

Alma Mater Studiorum - Università di Bologna

Scuola di Ingegneria e Architettura
Dipartimento di Architettura
Corso di laurea in Ingegneria Edile e Architettura

Tesi di laurea in
Architettura e Composizione architettonica

Combinatorial Habitat:

un sistema architettonico adattivo
tra estetica e tettonica

CANDIDATO
Beatrice Borri

RELATORE
Prof. Alessio Erioli

CORRELATORE
Lapo Naldoni

Anno Accademico 2024/25
Sessione VI

ABSTRACT

La tesi esplora il rapporto tra architettura e tecnica, proponendo un approccio generativo in grado di integrare forma, struttura ed estetica su scala architettonica. Superando la separazione tra ideazione e costruzione, le logiche costruttive sono considerate strumenti in grado di orientare le scelte progettuali e definire relazioni coerenti tra materiali, configurazione spaziale e prestazioni strutturali.

Il progetto applica questi principi a un sistema costruttivo in legno CLT assemblato a secco, basato su pochi elementi standardizzati e su un sistema di rinforzo strutturale che connette configurazione architettonica e prestazioni statiche. La progettazione segue una logica di economia dei mezzi e sfrutta la ripetizione controllata degli elementi per generare configurazioni adattive, capaci di reagire alle diverse esigenze funzionali e alle condizioni del contesto.

Il sistema proposto si configura come un modello adattivo, in cui la complessità emerge dalle relazioni tra elementi ripetuti piuttosto che dalla varietà dei componenti. Questa logica consente di generare configurazioni spaziali differenti a partire da un numero limitato di elementi, applicato alla progettazione di un habitat capace di adattarsi nel tempo alle esigenze e alle diverse modalità di utilizzo dello spazio.

INDICE

1. ARCHITETTURA COME PROCESSO INTEGRATO	1
Architettura e tecnica	1
2. QUADRO TEORICO	9
Architettura e tecnologia	9
Architettura e pensiero sistemico: un cambio di paradigma	16
Design combinatorio e assemblaggi	29
3. HABITAT	35
4. METODO	41
Strumenti	41
Integrazione tra Assembler e Karamba3D	44
Approccio discretizzato e prefabbricazione	49
5. STRATEGIE PROGETTUALI	53
6. DESIGN PROCESS	67
Assembler	67
Sperimentazioni preliminari di assemblaggio	72
Primi test di comportamento strutturale con Karamba3D	82
Fase esplorativa: assemblaggi, regole e configurazioni spaziali	88
Modellazione a lastre: criteri e considerazioni metodologiche	98
Sviluppo e valutazione dei set di regole per l'assemblaggio	102
Assemblaggio, regole e feedback: costruzione adattiva del sistema di rinforzo	116
Ambiente	140
Ambiente virtuale e parametri di crescita	147
7. PROGETTO	173
8. CONCLUSIONI	203

1. ARCHITETTURA COME PROCESSO INTEGRATO

Architettura e tecnica

L'interazione tra architettura e tecnica costruttiva è stata una costante lungo tutta la storia, rispecchiando le esigenze, le risorse e le aspirazioni delle società di ogni epoca. Il termine architettura deriva dal greco *architéktōn*, a sua volta composto da *árche* (principio primo) e *téktōn* (tessere, lavorare il legno). Questa etimologia sottolinea l'intima relazione tra ideazione e realizzazione, tra forma e tecnica. In origine, infatti, non esisteva una netta distinzione tra l'atto del progettare e quello del costruire: architettura e tecnica erano due aspetti inseparabili di un unico processo creativo. Nonostante oggi, nella pratica professionale e accademica, architettura e tecnica siano spesso considerate discipline distinte, numerosi casi mostrano come l'interazione tra architettura e tecnica possa condurre a risultati interessanti, evidenziando il potenziale di un approccio integrato nella definizione dell'estetica dell'architettura.

Già con Brunelleschi si assiste a una prima separazione tra il momento ideativo e quello realizzativo del progetto architettonico. Pur mantenendo un controllo diretto sul cantiere attraverso squadre di manovali da lui coordinate, Brunelleschi sviluppava il progetto in autonomia, segnando così una distinzione tra progettista e costruttore (Carpo, 2011).

Questo processo trova un'importante codificazione con Leon Battista Alberti. Alberti introduce l'idea di progetto come documento completo e definitivo, contenente tutte le informazioni necessarie per essere realizzato senza ulteriori interventi o modifiche (Carpo, 2011).

Nella sua visione, l'architetto deve completare ogni revisione in fase progettuale, in modo che la costruzione possa avvenire senza esitazioni. In questo passaggio, l'architetto assume uno status autoriale, allografico e notazionale: l'opera viene così identificata tanto con l'edificio quanto con il progetto che lo rappresenta (Carpo, 2011).

Come osserva Mario Carpo in *The Alphabet and the Algorithm*, questo modello albertiano segna una svolta radicale: l'architettura diventa un sistema informativo che descrive l'oggetto attraverso un codice autonomo e replicabile. Il digitale, osserva Carpo, spezza questa continuità storica, mettendo in crisi il paradigma albertiano. La natura variabile e modificabile dell'informazione digitale mette in crisi la logica della notazione stabile e definitiva, tipica dell'architettura albertiana e, più in generale, del modello industriale basato sulla standardizzazione (Carpo, 2011). La cupola di Brunelleschi segna l'avvio della modernità architettonica, in cui l'architettura si configura come arte autoriale fondata sulla separazione tra il progetto e la sua esecuzione. Con Alberti, questa transizione viene formalizzata attraverso una notazione grafica standardizzata, che consente di separare nettamente il ruolo dell'architetto da quello del costruttore. Nasce così l'idea del progetto come sistema informativo autonomo, capace di descrivere l'edificio in modo preciso e replicabile, indipendentemente dalla presenza dell'autore (Carpo, 2011).

Questa evoluzione segna il passaggio da un'architettura "autografica" – legata direttamente alla mano dell'artigiano – a una "allografica", basata su un linguaggio codificato e condiviso. Il progetto diventa così un sistema di informazione in sé, che non solo descrive l'oggetto architettonico, ma lo sostituisce simbolicamente e operativamente nel processo di costruzione.

Dettaglio architettonico

Il dettaglio architettonico emerge come punto critico e significativo per comprendere la frattura moderna tra ideazione e realizzazione. Se il progetto è diventato un sistema autonomo di informazioni, separato dal processo costruttivo, il dettaglio rappresenta oggi una possibile soglia di reintegrazione: un luogo in cui la tecnica torna a dialogare direttamente con la forma, e dove le decisioni progettuali si confrontano con le logiche materiali, costruttive e operative. Il dettaglio, in quanto interfaccia tra concetto e costruzione, permette di indagare non solo come l'architettura viene realizzata, ma anche come essa può essere pensata a partire dalla tecnica stessa. Per questo, affrontare il tema del dettaglio significa interrogarsi sulle

modalità attraverso cui l'architettura può tornare a essere un processo integrato.

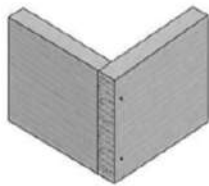
Nella tradizione progettuale, il dettaglio è spesso affrontato come fase conclusiva del processo, il risultato di un progressivo restringimento di scala. Secondo questa visione, si tratterebbe di un momento risolutivo, in cui si definiscono le modalità costruttive e formali in risposta a scelte già compiute a scala maggiore. Tuttavia, una lettura più attenta e contemporanea del ruolo del dettaglio permette di riconoscerlo non come un'espressione marginale, ma come un elemento attivo del processo progettuale.

Riconoscere il dettaglio come componente fondamentale del processo progettuale consente di comprenderne il ruolo generativo, come descritto da Roland Snooks (2012). Il dettaglio si configura come informazione procedurale, ovvero un'operazione locale che genera forma e organizzazione. Snooks lo descrive come una procedura o comportamento che, attraverso la ripetizione, contribuisce alla formazione di un sistema informativo complesso, andando oltre la semplice funzione tecnica o formale, dettagli che derivano dalle modalità di costruzione, non semplici aggiunte decorative ma espressioni dirette del modo in cui un elemento viene concepito e realizzato.

Il dettaglio diventa così ornamento attivo, capace di generare pattern percettivi e di contribuire alla definizione dell'estetica architettonica. Non va inteso come fase accessoria o terminale del progetto, ma come momento integrato e generativo, in cui si saldano progettazione, processo e costruzione.

Greg Lynn, nel quadro della progettazione digitale, propone una lettura del dettaglio in relazione al concetto di complessità (Lynn, 1993). A differenza di una struttura gerarchica tradizionale, in cui le parti sono subordinabili alla totalità, la complessità implica variazioni locali non riducibili alla struttura del tutto (Lynn, 1993). Lynn critica l'idea del dettaglio come riduzione del progetto architettonico a un "momento discreto". In un sistema complesso, afferma, il dettaglio non è un elemento separato, ma è ovunque: distribuito, variegato e in continua interazione con le qualità formali e spaziali dell'insieme (Lynn, 1993).

In questa tesi, il dettaglio non è inteso come una parte secondaria o accessoria, ma come una componente attiva della sintesi progettuale: un punto nodale attraverso cui si costruisce un nuovo tipo di totalità. Non si tratta più della somma di parti subordinate a un ordine superiore, ma di un sistema emergente, in cui ogni componente



Butt Joint



Lap Joint



Bridle Joint



Dowel Joint



Pocket-Hole Joint



Mitre Joint



Biscuit Joint



Dado Joint



Dovetail Joint



Groove and Tongue Joint



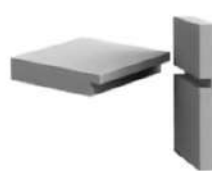
Mortise and Tenon Joint



Box Joint



Rebate Joint



Groove Joint



Cross Dowel Joint

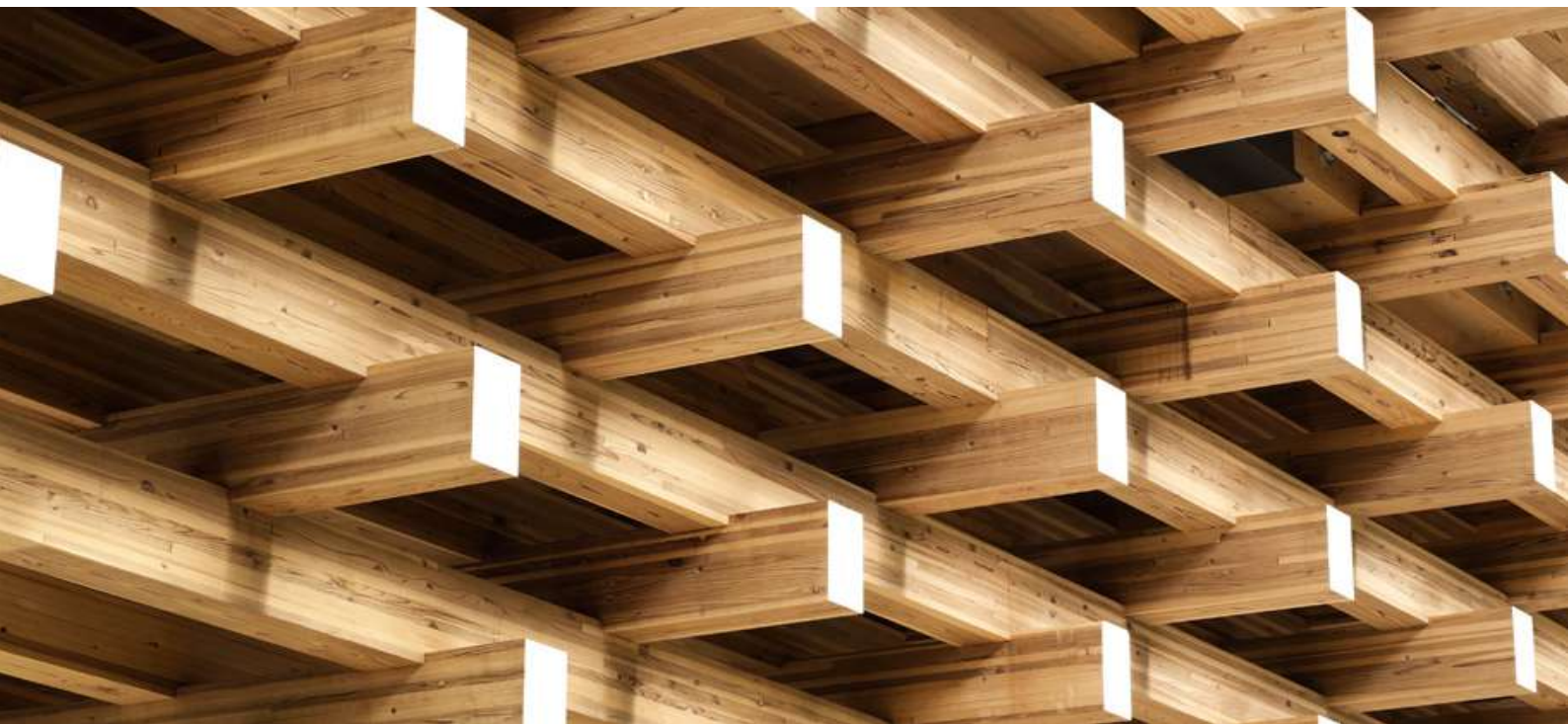


Fig.1 - Final Wooden House, Sou Fujimoto (2006)

La Final Wooden House è costruita esclusivamente con elementi modulari in legno di cedro, impilati senza distinzione tra pavimenti, pareti o soffitti. Il risultato è uno spazio continuo e tridimensionale, in cui ogni superficie può essere interpretata liberamente come scala, seduta, piano d'appoggio o elemento strutturale (Final Wooden House, 2020). L'approccio riflette un'economia dei mezzi: un solo materiale, una sola sezione, per costruire un intero universo abitabile, variabile e aperto all'interpretazione.

locale è potenzialmente generativa dell'intero. Da qui l'esigenza di una teoria del progetto capace di pensare il dettaglio non come fine ma come principio – come momento di progettazione che partecipa intensamente alla definizione del sistema architettonico e della sua estetica. In questo senso, il dettaglio non è solo il luogo in cui il progetto incontra la costruzione, ma anche quello in cui si manifesta un'estetica generata dalla tecnica stessa.

Estetica

L'estetica architettonica è intrinsecamente legata al movimento e alla percezione sensoriale. L'esperienza estetica non si esaurisce nella visione statica di un oggetto, ma si forma attraverso un'interazione dinamica tra corpo, spazio e tempo. Vivere un'opera di architettura significa attraversarla, abitarla, esplorarla: la percezione che ne deriva è in costante mutamento, sia per effetto del movimento fisico nello spazio, sia per la reiterazione dell'esperienza nel tempo.

L'esperienza architettonica, dunque, è fondamentalmente attiva. Non si tratta di una contemplazione passiva, ma di una relazione sensoriale in divenire, in cui il soggetto partecipa attivamente alla costruzione del significato.

Fig. 2 - Wood Joints

I giunti in legno rappresentano una sofisticata forma di progettazione. Ogni incastro è pensato per rispondere a specifiche sollecitazioni meccaniche e per garantire la durabilità dell'insieme. Il dettaglio diventa sistema costruttivo e insieme forma di espressione estetica.

