



Università degli Studi di Napoli “Federico II”
Scuola Politecnica e delle Scienze di Base
Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale

Corso di Strutture per Edifici Alti e Grandi Coperture
Anno Accademico 2022 – 2023

Growth – Progetto di un sistema di edifici alti a Milano

Report

Docente

Prof.ssa Ing. Elena **Mele**

Tutor

Ing. Diana **Faiella**

Ing. Francesco **Esposito**

Ing. Fabrizio **Ascione**

Studenti

Tommaso **Petrella** – N51/964

Riccardo Maria **Polidoro** – N52/712

Sommario

1. Obiettivi dell'elaborato	1
2. Introduzione	1
2.1 Gli sviluppi della città futura: è necessario un cambio di paradigma?	1
2.2 Descrizione del sistema	3
3. Processo compositivo	4
4. Modularità	8
5. Struttura	9
5.1 Sistema pendolare	9
5.1.1 Impalcato e Analisi dei carichi	9
5.1.2 Travi secondarie e principali	13
5.1.3 Colonne/Tiranti	15
5.2 Diagonal truss (transfer truss)	15
5.3 Belt truss	18
Megacolonne	18
5.4 Sezioni utilizzate nei moduli	19
5.4.1 Megacolonne	19
5.4.2 Trave reticolare diagonale (struttura di trasferimento centrale)	20
5.4.3 Belt truss (struttura di trasferimento perimetrale)	21
5.5 Deformabilità	22
5.5.1 Limiti	22
5.5.2 Effettive	23
5.5.3 Spostamenti di piano e di interpiano nei vari moduli	24
5.6 Peso strutturale (unit steel)	27
5.6.1 Incidenza su peso complessivo edificio	27
6. Architettura	27
6.1 Edificio monomodulo	27
6.1.1 Uffici	28
6.1.2 Residenziale	28
6.2 Edificio polimodulo	29
6.2.1 Uffici	29
6.2.2 Residenziale	29
7. Soluzioni tecnologiche	30

8. Urbanistica	32
8.1 Obiettivi dell'intervento a scala urbanistica	33
8.1.1 Inclusione e integrazione sociale	33
8.1.2 Riqualificazione ambientale	34
8.1.3 Mobilità dolce	34
8.2 Il disegno dell'area di intervento e le connessioni con l'intorno	35
8.3 Parametri per la sostenibilità	36
8.4 Indicatori di sostenibilità considerati nel progetto	38
8.4.1 Energia	38
8.4.2 Risorsa idrica	39
8.4.3 CO ₂ ed altre emissioni	39
8.5 L'impianto di progetto	40
9. Sviluppi futuri	42
10. Conclusioni	43

1. Obiettivi dell'elaborato

La relazione in oggetto, a corredo del progetto di un sistema strutturale per edifici alti, verte sulla descrizione del percorso progettuale intrapreso durante il corso di Strutture per Edifici Alti e Grandi Coperture dell'A.A. 2022 – 2023, illustrando le interrelazioni tra architettura, struttura, urbanistica e studio delle soluzioni tecnologiche nella realizzazione dell'edificio. Il progetto, più che essere improntato alla realizzazione di un singolo edificio, vede le sue massime potenzialità nella modularità in pianta e in altezza, principio ritenuto cardine dagli scriventi per lo sviluppo della città futura. A seguito di un'attenta descrizione del sistema, del processo compositivo, del dimensionamento strutturale, degli studi funzionali sull'organizzazione planimetrica, delle soluzioni tecnologiche, viene descritta una possibile organizzazione urbana di un complesso di edifici che adottano detta tecnologia, proponendo infine diverse intuizioni e deduzioni che, se sviluppate in successive occasioni, potrebbero contribuire significativamente alla piena maturazione di un sistema strutturale innovativo che potrebbe plasmare e costituire l'ossatura delle città del domani.

Oltre ad essere strumentale alla descrizione del progetto, dunque, la presente relazione vuole servire da testamento e testimone per futuri sviluppi in materia, auspicando che il lavoro qui condotto e le strade tracciate possano servire da utile base per futuri sviluppi in materia di progettazione di edifici alti e, a una scala maggiore, per ciò che concerne la questione ambientale, il consumo di suolo e tutte le problematiche attinenti allo sviluppo delle città del XXI secolo, che potrebbero richiedere un totale cambio di paradigma.

2. Introduzione

Durante il corso di Strutture per Edifici Alti e Grandi Coperture, sono state illustrate diverse tipologie di sistemi strutturali ed altrettanti approcci per il dimensionamento e il progetto di edifici alti. In quest'ottica, complice la composizione del gruppo di lavoro e le più recenti tendenze nel campo della progettazione di nuovi edifici, sempre più incentrata sull'integrazione tra struttura e architettura e sull'elaborazione di soluzioni attente ai principi di sostenibilità ambientale, economica e sociale, si è scelto di elaborare una proposta progettuale fondata sulla versatilità, applicabile in diverse situazioni e conformazioni senza però limitare le possibilità di espressione architettonica, nel tentativo di ampliare le soluzioni adottate ai contesti più disparati, consentendo la realizzazione di edifici sempre rispettosi del contesto e dei linguaggi architettonici presenti attraverso ridotte modifiche al sistema qui presentato.

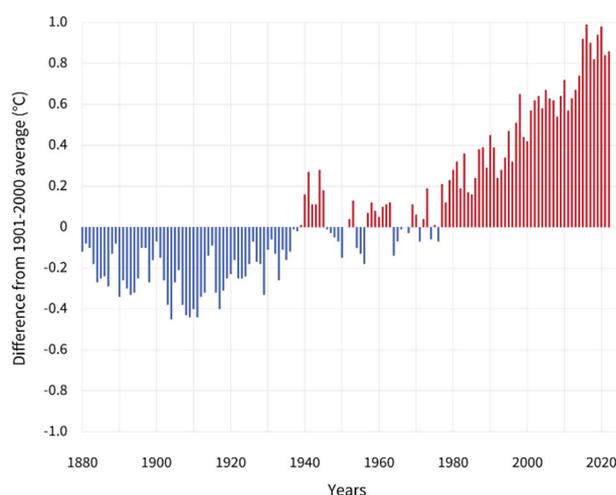
2.1 Gli sviluppi della città futura: è necessario un cambio di paradigma?

Il pianeta Terra è, oggi più che mai, oggetto di particolari attenzioni e preoccupazioni: il riscaldamento globale, tra le varie problematiche ambientali causate dall'industrializzazione, sta iniziando a compromettere definitivamente interi ecosistemi, come evidente dalla recente notizia sulla fioritura di piante in Antartide.



È necessaria un'azione tempestiva in materia, e il mondo delle costruzioni può e deve essere un volano: tra tutte le industrie, quella edile è responsabile per il 53% delle emissioni globali di CO₂, e il consumo globale dell'energia deriva per il 60% dagli edifici realizzati. Inoltre, un cambiamento del modo di costruire e pensare gli edifici si riflette in una modifica del sistema città nel suo complesso, attesa la natura olistica del sistema stesso.

GLOBAL AVERAGE SURFACE TEMPERATURE



Bisogna tener conto, ritenendo improbabile la possibilità di non costruire nuovi edifici – anche a fronte di un sensibile incremento demografico negli ultimi anni – della necessità di progettare nuove strutture in maniera intelligente, ponendo l'attenzione sul *Life Cycle Assessment*, sulla realizzazione di *Zero Energy Buildings* e sulla realizzazione di sistemi

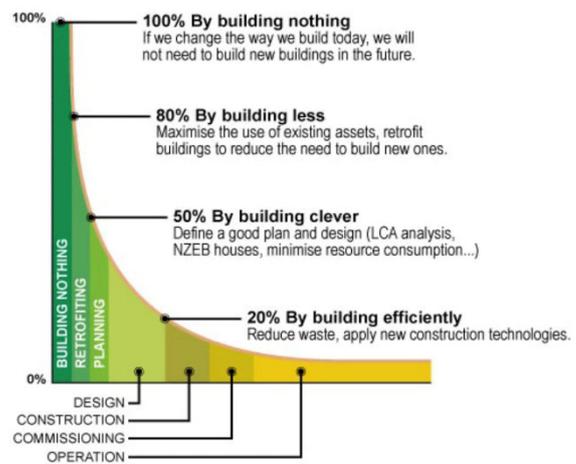
urbani sostenibili, incentrati su un minor consumo di suolo e sulla realizzazione di sistemi urbani stratificati ed integrati, in grado di rispondere alle esigenze funzionali di una città senza sacrificare quelle sociali ed ambientali, necessarie per garantire la sopravvivenza della vita umana.

La tipologia del grattacielo, nata a fine Ottocento per esigenze economiche e di rapida ricostruzione, si presenta oggi come un interessante punto di partenza in tal senso. Con la ridotta area di impronta, gli elevati rapporti di snellezza e il considerevole numero di piani e di altezze, l'edificio alto consente la vita contemporanea di numerose persone su una stessa area, riducendo sensibilmente il consumo di suolo. Risulta quindi fondamentale, a partire da questa tipologia edilizia, implementare sistemi sostenibili a livello sociale, ambientale ed economico, così da poter definire i primi passi verso la realizzazione di un nuovo sistema di città, in grado di rispondere alle esigenze della contemporaneità.

A ciò si aggiunge la necessità di rivoluzionare l'intero sistema dell'industria edile: al giorno d'oggi, circa il 50% dei materiali prodotti nell'Unione Europea sono impiegati per attività edilizie; risulta quindi che, nel caso in cui fosse possibile realizzare edifici con materiali recuperati da opere già realizzate e dismesse, sarebbe possibile ridurre sensibilmente anche l'estrazione e la produzione di materiali e l'impatto connesso a questi aspetti dell'industria edile.

Tradurre un edificio alto in un elemento spaziale poroso, in grado di cogliere la complessità e la spazialità del sistema urbano, consente di elevare efficacemente la città in altezza, sollevandola da terra e costruendo sistemi articolati e attenti alla tematica ambientale: la sfida recente, più che la corsa in altezza, è la definizione di una *mixité fonctionnelle*, una commistione tra funzioni pubbliche, private, attrezzature in grado di consentire il completo espletarsi delle attività umane in un singolo sistema, adottando soluzioni per la gestione e il controllo di flussi differenti e per la sicurezza di utenti e residenti. Il suolo così risparmiato può essere dedicato a una riforestazione, eventualmente integrata a spazi pubblici: il verde urbano è, oggi più che mai, un elemento funzionale per la mitigazione del cambiamento climatico, dell'effetto *isola di calore*, riducendo la concentrazione di gas serra, intrappolando le polveri sottili, aumentando i comfort ambientale e migliorando la gestione del ciclo dell'acqua.

How to reduce the carbon emitted at each stage

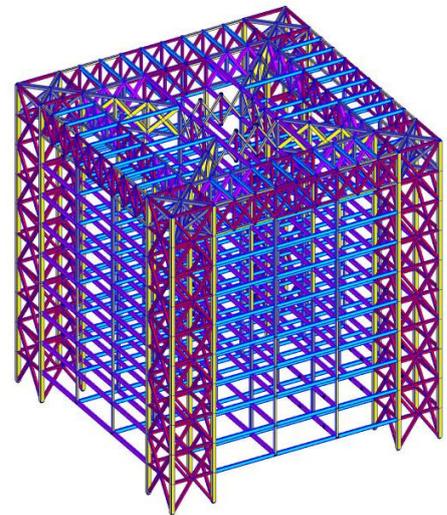


- LIFE CYCLE THINKING** ✓
- CONTROLLO DI PERFORMANCE, IMPATTI E COSTI LUNGO TUTTO IL CICLO DI VITA
- ✓ SMONTABILITÀ
 - ✓ TECNICHE E MATERIALI SOSTENIBILI
 - ✓ FACILE MANUTENZIONE
 - ✓ RIPARABILITÀ IN SEGUITO A TERREMOTI
 - ✓ MASSIMA FLESSIBILITÀ
 - ✓ ADATTABILITÀ

L'edificio alto appare quindi come elemento fondamentale della *città compatta* che, fondata sui valori della densità, dell'incontro e della prossimità, si qualifica come modello sostenibile di crescita delle città. Il modello, da rielaborare alla luce delle nuove esigenze sociali ed ambientali e della carenza di aree che sappiano interpretare i nuovi stili di vita e i bisogni della città attuale, insieme ad aree per lo sport, per il tempo libero, per la predisposizione di grandi eventi, per il riequilibrio climatico e ambientale, può vedere nell'edificio alto la base di ulteriori e nuovi sviluppi, definendo un'intersezione tra *città compatta* e *città aperta*: grazie allo sviluppo verticale si riesce a preservare porzioni di suolo libere dal costruito, da poter destinare a verde e spazi pubblici, coniugando la densità edilizia con la componente naturale.

2.2 Descrizione del sistema

Il sistema elaborato consiste in una composizione di moduli *superframe*, di pianta 40.3x40.3 m (distanza tra gli assi delle colonne perimetrali) e di altezza 45 m per 10 piani, costituito da un megatelaio composto da quattro megacolonne d'angolo e una cintura reticolare di collegamento irrigidita da un sistema reticolare che occupa le diagonali del quadrato in pianta. Il sistema sorregge a sua volta gli impalcati del modulo, appesi tramite tiranti al megatelaio. In questo modo, le strutture di impalcato possono essere progettate a soli carichi verticali ed è possibile minimizzare l'ingombro strutturale delle colonne (che, essendo in trazione, possono essere progettate senza tener conto dell'instabilità flessionale a compressione) e mantenere i primi livelli totalmente liberi, così da poter definire degli spazi aperti pubblici alla base di ciascun modulo. In tal senso, i tiranti di piano consentono anche di poter rimuovere alcuni campi di solaio per realizzare spazi pubblici a doppia o tripla altezza, definendo delle vere e proprie piazze o aree verdi in quota. In previsione dell'assemblaggio di più moduli, la struttura reticolare diagonale di trasferimento è costituita da un blocco reticolare centrale a pianta quadrata che, consentendo lo svuotamento della campata centrale, costituisce una predisposizione per il blocco scala-ascensori di collegamento tra moduli e, in soluzioni particolarmente snelle, per il posizionamento di un nucleo centrale (in questo modo, la struttura di trasferimento funge anche da trave outrigger, coinvolgendo le megacolonne d'angolo).



