare l'analisi degli insiemi identificando otto elementi differenti corrispondenti a cinque sistemi di parete differenti, due sistemi di tetto, e un singolo sistema di pavimento (82).

La continuità dell'involucro è stata ottenuta con giunti a pressione e guarnizioni a labirinto. Le finiture interne, principalmente costituite da cartongesso e rivestimento in linoleum, sono state legate irrimediabilmente tra loro e ai pannelli OSB interni e sono state prefabbricate con ciascun sottoinsieme⁵⁴. La seconda abitazione è composta da otto tipi di elementi con diverse aperture, disposti in una collezione di 11 per formare un'unità abitativa di 33 m2 su fondazioni elevate. Gli elementi sono collegati reciprocamente attraverso giunti di contatto completamente reversibili post-tensionati. Analizzando i dettagli (83-84) su scala di parti e materiali, la strategia di connettività si basa principalmente su viti, chiodi e graffe e sulla colla chimica per



[82] Raffigurazione degli elementi presenti all'interno della prima abitazione (Fonte: Circularity Indicators as a Design Tool for Design and Construction Strategies in Architecture pp. 19).



[83-84] Dettagli costruttivi inerenti la parete e le fondazioni rialzate della seconda struttura (Fonte: Circularity Indicators as a Design Tool for Design and Construction Strategies in Architecture pp. 20).

54 - Circularity Indicators as a Design Tool for Design and Construction Strategies in Architecture 18-25

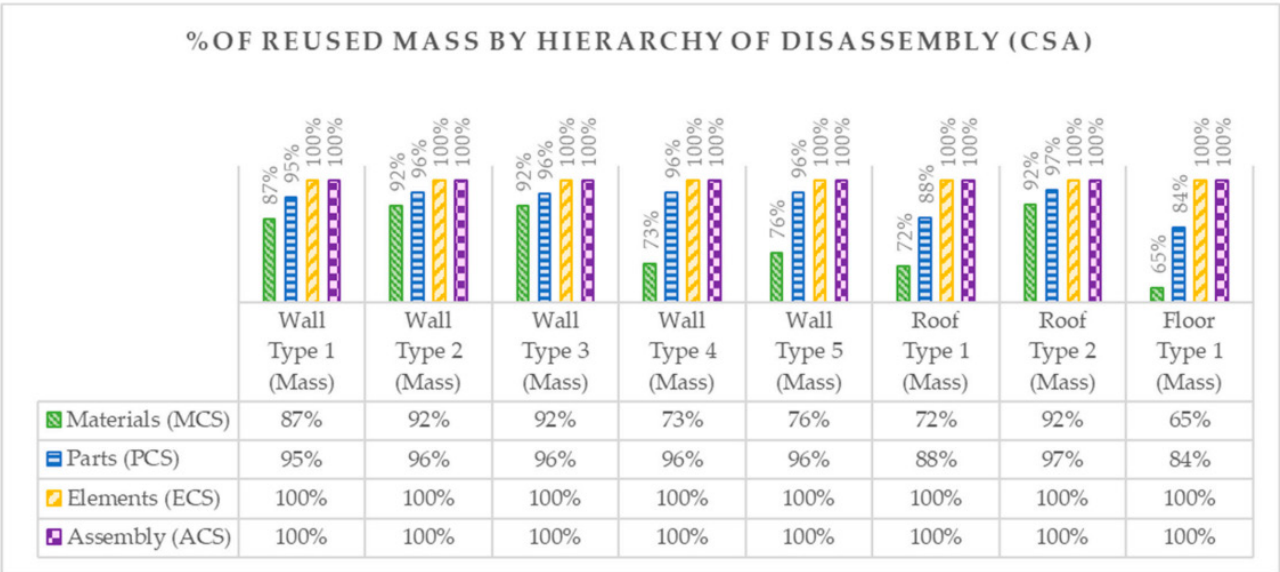
alcune finiture interne, membrane traspiranti ed EPDM. Nel primo caso studio i risultati delle analisi sono stati poi riportati con il numero di elemento e gerarchia dello smontaggio. Dalla tabella (85) è possibile osservare come la massa riutilizzata variasse dal 65% al 92%, dall'84 al 97 il riuso delle parti e del 100% il riuso degli elementi di assemblaggio.

Per quanto riguarda il secondo caso studio (86) la massa riutilizzata è variata dal 66% al 91%, mentre quello dei materiali dal 89% al 96%, anche qui la massa riutilizzata è stata del 100%.

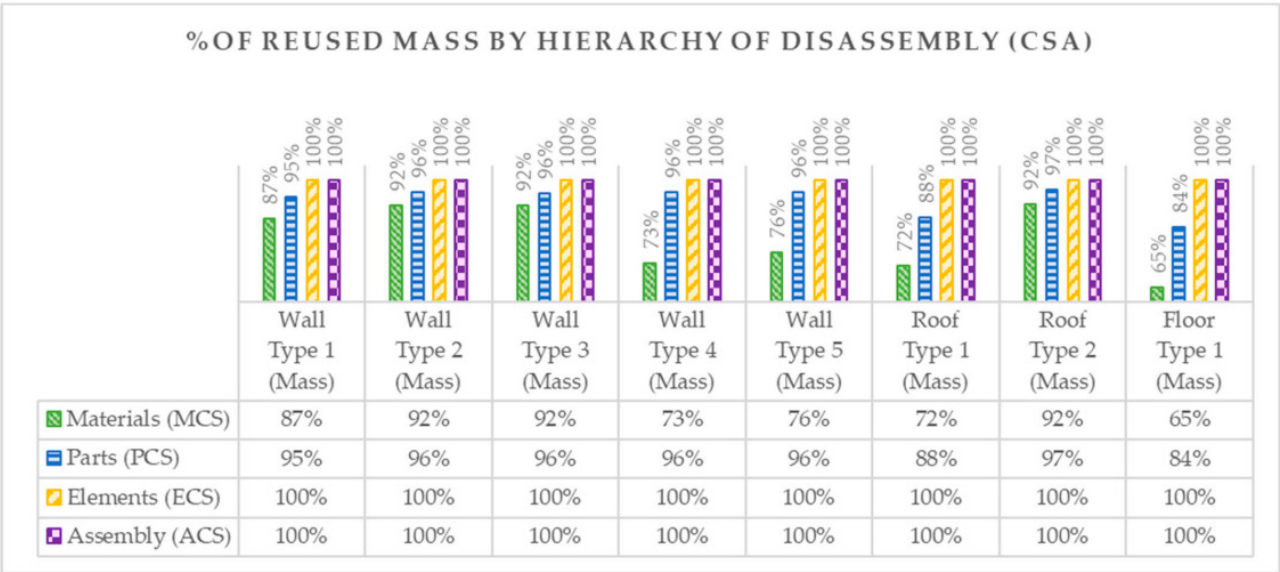
Grazie alle analisi eseguite è stato possibile

mappare con dei grafici il livello di riuso all'interno dei singoli processi. Da questi grafici (87-88) risulta subito evidente il fatto che i materiali risultano il parametro meno suscettibile ad un riuso di tipo circolare; infatti, in tutti i grafici mostrati nell'articolo le percentuali variano dal 70 all'85%.

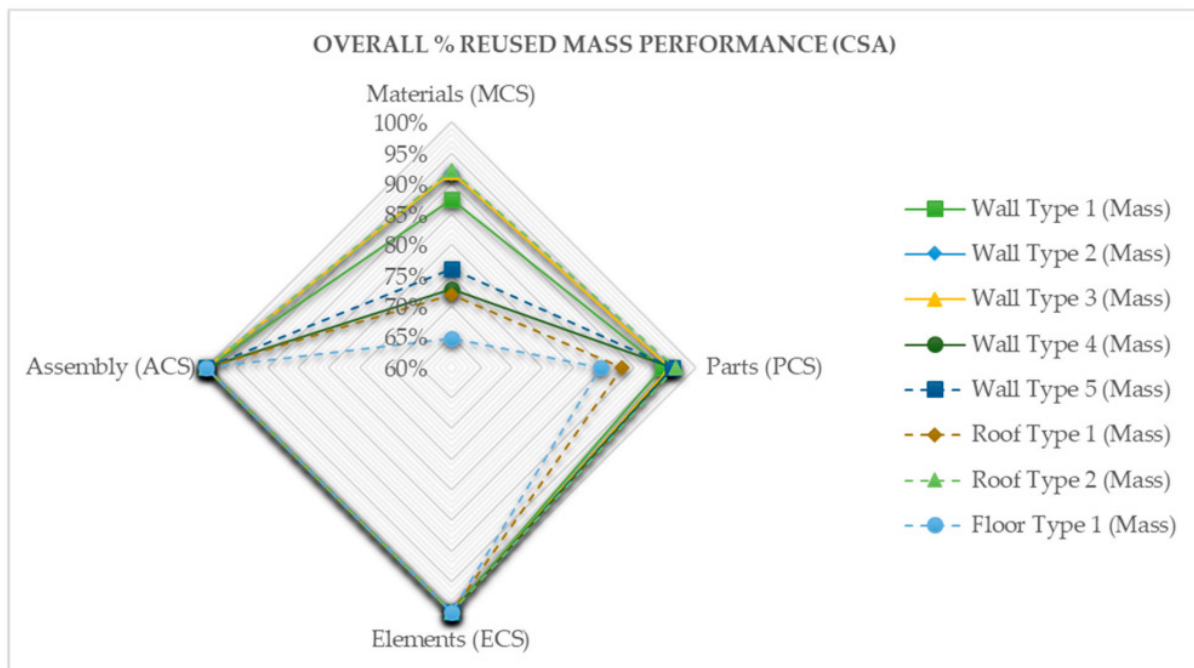
I risultati di questo studio evidenziano l'importanza di considerare diverse scale e gerarchie di smontaggio nell'approcciare la circolarità nel design architettonico. Sia nei metodi MCI che Level(s), l'impatto della connettività strutturale e la strategia complessiva di circolarità sottostante al design dell'edificio sono considerati in



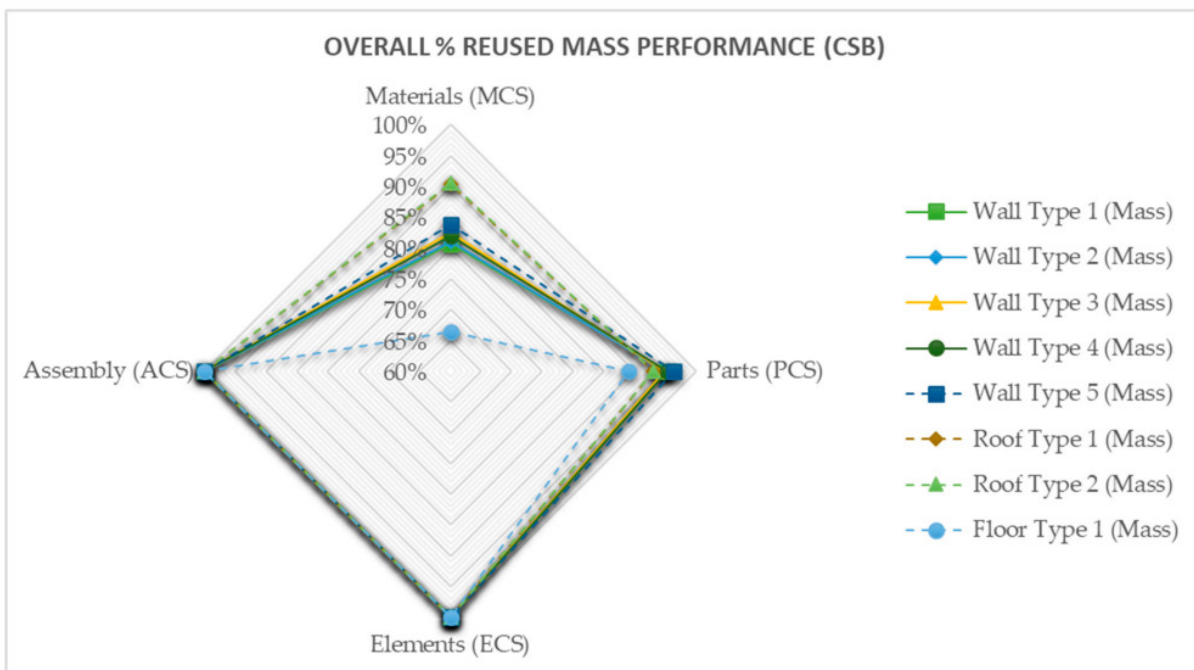
(85) Percentuale di massa riutilizzata per gerarchie di smontaggio per caso studio 1 (Fonte: Circularity Indicators as a Design Tool for Design and Construction Strategies in Architecture pp. 21).



(86) Percentuale di massa riutilizzata per gerarchie di smontaggio per caso studio 2 (Fonte: Circularity Indicators as a Design Tool for Design and Construction Strategies in Architecture pp. 23).



[87] Prestazione complessiva in base alla percentuale di massa riutilizzata caso studio 1 (Fonte: Circularity Indicators as a Design Tool for Design and Construction Strategies in Architecture pp. 22).



[88] Prestazione complessiva in base alla percentuale di massa riutilizzata caso studio 2 (Fonte: Circularity Indicators as a Design Tool for Design and Construction Strategies in Architecture pp. 23).

modo indiretto.

Il Design for Disassembly (DfD) comprende

l'implementazione della circolarità a varie scale, incluse materiali, parti, elementi e

assemblaggi, con il livello dei materiali che rappresenta il livello più basso di organizzazione in un edificio (89).

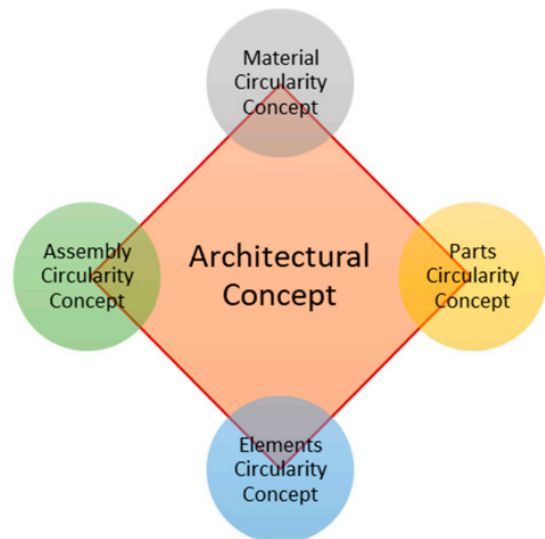
A seconda dello scenario di riutilizzo immaginato alla fine della vita dell'edificio, possono essere calcolati almeno quattro indicatori di prestazioni di circolarità. Quando la gerarchia è assemblaggi > elementi > parti > materiali, i risultati mostrano che generalmente maggiore è la gerarchia (cioè l'assemblaggio), più alto è il punteggio di circolarità e, per estensione, ACS > ECS > PCS > MCS. La corrispondenza sopra menzionata è parzialmente confermata dai risultati per alcuni elementi valutati.

Questo studio rende evidente che, c'è chiaramente una variabilità dei CI (Circular indicators) indipendente dalla gerarchia di smontaggio. È quindi utile sottolineare l'importanza della strategia strutturale e, specificamente, della strategia di smontaggio, nelle prime fasi del design architettonico.

Nel contesto della progettazione concettuale, utilizzare Levels come protocollo primario per valutare la circolarità offre significativi vantaggi grazie alle sue assunzioni minime e alla sua struttura semplice. Tuttavia, MCI è più adatto per le fasi di progettazione successive, quando si conoscono informazioni più dettagliate in termini di approvvigionamento e gestione dei rifiuti. Tuttavia forse l'opzione più interessante è quella di esplorare il potenziale di combinare i punti di forza di MCI e Level(s) per creare un approccio completo ma semplificato che supporti l'implementazione precoce della circolarità nel design⁵⁵.

Un approccio di questo tipo aumenta la flessibilità e la libertà di scelta in termini di disposizione strutturale, modularità e flessibilità dello spazio, consentendo di considerare una gamma più ampia di materiali per strategie circolari, fornendo informazioni estese per lo sviluppo del design a diverse scale.

Da questo studio è possibile estrarre una serie di conclusioni:



(89) Rappresentazione diagrammatica dell'approccio progettuale concettuale architettonico basato sulla strategia di smontaggio gerarchico (Fonte: Circularity Indicators as a Design Tool for Design and Construction Strategies in Architecture pp. 30).

- 1 - L'integrazione dei principi di Design for Disassembly (DfD) incoraggia i progettisti a considerare diverse scale dell'edificio oltre ai soli materiali utilizzati.
- 2 - Gli indicatori di circolarità del Materiale (MCI) e Levels possono essere adattati efficacemente a un approccio gerarchico per l'implementazione di DfD.
- 3 - Gli indicatori di circolarità possono variare a diverse scale o gerarchie.
- 4 - Le gerarchie di smontaggio sono strettamente correlate alla strategia di fine vita.
- 5 - La considerazione degli scenari di fine vita dovrebbe essere affrontata nella fase di progettazione concettuale.
- 6 - Per un approccio completo e flessibile, dovrebbero essere considerate le quattro principali gerarchie (materiali, parti, elementi, assemblaggi).
- 7 - Un design concettuale basato sulla gerarchia dello smontaggio consente l'integrazione di materiali con una circolarità intrinseca.
- 8 - L'implementazione della circolarità interrompe l'approccio standard alla progettazione concettuale e richiede la considerazione della tecnologia costruttiva fin dalle prime fasi di sviluppo

3.1.2 - Politiche e strategie per il riuso circolare disponibili in Europa

In Europa al giorno d'oggi il problema dei rifiuti edili sta diventando sempre più importante, per questo trovare un modo efficace di progettare per il riuso, come illustrato nel precedente capitolo, diventa sempre più fondamentale.

Attualmente l'obiettivo è quello di recuperare e riutilizzare il 70% dei CDW (construction and demolition waste) non pericolosi entro il 2020, secondo la Direttiva 2008/98/CE del parlamento europeo.

L'idea è quella di riutilizzare i materiali da costruzione in maniera differente mettendo in atto quello che viene chiamato "conservazione del valore".

Per questi motivi il design for disassembly sta diventando una pratica sempre più diffusa, offrendo di fatto la possibilità alle aziende di progettare il loro edificio in modo sostenibile fin dalle prime fasi di progettazione⁵⁶.

Un ulteriore aspetto fondamentale riguarda il patrimonio edilizio residenziale europeo, che costituisce due terzi del patrimonio edilizio totale è costituito per il 50% da edifici costruiti prima del 1970. Per questo motivo molti di essi oggi si ritrovano in condizioni pessime e in stato di abbandono. Riuscire a recuperare e riutilizzare i materiali che compongono questi edifici sarebbe sicuramente un grande passo avanti per la sostenibilità degli interventi.

La direttiva europea che ad oggi regola la gestione dei rifiuti cerca di incoraggiare il riuso e il riciclo dei materiali ponendo dei limiti all'utilizzo dei materiali "vergini".

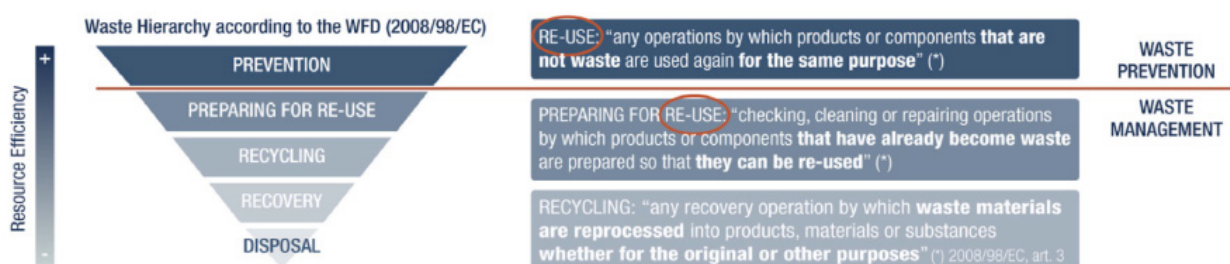
Difattoda molta importanza alla prevenzione e alla preparazione dei materiali per il riuso come illustrato anche nello schema (90). Inoltre, questa operazione comporta anche una manutenzione del materiale molto attenta per massimizzarne la durata.

Un altro aspetto da considerare è quello del così detto End of waste (EoW) ovvero il momento in cui un rifiuto a seguito di un trattamento di recupero che lo rende nuovamente utilizzabile in ambito edilizio o anche in un differente ambito di utilizzo che non includa il deposito in discarica.

L'urban Mining (UM) è un processo che consiste nel recupero di materiali di qualsiasi tipo, nel settore edilizio, questo processo è anche utilizzato come riciclaggio dei CDW per produrre principalmente sottofondi stradali.

Per sfruttare a pieno questa strategia sarebbe ideale implementare un "passaporto del materiale" rendendo le città i punti di estrazione del futuro.

Negli ultimi anni diversi architetti che praticano questa "disciplina" come ad esempio superuse studios, Rotor, Lendager, hanno iniziato a promuovere il riutilizzo di edifici che stanno per essere



(90) Il ruolo del processo di riuso (Fonte: Reuse of building elements in the architectural practice and the European regulatory context: Inconsistencies and possible improvements pp. 5).

56 - Reuse of building elements in the architectural practice and the European regulatory context: Inconsistencies and possible improvements pp. 1-7

demoliti.

Ovviamente questa scelta limita di molto le scelte di progetto, rendendole quasi dipendenti da questo aspetto.

Alcuni di questi architetti hanno definito il processo “progetto di progettazione per il riutilizzo”, in questo tipo di processo l’ambiente costruito di fatto funge da “banca di materiali”.

Questa banca di materiali può essere rifornita attraverso edifici presenti in loco, ovvero quelli che saranno demoliti per lasciare spazio al nuovo edificio, oppure possono provenire dalla città e in questo caso la difficoltà maggiore risulta essere quella di identificare i materiali a disposizione, in quanto appunto non esiste un vero e proprio archivio.

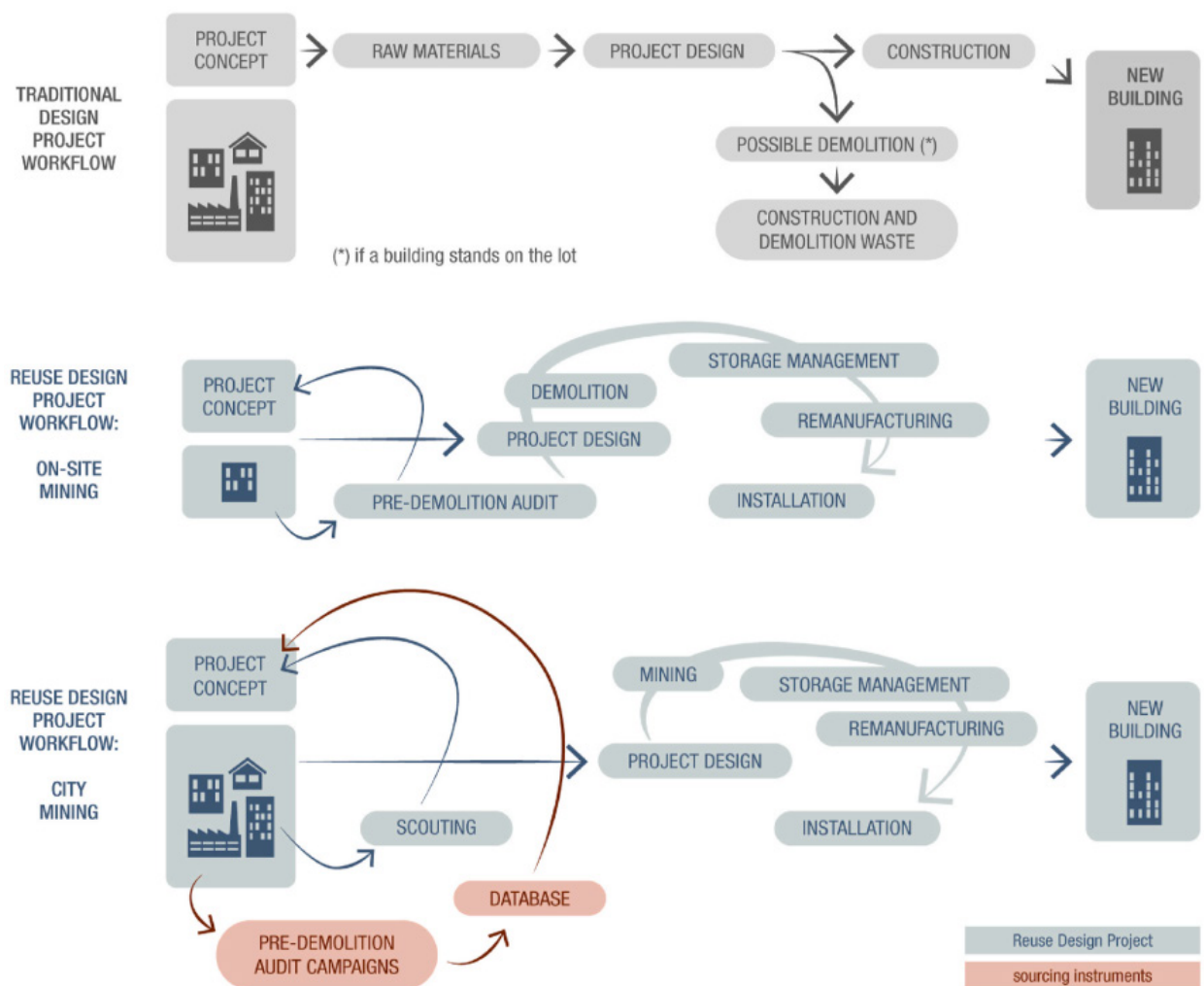
A questo scopo negli ultimi anni alcuni studi di architettura e alcuni stakeholder

hanno iniziato a stimare dati su piattaforme online in cui connettere domanda e offerta di questi materiali (91).

A livello normativo in Europa al momento non esiste nessun regolamento specifico per questo tipo di pratiche, tuttavia il Il Protocollo dell’UE sulla Gestione dei Rifiuti da Costruzione e Demolizione affronta il flusso generale del processo di demolizione, fornendo alcune indicazioni per quanto riguarda le quantità e la qualità dei materiali di recupero.

Vengono inoltre emanate delle buone pratiche da seguire per certificare che i materiali recuperati siano idonei alle nuove funzioni che andranno a svolgere (92).

Oltre a ciò tutti i materiali utilizzati devono essere idonei alle norme hENs, ovvero le norme armonizzate europee, rilasciano la marcatura CE obbligatoria per tutti i



(91) Comparazione tra un classico processo di progetto e un processo RDP (Fonte: Reuse of building elements in the architectural practice and the European regulatory context: Inconsistencies and possible improvements pp. 6).

PHASES	ACTIVITIES	
WASTE IDENTIFICATION	MATERIAL INVENTORY	PRE-DEMOLITION AUDIT
		WASTE MANAGEMENT PLAN
SOURCE SEPARATION AND COLLECTION	HAZARDOUS REMOVAL	
	SELECTIVE DEMOLITION	DISMANTLING
	ON-SITE SORTING	WASTE COLLECTION
WASTE LOGISTICS	WASTE TRANSPORT	TRACEABILITY
	OFF-SITE SORTING	WASTE COLLECTION
	PROPER STOCKING	
WASTE PROCESSING	LANDFILLING	
	BACKFILLING	
	RECOVERY	
	RECYCLING	
	RE-USE	

(92) Fasi di analisi del protocollo europeo costruzione e demolition waste (Fonte: Reuse of building elements in the architectural practice and the European regulatory context: Inconsistencies and possible improvements pp. 6).

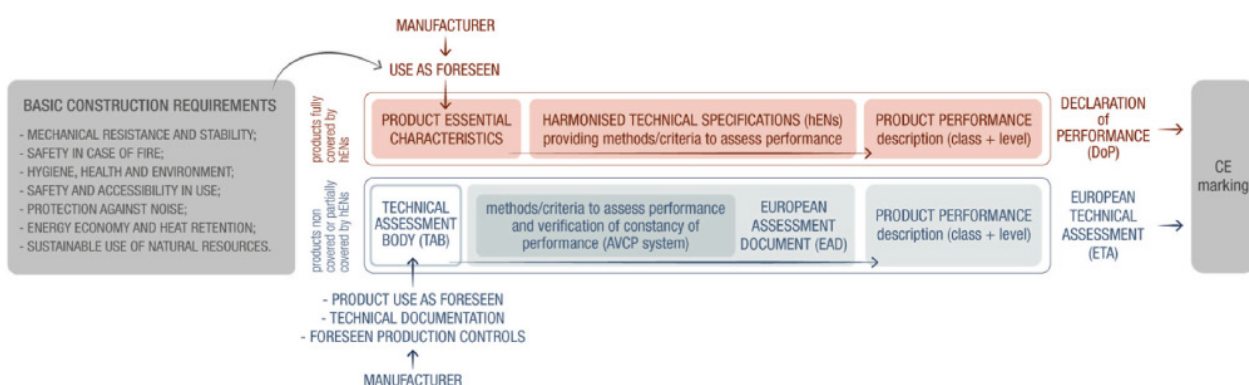
prodotti edilizi europei, per ottenerla si possono seguire 2 procedure:
 La prima è detta CEN, in rosso nella figura, in questo caso il prodotto deve essere interamente coperto da una norma armonizzata e il suo venditore deve emettere una dichiarazione delle prestazioni (DoP) (93).
 La via EOTA invece, in blu, mostra il processo nel caso il prodotto non sia completamente coperto dalla norma, ad esempio in caso di

un prodotto che non rientra nella casistica di alcuna norma esistente⁵⁷. I procedimenti RPC definiscono molto bene il linguaggio da utilizzare per le prestazioni ma non definiscono i contenuti delle prestazioni tecniche.

Questa panoramica delle normative europee concernenti la gestione dei rifiuti da costruzione e demolizione e i requisiti dei prodotti da costruzione dipinge un quadro sfumato per gli elementi edilizi recuperati. Da un lato, il riutilizzo è riconosciuto come un processo efficiente e sostenibile che facilitano la sua attuazione nel settore edile, mentre, dall'altro, non è menzionato nel regolamento principale concernente gli standard per la commercializzazione dei prodotti da costruzione.

Questa mancanza di una marcatura CE di fatto crea una grave mancanza e rende difficilmente utilizzabili questi sistemi sul territorio europeo, in quanto la mancanza di tale etichetta può essere interpretata come l'indicazione di rischio di un determinato materiale.

Un'altra problematica riguarda il momento in cui il materiale smette di essere rifiuto e diventa di fatto un nuovo materiale da costruzione; infatti, a livello burocratico ancora questo aspetto non è ancora stato approfondito e crea problematiche



(93) Prestazione complessiva in base alla percentuale di massa riutilizzata caso studio 2 (Fonte: Circularity Indicators as a Design Tool for Design and Construction Strategies in Architecture pp. 23).

57 - Reuse of building elements in the architectural practice and the European regulatory context: Inconsistencies and possible improvements pp. 7-11

differenti di volta in volta a seconda delle normative vigenti nei singoli paesi dell'UE. Oltre a tutte le problematiche normative appena descritte causano varie criticità, tra cui senza dubbio le più importanti sono:

- aumento dei tempi dei processi di costruzione;
- aumento dei costi dei processi;
- problemi di valutazione delle prestazioni;
- percezione negativa dell'utente finale.

Di fatto la decostruzione selettiva richiede costi molto elevati, per via della manodopera specializzata e dei vari macchinari spesso necessari per sistemare i materiali recuperati.

Dal punto di vista delle prestazioni, la responsabilità per la valutazione del prodotto riutilizzato potrebbe essere motivo di preoccupazione per i distributori che potrebbero cercare aiuto da revisori o progettisti per certificare la valutazione. Infatti, come confermato anche dalle interviste ai costruttori, "i materiali edili secondari derivanti da rifiuti da costruzione riutilizzati non sono ampiamente accettati sul mercato. Questo è principalmente dovuto alla mancanza di standard materiali,

che porta i consumatori a dubitare della qualità dei materiali riutilizzati".

Di fronte a queste evidenze, le cose da fare sono molteplici per provare a valorizzare i materiali e a non trasformarli in rifiuti, in primo luogo si dovrebbe cercare di non considerare mai gli elementi in fine vita come rifiuti. Rimuovendo questo stato, in automatico si risolverebbe anche quello di fine rifiuti e di conseguenza si riuscirebbe a semplificare l'utilizzo di queste risorse. Per semplificare la questione normativa sarebbe utile utilizzare i materiali in un processo a cascata, ovvero assegnando ai materiali di recupero delle funzioni meno importanti rispetto a quelle del loro primo utilizzo, ad esempio un elemento strutturale potrebbe diventare parte di una pavimentazione.

Come evidenziato in questo articolo⁵⁷ le barriere sono principalmente politiche a questo riguardo, essendo di fatto ormai chiaro agli architetti il bisogno di riutilizzare e massimizzare il consumo di ogni materiale, sfruttando a pieno tutte le nuove strategie oggi disponibili (94).

Acronyms	Approaches
3Rs-Df3Rs	Reduce, Reuse, Recycle/Design for Reduce, Reuse, Recycle
AR-DfAR	Adaptive Reuse/Design for Adaptive Reuse
CDW Mana	Construction and Demolition Waste Management
CDW Mini	Construction and Demolition Waste Minimisation
CE-DfCE	Circular Economy/Design for Circular Economy
CL-DfCL	Closed loops/Design for Closed loops
Cy	Constructability
De-DfD	Deconstruction/Design for Deconstruction
Disa-DfDisa	Disassembly/Design for Disassembly
Dis-DfDis	Dismantle/Design for Dismantle
IFD-DfIFD	Industrialised, Flexible and Demountable/Design for Industrialised, Flexible and Demountable buildings
LCA	Lifecycle Assessment
MA	Manufacture and Assembly/Design for Manufacture and Assembly
PFA-DfPFA	Prefabrication/Design for Prefabrication
RL-DfRL	Reverse Logistics/Design for Reverse Logistics
SB-DfSB	Sustainable Building/Design for Sustainable Building
SD	Selective Demolition
TB-DfTB	Transformable Building/Design for Transformable Building

(94) Elenco delle strategie ad oggi più utilizzate per il riuso circolare dei materiali (Fonte: Barriers to Implementing the Circular Economy in the Construction Industry: A Critical Review pp. 4).

3.1.3 - Come coinvolgere clienti e stakeholder

In questo paragrafo abbiamo cercato di capire come potrebbe essere facilitata la scelta di un approccio di progetto pensato oltre che in ottica di assemblaggio anche e soprattutto come progetto per la decostruzione e il recupero circolare dei materiali⁵⁷.

Ad oggi l'unione Europea richiede di recuperare da ogni demolizione il 70% dei materiali non pericolosi utilizzati nel progetto (Direttiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo).

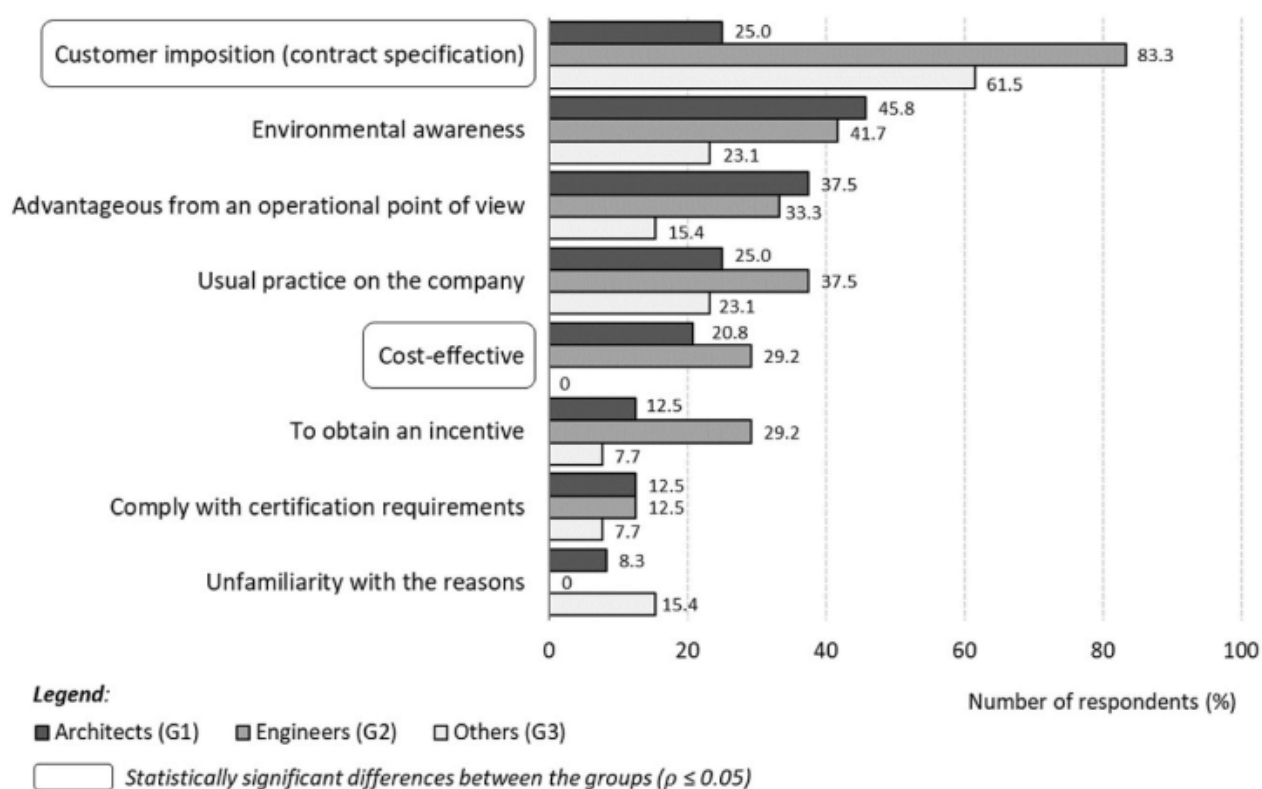
Tuttavia, nessuno dei paesi membri ad oggi riesce a rispettare questa norma, per via dei materiali utilizzati in passato per la costruzione degli edifici.

Per facilitare la comprensione di queste

dinamiche agli stakeholder e promuovere ai loro occhi queste pratiche è necessario redigere normative che ne specifichino i metri di utilizzo e soprattutto che la ricerca in questo senso sia incoraggiata e supportata anche a livello economico.

Un aiuto importante in questo senso viene dato dal BIM (tema trattato nel paragrafo successivo), che è uno strumento sicuramente gradito a tutti i professionisti coinvolti nel processo di progettazione, come architetti e ingegneri.

Per comprendere al meglio le modalità di lavoro delle più importanti aziende di costruzione, a diversi studi di architettura, ingegneria e professionisti che lavorano nelle aziende di costruzione, situati in



(95) Grafico che illustra le motivazioni dietro alla scelta di utilizzo di demolizioni selettive (Fonte: Barriers to Implementing the Circular Economy in the Construction Industry: A Critical Review pp. 6).

57 - Understanding the perceptions of stakeholders on selective demolition pp. 1-10

Portogallo è stato richiesto di compilare un sondaggio con varie domande per scoprire quali siano le migliori pratiche da affiancare alle pratiche da loro seguite.

Le risposte ai questionari hanno evidenziato che nel 77% dei casi gli studi hanno integrato metodi di demolizione selettiva atti al riuso e al riciclo dei materiali.

Il motivo per cui questi vengano integrati nei loro processi di lavorazione le risposte sono state quelle riportate all'interno del diagramma riportato nella figura 95.

Come si può vedere del diagramma la maggiorparte delle casistiche in cui si verifica il riuso dei materiali sono dettate da obblighi contrattuali e quindi da obblighi a cui l'azienda non può sottrarsi.

Inoltre, la maggior parte di questi lavori viene effettuata su edifici appartenenti a privati, (75%) mentre nel pubblico solo nel 60% dei casi viene effettuato questo tipo di intervento.

Analizzando questo dato appare subito evidente come il mondo dell'edilizia pubblica potrebbe sfruttare molto meglio la propria influenza sulle aziende invitandole a recuperare i materiali.

Una classificazione doverosa in questo senso è stata quella di considerare diversamente le varie classi coinvolte nel processo; infatti, agli ingegneri è stata riconosciuta una conoscenza maggiore del tema, in quanto sono coloro che devono di fatto ingegnarsi per trovare le soluzioni.

Successivamente sono stati considerati gli architetti ed infine i professionisti facenti parte delle aziende di costruzione.

Ciò che emerge dai dati raccolti è che la maggior parte dei partecipanti non valuta in modo troppo serio l'argomento, pensando

in fondo che sia una cosa secondaria.

Per quanto riguarda i metodi per implementare al meglio la sostenibilità all'interno dei processi di costruzione, tutte le potenziali misure per promuovere la demolizione selettiva sono state valutate molto positivamente dai partecipanti, con un'enfasi, tuttavia, sulla categoria relativa all'informazione e alla sensibilizzazione.

Ciò è in linea con la letteratura, che sottolinea la necessità di aggiornare le conoscenze.

Questo aspetto è molto importante e potrebbe essere raggiunto integrando iniziative locali, non solo concentrandosi su azioni di sensibilizzazione e formazione poco frequenti, ma istigando routine di supervisione e formazione. Questo sarà importante non solo per trasmettere conoscenze in modo più coerente e dettagliato, con uguaglianza tra le parti interessate, ma anche per creare condizioni che consentano ai praticanti di sentirsi a proprio agio nell'esprimere i loro dubbi, in un ambiente che incoraggi la cooperazione e la co-costruzione, e cerchi di migliorare le soluzioni, il che è possibile solo attraverso iniziative che si sviluppino gradualmente, nel tempo.

Le informazioni finali redatte da questo studio portano alla conclusione che il 23% degli studi coinvolti non ha mai effettuato processi di demolizione selettiva, mentre gli studi che li praticano nella maggior parte dei casi lo fanno solo per obblighi contrattuali.

Mentre per quanto riguarda le ragioni della mancata implementazione, la più frequente è stata la mancanza di informazioni e di consapevolezza sul tema.

3.2 - Collaborazione tra BIM e DfD

3.2.1 - Ampliare le opportunità attraverso il BIM

Con la necessità di progettare in maniera sempre più attenta gli edifici, pensando appunto al fine vita, l'integrazione dei sistemi BIM, in grado di gestire grandi fonti di informazioni contemporaneamente, diventano un alleato molto importante.

Tuttavia, ad oggi gli strumenti di cui sono dotati i sistemi BIM riguardanti il design for deconstruction o disassembly, sono ancora insufficienti e non abbastanza specifici.

Per questo motivo sarebbe importante creare un plug-in o comunque un software in grado di interfacciarsi col BIM, una possibile soluzione potrebbe essere quella di integrare alla metodologia BIM sia i concetti di DfD che quelli di Open building (ovvero la possibilità di adattare gli spazi interni di un edificio col passare del tempo a nuove esigenze). Grazie alla possibilità di modificare la disposizione interna degli edifici, ovviamente si allunga la vita dell'edificio che sarà utilizzabile per più tempo mantenendo una certa dinamicità degli ambienti anche cambiando la funzione.

Lo smontaggio o la de-costruzione comportano la sostituzione della demolizione tradizionale con uno smantellamento attento e pianificato mirato ad aumentare il potenziale di riutilizzo dei componenti edilizi e al riciclo dei materiali. "Design per lo smontaggio" o "Design per la de-costruzione" hanno la stessa idea e sono entrambi abbreviati come DfD⁵⁸.

Un modo per facilitare la transizione da un modello lineare a un modello circolare è impiegare strumenti di supporto ai progetti che forniscono indicazioni su vari aspetti.

Ad esempio, questi strumenti possono offrire approfondimenti sulla generazione di rifiuti durante la fase di fine vita (EoL), sulla selezione dei materiali, sui metodi di collegamento degli elementi e sul potenziale riutilizzo e riciclo [96].

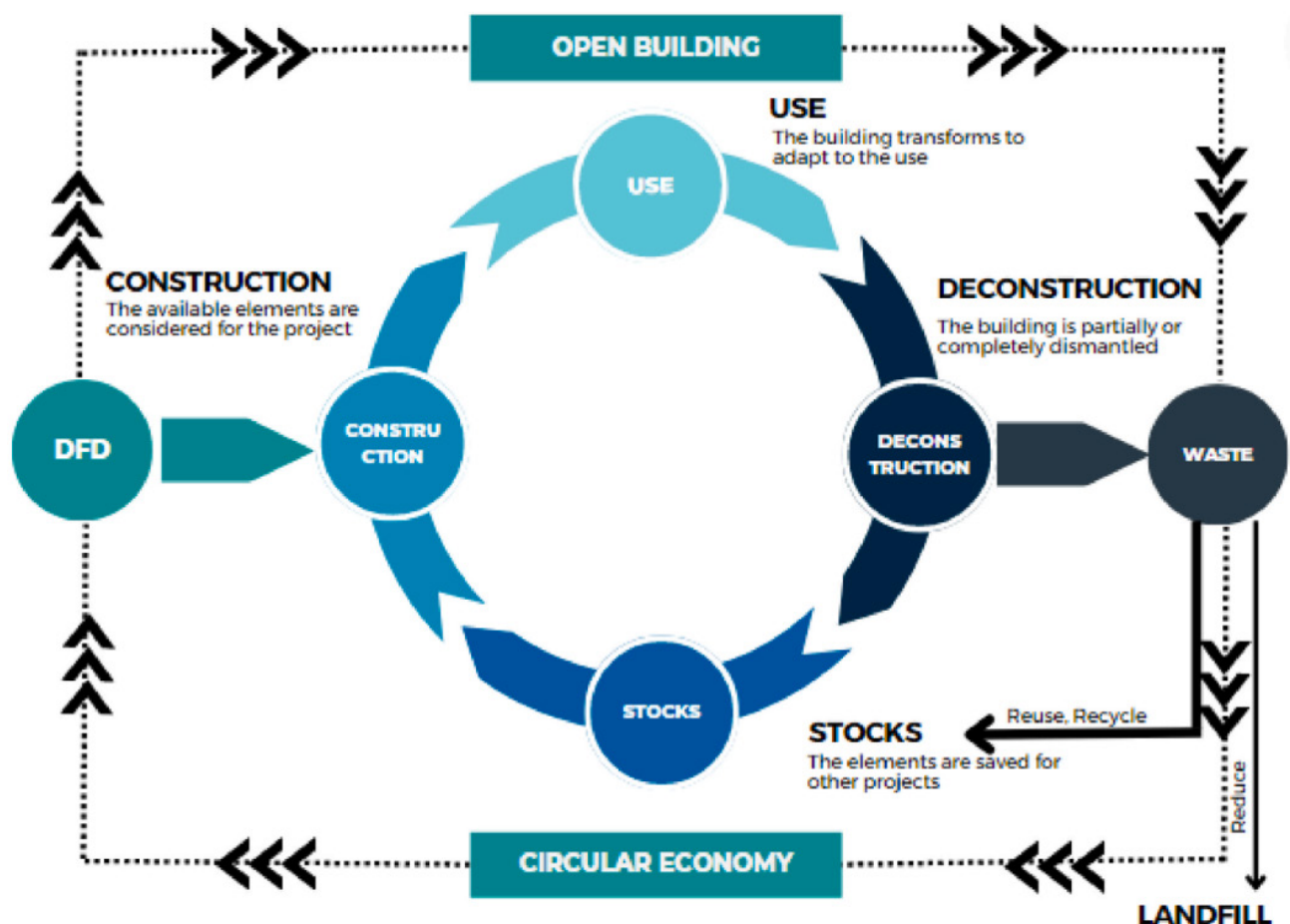
I problemi principali a cui l'implementazione del BIM ad oggi deve rispondere sono sette:

- 1 - parametri di implementazione e caratteristiche di progettazione.
- 2 - quantificazione del potenziale recuperabile degli edifici.
- 3 - analisi delle prestazioni e simulazione delle alternative di fine vita.
- 4 - sviluppo di una banca materiali con connessione BIM.
- 5 - gestione dei rifiuti di smontaggio.
- 6 - analisi della fattibilità dello smontaggio.
- 7 - rilevamento e tracciamento degli oggetti.

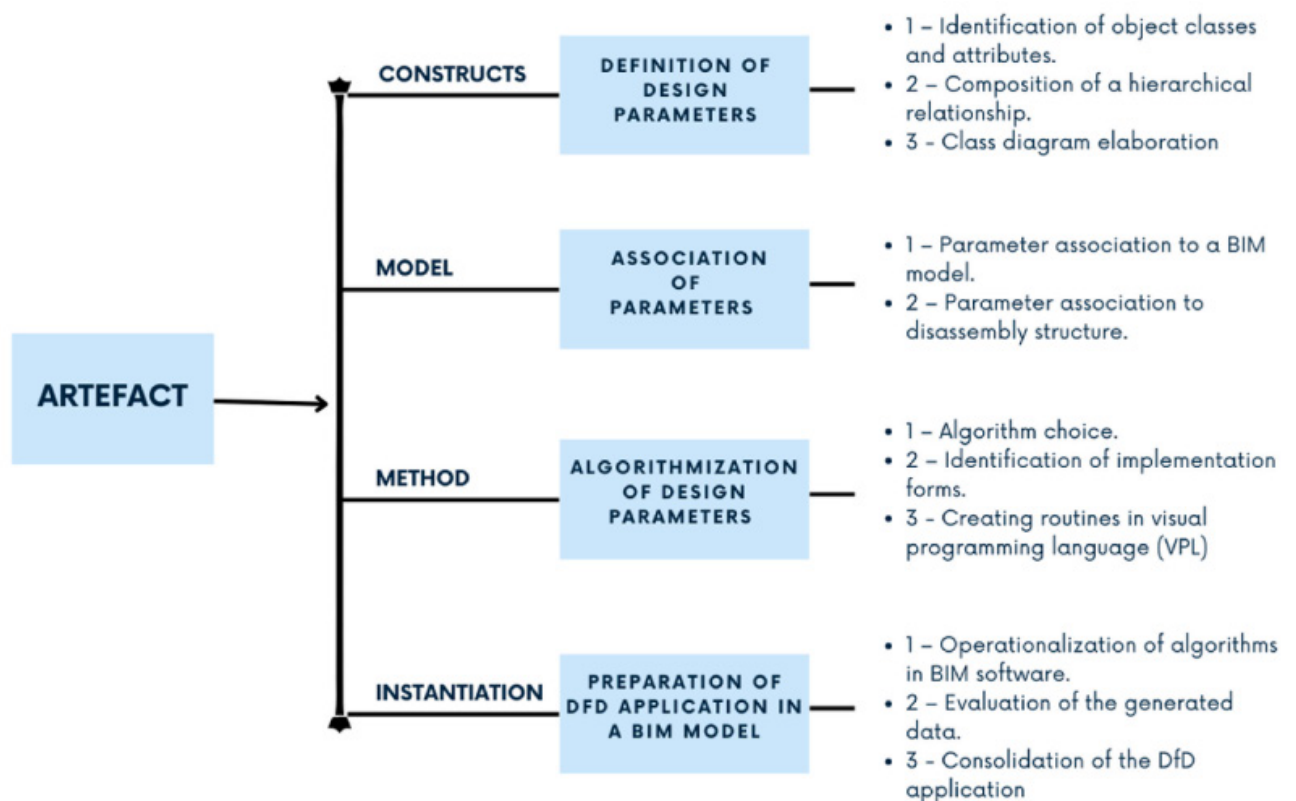
Per cercare di realizzare un software o comunque un procedimento in grado di sopperire a queste mancanze del BIM si è proceduto attraverso diversi passaggi raffigurati nell'immagine 97.

Il processo di sviluppo ha inizio con la formulazione dei parametri del DfD e culmina nella creazione di un'applicazione BIM per il DfD, che è realizzata utilizzando il software di progettazione computazionale REVIT2. Questa applicazione incorpora routine eseguite attraverso il linguaggio di programmazione visuale (VLP), DYNAMO. La prima cosa necessaria per l'applicazione di una metodologia DfD è rendere riconoscibili le parti dell'edificio attraverso un linguaggio scritto, che vengono poi elaborati in oggetti e attributi e l'identificazione dei verbi che vengono

58 - Integration of BIM and design for deconstruction to improve circular economy of buildings 1 - 7



[96] Connessione tra DfD, Open building e economia circolare (Fonte: Integration of BIM and design for deconstruction to improve circular economy of buildings pp. 3).



[97] Framework di sviluppo dell'artefatto BIM per il Design per la Decostruzione (DfD) (Fonte: Integration of BIM and design for deconstruction to improve circular economy of buildings pp. 7).

elaborati in operazioni e servizi. Una volta identificate le classi di oggetti, diventa necessario stabilire relazioni gerarchiche tra di esse. Attraverso la definizione di gerarchia, il progettista ha la suddivisione dell'edificio in sistemi e parti, e la sua importanza sta nel permettere chiaramente il flusso di dati, che può essere raggiunto attraverso l'uso di codici, definizioni e operazioni applicabili a un'intera classe di oggetti che condividono proprietà comuni. In Revit, tutti gli elementi del modello includono i codici di assemblaggio disponibili e le relative descrizioni dei tipi di assemblaggio, basati sull'elenco gerarchico dei codici Unifomat, come mostrato nell'immagine 97.

Infine, il diagramma delle classi rappresenta le classi di sistema e le loro associazioni [98].

Sulla base del modello per l'organizzazione e la classificazione delle informazioni in BIM, è stato sviluppato e implementato in questo progetto un modello per gli attributi BIM, specificamente allo scopo del disassemblaggio.

Questo modello è strutturato in tre

divisioni: gerarchia di disassemblaggio; dati geometrici dei componenti; informazioni di disassemblaggio [98].

Questo quadro stabilisce il collegamento tra disassemblaggio, domini di progettazione e parametri BIM.

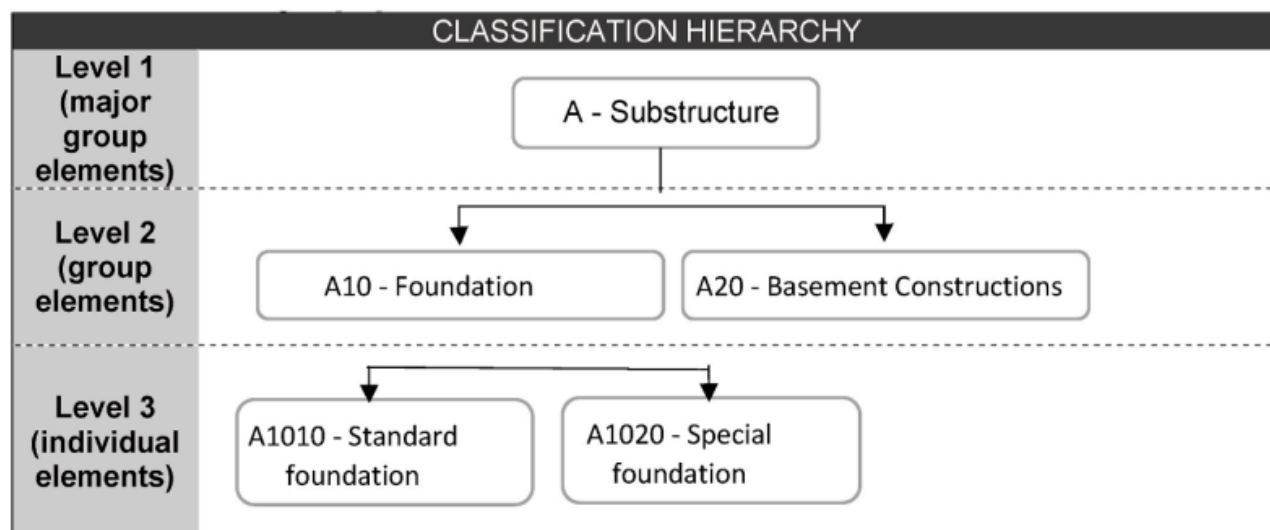
Le fasi successive comporteranno la proposta e l'implementazione di algoritmi per i parametri del progetto identificati utilizzando il software di creazione di modelli, Revit, e lo strumento di programmazione visiva, Dynamo⁵⁹.

Per avviare questo processo è stato necessario ricreare i parametri DfD in Revit, incorporandone anche di aggiuntivi [99].

- A1 – EOL: Fine vita (EOL) parametro creato per identificare gli elementi in base alla loro possibile destinazione per la pianificazione del disassemblaggio.

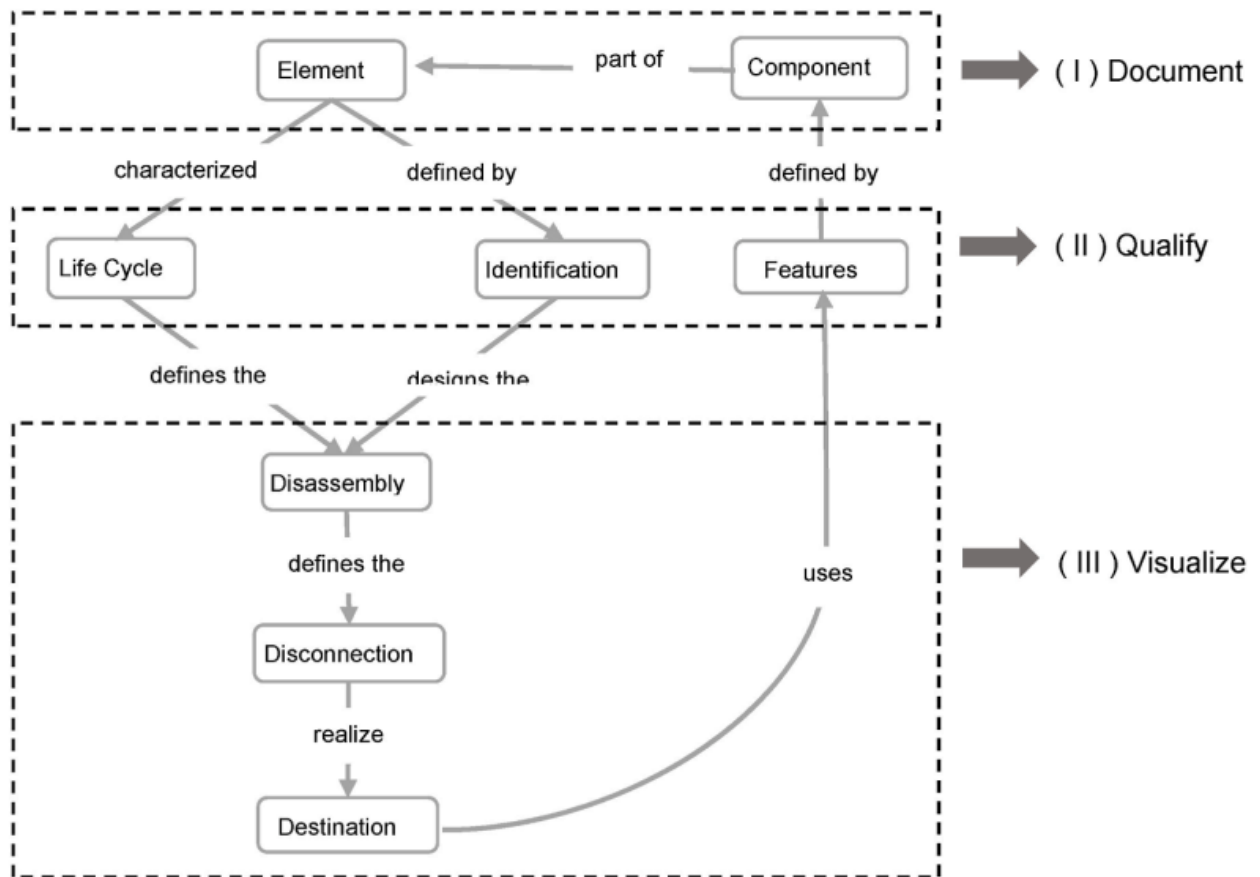
- A2 – FLESSIBILITÀ: Il parametro Flessibilità rappresenta le condizioni del progetto di autore, indicando gli elementi che sono supporto (supporto), oppure gli elementi che sono mobili (infill).

- A3 – PLS: Rappresenta la durata del progetto.



[98] Gerarchia di classificazione ASTM UNIFORMAT II per gli elementi edilizi (Fonte: Integration of BIM and design for deconstruction to improve circular economy of buildings pp. 8).

59 - Integration of BIM and design for deconstruction to improve circular economy of buildings pp. 7 - 12



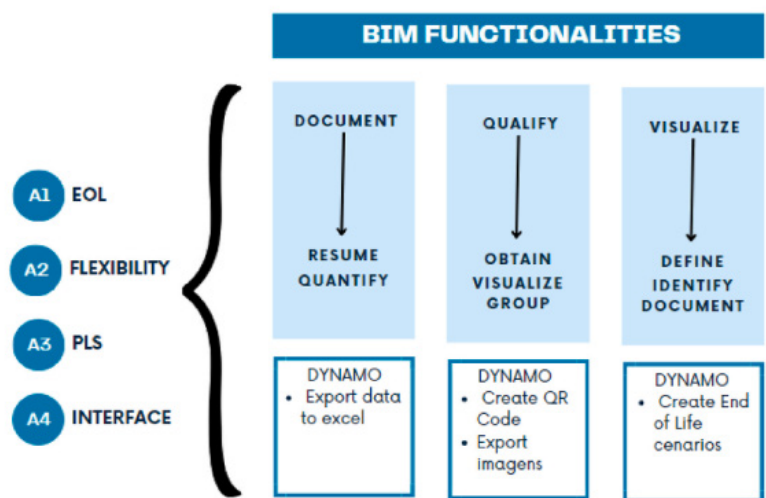
[99] Diagramma di relazione tra classi di sistema (Fonte: Integration of BIM and design for deconstruction to improve circular economy of buildings pp. 9).

- A4 - INTERFACCIA: Il parametro

Interfaccia rappresenta il tipo di connessione che l'elemento stabilisce con gli altri che lo supportano e lo mantengono stabile nella sua posizione [100].

A questo punto è possibile creare documenti coerenti a supporto della procedura di disassemblaggio.

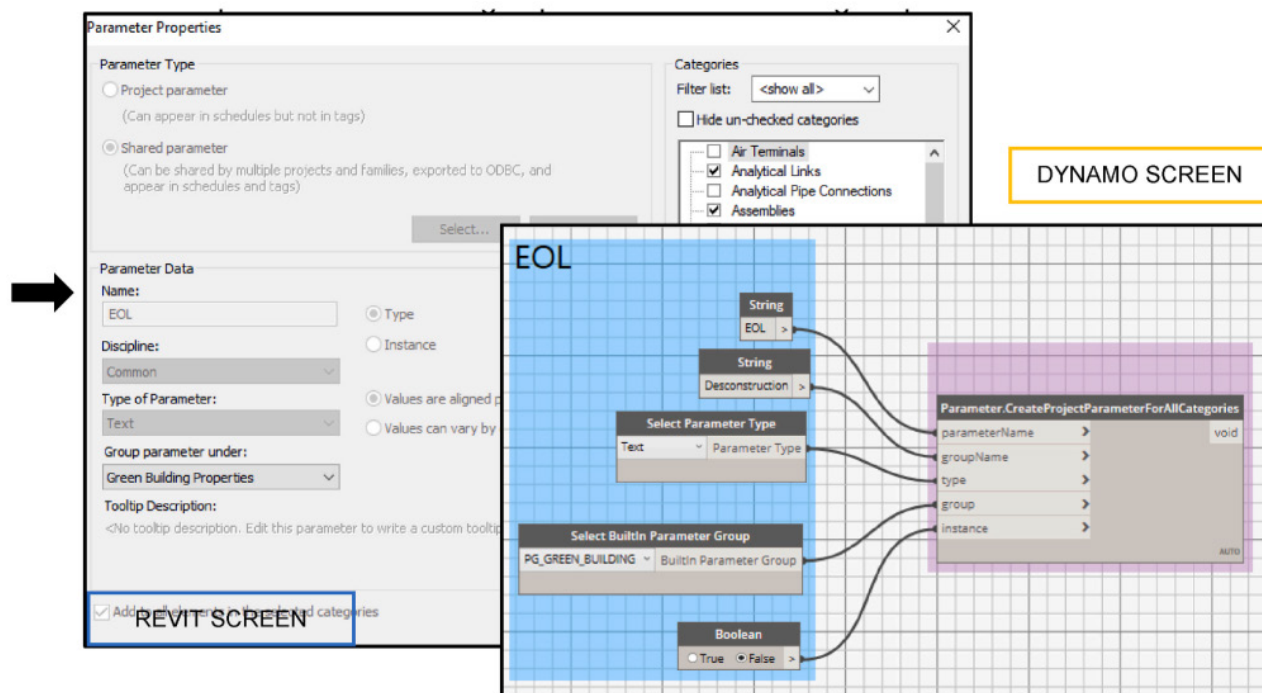
A questo scopo, è stata proposta una routine Dynamo che crea e configura automaticamente questi parametri condivisi all'interno



[100] Grafico che illustra le motivazioni dietro alla scelta di utilizzo di demolizioni selettive (Fonte: Integration of BIM and design for deconstruction to improve circular economy of buildings pp. 10).

di un gruppo chiamato "Proprietà dell'edificio verde".

Il grafico Dynamo, in questa routine, è composto da due gruppi di nodi. Il primo fornisce il nome dei parametri, i gruppi e i tipi, mentre il secondo fornisce la creazione dei parametri di progetto in Revit, come mostrato nella schermata delle Proprietà del progetto in Revit [101]. Una volta creati questi parametri, i campi in Revit devono essere compilati con informazioni che identificano la condizione di ogni elemento, questo consente di esportare le informazioni



(101) Il parametro condiviso EOL all'interno del gruppo Green Building Properties (Fonte: Integration of BIM and design for deconstruction to improve circular economy of buildings pp. 11).

in Excell e facilita la generazione di immagini, facilitando il tracciamento. Arrivati a questo punto tutti gli elementi sono identificati attraverso un codice di identificazione noto come Element ID, questo codice può essere visualizzato in REVIT utilizzando la routine Dynamo nella tabella delle proprietà, e da lì può comparire in tabelle come Programma/Quantità.

Inoltre, sarà utilizzato per l'identificazione e il successivo tracciamento degli elementi costruttivi, il trasferimento dei dati dal modello BIM al database è stato ottenuto sviluppando uno script Dynamo, il quale accede alla struttura dei dati nel modello BIM di Revit, estrae le informazioni richieste e le inserisce in un foglio di calcolo Excel.

3.2.1.1 - Applicazione pratica nel caso di edificio per uffici

L'edificio per uffici XX (102) è stato concepito nel 1999, dallo studio XXarchitekten, con l'intenzione che durasse 20 anni perché dopo questo tempo la maggior parte degli uffici non sono in grado di rispondere alle nuove esigenze che arrivano con il tempo e l'uso. I principi di progetto adottati per dopo questo ciclo di vita includevano la scelta di materiali in grado di decomporre nel suolo, parti che possono essere riutilizzate

con o senza modifiche, materiali che possono essere riciclati. In base a questo, le specifiche del progetto prevedevano grandi finestre in vetro e in legno sulle facciate, struttura con colonne e travi in legno lamellare rinforzate in alcuni punti con controventature in acciaio, e altre strutture installate che potevano essere smontate e riutilizzate. Per questi motivi, questo progetto è stato

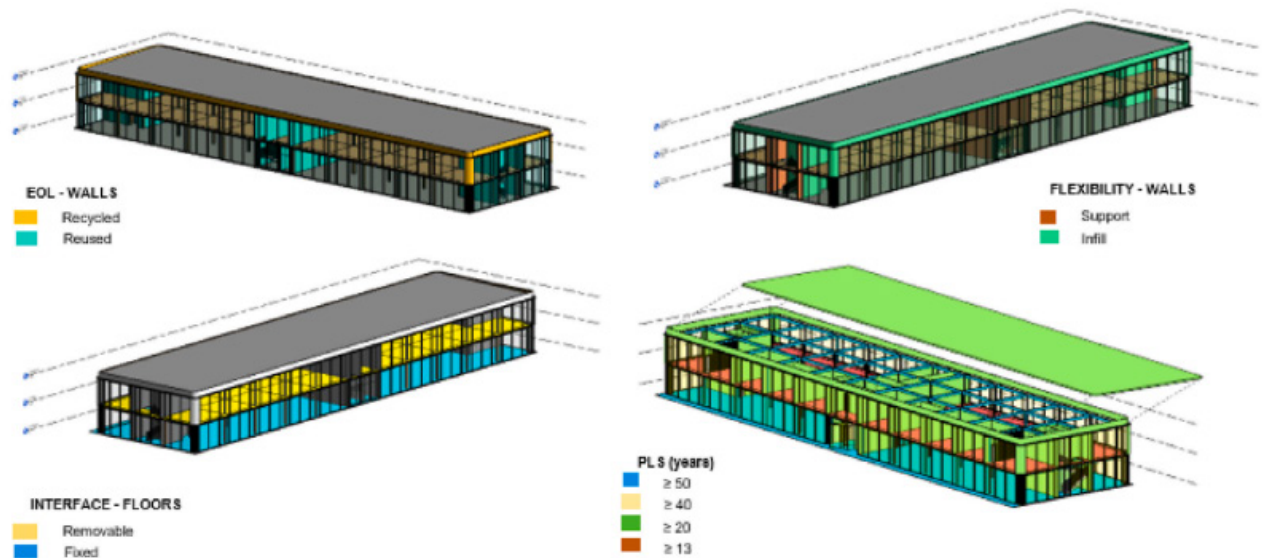
scelto come base di prova per l'applicazione BIM⁶⁰.

Per avviare l'implementazione, dopo il ridisegno del progetto in REVIT, i parametri DfD sono stati aggiunti al modello e configurati per ciascun elemento costruttivo con la routine Dynamo.

Il risultato dello script implementato in Dynamo per Revit per inviare i dati dal modello BIM a un foglio di calcolo [102], con l'obiettivo di identificare gli elementi e tracciarli, e in questo modo il documento

generato può iniziare a comporre una base di documentazione di progetto per la pianificazione e la gestione dello smontaggio.

Alla fine, gli elementi possono essere visualizzati con le loro caratteristiche attraverso una routine Dynamo e collegata in un codice QR. Il collegamento delle immagini in un codice QR consente di identificare questi componenti edificati, aiutando sia lo smontaggio che il futuro riutilizzo. Nell'immagine 103 possiamo vedere il risultato



[102] Risultati dei filtri DfD creati: EOL, Flessibilità, PLS e Interfaccia. (Fonte: Integration of BIM and design for deconstruction to improve circular economy of buildings pp. 14).



[103] creazione di un QR code personalizzato per un elemento (Fonte: Integration of BIM and design for deconstruction to improve circular economy of buildings pp. 15).

della routine di immagine e codice QR per un elemento di costruzione nell'edificio per uffici XX.

Il caso studio dimostra come lo strumento di supporto alla progettazione proposto permetta ai progettisti di gestire gli elementi edilizi dopo lo smontaggio e condividere informazioni sui componenti di sostituzione dello smontaggio che possono essere riutilizzati per nuovi edifici⁶¹.

Parametri di implementazione e caratteristiche di progettazione: Sono stati aggiunti parametri aggiuntivi. Il BIM offre la funzionalità di includere parametri definiti dall'utente, e attraverso l'ambiente di programmazione visiva, questo può essere automatizzato. Tra gli altri obiettivi, è possibile ottenere un miglioramento della collaborazione tra gli stakeholder, la quantificazione dei materiali recuperabili, lo sviluppo di piani di smontaggio e la simulazione di alternative di fine vita.

Quantificazione del potenziale di recupero degli edifici: Il riepilogo totale delle quantità di materiali destinati a essere riutilizzati o riciclati può essere estratto in Revit dal parametro EOL.

Analisi delle prestazioni e simulazione delle alternative di fine vita: La nuova proposta è l'elaborazione di parametri di smontaggio correlati alla teoria dei livelli, incoraggiando la concezione di spazio flessibile e adattabile a nuove esigenze, e fornendo la visualizzazione della destinazione finale dei componenti costruttivi specificati.

Sviluppo di una banca dati di materiali con connessione BIM: Lo sviluppo di una banca dati di materiali e componenti, serve come piattaforma per consentire ai progettisti di verificare la disponibilità di componenti edilizi. Questo approccio consente ai progettisti di collaborare durante la fase di progettazione del progetto controllando gli elementi che possono essere acquistati.

Gestione della fine vita (EOL): Questi principali

progressi si sono concentrati sulla stima dei rifiuti di demolizione, sull'estrazione delle informazioni nel modello BIM per la pianificazione del riciclo e del riutilizzo, dopo di che è possibile affrontare meglio la logistica dei trasporti, i costi e il tempo come proposto in precedenza.

Analisi della fattibilità dello smontaggio: In questo lavoro, la fattibilità dello smontaggio è principalmente situata nella fase di progettazione architettonica.

Rilevamento e tracciamento degli oggetti: L'elemento costruttivo può quindi essere tracciato attraverso un codice QR dopo lo smontaggio. Pertanto, questa ricerca si concentra sulla progettazione e sull'abilitazione della fase di pianificazione dello smontaggio durante la fase di progettazione iniziale.

Il sistema sviluppato ha il potenziale per facilitare l'adozione dello smontaggio e permettere ai professionisti di prendere decisioni informate riguardo allo smontaggio nelle fasi precedenti del progetto. Consente anche di identificare e tracciare elementi edilizi riciclabili o riutilizzabili, la loro vita utile e il potenziale smontaggio.

La Teoria dell'Edificio Aperto è stata integrata con il Design per lo Smontaggio per consentire l'Economia Circolare nell'industria delle costruzioni. Il progetto deve iniziare con la selezione di sistemi di costruzione, considerando la disponibilità di mercato del riutilizzo dei componenti. La flessibilità dei piani consente la rimozione di parte dell'edificio, modificando la configurazione interna e prolungando la vita utile dell'edificio.

61 - Integration of BIM and design for deconstruction to improve circular economy of buildings pp. 15 - 18

62 - everything need to change, architecture and the climate emergency. pp. 2

3.3 - Applicazioni concrete di metodologia DfD

Durante la conferenza Fabricate 2024 uno degli interventi più interessanti è stato sicuramente quello dell'architetto Anders Lendager, uno degli architetti più all'avanguardia sul tema della decostruzione selettiva e sul recupero circolare dei materiali.

Durante la presentazione ha portato 2 esempi di progetti realizzati dal suo studio negli ultimi anni, che verranno illustrati

nelle pagine successive e in cui sono stati applicati concetti molto interessanti che potrebbero essere presi ad esempio in molti altri casi.

Ovviamente queste metodologie non sono sempre applicabili e serve sempre un controllo accurato sui materiali di recupero prima di procedere con questo tipo di pratiche.

Durante la realizzazione di questo progetto

3.3.1 - The resource rows - Copenhagen



(104) Prospetto esterno del complesso di edifici realizzato con mattoni recuperati da vecchi edifici (Fonte: lendager.com - visto in data 10/05/2024).

l'obiettivo del progettista era quello di costruire un nuovo edificio a corte di 92 appartamenti, con al centro uno spazio verde dedicato ai residenti⁶².

La particolarità immediatamente percepibile di questo edificio è l'altissimo utilizzo di materiali di recupero, a partire dal prospetto infatti sono stati utilizzati mattoni recuperati da vecchi edifici presenti nell'area.

Questa pratica ha consentito un risparmio di CO2 pari al 29%, attraverso il riutilizzo di solo il 10% di tutti i materiali da costruzione impiegati, inoltre la velocità con cui si

riesce a tagliare (106) le parti murarie ha garantito il successo dell'opera.

Lo schema è composto da due file di case a schiera di tre piani affiancate da due blocchi di appartamenti di cinque piani. Il progetto dimostra un approccio radicale al riciclo dei materiali che riduce significativamente l'impronta di carbonio della costruzione.

Oltre al prospetto (104) anche altre parti del progetto sono state recuperate da vecchi edifici, ad esempio nel cortile interno sono presenti delle serre realizzate interamente con finestre e travi in legno di recupero, inoltre una trave in cemento riutilizzata è



(105) Corte interna con giardini e piccoli edifici in legno recuperato, in alto la passerella realizzata con una trave in cemento armato di recupero. (Fonte: lendager.com).

stata riutilizzata come ponte (105). Grazie all'applicazione di pratiche DfD ha consentito un riutilizzo di 463 tonnellate di rifiuti che sono tornati ad essere materiali da costruzione⁶³.

Ovviamente l'intero complesso è alimentato ad energia solare e pompe di calore aria-acqua.

Un altro aspetto interessante di questo progetto è il coinvolgimento degli abitanti nella vita sociale di quartiere, grazie alla possibilità di organizzare eventi e attività sia nel cortile che sui tetti verdi a loro disposizione.

63 - Resource Rows, lendager.com

64 - Karstadt Re-Parked, lendager.com



(106) Taglio di un segmento di muro da 1 m² (Fonte: lendager.com).

3.3.2 - Karstadt Re-Parked - Berlin



(107) Prospetto esterno con struttura realizzata dalle vecchie travi in cls. (Fonte: lendager.com).



(108) Progetto degli ambienti interni. (Fonte: lendager.com).

Il progetto Karstadt a Hermannplatz, un raccolto estetico e sostenibile e la riconfigurazione dei materiali esistenti che dimostra le possibilità del riutilizzo⁶⁴ - potrebbe creare il più sostenibile edificio commerciale e ufficio al mondo (107). L'obiettivo era massimizzare il riutilizzo dei

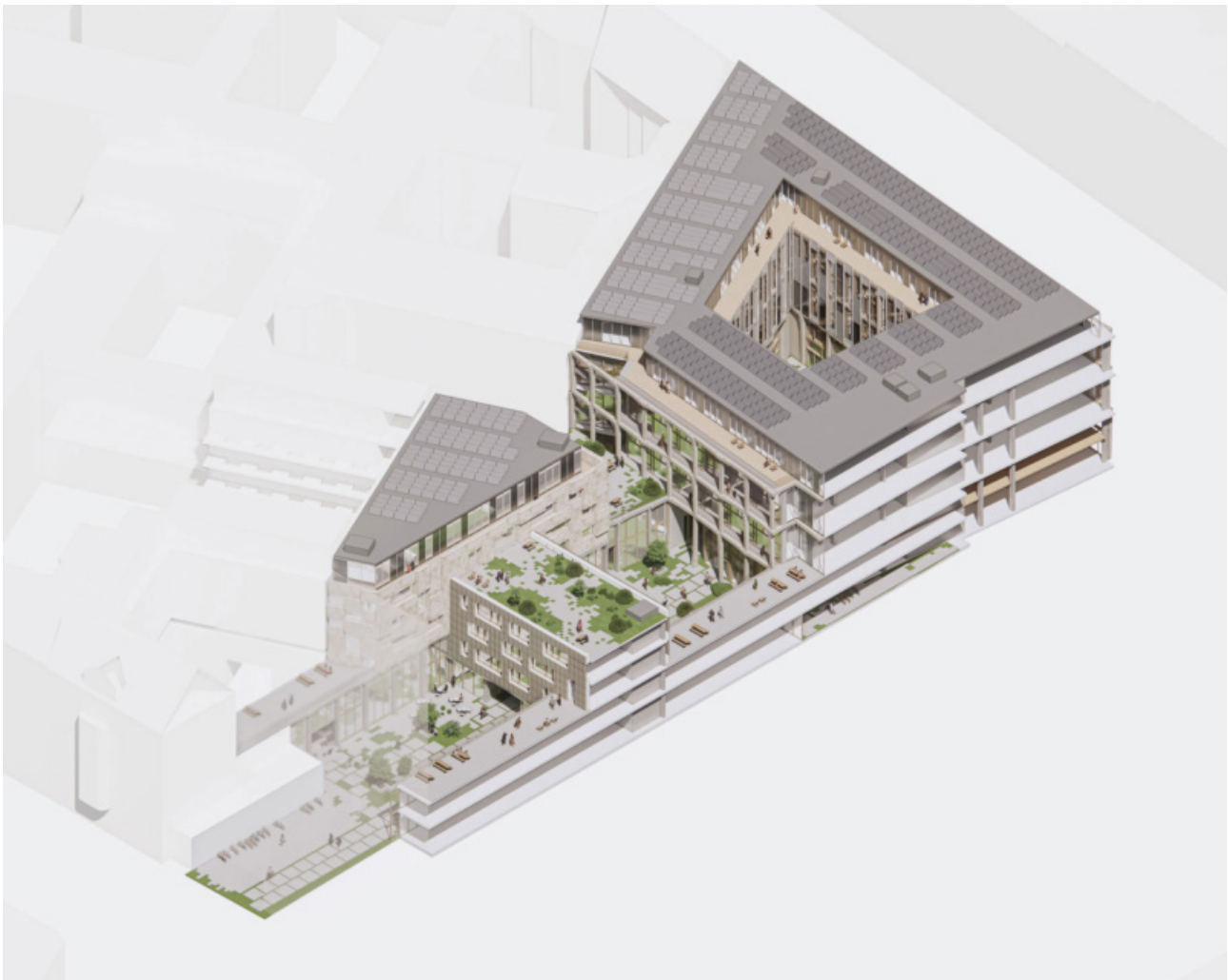
materiali da costruzione e dei componenti dell'edificio esistente del grande magazzino nella costruzione della parte posteriore del terreno. La base del concorso era costituita da un catalogo digitale dei componenti, in cui sono elencati tutti i materiali e i componenti dell'edificio esistente di

Karstadt, del parcheggio e del cortile che possono essere riutilizzati⁶⁵.

Il concept di Lendager prevede la rimozione dei piani 1, 3 e 5 e delle travi di cemento del parcheggio verso Urbanstraße, per creare spazi alti e flessibili per il commercio, gli uffici o le attività commerciali (108). I materiali rimossi saranno riutilizzati come nuove facciate e lastre portanti in combinazione con una nuova struttura in legno. Anche sui lati esterni verranno utilizzati i componenti rimossi. Le travi in calcestruzzo fungeranno da sistema di facciata a griglia autoportante.

Ciò crea una forte identità verso Urbanstraße.

I materiali del grande magazzino saranno riutilizzati come elementi interni e esterni. Lendager propone, tra le altre cose, una facciata composta da gradini delle scale mobili: questi gradini sono in acciaio inossidabile, recuperati anch'essi da un edificio in fase di demolizione, adatti come materiale da costruzione per le facciate grazie alla loro resistenza alle intemperie. Allo stesso tempo, la proposta visualizza il riutilizzo e l'economia circolare come temi importanti e comprensibili (109).



(109) Spaccado assonometrico del progetto. (Fonte: lendager.com).

65 -Deal magazine, Berlin Projekt Karstadt Hermannplatz: Lendager gewinnt Wettbewerb

Fonti

Libri (in ordine di citazione)

- Pelsmakers. Sofie, Nick Newman - Design Studio Vol. 1: Everything Needs to Change: Architecture and the Climate Emergency: 2021, RIBA publishing, London.

Articoli (in ordine di citazione)

- Francesco Incelli, Luciano Cardellicchio, Massimo Rossetti, Circularity Indicators as a Design Tool for Design and Construction Strategies in Architecture, Buildings, Giugno 2023.

- Massimiliano Condotta, Elisa Zatta, Reuse of building elements in the architectural practice and the European regulatory context: Inconsistencies and possible improvements, Journal of Cleaner Production, Luglio 2021.

- Mario Ramos a,b, Ana Paiva b, Graça Martinho, Understanding the perceptions of stakeholders on selective demolition, Journal of Building Engineering, Settembre 2023.

- Patricia Rodrigues Balbio de Lima a, Conrado de Souza Rodrigues a, Jouke M. Post, Integration of BIM and design for deconstruction to improve circular economy of buildings, Journal of Building Engineering, Novembre 2023.

Siti web (in ordine di citazione)

- Resource rows - www.lendager.com/project/resource-rows/ - visto in data 10/05/2024.

- Karstadt Re-Parked - www.lendager.com/project/karstadt/ - visto in data 10/05/2024.

- Deal magazine, Berlin Projekt Karstadt Hermannplatz: Lendager gewinnt Wettbewerb - www.deal-magazin.com/news/3/112108/Berlin-Projekt-Karstadt-Hermannplatz-Lendager-gewinnt-Wettbewerb - visto in data 10/05/2024.

Elenco immagini con fonti complete

(73) Equazione che esprime le prestazioni del processo MCI (Fonte: Francesco Incelli, Luciano Cardellicchio, Massimo Rossetti, *Circularity Indicators as a Design Tool for Design and Construction Strategies in Architecture* pp. 5).

(74) Espressione del punteggio di circolarità (Fonte: Francesco Incelli, Luciano Cardellicchio, Massimo Rossetti, *Circularity Indicators as a Design Tool for Design and Construction Strategies in Architecture* pp. 6).

(75) Sezione dell'edificio modulare (Fonte: Francesco Incelli, Luciano Cardellicchio, Massimo Rossetti, *Circularity Indicators as a Design Tool for Design and Construction Strategies in Architecture* pp. 11).

(76) Dettagli costruttivi dell'edificio (Fonte: Francesco Incelli, Luciano Cardellicchio, Massimo Rossetti, *Circularity Indicators as a Design Tool for Design and Construction Strategies in Architecture* pp. 11).

(77) Fasi di disassemblaggio di una partizione verticale (Fonte: Francesco Incelli, Luciano Cardellicchio, Massimo Rossetti, *Circularity Indicators as a Design Tool for Design and Construction Strategies in Architecture* pp. 12).

(78) Sezione del modulo H.E.L.P Veneto (Fonte: Francesco Incelli, Luciano Cardellicchio, Massimo Rossetti, *Circularity Indicators as a Design Tool for Design and Construction Strategies in Architecture* pp. 14).

(79) Tabella che racchiude i tipi di connessioni e effetti sui materiali connessi (Fonte: Francesco Incelli, Luciano Cardellicchio, Massimo Rossetti, *Circularity Indicators as a Design Tool for Design and Construction Strategies in Architecture* pp. 16).

(80) Formula utilizzata per il calcolo della percentuale di massa riutilizzata (Fonte: Francesco Incelli, Luciano Cardellicchio, Massimo Rossetti, *Circularity Indicators as a Design Tool for Design and Construction Strategies in Architecture* pp. 17).

(81) Diagramma gerarchico delle procedure di valutazione (Fonte: Francesco Incelli, Luciano Cardellicchio, Massimo Rossetti, *Circularity Indicators as a Design Tool for Design and Construction Strategies in Architecture* pp. 18).

(82) Rappresentazione degli elementi presenti all'interno della prima abitazione (Fonte: Francesco Incelli, Luciano Cardellicchio, Massimo Rossetti, *Circularity Indicators as a Design Tool for Design and Construction Strategies in Architecture* pp. 19).

(83-84) Dettagli costruttivi inerenti la parete e le fondazioni rialzate della seconda struttura (Fonte: Francesco Incelli, Luciano Cardellicchio, Massimo Rossetti, *Circularity Indicators as a Design Tool for Design and Construction Strategies in Architecture* pp. 20).

(85) Percentuale di massa riutilizzata per gerarchie di smontaggio per caso studio 1 (Fonte: Francesco Incelli, Luciano Cardellicchio, Massimo Rossetti, *Circularity Indicators as a Design Tool for Design and Construction Strategies in Architecture* pp. 21).

(86) Percentuale di massa riutilizzata per gerarchie di smontaggio per caso studio 2 (Fonte: Francesco Incelli, Luciano Cardellicchio, Massimo Rossetti, *Circularity Indicators as a Design Tool for Design and Construction Strategies in Architecture* pp. 23).

(87) Prestazione complessiva in base alla percentuale di massa riutilizzata caso studio 1 (Fonte: Francesco Incelli, Luciano Cardellicchio, Massimo Rossetti, *Circularity Indicators as a Design Tool for Design and Construction Strategies in Architecture* pp. 22).

(88) Prestazione complessiva in base alla percentuale di massa riutilizzata caso studio 2 (Fonte: Francesco Incelli, Luciano Cardellicchio, Massimo Rossetti, *Circularity Indicators as a Design Tool for Design and Construction Strategies in Architecture* pp. 23).

(89) Rappresentazione diagrammatica dell'approccio progettuale concettuale architettonico basato sulla strategia di smontaggio gerarchico (Fonte: Francesco Incelli, Luciano Cardellicchio, Massimo Rossetti, *Circularity Indicators as a Design Tool for Design and Construction Strategies in Architecture* pp. 30).

(90) Il ruolo del processo di riuso (Fonte: Massimiliano Condotta, Elisa Zatta, *Reuse of building elements in the architectural practice and the European regulatory context: Inconsistencies and possible improvements* pp. 5).

(91) Comparazione tra un classico processo di progetto e un processo RDP (Fonte: Massimiliano Condotta, Elisa Zatta, *Reuse of building elements in the architectural practice and the European regulatory context: Inconsistencies and possible improvements* pp. 6).

(92) Fasi di analisi del protocollo europeo construction e demolition waste (Fonte: Massimiliano Condotta, Elisa Zatta, *Reuse of building elements in the architectural practice and the European regulatory context: Inconsistencies and possible improvements* pp. 6).

(93) Prestazione complessiva in base alla percentuale di massa riutilizzata caso studio 2 (Fonte: Massimiliano Condotta, Elisa Zatta, *Circularity Indicators as a Design Tool for Design and Construction Strategies in Architecture* pp. 23).

(94) Elenco delle strategie ad oggi più utilizzate per il riuso circolare dei materiali (Fonte: Rabia Charef, Jean-Claude Morel, Kambiz Rakhshan, *Barriers to Implementing the Circular Economy in the Construction Industry: A Critical Review* pp. 4).

(95) Grafico che illustra le motivazioni dietro alla scelta di utilizzo di demolizioni selettive (Fonte: Rabia Charef, Jean-Claude Morel, Kambiz Rakhshan, *Barriers to Implementing the Circular Economy in the Construction Industry: A Critical Review* pp. 6).

(96) Connessione tra DfD, Open building e economia circolare (Fonte: Patricia Rodrigues Balbio de Lima, Conrado de Souza Rodrigues, Jouke M. Post, *Integration of BIM and design for deconstruction to improve circular economy of buildings* pp. 3).

(97) Framework di sviluppo dell'artefatto BIM per il Design per la Decostruzione (DfD) (Fonte: Patricia Rodrigues Balbio de Lima, Conrado de Souza Rodrigues, Jouke M. Post, *Integration of BIM and design for deconstruction to improve circular economy of buildings* pp. 7).

[98] Gerarchia di classificazione ASTM UNIFORMAT II per gli elementi edilizi (Fonte: Patricia Rodrigues Balbio de Lima, Conrado de Souza Rodrigues, Jouke M. Post, Integration of BIM and design for deconstruction to improve circular economy of buildings pp. 8).

[99] Diagramma di relazione tra classi di sistema (Fonte: Patricia Rodrigues Balbio de Lima, Conrado de Souza Rodrigues, Jouke M. Post, Integration of BIM and design for deconstruction to improve circular economy of buildings pp. 9).

[100] Grafico che illustra le motivazioni dietro alla scelta di utilizzo di demolizioni selettive (Fonte: Patricia Rodrigues Balbio de Lima, Conrado de Souza Rodrigues, Jouke M. Post, Integration of BIM and design for deconstruction to improve circular economy of buildings pp. 10).

[101] Il parametro condiviso EOL all'interno del gruppo Green Building Properties (Fonte: Patricia Rodrigues Balbio de Lima, Conrado de Souza Rodrigues, Jouke M. Post, Integration of BIM and design for deconstruction to improve circular economy of buildings pp. 11).

[102] Risultati dei filtri DfD creati: EOL, Flessibilità, PLS e Interfaccia. (Fonte: Patricia Rodrigues Balbio de Lima, Conrado de Souza Rodrigues, Jouke M. Post, Integration of BIM and design for deconstruction to improve circular economy of buildings pp. 14).

[103] creazione di un QR code personalizzato per un elemento (Fonte: Patricia Rodrigues Balbio de Lima, Conrado de Souza Rodrigues, Jouke M. Post, Integration of BIM and design for deconstruction to improve circular economy of buildings pp. 15).

[104] Prospetto esterno del complesso di edifici realizzato con mattoni recuperati da vecchi edifici (Fonte: Resource rows - www.lendager.com/project/resource-rows/ - visto in data 10/05/2024).

[105] Corte interna con giardini e piccoli edifici in legno recuperato, in alto la passerella realizzata con una trave in cemento armato di recupero. (Fonte: Resource rows - www.lendager.com/project/resource-rows/ - visto in data 10/05/2024).

[106] Taglio di un segmento di muro da 1 m² (Fonte: Resource rows - www.lendager.com/project/resource-rows/ - visto in data 10/05/2024).

[107] Prospetto esterno con struttura realizzata dalle vecchie travi in cls. (Fonte: Karstadt Re-Parked - www.lendager.com/project/karstadt/ - visto in data 10/05/2024).

[108] Progetto degli ambienti interni. (Fonte: Karstadt Re-Parked - www.lendager.com/project/karstadt/ - visto in data 10/05/2024).

[109] Spaccado assonometrico del progetto. (Fonte: Karstadt Re-Parked - www.lendager.com/project/karstadt/ -

Parte 2:

“The Shell project”

04

**Nascita del progetto:
Atelier progetto e modellazione
A. A. 2021/22**

4.1 - Nascita del progetto

Il progetto che ho deciso di sviluppare applicando alcune delle metodologie descritte nei capitoli precedenti e soprattutto con un approccio basato su DfMA e computational design nasce durante il laboratorio di progetto e modellazione guidato dai professori Lo Turco e Barosio, durante l'anno accademico 2021 - 2022.

La richiesta del corso era di ipotizzare uno sviluppo per l'area urbana adibita a parcheggio, posta tra Via Paolo Borsellino e Via Nino Bixio (111), l'area ha una lunghezza di 140 m e una larghezza di 70 m per una superficie totale di 9800 m².

Il progetto doveva essere in grado di ospitare un centro polivalente/culturale di circa 16000 m², delle residenze per studenti per circa 6000 m² e un centro commerciale per circa 6000 m².

L'area di progetto fa parte della zona di piano 8.18 all'interno della zona urbana di trasformazione denominata Spina 2, che si estende da Corso Ferrucci, Corso Vittorio Emanuele secondo, Via Borsellino e Via Volchieri, che dispone di una variante del piano regolatore. In particolare, l'area di progetto è indicata come area predisposta a servizi, per questo motivo si debbono rispettare determinati vincoli normativi:

Sarà necessario prevedere particolare

attenzione alla qualità architettonica tendendo conto del complesso storico delle OGR e degli edifici tutelati che insistono nell'area.

Devono essere previsti percorsi pedonali e spazi pubblici, rispondendo ad elevati livelli di sostenibilità ambientale.

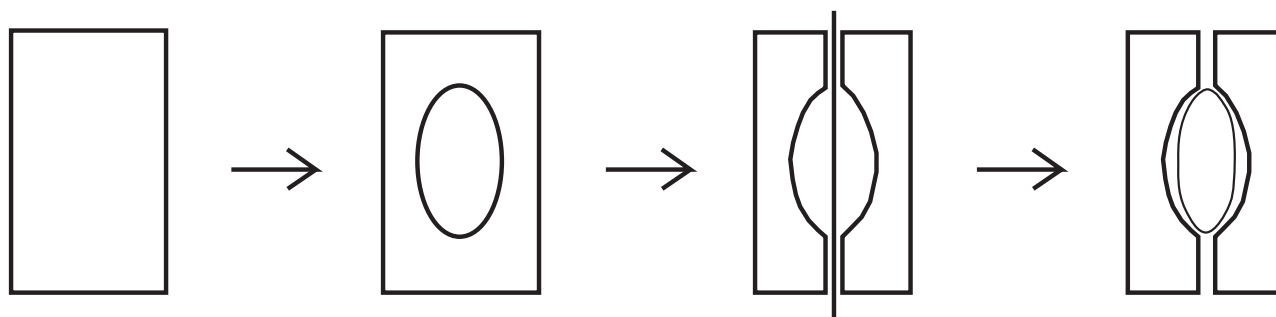
Rapportarsi con l'edificio dell'Energy Center, tenendo conto delle esigenze di soleggiamento dello stesso, a tale fine l'edificazione della porzione compresa tra l'Energy Center e Via Borsellino non dovrà superare l'altezza di m 25.

Prevedere il mantenimento di almeno il 50% di verde e salvaguardare i viali alberati esistenti.

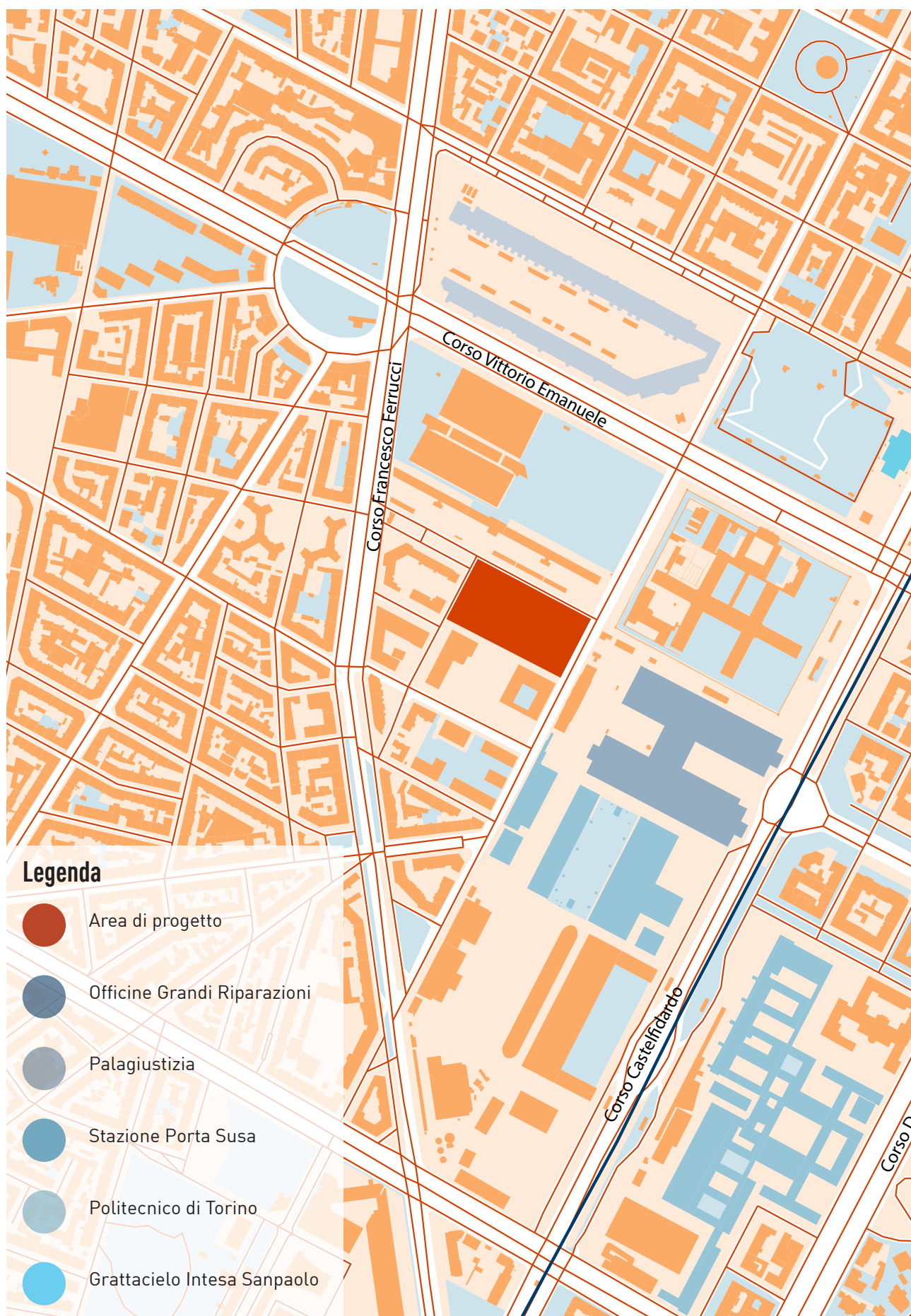
Un'ulteriore richiesta di questo "bando di progetto" era quella di avere a disposizione un auditorium dove svolgere conferenze e presentazioni e che facesse parte del centro polivalente.

Partendo da queste basi la mia idea è stata da subito quella di creare una struttura centrale per l'auditorium intorno alla quale si sviluppasse il resto del progetto (110). Inizialmente ho pensato a forme più regolari (112) che potessero essere facilmente integrate, quindi qualcosa di esagonale o ottagonale.

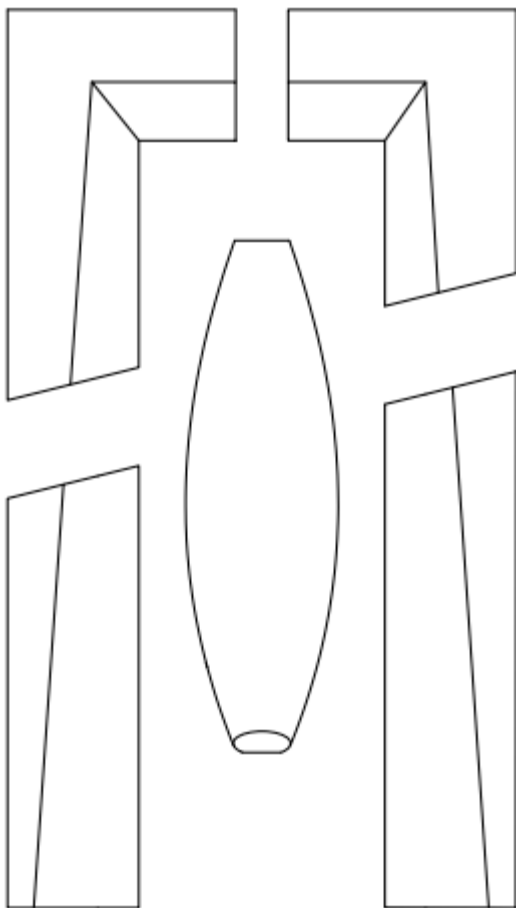
In seguito, ho cercato di sviluppare



(110) Concept d'insieme del massing iniziale del progetto (Fonte: Progetto Atelier progetto e modellazione A. A. 2021-2022).



[111] Inquadramento dell'area di progetto in scala 1:5000 (Fonte: Progetto Atelier progetto e modellazione A. A. 2021-2022).



(112) Prima idea di progetto con linee più nette e squadrate (Fonte: Progetto Atelier progetto e modellazione A. A. 2021-2022).

qualcosa di più complesso cercando di rendere la forma sinuosa e allungabile seguendo l'andamento graduale dell'auditorium (4.1.1).

Una volta scelta la forma dell'auditorium che ci sembrava più gradevole, ci siamo concentrati sul contorno, inizialmente con volumi rigidi e con tagli molto netti (110), successivamente con dei tagli in corrispondenza degli accessi agli edifici vicini come le residenze in Via Nino Bixio generando in questo modo dei collegamenti visivi con il contesto (112).

Successivamente con un offset di circa 10 m dalla base dell'auditorium ho cercato di

far seguire le forme dell'auditorium anche agli altri edifici del progetto.

Per i prospetti abbiamo scelto di massimizzare la superficie vetrata del lato interno del progetto per facilitare l'ingresso di luce, considerando l'altezza molto importante degli edifici e di conseguenza il cono d'ombra molto importante al quale specialmente i primi piani dell'edificio sono sottoposti.

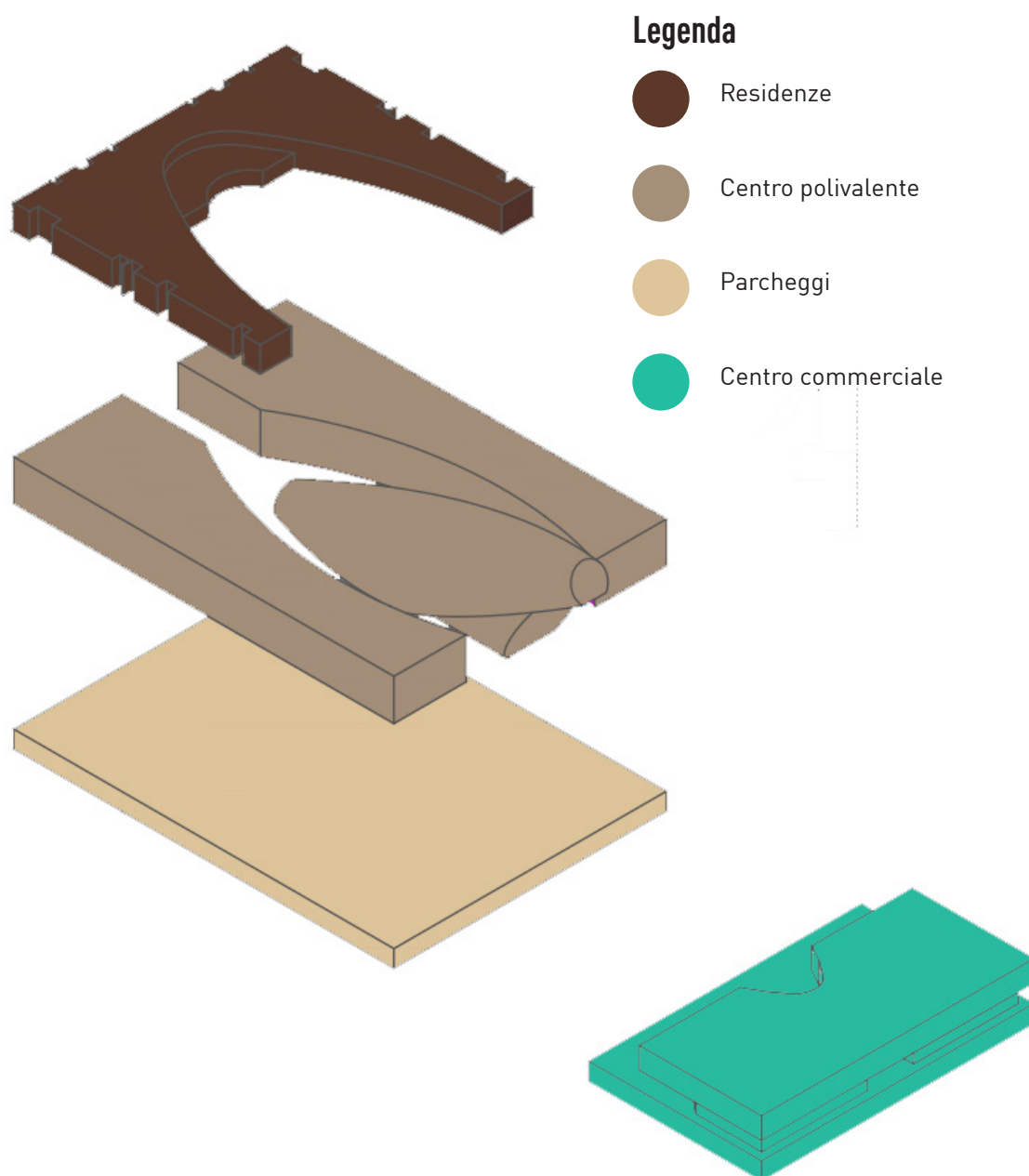
La configurazione finale del progetto prevedeva un parcheggio interrato a disposizione delle residenze e del centro polifunzionale, che consentiva anche un collegamento con le varie parti del progetto, in particolare anche con l'auditorium attraverso un vano scale e ascensore al centro di esso.

Gli ingressi pedonali principali sono stati posizionati sui lati corti dell'area di progetto, mentre lateralmente sono stati lasciati dei vuoti per mettere in comunicazione anche le aree vicine con i relativi edifici.

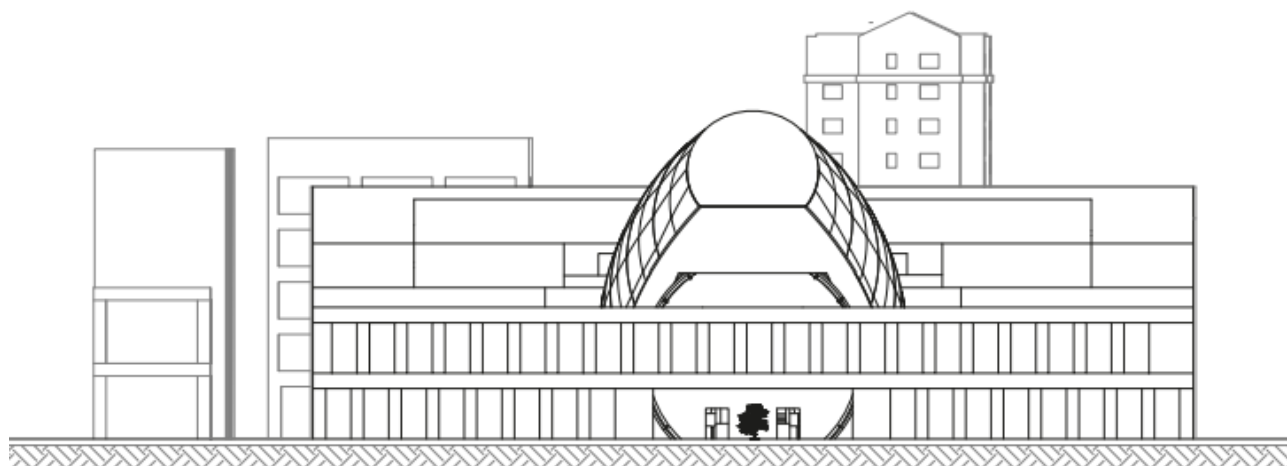
La parte del centro commerciale (113), confinante con le OGR è stata mantenuta molto bassa rispetto agli altri edifici per la mancanza di edifici alti confinanti con esso, viceversa gli edifici più alti sono stati posizionati dal lato opposto in corrispondenza delle residenze di Via Nino Bixio che avendo circa dieci piani risultano molto alte (114).

A livello di finiture sono state utilizzate dei pannelli in legno come frangisole in alcuni punti esterni rispetto alla corte, in cui il soleggiamento poteva rappresentare un problema.

Per quanto riguarda l'auditorium, sono state utilizzate delle lastre in Alucobond per i primi due terzi della struttura, mentre nella parte finale è stato creato un effetto di smaterializzazione sostituendo gradualmente le lastre in Alucobond con lastre di vetro.



[113] Esploso funzionale di progetto con indicati in diverse colorazioni gli edifici in base alla funzione (Fonte: Progetto Atelier progetto e modellazione A. A. 2021-2022).



[114] Prospetto del progetto rivolto verso Via Paolo Borsellino (Fonte: Progetto Atelier progetto e modellazione A. A. 2021-2022).