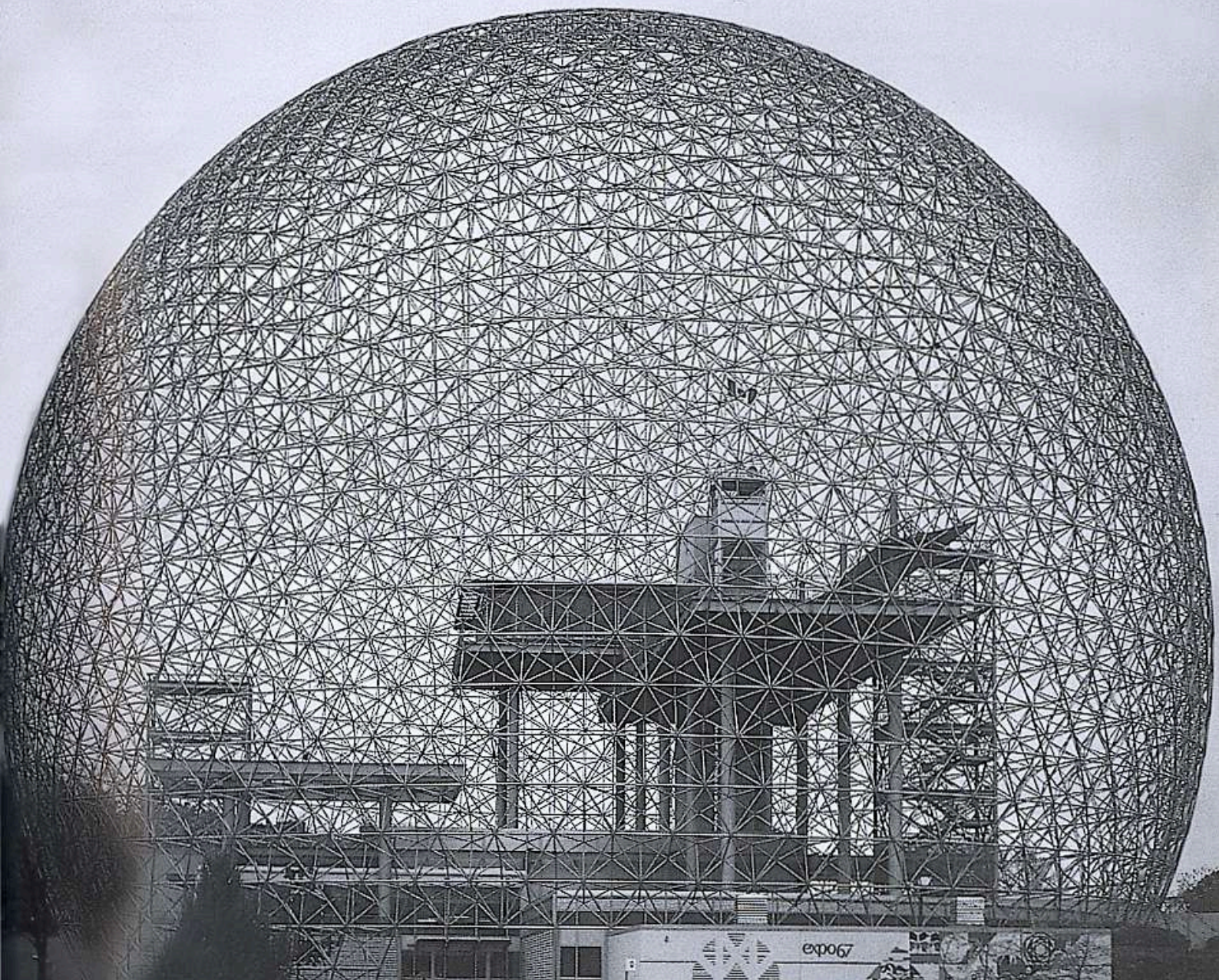
“Perception relies on action and action is possible only through perception”

(Reiser & Umemoto, 2006)

Fig. 3 - Yusuhara Wooden Bridge Museum, Kengo Kuma (2010)

La struttura è realizzata attraverso il sistema “Tokiyō”, caratterizzato dalla sovrapposizione di elementi lignei ispirati all'architettura tradizionale dei templi giapponesi. Il sistema utilizza travi incrociate per generare un pattern strutturale complesso, che conferisce all'intera costruzione un senso di leggerezza e trasparenza, pur mantenendo solidità e coerenza costruttiva (Yusuhara Wooden Bridge Museum, 2010).

Se concepita come forma di conoscenza emergente dall'interazione sensoriale con lo spazio, l'estetica non è un abbellimento accessorio, ma si configura come un dispositivo conoscitivo: un'esperienza che genera comprensione attraverso l'interazione continua con lo spazio costruito, nel tempo e nel movimento. Come scrivono Christy Anderson & David Karmon (2015), camminando accanto e attraverso l'architettura, iniziamo a comprendere il suo carattere mutevole e instabile, in cui non esiste una netta separazione tra movimento e conoscenza, entrando in quello che Bolla definisce il mondo evocativo degli oggetti – uno spazio in cui l'architettura ci coinvolge sia a livello somatico che psicologico, intrecciando esperienza presente e memoria.



Economia dei mezzi

L'estetica generata dal processo e non imposta dall'esterno, si radica anche in una logica di economia dei mezzi. Per economia dei mezzi non si intende semplicemente risparmio, ma la capacità di raggiungere un obiettivo con il minimo sforzo necessario rispetto a ciò che si intende massimizzare. La complessità progettuale viene affrontata attraverso un numero limitato di soluzioni, ripetute e adattate secondo un principio di efficienza operativa.

Fig. 4 - Palazzetto dello Sport, Roma, Pier Luigi Nervi (1957)

La copertura si distingue per un intradosso nervato, generato dalla ripetizione di un pattern romboidale che compone un disegno geometrico regolare e riconoscibile. Questa tecnica consente una razionalizzazione del cantiere e un'ottimizzazione dei materiali, combinando efficienza strutturale e un'elevata qualità estetica e formale.

Direzione del progetto

La volontà di superare la frattura moderna tra ideazione e costruzione, restituendo continuità e interazione tra tecnica, forma ed estetica, è alla base di questo progetto di tesi. In questa prospettiva, il dettaglio architettonico non è concepito come fase terminale del progetto, ma come dispositivo generativo, capace di attivare relazioni spaziali, strutturali e percettive. L'estetica non è dunque considerata un esito accessorio, ma una qualità emergente direttamente dal processo costruttivo, frutto della logica materiale e tecnica che lo struttura.

A partire da questi presupposti, il progetto esplora l'ambito della prefabbricazione in CLT (Cross-laminated timber, noto anche come X-LAM) e dell'assemblaggio a secco, sviluppando un sistema costruttivo basato sulla ripetizione e variazione di un dettaglio. È proprio attraverso la reiterazione adattiva di questo elemento che si definisce l'identità estetica dell'edificio. Tale approccio privilegia la ridondanza di pochi elementi ricorrenti, riducendo la varietà di componenti e favorendo una risposta flessibile a condizioni differenti. L'economia dei mezzi si traduce così in un principio operativo, in cui ogni parte risponde simultaneamente a esigenze funzionali, strutturali ed estetiche.

Queste riflessioni definiscono il quadro teorico e operativo da cui prende forma il progetto, orientato verso una concezione integrata della progettazione, in cui tecnica, forma ed estetica non costituiscono ambiti separati, ma aspetti complementari di un unico processo evolutivo.

Fig. 5 - Biosphère, Buckminster Fuller (1967)

Questa cupola geodetica, costruita tramite una maglia di triangoli, unisce efficienza geometrica e robustezza strutturale: in essa forma e struttura sono una cosa sola. Grazie alla sagoma sferica, si ottiene il massimo volume con la minima superficie (Buckminster Fuller Institute), rappresentando un perfetto esempio di "economia dei mezzi".



2. QUADRO TEORICO

Architettura e tecnologia

Negli ultimi decenni, le tecnologie digitali hanno profondamente trasformato le pratiche architettoniche, incidendo non solo sugli strumenti e sui tempi operativi, ma anche sulle logiche stesse del progettare e del costruire. Se da un lato l'adozione di strumenti digitali ha portato a un'accelerazione dei processi e a una riduzione dei costi, dall'altro il valore più profondo di questa transizione risiede nel cambiamento qualitativo che ha investito il pensiero progettuale. Il cosiddetto digital turn (svolta digitale) non si esaurisce in un miglioramento prestazionale: segna piuttosto il passaggio dalla macchina come calcolatrice alla macchina come agente creativo, capace non solo di simulare, ma anche di generare, interpretare e apprendere (Carpo, 2023).

Questo capitolo ricostruisce le principali traiettorie di questa trasformazione, mettendo in luce le sue fasi chiave: le cosiddette metawaves, i protagonisti teorici e le implicazioni sul piano formale e operativo, che hanno progressivamente ridefinito il ruolo dell'architetto e le modalità di concezione e realizzazione dell'architettura.

Fig. 6 - Computational Chair, Philippe Morel (2004)

La versione "T1-M 860" è il risultato di un processo di ottimizzazione articolato in 860 generazioni, corrispondente a un totale di 86.000 valutazioni eseguite tramite analisi agli elementi finiti. (Carpo, 2017).

Le "false partenze" dell'era digitale (1946–1970)

L'ENIAC (1946), primo calcolatore elettronico general purpose, rappresentò una rivoluzione nella capacità di eseguire sequenze

programmabili di operazioni aritmetiche. Tuttavia, le sue dimensioni imponenti e i costi elevati limitarono l'applicazione dei computer al solo ambito militare e ingegneristico (Carpo, 2023).

In ambito architettonico, i primi approcci al digitale furono teorici e speculativi. Negli anni Sessanta, figure come Cedric Price elaborarono progetti ispirati ai principi della cibernetica, come il Fun Palace (1963–67), dove interazione e feedback diventavano strutture operative del progetto (Carpo, 2023). Queste esperienze rimasero però a livello concettuale, influenzando più l'immaginario che la pratica costruttiva.

Parallelamente, le prime ricerche sull'intelligenza artificiale, come quelle del MIT (Massachusetts Institute of Technology) sotto la guida di Nicholas Negroponte diedero vita a un programma destinato a "sostituire" l'architetto: un sistema basato su un'enciclopedia di regole architettoniche che guidava l'utente, tramite menu interattivi, dall'idea al progetto finale. Tuttavia, le limitazioni hardware e l'assenza di un modello economico sostenibile portarono al declino di molte iniziative, culminando nel cosiddetto "AI winter" degli anni Settanta (Carpo, 2023).

Fig. 7 - Fun Palace, Cedric Price (1961)

Avvio reale: dal CAD ai disegni digitali (1981–1995)

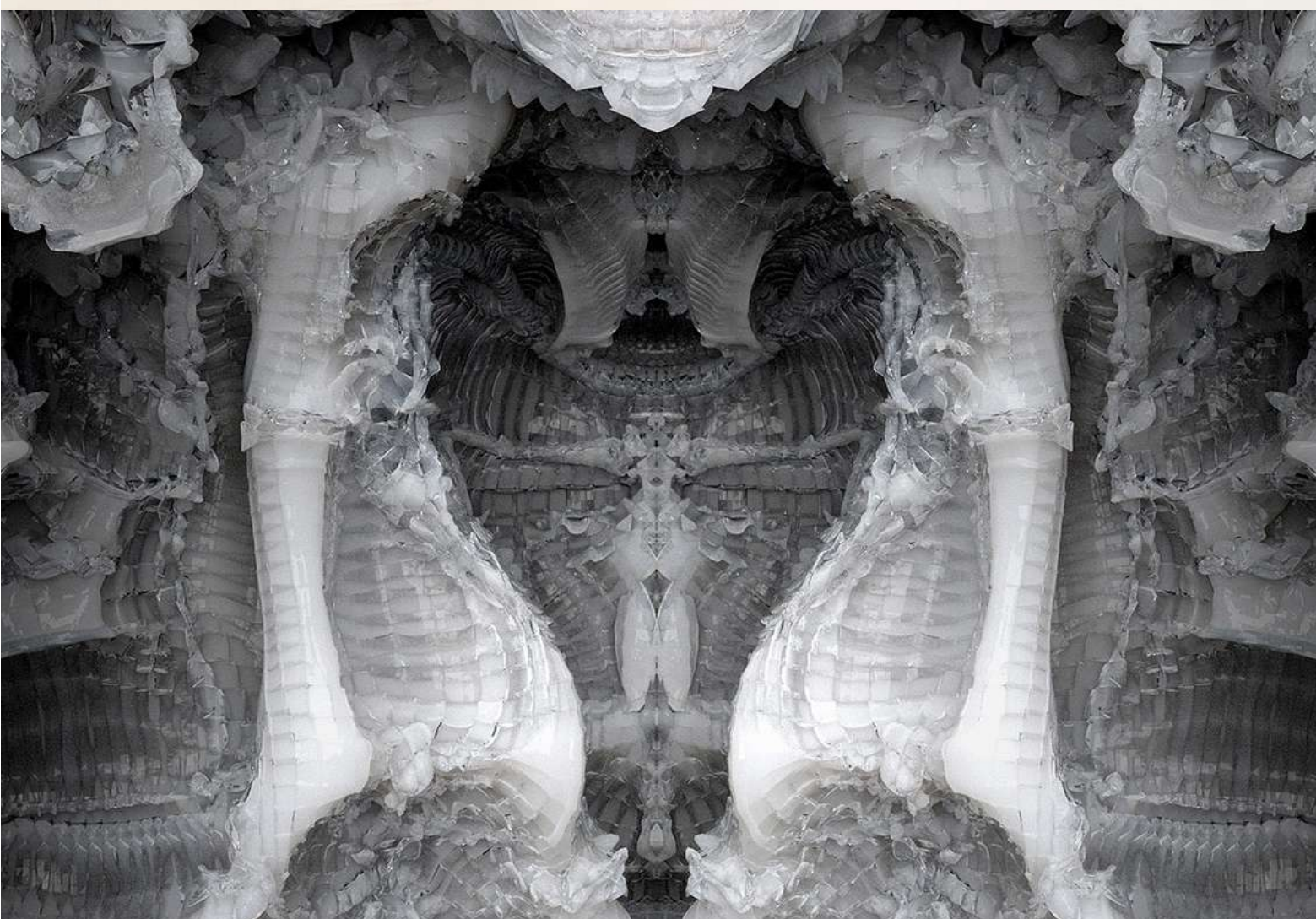
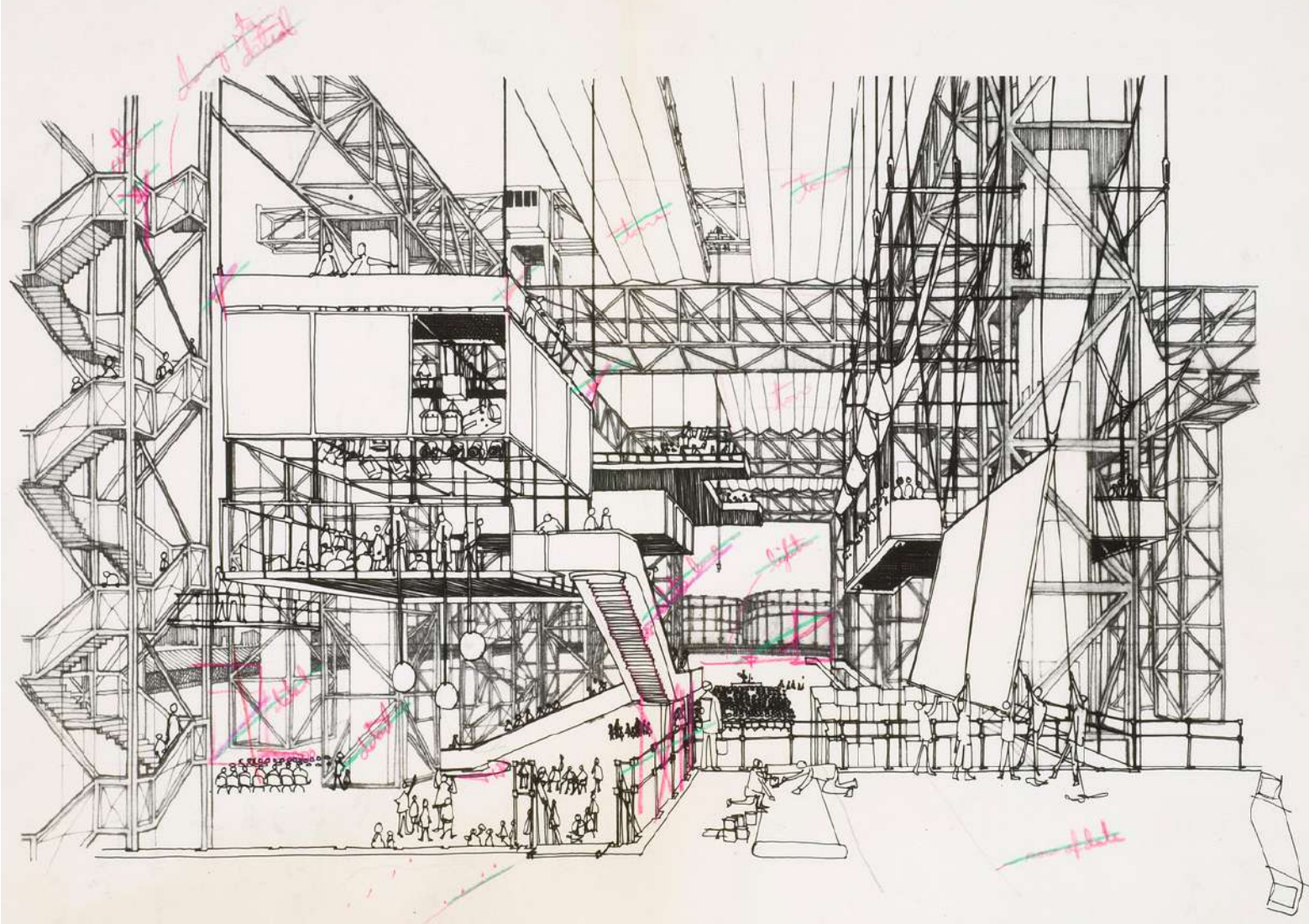
Il vero punto di svolta avvenne con la diffusione dei personal computer. AutoCAD, lanciato da Autodesk nel 1982, rese accessibile la modellazione 2D su PC, trasformando il computer in una vera e propria macchina da disegno, più che da calcolo (Carpo, 2023).