3. Processo compositivo

L'idea progettuale è stata delineata ispirandosi alla *Ville Radieuse* di Le Corbusier, un progetto urbanistico visionario concepito dall'architetto svizzero-francese negli anni '30. Caratterizzato da un approccio modernista e funzionalista, il progetto propone una città ideale basata su un concetto di pianificazione urbana che



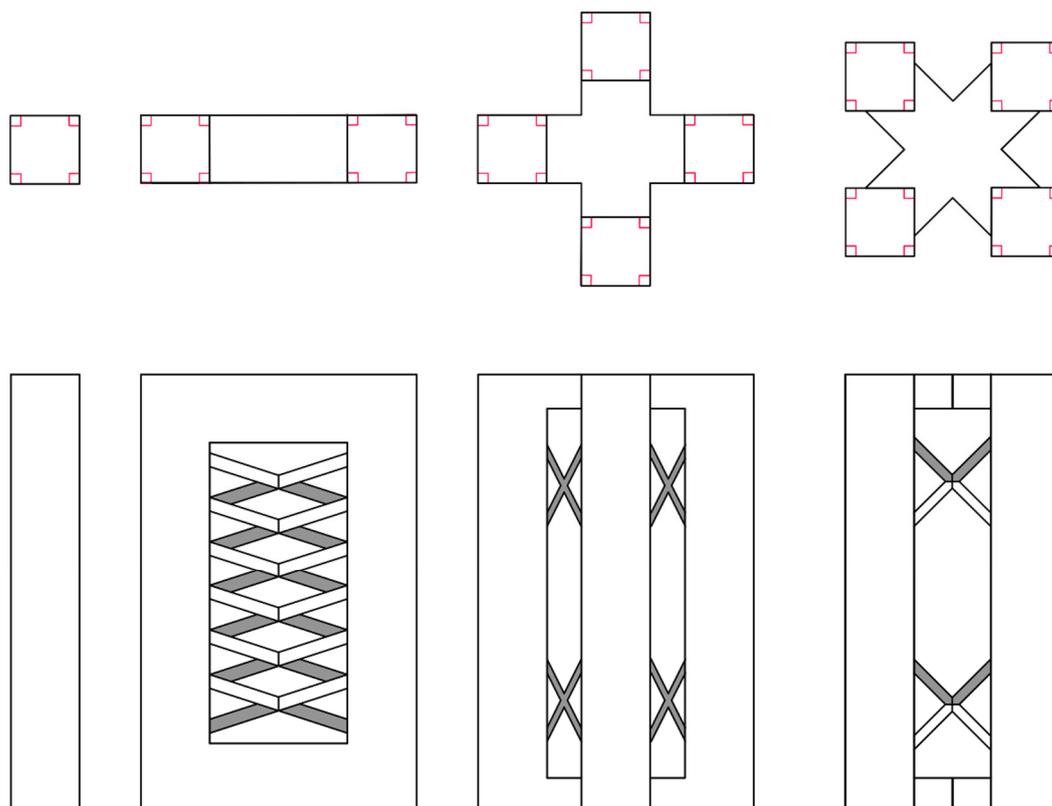
enfattizza nella sua organizzazione modulare la razionalità e l'efficienza, con grattacieli isolati circondati da ampi spazi verdi e soluzioni votate alla massima utilizzazione del suolo e alla realizzazione di un ambiente urbano armonico. L'idea centrale è quella di separare le funzioni della città in diverse zone specializzate, creando una divisione chiara tra residenze, aree commerciali e spazi pubblici. In particolare, l'organizzazione urbana prevede un progressivo incremento delle altezze degli edifici verso il centro della città, immaginato come centro direzionale, commerciale e amministrativo; seguono edifici a destinazione funzionale mista e, nei punti più periferici, a destinazione prevalentemente residenziale.

Volendo adattare il progetto di una singola torre, ispirata a quelle lecorbusiane, alle esigenze della città del XXI secolo, si è pensato di realizzare una *machine à abiter* organizzata in diversi moduli elementari a differente destinazione d'uso (residenziale, uffici, spazi pubblici, svago, commercio) per ogni piano, secondo il principio di integrazione della città nell'edificio: un aggregato di torri si costituirebbe come un intervento a scala urbana, da cui la necessità di integrare spazi di lavoro, del commercio, dello svago e di accoglienza, oltre a efficaci connessioni coi sistemi di trasporto pubblico locale presenti sul territorio.

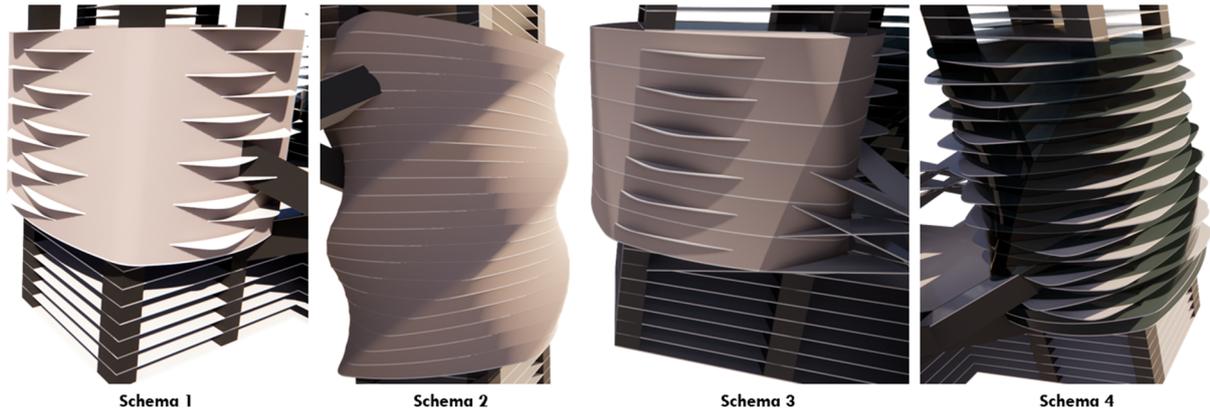
La prima idea di lavoro verteva su un complesso formato da due torri di 64 piani ciascuna unite da un blocco basamentale a destinazione commerciale e collegate in quota da *sky bridges* inclinati, prevedendo una superficie complessiva di 91200 m² divisi tra attività di svago, di accoglienza, funzioni del terziario e attività residenziale. Detto schema risultava eccessivamente statico, privo dei concetti di modularità e libertà organizzativa ispiratori della fase ideativa. Da questa prima soluzione, complice l'obiettivo di realizzare tipologie edilizie differenti per poter idealmente progettare un aggregato urbano di edifici fondati sulla stessa tecnologia, sono state elaborate quattro tipologie di edificio alto, prevedendo la possibilità di collegare più torri alla base e in cima con degli elementi di 5-10 piani, con l'obiettivo di raggiungere altezze sempre maggiori. Difatti, considerando ogni torre come un *superframe* autonomo, gli elementi di collegamento tra torri consentirebbero di rendere i

singoli sistemi parte di un mega-sistema strutturale che coinvolge le torri come megacolonne di un edificio di scala maggiore.

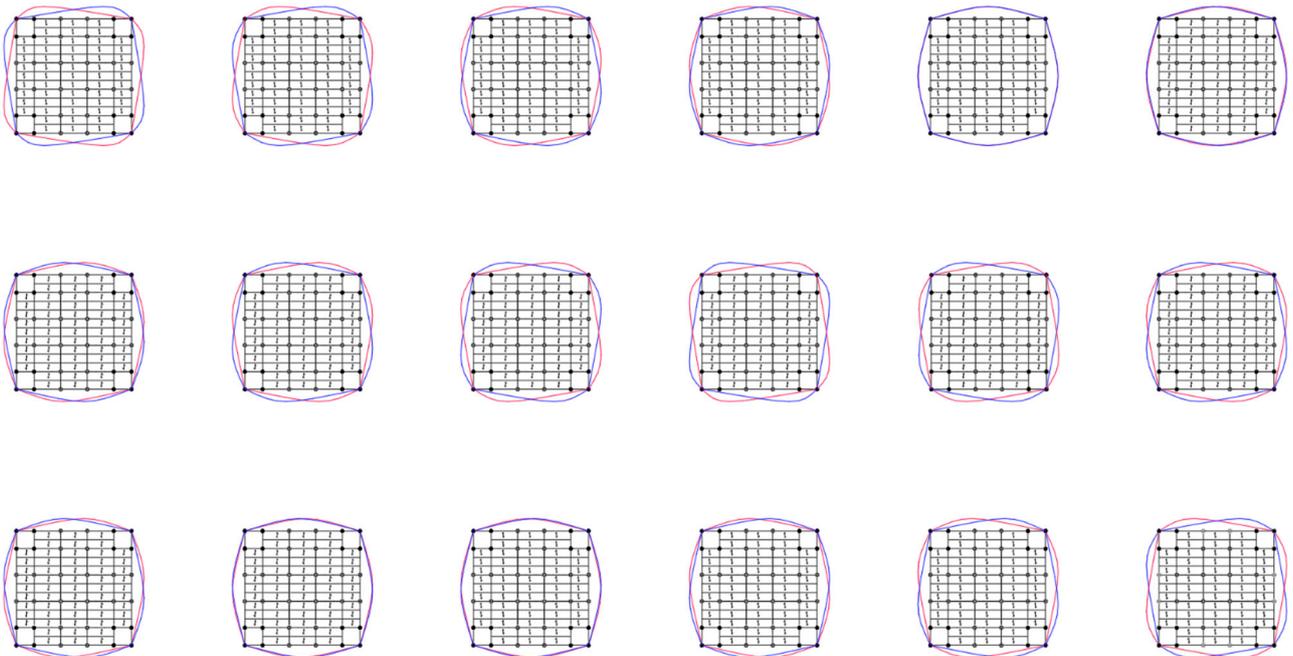
Come visto nel progetto lecorbusiano, la singola torre occuperebbe così le aree laterali dell'intervento urbano, essendo tendenzialmente soggetta – come intuibile dagli studi di Fazlur Khan e di Ali e Moon – ad un limite di efficienza in altezza più basso rispetto alle altre tipologie; progredendo verso il centro, si prevede di disporre dei moduli a torri accoppiate come elementi di transizione verso il vero



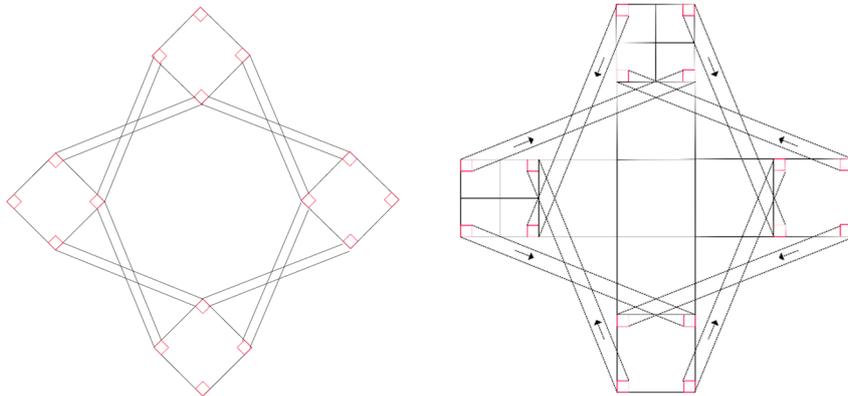
e proprio centro dell'impianto, caratterizzato da torri organizzate in una pianta a croce greca così da massimizzare l'inerzia del sistema, consentendo idealmente di realizzare edifici di altezze considerevoli e che rappresenterebbero il fulcro dell'impianto.



Una volta definita la matrice progettuale del sistema complessivo, si è scelto di operare in parallelo tra architettura e struttura: in particolare, uno degli scopi del progetto verteva sul realizzare una soluzione strutturale autonoma rispetto al disegno di facciata, prevedendo nel calcolo le possibilità di inserire sbalzi considerevoli ed incentrando le scansioni di facciata sulla realizzazione di un sistema con esoscheletro esterno. In questo modo, il sistema si presta alle applicazioni architettoniche più disparate, mostrandosi capace di adattarsi ad ogni luogo e ad ogni contesto. Sono state elaborate quattro proposte di facciata, tutte basate su un'alternanza nella scansione dei solai e della facciata così da realizzare dei pozzi di luce o altre aperture a doppia e tripla altezza in grado di mettere in comunicazione più livelli dell'edificio. Tra questi, si è scelto di optare per lo Schema 4, basato su una rotazione progressiva della facciata, di base quadrangolare smussata, nella quale si innestano due sistemi contrapposti di solai che ruotano a loro volta con lo stesso passo della facciata. Essendo tale soluzione caratterizzata da sbalzi di oltre 11 m, si è poi optato per una soluzione basata sullo stesso effetto geometrico ma realizzata con sbalzi entro i 4.5 m, determinando l'andamento riportato di seguito (in blu l'andamento della facciata, in rosso quello dei solai).

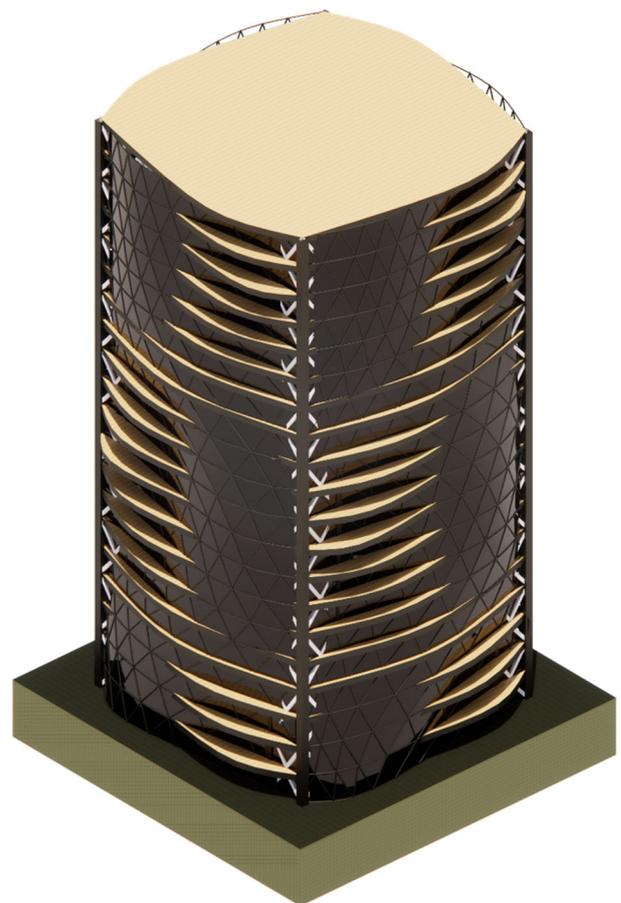


A questa è seguita una fase di studio e selezione degli *sky links* in quota nella soluzione a quattro torri, puntando alla realizzazione di collegamenti tra torri caratterizzati da una zona centrale panoramica e di aggregazione da cui potersi orientare nella prosecuzione del percorso. A seguito dell'elaborazione di diverse alternative progettuali, sono state selezionate le seguenti tipologie per i due schemi di gruppi di quattro torri:



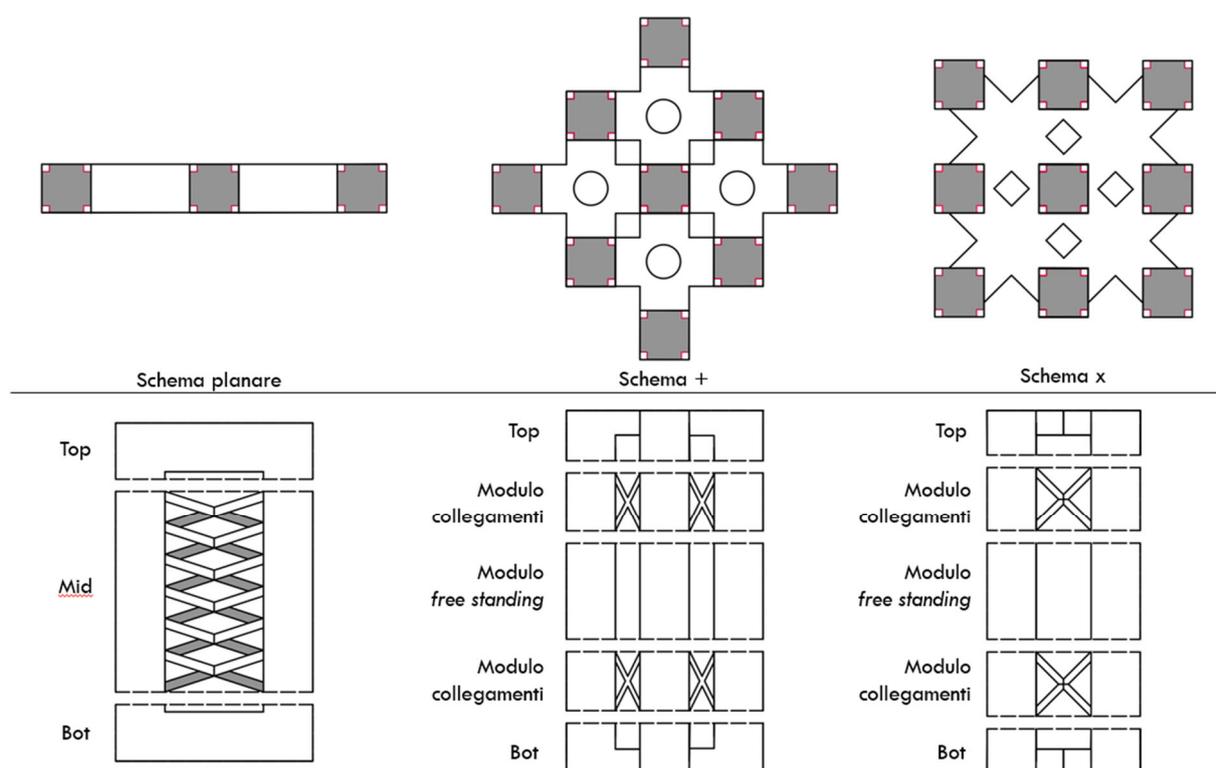
Entrambi i sistemi sono caratterizzati da collegamenti a X in pianta e in sezione (ovvero costituiti da rampe sia ascendenti che discendenti per ciascun allineamento) che definiscono uno spazio d'incontro centrale, fulcro direzionale nei percorsi tra torri e punto nodale per esperire il panorama circostante.