4.1.1 - Sviluppo della geometria dell'auditorium

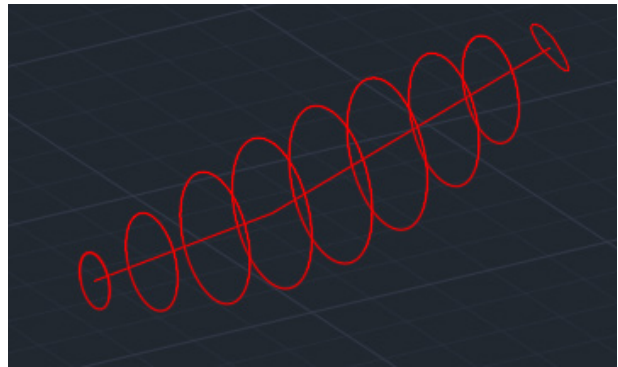
Il vero fulcro della tesi sarà la rielaborazione dell'auditorium per renderlo realizzabile con metodologia DfMA, per questo motivo è indispensabile spiegare il processo che ha portato alla generazione della geometria e alle prime idee di progetto.

Il modello originale è stato realizzato sul software Autocad 3D, il primo step è stato quello di realizzare una serie di cerchi equidistanti moltiplicando il diametro di 1,618 da un cerchio all'altro (115) (questo per mantenere un rapporto di dimensioni riconducibile al segmento aureo).

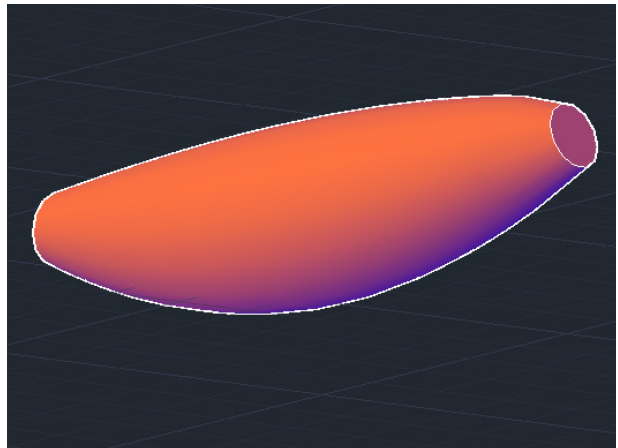
A circa metà della lunghezza totale dell'auditorium la linea centrale che collega gli assi dei cerchi, invece di continuare orizzontalmente è stata inclinata di 30° verso l'alto, inoltre sempre dopo metà della lunghezza i cerchi hanno iniziato a decrescere a livello di dimensione sempre seguendo il rapporto aureo, infine l'ultimo di questi cerchi è stato ruotato di 30° in modo da rendere più liscia la coda dell'edificio.

Il passaggio successivo ha comportato l'esecuzione di un loft (116) attraverso i cerchi creati, che ha portato alla creazione di una geometria molto morbida ma ancora molto semplice. Per questo motivo successivamente la base è stata tagliata orizzontalmente seguendo il centro del primo cerchio utilizzato per il loft. La parte alta invece è stata tagliata prendendo come riferimento i punti medi del lato lungo della geometria e un punto all'interno dell'ultimo cerchio che ha generato il loft ad un terzo del raggio totale (117).

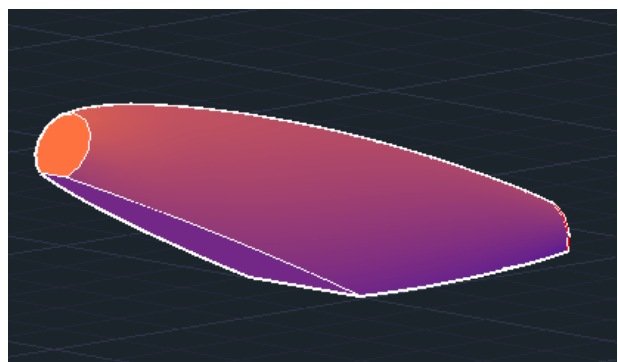
L'ultimo step è stato quello di aggiungere un cilindro di diametro leggermente inferiore rispetto alla larghezza della geometria principale, inserirlo nella geometria e anche in questo caso inserire un taglio a



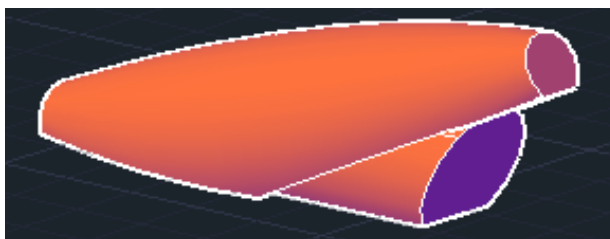
(115) Serie di cerchi da cui è stata realizzata la geometria dell'auditorium. (Fonte: Progetto Atelier progetto e modellazione A. A. 2021-2022)



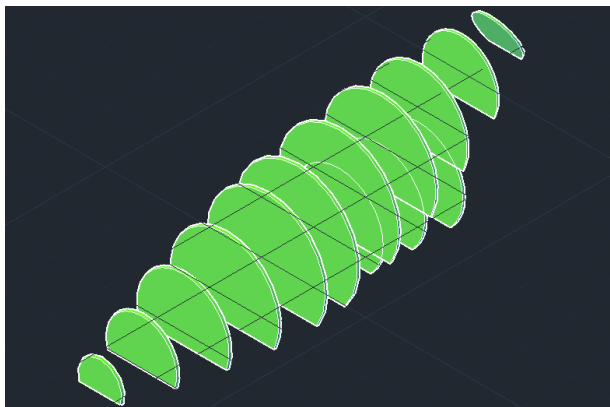
(116) Geometria ottenuta tramite il loft dei cerchi. (Fonte: Progetto Atelier progetto e modellazione A. A. 2021-2022)



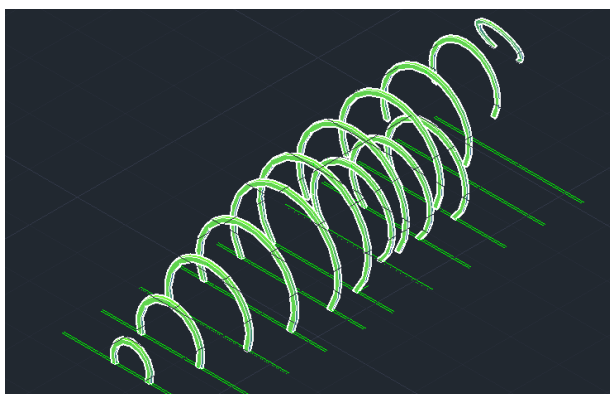
(117) Geometria ottenuta tramite il loft dei cerchi. (Fonte: Progetto Atelier progetto e modellazione A. A. 2021-2022)



(118) Geometria completa. (Fonte: Progetto Atelier progetto e modellazione A. A. 2021-2022)



(119) Sezioni geometria finale. (Fonte: Progetto Atelier progetto e modellazione A. A. 2021-2022)



(120) Sezioni svuotate al centro. (Fonte: Progetto Atelier progetto e modellazione A. A. 2021-2022)



(121) Disposizione segmenti travi (Fonte: Progetto Atelier progetto e modellazione A. A. 2021-2022)

30° opposto rispetto all'inclinazione dell'ultimo cerchio posto alla fine della geometria (118).

Una volta ottenuta la geometria di base è stato necessario realizzare una struttura portante e una suddivisione interna degli ambienti, per questo è stata utilizzata la stessa geometria per generare gli archi strutturali, per farlo la geometria è stata tranciata in sezioni di 30 cm l'una (119), ognuna di queste fette è stata poi svuotata lasciando solo un bordo di 40 cm, ovvero la larghezza degli archi in acciaio.

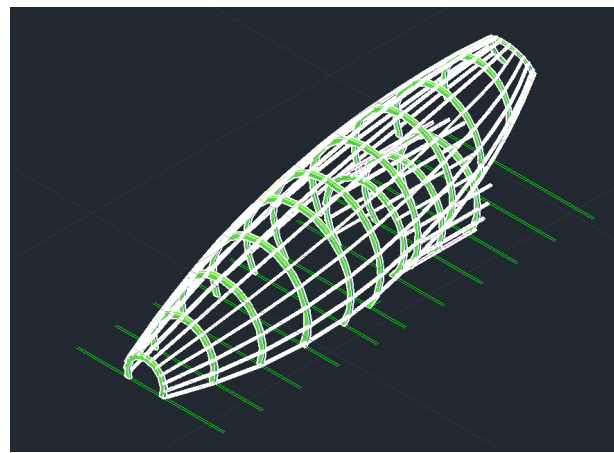
Una volta ottenuta la struttura principale composta dagli archi in acciaio realizzati tramite taglio laser e da più strati sovrapposti tra loro, è stato pensato un modo per connetterli tra loro, ovvero delle travi IPE che attraversano delle sagome appositamente ritagliate negli archi (120).

Per realizzarle sono stati creati dei profili delle travi e sono stati posizionati in corrispondenza dei vertici scelti attraverso l'utilizzo di un poligono formato da 20 lati, questo ha consentito di mantenere la stessa posizione della sezione in tutte le varianti della geometria (121).

A questo punto è stato eseguito il loft di tutte le travi, ottenendo il sistema di travi principale (122).

Lo stesso processo è stato eseguito anche nella parte rotonda alla base che fungerà da ingresso all'auditorium.

Vista la necessità di utilizzare dei pannelli di Alucobond come finitura, è stato deciso



(122) Travi principali realizzate (Fonte: Progetto Atelier progetto e modellazione A. A. 2021-2022)

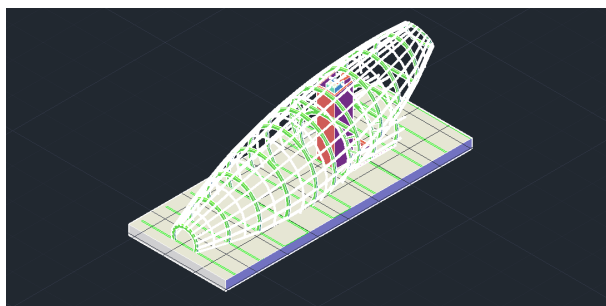
è stato deciso di inserire un ordine di travi secondarie che appoggiassero sulle prime ma che fossero rotonde, seguendo quindi la forma della geometria dell'auditorium, mentre per le principali sono state utilizzate delle IPE 300, per le secondarie sono state utilizzate delle IPE 220 (123).

A questo punto la struttura esterna risulta completa e abbiamo iniziato a lavorare sulla disposizione interna, partendo dal piano terra, la prima cosa da decidere era dove posizionare il vano scale, optando poi per un punto centrale in modo da avere un ascensore al centro con le scale intorno e gli accessi laterali alla sala teatrale.

Davanti al vano scale abbiamo posizionato un desk in cui sarebbe stato possibile acquistare eventuali biglietti o chiedere informazioni e i servizi igienici (124).

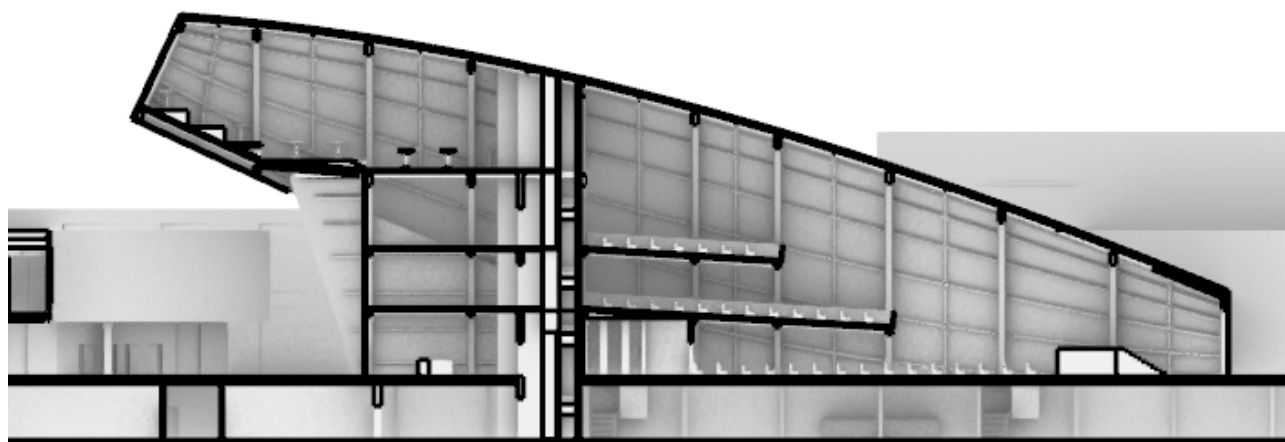
La suddivisione in due ambienti continua anche ai piani superiori, una prima parte dedicata alle balconate e una seconda in cui sono inseriti servizi igienici, uffici per la direzione e all'ultimo piano un bar, unica parte parzialmente vetrata dell'edificio.

Per sostenere i piani superiori sono stati modificati gli archi strutturali inserendo una trave inclusa nel loro disegno in

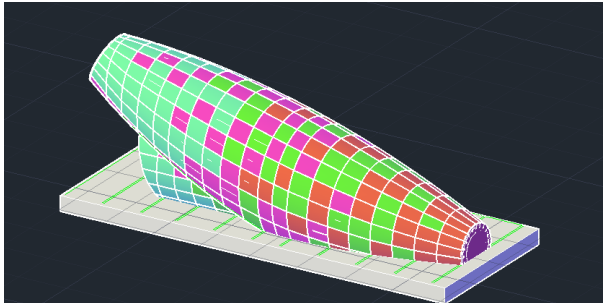


(123) Struttura portante completa (Fonte: Progetto Atelier progetto e modellazione A. A. 2021-2022)

corrispondenza del passaggio del solaio. L'ultima parte realizzata è stata la pelle esterna, per realizzarla è stata ripresa la geometria di base, sovrapposta alla struttura ed esplosa. A questo punto è stata scalata leggermente la superficie esterna per renderla più grande e in grado di coprire la struttura e in seguito è stata estrusa, ottenendo così un solido che copriva interamente la struttura portante. A questo punto il solido è stato tagliato in corrispondenza dei punti medi delle travi sia principali che secondarie, ottenendo così la suddivisione in pannelli, poi suddivisi in layer diversi in base al colore o al materiale di finitura (125).

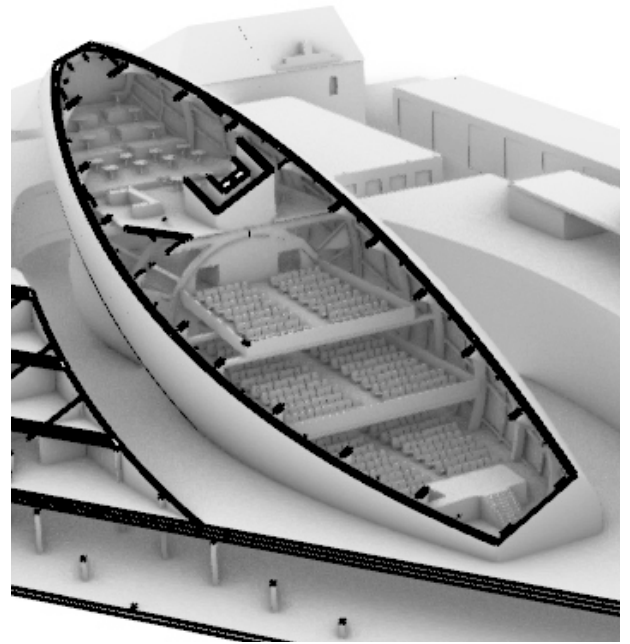


(124) Sezione dell'auditorium completa dove si può vedere la suddivisione interna. (Fonte: Progetto Atelier progetto e modellazione A. A. 2021-2022)

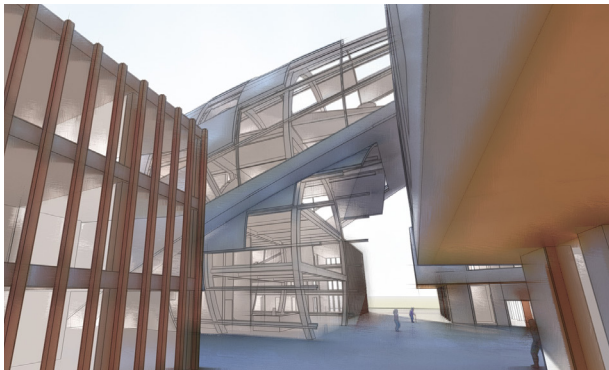


(125) Pelle esterna modellata (Fonte: Progetto Atelier progetto e modellazione A. A. 2021-2022)

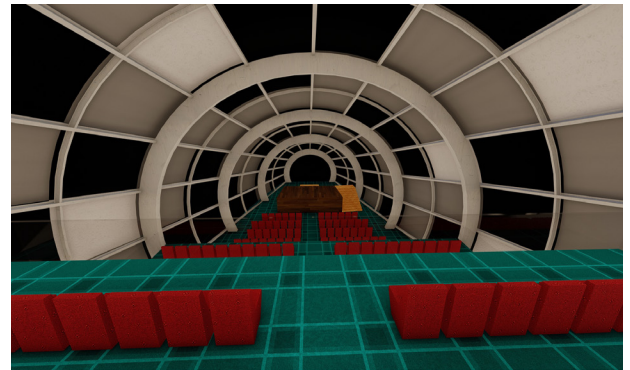
Il risultato finale non mi ha soddisfatto appieno (126, 127, 128, 129), probabilmente la finitura e il sistema strutturale potevano essere pensati in maniera più complessa, ed è proprio quello che ho provato a fare in questa tesi di laurea, rielaborare il progetto attraverso una metodologia DfMA rendendolo anche più sostenibile e accattivante dal punto di vista del design.



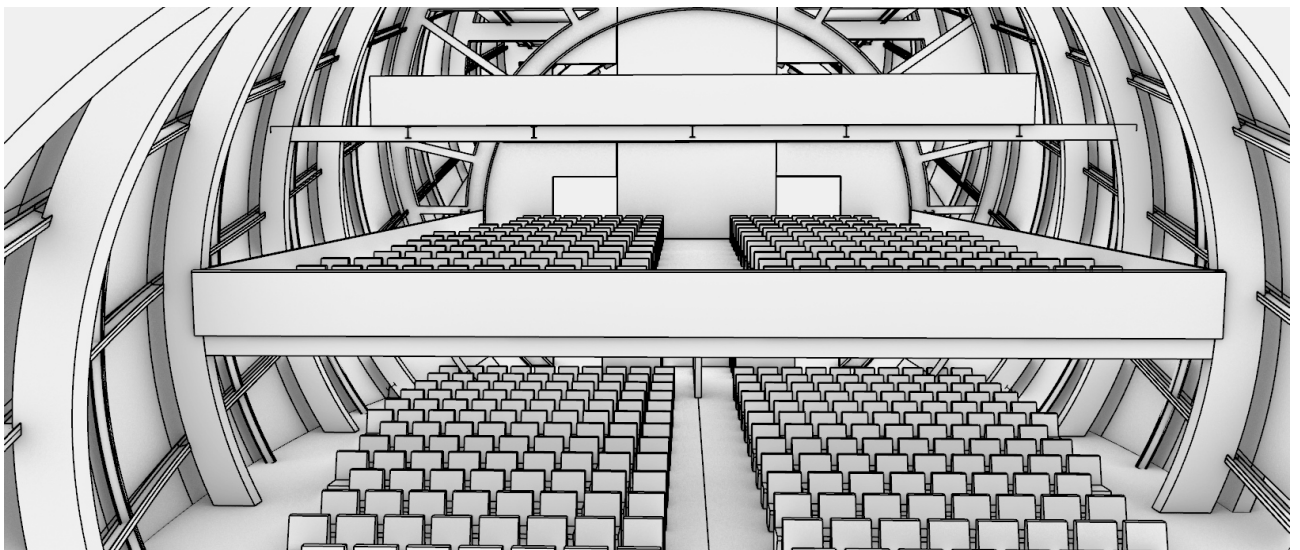
(126) Sezione diagonale auditorium (Fonte: Progetto Atelier progetto e modellazione A. A. 2021-2022)



(127) Render esterno (Fonte: Progetto Atelier progetto e modellazione A. A. 2021-2022)



(128) Render interno (Fonte: Progetto Atelier progetto e modellazione A. A. 2021-2022)



(129) Vista interna modello auditorium in cui si può leggere la struttura portante (Fonte: Progetto Atelier progetto e modellazione A. A. 2021-2022)

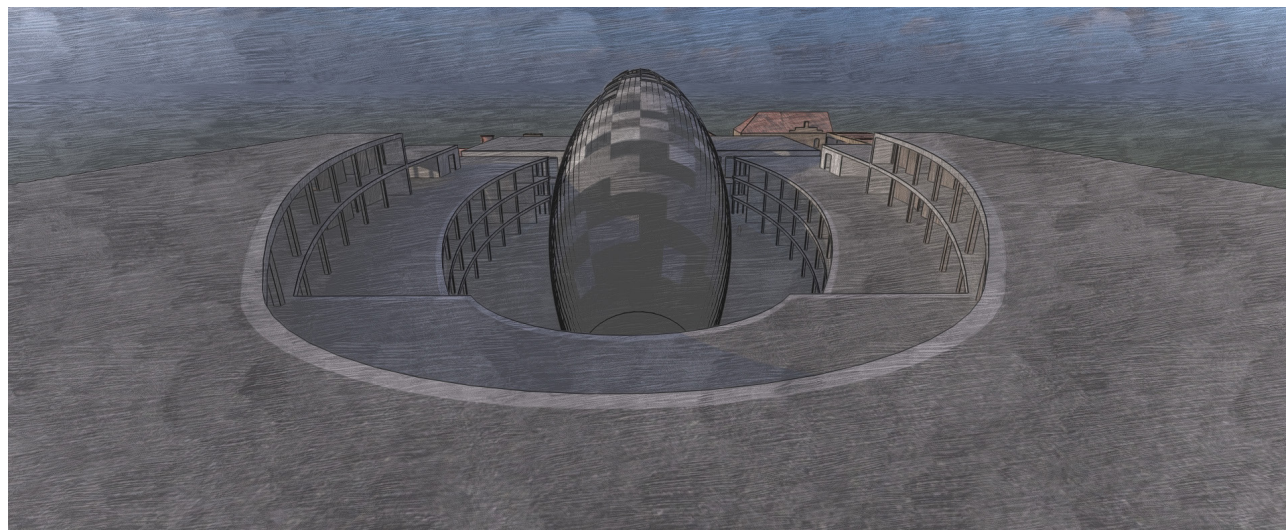
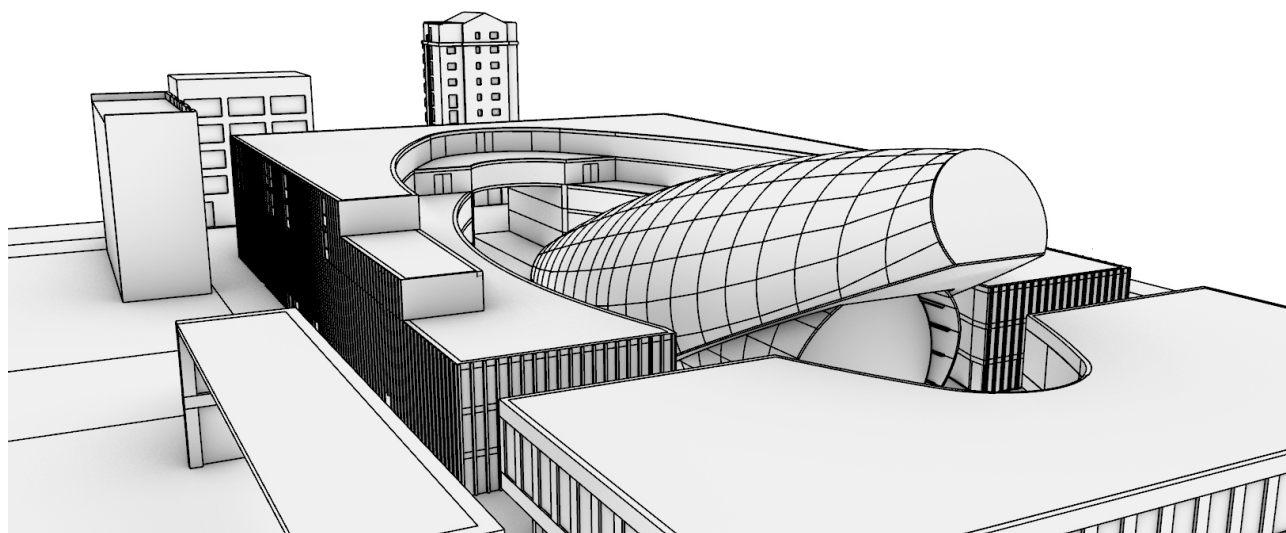
4.2 - Risultato finale

Il risultato finale ha visto la realizzazione di tre blocchi di edifici, il primo che si affaccia su via Nino Bixio è composto da 3 piani dedicati agli ambienti per il centro polifunzionale e 2 piani dedicati alle residenze per gli studenti universitari ai piani superiori.

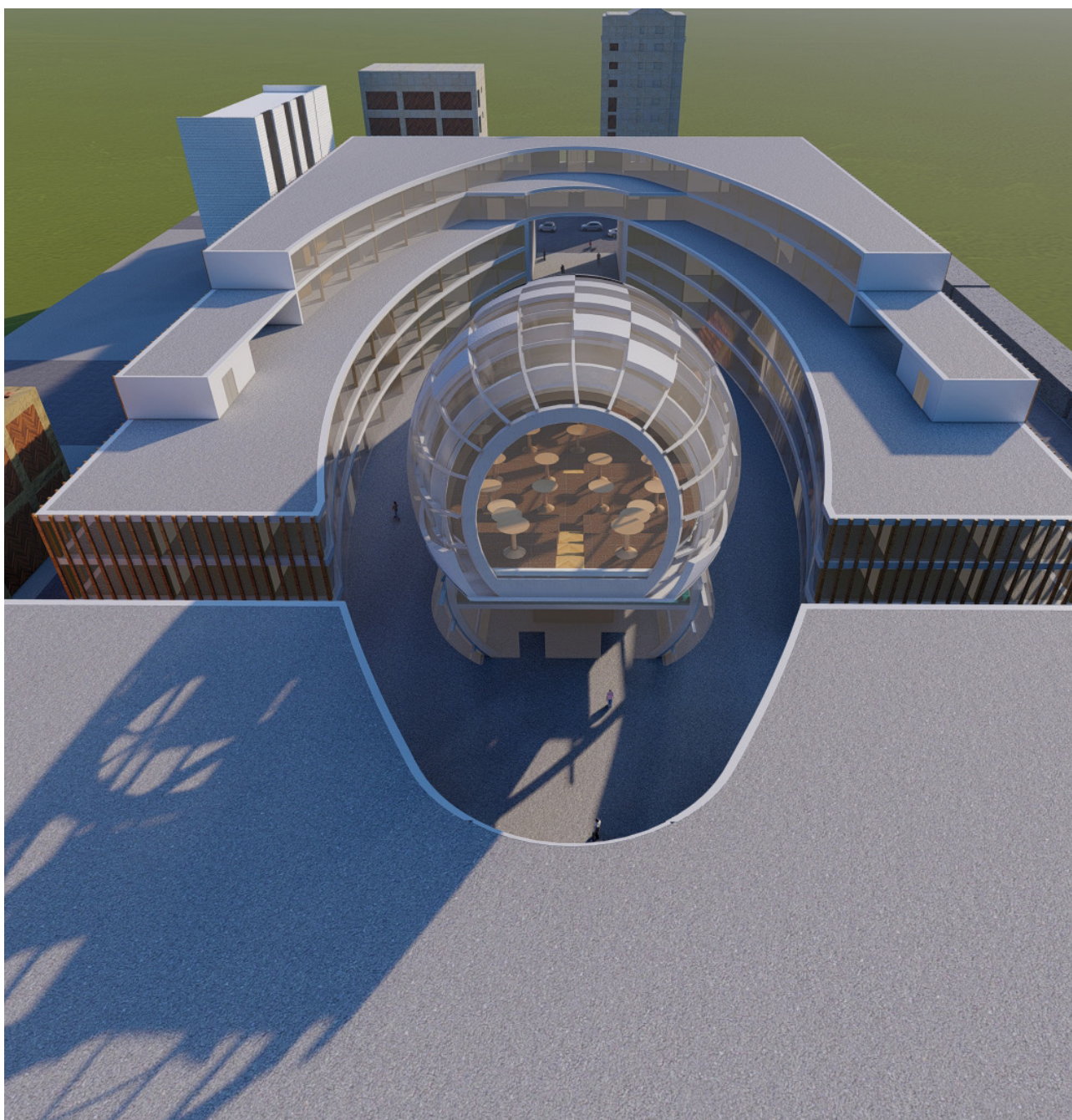
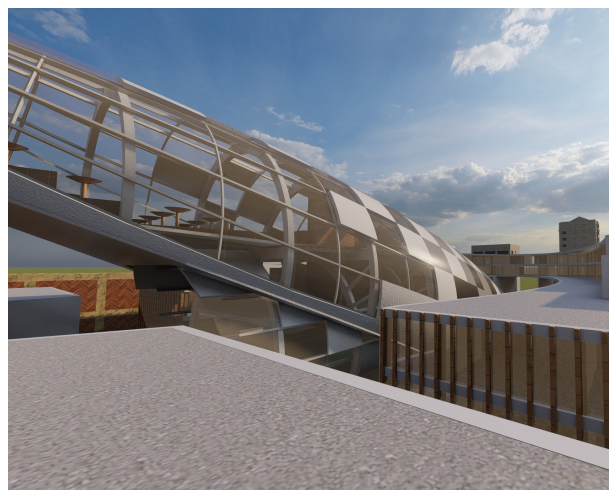
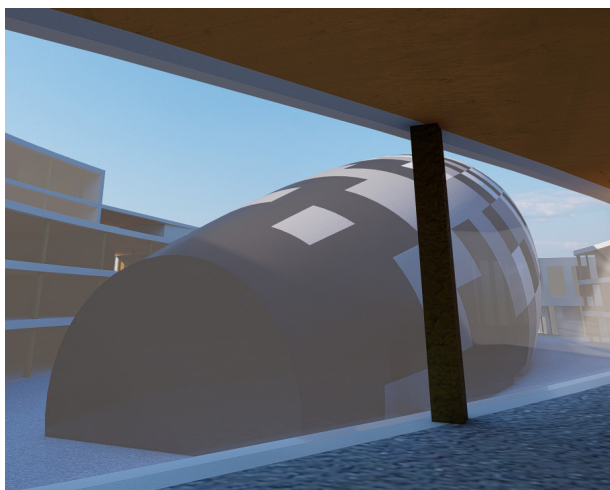
Questo blocco di edifici avrà anche a disposizione un piano di parcheggi interrati che consentirà anche l'accesso al secondo

blocco, ovvero l'auditorium.

L'ultimo blocco è quello composto dal centro commerciale, anch'esso dotato di parcheggio interrato che confina con via Paolo Borsellino e ha un'altezza di tre piani. Internamente gli edifici sono stati pensati per favorire le attività comuni e la socialità con un'attenzione particolare alle aree comuni.



(130-131) Vista estratta dal 3D del modello e render artistico ricavato da Lumion (Fonte: Progetto Atelier progetto e modellazione A. A. 2021-2022)



(132-133-134) Viste renderizzate sul software Lumion (Fonte: Progetto Atelier progetto e modellazione A. A. 2021-2022)

Fonti

Elenco immagini con fonti complete

(110) Concept d'insieme del massing iniziale del progetto (Fonte: Progetto Atelier progetto e modellazione A. A. 2021-2022).

(111) Inquadramento dell'area di progetto in scala 1:5000 (Fonte: Progetto Atelier progetto e modellazione A. A. 2021-2022).

(112) Prima idea di progetto con linee più nette e squadrate (Fonte: Progetto Atelier progetto e modellazione A. A. 2021-2022).

(113) Esploso funzionale di progetto con indicati in diverse colorazioni gli edifici in base alla funzione (Fonte: Progetto Atelier progetto e modellazione A. A. 2021-2022).

(114) Prospetto del progetto rivolto verso Via Paolo Borsellino (Fonte: Progetto Atelier progetto e modellazione A. A. 2021-2022).

(115) Serie di cerchi da cui è stata realizzata la geometria dell'auditorium. (Fonte: Progetto Atelier progetto e modellazione A. A. 2021-2022)

(116) Geometria ottenuta tramite il loft dei cerchi. (Fonte: Progetto Atelier progetto e modellazione A. A. 2021-2022)

(117) Geometria ottenuta tramite il loft dei cerchi. (Fonte: Progetto Atelier progetto e modellazione A. A. 2021-2022)

(118) Geometria completa. (Fonte: Progetto Atelier progetto e modellazione A. A. 2021-2022)

(119) Sezioni geometria finale. (Fonte: Progetto Atelier progetto e modellazione A. A. 2021-2022)

(120) Sezioni svuotate al centro. (Fonte: Progetto Atelier progetto e modellazione A. A. 2021-2022)

(121) Disposizione segmenti travi (Fonte: Progetto Atelier progetto e modellazione A. A. 2021-2022)

(122) Travi principali realizzate (Fonte: Progetto Atelier progetto e modellazione A. A. 2021-2022)

(123) Struttura portante completa (Fonte: Progetto Atelier progetto e modellazione A. A. 2021-2022)

(124) Sezione dell'auditorium completa dove si può vedere la suddivisione interna. (Fonte: Progetto Atelier progetto e modellazione A. A. 2021-2022)

(125) Pelle esterna modellata (Fonte: Progetto Atelier progetto e modellazione A. A. 2021-2022)

(126) Sezione diagonale auditorium (Fonte: Progetto Atelier progetto e modellazione A. A. 2021-2022)

(127) Render esterno (Fonte: Progetto Atelier progetto e modellazione A. A. 2021-2022)

(128) Render interno (Fonte: Progetto Atelier progetto e modellazione A. A. 2021-2022)

(129) Vista interna modello auditorium in cui si può leggere la struttura portante (Fonte: Progetto Atelier progetto e modellazione A. A. 2021-2022)

(130-131) Vista estratta dal 3D del modello
e render artistico ricavato da Lumion
(Fonte: Progetto Atelier progetto e
modellazione A. A. 2021-2022)

(132-133-134) Viste renderizzate sul
software Lumion (Fonte: Progetto Atelier
progetto e modellazione A. A. 2021-2022)

05

Evoluzione del progetto tramite l'approccio DfMA: "The Shell"

5.1 - Ripensare sostenibile e circolare

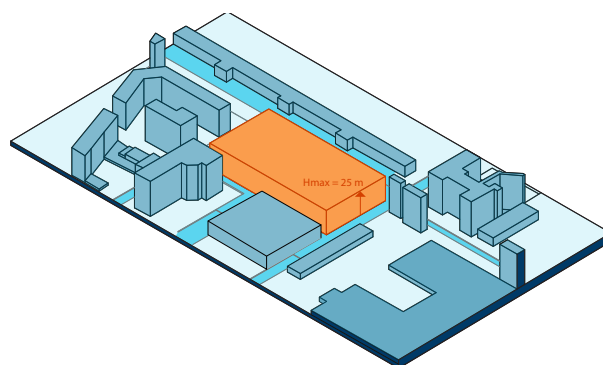
Il progetto presentato nelle pagine precedenti, sebbene rispettasse tutte le esigenze richieste dal corso di progettazione, presentava diverse lacune dal punto di vista progettuale e soprattutto non era pensato in ottica pienamente sostenibile.

Per questo motivo quando ho deciso di rimettere mano al progetto mantenendo come unico punto di riferimento l'oggetto vero e proprio della tesi, ovvero l'auditorium. Come punto di partenza per avviare il progetto ho ripreso il piano regolatore¹⁰⁹ e sono ripartito in particolare tenendo in considerazione tre aspetti fondamentali:

- L'altezza massima dei fabbricati non doveva superare i 25 m. (135)
- Il rapporto con le OGR (136) doveva essere chiaro e marcato
- Vi era la necessità di cercare il dialogo con l'energy center (137).

Oltre a questi accorgimenti ho cercato in generale di rendere il progetto più integrato nel quartiere rispetto al precedente, rendendolo più permeabile e distribuendo meglio le funzioni.

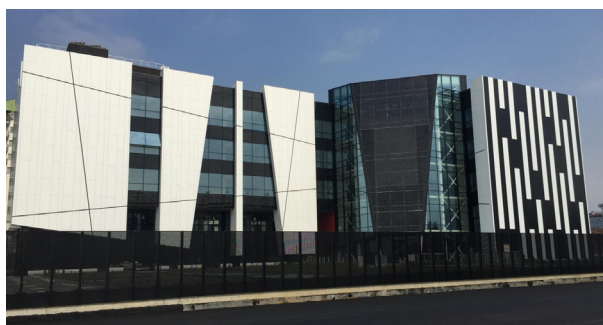
Infine, non essendo richieste dal PRG ma essendo semplicemente delle richieste formulate a scopo didattico le quantità richieste per il progetto di Atelier, in termini di m2 calpestabili non sono stati presi in considerazione, al contrario i parcheggi coperti necessari all'area (pari al 20% del costruito) sono stati pienamente rispettati. Un altro aspetto a cui è stata data molta importanza è la presenza di verde e di acqua all'interno del progetto, questo per mitigare l'impatto del progetto rispetto all'ambiente e per raffrescare l'aria d'estate rendendo così più vivibile l'ambiente.



(135) Concept sviluppo altezza massima superficie di progetto

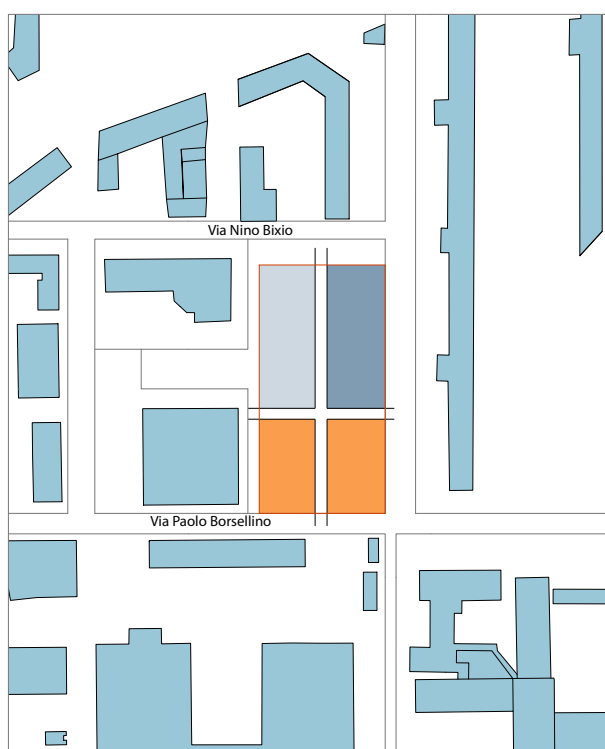


(136) Officine grandi riparazioni (OGR) (Fonte: Turismotorino.org)



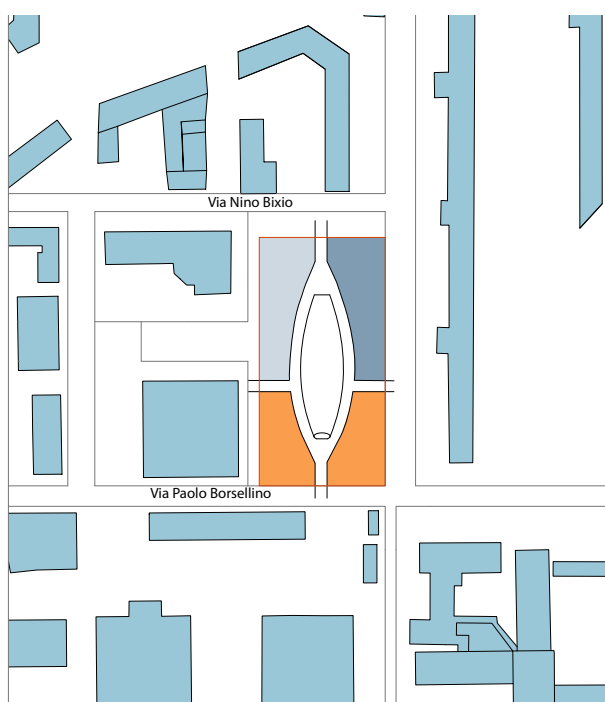
(137) Energy center (Fonte: Corradinoarchitetto.com)

5.1.1 - Permeabilità



- Edifici commerciali
- Edificio residenziale
- Edificio per uffici

(138) Concept suddivisione area di progetto



(139) Concept suddivisione area di progetto con auditorium

Per rendere il progetto facilmente accessibile ho cercato di far corrispondere i percorsi di accesso al progetto con le uscite dai vari edifici confinanti.

Questo consentirà di creare una continuità di percorsi favorendo anche la frequentazione degli spazi commerciali presenti all'interno dell'area di progetto.

Il metodo più semplice per suddividere gli edifici in modo di avere un'apertura per ogni lato era quello di dividere l'area in 4 porzioni (138).

Volendo posizionare le attività commerciali al di sotto degli edifici residenziali e dedicati ad uffici, inoltre verrà posizionato un centro commerciale, ristoranti e negozi sul fronte rivolto verso via Paolo Borsellino.

Questo fronte è più adatto per ospitare attività commerciali essendo affacciato su una via molto trafficata com'è appunto via Borsellino, la quale connette l'area di progetto direttamente con le aule R del Politecnico di Torino, rendendo così gli studenti del Politecnico dei potenziali clienti per le attività commerciali, in particolare i ristoranti.

Prima di poter lavorare in modo preciso sulla forma dei singoli volumi è stato necessario posizionare l'auditorium al centro dell'area di progetto lasciando anche un offset di circa 12 m intorno ad esso per fare in modo che lo spazio non risulti troppo stretto (139).

Una volta definiti gli spazi e le relative funzioni lavorando sulle vie di accesso e cercando di rendere i percorsi il più fluenti possibili ho definito maggiormente la forma di base degli edifici.

In questa fase spostando e modificando le linee che delimitano le pareti degli edifici ho cercato di creare delle corrispondenze tra le uscite degli edifici di contorno e gli ingressi all'area di progetto (140).

Tutti gli edifici che compongono il progetto verranno collegati tra loro anche tramite il parcheggio sotterraneo a disposizione dei dipendenti dell'ufficio e degli abitanti delle residenze.

Cercando di trovare le soluzioni migliori per sistemare al meglio il progetto rapportandolo con il contesto sono stati tenuti in considerazione i seguenti fattori, raffigurati nel concept (140):

- Di fronte alle residenze di via Nino Bixio era necessario avere un ampio spazio verde, indispensabile per consentire agli abitanti dei condomini di avere degli spazi verdi in cui portare i figli a giocare e dove fare delle brevi passeggiate.

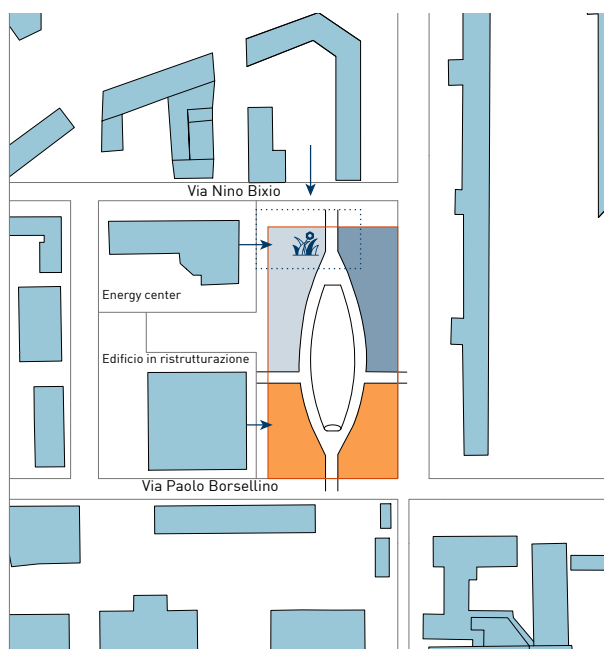
- L'energy center avrebbe un vantaggio potendosi affacciare su un'area verde che migliorerebbe la vista per coloro che si trovano all'interno, inoltre costruire di fronte ad esso sarebbe svantaggioso per entrambi gli edifici, creandosi una strettoia buia e poco gradevole.

- L'altro edificio, attualmente in fase di ristrutturazione affacciato su Via Paolo Borsellino, necessiterà allo stesso modo di spazio aperto di fronte a se, per questo motivo gli edifici riservati al centro commerciale sono stati mantenuti più bassi.

- Per quanto riguarda il lato opposto del progetto non essendoci edifici confinanti è stato possibile ipotizzare un edificio residenziale leggermente più alto di ben 5 piani.

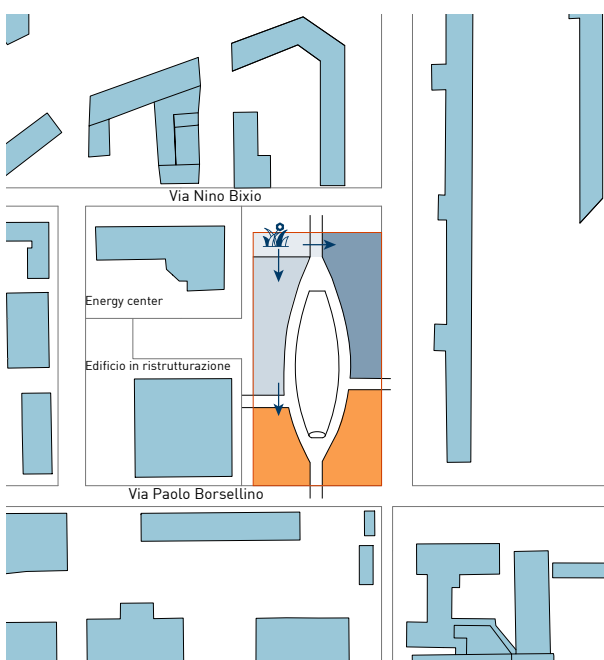
- Infine, un aspetto a cui è stata data molta importanza è stato quello di creare degli ampi spazi d'ingresso in modo da invitare all'ingresso o quanto meno al passaggio nell'area di progetto.

A seguito di queste considerazioni sono state eseguite delle modifiche sostanziali in relazione alle sagome dei vari edifici. Per consentire l'inserimento di un'area verde di fronte alle residenze di Via Nino Bixio e a fianco dell'energy center ho deciso di arretrare il fronte dell'edificio per uffici (141).

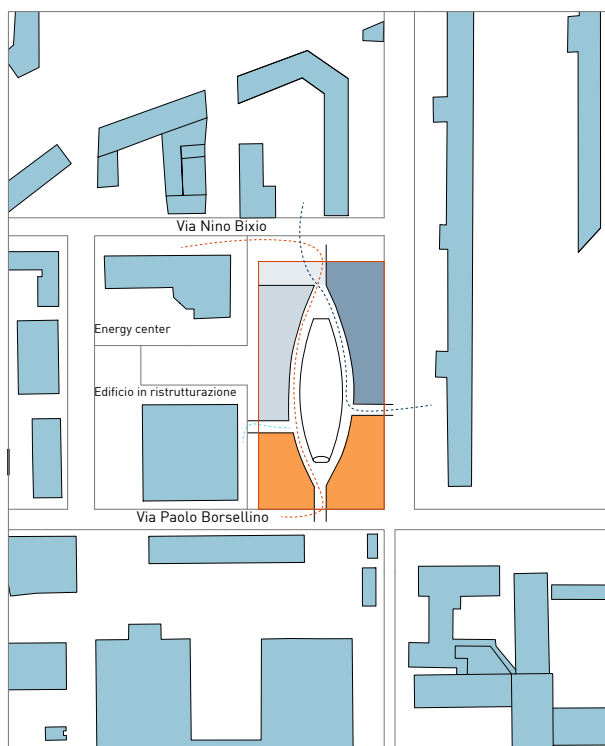


- Edifici commerciali
- Edificio residenziale
- Edificio per uffici

(140) Concept rapporto con edifici vicini



(141) Concept modifica edificio per uffici in favore dell'inserimento di un'area verde.



(142) Concept percorsi area di progetto

Per compensare questo arretramento del fronte mantenendo più o meno le stesse dimensioni ho scelto di arretrare anche il fronte retrostante accorciando quindi di conseguenza anche l'edificio commerciale sul medesimo lato, in questo modo l'accesso al nostro progetto dal palazzo in fase in ristrutturazione risulta più centrale e presumibilmente più comodo, consentendo inoltre di posizionare l'ingresso ai parcheggi sotterranei sotto l'edificio in corrispondenza della strada che divide energy center e appunto edificio in ristrutturazione.

Questo sfalsamento mi ha consentito anche di creare un'alternanza di movimento molto gradevole che consentirà anche l'accesso da entrambe le direzioni e dei percorsi scorrevoli all'interno dell'area di progetto (142).

5.1.2 - Forme di progetto

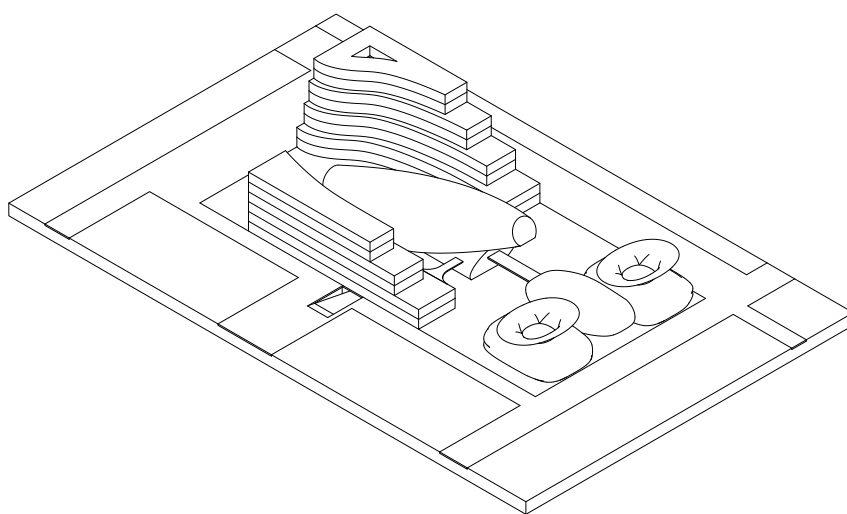
Una volta accertata l'efficacia dei percorsi era necessario capire come sviluppare gli edifici a livello di forma e funzioni.

Per fare questo ho realizzato qualche prova con delle geometrie semplici e realizzando dei modelli in scala 1:750 per

analizzarne al meglio le forme e capire il rapporto degli edifici tra loro.

Nei prossimi sotto-paragrafi verranno illustrate brevemente le iterazioni di studio sviluppate fino ad arrivare a quella definitiva.

5.1.2.1 - Prima reiterazione di progetto



(143) Prima reiterazione di progetto

Come è possibile vedere già da questa prima opzione di progetto (143) rispetto a quello che ci si poteva aspettare dall'impronta a terra precedentemente elaborata è stata parzialmente rivista.

La differenza più grande riguarda sicuramente la parte commerciale del progetto, la quale è stata ripensata con forme più morbide e sinuose

rispetto alla rigidità degli edifici residenziale e per uffici (144).

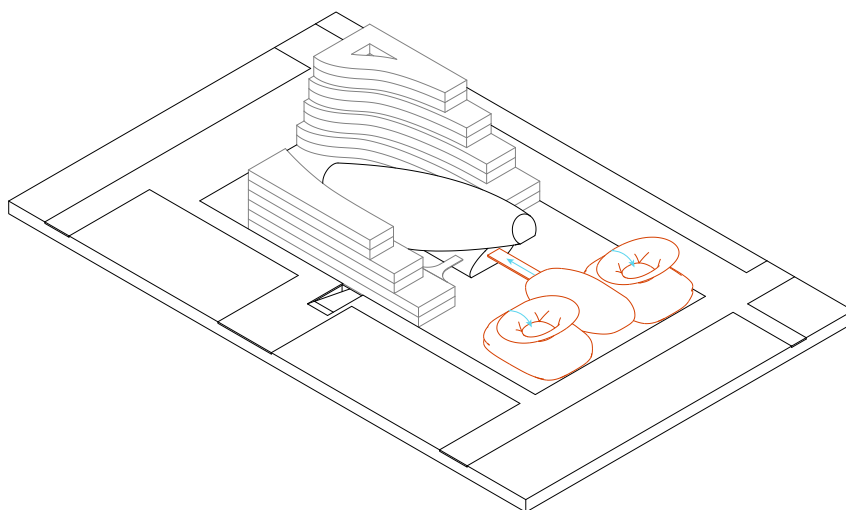
Le grandi coperture che sovrastano i 2 fabbricati entrambi di due piani fuori terra, erano pensate per raccogliere l'acqua piovana in cisterne interrato e riutilizzarla poi per l'irrigazione del prato.

Inoltre, ho pensato anche all'aggiunta di un corpo centrale sospeso che fungesse da collegamento tra i 2 corpi e grazie ad una passerella sospesa collegasse anche l'auditorium.

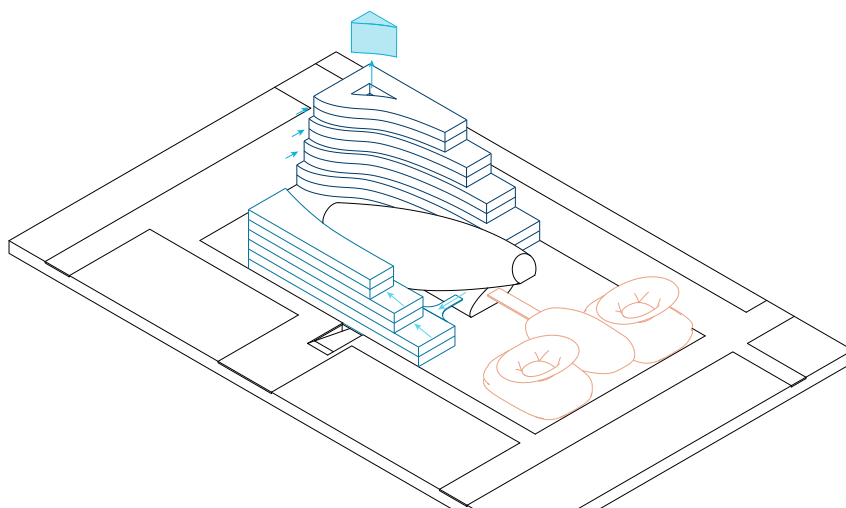
Per quanto riguarda gli edifici residenziali e per uffici abbiamo mantenuto delle forme molto simili alle forme iniziali delle impronte a terra (145).

In entrambi i casi si è mantenuto un concept molto simile con delle gradonate interne ogni 2 piani che consentono di avere dei piccoli terrazzi per residenti e lavoratori. Nel caso dell'edificio residenziale è stata pensata un'apertura interna che consenta di rimanere al di sotto dei 12 m di larghezza dell'edificio.

Questo edificio è pensato di ben otto piani, cosa che successivamente verrà ridotta per evitare ombre



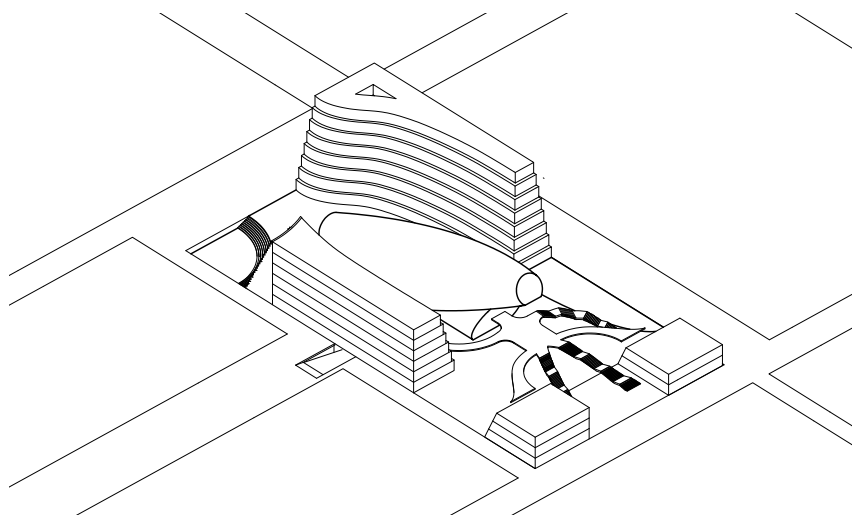
(144) Prima reiterazione di progetto - evidenziati in rosso gli edifici commerciali



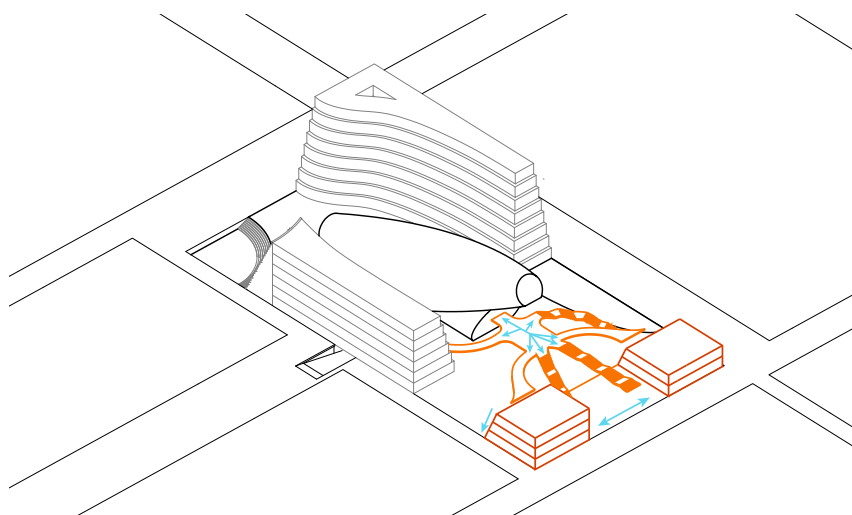
(145) Prima reiterazione di progetto - focus edificio residenziale e per uffici

molto estese che creassero problemi anche agli ambienti interni dell'area di progetto, inoltre avendo previsto dei piani da circa 3,5 m l'uno si rischiava di sfiorare il limite massimo di altezza previsto dal prg. L'edificio per uffici invece risulta un pò più basso, con 6 piani e anche in questo caso una passerella che collega l'auditorium direttamente con la prima terrazza dell'edificio. Questa prima versione del progetto presenta sicuramente varie problematiche, come quella dell'altezza che sono state affrontate e risolte nelle versioni successive. Di questa versione del progetto non è stato realizzato un modello di studio essendo di fatto una prima bozza e di cui pochissimi elementi sono stati mantenuti.

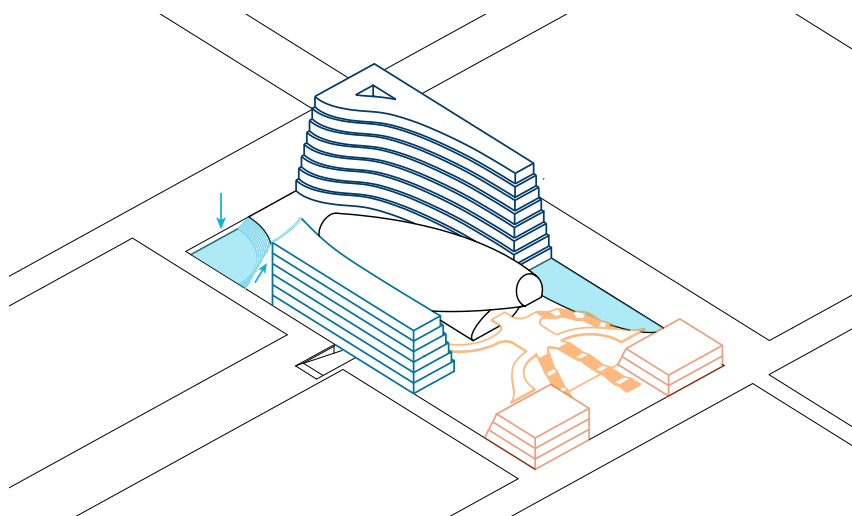
5.1.2.2 - Seconda reiterazione di progetto



(146) Seconda reiterazione di progetto



(147) Seconda reiterazione di progetto - focus edificio commerciale



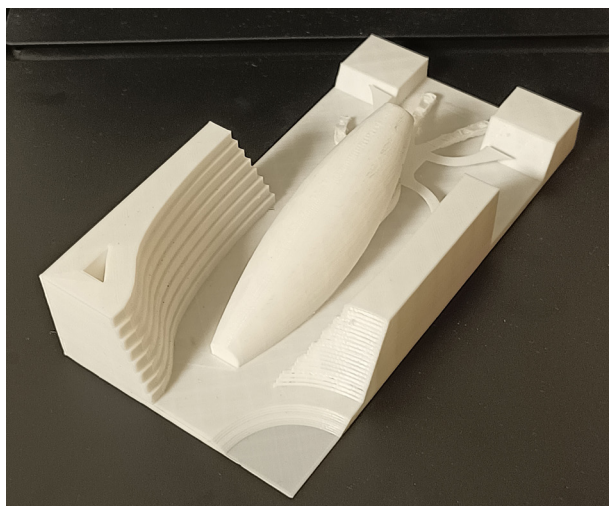
(148) Seconda reiterazione di progetto - focus edificio commerciale

In questa seconda iterazione di progetto (146) è stata modificata nuovamente la forma di base degli edifici commerciali creando dei cubi con la faccia interna degli edifici inclinata, questa modifica è stata pensata per poter consentire il recupero dell'acqua piovana alla base (147). Oltre a questo, lo spazio molto più ampio all'ingresso, reso possibile dall'aumento di un piano di uno dei due edifici, ha consentito l'inserimento di una passerella che collega l'auditorium con i due edifici commerciali e con l'edificio per uffici. Per quanto riguarda l'edificio per uffici e il residenziale ho deciso di inserire le gradinate ad ogni piano, in questo modo l'obiettivo era quello di dedicare un balcone ad ogni appartamento.

In aggiunta a questo nell'edificio per uffici abbiamo inserito una parete verde a gradoni che consentirebbe di ampliare la superficie verde dell'area (148).

Inoltre, questa gradinatura si potrebbe estendere anche verso il basso facendola culminare con il giardino leggermente interrato rispetto alla strada, in modo da evitare almeno in parte il rumore causato dal traffico.

Un'altra area verde è stata inserita tra l'edificio residenziale e quello commerciale in modo da creare anche in quella parte del progetto uno spazio verde dove socializzare. Dal modello stampato in 3D [149] è stato possibile notare come la passerella creasse un ingombro non indifferente proprio di fronte all'auditorium.



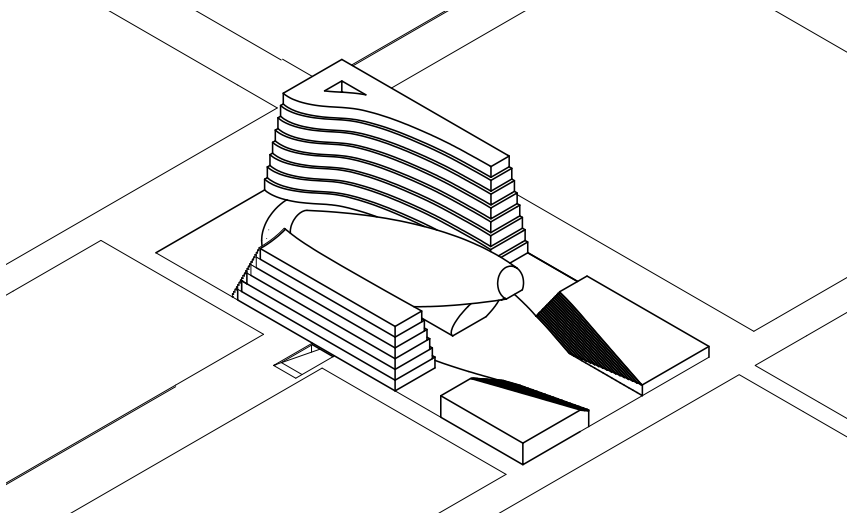
[149] Seconda reiterazione di progetto - focus edificio commerciale

5.1.2.3 - Terza reiterazione di progetto

In questa terza versione del progetto [150] sono intervenuto nuovamente sui corpi commerciali, abbiamo deciso di riportarli a delle forme simili a quelle dell'impronta a terra originale, mantenendo l'edificio alla sinistra dell'auditorium su due piani e riducendo quello a destra ad un piano.

Questa modifica è stata pensata per consentire di distribuire meglio le funzioni su massimo due piani senza andare a inserire sistemi di collegamento verticale troppo complessi, velocizzando quindi la visita all'interno.

Nello specifico abbiamo pensato di inserire

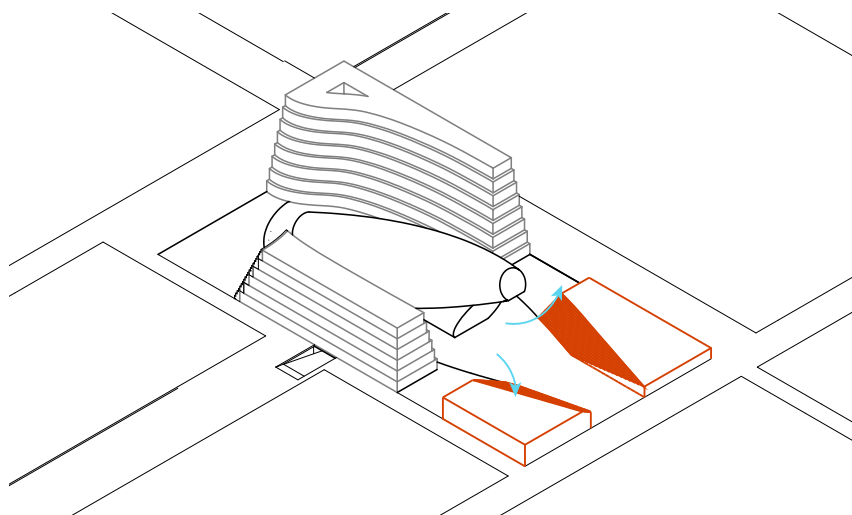


[150] Terza reiterazione di progetto

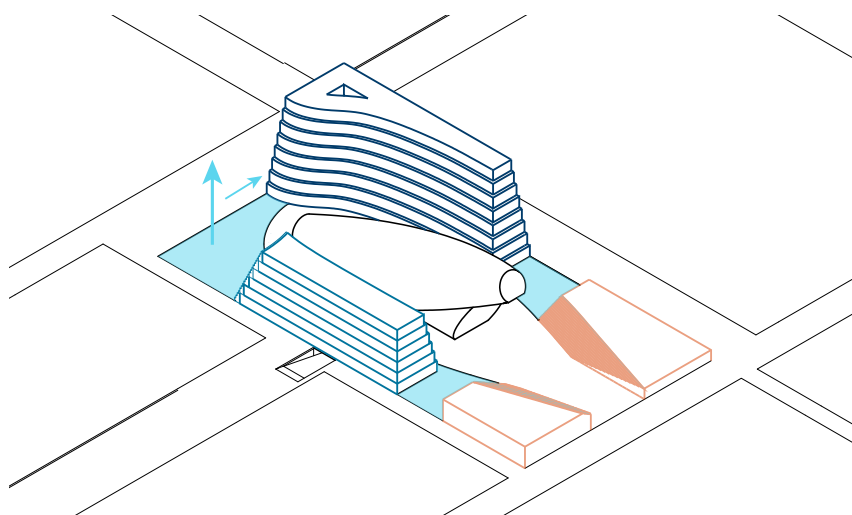
nell'edificio ad un piano un centro commerciale e nell'edificio a due piani ristoranti e negozi, creando così un piccolo centro commerciale diviso su due volumi [151].

Inoltre, grazie alle scalinate inserite nella parte interna dei volumi sarà possibile accedere alle terrazze in copertura dove svolgere delle attività all'aperto gestite dal centro.

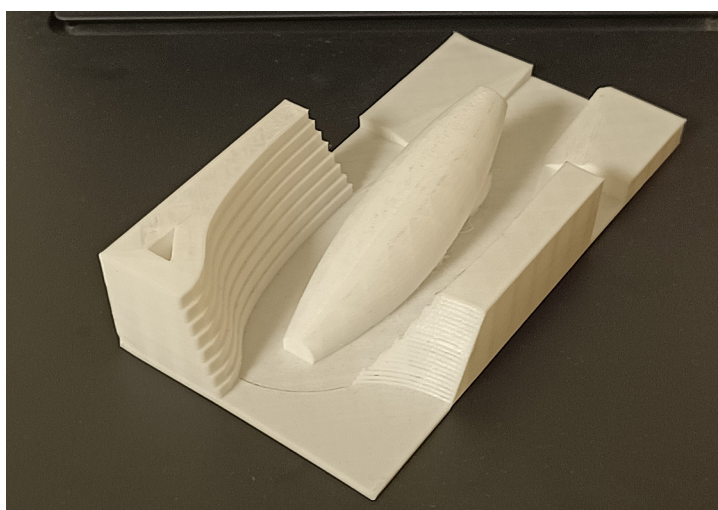
Oltre a questo, anche la passerella è stata rimossa dal progetto per via delle dimensioni ingombranti che causavano ampie zone d'ombra e evidenti difficoltà strutturali.



(151) Terza reiterazione di progetto - focus edificio commerciale



(152) Terza reiterazione di progetto - focus edificio commerciale



(153) Terza reiterazione di progetto - modello stampato in 3D

Inoltre, lo spazio lasciato libero dalla passerella risulta più ampio e gradevole.

Per quanto riguarda gli edifici alti abbiamo mantenuto le forme già delineate con la versione precedente (152).

Di fatto le uniche differenze risultano essere la rimozione del dislivello alla base dell'edificio per uffici, con l'area verde che si estende anche in direzione dell'edificio residenziale, e la nuova zona verde compresa tra l'edificio per uffici e l'edificio commerciale a 2 piani.

Dal modello fisico (153) è possibile vedere come l'alternanza tra edifici alti e bassi contrapposta rispetto all'andamento dell'auditorium risulti molto particolare e accattivante, inoltre rispetto alla versione precedente la mancanza della passerella crea una piazza esterna molto ampia proprio di fronte all'auditorium esaltandone le dimensioni e l'importanza al centro del progetto.

5.1.2.4 - Versione definitiva

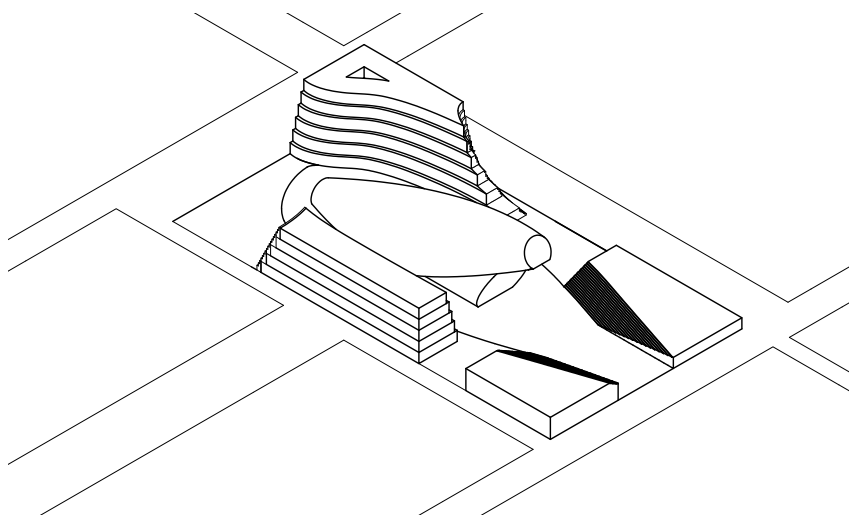
Nell'ultima versione del progetto (154) ho deciso di apportare qualche modifica solo agli edifici alti rendendoli leggermente più bassi.

Infatti, l'edificio residenziale con i suoi otto piani era eccessivamente ingombrante e rischiava di rendere l'edificio poco gradevole per gli edifici circostanti, andando a coprire la luce solare.

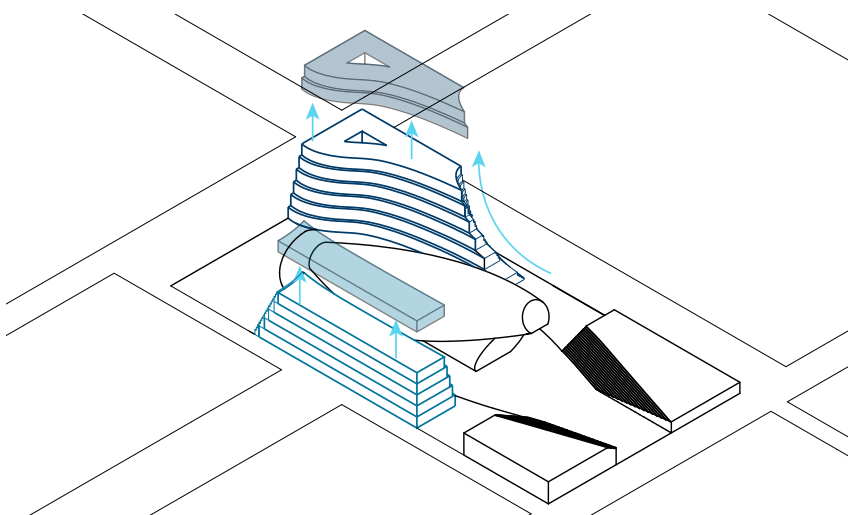
Inoltre, gli otto piani avrebbero portato l'edificio a sfiorare i 25 m di altezza massimi previsti dal PRG per quest'area di progetto (155).

Lo stesso discorso è stato applicato anche se in maniera minore anche sull'edificio per uffici, sebbene quest'edificio non superasse il limite di altezza imposto dal PRG ho comunque deciso di rimuovere un piano per evitare problemi di illuminazione con l'energy center e soprattutto per avere un'altezza simile agli edifici a lui vicino.

Oltre a questo, nell'edificio residenziale ho deciso di inserire dei terrazzamenti analoghi a quelli presenti nell'edificio per uffici con lo scopo di portare l'area verde compresa tra l'edificio commerciale e



(154) Quarta reiterazione di progetto

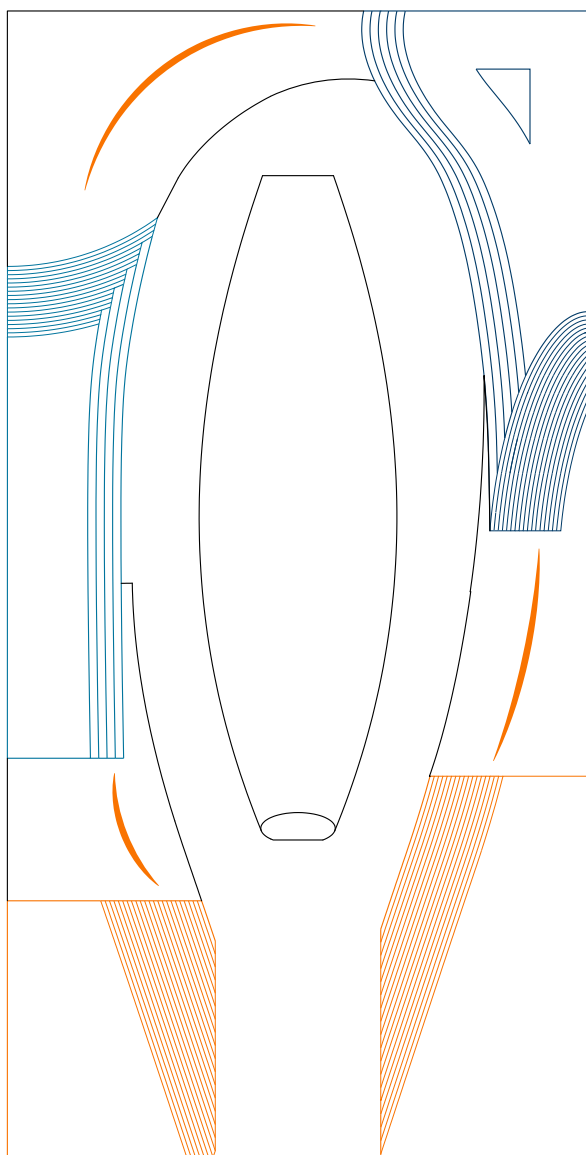


(155) quarta reiterazione di progetto - modello stampato in 3D

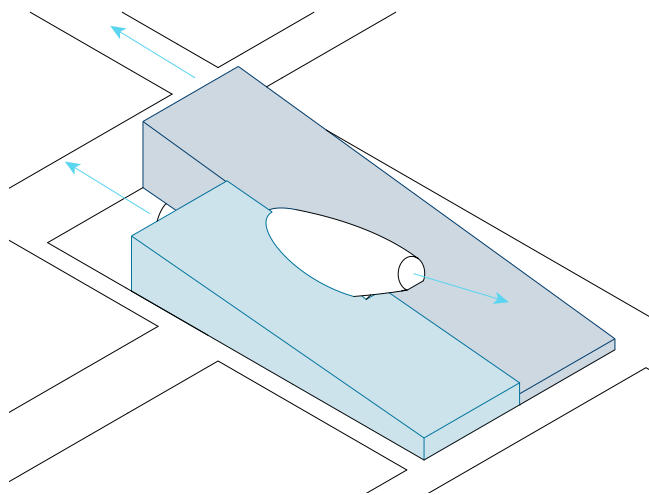
quello residenziale anche sulla parete circostante.

Tutta questa serie di movimenti hanno contribuito a creare una geometria continua che vista dall'alto sembra abbracciare l'auditorium (156).

Questo aspetto è evidenziato anche dal modo in cui terminano gli edifici, come ad esempio la curva dell'edificio residenziale sembra essere un "incastro" per la curva delle gradinate dell'edificio per uffici, aiutando a creare un senso di continuità.



(156) Concept continuità geometrie



(157) Concept inclinazione fabbricati

Così come la curva creata dalle gradinate dell'edificio residenziale e quella dell'edificio commerciale parallelo, fa eccezione l'altro edificio commerciale rispetto all'edificio per uffici, in cui si è voluto dare un punto di arrivo.

Un altro aspetto che risulta molto importante per il risultato finale del progetto è la contrapposizione tra lo sviluppo in altezza dell'auditorium e quello del resto del progetto, difatti mentre l'auditorium ha la sua base a Nord-Est e la parte alta orientata verso Sud-Ovest mentre il resto del progetto è esattamente l'opposto, con gli edifici alti, ovvero il residenziale e quello per uffici posizionati a Nord-Est (in corrispondenza degli edifici residenziali di via Nino Bixio, in modo da mantenere una continuità con le altezze), e gli edifici commerciali bassi posizionati a Sud-Ovest in corrispondenza delle OGR. Questo ha portato l'auditorium ad emergere rispetto al resto del progetto, valorizzando la forma che emerge dagli edifici bassi del centro commerciale (157).

Dal modello fisico (158) si può notare come gli edifici più bassi contribuiscano, rispetto alle versioni precedenti, ad aumentare il dialogo tra i vari elementi del progetto creando una maggiore armonia e continuità.

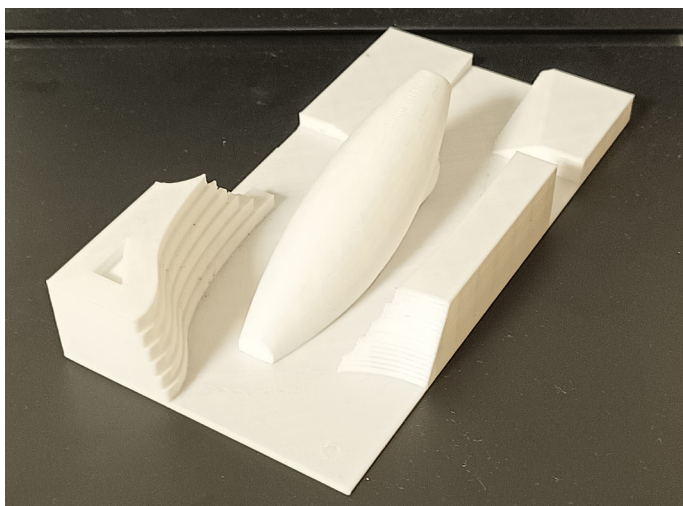
Inoltre, le varie aperture a gradoni realizzate contribuiscono a rendere i prospetti sia esterni che interni dei fabbricati.

Un altro aspetto importante è la grande presenza di verde all'interno del progetto, che nel resto degli edifici vicini tendeva a scarseggiare.

Infine, essendo la sostenibilità uno dei concetti alla base di questo progetto, ho cercato di rendere il tutto estremamente sostenibile, per questo motivo nei seguenti paragrafi andrò ad analizzare le scelte fatte a livello di materiali per le finiture di tutti questi edifici, partendo ovviamente dal presupposto di cercare sempre il recupero dei materiali e il

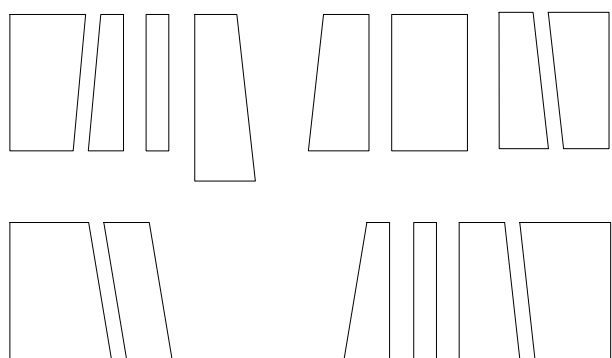
riutilizzo di questi. oltre alle pareti verdi.

Tutti questi fattori verranno approfonditi nei successivi paragrafi in cui si cercherà di definire al meglio le scelte fatte per massimizzare la sostenibilità e il riuso di materiali all'interno del progetto.

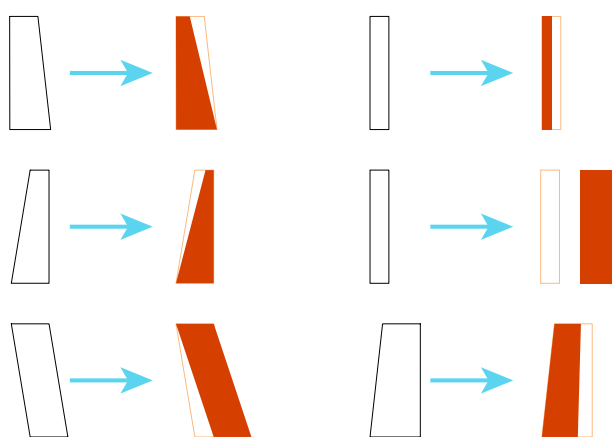


[158] Modello fisico versione finale

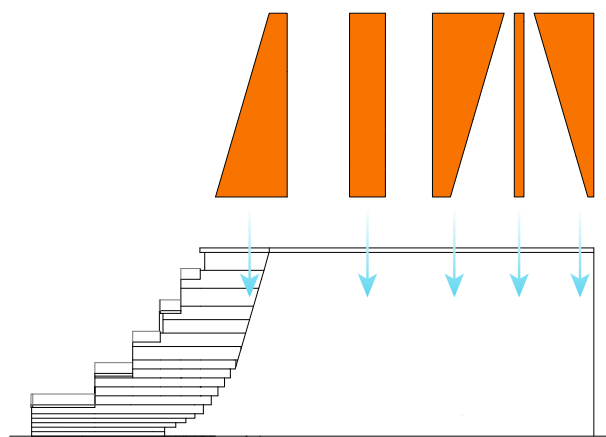
5.2 - Il ridisegno della facciata



(159) Forme presenti nei prospetti dell'energy center



(160) Ridefinizione di forme per le facciate esterne



(161) Composizione facciate fase 1

Una volta definita la forma del progetto era necessario trovare delle geometrie che definissero in modo preciso le facciate, nello specifico come detto precedentemente vi era la necessità di interfacciarsi con Energy center e OGR.

Volendo improntare il progetto con un

taglio contemporaneo e con linee nette e decise, ho deciso di andare a riprendere il pattern dell'energy center.

Per mantenere un legame anche con le OGR invece ho deciso di utilizzare i materiali che distinguono la facciata delle OGR, ovvero mattoni e pietra (la scelta dei materiali verrà approfondita nel paragrafo successivo).

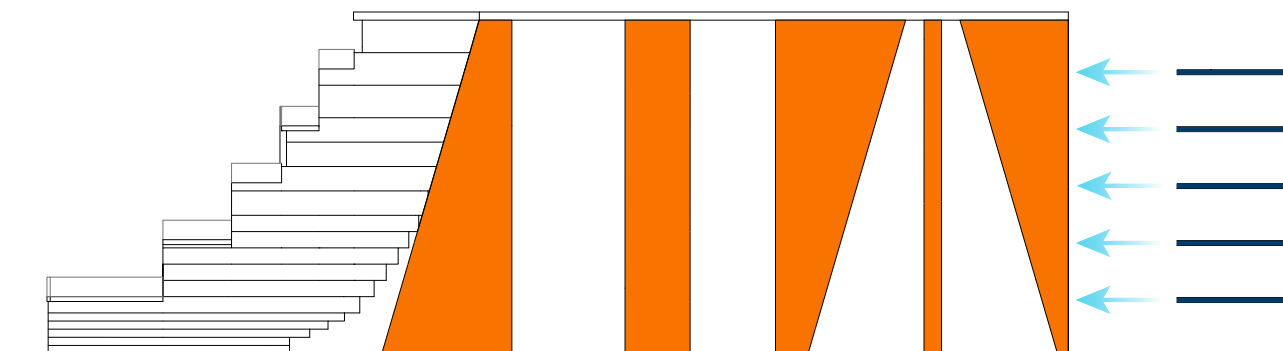
Per seguire il disegno della facciata dell'energy center abbiamo analizzato le forme che le compongono, dopodiché ho realizzato un campionario (159) con tutte le forme presenti all'interno delle facciate. Queste forme che abbiamo ricavato sono poi state rimaneggiate, in modo da creare forme più accattivanti e in alcuni casi più nette e particolari, in modo da non realizzare un'esatta copia delle facciate dell'energy center (160).

L'aspetto fondamentale era evitare di creare delle facciate identiche tra loro, era importante mantenere delle linee leggermente differenti tra le facciate, in modo da rendere più unico ogni lato del progetto, integrando anche la possibilità di inserire logge o aperture all'interno delle pareti (161).

Questo processo è stato ripetuto su tutti i lati esterni del progetto, comprendendo sia gli edifici alti che quelli commerciali, l'unico lato in cui ho agito diversamente è il prospetto interno dell'edificio residenziale e per uffici che verranno trattati in seguito. Una volta definito un disegno di facciata, ho tagliato il disegno con i solai, rendendoli evidenti nei punti in cui avremmo inserito delle logge (162).

A questo punto ho iniziato a predisporre le aperture, principalmente logge con dei piccoli terrazzi per quanto riguarda l'edificio residenziale (163), mentre per quanto riguarda l'edificio per uffici ho inserito più finestre singole, al piano terra invece su quasi tutti i prospetti abbiamo inserito delle vetrate per attività commerciali.

Come ultimo dettaglio abbiamo inserito anche dei tagli diagonali sui prospetti



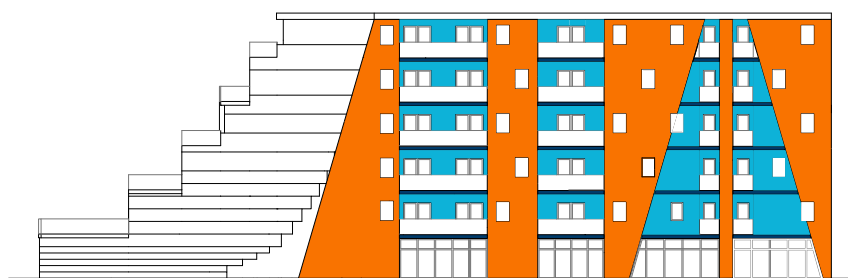
[162] Composizione facciate fase 2

[164] in cui andare ad inserire dei led che di sera rendano evidente il taglio all'interno delle facciate.

Per quanto riguarda l'interno degli edifici alti le facciate interne le forme geometriche non sono state estese su tutta la facciata bensì tutte le partizioni sono suddivise su ogni piano.

La logica dietro alla scelta delle forme è sempre la stessa, ovvero una semplice rielaborazione delle forme che compongono l'energy center [165], con la differenza che in questo caso avendo a disposizione più piani sovrapposti le forme sono state specchiate lungo la linea di mezzzeria del solaio, ottenendo così piani sempre diversi tra di loro nel disegno di prospetto [166].

Per regolarizzare le forme dove inserire le



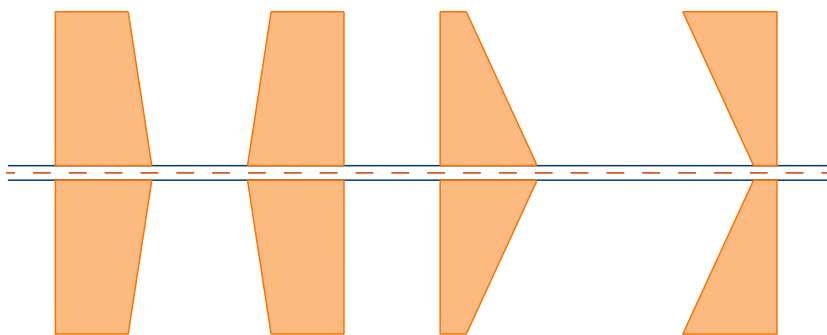
[163] Composizione facciate fase 3 (facciata)



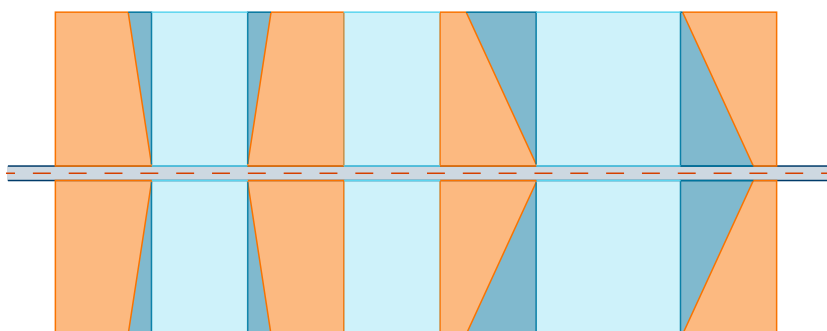
[164] Composizione facciate dettagli finali



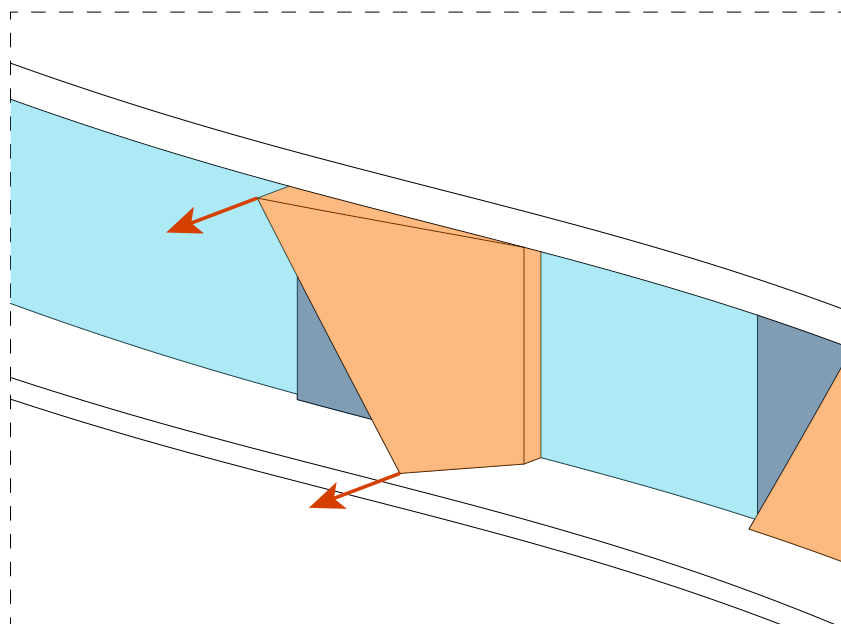
[165] Composizione facciate interne 1



(166) Composizione facciate interne 2



(167) Composizione facciate interne 2



(168) Concept divisione terrazze

vetrate ho poi realizzato una seconda parete che andasse a regolarizzare appunto la prima (167).

Questa seconda finitura dovrà essere diversa rispetto alla prima in modo tale da mantenere integro il disegno in facciata.

Per quanto riguarda l'edificio residenziale si è resa necessaria un'ulteriore operazione, dovendo suddividere il terrazzo che avvolge tutti i livelli.

Per fare questo ho traslato 2 vertici di un lato delle pareti che ho scelto di utilizzare per la suddivisione, in modo tale da ottenere la divisione senza aggiungere nessun elemento esterno al disegno di facciata (168). Inoltre, questi tagli creati dalle forme estremamente particolari che si vengono a creare con queste modifiche creano un effetto molto suggestivo guardando l'edificio dal basso.

5.3 - Riprogettare l'involucro: recupero ed innovazione

Come già accennato nei paragrafi precedenti, come riferimento per i materiali da utilizzare come finitura ho preso le OGR, le quali utilizzano una finitura tipica degli edifici sia industriali che storici di Torino, ovvero pietra e mattoni.

Analizzando le facciate delle OGR, si può notare come la pietra sia il materiale predominante; tuttavia, in questo caso il mattone mi sembrava l'opzione migliore per comporre le ampie facciate esterne dei nostri volumi, per cui ho invertito le quantità di materiali, inserendo per la maggior parte mattoni e in minor quantità pietra (169-170).

Ovviamente entrambi questi materiali hanno in impatto sull'ambiente dovuto alla loro produzione molto impattante, in particolare il mattone richiede che venga estratta dell'argilla, che venga cotta in forni che raggiungono altissime temperature ecc.

Allo stesso modo la pietra, così come qualsiasi altro materiale lapideo deve essere estratto e successivamente lavorato con macchinari che consumano importanti quantitativi di energia e di conseguenza producono inquinamento.

Per entrambi questi materiali ho dunque trovato delle alternative che mi consentissero di avere il materiale in breve tempo, ma soprattutto che limitassero al minimo l'inquinamento causato dalla loro produzione e magari in qualche caso che consentissero di evitare la creazione di nuovi rifiuti nel prossimo futuro.



(169) Facciata OGR (foto realizzata durante sopralluogo)



(170) Dettaglio facciata OGR (foto realizzata durante sopralluogo)

5.3.1 - Mattoni di recupero



(171) Progetto Resource Rows (fonte: Lendager.com)



(172) Taglio delle murature in mattoni (fonte: Lendager.com)

Per quanto riguarda le facciate in mattoni presenti nel progetto, ho scelto di prendere come esempio il progetto dello studio Lendager (171), già citato nel terzo capitolo di questa tesi [3.3.1 - The resource rows - Copenhagen].

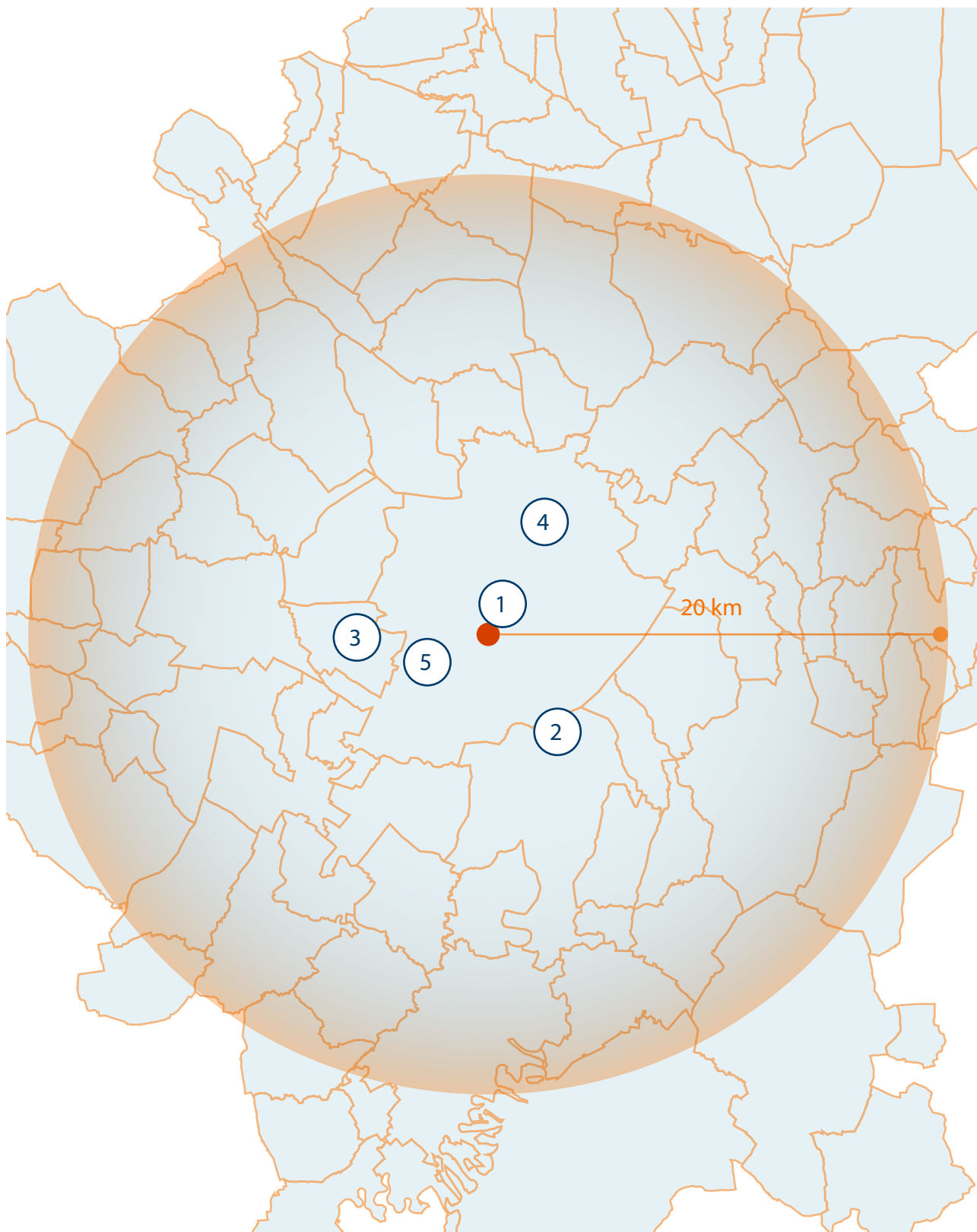
In breve, il processo consiste nel demolire in modo selettivo le pareti in mattoni (170) di edifici abbandonati o comunque in procinto di essere demoliti, per poi riutilizzarli per ricoprire le facciate del nuovo edificio.

Nello specifico attraverso una sega circolare i muri vengono suddivisi nel giro di pochi secondi in parallelepipedi di 1 m². Questo processo oltre a essere estremamente rapido, consente di utilizzare un quantitativo di energia molto più basso rispetto alla produzione classica dei mattoni che in genere richiede circa 1200 kWh/m³, mentre con questa tecnica saranno sufficienti pochi kWh necessari al taglio e al trasporto dei pannelli.

Inoltre essendo presi da edifici in attesa di demolizione, si è evitato di produrre rifiuti inerti che sono tra i più difficili da smaltire. Per procedere con questo tipo di intervento la prima operazione che abbiamo svolto è stata la ricerca di edifici che facessero al caso, ovvero in stato di abbandono o comunque che avrebbero potuto subire una demolizione in tempi relativamente brevi. Ho quindi realizzato una mappa che identificasse sia all'interno di Torino che nei comuni limitrofi tutta una serie di edifici che corrispondesse a questi requisiti (173). Ovviamente per selezionare i migliori edifici per poter procedere sarebbe necessario parlare con le amministrazioni comunali, proprietari e vari enti che si occupano di gestire gli edifici.

Questo ovviamente non essendo un progetto reale, ma solo a scopo di tesi di laurea non è stato fatto; tuttavia, per scegliere gli edifici teoricamente utilizzati all'interno del progetto sono stati scelti degli specifici criteri di giudizio:

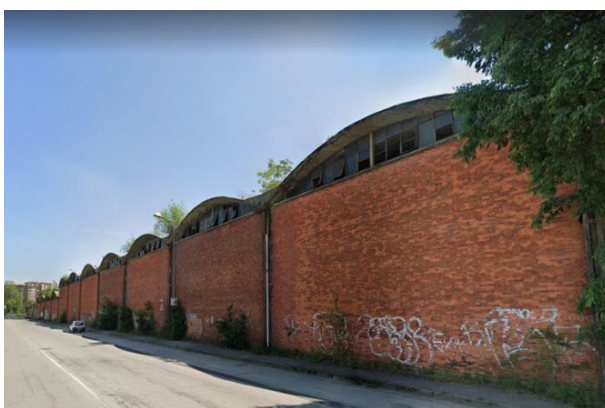
- Stato di conservazione dei mattoni: era fondamentale scegliere dei mattoni che



(173) Collocazione edifici per mattoni da recuperare - scala 1:250000



(174) 1 - Muro di cinta cantiere a lato stazione porta Susa (Foto realizzata durante sopralluogo)



(175) 2 - Ex fabbriche Firsat, Moncalieri (Fonte: notiziario del web)



(176) 3 - Ex cascina abbandonata, Grugliasco (Fonte: Google maps)

non avessero evidenti problematiche e che non risultassero degradati.

- Facilità di smontaggio: era importante scegliere dei muri che non presentassero problematiche con tubature o sistemi elettrici, inoltre un altro aspetto fondamentale era evitare lastre di eternit presenti nei progetti per evitare rallentamenti dovuti allo smaltimento.

- Distanza dal luogo di progetto: abbiamo definito un raggio di 20 km dall'area di progetto entro il quale ricercare gli edifici adatti, questo per ridurre al minimo l'inquinamento dovuto al trasporto in cantiere delle parti sezionate.

- Differenze tra i vari tipi di murature: era importante avere delle murature con maglie diverse in modo da ottenere un risultato finale più particolare.

Alla fine, gli edifici selezionati per ricavare i mattoni sono quelli numerati all'interno della mappa e elencati qui di seguito:

1 - Muro di cinta cantiere a lato stazione porta Susa (174). Si tratta di un muro che circonda un cantiere presente a lato della stazione di Torino Porta Susa, in Corso Bolzano, realizzato in parte in pietra e in parte in mattoni. Probabilmente con la chiusura del cantiere verrà demolito, per cui sarebbe ottimo recuperare la parte in mattoni per il progetto.

2 - Ex fabbriche Firsat, Moncalieri (175) Si tratta di una vecchia fabbrica a Moncalieri abbandonata ormai da diversi anni, negli ultimi anni è stata più volte occupata e utilizzata come bivacco e luogo di spaccio, per questo una demolizione potrebbe essere ben vista, rendendo di fatto il materiale nuovamente utile.

3 - Ex cascina abbandonata, Grugliasco (176) Si tratta di una vecchia cascina abbandonata a Grugliasco, in via San Martino, di questo edificio in realtà non rimane molto materiale utilizzabile, tuttavia essendo stato in parte demolito, sarebbe a maggior ragione logico utilizzare

le ultime parti restanti all'interno del progetto.

4 - Fabbrica abbandonata, corso Mortara (177) Anche in questo caso si tratta di una fabbrica abbandonata, questo edificio composto da ben 4 piani fuori terra, probabilmente da solo sarebbe sufficiente a fornire elementi per tutto il progetto, tuttavia per aumentare le differenze tra un pannello e l'altro e non avere una facciata uniforme ma ricreare un pattern realizzato da mattoni differenti tra loro.

5 - Muro di cinta cantiere via Passo buole, Torino (178) Si tratta di un muro di recinzione di un cantiere attualmente in lavorazione; quindi, considerato lo stato del muro si può pensare che verrà demolito a fine lavori, per questo sarebbe ideale da utilizzare nel progetto.

Una volta trovati gli edifici era necessario capire come suddividere gli elementi in facciata nel progetto, abbiamo ipotizzato di utilizzare pezzi da un metro quadro in modo da rendere semplice il taglio e il trasporto, per cui siamo partiti per ogni parete in mattoni dal lato regolare e abbiamo disposto in fila i quadrati da 1m per 1m di ritaglio, come spessore abbiamo deciso di tenere circa 10 cm andando a livellare le pareti di spessore superiore, per farlo abbiamo ipotizzato l'utilizzo di una sega a nastro industriale (179) per i muri ampiamente al di sopra dei 10 cm di spessore, mentre per quanto riguarda gli strati leggermente al di sopra dello spessore, oppure con uno strato di finitura da rimuovere abbiamo ipotizzato una levigatrice per pavimenti (180).

Ovviamente ogni pannello avrà necessità di un passaggio della livellatrice in modo da rimuovere imprecisioni e sporco



(177) 4 - Fabbrica abbandonata, corso Mortara (Fonte: Google maps)



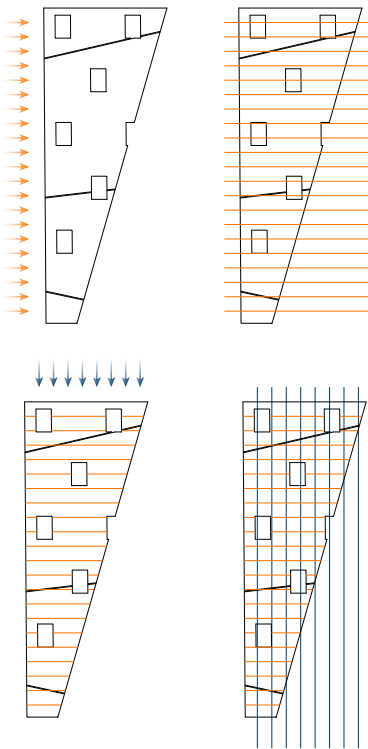
(178) 5 - Muro di recinzione cantiere via Passo Buole (Fonte: Google maps)



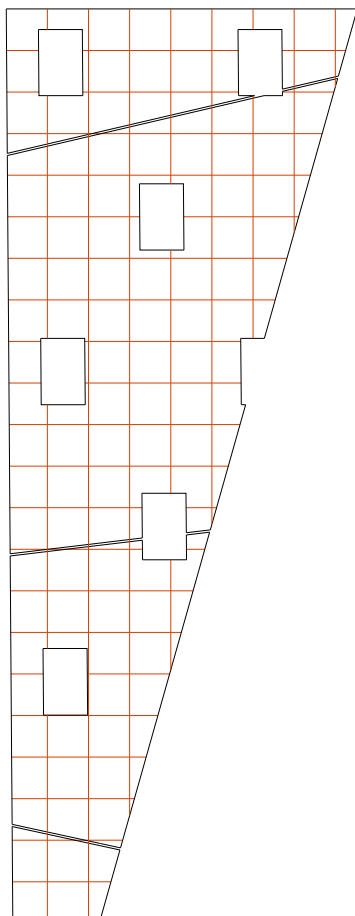
(179) Sega a nastro per mattoni (Fonte: Youtube.com)



(180) Levigatrice industriale per pavimenti (Fonte: Lmar-machines.com)



(181) Concept schema di taglio muro di facciata



(182) Suddivisione facciata finale

accumulato dai mattoni nel corso degli anni.

Una volta ottenuti i riquadri era importante capire come suddividere le facciate, per questo motivo abbiamo deciso di eseguire un concept sul taglio delle facciate (181) prima lateralmente e poi dall'alto, per quanto riguarda i quadrati che fuoriusciranno (182) è stata denominata in modo preciso in modo da poter ricondurre subito il pezzo alla facciata e alla posizione corretta.

Ovviamente in caso di edificio realmente realizzato ogni pezzo andrebbe catalogato in modo preciso in modo da ricreare fedelmente la facciata disegnata.

Per questo motivo abbiamo fatto un possibile schema di tutti i pezzi che compongono una delle parti che compongono la facciata già utilizzata da esempio nel paragrafo precedente (facciata Nord-Est edificio residenziale), la stessa parte che è stata utilizzata come base per il concept.

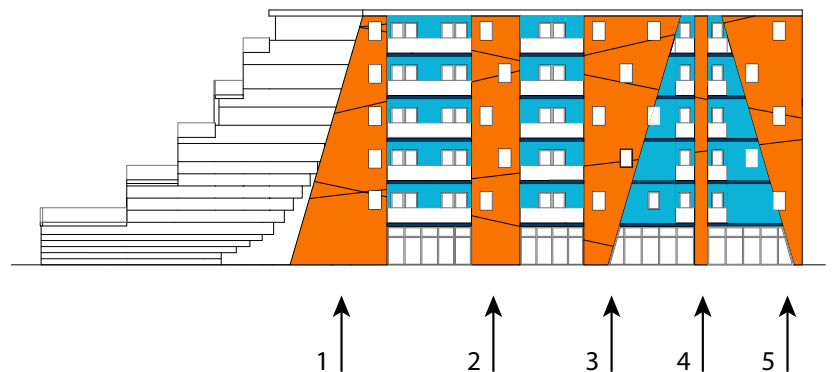
La numerazione utilizzata serve a identificare l'edificio con la prima sigla, in questo caso RES --> residenziale.

In secondo luogo, viene identificata la facciata N/E --> Nord-Est.

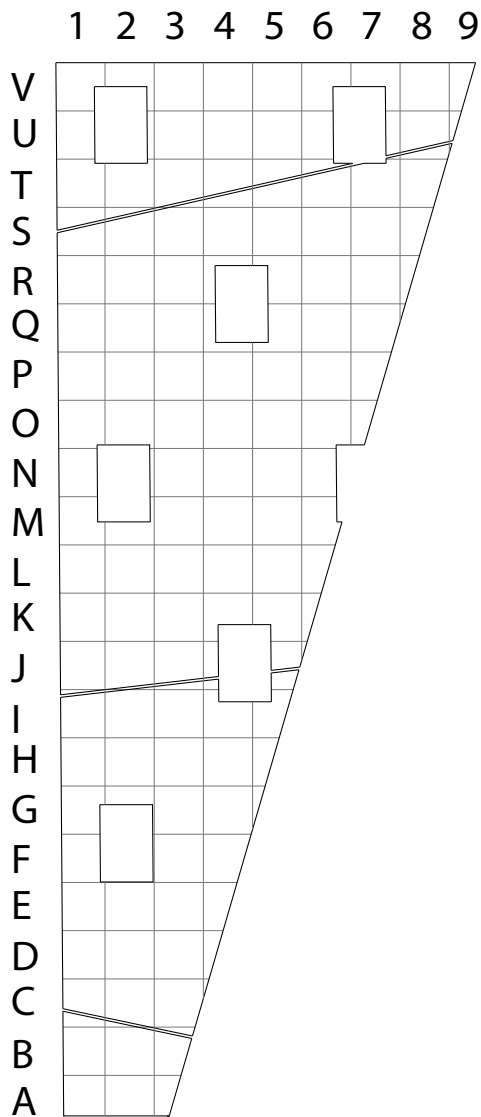
Successivamente va identificato l'elemento di facciata di cui fa parte la lastra, questo va conteggiato partendo da sinistra verso destra da una vista di prospetto di riferimento (181).