Nel 1991, il software form-Z introdusse il supporto a spline e NURBS, permettendo la modellazione di superfici libere e curve complesse: un passaggio decisivo dalle tavole bidimensionali alle prime esplorazioni tridimensionali non euclidee. Parallelamente, il linguaggio PostScript (1984) consentì per la prima volta la stampa di disegni digitali con precisione tipografica, chiudendo il ciclo tra progetto e rappresentazione (Carpo, 2023).

Digital Formalism e fabbricazione avanzata (1995–2010)

A partire dalla fine degli anni Novanta, la crescente potenza di calcolo e la nascita di software parametrici permisero la generazione e gestione di forme complesse su larga scala. Questo periodo, che segna la cosiddetta "seconda svolta digitale", è rappresentato da opere come Digital Grottesque I (2013) di Hansmeyer e Dillenburger,

Fig. 8 - Digital Grottesque I, Michael Hansmeyer (2013)



una microgrotta composta da migliaia di voxel progettati individualmente (Carpo, 2017), o i lavori di Alisa Andrasek, caratterizzati da un'estetica ad altissima risoluzione generata computazionalmente, e dalla Computational Chair di Philippe Morel (Carpo, 2017).

La complessità delle geometrie progettate poneva nuove sfide alla fabbricazione. Questo condusse all'integrazione tra progettazione algoritmica e robotica avanzata. All'ETH di Zurigo, Fabio Gramazio e Matthias Kohler riprogrammarono robot industriali per la posa automatizzata di mattoni in configurazioni non standard (Carpo, 2023). All'Università di Stoccarda, Achim Menges e Jan Knippers svilupparono sistemi robotici adattivi, capaci di rispondere alle irregolarità di materiali naturali come il legno non industriale o materiali compositi a comportamento non lineare («Emergence: Morphogenetic Design Strategies», 2004; «Material Computation», 2012). Parallelamente, il gruppo di Gilles Retsin e Manuel J. Garcia al Bartlett di Londra esplorava l'assemblaggio robotico di macrocomponenti modulari, in una direzione ripresa anche da José Sanchez alla USC di Los Angeles, dando forma a un'estetica spesso definita neobrutalismo digitale (Carpo, 2023).

In questo contesto nacque il movimento del digital formalism, basato su algoritmi generativi capaci di produrre forme prima impensabili. A partire dal 1996, il termine blob fu adottato per descrivere le nuove geometrie fluide, evolvendosi poi nel concetto sistemico di parametricism formulato da Patrik Schumacher: una teoria progettuale fondata su regole interconnesse, proprie dell'era computazionale (Carpo, 2023).

Fig. 9 - Padiglione di ricerca ICD/ITKE (2010)

Struttura attiva a flessione costruita con sottili strisce di compensato. La geometria nasce dall'interazione iterativa fra pressioni applicate e vincoli esterni, con il materiale che agisce da driver primario nella generazione simultanea di forma e struttura («Material Computation», 2012).

Fig. 10 - FAZ Pavilion, Achim Menges, (2011)

Struttura autonoma a "attivazione passiva" che, ispirandosi al principio igroscopico delle pigne di conifera, si apre o si chiude in funzione dell'umidità relativa. L'architettura mantiene così un feedback continuo con l'ambiente, modulando la propria forma senza ausilio di attuatori meccanici o controllo esterno («Material Computation», 2012).



Il rinascimento dell'Intelligenza Artificiale (2010–2025)

Negli ultimi anni, l'intelligenza artificiale — in particolare il machine learning — ha conosciuto un'espansione esponenziale, resa possibile da potenze computazionali oggi accessibili. Le reti neurali profonde risolvono problemi complessi e riattivano l'ambizione della “macchina progettista” (Carpo, 2023).

Architetti e designer sperimentano l'uso di Generative Adversarial Networks (GAN) per la creazione di immagini e configurazioni spaziali. Tuttavia, l'impiego dell'AI nel progetto architettonico resta limitato da due ostacoli principali:

- la necessità di tradurre l'intenzione progettuale in parametri computabili;
- l'impossibilità di definire in modo univoco qualità non misurabili come l'esperienza dello spazio o il valore simbolico.

Come osserva Philip Bernstein, l'AI non sostituirà la creatività umana, ma potrà supportarla attraverso strumenti progettuali più intelligenti e reattivi (Carpo, 2023).

Conclusioni

Dal gigantesco ENIAC ai moderni assistenti generativi basati su GAN, il “digital turn” in architettura è stato segnato da fasi di entusiasmo, abbandono e concreta implementazione. L'innovazione tecnologica ha permesso nuove estetiche, nuovi processi produttivi e nuovi paradigmi teorici, senza tuttavia sostituire l'intelligenza umana del progetto. La sfida contemporanea consiste ora nel padroneggiare strumenti basati su dati e algoritmi, sapendo che dietro ogni curva parametrica o ogni micro voxel si cela una decisione progettuale insostituibile.

Fig. 11 - Prevalenza del calcolo nella progettazione architettonica, Carpo (2023)

Architettura e pensiero sistemico: un cambio di paradigma

In un'epoca segnata da complessità crescenti — ambientali, sociali, tecnologiche — l'architettura è chiamata a ripensare i propri strumenti, processi e paradigmi. La moltiplicazione delle variabili in gioco, l'instabilità dei contesti e l'intensificarsi delle interazioni tra spazio, ambiente e tecnologia impongono un'evoluzione del pensiero progettuale. In questo scenario, la teoria dei sistemi e il pensiero sistemico offrono un'alternativa alla tradizionale visione lineare e deterministica, proponendo un modello di conoscenza fondato sulle relazioni, sulla non linearità e sull'emergenza dei comportamenti collettivi.

Un sistema può essere definito come un insieme di elementi interconnessi, la cui organizzazione permette il funzionamento dell'insieme come un tutto coerente (Colchester, 2016). Pensare in termini sistemici significa superare la centralità dell'oggetto in sé per concentrarsi sulle relazioni dinamiche che ne definiscono il comportamento e l'efficacia nel tempo. A differenza degli approcci analitici, che frammentano i fenomeni per isolarne le componenti, il pensiero sistemico privilegia la sintesi: una visione d'insieme che mira a comprendere le proprietà emergenti generate dalle interazioni tra le parti (Colchester, 2016).

Applicato all'architettura, questo approccio comporta una serie di spostamenti concettuali:

- dalla forma come risultato alla forma come processo dinamico;
- dalla figura come oggetto statico e isolato all'interazione tra agenti in un sistema;
- dall'architettura come entità definita all'architettura come sistema aperto e adattivo.

Questo capitolo esplora i fondamenti della teoria dei sistemi e della complessità, approfondendo concetti chiave come auto-organizzazione, adattamento, emergenza e coevoluzione. Questi concetti, mutuati dalla biologia, dalla cibernetica e dalle scienze computazionali, saranno messi in dialogo con strumenti operativi come pattern generativi, geometrie anesatte, logiche di combinatorial design e strategie bottom-up. Attraverso una selezione di casi studio progettuali: dalle tensostrutture di Frei Otto, ai modelli evolutivi di John Frazer, fino alle coperture pieghevoli e site-specific di Shoji Yoh, si mostrerà come questi principi siano in parte già attivi, seppur in forme differenti, nella pratica architettonica contemporanea.

Questa riflessione costituisce la base teorica del progetto sviluppato nella tesi, che assume il sistema come modello operativo e relazionale, esplorando assemblaggi generativi e strategie basate su variazione, ridondanza e adattabilità. La teoria dei sistemi non è qui semplicemente descritta, ma adottata come infrastruttura progettuale, orientando il progetto verso configurazioni resilienti, dinamiche e sostenibili.

Fondamenti del pensiero sistemico

Alla base del pensiero sistemico vi è l'idea che la comprensione profonda di un fenomeno non possa derivare dalla sola analisi delle sue componenti, ma debba emergere dall'osservazione delle relazioni che lo connettono a un contesto più ampio, in cui ogni elemento assume significato solo nel contesto delle relazioni che lo legano agli altri. Come afferma Colchester (2016), un sistema può essere definito come un insieme di elementi interconnessi, la cui organizzazione consente il funzionamento dell'insieme come un tutto coerente. Questa definizione mette in evidenza che le relazioni tra le parti sono tanto determinanti quanto le parti stesse.

Il pensiero sistemico si fonda su un principio di sintesi: contrariamente all'approccio analitico, che tende a scomporre e isolare i fenomeni per misurarli, la sintesi mira a coglierne l'identità complessiva, considerandone la funzione all'interno di un sistema (Colchester, 2016). In ambito progettuale, questo significa spostare l'attenzione dai singoli elementi alla rete di relazioni in cui essi operano. La progettazione sistemica si configura così come un processo relazionale, contestuale e funzionale, in cui ogni scelta è vista come parte di un insieme di interazioni spaziali, temporali e operative.

Un concetto chiave connesso al pensiero sistemico è quello di complessità, intesa come grado di articolazione interna di un sistema. Secondo Colchester (2016), la complessità può essere descritta attraverso tre fattori:

- il numero di elementi presenti,
- il livello di diversità tra essi,
- il grado di interconnessione.

L'aumento della complessità implica che la forma e il comportamento di un sistema non siano più riducibili alla somma delle parti, ma emergano da interazioni non lineari, spesso difficilmente prevedibili.

Questo principio è particolarmente rilevante per l'architettura contemporanea, che opera in contesti a elevata variabilità e richiede soluzioni progettuali flessibili, adattive e aperte.

Infine, il pensiero sistemico comporta un cambio di scala e di paradigma: dalla progettazione dell'oggetto isolato alla progettazione del sistema, dalla forma come risultato statico alla forma come esito dinamico di relazioni tra forze, materiali, agenti, utenti e ambiente. È in questo scenario che si inseriscono i concetti di sistemi complessi, adattivi ed emergenti, che costituiscono il nucleo delle sezioni successive.

Dinamiche dei sistemi complessi

I sistemi complessi si distinguono da quelli semplici per la presenza di numerosi elementi eterogenei che interagiscono tra loro in modo non lineare, generando comportamenti collettivi non riconducibili alla somma delle singole parti. Tali comportamenti emergono da processi locali distribuiti, che si sviluppano nel tempo e nello spazio senza il ricorso a un controllo centralizzato. Questo fenomeno prende il nome di auto-organizzazione.

Un sistema auto-organizzato è caratterizzato dalla capacità di generare ordine in assenza di un piano globale o di un'autorità centrale (Johnson, 2001). L'organizzazione emerge a partire da interazioni locali tra le parti, attraverso meccanismi semplici ma ripetuti, che producono configurazioni complesse su larga scala. Non c'è un agente centrale che orchestra il comportamento dell'insieme: il coordinamento emerge dal basso, come effetto collettivo delle azioni locali. Questi sistemi tendono a essere flessibili, efficienti e resilienti, poiché sono in grado di reagire rapidamente a perturbazioni ambientali o cambiamenti di contesto.

Un esempio emblematico è il comportamento delle colonie di formiche: la regina non esercita un controllo direttivo, eppure emergono pattern complessi a partire da azioni locali non coordinate. Le formiche non hanno accesso a una visione d'insieme, ma riescono comunque a collaborare grazie a segnali e informazioni locali. Ogni agente opera con una conoscenza limitata, ma l'interazione produce intelligenza collettiva. Gli agenti del sistema operano in base a ciò che accade nel loro immediato intorno, eppure le loro azioni collettive producono effetti globali (Johnson, 2001).

L'auto-organizzazione è un principio strutturale ricorrente in molti sistemi naturali, sociali e progettuali, in cui l'ordine globale è il

risultato di regole semplici applicate localmente, capaci di generare configurazioni coerenti e complesse senza la necessità di un disegno centralizzato.

Questa dinamica, in cui l'ordine nasce dal basso attraverso interazioni locali, conduce a un altro principio chiave dei sistemi complessi: l'emergenza. Si tratta del fenomeno per cui nuove proprietà o comportamenti collettivi scaturiscono dall'interazione tra elementi semplici, seguendo regole locali. Come osserva Johnson (2001), i sistemi emergenti operano dal basso verso l'alto: l'organizzazione non è imposta dall'esterno, ma deriva dalle relazioni tra agenti autonomi, ciascuno dei quali agisce secondo informazioni locali. Le regole che guidano il comportamento complessivo non sono codificate centralmente, ma emergono come conseguenza dell'interazione tra le parti.

Nei sistemi emergenti, la complessità nasce da interazioni reiterate e semplici, che nel loro accumularsi generano fenomeni inattesi e strutturati. A caratterizzare questi sistemi non è la conoscenza globale, ma la limitazione cognitiva dei singoli: ogni agente percepisce solo ciò che lo circonda, e proprio da questa condizione nascono effetti complessi su larga scala. Johnson (2001) individua cinque principi fondamentali per comprendere il funzionamento dei sistemi emergenti:

- Il più è diverso
- L'ignoranza è utile
- Favorire interazioni casuali
- Cerca pattern nei segnali
- Presta attenzione al vicino

In questo quadro, la forma architettonica non è determinata a priori, ma emerge come effetto collettivo delle condizioni interne (regole, agenti, vincoli) e delle sollecitazioni esterne (ambiente, perturbazioni, feedback). Il progettista non disegna più direttamente l'esito formale, ma predispone un sistema di condizioni che consentano alla forma di emergere in modo dinamico, adattivo e aperto.

Nel lavoro di Makoto Sei Watanabe, l'organizzazione complessiva dell'opera architettonica non è definita da un piano globale, ma emerge da regole locali applicate a singole componenti (Makoto Sei Watanabe, 2005). Il progetto si configura come sistema auto-organizzato, in cui l'insieme risulta dall'interazione tra le parti, senza una regia centralizzata. Questo approccio incarna pienamente i principi dell'emergenza e dell'adattamento. Questo approccio architettonico non cerca di imporre un ordine dall'alto, ma lo lascia affiorare dal comportamento stesso degli elementi progettuali.

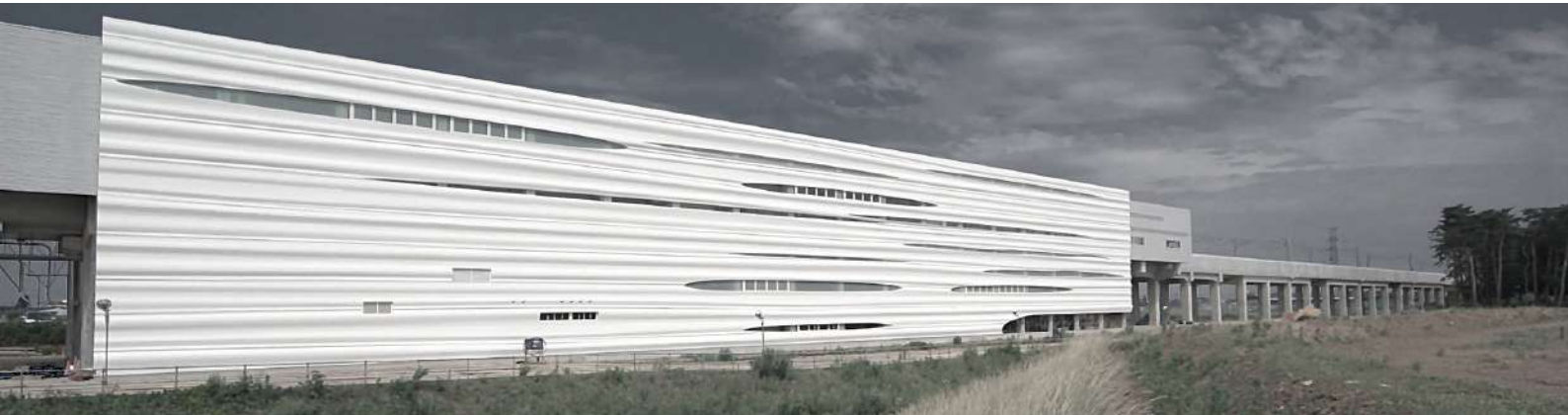
Un altro principio centrale nei sistemi complessi è quello di feedback: un processo in cui il sistema riceve informazioni sul proprio stato e le utilizza per modificare il proprio comportamento. Secondo Colchester (2016), esistono:

- feedback negativi, che tendono a stabilizzare il sistema (autoregolazione),
- feedback positivi, che amplificano i cambiamenti e possono generare dinamiche nuove.