Come anticipato, la fase compositivo-organizzativa del progetto si è conclusa con la delineazione di un esoscheletro esterno votato esclusivamente alla funzione di sostenere la facciata vetrata, definendo un edificio dalle linee sinuose e con un profilo elicoidale così da meglio accogliere le correnti d'aria alle varie altezze.



4. Modularità

Ricordando quanto già accennato, uno dei punti di svolta nella delineazione dell’impianto compositivo del progetto deriva dall’organizzazione di un assetto urbanistico basato sui sistemi ideati, riprendendo la *Ville Radieuse*. Da detta idea, complice la modularità del sistema strutturale della singola torre, è scaturita quella di definire una modularità in orizzontale, oltre che in verticale: utilizzando gli schemi individuati in precedenza come matrice, si è scelto di scomporre ogni edificio in unità costitutive (per definirne una modularità compositiva in altezza, basata sulle esigenze funzionali del singolo edificio) e di realizzare delle proposte di aggregati sviluppati in orizzontale oltre che in verticale, in grado di definire delle vere e proprie città collegate su più livelli. Particolarmente suggestiva è stata l’elaborazione dello “Schema +”, riportato di seguito, in cui si ipotizza un sistema di torri progressivamente meno alte che sorreggono a vari livelli quella centrale, determinando varie piazze e collegamenti a più quote tra gli edifici e definendo un vero e proprio sistema edilizio urbano, con articolazione complessa.



Il principio di modularità è stato applicato anche al sistema strutturale, organizzato in più moduli cubici sovrapponibili e caratterizzati da un megatelaio che sorregge nove impalcati tramite tiranti. In questo modo, al variare delle esigenze urbanistiche dell’area di progetto, è possibile definire torri di diversa altezza semplicemente ripetendo il modulo elementare. Inoltre, in virtù della semplice ripetibilità del sistema, è anche possibile realizzare l’edificio in più fasi temporali, realizzando il modulo di base con le dimensioni necessarie per sostenere l’edificio *target* previsto e consentendo di proseguire il cantiere

anche in più periodi temporali (l'applicazione si presta particolarmente a città in espansione o caratterizzate da una forte crescita demografica, in quanto è possibile aumentare la capacità urbanistica del singolo lotto, potenzialmente azzerando il consumo di suolo), complice la quasi totale autonomia dei singoli moduli anche dal punto di vista impiantistico, sociale, funzionale.

5. Struttura

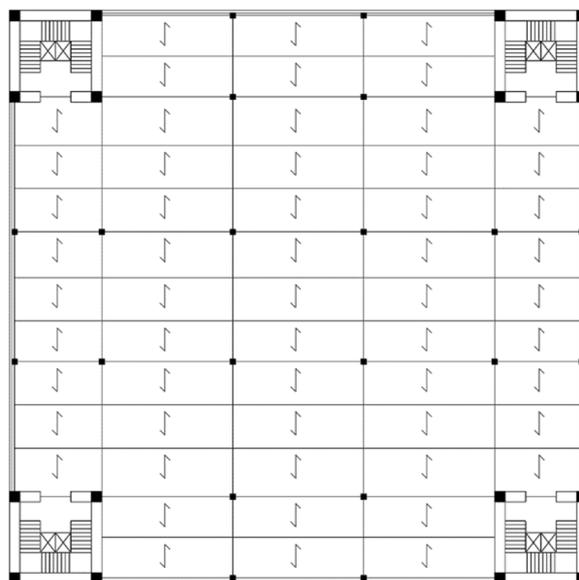
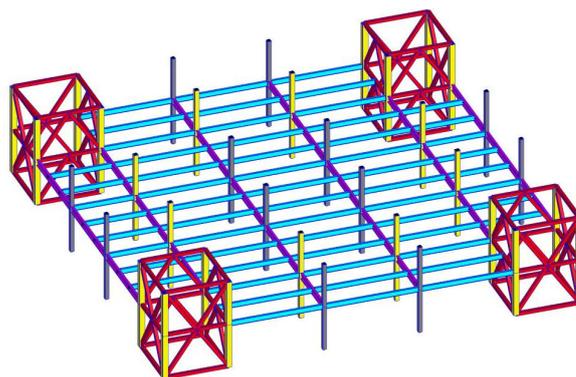
5.1 Sistema pendolare

In virtù della previsione di una megastruttura progettata sia per trasmettere i carichi in fondazione che per resistere alle azioni orizzontali, gli impalcati sono stati dimensionati come una struttura pendolare, dimensionando i tiranti di ogni modulo allo stesso modo e facendone variare la sezione ogni 4 livelli. Il solaio è composto da un sistema classico di travi principali e secondarie in acciaio di luce 9.3 m e interasse 3.1 m su cui si imposta una lamiera grecata completata da soletta collaborante in calcestruzzo. Ripetendosi ad ogni modulo, il sistema così progettato consente un'elevata serialità nella realizzazione in cantiere e apre le possibilità ad eventuali variazioni dello schema strutturale al variare del modulo, dovuto ad esempio a esigenze di diversa scansione delle campate.

5.1.1 Impalcato e Analisi dei carichi

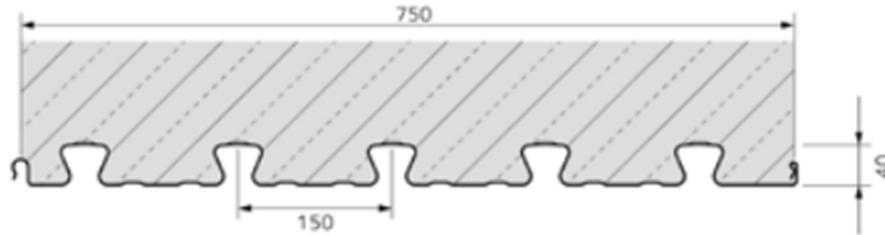
Come anticipato, la tecnologia adottata per il solaio prevede un sistema classico con lamiera grecata e soletta collaborante in calcestruzzo; risulta dal dimensionamento una lamiera COFRASTRA 40 di spessore 0,75 mm, con soletta in conglomerato cementizio armato di altezza 12 cm, avente un carico strutturale permanente pari a 275 kg/mq.

Come carico permanente non strutturale, sono stati considerati dei divisori realizzati in tecnologia a secco (modello *sandwich*), aventi caratteristiche fonoassorbenti e termoisolanti; tenendo conto anche del peso del controsoffitto e del peso del sottofondo e pavimento risulta un carico di 2,25 kN/mq.



Fire resistance

Thickness of the slab [cm]	REI [min]			
	30	60	90	120
9	9	9	11	13



Characteristics	Nominal thickness of the profile sheet [mm]		
	0,75	0,88	1,00
Weight [kg/m ²]	9,80	11,50	13,10
Cross section A_p : [mm ² /m]	1 183	1 400	1 600
Effective inertia I_{eff} [cm ⁴ /m]	17,58	22,23	25,41
Height of neutral axis [mm]	10,60	10,60	10,60
Modulus of inertia [cm ³ /m]	16,57	20,95	23,95

Nominal concrete consumption

	Thickness of the slab [cm]									
	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Concrete volume [l/m ²]	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170
Theoretical weight* of the composite slab [kg/m ²]	200	225	250	275	300	325	350	375	400	425

Concrete density 2500 kg/m³

Maximum recommended slab thickness $d = 20$ cm

*Additional weight due to pounding effect is not included

Per quanto riguarda i sovraccarichi accidentali, è stata considerata una destinazione d'uso mista, variabile tra le categorie A, B, C e D. A scopo didattico, con l'obiettivo di tener conto di una maggior versatilità della struttura e la previsione di sovraccarichi d'impalcato aggiuntivi a quelli calcolati a rigore, è stato considerato un sovraccarico accidentale pari a 6,0 kN/mq.

Il carico sismico non è stato considerato per motivi:

- di bassa sismicità del sito in esame corrispondente ad un elevato periodo proprio di vibrazione della struttura;
- di principale interesse in riguardo al comportamento dell'edificio nei confronti delle azioni da vento, calcolate in accordo alle NTC 2018 e alla relativa circolare ministeriale del 2019, in ragione della tendenziale snellezza del sistema.

Per quanto riguarda le azioni del vento, il sito ricade in Zona 1, il che implica una velocità base di

riferimento a livello del mare pare a 25 m/s. Considerando il coefficiente di altitudine, unitario in questa applicazione, dal prodotto dei parametri appena introdotti si ottiene la velocità base di riferimento, pari al valore medio di velocità in un evento di vento di 10 minuti a 10 m di altezza dal suolo su un terreno pianeggiante e omogeneo, con un periodo di ritorno pari a 50 anni.

Da questa è stata valutata la velocità di riferimento, valore medio di velocità riferito a ad un periodo di ritorno pari a 50 anni¹.

La pressione del vento è calcolata come:

$$P = q_r c_e c_p c_d$$

dove

q_r è la pressione cinetica di riferimento di cui al § 3.3.6;

c_e è il coefficiente di esposizione di cui al § 3.3.7;

c_p è il coefficiente di pressione di cui al § 3.3.8;

c_d è il coefficiente dinamico di cui al § 3.3.9.

La pressione cinetica di riferimento è pari a:

$$q_r = \frac{1}{2} \rho v_r^2 \quad [3.3.6]$$

dove

v_r è la velocità di riferimento del vento di cui al § 3.3.2;

ρ è la densità dell'aria assunta convenzionalmente costante e pari a 1,25 kg/m³.

Esprimendo ρ in kg/m³ e v_r in m/s, q_r risulta espresso in N/m².

Il coefficiente di esposizione è dato da:

$$\begin{aligned} c_e(z) &= k_r^2 c_t \ln(z/z_0) [7 + c_t \ln(z/z_0)] && \text{per } z \geq z_{\min} \\ c_e(z) &= c_e(z_{\min}) && \text{per } z < z_{\min} \end{aligned} \quad [3.3.7]$$

dove

k_r, z_0, z_{\min} sono assegnati in Tab. 3.3.II in funzione della categoria di esposizione del sito ove sorge la costruzione;

c_t è il coefficiente di topografia.

Tab. 3.3.II - Parametri per la definizione del coefficiente di esposizione

Categoria di esposizione del sito	K_r	z_0 [m]	z_{\min} [m]
I	0,17	0,01	2
II	0,19	0,05	4
III	0,20	0,10	5
IV	0,22	0,30	8
V	0,23	0,70	12

Tale formula è valida per altezze non maggiori di $z=200$ m, in questo elaborato è stata comunque

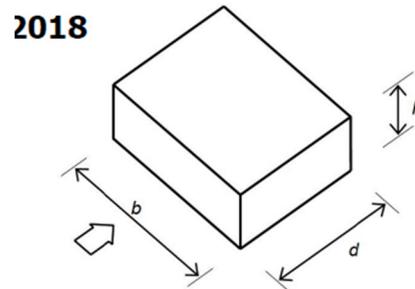
¹ Nel caso sia necessario valutare la velocità di riferimento con un periodo di ritorno differente rispetto ai 50 anni, è possibile calcolare la velocità di riferimento dal prodotto della velocità di base di riferimento, prima calcolata, e dal coefficiente di ritorno, che nel caso di periodo di ritorno pari a 50 anni è unitario.

adottata per altezze superiori al limite.

- La categoria di esposizione è assegnata in funzione della posizione geografica del sito ove sorge la costruzione e della classe di rugosità del terreno.
- Il coefficiente di topografia c_t è posto generalmente pari a 1, sia per le zone pianeggianti sia per quelle ondulate, collinose e montane.
- I coefficienti aerodinamici vengono valutati come riportato nella Circolare 2019 in funzione

Tabella C3.3.I: Edifici a pianta rettangolare: c_{pe} per facce sopravento, sottovento e laterali

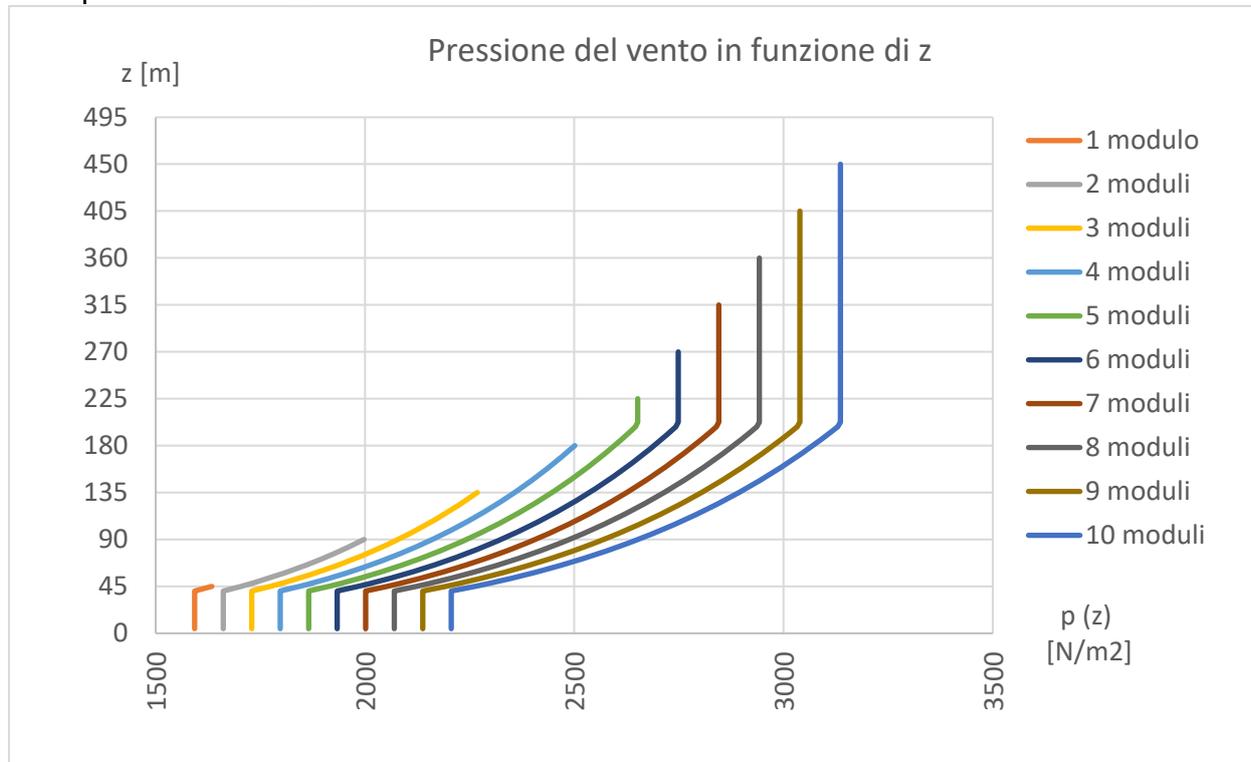
Faccia sopravento	$C_U = 2,0$	$C_U = 1,5$
$h/d \leq 1$: $c_{pe} = 0,7 + 0,1 \cdot h/d$	$h/d \leq 0,5$: $c_{pe} = -0,5 - -0,8 \cdot h/d$	$h/d \leq 1$: $c_{pe} = -0,3 - 0,2 \cdot h/d$
$h/d > 1$: $c_{pe} = 0,8$	$h/d > 0,5$: $c_{pe} = -0,9$	$1 < h/d \leq 5$: $c_{pe} = -0,5 - 0,05 \cdot (h/d - 1)$



della forma dell'edificio e del rapporto h/d .