Infine, viene assegnata una lettera ad ogni riga in ordine alfabetico partendo dal basso verso l'alto, mentre viene assegnato un numero per ogni colonna partendo da sinistra verso destra (183). Ovviamente il codice per ogni singolo pannello dovrà essere scritto sul retro del pannello stesso nel momento in cui si termina il taglio, in modo tale che, una volta giunti in cantiere non si crei confusione e che il pattern ricreato sia esattamente quello che si si aspettava dai disegni di progetto (183).

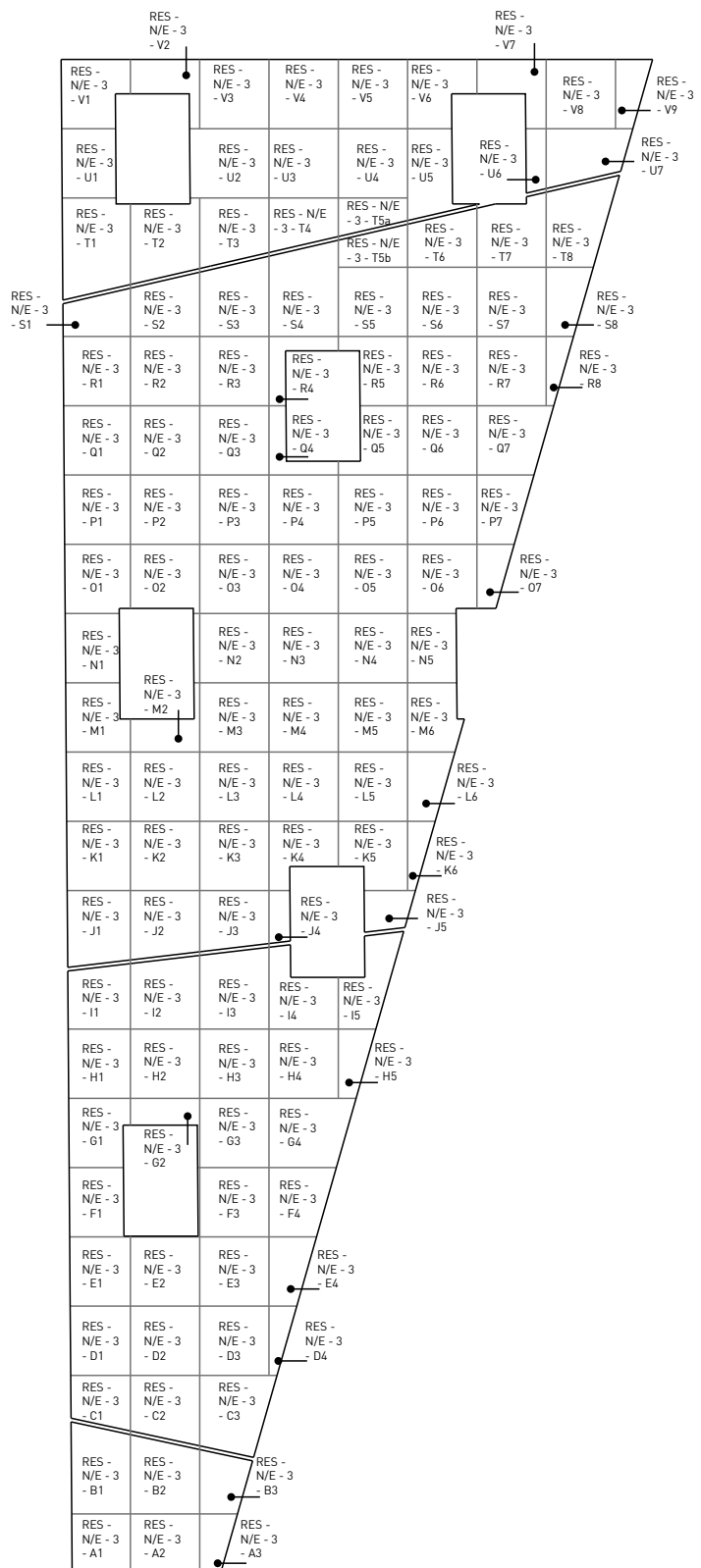
Per dare un'idea di quello che potrebbe essere il risultato finale, abbiamo realizzato il possibile disegno della parte di facciata presa in esame fino a questo momento (184).



(183) Numerazione elementi in facciata



(184) Suddivisione facciata con numeri e lettere



(185) Suddivisione facciata con numeri e lettere

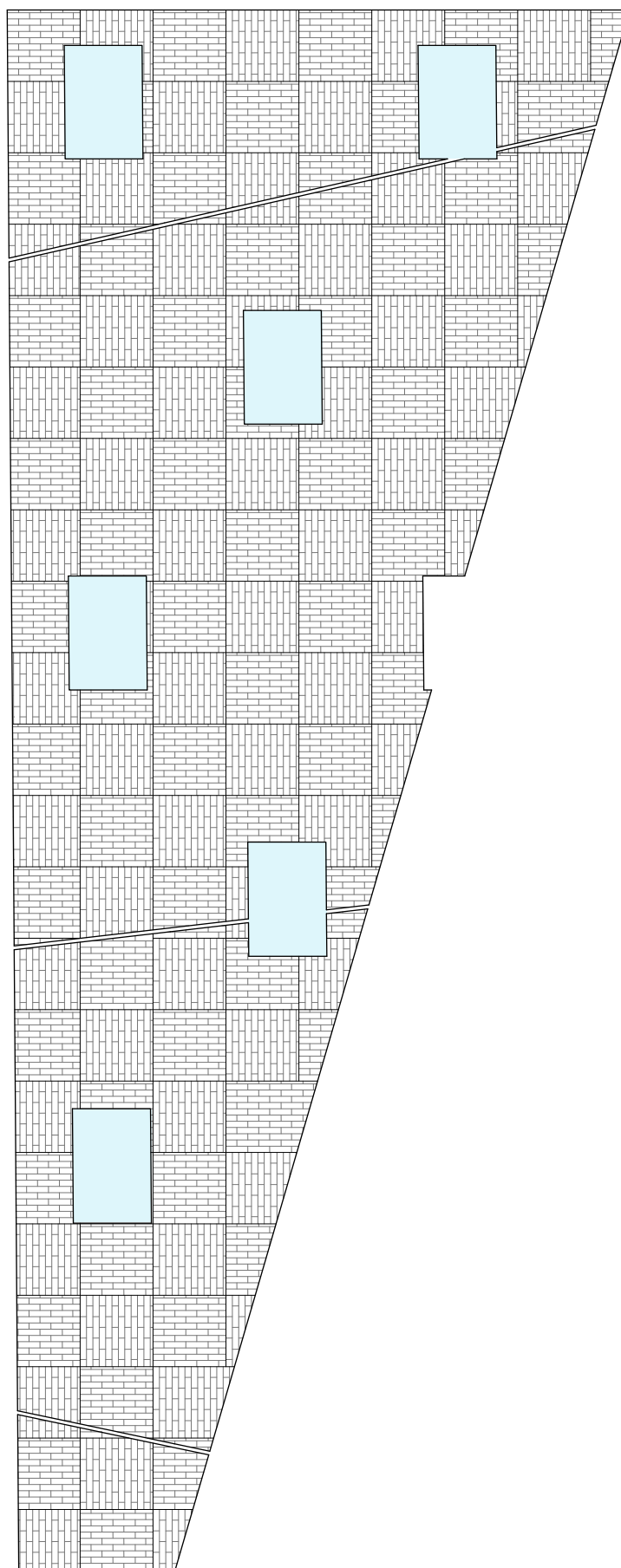
Ovviamente tutta questa facciata sarà sostenuta da un sistema a telaio che incorporerà anche il sistema di isolamento e finitura interna.

La pratica che ho pensato per questa parte di pelle del progetto ovviamente rientra all'interno del principio di DfMA di fatti i pezzi, pur essendo rielaborati e non nuovi, sono comunque realizzati appositamente per questo progetto (186).

Ovviamente questi edifici, sia residenziale che commerciale e per uffici non verranno approfonditi nel dettaglio, non essendo il focus della tesi, ma bensì semplicemente il contorno dell'elemento centrale. ovvero l'auditorium.

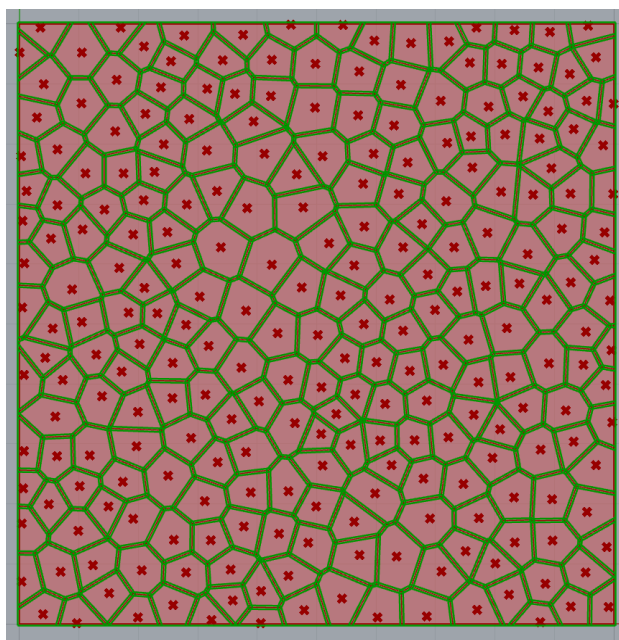
Tuttavia, era importante definire un contorno di progetto all'altezza del progetto stesso, per questo motivo abbiamo svolto questo studio sia sulla parte in mattoni, sia sulla parte in pietra che verrà trattata nel prossimo sotto paragrafo.

Entrambe le tecnologie scelte sono ovviamente riconducibili ai DfMA, sebbene realizzate in modi totalmente differenti tra loro.



(186) Esempio di pattern in facciata

5.3.2 - Riutilizzare il marmo



(187) Esempio di pattern Voronoy per la facciata



(188) Muro di facciata OGR, com'è possibile notare le pietre ricordano il pattern Voronoy

Per quanto riguarda le parti di facciata in pietra ho trovato una soluzione su come ricreare un materiale simile alla pietra senza andare ad estrarne di nuova.

Ovvero ho pensato di stampare in 3D un pattern realizzato con Grasshopper per replicare l'andamento della pietra (187).

Il pattern prescelto alla fine sarebbe un pattern Voronoy, questo perchè la forma irregolare delle sagome, è molto simile a quella delle pietre che compongono i muri delle OGR (188).

La particolarità di questa stampa sarebbe il materiale di stampa da utilizzare, ovvero degli scarti di lavorazione del marmo, i quali tramite additivi sono diventati recentemente stampabili in 3D.

Il materiale principale necessario alla realizzazione di questa finitura, gli scarti di lavorazione del marmo e di altri materiali lapidei, non sono difficili da trovare e soprattutto difficilmente riutilizzabili.

Per questo motivo sarà sufficiente rivolgersi a qualche azienda che si occupa di lavorazione del marmo a Torino, nello specifico ne abbiamo individuate alcune che potrebbero fare al caso nostro:

- CALBA S.R.L, marmista e marmi, Torino
- SanCarlo costruzioni srls, marmista e marmi, Torino
- Florin T, marmista e marmi, Torino
- Giuseppe C, marmista e marmi, Grugliasco

Questi ovviamente sono solo alcuni dei numerosi artigiani presenti sul territorio, inoltre essendo per loro il materiale a noi utile un semplice scarto di lavorazione potrebbero cederlo senza chiedere alcun compenso.

La problematica in tal senso potrebbe essere l'identificazione di additivi adatti allo scopo; tuttavia, come già specificato nel terzo capitolo, alcune start up stanno già realizzando alcune piastrelle con questa esatta procedura [2.3.1.1 - Stampa 3D applicata all'edilizia].

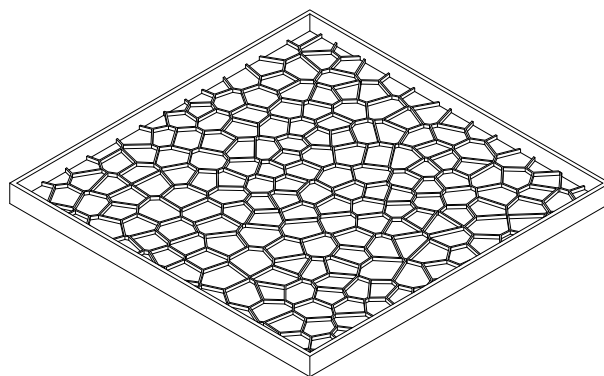
Un'altra problematica potrebbe essere

raccontata dai lunghi tempi necessari alle stampanti 3D per realizzare tutte le parti necessarie al progetto, per questo motivo ho pensato di realizzare solo dei negativi direttamente stampati in 3D (189). Quindi verrebbe miscelato il composto con i corretti additivi, per poi essere versato negli stampi (190) appositamente creati attraverso il pattern realizzato su Grasshopper.

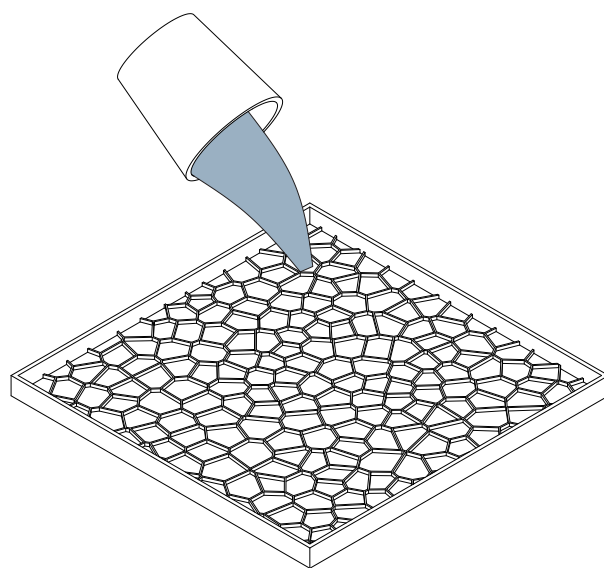
Ovviamente prima di versare il composto dovrà essere spruzzato un composto in grado di impedire la presa sullo stampo da parte del composto, il quale una volta essiccato sarà estratto effettuando pressione tramite dei fori appositamente realizzati sugli stampi (191), che ovviamente durante il versamento dovranno essere ostruiti.

Una volta rimosso il pezzo (192) completo dovrà essere levigato e imballato per il trasporto, inoltre se necessario potranno essere praticati fori, fresature o altri tipi di lavorazioni necessari all'allestimento della facciata (193).

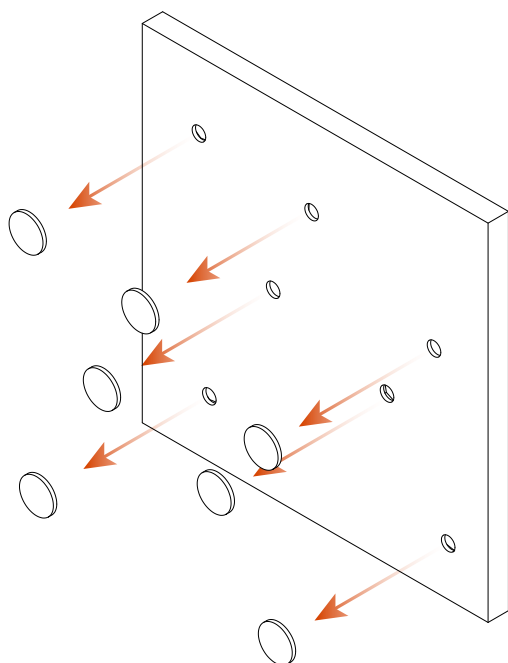
Lo spessore di queste finiture sarà di massimo 5 cm e con una superficie di massimo un m² in modo da non avere elementi troppo pesanti e difficili da trasportare, considerando che il materiale di base sarebbe comunque per la maggior parte marmo.



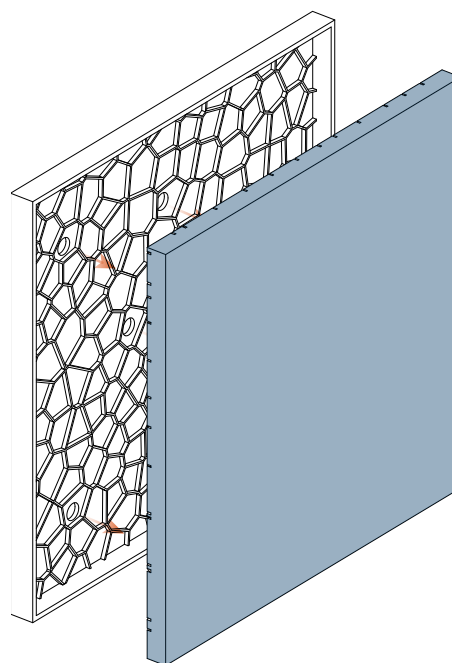
(189) Negativo di griglia Voronoy in facciata



(190) Negativo di griglia Voronoy in facciata



(191) Rimozione delle chiusure per consentire la spinta verso l'esterno dell'elemento stampato.



(192) Rimozione dell'elemento stampato dallo stampo

comunque, per la maggior parte marmo. Per quanto riguarda la scelta dei componenti per la miscela che compone le pareti, ho trovato una ricerca realizzata nel 2023 che prova proprio a recuperare in modo simile a quello pensato da me i materiali lapidei⁶⁷.

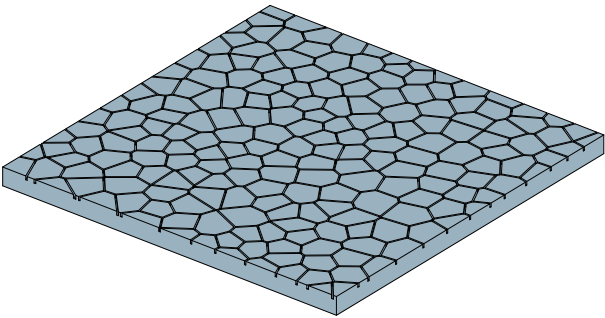
Nello specifico vengono utilizzati dei fanghi di natura marmorea (193) e dei fanghi di natura calcarea, questi vengono prima asciugati a temperatura ambiente e successivamente essiccati ulteriormente a 40°.

Dopo l'essiccazione sono stati disgregati per mezzo di un mulino a mascelle, come legante invece è stata scelta una resina in poliestere preaccelerata a base di acido ortoftalico a bassa reattività con una polimerizzazione molto graduale.

Dopo aver eseguito delle analisi sulla granulometria dei campioni e aver determinato i limiti di consistenza, aver determinato l'esatta composizione chimica e mineralogica, oltre che la viscosità corretta del legante, è stata ottenuta la corretta miscela di marmo e aggregati.

Il processo di produzione comprendeva una miscela composta da marmo, fanghi carbonatati, resina e catalizzatore, seguiti dall'incorporazione di aggregati (194).

Questi materiali sono poi stati impastati tra loro un pò come si fa con il calcestruzzo,



(193) Risultato finale di stampa



(174) Fanghi di natura marmorea (Fonte: A Novel Approach for the Reuse ofWaste from the Ex- tractive and Processing Industry of Natural Stone Binders: Development of Stone Composites - pp. 6)

Formulation Ref.	Aggregates			Binders		
	BA [%]	B1 [%]	B2 [%]	Lime. Slurry [%]	Marble Slurry [%]	Resin [%]
F1	30	30	40	52		
F2	20	20	60	52		
F3	35	15	50	52		
F4	40	40	20	52		
F5	30	30	40		52	48
F6	20	20	60		52	
F7	35	15	50		52	
F8	40	40	20		52	

(195) Tabella che mostra la composizione chimica delle lastre realizzate col marmo di recupero (Fonte: A Novel Approach for the Reuse ofWaste from the Extractive and Processing Industry of Natural Stone Binders: Development of Stone Composites - pp. 8)

66 - A Novel Approach for the Reuse ofWaste from the Extractive and Processing Industry of Natural Stone Binders: Development of Stone Composites pp. 6

67 - A Novel Approach for the Reuse ofWaste from the Extractive and Processing Industry of Natural Stone Binders: Development of Stone Composites pp. 11

ottenendo un risultato finale molto interessante, con un peso specifico di 2500 g/cm³.

Un altro valore fondamentale per valutare la qualità del materiale è la viscosità, infatti, un po' come nel calcestruzzo, la viscosità è fondamentale per stabilire la formulazione corretta della composizione [195].

La caratterizzazione meccanica del legante è stata essenziale per convalidare le sue prestazioni, poiché il suo comportamento sarà, in certa misura, un fattore condizionante del comportamento meccanico dei compositi⁶⁸.

Il tempo ideale di stagionatura previsto è di 28 giorni, tempo nel quale il materiale raggiunge la resistenza a compressione ideale.

Di fatto la conclusione a cui giunge questo studio è che grazie al corretto utilizzo dei leganti, dei reagenti, degli additivi e dei fanghi carbonatici è effettivamente possibile realizzare delle lastre composte da marmo riciclato, ponendo di fatto un importante passo avanti verso il riuso dei materiali lapidei.

La formulazione del legante che ha ottenuto risultati ottimizzati è quella corrispondente alla miscela di 52% di fango

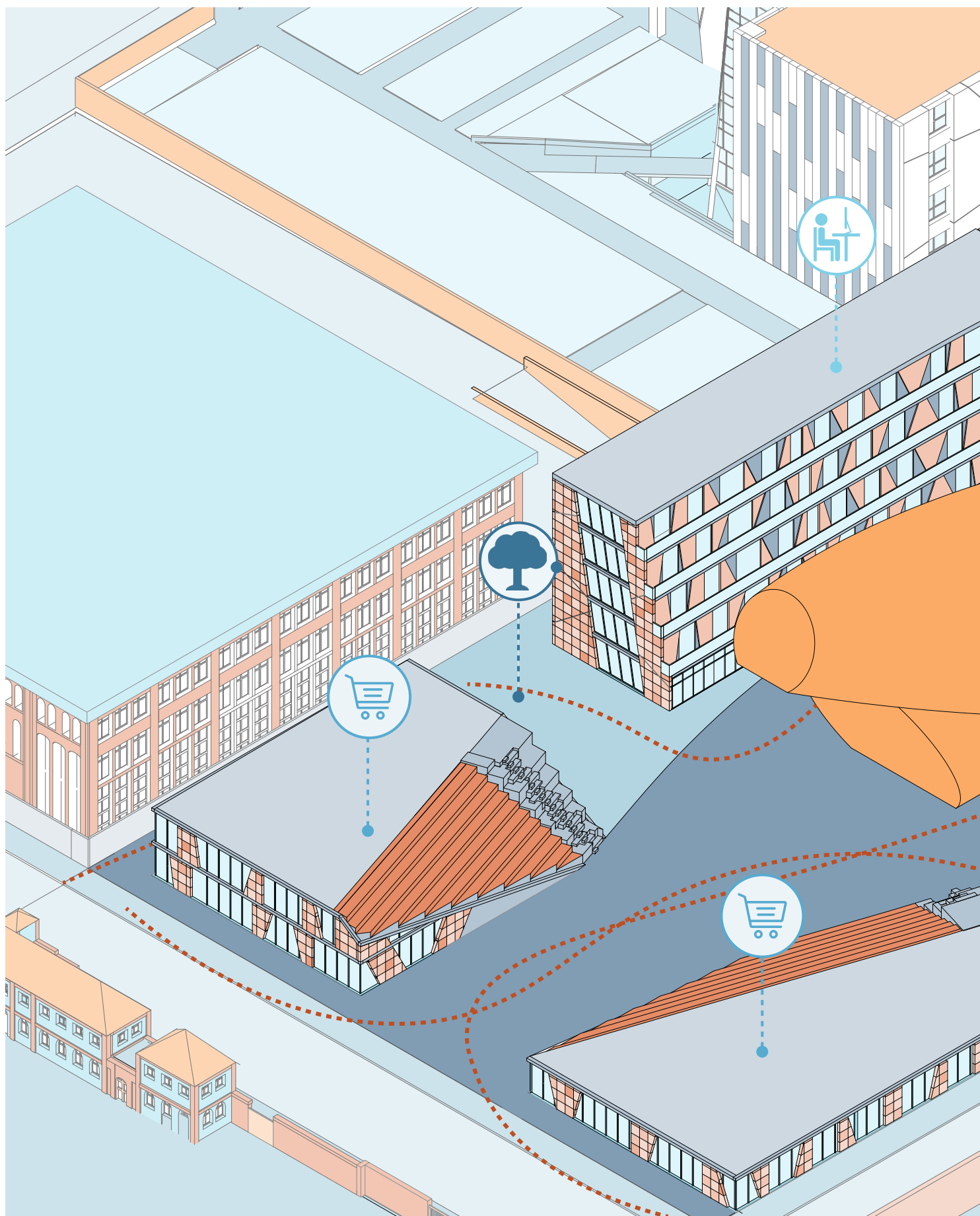
marmoreo e 48% di resina.

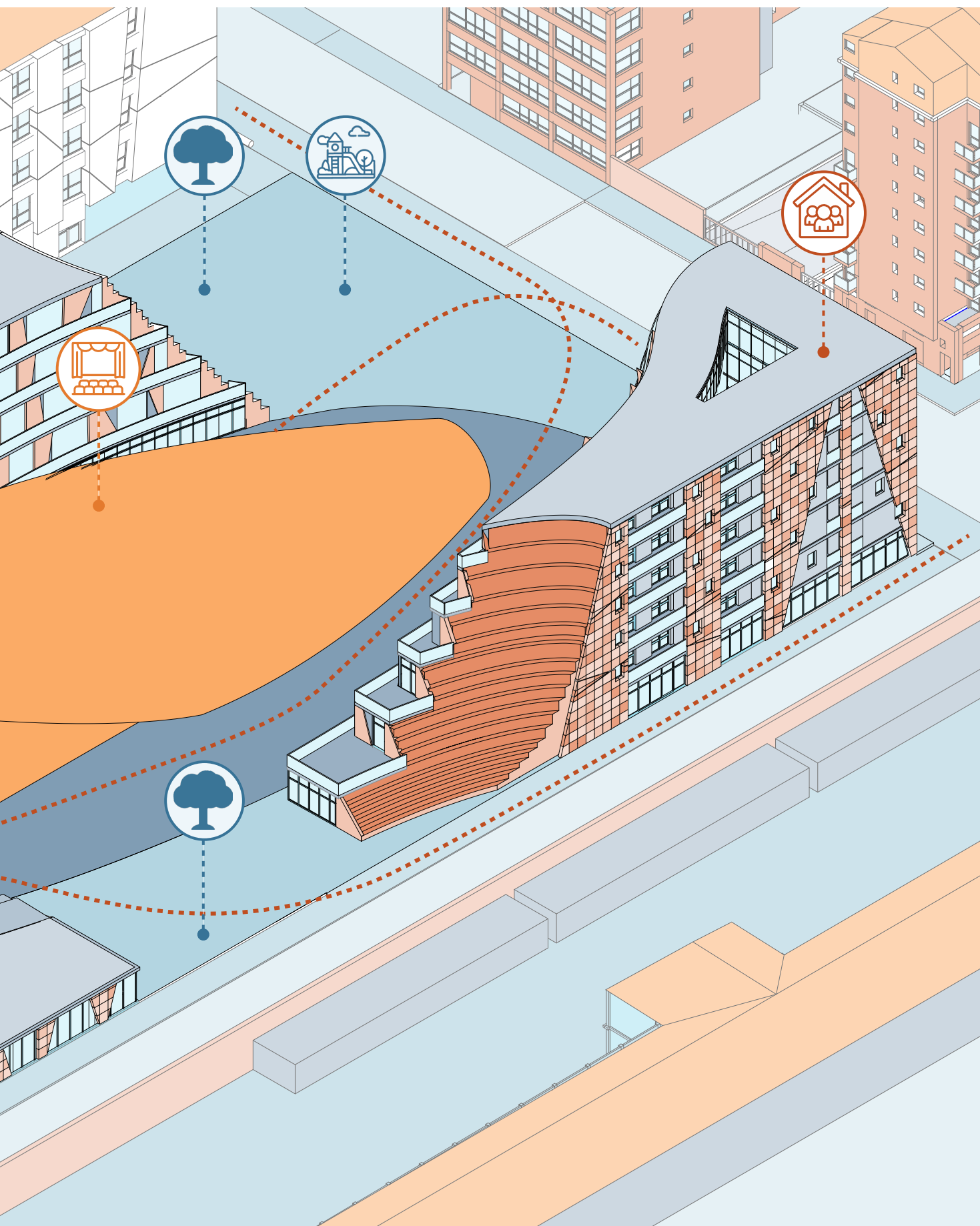
Un'obiezione che potrebbe essere fatta potrebbe riguardare i lunghi tempi necessari per la stagionatura di ciascun blocco di marmo, ovvero 28 giorni, ma per ovviare a questa problematica sarà sufficiente iniziare a produrre i blocchi non appena il cantiere sarà avviato. In questo modo durante tutte le altre fasi di cantiere i blocchi in marmo saranno realizzati e preparati per essere trasportati in cantiere al momento del bisogno.

Questa tecnica per quanto estremamente interessante non risulta essere praticabile, in quanto la quantità di materiale polimerico utilizzata nella formulazione risulta essere molto elevata, circa il 50%, per questo motivo l'aspetto della sostenibilità viene un po' meno.

Inoltre, la complessità della lavorazione richiesta avrebbe richiesto una manodopera molto specializzata, di conseguenza alla fine probabilmente la scelta più adatta per realizzare queste parti della finitura degli edifici sarà quella di utilizzare della pietra o del marmo di recupero.

5.4 - Visione d'insieme





5.4.1 - Considerazioni sulla forma di progetto

A livello formale la forma raggiunta con l'ultima versione di progetto che svolgono anche la funzione di piazza urbana, ci consente di avere ampi ingressi per l'area di progetto, garantendo una circolazione dinamica e scorrevole.

L'accesso sarà garantito da tutti i lati del progetto e garantirà la comunicazione anche con gli edifici vicini e il rapporto diretto fra gli spazi.

La forma finale scelta per gli edifici eviterà delle zone d'ombra eccessive all'interno del progetto, garantendo inoltre delle ampie terrazze dove organizzare eventi e attività utili sia agli abitanti dell'area di progetto che alle persone residenti nelle immediate vicinanze.

All'interno degli edifici ci saranno ampi spazi per residenze (3100 m²), uffici (2500 m²), e commerciale (4200 m²).

Tuttavia, lo sviluppo interno di questi edifici non è stato approfondito, non essendo gli edifici in questione il fulcro della tesi, la quale ha lo scopo di focalizzarsi sulla costruzione dell'auditorium tramite metodologia DfMA. Per questo motivo lo sviluppo degli edifici limitrofi è stato affrontato solo in maniera parziale, cercando un modo per integrare anche in essi una metodologia volta all'utilizzo di DfMA, in questo le due scelte sono ricadute sul riutilizzo dei mattoni e dei rifiuti di inerti.

Questa scelta di utilizzare metodologia DfMA anche per gli edifici vicini è volta alla volontà di ottimizzare la sostenibilità del progetto massimizzando il riuso di materiali non solo nell'auditorium, ma in generale in tutto il progetto, lavorando alla scala di distretto.

Questo aspetto risulta fondamentale quando si vuole ottenere la massima

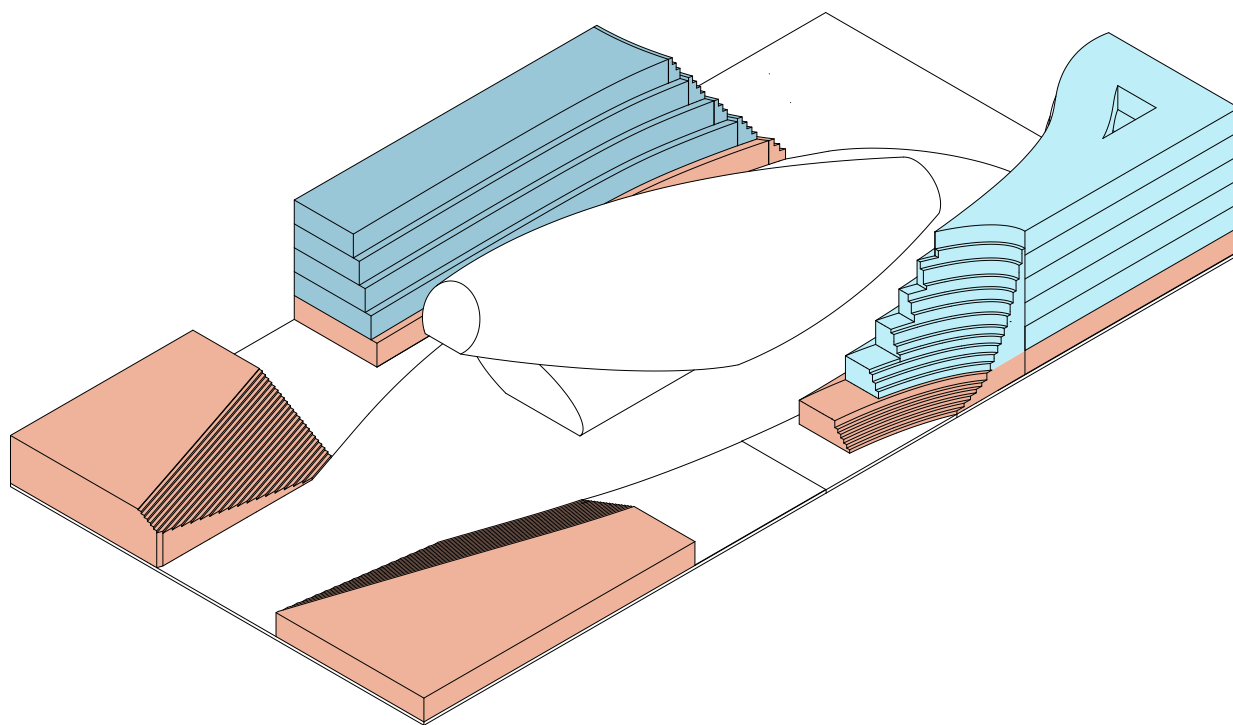
sostenibilità da un progetto, è importante che tutte le parti che lo compongono dialoghino tra di loro e si aiutino nel raggiungimento degli obiettivi progettuali.

Pur non avendo approfondito fino in fondo la distribuzione degli edifici ho comunque immaginato delle funzioni dedicate a ciascun edificio del progetto, come riportato nello schema funzionale (197).

Come si può vedere le funzioni prestabilite per gli edifici bassi sono totalmente commerciali con la differenza che nell'edificio di due piani disposto a Sud-Ovest verranno inseriti ristoranti e negozi, mentre nell'edificio con un solo piano sarà inserito un centro commerciale.

Per quanto riguarda l'edificio di sei piani invece cinque saranno dedicati alle residenze, mentre il piano terra sarà dedicato ad attività comuni come palestre, aule studio, mense, ecc. inoltre sarà anche presente la reception che controllerà l'accesso delle residenze.

Anche l'edificio per uffici di cinque piani fuori terra avrà quattro piani dedicati ad uffici e il piano terra ad attività comuni e reception, in questo caso potrebbe essere utile anche una sala esposizioni per mostre ed eventi.



● Attività commerciali

● Edificio per uffici

● Edificio residenziale

○ Auditorium

(197) Schema concettuale aree progetto

5.5.1 - Equinozio di primavera 20 Marzo

5.5.1.1 - Ore 9:00



[201 - 202] Equinozio di primavera ore 9:00

5.5.1.2 - Ore 12:30



[203 - 204] Equinozio di primavera ore 12:30

L'equinozio di primavera evidenzia una buona copertura solare in tutte le ore della giornata, in particolare alle 12.30. L'auditorium in particolare viene coperto dalla luce solare su tutta la sua superficie rendendo indispensabile utilizzare una stratigrafia che possa contenere la trasmittanza termica.

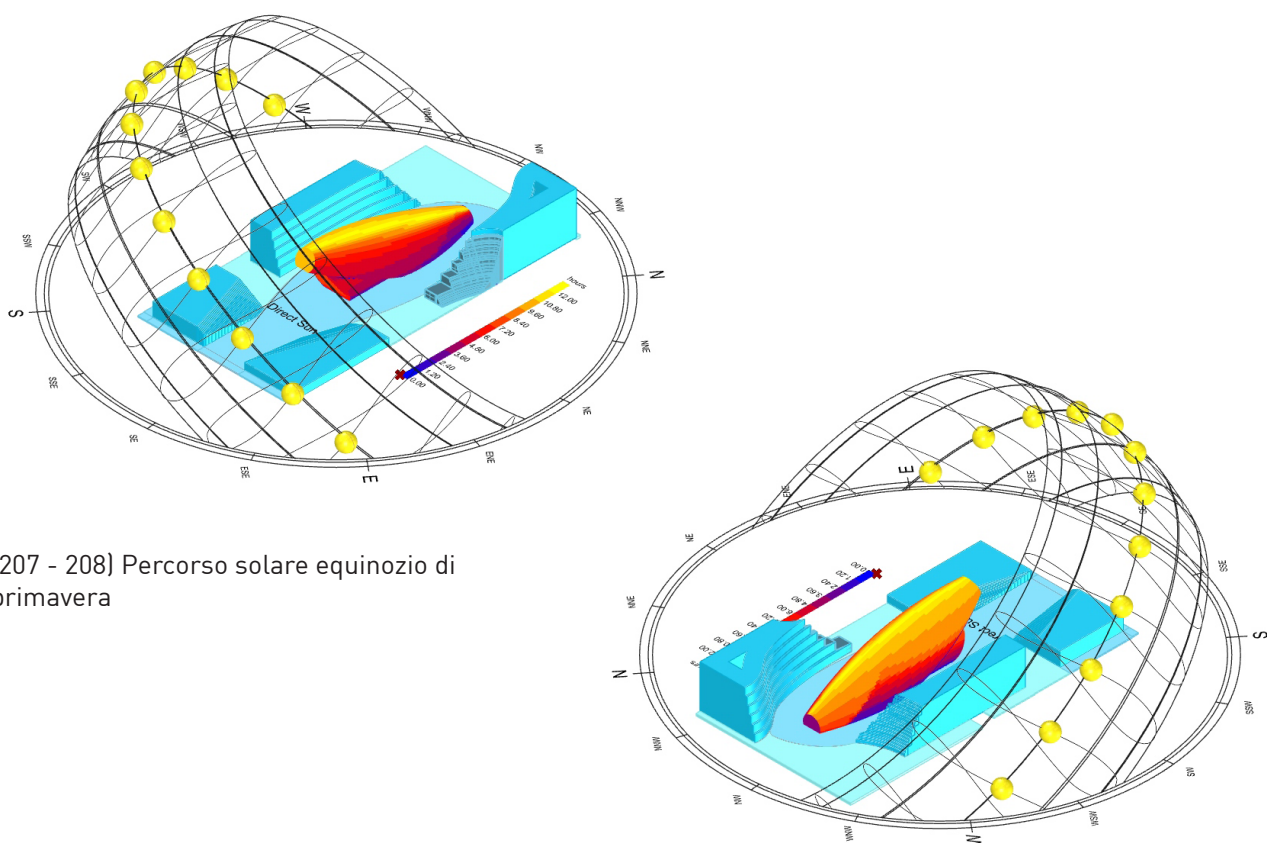
Come si può notare l'intensità solare varia molto in base all'orario di esposizione come è logico che sia per via della posizione del sole. In questo caso è molto semplice notare come l'intensità sia molto più elevata e distribuita su tutto l'edificio alle 12.30, mentre alle 9 e alle 18 la superficie in ombra sia maggiore.

5.5.1.3 - Ore 18:00



(205 - 206) Equinozio di primavera ore 18:00

5.5.1.4 - Giornaliero



(207 - 208) Percorso solare equinozio di primavera

5.5.2 - Solstizio d'estate 21 Giugno

5.5.2.1 - Ore 9:00



[209 - 210] Solstizio d'estate ore 9:00

5.5.2.2 - Ore 12:30



[211 - 212] Solstizio d'estate ore 12:30

Il solstizio d'estate evidenzia una copertura solare quasi totale in molte ore della giornata.
L'auditorium in particolare viene coperto dalla luce solare su tutta la sua superficie rendendo indispensabile utilizzare una stratigrafia che possa contenere la trasmittanza termica.

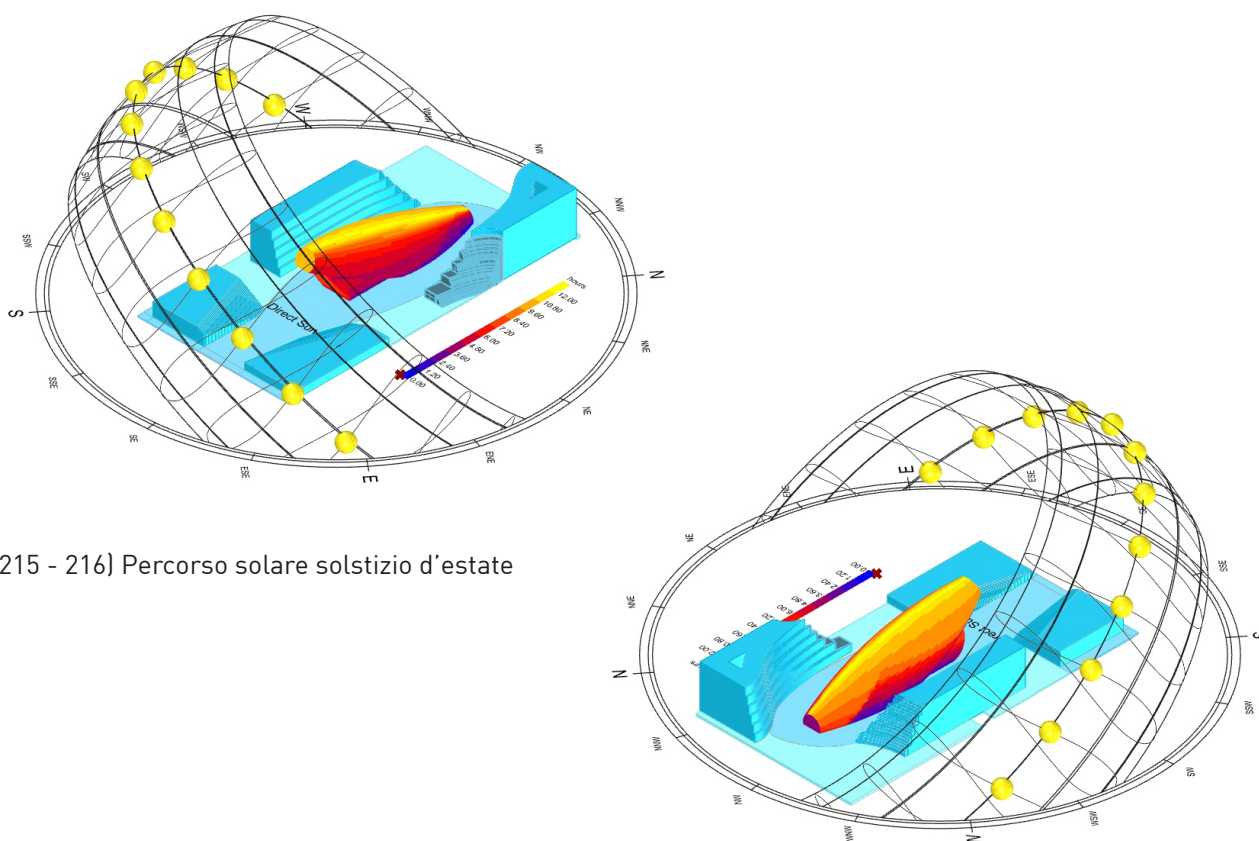
Anche in questo caso ovviamente le 12.30 sono l'orario con la maggiore esposizione solare, inoltre è anche possibile notare come rispetto agli altri solstizi ed equinozi l'esposizione sia decisamente maggiore.

5.5.2.3 - Ore 18:00



[213 - 214] Solstizio d'estate ore 18:00

5.5.2.4 - Giornaliero



[215 - 216] Percorso solare solstizio d'estate

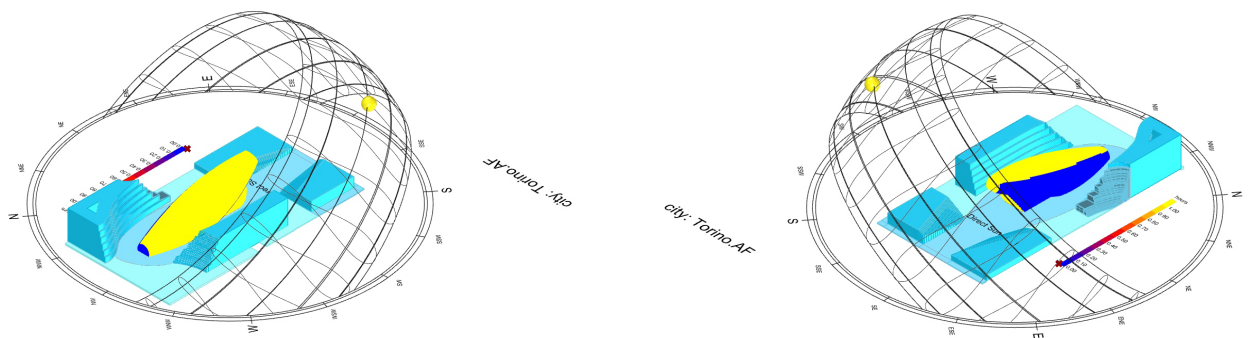
5.5.3 - Equinozio d'autunno 23 Settembre

5.5.3.1 - Ore 9:00



[217 - 218] Equinozio d'autunno ore 9:00

5.5.3.2 - Ore 12:30



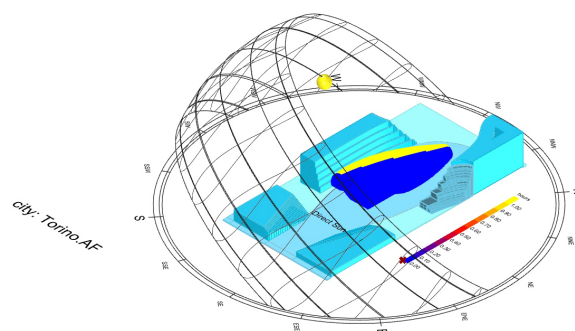
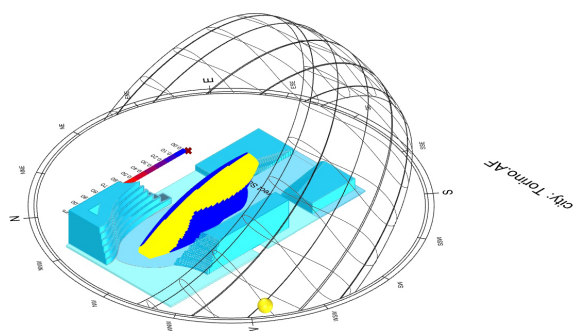
[219 - 220] Equinozio d'autunno ore 12:30

l'equinozio d'autunno evidenzia una copertura solare molto buona in tutte le ore della giornata, molto simile a quelle dell'equinozio di primavera.

L'auditorium in particolare viene coperto dalla luce solare su tutta la sua superficie rendendo indispensabile utilizzare una stratigrafia che possa contenere la trasmittanza termica.

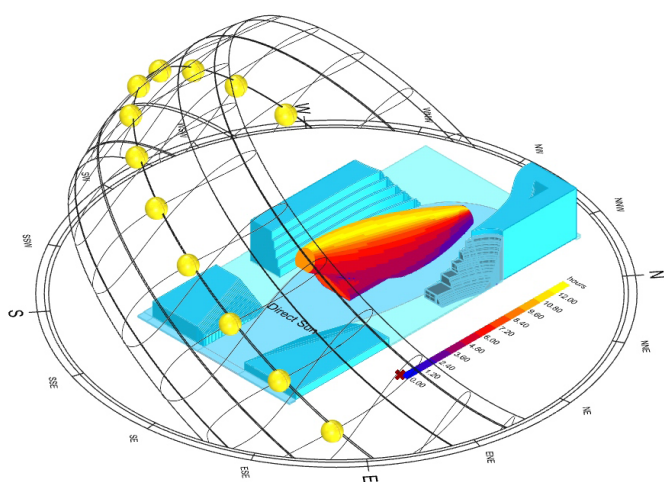
Questo risultato in realtà è molto simile a quello ottenuto nel solstizio di primavera, con differenze minime riguardo alle zone in ombra durante la giornata. Questo di fatto rende questa situazione la più frequente e quella da tenere in maggior considerazione durante le fasi di progetto.

5.5.3.3 - Ore 18:00

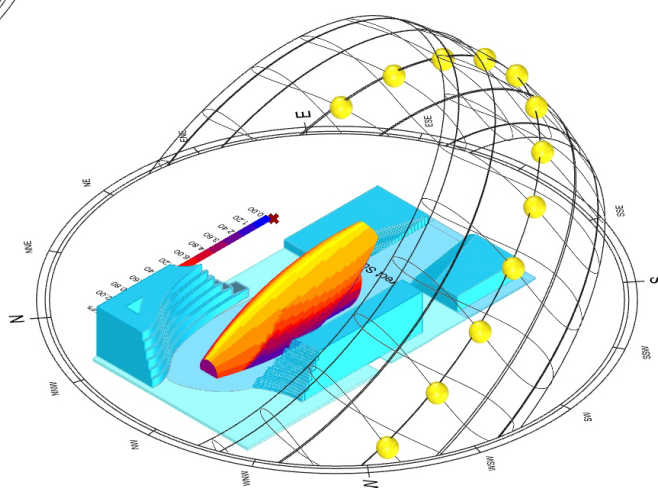


(221 - 222) Equinozio d'autunno ore 18:00

5.5.3.4 - Giornaliero



(223 - 224) Percorso solare equinozio d'autunno



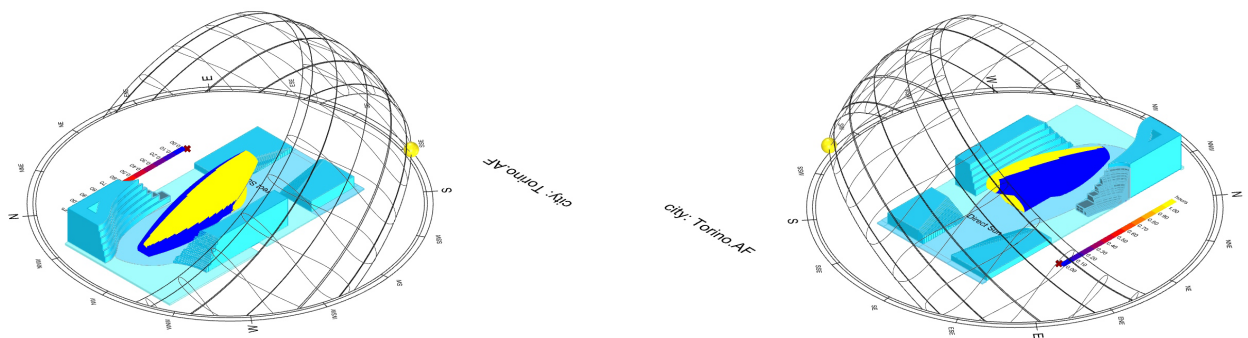
5.5.4 - Solstizio d'inverno 22 Dicembre

5.5.4.1 - Ore 9:00



[225 - 226] Solstizio d'inverno ore 9:00

5.5.4.2 - Ore 12:30

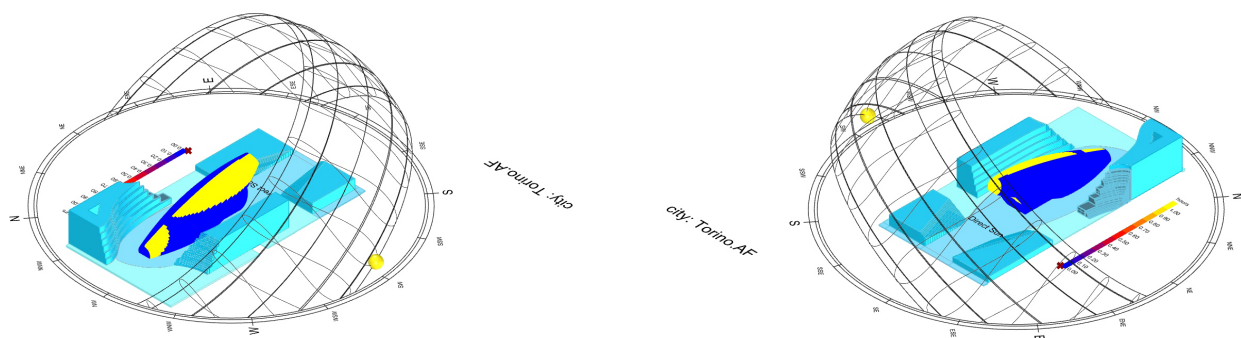


[227 - 228] Solstizio d'inverno ore 12:30

l'equinozio d'inverno evidenzia una ridotta capacità solare, per cui sarà importante pensare ad una stratigrafia in grado anche di contenere il calore, in modo da limitare la necessità di riscaldamento dell'edificio.

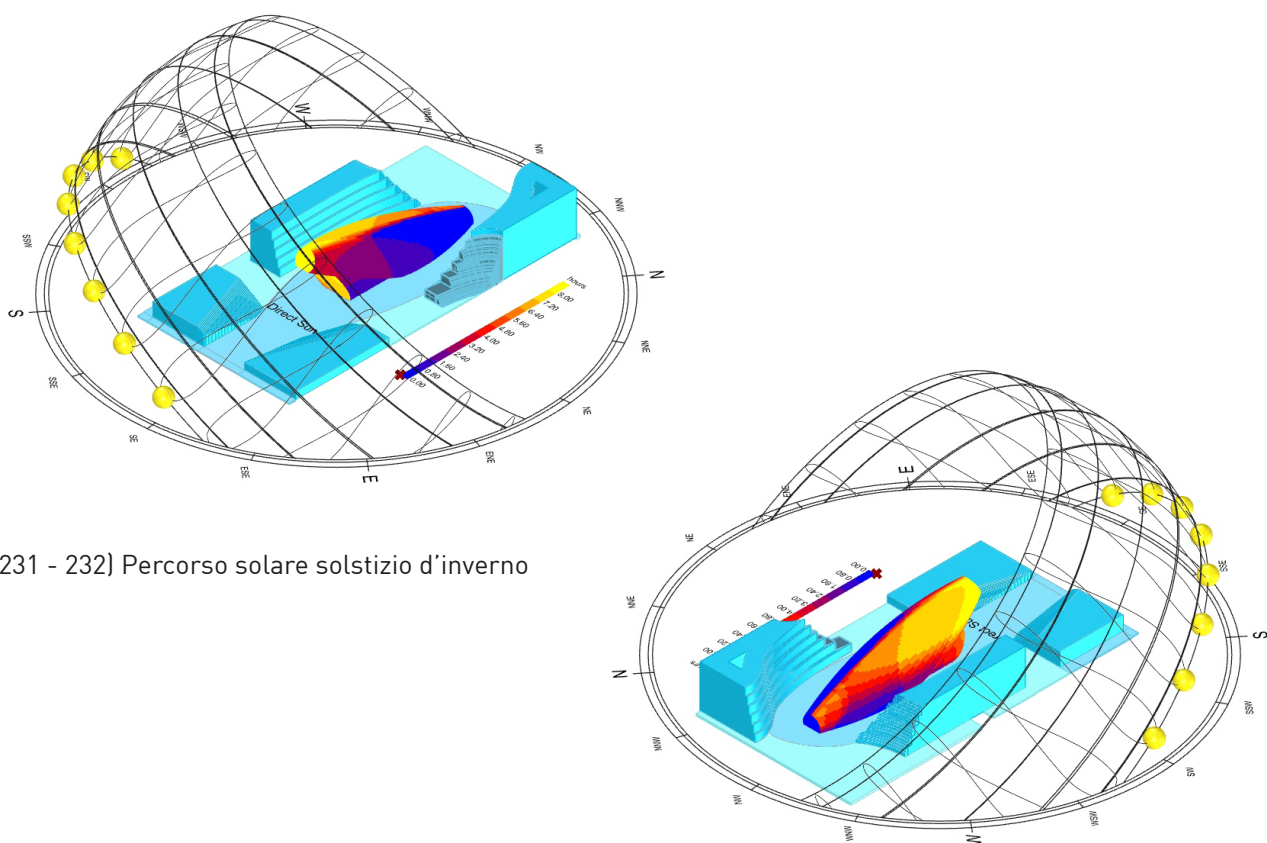
In questo caso l'irradiazione è estremamente bassa, con pochissime zone solari esposte e quasi solo durante le ore in cui il sole è più alto.

5.5.4.3 - Ore 16:00



[229 - 230] Solstizio d'inverno ore 16:00

5.5.4.4 - Giornaliero



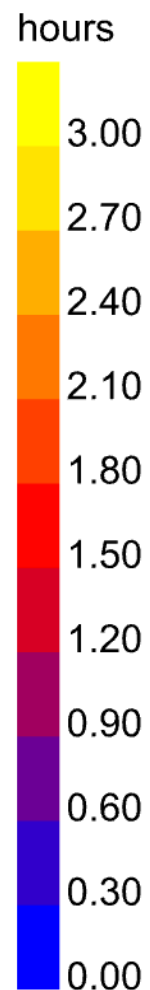
[231 - 232] Percorso solare solstizio d'inverno

Grazie a questa analisi mi è stato possibile capire per quanto tempo l'auditorium sarà soggetto a irradiazione solare e da qui adottare soluzioni efficaci a livello di stratigrafia e impianti.

Nel capitolo 7 inoltre verrà approfondita la questione della stratigrafia creando delle aperture dinamiche e funzionali all'interno dei pannelli di finitura.

Grazie alla legenda (233) ci è stato anche possibile distinguere le intensità giornaliere dell'illuminazione a cui sarebbe stato soggetto l'auditorium, questa legenda si riferisce in particolare al tempo in cui una specifica parte dell'edificio è soggetta a illuminazione.

Infatti, nel caso in cui abbiamo la massima esposizione si hanno 3 ore di irradiazione su 24 ed è indicato in colore giallo, e così via fino ad arrivare ai punti blu che sono quelli che non vengono mai illuminati durante il giorno.



(233) esempio di legenda che indica tramite gradiente colorato il numero di ore a cui una superficie viene esposta all'irraggiamento solare nell'arco di una giornata.

Fonti

Articoli

Paula Afonso , Vera Pires, Paula Faria, Antônio Azzalini, Luis Lopes, Paulo Mourão and Ruben Martins - A Novel Approach for the Reuse of Waste from the Extractive and Processing Industry of Natural Stone Binders: Development of Stone Composites - 2023 - Marijana.

Elenco immagini con fonti complete

(135) Concept sviluppo altezza massima superficie di progetto (Fonte: elaborato di progetto).

(136) Officine grandi riparazioni (OGR) (Fonte: Turismotorino.org/it/OGR-torino)

(137) Energy center (Fonte: Corradinoarchitetto.com)

(138 - 142) Concept suddivisione area di progetto (Fonte: elaborato di progetto).

(143 - 145) Rappresentazione prima idea di progetto (Fonte: elaborato di progetto).

(146 - 148) Rappresentazione seconda idea di progetto (Fonte: elaborato di progetto).

(149 - 152) Rappresentazione terza idea di progetto (Fonte: elaborato di progetto).

(153 - 154) Rappresentazione idea definitiva di progetto (Fonte: elaborato di progetto).

(155) Concept continuità geometrie (Fonte: elaborato di progetto).

(156) Concept inclinazione fabbricati (Fonte: elaborato di progetto).

(157) Modello fisico versione finale (Fonte: elaborato di progetto).

(158-163) Concept composizione facciate esterne edificio residenziale (Fonte: elaborato di progetto).

(164-167) Concept composizione facciata interna residenziale (Fonte: elaborato di progetto).

(168-169) Facciate OGR (Fonte: foto realizzata il 29-07-2024 durante sopralluogo).

(170) Progetto Resource Rows (fonte: Lendager.com)

(171) Taglio parete in mattoni con sega circolare (Fonte: Lendager.com)

(172) Disposizione edifici demolibili in scala 1:250000 (Fonte: elaborato di progetto)

(173) Muro di cinta cantiere a lato stazione porta Susa (Fonte: foto realizzata il 29-07-2024 durante sopralluogo).

(174) Ex fabbriche Firsat, Moncalieri (Fonte: Notiziariodelweb.com).

(175) Ex cascina abbandonata, Grugliasco (Fonte: Google Earth).

(176) Fabbrica abbandonata, corso Mortara (Fonte: Google Earth)

(177) Muro di recinzione cantiere via Passo Buole (Fonte: Google Earth).

(178) Sega a nastro per mattoni (Fonte: Youtube.com)

(179) Levigatrice industriale per pavimenti (Fonte: Lmarmachines.com)

(180 - 181) Concept suddivisione facciata (Fonte: elaborato di progetto).

(182-184) Esempio suddivisione e numerazione pannelli di facciata (Fonte: elaborato di progetto).

(185) Esempio di pattern di facciata (Fonte: elaborato di progetto).

(186) Esempio di pattern Voronoy per pietra in facciata (Fonte: elaborato di progetto).

(187) Muro di facciata OGR, com'è possibile notare le pietre ricordano il pattern Voronoy (Fonte: foto realizzata durante sopralluogo 29-07-2024).

(188-193) Concept composizione elementi in pietra per facciate (Fonte: elaborato di progetto).

(194) Fanghi di natura marmorea (Fonte: Paula Afonso , Vera Pires, Paula Faria, Antônio Azzalini, Luis Lopes, Paulo Mourão and Ruben Martins - A Novel Approach for the Reuse of Waste from the Extractive and Processing Industry of Natural Stone Binders: Development of Stone Composites - 2023 - Marijana - pp. 6)

(195) Fanghi di natura marmorea (Fonte: Paula Afonso , Vera Pires, Paula Faria, Antônio Azzalini, Luis Lopes, Paulo Mourão and Ruben Martins - A Novel Approach for the Reuse of Waste from the Extractive and Processing Industry of Natural Stone Binders: Development of Stone Composites - 2023 - Marijana - pp. 8)

(196) Assonometria complessiva di progetto, riassuntiva di tutte le scelte formali (Fonte: elaborato di progetto).

(197) Schema concettuale aree progetto (Fonte: elaborato di progetto).

(198) File epw e relativo componente di gestione (Fonte: elaborazione progettuale)

(199) Sunpath, comando di gestione dell'andamento solare, e direct sun hours, ovvero il gestore degli output solari (Fonte: elaborazione progettuale).

(200) Percorso solare generato intorno l'area di progetto (Fonte: elaborazione progettuale).

(201 - 232) Irraggiamenti solari negli equinozi primaverile e autunnale, solstizi estivo, invernale alle ore 9:00, 12:30, 18:00 e andamento durante la giornata (Fonte: elaborazione eseguita tramite ladybug per Grasshopper).

(233) Legenda ladybug (Fonte: elaborazione eseguita tramite ladybug per Grasshopper).

06

“The Shell”: l’auditorium. Definizione della struttura portante

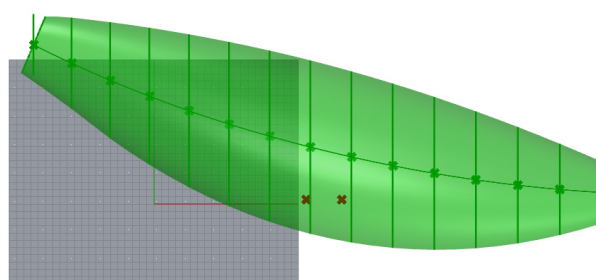
L'auditorium denominato "The shell", per via della forma che ricorda quella di una conchiglia, è stato pensato come una struttura architettonicamente complessa che potesse dare una forte caratterizzazione al quartiere e intorno al quale si sarebbe sviluppato il resto del progetto.

La geometria dell'auditorium è stata rielaborata da capo utilizzando Grasshopper e mantenendo l'auditorium sviluppato per l'atelier come riferimento per quanto riguarda le quote.

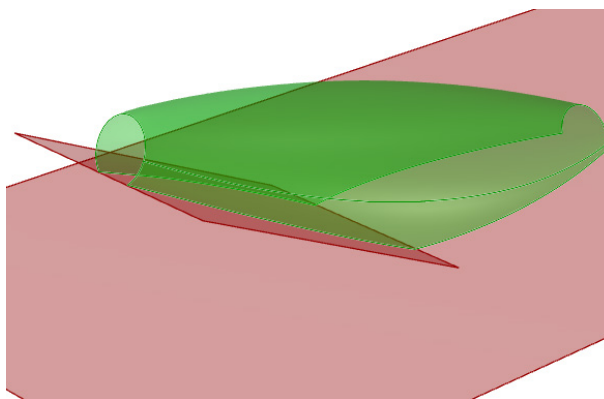
Prima di tutto ho generato la forma base che compone la curvatura principale dell'auditorium generando una serie di circonferenze che seguissero l'andamento della polilinea utilizzata anche per generare l'auditorium originale [234-235].

In secondo luogo, è stato necessario elaborare le suddivisioni, una orizzontale e una diagonale a 60° della geometria, in modo da ottenere la superficie principale completa dell'auditorium [236].

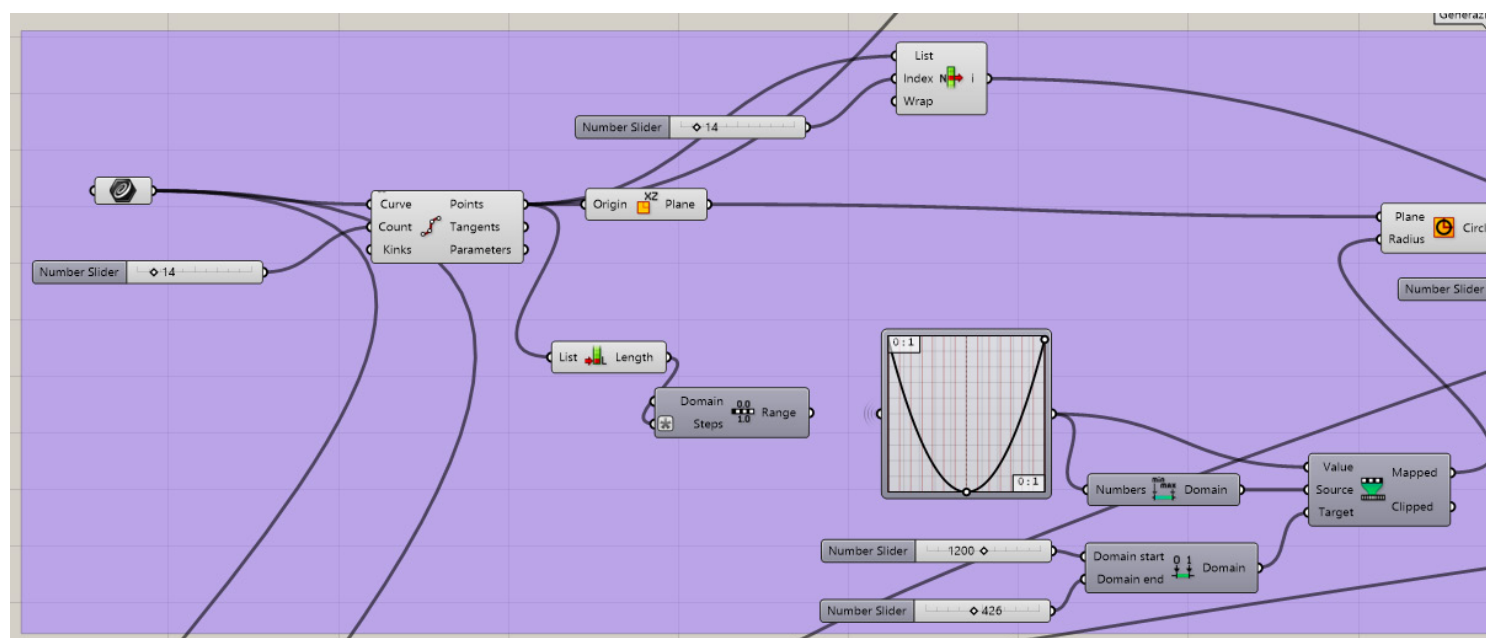
A questo punto ho generato anche la geometria del cilindro alla base



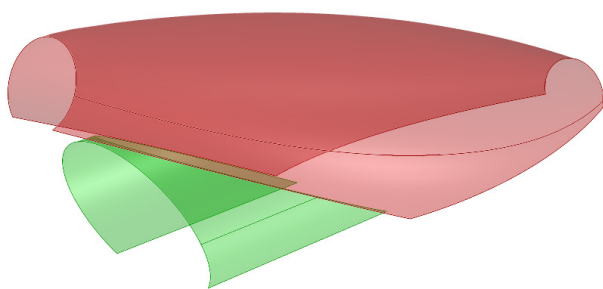
(235) Forma base dell'auditorium



(236) Forma base dell'auditorium



(234) Forma base dell'auditorium

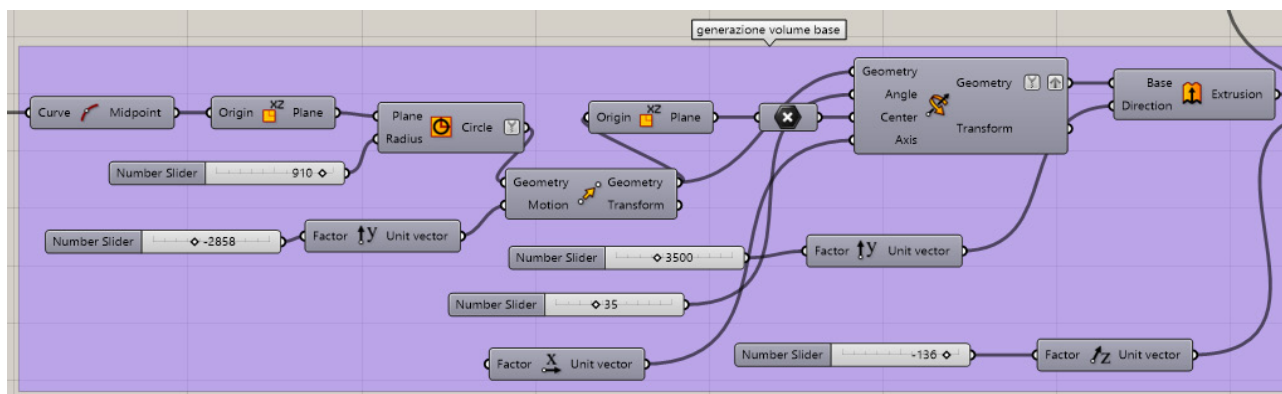


[237] Forma finale dell'auditorium con volume alla base

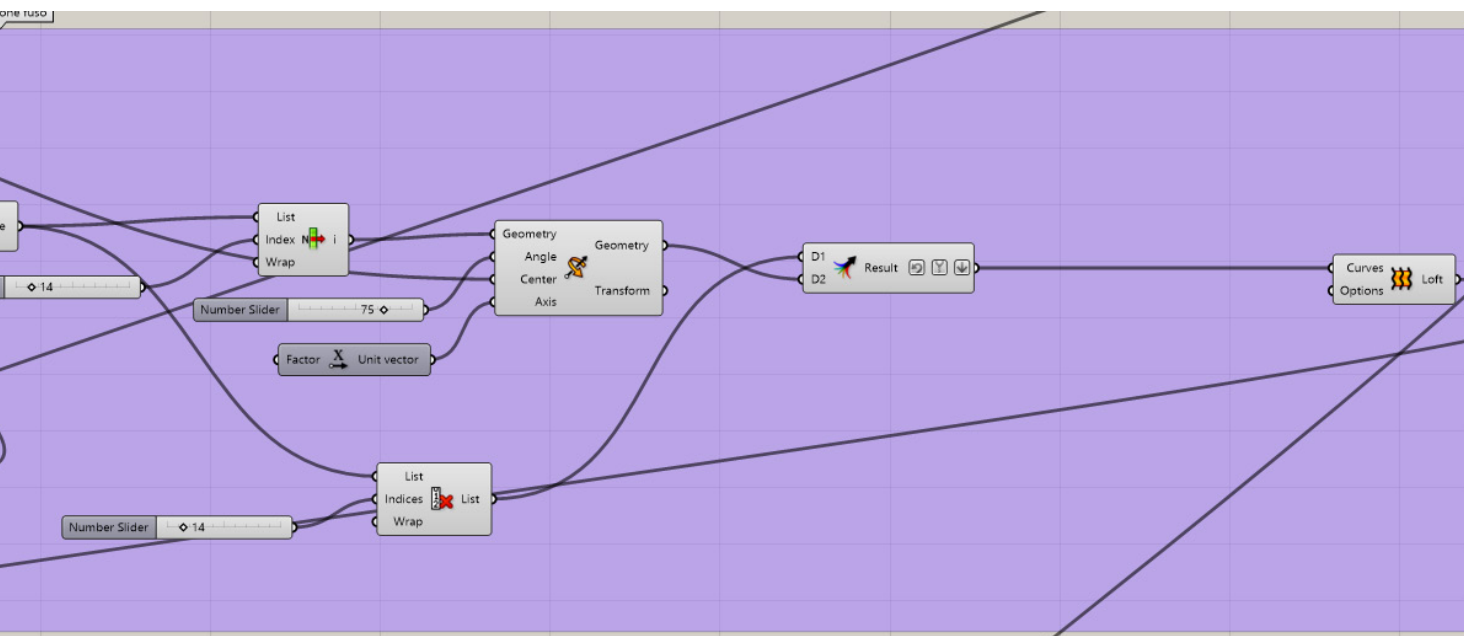
dell'auditorium, ovviamente mantenendo le proporzioni originarie dell'auditorium [237-238].

Una volta ottenuta la geometria dell'auditorium ho realizzato un'analisi delle dimensioni complessive [239-240].

L'auditorium avrà una lunghezza di 80 m, una larghezza di 24 m e un'altezza di 25 m. Il tutto sarà suddiviso su quattro piani fuori terra, il piano terra sarà dedicato ad auditorium e ingresso, il primo piano ad



[238] Codice Grasshopper per la realizzazione della geometria di base

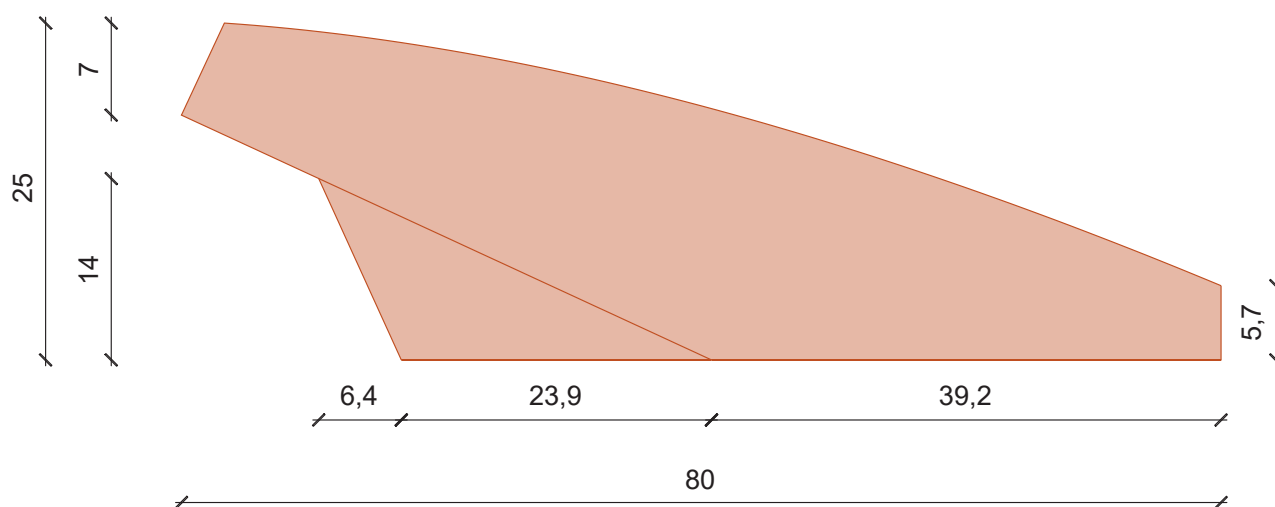


auditorium e un piccolo spazio dove acquistare bevande o cibo da consumare all'interno, il secondo oltre all'auditorium ospiterà anche degli uffici dedicati alla gestione dell'auditorium e all'organizzazione di eventi al suo interno. Infine, il terzo e ultimo piano sarà dedicato esclusivamente ad un bar, che godrà di una vista molto gradevole sugli edifici intorno all'auditorium.

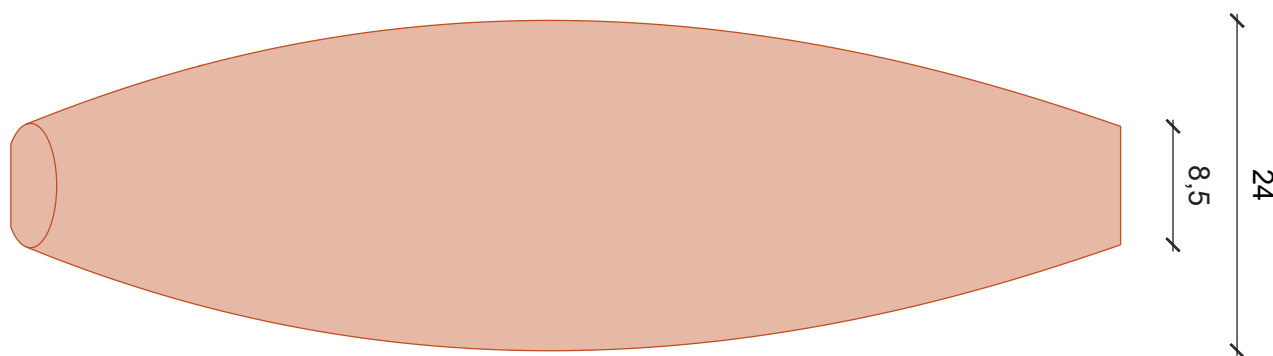
All'interno l'auditorium avrà un totale di 1000 posti a sedere, suddivisi in:

- 430 posti al piano terra
- 350 al primo piano
- 220 al secondo piano.

Oltre a questo, il bar sarà in grado di ospitare circa 80 persone contemporaneamente, ovviamente questo a prescindere dal fatto che l'auditorium abbia uno spettacolo o una presentazione in corso, grazie alle pareti insonorizzate che suddividono gli ambienti. Grazie all'ottima disponibilità di posti a sedere e al grande spazio a sua disposizione,



[239] Quote auditorium, vista laterale



[240] Quote auditorium, vista dall'alto

questo auditorium potrebbe diventare un polo attrattivo per tutta la città, diventando un edificio che si contraddistingue nel panorama cittadino torinese, fatto per la maggior parte di edifici molto regolari.

Inoltre, grazie alla sua posizione a due passi dal Politecnico e dalle OGR, potrebbe essere utilizzato per presentare progetti, proiezioni cinematografiche o spettacoli teatrali o musicali, magari organizzati da organizzazioni studentesche o simili.

Inoltre, potrebbe fornire un luogo di attrazione per le persone anche alla sera infatti, quest'area di Torino è priva di servizi

serali e di fatti è popolata principalmente di giorno, momento in cui è affollata da studenti e professionisti che lavorano lì vicino.

Avere una struttura di questo tipo sicuramente fornirebbe anche a coloro che vivono nelle vicinanze la possibilità di andare al cinema, vedere uno spettacolo teatrale o assistere ad una presentazione senza doversi spostare troppo da casa.

Infine, la forma particolare dell'edificio potrebbe attirare molte persone incuriosite dalla forma architettonica, rendendo ancora più attiva questa parte di città.

6.1 - Suddivisione struttura

La prima cosa da analizzare inerente all'auditorium è sicuramente la struttura portante essendo una forma molto irregolare.

La struttura dell'auditorium si compone di 3 livelli strutturali, il primo livello ovviamente supporta i successivi, e si compone di archi strutturali in acciaio (241).

Il secondo livello è composto da travi in legno di recupero (242) per realizzare le quali è stato preso come riferimento uno dei progetti visti alla conferenza Fabricate 2024, e di cui ho parlato nel secondo capitolo (2.5.1.3 - Utilizzo del legno in elementi complessi di piccola scala).

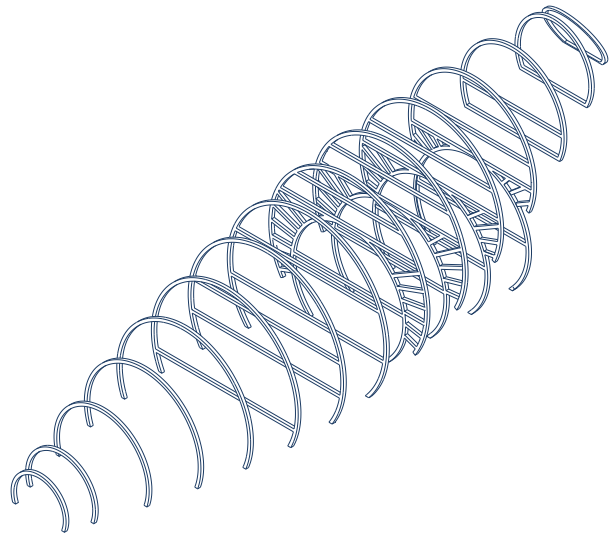
Ovviamente la scala di progetto è nettamente superiore ma dovendo sorreggere solo dei pannelli di copertura la resistenza meccanica di queste travi non dovrà essere eccellente.

Per quanto riguarda l'interno del progetto, ovvero il sistema che sorregge i solai, ho scelto di utilizzare come secondo livello strutturale delle semplici travi IPE.

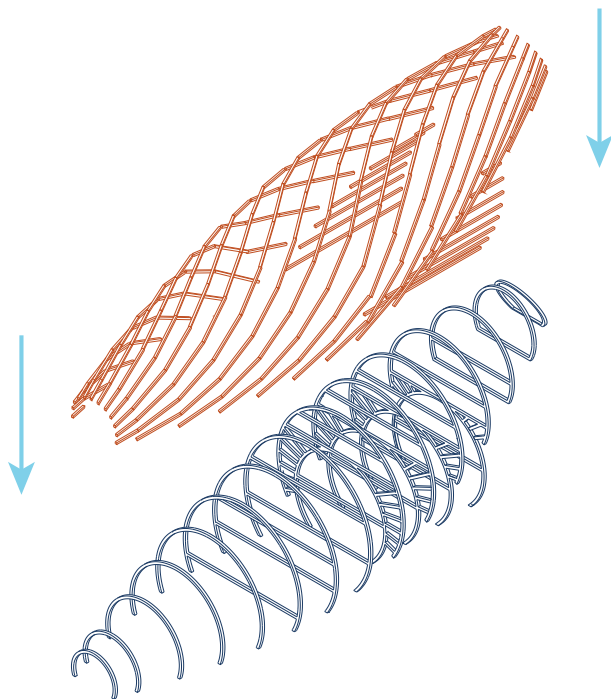
Infine, come terzo livello strutturale ho scelto di utilizzare degli archi in legno lamellare (243) molto più sottili rispetto a quelli del primo livello, questo consentirà di utilizzare pannelli di finitura più piccoli e semplici da trasportare e assemblare.

Mentre per l'interno ho scelto di utilizzare sempre delle travi IPE più piccole.

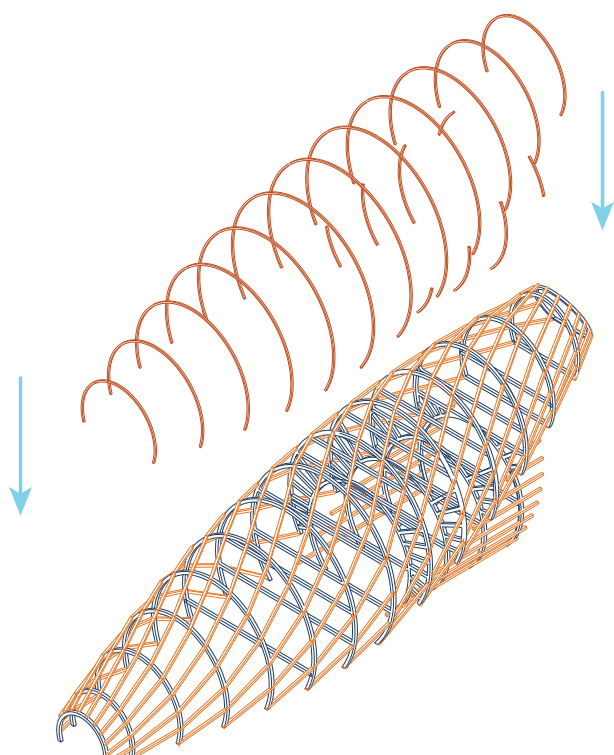
Nei successivi paragrafi verranno illustrati nel dettaglio tutti questi elementi strutturali (244) con particolare attenzione al metodo con cui si giuntano tra loro e il metodo di produzione.



(241) Struttura ad archi completa

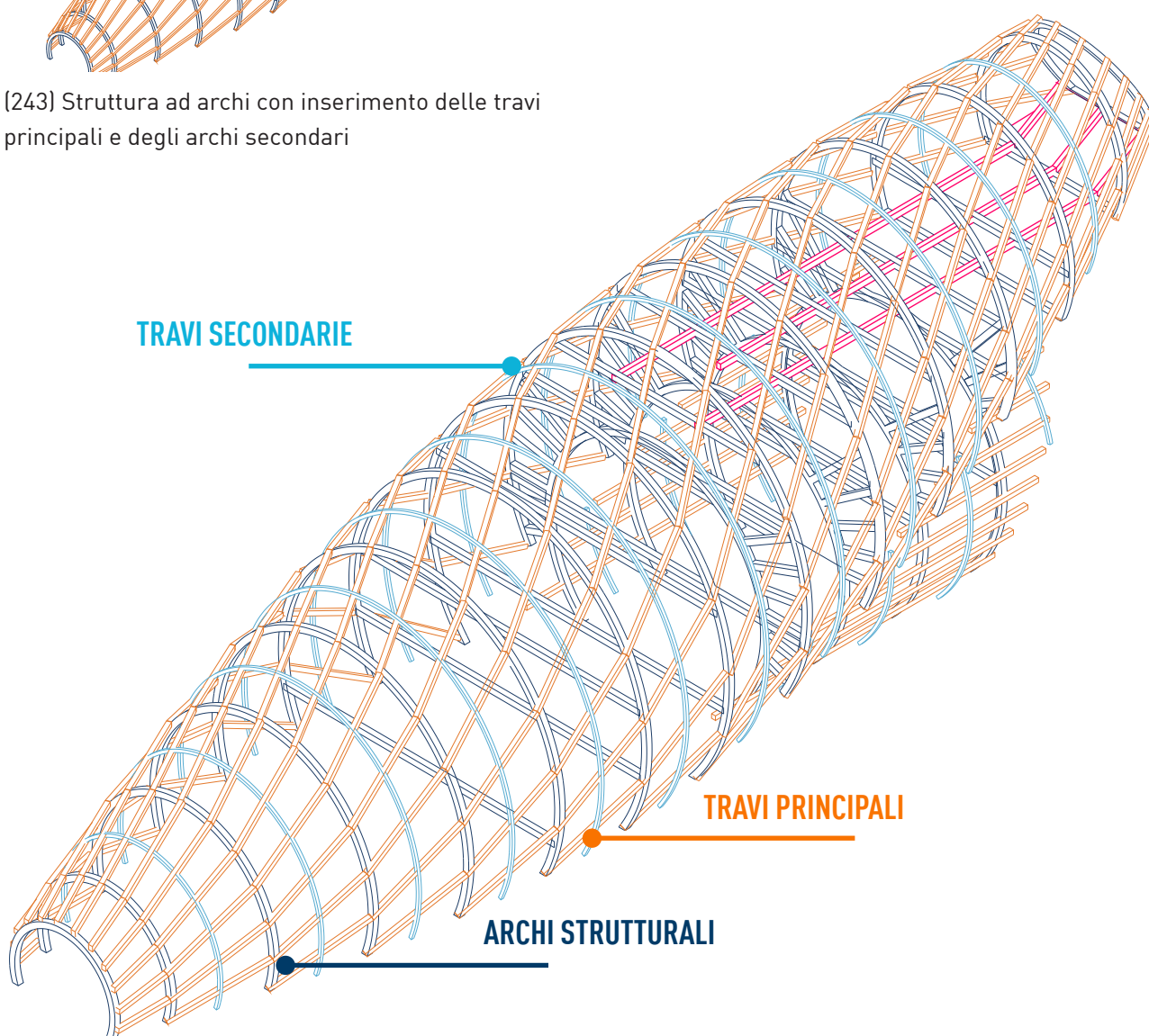


(242) Struttura ad archi con inserimento delle travi principali



La struttura in totale sarà composta da 15 archi strutturali, ognuno dei quali sarà a sua volta composto da 11 strati di lamelle d'acciaio tagliate a laser, ovviamente il numero di componenti di ciascun arco varierà in base alle dimensioni dello stesso. Le travi principali invece saranno 212, intervallate tra un arco strutturale e l'altro, mentre le travi secondarie saranno 190 e verranno suddivise in corrispondenza di ogni trave principale.

[243] Struttura ad archi con inserimento delle travi principali e degli archi secondari



[244] Struttura portante esterna completa

6.2 - Archi strutturali

6.2.1 - Realizzazione forme degli archi

Per elaborare gli archi strutturali elaborato una definizione con Grasshopper basandomi sulla geometria che compone l'auditorium.

L'operazione che ho svolto consiste nella suddivisione della geometria base dell'auditorium in più tratti, nello specifico ho deciso di inserire una distanza tra un arco e l'altro di quasi 6 m.

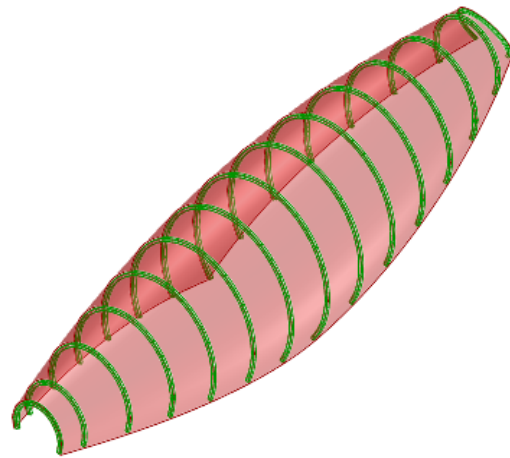
Da questa suddivisione semplice ho effettuato un offset verticale di 42 cm di questa linea e effettuato un loft, in modo da ottenere una superficie generata tra le due linee, successivamente estrusa sempre di 42 cm [245].

Tutto questo processo è stato automatizzato da una definizione realizzata su Grasshopper, che ci ha consentito di ottenere velocemente tutte le forme di base degli archi strutturali [246].

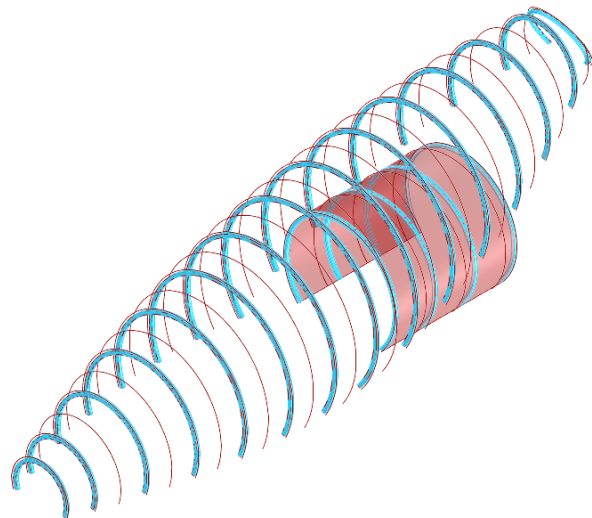
Questo stesso processo è stato ripetuto con alcune differenze nelle inclinazioni per realizzare gli archi della parte bassa dell'auditorium, creando dei cerchi identici e corrispondenti agli archi superiori [247].

Questi secondi archi sono presenti solo nell'ultima parte della struttura, ovvero dove l'auditorium inizia ad alzarsi creando il taglio diagonale.

Queste sagome saranno solo la base di partenza per la realizzazione degli archi completi; infatti, sebbene la forma dei primi cinque archi sarà completa già in questo modo, tutti gli archi successivi necessiteranno di ulteriori modifiche prima di poter ottenere le forme definitive. Questo per via del fatto che gli archi successivi dovranno sorreggere anche gli spalti del primo e del secondo piano,

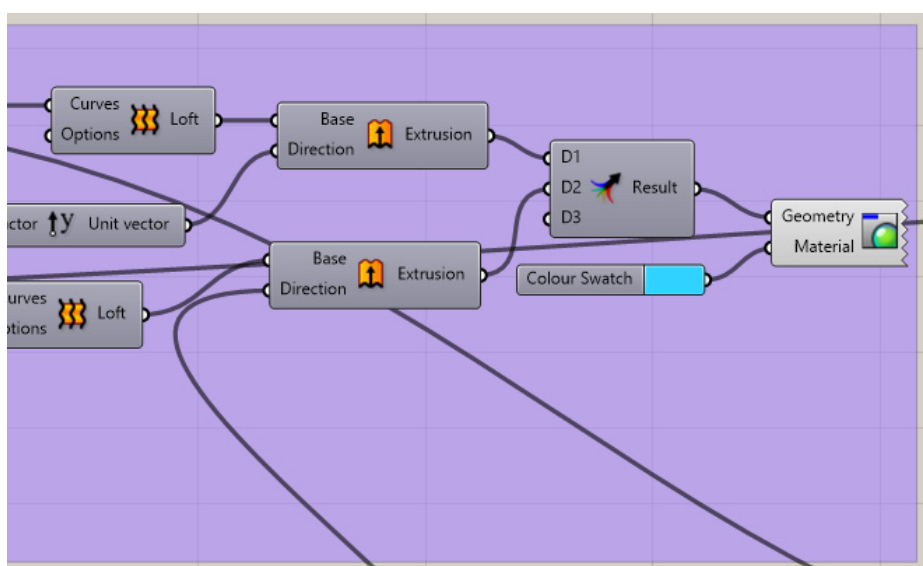
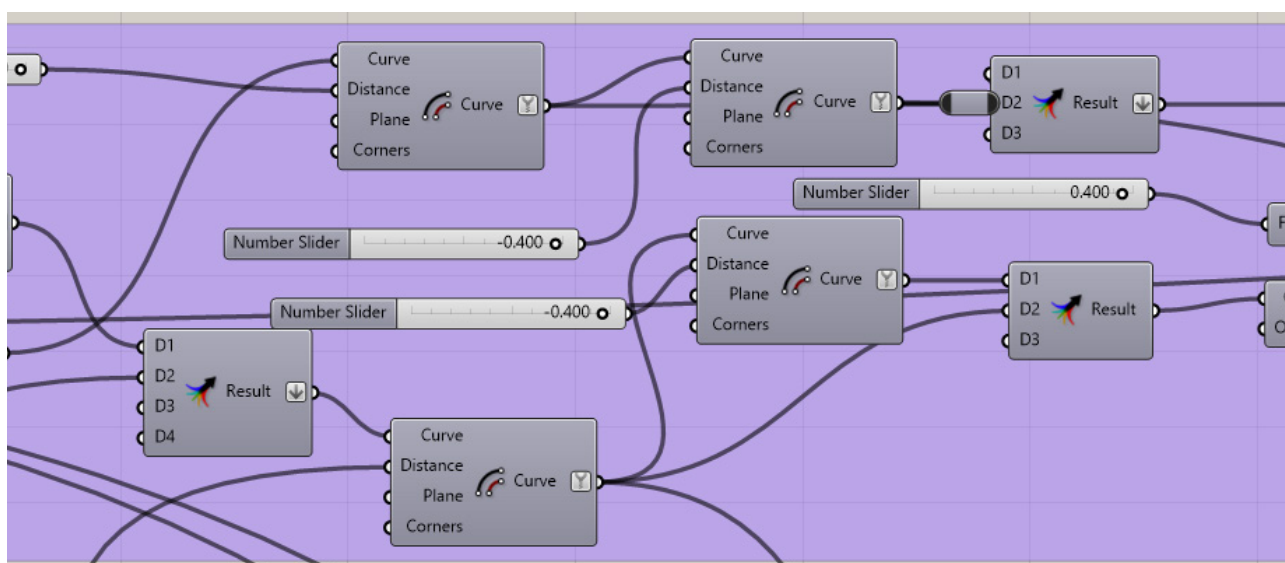
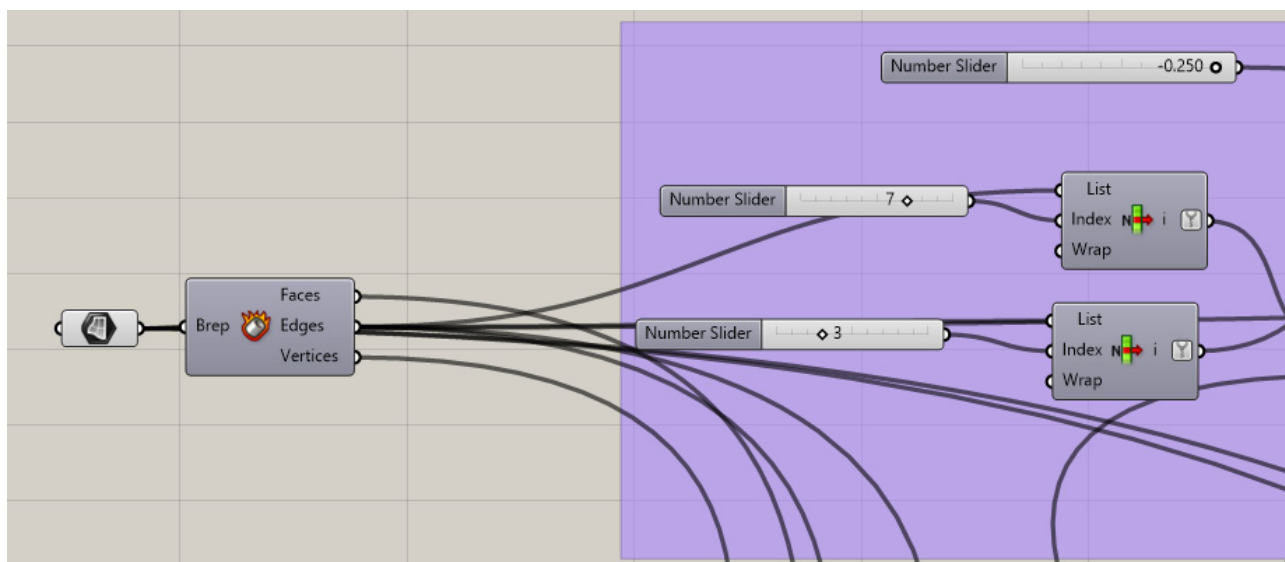


[245] Archi strutturali principali



[246] Archi piano terra circolari

quindi necessiteranno di un elemento orizzontale.



[247] Definizione di Grasshopper utilizzata per realizzare forme base archi strutturali

che funge da trave collegando i due lati dell'arco.

Per questo motivo l'arco numero 6 avrà un elemento orizzontale, mentre il 7 e l'8 ne avranno 2 essendo necessari anche per sorreggere il secondo piano.

Per posizionare questi elementi ho prima dovuto modellare gli spalti che sarebbero stati sorretti, in modo tale da avere le giuste altezze che avrebbero consentito la visione da qualsiasi posto dell'auditorium (248).

Ad esempio, nel caso del quinto arco strutturale ho posizionato la trave a circa 3.5 m di altezza, questo consentirà il passaggio senza nessun problema al di sotto della trave e una corretta visione sia dal piano terra che dal primo piano (249).

Questo stesso processo è stato ripetuto anche col gli archi 6 e 7.

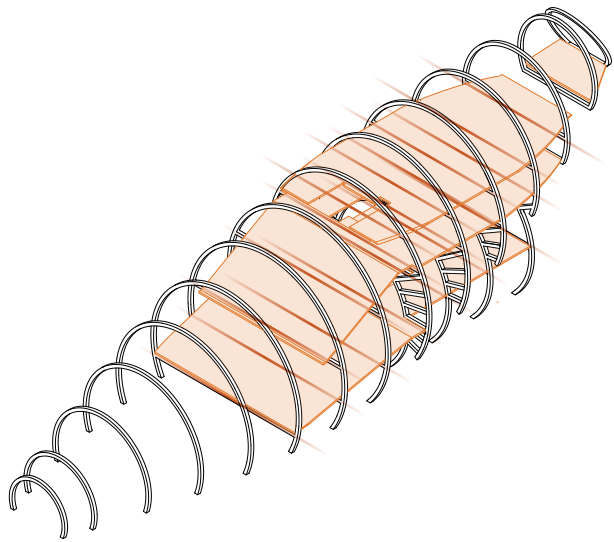
A partire dall'ottavo arco invece oltre alla necessità di creare delle travi vi era anche la necessità di collegare gli archi alla base con quelli superiori, per farlo era necessario connettere con degli elementi a raggio i due archi tra di loro.

Per tracciare le linee base che compongono questi raggi ho iscritto alla circonferenza dell'arco superiore un poligono con 34 lati e ho tracciato una retta che intersecasse il centro del poligono e ciascuno dei suoi vertici (250).

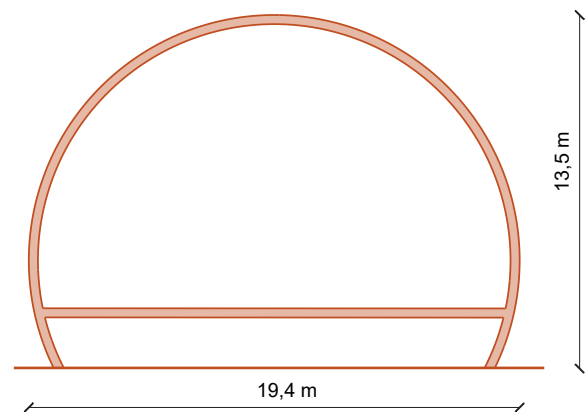
Una volta creati i raggi ho scelto quelli che intersecassero entrambi gli archi senza passare attraverso i solai, infine ho estruso la linea ottenendo una superficie e successivamente un raggio dello stesso spessore dell'arco strutturale (251).

Ovviamente ho interrotto i raggi in corrispondenza delle travi che sorreggono i piani superiori, in modo che non intralcino il passaggio in nessun modo (252).

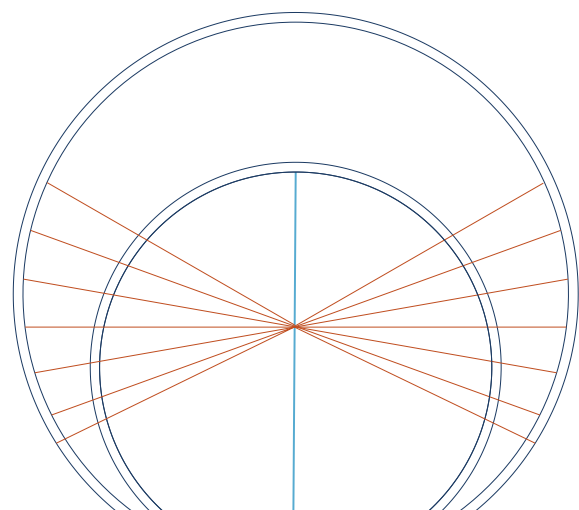
Questa stessa serie di operazioni è stata eseguita negli archi 9-10-11-12, mentre



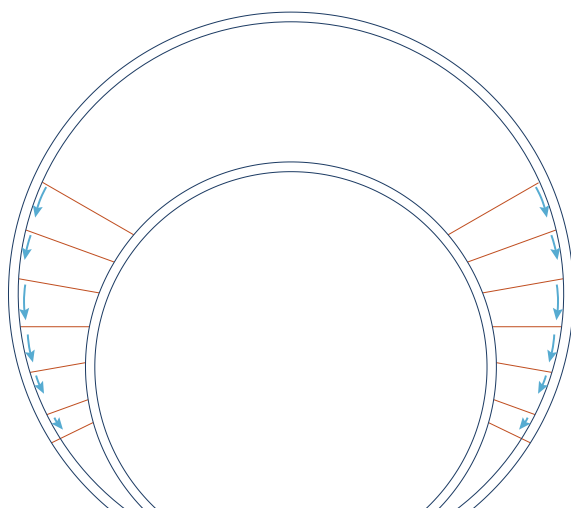
(248) Modello con indicati i punti di passaggio di tutte le travi che sorreggono i solai



(249) Arco numero 5 con un elemento orizzontale posizionato a 3.5 m di altezza



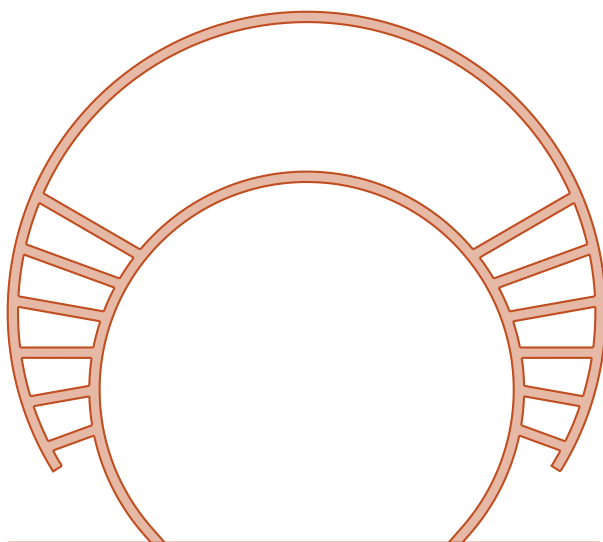
(250) Raggi di suddivisione e contatto tra archi strutturali.



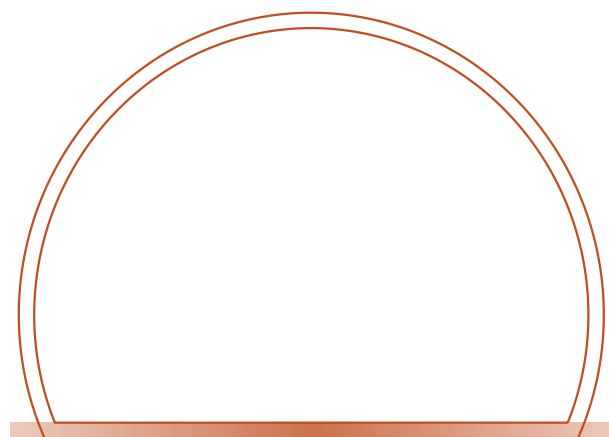
[251] Estrusione degli archi per creare le superfici da estrarre.

per quanto riguarda gli ultimi 3 archi (dal 13 al 15) invece sono stati realizzati come nel caso dei primi, con l'unica differenza che in questo caso è stata aggiunta anche una "trave" per concludere la forma geometrica degli archi che riprendesse quella della geometria di base con un taglio netto [253-254].

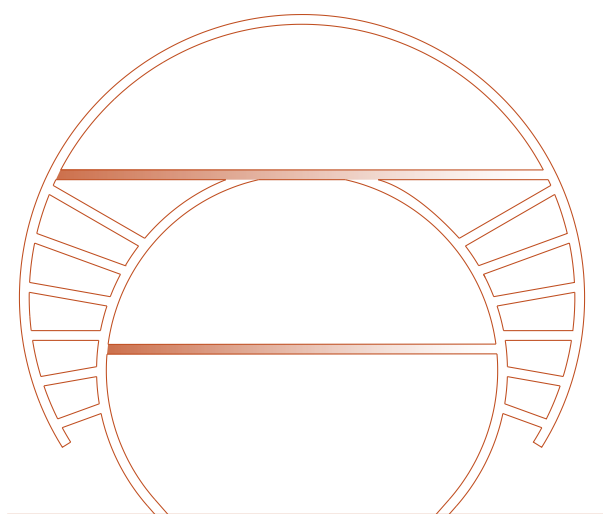
A questo punto avendo ottenuto tutte le geometrie di base e ho iniziato a lavorare sulla suddivisione in strati e al modo in cui questi avrebbero potuto essere assemblati.



[252] Raggi di suddivisione e contatto tra archi strutturali.



[254] Arco strutturale numero 13 con evidenziato il tratto di taglio che chiude la geometria



[253] Aggiunta travi archi strutturali

6.2.2 - Processo progettuale archi strutturali

Le dimensioni necessarie per gli archi che compongono questa struttura sono ovviamente molto importanti, l'arco più alto raggiunge quasi i 25 m per questo motivo era necessario studiare un modo per trasportarli e assemblarli semplicemente. Dunque, è stato fondamentale concepirli con queste caratteristiche e per ottenere dei risultati ideali e con dei tempi di fabbricazione molto rapidi ed efficienti ho scelto di realizzarli con delle lastre d'acciaio tagliate a laser.

Ovviamente il primo aspetto da considerare è il metodo di suddivisione degli archi che consentisse di dividere gli archi consentendo di unirli velocemente una volta arrivati in cantiere.

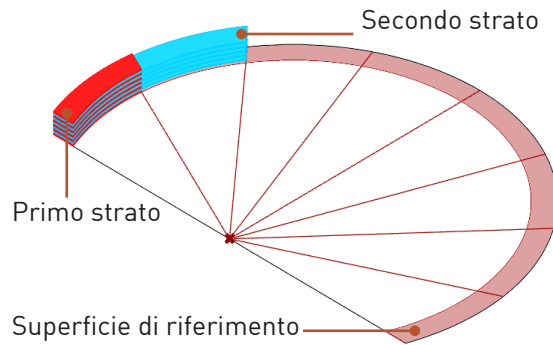
La strategia che ho deciso di adottare riguarda la suddivisione di ogni arco in strati, ognuno di questi strati avrà uno spessore da 2 cm.

La necessità ovviamente era quella di avere un primo strato suddiviso diversamente rispetto al secondo, questo per consentirne la giunzione a incastro tra i due, inoltre verrà lasciato uno spazio da 2 cm, rafforzando la suddivisione con dei distanziatori.