Nel caso dello stormo di uccelli, un feedback positivo si attiva quando il volo di un esemplare innesca una reazione a catena che coinvolge l'intero gruppo (Colchester, 2016; Johnson, 2001). In architettura, i meccanismi di feedback trovano applicazione nei sistemi generativi e adattivi, in cui le prestazioni strutturali, ambientali o funzionali vengono monitorate e retroazionate per ottimizzare il progetto. Ciò avviene sia nei sistemi materiali, in cui i componenti possono rispondere a stimoli esterni (es. materiali attivi, sistemi cinetici), sia nei processi computazionali, dove le informazioni raccolte influenzano dinamicamente la morfogenesi del progetto, rendendolo più reattivo, efficiente e contestuale. I meccanismi di feedback, insieme a quelli basati su ripetizione e variazione, costituiscono l'infrastruttura dinamica che rende i sistemi capaci di adattarsi alle condizioni locali e ai cambiamenti nel tempo.

Fig. 12 - Stazione Kashiwanoha-Campus, Makoto Sei Watanabe (2005)

Esempio pionieristico di architettura generativa. Attraverso un sistema basato su algoritmi e intelligenza artificiale, la forma dell'edificio emerge da un processo iterativo tra input umani e generazione computazionale (Makoto Sei Watanabe, 2005).



Variazione e Ridondanza nei Sistemi Complessi

Due principi fondamentali per la resilienza dei sistemi complessi sono la ridondanza e la variazione. La ridondanza non va intesa come mera moltiplicazione di elementi identici, ma come ripetizione capace di generare variazione attraverso le relazioni interne tra le parti. In assenza di variazione, un errore isolato può propagarsi indisturbato, rendendo il sistema fragile e vulnerabile. È proprio questa variabilità interna che rafforza la capacità del sistema di rispondere efficacemente a perturbazioni esterne.

La ridondanza non riguarda soltanto il numero di elementi, ma anche la capacità del sistema di evolversi nel tempo. Essa apre a nuove possibilità funzionali, predisponendo l'assetto a modifiche nelle prestazioni e negli usi futuri. Come mostrano le cosiddette Rubens Structures (Van de Worp, 2014), la ridondanza può manifestarsi anche a livello strutturale: una ripetizione di percorsi delle forze in grado di sostenere, nel corso del tempo, diverse configurazioni funzionali. Un esempio emblematico è la sedia The Continuous Line, in cui la ridondanza geometrica e funzionale è utilizzata per garantire diverse possibilità d'uso nel tempo. Intrecciando più traiettorie strutturali, "The Continuous Line" offre diverse posizioni di seduta, dimostrando come ripetizione, variazione e ridondanza possano fondersi in una stessa strategia progettuale (Van de Worp, 2014).

Fig 13 - The Continuous Line, Rubens structure (2014)

Struttura adattiva che integra percorsi di carico sovrapposti, permettendo differenti configurazioni d'uso. Il progetto mostra come la ridondanza geometrica possa generare flessibilità funzionale attraverso logiche di variazione strutturale (Van de Worp, 2014).

Rappresenta un mutamento radicale nella concezione stessa di struttura: si passa da un'entità rigida e prestabilita a un sistema flessibile, predisposto ad accogliere ciò che ancora non è noto. È una ripetizione complessa — una ripetizione che genera variazione — in grado di produrre novità non introducendo elementi completamente nuovi, ma trasformando incessantemente ciò che si ripete.



L'integrazione di principi come la ripetizione differenziale, la variazione locale, la ridondanza e il feedback definisce sistemi capaci non solo di reagire agli stimoli, ma anche di trasformarsi nel tempo. In questo quadro, il progetto non viene più inteso come un insieme di forme statiche o prestazioni fissate a priori, ma come un ambiente operativo, capace di evolvere, apprendere e adattarsi in risposta a contesti mutevoli. È proprio da questa visione che emergono i concetti di sistemi adattivi ed evolutivi, nei quali la progettazione architettonica si configura come un processo aperto, dinamico e interattivo.

Sistemi adattivi ed evoluzione

Tra le diverse categorie di sistemi, quelli adattivi si distinguono per la capacità di adattarsi in risposta all'ambiente. A differenza dei sistemi statici o puramente reattivi, essi non si limitano a rispondere a stimoli esterni, ma modificano la propria struttura interna, elaborano informazioni e apprendono dall'esperienza. L'adattamento non è un'eccezione, ma una strategia sistemica: una condizione strutturale del funzionamento.

Come descritto da John Holland (Waldrop, 1992), un sistema adattivo complesso è costituito da una rete di agenti che operano in parallelo, interagendo all'interno di un ambiente che essi stessi contribuiscono a modificare. Questi agenti:

- rivedono e riorganizzano continuamente la propria struttura interna,
- formulano previsioni attraverso modelli comportamentali interni,
- valutano e selezionano pattern di risposta in base alla loro efficacia.

In architettura, questi principi si traducono nella possibilità di progettare sistemi capaci di trasformarsi nel tempo, modificando forma, funzione o organizzazione in risposta a condizioni ambientali, d'uso o prestazionali. L'obiettivo non è fissare una forma, ma predisporre una struttura dinamica, in grado di adattarsi a scenari futuri e contesti mutevoli.

Alla base di questa capacità vi è il meccanismo di feedback: un meccanismo di regolazione grazie al quale il sistema monitora e modifica il proprio stato e modifica il proprio comportamento in base all'esperienza. L'adattamento diventa così un comportamento appreso, non solo una semplice reazione.

Fig. 14 - Padiglione tedesco per l'EXPO, Frei Otto (1967)
Struttura a membrana leggera realizzata con un sistema di tensostrutture in tessuto e cavi. Il progetto esemplifica l'approccio form-finding di Frei Otto, in cui la forma architettonica emerge da equilibri fisici tra tensione, gravità e vincoli, ispirandosi a bolle di sapone (AD Classics, 2015).

Fig. 15 - Centro comunitario Najju, Shoei Yoh (1994)
Copertura in legno a pieghe multiple (Shoei Yoh Archive, 2019).

Fig. 16 - Yokohama International Port Terminal, Foreign Office Architects, (1995-2002)

Il terminal passeggeri di Yokohama è concepito come un'estensione continua del suolo urbano, dove le linee di circolazione vengono trasformate in superficie architettonica tramite piegature e biforcazioni. Il progetto sfuma i confini tra infrastruttura e spazio pubblico, proponendo un paesaggio artificiale accessibile, fluido e indeterminato, capace di evolvere nel tempo (Yokohama Port Terminal).



Secondo Waldrop (1992), i sistemi complessi non raggiungono mai un equilibrio stabile, ma si mantengono in una condizione di instabilità controllata. Il punto più fertile di questa instabilità è il cosiddetto edge of chaos: una soglia tra ordine e disordine, in cui i sistemi sono abbastanza strutturati da organizzarsi e sufficientemente flessibili da evolvere. Applicata all'architettura, questa condizione suggerisce la progettazione di forme aperte e adattabili, che non si cristallizzano in un'unica configurazione definitiva ma restano sensibili a trasformazioni future, sia formali che funzionali. Un riferimento teorico significativo è rappresentato dal lavoro di John Frazer, per cui l'architettura deve essere pensata come un sistema vivente, capace di evolversi nel tempo attraverso cicli di informazione e retroazione (Frazer, 1995).

Nel suo libro *An Evolutionary Architecture*, Frazer (1995) propone un modello progettuale ispirato ai meccanismi evolutivi della natura, in cui l'architettura non è più vista come prodotto finito, ma come ecosistema generativo, in continuo divenire. Le forme emergono da processi analoghi a quelli genetici: mutazione, selezione, adattamento. I vincoli ambientali e strutturali non sono ostacoli, ma forze generative. In questa prospettiva, la natura non è solo modello formale, ma agente generativo, capace di guidare la produzione architettonica attraverso logiche evolutive e sistemiche.

Un esempio emblematico è il Game of Life di John Conway (Gardner, 1970): un automa cellulare in cui semplici regole locali generano comportamenti emergenti complessi. Ogni cella vive o muore in base allo stato delle celle adiacenti, ma la somma di queste interazioni locali produce fenomeni imprevedibili, talvolta assimilabili a dinamiche biologiche. Questo modello, spesso citato in architettura, dimostra come la complessità possa emergere dal basso, senza una regia centralizzata (Frazer, 1995; M. Mitchell Waldrop, 1992).

Un riferimento emblematico a queste logiche è rappresentato dal lavoro di Frei Otto, pioniere nell'uso del form-finding come approccio progettuale. Le sue tensostrutture non vengono semplicemente disegnate, ma "scoperte" attraverso modelli fisici e simulazioni che restituiscono l'equilibrio tra forze, materiali e vincoli. Ispirate a strutture naturali come ragnatele, membrane e bolle di sapone, le sue opere mostrano come il form-finding possa costituire un processo progettuale non prescrittivo, in cui la morfologia nasce direttamente dal comportamento fisico dei materiali, diventando esito di un processo non prescrittivo, dinamico e adattivo (Hildebrand, 2015).

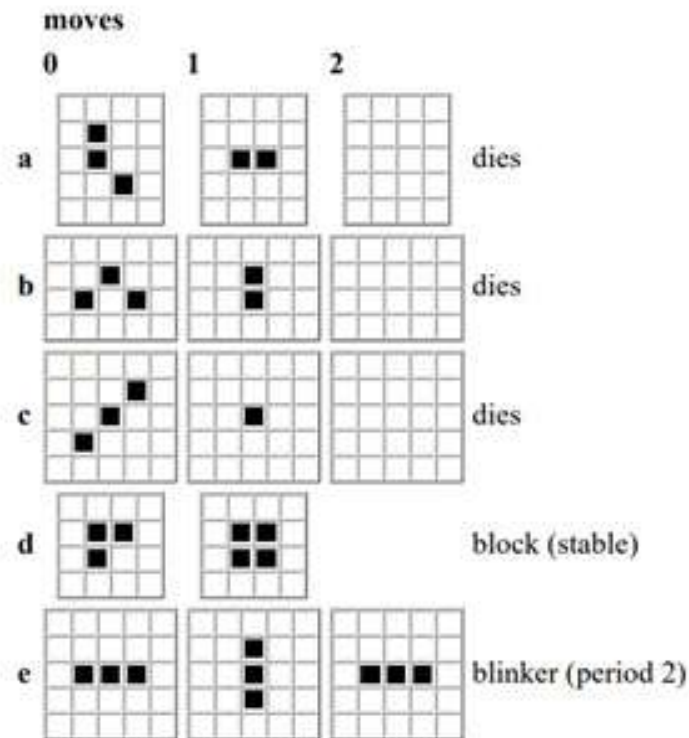


Fig. 17 - Game of Life di Conway (1970)

Evoluzione di cinque configurazioni nel Game of Life di Conway (ogni cella viva sopravvive con 2-3 vicini, muore per isolamento o sovrappopolazione, e una cella morta nasce con esattamente 3 vicini):

- a, b, c: tripletti che si spengono completamente alla mossa 2;
- d: alla mossa 2 diventa un "blocco" stabile 2x2;
- e: alla mossa 2 genera un oscillatore di periodo 2 ("blinker") alternando file orizzontali e verticali di tre celle.

Dispositivi concettuali per una progettazione sistemica

Tradurre il pensiero sistemico in architettura non implica solo l'adozione di strumenti digitali avanzati o metodologie innovative, ma richiede un cambiamento profondo nell'approccio progettuale. In questa prospettiva, l'architettura non è più intesa come oggetto statico o autonomo, ma come sistema relazionale, in continua trasformazione e interazione con forze materiali, ambientali e sociali.

Per operare in questo scenario complesso, è necessario dotarsi di dispositivi concettuali — modelli teorico-operativi che orientano il progetto secondo logiche sistemiche. Tra questi, pattern, combinatorial design e geometrie anesatte non rappresentano stili o tecniche, ma strategie per progettare l'architettura come processo, come campo dinamico aperto alla variazione, all'adattamento e all'evoluzione.

Pattern e sistemi generativi

Il concetto di pattern non si esaurisce nella ripetizione geometrica, ma indica la presenza di principi organizzativi ricorrenti, capaci di operare su più scale e livelli di complessità. Come affermano Reiser & Umemoto (2006), i pattern non modellano soltanto la forma, ma organizzano relazioni tra forze, dati e geometrie. In architettura, essi possono essere letti come strategie progettuali in grado di generare

configurazioni complesse attraverso meccanismi di variazione e ripetizione.

Questa logica è strettamente legata al design combinatorio, che si fonda sull'uso di unità discrete e regole di aggregazione per esplorare un'ampia varietà di configurazioni (Sanchez, 2016). La progettazione si sposta così dalla definizione formale dell'oggetto finito alla costruzione di un sistema di regole, in cui la combinazione tra elementi genera complessità emergente.

Geometria anesatte: tra materia e forma

Riprendendo la classificazione proposta da Deleuze (cit. in Reiser & Umemoto, 2006), è possibile distinguere tra geometrie esatte (regolari, euclidee), inesatte (approssimative) e anesatte. Le geometrie anesatte non sono approssimazioni, ma esiti locali di forze agenti sulla materia, risultanti da tensioni, condizioni contingenti e vincoli specifici.

Esse rappresentano una risposta operativa alla complessità, permettendo di concepire forme non deterministiche, che emergono dall'interazione dinamica tra geometria, materiale e contesto.

Folding: forma come processo

All'interno di questo quadro teorico si inserisce il concetto di folding, che nella riflessione Greg Lynn (1993), ispirata a Deleuze, assume un significato profondamente processuale. Il folding non è una tecnica né uno stile, ma una logica trasformativa continua, in cui la forma si costruisce per piegatura, modulazione e deformazione, generando connessioni fluide tra le differenze. La variazione diventa così condizione costitutiva, anziché eccezione, e la forma è concepita come divenire (Mario Carpo, 1993).

Come sottolinea Carpo (1993), questa logica trova espressione nelle strutture progettate da Shoji Yoh, in particolare nelle coperture pieghevoli site-specific, realizzate tramite assemblaggi non standard, che fondono tecnologie digitali e tecniche artigianali. Ogni piega è una risposta unica a vincoli locali, rendendo l'opera irripetibile e strettamente legata al contesto. Queste strutture, che Lynn (1993) definisce anesatte, non derivano da geometrie predefinite, ma nascono dalla negoziazione tra forma, forza e materia.

Queste coperture pieghevoli dimostrano come l'architettura sia un processo non lineare, in cui la forma prende forma dal confronto con condizioni specifiche e mutevoli.

Riflessioni conclusive — Verso un'architettura sistemica

Il pensiero sistemico e la teoria della complessità propongono un cambio di paradigma rispetto alla visione tradizionale del progetto architettonico: non più concepito come prodotto finito, ma come processo dinamico fondato su relazioni, interazioni e adattamenti continui.

In questo quadro, la forma non è più un fine, ma una conseguenza, l'esito emergente di un sistema di condizioni, vincoli e regole operative.

L'architettura, intesa come sistema complesso adattivo, si libera da ogni determinismo formale e apre il progetto alla possibilità di evolversi, mutare, apprendere nel tempo. Si configura come un dispositivo capace di interagire con l'ambiente, integrare feedback informativi e rimanere aperto a necessità prestazionali e usi nel tempo.

In questo contesto, strumenti come pattern generativi, combinatorial design, form finding, geometrie anesatte, non sono solo tecniche operative, ma modi di pensare l'architettura come sistema. Ogni elemento è parte di una rete complessa, ogni decisione incide sulle dinamiche del sistema, ogni variazione può diventare una nuova opportunità. Al contrario dell'approccio tradizionale, che reprime irregolarità e deviazioni considerandole difetti da correggere, questo paradigma le valorizza come motori di creatività e innovazione (Reiser & Umemoto, 2006).

Assumere un approccio sistemico significa anche ridefinire la responsabilità progettuale: non si tratta solo di progettare una forma, ma di progettare il comportamento di un sistema: la sua capacità di trasformarsi nel tempo, di interagire con l'ambiente, di generare relazioni spaziali e sociali significative.

Questo cambio di prospettiva — dal controllo alla condizione, dalla forma al processo, dall'oggetto al sistema — rappresenta una risorsa e una sfida per l'architettura contemporanea. Una sfida che non può essere affrontata con strumenti convenzionali, ma che richiede una nuova sensibilità progettuale, capace di navigare tra regole e variabilità, vincoli e possibilità, dati e materia.