Il coefficiente dinamico tiene conto degli effetti riduttivi associati alla non contemporaneità delle massime pressioni locali e degli effetti amplificativi dovuti alla risposta dinamica della struttura. Il coefficiente è stato posto pari ad 1.

Si riporta di seguito una rappresentazione grafica delle pressioni da vento agenti sui diversi sistemi strutturali, al variare del numero di moduli. Si ricorda, per una miglior leggibilità del grafico, che ogni modulo presenta un'altezza di 45 m.



5.1.2 Travi secondarie e principali

Le travi secondarie del piano tipo sono state verificate considerando i carichi permanenti, non permanenti e accidentali precedentemente descritti.

La luce delle travi secondarie è pari a 9,30 m con un interasse pari a 3,10 m.

La sollecitazione massima agente è data da:

$$M_{max} = \frac{q_{tot,SLU} \cdot l^2}{8}$$

Impiegando il momento appena calcolato come azione di progetto, si calcola il modulo resistenza plastico minimo necessario per la trave, considerando come titolo dell'acciaio un S355, con tensione caratteristica di snervamento pari a $f_{yk} = 275 \text{ MPa}$.

Dal dimensionamento risulta un profilo IPE 500.

Per la verifica a taglio si è utilizzata l'espressione fornita dalle NTC 2018:

$$V_{Rd} = \frac{A_v \cdot f_{yk}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$$

Con A_v pari all'area resistente a taglio

La verifica di deformabilità è stata effettuata tenendo conto dei limiti di normativa indicati nelle NTC

2018. Si è considerata la combinazione rara delle azioni, adottando il valore unitario per i coefficienti parziali di sicurezza.

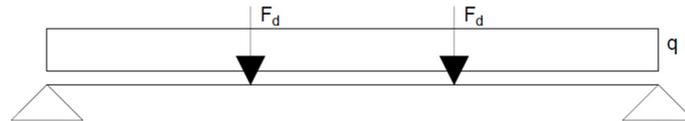
La freccia massima è stata calcolata come:

$$f_{max} = \frac{5}{384} \cdot \frac{q_{tot,SLE} l^4}{EI}$$

Tale freccia si confronta con i limiti imposti dalle NTC 2018, che per i solai generici impone un massimo di $\delta_{max}/250$.

Considerando, invece della combinazione rara, la sola componente dovuta ai sovraccarichi accidentali, si confronta la nuova freccia con il relativo limite imposto dalla normativa, pari a $\delta_2/300$.

Le travi principali sono state verificate considerando uno schema strutturale così come indicato nel seguente diagramma.



Il carico agente sulle travi principali è composto dal carico trasportato dalle travi secondarie, applicato ad $1/3$ e a $2/3$ della lunghezza della trave, e dal peso proprio della trave.

Il valore di momento massimo si ottiene come

$$M_{max} = \frac{q \cdot l^2}{8} + \frac{F \cdot l}{3}$$

Considerando un titolo di acciaio S355, si è calcolato il valore minimo del modulo di resistenza, risultando dal dimensionamento una sezione di tipo IPE O 600.

Per la verifica a taglio è stata utilizzata la seguente formula

$$V_{c,Rd} = \frac{A_v \cdot f_{yk}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$$

Per le verifiche di deformabilità è stata considerata come nel caso precedente la combinazione delle azioni rara e come limite gli stessi esposti per le travi secondarie, data l'uguaglianza degli schemi.

La freccia massima è stata calcolata come segue:

$$f_{max} = \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot I} + \frac{5}{384} \cdot \frac{q \cdot l^4}{E \cdot I}$$

5.1.3 Colonne/Tiranti

Le colonne della struttura pendolare sono state dimensionate per i soli carichi verticali, essendo soggette a puro sforzo normale. Per valutare l'azione agente sulle colonne al primo ordine, è stato impiegato il metodo delle aree di influenza. Lo sforzo normale agente sulla colonna i -esima al I ordine è pari a:

$$N_{iI} = \sum_{j=1}^{npiani} (A_{ij} \cdot W_{ij} + P_{p,ij})$$

- N_{iI} è lo sforzo normale della colonna i -esima al I ordine
- $P_{p,ij}$ è il peso proprio della colonna i -esima al piano j -esimo
- W_{ij} è il peso per unità di superficie riferita al piano j -esimo
- A_{ij} è l'area d'influenza della colonna i -esima al piano j -esimo

Le colonne vengono classificate in tre tipologie di pilastri, classificati al variare delle aree di influenza.

Si definiscono colonne *interne*, colonne *lateralmente interne* e colonne *perimetrali*.

La progettazione si è incentrata sulla ricerca dell'area di resistenza minima, da cui si è selezionato un profilo di sezione adatta.

$$A_{min} = \frac{N_{ed}}{f_{yd}}$$

5.2 Diagonal truss (transfer truss)

La *diagonal truss* ha il principale compito di trasferire i carichi dai pilastri interno verso le megacolonne perimetrali. All'aumento progressivo del numero dei moduli, si è osservato che il complesso delle quattro megacolonne d'angolo non è in grado di resistere alle azioni laterali del vento autonomamente oltre il limite dei 300 m; è stato quindi predisposto un vano centrale – che, nel caso dei moduli progettati in questa specifica applicazione, serve da predisposizione per una bucatina utile per il posizionamento di un blocco centrale di collegamenti verticali tra moduli – per l'alloggiamento di un nucleo; detta nuova configurazione strutturale determinerebbe una modifica del ruolo strutturale della trave reticolare diagonale, che non trasferirebbe più il carico del tirante, diventando invece parte di un vero e proprio sistema ad outrigger.

Le sollecitazioni massime agenti negli elementi della trave reticolare sono state ricavate direttamente dai risultati del calcolatore utilizzato nelle analisi 'SAP 2000', attuando un successivo procedimento di verifica tramite un criterio di resistenza.

La progettazione si è incentrata sulla ricerca dell'area di resistenza minima, da cui si è selezionato un

profilo di sezione adatta.

$$A_{min} = \frac{N_{ed}}{f_{yd}}$$

In base a tale valore, ricavato principalmente per i montanti e per le diagonali, è possibile scegliere un profilato ed effettuare la verifica di stabilità per elementi compressi. Quest'ultima si effettua verificando la seguente disuguaglianza:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1$$

Dove N_{Ed} è l'azione di compressione di calcolo mentre $N_{d,Rd}$ è la resistenza all'instabilità nell'asta compressa, data da:

$$N_{bRd} = \chi \cdot \frac{A \cdot f_{yk}}{\gamma_{M1}} \text{ per sezioni di classe 1,2,3}$$

I coefficienti χ dipendono dal tipo di sezione e dal tipo di acciaio impiegato; essi si desumono, in funzione di appropriati valori di snellezza adimensionale $\bar{\lambda}$, dalla seguente formula:

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1,0$$

con:

$$\phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2]$$

La verifica si conduce con il coefficiente χ minore tra quelli risultanti dalla verifica condotta lungo l'asse forte e l'asse debole; risulta che il minore corrisponde alla verifica condotta lungo l'asse debole z. La snellezza adimensionale $\bar{\lambda}$ vale:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_{yk}}{N_{cr}}} \text{ per sezioni di classe 1,2,3}$$

Il termine α è il fattore di imperfezione, ricavato dalle NTC 2018 e riportato di seguito:

Curva di instabilità	a ₀	a	b	c	d
Fattore di imperfezione α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

Il termine N_{cr} rappresenta la forza elastica critica per la modalità d'instabilità pertinente (flessionale, torsionale o flessio-torsionale) e vale:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{min}}{L_0^2}$$

Dove L_0 è la lunghezza libera d'inflessione dell'elemento, A è l'area lorda della sezione. In base a delle tabelle indicate dalla normativa si userà la curva d'instabilità c per la quale si ha $\alpha = 0,49$.

Per quanto riguarda le travi, essendo esse soggette ad una sollecitazione composta da sforzo normale e momento flettente si sono verificate le sezioni scelte nei confronti della resistenza e della stabilità con le seguenti formule.

- Resistenza:

$$M_{ed} \leq M_{n,rd}(N_{ed})$$

$$M_{n,y,rd} = M_{pl,y,rd} \frac{\left(1 - \frac{N_{ed}}{N_{pl,rd}}\right)}{1 - 0,5 \left(\frac{A - 2 \cdot b \cdot t_f}{A}\right)}$$

- stabilità (metodo A per sezioni di classe 1-2-3):

$$\frac{N_{ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi_{min} \cdot f_{yk} \cdot A} + \frac{M_{yeq,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{f_{yk} \cdot W_y \cdot \left(1 - \frac{N_{ed}}{N_{cr,y}}\right)} + \frac{M_{zeq,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{f_{yk} \cdot W_z \cdot \left(1 - \frac{N_{ed}}{N_{cr,z}}\right)} \leq 1$$

- $M_{ed,z} = 0$

dove:

χ_{min} è il minimo fattore χ relativo all'inflessione intorno agli assi principali di inerzia;

W_y e W_z sono i moduli resistenti elastici per le sezioni di classe 3 e i moduli resistenti plastici per le sezioni di classe 1 e 2,

$N_{cr,y}$ e $N_{cr,z}$ sono i carichi critici euleriani relativi all'inflessione intorno agli assi principali di inerzia;

$M_{yeq,Ed}$ e $M_{zeq,Ed}$ sono i valori equivalenti dei momenti flettenti da considerare nella verifica.

Se il momento flettente varia lungo l'asta si assume, per ogni asse principale di inerzia,

$$M_{eq,Ed} = 1,3 \cdot M_{m,Ed} \quad (C4.2.33)$$

essendo $M_{m,Ed}$ il valor medio del momento flettente, con la limitazione

$$0,75 \cdot M_{max,Ed} \leq M_{eq,Ed} \leq M_{max,Ed} \quad (C4.2.34)$$

$$\begin{aligned}
 - \chi_y &= \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda_y^2}} \text{ con } \lambda_y = \sqrt{\frac{A \cdot f_{yk}}{N_{cr,y}}}, N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{l_0^2}, \phi_y = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\lambda_y - 0,2) + \lambda_y^2] \\
 - \chi_z &= \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda_z^2}} \text{ con } \lambda_z = \sqrt{\frac{A \cdot f_{yk}}{N_{cr,z}}}, N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{l_0^2}, \phi_z = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\lambda_z - 0,2) + \lambda_z^2]
 \end{aligned}$$

Inoltre, essendo la struttura considerabile come una trave reticolare che sostiene dei solai, è stata verificata la deformabilità massima in base al requisito prescritto dalle NTC 2018, ovvero $L/400$.

5.3 Belt truss

La Belt truss, come la diagonal truss, ha il compito di trasferire il carico dai tiranti medi e perimetrali verso le megacolonne. In aggiunta a ciò, la struttura garantisce anche un funzionamento tridimensionale all'edificio, collegando e coinvolgendo le colonne adiacenti in maniera tale da garantire un funzionamento a megatelaio, così da non determinare un comportamento a mensole isolate nelle megacolonne.

Gli elementi della belt truss sono stati verificati con criteri di resistenza, così come riportati nel paragrafo riguardante la diagonal truss, fino al raggiungimento di un'altezza tale da determinare una prevalenza del progetto per rigidità su quello per resistenza, a causa del carico da vento. All'aumentare dei moduli, in corrispondenza degli edifici con 5 e 6 moduli, si è infatti palesata la necessità di aumentare le sezioni degli elementi comprendenti la belt truss per poter soddisfare i requisiti di deformabilità globale dell'edificio, così da realizzare un effettivo telaio spaziale. I requisiti di deformabilità della belt truss sono stati verificati come quelli della diagonal truss.

Megacolonne

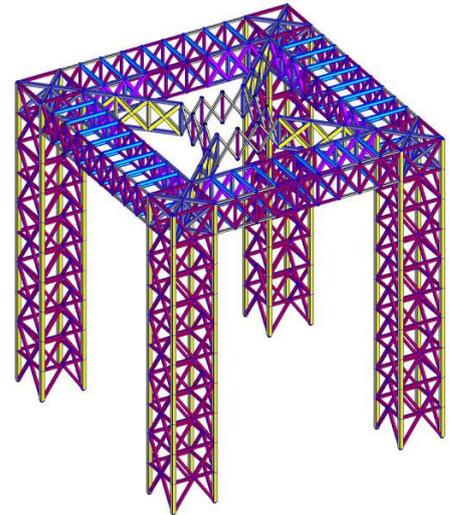
Le megacolonne sono il macroelemento con il compito fondamentale di portare i carichi al terreno. Composte essenzialmente da una struttura reticolare, si è scelto di realizzare delle diagonali a X su due piani nelle facciate esterne del sistema, mentre per le facciate interne si è scelto di realizzare dei controventi a V inversa su ogni piano per rispondere alle esigenze funzionali dell'edificio, essendo le megacolonne caratterizzate anche dalla funzione di alloggiamento dei collegamenti verticali.

Le verifiche condotte nelle membrature componenti il sistema sono del tutto analoghe a quelle già illustrate in precedenza, per gli altri elementi della megastruttura.

Si riporta di seguito una panoramica delle sezioni previste all'aumentare dei moduli.

5.4 Sezioni utilizzate nei moduli

Parlando di un edificio composto da più moduli, la numerazione per la trattazione di ogni modulo è stata assunta crescente dall'alto verso il basso.



5.4.1 Megacolonne

5.4.1.1 Colonne

1 modulo: 21 500 kN – 500x500x40 mm **S355**

2 moduli:

- 1 modulo: 21 500 kN – 500x500x40 mm **S355**
- 2 modulo: 42 000 kN – 800x800x35 mm **S450**

4 moduli:

- 1-2 modulo: 48 000 kN – 800x800x35 mm **S450**
- 3-4 modulo: 100 000 kN (73k al 3) – 1000x1000x70 mm **S450**

6 moduli:

- 1-2 modulo: 48 000 kN – 800x800x35 mm **S450**
- 3-4 modulo: 100 000 kN (73k al 3) – 1000x1000x70 mm **S450**
- 5-6 modulo: 160 000 kN – 1 200x1 200x90 mm **S450**

5.4.1.2 Diagonali

1 modulo: 4 500 kN – 300x300x16 mm **S355**

2 moduli:

- 1 modulo: 4 500 kN – 300x300x16 mm **S355**
- 2 modulo: 6 000 kN – 300x300x16 mm **S450**

4 moduli:

- 1-2 modulo: 6 000 kN – 300x300x16 mm **S450**
- 3-4 modulo: 12 000 kN – 400x400x25 mm **S450**

6 moduli:

- 1-2 modulo: 6 000 kN – 300x300x16 mm **S450**
- 3-4 modulo: 12 000 kN – 400x400x25 mm **S450**
- 5-6 modulo: 20 000 kN – 500x500x35 mm **S450**

5.4.1.3 Travi

- 1 modulo – 400x400x20 mm **S355**

2 moduli:

- 1 modulo: 400x400x20 mm **S355**
- 2 modulo: 400x400x20 mm **S450**

4 moduli:

- 1-2 modulo: 400x400x20 mm **S450**
- 3-4 modulo: 500x500x25 mm **S450**

6 moduli:

- 1-2 modulo: 400x400x20 mm **S450**
- 3-4 modulo: 500x500x25 mm **S450**
- 5-6 modulo: 500x500x35 mm **S450**

5.4.1.4 *Nodo (intersezione tra megacolonne e struttura di trasferimento)*

1 modulo: 10000 kN – 500x500x25 mm **S355**

2 moduli:

- 1 modulo: 10000 kN – 500x500x25 mm **S355**
- 2 modulo: 10000 kN – 500x500x25 mm **S450**

4 moduli:

- 1-2 modulo: 10000 kN – 500x500x25 mm **S450**
- 3-4 modulo: 00000 kN – 500x500x30 **S450**

6 moduli:

- 1-2 modulo: 10000 kN – 500x500x25 mm **S450**
- 3-4 modulo: 00000 kN – 500x500x30 mm **S450**
- 5-6 modulo: 00000 kN – 500x500x35 mm **S450**

5.4.1.5 *Diagonale di scarico (in prossimità del nodo, coinvolge l'impalcato inferiore nella trasmissione dei carichi verticali della trave di trasferimento centrale)*