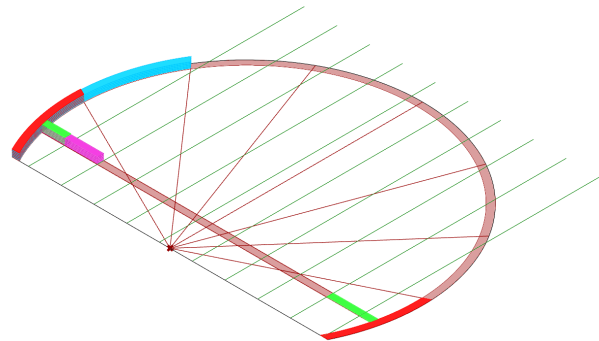
Per suddividere gli archi in modo rapido e veloce mantenendo gli stessi principi mi sono aiutato con una semplice definizione elaborata su Grasshopper (255), utilizzando come base di partenza le superfici base degli archi (256).

La definizione elaborata è stata utile solo per gli archi base; infatti, è pensata per suddividere la superficie in modo radiale, e non verticale, per questo motivo ad esempio gli archi con le travi non potrebbero essere suddivisi con questa definizione, per questo ne ho elaborato una piccola aggiunta.

L'aggiunta necessaria ovviamente era la



(255) Risultato ottenuto grazie all'algoritmo elaborato su Grasshopper



(256) Risultato ottenuto con l'algoritmo base in combinazione con la breve aggiunta dedicata alla trave

superficie di base della trave, la quale doveva essere suddivisa dalla restante superficie, questo per consentire il corretto funzionamento degli algoritmi (252), i quali essendo basati sulle superfici create su Rhino, se fossero collegate avrebbero subito entrambe le modifiche, realizzando così un esito non corretto.

Quindi ho collegato entrambe le superfici caricate al loro corretto algoritmo, il primo già utilizzato in precedenza per le suddivisioni radiali (257) e il secondo per le suddivisioni verticali necessarie per la trave (258-259).

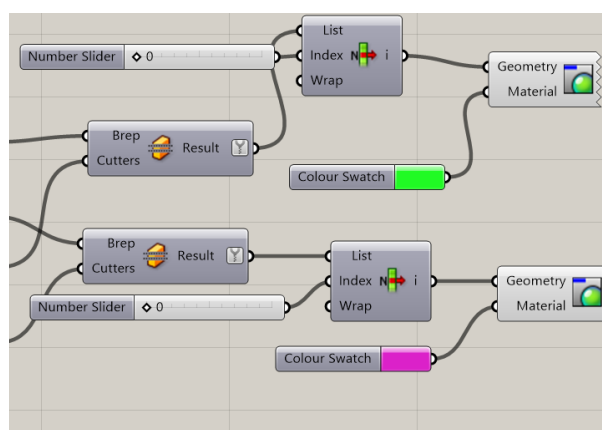
Ovviamente man mano che gli archi aumentavano di dimensioni è stato necessario aumentare anche la quantità di divisioni richieste, questo per mantenere dei pezzi che non superino i 6 m di lunghezza, facilitarne il trasporto in cantiere e soprattutto per rendere più semplice la produzione.

Per quanto riguarda gli archi doppi invece è stato necessario elaborare manualmente le suddivisioni, vista la maggiore complessità della geometria di base; tuttavia, il metodo non si discosta molto da quello utilizzato con Grasshopper; infatti, si basa su una serie di tagli radiali e verticali, con la differenza che i raggi sono stati trattati ognuno in modo differente, garantendo così una corretta suddivisione in grado di garantire la continuità strutturale.

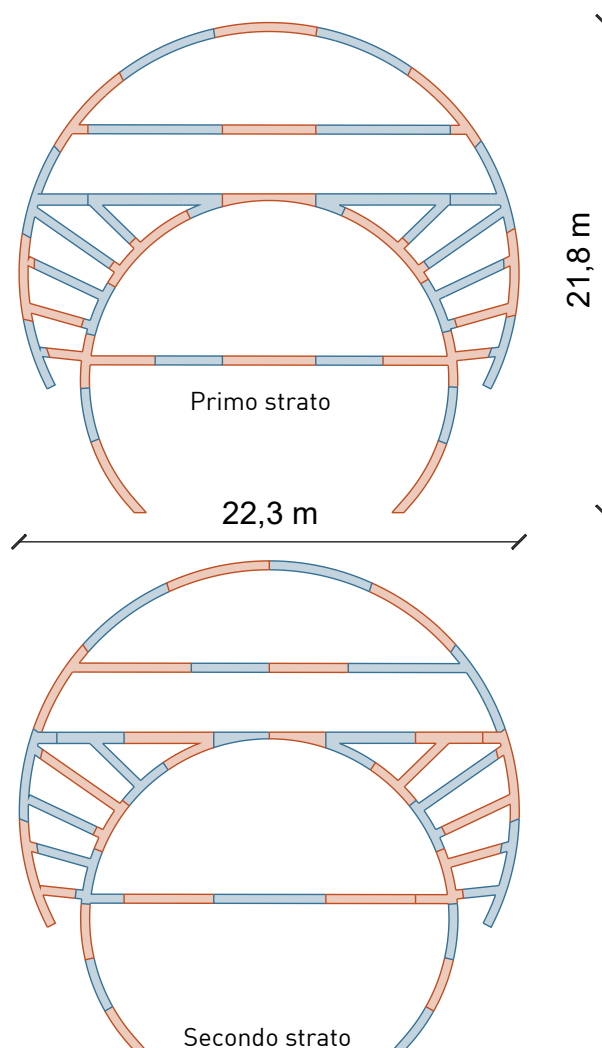
Il risultato finale (260) comprende una trentina di parti per ogni strato, rendendo di fatto questi archi un pò più complessi da assemblare.

Per finire gli ultimi archi, ovvero quelli dal 13 al 15 sono stati suddivisi con il medesimo metodo utilizzato per gli archi con le travi, ovvero suddividendo tramite l'algoritmo in senso radiale l'arco e verticalmente la trave che conclude la geometria.

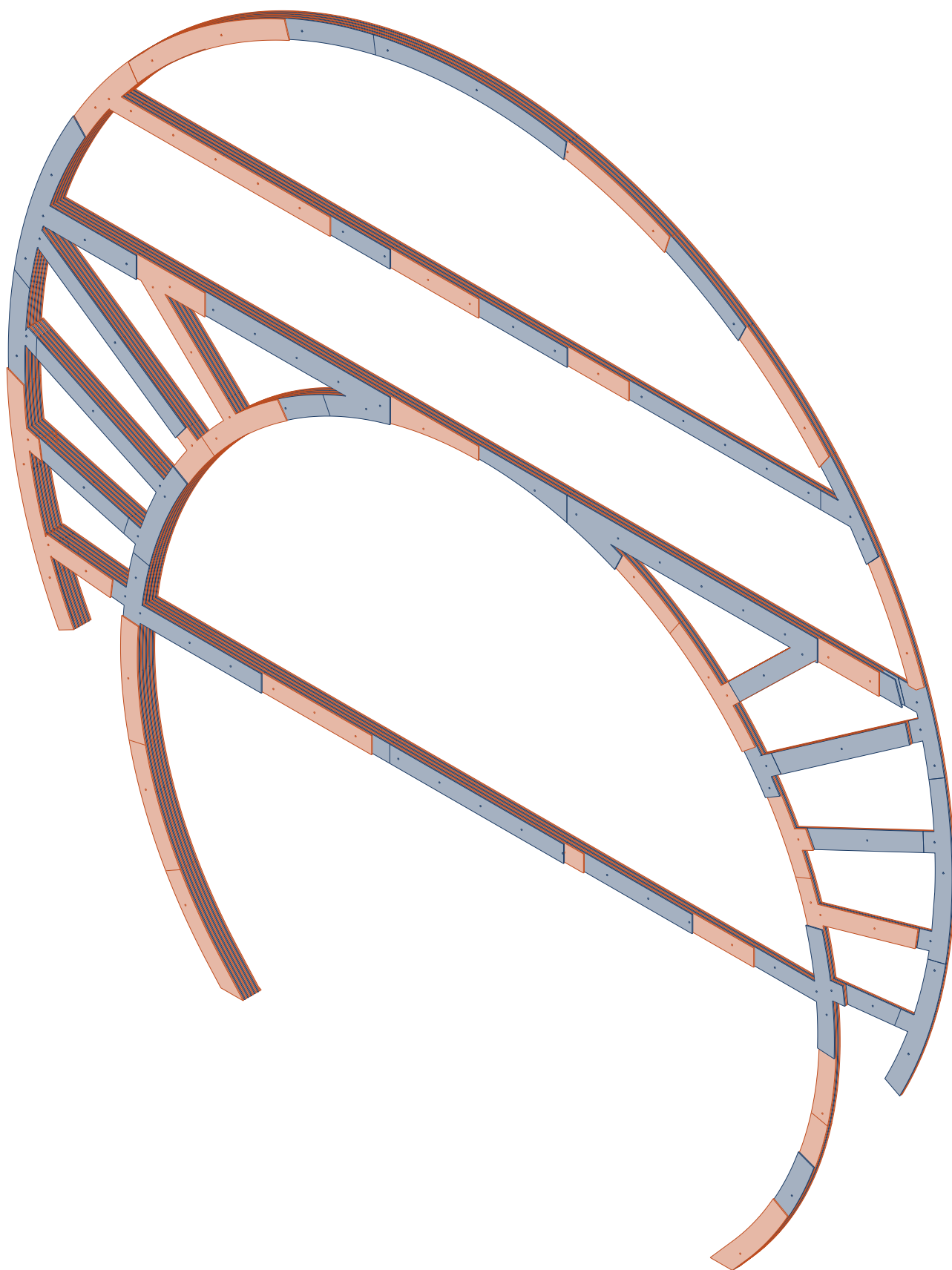
Una volta ottenuti tutti gli strati necessari a realizzare gli archi era necessario capire come tutti gli strati sarebbero stati assemblati tra loro e le variazioni necessarie nel disegno degli archi per consentire l'incastro con le travi esterne e interne.



(259) Algoritmo per suddividere le travi tra gli archi verticalmente (parte 2)

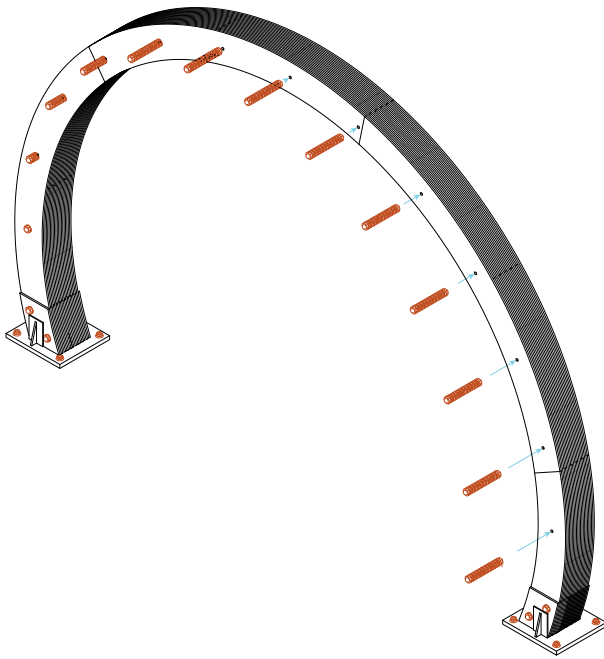


(260) Strati utilizzati per la realizzazione dell'arco strutturale numero 10



[261] Assonometria arco numero 10 in fase di assemblaggio

6.2.2.1 - Assemblare gli archi



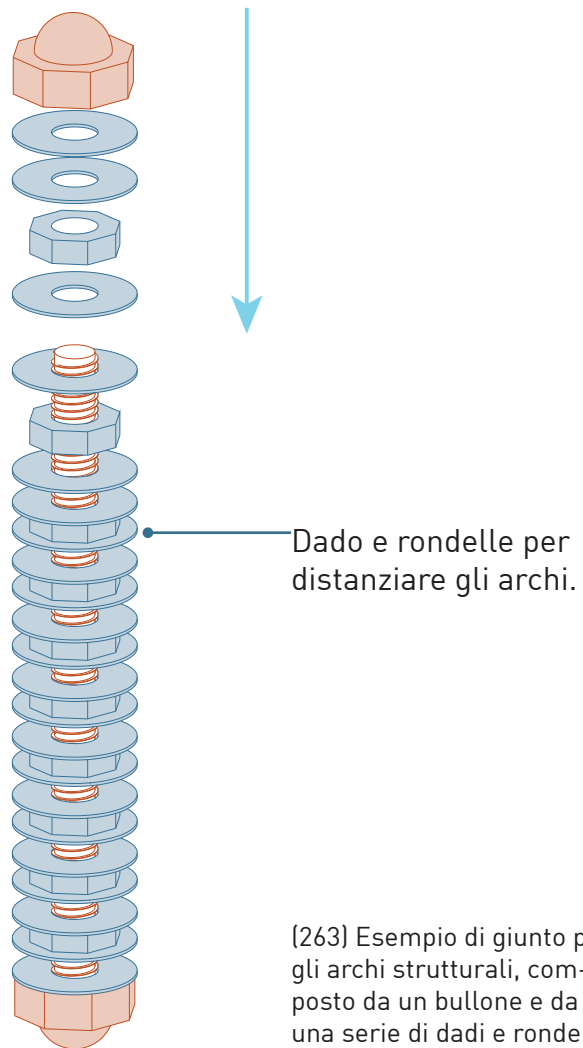
(262) Assonometria con schematizzato l'inserimento dei bulloni nei fori del secondo arco

Per assemblare in modo efficace i vari strati degli archi ho scelto di ritagliare con il taglio laser dei fori da 3 cm di diametro in corrispondenza della linea mediana degli archi, sarà necessario avere almeno due incisioni per ogni segmento in modo da evitare eventuali rotazioni.

Questi fori sono pensati per inserire dei bulloni in acciaio che forniranno il supporto necessario a mantenere legati insieme tutti i pezzi di ogni arco (262).

Tra uno strato e l'altro andranno inserite una rondella a contatto con il primo strato dell'arco dello spessore da 2 mm, un dado da 16 mm e un'altra rondella da 2 mm a contatto con il secondo strato dell'arco, questo per mantenere la distanza di 2 cm tra gli strati (263).

Una volta arrivati in cantiere con le varie parti dell'arco sarà importante sapere esattamente l'ordine di montaggio, e la

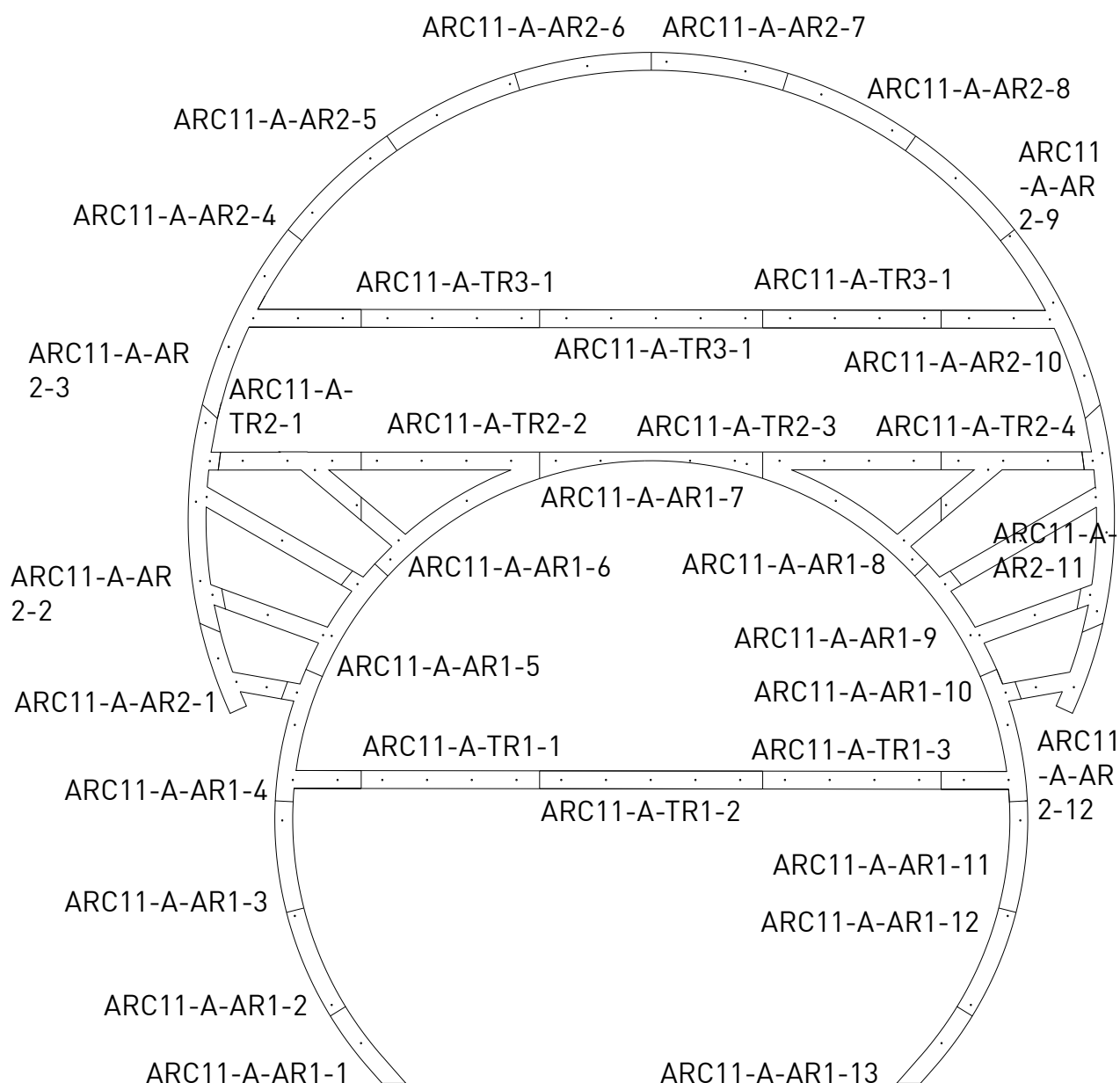


(263) Esempio di giunto per gli archi strutturali, composto da un bullone e da una serie di dadi e rondelle

posizione di ogni componente, per questo motivo, così come per le pareti in mattoni recuperate per le facciate degli edifici circostanti, anche nel caso degli archi sarà necessario assegnare un nome a tutte le parti.

Ho quindi realizzato un tentativo di denominazione con l'arco più grande del progetto, ovvero l'undicesimo partendo dal basso.

Come prima sigla ho scelto di applicare ARC con il numero dell'arco, ad esempio nel caso specifico (264) ARC11.



[264] Esempio di numerazione dei componenti dell'arco 11

Dopodichè è necessario individuare lo strato di riferimento dell'arco, ovvero A o B, essendoci appunto due varianti di taglio. Infine, bisogna identificare il numero del segmento tagliato, in questo caso essendoci 2 archi, le travi e i raggi di connessione, ho scelto di assegnare una sigla differente in base a dove si trova la sezione seguita da un numero.

Le sigle scelte sono:

- AR1 per l'arco alla base
- AR2 per l'arco soprastante
- TR per le parti inerenti alle travi

Come ultimo elemento ho assegnato un

numero ad ogni segmento, partendo da 1 per ogni sigla differente e procedendo in senso orario per archi e raggi di connessione, mentre per le travi siamo partiti da sinistra verso destra, partendo dalla trave più bassa alla più alta.

Inoltre, anche per le travi ho modificato il numero davanti alla sigla TR in base all'altezza della trave, quindi la più bassa sarà TR1 e la più alta TR3.

Per quanto riguarda i bulloni invece non è stato necessario numerarli essendo tutti uguali fra loro.

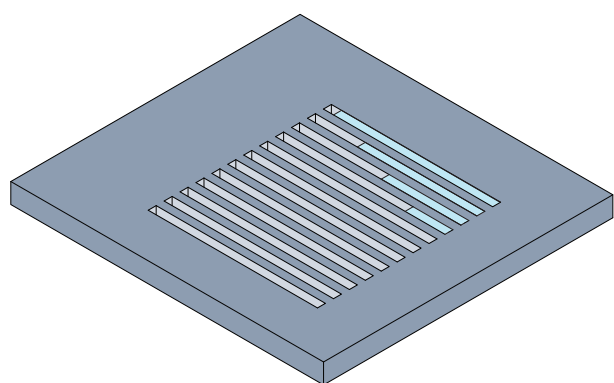
Ovviamente così come nel caso dei muri anche per quanto riguarda gli archi

verranno scritte le sigle sui pezzi in modo da trovarli facilmente.

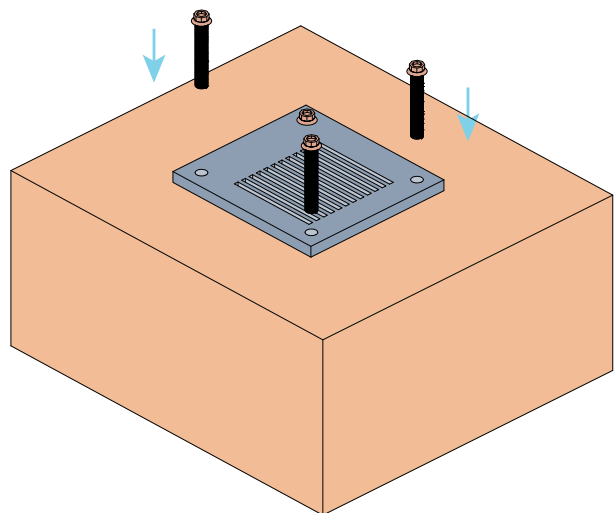
L'ultimo aspetto da considerare infine è come si attaccano al suolo questi archi; quindi, ho studiato dei basamenti personalizzati per ogni arco.

Per realizzare i basamenti mi sono ispirati alle staffe a scomparsa utilizzate per il legno lamellare, per prima cosa ho utilizzato una piastra d'acciaio spessa 5 cm che ho fresato (265) per 3 cm tramite fresa CNC e forato.

Queste piastre saranno poi ancorate alle fondazioni tramite dei bulloni che ne



(265) Realizzazione basamento archi - step 1



(266) Realizzazione basamento archi - step 2

impediranno il movimento (266).

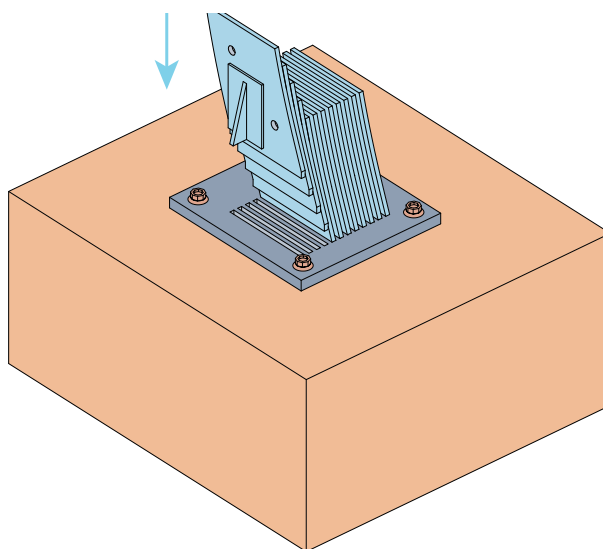
A questo punto in ogni fresata andrà inserita una sagoma che replica precisamente i primi 50 cm dell'arco da supportare, questo per mantenere il profilo invariato anche alla base, le piastre andranno inoltre saldate alla base, (267) questo per evitare movimenti.

Gli archi andranno incastrati negli spazi vuoti tra una sezione e l'altra, (268) questo consenti di creare un incastro molto solido con più strati che contribuiscono a rendere l'incastro più solido.

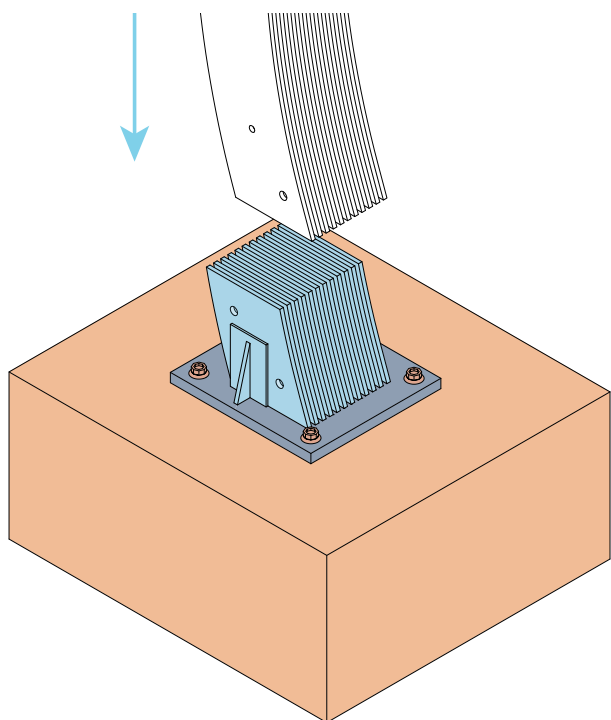
Come ultimo passo andranno inseriti 2 bulloni da 4 cm di diametro che attraversano da un lato all'altro l'incastro andando a compattare il tutto e ad assicurare la tenuta degli incastri (269).

Ogni arco verrà dotato ovviamente di due di questi ancoraggi e allo strato più esterno verranno saldate delle lastre con un triangolo che consente aiutare a mantenere in equilibrio l'arco e a stabilizzare al meglio la struttura.

Questo sistema di incastri nel suo complesso (270) garantirà non solo la



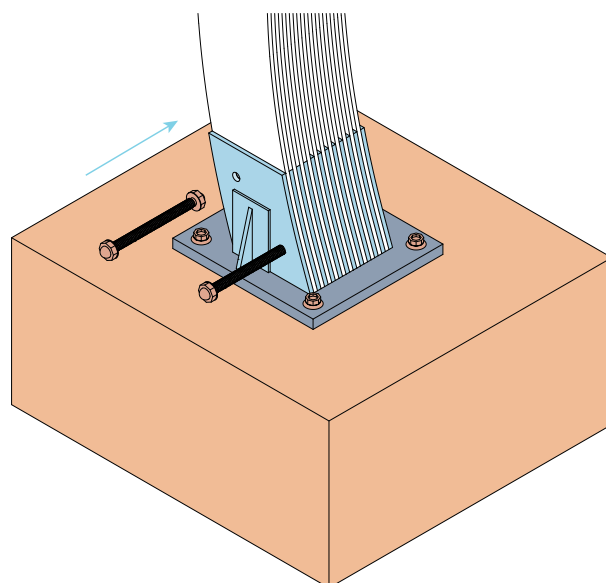
(267) Realizzazione basamento archi - step 3



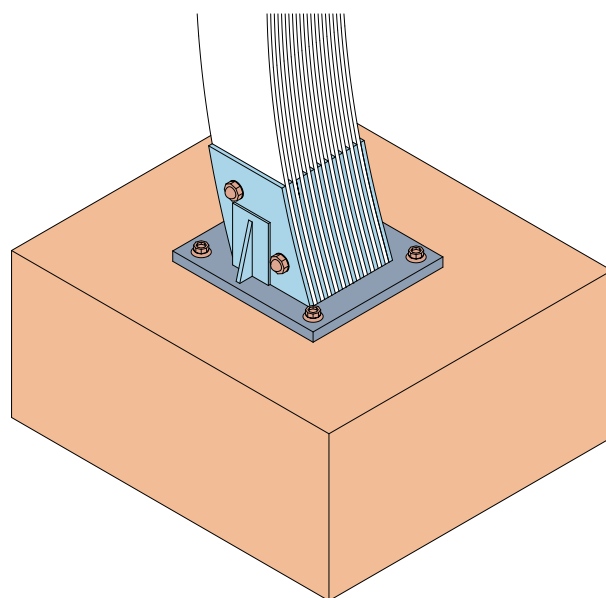
(268) Realizzazione basamento archi - step 4

realizzazione, il trasporto e l'assemblaggio degli archi in cantiere in modo veloce e preciso grazie ad un taglio laser a controllo numerico, ma garantirà anche la sostituzione di parti in fase di degrado e il totale riciclo di tutta la struttura una volta che l'edificio arriverà al fine vita.

Infatti, uno dei vantaggi del metallo rispetto, ad esempio, al cemento è la facilità di riciclo ma per poterla sfruttare al meglio è necessario poter separare tutte le parti da altri tipi di materiali, per questo è importante non utilizzare colle.

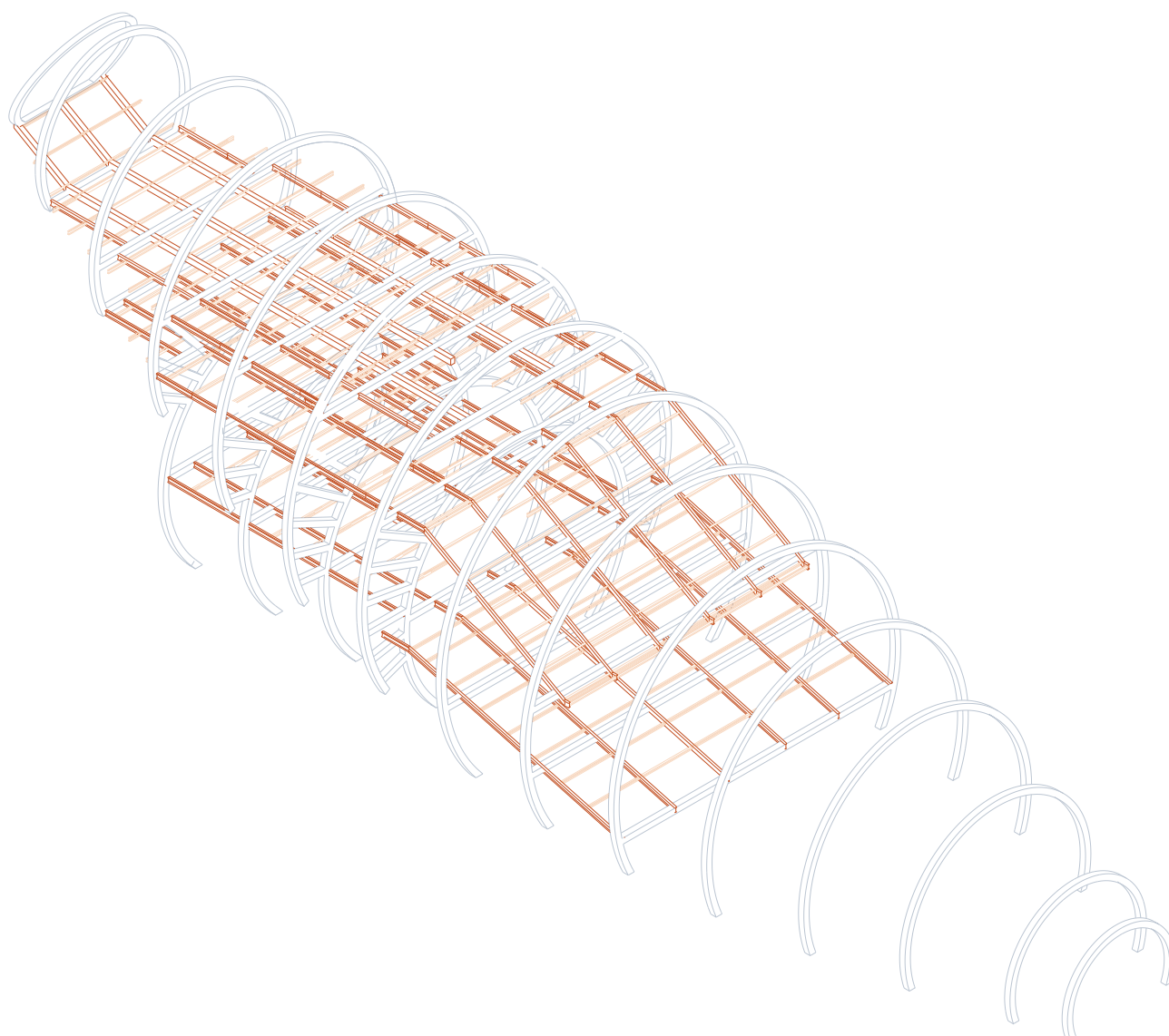


(269) Realizzazione basamento archi - step 5



(270) Realizzazione basamento archi - step 6

6.2.3 - Giunzione travi principali interne



(271) Struttura solai composta da travi principali e secondarie

La struttura interna che sorregge i solai, come spiegato precedentemente è composta da travi principali IPE 300, le quali scorrono all'interno delle travi degli archi, ovviamente per poterlo fare occorre ritagliare la sagoma delle travi all'interno dei primi 2 strati degli archi.

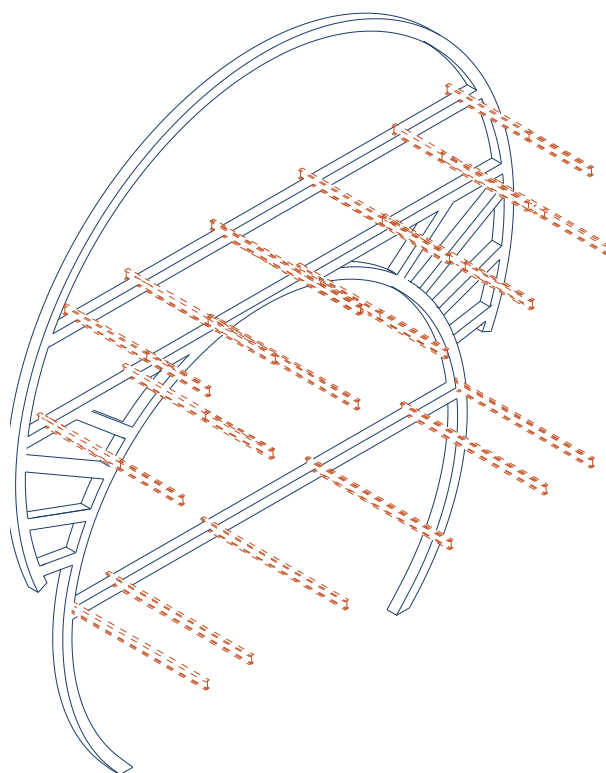
Per ottenere queste sagome alla giusta

altezza e nella giusta posizione ho prima modellato la struttura completa (271) posizionando le travi correttamente e a contatto con il solaio, a questo punto ci è stato sufficiente creare una copia del modello in cui tramite una sottrazione booleana delle travi dal modello degli archi (272) ho ottenuto una sagoma

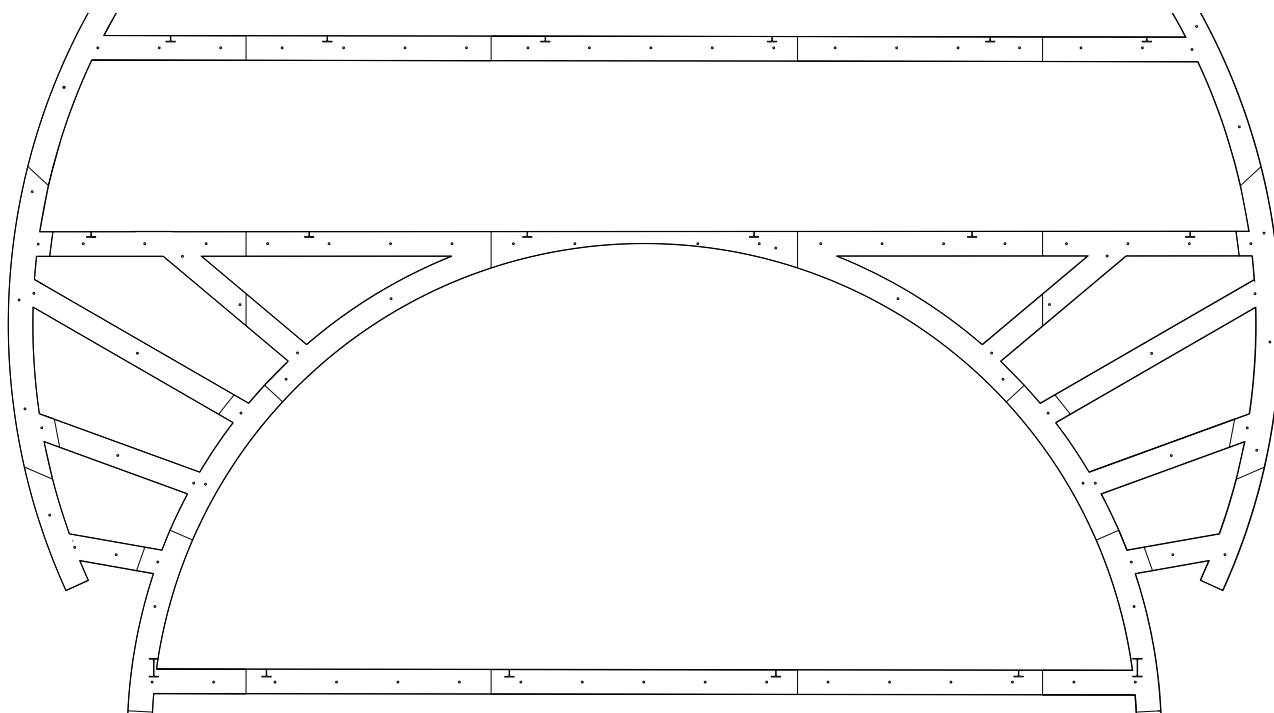
estremamente precisa della trave che dovrà attraversare l'arco. Un aspetto a cui prestare la massima attenzione in questo caso era quello di evitare la sovrapposizione delle travi con i bulloni di giunzioni per gli archi strutturali. Per questo motivo una volta eseguita la sottrazione ho estratto un disegno 2D di ogni arco e lo ho sovrapposto a quello inerente alla suddivisione degli archi in cui erano visibili tutti i fori dei bulloni.

Ogni trave principale sarà lunga poco più di 6 m e tra una e l'altra ci saranno nella maggior parte dei casi una distanza di 3.5 m, non tutte le travi infatti potranno essere disposte a questa lunghezza, per evitare di interferire con i bulloni.

Ho predisposto una tolleranza massima di 50 cm in più o in meno dei 3.5 m "standard" di distanza. Questa distanza sarà poi a sua volta coperta dalle travi IPE 200, ovvero lo strato di travi secondarie (273).

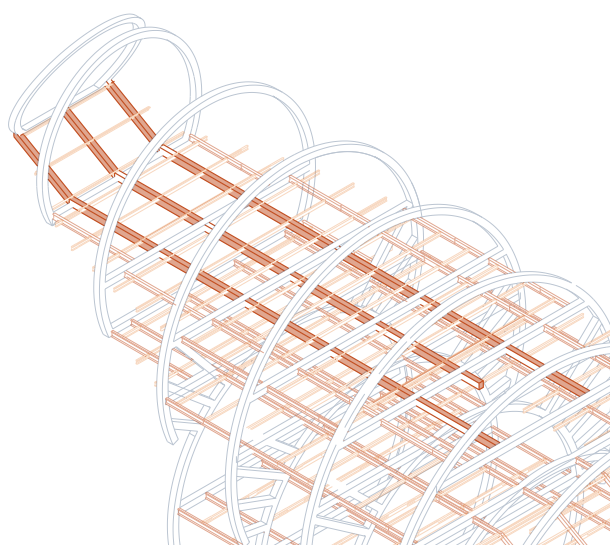


(272) Schematizzazione processo di sottrazione

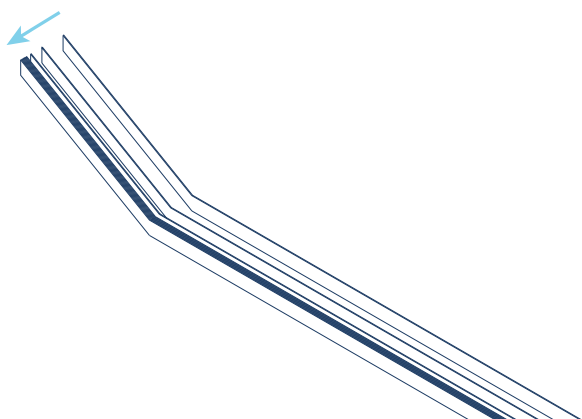


(273) Travi arco dopo la sottrazione dei profili delle travi

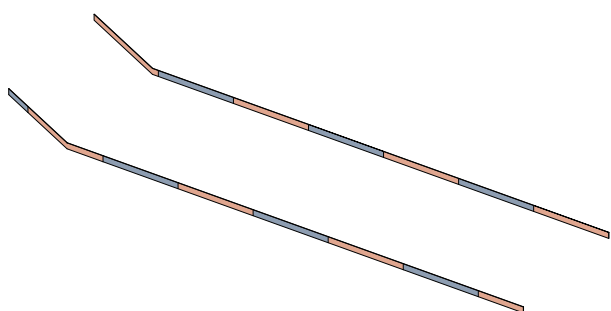
6.2.3.1 - Travi speciali



(274) Struttura auditorium con evidenziate le travi speciali.



(275) Trave speciale



(276) Doppio layout travi speciali

Per sorreggere lo sbalzo finale della struttura delle semplici travi IPE non sarebbero state adatte, per questo motivo ho dovuto elaborare delle speciali travi tagliate a laser e stratificate come gli archi che fossero in grado di suddividere il peso dello sbalzo su tutti gli ultimi archi strutturali e sul vano scale.

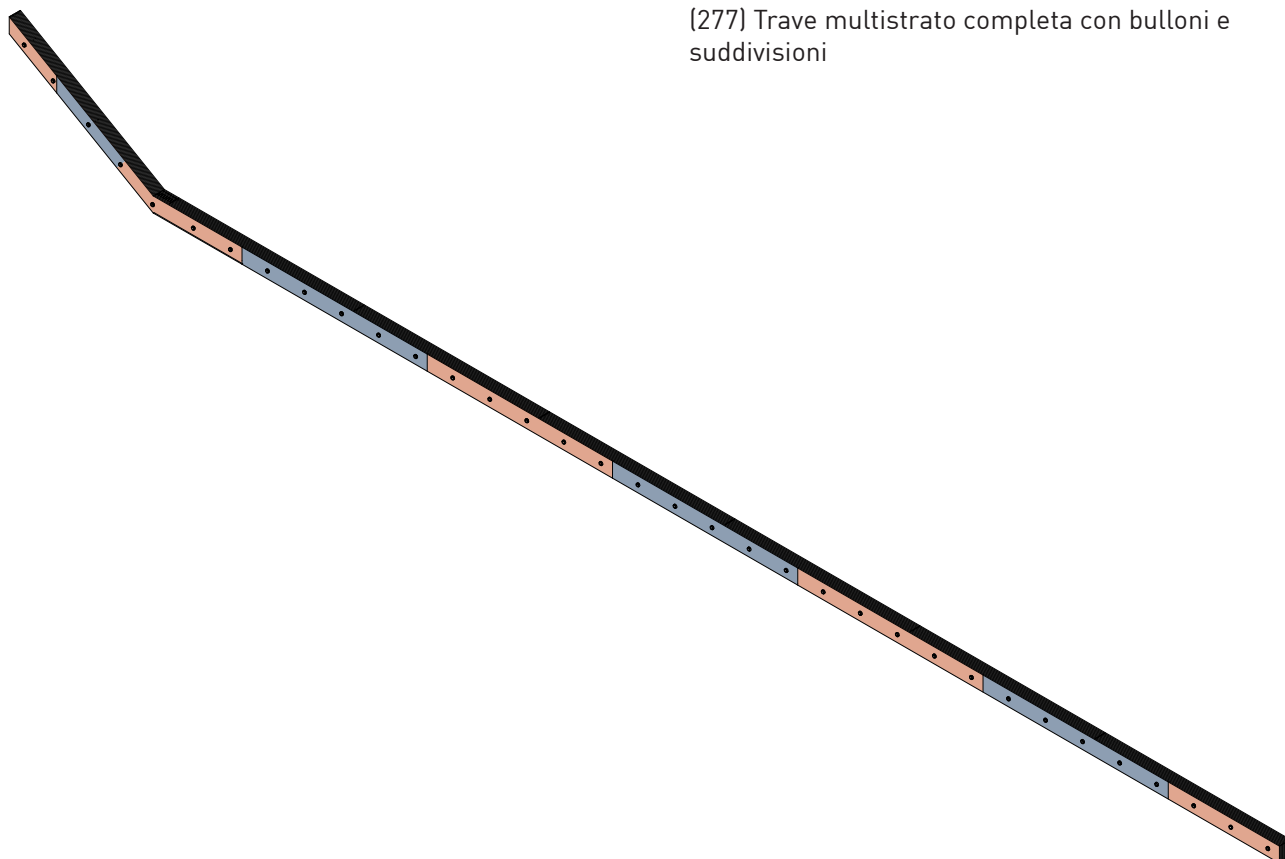
Inoltre, l'inclinazione richiesta per sorreggere l'ultimo arco sarebbe stata molto difficile da realizzare con altri sistemi, ad esempio curvando delle travi IPE riducendo così la capacità di carico.

Per realizzare le travi ho ovviamente realizzato un modello base della geometria, intersecandola con gli archi strutturali (274), a questo punto l'ho suddivisa in strati (275) e successivamente in 2 diversi layout di taglio (276), esattamente come ho fatto per gli archi strutturali.

Ovviamente per giungere i vari strati ho utilizzato lo stesso sistema a bulloni, i quali erano semplicemente un po' più corti per adattarsi allo spessore da 30 cm della trave, inoltre la distanza tra un bullone e l'altro sarà minore rispetto al resto del modello, in quanto dovranno sopportare uno stress maggiore; quindi, ne ho posizionato 1 ogni metro circa (277).

Per connettere le travi agli archi ho quindi pensato a degli incastri che consentissero la distribuzione del carico sugli archi 12-11-10-9 e sul vano scale, raggiungendo una lunghezza complessiva delle travi di circa 25 m.

L'incastro pensato per giungere archi e travi è un incastro a pettine, realizzando delle aperture da 2 cm nella trave avremo la possibilità di infilarla nelle aperture tra uno strato e l'altro dell'arco, questo consentirà di restituire le proprietà strutturali che la



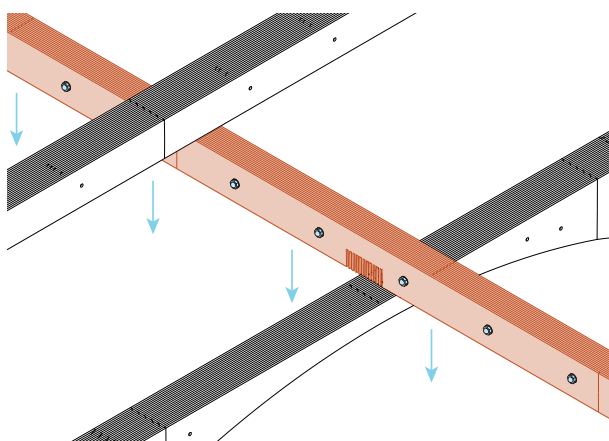
[277] Trave multistrato completa con bulloni e suddivisioni

trave andrà a perdere con la creazione dei tagli [278].

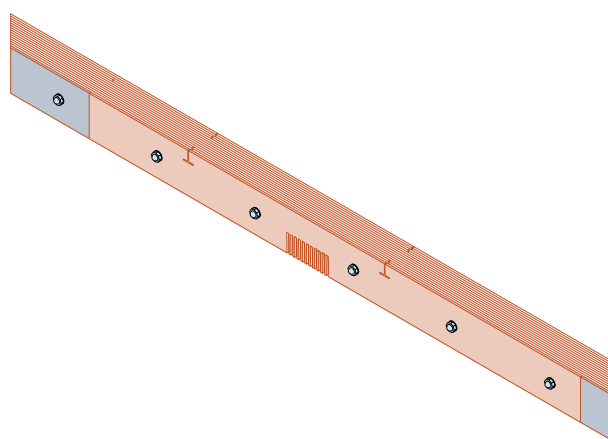
Ovviamente queste travi dovranno fungere anche da travi principali e sorreggere le secondarie; tuttavia, la mancanza delle ali inferiori tipiche delle travi IPE crea ci ha costretti a ripiegare su un sistema analogo a quello degli archi strutturali, ovvero

sottraendo da due strati per lato la sagoma della trave IPE 200 [279].

Queste travi personalizzate ovviamente sono pensate appositamente per questo edificio rispondendo a delle esigenze specifiche inerenti le capacità strutturali dell'edificio attraverso un metodo di produzione DfMA.



[278] Incastro a pettine, esempio di incastro su una delle travi di un arco strutturale



[279] Trave completa con asole di scorrimento travi secondarie

6.3 - Vano scale e ascensore

Il vano scale, che ovviamente dal punto di vista strutturale sarà fondamentale sotto diversi punti di vista, non solo per quanto riguarda i collegamenti verticali, ma anche per quanto riguarda i controventi strutturali. Infatti, sebbene la forma degli archi garantisca un'ottima resistenza al vento dal lato trasversale della struttura, dal punto di vista longitudinale non vi sono molti elementi rigidi che possano opporsi in caso di forti raffiche di vento.

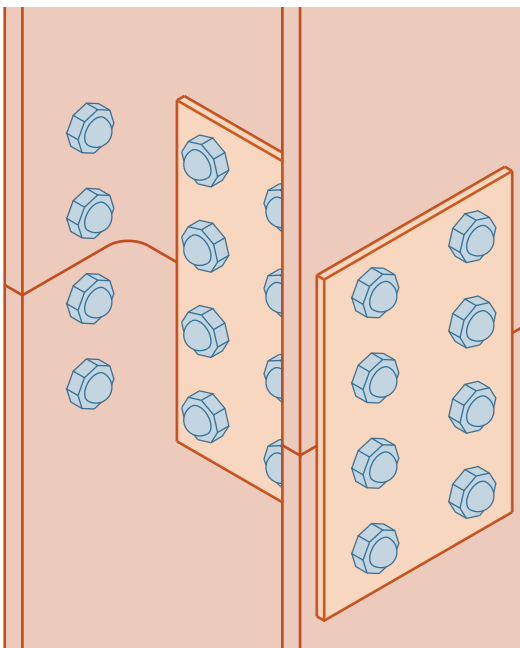
Per questo motivo il vano scale, che raggiunge quasi ogni livello della struttura diventa fondamentale per creare un elemento rigido che fornisca una valida

risposta in caso di forti raffiche.

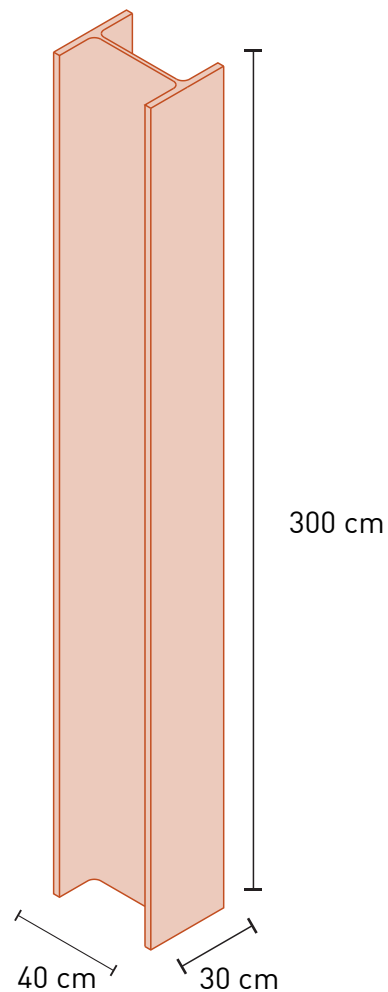
Per questo motivo il vano scala è stato pensato con pilastri e travi in acciaio di grandi dimensioni, non solo per sorreggere la struttura e il passaggio di un grande numero di persone, ma anche per essere in grado di sopportare un eventuale spinta del vento.

La struttura è composta da 4 elementi principali, pilastri HEA 400, Travi IPE 360, Travi IPE 300 e Croci di Sant'Andrea, nei prossimi paragrafi verranno spiegati tutti nel dettaglio, in modo da rendere comprensibile il funzionamento di tale struttura.

6.3.1 - Pilastria HEA 400



(281) Esempio di giunto con piastre a bulloni tra due pilastri



(280) Pilastro HEA 400

L'elemento principale utilizzato per la realizzazione del vano scale è sicuramente il pilastro HEA (280), realizzato in acciaio, offre un'ottima resistenza strutturale e mantenendo un profilo laterale leggermente più stretto rispetto ad un pilastro HEA.

Questi pilastri sono stati giuntati tra loro tramite delle piastre a bulloni (281) che consentiranno oltre alla giunzione anche lo smontaggio dei pilastri una volta terminato l'utilizzo dell'edificio, recuperando così il materiale.

Per poter giuntare le travi con i pilastri, ho posizionato un sostegno con 2 versioni differenti, una che si potesse incastrare all'interno delle due ali del pilastro e una seconda che si potesse ancorare alla faccia piana del pilastro.

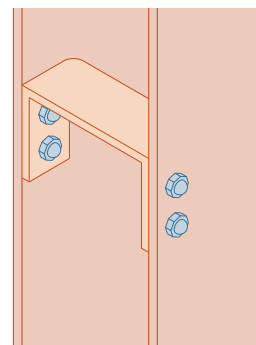
La prima versione (282), quella pensata per l'interno del pilastro, si applica tramite due bulloni avvitati su ogni ala del pilastro, in modo da evitare rotazioni e aumentare la portata del giunto, il quale è composto da una lastra di metallo piegata a C con i fori per ospitare i bulloni.

La seconda versione invece (283), quella che si applica sul lato piano del pilastro è composta da una lastra piana sulla quale è stata saldata un'altra piastra piegata a C e con i due lati esterni tagliati a 45°.

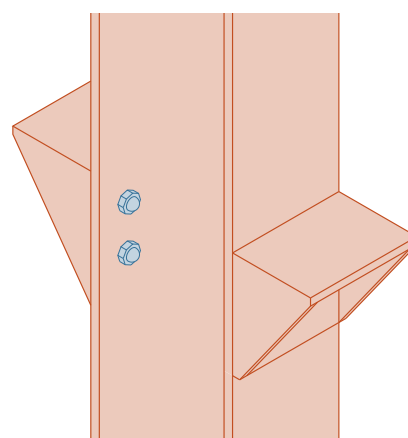
Sulla piastra piana sono poi stati praticati due fori sul lato destro e due sul lato sinistro in cui inserire i bulloni per il fissaggio al pilastro.

Per quanto riguarda il fissaggio a terra i pilastri sono stati ancorati con un basamento munito di piastre alte 50 cm che hanno consentito l'inserimento di bulloni sia nel pilastro che nel plinto di fondazione (284).

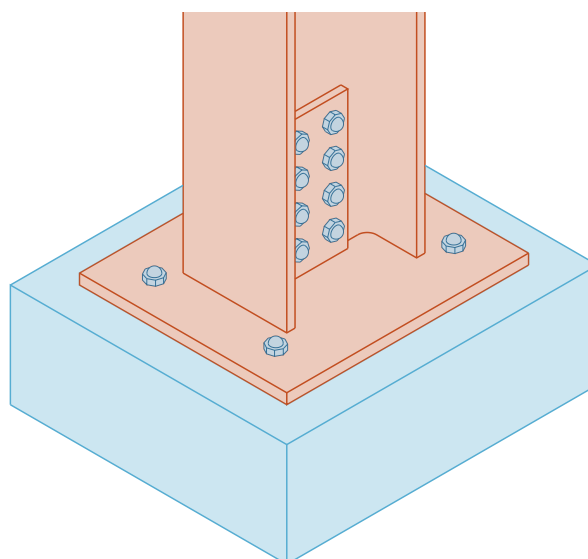
Con questi pilastri verranno realizzate otto colonne che formeranno la struttura di base del vano scale e del vano ascensore per tutti i piani fuori terra, mentre per quanto riguarda il piano interrato riservato ai parcheggi verrà usata una struttura in cls armato.



(282) Esempio di pilastro HEA utilizzato per la struttura del vano scale



(283) Esempio di pilastro HEA utilizzato per la struttura del vano scale



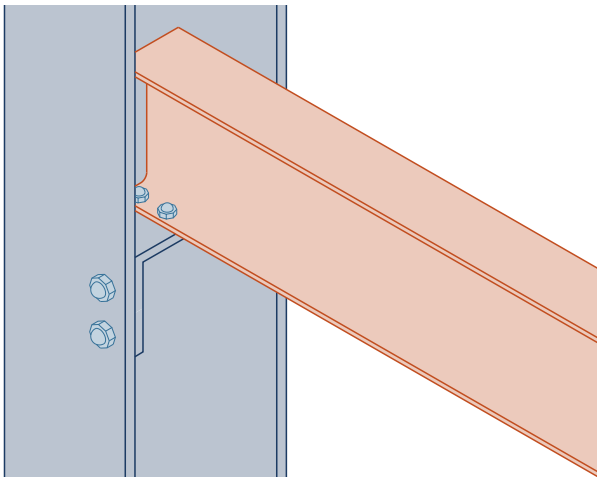
(284) Giuntura a terra pilastro HEA tramite piastra a bulloni

6.3.2 - Travi IPE 360 e 300

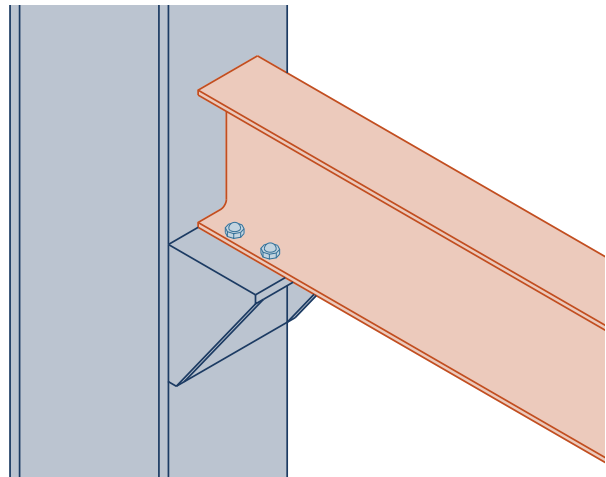
Per quanto riguarda le travi, ho deciso di utilizzarne di 2 tipi, ovvero IPE 360 e IPE 300, il motivo per cui ho fatto questa scelta è la presenza delle scale; infatti, gli scalini saranno avvitati all'interno delle travi IPE 360, le quali passando da un pilastro all'altro in diagonale aiuteranno anche la funzione di controventatura.

Per quanto riguarda le travi IPE 300 invece, l'unico scopo che avranno sarà quello di sorreggere le travi secondarie dei solai, per questo la dimensione necessaria è inferiore.

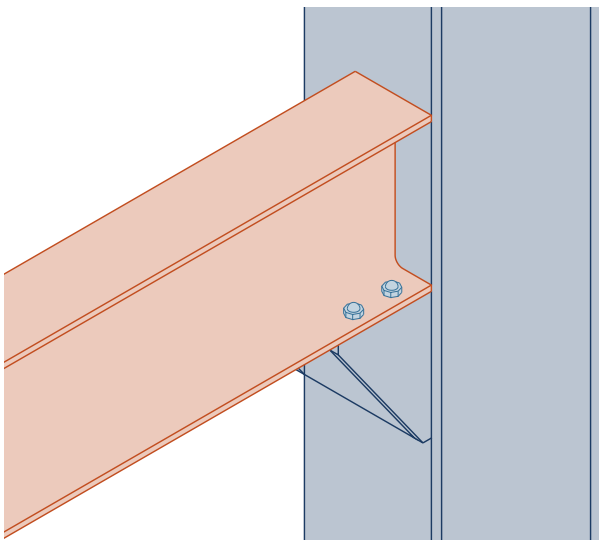
La lunghezza massima di entrambe le travi è di circa 5.5 m nel vano scale, mentre nel vano ascensore scende intorno ai 3 m.



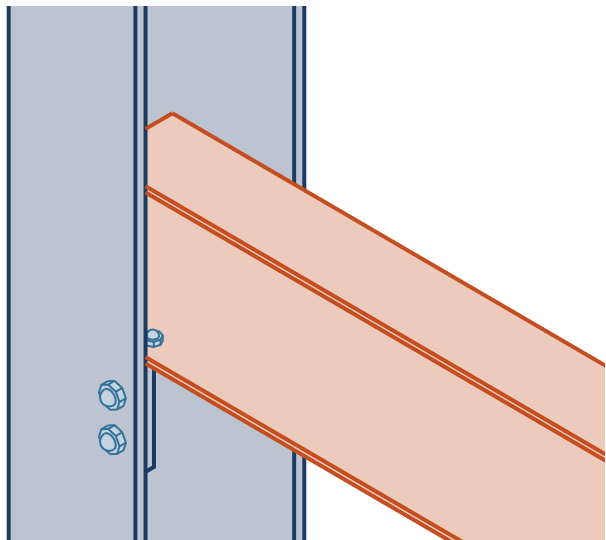
(285) Primo tipo di giuntura con trave IPE 300



(286) Secondo tipo di giuntura con trave IPE 300



(287) Giuntura trave IPE360 prima opzione internamente rispetto alla piastra di appoggio



(288) Giuntura trave IPE360 seconda opzione internamente rispetto alla piastra di appoggio

Le travi saranno imbullonate agli attacchi precedentemente illustrati in due modi, le travi IPE 300 saranno appoggiate al centro delle piastre (285-286), mentre le travi IPE 360 verranno posizionate a filo interno a contatto con l'ala del pilastro (287-288) questo sia per consentire il posizionamento

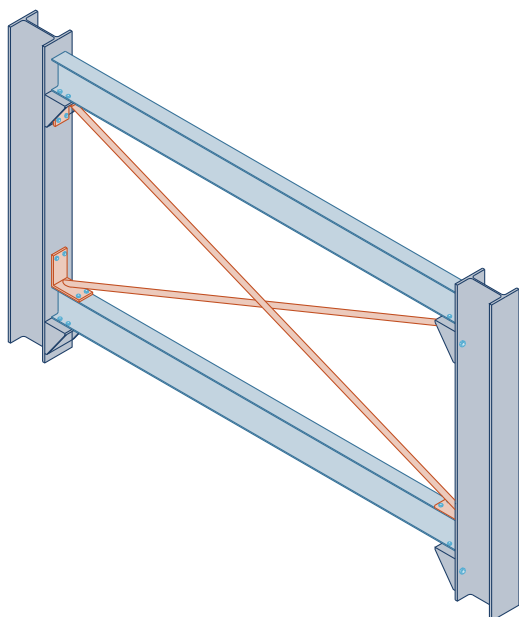
6.3.3 - Croci di Sant'Andrea

Come controvento ho scelto di utilizzare delle semplici croci di Sant'Andrea (289), le croci sono formate da due aste in acciaio da 5 cm di diametro incrociate tra loro.

Come tutti gli altri elementi di questa struttura sono imbullonate tramite delle piastre saldate alle estremità.

Come già detto nei paragrafi precedenti anche la struttura delle travi IPE 360 contribuirà a contrastare la spinta del vento, ma essendo fondamentale rendere questo vano scale in grado di irrigidire tutta la struttura in senso longitudinale, per questo motivo è fondamentale avere anche delle croci di Sant'Andrea che contribuiscano a contrastare la spinta del vento.

I controventi verranno posizionati tra i pilastri del vano ascensore, questo per non interferire con la struttura del vano scale già controventata dalle travi delle scale.



(289) Controvento a Croce di Sant'Andrea

dei tamponamenti nei lati in cui saranno presenti, sia per facilitarne la giunzione con i pilastri.

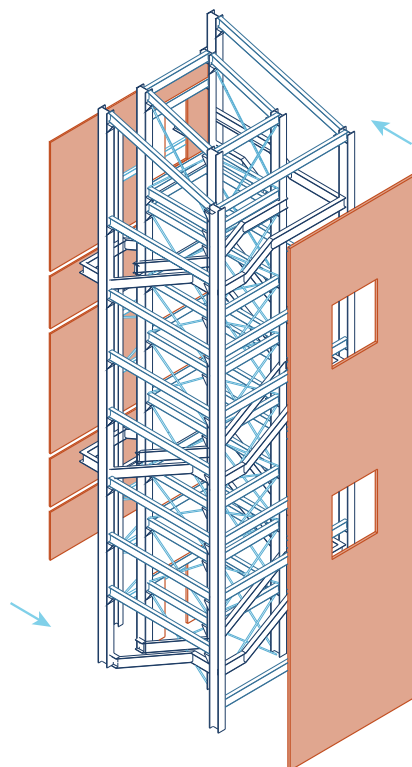
Ovviamente per il resto dei solai verranno usate sempre travi IPE 300 come travi principali e IPE 200 come secondarie.

6.3.4 - Muri di tamponamento

I muri di tamponamento (290) verranno posizionati sopra le travi IPE 300 e 360, in corrispondenza dell'ala esterna della trave, questi muri verranno posizionati solo in due lati delle scale, il primo è quello rivolto verso gli spalti dell'auditorium, mentre il primo dal lato rivolto verso l'ingresso dell'auditorium.

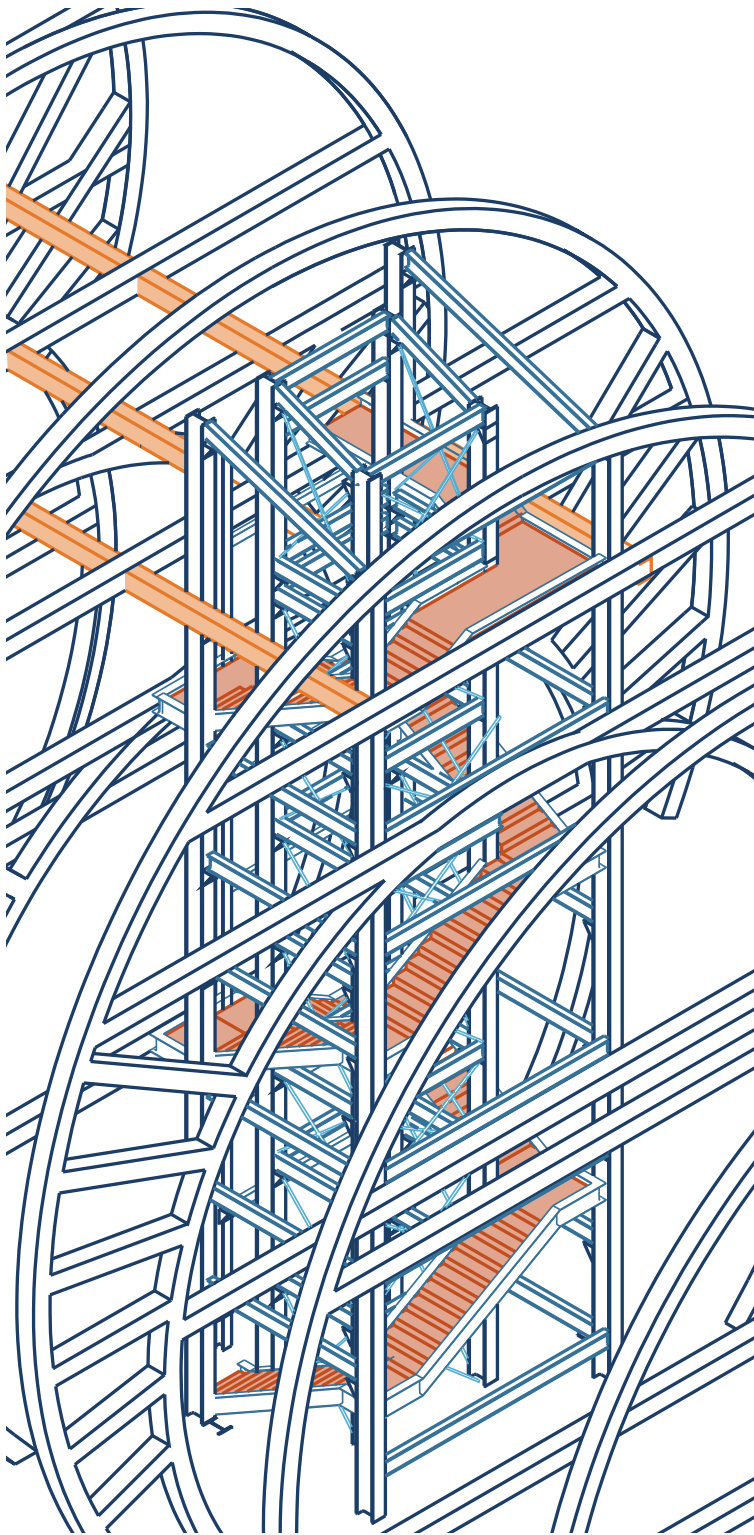
I muri saranno in semplice cartongesso per quanto riguarda il lato rivolto verso l'ingresso, in quanto unico scopo di questo muro è quello di nascondere il vano scale al momento del primo ingresso.

Per quanto riguarda la partizione che divide gli spalti dal vano scala, sarà necessario anche uno strato di isolamento acustico per controllare l'ingresso del suono.



(290) Applicazione muri di tamponamento

6.3.5 - Struttura completa



[291] Vano scale assemblato con archi e travi speciali connesse.

Il risultato finale [291] di questo vano scale e ascensore è un corpo rigido, il quale attraverso la connessione con gli archi strutturali consentirà di avere un'ottima risposta al vento, per massimizzare questo risultato ad alcune travi principali verranno collegati dei tondini metallici connessi agli archi, questo aiuterà a distribuire il carico.

Inoltre, la connessione con le travi speciali consentirà al vano scale di contribuire a bilanciare il peso dello sbalzo.

Questo vano scale rispetto agli archi strutturali, alle travi principali e secondarie è un elemento abbastanza semplice e non riconducibile alla metodologia DfMA, tuttavia per questo elemento non era necessario pensare a soluzioni estremamente complesse, essendo molto efficace anche in questo modo.

6.4 - Travi principali copertura

6.4.1 - Generazione geometria travi principali

Come travi principali di copertura si servivano degli elementi che collegassero gli archi tra di loro, questo allo scopo di creare un supporto per i pannelli di copertura e per le travi secondarie che verranno fissate sopra le principali.

Per creare la geometria di base di queste travi mi sono aiutato ancora una volta con Grasshopper [292], l'idea era di creare una struttura che desse un pattern di copertura accattivante, in modo da renderlo leggibile anche dall'esterno grazie alla suddivisione dei pannelli di copertura.

Nello specifico il primo passo fatto è stato quello di riprendere come riferimento i tagli nella superficie utilizzati per generare gli archi, in modo da avere delle guide da seguire per il posizionamento delle travi.

A questo punto ho inserito un offset di 35 cm [285] per distanziare il posizionamento di questo bordo rispetto al limite della geometria di base in modo da lasciare spazio per la pelle di finitura e le travi secondarie, le quali ovviamente saranno leggermente più esterne.

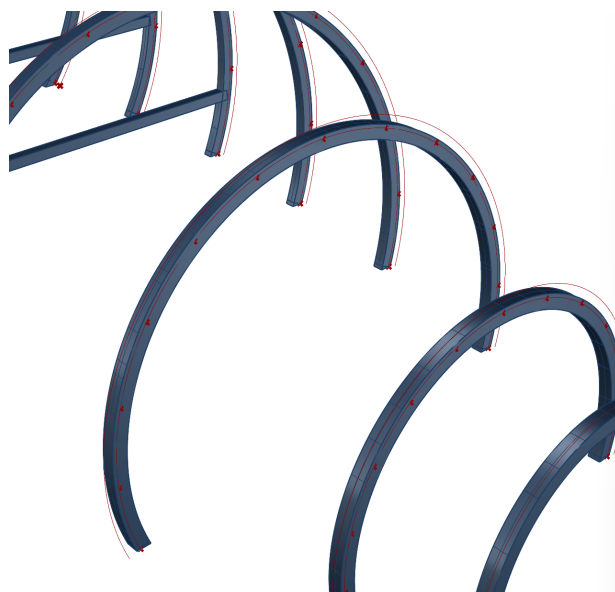
A questo punto ho posizionato dei punti [293] su questa linea di offset scegliendo proprio grazie al numero di questi punti il numero di travi che avrebbero connesso ogni lato della trave, nello specifico ho scelto 12 travi per ogni sezione compresa tra due archi.

Questo numero di travi è stato scelto per avere una distanza massima di circa 4 m nei casi in cui le travi sono più distanziate tra loro e di 1.5 m nel caso in cui siano molto ravvicinate come all'inizio e alla fine della struttura.

A questo punto per fare in modo che le travi non fossero perfettamente dritte ma sfalzate in modo da generare una geometria accattivante ho utilizzato prima il comando "relative item" che ci ha permesso di connettere ognuno di questi punti, non con il diretto corrispondente sull'arco



[293] Dettaglio della sezione di base della geometria utilizzata per posizionare le travi (in rosso) e relativo offset in verde.

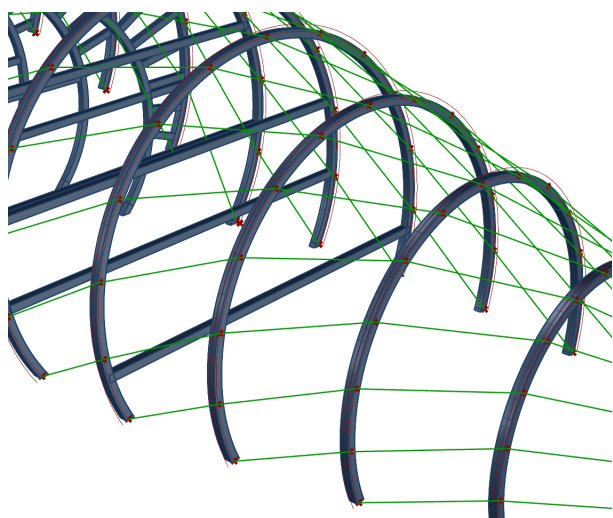


[294] Punti posizionati sugli offset dei tagli effettuati nella geometria.

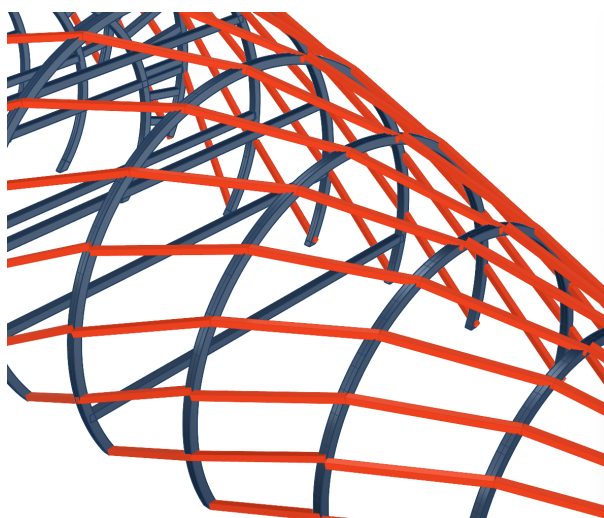
successivo, ma bensì con 2 punti successivi. In questo modo ho ottenuto grazie al comando "line" una serie di linee che percorrevano proprio questi percorsi. Di queste linee poi è stato nuovamente eseguito un offset di 30 cm, in modo da poter successivamente eseguire un loft tra

le due rette e creare dunque una superficie. In questo modo ho ottenuto grazie al comando "line" una serie di linee che percorrevano proprio questi percorsi. Di queste linee poi è stato nuovamente eseguito un offset di 30 cm, in modo da poter successivamente eseguire un loft tra le due rette e creare dunque una superficie e successivamente estruderla ancora una volta di 30 cm; quindi, alla fine le dimensioni delle travi saranno di 30x30 cm (294). Tutte questo processo (295) mi ha

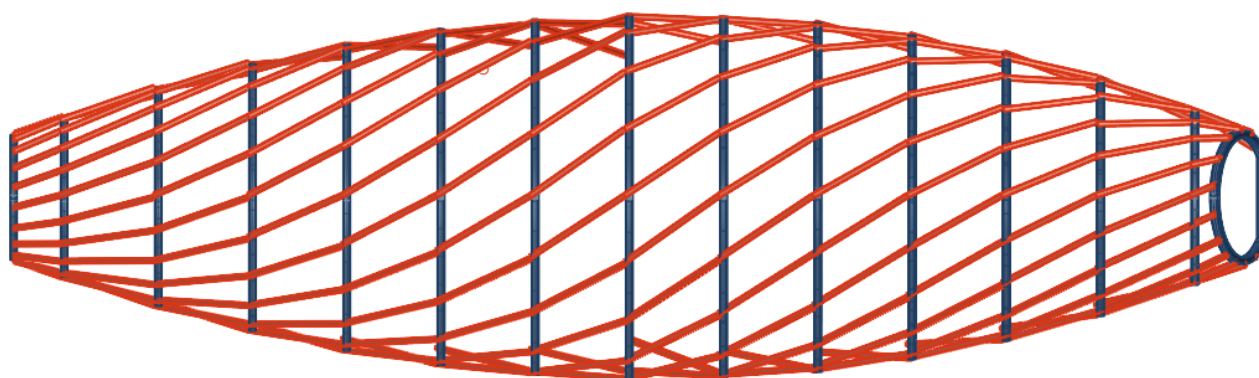
consentito di generare ben 168 travi in pochi minuti, ovviamente queste travi avrebbero potuto essere generate anche con la modellazione 3D classica, ma essendo ogni trave leggermente diversa dalla precedente in termini di lunghezza e inclinazione il processo avrebbe richiesto diverse ore, invece dei pochi minuti necessari grazie a Grasshopper. Nell'immagine a fine pagina (296) è possibile notare con il patter realizzato sia evidente in una vista dall'alto.



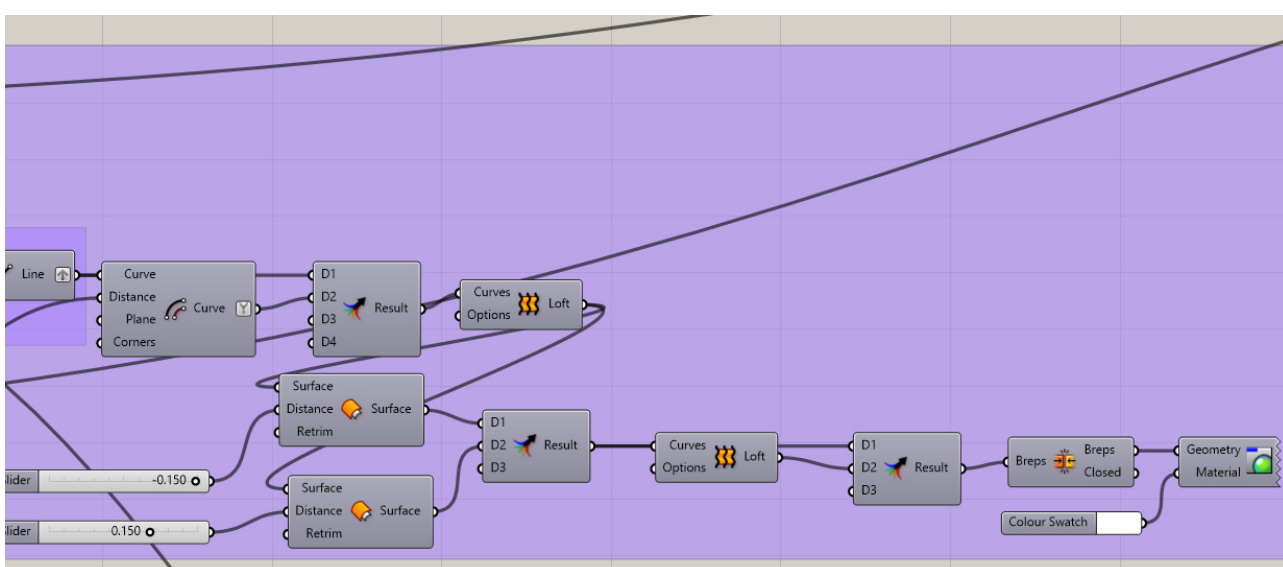
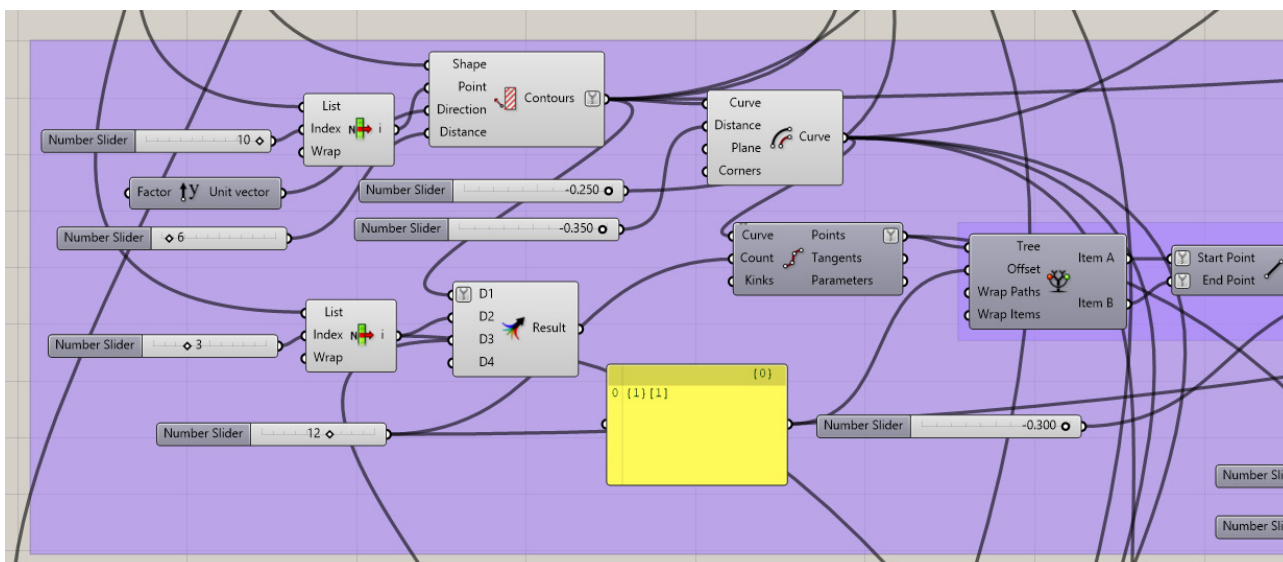
(295) Linee tracciate grazie al comando relative item in corrispondenza



(296) Linee tracciate grazie al comando relative item in corrispondenza

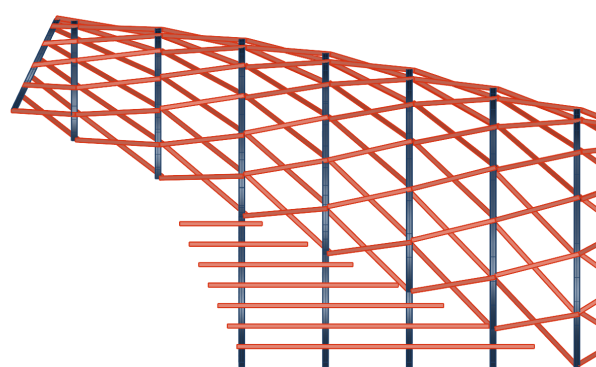


(296) Struttura con archi e travi principali vista dall'alto.



[297] Algoritmo generato attraverso Grasshopper per la realizzazione delle travi principali

Ovviamente un processo simile è stato svolto anche per la parte all'ingresso del progetto [297], nella quale si è scelto di mantenere un pattern più semplice per differenziare leggermente il disegno rispetto alla parte principale del progetto. Per creare un algoritmo in grado di creare queste travi è stato sufficiente rimuovere il comando “relative item” dall'algoritmo precedente per ottenere il risultato voluto [298].



[298] Travi principali nel lato d'ingresso del progetto

6.4.2 - Materiali per la realizzazione delle travi



(299) Esempio del materiale utilizzato per produrre le travi (Fonte: Fabricate 2024)

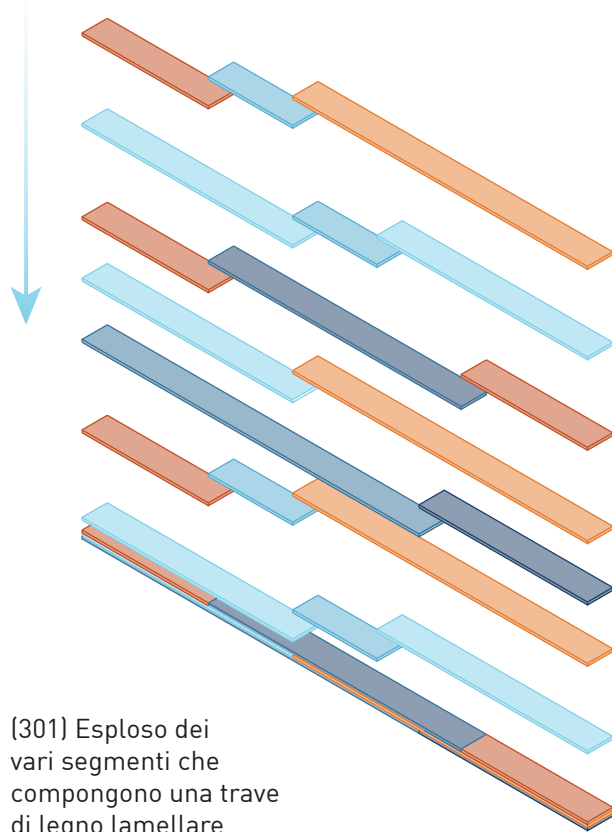


(300) Tipica squadratrice da falegnameria (Fonte: DM italia srl)

Per scegliere il materiale da utilizzare per la realizzazione di queste travi mi sono ispirati al progetto MARINA SPA PROTOTYPE, che è stato già presentato nel secondo capitolo di questa tesi (2.5.1.3 - Utilizzo del legno in elementi complessi di piccola scala) questo progetto utilizza del legno massello di scarto ricavato da processi industriali per realizzare delle travi in legno massello.

In particolare, questi elementi erano recuperati da lastre di legno per la produzione di pavimenti (299), in particolare gli assi forniti dal produttore erano assi di quercia di forma irregolare che non erano adatti alla produzione di pavimenti.

Sito impregnante CLOU: <https://www.clou-shop.eu/clou-heimwerker/holzlacke/arbeitsplatten-oel.html>



(301) Esploso dei vari segmenti che compongono una trave di legno lamellare

Per contrastare le proprietà anisotrope del legno gli strati sono stati tagliati per metà in senso longitudinale e metà in senso trasversale alle fibre del legno. Noi ho scelto di seguire le medesime modalità di produzione delle travi, per questo motivo ho per prima cosa svolto una breve ricerca sul territorio per trovare grosse falegnamerie industriali che potessero fornire il materiale di partenza.

In particolare, ho trovato le seguenti aziende che potrebbero fare al caso:

- Giorio s.p.a, Volpiano
- Moroso Falegnameria, Borgaro torinese
- Zanotti S.p.A., Leini

Una volta ottenuto il materiale la prima operazione da svolgere sarà quella di

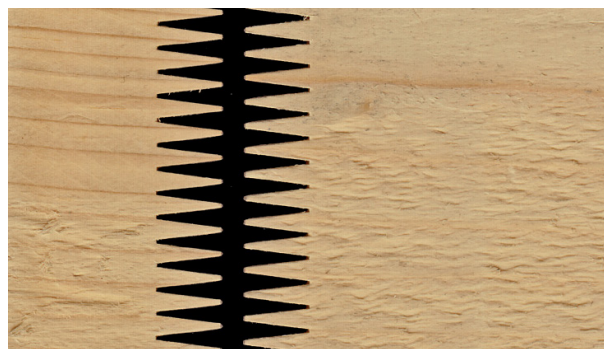
Bake: operazione che trasforma la geometria generata tramite Grasshopper da semplice anteprima a modello 3D modificabile tramite rhino.

ritagliare dei listelli con le forme desiderate, per mezzo di una sega a nastro o di una squadratrice (300) in particolare si tratterà di parallelepipedi con lato lungo non definito, in quanto dipenderà dalle lastre recuperate, e un lato corto da 32 cm. Ovviamente le travi complete dovranno essere lunghe 6 m, ma difficilmente si potrà avere a disposizione delle lastre così lunghe, per questo la lunghezza finale verrà ottenuta giuntando più parti (301), un pò come fatto con gli archi strutturali e come si fa in genere proprio col legno lamellare per mezzo di incastri KVH molto semplici praticati sulla testa delle travi (302) e colla. Il motivo per cui le lastre verranno tagliate da 32 cm invece che 30 è che probabilmente una volta giuntate le travi necessiteranno di operazioni di pulizia e scartavetratura, per cui è facile che un centimetro per lato vada rimosso tra un'operazione e l'altra, ottenendo in questo modo 30 cm esatti.

Allo stesso modo anche l'altezza dei segmenti verrà tagliata di mezzo centimetro in più in modo da offrire la possibilità di piallare e scartavetrare i listelli prima di incollarli.

Una volta ottenute le travi finite, queste andranno lavorate attraverso una macchina a controllo numerico (CNC) (303) in modo da creare degli incastri per connettere le travi agli archi strutturali, questo aspetto verrà poi approfondito nel paragrafo successivo. L'ultimo passaggio a cui le travi verranno sottoposte è l'impregnazione con dei prodotti per la conservazione del legno, in modo da evitare l'insediamento da parte d'insetti che potrebbero rovinare le travi, in questo senso sarà fondamentale utilizzare un impregnante biodegradabile, che non impatti a livello ambientale. Per questo motivo ho scelto di utilizzare una soluzione a base di olio di lino naturale, olio di girasole, olio di soia e cera di carbauba, denominata arbeitsplatten-Öl, prodotta dall'azienda tedesca CLOU (304).

Questo impregnante ideale per interni, le travi ovviamente saranno totalmente coperte dai pannelli di copertura; quindi, sono considerabili come elementi



(302) Giunture KVH praticate tra un listello e l'altro per aumentare la tenuta dell'incollaggio (Fonte: Teknoring.com)



(303) Macchinario CNC per legno (Fonte: makxilia.biz)



(304) Impregnante per legno sostenibile (Fonte: clou.de)

d'interno, ci consentirà di smaltire le travi una volta terminato l'utilizzo, senza impattare sull'ambiente. Ovviamente essendo travi molto lunghe nulla vieta, una volta smontate, di asportare le parti iniziali e finali delle travi, nelle quali saranno realizzati gli appositi incastri, e crearne di nuovi, andando quindi a adattare le travi per nuovi edifici.

6.4.3 - Assemblare le travi principali



(305) Esempio di giunto a scomparsa (Fonte: trends.archiexpo.it)

Per riuscire ad unire le travi agli archi strutturali, ancora una volta è stato necessario ricorrere ad elementi di giunzione personalizzati; infatti, ogni trave necessitava di inclinazioni specifiche, dettate dalle dimensioni degli archi che avrebbero connesso.

Infatti, agli archi più grandi tra di loro hanno una differenza di altezza molto più bassa rispetto agli archi più piccoli posizionati alla base dell'edificio, di conseguenza le travi avranno inclinazioni leggermente differenti tra loro.

Inoltre, per connettere le travi agli archi ho scelto di utilizzare dei giunti a scomparsa (305), ovvero composti da una lastra metallica che andasse a nascondersi all'interno della trave e fissata tramite bulloni che la attraversano da parte a parte. Per tutti questi motivi vi erano diversi aspetti da considerare e da non sottovalutare

nel momento della creazione del giunto, prima di tutto l'inclinazione come già detto, in secondo luogo la dimensione del giunto, che non doveva essere maggiore rispetto alla trave, ma nemmeno troppo piccolo o sarebbe stato inutile.

Per risolvere entrambe le questioni ci è venuto in aiuto il modello 3D; infatti, avendo già posizionato le travi grazie all'algoritmo realizzato su Grasshopper, ci è stato possibile effettuare un "bake" delle geometrie per poterci lavorare direttamente da Rhinoceros, andando a modellare gli incastri direttamente con le inclinazioni che avrebbero avuto le travi.

La prima cosa a cui ho pensato è stata appunto la connessione delle travi, come già detto ho pensato di connettere le travi per mezzo di un giunto a scomparsa, quindi una lastra piatta in acciaio, questa avrebbe dovuto tenere conto di 2 inclinazione, a parte per quanto riguarda le travi posizionate alla fine e all'inizio della struttura, le quali non avendo travi dal lato opposto al loro non avrebbero patito questo problema. Per tutte le altre invece è stato pensato un giunto doppio, in grado di connettere entrambe le travi che si sarebbero dirette in quel particolare giunto.

Quando ho provato a modellare il giunto mi sono subito resi conto che quasi tutte le travi intersecavano gli archi strutturali, questo ovviamente nel modello digitale non è un problema, ma nella realtà questo aspetto avrebbe impedito la giunzione corretta delle travi.

Per questo motivo ho subito ripreso la geometria di base degli archi e l'ho utilizzata per sottrarre da ogni trave, tramite sottrazione booleana (306), la parte che intersecava l'arco, in questo modo si

è creato uno scasso nella trave, che verrà poi realizzato dalla fresa CNC al momento della lavorazione.

Una volta ottenuta la forma delle travi ho tracciato delle linee di mezzeria per avere una guida dove far passare il giunto da nascondere all'interno (307), da queste linee ho poi ricavato due superfici estrudendole per 20 cm, ovvero lo spessore che ho ipotizzato per le piastre di giuntura. Il passo successivo è stato quello di tagliare le superfici ottenute ad una distanza di 50 cm dall'inizio delle travi, ottenendo così la lunghezza dei giunti.

Le due superfici ottenute in questo modo forniscono la geometria di base da cui partire per creare il giunto per le due travi, l'operazione successiva è stata quella di unire queste due superfici con una superficie creata sfruttando i bordi delle due superfici "originali" (308).

La superficie ottenuta non sarà dritta, infatti ogni trave sarà leggermente sfalsata rispetto alla precedente, questo per mantenere il disegno strutturale voluto in copertura.

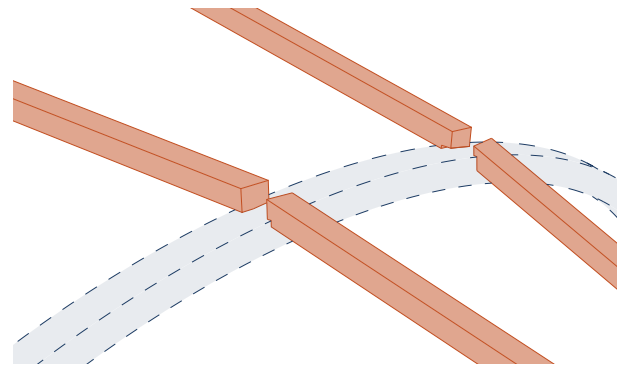
Questa piega è ben visibile guardando la struttura dall'alto, ed è facile estrarre l'angolo d'inclinazione dal modello 3D; quindi, bisognerà trovare un modo per trasferire questa inclinazione alla lastra.

A questo punto estrudendo le superfici di 2 cm ho completato geometria per la piastra, a questo punto la cosa importante da capire era come realizzare una piastra di questo tipo. Il primo step è sicuramente quello di tagliare a laser la geometria piana, posizionando già i fori ricavati contemporaneamente sia sulle travi (309) che sulla piastra tramite sottrazione booleana, in modo da ottenere una corrispondenza perfetta, tuttavia essendo necessarie delle pieghe andrà calcolato il fattore K, ovvero:

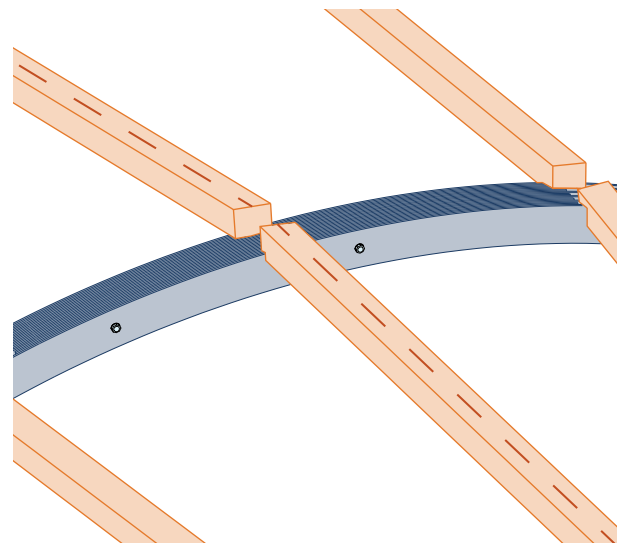
$$L = A+B+(n/2 \times R + K \times T) \times \alpha$$

Dove A e B sono le lunghezze dei

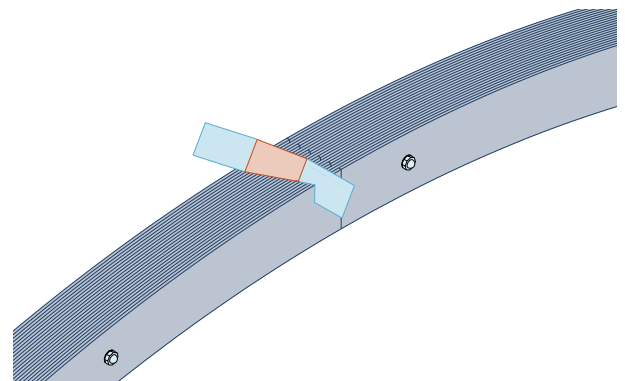
tratti piani, R è il raggio interno di piega, T lo spessore della lamiera, K è il K-factor, e



(306) Sottrazione tramite differenza booleana della parte di trave sovrapposta all'arco.



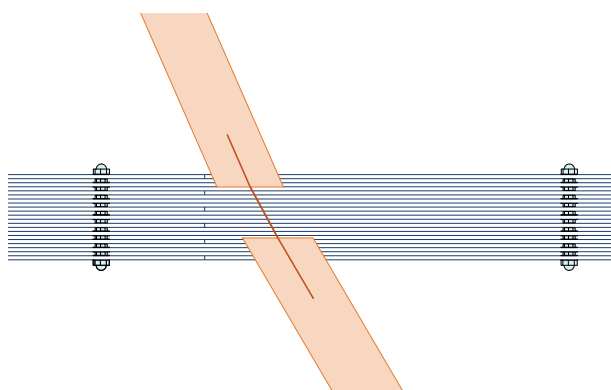
(307) Linea di mezzeria tracciata su una delle travi principali



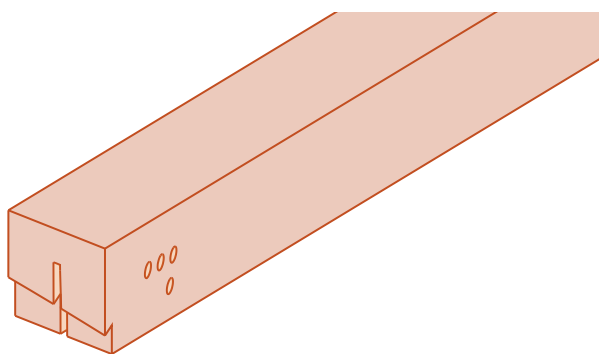
(308) Superfici generate dalla linea di mezzeria in azzurro e superficie di giunzione in arancione

α l'angolo di piega in radianti.

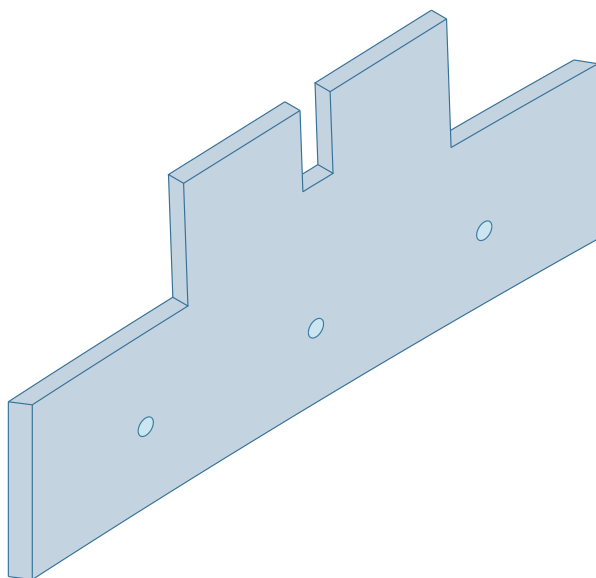
Questa formula tiene conto della deformazione del materiale durante la piegatura, consentendo di calcolare quanto materiale aggiungere nella zona della piega per evitare che le pieghe realizzate vadano ad accorciare il pezzo più del previsto.



(309) Piega della piastra che giunta le travi sopra l'arco strutturale



(310) Testa di trave completa di fresatura centrale e fori per inserimento dei bulloni



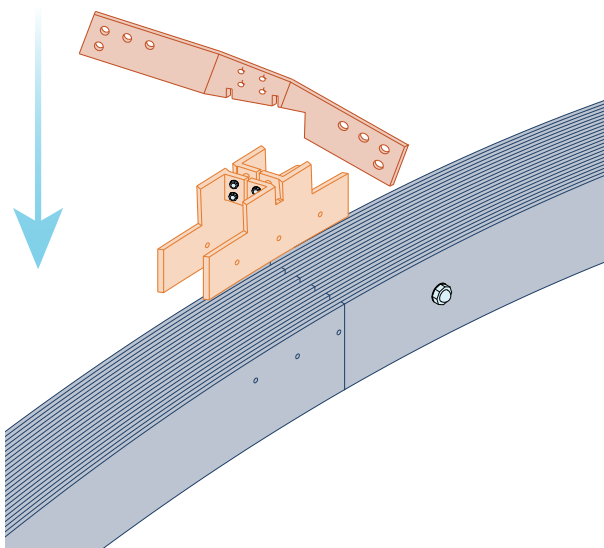
(311) Piastra connessa direttamente con l'arco strutturale che consente la giunzione delle travi.

Questa formula tiene conto della deformazione del materiale durante la piegatura, consentendo di calcolare quanto materiale aggiungere nella zona della piega per evitare che le pieghe realizzate vadano ad accorciare il pezzo più del previsto.

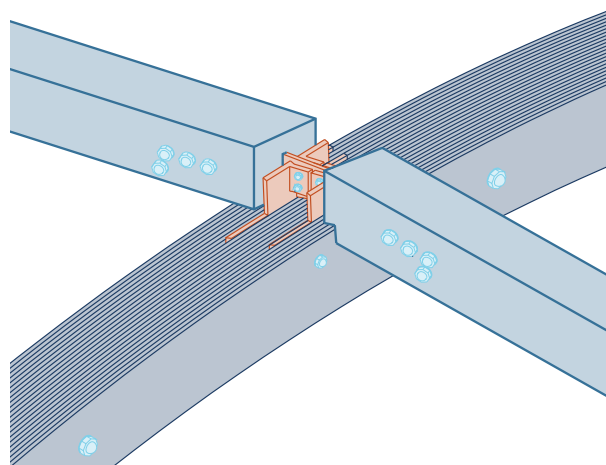
Una volta completato l'incastro delle travi (310) era necessario trovare un modo per giuntare l'incastro stesso con l'arco strutturale, impedendo quindi il movimento delle travi e fissandole nella posizione corretta.

Per farlo ho scelto di utilizzare due piastre (311), sempre dello spessore di 2 cm che riprendesse la forma dell'arco e che si inserissero perfettamente all'interno delle fessure tra uno strato e l'altro degli archi, più precisamente nel terzo spazio libero da ciascuno dei due lati. Queste piastre, ovviamente realizzate sempre tramite taglio laser, avrebbero poi avuto alle estremità delle asole saldate con la stessa inclinazione del giunto per le travi in cui far passare i bulloni per il fissaggio con l'incastro della trave. Ovviamente nella parte bassa della piastra che avrà un'altezza di 20 cm saranno presenti 3 fori, posizionati in mezz'aria, per fissarla sempre tramite imbullonatura agli archi strutturali; quindi, di conseguenza anche negli archi andranno previsti questi fori durante le fasi di taglio delle componenti. Questi incastri non saranno giuntati solo tramite i bulloni, ma anche dai corpi stessi delle piastre; infatti, circa 5 cm della piastra inserita all'interno dell'arco verrà incastrata con i primi 5 cm della piastra che giunta le travi (312), in questo modo l'incastro sarà molto più efficiente e offrirà resistenza sia in senso longitudinale che trasversale.

Una volta connesso questo incastro (313) garantisce la tenuta delle travi in tutte le direzioni, bloccando rotazioni e spostamenti grazie ai numerosi incastri, tuttavia così come in tutti i casi in cui si ha un livello così elevato di personalizzazione il problema rischia di presentarsi all'arrivo dei pezzi in cantiere, in quanto la differenza minima tra le parti rischia di rendere molto complesso identificare il giunto corretto per ogni trave. Per questo motivo è stato necessario



[312] Esploso dei vari componenti del giunto

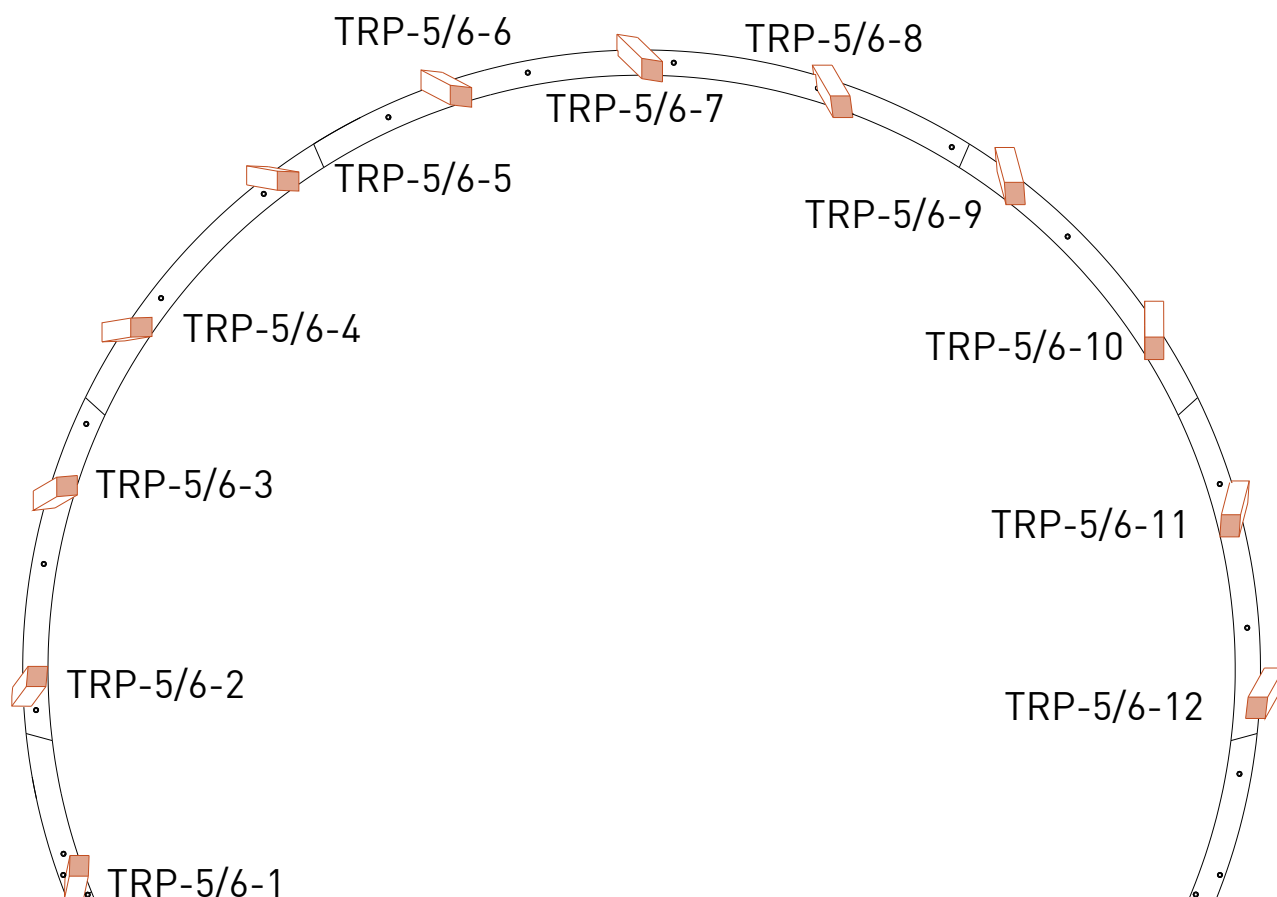


[313] Giunto travi-arco al completo

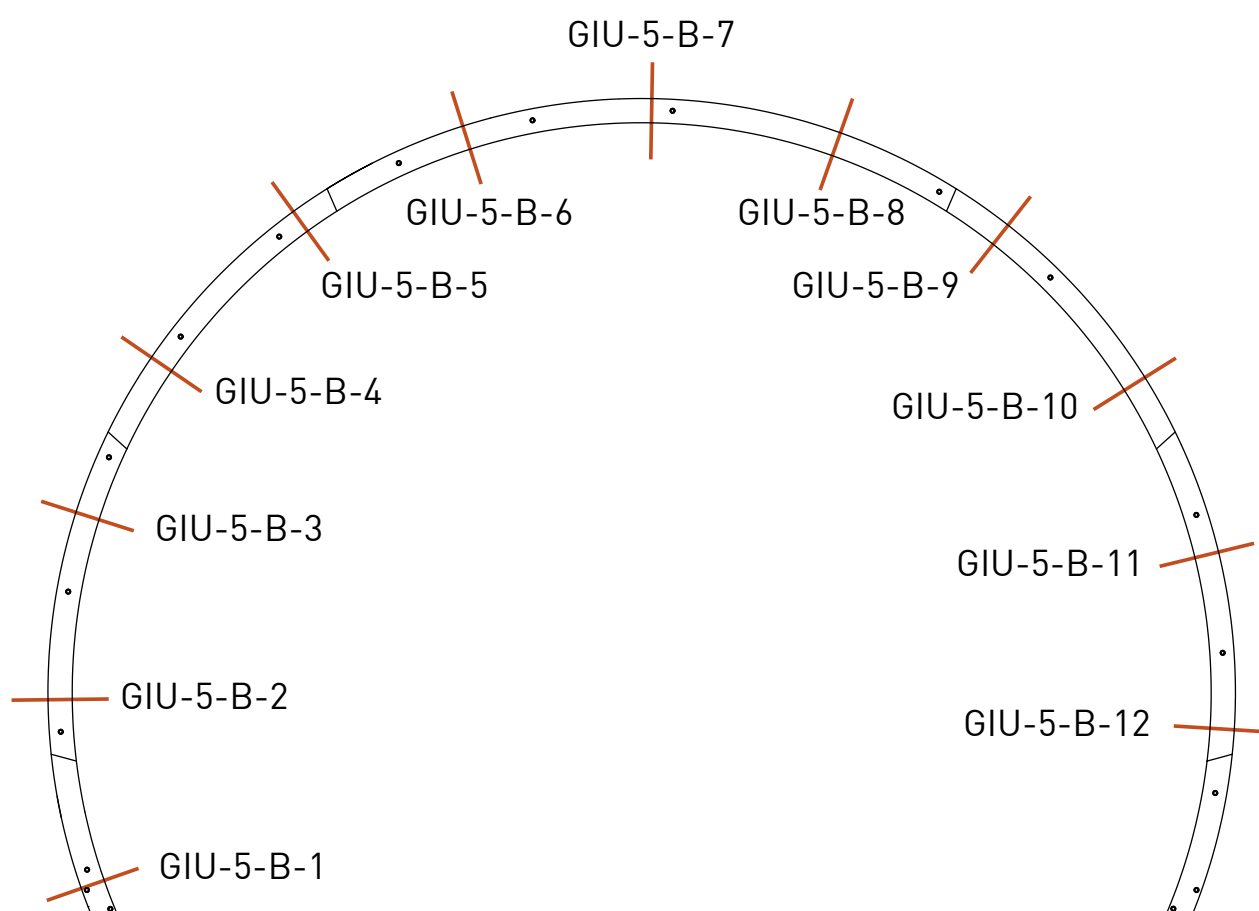
creare un disegno con annotate tutte le sigle pensate, anche in questo caso appositamente per rendere facilmente identificabili i componenti e posizionarli nella corretta posizione. Questa operazione è stata eseguita sia per

le travi che per i giunti, e ovviamente anche queste sigle sono state pensate appositamente con dei significati ben precisi.