In quest'ottica, progettare non significa più fissare un risultato definitivo, ma attivare un processo dinamico. Come affermano Reiser e Umemoto (2006), l'architettura è un processo non lineare, in cui le idee si evolvono in risposta alle circostanze e alle scoperte emerse durante il percorso progettuale. È proprio in questa apertura al divenire che si manifesta la potenza del pensiero sistemico: nel riconoscere

che ogni configurazione è transitoria, ogni soluzione è rinegoziabile, ogni progetto è parte di un insieme più ampio, complesso e in continua trasformazione.

Dalla teoria al progetto — Il sistema come principio generativo dell'architettura

I concetti sviluppati in questo capitolo: sistema, complessità, emergenza, adattamento; non restano confinati alla teoria, ma si traducono in strategie progettuali. Adottare una prospettiva sistemica significa ripensare ogni fase del processo progettuale: dalla definizione degli elementi alla loro modalità di aggregazione, dal comportamento del materiale all'organizzazione spaziale, fino alle necessità future.

Nel progetto sviluppato in questa tesi, il concetto di sistema architettonico è inteso come un insieme modulare e generativo, fondato su unità discrete capaci di articolarsi in configurazioni differenti attraverso regole di assemblaggio. L'obiettivo non è solo rispondere a esigenze funzionali o formali, ma costruire un sistema in grado di adattarsi a contesti diversi, di rispondere a stimoli ambientali e di adattarsi attraverso strategie di variazione e ridondanza, seguendo una logica di economia dei mezzi.

In questa prospettiva, la struttura architettonica non è un contenitore statico, ma un organismo configurabile, capace di rispondere a bisogni mutevoli, vincoli ambientali, scenari futuri. Il progetto diventa un campo di possibilità, un sistema in equilibrio dinamico tra vincoli e libertà, regole e variazione, ordine e instabilità controllata.

Integrando strategie bottom-up, strumenti computazionali e logiche combinatorie, si rafforza la visione sistemica: il progetto cessa di essere un risultato univoco e definitivo, trasformandosi invece in una piattaforma evolutiva in grado di produrre molteplici soluzioni operative, adattandosi alle condizioni ambientali, strutturali e materiali.

Design combinatorio e assemblaggi

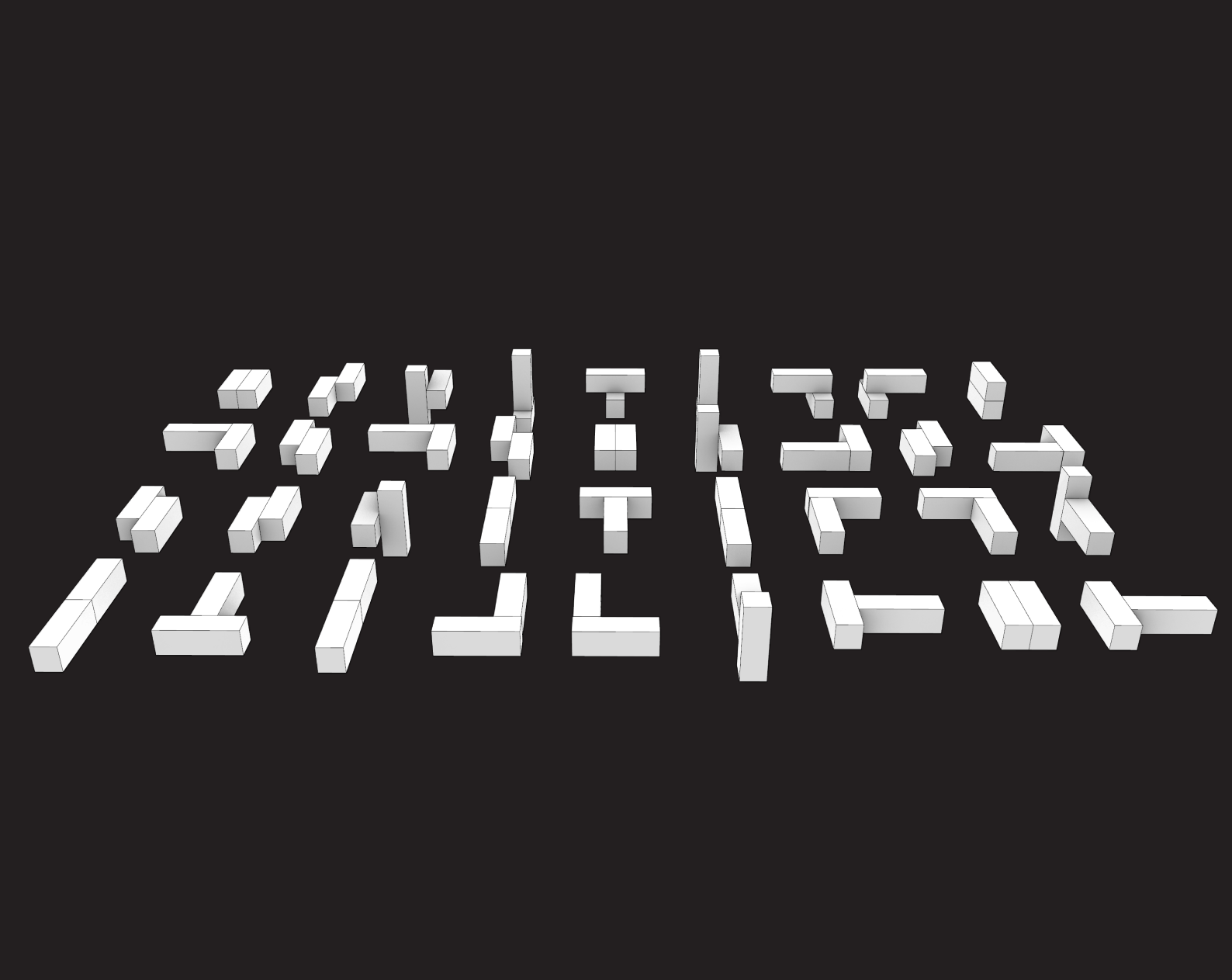
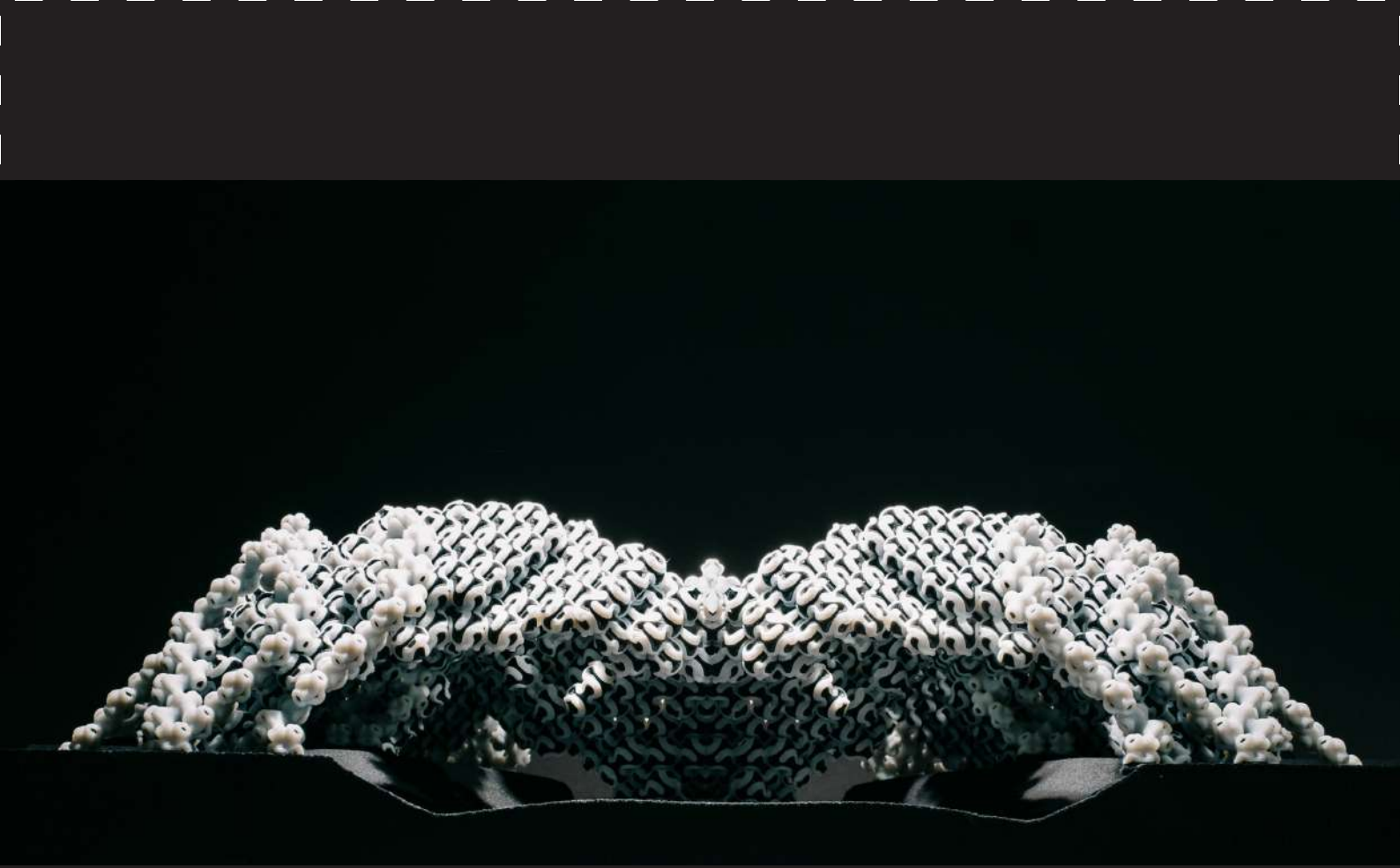
Combinatorial Design

Il design combinatorio è una strategia progettuale non parametrica basata sulla permutazione, combinazione e disposizione di unità discrete. A differenza dell'approccio parametrico, che opera attraverso la variazione continua di intervalli numerici e rapporti geometrici, il combinatorio lavora su insiemi finiti, generando configurazioni mediante regole semplici, spesso di natura algoritmica (Sanchez, 2016).

Nel contesto parametrico, le forme si sviluppano per manipolazione di parametri continui, tipicamente all'interno di ambienti NURBS, dove curve e superfici vengono deformate secondo logiche fluide e scalabili (Sanchez, 2016). Il design combinatorio, al contrario, parte dalla definizione di un catalogo di parti discrete e dalla costruzione di relazioni tra esse: accoppiamenti, aggregazioni e strutture gerarchiche capaci di generare complessità a più scale, mantenendo un'impostazione sistemica aperta e modificabile (Sanchez, 2016).

Un sistema combinatorio non mira all'ottimizzazione, poiché lo spazio delle soluzioni cresce esponenzialmente con l'aumentare delle unità, rendendo impraticabile la ricerca di una configurazione ideale (Sanchez, 2016). L'apertura del sistema diventa quindi un tratto distintivo: ogni soluzione è temporanea, legata a condizioni contingenti. In questo senso, la malleabilità rappresenta un valore progettuale fondamentale. Secondo Sánchez, essa consiste nella capacità del sistema di produrre configurazioni emergenti da situazioni specifiche, dove non esiste una forma ottimale nel lungo periodo, ma solo risposte ad hoc, raccolte dai progettisti o da una collettività (Sanchez, 2016). Il sistema resta così aperto al cambiamento e resistente alla cristallizzazione in una forma definitiva.

Mentre i sistemi parametrici si articolano attraverso flussi di dati e trasformazioni continue, quelli combinatori si fondano sulla disposizione e montaggio di unità discrete. Significato, funzione e prestazione emergono dalle relazioni tra parti, piuttosto che da una forma globale prestabilita.



Assemblaggio

Nel contesto del design combinatorio, l'assemblaggio rappresenta una strategia progettuale coerente con un approccio sistemico e discreto. In quanto sistema composto da parti e relazioni, le proprietà emergenti non derivano solo dagli elementi costitutivi, ma soprattutto dalle modalità con cui questi interagiscono. Pensare l'architettura attraverso la logica dell'assemblaggio consente una progettazione dal basso verso l'alto, in cui l'insieme non è definito a priori ma costruito progressivamente a partire dalle connessioni locali tra le parti. L'assemblaggio, in questo senso, non è solo un costrutto materiale ma anche rappresentazionale: è allo stesso tempo struttura e processo, forma e trasformazione. La sua natura è multi-scalare, poiché assemblaggi locali (come stanze, elementi costruttivi, azioni) sono intrecciati in configurazioni più ampie (come edifici, quartieri o città), senza essere ridotti a esse (Dovey, 2013). Tale visione permette di pensare l'architettura non come una forma fissa, ma come un sistema aperto in continua riorganizzazione.

Fig. 18 - polyomino, Jose Sanchez (2014)

Il progetto esplora la ripetizione seriale come strumento per generare complessità e personalizzazione. Attraverso unità modulari identiche ma liberamente ricombinabili, propone un'alternativa alla standardizzazione industriale (Polyomino, 2014).

Questo approccio si riflette anche nell'uso di strumenti progettuali capaci di generare e testare molteplici configurazioni in tempi ridotti, senza partire da uno schema prestabilito. L'attenzione si sposta così dal semplice oggetto alla sua agency: cosa fa, come si comporta nel sistema, e quali proprietà emergono dall'interazione con altri elementi.

In questo contesto è utile richiamare il pensiero di Christopher Alexander (1968), che distingue tra:

- un sistema nel suo insieme, inteso come configurazione complessa di parti e relazioni, osservabile attraverso le sue proprietà (olistiche) emergenti;
- un sistema generatore, ovvero un insieme di componenti e regole che ne guidano la formazione.

Secondo Alexander, quasi ogni sistema complesso osservabile è prodotto da un sistema generatore. L'assemblaggio architettonico, quindi, può essere inteso come l'effetto visibile di un processo generativo basato su regole e parti elementari. Il termine stesso assemblaggio, traduzione dall'originale francese *agencement*, implica non solo un'unione di elementi, ma una loro disposizione intenzionale, un allineamento produttivo (Dovey, 2013). La versione inglese *assemblage* è particolarmente adatta a descrivere questa condizione dinamica grazie alla sua doppia natura di sostantivo e verbo: un assemblaggio è tanto una cosa quanto un processo, tanto una struttura quanto un'agency (Dovey, 2013). Questa tensione

Fig. 19 - Esempio di possibili connessioni di un elemento per generare un assemblaggio

interna tra stabilità e cambiamento riflette l'essenza di un sistema generativo e adattivo.

In questo senso, le singole parti non necessitano di una visione complessiva per generare l'insieme: la complessità emerge localmente, attraverso interazioni, accoppiamenti, e relazioni gerarchiche. Si tratta quindi di una logica bottom-up, dove le proprietà del tutto non sono deducibili dalle proprietà delle singole parti.

Ogni elemento possiede sia qualità proprie che relazionali, determinate dalla sua posizione e funzione nel sistema. L'assemblaggio è una configurazione eterogenea in cui oggetti e relazioni coesistono in una condizione di interdipendenza. Dall'equilibrio tra componenti e connessioni emergono proprietà sistemiche: non riconducibili a una singola parte, ma generate dall'insieme.