1 modulo: 12000 kN – 500x500x25 mm **S355**

2 moduli:

- 1 modulo: 12000 kN – 500x500x25 mm **S355**
- 2 modulo: 16000 kN – 500x500x25 mm **S450**

4 moduli:

- 1-2 modulo: 16000 kN – 500x500x25 mm **S450**
- 3-4 modulo: 20000 kN – 500x500x30 mm **S450**

6 moduli:

- 1-2 modulo: 16000 kN – 500x500x25 mm **S450**
- 3-4 modulo: 20000 kN – 500x500x30 mm **S450**
- 5-6 modulo: 20000 kN – 500x500x35 mm **S450**

5.4.2 *Trave reticolare diagonale (struttura di trasferimento centrale)*

5.4.2.1 *Diagonali*

1 modulo: 11500 kN – 500x500x25 mm **S355**

2 moduli:

- 1 modulo: 11500 kN – 500x500x25 mm **S355**
- 2 modulo: 11500 kN – 500x500x25 mm **S355**

4 moduli:

- 1-2 modulo: 11500 kN – 500x500x25 mm **S450**
- 3-4 modulo: 13000 kN – 500x500x30 mm **S450**

6 moduli:

- 1-2 modulo: 11500 kN – 500x500x25 mm **S450**
- 3-4 modulo: 13000 kN – 500x500x30 mm **S450**
- 5-6 modulo: 14000 kN – 500x500x30 mm **S450**

5.4.2.2 Montanti

1 modulo: 8500 kN – 400x400x20 mm **S355**

2 moduli:

- 1 modulo: 400x400x20 mm **S355**
- 2 modulo: 400x400x20 mm **S355**

4 moduli:

- 1-2 modulo: 8500 kN – 400x400x20 mm **S450**
- 3-4 modulo: 0000 kN – 400x400x25 mm **S450**

6 moduli:

- 1-2 modulo: 8500 kN – 400x400x20 mm **S450**
- 3-4 modulo: 0000 kN – 400x400x25 mm **S450**
- 5-6 modulo: 0000 kN – 400x400x25 mm **S450**

5.4.2.3 Traversi

1 modulo: 8500 kN – 400x400x20 mm **S355**

2 moduli:

- 1 modulo: IDEM
- 2 modulo: IDEM

4 moduli:

- 1-2 modulo: 8500 kN – 400x400x20 mm **S450**
- 3-4 modulo: 0000 kN – 500x500x25 mm **S450**

6 moduli:

- 1-2 modulo: 8500 kN – 400x400x20 mm **S450**
- 3-4 modulo: 0000 kN – 500x500x25 mm **S450**
- 5-6 modulo: 0000 kN – 500x500x25 mm **S450**

5.4.3 Belt truss (struttura di trasferimento perimetrale)

5.4.3.1 Diagonali

1 modulo: 8000 kN – 400x400x20 mm **S355**

2 moduli:

- 1 modulo: 8000 kN – 400x400x20 mm **S450**
- 2 modulo: 10000 kN – 400x400x20 mm **S450**

4 moduli:

- 1-2 modulo: 10000 kN – 400x400x20 mm **S450**
- 3-4 modulo: 12000 kN – 400x400x25 mm **S450**

6 moduli:

- 1-2 modulo: 10000 kN – 400x400x20 mm **S450**
- 3-4 modulo: 12000 kN – 400x400x25 mm **S450**
- 5-6 modulo: 15000 kN – 500x500x25 mm **S450**

5.4.3.2 Montanti

1 modulo: 4500 kN – 350x350x20 mm **S355**

2 moduli:

- 1 modulo: 4500 kN – 350x350x20 mm **S355**
- 2 modulo: 4500 kN – 350x350x20 mm **S450**

4 moduli:

- 1-2 modulo: 4500 kN – 350x350x20 mm **S450**
- 3-4 modulo: 0000 kN – 500x500x20 mm **S450**

6 moduli:

- 1-2 modulo: 4500 kN – 350x350x20 mm **S450**
- 3-4 modulo: 0000 kN – 400x400x20 mm **S450**
- 5-6 modulo: 0000 kN – 500x500x20 mm **S450**

5.4.3.3 Traversi

1 modulo: 6700 kN – 350x350x20 mm **S355**

2 moduli:

- 1 modulo: 6700 kN – 400x400x20 mm **S355**
- 2 modulo: 6700 kN – 400x400x20 mm **S450**

4 moduli:

- 1-2 modulo: 6700 kN – 400x400x20 mm **S450**
- 3-4 modulo: 0000 kN – 500x500x25 mm **S450**

6 moduli:

- 1-2 modulo: 6700 kN – 400x400x20 mm **S450**
- 3-4 modulo: 0000 kN – 400x400x20 mm **S450**
- 5-6 modulo: 0000 kN – 500x500x20 mm **S450**

5.5 Deformabilità

5.5.1 Limiti

- L/400 Belt truss (29,7 m): 6,98 cm
- L/500 Belt truss: 5,58 cm
- L/400 Diag truss (13,14 m): 3,29 cm
- L/500 Diag truss: 0,0789 m
- H/500 (45 m – singolo modulo): 0,09 m

5.5.2 Effettive

5.5.2.1 Spostamenti verticali belt truss

1 modulo: 1,62 cm

2 moduli:

- 1 modulo: 1,42 cm
- 2 modulo: 1,48 cm

4 moduli:

- 1 modulo: 1,83 cm
- 2 modulo: 1,90 cm
- 3 modulo: 1,52 cm
- 4 modulo: 1,51 cm

6 moduli:

- 1 modulo: 2,23 cm
- 2 modulo: 2,28 cm
- 3 modulo: 1,89 cm
- 4 modulo: 1,84 cm
- 5 modulo: 1,46 cm
- 6 modulo: 1,36 cm

5.5.2.2 Spostamenti verticali truss diagonale

1 modulo: 1,75 cm

2 moduli:

- 1 modulo: 1,88 cm
- 2 modulo: 1,52 cm

4 moduli:

- 1 modulo: 2,00 cm
- 2 modulo: 1,96 cm
- 3 modulo: 1,64 cm
- 4 modulo: 1,57 cm

6 moduli:

- 1 modulo: 2,39 cm
- 2 modulo: 2,34 cm
- 3 modulo: 2,04 cm
- 4 modulo: 1,95 cm
- 5 modulo: 1,77 cm
- 6 modulo: 1,62 cm

5.5.2.3 Spostamenti orizzontali in cima K+V

1 modulo: 0,63 cm

2 moduli: 3,38 cm

4 moduli: 14,42 cm

6 moduli: 36,85 cm

5.5.2.4 Spostamenti orizzontali in cima V+K

1 modulo: 0,90 cm

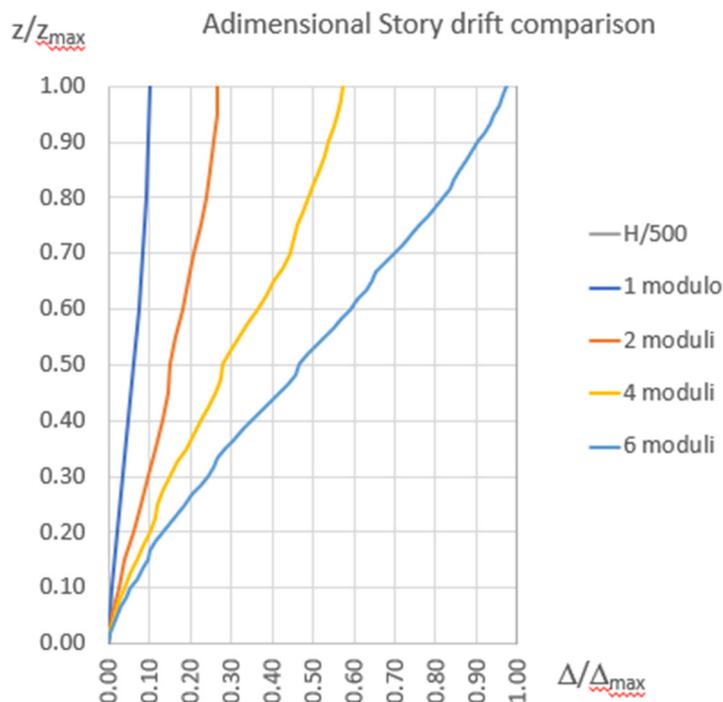
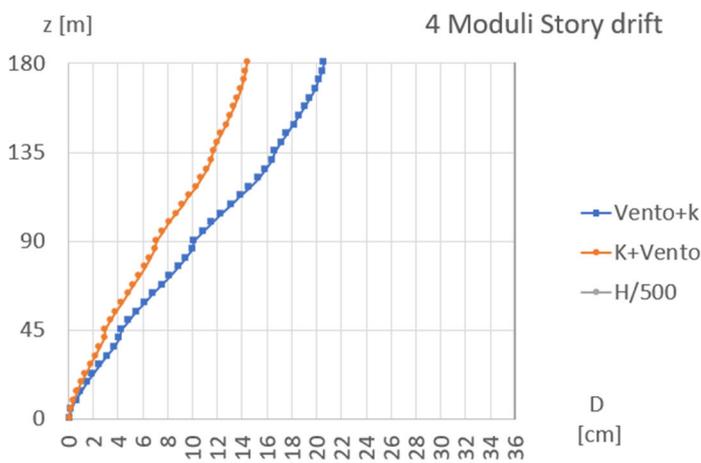
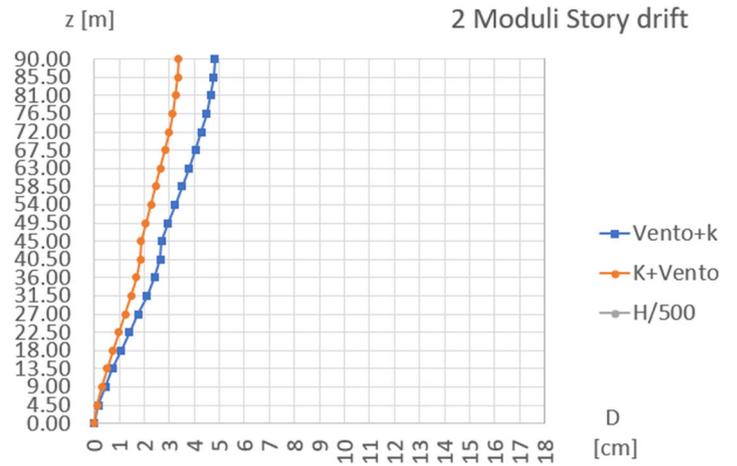
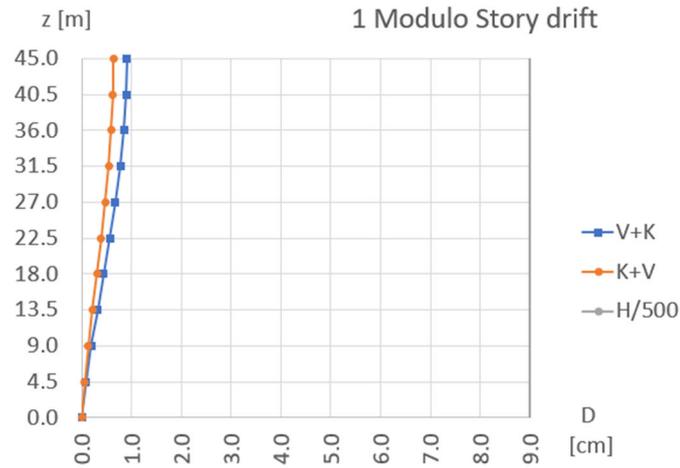
2 moduli: 4,83 cm

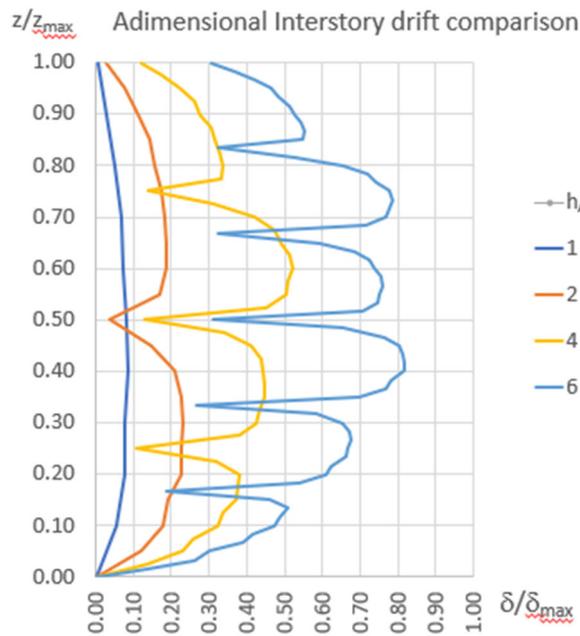
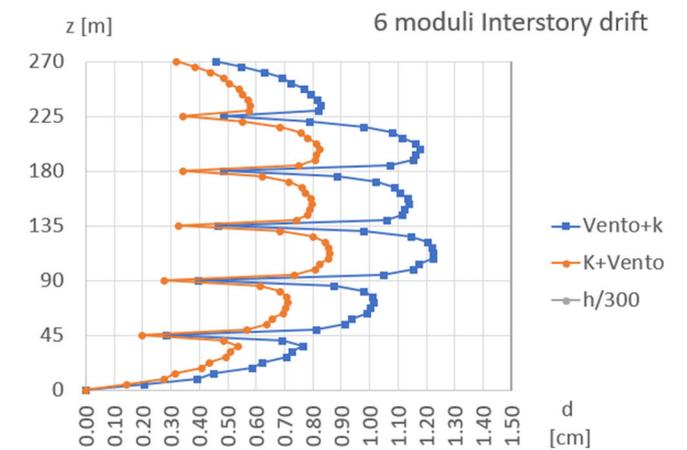
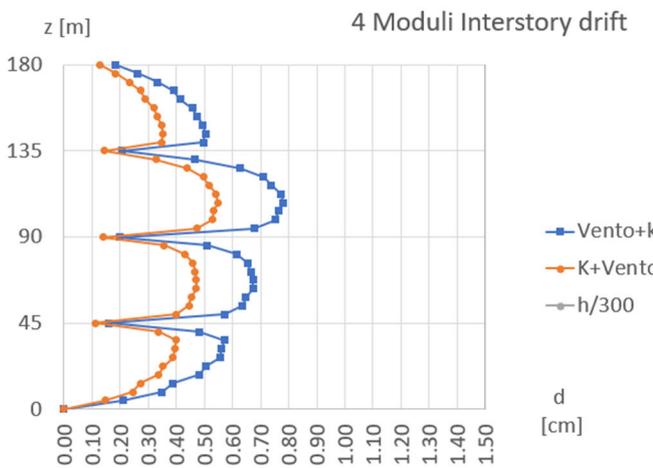
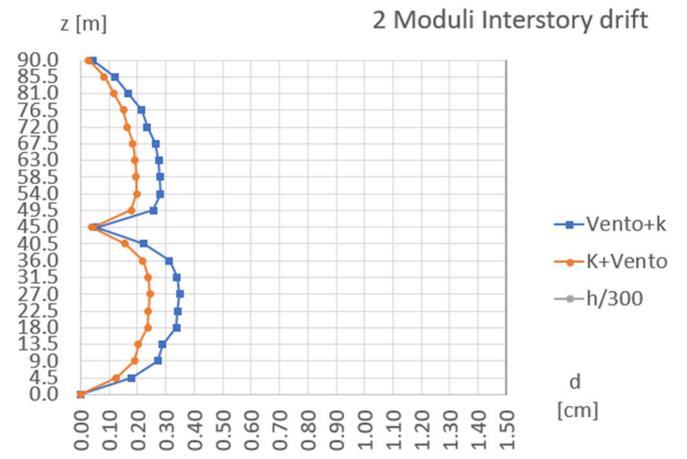
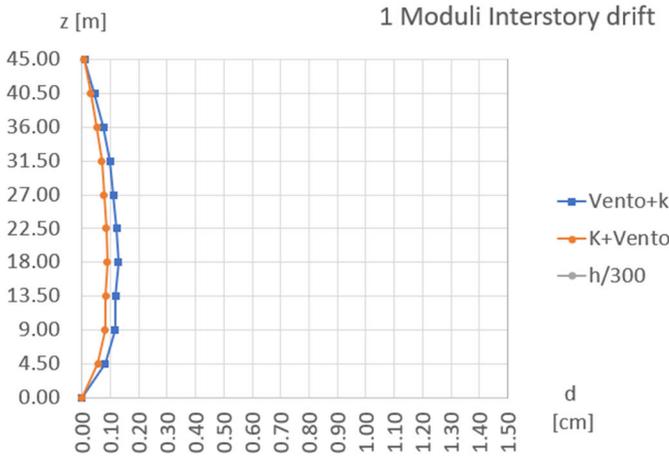
4 moduli: 20,60 cm

6 moduli: 52,64 cm

5.5.3 Spostamenti di piano e di interpiano nei vari moduli

Si riportano di seguito i grafici relativi agli spostamenti di piano e di interpiano nelle varie soluzioni strutturali elaborate.