Per quanto riguarda le travi ho pensato di utilizzare come prima sigla TRP, ovvero



[314] Esempio numerazione travi in senso orario



[315] Esempio numerazione giunti in senso orario

travi principali. Come seconda sigla ho scelto di utilizzare il numero degli archi che vengono collegati dalla suddetta trave, ad esempio le travi che ho scelto di numerare come esempio collegano gli archi 5 e 6, quindi la seconda parte della sigla sarà 5/6. Infine, serviva distinguere il numero della trave tra quelle che collegano gli archi, per cui ho numerato in senso orario le travi da 1 a 12 come ultima parte della sigla. Il risultato finale sarà una sigla di questo tipo: TRP-5/6-1. Nel disegno creato per schematizzare questa operazione [314] ho indicato le travi con dei quadratini arancioni, che indicano la sezione della trave, inoltre per assicurarci che venissero montate nel verso giusto ho pensato di scrivere la lettera A per il verso che punta

verso il basso, e B su quello opposto. per quanto riguarda lo schema dei giunti [315] invece sono stati indicati con dei tratti arancioni più spessi.

I giunti sono stati denominati con un altro criterio, come prima parte della sigla ho abbreviato giunto con GIU, in secondo luogo ho scelto di inserire il numero dell'arco sul quale sarebbe stato fissato il giunto, nel caso esempio il 5.

Come terza sigla ho pensato di inserire il lato verso cui si sarebbe rivolto il giunto, B in caso sia rivolto verso la base, C in caso sia rivolto verso la cima del progetto. Infine, ho utilizzato sempre lo stesso conteggio in senso orario per numerare i giunti e posizzionarli correttamente.

La sigla ottenuta alla fine sarà simile alla

seguente: GIU-5-B-1. Una volta completati tutti questi elementi sarà possibile assemblare in opera le travi in pochissimo tempo, pochissimo sforzo e praticamente senza rischi, l'unico punto debole della

procedura esposta probabilmente è la mancanza di un algoritmo velocizzi il lavoro, ma la complessità richiesta per crearlo sarebbe stata molto elevata considerando tutte le forme coinvolte.

6.5 - Travi secondarie copertura

6.5.1 - Generazione geometria travi secondarie

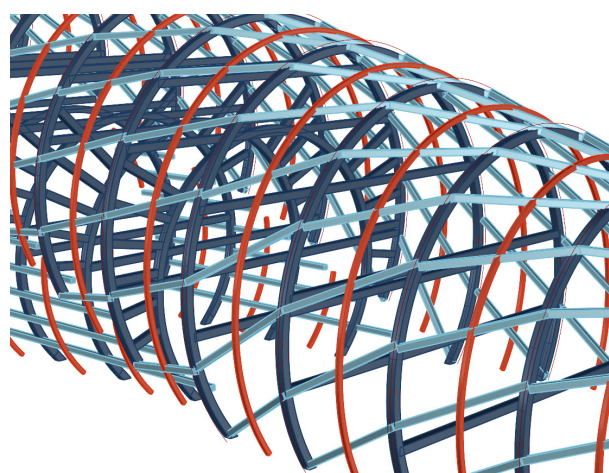
L'ultima parte della struttura rimasta da analizzare riguarda le travi secondarie, la cui geometria, anche in questo caso è stata generata tramite un algoritmo realizzato su Grasshopper. La differenza rispetto alle travi principali ovviamente è il fatto che le travi secondarie (316) per come le ho pensate avranno una geometria più simile a quella degli archi strutturali. Per questo motivo ho deciso di utilizzare come punto di partenza lo stesso algoritmo utilizzato per la realizzazione degli archi (317), modificando poi semplicemente le distanze di offset, in particolare la distanza rispetto alla fine della geometria originale, ovviamente inferiore rispetto a quella delle travi principali.

Nello specifico ho lasciato una distanza da 20 cm rispetto al punto finale, mentre lo spessore assegnato alle travi è di 20 cm, così come la profondità.

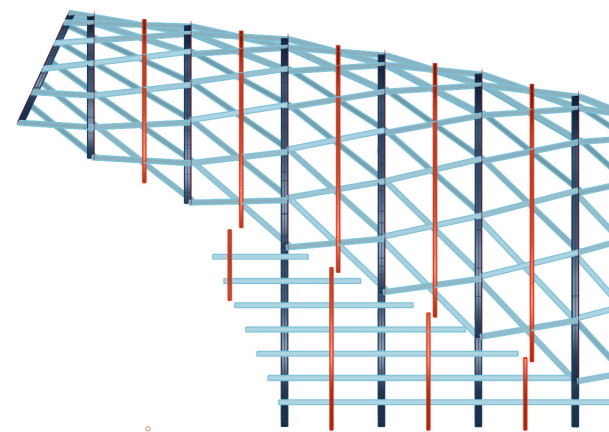
Lo scopo principale di queste travi sarà quello di consentire la posa dei pannelli su di esse, evitando in questo modo di avere dei pannelli di dimensioni molto difficili da trasportare, oltre che da produrre.

Per questo motivo queste travi sono posizionate a metà strada tra un arco strutturale e l'altro, ovvero dimezzare la lunghezza dei pannelli che verranno posati in copertura, ottenendo una dimensione dei pannelli che va da un minimo di 1,5 x 3 m, fino ad un massimo di 4,5 x 3 m, ovvero una misura non troppo complessa in quanto realizzazione e trasporto.

La struttura a questo punto risulta essere completa (318), infatti aggiungendo queste travi si arriva ad avere un disegno



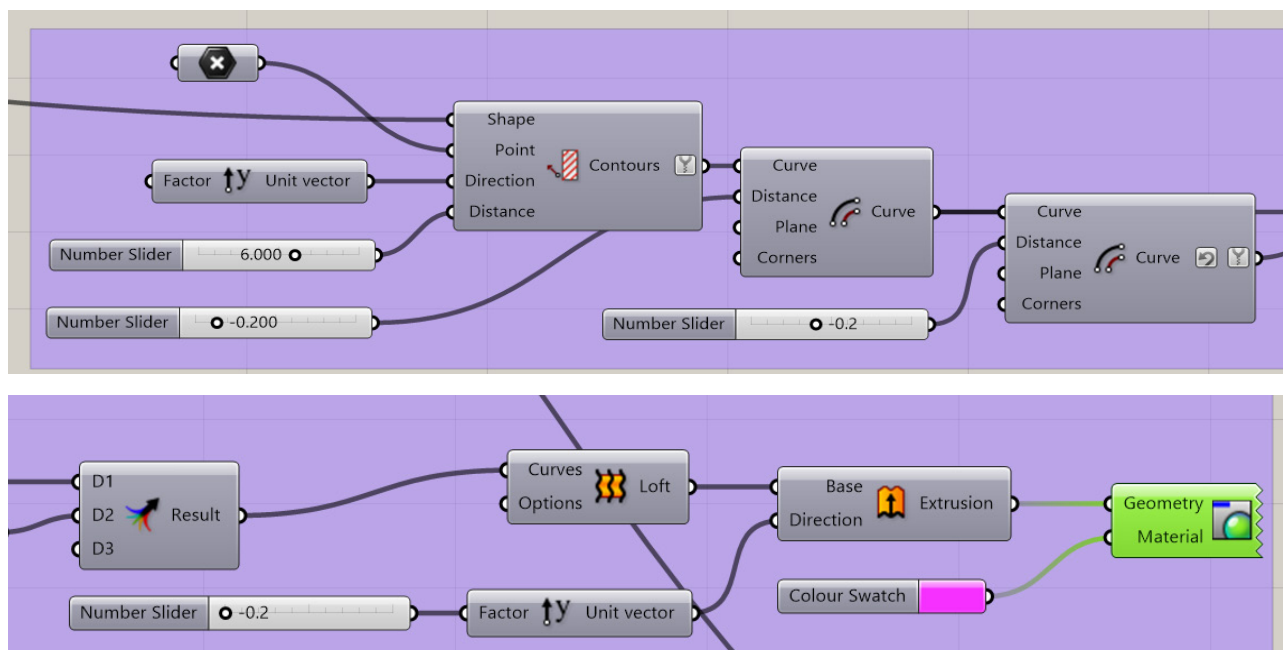
(316) Travi secondarie posizionate all'interno del modello 3D



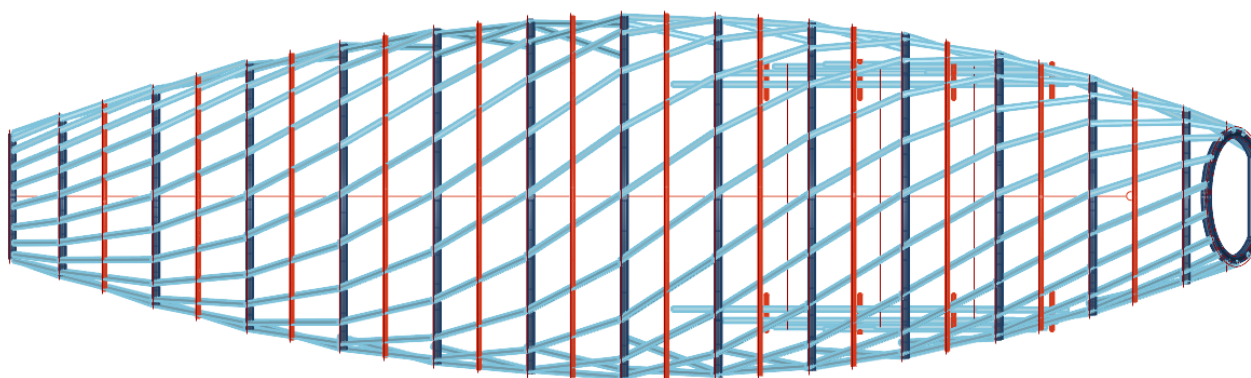
(317) Travi secondarie posizionate sul corpo cilindrico all'ingresso.

strutturale abbastanza fitto da consentire l'inserimento di pannelli e di tutti gli elementi necessari al corretto funzionamento della struttura (319).

Ovviamente lo stesso procedimento è stato eseguito anche con il corpo cilindrico



[318] Travi secondarie posizionate all'interno del modello 3D



[319] Struttura completa vista dall'alto, travi secondarie in arancione

all'ingresso.

Per quanto riguarda il materiale utilizzato per la realizzazione delle travi, sarà lo stesso legno lamellare utilizzato per le travi principali, con le dovute differenze di forma e spessore.

Proprio la forma infatti è la causa della principale differenza di lavorazione; infatti, non sarà più possibile sezionare gli assi con una semplice squadratrice, ma sarà necessaria una macchina a controllo

numerico, in modo da seguire la forma tondeggiante della trave in modo rapido e preciso.

Tuttavia, questa è l'unica differenza rispetto al metodo di lavorazione utilizzato per le travi principali; infatti, tutti i passaggi successivi come l'impregnazione e la lavorazione finale con CNC sarà la medesima, ovviamente con le dovute differenze nel disegno.

6.5.2 - Assemblare le travi secondarie

Essendo posizionate a metà strada tra un arco strutturale e l'altro il modo più logico per collegare queste travi al resto della struttura era ancorarle alle travi principali, per fare questo ho scelto di utilizzare un sistema composto da 2 componenti come nel caso delle travi principali.

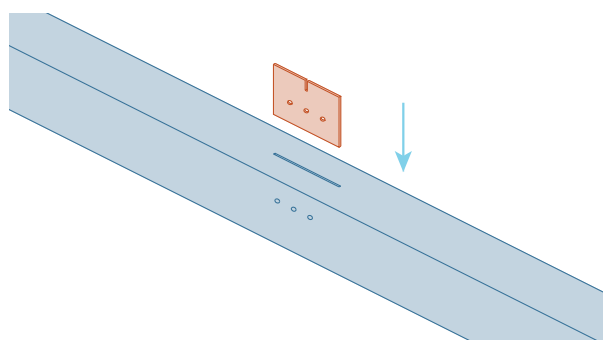
Il primo componente ha lo scopo di creare un punto di connessione per il secondo che verrà connesso direttamente con due travi, è composto da una piastra metallica spessa 1 cm che rientra per 20 cm, in altezza e 30 in larghezza all'interno di una fresatura posta al centro della trave principale (320). Questa piastra fuoriesce dalla trave solo per 5 cm (321), che li consentono di creare l'incastro per la seconda parte del giunto attraverso la sagoma della piastra tagliata a laser e delle asole saldate ad essa nelle quali è possibile inserire i bulloni per la giuntura.

Ovviamente questa prima parte del giunto sarà assicurata alla trave tramite dei fori posizionati sia sulla piastra (dove saranno tagliati a laser), sia sulla trave (dove saranno incisi con la CNC).

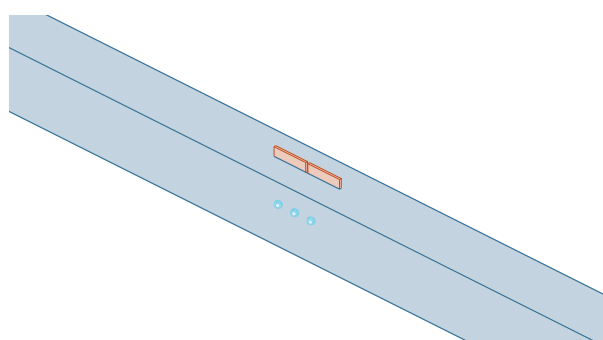
La seconda parte del giunto sarà anch'essa realizzata tramite taglio laser con delle asole saldate ai lati per poter essere giuntate alla prima parte del giunto (322). Per ottenere la corretta geometria da tagliare a laser sarà necessario sottrarre eventuali intersezioni con le travi principali, inoltre per come è pensato sarà necessario prima giuntare questa seconda parte alla prima, in modo da poter avvitare i due giunti tra di loro (323) e subito dopo posizionare le travi secondarie, anche in questo caso con delle fessure che consentano la scomparsa del giunto.

Questa seconda parte del giunto avrà un'altezza di soli 10 cm, questo per non andare troppo in profondità nella trave (324) che in questo caso è spesso solo 20 cm.

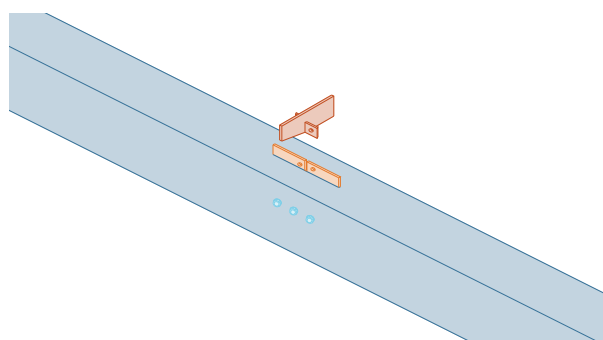
Anche in questo caso le travi andavano a sovrapporsi con quelle principali per qualche centimetro, per questo motivo,



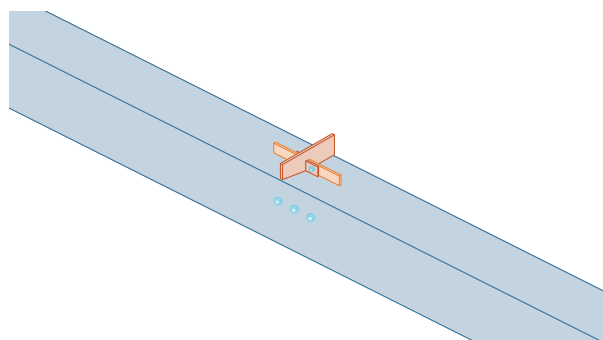
(320) Prima staffa incastro che viene posizionata a metà della trave principale.



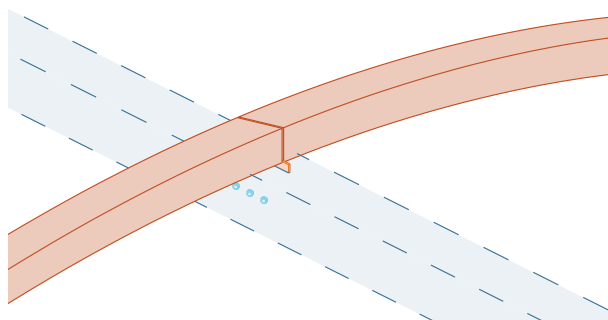
(321) Prima staffa incastro connessa alla trave principale



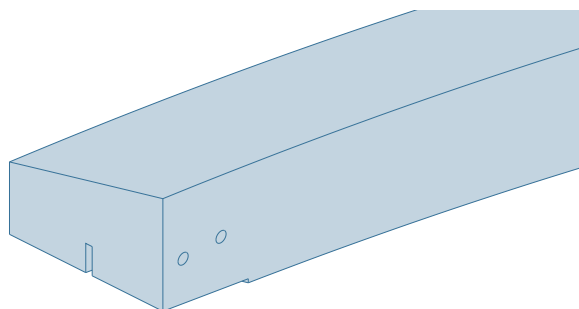
(322) Seconda staffa che viene fissata alla prima



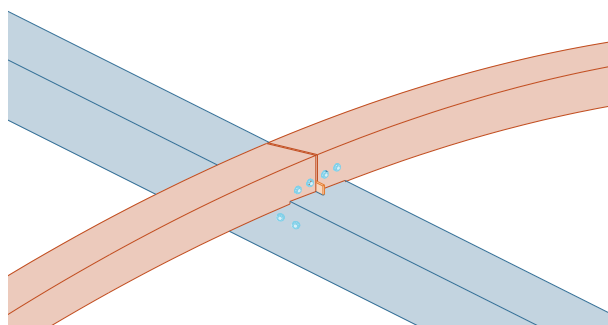
(323) Connessione delle due parti del giunto



(324) Sottrazione della trave principale dalle secondarie



(325) Profilo completamente elaborato di una trave secondaria



(326) Incastro tra 2 travi secondarie e una trave principale al completo.

ancora una volta mi sono aiutato con il modello 3D per effettuare una sottrazione booleana e sottrarre la parte di trave principale da quella secondaria, ottenendo così il profilo perfetto (325-326) da sottoporre alla lavorazione della CNC. La bellezza di questo incastro così come di tutti quelli che sono stati pensati fino a

questo momento è la totale copertura dei giunti che verranno inseriti all'interno della struttura rendendoli quasi invisibili (se non fosse per le teste dei bulloni).

Inoltre, questo tipo di giunti garantisce oltre ad un assemblaggio molto rapido anche un disassemblaggio altrettanto rapido ed efficiente, garantendo il completo recupero di tutti i materiali edilizi rendendoli molto semplici da separare e riutilizzare / riciclare molto facilmente.

Anche in questo caso, essendo ogni trave differente rispetto alla precedente sarà molto importante creare una sigla specifica per ogni trave e per ogni giunto, essendo anche l'inclinazione della trave incidente sulla forma finale del giunto.

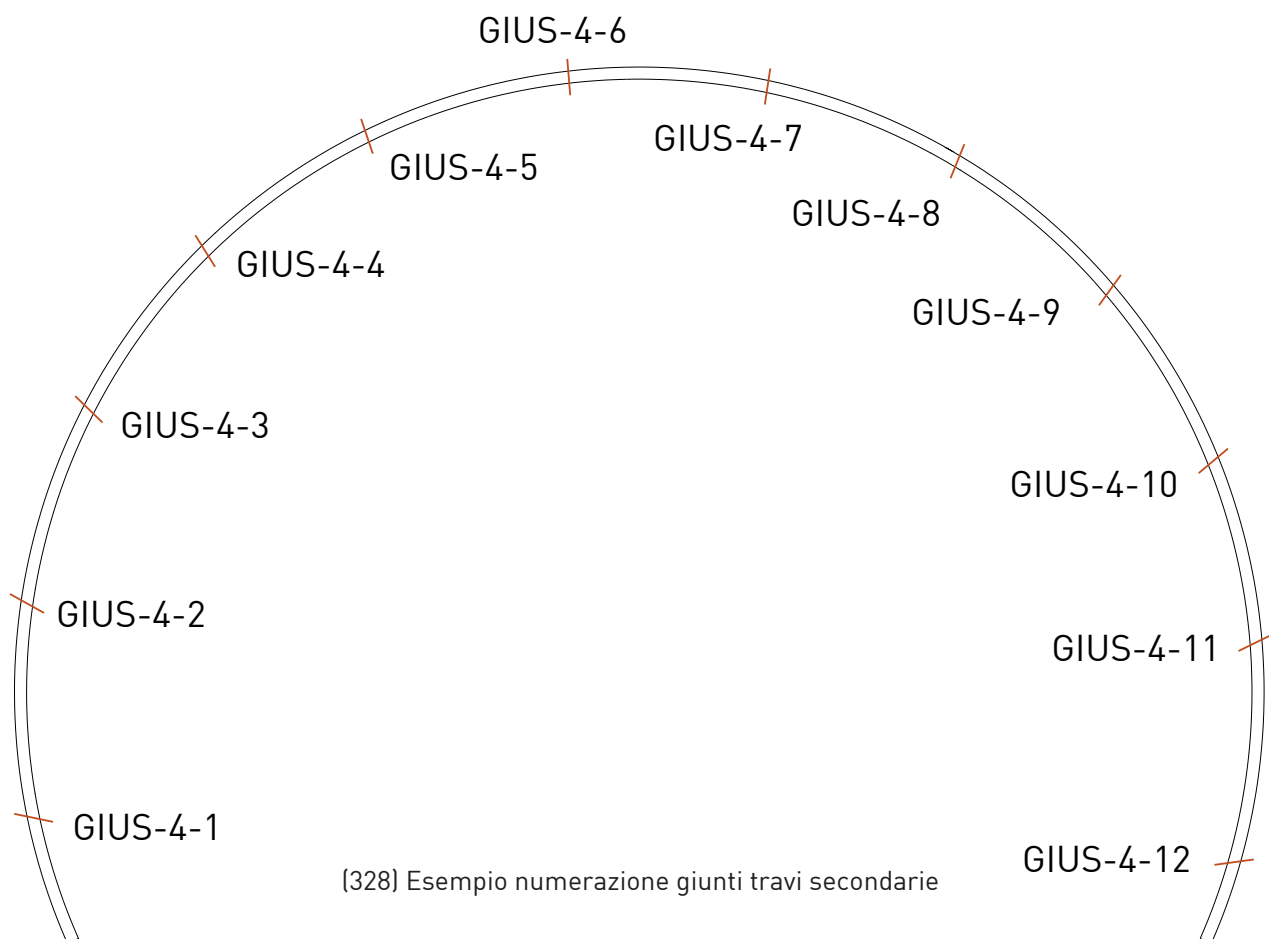
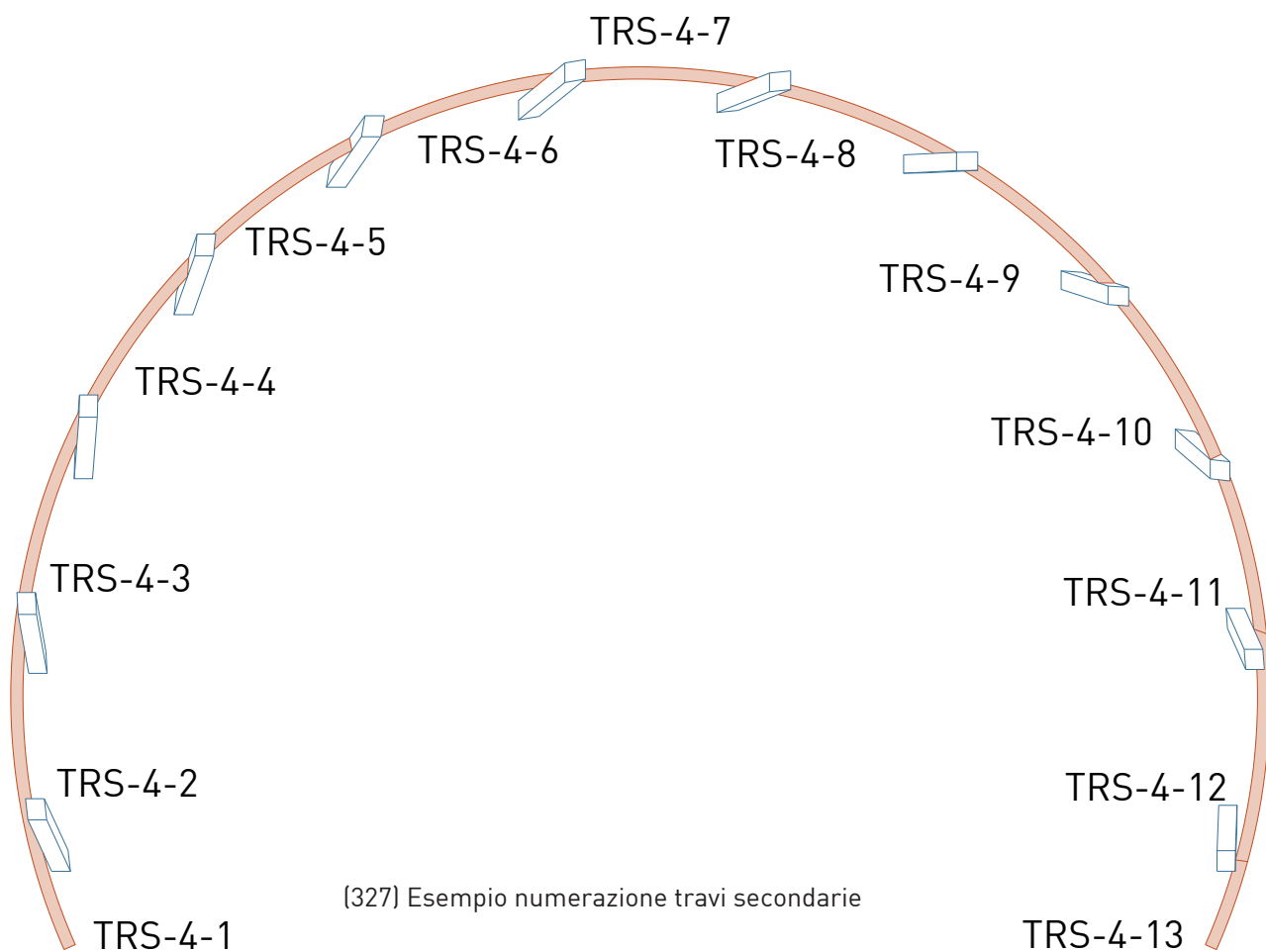
Per quanto riguarda le travi come prima sigla ho usato TRS, ovvero travi secondarie, come seconda sigla ho indicato il numero della trave partendo dal basso, nel caso che porteremo come esempio 4. Infine, come ultimo elemento ho inserito il numero il numero della trave assegnato in senso orario rispetto al disegno; quindi, una possibile sigla ottenuta potrebbe essere TRS-4-1 (327).

Ovviamente anche in questo caso è stato necessario annotare sulle travi delle sigle che indicassero la direzione di montaggio, S per lato sinistro e D per lato destro, avendo come riferimento i disegni forniti con le istruzioni di montaggio.

Per quanto riguarda i giunti invece come prima sigla ho usato GIUS, ovvero come giunto secondario, come seconda ho inserito il numero dell'ordine di travi a cui appartiene quella trave, in questo caso sempre 4.

Per concludere ho inserito i numeri delle travi, tra cui è compreso il giunto, ad esempio 5/6, ottenendo quindi delle sigle di questo tipo GIUS-4-5/6 (328).

Ovviamente è fondamentale che queste sigle vengano scritte sui giunti e sulle travi in modo che una volta arrivati in cantiere sia sufficiente guardare i disegni per assemblare facilmente tutti i pezzi.

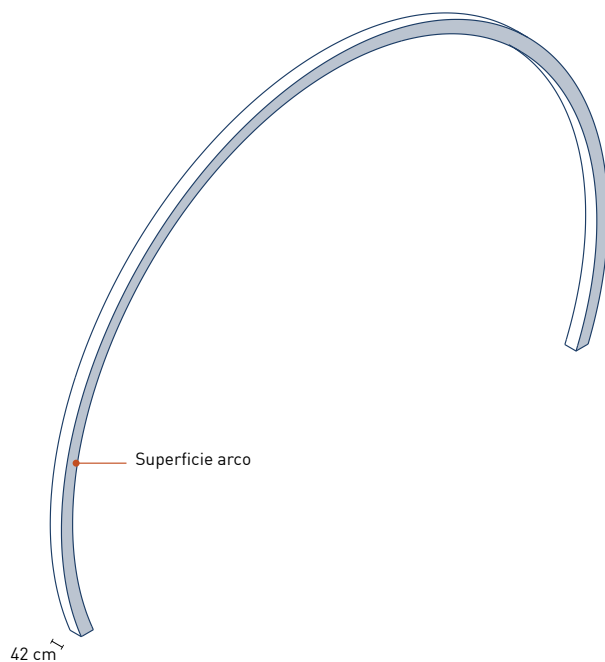


6.6 - Calcolo peso edificio

Pur non essendo il focus di questa tesi analizzare il comportamento della struttura, ci sembrava illogico non includere una breve analisi strutturale dell'auditorium, soprattutto considerando la natura particolare di questa struttura. Per questo motivo ho calcolato il peso strutturale di tutti gli elementi strutturali e non strutturali (anticipando anche alcune parti che verranno trattate nel prossimo capitolo come la pelle esterna) per dare un ordine di grandezza degli sforzi in gioco.

6.6.1 - Peso strutturale

6.6.1.1 - Archi strutturali



[329] Arco strutturale con evidenziata la faccia da cui è stata estratta la superficie e con indicato lo spessore di 42 cm.

Oltre a questo, ho analizzato anche la direzione degli sforzi e il peso che avrebbero dovuto sostenere i solai aggiungendo il carico di persone e oggetti di arredo, oltre ovviamente allo sforzo causato dal vento, dalla neve e dalla pioggia.

Ovviamente non sarà un'analisi completa e dettagliata su ogni singolo elemento, ma un'analisi di base del comportamento complessivo della struttura.

Per calcolare il peso strutturale degli archi ho seguito il seguente procedimento:

Per prima cosa grazie alla geometria di base creata su Rhino ho estratto l'area totale della superficie, facilmente calcolabile tramite il comando area presente su Rhino. La seconda operazione è stata quella di moltiplicare l'area ottenuta, ovviamente differente per ogni arco, moltiplicata per lo spessore degli archi (42 cm) ottenendo in questo modo il volume dell'arco [329].

Ovviamente questo volume successivamente è stato diviso per 2, per tenere in considerazione gli strati vuoti che compongono gli archi.

A questo punto ho moltiplicato il volume in m^3 di ogni arco per il peso specifico al m^3 dell'acciaio strutturale specifico, che ho ipotizzato per la realizzazione del progetto, ovvero $7850 \text{ Kg}/m^3$.

Il risultato finale ottenuto da questi calcoli lo ho riassunto in una breve lista con il peso specifico di ogni arco numerandoli come al solito dal basso verso l'alto.

Arco 1

Area: 5,9 m²

Volume: 2,5 m³ --> 1,25 m³

Peso: 9812 Kg

Arco 2

Area: 7,5 m²

Volume: 3,1 m³ --> 1,55 m³

Peso: 12167 Kg

Arco 3

Area: 10 m²

Volume: 4,2 m³ --> 2,1 m³

Peso: 16485 Kg

Arco 4

Area: 12,5 m²

Volume: 5,2 m³ --> 2,6 m³

Peso: 20410 Kg

Arco 5

Area: 15 m²

Volume: 6,3 m³ --> 3,15 m³

Peso: 24727 Kg

Arco 6

Area: 25 m²

Volume: 10,6 m³ --> 5,3 m³

Peso: 41605 Kg

Arco 7

Area: 36 m²

Volume: 15,2 m³ --> 7,6 m³

Peso: 59660 Kg

Arco 8

Area: 38 m²

Volume: 16 m³ --> 8 m³

Peso: 62800 Kg

Arco 9

Area: 70 m²

Volume: 30 m³ --> 15 m³

Peso: 117750 Kg

Arco 10

Area: 65 m²

Volume: 27 m³ --> 13,5 m³

Peso: 106000 Kg

Arco 11

Area: 60 m²

Volume: 25 m³ --> 12,5 m³

Peso: 98125 Kg

Arco 12

Area: 58 m²

Volume: 24,4 m³ --> 12,2 m³

Peso: 95770 Kg

Arco 13

Area: 22 m²

Volume: 9,2 m³ --> 4,6 m³

Peso: 36110 Kg

Arco 14

Area: 13 m²

Volume: 5,5 m³ --> 2,75 m³

Peso: 21567 Kg

Arco 15

Area: 10 m²

Volume: 4,2 m³ --> 2,1 m³

Peso: 16485 Kg

Peso totale archi strutturali

740000 Kg

6.6.1.2 - Vano scale

Per quanto riguarda il vano scale, avendo utilizzato elementi più standardizzati rispetto agli archi strutturali, per questo motivo ricavare volumi e pesi specifici è stato molto più semplice.

Per farlo mi sono affidati al sito metalscrapp.com, che consente di calcolare rapidamente il peso di profilati metallici inserendo come dati di input il tipo di profilo, la lunghezza della trave e il materiale utilizzato, in questo caso ho inserito dell'acciaio semplice. Inoltre, per quanto riguarda i controventi tubolari, consente di inserire, oltre al diametro del tubo anche lo spessore interno.

Quindi di seguito ho riportato i risultati dei pesi strutturali di ogni elemento utilizzato per il vano scale, nello specifico trave HEA 400, HEA 300, trave IPE 360, trave IPE 300 e trave IPE 200, oltre ovviamente alle croci di Sant'Andrea.

Pilastri HEA 400

Peso totale: 25000 Kg

Pilastri HEA 300

Peso totale: 4440 Kg

Travi IPE 360

Peso totale: 4000 Kg

Travi IPE 300

Peso totale: 7600 Kg

Travi IPE 200

Peso totale: 540 Kg

Croci di Sant'Andrea

Peso totale: 1440 Kg

Peso totale vano scale: 43000 Kg

6.6.1.3 - Travi IPE che sorreggono i solai interni

Per quanto riguarda le travi dei solai interni, anche in questo caso mi sono affidati al sito metalscrapp.com, in questo caso calcolando semplicemente travi IPE 300 e IPE 200, ma prestando più attenzione alle lunghezze molto diverse che le travi presentano tra loro per via della forma dei solai. Per una maggior leggibilità della distribuzione dei carichi inoltre ho suddiviso i pesi per piano e per tipologia di solaio, in particolare con la dicitura solaio piano per le parti di solaio pianeggianti e solaio inclinato per le parti di solaio dedicate alla platea dell'auditorium.

Piano primo

IPE 300 solaio piano: 3540 Kg

IPE 300 solaio inclinato: 4710 Kg

IPE 200 solaio piano: 1888 Kg

IPE 200 solaio inclinato: 3600 Kg

Peso totale travi primo piano: 13750 Kg

Piano secondo

IPE 300 solaio piano: 5700 Kg

IPE 300 solaio inclinato: 3800 Kg

IPE 200 solaio piano: 3825 Kg

IPE 200 solaio inclinato: 3600 Kg

Peso totale travi primo piano: 17000 Kg

Piano terzo

IPE 300 solaio piano: 3650 Kg

IPE 200 solaio piano: 4725 Kg

Peso totale travi primo piano: 8375 Kg

Peso totale solai: 39125 Kg

6.6.1.4 - Travi speciali

Per queste travi è stato utilizzato lo stesso tipo di acciaio utilizzato per gli archi strutturali, in modo da ottenere la massima resistenza strutturale possibile.

Per ricavare il volume è stata ricavata l'area della superficie tramite il modello realizzato su Rhino, ovvero 13,7 m² per le travi esterne e 11,8 m² per la trave centrale. A questo punto è stata moltiplicata l'area per lo spessore delle travi ovvero 30 cm, ottenendo così il volume che corrisponde a 4,11 m³ per le travi laterali e 3,5 m³ per la trave centrale.

Ovviamente questo volume andrà diviso per 2 in modo da considerare gli strati vuoti delle travi; quindi, si otterranno dei volumi finali di 2,05 m³ e 1,75 m³.

Come negli archi strutturali il peso specifico dell'acciaio è di 7850 Kg/m³; quindi, moltiplicando questo peso specifico per i volumi ho ottenuto il peso di queste 3 travi.

Travi laterali

$$2,05 \times 7850 = 16100 \text{ Kg}$$

Trave centrale

$$1,75 \times 7850 = 13737 \text{ Kg}$$

Peso totale travi speciali

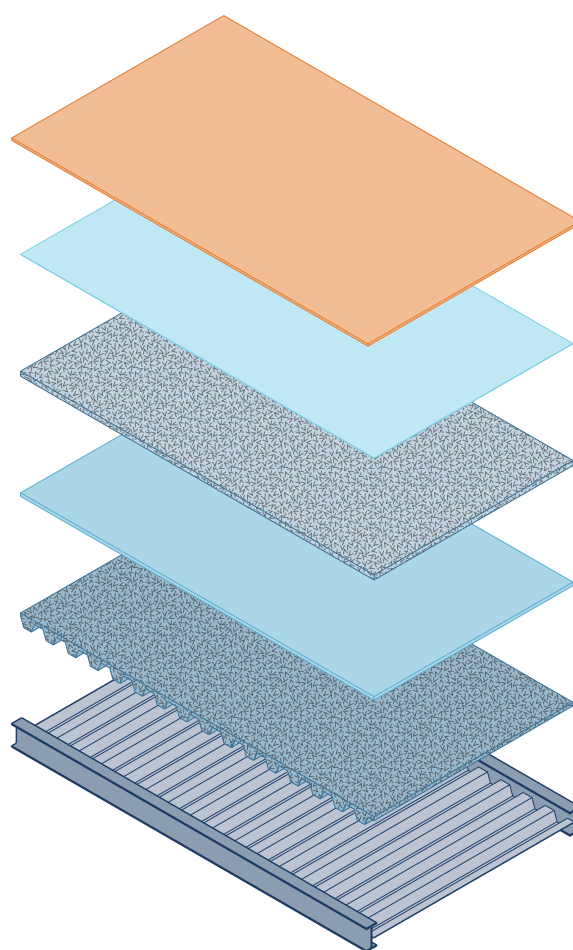
$$(16100 \times 2) + 13737 = 29837 \text{ Kg}$$

6.6.1.5 - Solai in lamiera grecata

Per i solai ho deciso di utilizzare come base della lamiera grecata con un'altezza di 8 cm, questo per l'elevata facilità di assemblaggio con le strutture di tipo metallico. Per quanto riguarda gli strati superiori del pannello ho utilizzato una stratigrafia molto classica, con un massetto in CLS di riempimento spesso 5 cm, uno strato isolante spesso 3 cm, un ulteriore strato di CLS di allettamento spesso 4 cm, un tappetino anti-calpestio e una pavimentazione spessa 2 cm.

A scopo di calcolo del peso ho tenuto in considerazione solo la lamiera grecata e i massetti in cls, essendo gli altri strati non inerenti alla prestazione strutturale e inoltre poco significativi in termini di peso. Per eseguire il calcolo mi sono aiutato ancora una volta con il modello, ottenendo dalla faccia della lamiera l'area occupata da 1 m di lamiera e moltiplicandola poi per la lunghezza del pannello, ottenendo dunque il volume per 1 m di lamiera in modo da ottenere il volume al m².

Successivamente ho ripetuto la stessa operazione per i due strati di CLS, dopodiché ho moltiplicato i volumi ottenuti



(330) Esploso degli elementi che compongono un solaio

per il peso specifico al m^3 sia della lamiera che del CLS, in questo modo ho ottenuto il peso per ogni m^2 di lamiera. A questo punto è stato sufficiente moltiplicare questo peso per il numero di m^2 presenti per ogni solaio, ottenendo quindi il peso di ciascuno di essi, e di conseguenza anche il peso totale dei solai.

m^3 lamiera per $m^2 = 0,0075 m^3$

m^3 CLS 1 per $m^2 = 0,069 m^3$

m^3 CLS 2 per $m^2 = 0,043 m^3$

Peso specifico lamiera: $7850 \text{ Kg}/m^3$

Peso specifico CLS: $2400 \text{ Kg}/m^3$

Peso specifico lamiera al m^2 : 59 Kg

Peso specifico CLS al m^2 : 269 Kg

Peso totale al m^2 : 328 Kg

6.6.1.6 - Travi principali copertura

Per le travi di copertura ho utilizzato la stessa misura [331] per tutti le travi comprese tra il secondo arco e il penultimo, per quanto riguarda le travi iniziali invece ho modificato la lunghezza; infatti, come si può vedere dal modello le travi che congiungono il primo e secondo arco sono più corte rispetto alle altre, nello specifico $3m$. Inoltre, per quanto riguarda le travi finali, anch'esse più corte ho personalizzato la lunghezza per ogni trave, infatti essendo l'ultimo arco inclinato, ogni trave avrà una lunghezza diversa rispetto alla precedente. Per quanto riguarda il peso specifico del materiale ho preso come riferimento del legno lamellare realizzato in abete rosso, essendo il legno più utilizzato per questo tipo di trave, il cui peso specifico, che può

Solaio primo piano superficie: $660 m^2$

Solaio secondo piano superficie: $667 m^2$

Solaio terzo piano superficie: $425 m^2$

Peso totale solaio primo piano: 216500 Kg

Peso totale solaio primo piano: 219000 Kg

Peso totale solaio primo piano: 140000 Kg

Per quanto riguarda invece un singolo pannello come quello mostrato nell'esploso [330], le dimensioni sono di $2 m$ per $3,5 m$ ovvero $7 m^2$, ovviamente non tutti i pannelli avranno le stesse dimensioni, per via della della forma del progetto che tende a stringersi sul retro.

Tuttavia, la maggioranza di questi pannelli avrà queste dimensioni e di conseguenza un peso di **2300 Kg** .

leggermente variare in base all'umidità si aggira intorno ai 500 Kg al m^3 .

Il numero di travi da $6 m$ che ho utilizzato nel progetto è 180 , le travi da $3 m$ invece sono 12 così come quelle a lunghezza variabile.

Travi da $6 m$

Volume singola trave: $0,54 m^3$

Peso specifico singola trave: 270 Kg

Peso specifico totale: 48600 Kg

Travi da $3 m$

Volume singola trave: $0,27 m^3$

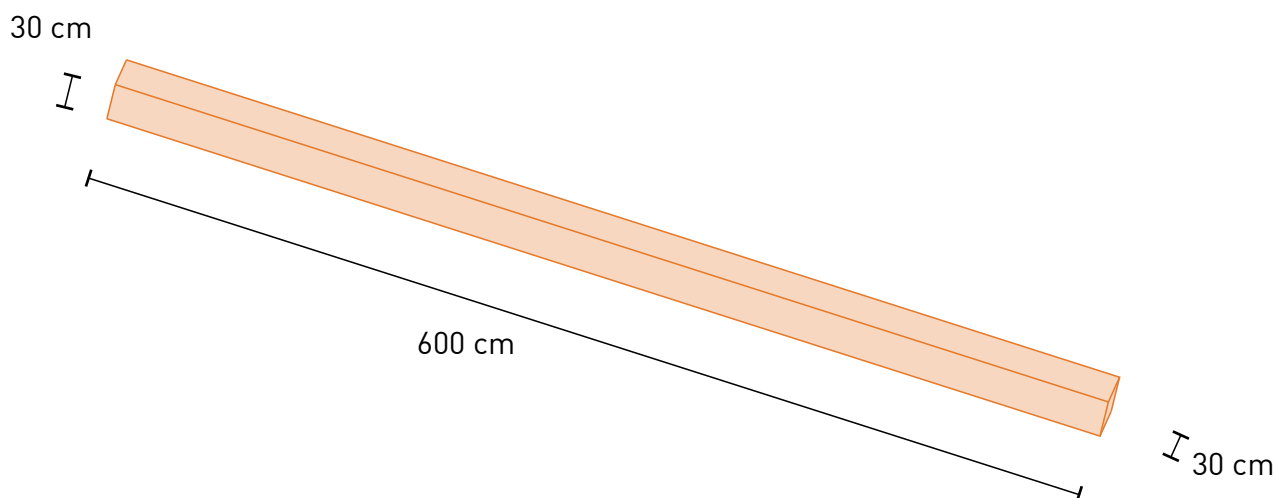
Peso specifico singola trave: 135 Kg

Peso specifico totale: 1620 Kg

Travi con lunghezza variabile

Peso specifico totale: 1800 Kg

Peso totale travi principali: 52000 Kg



[331] Trave principale in legno lamellare con quote

6.6.1.7 - Travi secondarie copertura

Ho semplificato i calcoli per le travi secondarie [332], evitando la complessità della loro forma tondeggianti. Come per gli archi strutturali, ho calcolato l'area dalla superficie del modello e moltiplicata per lo spessore (20 cm) per ottenere il volume. I gruppi di travi, denominati GTRAV, sono stati elencati con il loro peso specifico, mantenendo quello dell'abete rosso (500 Kg).

GTRAV-1

Volume: 0,9 m³

Peso specifico: 450 Kg

GTRAV-2

Volume: 1,16 m³

Peso specifico: 580 Kg

GTRAV-3

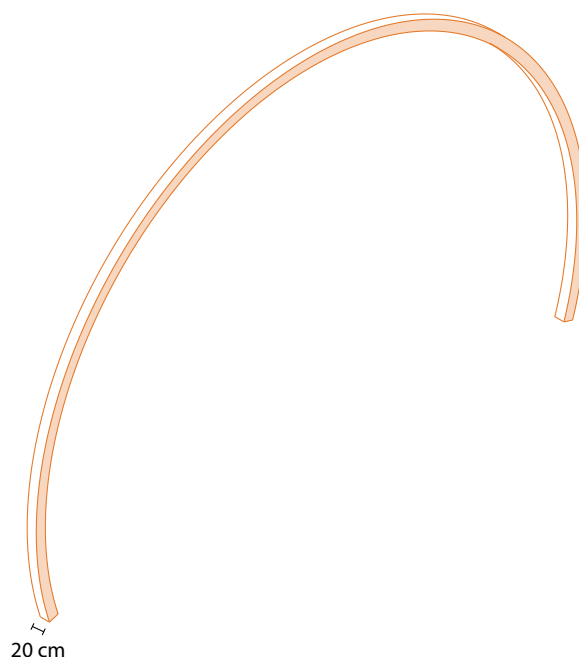
Volume: 1,4 m³

Peso specifico: 700 Kg

GTRAV-4

Volume: 1,6 m³

Peso specifico: 810 Kg



[332] Gruppo di travi con evidenziata la superficie che viene ricavata per essere moltiplicata con lo spessore e ottenere così il volume.

GTRAV-5

Volume: 1,8 m³

Peso specifico: 910 Kg

GTRAV-6

Volume: 2 m³

Peso specifico: 1000 Kg

GTRAV-7

Volume: 2,02 m³

Peso specifico: 1010 Kg

GTRAV-8

Volume: 1,9 m³

Peso specifico: 950 Kg

GTRAV-9

Volume: 1,7 m³

Peso specifico: 870 Kg

GTRAV-10

Volume: 1,6 m³

Peso specifico: 780 Kg

GTRAV-11

Volume: 1,35 m³

Peso specifico: 675 Kg

GTRAV-12

Volume: 1,1 m³

Peso specifico: 550 Kg

Travi struttura ingresso

Volume: 2,3 m³

Peso specifico: 1140 Kg

Peso totale travi secondarie: 10425 Kg

6.6.2 - Carico copertura

Ovviamente per analizzare in modo completo i carichi strutturali che compongono la struttura, occorre valutare anche il peso di quegli elementi che compongono

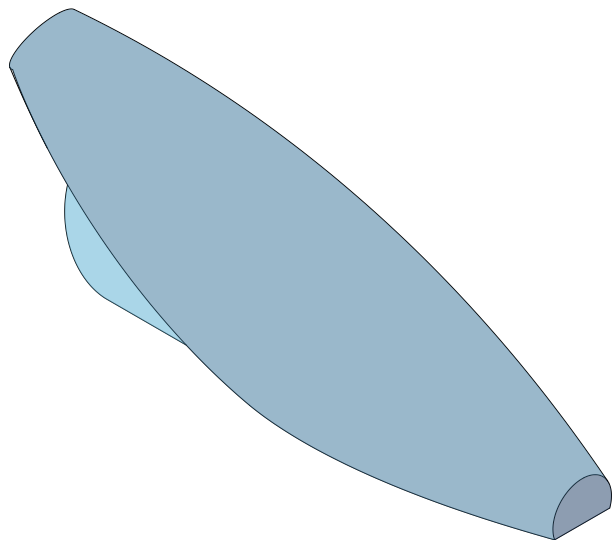
l'edificio ma senza sorreggerlo, nello specifico nei prossimi paragrafi analizzeremo il peso specifico della pelle esterna di copertura.

Per farlo prima di tutto è stato necessario ricavare dal modello la superficie totale composta dalla pelle esterna; quindi, sempre tramite il comando area ho calcolato la superficie di ogni lato, ottenendo la superficie specifica di ogni faccia [333-334].

Nello specifico le superfici hanno le seguenti metrature:

- Sup. principale: 3100 m²
- Sup. laterale (x2): 370 m²
- Sup. vetrata principale: 232 m²
- Sup. vetrata secondaria: 41 m²
- Sup. vetrata alta: 58 m²

Una volta ottenute le superfici totali delle



[333] Prima immagine riferita alla distinzione dei lati dell'auditorium

varie superfici è necessario suddividerle in base ai materiali che le compongono, in modo da poter assegnare ad ognuna di queste superfici un peso specifico.

Ovviamente siamo partiti dalla superficie principale, la quale come vedremo nel prossimo capitolo è composta da due tipi di

pannellature, opache e trasparenti. Nello specifico, su un totale di 312 pannelli ci saranno il 90% di pannelli opachi e il 10% di pannelli vetrati, dunque avendo già a disposizione la metratura della superficie ho calcolato la metratura totale di entrambe le soluzioni, ottenendo rispettivamente una superficie di 2790 m² opachi e 310 m² vetrati. In questo modo ho semplicemente moltiplicato i m² di superficie vetrata per lo spessore ipotizzato per i pannelli di vetro, ovvero 2 lastre da 6 mm, quindi 1,2 cm totali.

Moltiplicando i m² per lo spessore, ho dunque ottenuto il volume generale di tutto il vetro inserito all'interno di questo lato del progetto, ovvero 3,72 m³.

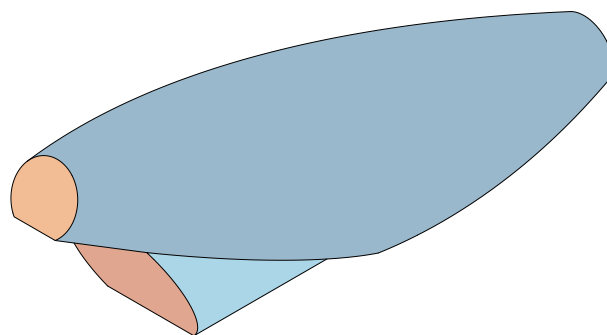
Come peso specifico del vetro ho considerato 2500 Kg e a questo punto ho semplicemente moltiplicato il volume per il peso specifico, ottenendo il peso totale di 9300 Kg.

Per quanto riguarda il peso dei montanti in alluminio ho calcolato la lunghezza ho ottenuto la superficie dell'area moltiplicando base per altezza ovvero 10 x 25 cm, ovvero 250 cm².

A questo punto ho moltiplicato area per lunghezza per ottenere il volume di 3 m e 2 m, ovvero un valore medio della lunghezza e larghezza dei pannelli, ottenendo così il volume di 0,075 e 0,050 m².

A questo punto moltiplicando il valore ottenuto per il peso specifico dell'alluminio di 2700 Kg, ho ottenuto il peso di questi montanti di 202,5 Kg e di 135 Kg, però da questi pesi andrà sottratto un 40% del peso dovuto alle camere d'aria interne degli infissi. Quindi alla fine il peso dei bordi degli infissi sarà un totale di 405 Kg. Moltiplicando per 30 questo dato otterremo il peso totale di tutti i montanti in alluminio dei pannelli presenti nella copertura principale, ovvero 12.150 Kg.

Per quanto riguarda i pannelli opachi, ovviamente la questione è un pò più complessa, essendo i pannelli composti da più strati di materiali e di conseguenza hanno pesi specifici differenti, per cui ho analizzato gli spessori di ciascun



[334] Seconda immagine riferita alla suddivisione delle facce dell'auditorium.

Legenda

Sup. principale	●
Sup. laterale	●
Sup. vetrata principale	●
Sup. di facciata	●
Sup. vetrata alta	●

materiale presente all'interno del pannello. Nello specifico ho utilizzato il Corian come finitura interna ed esterna con uno spessore di 5 cm per lato, come lati esterni dei pannelli ho utilizzato delle lastre in fibra di legno pressata e che contengono al loro interno uno strato isolante e una membrana anti-risalita.

A scopo di calcolo del peso strutturale sono stati tenuti in considerazione solo i pannelli in Corian, spessi in totale 10 cm e gli elementi in fibra di legno, i quali avendo più lunghezze sono stati tenuti in considerazione dei valori medi, ovvero di 3 m di lunghezza e di 2 m di larghezza dei pannelli.

Quindi ho moltiplicato il valore di superficie di 2790 m², per lo spessore del Corian di 10 cm, ottenendo quindi un volume di 279 m³. A questo punto ho moltiplicato i m³ con il volume specifico del Corian ovvero 1730 Kg, ottenendo un peso totale di 482.670 Kg. Per quanto riguarda il peso degli assi in legno lamellare ho ottenuto la superficie dell'area moltiplicando base per altezza ovvero 10 x 25 cm, ovvero 250 cm².

A questo punto ho moltiplicato area per lunghezza per ottenere il volume,

ottenendo quindi un volume di 0,050 m³ e 0,075 m³. Infine, moltiplicando volume e peso specifico di 300 Kg, ho ottenuto il peso di queste due tipologie di bordi, ovvero 22,5 Kg per le travi da 3 m e di 15 Kg.

Quindi per ogni pannello ci saranno un totale di 75 Kg di fibra di legno pressata; quindi, andrà moltiplicato questo peso per il numero di pannelli utilizzato, ovvero 282, ottenendo un peso di 21.150 Kg.

Quindi alla fine il carico totale della copertura principale corrisponde a:

Peso pannelli vetrati:

$$12.150 + 9300 = \mathbf{21.450 \text{ Kg}}$$

Peso pannelli opachi:

$$21.150 + 482.670 = \mathbf{503.820 \text{ Kg}}$$

Peso totale pannelli:

$$503.820 + 21.450 = \mathbf{525.270 \text{ Kg}}$$

Per quanto riguarda la superficie laterale, ovvero quel corpo posto alla base dell'auditorium che ne costituisce l'ingresso è composta unicamente da pannelli vetrati, per questo motivo ho utilizzato come dati di input gli stessi utilizzati precedentemente per la copertura superiore, ovvero 405 Kg per quanto riguarda i montanti in alluminio e 2500 Kg/m³ per quanto riguarda il peso specifico del vetro e 1,2 cm di spessore totale delle lastre di vetro.

Quindi ho rielaborato il volume del vetro moltiplicando il volume totale di queste facce, ovvero 185 m² per lato, quindi in totale 270 m².

A questo punto ho moltiplicato lo spessore di 1,2 cm con i 270 m², ottenendo così il

volume totale delle lastre vetrate di 3,24 m³.

Infine, a questo punto ho moltiplicato il peso specifico di 2500 Kg con il volume, ottenendo così il peso di 8100 Kg.

Mentre i montanti in alluminio verranno moltiplicati con il numero di pannelli presenti, ovvero 80 pannelli, ottenendo in questo modo un peso dei montanti di 32.400 Kg.

Quindi il peso totale dei pannelli laterali sarà di:

$$32.400 + 8100 = \mathbf{40.500 \text{ Kg}}$$

Per quanto riguarda la vetrata principale sarà composta principalmente da vetro e ovviamente dai relativi supporti in alluminio; quindi, ho considerato un 15% della superficie occupato dai montanti, quindi in alluminio e il restante totalmente in vetro a due lastre da 6 mm.

Facendo un rapido calcolo il 15% della superficie corrisponde a 35 m², mentre i restanti 297 saranno vetrati.

Per gli spessori del vetro invece sono stati mantenuti i 12 mm totali mentre per gli infissi considerati spessi 15 cm, ho calcolato uno spessore di 10 cm in modo da tenere in considerazione il fatto che all'interno sono scavati.

Di conseguenza considerando che il peso specifico del vetro è di 2500 Kg e quello dell'alluminio è di 2700 Kg si otterranno i seguenti risultati:

Peso del vetro:

$$(297 \times 0,012) \times 2500 = \mathbf{8900 \text{ Kg}}$$

Peso degli infissi:

$$(35 \times 0,1) \times 2700 = \mathbf{9450 \text{ Kg}}$$

Peso totale facciata: 18350 Kg

Per concludere la vetrata alta l'ho calcolata con le stesse modalità della vetrata principale, ovvero assegnando ai montanti un 15% della superficie.

Il risultato è stato il seguente:

Peso del vetro:

$$(50 \times 0,012) \times 2500 = \mathbf{1500 \text{ Kg}}$$

Peso degli infissi:

$$(8 \times 0,1) \times 2700 = \mathbf{2160 \text{ Kg}}$$

Peso totale facciata: 3660 Kg

6.6.3 - Altri carichi a cui è sottoposta la struttura

In questo paragrafo verranno calcolati quei carichi meno impattanti rispetto al peso strutturale e a quello dei pannelli di copertura.

Nello specifico tratteremo: peso degli

arredi, peso delle persone e peso causato da eventi atmosferici come vento, pioggia e neve. Questi calcoli ovviamente saranno svolti basandoci su semplici dati recuperati online.

6.6.3.1 - Peso poltroncine e mobili

All'interno dell'auditorium sono presenti molte poltroncine, per calcolarne il peso è stato necessario conteggiare il numero totale per ogni solaio e moltiplicare questo numero per il peso di un singolo esemplare, che è stato ricavato confrontando i pesi di alcune poltrone da teatro trovate su vari siti internet.

Il peso ipotizzato è di 20 Kg, in quanto la maggior parte dei siti indicavano un peso che poteva andare dai 15 ai 25 Kg.

Il numero di poltrone invece è di 340, nel primo piano e di 196 nel secondo piano; dunque, moltiplicando questi 2 risultati ho ottenuto un peso di **6800 Kg** per il primo piano e di **3920 Kg** per il secondo.

Ovviamente per avere il reale peso di tutti gli arredi presenti nella struttura il calcolo sarebbe più complesso, ma per semplificare un pò questa parte mi sono limitati ad analizzare la tipologia di arredo più presente all'interno.

Per quanto riguarda i solai non dedicati alle seggiole ho aggiunto 2 Kg al m² dovuti al carico dei mobili, ottenendo così un carico dei carichi di:

560 Kg per il primo piano

812 Kg per il secondo piano

850 Kg per il terzo piano

6.6.3.2 - Peso persone

Il carico delle persone per quanto riguarda tutti i solai è stato estremamente semplice da svolgere; infatti, la normativa italiana prevede che per un luogo pubblico come un teatro, il solaio debba essere in grado di sorreggere 500 Kg/m² dovuto alla presenza di persone. Quindi per svolgere questo calcolo è stato sufficiente moltiplicare i m²

dei solai per 500 Kg, ottenendo quindi i seguenti risultati:

Primo piano: 327000 Kg

Secondo piano: 333000 Kg

Terzo piano: 436500 Kg

6.6.3.3 - Carico del vento

Per calcolare il carico del vento secondo normativa (NTC) ho prima di tutto stabilito il valore di riferimento del vento per Torino (25 m/s), dopodichè ho ipotizzato una direzione prevalente = 1 e un coefficiente stagionale sempre = 1.

In questo modo ho calcolato la velocità di progetto del vento:

$$1 \times 1 \times 25 = 25 \text{ m/s}$$

Successivamente ho calcolato la pressione dinamica del vento utilizzando la densità dell'aria pari a 1,25 Kg/m³ al livello del mare e applicando la seguente formula:

$$1/2 \times 1,25 \times (25)^2 = 40 \text{ Kg/m}^2$$

A questo punto ho stabilito un valore di esposizione medio, pari a 2, questo perchè l'edificio è in parte coperto da altri edifici che lo circondano.

Come coefficiente aerodinamico invece ho scelto di utilizzare 1, essendo la forma dell'edificio abbastanza aerodinamica.

Grazie a questi dati ci è quindi stato possibile calcolare la pressione del vento, data dalla seguente formula:

$$40 \times 2 \times 1 = 80 \text{ Kg/m}^2$$

Per calcolare infine la pressione totale del vento ho moltiplicato la pressione del vento per la superficie totale, ottenendo quindi il seguente risultato:

$$80 \times 3100 = \mathbf{248000 \text{ Kg}}$$

6.6.3.4 - Carico neve

Per calcolare il carico della neve sulla copertura mi sono affidati ancora una volta alle norme italiane e ho semplicemente ripreso la metratura di 3100 m² e assegnato un'inclinazione di 60° della copertura, essendo inclinata sia in senso longitudinale che trasversale.

Dopodichè ho applicato la seguente formula:

$$\text{Coeff. forma del tetto (60° --> 0.5)} \times \text{coeff. di esposizione (1)} \times \text{Coeff. termico (1)} \times \text{carico della neve caratteristico per Torino (153 Kg)} = \mathbf{236000 \text{ Kg}}$$

$$\text{Ovvero: } 76 \text{ Kg/m}^2$$

6.6.3.5 - Carico pioggia

Per calcolare il carico massimo della pioggia ho nuovamente seguito la normativa italiana ipotizzando nuovamente un'inclinazione di 60° della copertura, quindi un valore 0,5 e applicando le seguenti formule:

Per prima cosa ho calcolato il peso per una superficie piana:

$$3100 \text{ (m}^2 \text{ di superficie)} \times \cos (45^\circ) = 3100 \times 0,707 = 2192 \text{ Kg}$$

A questo punto ho eseguito una seconda formula per calcolare il peso sulla superficie inclinata:

$$0,5 \text{ (inclinazione della copertura)} \times 70 \text{ (Kg di pioggia che possono cadere a Torino in un'ora)} \times 0,707 \times 2192 = \mathbf{54373 \text{ Kg}}$$

6.6.4 - Riassunto dei carichi e conversione in KN

Per semplificare la lettura dei dati raccolti in queste pagine ed avere già la conversione in KN necessaria per eseguire eventuali calcoli ho raggruppato nelle prossime pagine tutti i risultati raccolti.

Archi strutturali

Arco 1: 9812 Kg --> 962 KN

Arco 2: 12167 Kg --> 1200 KN

Arco 3: 16485 Kg --> 1617 KN

Arco 4: 20410 Kg --> 2002 KN

Arco 5: 24727 Kg --> 2425 KN

Arco 6: 41605 Kg --> 4081 KN

Arco 7: 59660 Kg --> 5852 KN

Arco 8: 62800 Kg --> 6160 KN

Arco 9: 117750 Kg --> 11551 KN

Arco 10: 106000 Kg --> 10400 KN

Arco 11: 98125 Kg --> 9626 KN

Arco 12: 95770 Kg --> 9400 KN

Arco 13: 36110 Kg --> 3542 KN

Arco 14: 21567 Kg --> 2115 KN

Arco 15: 16485 Kg --> 1617 KN

Totale:

740000 Kg ---> 72600 KN

Vano scale

Peso totale: 43000 Kg --> 422 KN

Travi IPE

Peso solaio primo piano: 13750 Kg
135 KN

Peso solaio secondo piano: 17000 Kg
167 KN

Peso solaio terzo piano: 8375 Kg
82 KN

Peso totale travi IPE: 39125 Kg
384 KN

Travi speciali

Peso totale travi speciali:

29837 Kg ---> 2927 KN

Solai

Peso totale solaio primo piano: 216500 Kg
2123 KN

Peso totale solaio primo piano: 219000 Kg
2150 KN

Peso totale solaio primo piano: 140000 Kg
1373 KN

Travi principali

Travi da 6 m: 48600 Kg --> 477 KN

Travi da 3 m: 1620 Kg --> 16 KN

Travi con lunghezza variabile: 1800 Kg
17,6 KN

Peso totale travi principali:
52000 Kg --> 510 KN

Travi secondarie

GTRAV-1: 450 Kg --> 4,4 KN

GTRAV-2: 580 Kg --> 5,6 KN

GTRAV-3: 700 Kg --> 6,8 KN

GTRAV-4: 810 Kg --> 7,9 KN

GTRAV-5: 910 Kg --> 8,9 KN

GTRAV-6: 1000 Kg --> 9,8 KN

GTRAV-7: 1010 Kg --> 9,9 KN

GTRAV-8: 950 Kg --> 9,7 KN

GTRAV-9: 870 Kg --> 8,5 KN

GTRAV-10: 780 Kg --> 7,6 KN

GTRAV-11: 675 Kg --> 6,7 KN

GTRAV-12: 550 Kg --> 5,5 KN

Travi struttura ingresso: 1140 Kg --> 11 KN

Peso totale travi secondarie:
10425 Kg --> 102 KN

Carico copertura

Peso pannelli vetrati:

In copertura: 21450 Kg --> 210,39 KN.

lateralì: 40.500 Kg --> 397,91kN

Peso pannelli opachi:

503.270 Kg --> 4937,08 kN

Peso totale di tutti i pannelli di copertura:

565.770 Kg --> 5550,20 kN

Peso vetrata principale

18350 Kg --> 180,01 kN

Peso vetrata alta

3660 Kg --> 35,90 kN

Peso superficie di facciata

0,2 m³ x 1730 = 350 Kg --> 3,43 kN

Peso totale elementi di copertura:

587.580 Kg --> 5.759,26 kN

Peso poltroncine

Primo piano: 6800 Kg --> 66,7 KN

Secondo piano: 3920 Kg --> 38,5 KN

Peso mobili

primo piano 560 Kg --> 5,5 KN

secondo piano 812 Kg --> 7,9 KN

terzo piano 850 Kg --> 8,4 KN

Carico persone

Primo piano: 327000 Kg --> 3200 KN

Secondo piano: 333000 Kg --> 32600 KN

Terzo piano: 436500 Kg --> 4280 KN

Carico neve

236000 Kg --> 2315 KN

Carico pioggia

54373 Kg --> 533 KN

Carico vento

248000 Kg --> 2430 KN

Fonti

Elenco immagini con fonti complete

(234) Forma base dell'auditorium (Fonte: elaborato di progetto)

(235) Forma base dell'auditorium (Fonte: elaborato di progetto)

(236) Forma base dell'auditorium (Fonte: elaborato di progetto)

(237) Forma finale dell'auditorium con volume alla base (Fonte: elaborato di progetto)

(238) Codice Grasshopper per la realizzazione della geometria di base (Fonte: elaborato di progetto)

(239) Quote auditorium, vista laterale (Fonte: elaborato di progetto)

(240) Quote auditorium, vista dall'alto (Fonte: elaborato di progetto)

(241) Struttura ad archi completa (Fonte: elaborato di progetto)

(242) Struttura ad archi con inserimento delle travi principali (Fonte: elaborato di progetto)

(243) Struttura ad archi con inserimento delle travi principali e degli archi secondari (Fonte: elaborato di progetto)

(244) Struttura portante esterna completa (Fonte: elaborato di progetto)

(245) Archi strutturali principali (Fonte: elaborato di progetto)

(246) Archi piano terra circolari (Fonte: elaborato di progetto)

(247) Definizione utilizzato per realizzare forme base archi strutturali (Fonte: elaborato di progetto)

(248) Modello con indicati i punti di passaggio di tutte le travi che sorreggono i solai (Fonte: elaborato di progetto)

(249) Arco numero 5 con un elemento orizzontale posizionato a 3.5 m di altezza (Fonte: elaborato di progetto)

(250) Raggi di suddivisione e contatto tra archi strutturali. (Fonte: elaborato di progetto)

(251) Estrusione degli archi per creare le superfici da estrarre. (Fonte: elaborato di progetto)

(252) Raggi di suddivisione e contatto tra archi strutturali. (Fonte: elaborato di progetto)

(253) Aggiunta travi archi strutturali (Fonte: elaborato di progetto)

(254) Arco strutturale numero 13 con evidenziato il tratto di taglio che chiude la geometria (Fonte: elaborato di progetto)

(255) Risultato ottenuto grazie all'algoritmo elaborato su Grasshopper (Fonte: elaborato di progetto)

(256) Risultato ottenuto con l'algoritmo base in combinazione con la breve aggiunta dedicata alla trave (Fonte: elaborato di progetto)

(257) Algoritmo per suddividere gli archi in modo radiale (Fonte: elaborato di progetto)

(258-259) Algoritmo per suddividere le travi tra gli archi verticalmente (Fonte: elaborato di progetto)

(260) Strati utilizzati per la realizzazione dell'arco strutturale numero 12 (Fonte: elaborato di progetto)

(261) Assonometria arco numero 10 in fase di assemblaggio (Fonte: elaborato di progetto)

(262) Assonometria con schematizzato l'inserimento dei bulloni nei fori del secondo arco (Fonte: elaborato di progetto)

(263) Esempio di giunto per gli archi strutturali, composto da un bullone e da una serie di dadi e rondelle (Fonte: elaborato di progetto)

(264) Esempio di numerazione dei componenti dell'arco 11 (Fonte: elaborato di progetto)

(265) Realizzazione basamento archi - step 1 (Fonte: elaborato di progetto)

(266) Realizzazione basamento archi - step 2 (Fonte: elaborato di progetto)

(267) Realizzazione basamento archi - step 3 (Fonte: elaborato di progetto)

(268) Realizzazione basamento archi - step 4 (Fonte: elaborato di progetto)

(269) Realizzazione basamento archi - step 5 (Fonte: elaborato di progetto)

(270) Realizzazione basamento archi - step 6 (Fonte: elaborato di progetto)

(271) Struttura solai composta da travi principali e secondarie (Fonte: elaborato di progetto)

(272) Schematizzazione processo di sottrazione (Fonte: elaborato di progetto)

(273) Travi arco dopo la sottrazione dei profili delle travi (Fonte: elaborato di progetto)

(274) Struttura auditorium con evidenziate le travi speciali. (Fonte: elaborato di progetto)

(275) Trave speciale (Fonte: elaborato di progetto)

(276) Doppio layout travi speciali (Fonte: elaborato di progetto)

(277) Trave multistrato completa con bulloni e suddivisioni (Fonte: elaborato di progetto)

(278) Incastro a pettine, esempio di incastro su una delle travi di un arco strutturale (Fonte: elaborato di progetto)

(279) Trave completa con asole di scorrimento travi secondarie (Fonte: elaborato di progetto)

(280) Pilastro HEA 400 (Fonte: elaborato di progetto)

(281) Esempio di giunto con piastre a bulloni tra due pilastri (Fonte: elaborato di progetto)

(282) Esempio di pilastro HEA utilizzato per la struttura del vano scale (Fonte: elaborato di progetto)

(283) Esempio di pilastro HEA utilizzato per la struttura del vano scale (Fonte: elaborato di progetto)

(284) Giuntura a terra pilastro HEA tramite piastra a bulloni (Fonte: elaborato di progetto)

(285-286) Primo e secondo tipo di giuntura con trave IPE 300 (Fonte: elaborato di progetto)

(287-288) Giuntura trave IPE360 prima e seconda opzione internamente rispetto alla piastra di appoggio (Fonte: elaborato di progetto)

(289) Controvento a Croce di Sant'Andrea (Fonte: elaborato di progetto)

(290) Applicazione muri di tamponamento (Fonte: elaborato di progetto)

(291) Vano scale assemblato con archi e travi speciali connesse. (Fonte: elaborato di progetto)

(292) Dettaglio della sezione di base della geometria utilizzata per posizionare le travi (in rosso) e relativo offset in verde. (Fonte: elaborato di progetto)

(293) Punti posizionati sugli offset dei tagli effettuati nella geometria (Fonte: elaborato di progetto)

(294) Linee tracciate grazie al comando relative item in corrispondenza (Fonte: elaborato di progetto)

(295) Linee tracciate grazie al comando relative item in corrispondenza (Fonte: elaborato di progetto)

(296) Struttura con archi e travi principali vista dall'alto. (Fonte: elaborato di progetto)

(297) Algoritmo generato attraverso Grasshopper per la realizzazione delle travi principali (Fonte: elaborato di progetto)

(298) Travi principali nel lato d'ingresso del progetto (Fonte: elaborato di progetto)

(299) Esempio del materiale utilizzato per produrre le travi (Fonte: Phil Ayres, Mette Ramsgaard Thomsen, Bob Sheil, Marilena Skavara, Fabricate 2024 - Creating resourceful futures, UCL Press, UK, 2024 - striatus 2.0 phoenix - improving circularity of 3d-concrete-printed unreinforced masonry structures, pp. 103).

(300) Tipica squadratrice da falegnameria (Fonte: DM Italia srl/ Squadratrice per legno TSI Super 3000 di Damatomacchine)

(301) Esploso dei vari segmenti che compongono una trave di legno lamellare (Fonte: elaborato di progetto)

(302) Giunture KVH praticate tra un listello e l'altro per aumentare la tenuta dell'incollaggio (Fonte: Teknoring.com/ Legno strutturale con giunti a dita: caratteristiche, applicazioni, norme)

(303) Macchinario CNC per legno (Fonte: makxilia.biz/ CENTRO DI LAVORO A CONTROLLO NUMERICO CASADEI BUSELLATO mod. JET OPTIMA RT21 - A - CE)

(304) Impregnante per legno sostenibile (Fonte: clou.de/ Arbeitsplatten-Öl)

(305) Esempio di giunto a scomparsa (Fonte: trends.archiexpo.it/ Serie Alu di RothoBlaas : si amplia la gamma di giunzioni a scomparsa legno-legno e legno-cemento)

(306) Sottrazione tramite differenza booleana della parte di trave sovrapposta all'arco. (Fonte: elaborato di progetto)

(307) Linea di mezzeria tracciata su una delle travi principali (Fonte: elaborato di progetto)

- (308) Superfici generate dalla linea di mezzeria in azzurro e superficie di giunzione in arancione (Fonte: elaborato di progetto)
- (309) Piegia della piastra che giunta le travi sopra l'arco strutturale (Fonte: elaborato di progetto)
- (310) Testa di trave completa di fresatura centrale e fori per inserimento dei bulloni (Fonte: elaborato di progetto)
- (311) Piastra connessa direttamente con l'arco strutturale che consente la giunzione delle travi (Fonte: elaborato di progetto)
- (312) Esploso dei vari componenti del giunto (Fonte: elaborato di progetto)
- (313) Giunto travi-arco al completo (Fonte: elaborato di progetto)
- (314) Esempio numerazione travi in senso orario (Fonte: elaborato di progetto)
- (315) Esempio numerazione giunti in senso orario (Fonte: elaborato di progetto)
- (316) Travi secondarie posizionate all'interno del modello 3D (Fonte: elaborato di progetto)
- (317) Travi secondarie posizionate all'interno del modello 3D (Fonte: elaborato di progetto)
- (318) Travi secondarie posizionate sul corpo cilindrico all'ingresso. (Fonte: elaborato di progetto)
- (319) Struttura completa vista dall'alto, travi secondarie in arancione (Fonte: elaborato di progetto)
- (320) Prima staffa incastro che viene posizionata a metà della trave principale. (Fonte: elaborato di progetto)
- (321) Prima staffa incastro connessa alla trave principale (Fonte: elaborato di progetto)
- (322) Seconda staffa che viene fissata alla prima (Fonte: elaborato di progetto)
- (323) Connessione delle due parti del giunto (Fonte: elaborato di progetto)
- (324) Sottrazione della trave principale dalle secondarie (Fonte: elaborato di progetto)
- (325) Profilo completamente elaborato di una trave secondaria (Fonte: elaborato di progetto)
- (326) Incastro tra 2 travi secondarie e una trave principale al completo (Fonte: elaborato di progetto)
- (327) Esempio numerazione travi secondarie (Fonte: elaborato di progetto)
- (328) Esempio numerazione giunti travi secondarie (Fonte: elaborato di progetto)
- (329) Arco strutturale con evidenziata la faccia da cui è stata estratta la superficie e con indicato lo spessore di 42 cm (Fonte: elaborato di progetto)
- (330) Esploso degli elementi che compongono un solaio (Fonte: elaborato di progetto)
- (331) Trave principale in legno lamellare con quote (Fonte: elaborato di progetto)
- (332) Gruppo di travi con evidenziata la superficie che viene ricavata per essere moltiplicata con lo spessore e ottenere così il volume (Fonte: elaborato di progetto)
- (333 - 334) Prima e seconda immagine riferite alla distinzione dei lati dell'auditorium (Fonte: elaborato di progetto)

07

Studio e sviluppo dell'involucro dell'auditorium

7.1 - Suddivisione geometrica dell'involucro esterno

Come nel caso della struttura, anche per generare gli elementi di pannellatura esterni mi sono aiutato con degli algoritmi realizzati su Grasshopper, questo non tanto per la complessità delle geometrie, ma più che altro per la quantità di pannelli, che avrebbe richiesto diverso tempo per la realizzazione di tutti i tagli necessari alla corretta suddivisione.

Ovviamente come base per questi pannelli ho utilizzato la geometria originale dell'auditorium e sono andato a "recuperare" alcune parti degli algoritmi utilizzati per gli archi e per le travi per generare delle superfici di taglio in corrispondenza degli assi centrali delle travi. In ordine ho inserito prima i tagli inerenti gli archi e le travi secondarie (335), e successivamente ho pensato alla suddivisione in corrispondenza delle travi principali (336).

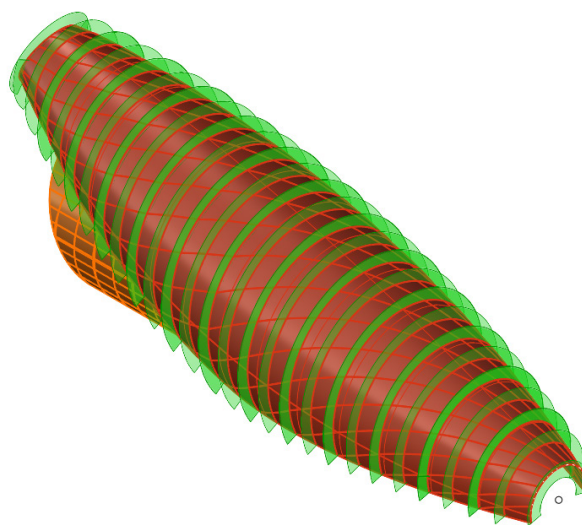
Questo ci ha consentito di accertarci che ogni inclinazione fosse corretta e che i pannelli fossero esattamente come avrebbero dovuto essere.

Questa operazione di taglio è stata ripetuta anche sul corpo d'ingresso, ovviamente andando ad utilizzare gli specifici algoritmi delle relative travi.

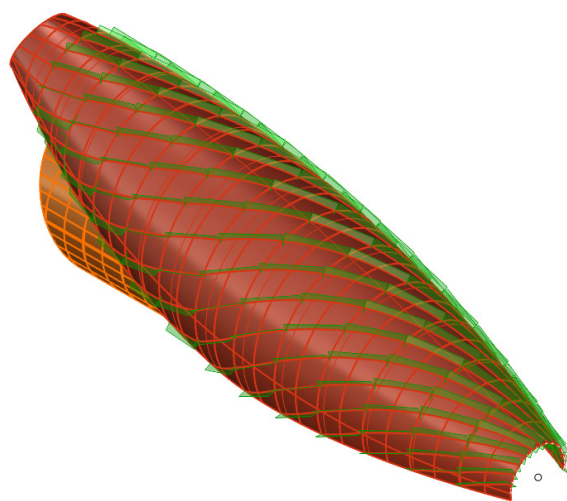
Il risultato finale di queste suddivisioni è un insieme di superfici che, riflettono perfettamente la suddivisione strutturale anche all'esterno, grazie alla suddivisione dei pannelli.

A questo punto ho iniziato ad estrarre tutti i pannelli (337), con uno spessore di 35 cm, dovuto alla stratigrafia che verrà illustrata nei paragrafi successivi.

Una volta ottenute le basi di questi pannelli,

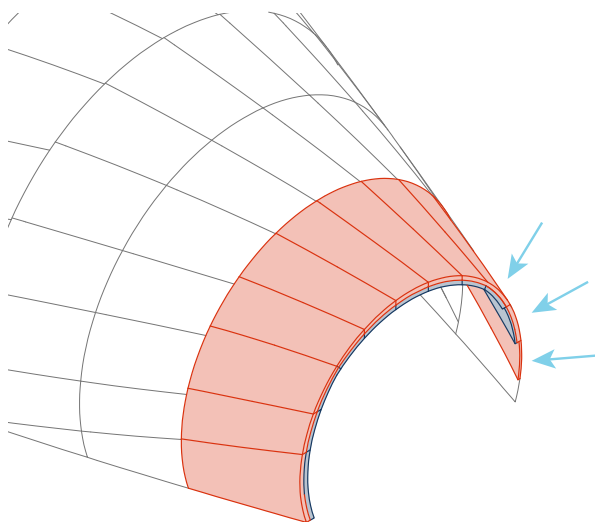


(335) Tagli realizzati sulla superficie esterna tramite algoritmo realizzato su Grasshopper, nello specifico in corrispondenza degli archi strutturali e delle travi secondarie.



(336) Tagli realizzati sulla superficie esterna tramite algoritmo realizzato su Grasshopper, nello specifico in corrispondenza delle travi principali

è stato sufficiente estrarre le facce di base per ottenere le geometrie esatte



(337) Concept estrusione faccia di base della prima fila di pannelli

di tutti i pannelli che compongono la pelle esterna.

Ovviamente a livello di modello non è stato necessario realizzare la stratigrafia per ogni singolo pannello, per questo ci siamo limitati a realizzare 2 “strati”, uno interno ed uno esterno.

Questa doppia stratigrafia ha un duplice scopo, il primo quello di unire lo strato interno, tramite un unione booleana, ottenendo così una superficie liscia come finitura opaca interna, un pò come sarebbe nella realtà.

In secondo luogo, utilizzando due layer differenti per questi strati sarà possibile assegnare dei materiali differenti in fase di rendering al modello.

7.1.1 - Pannelli opachi o trasparenti?

Per scegliere come suddividere i pannelli tra opachi e vetrati, ho prestato attenzione a diverse varianti, in particolare la parte bassa del modello ho deciso di lasciarla totalmente vetrata per diversi motivi:

- Essendo la parte d'ingresso all'auditorium volevo che fosse luminoso e creasse una continuità con lo spazio esterno.
- Ponendosi alla base dell'architettura, con un importante sbalzo superiore, utilizzando degli elementi vetrati si otterrà un effetto di leggerezza alla base e di pesantezza superiore molto interessante dal punto di vista architettonico.
- Infine, non essendo questa parte coinvolta all'interno dell'auditorium non sarà necessario regolare artificialmente la luminosità come invece sarà necessario all'interno, per cui avere un'alternanza importante dal punto di vista illuminotecnico, può essere molto interessante.

Per quanto riguarda la parte superiore dell'auditorium invece, la scelta è stata ancor più ragionata; infatti, essendo questa parte totalmente esposta alla radiazione solare un'eccessiva irradiazione avrebbe reso poco gradevole la visita degli spazi interni.

Per questo motivo ho deciso di

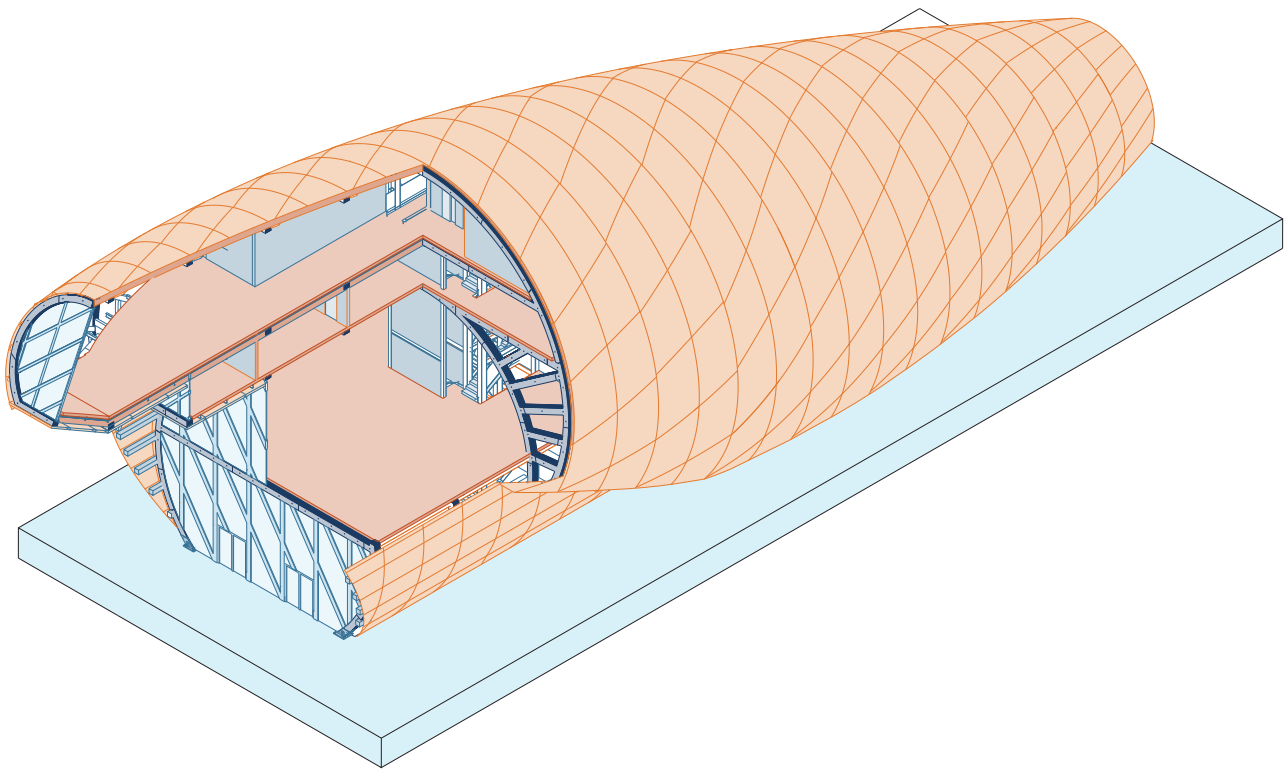
inserire pochi pannelli vetrati in questa parte, alla disposizione dell'ambiente interno, ovviamente nella prima metà della struttura i pannelli saranno totalmente opachi per consentire la regolazione dell'illuminazione all'interno dell'auditorium.

Nella seconda parte della struttura invece anche grazie allo spaccato assonometrico (338), mi sono accorto che prima dell'apertura posizionata alla fine del primo piano, vi era uno spazio molto ampio totalmente privo di aperture, per questo motivo ho posizionato in corrispondenza di questo piano quattro pannelli vetrati per lato.

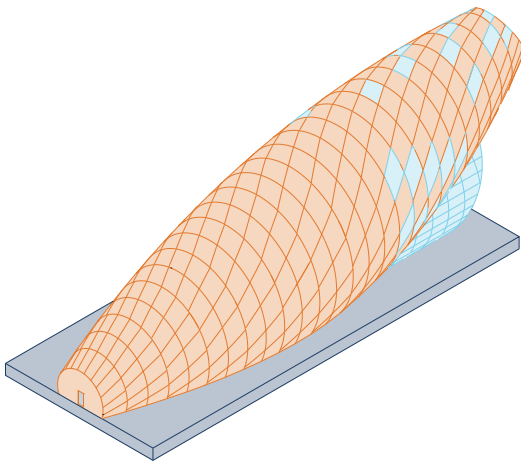
Lo stesso discorso vale ovviamente anche per il secondo piano in cui ho pensato di inserire gli uffici dell'amministrazione, di conseguenza anche qui ho deciso di inserire altri 5 pannelli per lato.

Infine, al terzo piano ho deciso di inserire un maggior numero di pannelli vetrati; infatti, avendo pensato di inserire un piano bar a questo livello, la possibilità di avere un locale luminoso è sicuramente un enorme valore aggiunto.

I pannelli specifici da realizzare vetrati sono stati scelti con due parametri:



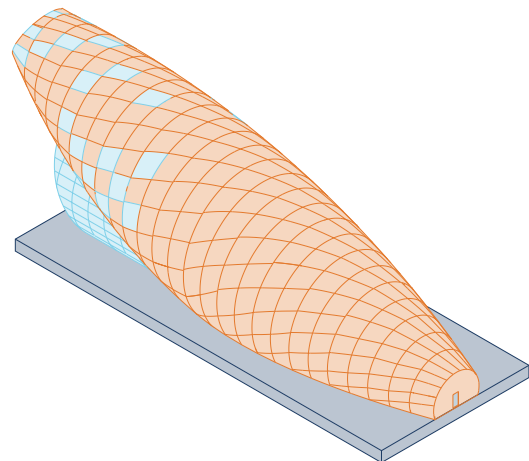
(338) Spaccato assonometrico parte posteriore auditorium



(339) Disposizione dei pannelli vetrati evidenziati in azzurro 1

- Prima di tutto dovevano essere posizionati in modo da consentire la maggior irradiazione solare possibile.
- In secondo luogo, dovevano contribuire alla realizzazione di un disegno di facciata accattivante.

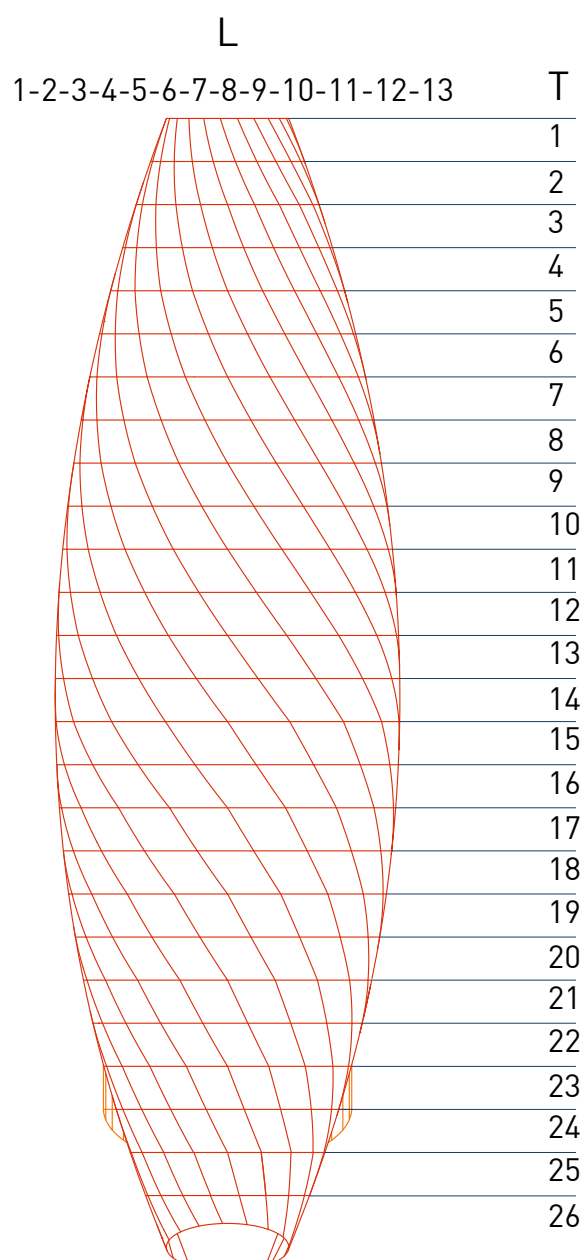
Il risultato finale di queste valutazioni mi



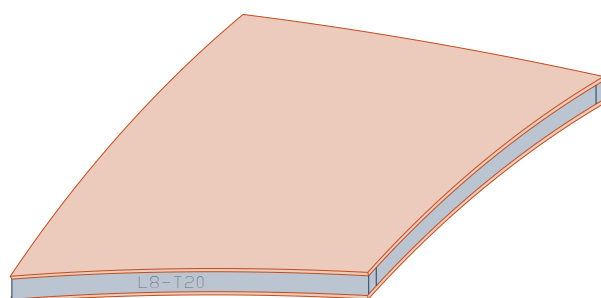
(340) Disposizione dei pannelli vetrati evidenziati in azzurro 2

ha portato ad avere la disposizione finale di un totale di 30 pannelli vetrati nella parte retrostante dell'auditorium (339-340). Questa suddivisione è pensata per dare un effetto di smaterializzazione dell'architettura mentre si procede verso la parte finale della coda.

7.1.2 - Ordinamento pannelli per montaggio



[341] Griglia di numerazione dei pannelli per semplificare la fase di assemblaggio.



[342] Pannello completo con sigla corrispondente annotata sul bordo

Così come per le parti che compongono gli archi e per le travi principali e secondarie, anche in questo caso sarà necessario fornire dei codici identificativi ai pannelli, per consentire agli operatori un montaggio rapido e senza errori.

Essendo di fatto i pannelli suddivisi in due direzioni, per assegnare un codice ad ognuno di essi ho pensato di sfruttare la doppia suddivisione dei pannelli, quella orizzontale dovuta a archi e travi secondarie, e quella obliqua basata sulle travi principali.

Il primo ordine di suddivisione che ho inserito nei codici dei pannelli è quello longitudinale, che va da 1 a 13, ovvero il numero di pannelli per ogni fila, ovviamente la numerazione avverrà in senso orario guardando l'auditorium dal lato basso.

Successivamente il numero trasversale, composto dal numero delle file di pannelli, ovvero da 1 a 26 [341].

Grazie a questa suddivisione ho formulato un codice dedicato a ciascun pannello come quello qui elencato: L5-T7

In cui L sta per longitudinale e T per trasversale, in modo da indicare il perfetto posizionamento dei pannelli.

Infine, questo codice andrà annotato su uno dei lati di ogni pannello [342], in modo da rendere immediato il riconoscimento e da non essere più visibile una volta che il pannello è montato.

7.2 - Stratigrafia dei pannelli

Inizialmente come finitura esterna ho pensato di utilizzare pannelli in alluminio riciclato, per via della grande lavorabilità di questo materiale, tuttavia in seguito, seguendo un suggerimento del professor Callegari, ho prestato attenzione al Corian. Questo materiale in edilizia ancora non è ancora tra i più utilizzati, tuttavia ha delle proprietà molto interessanti, in primis un'elevata lavorabilità, seppur non hai livelli dell'alluminio⁶⁸.

Tuttavia, negli ultimi anni ci sono state diverse applicazioni molto interessanti (343-344), in particolare proprio nel caso di edifici parametrici, con doppie curvature come in questo caso.

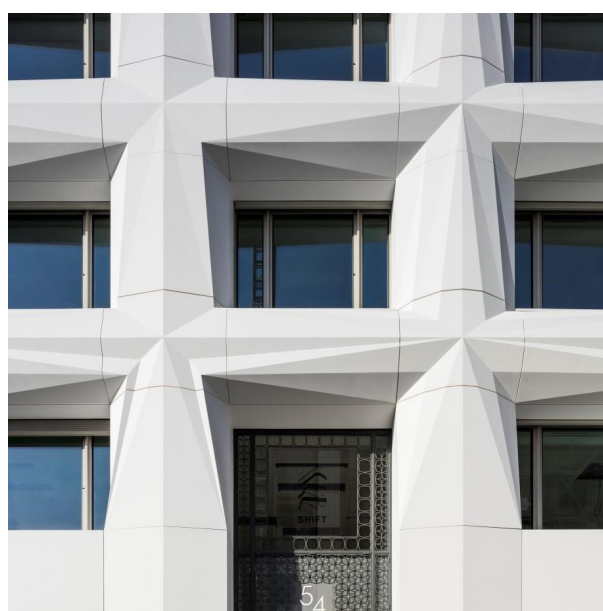
L'alta lavorabilità di questo materiale è dovuta ovviamente alla sua composizione chimica, ovvero un terzo di resina acrilica e due terzi di idrossido di alluminio.

Questo materiale inoltre offre ulteriori vantaggi di progettazione, in termini di resistenza ai raggi UV, conservando nel tempo prestazioni e proprietà⁶⁹.

Un altro aspetto fondamentale è la possibilità di riparare sul posto eventuali pannelli danneggiati, oltre a non essere poroso e quindi estremamente facile da pulire.

Infine, questi pannelli risultano estremamente leggeri rispetto ad altri materiali analoghi, e fornisce un'eccellente resistenza al vento, un ultimo vantaggio riguarda la resistenza al fuoco; infatti, in caso di incendio il Corian non fonde evitando di creare delle ricadute di materiale ustionante.

Un altro aspetto che mi ha convinto ad utilizzare questo materiale sia per la finitura esterna che per quella interna, ovvero la possibilità di scegliere diverse colorazioni, oltre alla classica tinta bianca.



(343-344) Edificio polifunzionale a Sofia, Bulgaria e 54 Londres, Paris, complesso immobiliare. Entrambi questi edifici sono esempi pratici di applicazione del Corian in facciata. (Fonte: Exteriors.corian.it)

68 - Agape design - materiali/corian

69 - Exteriors.corian.it

70 - Exteriors.corian.it - colors of corian

CORIAN® EXTERIORS COLOUR PALETTE



Questa grande disponibilità di colorazioni⁷⁰ disponibili per il materiale [345] è stata fondamentale per la scelta del materiale come finitura interna; infatti, dovendo coprire diverse tipologie di stanze sarà necessario utilizzare finiture interne differenti tra vari ambienti.

Inoltre, questo materiale è totalmente riciclabile e quindi riutilizzabile, per questi motivi rispecchia appieno tutti gli obiettivi di progetto che ci siamo posti.

Il secondo materiale che compone la stratigrafia è ovviamente lo strato di isolante, le caratteristiche che ho ricercato per questo componente, sono facilità di produzione, ampia disponibilità sul mercato e facilità di riciclo.

Questo materiale rispetta tutti questi aspetti in quanto è un materiale prodotto partendo dalla carta (346), quindi un materiale che nasce da un processo di riciclo⁷¹.

Previene muffe e invasione di insetti, grazie al fatto che la fibra di carta durante il processo produttivo viene mescolata con sali minerali che ne aumentano la resistenza anche alle fiamme.

Ovviamente per questioni di praticità la fibra di cellulosa dovrà essere inserita all'interno di contenitori su misura realizzati in cartone pressato, che garantirà resistenza e riciclabilità di tutto il pacchetto isolante una volta arrivati a fine vita dell'edificio.

Per la realizzazione del pannello che dovrà contenere ovviamente tutto il pacchetto saranno necessari dei bordi in materiale isolante, con una buona resistenza meccanica per tenere insieme i pannelli.

Lo strato di isolante previsto sarà di 24 cm e consentirà di abbattere l'impatto di calore durante l'estate e del freddo durante l'inverno, minimizzando l'utilizzo di riscaldamento e raffreddamento meccanizzato.

Quindi ho optato per la fibra di legno pressata⁷² (347), che ovviamente è un materiale di origine naturale, sottoprodotto del legno e di conseguenza facilmente riciclabile.

A questo punto l'ultimo aspetto rimasto da considerare è quello di una membrana anti risalita di umidità.

Questo aspetto è stato il più complesso a cui trovare una soluzione, in quanto esistono pochi materiali di questo tipo



(346) Fibra di cellulosa vista da vicino (Fonte: Isolacasa.it)



(347) Pannello in fibra di legno (Fonte: Fibradilegno.com)



(348) EPDM gomma utilizzata come strato anti risalita (Fonte: Betelli.it)

71 - Isolacasa.it/ fibra di cellulosa

72 - Fibradilegno / catalogo fibra di legno

73 - Betelli.it

facili da riciclare, infatti la maggior parte di questi prodotti sono derivati dal petrolio e quindi o non riciclabili o comunque per riciclarli si producono gas serra e simili.

Per cui ho scelto di utilizzare EPDM, ovvero Etilene Propilene Diene Monomero⁷³ (348) una tipologia di gomma sintetica ottenuta dalla copolimerizzazione di etilene, propilene e diene, ovvero un composto a doppi legami.

I vantaggi di questo materiale sono molteplici, infatti è duraturo nel tempo, resistente al calore, ovviamente impermeabile all'acqua e sia riutilizzabile, che completamente riciclabile.

Come già accennato come ultimo strato, ovvero la finitura interna ho utilizzato nuovamente il Corian, anche in questo

caso spesso 5 cm che consentirà una chiusura perfetta e completa.

Grazie alla scelta di questi materiali ho ottenuto una soluzione di facciata totalmente sostenibile e riutilizzabile/riciclabile.

Lo spessore totale dei pannelli alla fine sarà di circa 35 cm, questo spessore probabilmente potrebbe risultare eccessivo ma ho deciso di utilizzare molto isolante perchè non avendo svolto calcoli specifici ho preferito abbondare in modo da evitare che lo strato fosse insufficiente.

Probabilmente, infatti, uno strato di isolante da 16 cm sarebbe stato sufficiente per adempiere alle esigenze dell'edificio.

7.3 - Realizzazione e assemblaggio

La realizzazione dei pannelli opachi e dei pannelli vetrati ha richiesto dei processi simili ma con alcune differenze sostanziali. Infatti, entrambi i pannelli sono composti da forme geometriche simili, curvate in due direzioni, ma ovviamente nel caso degli infissi vetrati sarà necessario avere due parti composte da infisso e vetro.

Entrambi i pannelli ad ogni modo sono stati pensati per essere realizzati con un innovativo processo di curvatura a caldo, pensato da Corian Automated 3D Fabrication Solution, pensato in particolare per la curvatura del Corian, si basa su dei pistoncini a controllo numerico (349).

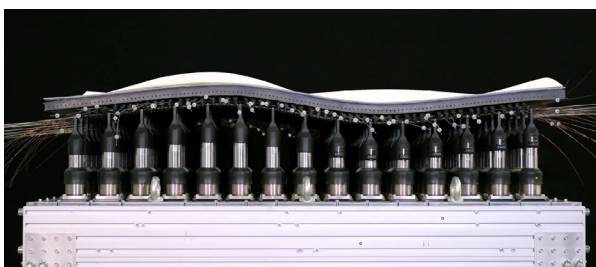
Questi pistoncini sono sovrapposti da un piano d'appoggio modulabile che consente di realizzare le forme più complesse a doppia curvatura, con estrema facilità (350).

In questo caso, avendo a che fare con forme sempre leggermente diverse tra loro, questo processo ci ha consentito di risparmiare soldi, materiali e tempo che sarebbero stati richiesti nel caso di utilizzo di casseri convenzionali in legno.

Il procedimento di lavorazione è relativamente semplice, consiste nel riscaldare l'elemento che si intende curvare, in modo da renderlo malleabile, a questo punto viene posizionato sul letto composto appunto dai pistoncini, che gradualmente assumono la forma indicata attraverso il disegno CAM (351).

Nel nostro caso, per ottenere le inclinazioni degli elementi è stato sufficiente basarsi sui singoli elementi ricavati dal modello 3D ricavato tramite Rhino.

Per distinguere meglio le fasi di realizzazione dei pannelli ho suddiviso le due tipologie dei pannelli nei due paragrafi successivi.



(349) Sistema di piegatura del corian basato sui pistoncini e un letto flessibile (Fonte: Parametric architecture)



(350) Sistema di piegatura del corian basato sui pistoncini e un letto flessibile (Fonte: Parametric architecture)



(351) Esempio di facciata realizzata in Corian con forme a doppia curvatura (Fonte: Parametric architecture)

7.3.1 - Pannelli opachi

La realizzazione dei pannelli opachi risulta essere sicuramente la più complessa, infatti necessiterà di varie fasi, in modo da rendere compatibile l'aspetto estetico con quello pratico.

Infatti, questi pannelli, oltre a garantire una vista gradevole all'edificio, dovranno dare garanzie dal punto di vista prestazionale; quindi, necessiteranno di un isolante adatto e di una membrana per impedire la risalita dell'acqua.

I materiali utilizzati, come specificato nel precedente paragrafo sono:

- Corian per la finitura esterna
- Isolante in fibra di cellulosa
- Membrane in EPDM (Etilene Propilene Diene Monomero)
- Strato di finitura interna, realizzato in Corian.

La scelta di utilizzare il Corian, sia come finitura interna che esterna è dovuta principalmente a una motivazione molto pratica, ovvero utilizzare un materiale differente per lo stesso pannello avrebbe richiesto un costo aggiuntivo in termini di tempo e di denaro necessario alla realizzazione non indifferente.

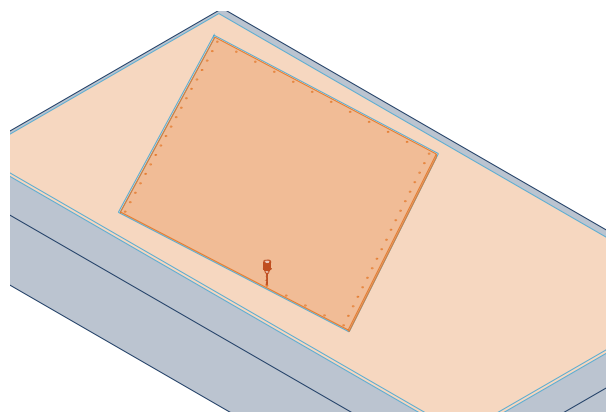
Infatti, la mia prima scelta come materiale di finitura interna era il legno lamellare, il quale avrebbe però richiesto dei casseri per la piegatura, un'azienda che si occupasse della produzione e soprattutto delle tempistiche molto più lunghe.

Invece utilizzando il Corian anche all'interno avremo la possibilità di velocizzare il processo di produzione e di risparmiare ulteriormente anche sulle finiture che sarebbero state richieste dal legno lamellare.

Infatti, per avere un prodotto visivamente gradevole, il legno avrebbe richiesto o un'impiallacciatura, oppure una verniciatura o un rivestimento di altro tipo. Il Corian invece ha un colore neutro molto gradevole che non necessita di rivestimenti o ulteriori finiture.

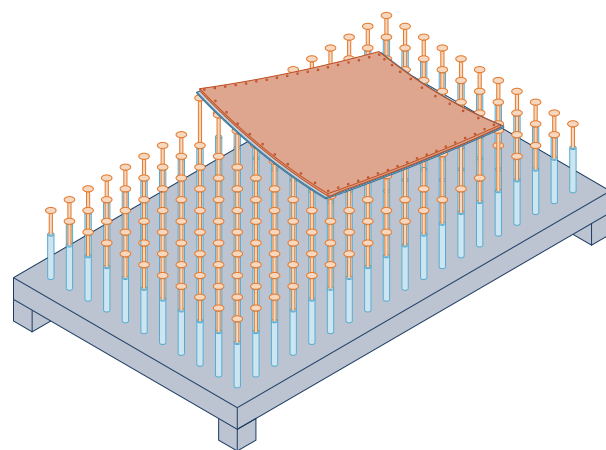
Il primo passo per ottenere il pannello è

ovviamente la realizzazione dello strato esterno del pannello, la prima fase necessaria ovviamente consiste nel ritagliare il pannello attraverso una fresa a controllo numerico. Durante questa fase è stato indispensabile tenere in considerazione anche la successiva curvatura dei pannelli; quindi, anche in questo caso è stato necessario calcolare il fattore K. Anche tutti i fori necessari alla giuntura dei pannelli è stata necessaria per la realizzazione dei fori, che verranno realizzati sempre grazie alla fresa CNC [352].



[352] Fase di taglio del pannello in Corian

Il secondo step riguarda appunto la curvatura del pannello, ogni pannello andrà quindi riscaldato e successivamente posizionato sul macchinario, che grazie ai pistoncini andrà a curvare il pannello [353].



[353] Fase di piegatura dello strato di finitura esterna del pannello in Corian

Ovviamente questa procedura andrà ripetuta anche con il secondo strato, di finitura interna, con le uniche differenze che la dimensione sarà leggermente inferiore; infatti, il pannello principale dovrà essere un pò più largo per nascondere le travi e garantire l'impermeabilità della copertura. Una volta realizzati i pannelli interni ed esterni, sarà il momento di realizzare i bordi che consentiranno la giuntura dei pannelli laterali.

Questi bordi, che avranno uno spessore di 25 cm, spessore necessario a contenere all'interno l'isolante e lo strato impermeabilizzante.

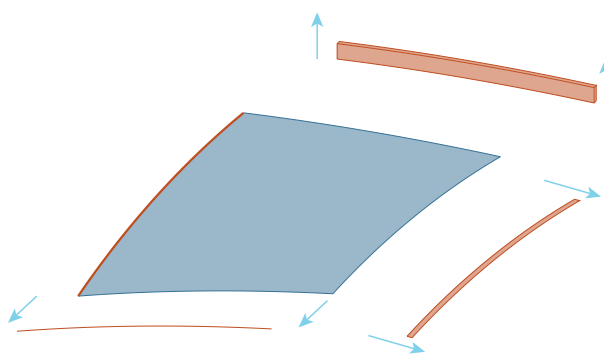
Questi bordi saranno realizzati in fibra di legno pressata, questo materiale è ideale per questo scopo, avendo un'ottima resistenza meccanica, utile a mantenere connessi in pannelli e sopportare il peso del pannello.

Inoltre, essendo un materiale isolante, interromperà il ponte termico tra interno ed esterno che si sarebbe altrimenti verificato tra i due strati di Corian.