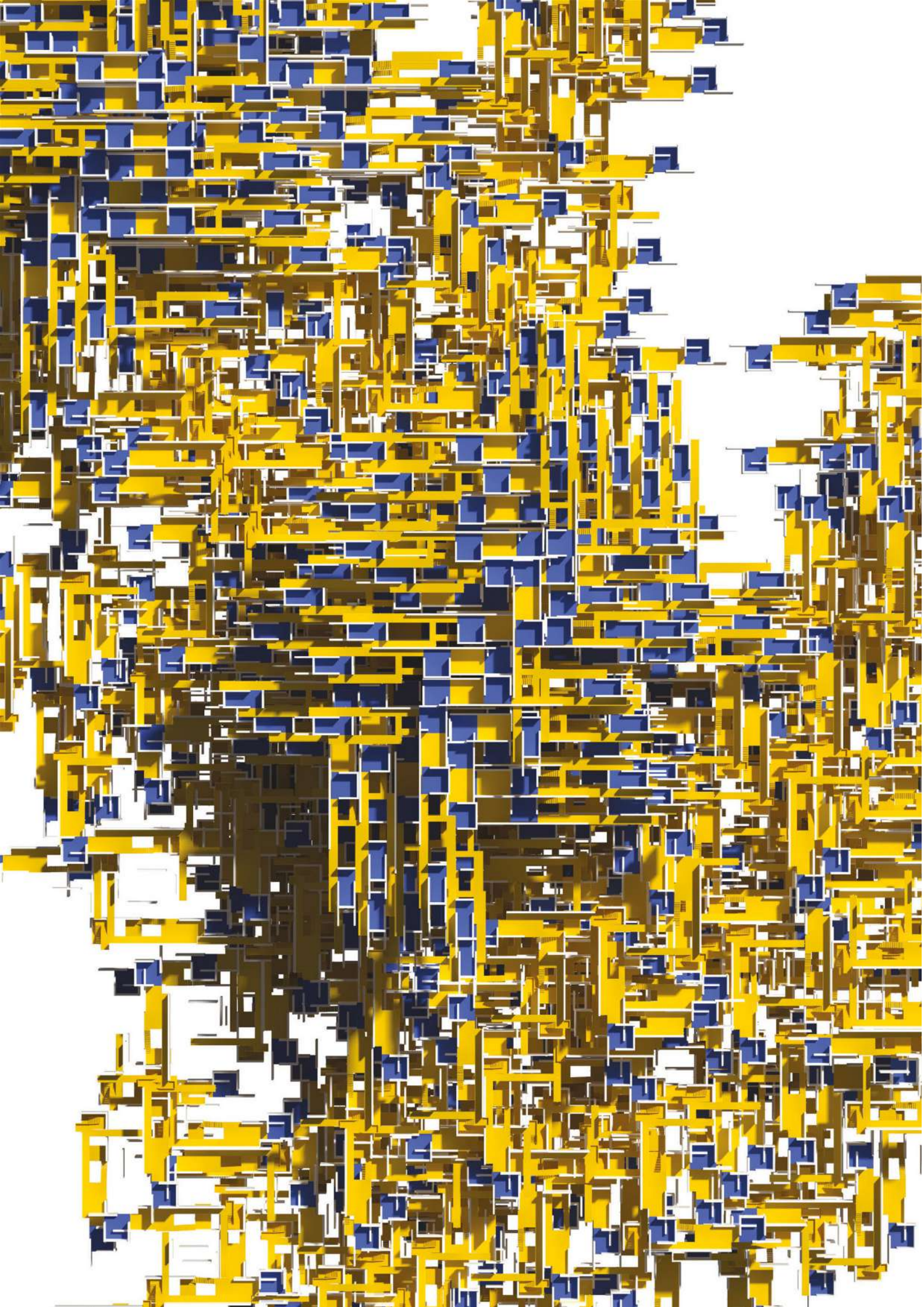
Tali processi possono avere una funzione stabilizzante, mantenendo la coerenza del sistema, oppure destabilizzante, innescando mutazioni profonde (Colchester, 2016). In quest'ultimo caso, il sistema può acquisire una nuova identità complessiva e dare origine a un diverso assemblaggio. Questo aspetto evidenzia il potenziale generativo dell'instabilità come apertura verso configurazioni non prevedibili a priori.

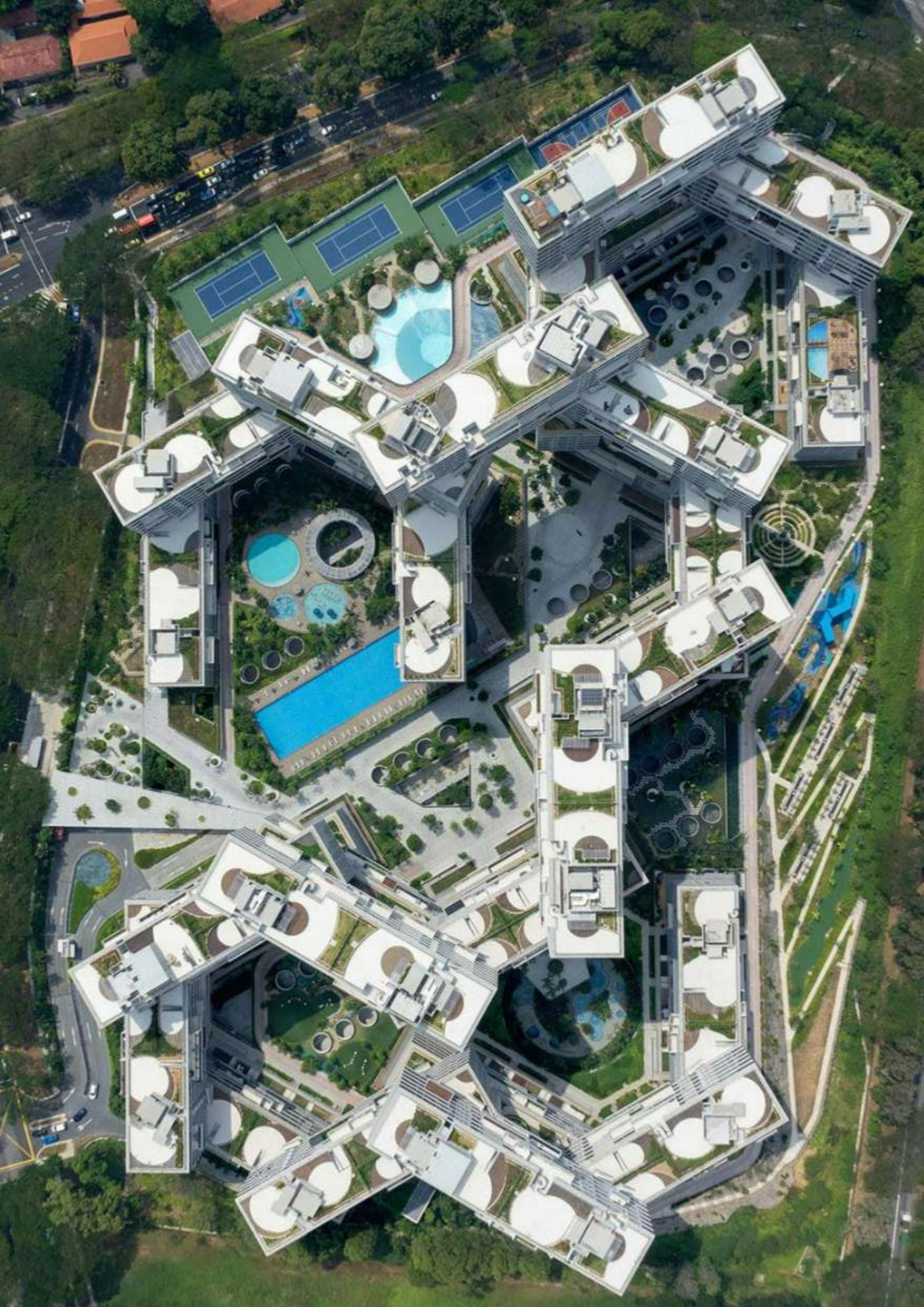
In definitiva, l'assemblaggio è al tempo stesso processo e risultato, agency e struttura, mutamento e permanenza. Non si limita a unire parti, ma le mette in relazione secondo logiche che producono effetti collettivi non riducibili alle singole parti.

In questo senso, l'assemblaggio è verbo prima ancora che sostantivo: è l'azione del connettere che dà origine alla configurazione stessa. Il progetto non è quindi un oggetto finito, ma un campo dinamico di possibilità, aperto all'evoluzione e alla trasformazione.

Fig. 20 - Bartlett Blockerties, (2018)

Il progetto esplora l'emersione di pattern come configurazioni riconoscibili e regolarità complesse all'interno della variazione formale (Junyi Bai et al., 2018).





3. HABITAT

L'impianto teorico delineato nei capitoli precedenti — dall'evoluzione delle tecnologie digitali al pensiero sistemico, fino alle logiche di assemblaggio e al design combinatorio — costituisce la base concettuale su cui si innesta lo sviluppo progettuale. Il progetto verte sull'idea di creare un habitat in cui la funzione residenziale costituisce il nucleo centrale attorno al quale si articolano servizi e attività complementari. L'obiettivo è quello di migliorare la qualità della vita quotidiana, promuovendo l'interazione sociale e garantendo una flessibilità d'uso capace di adattarsi dinamicamente alle esigenze urbane in continua evoluzione.

Alla base del progetto vi è la concezione di un ambiente residenziale integrato, dove la funzione abitativa rappresenta il fulcro attorno al quale si aggregano spazi culturali, commerciali, ricreativi e collettivi. Queste funzioni accessorie sono pensate per generare valore aggiunto, non solo per i residenti ma anche per la comunità urbana più ampia, attraverso spazi aperti e accessibili che favoriscono usi misti e adattivi. La compresenza di tali funzioni consente di rispondere in modo più efficace alle dinamiche contemporanee della città, contribuendo a una maggiore coesione sociale e a una gestione più sostenibile del territorio.

Fig. 22 - The Interlace, OMA, Singapore (2013)

Complesso residenziale composto da 31 blocchi di appartamenti, ciascuno alto sei piani e identici in lunghezza. Questi blocchi sono impilati in una disposizione esagonale attorno a otto cortili. (The Interlace, 2013)

Questa scelta progettuale è motivata da esigenze, come la crescente difficoltà nell'accesso a un'abitazione dignitosa in molte città italiane. Bologna, in particolare, rappresenta un caso emblematico, con un'offerta abitativa limitata e un costante aumento dei costi. La città registra una delle crescite demografiche più rapide a livello nazionale (inumeridibolognametropolitana, 2023) e, allo stesso tempo, affronta

sfide abitative rilevanti: al gennaio 2025, il costo medio di affitto si attesta intorno ai 18,5 €/m², mentre il prezzo medio di acquisto è di circa 3.454 €/m² (idealista, 2025). Questi dati evidenziano la necessità urgente di nuove soluzioni abitative di qualità, accessibili e orientate al benessere dell'individuo.

Da qui nasce la proposta di un habitat che integri diverse tipologie di spazi e funzioni, incrementando sia la quantità che la qualità dell'offerta residenziale. L'obiettivo non è solo quello di costruire nuovi alloggi, ma di progettare un modello di vita urbana più sostenibile, inclusivo e resiliente.

Fig. 22 - Confronto popolazione residente (2023)

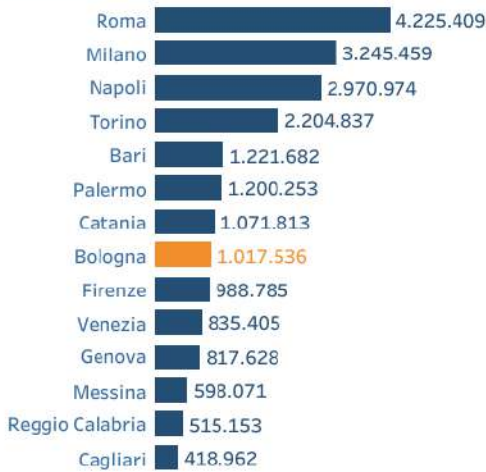
Popolazione residente

Anno 2023



Popolazione al 31 dicembre

Anno (grafici a barre)
2023

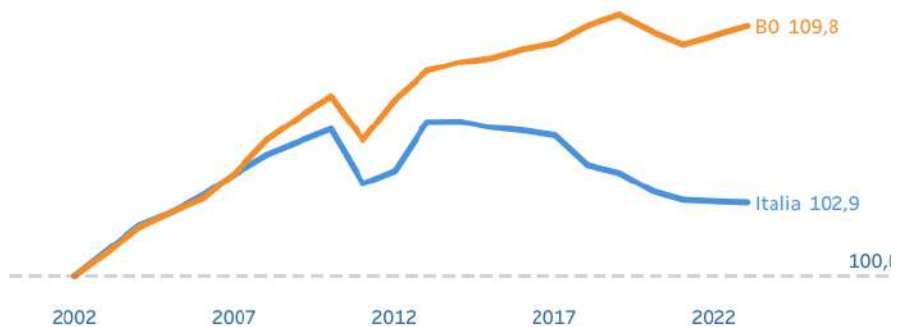
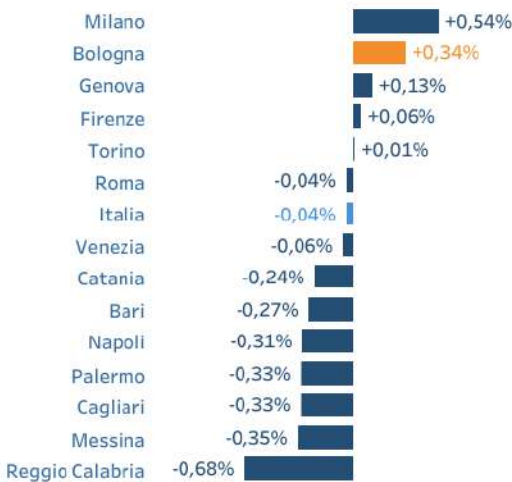


Secondo i dati del Censimento Permanente, pubblicati da Istat a dicembre 2024, l'anno 2023 evidenzia a Bologna un **leggero aumento** di popolazione da 1.014.124 a 1.017.536 abitanti (pari a 3.412 persone in più, ovvero **+0,34%**). Si tratta di un'eccezione - insieme a Milano, Roma e Firenze - rispetto al calo osservato in Italia (-0,04%) e nella maggior parte delle città metropolitane italiane.

Variazione % della popolazione 2023-2022

Trend dell'indice della popolazione

Serie storica 2002-2023 (2002 = base 100)



Scegli un **territorio** da confrontare con Bologna
Italia

Scegli un **secondo territorio**
Italia

Graf. 2 – I primi 30 capoluoghi di provincia con il maggior fabbisogno di alloggi per studenti

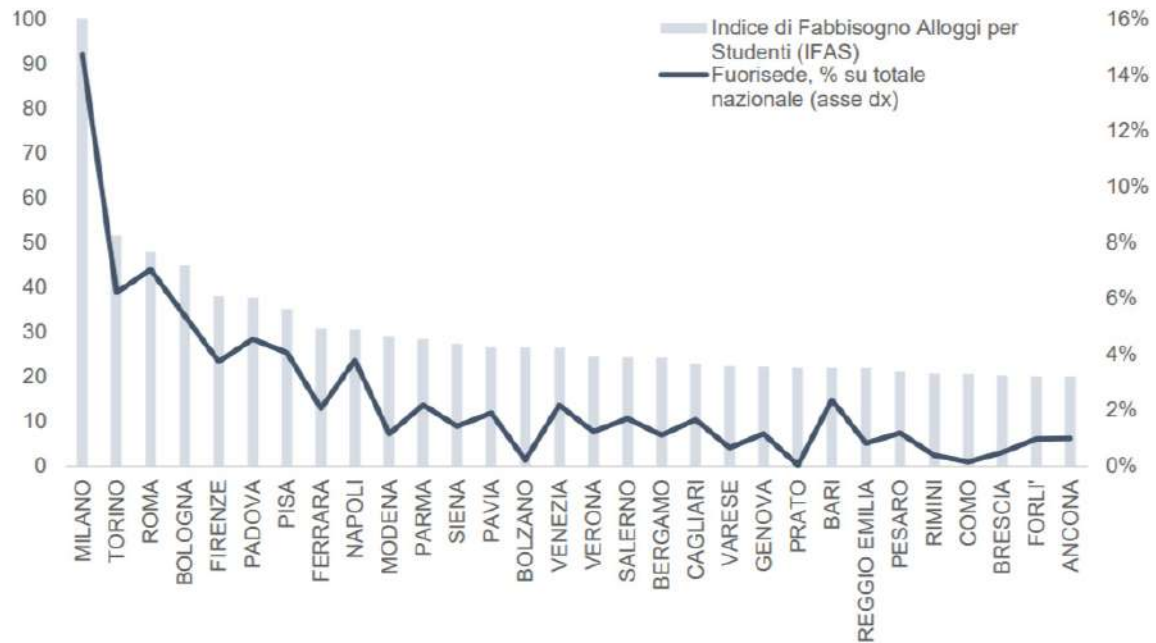
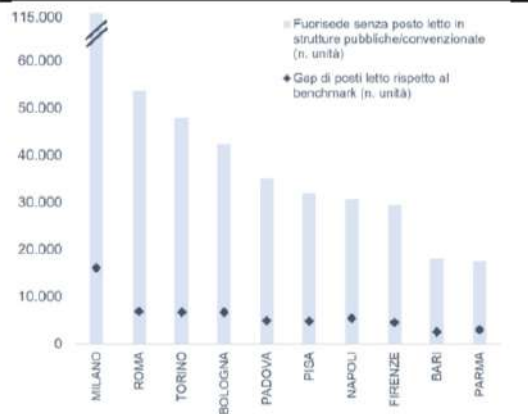


Fig. 23 - Movimento demografico a Bologna dal 2002 al 2022

Graf. 3 – Domanda potenziale di alloggi per studenti nei primi dieci capoluoghi di provincia



Fonte: elaborazione CDP (Strategie Settoriali e Impatto) su dati MUR e Scenari Immobiliari

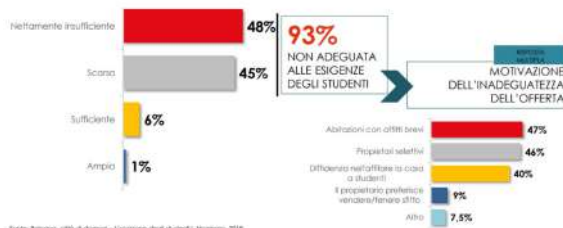
Fig. 24 - Fabbisogno di alloggi per studenti (2019)

Graf. 4 – Canoni medi di affitto mensili (30mq) nei primi dieci capoluoghi per fabbisogno di alloggi per studenti, 2019



Fonte: elaborazione CDP (Strategie Settoriali e Impatto) su dati CDP (Assessorato della Famiglia)

Valutazione sull'offerta di affitto a Bologna da parte degli studenti



Fonte: Bologna, città di domani - L'opinione degli studenti | Novembre 2018

Fig 25 - Indice di gradimento e valutazione difficoltà di accesso alla casa a Bologna (2022)

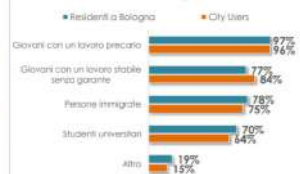
ACCESSO ALLA CASA

DIFFICOLTÀ ALL'ACCESSO

Esistono difficoltà per chi intende acquistare o prendere in affitto un'abitazione nella città di Bologna?