5.6 Peso strutturale (unit steel)

Area: 1738,89 mq/piano

1 modulo: 22280,45 kN = 128 kg/mq

2 moduli: 48053,11 kN = 138 kg/mq

4 moduli: 127807,02 kN = 184 kg/mq

6 moduli: 234395,44 kN = 225 kg/mq

5.6.1 Incidenza su peso complessivo edificio

1 modulo: 15,86%

2 moduli: 16,89%

4 moduli: 21,27%

6 moduli: 24,83%

6. Architettura

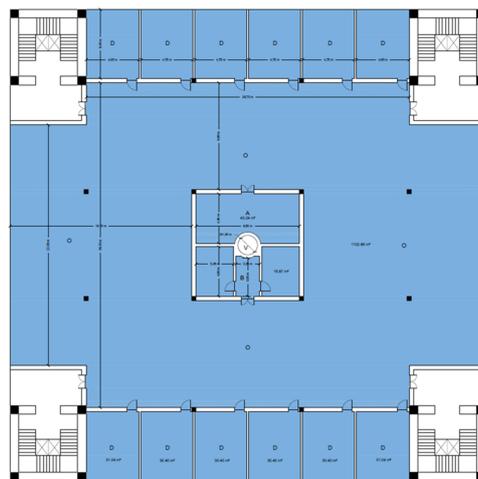
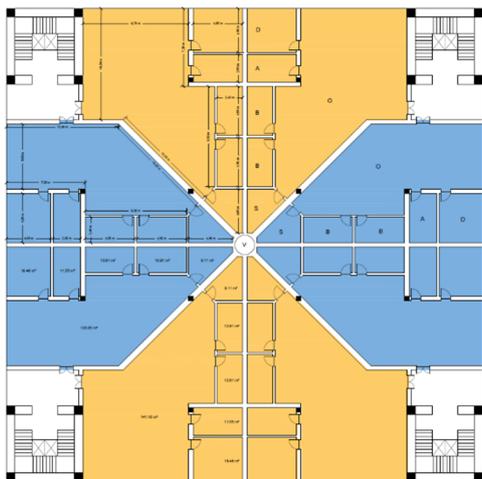
Le soluzioni architettoniche proposte nel corso del processo compositivo hanno determinato il *framework* entro cui operare nell'organizzazione interna dell'edificio. Si è scelto di distinguere tra l'organizzazione di un edificio *monomodulo*, in cui le quattro megacolonne d'angolo sono sufficienti per accogliere i collegamenti verticali ai vari livelli dell'edificio e in cui si prevede un'organizzazione monofunzionale, da quella di una torre *polimodulo*, caratterizzata dalla presenza di attività differenti nei vari moduli e in cui si rivela necessaria una torre distributiva interna che, servendo le *sky lobbies* dei singoli moduli, consente di raggiungere le torri angolari a servizio dei livelli del modulo specifico.

6.1 Edificio monomodulo

Essendo l'edificio monofunzionale, non si rilevano particolari esigenze a livello di organizzazione planimetrica del livello di base, completamente libero da elementi strutturali (eccettuando le megacolonne) e che può servire da hall centrale (eventualmente con auditorium, nel caso di un edificio destinato a uffici) o da giardino coperto e area relax nel caso di un edificio residenziale, in cui possono svolgersi la maggior parte delle attività sociali degli occupanti in caso di condizioni climatiche avverse.

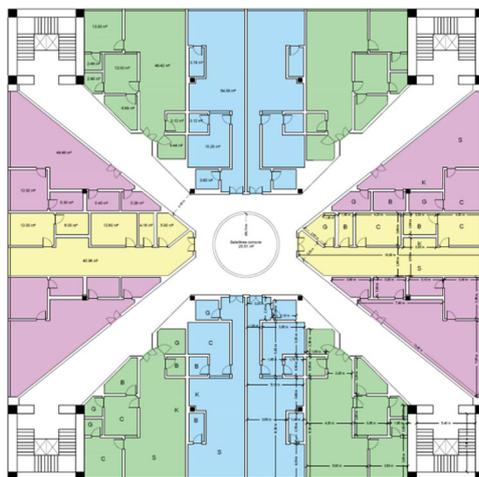
6.1.1 Uffici

Sono stati previsti due diversi sistemi per uffici: il primo prevede otto uffici a piano ed è stato concepito con l'idea di massimizzare la rendita fondiaria di un eventuale proprietario, interessato a vendere o affittare spazi per uffici ad aziende emergenti o di piccole dimensioni. Il secondo schema è invece ispirato alle organizzazioni degli uffici delle grandi aziende, in cui ogni livello dell'edificio è destinato ad uno specifico dipartimento con una rigida gerarchia nel piano (impiegati che lavorano negli open space, supervisors e dirigenti con uffici condivisi o singoli). In entrambe le tipologie sono state predisposte delle aree stampa/archivio e degli ambienti separati per la direzione.



6.1.2 Residenziale

In questo caso, complice la ridotta dimensione dell'edificio, si è optato per una soluzione votata esclusivamente alla massimizzazione della rendita fondiaria, prevedendo un sistema con 14 unità immobiliari a piano, di cui otto pensate per accogliere nuclei familiari ridotti e sei destinate a famiglie più consistenti. Per garantire un'elevata vivibilità degli ambienti, è stata definita un'area centrale delimitata da una parete vetrata che, al variare del livello, può essere destinata a differenti attività (ludoteca, sala riunioni, palestra...), così da distribuire la vita dell'edificio lungo il suo sviluppo verticale. L'andamento dei corridoi, rastremati verso il centro, è stato definito in maniera tale da determinare un'alterazione prospettica con l'obiettivo di avvicinare fittiziamente le vie d'esodo al centro dell'edificio (distante 28 m dall'angolo) con l'obiettivo di fornire una maggior calma e un



deflusso più ordinato degli occupanti in caso di emergenza.

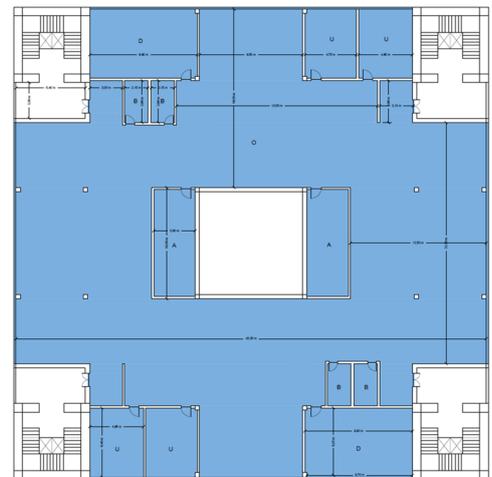
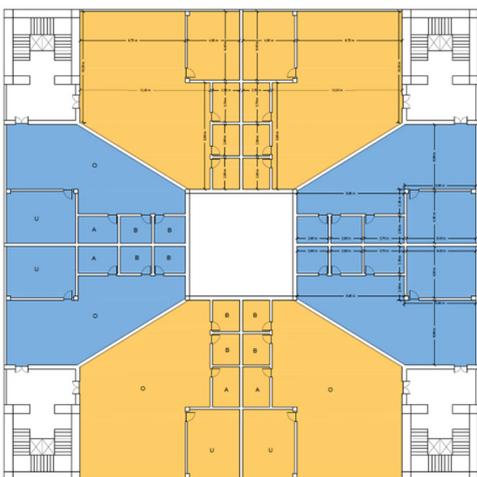
6.2 Edificio polimodulo

In questo caso, al variare del numero e della destinazione dei moduli cambia anche la definizione delle *sky lobbies*, che possono essere destinate a hall di accesso agli uffici, *community gardens* di filtro verso le unità residenziali, ristoranti e lobby di hotel, spazi di aggregazione e socialità in moduli destinati allo svago, veri e propri parchi verdi su più altezze in moduli commerciali... Complice l'elevata versatilità strutturale del sistema di impalcato, le possibilità organizzative sono pressoché infinite, particolarmente nella delineazione di spazi a tripla e quadrupla altezza in corrispondenza di livelli destinati ad attività commerciali. In virtù del meccanismo distributivo ai singoli moduli, che prevede il passaggio in una delle megacolonne d'angolo per raggiungere i vari piani del singolo modulo, per differenziare i collegamenti e i percorsi degli occupanti e dei visitatori si rivela necessaria una torre distributiva centrale che serve solo i livelli di base di ciascun modulo tramite un sistema di scale e ascensori *shuttle*. In questo modo, la gestione dei flussi è governata da principi razionali e funzionali, consentendo di minimizzare i tempi di attesa e di percorrimto all'interno del singolo edificio e, nel caso di edifici con torri collegate, nell'intero aggregato urbano.

Anche in questo caso, sono state realizzate a titolo esemplificativo le planimetrie per i moduli a destinazione uffici e residenziale.

6.2.1 Uffici

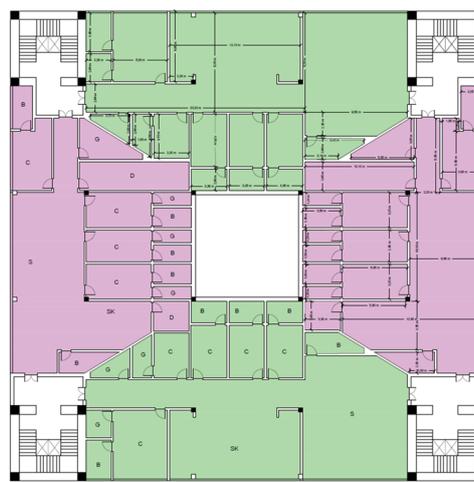
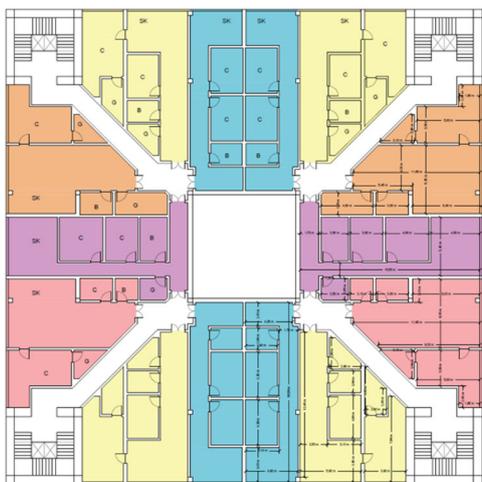
Il sistema segue la stessa scansione e distinzione fatta per l'edificio a singolo modulo; nel caso dell'ufficio singolo sono stati previsti affacci su tutte e quattro le facciate, definendo un ufficio dirigenziale, quattro postazioni indipendenti per *supervisor* e una sala riunioni di piano.



6.2.2 Residenziale

Complice la maggior dimensione dell'edificio e il tendenziale aumento dei costi delle unità immobiliari

con l'altezza, essendo meglio esposte e meno suscettibili ai rumori del traffico urbano, in questo caso si è scelto di elaborare due soluzioni *estreme*, puntando alla massimizzazione della rendita fondiaria con una soluzione a 14 unità analoga a quella dell'edificio monomodulo, e alla realizzazione di veri e propri *loft* in un'alternativa che prevede 4 unità immobiliari a piano, ciascuna con doppio ingresso. L'idea progettuale prevede una serie di disposizioni intermedie che, nel passare da 14 a 4 unità, consente di soddisfare le esigenze di spazio di nuclei familiari di differenti dimensioni, rivelando anche in questo aspetto una particolare versatilità ed aprendo le possibilità alla progettazione di spazi di *co-housing*, con ambienti comuni di cucina e lavanderia, che potrebbero contribuire ulteriormente alla qualità sociale dell'intervento, ponendo l'accento sulla copartecipazione.



7. Soluzioni tecnologiche

Si riporta di seguito una breve panoramica delle scelte tecnologiche implementate nel progetto. Innanzitutto, come intuibile dalla genesi strutturale del sistema, un'idea chiave alla base delle soluzioni strutturali attuate riguarda la montabilità e smontabilità del sistema che, essendo realizzato quasi interamente a secco (l'unico elemento gettato in opera è costituito dalle solette collaboranti degli impalcati, necessarie per garantire il vincolo di piano rigido), consente una più rapida realizzazione e una più facile manutenzione, anche a seguito di eventi accidentali. Allo stesso modo va intesa la struttura a più moduli sovrapposti, in cui eventuali danni agli impalcati del singolo modulo non si ripercuotono sul resto della struttura.

Dal punto di vista della sostenibilità ambientale, fulcro del progetto è stata un'attenzione verso la progettazione Z.E.B. (*Zero Energy Building*) e W.B.L.C.A. (*Whole Building Life Cycle Assessment*), approcci progettuali incentrati sullo studio dell'impatto energetico dell'edificio nel corso della sua vita utile e alla fine della propria fase di esercizio.

Dal punto di vista della gestione della risorsa idrica, sono stati ipotizzati dei sistemi di raccolta e riutilizzo delle acque piovane (raccolte in copertura e negli sbalzi, oltre che in facciata in

corrispondenza dei piani tecnici) e grigie tramite sistemi di depurazione e pompaggio posti all'interno dei piani tecnici. Allo stesso tempo, per ovviare alle cosiddette *bombe d'acqua* e altri fenomeni meteorologici imprevisti di grande entità sono state ipotizzate delle *bio retention cells*, sistemi di captazione e lento rilascio delle acque meteoriche ottenuti tramite una sovrapposizione di uno strato di terreno (in cui è possibile prevedere inerbimento o piantumazione) su uno strato di ghiaia, a sua volta poggiato su un elemento di captazione delle acque. Impiegando detta tecnologia sugli sbalzi e nelle altre zone esposte agli agenti atmosferici in cui si prevedono sistemazioni a verde, è possibile dilazionare nel tempo il rilascio delle acque meteoriche alle stazioni di depurazione, garantendo una portata più uniforme in ingresso alle cisterne.

Per ciò che concerne un utilizzo più ragionato dell'energia, è stata prevista l'implementazione di vetri a doppia camera fotovoltaici e cromogenici, così da garantire al contempo privacy, riduzione dell'emissività delle superfici trasparenti e recupero dell'energia tramite le celle fotovoltaiche trasparenti (costituite da un film di silicati) in un'unica soluzione. In parallelo, sono state previste delle turbine eoliche ad asse verticale da inserire sugli sbalzi e in copertura (eventualmente accoppiate a pannelli fotovoltaici veri e propri), così da garantire un ulteriore recupero dell'energia elettrica. In parallelo, si è scelto di prevedere dei sistemi di controllo IoT per le diverse unità funzionali (uffici, aree commerciali e pubbliche, unità abitative...) così da consentire un controllo automatico dei sistemi di climatizzazione e ricircolo dell'aria oltre che dell'utilizzo della risorsa elettrica, consentendo un controllo puntuale e remoto degli ambienti (utile soprattutto negli uffici di grandi dimensioni) e un'autoregolazione degli impianti così da minimizzare l'utilizzo di elettricità.