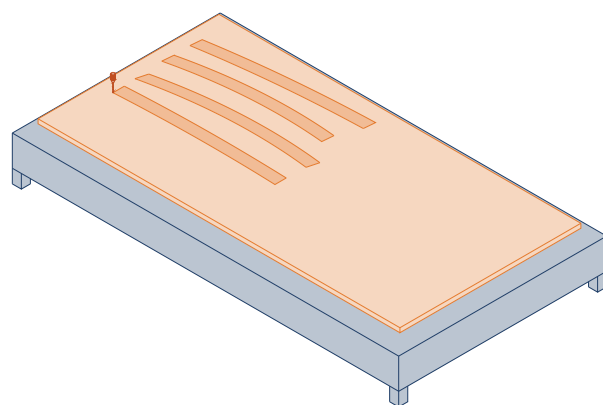
Per realizzare i componenti correttamente ho estratto la curvatura (in questo caso singola) da ogni lato della superficie di base di ogni pannello.

Una volta ricavata la superficie curva è stato necessario assegnarle appunto lo spessore di 25 cm, in modo da ottenere la geometria finale del bordo [354].

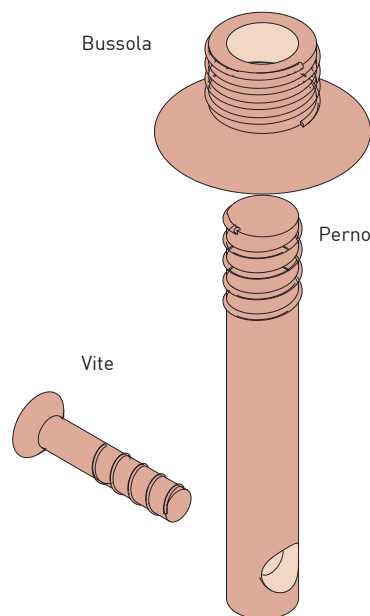
Una volta ottenuta la geometria di ognuno dei 4 componenti laterali, sarà possibile ricavare i disegni da inserire nel macchinario a controllo numerico in cui verranno ritagliate le sagome [355]. Ovviamente in questa fase verranno realizzati anche i fori necessari all'assemblaggio dei pannelli, questi fori saranno posizionati sia sul lato che sulla testa del pannello, infatti i giunti utilizzati, per consentire il futuro smontaggio dei pannelli richiedono



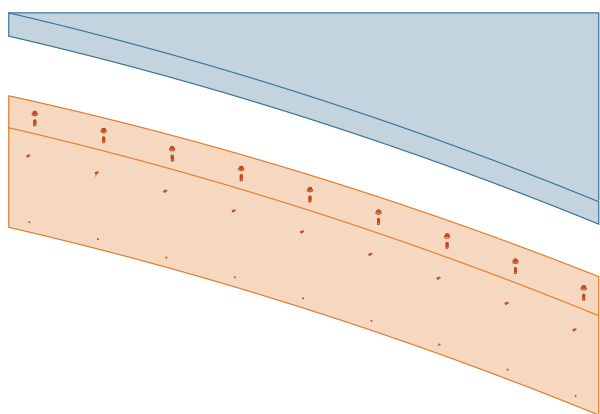
[354] 4 fasi per l'estrazione della curvatura di ogni singolo lato del pannello.



[355] Fase di taglio degli elementi di contorno



[356] Giunti metallici per fissare i due strati dei pannelli e renderli semplici da smontare

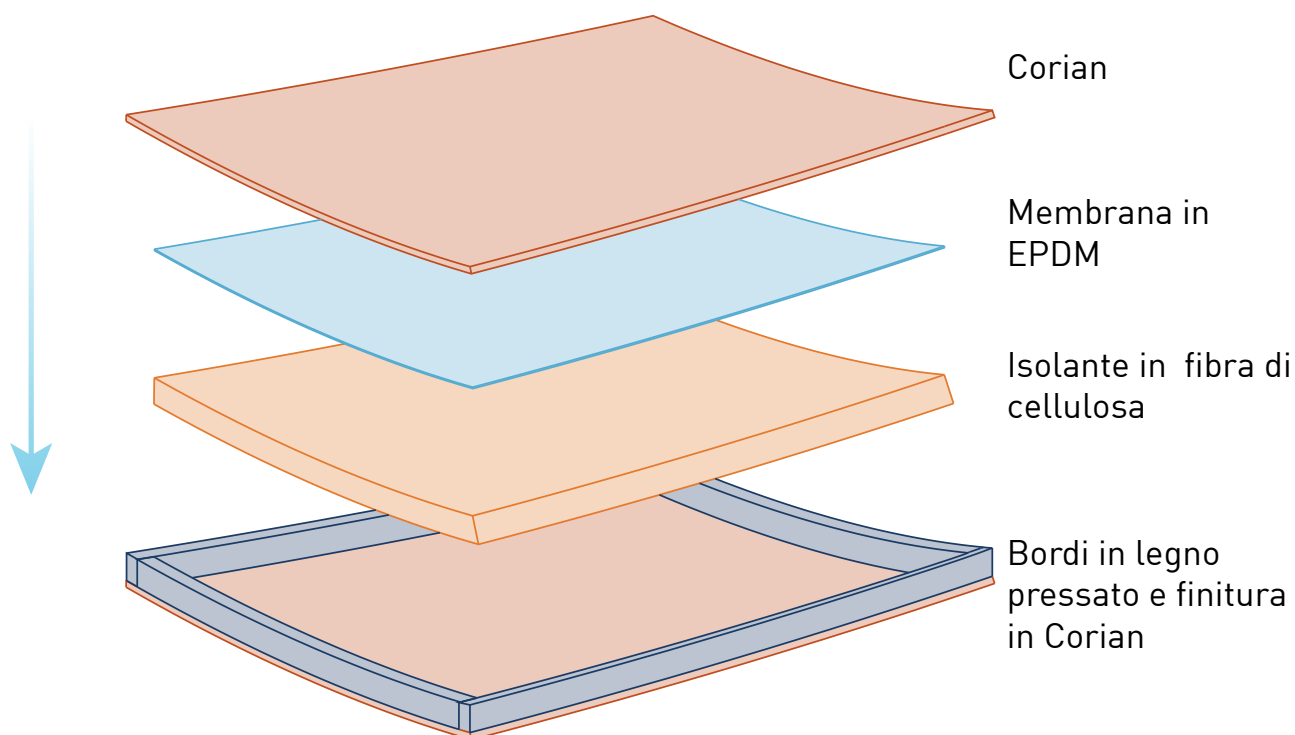


(357) Fase di assemblaggio tra bordi e facciata del pannello.

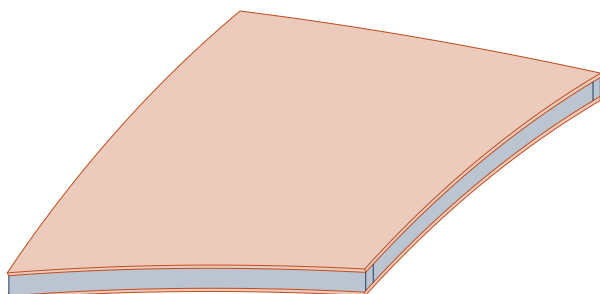
l'utilizzo di bussole e perni tipici nell'assemblaggio dei mobili (356).

Ovviamente prima di assemblare il pannello andrà impermeabilizzato il legno in modo che, nel momento in cui entrerà in contatto con l'acqua non marcisca. Per farlo il legno sarà spruzzato con un impermeabilizzante per il legno.

Una volta realizzati tutti i fori, che nello specifico comprendono per ogni incastro due fori verticali, per inserire i perni e due fori orizzontali per le bussole in corrispondenza di ogni foro (357).



(358) Composizione di un pannello attraverso l'inserimento di isolante e impermeabilizzante all'interno.



(359) Esempio di pannello completo

Questi fori avranno un diametro di circa 4 mm e questo tipo di assemblaggio garantirà la smontabilità dei pannelli con dei semplici cacciaviti permettendo di riciclare separatamente tutti i componenti dei pannelli.

Una volta assemblati tutti i lati dei pannelli ho inserito all'interno l'isolante e lo strato di impermeabilizzante (358), infine ho chiuso i pannelli con il secondo strato di Corian. A questo punto i pannelli risultano completi (359) quindi ci siamo concentrati sul trovare una soluzione rapida ed efficace per fissarli alle travi.

Il primo aspetto a cui ho dovuto fare attenzione è stata la differenza di altezza tra le travi principali, secondarie e gli archi strutturali.

Infatti, questi elementi, poggiando gli uni sugli altri si trovano ad essere ad altezze leggermente diverse tra loro.

Per risolvere questo problema ho adottato delle soluzioni ad hoc per ogni elemento che compone la maglia strutturale.

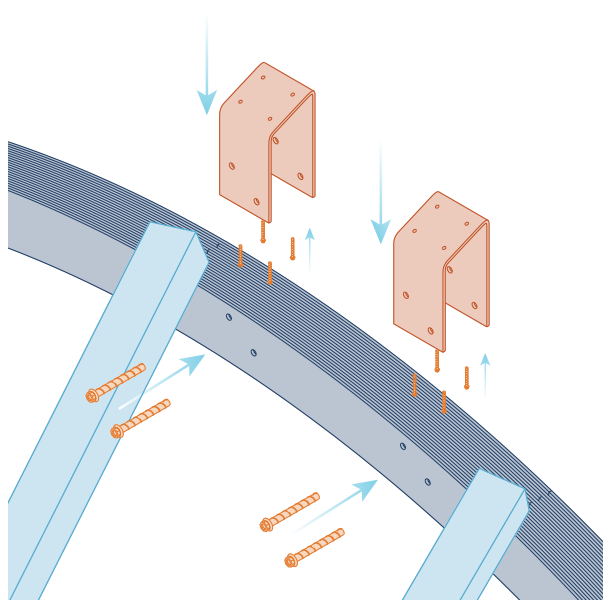
Nello specifico per quanto riguarda gli archi strutturali ho inserito nelle fessure tra un arco e l'altro dei sostegni, fissati tramite bulloni all'arco, che consentiranno di recuperare i centimetri mancanti e il fissaggio attraverso delle viti dei pannelli ad essi (360).

Per quanto riguarda le travi principali invece, essendo la differenza di livello molto meno evidente, mi sono limitato a inserire dei moduli metallici a forma di T da sovrapporre alle travi (361).

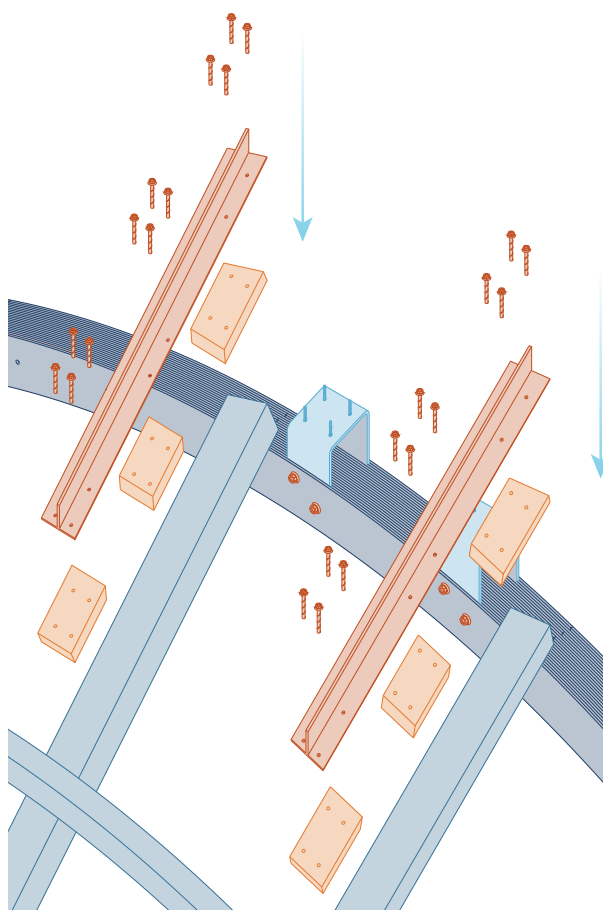
Questa forma a T ha una duplice funzione, ovvero andare a coprire lo spazio tra le travi e il pannello, ma anche quella di colmare il piccolo spazio tra un pannello e l'altro e sostenendo inoltre una guaina impermeabilizzante che consentirà di ottenere una perfetta chiusura della pelle esterna.

Questa chiusura impermeabile ovviamente andrà realizzata anche sul lato corto, ovvero in corrispondenza sia degli archi strutturali che in corrispondenza delle travi secondarie.

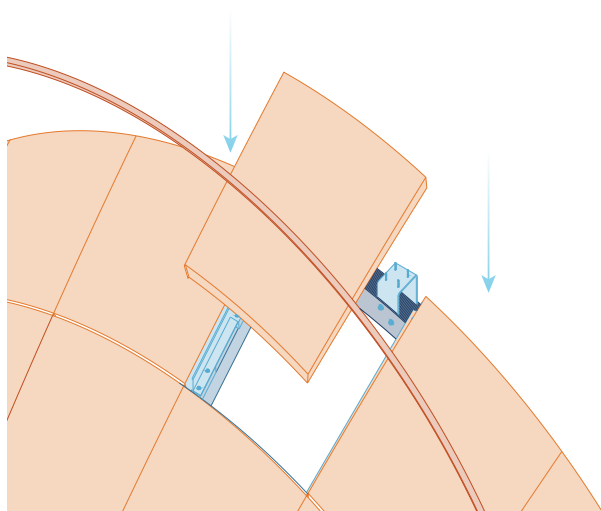
Per fissare i pannelli alle travi verranno utilizzate delle piastre metalliche a L che saranno fissate sui lati delle travi e consentiranno di fissare i pannelli attraverso 4 bulloni da 10 mm di diametro per ogni lato. Ovviamente ogni piastra utilizzata per fissare i pannelli avrà un'inclinazione diversa che verrà calcolata partendo dalla geometria di ogni singolo



(360) Aggiunta dei sostegni per i pannelli, fissati agli archi strutturali.



(361) Aggiunta profili a T su travi principali



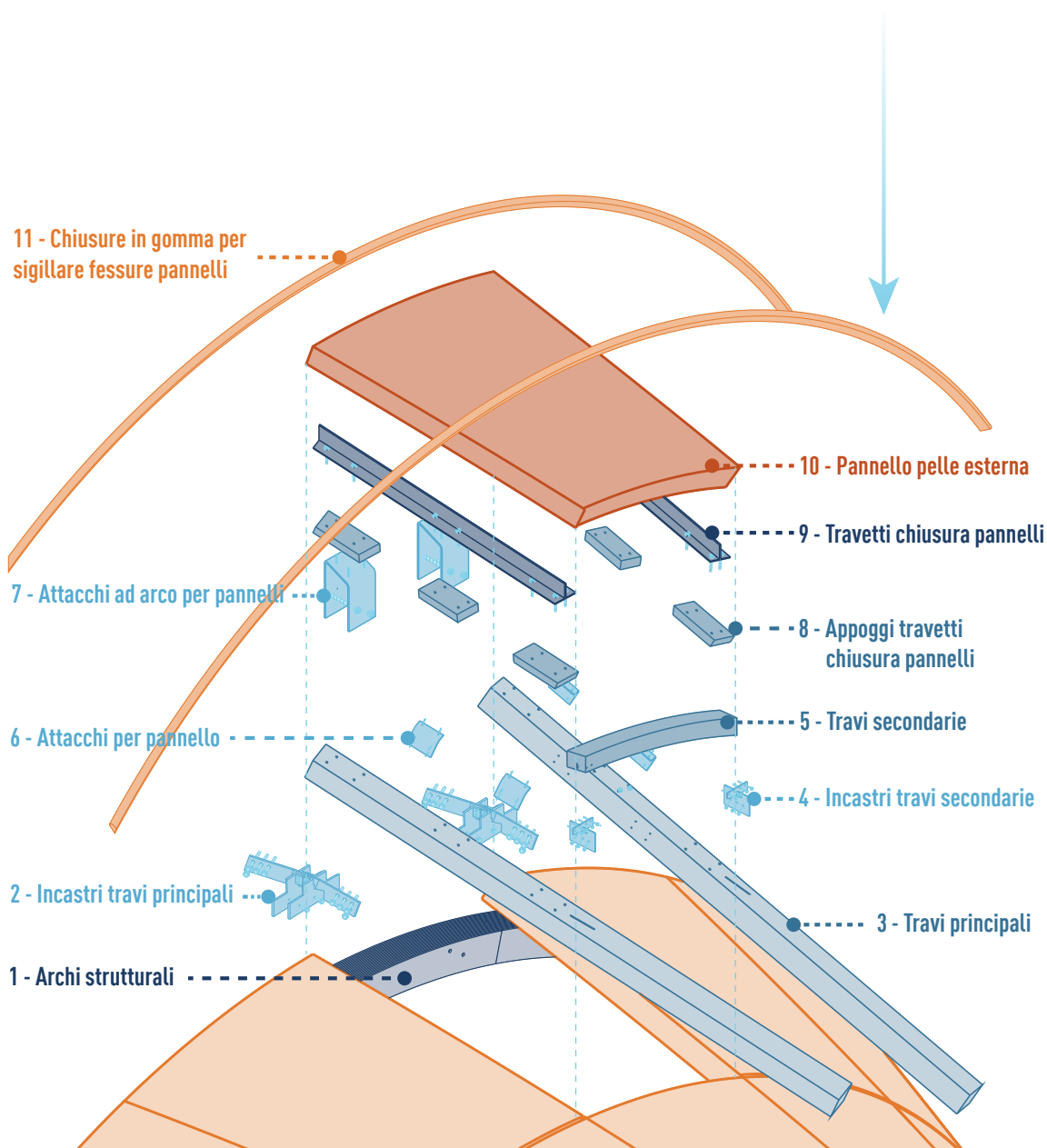
(362) Posizionamento dei pannelli con elemento in gomma come chiusura impermeabilizzante

pannello.

Infine, i fori per i bulloni utilizzati per il fissaggio andranno praticati prima di mandare i pannelli in cantiere sulla faccia interna del pannello, tramite fresa a controllo numerico.

Una volta montato il pannello per impermeabilizzare anche il lato corto verranno inseriti degli elementi di chiusura in gomma dura che una volta inseriti nello spazio di giuntura impediranno l'ingresso di acqua all'interno della struttura (362).

Nell'esploso qui indicato è possibile notare un pannello di facciata con tutte le travi e incastri necessari a sostenerlo (363).



(363) Esploso completo della struttura che sorregge ogni singolo pannello

7.3.2 - Pannelli trasparenti

La differenza fondamentale tra queste 2 tipologie di pannelli sta nella presenza di un telaio, necessario a sostenere le due lastre vetrate da 4 mm di spessore, che verranno realizzate anch'esse curve in modo da riprendere anche in questo caso la geometria dell'auditorium.

Il telaio invece, essendo composto da più angolazioni ed essendo per definizione un estrusione cava, necessiterà di un processo personalizzato.

Il primo step, consiste nel ricavare la forma degli infissi, quindi come nel caso dei pannelli opachi ho preso la superficie del pannello di riferimento e estratto i bordi.

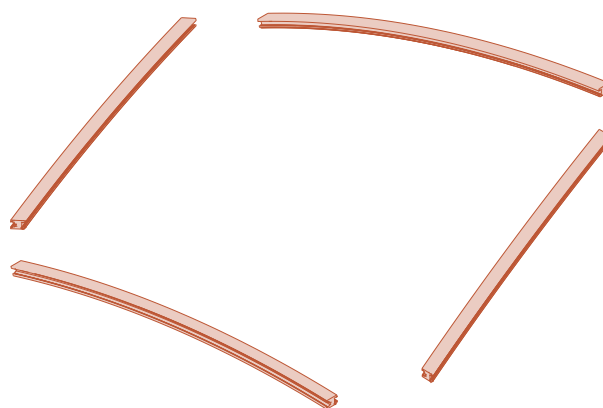
Da qui ho ricavato il raggio di curvatura di tutti i lati, che verranno lavorati singolarmente, questo per assegnare ad ogni lato la corretta curvatura, seguendo un procedimento analogo a quello utilizzato nei pannelli opachi.

Di fatto la lavorazione consiste in un'estrusione curva di alluminio (364), in questo modo sarà possibile ottenere dei profili elaborati internamente e con l'inclinazione corretta per consentire il corretto posizionamento.

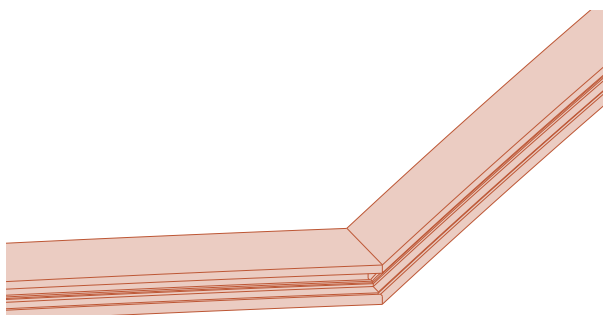
Una volta ottenuti i 4 lati del telaio verranno tagliati tutti i bordi a 45° per poter saldare tra loro gli elementi ottenendo così il telaio completo (365).

Una volta assemblati i primi 2 lati, sarà possibile inserire i vetri all'interno attraverso i tipici "binari" previsti nell'estrusione del telaio, per poi richiudere il pannello con la seconda coppia di lati ottenendo così, una volta saldati anche questi ultimi ai precedenti, il pannello finito (366).

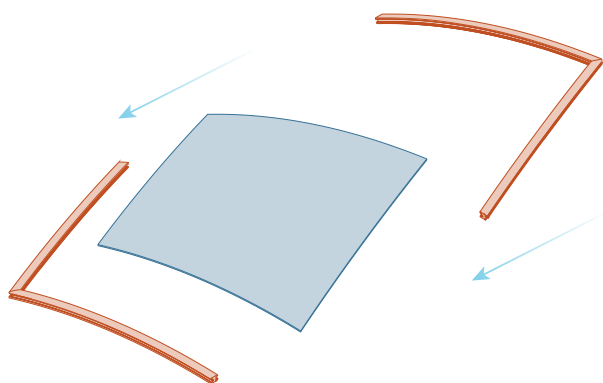
Per fissare questi infissi alla struttura portante useremo un sistema analogo a quello utilizzato per i pannelli opachi,



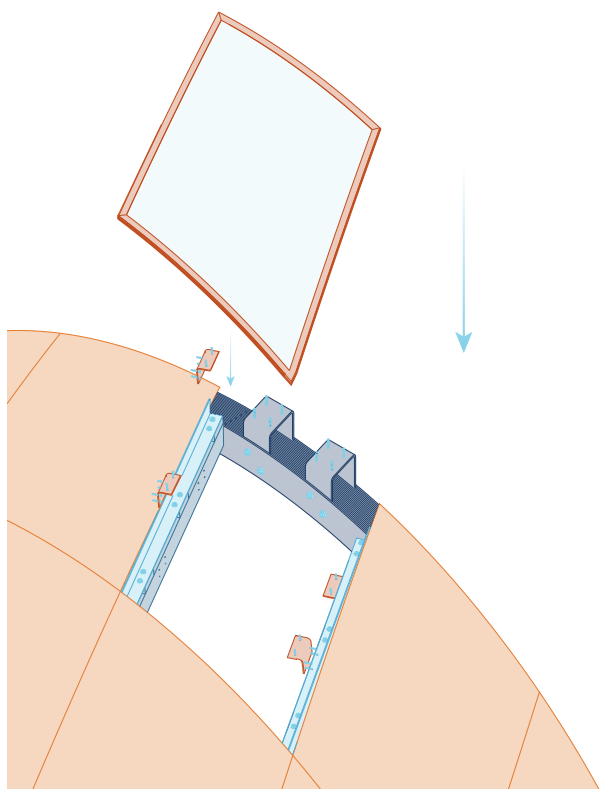
(364) Profili in alluminio estrusi in modo curvilineo per i pannelli vetrati.



(365) Esempio di giuntura a 45° di due bordi in alluminio del telaio.



(366) Assemblaggio pannelli



(367) Fissaggio dei pannelli alla struttura portante

ovvero delle piastre ad L, fissate da un lato alle travi e dall'altro all'infisso (367).

Ovviamente anche in questo caso sarà necessario tenere in considerazione le differenze di altezze tra archi strutturali, travi principali e secondarie, adottando gli stessi accorgimenti applicati nel caso precedente.

7.3.3 - Pannelli di chiusura laterali

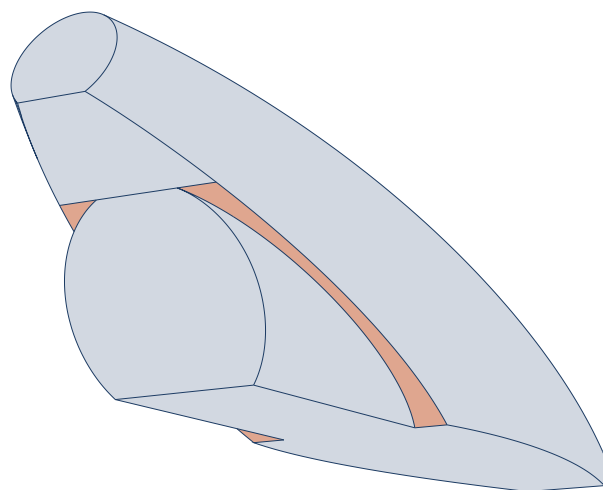
La particolare forma dell'auditorium ci ha portato ad avere delle facciate inclinate affianco al volume d'ingresso (368).

Questi lati ovviamente andranno anch'essi chiusi, e nel caso specifico ho deciso di farlo con dei pannelli opachi in modo da creare un contorno marcato per il corpo ingresso vetrato posto alla base dell'auditorium.

Questi pannelli, dal punto di vista produttivo in realtà non sono molto complessi da realizzare, anzi sono molto più semplici rispetto a quelli della copertura principale, infatti non essendo curvi, non necessitano del processo di curvatura precedentemente illustrato.

In questo caso però l'aspetto complesso risulta essere l'assemblaggio al resto della struttura; infatti, non essendoci travi principali e secondarie che possono sorreggere questi pannelli, la giuntura andrà pensata direttamente in corrispondenza degli archi strutturali.

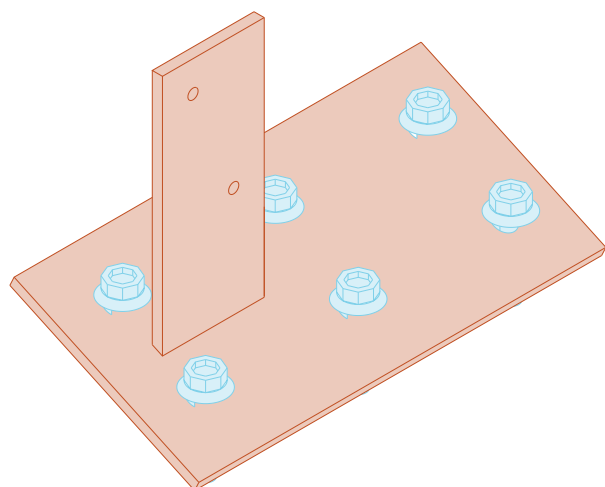
Queste giunture sfrutteranno ancora una volta gli spazi tra gli strati degli archi



(368) Pannelli piani indicati in arancione

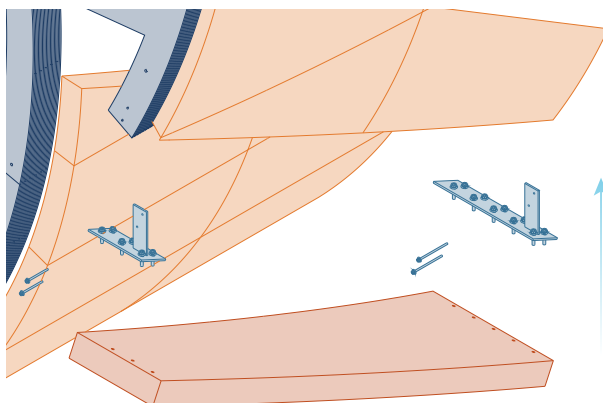
strutturali, con dei giunti a T (369) connessi negli spazi tramite due piastre e con una parte alta che verrà collegata direttamente ai pannelli. Proprio a causa di queste tipo di giunture questi pannelli avranno dimensioni leggermente maggiori, in termini di lunghezza rispetto agli altri.

Infatti, per poter giuntare i pannelli a due archi strutturali (370) distanti 6 m l'uno



(369) Giunto a T per assemblare i pannelli piani agli archi strutturali

dall'altro saranno necessari dei pannelli in grado di arrivare da un arco all'altro.



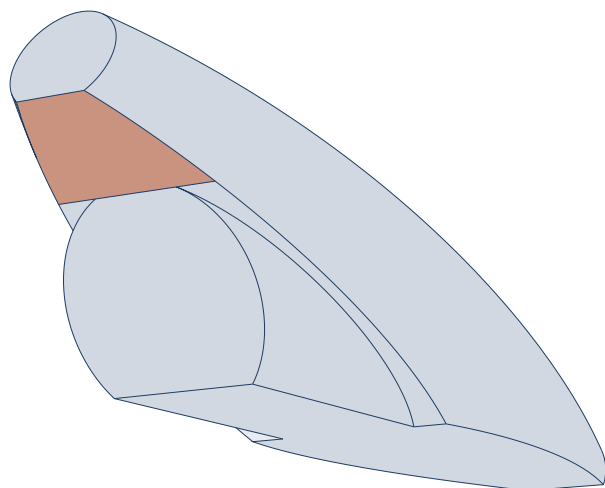
(370) Esploso con elementi necessari all'assemblaggio del pannello piano

7.3.4 - Pannelli di chiusura sopra l'ingresso

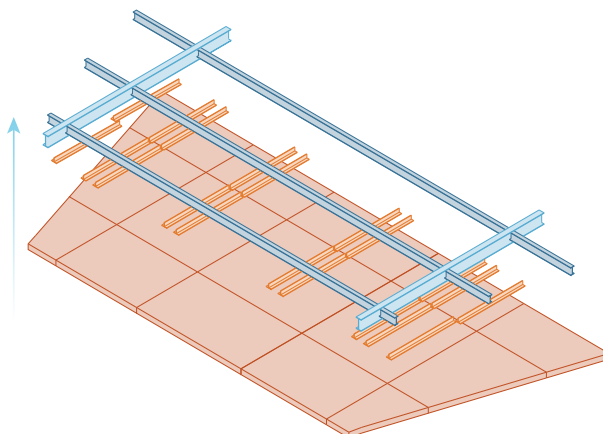
Questi pannelli sono quelli posizionati subito al di sotto allo sbalzo della coda dell'auditorium (371) e ovviamente sono indispensabili per mantenere la continuità nella pelle esterna.

Per quanto riguarda il metodo di

assemblaggio, ho ipotizzato di utilizzare dei travetti a T, al di sotto delle travi IPE 200 che sorreggono quella parte di edificio, in modo tale da poter fissare in totale sicurezza tutti i pannelli tramite dei semplici bulloni (372).



(371) Pannelli di chiusura posti sopra l'ingresso in arancione



(372) Esploso giunti pannelli con travetti a T e travi secondarie.

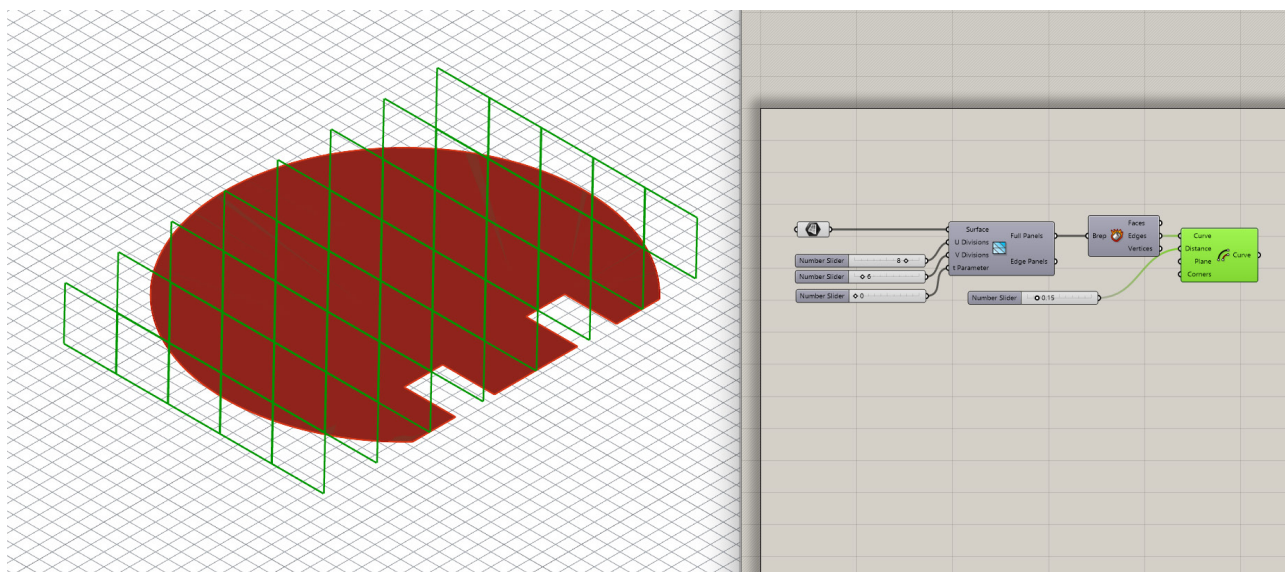
7.4 - Vetrate e chiusure verticali

Per quanto riguarda le quattro chiusure verticali piane, presenti all'interno del progetto, le ho suddivise in due categorie, ovvero vetrate e non vetrate.

Le pareti vetrate sono le tre poste in corrispondenza dell'ingresso, per questo lato dell'edificio era indispensabile inserire degli elementi vetrati, in quanto vi è la necessità di andare a inserire gli uffici di

amministrazione al secondo piano e il piano bar al terzo.

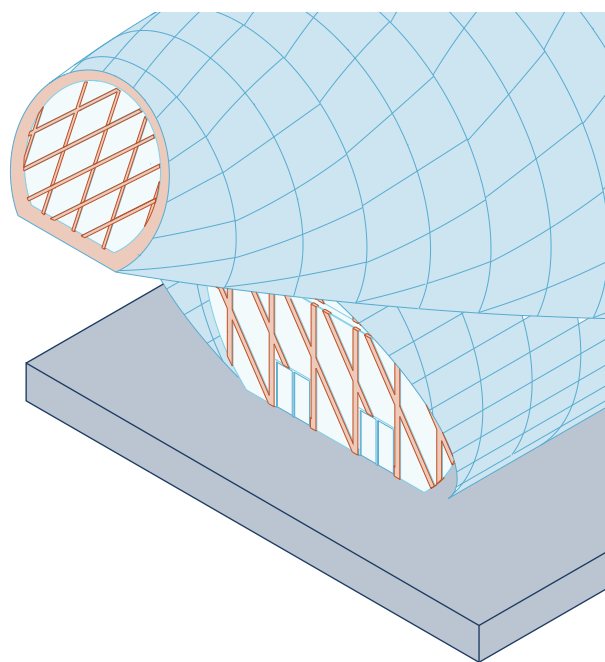
Per differenziare questi elementi rispetto alle pannellature del resto dell'edificio, ho deciso di tornare su Grasshopper ed elaborare un semplicissimo pattern geometrico (366), da utilizzare come guida per questi infissi.



[373] Pattern utilizzato per la creazione degli elementi vetrati all'ingresso della facciata.

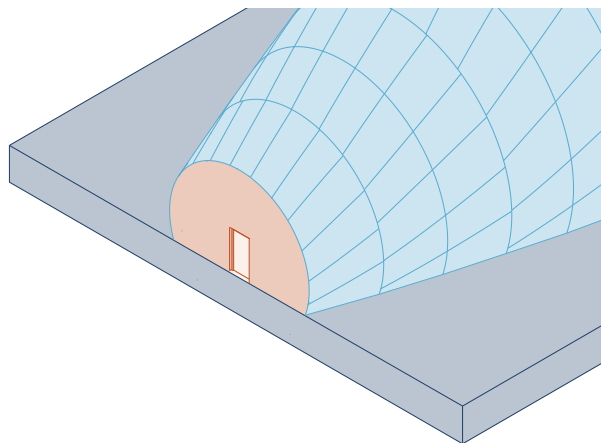
Questo stesso pattern è stato utilizzato anche per realizzare gli altri due pannelli vetrati presenti dallo stesso lato dell'edificio, con la differenza che in questo caso sono stati scalati e specchiati rispetto a questo primo pannello per dare un maggior senso di movimento alla facciata. Una volta estruso il pattern e suddiviso in elementi vetrati e montanti il risultato ottenuto [374] risultano essere delle facciate molto particolari che rompono il ritmo degli altri pannelli andando a rendere il tutto più particolare.

Queste facce dell'auditorium sono molto elaborate anche per un motivo molto semplice; infatti, questo è il primo lato che ci si trova davanti nel momento in cui si accede dall'ingresso principale dell'isolato. Al contrario il lato opposto dell'auditorium



[374] Facciate vetrate particolari poste all'ingresso dell'auditorium

Al contrario il lato opposto dell'auditorium volto verso l'ingresso secondario, non è stato necessario elaborarlo altrettanto, infatti mi sono limitato ad inserire dei pannelli opachi in Corian, come nel resto della pelle esterna e una porta per l'accesso diretto ai camerini e al palcoscenico dell'auditorium (375).



(375) Facciata in Corian con porta che da accesso a camerini e palcoscenico.

Fonti

Siti web (in ordine di citazione)

- Agape design - materiali/corian - www.agapedesign.it/materiali/corian

- Exteriors.corian.it - www.exteriors.corian.it/ec-corian-r-features-benefits-it

- Exteriors.corian.it - www.exteriors.corian.it/ec-colors-of-corian-it

- Isolacasa.it/ fibra di cellulosa - www.isolacasa.it/%20fibra%20di%20cellulosa/

- Fibradilegno / catalogo fibra di legno - www.fibradilegno.com/index.html

- Betelli.it - www.betelli.it/che-materiale-e-epdm/

Elenco immagini con fonti complete

(335) Tagli realizzati sulla superficie esterna tramite algoritmo realizzato su Grasshopper, nello specifico in corrispondenza degli archi strutturali e delle travi secondarie. (Fonte: Elaborato di progetto).

(336) Tagli realizzati sulla superficie esterna tramite algoritmo realizzato su Grasshopper, nello specifico in corrispondenza delle travi principali (Fonte: Elaborato di progetto).

(337) Concept estrusione faccia di base della prima fila di pannelli (Fonte: Elaborato di progetto).

(338) Spaccato assonometrico parte posteriore auditorium (Fonte: Elaborato di progetto).

(339) Disposizione dei pannelli vetrati evidenziati in azzurro 1 (Fonte: Elaborato di progetto).

(340) Disposizione dei pannelli vetrati evidenziati in azzurro 2 (Fonte: Elaborato di progetto).

(341) Griglia di numerazione dei pannelli per semplificare la fase di assemblaggio. (Fonte: Elaborato di progetto).

(342) Pannello completo con sigla corrispondente annotata sul bordo (Fonte: Elaborato di progetto).

(343-344) Edificio polifunzionale a Sofia, Bulgaria e 54 Londres, Paris, complesso immobiliare. Entrambi questi edifici sono esempi pratici di applicazione del Corian in facciata. (Fonti: www.exteriors.corian.it/Sofia-Bulgaria-Corian-R-Exteriors-per-una-facciata-imponente-e-altamente)

(345) Palette di colori e fantasie disponibili (www.exteriors.corian.it/ec-colors-of-corian-it)

(346) Fibra di cellulosa vista da vicino (Fonte: www.isolacasa.it/%20fibra%20di%20cellulosa/)

(347) Pannello in fibra di legno (Fonte: www.fibradilegno.com/fibra-di-legno-therm-dry.html)

(348) EPDM gomma utilizzata come strato anti risalita (Fonte: www.betelli.it/che-materiale-e-epdm/)

(349) Sistema di piegatura del corian basato sui pistoncini e un letto flessibile (Fonte: parametric-architecture.com/towards-a-parametric-material-corian-solid-surface-and-3d-fabrication-solutions/)

(350) Sistema di piegatura del corian basato sui pistoncini e un letto flessibile (Fonte: Parametric architecture)

(351) Esempio di facciata realizzata in Corian con forme a doppia curvatura (Fonte: <https://parametric-architecture.com/towards-a-parametric-material-corian-solid-surface-and-3d-fabrication-solutions/>)

(352) Fase di taglio del pannello in Korean (Fonte: Elaborato di progetto).

(353) Fase di piegatura dello strato di finitura esterna del pannello in Korean (Fonte: Elaborato di progetto).

(354) 4 fasi per l'estrazione della curvatura di ogni singolo lato del pannello. (Fonte: Elaborato di progetto).

(355) Fase di taglio degli elementi di contorno (Fonte: Elaborato di progetto).

(356) Giunti metallici per fissare i due strati dei pannelli e renderli semplici da smontare (Fonte: Elaborato di progetto).

(357) Fase di assemblaggio tra bordi e facciata del pannello. (Fonte: Elaborato di progetto).

(358) Composizione di un pannello attraverso l'inserimento di isolante e impermeabilizzante all'interno. (Fonte: Elaborato di progetto).

(359) Esempio di pannello completo (Fonte: Elaborato di progetto). (Fonte: Elaborato di progetto).

(360) Aggiunta dei sostegni per i pannelli, fissati agli archi strutturali. (Fonte: Elaborato di progetto).

(361) Aggiunta profili a T su travi principali (Fonte: Elaborato di progetto).

(362) Posizionamento dei pannelli con elemento in gomma come chiusura impermeabilizzante (Fonte: Elaborato di progetto).

(363) Esploso completo della struttura che sorregge ogni singolo pannello (Fonte: Elaborato di progetto).

(364) Profili in alluminio estrusi in modo curvilineo per i pannelli vetrati. (Fonte: Elaborato di progetto).

(365) Esempio di giuntura a 45° di due bordi in alluminio del telaio. (Fonte: Elaborato di progetto).

(366) Assemblaggio pannelli (Fonte: Elaborato di progetto).

(367) Fissaggio dei pannelli alla struttura portante (Fonte: Elaborato di progetto).

(368) Pannelli piani indicati in arancione (Fonte: Elaborato di progetto).

(369) Giunto a T per assemblare i pannelli piani agli archi strutturali (Fonte: Elaborato di progetto).

(370) Esploso con elementi necessari all'assemblaggio del pannello piano (Fonte: Elaborato di progetto).

(371) Pannelli di chiusura posti sopra l'ingresso in arancione (Fonte: Elaborato di progetto).

(372) Esploso giunti pannelli con travetti a T e travi secondarie. (Fonte: Elaborato di progetto).

(373) Pattern utilizzato per la creazione degli elementi vetrati all'ingresso della facciata. (Fonte: Elaborato di progetto).

(374) Facciate vetrate particolari poste all'ingresso dell'auditorium (Fonte: Elaborato di progetto).

(375) Facciata in Corian con porta che da accesso a camerini e palcoscenico. (Fonte: Elaborato di progetto).

08

Cantierizzazione e assemblaggio in sito

8.1 - Studio del cantiere

In questo capitolo ho provato a capire come tutti i componenti di progetto che ho pensato, potrebbero essere trasportati in cantiere e successivamente assemblati, ovvero quello che probabilmente è l'aspetto più importante di un progetto basato su metodologia DfMA.

Come obiettivo finale di questo capitolo mi sono posto la realizzazione di un Cronoprogramma, ovviamente semplificato, di quelle che potrebbero essere le fasi di cantiere inerenti la realizzazione dell'auditorium e i relativi tempi di realizzazione e delle assonometrie che aiuteranno a spiegare ogni fase di questo processo.

Questa operazione ovviamente sarà focalizzata sull'auditorium, essendo l'oggetto fulcro della tesi; infatti, non essendo stati approfonditi i progetti degli edifici che gli stanno intorno, non sarebbe stato possibile svolgere questa analisi.

Le fasi che ho seguito per sviluppare

questo elaborato sono le seguenti:

- Per ogni tipologia di elemento da me progettato è stata pensata una modalità di trasporto che fosse applicabile con un trasporto convenzionale.

- In secondo luogo, ho ipotizzato l'ordine di arrivo dei materiali in cantiere in base a come abbiamo pensato che il progetto potesse essere realizzato senza creare problemi alle fasi successive.

- Infine, ho ipotizzato i tempi delle singole fasi di assemblaggio a secco dei componenti, andando a realizzare il Cronoprogramma per il cantiere.

Oltre a queste fasi di studio ho anche provato a capire come potrebbe essere organizzato il cantiere per garantire la massima sicurezza e una gestione efficace delle risorse.

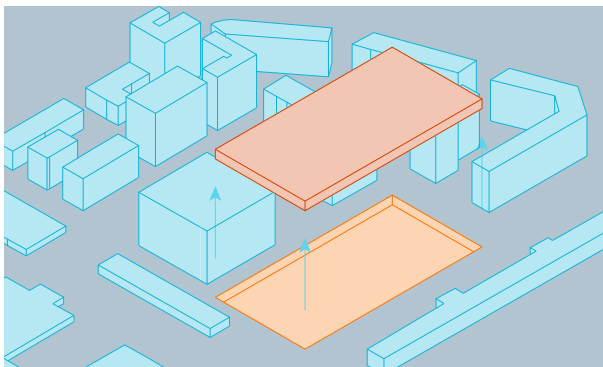
8.1.1 - Fase 1: pulizia e preparazione area di cantiere

Come già accennato nel quarto capitolo di questa tesi, l'area di progetto al momento è occupata da dei parcheggi (375). La prima operazione da svolgere per studiare questo cantiere è stata quella di programmare la rimozione dell'asfalto e del terreno in modo da poter inserire il piano di parcheggi interrati.

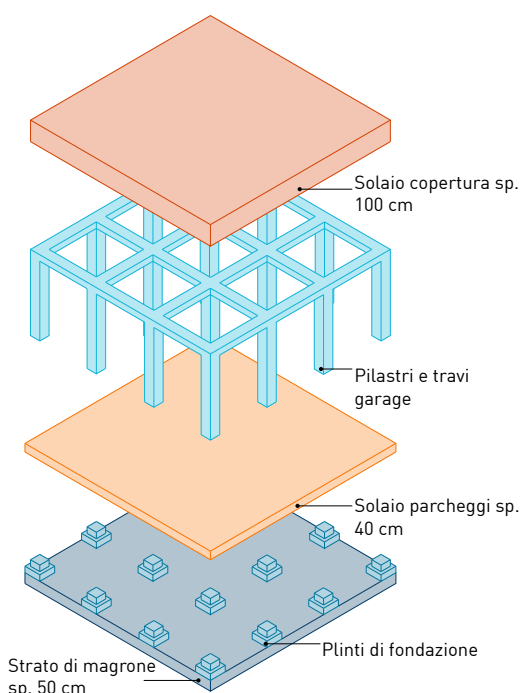
Ovviamente lo scavo è stato pensato anche per poter ospitare le fondazioni di tutto il progetto e con un solaio sufficientemente spesso da ospitare le aree verdi che fanno parte del progetto.



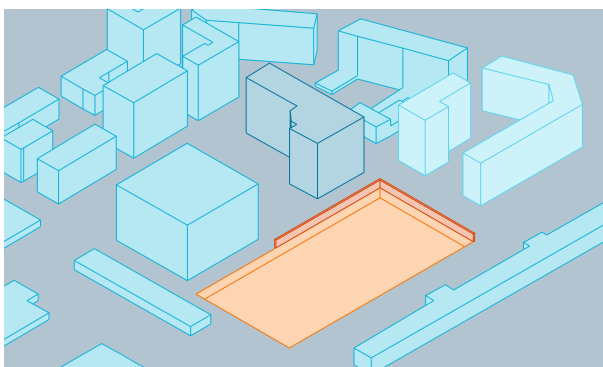
(375) Foto area di progetto realizzata il giorno 29/07/2024 durante sopralluogo.



(376) Schematizzazione rimozione del terreno per realizzazione parcheggio interrato



(377) Posizionamento delle barriere fonoassorbenti ai margini del cantiere



- Barriera fonoassorbente
- Energy center
- Residenze Via Nino Bixio

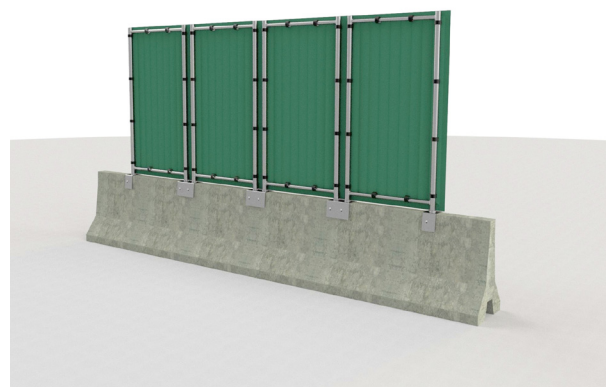
(378) Posizionamento delle barriere fonoassorbenti ai margini del cantiere

Per i seguenti motivi lo spessore ipotizzato per questo scavo (376) è 6,5 m, di cui 1 m circa per il solaio, 4 m per lo spazio dedicato al parcheggio, 40 cm per lo spessore del solaio del parcheggio, 60 cm per i plinti di fondazione e infine uno strato di 50 cm di magrone (377).

Prima di procedere realmente alla realizzazione di questo scavo ovviamente è stato indispensabile pensare alla recinzione che avrebbe dovuto racchiudere il cantiere e non solo per poter controllare gli ingressi, ma anche e soprattutto per non disturbare le attività svolte all'interno degli edifici posti intorno al progetto. In particolare, gli unici edifici che potrebbero essere fortemente disturbati dai rumori e dalle polveri alzate nel cantiere, sarebbero l'energy center e le residenze di via Nino Bixio.

Per questo motivo in corrispondenza di questi due edifici (378) sarà necessario mettere una barriera fonoassorbente (379), in grado di ridurre al minimo il fastidio prodotto dai lavori. Per quanto riguarda gli altri lati invece abbiamo pensato di inserire una classica barriera con alla base un new jersey (tra l'altro già presenti in sito, per delimitare l'area dei parcheggi) e sopra di essa si posizionerà una barriera in lamiera grecata con alla base sempre un new jersey per contenere le polveri (380).

Una volta delimitato il cantiere è stato fondamentale decidere i punti di accesso e uscita di questo cantiere, nello specifico



(379) Esempio di barriera fonoassorbente (Fonte: CIR-ambiente)

ho scelto di posizionare entrambi sul lato affacciato su Via Borsellino (381), questo perchè essendo la via più larga, renderà più semplice far transitare anche i mezzi di grandi dimensioni. Inoltre, essendo una via direttamente collegata con corso Ferrucci e corso Vittorio Emanuele, sarà più semplice trasportare i materiali da questo lato.

Ovviamente gli ingressi dovranno essere pensati in punti che rimarranno percorribili dai mezzi almeno fino a una fase molto avanzata del cantiere, per questo motivo saranno posizionati a qualche metro dai punti in cui sorgeranno gli edifici commerciali, quasi perfettamente al centro del lato.

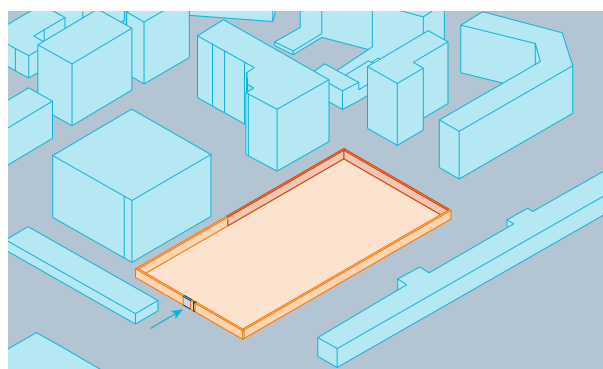
Questa apertura sarà larga rispettivamente 5 m per quanto riguarda l'apertura destinata ai veicoli e 1 m per le aperture per i pedoni.

È indispensabile poi che questi 2 ingressi siano chiaramente suddivisi tra loro da spazio e anche da barriere, come dei new jersey (382).

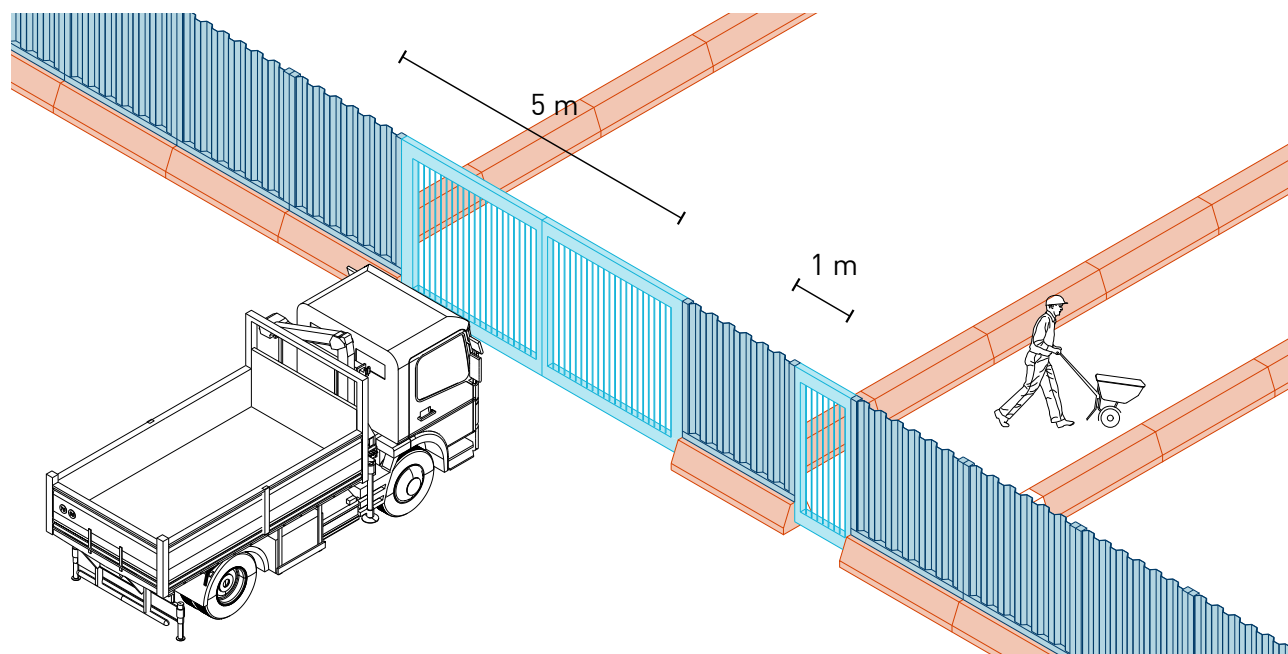
Una volta ultimata la messa in sicurezza del cantiere sarà possibile iniziare gli scavi, andando a rimuovere prima la



(380) Esempio barriera in lamiera grecata (Fonte: Cementisolai.it)



(381) Posizionamento ingresso in cantiere al centro del lato corto alla base della recinzione



(382) Ingresso di cantiere con percorsi separati da new jersey

pavimentazione asfaltata presente al momento e successivamente il terreno per lasciare spazio ai parcheggi. In seguito, verranno eseguite le operazioni di getto del magrone di base, la realizzazione

delle fondazioni, della soletta del parcheggio, i pilastri destinati a sorreggere il solaio e gli edifici successivamente posizionati al di sopra.

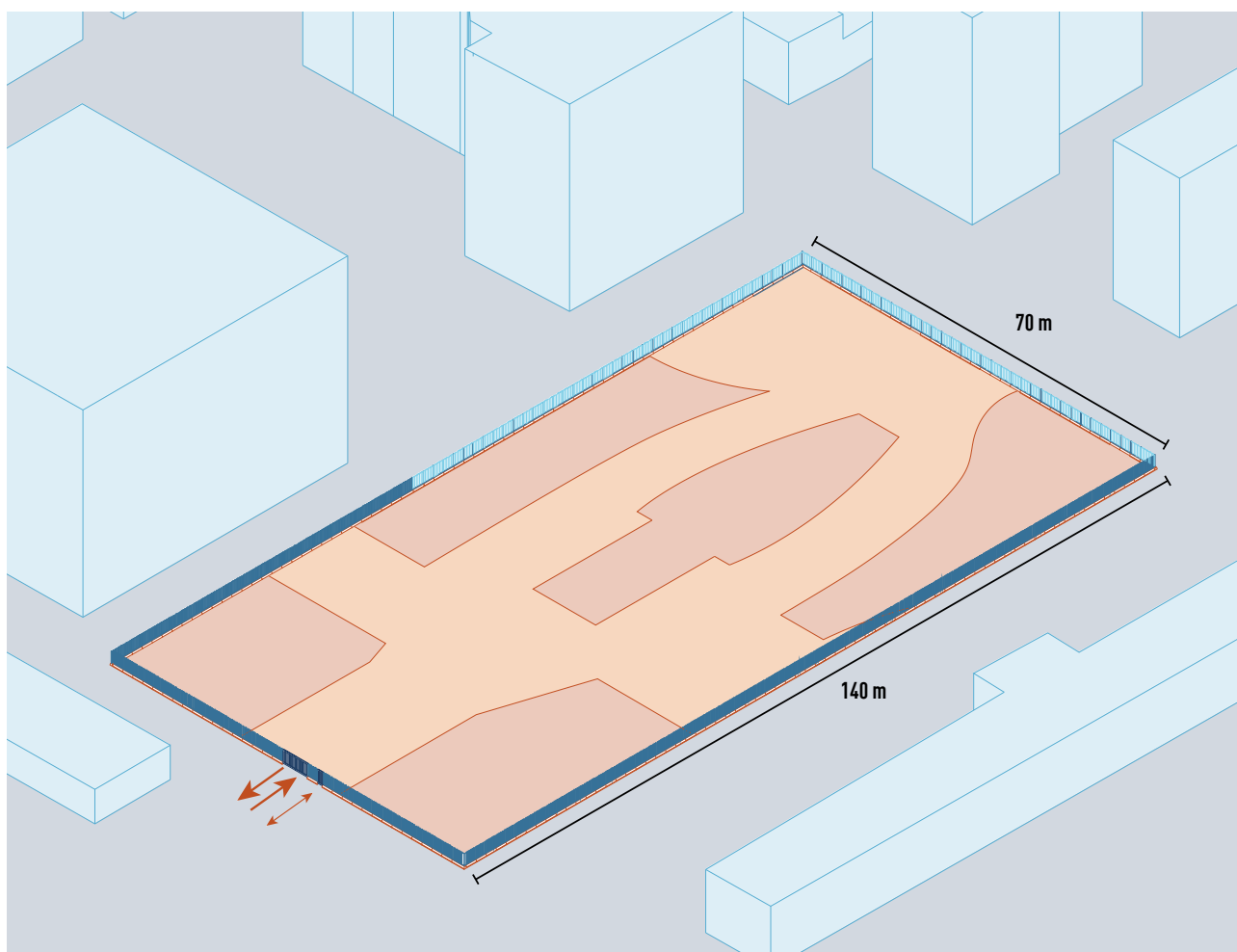
8.1.2 - Fase 2: Definizione mappa di cantiere

Una volta realizzati i parcheggi, ed aver quindi ottenuto la superficie "grezza" del solaio di copertura sarà il momento di realizzare la mappa del cantiere, ovvero organizzare il posizionamento di quegli elementi indispensabili al funzionamento del cantiere.

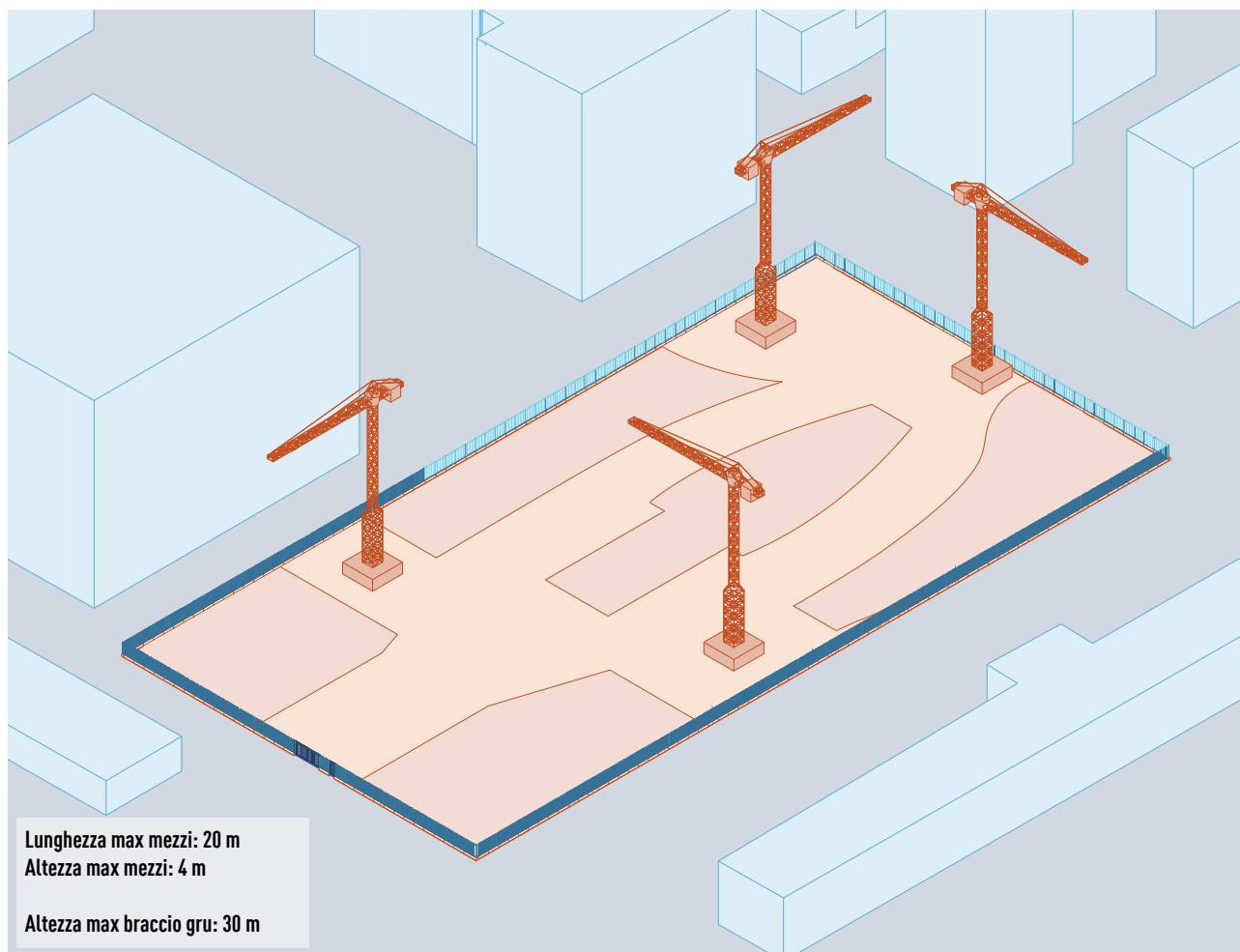
Per farlo ovviamente è stato importante identificare l'impronta a terra degli edifici (383), questo ovviamente per evitare di posizionare gru o altri elementi difficili da spostare sopra i punti in cui costruire.

La cosa indispensabile è scegliere attentamente il posizionamento delle gru e di altri elementi complicati da smontare accuratamente, in modo da evitare spostamenti nelle fasi successive. Per questo motivo per posizionare gli elementi abbiamo seguito il seguente ordine:

Le gru: andrà predisposto un punto in cui posizionarle in modo che possano aiutare alla realizzazione di tutti gli edifici, senza interferire con le altre attività, per questo



(383) Area di progetto recintata e con evidenziati i punti in cui sorgeranno i nuovi edifici



(384) Gru posizionate nell'area di cantiere

motivo, abbiamo pensato di inserire le gru (384) negli spazi liberi tra due edifici. Questo consentirà a queste gru di operare su almeno due edifici, garantendone l'utilità durante tutte le fasi di cantiere. Nello specifico per il cantiere abbiamo ipotizzato di utilizzare delle gru alte 30 m e con un braccio di 20 m di diametro.

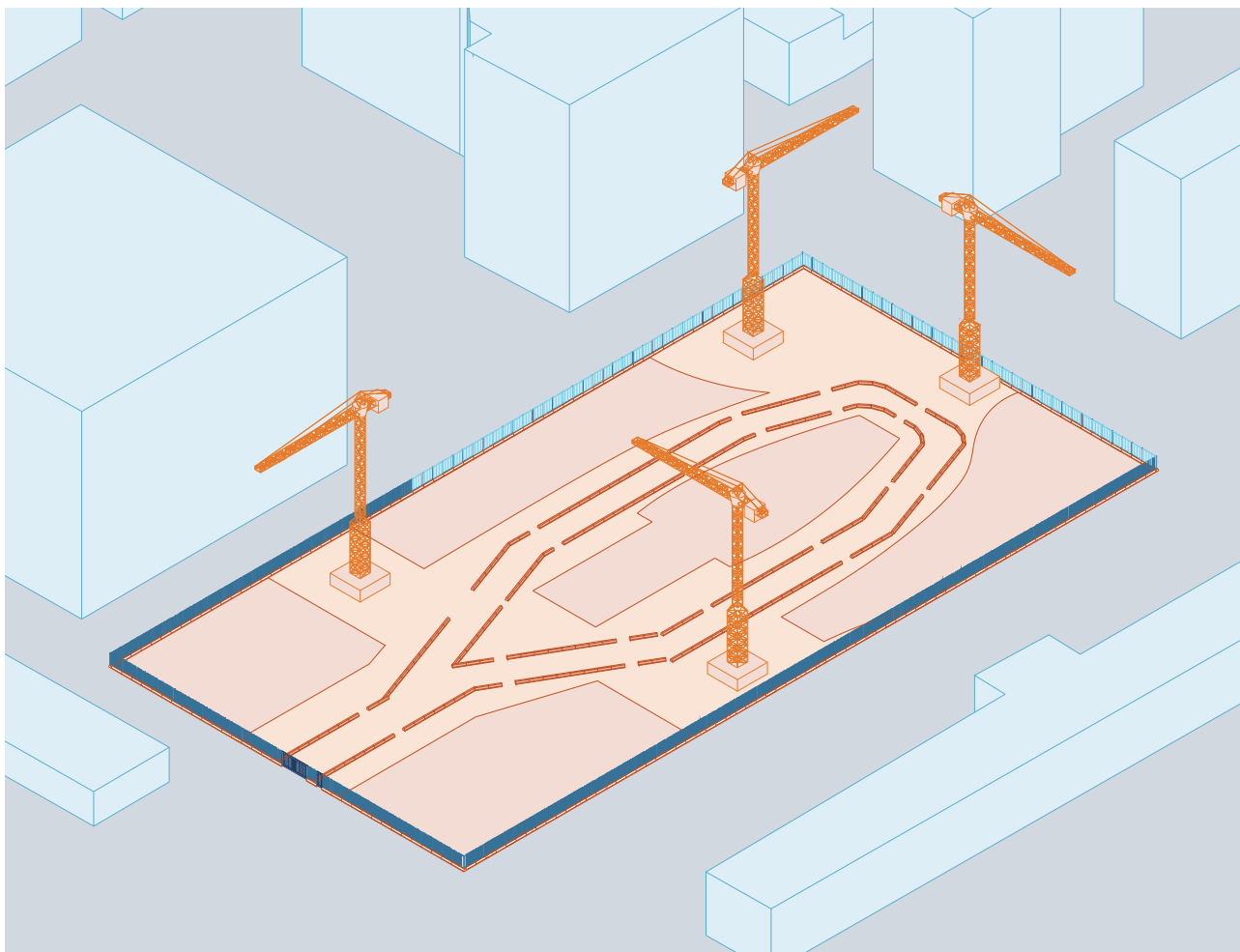
Percorsi pedonali e per i mezzi di cantiere: questi percorsi sono una delle prime cose a cui pensare in quanto sono fondamentali per muoversi in sicurezza all'interno dell'area di cantiere. Un aspetto fondamentale è quello di mantenere separati i percorsi pedonali e per i veicoli, nel caso siano uno

affianco all'altro va comunque predisposta una divisione per mezzo di new jersey.

Infatti come si può vedere nell'immagine (385), abbiamo predisposto il percorso per i mezzi pesanti in modo che possa raggiungere tutte le parti del cantiere in sicurezza.

Infine abbiamo predisposto alcuni spazi aperti che potessero essere attraversati dagli operai in sicurezza.

Infine ho posizionato tutte le altre cose più semplici, eventualmente possibili da spostare a cantiere in corso, ma ovviamente fondamentali per il funzionamento del cantiere:



(385) Posizionamento dei new jersey nell'area di cantiere per consentire il passaggio dei mezzi pesanti in cantiere

Deposito attrezzi: fondamentale per evitare furti e conservare in modo sicuro tutte le attrezzature.

Deposito materiale: Il materiale dovrà essere posizionato in postazioni distanti dal punto di lavorazione e soprattutto al riparo da fenomeni atmosferici.

Uffici tecnici: all'interno del cantiere sarà necessario predisporre un'area dedicata ad architetti e ingegneri che seguiranno il processo.

Deposito rifiuti: allo stesso modo dei materiali anche gli scarti dovranno essere posizionati in un posto distante dai punti di lavorazione, ma soprattutto per favorire lo sviluppo sostenibile del progetto dovranno essere suddivisi per tipologia di materiale, in modo da essere riciclati.

Mensa, spogliatoi e altre strutture dedicate agli operai.

Servizi igienici

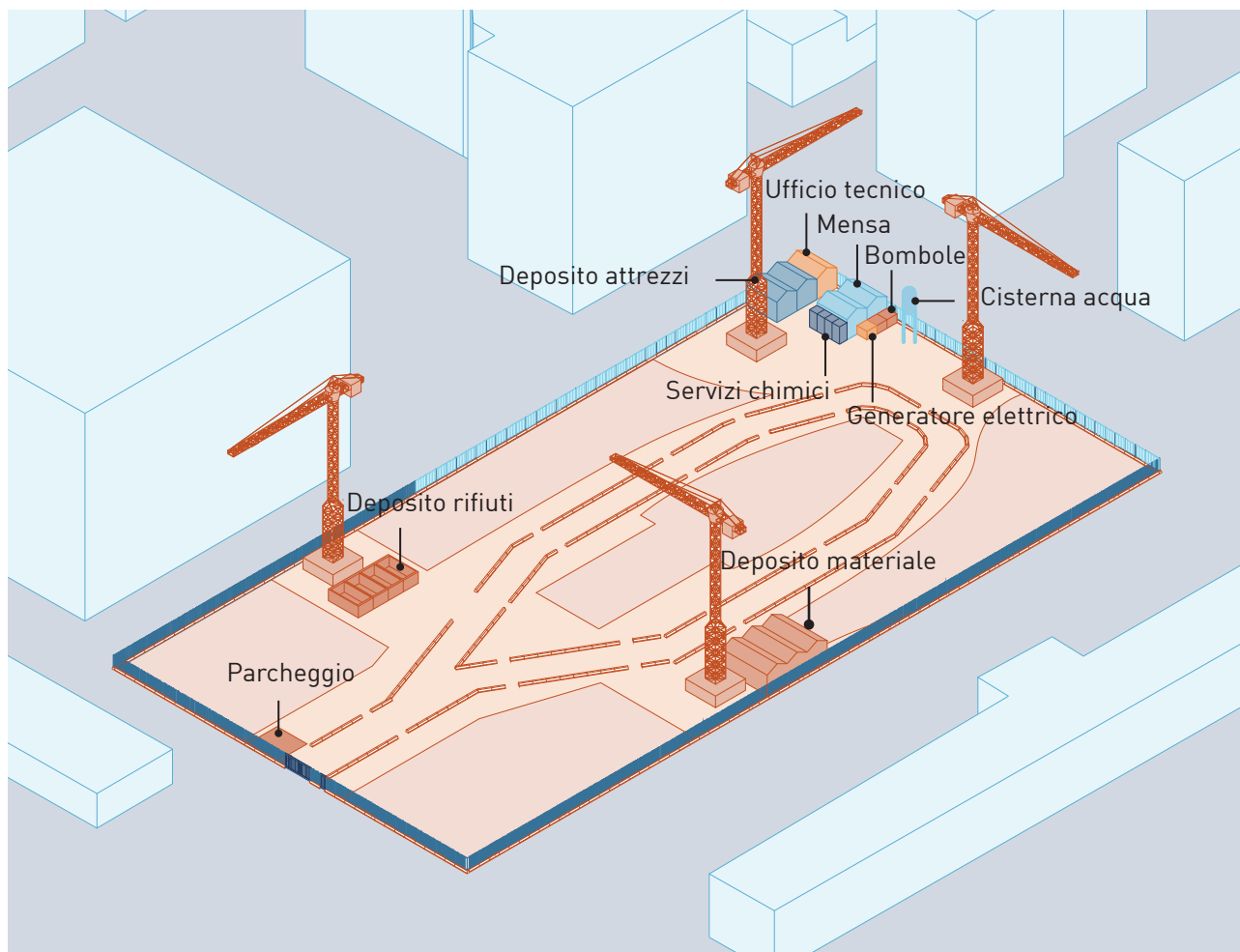
Deposito bombole: possono essere necessarie delle bombole in cantiere per eseguire alcune lavorazioni, queste andranno conservate in un luogo sicuro e lontano da fonti di calore.

Cisterna per l'acqua potabile

Generatore elettricità

Parcheggio: parcheggio per automobili di ingegneri, architetti o altro personale che lavora al cantiere.

La mappa del cantiere completa (386) mostra che tutti gli elementi posizionati



(386) Mappa di cantiere al completo

consentiranno un utilizzo funzionale del cantiere, ovviamente la prima parte da realizzare sarà quella centrale composta dall'auditorium, in modo da poter successivamente passare a lavorare sulle parti esterne senza interferenze nelle lavorazioni.

Le posizioni degli elementi sono state scelte in base a diversi motivi, ad esempio il parcheggio è stato posizionato vicino all'ingresso in modo che le auto possano rimanere il più lontano possibile dalle lavorazioni. Stesso motivo per il deposito rifiuti è stato posizionato leggermente più internamente in modo che i cassoni possano essere prelevati rapidamente dai

camion che si occupano della rimozione. Anche il deposito dei materiali è abbastanza vicino all'ingresso, in modo che anche in questo caso si possa scaricare rapidamente il materiale.

Il resto degli elementi di cantiere è posizionato sul fondo, essendo quasi tutti elementi al servizio del personale che lavorerà nel cantiere e che potrebbe essere utile avere tutto vicino.

Inoltre, l'area dedicata risulta essere piuttosto distante dai punti di lavorazione, consentendo il massimo silenzio per i tecnici e per gli operai nei momenti di pausa in mensa.

8.2 - Trasporto e assemblaggio

Il trasporto dei componenti realizzati è un altro elemento chiave della procedura DfMA, per ognuno dei componenti ho pensato ad un modo efficace per trasportarli in cantiere.

Ogni tipologia di componente ha richiesto un procedimento personalizzato che ho studiato in questo paragrafo, portando degli esempi concreti pensati per ognuna delle tipologie.

8.2.1 - Archi strutturali

8.2.1.1 - Trasporto

Come già descritto in precedenza gli archi strutturali sono stati realizzati con dimensioni inferiori ai 6 m in lunghezza e 4 m in larghezza, questo per consentire il trasporto su camion.

Nello specifico per capire quanti camion sarebbero stati necessari per il trasporto abbiamo dovuto ricercare il peso massimo di un bilico secondo normativa italiana che per un bilico a 5 assi è di massimo 40 tonnellate. Per quanto riguarda i camion di dimensioni inferiori ovvero da 3 o due assi il carico scende rispettivamente a 25 e 10 tonnellate.

Ovviamente questo peso comprende sia il peso del carico sia il peso del camion a vuoto, per questo motivo va considerato un peso di portata massimo di circa 25 tonnellate al massimo per i bilici con 5 o 4 assi, 15 per quelli a 3 assi e 7 per quelli a 2 assi.

Basandomi su questa suddivisione per capire il numero di bilici necessari per il trasporto di ogni arco, ho preso come riferimento il peso di ciascun arco, assegnando poi ad ognuno di essi uno o più tipi di camion per il trasporto (387).

Una volta assegnati i vari tipi di camion a ciascun arco abbiamo analizzato in che modo potessero essere posizionati io vari componenti all'interno.

Ho eseguito dei tentativi di disposizione dei componenti con alcuni archi molto diversi

(387) Suddivisione dei pezzi di ogni singolo arco su bilici a 2, 3 o 4 assi in base al peso e alla dimensione dei componenti degli archi.

Arco 1	
Arco 2	
Arco 3	 
Arco 4	 
Arco 5	 
Arco 6	 
Arco 7	 
Arco 8	  
Arco 9	    
Arco 10	    
Arco 11	   
Arco 12	   
Arco 13	 
Arco 14	
Arco 15	 

tra loro, nello specifico ho eseguito delle prove con il primo arco per il quale è stato sufficiente un camion a 3 assi con una portata da 15 tonnellate.

Il secondo arco analizzato è l'arco numero 9, ovvero il più pesante (come riportato nel calcolo dei pesi al capitolo 6), infine ho analizzato l'arco numero 13, in quanto ha una forma leggermente differente rispetto agli altri.

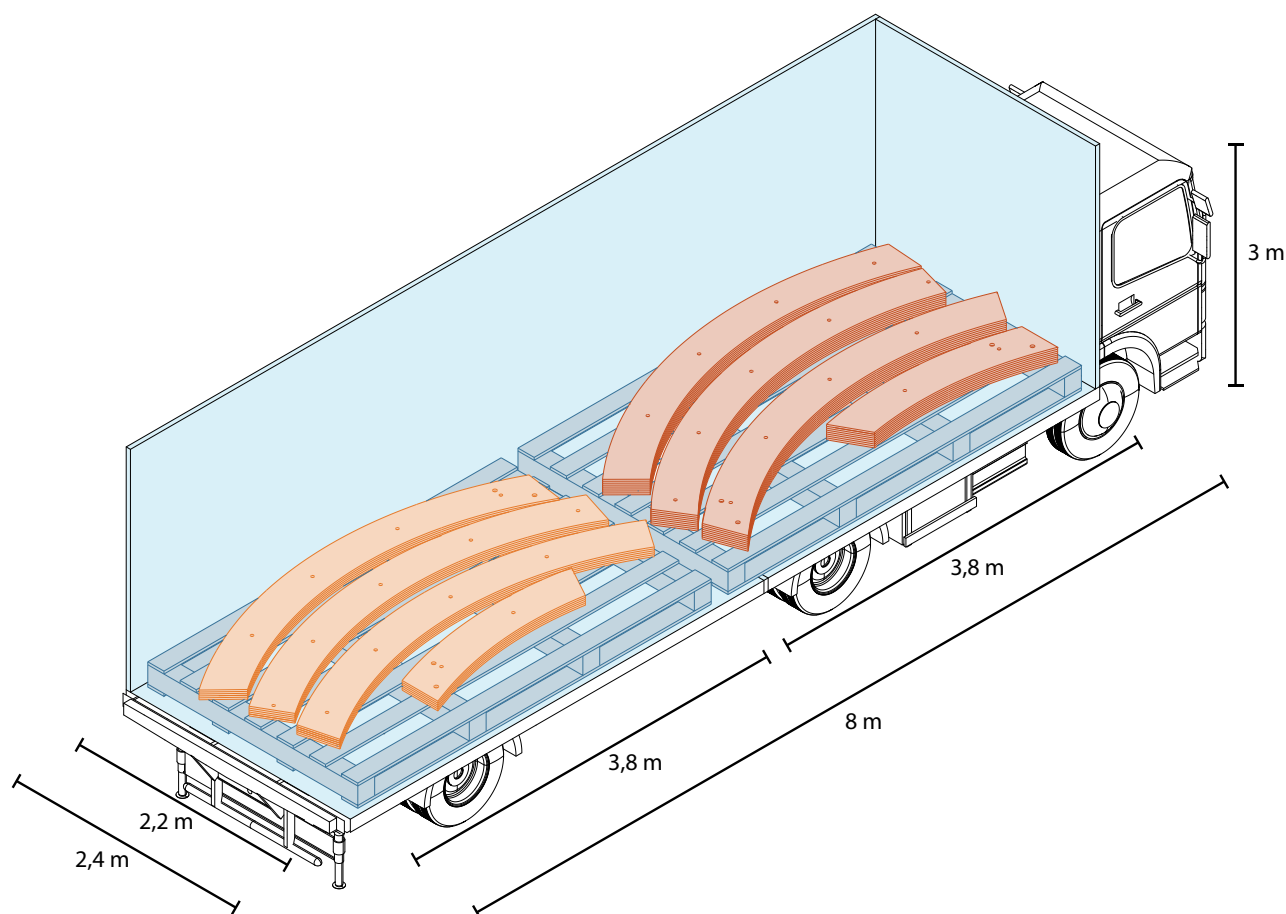
Per trasportare in modo efficace i componenti, ho posizionato alla base dei pallet rivolti verso il lato lungo del camion, in modo che una volta aperto il tendone

sarà molto facile estrarre i componenti con un muletto.

Nel caso del primo arco, in cui ho utilizzato un bilico da 3 assi, ipotizzando una lunghezza di 9 m e una larghezza di 2,5 m, ho posizionato i pezzi degli archi su due diversi pallet (388), questo per suddividere i 2 differenti strati degli archi strutturali facilmente.

Ovviamente tutti i pezzi andranno fissati con delle cinghie ai bancali, questo per evitare movimenti durante il trasporto.

Per quanto riguarda l'arco numero 9 invece la procedura è stata un pò più complessa,



[388] Camion di esempio con suddivisione in parti del primo arco strutturale suddivisi su due bancali differenti

in quanto il peso dell'arco ha richiesto l'utilizzo di più camion adibiti al trasporto. Nello specifico considerando il peso di questo arco, come indicato nella tabella precedentemente mostrata, saranno necessari ben 5 bilici tutti a 4 o 5 assi.

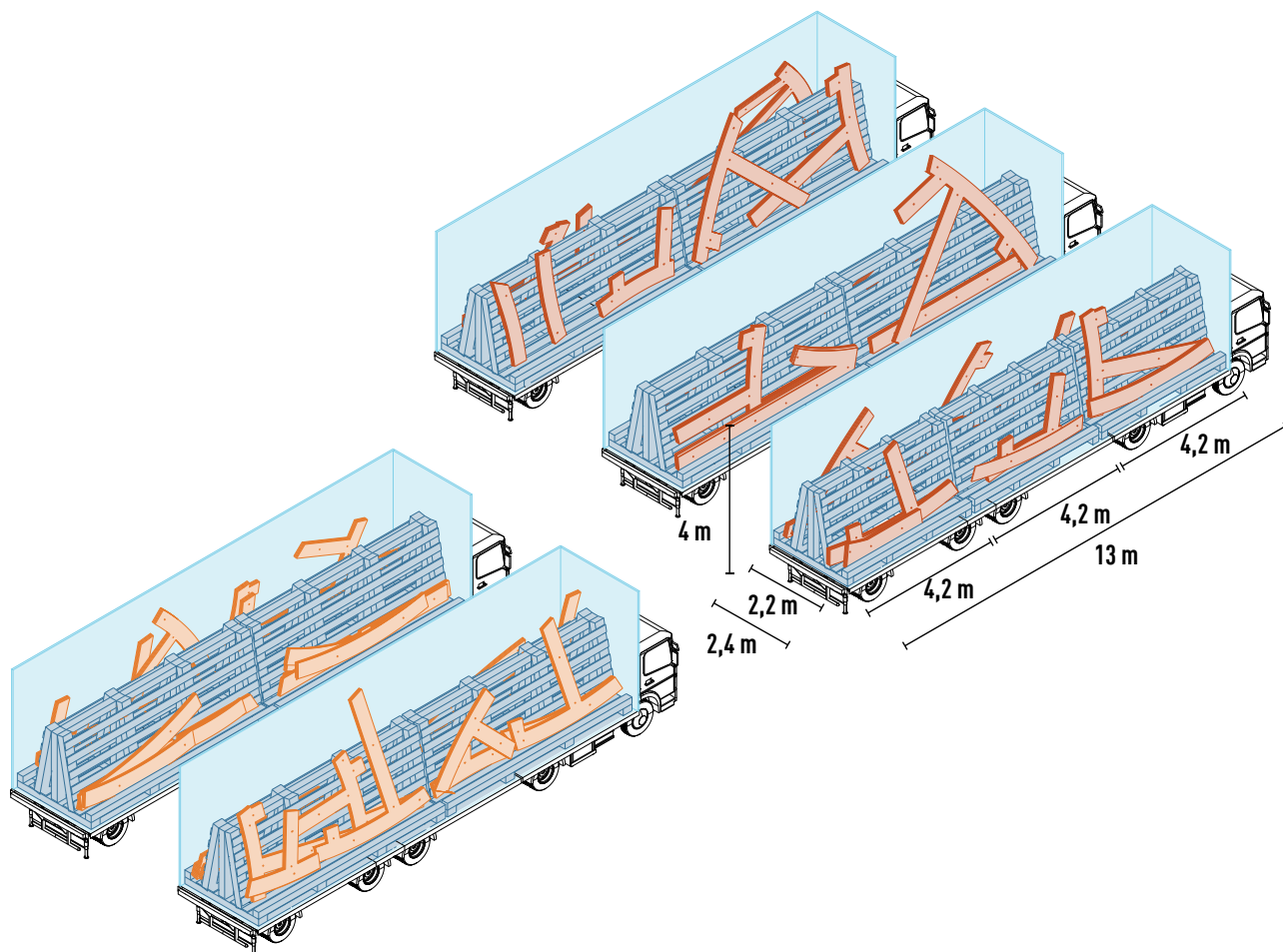
La distribuzione dei pezzi in questo caso è leggermente diversa rispetto al caso precedente; infatti, per evitare problematiche con le dimensioni dei pezzi più grandi, i quali sarebbero troppo larghi per essere sdraiati semplicemente nel camion.

Per risolvere questo problema ho utilizzato un appoggio differente, ovvero una struttura

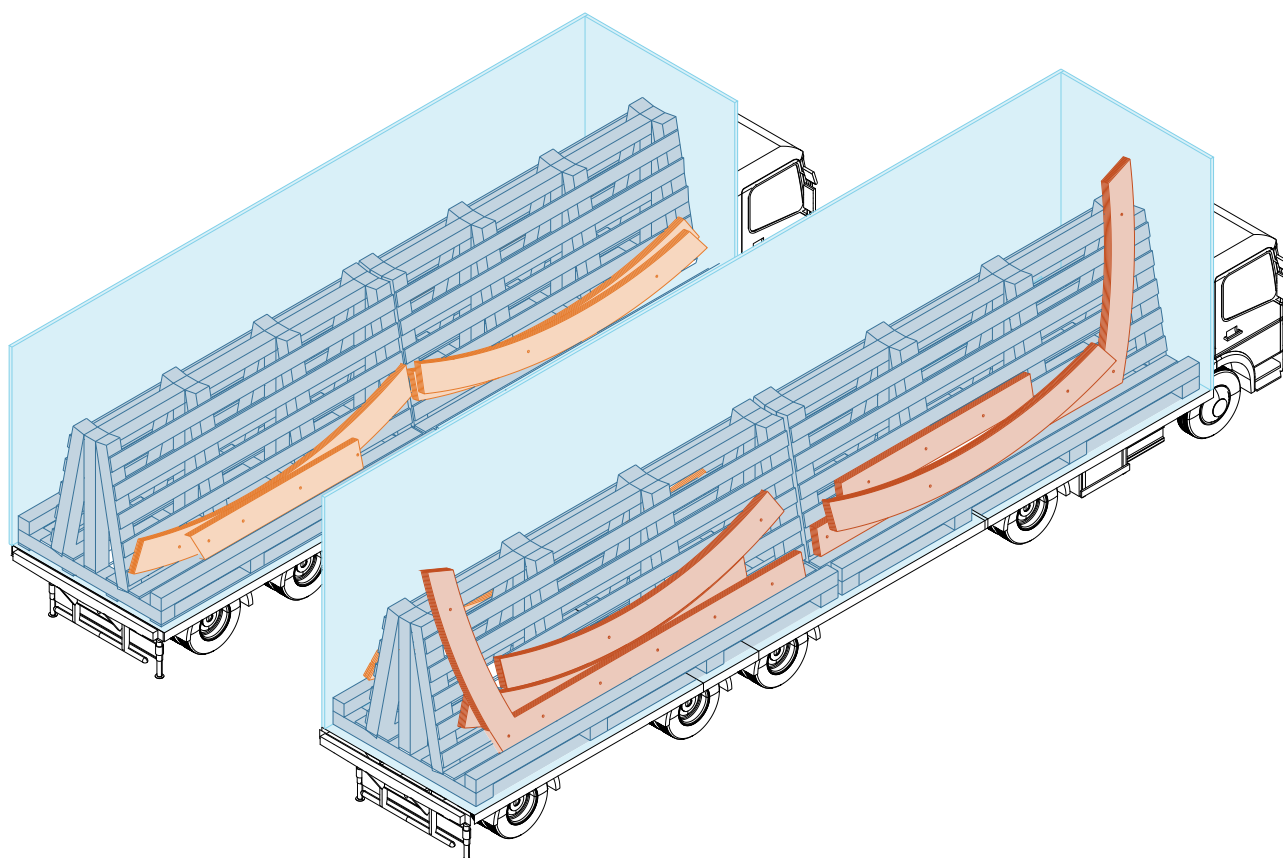
inclinata a 30° [389] su cui appoggiare i pezzi di lato, per poi essere fissati con delle cinghie.

Anche per quanto riguarda il tredicesimo arco, per il quale saranno necessari 2 camion, uno da 4 o 5 assi, e il secondo da 3 assi, sarà necessario utilizzare il medesimo sistema di bancali inclinati [390].

Questo metodo andrà replicato con tutti gli archi presenti nel progetto, ovviamente ogni arco richiederà una specifica suddivisione e andranno consegnati uno alla volta, in modo da depositare tutti i bancali vicini tra loro ed evitare confusione tra i pezzi di più archi.



[389] Camion di esempio con suddivisione in parti del nono arco strutturale suddiviso in 5 bilici a 5 assi e con bancali da 4 o 6 m inclinati a 30°



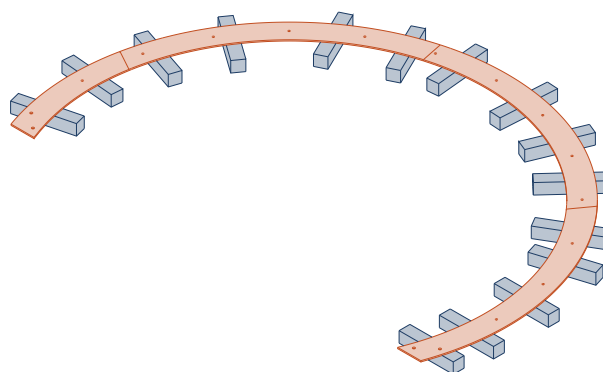
[390] Camion di esempio con suddivisione in parti del tredicesimo arco strutturale suddiviso in un bilico a 5 assi e un bilico a 3 assi, disposti su dei bancali inclinati a 30°.

8.2.1.2 - Assemblaggio

Per assemblare gli archi in opera ho suddiviso l'operazione in due fasi, ovvero una prima fase di assemblaggio dei singoli archi e una seconda in cui si congiunge l'arco alle fondazioni.

Per quanto riguarda la prima fase, sarà necessario appoggiare il primo strato degli archi su degli assi di legno [391], o comunque su dei sostegni momentanei, a lato della posizione di progetto, ovviamente per spostare le parti sarà necessario l'aiuto di un muletto.

Una volta fatto questo sarà necessario inserire in ognuno dei fori un bullone, il quale verrà successivamente fissato con dado e rondelle [392].

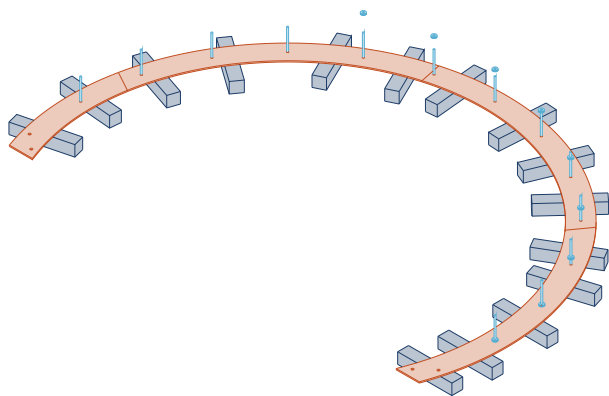


[391] Primo strato dell'arco strutturale posizionato su dei sostegni in legno provvisori

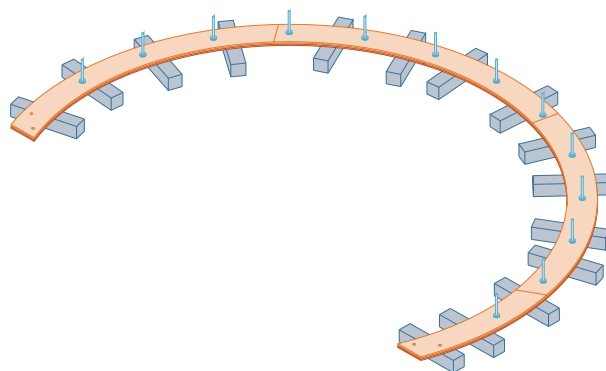
Una volta fissati tutti i bulloni sarà il momento di posizionare il secondo strato degli archi sopra il primo, in questo modo una volta fissato anch'esso con dado e rondelle sarà perfettamente incastrato (393).

Questa operazione andrà ripetuta per tutti gli strati, fino ad ottenere l'arco completo, e una volta concluso questa operazione potranno essere fissati gli elementi di base per il fissaggio degli archi alle fondazioni. Per quanto riguarda la seconda fase sarà necessario legare l'arco ormai completo ad una gru attraverso delle catene che ne consentiranno il sollevamento (394).

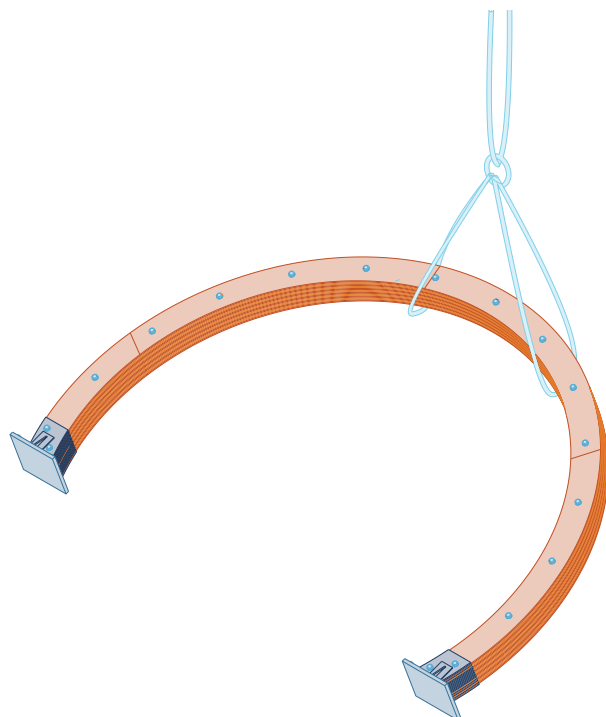
A questo punto sarà molto semplice posizionare l'arco grazie all'aiuto di una gru che porterà in posizione corretta l'arco, per poi essere avvitato alle fondamenta. Ovviamente nel caso degli archi più pesanti come quelli più centrali la seconda parte di questa modalità potrebbe non essere efficace, per via del peso eccessivo per le gru. Per risolvere questa problematica sarà sufficiente rialzare i primi due strati una volta assemblati e completare l'assemblaggio dei successivi strati verticalmente, questo ovviamente risulterà un pò più complicato. Una volta posizionati i primi tre archi sarà possibile iniziare a posizionare anche le prime travi principali, le cui modalità di trasporto e assemblaggio saranno illustrate nel prossimo paragrafo.



(392) Primo strato dell'arco strutturale posizionato su dei sostegni in legno con l'aggiunta di bulloni, dadi e rondelle.



(393) Primo e secondo strato dell'arco strutturale posizionati su dei sostegni in legno con l'aggiunta di bulloni, dadi e rondelle.



(394) Arco al completo che viene sollevato da una gru per essere posizionato in opera.

8.2.2 - Travi principali

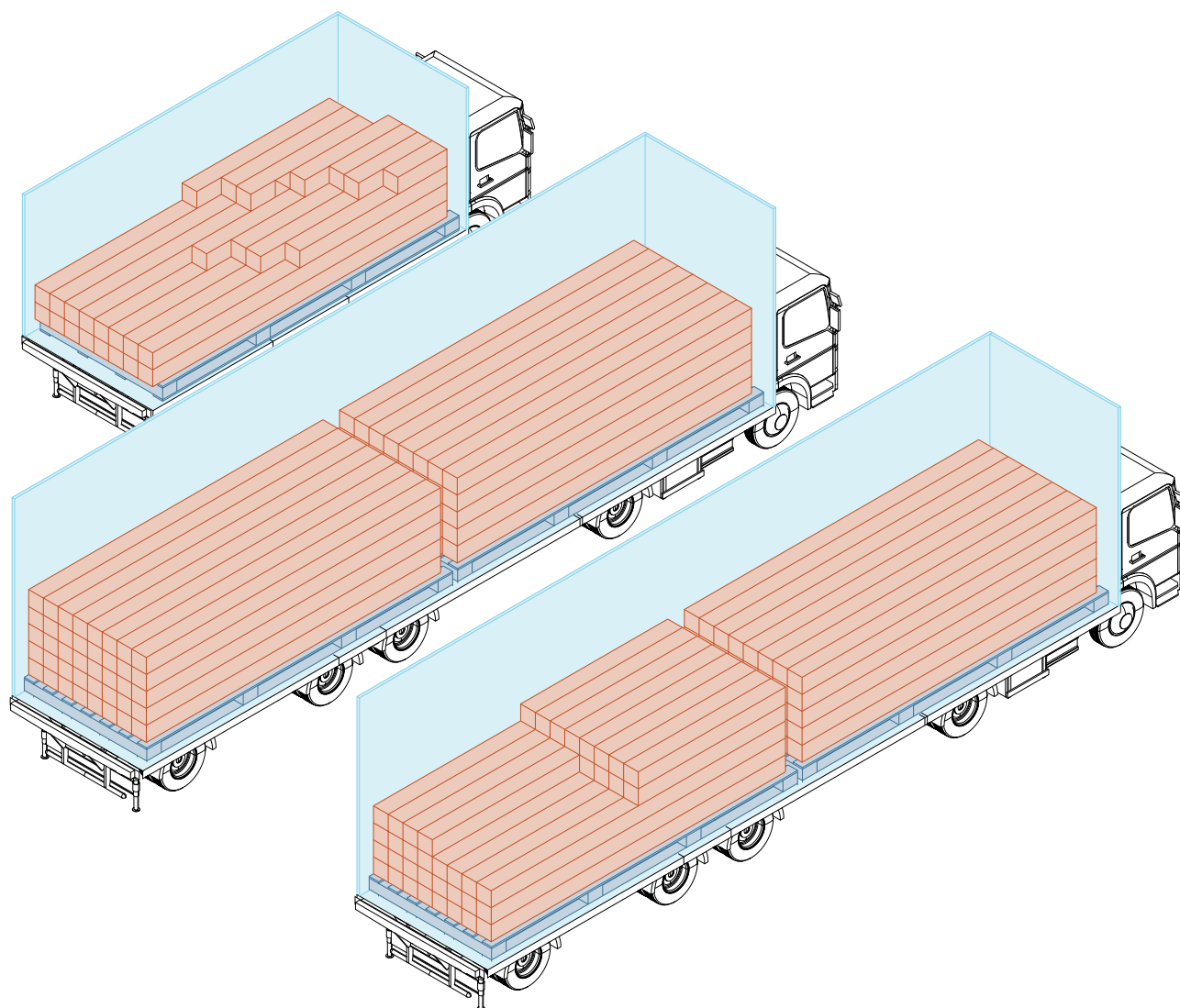
8.2.2.1 - Trasporto

Per quanto riguarda il trasporto delle travi, il procedimento è decisamente più semplice; infatti, la forma a parallelepipedo delle travi favorisce il posizionamento delle travi su dei bancali piani molto semplici. Inoltre, anche il peso è decisamente inferiore rispetto a quello degli archi, come stabilito grazie ai calcoli realizzati nel sesto capitolo.

Infatti, il peso totale delle travi di 52000 Kg

consentirà il trasporto utilizzando solo 2 bilici a 5 assi e un camion a 2 assi (395).

Sui bancali ovviamente andranno caricate le travi in modo comodo per l'assemblaggio, ovvero collocando i pezzi da utilizzare prima al di sopra di quelli da utilizzare successivamente, questo in modo che una volta in cantiere i bancali siano facilmente usufruibili dagli operatori che si occuperanno dell'assemblaggio.



(395) Travi principali suddivise sui 3 camion (2 a 5 assi e uno a 2 assi) necessari per il trasporto.

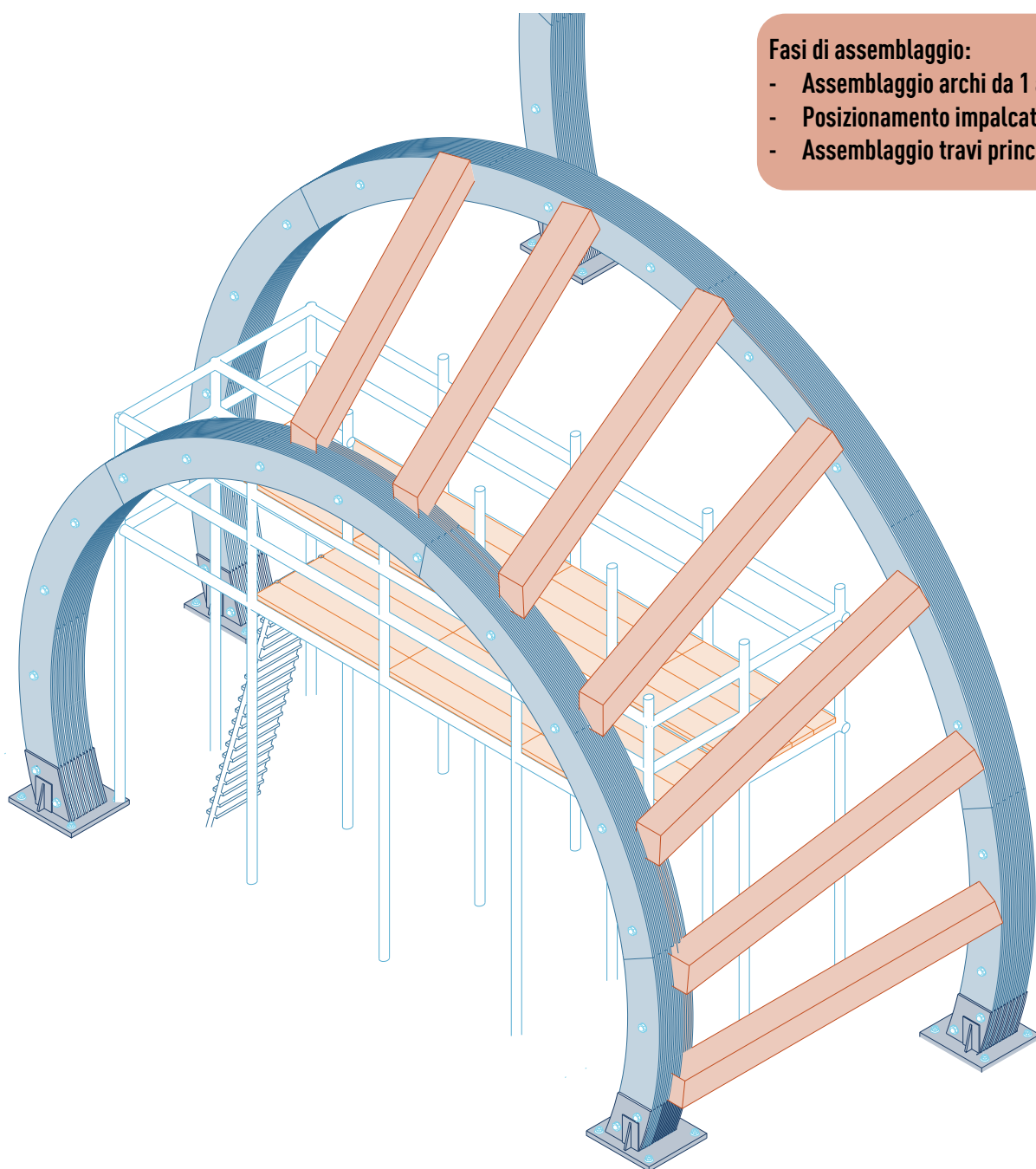
8.2.2.2 - Assemblaggio

Per assemblare le travi sarà ovviamente necessario attendere il completamento dei primi 3 archi strutturali, a questo punto sarà possibile inserire le travi con i relativi incastri al loro posto seguendo le istruzioni di assemblaggio.

Per posizionare le travi sarà ovviamente necessario utilizzare una gru e posizionare delle impalcature in prossimità degli

archi, le quali saranno necessarie anche per il posizionamento successivo di travi secondarie e dei pannelli (396).

Le impalcature ovviamente andranno assicurate agli archi strutturali per garantire la tenuta in caso di movimenti bruschi o folate di vento particolarmente forti.



Fasi di assemblaggio:

- Assemblaggio archi da 1 a 3
- Posizionamento impalcatura
- Assemblaggio travi principali

(396) Assemblaggio delle travi principali in cantiere

8.2.3 - Travi secondarie

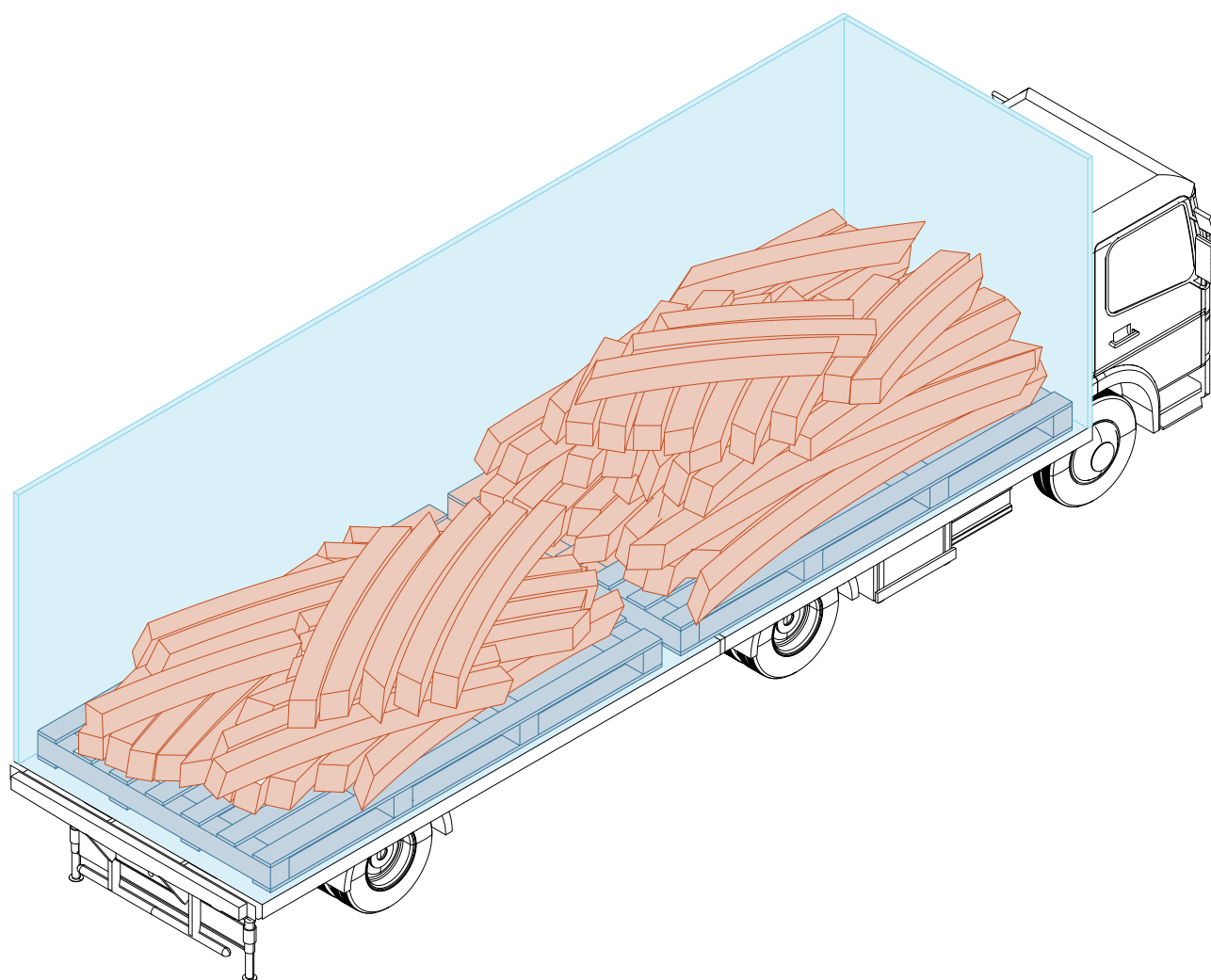
8.2.3.1 - Trasporto

Il trasporto delle travi secondarie sarà leggermente più complesso per via della forma delle travi, la quale richiede ovviamente una maggior attenzione nella distribuzione dei pezzi.

Infatti, la forma inclinata renderà necessario porre un pò di attenzione per la disposizione, nello specifico ho scelto di disporre ogni gruppo di travi sullo stesso

bancale, per poi sovrapporlo con il secondo gruppo di travi in senso opposto [397].

Le travi verranno ordinate sui bancali, suddivisi su 3 camion a 3 assi; infatti, sebbene fosse sufficiente un singolo autocarro da 3 assi per il peso delle travi, il volume che un singolo camion sarebbe in grado di trasportare non sarebbe stato sufficiente.



[397] Travi secondarie posizionate su un camion a 3 assi su due bancali.