Sì 76% RESIDENTI A BOLOGNA
Sì 76% CITY USERS

Fase di popolazione con particolari difficoltà ad acquistare o prendere in affitto un'abitazione nella città di Bologna



Fonte: Bologna, città di domani - L'opinione della popolazione | Novembre 2018

Benefici

Integrare la funzione residenziale con servizi e spazi collettivi all'interno di un unico sistema architettonico genera numerosi benefici, sia a livello individuale che collettivo. Questa scelta progettuale consente una significativa ottimizzazione del tempo, grazie alla riduzione degli spostamenti quotidiani e alla possibilità di accedere facilmente a servizi essenziali come negozi, strutture sportive, spazi ricreativi o culturali. Avere tali funzioni a breve distanza dalla propria abitazione migliora l'efficienza delle routine quotidiane e favorisce un miglior equilibrio tra vita privata, lavoro e tempo libero.

Dal punto di vista ambientale e urbanistico, la mobilità sostenibile è incentivata dalla prossimità delle funzioni, riducendo la dipendenza dall'auto privata contribuendo a ridurre traffico e inquinamento, migliorando la qualità dell'aria e la vivibilità urbana.

Uno degli aspetti più rilevanti è la promozione della socializzazione e del senso di comunità. Spazi comuni accessibili, aree verdi condivise, attività collettive o miste favoriscono occasioni di incontro tra residenti e con il quartiere circostante. Questo contribuisce a costruire un tessuto sociale solido, basato sul supporto reciproco, sul riconoscimento e sull'inclusione. La coesistenza di diverse funzioni all'interno dello stesso edificio o complesso genera un ambiente urbano vivo, attivo durante tutto l'arco della giornata, contrastando fenomeni di isolamento o degrado (Jane Jacobs, 1992; Mahshad Kazemzade & Reza Shakouri, 2017).

La sicurezza rappresenta un ulteriore vantaggio. La presenza continua di persone negli spazi pubblici o semi-pubblici, favorita dalla varietà delle attività presenti, comporta un effetto di sorveglianza informale, ciò che Jane Jacobs definiva "gli occhi sulla strada" (Jane Jacobs, 1992). Ambienti frequentati e visibili tendono a essere più sicuri, specialmente per bambini, anziani e persone vulnerabili. Inoltre, l'integrazione di funzioni può portare a un miglioramento dell'illuminazione e della manutenzione urbana.

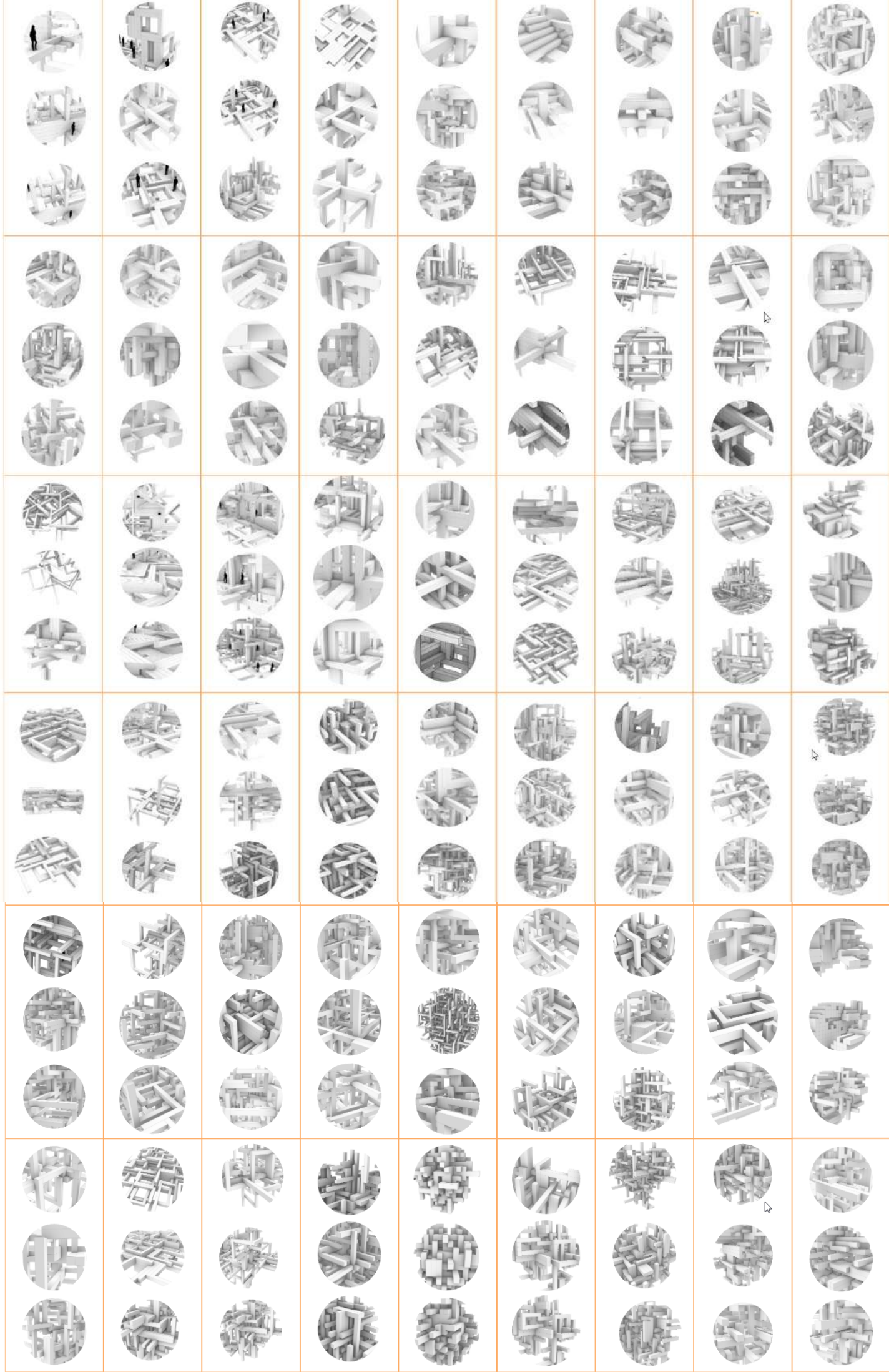
Infine, un ambiente integrato ha effetti positivi anche sul benessere psicofisico. La possibilità di muoversi a piedi, fare attività fisica all'aperto, frequentare luoghi sociali e vivere in spazi ben progettati incide direttamente sulla salute mentale e fisica dei residenti. Il comfort ambientale, l'accesso a servizi e la qualità architettonica degli spazi abitativi contribuiscono a un senso generale di benessere, stabilità e appartenenza.

Applicazione

Il sistema progettuale verrà applicato all'area dell'ex caserma Perotti a Bologna. Tuttavia, è concepito come un dispositivo replicabile in contesti diversi, capace di adattarsi al variare degli input ambientali.

L'obiettivo è sviluppare un sistema in grado di "reagire" attivamente alle trasformazioni della città, adattandosi a condizioni urbane, climatiche e sociali differenti. Pur basandosi su un principio costruttivo comune, il progetto si articola in configurazioni diverse, capaci di rispondere alle specificità di ogni sito: densità urbana, morfologia del lotto, domanda abitativa, presenza di infrastrutture.

La proposta si basa sui principi di scalabilità e replicabilità, con l'obiettivo di definire un modello progettuale capace di adattarsi a contesti diversi. A partire da logiche condivise, il sistema è pensato per essere declinato in modo specifico, offrendo risposte puntuali alle esigenze locali.



4. METODO

Strumenti

Il presente progetto di tesi si basa su una metodologia progettuale computazionale, che integra l'uso di strumenti digitali per modellare e analizzare un sistema architettonico complesso. L'obiettivo è esplorare le potenzialità del legno CLT attraverso una logica di fabbricabilità e assemblaggio a secco, riducendo al minimo lo spreco di materiale e favorendo la modularità e la precisione dell'assemblaggio.

Per perseguire questi obiettivi è stata adottata una serie di strumenti digitali interoperabili tra loro, in grado di gestire l'intero flusso di lavoro: dalla definizione della geometria alla verifica strutturale. In questa fase del lavoro, gli strumenti principali utilizzati sono:

- Rhinoceros 3D (Robert McNeel & Associates, 2025 - Rhino 8 versione 8.18.25100.11001)
- Grasshopper (David Rutten, 2025 - versione 1.0.0008)
- Karamba3D (Clemens Preisinger, 2024 - versione 3.1.50414.0)
- Assembler (Alessio Erioli -Co-de-iT, 2023 - versione 1.3.0)

4. METODO

Grasshopper è un ambiente di programmazione integrato in Rhino, che consente di creare definizioni parametriche tramite una logica a nodi. Rispetto ai software CAD tradizionali, Grasshopper introduce una modalità progettuale generativa, nella quale le forme non sono disegnate, ma generate attraverso relazioni logiche tra parametri, geometrie e condizioni al contorno. Questo approccio consente di:

- esplorare numerose varianti progettuali in tempi brevi;
- integrare dati quantitativi (dimensioni, relazioni, vincoli) all'interno della morfologia;
- automatizzare processi ripetitivi o condizionati da più variabili;
- predisporre geometrie direttamente compatibili con la fabbricazione digitale.

Assembler è un plug-in di Grasshopper per la progettazione e l'analisi di sistemi di assemblaggio in architettura, che combina principi di mereologia (studio delle parti e del tutto) e progettazione combinatoria. Lo strumento sfrutta la ripetibilità degli elementi e l'automazione per generare strutture in cui la qualità emergente nasce dal rapporto dinamico tra parti, connessioni e contesto. Il motore di Assembler si basa su euristiche (regole/ipotesi), che lavora su più livelli: dalla singola componente all'aggregato complessivo fino all'interazione con l'ambiente circostante. L'utente definisce:

- Le geometrie di base (parti),
- I vincoli spaziali e funzionali (spazi "inviolabili" o zone vuote),
- Le regole di accoppiamento,
- I criteri che guidano l'espansione dell'assemblaggio.

Il progetto si fonda su un sistema di assemblaggio composto da elementi ripetibili, in grado di raccogliere e interpretare informazioni relative allo spazio occupato e alla propria rete di connessioni. Il processo combinatorio che guida la loro aggregazione si basa su regole applicate in modo iterativo, dove ogni scelta, sia dei componenti che delle regole, è influenzata da dati interni ed esterni al sistema. Una volta definita una configurazione, strategie computazionali permettono di analizzarne le informazioni sia a livello locale che globale, rendendo possibile l'adattamento in funzione di obiettivi prestazionali o progettuali specifici.

Karamba3D è un plugin per Grasshopper che permette l'analisi strutturale agli elementi finiti (FEM) all'interno dello stesso ambiente parametrico. La sua integrazione nel processo progettuale consente

di testare le performance strutturali di un sistema in tempo reale, mentre la geometria viene modificata in funzione delle necessità progettuali.

Le principali funzionalità rilevanti includono:

- assegnazione di materiali e sezioni;
- definizione di carichi e vincoli;
- analisi di deformazioni, tensioni e stabilità;
- feedback visuale immediato all'interno del workflow.

L'utilizzo di Karamba3D permette quindi di spostare l'analisi strutturale dalla fine del processo progettuale al suo interno, trasformandola in una guida alla definizione della forma.

Questa flessibilità strumentale rappresenta un elemento centrale del paradigma digitale: gli strumenti non si limitano a eseguire operazioni, ma diventano veri e propri agenti progettuali, in grado di orientare le scelte e ampliare lo spazio delle possibilità.

Integrazione tra Assembler e Karamba3D

Dopo aver descritto i singoli strumenti, questo paragrafo presenta la logica della loro integrazione, che costituisce la base metodologica del progetto. L'obiettivo non è ancora la presentazione del progetto finale, ma la definizione di un processo di lavoro capace di collegare la generazione di assemblaggi spaziali (Assembler) con la loro analisi strutturale (Karamba3D). In questo modo è stato possibile esplorare rapidamente molteplici configurazioni, osservandone sia le implicazioni architettoniche sia le prestazioni tecniche, e costruire così un flusso di lavoro coerente che verrà poi applicato al caso studio.

Assembler è stato utilizzato per definire la morfologia degli assemblaggi: la definizione della/e parte(i) e delle geometrie interne, la selezione delle euristiche di generazione e la creazione automatica della topologia assemblata. Karamba3D è stato impiegato per tradurre questi assemblaggi in un modello strutturale e per condurre le verifiche e l'analisi dei risultati.

Questa combinazione ha consentito due tipi di indagine:

- analizzare come varia la prestazione strutturale di uno stesso schema di connessione al variare delle geometrie interne;
- osservare come cambia la risposta globale mantenendo inalterata la geometria generale ma variando il numero di parti dell'assemblaggio o le regole (euristiche) che ne determinano la costruzione.

Scelta degli elementi: beam vs shell

Karamba3D permette l'uso di elementi beam (1D) e shell (2D). Per la fase iniziale di studio si è scelto di generare assemblaggi con elementi beam di forma semplice: questa scelta ha reso il modello computazionalmente leggero e ha permesso di comprendere le potenzialità del flusso di lavoro prima di passare a discretizzazioni bidimensionali più complesse.

Fig. 27 - Schema del workflow, integrazione tra Karamba3D e Assembler

Flusso operativo

Il processo adottato è sintetizzabile in queste fasi:

1. Generazione (Assembler):

- definizione della/e parte (i);
- parametrizzazione delle geometrie interne e delle interazioni tra parti;
- scelta delle euristiche/regole di assemblaggio;
- generazione automatica della topologia dell'assemblaggio.

2. Generazione del modello (Karamba3D):

- conversione dell'assemblaggio in un modello strutturale (beam o shell) con proprietà di materiale e sezioni/spessori;
- applicazione dei carichi e vincoli pertinenti;
- calcolo del modello.

3. Analisi dei risultati:

- verifica degli sforzi (in particolare lo stress assiale lungo l'asse degli elementi per i beam e le tensioni principali per le shell);
- valutazione del fattore di utilizzo degli elementi;
- interventi di rinforzo in post-processing e applicazione di regole correttive.