Nell'ottica di una minimizzazione del rischio associato all'utilizzo degli ambienti e di un minor impatto ambientale dovuto all'edificio, si è scelto di non prevedere un allacciamento del gas all'edificio, preferendo l'utilizzo di fuochi a induzione e sistemi di elettroriscaldamento a pavimento. In questo modo, è possibile ridurre sensibilmente il rischio di esplosioni nell'edificio e l'impatto connesso alle emissioni di gas di scarico, provvedendo ad una soluzione ancora più sostenibile e misurata.

Per quanto riguarda l'effetto isola di calore, causato dalla forte urbanizzazione delle aree, sono state previste diverse tecnologie legate all'intensificazione delle aree verdi: attraverso facciate verdi, superfici a verde intensivo (sbalzi, rooftop, plaza e sky lobbies alla base dei vari moduli) e aree destinate a idrocoltura (particolarmente nei percorsi distributivi ai singoli livelli), insieme all'utilizzo di vetri cromogenici e basso emissivi oltre ad eco-vernici² e ad un'attenta progettazione dell'impianto urbanistico del quartiere, votato alla minimizzazione delle superfici impermeabili, si prevede di poter

² Come l' *airlite*, vernice in grado di decomporre il 90% degli inquinanti presenti in atmosfera – CO2 inclusa – in sali minerali utili alla crescita della vegetazione oltre ad una spiccata capacità di eliminazione dei batteri presenti sulla superficie in virtù dell'alto potere ossidante e dell'elevata alcalinità della superficie ed un elevatissimo potere riflettente, in grado di mitigare significativamente il passaggio di calore dall'esterno.

raggiungere un coefficiente di riflessione medio – pari alla media ponderata dei coefficienti di riflessione dei singoli materiali, tabellati – di progetto prossimo a 0.30^3 , ovvero ad un'aliquota di riflessione pari al 30% della radiazione assorbita, valore di circa tre volte migliore rispetto a contesti urbanistici ad elevata presenza di superfici bituminose o scure.

Le soluzioni adottate prevedono anche un importante risvolto sociale: in base a quanto affermato da Chris Wise ad agosto 2001⁴, si è ritenuto di fornire l'edificio di spazi di aggregazione e socialità, così da rendere il singolo edificio un sistema urbano autonomo ed autosufficiente. Ad esempio, sono stati delineati degli spazi per il *community gardening* nelle sky lobbies dei moduli residenziali, votati alla coltivazione di spezie e piccoli alberi da frutto. In parallelo, si è pensato di prevedere alloggiamenti per diverse essenze adatte al clima lombardo (Agave, Sedum, Clematide, Glicine, Petunie, Begonie, Gerani, Lavanda, Iris) nei vari sbalzi previsti nelle unità residenziali.

8. Urbanistica

Nel tentativo di ipotizzare un'organizzazione a carattere urbanistico del sistema, si è scelto di individuare nell'area dell'ippodromo SNAI di Milano, vicino a CityLife, il lotto d'intervento. In questo modo è possibile operare in prossimità degli edifici più alti d'Italia, garantendo una miglior



³ Per definire dei valori di riferimento, si consideri che il coefficiente di riflessione di un manto erboso è 0.26, mentre quello di una superficie asfaltata è 0.1.

⁴ *Imagine a 200 storey tower. It might contain a town of 25,000 people. Such a tower could simply be photo-copied up from today's skyscraper, but it would be a horrible, illogical scenario. It would be a fortress, with only one way in and one way out. The environment is artificially controlled, with artificial air and artificial light. As a result, it has artificial behaviour patterns. It is a masterful inversion of social engineering, dictating that everyone sits high in the air facing outwards with their backs to everyone else.*

integrazione della tipologia edilizia nel contesto. In virtù delle dimensioni dell'area, è così possibile prevedere un dimensionamento preliminare di un quartiere di torri, integrando le diverse tipologie edilizie elaborate nel corso del processo compositivo in un unico sistema integrato, immerso nel verde e in grado di definire un nuovo polo di innovazione nella città.

8.1 Obiettivi dell'intervento a scala urbanistica

Nell'articolazione dell'aggregato urbano di edifici, si è scelto di perseguire i seguenti obiettivi di progetto:

8.1.1 Inclusionione e integrazione sociale

Detto obiettivo fonda sulla volontà e la tendenza all'inclusione delle diverse identità in un unico contesto, privo di discriminazioni e nel quale venga praticata una forma di comunicazione interculturale; in tal senso, si intende attraverso il disegno di piano favorire l'incontro di più soggetti: dall'abitante dell'area al turista, passando per lo studente, il coltivatore, l'imprenditore... Attraverso la delineazione di spazi comuni di pertinenza di aree aventi destinazioni d'uso differenti, infatti, si prevede di favorire l'interazione sociale e l'inclusione di tutte le realtà che vivono lo spazio, contribuendo a delineare un nuovo senso di identità e appartenenza, scevro dalle implicazioni negative e il conseguente *effetto stigma* dei recenti eventi di cronaca inerenti.

Difatti, attraverso l'integrazione sociale si intende mettere in moto un processo che consenta al sistema urbano di acquistare e conservare una propria unità strutturale e funzionale a scala locale in termini di mantenimento dell'equilibrio interno del sistema, della cooperazione sociale, del coordinamento tra i ruoli e le istituzioni, tra le diverse culture e le diverse fasce d'età della popolazione.

Per favorire tale processo, inapplicabile con un mero intervento di natura prettamente tecnica, si intende promuovere la realizzazione di edifici/moduli adibiti a social housing ed a residenze per studenti, integrare spazi educativi negli edifici con un minor numero di moduli delineando poli assenti nell'area per garantire un sistema scolastico rispondente alle esigenze della comunità (particolarmente in merito alle distanze da percorrere per raggiungere l'istituzione). Infine, l'intervento si propone di prevedere ambienti a spiccata valenza pubblica (primo tra tutti la grande piazza centrale), nei quali si intende delineare ulteriori aree dedicate a verde, al recupero delle acque meteoriche o al recupero energetico. In sintesi, in tale strategia si riscontra anche il fine di definire intersezioni e commistioni tra le tre linee cardine dell'intervento, auspicando che il recupero e la riqualificazione ambientale funga da traino per quella sociale ed economica e viceversa.⁵

⁵ Fondamentale per garantire una autentica integrazione all'interno dell'ambito, oltre che a determinare un piano efficacemente rispondente alle esigenze della comunità locale, è garantire forme di urbanistica partecipata, consentendo la collaborazione di professionisti, istituzioni e cittadini alla realizzazione di un insediamento che risponda al meglio alle esigenze della popolazione.

8.1.2 Riqualificazione ambientale

Si ritiene imprescindibile definire, atteso il carattere metropolitano della città di Milano, che intende elevarsi a *città-traino* nella sfida ambientale italiana, all'interno del progetto una linea strategica sui temi ambientali, anche in virtù dei recenti effetti del cambiamento climatico, quanto mai evidenti, oltre che del già vasto quadro normativo in materia di sostenibilità (Agenda 2030, Next generation EU, NZEB...) e dei numerosi esempi a scala europea di quartieri ed aree di città sostenibili.

Per definire interventi efficaci, ci si è ispirati ad alcune *best practices* mitteleuropee, prevedendo soluzioni di recupero e risparmio di risorse per gli edifici attraverso:

- Impianti di raccolta e stoccaggio delle acque meteoriche e di riutilizzo delle acque grigie, dotati di filtri integrati e vegetati per garantire potabilizzazione dell'aliquota di acqua convogliata in serbatoi interrati;
- Impianti eolici e fotovoltaici a piccola scala, a diretto servizio delle utenze;
- Ridotti indici di impermeabilizzazione del suolo;
- Utilizzo di materiali sostenibili nella progettazione degli edifici, a seguito di un attento *Life Cycle Assessment*;
- Attenzione ai parametri relativi alla certificazione LEED⁶;
- Tendere ad una progettazione bioclimatica, il più possibile legata all'utilizzo di impianti passivi (camini del vento e pozzi di luce, collettori solari, pompe di calore, vetri fotovoltaici...) o domotizzati (con appositi sensori e possibilità di implementare sistemi IoT, secondo la filosofia della *building automation*) per garantire il minimo consumo energetico;
- Progettazione di opportuni impianti elettrici in luogo degli impianti a gas (elettrosaldamento a pavimento, caldaia elettrica, fornelli a induzione...) per limitare la dipendenza dai combustibili fossili;
- Promuovere l'utilizzo di *airlite*⁷ nei rivestimenti opachi degli edifici.

Anche in questa linea strategica si è operato il più possibile per garantire una contaminazione con le altre strategie progettuali, integrando la sostenibilità sociale con quella ambientale ed economica promuovendo un equilibrio tra comfort, risparmio e riduzione dell'impatto ambientale.

8.1.3 Mobilità dolce

L'incentivo ai sistemi di mobilità dolce sostenibili e collettivi a scapito del trasporto privato ha caratterizzato il disegno della rete viaria, avente destinazione prettamente ciclopedonale (eccezion fatta per il transito di mezzi di emergenza e navette elettriche da e per le vicine stazioni della

⁶ La certificazione si articola in otto categorie: trasporto e ubicazione; sostenibilità del sito; efficienza delle risorse idriche; energia e atmosfera; materiali e risorse; qualità degli ambienti interni; innovazione; priorità regionale.

⁷ Particolare vernice in grado di assorbire lo smog; il murales più grande d'Europa realizzato con la suddetta si trova a Roma, in via del Porto Fluviale. Attraverso la luce solare, le componenti inquinanti in atmosfera vengono scomposte in sali minerali, con una capacità di abbattimento di quasi il 90% degli inquinanti presenti in aria.

metropolitana), con una ridotta area carrabile di pertinenza delle sole aree di parcheggio, interrate e parte di un sistema di collegamenti sotterranei tra edifici in maniera tale da non incidere significativamente sul disegno dell'ambito. Per soddisfare i fabbisogni di mobilità della popolazione nell'area, si prevede l'installazione di stazionamenti di bike sharing⁸ in prossimità dei punti di interesse del lotto (attività collettive, spazi ricettivi o del commercio), in maniera tale da garantire un sistema di circolazione nell'area senza incidere sui livelli di inquinamento atmosferico ed acustico ed aumentando al contempo i livelli di sicurezza del trasporto e della circolazione. Si ipotizza inoltre di favorire l'interscambio tra il trasporto pubblico locale e detto sistema di mobilità, inserendo una linea di navette elettriche che collegano l'ambito alle vicine stazioni delle linee lilla e rossa.

Principale criticità nell'ambito sul tema della mobilità è la prossimità con assi ad elevato scorrimento, per i quali sono state previste delle aree *cuscinetto* per garantire un graduale passaggio dall'ambiente trafficato all'area interessata dal progetto.

8.2 Il disegno dell'area di intervento e le connessioni con l'intorno

L'area di intervento è stata articolata come esplicitazione dei seguenti principi *funzionali*:

- **Sicurezza:** definizione di *aree cuscinetto* tra gli assi viari preesistenti e le funzioni previste, in maniera tale da garantire il regolare esercizio delle attività senza subire l'influenza diretta del traffico veicolare; posizionamento diffuso di attività residenziali e commerciali con servizio continuo per garantire un flusso di persone costante nell'area; riduzione al minimo degli assi viari carrabili nell'area, assoggettando gli interventi previsti a regime di ZTL per regolare l'accesso con mezzi privati a soggetti esterni all'area.
- **Salubrità:** Utilizzo estensivo di superfici a verde e tetti giardino; delimitazione di aree di rimboscamento urbano e zone dedicate ad attività sportive di varia natura, opportunamente distanziate dall'ambiente urbano circostante; forte incentivazione alla mobilità dolce a scapito dell'utilizzo di mezzi privati; utilizzo intensivo di vernici in grado di assorbire l'inquinamento atmosferico in prossimità dei confini dell'area per garantire un effettivo diaframma tra il contesto circostante e l'intervento proposto.
- **Impatto ambientale e carbon footprint:** definizione di strategie e tecnologie progettuali dedicate alla minimizzazione dei consumi, degli sprechi e delle conseguenze ambientali di un'eventuale dismissione; implementazione di tecnologie in grado di rendere l'intervento

⁸ Per favorire l'accessibilità al servizio da parte della massima quantità di utenti possibile, si ipotizza di prevedere stazionamenti dedicati ai diversamente abili, su ispirazione del servizio in corso di implementazione a Torino, garantito dalla fondazione Paideia.

conforme agli standard NZCB⁹ ed NZEB, garantendo indipendenza energetica ed un sufficiente grado di autonomia di risorsa idrica¹⁰.

La netta distinzione *compositiva* dell'intervento non si risolve in una separazione dal contesto circostante: l'area si apre verso ed è compenetrata dalle preesistenze, seguendo la volontà di *restituire* uno spazio alla città: si prevede che i contorni del lotto siano interamente aperti e dotati di spazi collettivi che garantiscano un miglioramento del paesaggio e della vivibilità nell'abitato, essendo il dislivello tra il manto stradale e l'area del lotto entro il metro di differenza. In questo modo, pur essendo limitato l'accesso ai veicoli a motore, viene garantita un'assoluta permeabilità a livello ciclopedonale tra il lotto e le sue immediate vicinanze.

8.3 Parametri per la sostenibilità

Come anticipato, nel disegno di piano hanno partecipato alla definizione e delineazione dei singoli interventi una serie di parametri legati al miglioramento delle prestazioni energetiche del sistema edilizio, garantendo l'indipendenza dai combustibili fossili, impiegando fonti energetiche rinnovabili, migliorando la qualità dell'aria e riducendo l'impatto acustico del traffico circostante, implementando sistemi di recupero e riutilizzo delle acque grigie e meteoriche; a ciò si aggiunge l'utilizzo intensivo di verde pubblico, con ridotti valori di albedo, la previsione di specchi d'acqua nelle aree pavimentate di particolare estensione e sprovvisti di sufficienti elementi schermanti dalla radiazione solare ed altre strategie che contribuiscono a garantire il comfort nell'area, riducendo l'effetto *isola di calore* tipico delle aree urbane densamente popolate, già di entità relativamente minore rispetto ad altre aree in virtù della vicinanza al mare e al parco urbano dell'area adiacente. Tali strategie rivestono un importante ruolo *deontologico-morale* nella progettazione, essendo peraltro sempre più richieste dalle normative e dagli accordi internazionali alla luce delle crescenti crisi climatiche.

Un intervento sostenibile sul territorio però non si limita unicamente a criteri di sostenibilità ambientale e sociale, in quanto l'attuazione delle previsioni dipende soprattutto dalla *sostenibilità* economica; negli ultimi anni però le strategie citate hanno rappresentato di per sé anche un significativo incentivo all'attuazione, essendo di elevatissima attrattiva per *stakeholders* – portatori d'interesse – in quanto foriere di elevate possibilità remunerative e, contemporaneamente, significativi effetti *di immagine*. Emblematico in tal senso è il PNRR, piano di promozione comunitaria avente tra i principali obiettivi la riqualificazione sostenibile dell'ambiente urbano.

⁹ Net Zero Carbon Building, edifici a emissioni zero di CO₂.

¹⁰ Il principio ha influito sul posizionamento e il distanziamento tra edifici, oltre alla definizione di aree libere per il posizionamento di serbatoi interrati a servizio della comunità.

8.3.1 Il Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR)

Documento necessario per accedere ai fondi *Next Generation EU*¹¹ (NGEU), pacchetto varato per un'efficace transizione economica dopo la crisi pandemica mondiale degli ultimi anni che prevede 750 miliardi di euro di prestiti agevolati e sovvenzioni agli Stati membri secondo un *Dispositivo per la Ripresa e Resilienza* (RRF) valido dal 2021 al 2026, presenta un elevatissimo interesse da parte del governo e delle istituzioni¹². Per essere erogati i fondi, si richiede che il PNRR rispetti determinati obiettivi performativi entro precise scadenze: tra i vari parametri economici da dover rendicontare, viene richiesto anche un aggiornamento dello stato di avanzamento dei progetti stessi, determinando una forma di vigilanza e controllo sull'attuazione. Tra i soggetti attuatori del PNRR figurano Regioni ed enti locali (Province, Comuni, città metropolitane...), sui quali ricade la responsabilità delle singole progettualità e della loro attuazione (nel novero delle proprie competenze istituzionali, valendo altresì il principio della sussidiarietà). In particolare, circa 66 miliardi di euro sono stati affidati dal governo all'attuazione regionale e locale¹³, in particolare per ciò che concerne:

- Messa in sicurezza di edifici scolastici;
- Social housing;
- Piani urbani integrati;
- Rigenerazione urbana;
- Puntare al raggiungimento dell'impatto climatico zero entro il 2050¹⁴;
- Ridurre le emissioni di gas serra del 55% (rispetto al 1990) entro il 2030¹⁵;
- Creare nuovi spazi verdi nelle città.