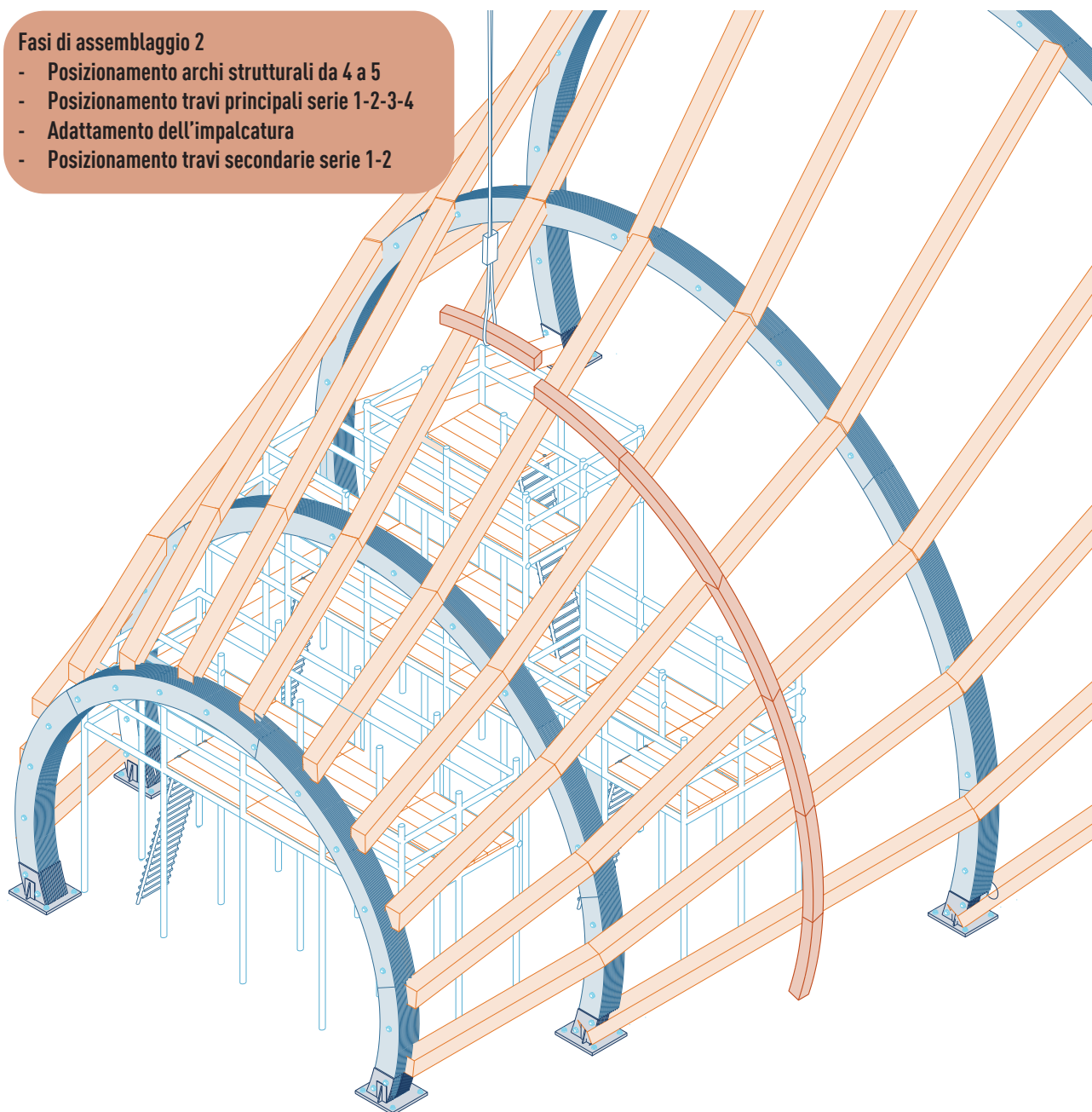
8.2.3.2 - Assemblaggio

Anche l'assemblaggio delle travi secondarie ovviamente dovrà attendere quello degli archi e delle travi principali, utilizzando le impalcature e le gru per posizionare nel posto corretto ogni singola trave (398).

A questo punto sarà fondamentale prestare la massima attenzione al corretto posizionamento delle travi, in modo da evitare problemi con l'assemblaggio dei pannelli.

Fasi di assemblaggio 2

- Posizionamento archi strutturali da 4 a 5
- Posizionamento travi principali serie 1-2-3-4
- Adattamento dell'impalcatura
- Posizionamento travi secondarie serie 1-2



(398) Assemblaggio del primo gruppo di travi secondarie in cantiere.

8.2.4 - Pannelli di copertura

8.2.4.1 - Trasporto

I pannelli di copertura, non essendo elementi piani e avendo anzi forme abbastanza complesse hanno necessitato di casse per il trasporto, che limitassero al minimo i movimenti all'interno dei bancali. Quindi una volta posizionati i bancali, abbiamo posizionato sopra di essi le casse vuote dove abbiamo appoggiato all'interno i pannelli di dimensioni simili tra loro, come ad esempio quelli appartenenti alle stesse righe.

Questo perché le dimensioni simili aiuteranno ad avere una maggiore stabilità tra i pannelli e a ridurre quindi i movimenti durante il trasporto.

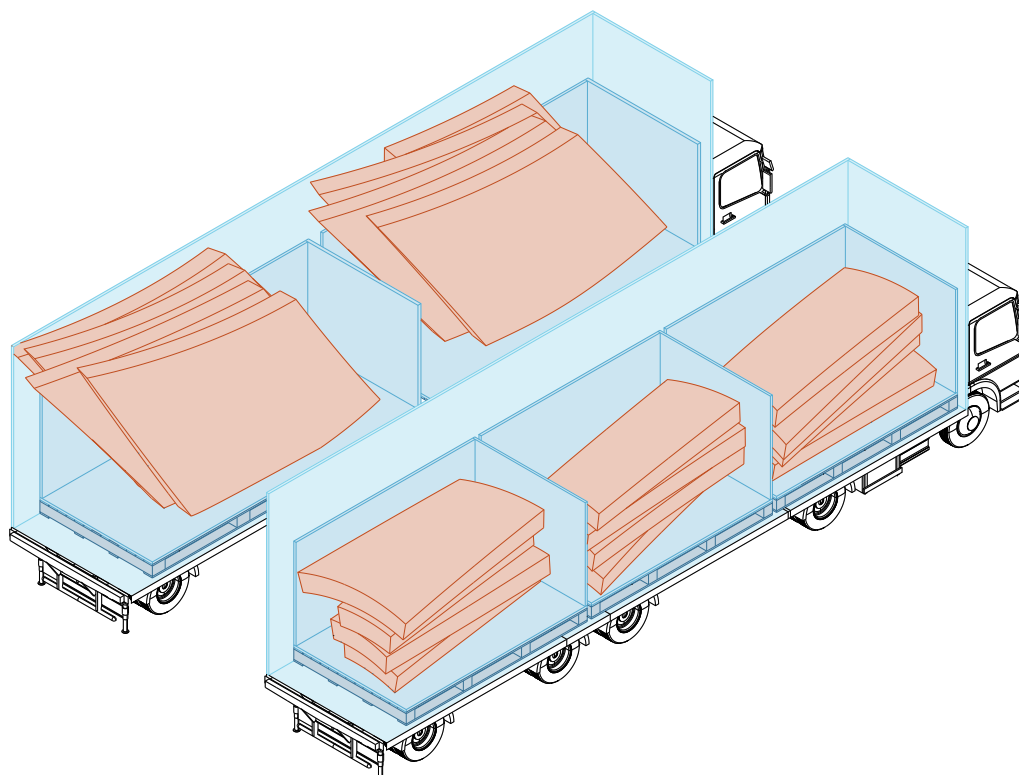
Infine, durante il trasporto verrà posizionato uno strato di materiale imballante, per evitare che i pannelli possano graffiarsi

strusciando tra loro.

Inoltre, per quanto riguarda i pannelli con una larghezza maggiore ai 3 m sarà necessario caricarli nelle scatole in verticale, in modo da evitare problemi con la larghezza del camion (399).

Anche in questo caso, vista la quantità molto elevata di pannelli e il conseguente peso decisamente elevato sono stati necessari ben 22 bilici a 4 o 5 assi e almeno un altro a 3 assi.

Tuttavia, questo calcolo essendo basato solo sulla capacità di portata dei mezzi in termini di peso potrebbe anche non essere sufficiente per motivi di spazio, perciò potrebbe essere necessario utilizzare qualche camion in più rispetto a quelli indicati.



(399) Esempio di trasporto dei pannelli sia di piccole dimensioni sdraiati nelle apposite casse, sia appoggiati verticalmente nel caso dei pannelli di larghezza superiore ai 3 m.

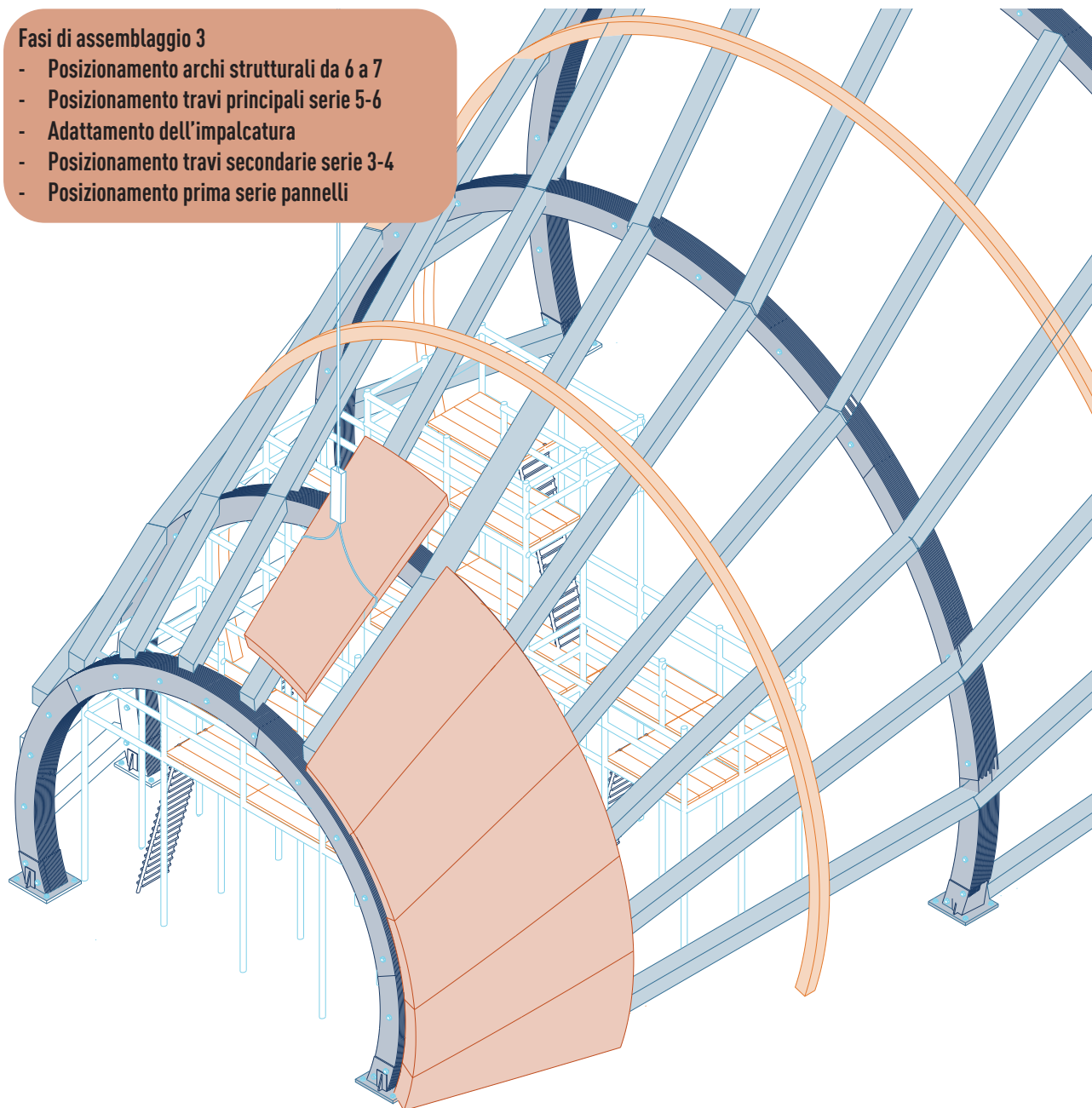
8.2.4.2 - Assemblaggio

Ovviamente anche in questo caso l'assemblaggio dei pannelli dovrà attendere il completamento dell'assemblaggio delle prime tre travi secondarie, solo a questo punto sarà infatti possibile procedere con l'inserimento dei primi pannelli (400).

Anche in questo caso verranno sfruttate sia le gru che i ponteggi precedentemente montati, per consentire agli operai di posizionare i pannelli con precisione e in totale sicurezza.

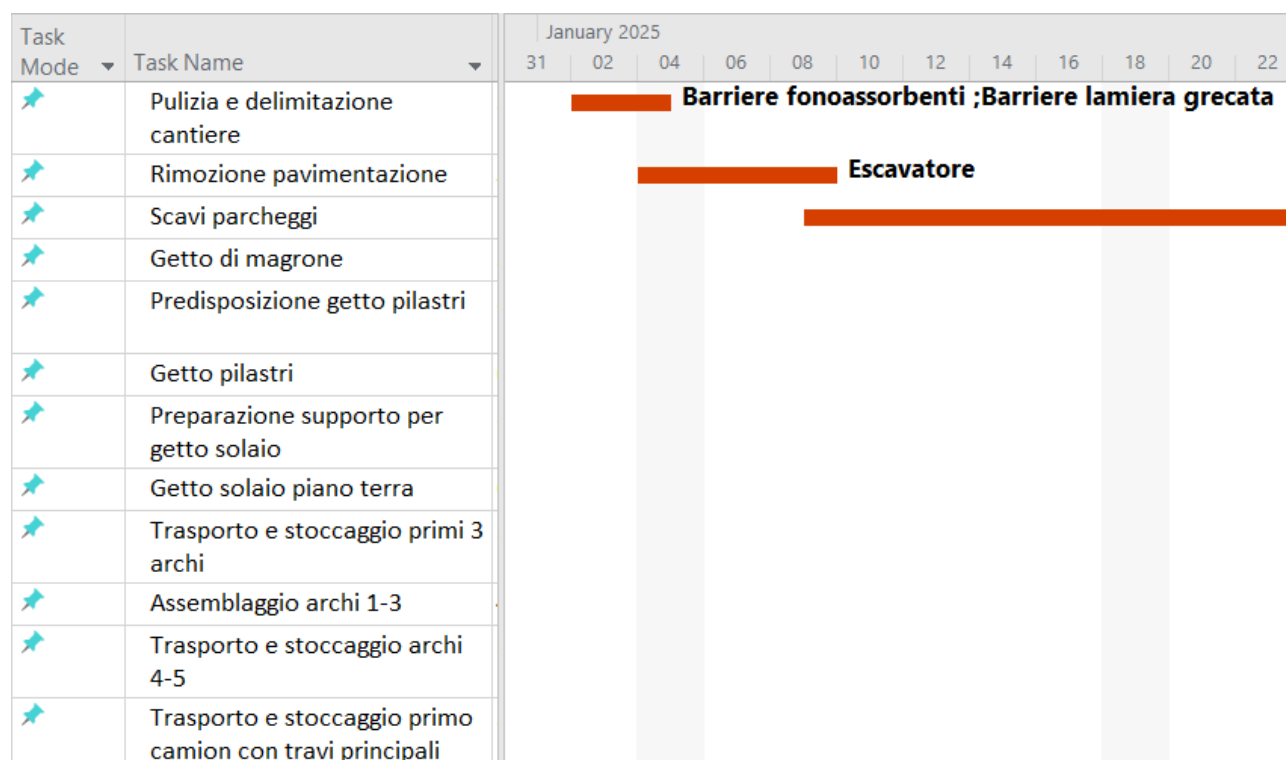
Fasi di assemblaggio 3

- Posizionamento archi strutturali da 6 a 7
- Posizionamento travi principali serie 5-6
- Adattamento dell'impalcatura
- Posizionamento travi secondarie serie 3-4
- Posizionamento prima serie pannelli



(400) Assemblaggio pannelli in cantiere

8.3 - Cronoprogramma



(401 A) Prima parte del cronoprogramma con inizio lavori impostato per il 2/01/2025

Una volta decisi i metodi di trasporto delle parti dell'edificio e i metodi di montaggio in cantiere sarà possibile ipotizzare dei tempi e di conseguenza elaborare il cronoprogramma di cantiere.

Ho deciso di impostare il cronoprogramma in modo molto semplice, partendo dalle fasi di allestimento del cantiere.

Il cronoprogramma avrà il nome delle attività disposte sull'asse Y mentre il tempo sull'asse X, nella parte alta del cronoprogramma ho inserito le date ipotizzate di svolgimento dei lavori.

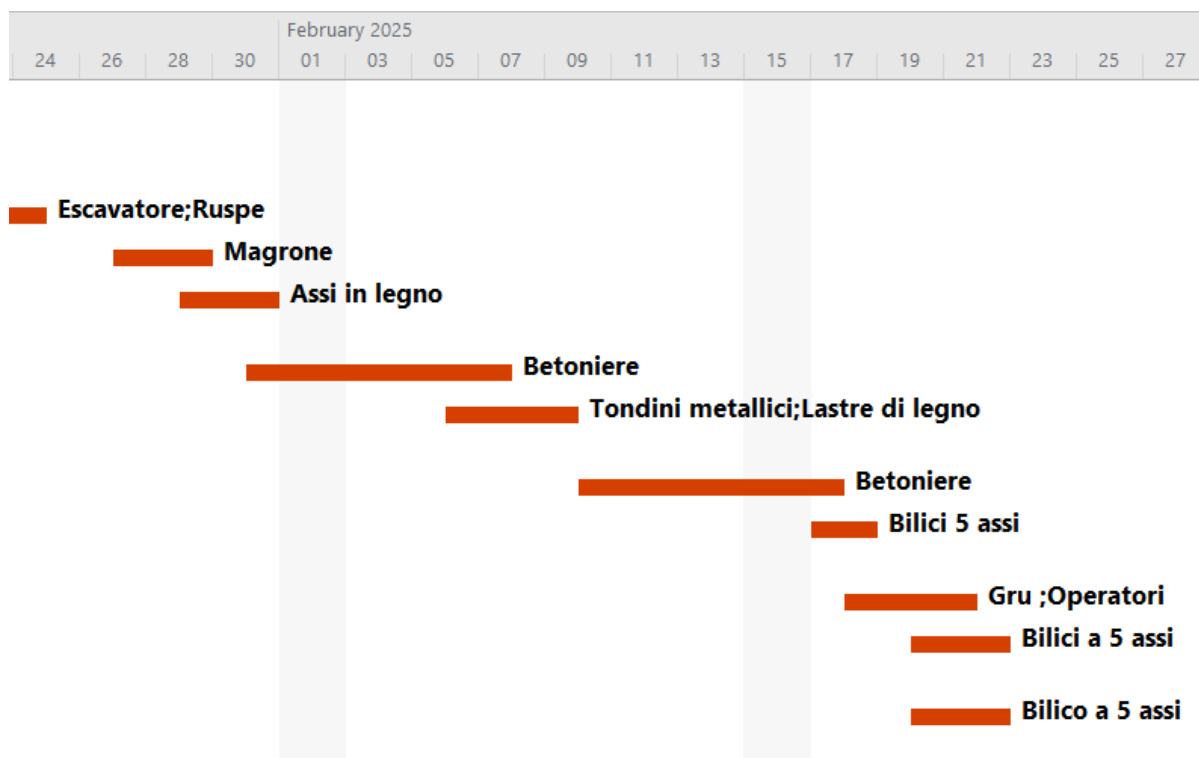
Come giorno di partenza del cantiere ho ipotizzato il primo Gennaio 2025.

Per realizzare il cronoprogramma ho deciso di utilizzare il programma Microsoft project, che consente di gestire tutte le fasi di lavorazione evitando errori.

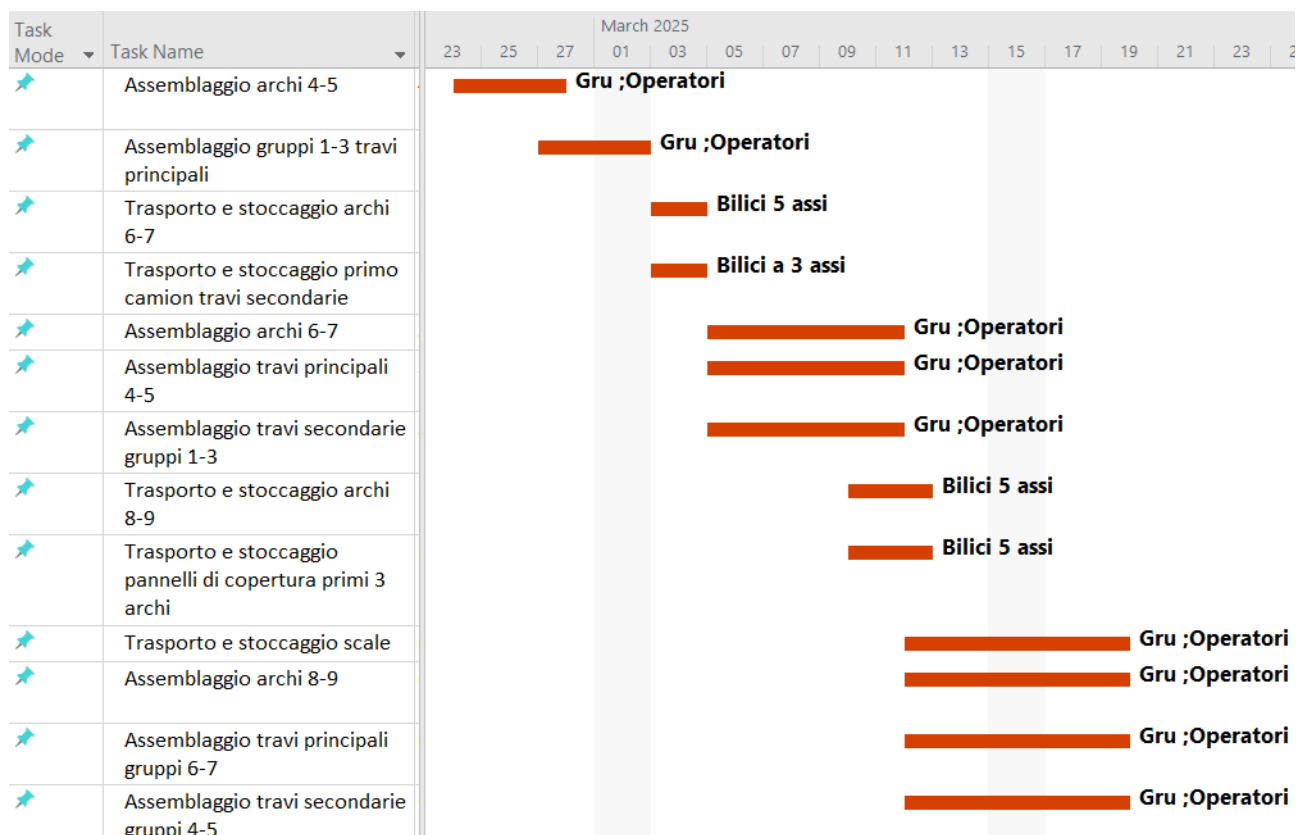
In questa prima parte del cronoprogramma (401 A-B) sono state inserite le operazioni di allestimento del cantiere, di scavo e di getto delle fondazioni e dei pilastri.

Inoltre, è stato anche disposto il getto del solaio del piano terra, per consentire l'assemblaggio delle strutture realizzate poste al di sopra di esso.

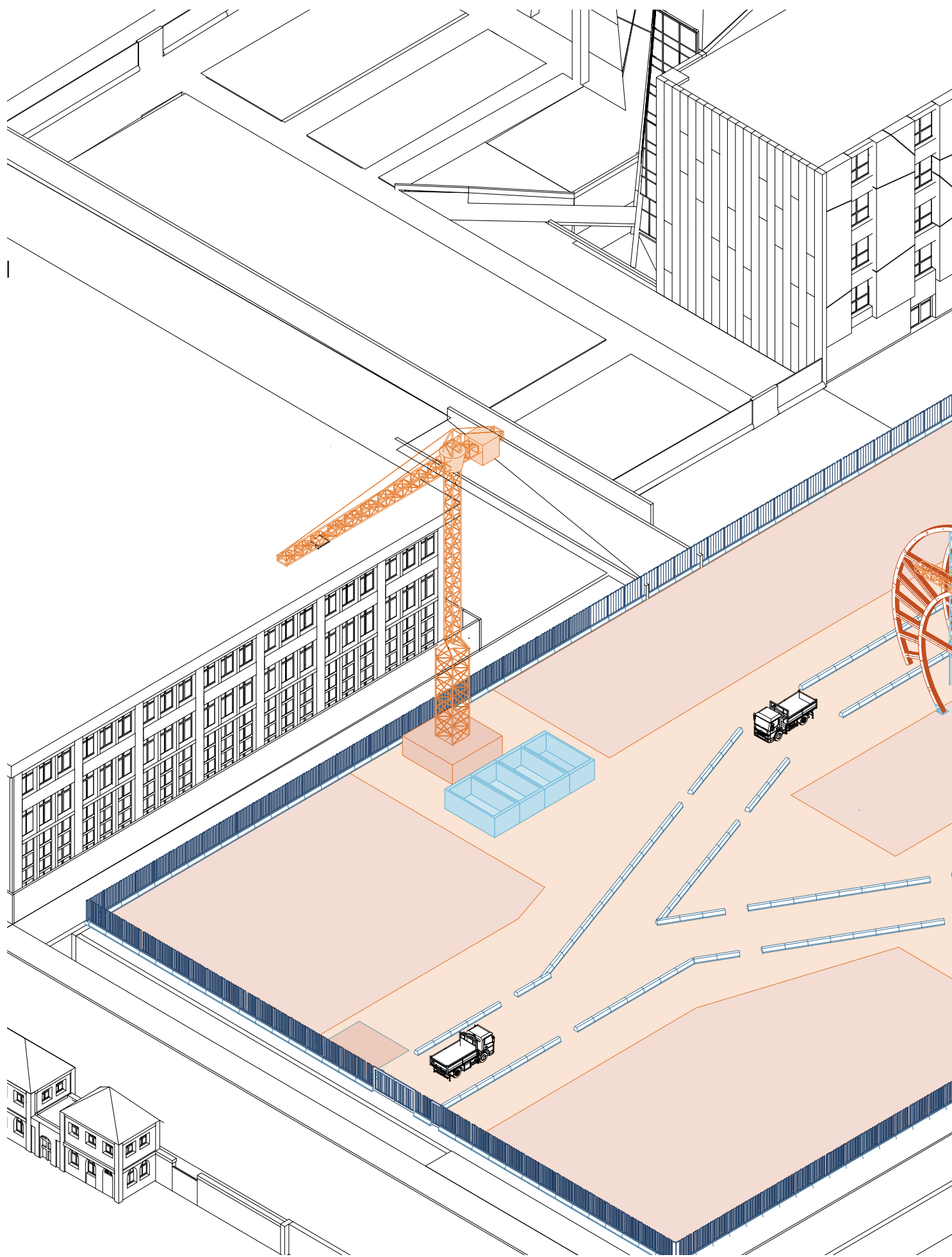
Le ultime lavorazioni inserite riguardano il trasporto delle prime parti dell'auditorium in cantiere, ho scelto di suddividere le consegne in modo da evitare un'eccessiva presenza di materiale in cantiere che potrebbe rendere difficile lo svolgimento dei lavori. Nella seconda parte del cronoprogramma (402) ho iniziato a suddividere le fasi di assemblaggio dell'auditorium, ipotizzando inoltre una disposizione del cantiere (403).

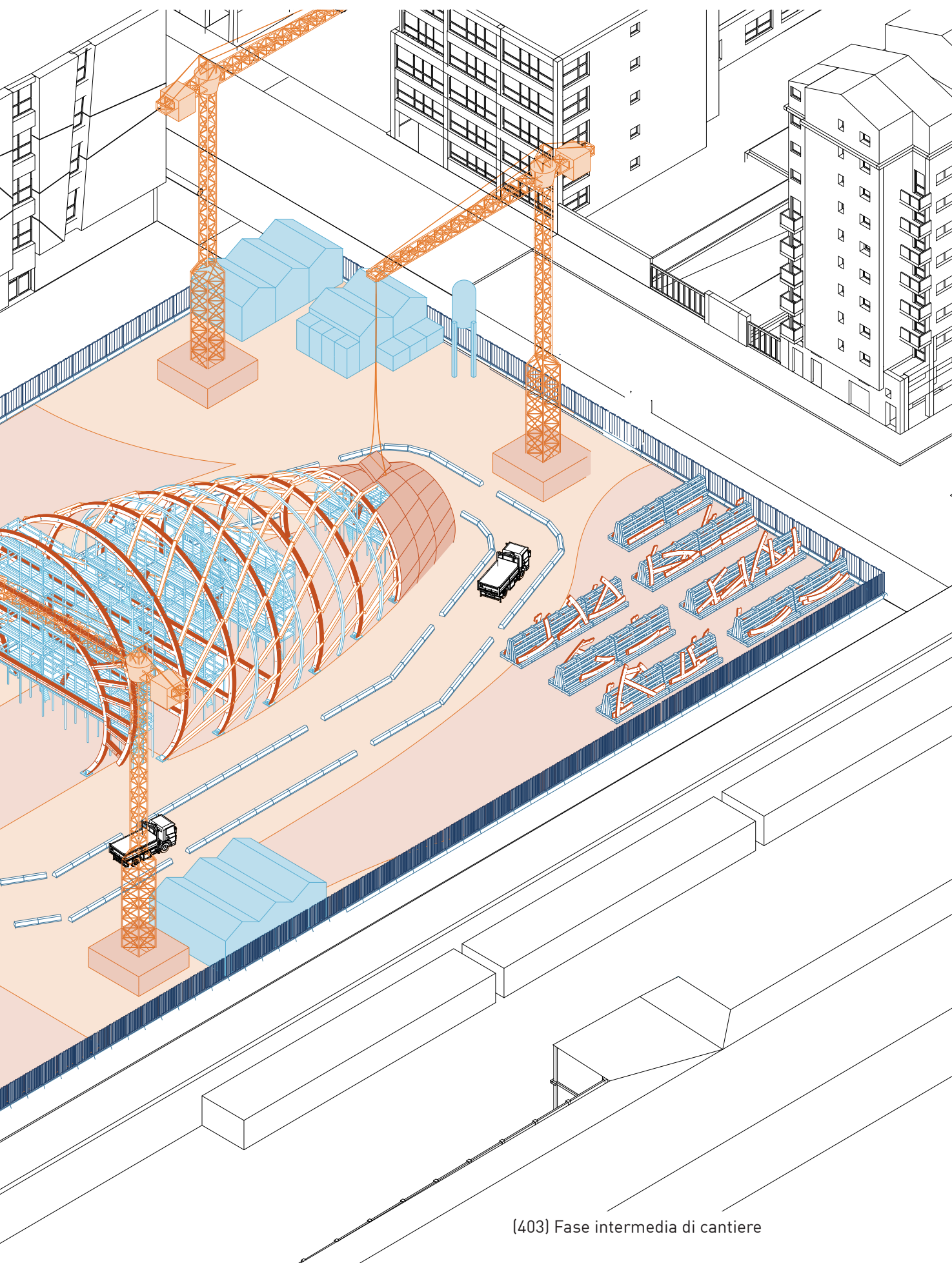


(401 B) Prima parte del cronoprogramma con inizio lavori impostato per il 2/01/2025

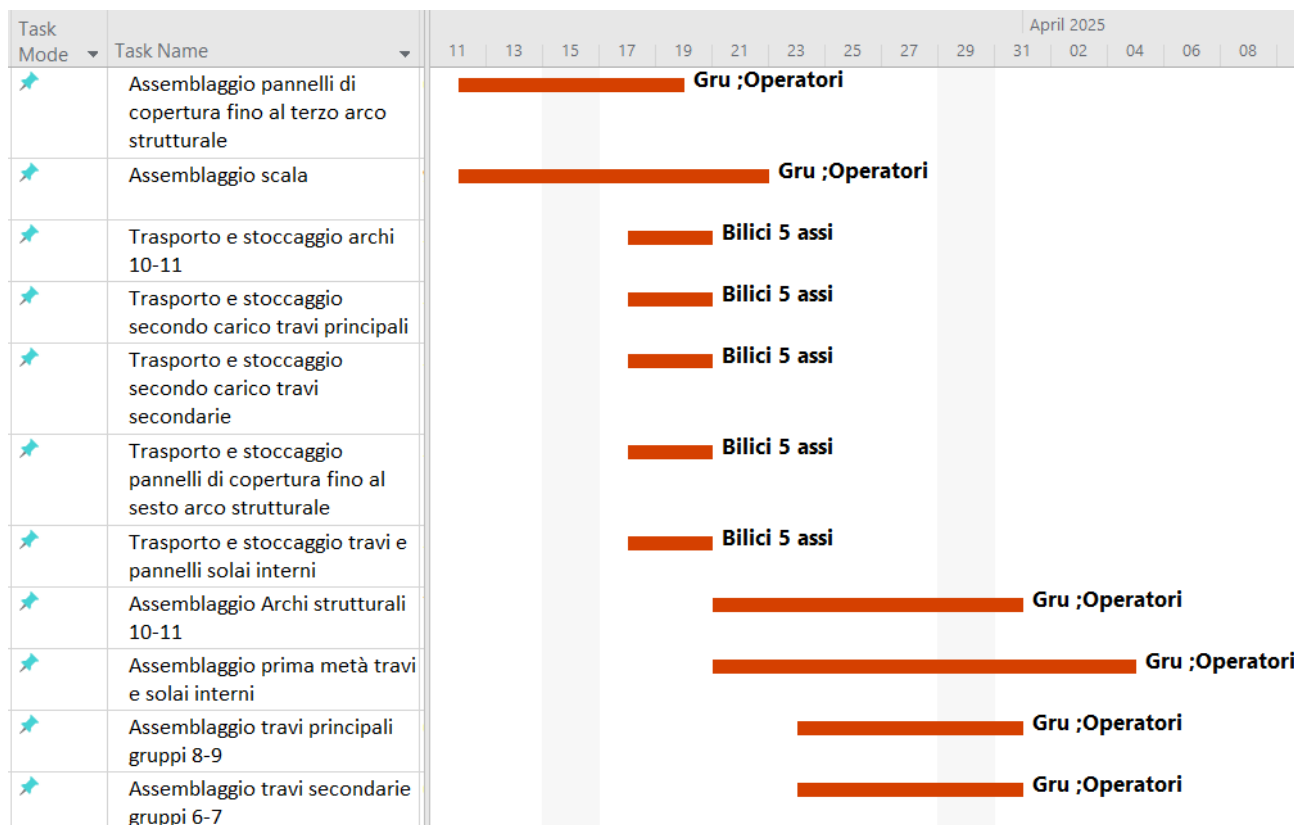


(402) Seconda parte del cronoprogramma in cui abbiamo iniziato ad imbastire l'assemblaggio delle prime parti dell'auditorium





(403) Fase intermedia di cantiere



(404) Terza parte del cronoprogramma in cui abbiamo portato avanti le parti

Nelle ultime fasi di assemblaggio dell'auditorium (404) ho considerato dei tempi di assemblaggio leggermente più lunghi, questo perchè il montaggio delle impalcature, aumentando di dimensioni richiederà ovviamente più tempo.

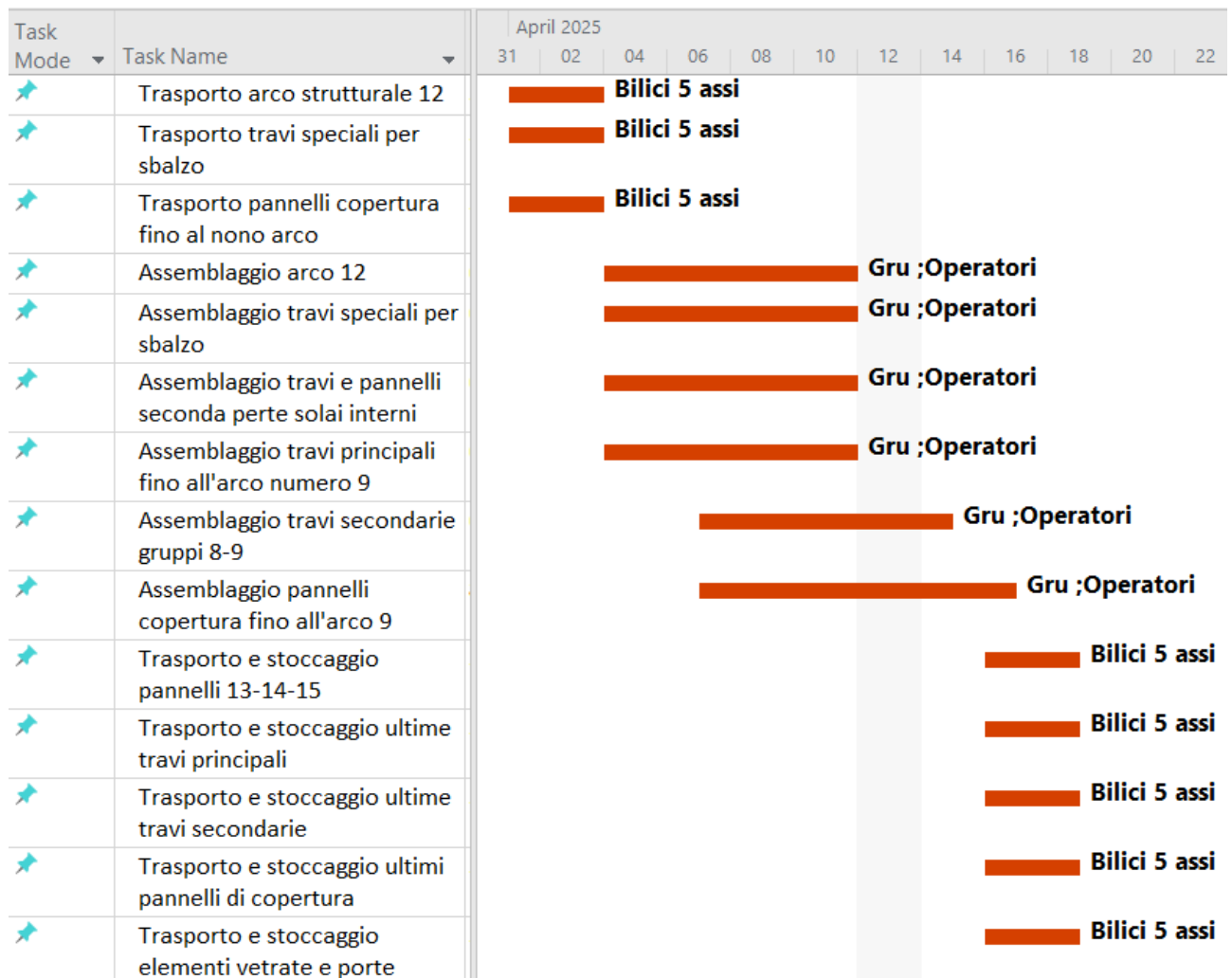
Questo discorso ovviamente vale anche per tutti i componenti come, ad esempio, i pannelli che aumentando di dimensioni necessiteranno di un maggior numero di giunti per essere posizionati correttamente. Infine, nelle ultime fasi sono stati inclusi anche degli elementi accessori e le finestre necessarie per il funzionamento della struttura (405).

Con queste fasi giungiamo al termine della realizzazione dell'auditorium (406), non ho approfondito le restanti parti del cantiere per via del fatto che non avendo progettato gli interni non sarebbe possibile farlo.

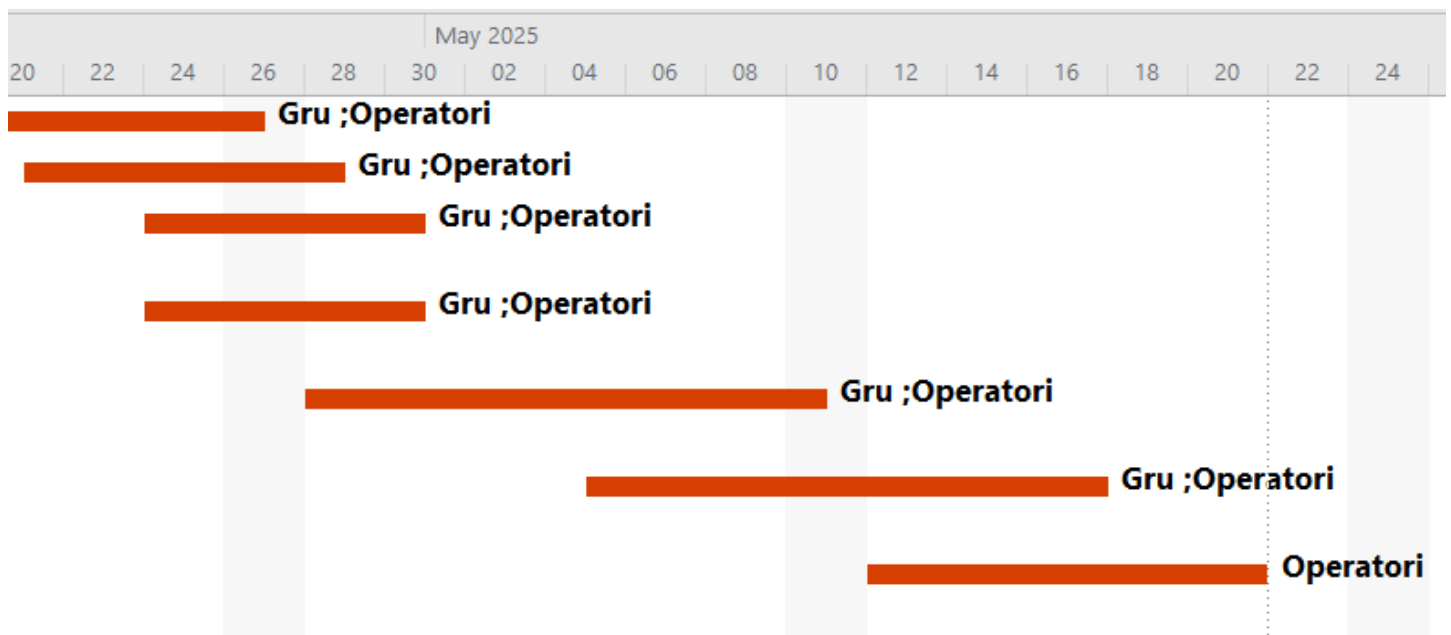
progetto.

Questo cronoprogramma ci ha consentito di dare delle tempistiche realistiche riguardo alla realizzazione in opera dell'auditorium.

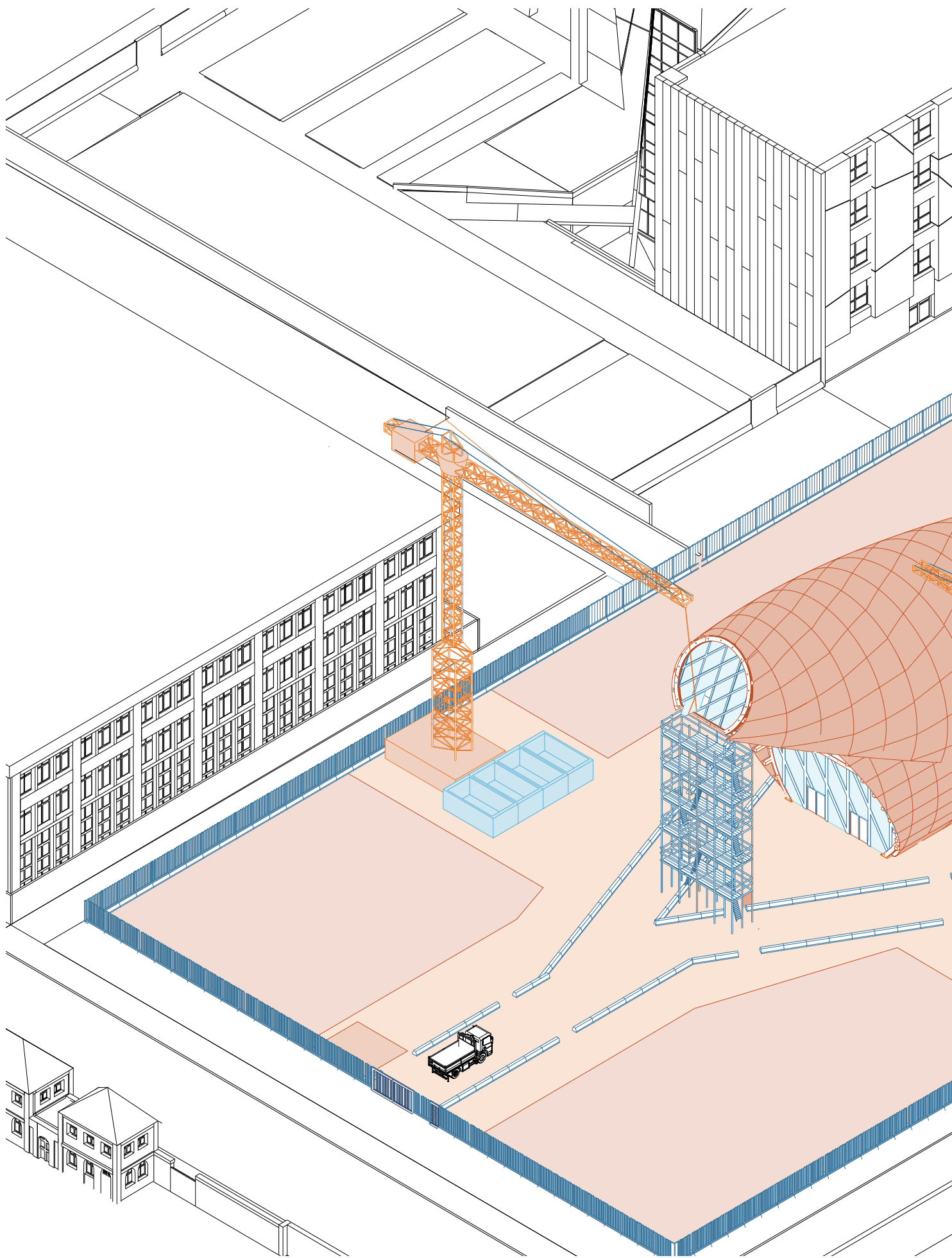
Task Mode	Task Name	16	18
★	Assemblaggio archi 13-14-15		
★	Assemblaggio travi principali		
★	Assemblaggio ultime travi secondarie		
★	Assemblaggio ultime travi secondarie		
★	Assemblaggio ultimi pannelli di copertura		
★	Assemblaggio vetrate e porte d'ingresso		
★	Assemblaggio ultimi elementi di finitura		

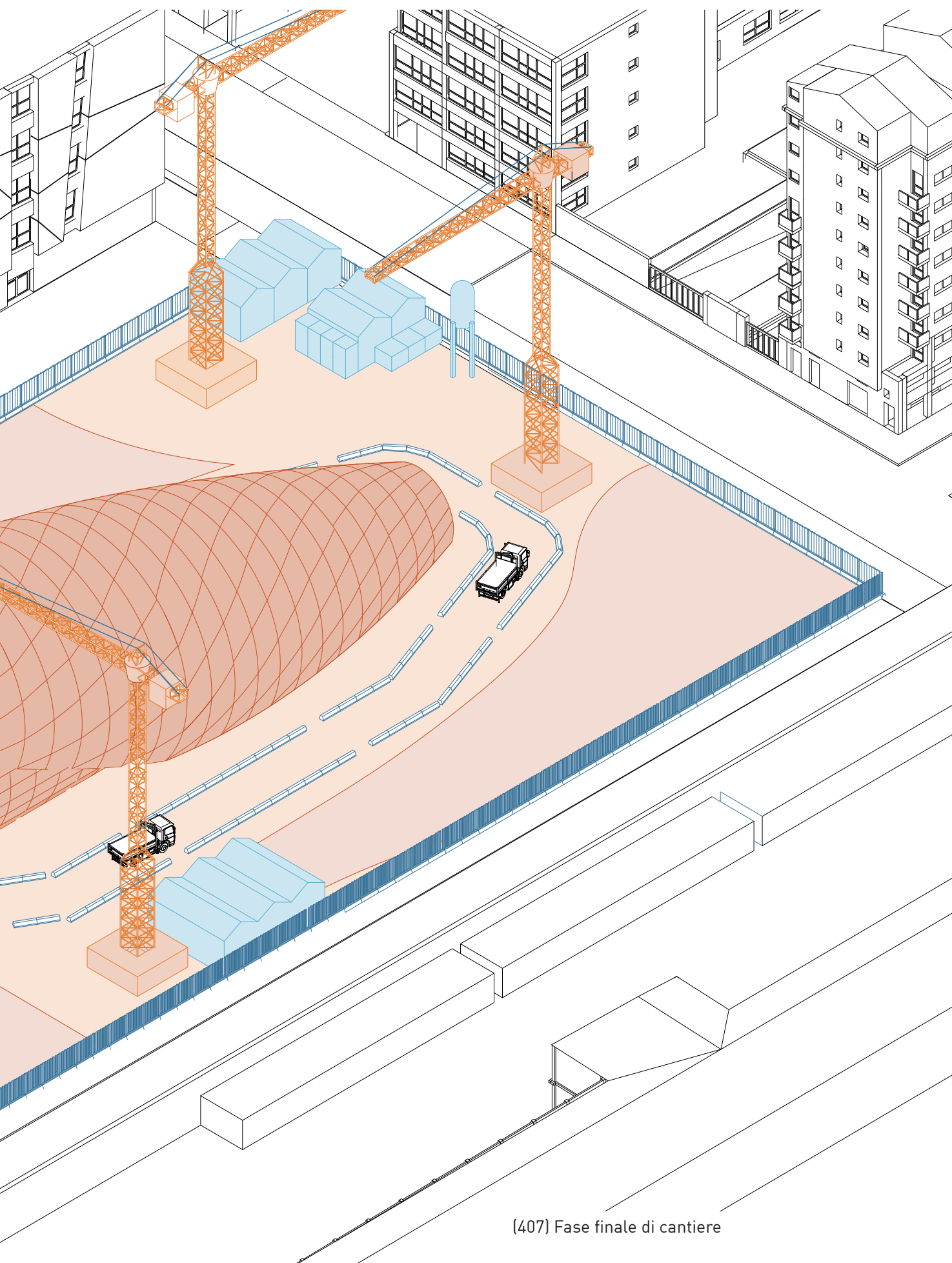


(405) Quarta parte del cronoprogramma in cui abbiamo analizzato la seconda fase di assemblaggio dell'auditorium



(406) Quinta parte del cronoprogramma in cui abbiamo analizzato le ultime operazioni per il completamento dell'auditorium





[407] Fase finale di cantiere

Da questo cronoprogramma risultano necessari circa cinque mesi per concludere l'assemblaggio dell'auditorium, se non si considera il tempo necessario per predisposizione dell'area di cantiere il tempo necessario scende a tre mesi e mezzo.

Ovviamente questa tempistica è possibile grazie al fatto che i pezzi sono già pronti una volta arrivati in cantiere, per cui le procedure necessarie in sono molto più rapide rispetto ad un cantiere classico; infatti, sono sufficienti pochi operatori per posizionare tutti i pezzi correttamente e

avvitarli.

Questo è proprio uno dei punti di forza della metodologia DfMA, infatti portando a termine il lavoro di cantiere in poco tempo sarà possibile completare le lavorazioni con un'efficacia di cantiere molto più elevata.

Un altro vantaggio di questo cantiere è la possibilità di avere un livello di sicurezza molto più elevato; infatti, non effettuare le lavorazioni in cantiere ma in un'officina con macchinari a controllo numerico rende tutte le operazioni molto più sicure.

Fonti

Elenco immagini con fonti complete

(375) Foto area di progetto realizzata il giorno 29/07/2024 durante sopralluogo.

(376) Schematizzazione rimozione del terreno per realizzazione parcheggio interrato (Fonte: elaborato di progetto).

(377) Posizionamento delle barriere fonoassorbenti ai margini del cantiere (Fonte: elaborato di progetto).

(378) Posizionamento delle barriere fonoassorbenti ai margini del cantiere (Fonte: elaborato di progetto).

(379) Esempio di barriera fonoassorbente (Fonte: CIR-ambiente, Pannelli modulari per barriere antirumore da cantiere)

(380) Esempio barriera in lamiera grecata (Fonte: Cementisolai.it, New Jersey Centrale H. 80)

(381) Posizionamento ingresso in cantiere al centro del lato corto alla base della recinzione (Fonte: elaborato di progetto).

(382) Ingresso di cantiere con percorsi separati da new jersey (Fonte: elaborato di progetto).

(383) Area di progetto recintata e con evidenziati i punti in cui sorgeranno i nuovi edifici (Fonte: elaborato di progetto).

(384) Gru posizionate nell'area di cantiere (Fonte: elaborato di progetto).

(385) Posizionamento dei new jersey nell'area di cantiere per consentire il passaggio dei mezzi pesanti in cantiere (Fonte: elaborato di progetto).

(386) Mappa di cantiere al completo (Fonte: elaborato di progetto).

(387) Suddivisione dei pezzi di ogni singolo arco su bilici a 2, 3 o 4 assi in base al peso e alla dimensione dei componenti degli archi. (Fonte: elaborato di progetto).

(388) Camion di esempio con suddivisione in parti del primo arco strutturale suddivisi su due bancali differenti (Fonte: elaborato di progetto).

(389) Camion di esempio con suddivisione in parti del nono arco strutturale suddiviso in 5 bilici a 5 assi e con bancali da 4 o 6 m inclinati a 30° (Fonte: elaborato di progetto).

(390) Camion di esempio con suddivisione in parti del tredicesimo arco strutturale suddiviso in un bilico a 5 assi e un bilico a 3 assi, disposti su dei bancali inclinati a 30°. (Fonte: elaborato di progetto).

(391) Primo strato dell'arco strutturale posizionato su dei sostegni in legno provvisori (Fonte: elaborato di progetto).

(392) Primo strato dell'arco strutturale posizionato su dei sostegni in legno con l'aggiunta di bulloni, dadi e rondelle. (Fonte: elaborato di progetto).

(393) Primo e secondo strato dell'arco strutturale posizionati su dei sostegni in legno con l'aggiunta di bulloni, dadi e rondelle. (Fonte: elaborato di progetto).

(394) Arco al completo che viene sollevato da una gru per essere posizionato in opera. (Fonte: elaborato di progetto).

(395) Travi principali suddivise sui 3 camion (2 a 5 assi e uno a 2 assi) necessari per il trasporto. (Fonte: elaborato di progetto).

(396) Assemblaggio delle travi principali in cantiere (Fonte: elaborato di progetto).

(397) Travi secondarie posizionate su un camion a 3 assi su due bancali. (Fonte: elaborato di progetto).

(398) Assemblaggio del primo gruppo di travi secondarie in cantiere. (Fonte: elaborato di progetto).

(399) Esempio di trasporto dei pannelli sia di piccole dimensioni sdraiati nelle apposite casse, sia appoggiati verticalmente nel caso dei pannelli di larghezza superiore ai 3 m. (Fonte: elaborato di progetto).

(400) Assemblaggio pannelli in cantiere (Fonte: elaborato di progetto).

(401) Prima parte del cronoprogramma con inizio lavori impostato per il 2/01/2025 (Fonte: elaborato di progetto).

(402) Seconda parte del cronoprogramma in cui abbiamo iniziato ad imbastire l'assemblaggio delle prime parti dell'auditorium (Fonte: elaborato di progetto).

(403) Fase intermedia di cantiere (Fonte: elaborato di progetto).

(404) Terza parte del cronoprogramma in cui abbiamo portato avanti le parti (Fonte: elaborato di progetto).

(405) Quarta parte del cronoprogramma in cui abbiamo analizzato la seconda fase di assemblaggio dell'auditorium (Fonte: elaborato di progetto).

(406) Quinta parte del cronoprogramma in cui abbiamo analizzato le ultime operazioni per il completamento dell'auditorium (Fonte: elaborato di progetto).

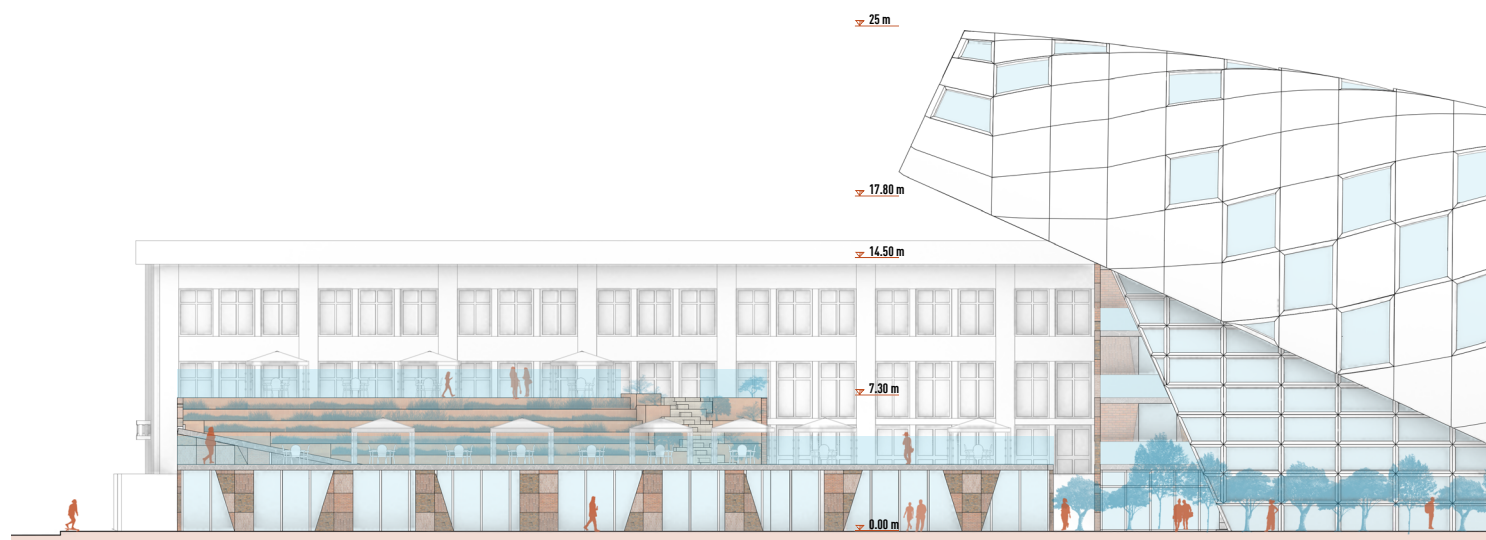
(407) Fase finale di cantiere (Fonte: elaborato di progetto).

09

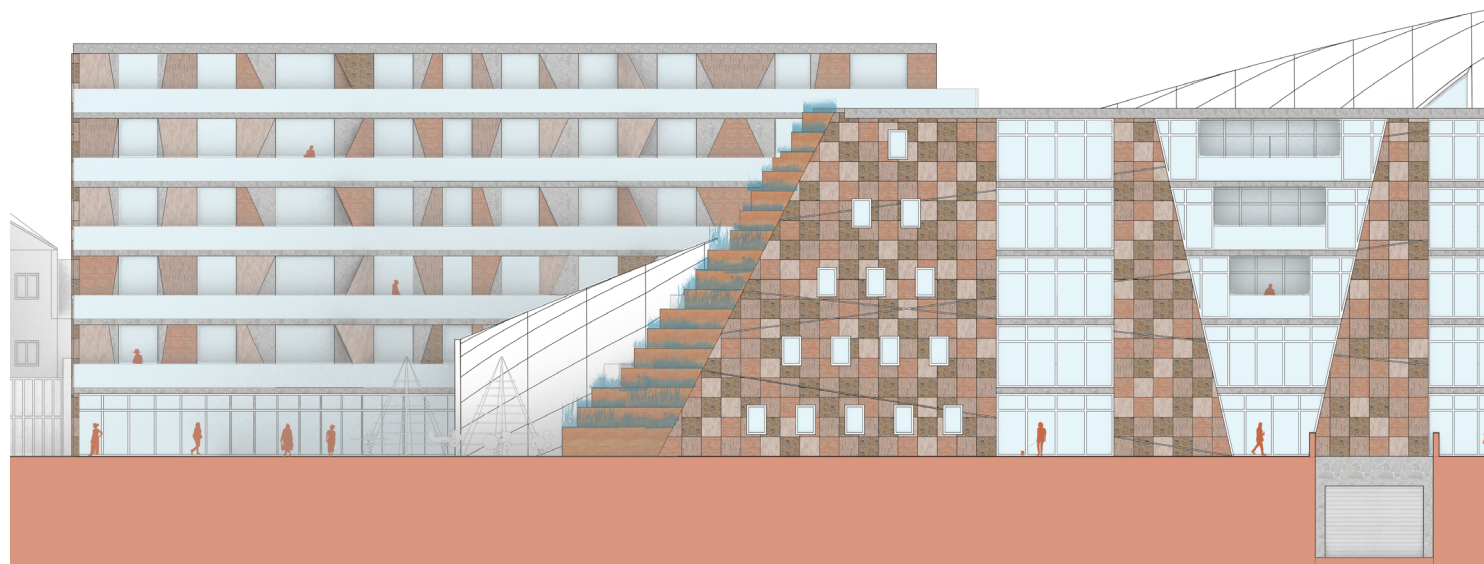
Risultato finale di progetto

9.1 - Disegni di progetto

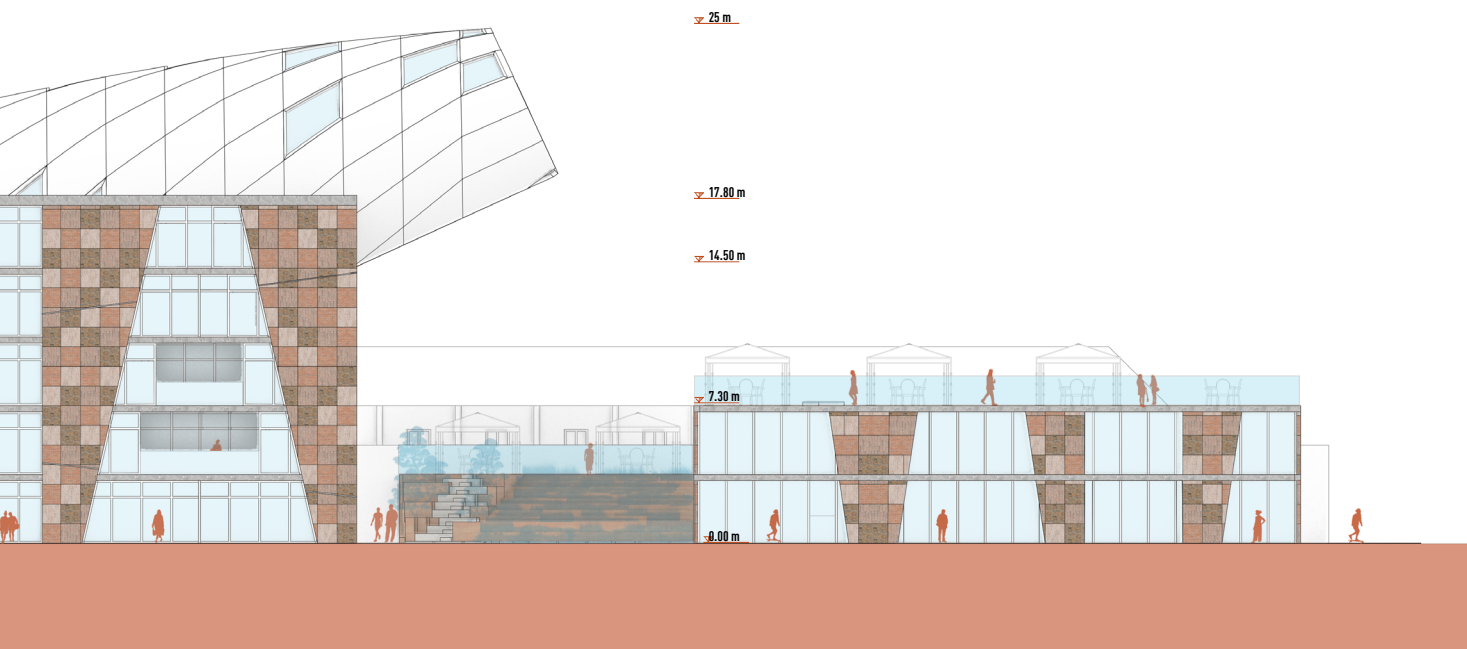
9.1.1 - Prospetti



(408) Prospetto Nord-Est scala 1:200



(409) Prospetto Sud-Ovest scala 1:200

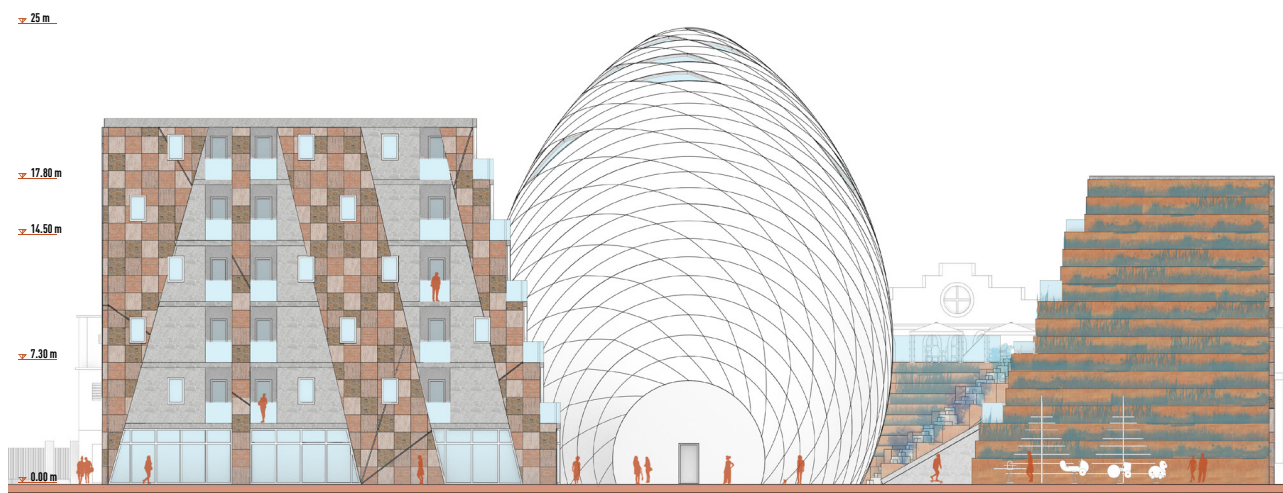


Già da questi primi due prospetti è immediatamente percepibile l'immagine del progetto, che mette immediatamente in risalto il riferimento al progetto dello studio Lendager.

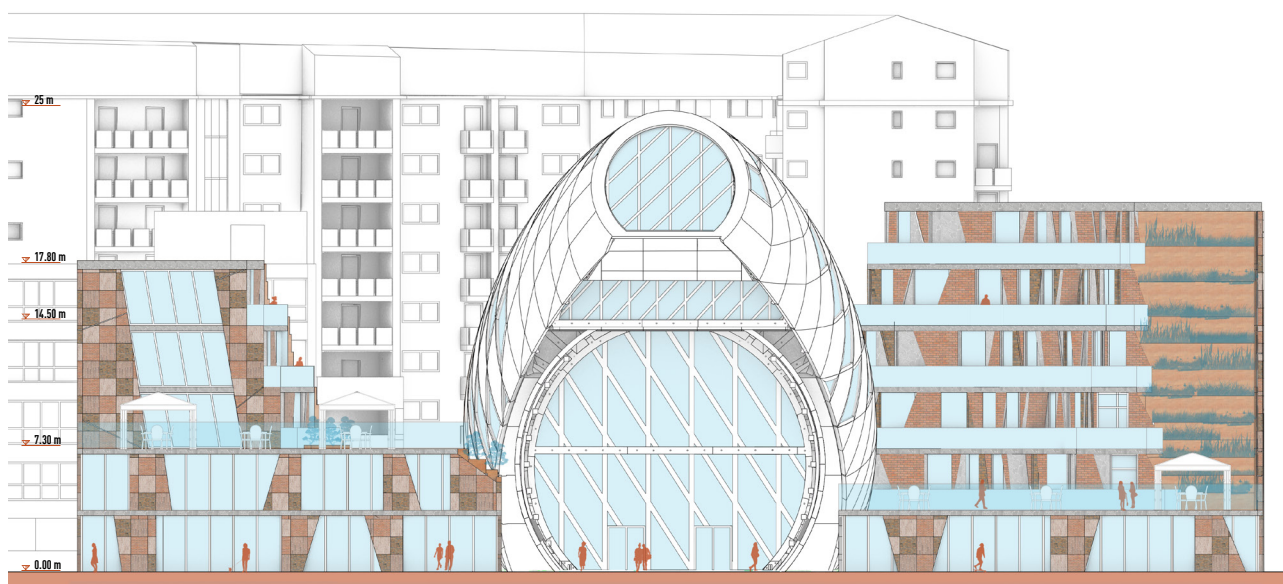
L'alternanza tra i colori dei mattoni differenti utilizzati nel progetto, combinata con i dettagli in pietra di riuso, portano il

progetto a richiamare fortemente la materialità delle OGR e le forme contemporanee dell'energy center.

Questi aspetti come evidenziato già precedentemente all'interno della tesi risultano molto evidenti, richiamando sia l'architettura contemporanea, che i classici edifici torinesi.



(410) Prospetto Nord-Ovest scala 1:200

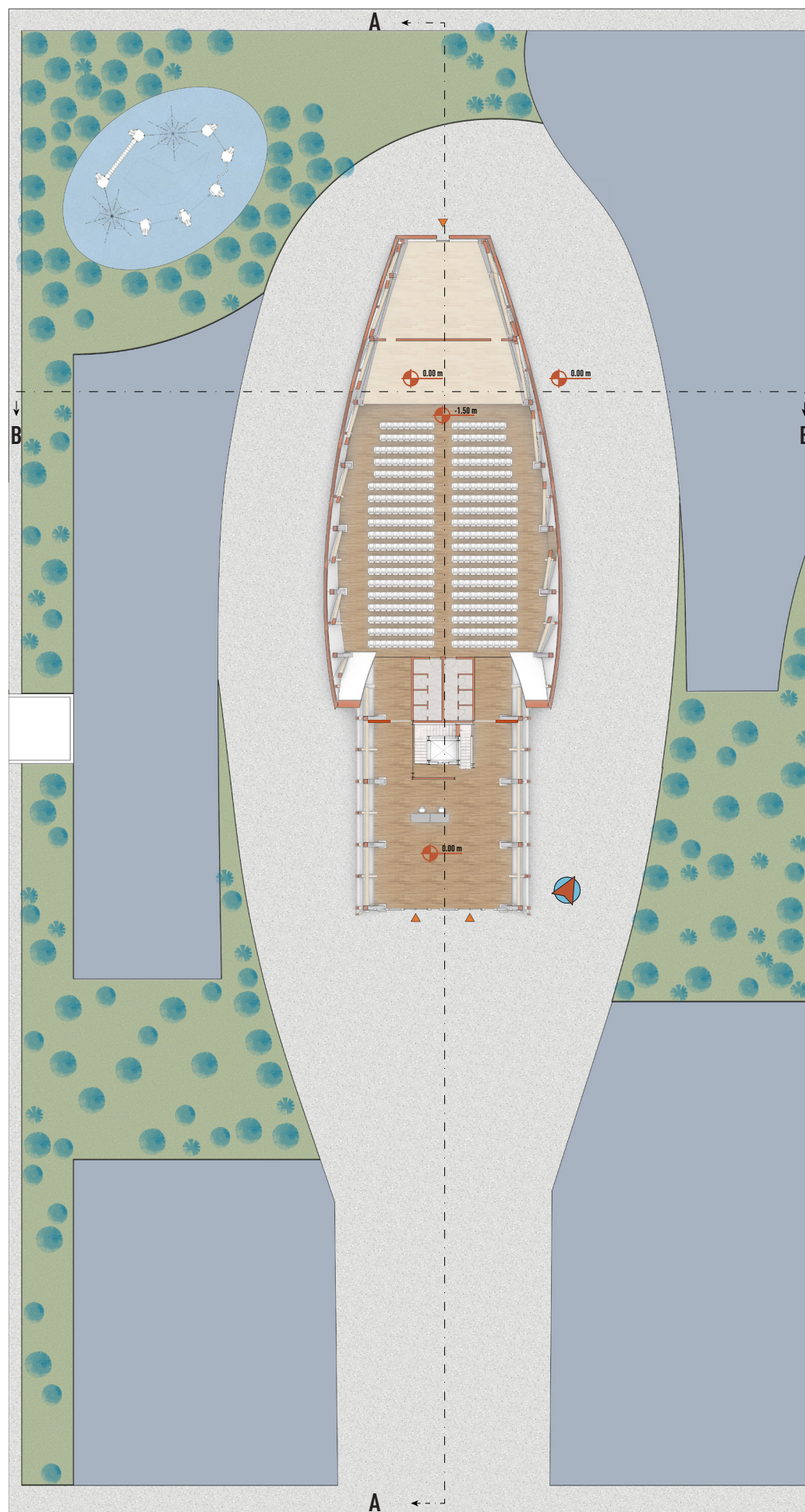


(411) Prospetto Nord-Ovest scala 1:200

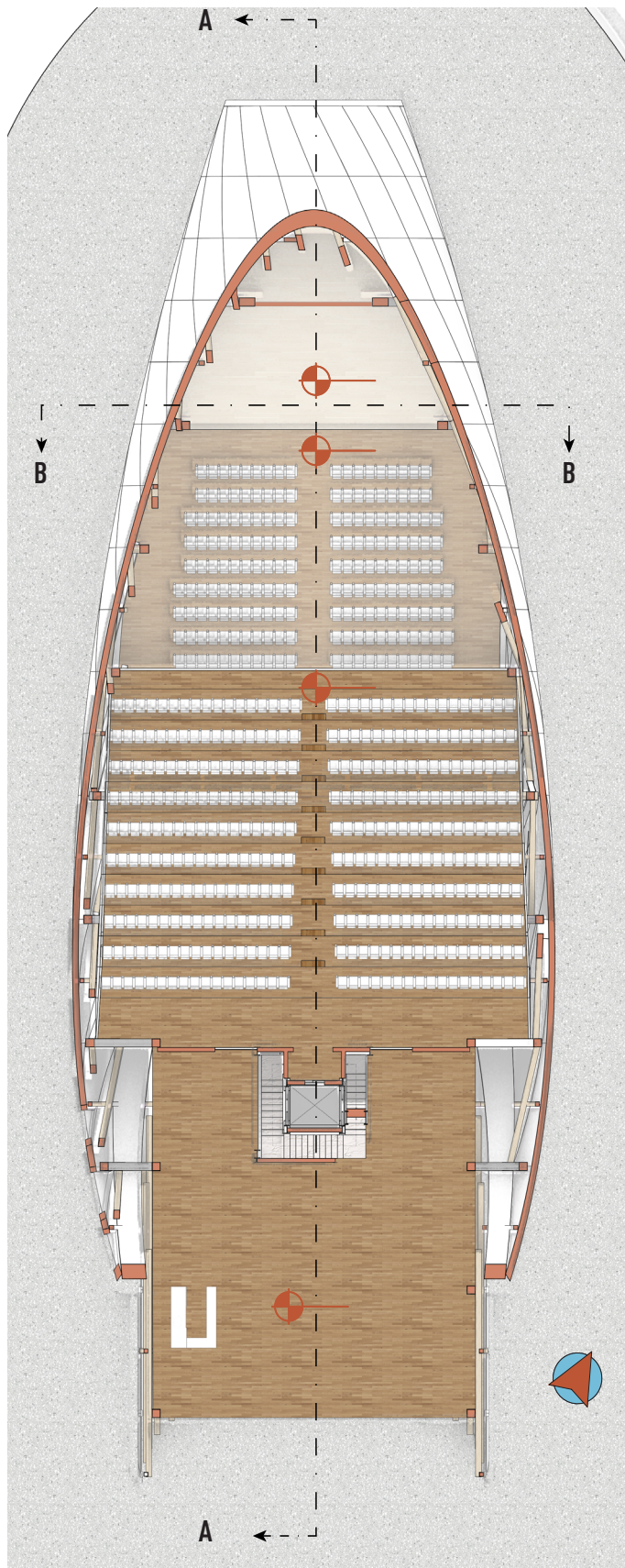
Nei prospetti così come in tutti gli altri elaborati che seguiranno, la pelle esterna dell'auditorium è stata volutamente lasciata bianca, questo per due motivi. In primis il colore del Corian è ovviamente bianco, ma in questo senso sarebbe stato possibile applicare un pattern di colore non proprio bianco ma fedele alla texture del Corian.

In secondo luogo, però era importante evidenziare nei disegni il contrasto tra i colori degli edifici commerciali, residenziali e per uffici, rispetto all'auditorium posto al centro del progetto.

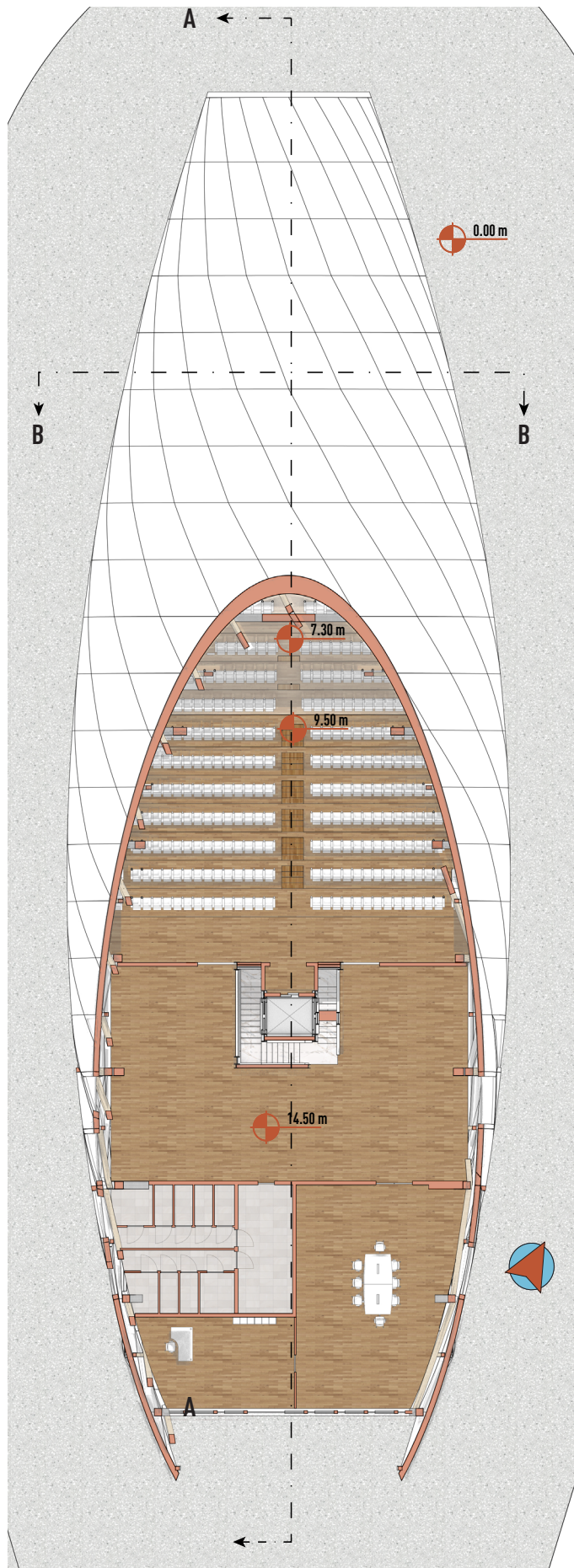
9.1.2 Piante



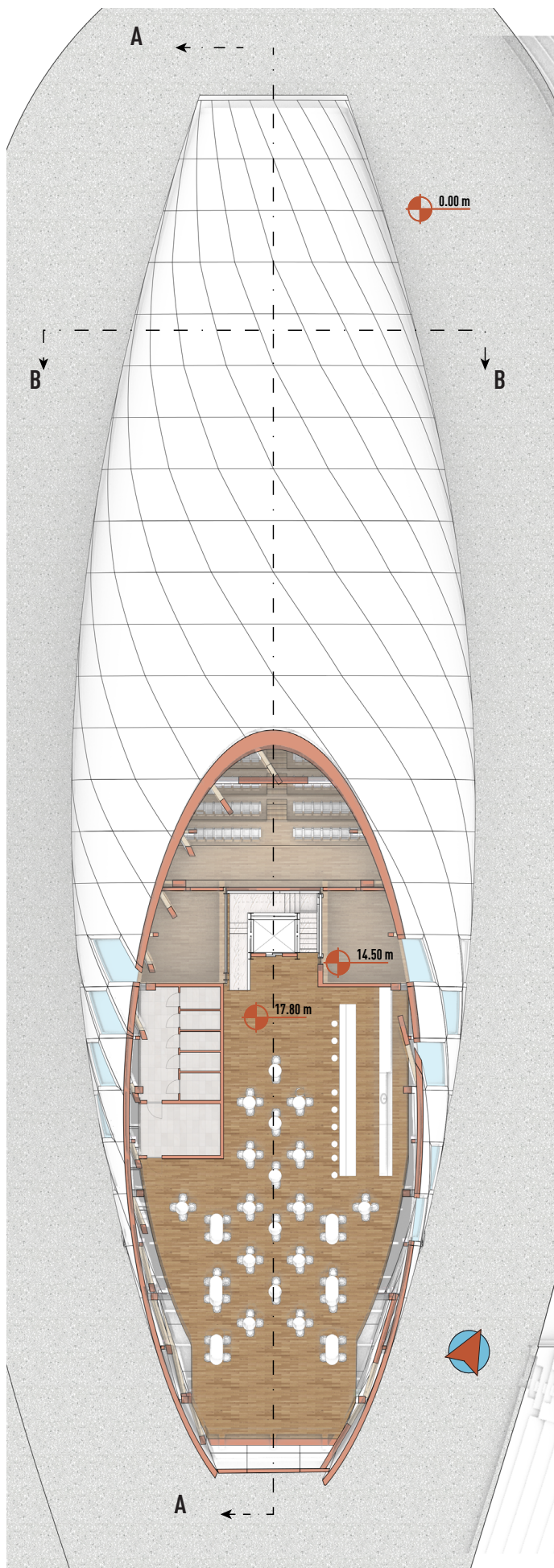
(412) Pianta
piano terra
scala 1:200



(413) Pianta primo
piano scala 1:200



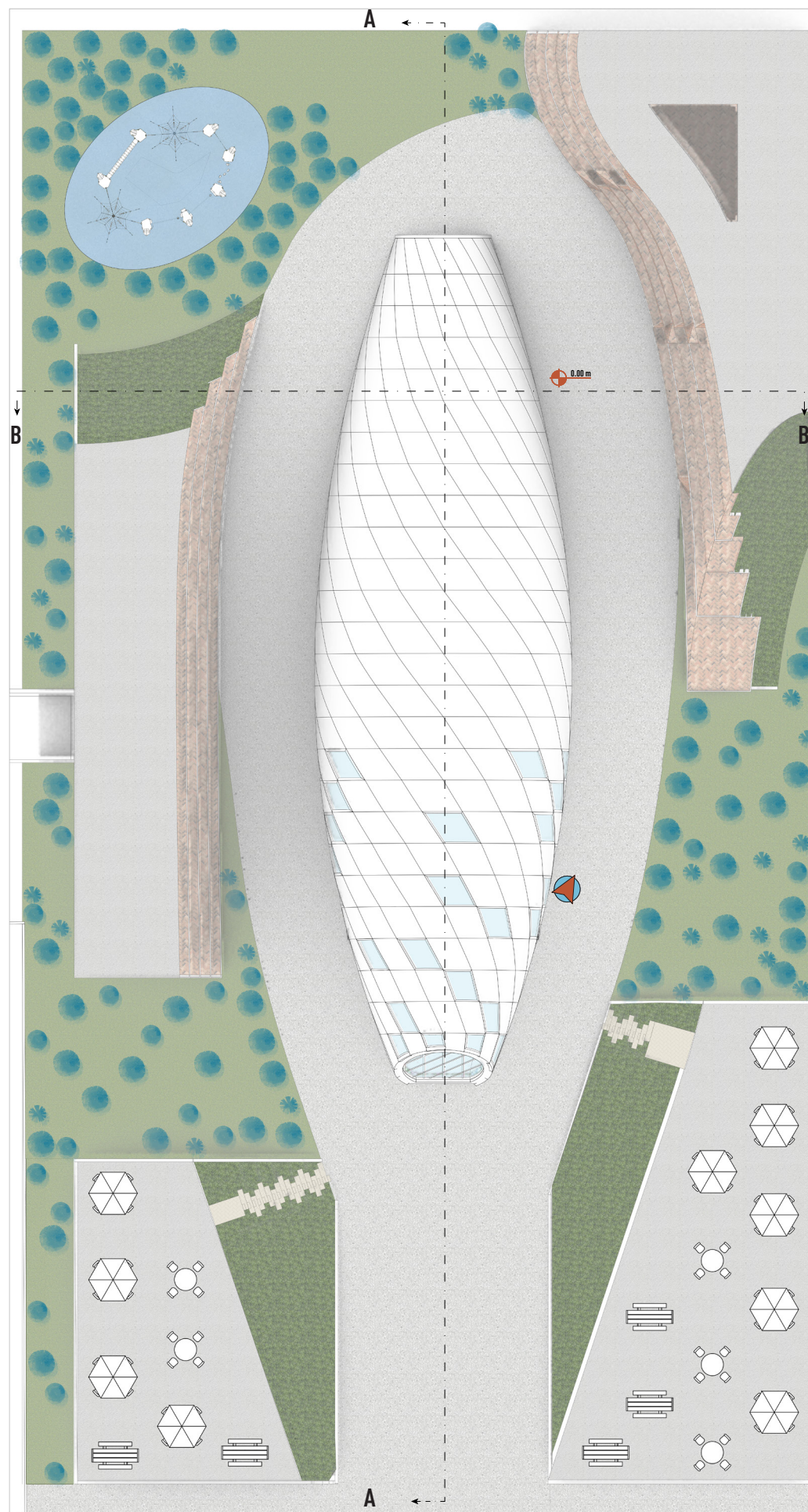
(414) Pianta secondo piano scala 1:200



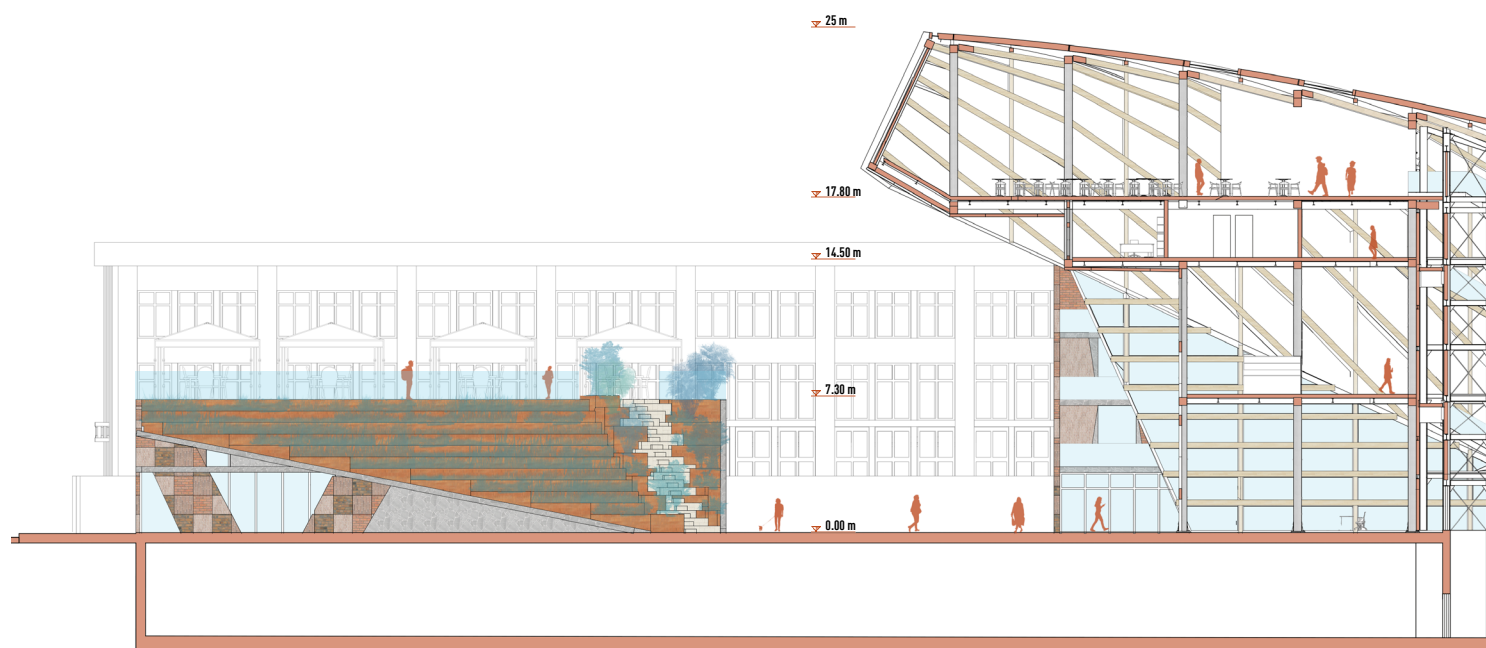
Per quanto riguarda le piante, ho ipotizzato l'inserimento di materiali caldi, in particolare diverse tipologie di legno in modo da ricreare un ambiente accogliente all'interno. Queste finiture calde ovviamente creano un contrasto con il colore freddo dei pannelli in Corian, creando un ambiente mai banale e con dei dettagli molto particolari.

(415) terzo piano scala
1:200

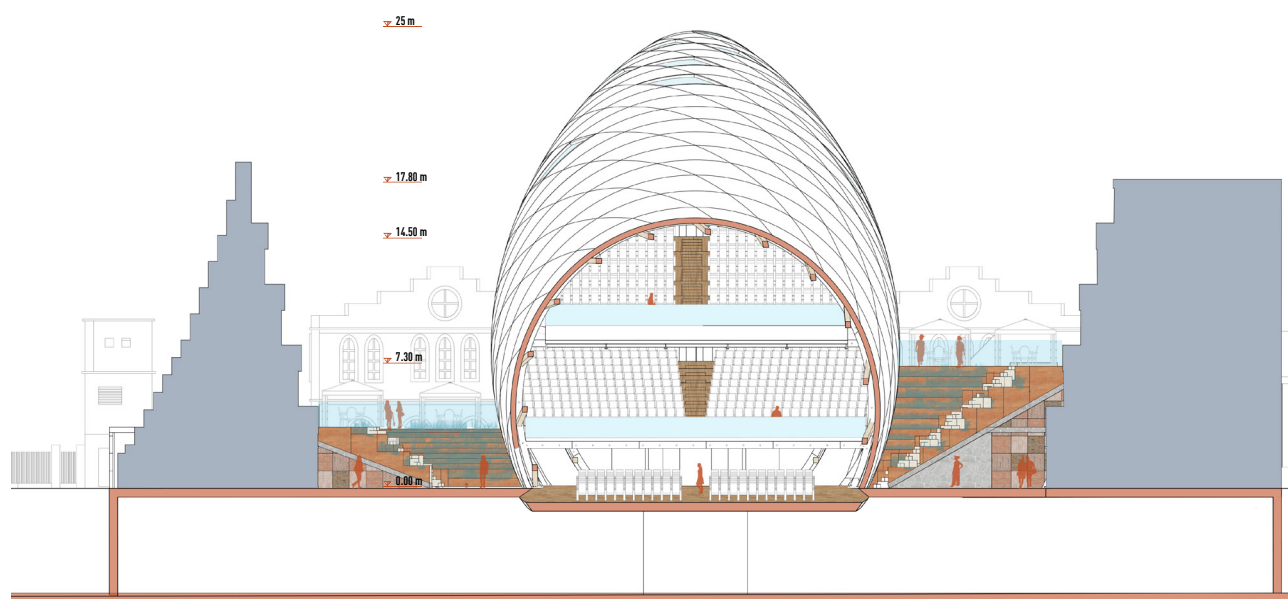
(416) Vista
dall'alto scala
1:200



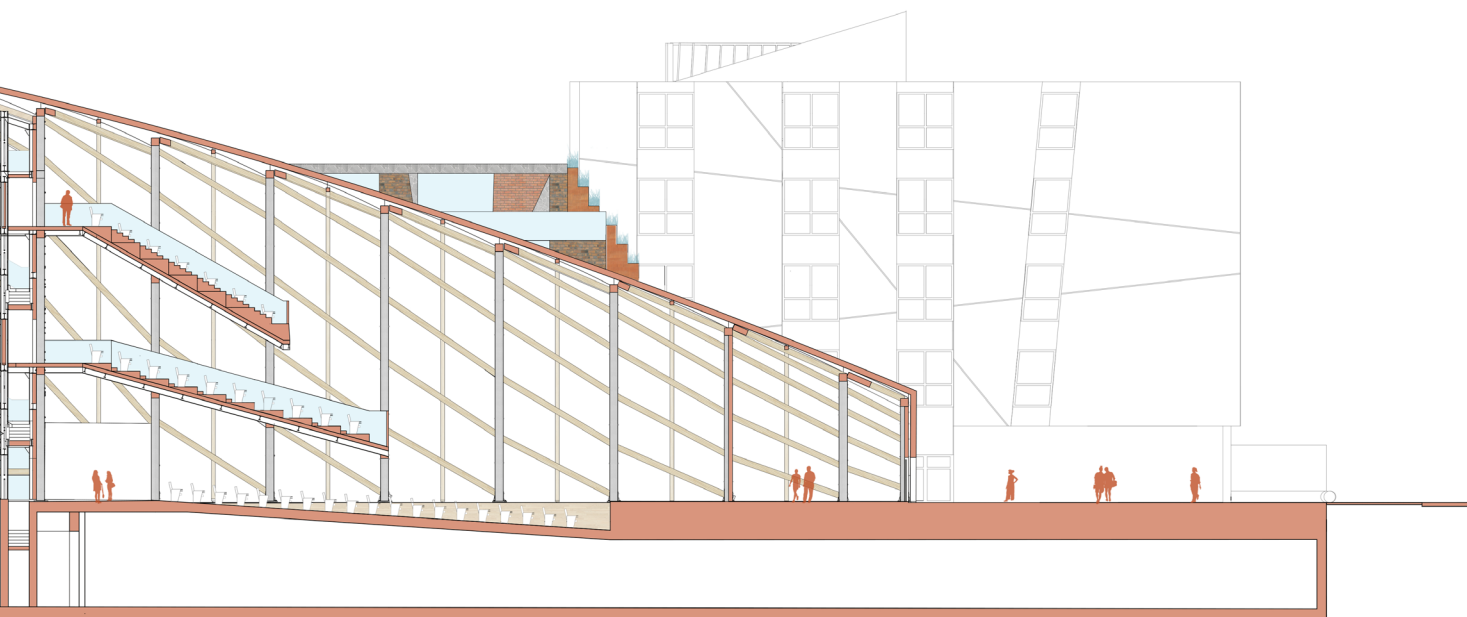
9.1.3 - Sezioni



(417) Sezione A-A scala 1:200



(418) Sezione B-B scala 1:200



Come è possibile vedere dalle sezioni la disposizione dell'auditorium è estremamente semplice ma funzionale.

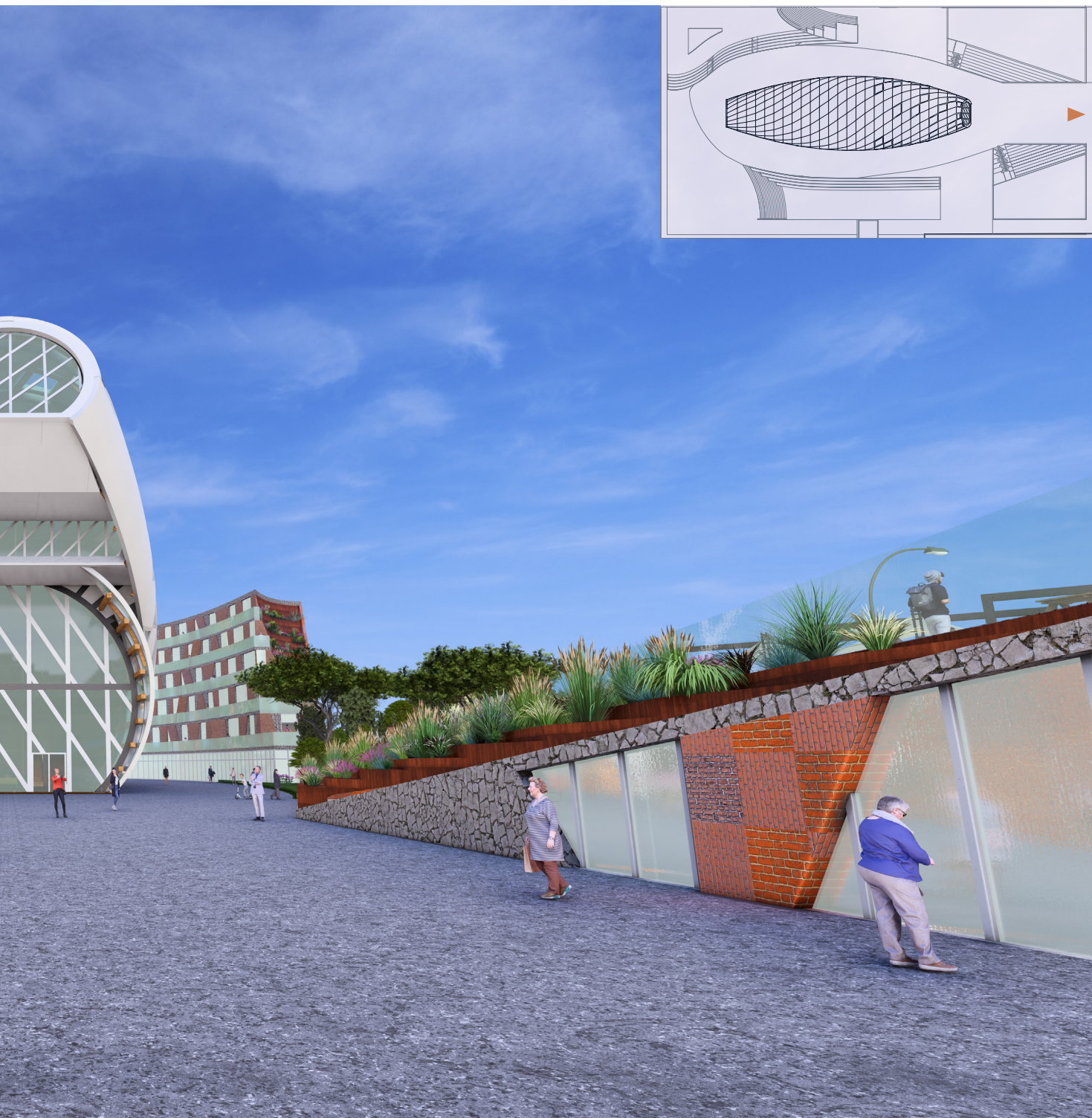
Il corpo scale e ascensore al centro dell'edificio consente un collegamento efficiente tra tutti i livelli dell'auditorium, consentendo una suddivisione efficace tra la parte dedicata al palco e quella dedicata a bar, ingresso e uffici.

Le inclinazioni dei solai sono pensate appositamente per garantire la visione sul palco per tutti i posti a sedere posizionati sugli spalti.

9.1.4 - Render

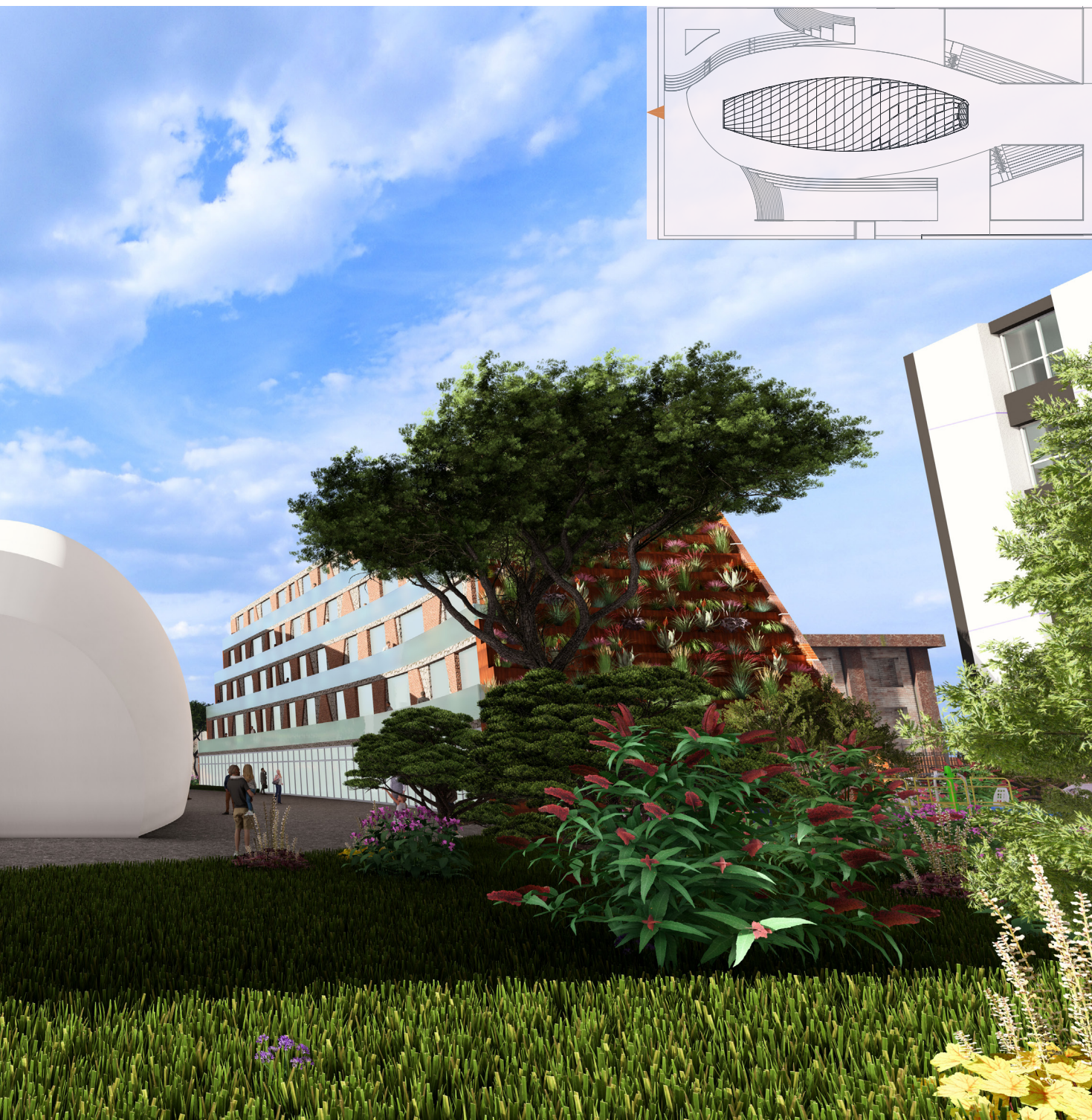
9.1.4.1 - Esterni





(419) Vista di progetto frontale da Via Paolo Borsellino





(420) Vista di progetto frontale da Via Paolo Borsellino



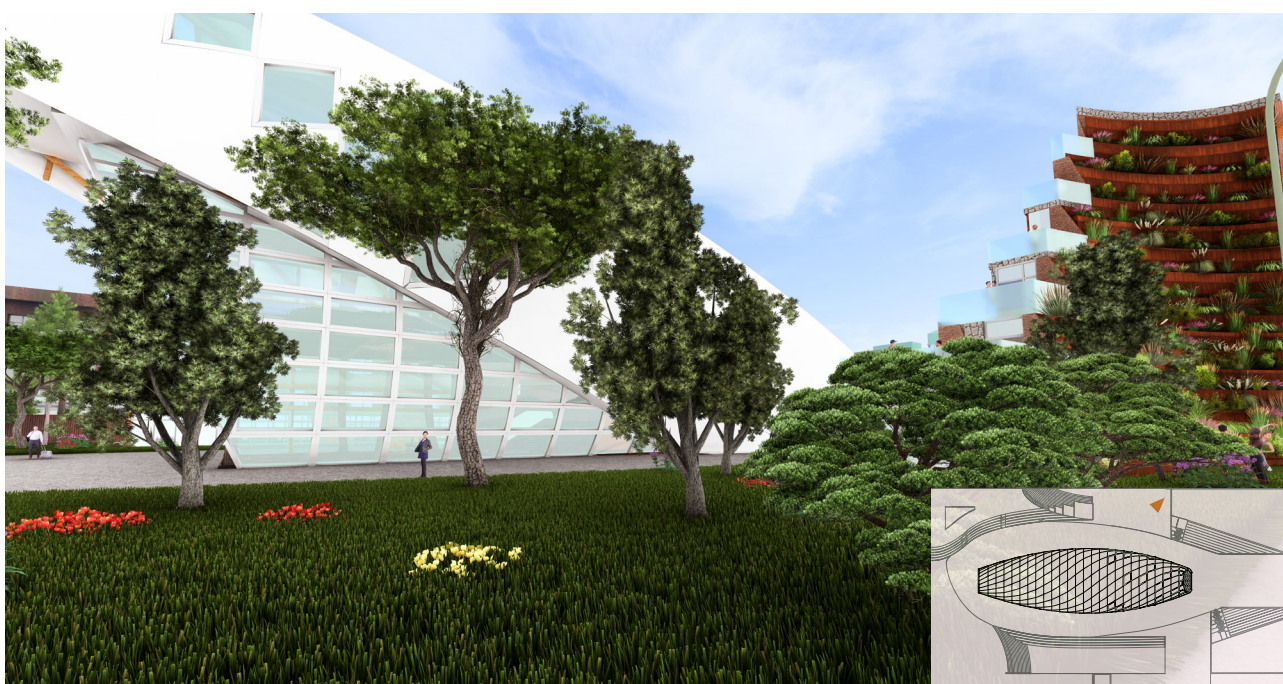
(421) Vista di progetto dal lato destra Via Nino Bixio



(422) Vista di progetto del lato sinistra di Via Nino Bixio



(423) Vista interna del progetto dal giardino posto sul lato sinistro



(424) Vista interna del progetto dal giardino posto sul lato destro



(425) Vista di progetto dalla piazza interna sul lato destro dell'auditoiurm



(426) Vista di progetto dal parco posto sul lato sinistro del progetto



(427) Vista di progetto dal solaio posto sopra l'edificio commerciale a destra dell'auditorium

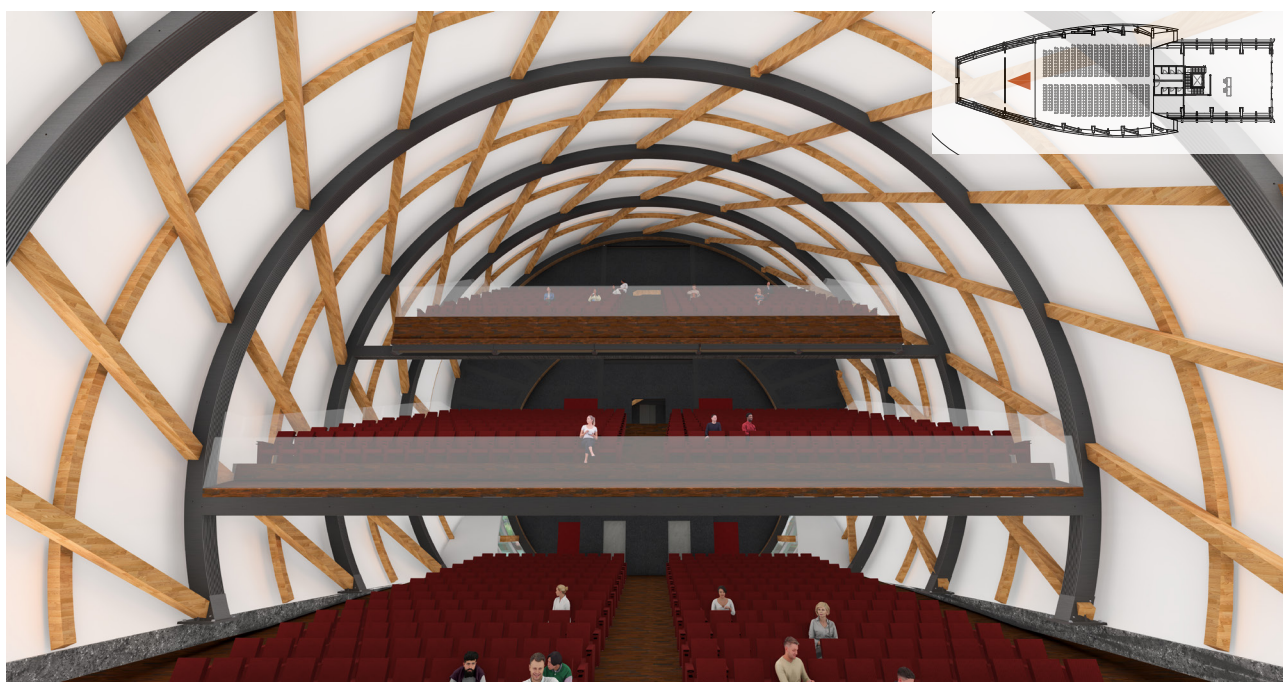


(428) Vista di progetto dal solaio posto sopra l'edificio commerciale a sinistra dell'auditorium



[429] Vista di progetto dal parcheggio dell'energy center con vista sull'ingresso ai box sotterranei dedicati all'area di progetto

9.1.4.2 - Interni



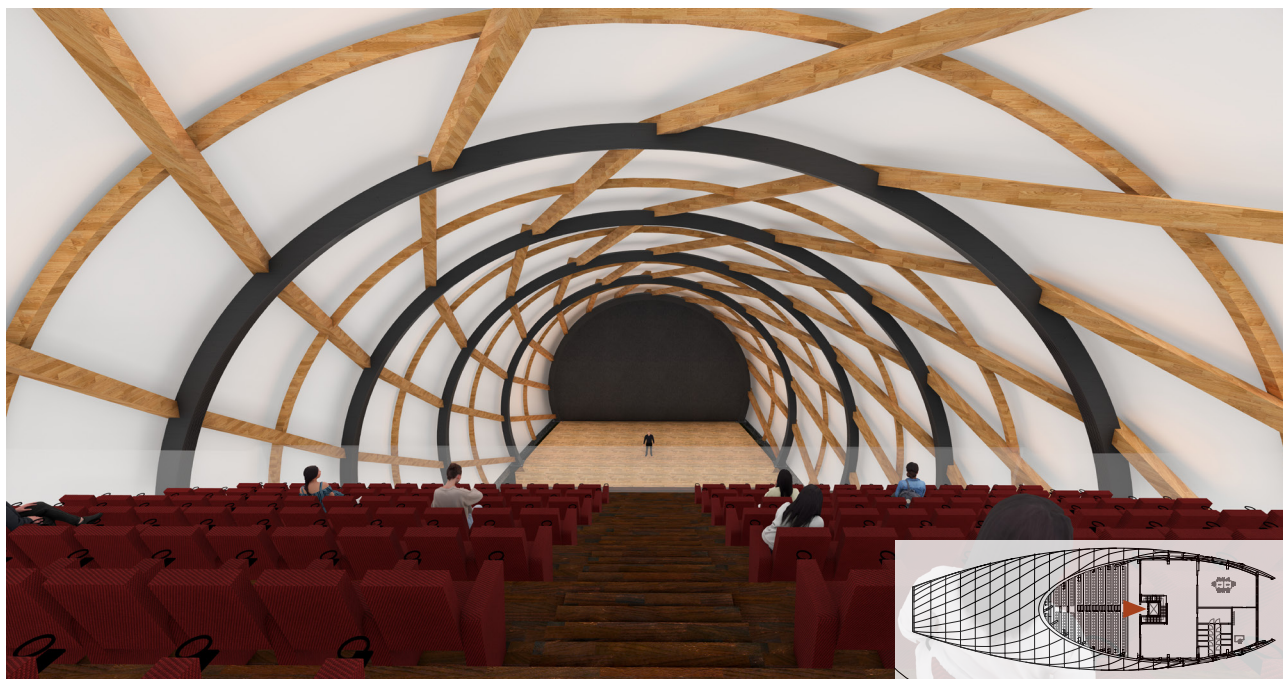
[430] Vista di progetto dal palco scenico posto nella parte bassa dell'auditorium



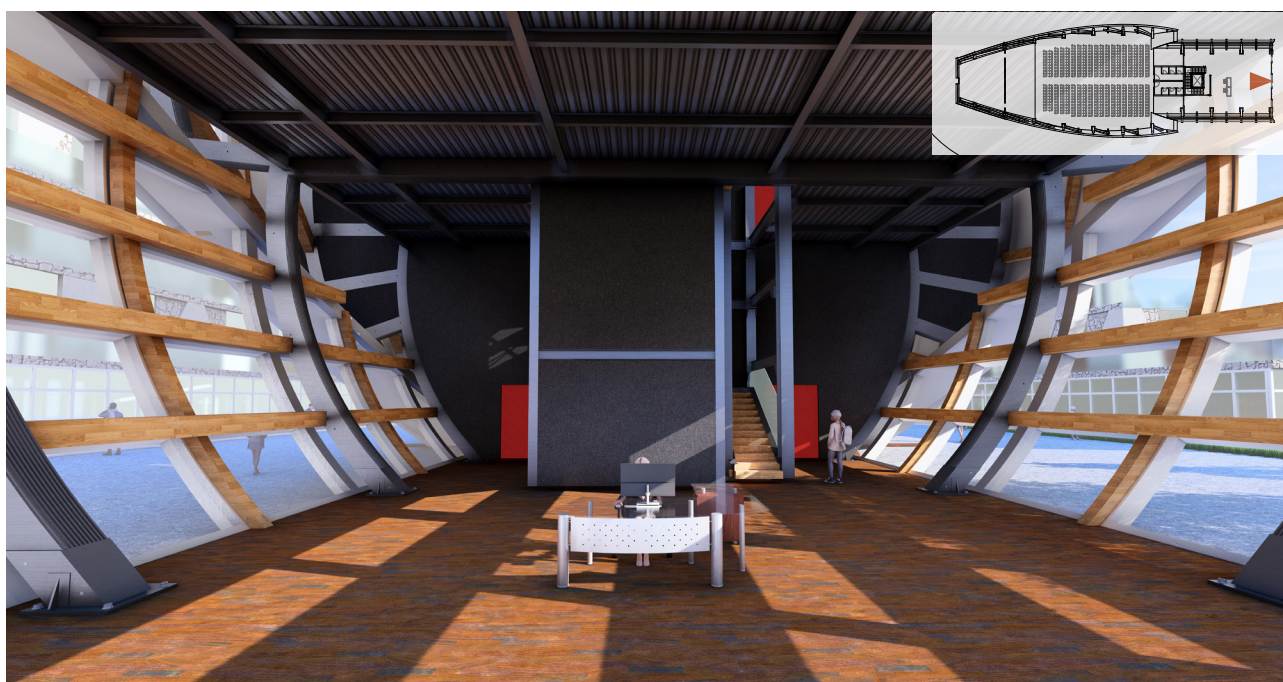
(431) Vista di progetto dal punto iniziale del corridoio centrale al piano terra



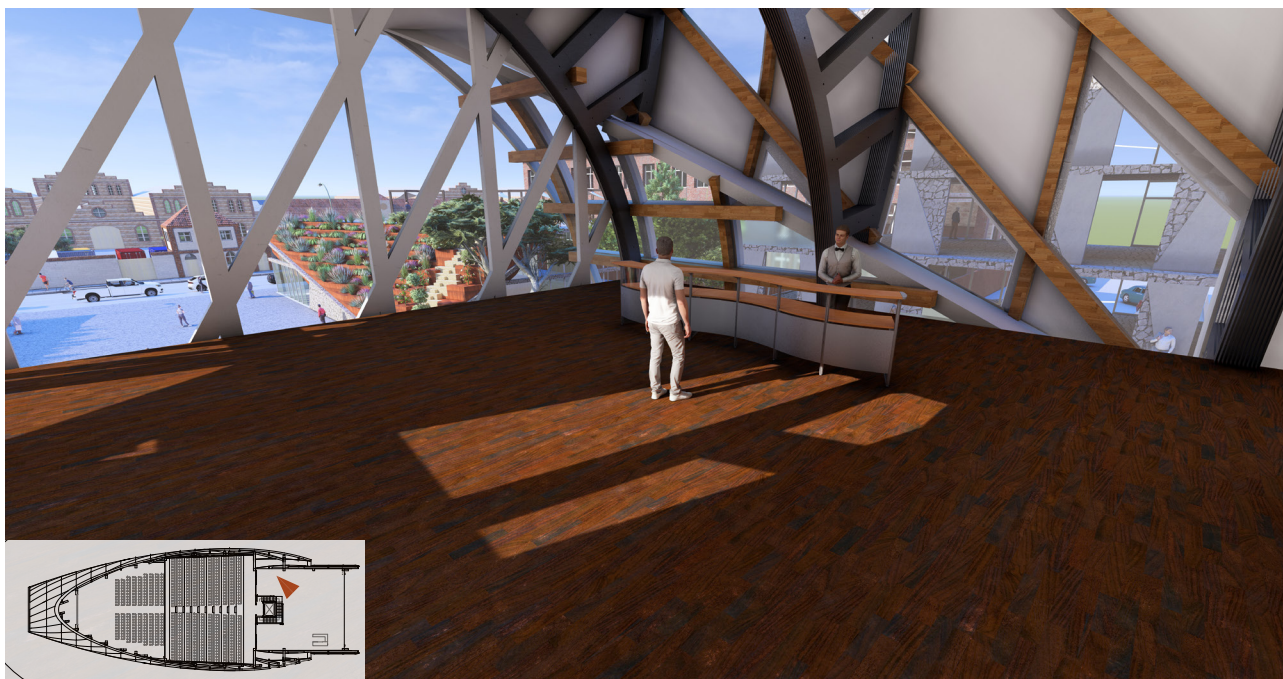
(432) Vista di progetto dal punto iniziale del corridoio centrale al primo piano



[433] Vista di progetto dal punto iniziale del corridoio centrale al piano terra



[434] Vista di progetto dall'ingresso principale all'auditorium



(435) Vista di progetto nella sala posta al primo piano dedicata all'acquisto di bevande



(436) Vista di progetto della sala riunioni al secondo piano



[437] Vista di progetto dell'ufficio dedicato al direttore posto al secondo piano



[438] Vista di progetto del piano bar posto al terzo piano



(439) Vista di progetto del piano bar posto al terzo piano

9.2 - Fine vita edificio

Per garantire la sostenibilità di questo progetto ho prestato la massima attenzione nella scelta dei materiali, in particolare l'obiettivo era quello di poter conferire un nuovo utilizzo a tutti questi materiali una

volta terminato l'utilizzo.

Per questo motivo ho provato a ipotizzare degli utilizzi futuri per i principali materiali utilizzati per la realizzazione dell'auditorium, una volta giunto a fine vita.

9.2.1 - Struttura portante

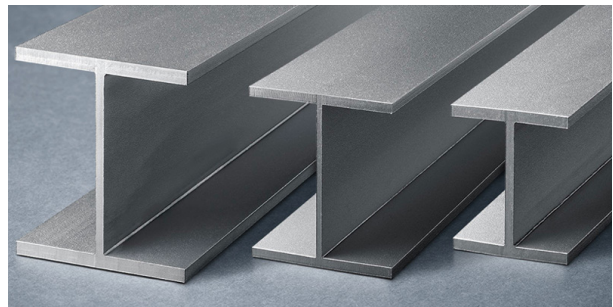
9.2.1.1 - Elementi in acciaio

Per quanto riguarda l'acciaio potrebbero essere riutilizzate sia le travi IPE che i pilastri HEA (440) utilizzati nel vano scale e soprattutto nei solai, oltre alla semplice fusione di tale materiale (441), si potrebbe ipotizzare di riutilizzare le travi in caso fossero ancora in buone condizioni, per delle luci inferiori.

Per fare questo ovviamente sarà necessario verificare che le travi non siano deformate, non presentino segni di ruggine o di altri tipi di deterioramenti, ovviamente dovranno rispondere alle esigenze normative future, ecc.

Inoltre, andrà valutato se asportare le teste delle travi in modo da evitare problemi dovuti all'inserimento di forature e bulloni che potrebbero aver ridotto la resistenza meccanica di quel tratto di trave. Oltre ovviamente a rendere più difficile l'utilizzo di questi elementi, vista la presenza di questi fori che limiterebbe le possibilità di lavorazione.

Questo metodo potrebbe essere integrato in un sistema di riferimento per la catalogazione dei materiali, per poter indicare con facilità agli architetti dove possono trovare materiali di recupero certificati in modo facile e veloce, da poter utilizzare all'interno dei loro progetti. Infatti, come spiegato nel terzo capitolo,



(440) Esempio di pilastri HEA (Fonte: Inox division)



(441) Fase di fusione dell'acciaio (Fonte: TCAspa)

74 - www.garofoli.com/

75 - www.fraiseracademy.it/

grazie anche agli esempi di progetto dello studio Lendager, questo approccio di catalogazione dei materiali potrebbe essere utile per ridurre l'impatto dei materiali dovuto alla produzione di nuovi materiali.

Questo procedimento in genere può essere svolto in caso la luce del nuovo edificio sia minore rispetto a quella coperta precedentemente, per questo motivo non può essere sempre una soluzione adatta. Ovviamente nel caso in cui le travi non

fossero adatte al riutilizzo, rimane sempre l'opzione della fusione e dunque del riciclo dell'acciaio per la produzione di nuovi prodotti.

Ovviamente il riciclo dell'acciaio è una pratica piuttosto comune ed è sicuramente la pratica più indicata per quanto riguarda gli archi strutturali gli archi strutturali, i quali difficilmente potranno essere riutilizzati data la forma estremamente personalizzata di tali archi.

9.2.1.2 - Elementi in Legno

Per quanto riguarda le travi principali e secondarie, il ventaglio di possibilità risulta sicuramente più ampio; infatti, oltre alla possibilità di riutilizzare le travi per luci inferiori nel caso in cui siano ancora in buono stato, il legno consente un utilizzo molto vario dei componenti. In particolare, potrebbero essere lavorate per estrarre piccoli oggetti attraverso sistemi di tornitura o lavorazioni a controllo numerico, oppure elementi architettonici secondari e arredi. Oltre a questo, in caso le travi siano danneggiate e dunque non riutilizzabili, in ultima istanza potrebbero essere utilizzate anche per la produzione di pannelli in pannelli di particelle (PDP 442)⁷⁴ oppure pannelli di fibra a media densità (MDF 443)⁷⁵.

Questi pannelli vengono ottenuti mescolando i trucioli del legno, che può essere massello o lamellare e vengono mischiati con resine, che dopo una pressatura a caldo li rendono solidi e compatti. La differenza tra i due tipi di pannelli è la grandezza dei trucioli che vengono utilizzati per la produzione; infatti, l'MDF utilizza dei trucioli di minor grandezza che consente di ottenere una resistenza meccanica maggiore e una superficie molto più liscia. Se tutte queste opzioni non fossero praticabili, per una ragione o per l'altra, rimane comunque la possibilità di utilizzare il legno come pellet o come combustibile geotermico, ricavando comunque un secondo utilizzo utile sia per le travi principali che per le secondarie.



(442) Pannello in PDP (Fonte: Saib.it)



(443) Pannello in MDF (Fonte: Tolinellionline.it)

9.2.2 - Pelle di finitura

La pelle di finitura dell'auditorium è composta da diversi strati, i quali sono stati scelti anche in relazione alla loro capacità di essere riciclati.

Partendo dal Corian (444), il quale come abbiamo visto è un materiale termoformabile⁷⁶, lo rende molto semplice da riutilizzare in nuove architetture, inoltre avendo dei pannelli di grandi dimensioni non sarà troppo difficile tagliare in misure più piccole i pannelli e adattarli in base alle richieste dei nuovi edifici.

Inoltre, così come il legno, nel caso in cui i pannelli non siano in buono stato o comunque riportano delle problematiche per cui non ne conviene il riciclo, il Corian offre la possibilità di essere utilizzato come combustibile, per produrre energia.

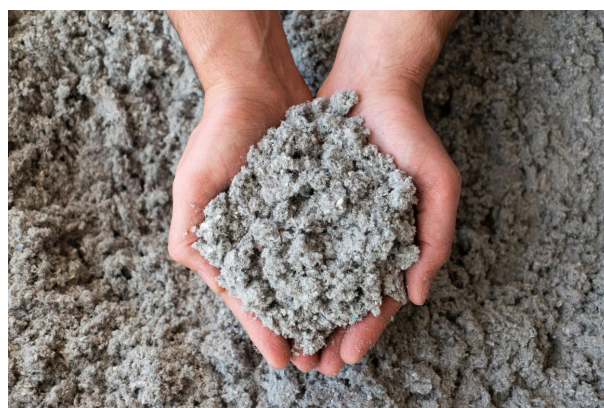
Il secondo strato, ovvero l'isolante composto da fibra di cellulosa (445), può essere facilmente riutilizzato direttamente come isolante, andando a riprendere il materiale e versandolo in nuovi contenitori delle dimensioni richieste⁷⁷. Questo ovviamente è possibile solo nel caso in cui il materiale si sia mantenuto in buone condizioni e soprattutto che abbia mantenuto le sue proprietà isolanti.

In alternativa può essere riutilizzato come riempimento per poltrone o divani oppure per pannelli fonoassorbenti, date le sue proprietà acustiche.

Nel caso in cui però siano passati molti anni e non sia effettivamente possibile procedere con il riuso diretto del materiale, si può comunque recuperare utilizzandola sia come fertilizzante (solo nel caso in cui non sia stata miscelata con prodotti chimici), oppure come ultima possibilità, può essere bruciata per produrre energia nelle centrali a bio-massa.



(444) Esempio di possibile riutilizzo del pannello in Corian (Fonte: Casf.it)



(445) Fibra di cellulosa (Fonte: magazine.windtre.it)



(446) EPDM frantumato (Fonte: Ghirarduzzi.it)

76 - www.corian.it/

77 - www.soloecologia.it

78 - www.ghirarduzzi.it

79 - fibradilegno.com/

Il terzo materiale che compone la stratigrafia, ovvero lo strato in EPDM, in questo caso difficilmente è possibile un processo di riutilizzo diretto del materiale; tuttavia, può essere riciclato in qualche modo.

Il processo più comune riguarda la frantumazione⁷⁸ del materiale [446], il quale una volta mischiato con altri materiali come ad esempio il poliuretano, può essere riutilizzato come pavimentazione di parchi giochi e prodotti di gomma riciclata come guarnizioni.

Altri processi di riciclo comprendono la possibilità di riciclo chimico, ovvero separando le sue componenti per ottenere nuovi materiali sintetici, ma questa procedura risulta molto complessa.

Infine, come molti degli altri prodotti, può essere incenerito e termovalorizzato per produrre energia.

Infine, la fibra di legno pressata, utilizzata per i bordi dei pannelli, questo materiale essendo già stato frantumato [447] e incollato difficilmente potrà essere riutilizzato direttamente; tuttavia, può essere riciclato anch'esso per la realizzazione di pannelli di MDF.

Di recente inoltre sono stati utilizzati anche per la realizzazione di materiali da costruzione a bassa densità.

Anche in questo caso se per qualche motivo le soluzioni precedenti non fossero adatte al caso specifico, rimangono sempre le opzioni della termovalorizzazione e del compostaggio.



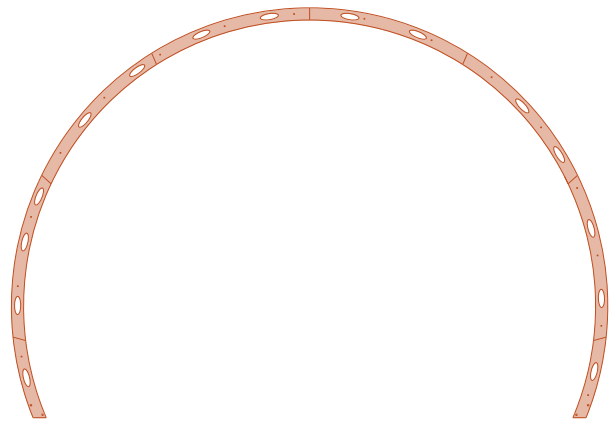
[447] Polvere ricavata dalla lavorazione dei pannelli di fibra di legno compressa (Fonte: Fibradilegno.com)

9.3 - Considerazioni finali

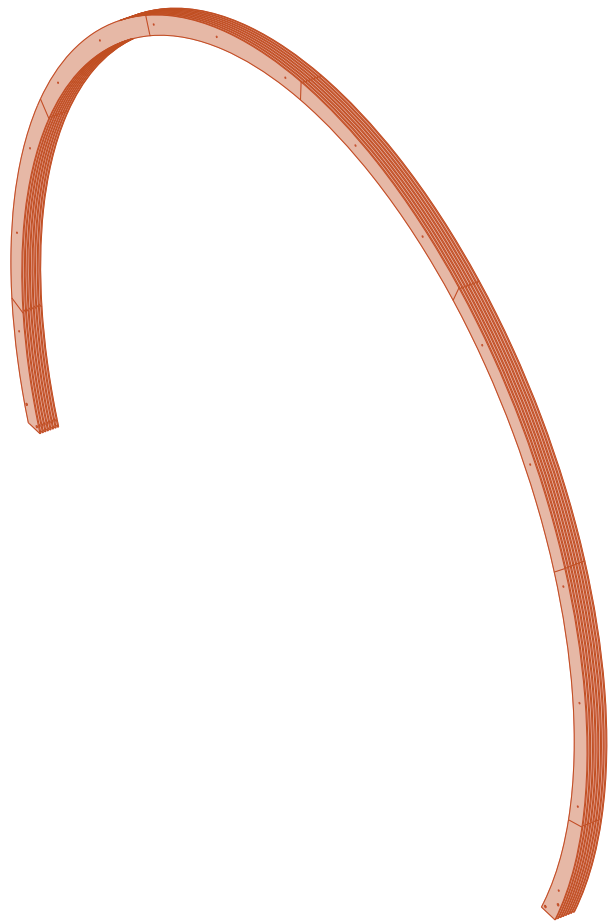
Analizzando i risultati ottenuti con questo progetto, è evidente come tutti gli obiettivi prefissati all'inizio della tesi siano stati pienamente raggiunti. L'edificio è stato concepito sin dall'inizio per essere prefabbricato off-site, consentendo di ridurre al minimo i tempi di assemblaggio in cantiere e garantendo al contempo elevati standard di sicurezza e una rapidità di esecuzione senza precedenti. Un ruolo cruciale è stato svolto dall'utilizzo di Grasshopper, un software di modellazione algoritmica che ha accelerato significativamente il processo di progettazione. Grazie a questo strumento è stato possibile generare tutti i componenti dell'auditorium da zero, sfruttando la precisione e la velocità del software per ottimizzare ogni dettaglio della geometria dell'edificio.

Ovviamente questo progetto non è immune da difetti o problematiche che potrebbero tuttavia essere facilmente sistemate. Ad esempio, come si può notare nel sesto capitolo il peso totale dell'edificio è decisamente molto elevato. Questo probabilmente è dovuto al fatto che non avendo effettuato calcoli strutturali non ho potuto dimensionare al meglio tutti i componenti, in particolare gli archi strutturali, i quali hanno un peso notevole. Questo peso ovviamente avrebbe potuto essere ridotto molto facilmente una volta compresa la sezione realmente necessaria a sorreggere la struttura.

Per farlo potrebbero essere incise delle asole all'interno degli archi (348), le quali avrebbero anche aiutato a gestire gli impianti. Oppure ancor più semplicemente il numero degli strati necessari per un



(448) Arco alleggerito con fori ad asola.



(449) Arco alleggerito grazie alla riduzione dei profili da 11 a 8 e il conseguente distanziamento degli strati da 2 a 4 cm.

singolo arco, avrebbe potuto essere più basso, ad esempio aumentando la distanza di vuoto tra uno strato e l'altro da 2 a 4 cm si riducono gli strati da 11 a 8, diminuendo di conseguenza il peso in modo netto [349]. Ovviamente questo vale anche per le travi principali e secondarie, per le quali sarebbe sufficiente ridurre le sezioni.

Ovviamente questo discorso vale anche per i pannelli, i quali a seguito di un adeguato calcolo fisico-tecnico avrebbero potuto essere resi più sottili per via di un'esigenza di isolamento inferiore.

Tuttavia, il motivo per cui non mi sono concentrato su questi aspetti e che non era il focus su cui volevo impostare la tesi, dando priorità agli aspetti inerenti alla modellazione e la realizzazione dei componenti, oltre alla logistica e all'assemblaggio in cantiere.

La scelta consapevole di materiali riciclabili e soprattutto riutilizzabili ha permesso la creazione di un edificio dalle forme particolarmente complesse, con una struttura innovativa arricchita da elementi in acciaio di alta qualità. Ogni parte dell'edificio è stata progettata tenendo conto del suo ciclo di vita, prevedendo un possibile riutilizzo a fine vita, secondo i principi dell'economia circolare. Dal punto di vista estetico, il risultato finale ha superato le aspettative: il contrasto tra il bianco brillante del Corian e le tonalità scure degli elementi lapidei permette all'auditorium di distinguersi nettamente dagli edifici circostanti, conferendogli un'identità visiva forte e riconoscibile. La scelta di una base d'ingresso completamente vetrata dona all'edificio un senso di leggerezza e trasparenza, come se fosse sollevato dal suolo, creando un contrasto visivo interessante con la plasticità del resto della struttura.

Questo progetto è la dimostrazione pratica di come la sinergia tra la metodologia DfMA, la modellazione algoritmica e l'uso di materiali sostenibili possa dare vita a un'opera architettonica innovativa e

funzionale. Sebbene il progetto non possa essere considerato completamente esaustivo in ogni sua parte, i risultati ottenuti sono comunque sufficienti per cogliere la complessità e le potenzialità di un'iniziativa di questo genere, che probabilmente non sarebbe stata realizzabile senza l'utilizzo di strumenti avanzati di modellazione parametrica. Ad esempio, la progettazione di travi con inclinazioni differenti sarebbe stata un compito arduo con la modellazione tradizionale proposta da Rhino, a causa delle molteplici variazioni angolari. Grasshopper ha reso possibile non solo questa operazione, ma anche altre fasi cruciali, come l'analisi solare illustrata nel quinto capitolo, offrendo la possibilità di elaborare dati certi e applicarli con precisione alla geometria dell'edificio. Questo ha garantito risultati ottimali in tempi brevi, rendendo il processo progettuale molto più dinamico ed efficiente.

Guardando al futuro, sarà sempre più necessario basare i modelli architettonici su dati concreti e precisi, per poter gestire al meglio le caratteristiche di ogni edificio e assicurare la riuscita e la funzionalità dell'opera. L'analisi basata su dati permette non solo di ridurre i margini di errore, ma anche di ottimizzare ogni fase della progettazione, favorendo una progettazione più consapevole e mirata.

Nel corso della prima parte di questa tesi, ho avuto l'opportunità di approfondire tecniche innovative e all'avanguardia, grazie anche al confronto diretto con esperti di diversi ambiti. Le interviste condotte con specialisti del design computazionale come Federico Borrello, Giuseppe Conti (Pininfarina), Thomas De Gaspari e il team di Blumer-Lehmann sono state particolarmente significative, offrendo spunti di riflessione essenziali per lo sviluppo del progetto. Ulteriori suggerimenti sono stati raccolti durante la conferenza Fabricate 2024, un evento di importanza internazionale che mi ha

aperto gli occhi sulle immense potenzialità del design computazionale applicato alla fabbricazione digitale. La partecipazione a tale evento è stata determinante per comprendere meglio l'approccio innovativo che caratterizza questa tesi e per capire come la ricerca e l'innovazione possano essere integrate in un progetto architettonico.

Le metodologie esplorate in questa tesi rappresentano il cuore del progetto, poiché ogni scelta progettuale è stata guidata dalla volontà di sperimentare e innovare. La realizzazione di questo edificio è basata quasi completamente su metodi di ultima generazione, sfruttando appieno le possibilità offerte dai macchinari a controllo numerico e dalla modellazione algoritmica. Per motivi di complessità e di limitazioni temporali, alcuni aspetti sono stati deliberatamente lasciati in secondo piano, come l'analisi strutturale, la valutazione della trasmittanza termica, l'impiantistica e la tecnologia per la diffusione del suono e l'illuminotecnica. Questo perché l'obiettivo primario della tesi non era quello di esplorare ogni dettaglio tecnologico dell'edificio, ma piuttosto di dimostrare la possibilità di realizzare un'architettura completamente ingegnerizzata e costruibile tramite metodologia DfMA.

Oggi, come evidenziato nella tesi, la metodologia DfMA e la modellazione algoritmica non sono ancora diffuse su

larga scala, ma il futuro dell'architettura appare destinato a integrare sempre più queste tecniche, riducendo il divario con le tradizionali pratiche artigianali e potenziando la velocità di produzione e la personalizzazione degli elementi architettonici. È probabile che ciò avvenga grazie ai vantaggi significativi offerti dalla digitalizzazione: la riduzione dei costi di produzione, l'aumento della sicurezza nelle lavorazioni e la precisione offerta dai macchinari a controllo numerico consentiranno di massimizzare l'efficienza del processo costruttivo.

Il progetto, quindi, non è solo un esercizio teorico, ma una visione concreta di come potrebbe evolversi l'architettura nel prossimo futuro, un'architettura in cui la digitalizzazione e l'innovazione tecnologica saranno parte integrante del processo progettuale. La capacità di creare edifici complessi e sostenibili utilizzando metodologie avanzate non solo ridefinirà il modo di costruire, ma cambierà anche la percezione stessa di cosa sia possibile realizzare nell'ambito architettonico, aprendo nuove strade per il design, l'efficienza e la sostenibilità ambientale. Questa tesi, quindi, rappresenta un punto di partenza per ulteriori approfondimenti e ricerche nel campo del design computazionale e della prefabbricazione digitale, confermando che l'innovazione è la chiave per un'architettura del futuro più consapevole, efficiente e rispettosa dell'ambiente.

Fonti

Siti web (in ordine di citazione)

- <https://www.garofoli.com/it/cose-il-materiale-mdf-e-le-sue-caratteristiche/#:~:text=La%20sigla%20MDF%20%C3%A8%20una,meglio%20di%20cosa%20stiamo%20parlando>.

- <https://www.fraiseracademy.it/legno-truciolare/>

- <https://www.corian.it/corian-r-technique-making-curves-thermoforming>

- <https://www.soloecologia.it/isolamento-termico-ecologico-fibra-cellulosa/>

- <https://www.ghirarduzzi.it/2023/04/26/nuove-sfide-nuove-opportunita-separazione-granulo-gomma-per-il-riciclaggio-dei-pneumatici-usati/>

- <https://www.fibradilegno.com/vantaggi-fibra-di-legno.html>

Elenco immagini con fonti complete

(408) Prospetto Nord-Est scala 1:200
(Fonte: elaborato di progetto)

(409) Prospetto Sud-Ovest scala 1:200
(Fonte: elaborato di progetto)

(410) Prospetto Nord-Ovest scala 1:200
(Fonte: elaborato di progetto)

(411) Prospetto Nord-Ovest scala 1:200
(Fonte: elaborato di progetto)

(412) Pianta piano terra scala 1:200
(Fonte: elaborato di progetto)

(413) Pianta primo piano scala 1:200
(Fonte: elaborato di progetto)

(414) Pianta secondo piano scala 1:200
(Fonte: elaborato di progetto)

(415) terzo piano scala 1:200 (Fonte:
elaborato di progetto)

(416) Vista dall'alto scala 1:200 (Fonte:
elaborato di progetto)

(417) Sezione A-A scala 1:200 (Fonte:
elaborato di progetto)

(418) Sezione B-B scala 1:200 (Fonte:
elaborato di progetto)

(419) Vista di progetto frontale da Via
Paolo Borsellino (Fonte: elaborato di
progetto)

(420) Vista di progetto frontale da Via
Paolo Borsellino (Fonte: elaborato di
progetto)

(421) Vista di progetto dal lato destra Via
Nino Bixio (Fonte: elaborato di progetto)

(422) Vista di progetto del lato sinistra
di Via Nino Bixio (Fonte: elaborato di
progetto)

(423) Vista interna del progetto dal
giardino posto sul lato sinistro (Fonte:
elaborato di progetto)

(424) Vista interna del progetto dal
giardino posto sul lato destro (Fonte:
elaborato di progetto)

(425) Vista di progetto dalla piazza interna
sul lato destra dell'auditorium (Fonte:
elaborato di progetto)

(426) Vista di progetto dal parco posto sul lato sinistro del progetto (Fonte: elaborato di progetto)

(427) Vista di progetto dal solaio posto sopra l'edificio commerciale a destra dell'auditorium (Fonte: elaborato di progetto)

(428) Vista di progetto dal solaio posto sopra l'edificio commerciale a sinistra dell'auditorium (Fonte: elaborato di progetto)

(429) Vista di progetto dal parcheggio dell'energy center con vista sull'ingresso ai box sotterranei dedicati all'area di progetto (Fonte: elaborato di progetto)

(430) Vista di progetto dal palco scenico posto nella parte bassa dell'auditorium (Fonte: elaborato di progetto)

(431) Vista di progetto dal punto iniziale del corridoio centrale al piano terra (Fonte: elaborato di progetto)

(432) Vista di progetto dal punto iniziale del corridoio centrale al primo piano (Fonte: elaborato di progetto)

(433) Vista di progetto dal punto iniziale del corridoio centrale al piano terra (Fonte: elaborato di progetto)

(434) Vista di progetto dall'ingresso principale all'auditorium (Fonte: elaborato di progetto)

(435) Vista di progetto nella sala posta al primo piano dedicata all'acquisto di bevande (Fonte: elaborato di progetto)

(436) Vista di progetto della sala riunioni al secondo piano (Fonte: elaborato di progetto)

(437) Vista di progetto dell'ufficio dedicato al direttore posto al secondo piano (Fonte: elaborato di progetto)

(438) Vista di progetto del piano bar posto al terzo piano (Fonte: elaborato di progetto)

(439) Vista di progetto del piano bar posto al terzo piano (Fonte: elaborato di progetto)

(440) Esempio di pilastri HEA (Fonte: <https://inoxdivision.com/projects/travi-he/>)

(441) Fase di fusione dell'acciaio (Fonte: <https://www.tcaspa.com/servizi/recupero-metalli-preziosi/fusione>)

(442) Pannello in PDP (Fonte: https://www.saib.it/prodotto/lpb_light/)

(443) Pannello in MDF (Fonte: <https://www.tonellionline.it/pannelli/mdf.html>)

(444) Esempio di possibile riutilizzo del pannello in Corian (Fonte: <https://casf.com.au/project/bondi-kitchen/>)

(445) Fibra di cellulosa (Fonte: <https://magazine.windtre.it/news-economia-finanza/fibra-di-cellulosa-edilizia-caratteristiche-e-applicazioni>)

(446) EPDM frantumato (Fonte: <https://www.ghirarduzzi.it/2023/04/26/nuove-sfide-nuove-opportunita-separazione-granulo-gomma-per-il-riciclaggio-dei-pneumatici-usati/>)

(447) Polvere ricavata dalla lavorazione dei pannelli di fibra di legno compressa (Fonte: <https://www.fibradilegno.com/vantaggi-fibra-di-legno.html>)

(448) Arco alleggerito con fori ad asola. (Fonte: elaborato di progetto)

(449) Arco alleggerito grazie alla riduzione dei profili da 11 a 8 e il conseguente distanziamento degli strati da 2 a 4 cm.
(Fonte: elaborato di progetto)

10

Modello fisico - scala 1:20

10.1 - Progettazione modello

10.1.1 - scegliere il modello

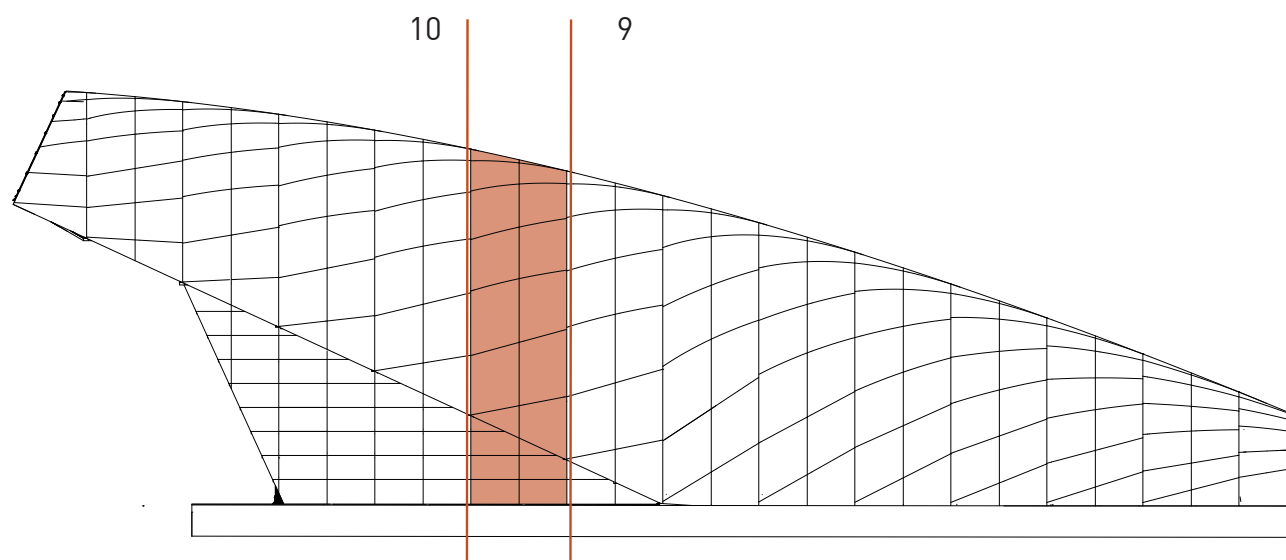
Quando ho deciso di realizzare il modello fisico di progetto, mi è subito sembrato importante riportare tutti i dettagli presenti all'interno del progetto, a questo è dovuta la scelta di utilizzare la scala di dettaglio 1:20.

Date le dimensioni globali dell'auditorium e la modularità della struttura, ho scelto di prototiparne soltanto una sezione significativa che potesse restituire più dettagli possibili, per questo motivo ho scelto la sezione di auditorium compresa

tra gli archi strutturali 9 e 10 (450).

Questa scelta è dovuta prima di tutto alla complessità della forma di questi archi e soprattutto alla presenza del vano scale e ascensore.

Una volta selezionata la parte di edificio ho scalato il modello e iniziato ad analizzare i vari componenti che avrei dovuto realizzare.



(450) Parte di edificio selezionata per realizzare il modello fisico

10.1.2 - Ingegnerizzazione dei componenti

La realizzazione di ogni singolo componente è stata meticolosamente studiata in funzione di 2 fattori.

Prima di tutto ogni elemento doveva essere in grado di giuntarsi con quello successivo in modo semplice e veloce, per questo tutti gli oggetti che compongono questo modello hanno degli incastri al loro interno.

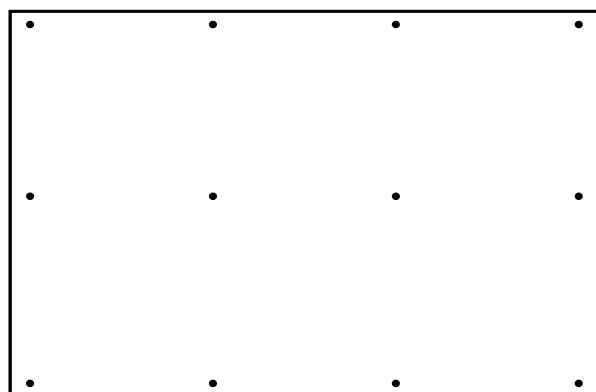
Il secondo fattore consisteva nel fatto che i materiali lavorabili erano fondamentalmente 3, ovvero lamiera in piccola parte, legno vegetale e PLA, ovvero stampa 3D.

Quindi ogni componente doveva essere realizzato con uno di questi materiali o da una combinazione di essi, fa eccezione la base, la quale oltre al primo strato in lamiera da 2 mm, necessario a bilanciare il peso della struttura superiore. Si compone di uno strato da 18 mm di legno lamellare. Questa base avrà uno spessore totale di 20 mm e per unire lo strato in lamiera con quello in legno ho utilizzato 12 viti da 4 mm di diametro, posizionate al di sotto dello strato in lamiera [451].

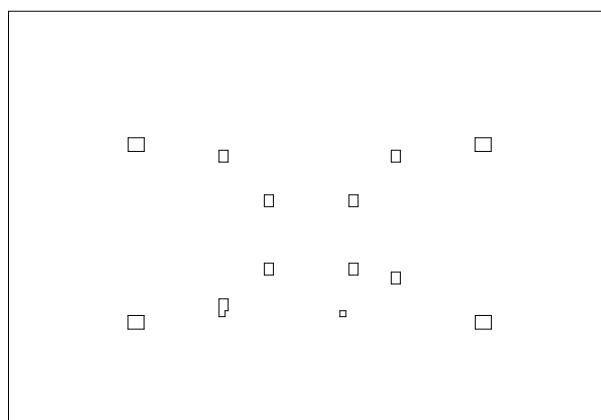
Nello strato in legno invece, ho realizzato i fori necessari attraverso una macchina CNC [452], questi fori, che non verranno eseguiti nella lamiera consentiranno l'inserimento e il successivo incastro degli archi strutturali e dei pilastri HEA che sorreggono il resto della struttura.

Per quanto riguarda gli archi strutturali, sono stati realmente realizzati attraverso la tecnica del taglio laser; quindi, ho prodotto dei disegni CAD [453], che sono stati successivamente tradotti in formato CAM da Thomas dell'azienda S.M.A.T e tagliati proprio come sarebbe successo in fase di produzione del progetto, ovviamente in scala ridotta.

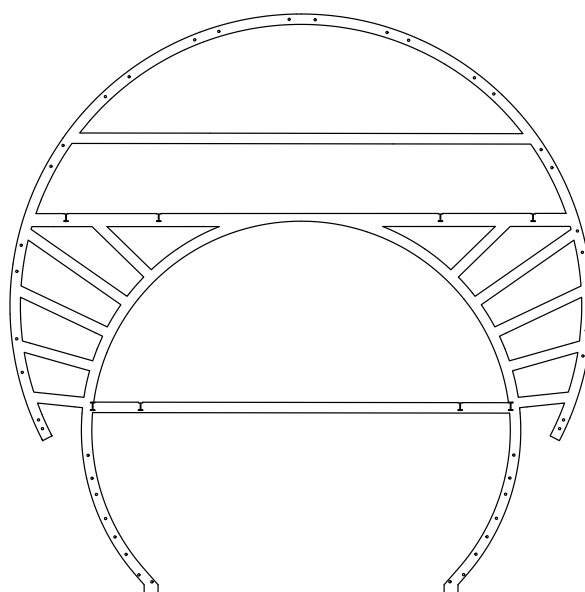
Questo disegno ovviamente teneva in considerazione anche gli incastri necessari a tutti gli altri componenti per essere assemblati, come ad esempio le sagome per le travi IPE e soprattutto i fori per le viti da 4 mm di diametro che manterranno collegati tra loro i vari strati degli archi



[451] Base in lamiera con fori per le viti necessari all'assemblaggio



[452] Base in legno in cui sono stati realizzati i fori per l'inserimento di archi strutturali e pilastri HEA



[453] Disegno CAD realizzato per il taglio di uno dei due archi strutturali attraverso il taglio laser.

e gli attacchi per le travi principali. In corrispondenza di questi fori sono state posizionate delle rondelle stampate su misura grazie alla stampante 3D, in modo tale che una volta strette le viti grazie ai bulloncini posizionati sul retro, la lamiera non venisse schiacciata e di conseguenza modificato l'aspetto finale del modello. Questo concetto è analogo a quello dei bulloni e delle rondelle utilizzato nel progetto in scala reale; tuttavia, ovviamente è stato semplificato per via della riduzione di scala (454).

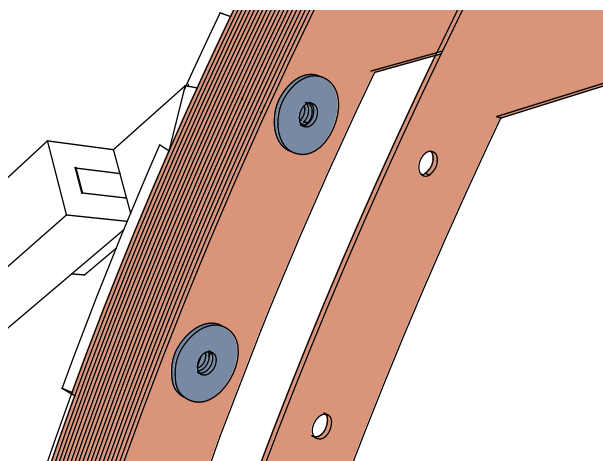
Il medesimo principio è stato applicato alla base degli archi, nella quale sono state inserite delle sezioni, sempre stampate in 3D, in modo da simulare la presenza degli elementi di giuntura alla base, che renderanno più solida la struttura (455).

Per quanto riguarda gli incastri da utilizzare per connettere le travi principali, ho deciso di stampare anche questi in 3D, avendo ognuno delle forme leggermente diverse, infatti, questo è il modo migliore per ottenere degli incastri perfettamente congruenti con ogni angolazione senza perdere troppo tempo nello studio e nella realizzazione del giunto.

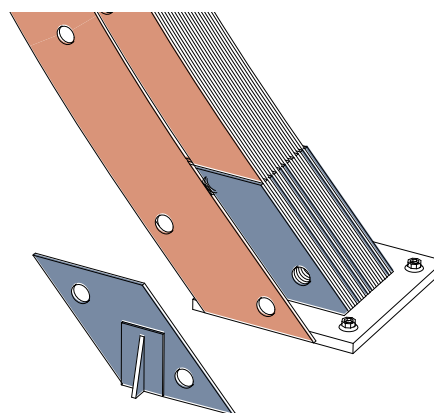
Il giunto si compone di una parte planare che ripercorre la forma degli archi andando poi a sviluppare un elemento diagonale, realizzato seguendo la direzione della specifica trave e che andrà incastrato in una fessura appositamente ricavata nel centro di essa (456).

Per quanto riguarda le travi principali sono realizzate in cartongesso, e le sagome sono tagliate attraverso taglio laser, nello specifico sono state realizzate 3 sezioni da 0,5 cm di spessore.

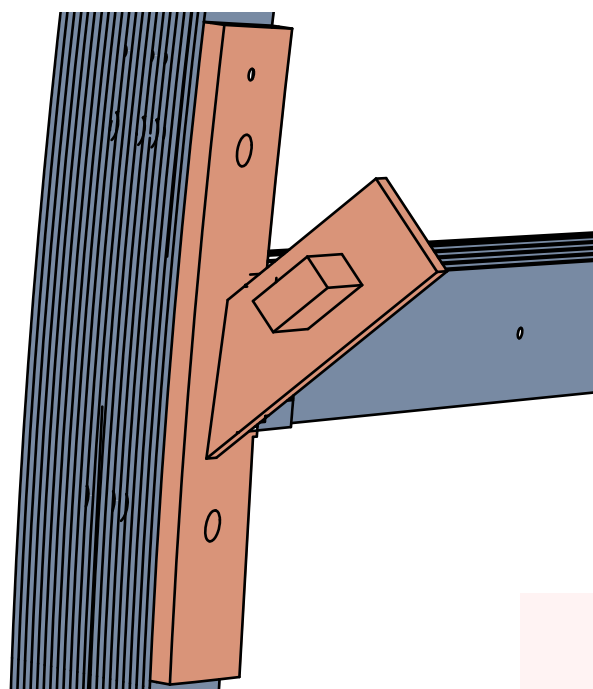
In corrispondenza di ogni giuntura con le travi secondarie ho posizionato un giunto stampato in 3D che consente di incollare la trave principale alla secondaria senza



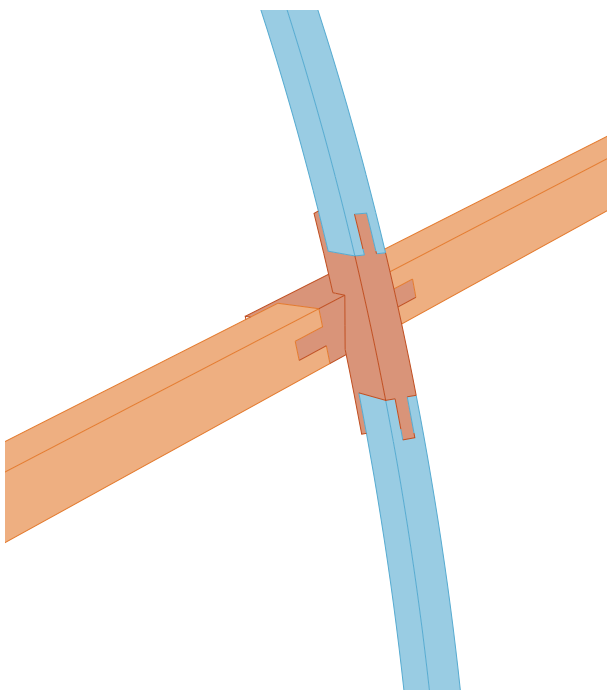
(454) Assemblaggio degli archi strutturali con rondelle come intermezzi per evitare la deformazione del metallo.



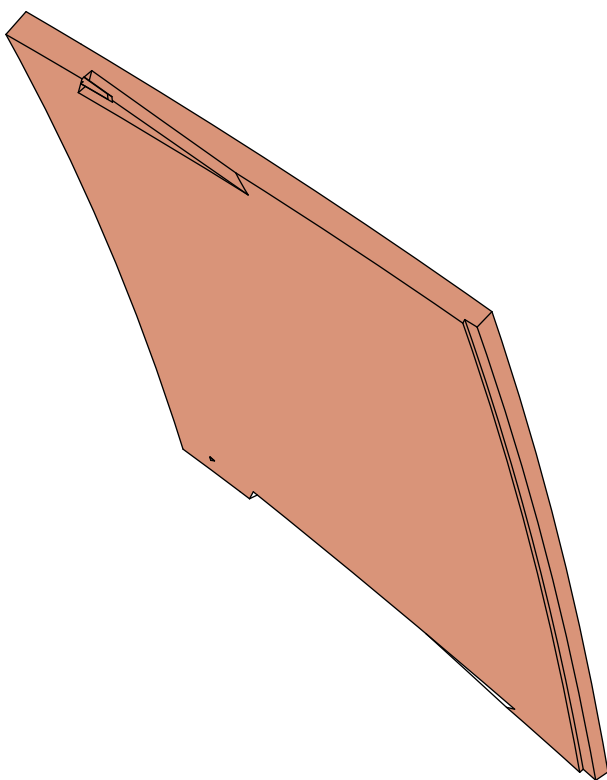
(455) Assemblaggio degli archi strutturali alla base con l'utilizzo di intermezzi stampati in 3D per evitare la deformazione del metallo.



(456) Incastro per travi principali



(457) Assemblaggio tra due travi secondarie attraverso un incastro "maschio-femmina".



(458) Pannello con sottrazione delle travi principali e secondarie per consentire l'incastro dei pannelli sul modello.

rischio di smontaggio o di incastro impreciso, infatti la corretta inclinazione della trave verrà garantita dalla precisione della stampa 3D (457).

Questa procedura ovviamente semplifica notevolmente la realizzazione di queste travi, rendendo necessario un solo giunto invece che i 2 che sarebbero stati necessari per unire le travi principali con le secondarie e successivamente le secondarie tra di loro.

A questo punto andranno giuntati anche i pannelli di finitura che saranno incastrati sfruttando una sottrazione booleana del profilo delle travi.

Infatti, per rendere questi pannelli perfettamente congruenti con la posizione delle travi ho estruso internamente i pannelli andando ad intersecarli con le travi, a questo punto ho creato delle copie delle travi negli stessi punti delle originali e ho sottratto queste copie dai pannelli.

Così facendo si sono creati dei solchi all'interno dei pannelli, i quali una volta ampliati leggermente tramite il comando premi e trascina, in modo da semplificare l'incastro saranno dei solchi perfettamente corrispondenti con la posizione delle travi (458).

A questo punto sarà sufficiente applicare un pò di colla e posizionare i pannelli.

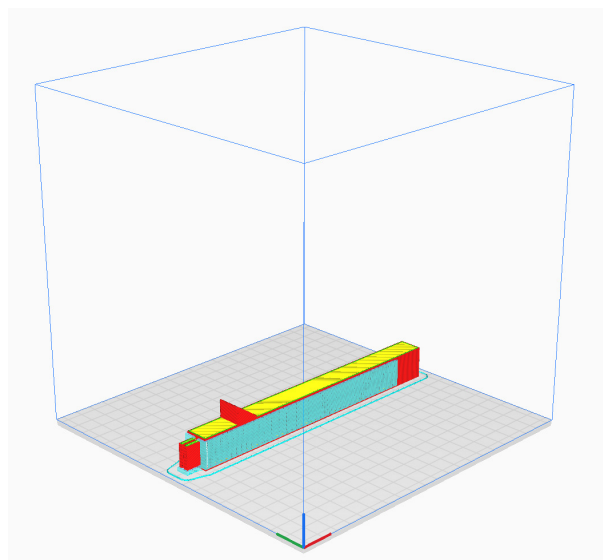
Per quanto riguarda i pannelli vetrati invece il processo sarà il medesimo con l'unica differenza che sarà solo il bordo del pannello che fungerà da telaio, mentre al centro dei pannelli ci sarà della plastica trasparente che verrà incollata su questi bordi.

Con questo ho completato il progetto della parte esterna del modello, per quanto riguarda l'interno invece ho realizzato prima i i pilastri HEA ho pensato di incastrarli nei buchi precedentemente realizzati nel basamento, questi pilastri saranno separati ogni 20 cm circa, questo per consentire il corretto posizionamento dei pilastri sul piano di stampa (459).

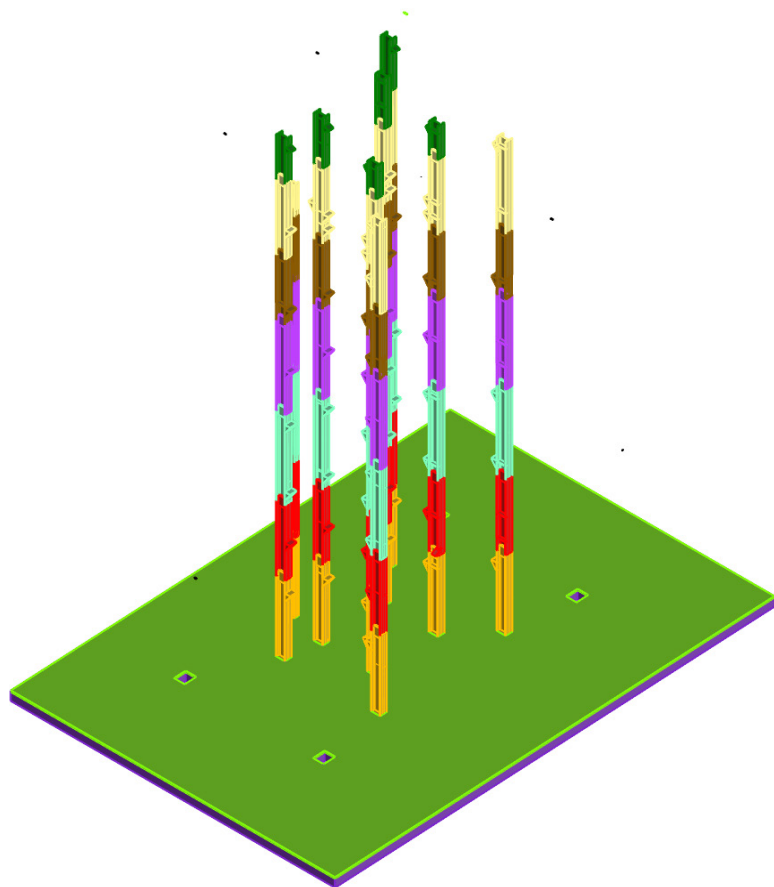
Infatti, la stampante a mia disposizione ha un piano di dimensioni 20 x 20, per cui per poter stampare questi pilastri in modo corretto e senza problemi è stato necessario crearne delle sezioni (460).

Per giuntare poi i pilastri tra loro sono stati aggiunti dei rinforzi laterali sui pilastri in modo da incastrare tra di loro le sezioni dei pilastri e ripristinandone la continuità (461).

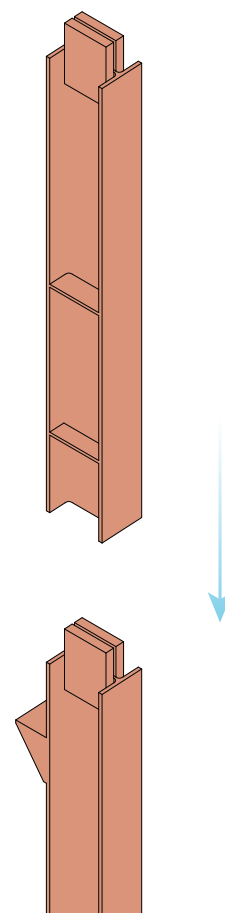
Una volta realizzati i pilastri mi sono concentrato sulla realizzazione delle scale, le quali, ovviamente stampate in 3D assieme alle travi laterali che le sorreggono e anche in questo caso sono state sezionate in blocchi di dimensioni adatte alla stampante (462).



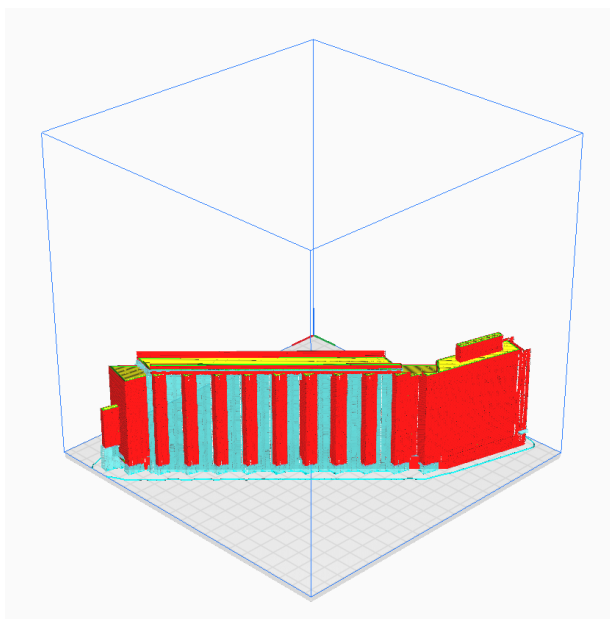
(459) Esempio di pilastro HEA posizionato sul piano di stampa nel software cura necessario per lo slicing



(460) Pilastri HEA sezionati all'interno del modello 3D



(461) Incastro tra due pilastri HEA



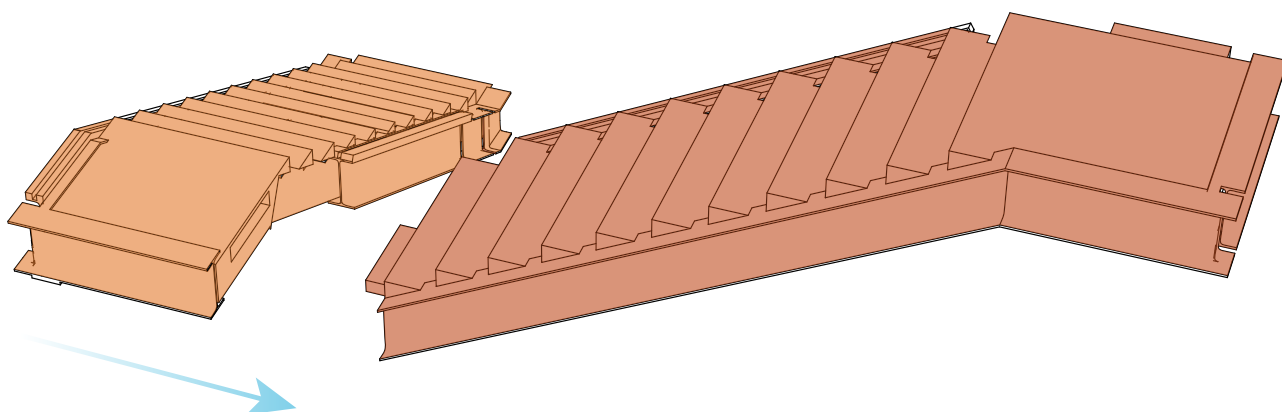
(462) Esempio di blocco scala posizionato sul piano di stampa nel software cura necessario per lo slicing.

Ovviamente anche in questo caso è stato necessario creare degli incastri “maschio-femmina” per poter connettere i vari blocchi scala tra loro (463).

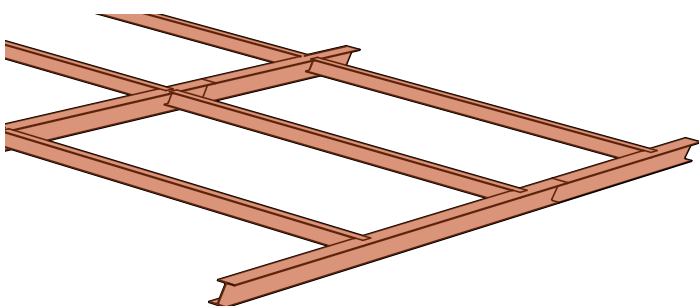
In seguito, ho realizzato le travi IPE che dovranno sorreggere i solai dei piani, inoltre ci sono anche le travi singole appoggiate semplicemente sui pilastri HEA.

Per quanto riguarda le travi che sorreggono i solai le ho stampate portando le travi secondarie in pari rispetto alle principali (464), questo per evitare la necessità di creare dei sostegni durante la stampa e soprattutto per avere un appoggio regolare per i solai.

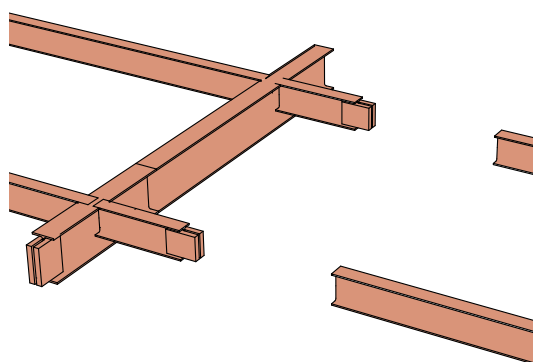
Inoltre, essendo queste travi troppo grandi per il piano di stampa anche in questo caso saranno sezionate e riassemblate con il medesimo sistema dei pilastri HEA (464).



(463) Incastro tra due blocchi scale



(464) Travi IPE che supportano i solai



(465) Incastri travi IPE che supportano i solai

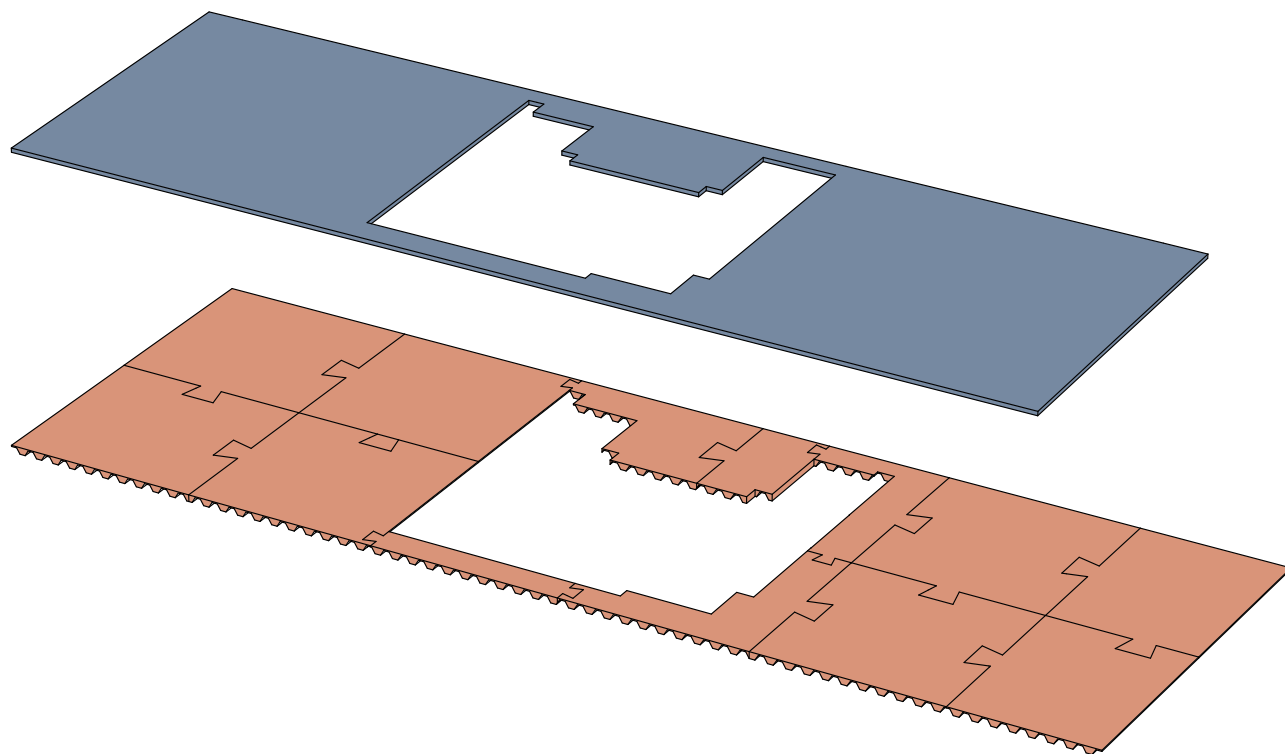
A questo punto ho analizzato come realizzare i solai, i quali essendo realizzati in lamiera grecata necessiteranno una stampa 3D anche in questo caso, per riprodurre la geometria della lamiera; tuttavia, considerato lo spessore molto importante dei solai, stampare interamente in 3D non era consigliabile.

Per questo motivo ho diviso il solaio in due parti, la prima stampata in 3D, in cui è inclusa la parte che simula la lamiera grecata, mentre la seconda più semplice sarà in legno vegetale.

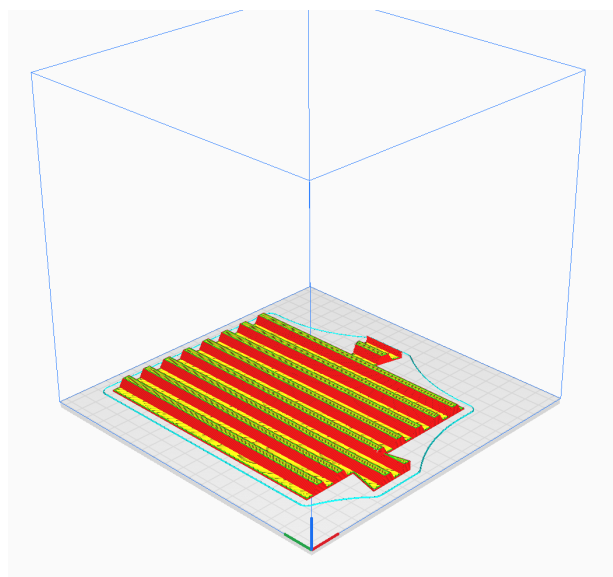
Gli spessori nello specifico saranno di 6 mm per quanto riguarda il solaio stampato in 3D e 4 mm per il solaio realizzato in legno vegetale [466].

Inoltre, ovviamente un solaio di queste dimensioni non sarebbe mai potuto

rientrare sul piano di stampa, per questo motivo ho creato una specie di puzzle, suddividendo i solai da stampare in diverse parti che potessero rientrare sul piano di stampa [467].



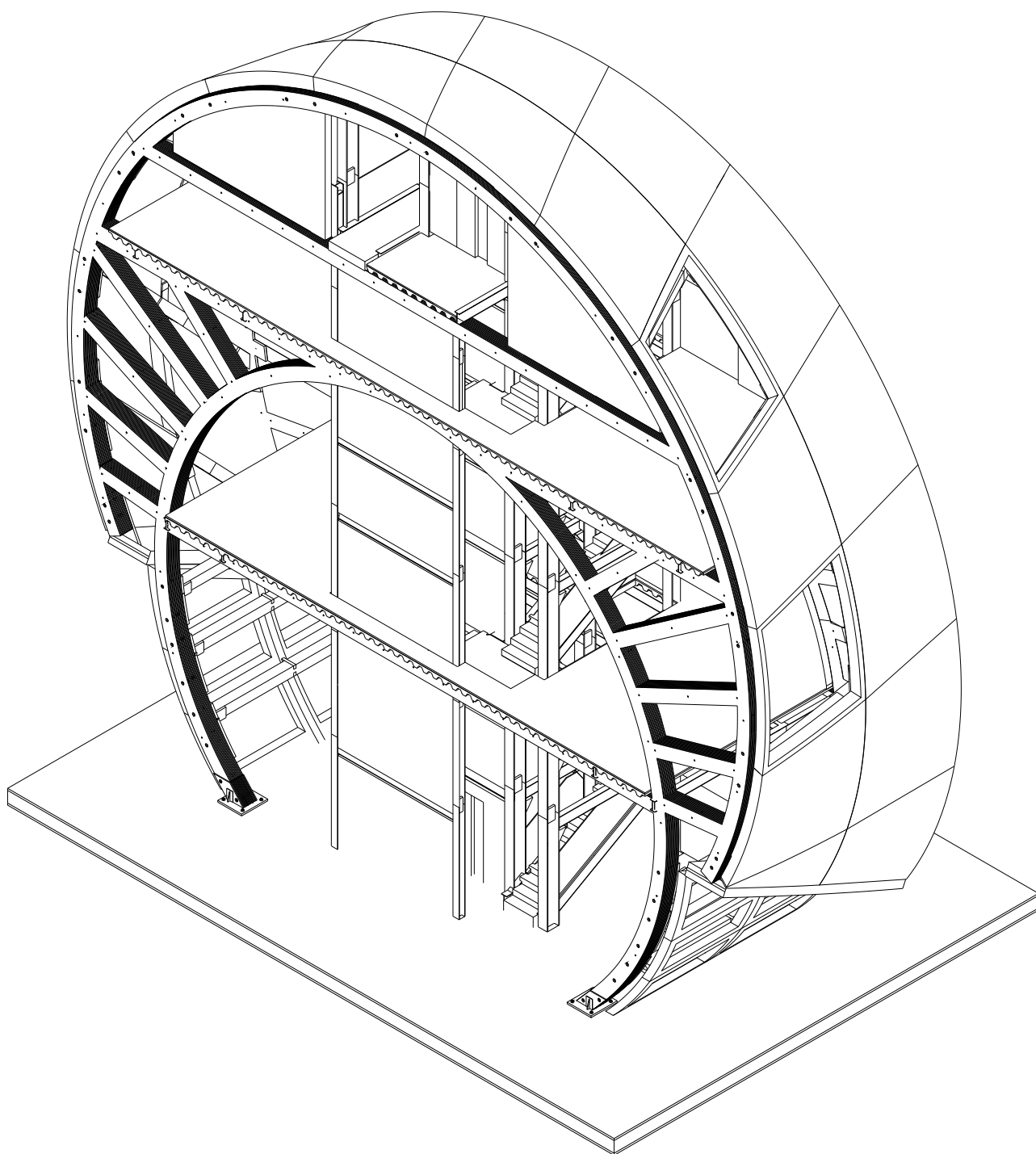
[466] Solaio secondo piano suddiviso in parti da stampare e da realizzare con cartone vegetale, che verrà tagliato a mano.



Come ultimi elementi ho realizzato i tamponamenti delle pareti tagliando manualmente i pannelli di cartone vegetale e andando a riempire i vuoti della parete che si affaccia sull'auditorium e del vano scale.

Sempre manualmente ho tagliato i corrimani delle scale in plastica trasparente e infine ho realizzato i controventi con del fil di ferro intrecciato ai pilastri HEA.

[467] Solaio in lamiera grecata sul piano di stampa nel software cura dedicato allo slicing



(468) Vista del modello completo

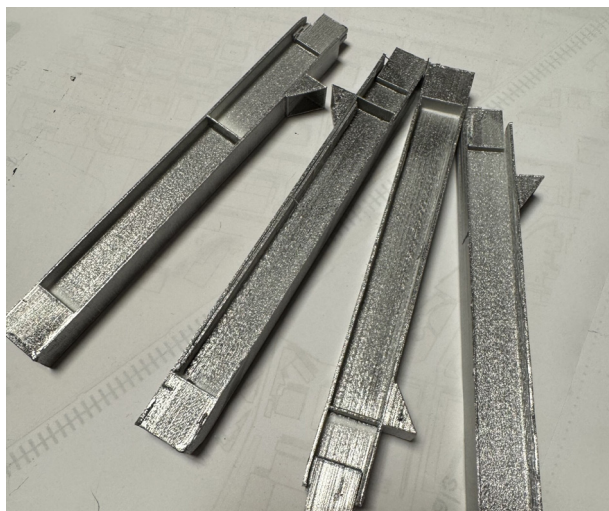
10.2 - Verniciatura e assemblaggio

Per questioni di verosomiglianza al manufatto di progetto, ho deciso di non limitarmi al semplice assemblaggio ma di utilizzare il colore per indicare sul modello i materiali utilizzati nella realtà per la costruzione dei singoli componenti.

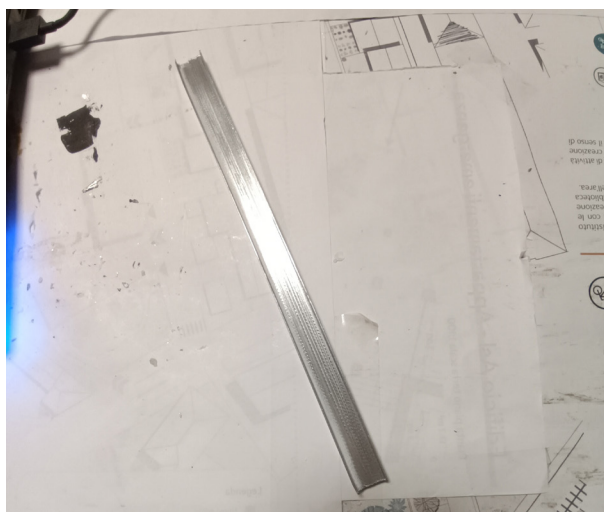
Per questo motivo, tutti i pezzi che nella realtà sarebbero in acciaio sono verniciati con una bomboletta spray di smalto acrilico effetto antichizzante che richiama il colore metallico, come ad esempio i pilastri HEA (469), le travi IPE (470) e persino le rondelle e i giunti posti alla base degli archi (471-472), oltre ovviamente alla prima metà dei solai realizzata in lamiera grecata (473).

La stessa logica è stata applicata a tutte le altre parti del modello, infatti anche le pareti che dividono la sala dedicata ad auditorium dalle sale confinanti sono state colorate di nero, anch'esse grazie ad una pittura acrilica, in modo da ricreare il colore visto nei rendering (474).

Man mano che completavo la verniciatura di diversi pezzi contigui, ho iniziato anche



(469) Pilastri HEA stampati in 3D e spruzzati con bomboletta spray metallizzata



(470) Travi IPE stampate in 3D e spruzzate con bomboletta spray metallizzata



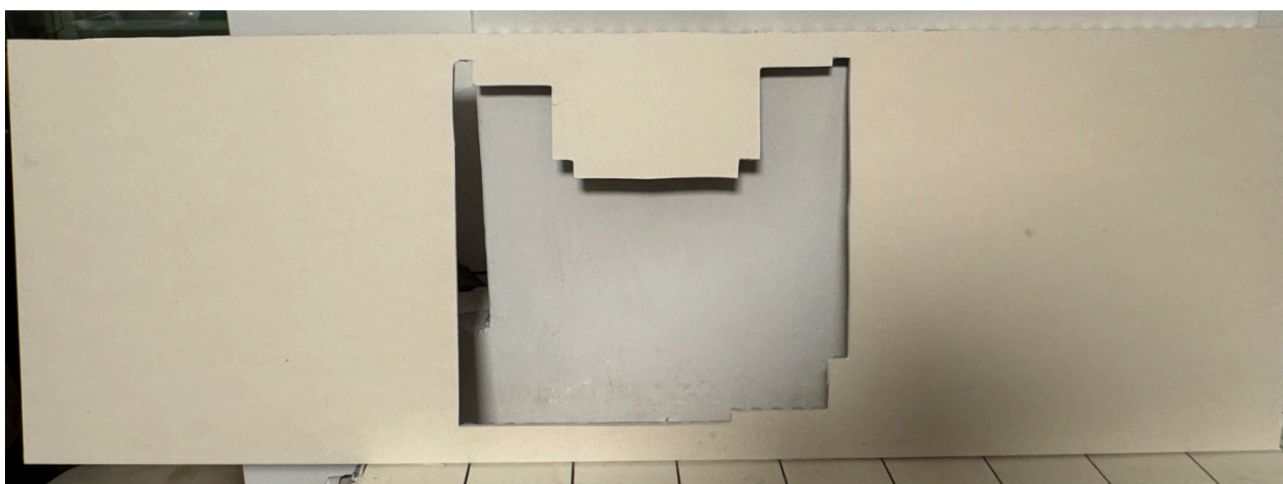
(471) Rondelle posizionate tra uno strato e l'altro degli archi



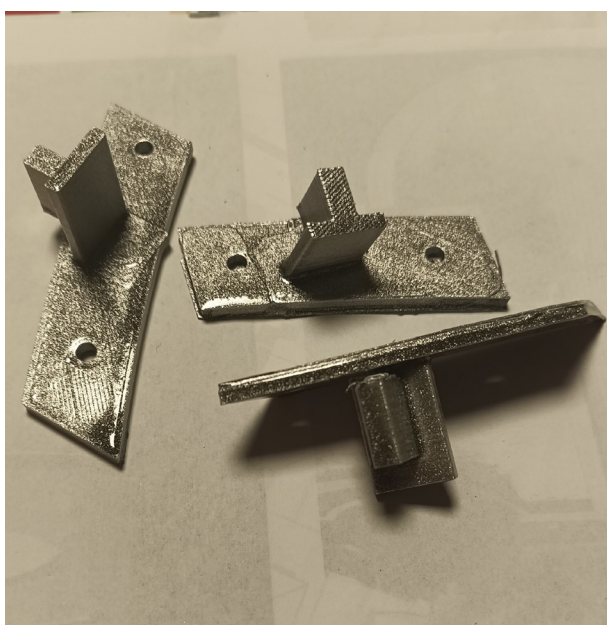
(472) Basette degli archi strutturali



(473) Solaio in lamiera grecata prima metà stampata in 3D



(474) Solaio in lamiera grecata seconda metà tagliata manualmente da un foglio di cartone vegetale



(475) Attacchi travi principali

la fase di assemblaggio, ovviamente continuando nel frattempo a verniciare gli altri pezzi.

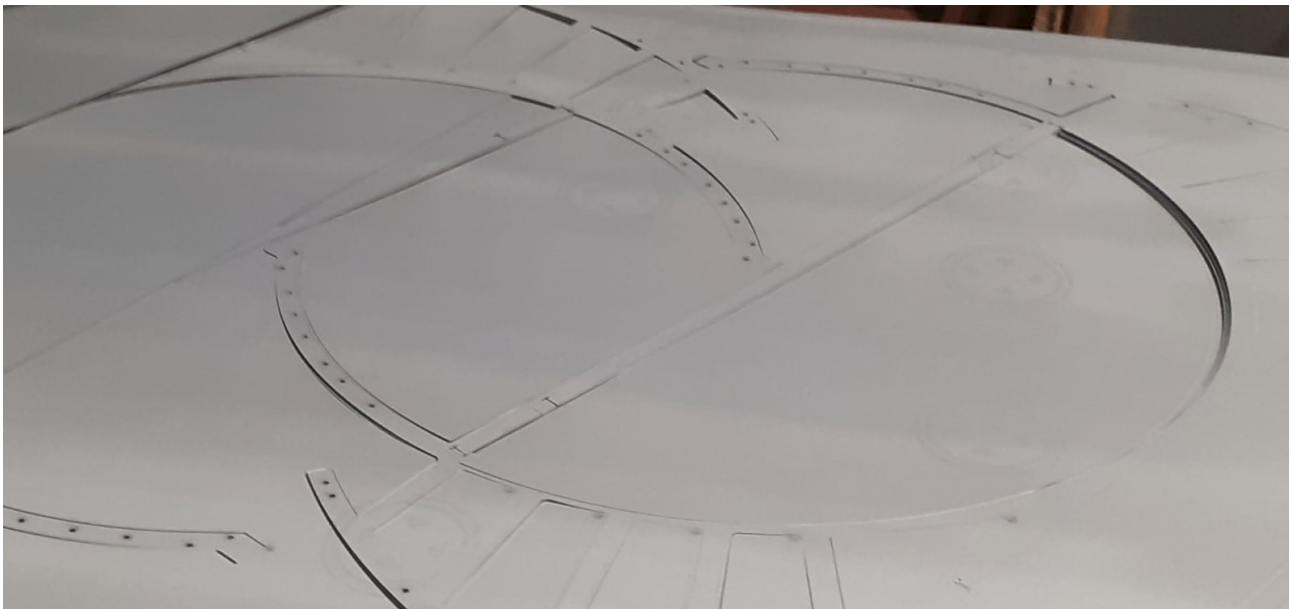
I primi pezzi che ho voluto completare sono le basette degli archi, le rondelle e gli attacchi per le travi principali (475).

Questo perchè erano i primi pezzi necessari per completare l'assemblaggio di entrambi gli archi strutturali, tagliati a laser (476-477) fondamentali per continuare poi il resto del modello.

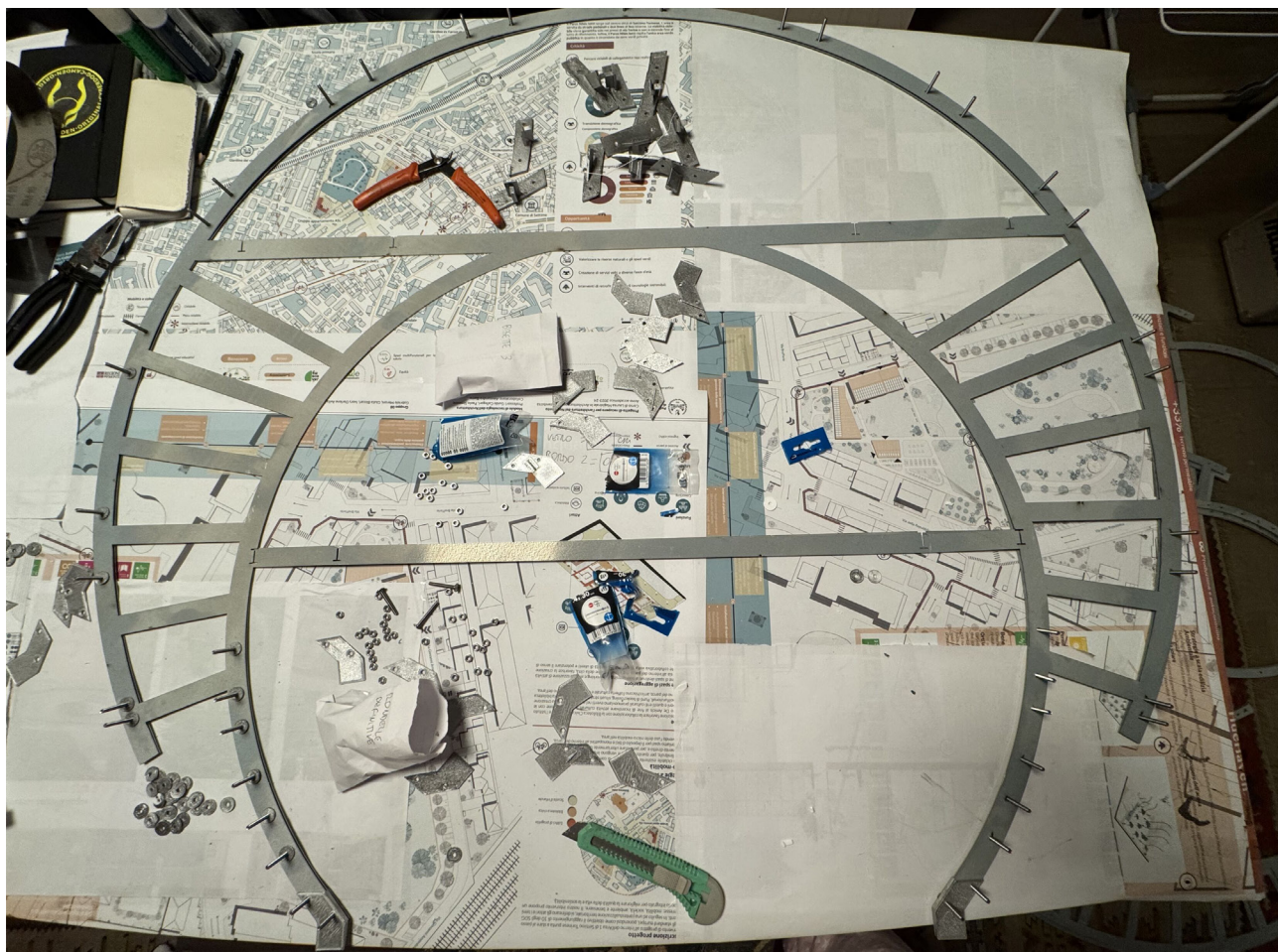
Una volta assemblati gli archi (478-479-480) per mantenerli in equilibrio e iniziare a montare il resto del modello gli ho inseriti negli appositi incastri realizzati nella base in legno tagliata a CNC in modo da garantire la massima precisione degli incastri (481).



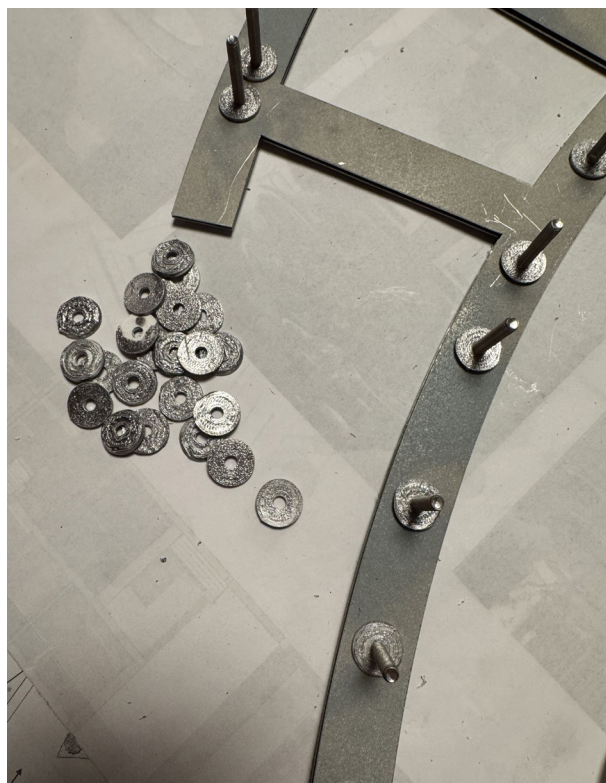
(476) Taglio a laser degli archi strutturali



(477) Archi tagliati in attesa della rimozione degli scarti



(478) Assemblaggio di un arco strutturale fase 1, posizionamento delle viti



(479) Assemblaggio arco strutturale fase 2



(480) Arco assemblato con giunti per le travi principali fase 3

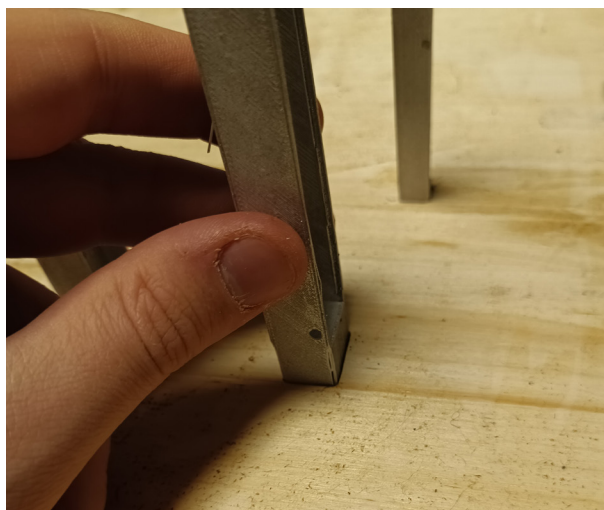


(481) Base in legno che sosterrà il modello

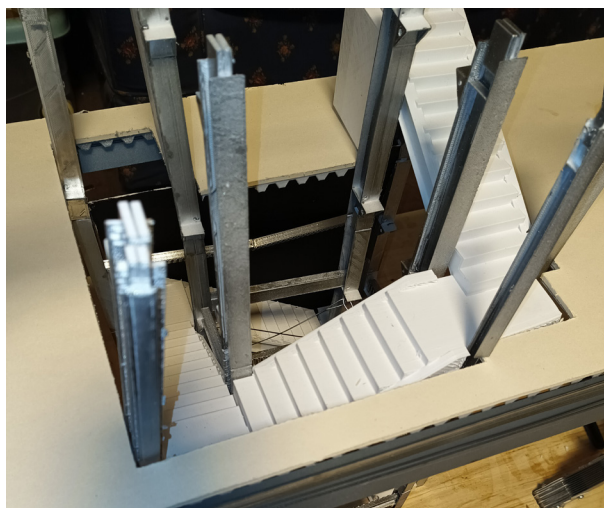
A questo punto ho inserito all'interno dei fori rimanenti la prima parte dei pilastri HEA (482), in modo da andare a inserire a ruota anche le prime due parti delle scale e i primi controventi (483).

A questo punto ho inserito anche le restanti parti di Pilastri HEA e di scale fino ad arrivare ad un'altezza vicina a quella del primo solaio.

Una volta posizionato correttamente il solaio ho posizionato anche travi IPE e muri di divisione presenti nella prima parte del modello, concludendo con i controventi realizzati in fil di ferro (486).

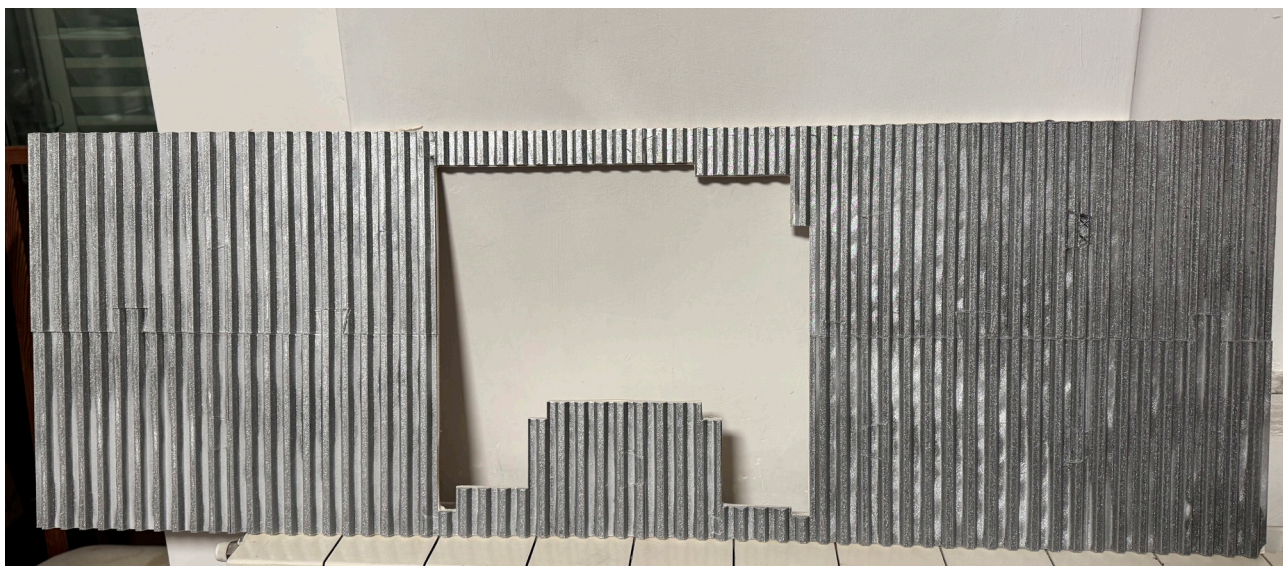


(482) Incastro pilastri HEA

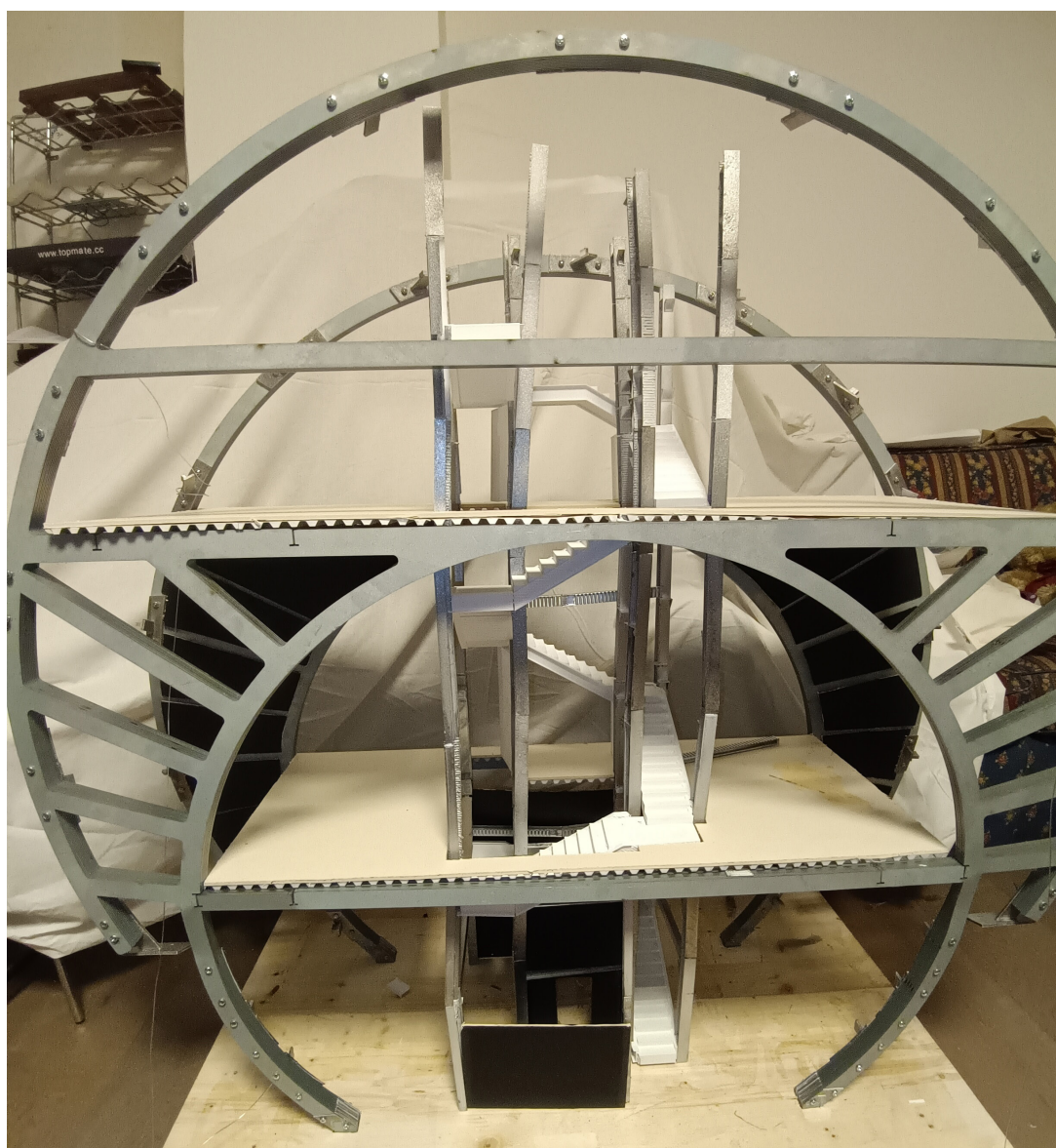


(483) Prima parte di scale e controventi assemblati

Una volta posizionati tutti questi elementi ho continuato ad assemblare pilastri HEA e blocchi di scale fino al secondo piano, e a questo punto ho ripetuto nuovamente l'operazione andando a posizionare il



(484) Solaio in lamiera grecata stampata in 3D e legno giuntati tra loro.



(485) Primo piano del modello completo

secondo solaio e successivamente tutti gli elementi di contorno come suddivisioni, travi IPE e controventi (486-487).

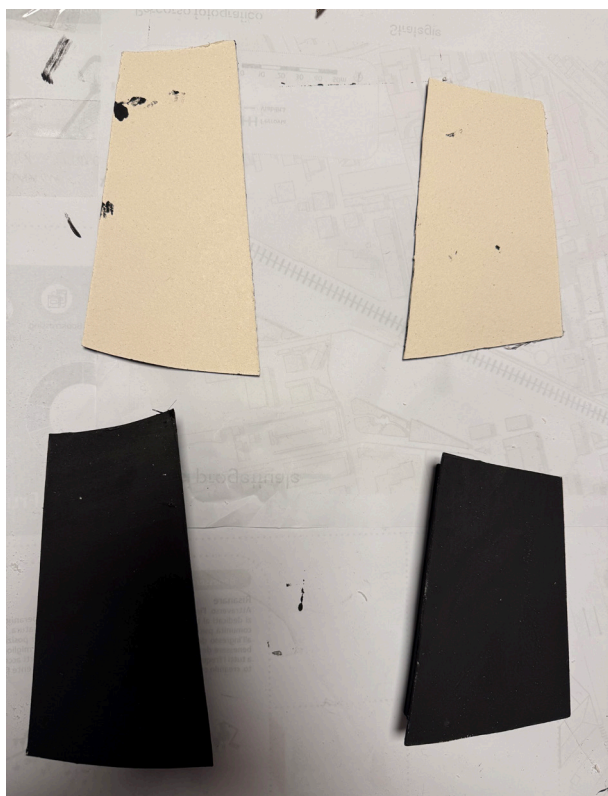
Successivamente ho posizionato le ultime parti di Pilastri HEA e infine gli ultimi dettagli che completano il vano scale (488).

A questo punto sono passato all'assemblaggio di tutti gli altri elementi di divisione tra i due ambienti, grazie a delle sagome che riprenderanno la sagoma creata dai raggi che connettono i due archi, creando dei "pacchetti" di riempimento realizzati in cartone vegetale, unendo tra loro più strati, in modo tale da riempire lo spazio interno e creando uno strato leggermente più grande sia da un lato che dall'altro, in modo che una volta incollati gli

strati siano perfettamente incastrati (489).

A questo punto ho iniziato a posizionare le travi principali, precedentemente assemblate alle secondarie attraverso il giunto stampato in 3D (490), infatti queste travi saranno perfettamente sovrapponibili alle principali.

Queste travi saranno composte da 3 strati ognuna e grazie a questi strati sarà possibile giuntarle tra loro, grazie ad un attento studio delle giunzioni (491-492) A questo punto ho realizzato anche dei piccoli elementi in tessuto per andare a simulare gli ingressi alla sala principale dell'auditorium (493).

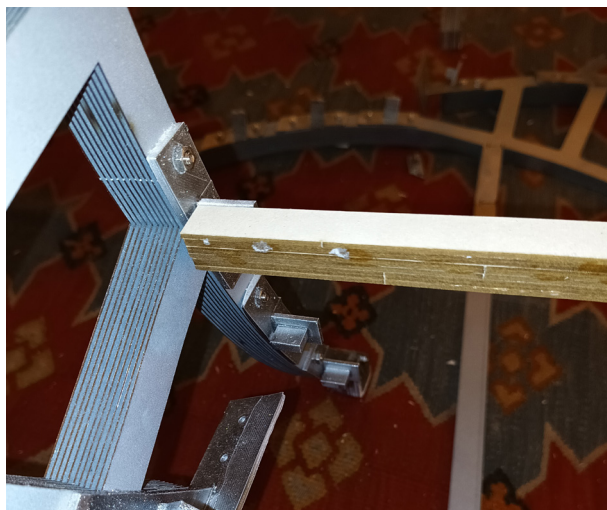


(486-487) Elementi di suddivisione degli ambienti

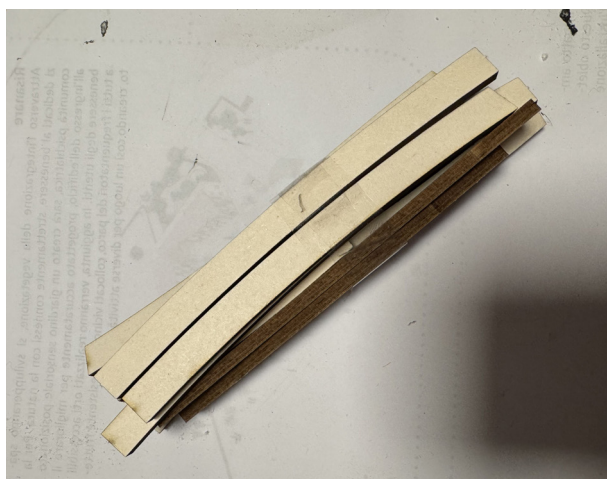




(488) Strati travi principali



(490) Giunzioni travi principali



(491) Elementi che compongono la trave secondaria



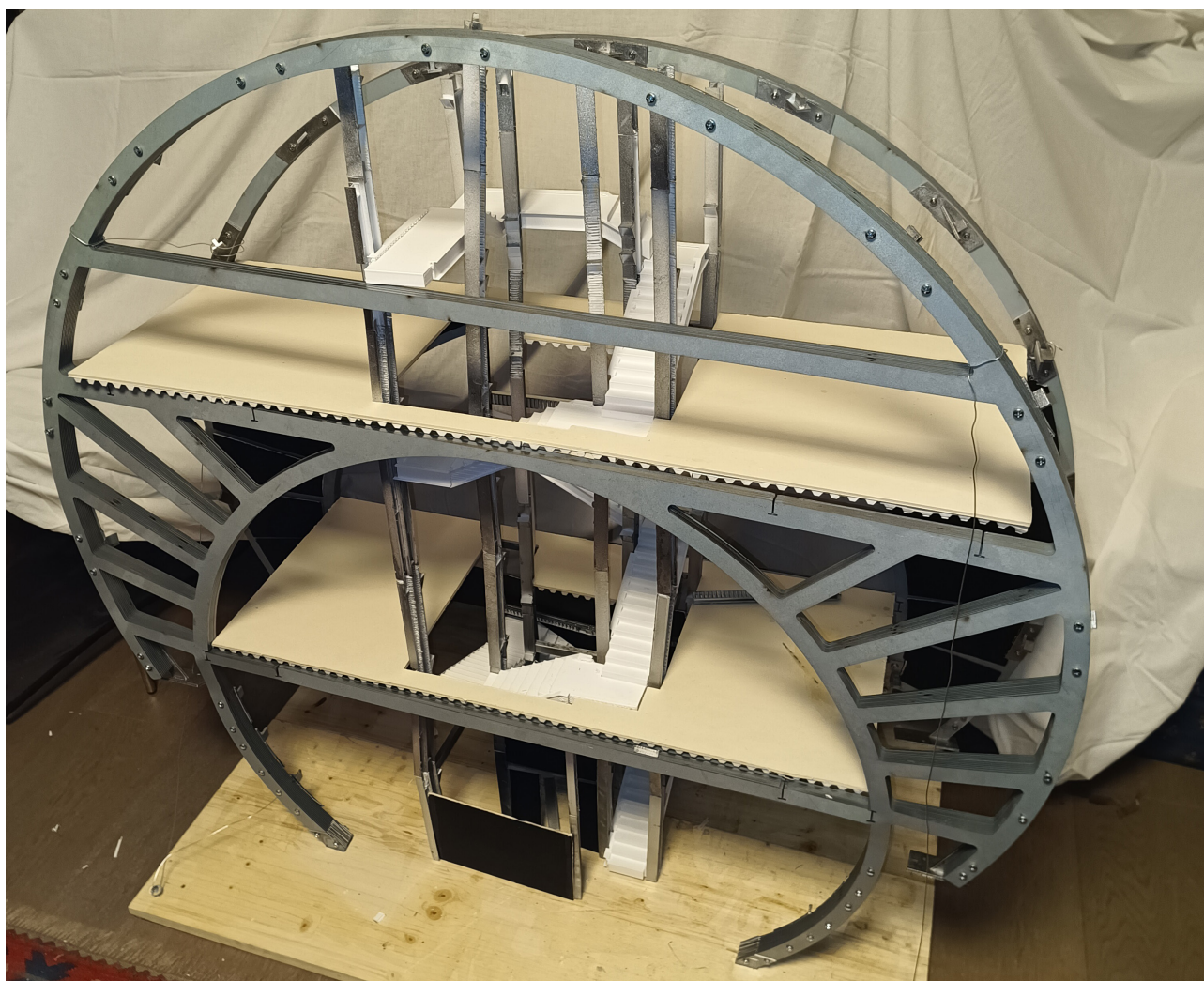
(489) Assemblaggio travi principali con secondarie

10.3 - Primo tentativo di assemblaggio

Dalle immagini del modello al completo (492-495) è possibile apprezzare come la struttura dell'architettura sia perfettamente rappresentata dal modello, e come questo aiuti anche una persona inesperta a comprendere al meglio le forme e il funzionamento dell'architettura. Questo genere di modelli, detti mock up in scala prototipi in scala, seppur molto ingombranti e di difficile realizzazione, come illustrato in queste pagine, sono

ingombranti e di difficile realizzazione, come illustrato in queste pagine, sono molto utili non solo per provare a realizzare delle anteprime dell'architettura, ma anche per la risolvere prima in scala ridotta i problemi che avremo poi nel realizzare l'edificio.

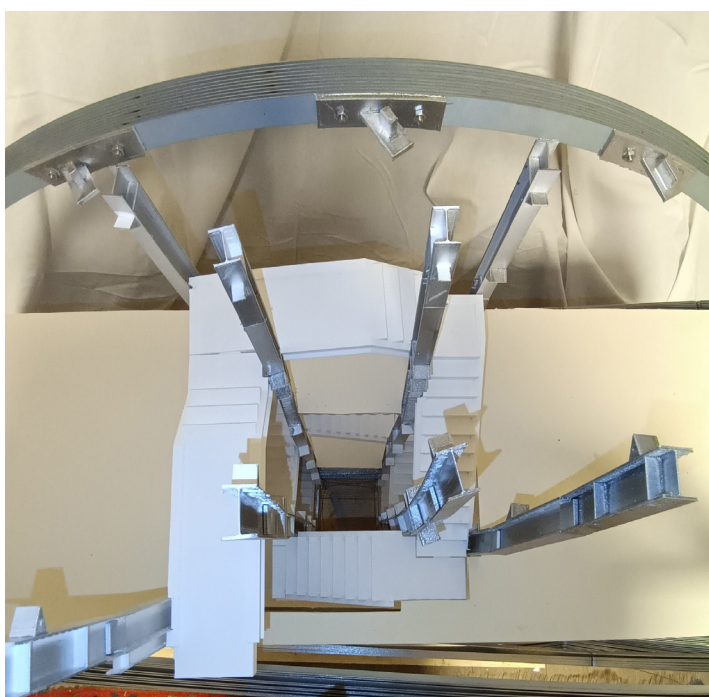
In seguito ho inserito le immagini del primo assemblaggio delle parti essenziali del modello (archi, solai, pilastri e blocchi scala).



(492) Vista modello



(493) Vista modello



(493) Vista vano scale dall'alto



[494] Vista modello

In seguito ho completato il modello aggiungewndo travi principali, travi IPE e tutti gli altri elementi compresi i tamponamenti, in modo da essere presentato durante la discussione di laurea.

Per quanto riguarda i pannelli di finitura invece sono stati realizzati solo come prototipi, essendo i tempi di stampa necessari estremamente lunghi.

Fonti

Elenco immagini con fonti complete

(450) Parte di edificio selezionata per realizzare il modello fisico (Fonte: elaborato di progetto)

(451) Base in lamiera con fori per le viti necessari all'assemblaggio (Fonte: elaborato di progetto)

(452) Base in legno in cui sono stati realizzati i fori per l'inserimento di archi strutturali e pilastri HEA (Fonte: elaborato di progetto)

(453) Disegno CAD realizzato per il taglio di uno dei due archi strutturali attraverso il taglio laser. (Fonte: elaborato di progetto)

(454) Assemblaggio degli archi strutturali con rondelle come intermezzi per evitare la deformazione del metallo. (Fonte: elaborato di progetto)

(455) Assemblaggio degli archi strutturali alla base con l'utilizzo di intermezzi stampati in 3D per evitare la deformazione del metallo. (Fonte: elaborato di progetto)

(456) Incastro per travi principali (Fonte: elaborato di progetto)

(457) Assemblaggio tra due travi secondarie attraverso un incastro "maschio-femmina". (Fonte: elaborato di progetto)

(458) Pannello con sottrazione delle travi principali e secondarie per consentire l'incastro dei pannelli sul modello. (Fonte: elaborato di progetto)

(459) Esempio di pilastro HEA posizionato sul piano di stampa nel software cura necessario per lo slicing (Fonte: elaborato di progetto)

(460) Pilastri HEA sezionati all'interno del modello 3D (Fonte: elaborato di progetto)

(461) Incastro tra due pilastri HEA (Fonte: elaborato di progetto)

(462) Esempio di blocco scala posizionato sul piano di stampa nel software cura necessario per lo slicing. (Fonte: elaborato di progetto)

(463) Incastro tra due blocchi scale (Fonte: elaborato di progetto)

(464) Travi IPE che supportano i solai (Fonte: elaborato di progetto)

(466) Solaio secondo piano suddiviso in parti da stampare e da realizzare con cartone vegetale, che verrà tagliato a mano. (Fonte: elaborato di progetto)

(465) Incastri travi IPE che supportano i solai (Fonte: elaborato di progetto)

(467) Solaio in lamiera grecata sul piano di stampa nel software cura dedicato allo slicing (Fonte: elaborato di progetto)

(468) Vista del modello completo (Fonte: elaborato di progetto)

(469) Pilastri HEA stampati in 3D e spruzzati con bomboletta spray metallizzata (Fonte: elaborato di progetto)

(470) Travi IPE stampate in 3D e spruzzate con bomboletta spray metallizzata (Fonte: elaborato di progetto)

(471) Rondelle posizionate tra uno strato e l'altro degli archi (Fonte: elaborato di progetto)

(472) Basette degli archi strutturali (Fonte: elaborato di progetto)

(473) Solaio in lamiera grecata sul piano di stampa nel software cura dedicato allo slicing (Fonte: elaborato di progetto)

(474) Solaio in lamiera grecata sul piano di stampa nel software cura dedicato allo slicing (Fonte: elaborato di progetto)

(475) Solaio in lamiera grecata sul piano di stampa nel software cura dedicato allo slicing (Fonte: elaborato di progetto)

(476) Taglio a laser degli archi strutturali (Fonte: elaborato di progetto)

(477) Archi tagliati in attesa della rimozione degli scarti (Fonte: elaborato di progetto)

(478) Assemblaggio di un arco strutturale fase 1 (Fonte: elaborato di progetto)

(479) Assemblaggio arco strutturale fase 2 (Fonte: elaborato di progetto)

(480) Arco assemblato con giunti per travi principali (Fonte: elaborato di progetto)

(481) Base in legno che sosterrà il modello (Fonte: elaborato di progetto)

(482) Basette degli archi strutturali (Fonte: elaborato di progetto)

(483) Prima parte di scale e controventi assemblati (Fonte: elaborato di progetto)

(484) Solaio in lamiera grecata stampata in 3D e legno giuntati tra loro. (Fonte: elaborato di progetto)

(486 487) Elementi di suddivisione ambienti (Fonte: elaborato di progetto)

(488) Secondo piano modello completo (Fonte: elaborato di progetto)

(489) Modello con vano scale completo (Fonte: elaborato di progetto)

(490) Strati travi principali (Fonte: elaborato di progetto)

(491) Elementi che compongono la trave secondaria (Fonte: elaborato di progetto)

(492 - 494) Viste del modello assemblato (Fonte: elaborato di progetto)