Risulta evidente che, in aggiunta alle indicazioni delle recenti leggi di bilancio in materia di efficientamento energetico e strutturale, un intervento come quello proposto rappresenta un'elevatissima attrattiva all'investimento, in quanto capace di assorbire diverse linee di indirizzo del piano rispettando al contempo il principio *DNSH* (Do No Significant Harm, non danneggiare significativamente l'ambiente circostante) richiesto dalla Comunità Europea.

In particolare, l'Art. 1, commi 534 e ss. Della L. 234/2021¹⁶ (*Bilancio di previsione dello Stato per l'anno finanziario 2022 e bilancio pluriennale per il triennio 2022-2024*) tratta le modalità di richiesta per un:

[...] contributo per investimenti in progetti di rigenerazione urbana, volti alla riduzione di fenomeni di marginalizzazione e degrado sociale, nonché al miglioramento della qualità del decoro urbano e del

¹¹ Per maggiori informazioni, v. https://next-generation-eu.europa.eu/index_it

¹² Si rimanda a tal proposito al portale governativo dedicato: <https://www.italiadomani.gov.it/content/sogei-ng/it/it/home.html>

¹³ DM 6/08/2021, <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2021/09/24/21A05556/sg>

¹⁴ Come dichiarato nell'European Green Deal del 2019.

¹⁵ Come da accordo comunitario raggiunto il 05/05/2021 (e proposta di legge associata) e da mission del programma quadro Horizon Europe, successore di Horizon 2020.

¹⁶ v. testo di legge in *Gazzetta Ufficiale*: <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2021/12/31/21G00256/sg>

tessuto sociale e ambientale.

Tra le linee strategiche del PNRR, particolarmente significative ai sensi dell'attuazione di un intervento nell'area sono:

- *Transizione ecologica*: ritenuta alla base del nuovo modello di sviluppo italiano ed europeo, segna il viraggio verso un'economia *green*, legata allo sviluppo sostenibile oltre che al guadagno economico;
- *Inclusione sociale*: fonda sul miglioramento della coesione territoriale, avendo tra le proprie priorità la parità di genere, la protezione e la valorizzazione dei giovani e il superamento dei divari territoriali.

Risulta dunque che, alla luce dell'elevatissimo interesse verso tematiche strutturali del progetto, la sua attuazione – eventualmente anche tramite interventi di partenariato pubblico-privato per le opere di spiccato interesse economico, come gli edifici per uffici – rientrerebbe tra le iniziative promosse all'interno del PNRR, garantendo in tal senso un cospicuo finanziamento ed una rapida attuazione, garantendo una *reimmissione* dell'area nel contesto urbano, restituendola pienamente alla città ed ai cittadini.

8.4 Indicatori di sostenibilità considerati nel progetto

Nel perseguire gli obiettivi sopracitati, il disegno di piano è stato elaborato tenendo conto di diversi indicatori della sostenibilità dell'intervento, in maniera tale da poter quantificare gli effetti della pianificazione sull'ambiente circostante.

In primo luogo, la minimizzazione del consumo di suolo attuata ha consentito la definizione di un elevato indice di permeabilità: difatti, sono stati definiti in prima approssimazione degli indici di permeabilità significativamente superiori al limite inferiore del 50%, garantendo un intervento poco suscettibile ad allagamenti, ridotti indici di riflessione, significativi aumenti di temperatura nell'intorno edificato ed altre conseguenze legate ad un significativo incremento delle superfici impermeabili.

8.4.1 Energia

Avendo previsto numerosi interventi di domotica ed utilizzo della risorsa elettrica, per poter garantire l'indipendenza energetica sono state previste due tipologie di impianto di produzione: fotovoltaico, sulla copertura e nelle facciate degli, e micro-eolico, con diverse turbine ad asse verticale in ciascun edificio.

I pannelli fotovoltaici, realizzati in silicio microcristallino, presentano impianti che occupano una superficie di 8 m² ciascuno per una superficie complessiva di 2.5 ha. Considerando impianti in grado di fornire 3 kW di picco, si stima una produzione media di 1550 kWh/anno per ciascun impianto.

Tenendo conto delle incertezze del sistema legate alle condizioni climatiche, particolarmente nel

periodo invernale, è stato inoltre previsto un intervento di fornitura ausiliaria con turbine eoliche ad asse verticale da 7 kWp ciascuna, in grado di erogare 1500 kWh/anno per turbina, determinando una fornitura elettrica ausiliaria ed ulteriore a quella fotovoltaica.

L'impianto complessivo dunque garantisce mediamente una fornitura elettrica elevata, tendenzialmente superiore rispetto all'insediamento teorico; la quota eccedente può essere utilizzata per l'alimentazione dei servizi pubblici e, in caso di eccedenze, per un'immissione nella rete comunale; si garantisce così un intervento che, oltre ad annullare i propri consumi, presenta un "impatto ambientale inverso", consentendo un miglior esercizio complessivo della risorsa sul territorio.

8.4.2 Risorsa idrica

Non essendo previsti appositi serbatoi di recupero delle acque meteoriche nelle aree comuni per mitigare i costi dell'intervento – pur essendo state previste aree adatte per una loro localizzazione, sotto le aree boscate e in prossimità delle aree di parcheggio interrato degli edifici – si è optato per la previsione di impianti di recupero dell'acqua piovana e riuso delle acque grigie¹⁷ alla scala del singolo edificio, garantendo una forma di recupero della risorsa indipendente per ogni modulo. Si prevedono:

- Impianto di recupero dell'acqua meteorica dalla copertura ed altri sporti, con apposito impianto di filtraggio e depurazione e una coppia di cisterne da 64 m³ ciascuna;
- Impianto di depurazione e potabilizzazione delle acque grigie con cisterna da 128 m³.

Considerando una dotazione idrica giornaliera di 250 L/ab/giorno, come da recenti indicazioni nella normativa in materia acquedottistica, si prevede una domanda complessiva di almeno 2250 m³/giorno nell'insediamento, a fronte di una capacità di stoccaggio giornaliera di 256 m³/modulo. In prima approssimazione, si ritiene che, in condizioni di funzionamento medio dei sistemi di stoccaggio e recupero, il sistema sia in grado di sopperire efficacemente alle esigenze dell'abitato, con aliquote aggiuntive destinabili all'irrigazione degli spazi verdi pertinenziali o, di concerto con l'ente gestore della risorsa idrica, all'immissione nella rete di distribuzione idrica comunale. L'intervento dunque si può qualificare come indipendente dalle forniture comunali, garantendo un surplus a servizio della comunità circostante.

8.4.3 CO₂ ed altre emissioni

Per minimizzare ulteriormente l'impatto dell'intervento, come anticipato, sono stati previsti edifici privi di allaccio alla fornitura di gas – complice l'eccellente capacità di produzione di energia elettrica – garantendo allo stesso tempo una totale indipendenza dell'ambito dai combustibili fossili. Per

¹⁷ Acque provenienti dagli scarichi di cucine e lavanderie, sostanzialmente contaminate da saponi, grassi ed altri materiali organici, di più semplice depurazione e potabilizzazione rispetto alle acque nere.

garantire la fornitura di acqua calda sanitaria agli edifici senza impattare sulla superficie destinata ad impianti fotovoltaici, sono stati previsti impianti a pompa di calore differenziati per ciascun edificio, in grado di erogare l'acqua richiesta attraverso l'energia geotermica insita nell'area. In questo modo, si garantisce un intervento pressoché ad emissioni 0 – fatto salvo per il transito veicolare per la sosta e la fase di realizzazione dell'impianto stesso – rispondente agli obiettivi comunitari per il 2050.

In aggiunta a ciò, sono state previste numerose strategie di mitigazione e assorbimento della CO₂ prodotta, come la previsione di uno strato di finitura esterna per gli edifici in airlite, vernice in grado di decomporre il 90% degli inquinanti presenti in atmosfera – CO₂ inclusa – in sali minerali utili alla crescita della vegetazione, oltre ad una spiccata capacità di eliminazione dei batteri presenti sulla superficie in virtù dell'alto potere ossidante e dell'elevata alcalinità della superficie, ed un elevatissimo potere riflettente, in grado di mitigare significativamente il passaggio di calore dall'esterno.

L'anidride carbonica è inoltre assorbita dalla vegetazione, la cui forte presenza garantisce un elevato assorbimento di CO₂ tramite fotosintesi (si consideri che, in media, un abitante produce 7.5 tonnellate/anno di anidride carbonica).

Come intuibile, la principale aliquota di abbattimento di consumi è però la totale dipendenza dell'intervento da fonti rinnovabili.

La combinazione delle strategie adottate consente da un lato un totale annullamento delle emissioni prodotte dagli abitanti nell'ambito – grazie all'indipendenza assoluta da combustibili fossili – dall'altro una riduzione di emissioni di diverse tonnellate annue di CO₂. A ciò si aggiunge un elevato assorbimento degli inquinanti presenti in atmosfera, determinando un ambiente caratterizzato da elevata salubrità.

8.5 L'impianto di progetto

Il piano proposto, basato sui principi organizzativi e funzionali della Ville Radieuse, prevede quindi



due accessi carrabili al lotto (a Nord e ad Ovest) che si dirigono verso un sistema sotterraneo di parcheggi, depositi e collegamenti sotterranei tra edifici. In superficie, l'impianto è organizzato in un sistema viario organico immerso nel verde, in cui si prevedono numerose postazioni bike sharing, stazionamenti di navette elettriche e altre iniziative per promuovere la mobilità dolce in tutto l'abitato, e non solo nell'ambito di intervento. Le superfici verdi sono inoltre dotate di numerose attrezzature, come campi da calcio e da tennis. La piazza centrale, fulcro dell'intervento, ospita uno specchio d'acqua centrale che, in aggiunta agli evidenti effetti estetici, contribuisce al raffrescamento naturale dell'area. Si riporta una vista del piano, delle linee metropolitane adiacenti e della distribuzione del verde nell'area.

9. Sviluppi futuri

Attesa la complessità del progetto, del sistema urbanistico e della sua articolazione, si riportano di seguito alcune idee e strategie che potrebbero essere adottate per sviluppare ulteriormente il sistema e la proposta, con l'auspicio di poter ispirare nuovi passi in questa direzione, portando a ulteriori avanzamenti sul tema della modularità strutturale.

Innanzitutto, come evidente dal diagramma delle pressioni del vento, va sottolineato che la tipologia strutturale si rivela efficace anche per un edificio di 100 piani, di 450 m di altezza. Le elevate pressioni del vento e la prevalenza del progetto per rigidità hanno determinato una limitazione significativa nel dimensionamento del sistema in assenza di un nucleo centrale, per il quale è stata però già definita una predisposizione nel sistema strutturale. Si ritiene che l'introduzione di un nucleo, oltre ad irrigidire la struttura e consentire il raggiungimento di altezze anche superiori ai 450 m preventivati, muti il sistema strutturale in uno ancora più efficiente e sicuro, in cui le *transfer trusses* diagonali fungono anche da outrigger tra nucleo e megacolonne, definendo una megastruttura a nucleo ed outrigger, che risulta, in base agli studi degli scriventi, attualmente inedita.

A ciò si aggiunge l'intenzione iniziale di collegare più torri tra loro con degli elementi a *piastra* di almeno cinque livelli e con degli *sky bridges* a più altezze. Anche in questo caso, il sistema risulterebbe particolarmente innovativo, rendendo la singola torre a sua volta componente di un sistema a megastruttura del secondo ordine, consentendo il raggiungimento di altezze ulteriori e definendo un comportamento strutturale ancor più innovativo, che meriterebbe approfondimento. Gli *sky bridges*, inizialmente considerati in ottica puramente formale, potrebbero in realtà contribuire – se opportunamente scanditi e progettati – da leganti tra le diverse torri, definendo un *telaio secondario* in grado di irrigidire ulteriormente il sistema di torri e, idealmente, riproporre un comportamento tubolare del complesso.

Detti collegamenti in quota rispondono all'obiettivo di realizzare vere e proprie *città in altezza*, su più livelli: le piastre di collegamento potrebbero diventare piazze tra edifici di differenti altezze, definendo quindi una stratificazione su più livelli della città, riducendo il consumo di suolo ed aumentando significativamente la densità urbana senza però compromettere le esigenze basilari della vita dell'uomo contemporaneo.

Un'ulteriore e innovativa concezione strutturale applicabile al sistema in oggetto riguarda lo studio del comportamento dinamico della struttura: attesa l'evidente distinzione tra struttura pendolare e megastruttura portante, è possibile prevedere nel collegamento tra impalcati e megacolonne degli smorzatori a masse accordate, utili per smorzare significativamente le azioni sismiche in occasione di un evento tellurico. In questo modo, tutti gli impalcati ai vari moduli oscillerebbero in controfase con la megastruttura del modulo corrispondente, limitando significativamente gli effetti di un sisma sulla

struttura e consentendo quindi una miglior risposta a detti eventi.

Per tener conto delle sempre maggiori esigenze di riuso e riutilizzo del materiale, si ritiene che un ulteriore possibile sviluppo della tipologia – attese le preponderanti caratteristiche di modularità – riguardi la possibilità di implementare nel progetto profili in acciaio di uso più comune nelle applicazioni industriali, così da consentire – eventualmente senza dover comporre più profili in un elemento in composizione saldata – il riutilizzo di elementi strutturali di impianti dismessi, contribuendo a una ricircolazione dei materiali da costruzione, riducendo sensibilmente l'impatto ambientale dovuto al loro smaltimento e/o alla loro reimmissione sul mercato attraverso processi di fusione. Parallelamente, nel corso dello sviluppo della proposta progettuale è stato immaginato un sistema di foratura delle membrature tale da consentire, all'atto della dismissione dell'edificio, un riutilizzo delle sue sezioni in svariate applicazioni di ingegneria civile: in questo modo, alla versatilità del sistema strutturale si assocerebbe una versatilità dei suoi componenti che, all'atto dello *smontaggio* dell'edificio, potrebbero essere rapidamente e direttamente applicate in un cantiere di diversa natura, per un'opera strutturale differente.

10. Conclusioni

In conclusione, si ritiene che la proposta progettuale elaborata, pur non essendo particolarmente avveniristica nella realizzazione della torre progettata, presenti significative potenzialità nello sviluppo della città futura, attese le sempre maggiori necessità di prevedere linee d'indirizzo per un progresso sostenibile, attento alle questioni ambientali e climatiche e all'utilizzo delle risorse (suolo, acqua, energia). Con l'utilizzo di profili votati al riuso e la possibilità di recuperare sezioni da altri sistemi strutturali, anche la realizzazione stessa dell'edificio risulta significativamente votata alla riduzione dell'impatto ambientale.

Si auspica che la seguente proposta, pur se relegata all'applicazione di nozioni ed approcci progettuali appresi nel corso dell'insegnamento, possa contribuire alla maturazione di un approccio più consapevole e illuminato verso la delineazione delle città del futuro, città densamente stratificate, attente alla questione ambientale, sicure, sviluppate in ottica prevalentemente sociale, votate al riuso, al riutilizzo e alla rielaborazione organica nel tempo dei sistemi strutturali; una città in cui la modularità, abbinata alla libertà di espressione architettonica nelle facciate, consente un'evoluzione del sistema urbano parallela a quella dei suoi abitanti e a quella del mondo intero, senza limitare in alcun modo le possibilità di ulteriori cambiamenti di paradigma.