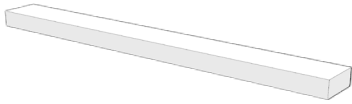
Il fattore di utilizzo

Il fattore di utilizzo (Utilization) è un indicatore sintetico che mette a confronto la domanda strutturale con la capacità resistente dell'elemento:

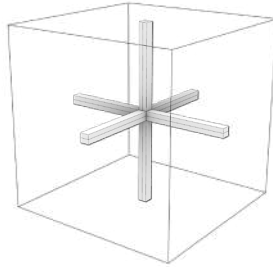
$$Utilization = \frac{\text{Domanda (forze, momenti)}}{\text{Resistenza (capacità \frac{\text{della sezione}}{\text{materiale}})}}$$

1. Generazione assemblaggio (Assembler)

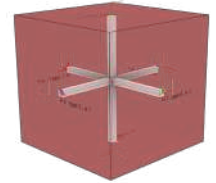
Definizione del modulo



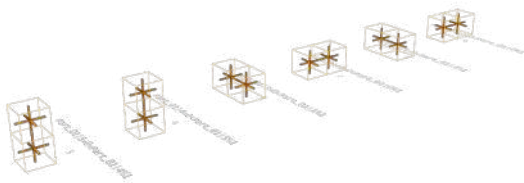
Definizione della geometria



Posizionamento delle handle



Regole selettive

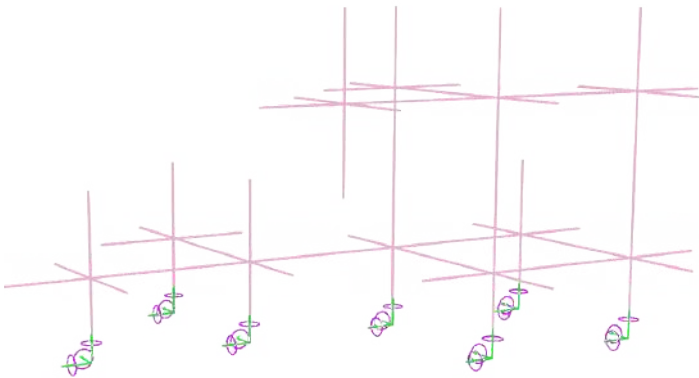


Generazione dell'assemblaggio

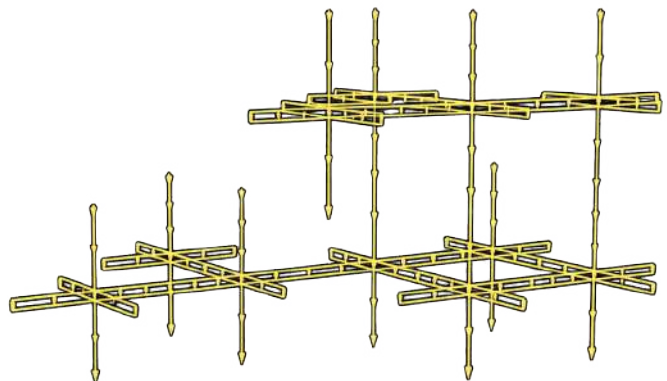


2. Generazione del modello (Karamba3D)

Supporti

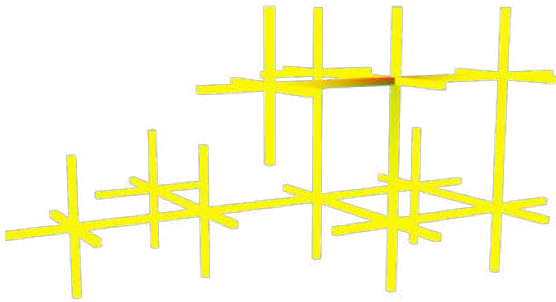


Carichi

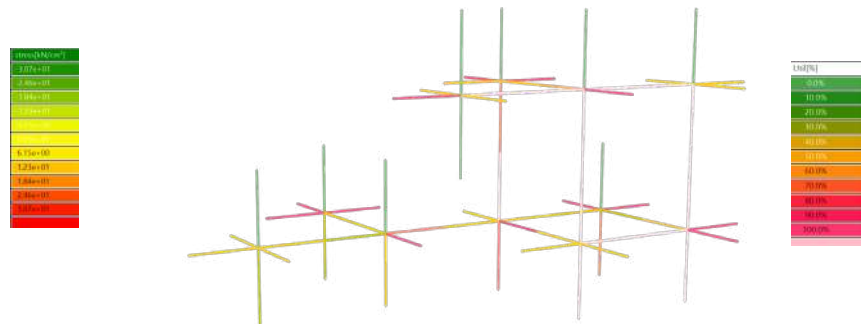


3. Analisi dei risultati

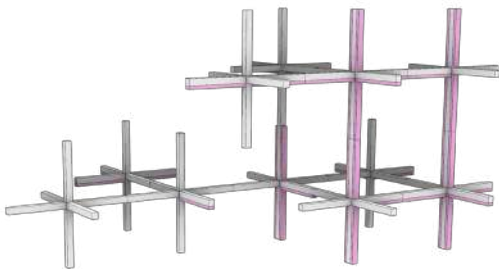
Axial stress



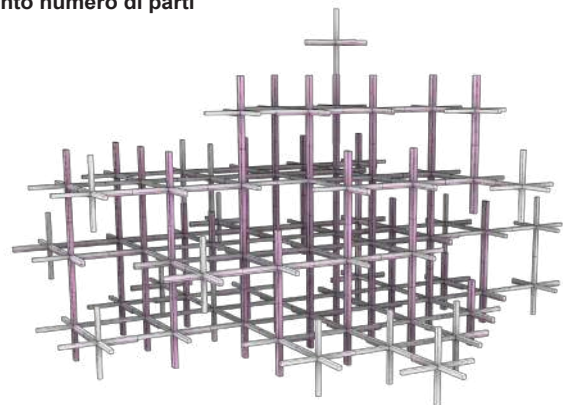
Utilization



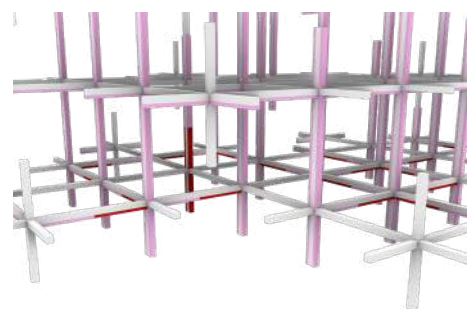
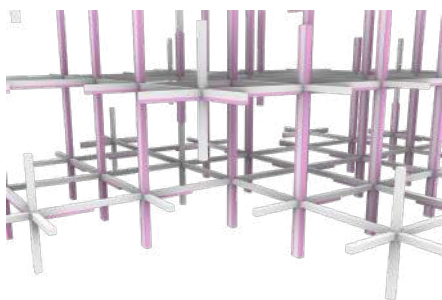
Aggiunte di rinforzo



Aumento numero di parti



Regole correttive in post-processing



Il componente di Karamba3D denominato “Utilizzo degli elementi” restituisce un valore complessivo di utilizzazione della sezione, tenendo conto dei fenomeni di comportamento plastico e dell’instabilità quando rilevante. L’interpretazione pratica è la seguente:

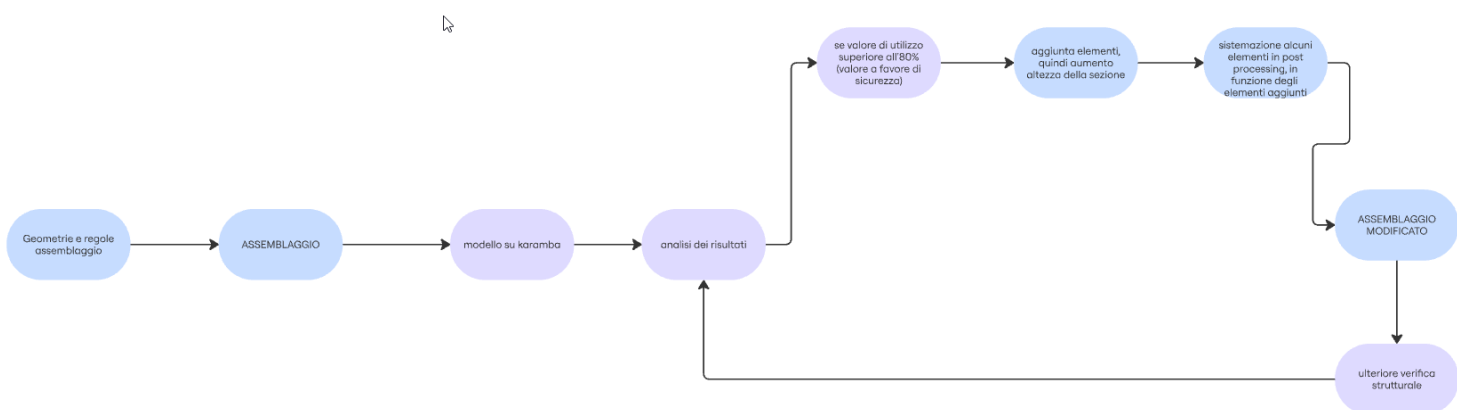
- Utilization < 1 (o < 100%) → l’elemento è entro i limiti di capacità;
- Utilization = 1 (100%) → elemento al limite della capacità;
- Utilization > 1 (100%) → elemento sovraccaricato (non verificato).

Nel workflow adottato, quando il valore di utilization supera la soglia di 0.8, il modello viene soggetto a procedure di rinforzo automatico: vengono aggiunti elementi di rinforzo nelle zone critiche e applicate regole mirate per modificare assicurare una coerenza negli elementi aggiunti. Questo passaggio è stato ripetuto anche per i modelli shell, adattando le regole di intervento alla natura bidimensionale degli elementi.

Considerazioni conclusive

L’approccio integrato Assembler–Karamba3D ha permesso di valutare, in modo iterativo, molteplici configurazioni dal punto di vista spaziale, morfologico e strutturale. Il metodo consente di mettere in relazione scelte generative (regole, numero di parti, geometrie interne) con prestazioni strutturali misurabili (sforzi, deformazioni, utilizzo) e fornisce una base solida per la definizione di regole automatiche di ottimizzazione e rinforzo.

Fig. 28 - Schema del processo

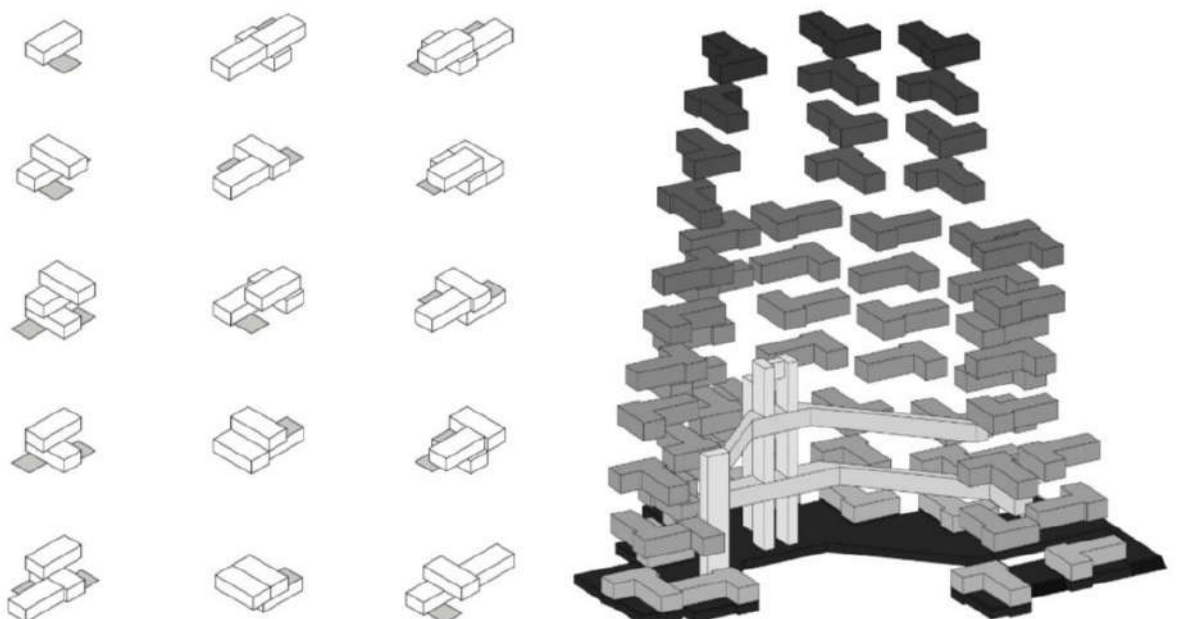


Approccio discretizzato e prefabbricazione

Il progetto si basa su un approccio discretizzato che presenta numerosi vantaggi: tempi e costi di costruzione si riducono grazie a un processo più rapido e a un controllo di qualità più efficace. Al contempo, questa metodologia facilita la reversibilità dell'edificio, permettendo di pianificarne l'intero ciclo di vita, fino a un eventuale smantellamento o riconfigurazione. Tra i limiti tipici delle soluzioni prefabbricate si riscontrano le complessità logistiche e di trasporto, dovute a peso, ingombri e costi elevati, nonché una percezione spesso negativa legata a forme ripetitive e a una presunta scarsa qualità.

Habitat '67 di Moshe Safdie (1967) illustra perfettamente l'idea di un'architettura modulare analogica. L'aggregazione avviene in modo analogico, dove ogni singola unità corrisponde a una "scatola", ognuna delle quali può essere combinata in 16 varianti, generando così 158 abitazioni (Habitat '67). Ottiene una spazialità sempre diversa, con ogni nucleo dotato di accesso indipendente e di uno spazio esterno privato. Ogni "scatola" funge anche da elemento portante, integrando funzionalità e struttura. L'edificio è concepito attraverso l'uso di parti prefabbricate e assemblate, simili a combinazioni di mattoncini LEGO; ciò che varia è il metodo di utilizzo del mezzo (prefabbricazione). In questo contesto la prefabbricazione non è un vincolo, ma un'opportunità: è il "protocollo" di montaggio – l'insieme delle regole di connessione – a determinare le possibili interazioni e combinazioni tra i vari moduli (Dream Builders: Recreating the Original Vision for Habitat 67 with an Unreal Engine and RealityCapture Sample Project).

Fig. 29 - Habitat 67, Moshe Safdie
Schema dell'aggregazione delle parti dell'edificio





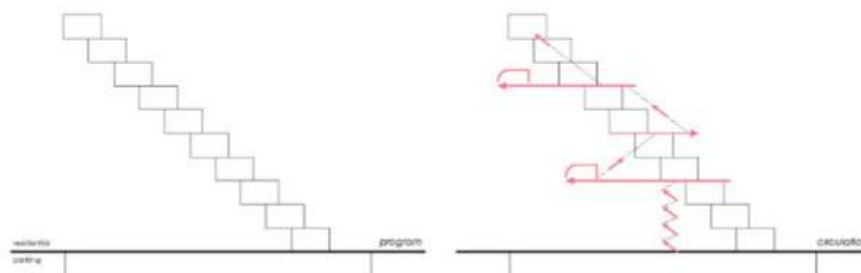
Nel caso specifico del progetto, la discretizzazione si traduce in un sistema costruttivo basato su pannelli in CLT assemblati a secco. L'approccio mira a ottimizzare il rapporto tra forma, struttura e fabbricabilità, con l'obiettivo di minimizzare gli sprechi in un'ottica di economia dei mezzi. Il progetto si fonda sull'idea di un processo integrato, in cui il dettaglio costruttivo non è solo esito di una soluzione tecnica, ma parte attiva della definizione morfologica complessiva. In questa prospettiva, il sistema costruttivo diventa espressione di un'interdipendenza profonda tra sistema materiale, processo e morfologia. I limiti, anziché essere ostacoli, vengono assunti come vincoli produttivi e generatori di forma, trasformando le costrizioni in opportunità progettuali.



Fig. 30 - Habitat 67, Moshe Safdie

Fig. 31 - Habitat 67, Moshe Safdie

Il disegno mette in evidenza le pareti portanti che sostengono le unità modulari, integrate con giardini e percorsi pedonali.





5. STRATEGIE PROGETTUALI

L'approfondimento della teoria dei sistemi complessi, condotto attraverso letture e analisi di casi studio, ha messo in evidenza il concetto di architettura adattiva come tema centrale e particolarmente significativo. Da questa riflessione è emersa una domanda guida: come progettare un'architettura capace di adattarsi al cambiamento?

Per iniziare a rispondere, sono stati individuati alcuni elementi ricorrenti nei riferimenti teorici e nei casi studio analizzati: complessità, proprietà emergenti, polivalenza, ridondanza, informazione, auto-organizzazione, sostenibilità e relazione tra tecnica e dettaglio architettonico.

A partire da questi elementi, sono state definite quattro strategie progettuali principali: complessità, polivalenza, sostenibilità e tettonica. Per ciascuna di esse sono stati individuati criteri operativi, quanto più possibile oggettivi, quantificabili e confrontabili:

1. Complessità

- Relazione dinamica con il contesto
- Connessioni visive interne ed esterne
- Presenza di proprietà emergenti
- Massimizzazione delle viste verso l'esterno

2. Sostenibilità

- Reversibilità e riuso dei materiali
- Ottimizzazione della geometria e dell'uso dei materiali

3. Polivalenza

- Flessibilità funzionale
- Accessibilità diffusa
- Qualità e varietà dei percorsi
- Ridondanza funzionale degli elementi

3. Tettonica

- Ridondanza costruttiva
- Serializzazione degli elementi
- Studio dei giunti
- Cura del dettaglio architettonico
- Integrazione tra processo progettuale e costruttivo

Queste quattro strategie costituiscono il fondamento metodologico adottato per guidare le scelte progettuali della tesi, nella prospettiva di un'architettura sistemica aperta al cambiamento e capace di riorganizzarsi nel tempo.

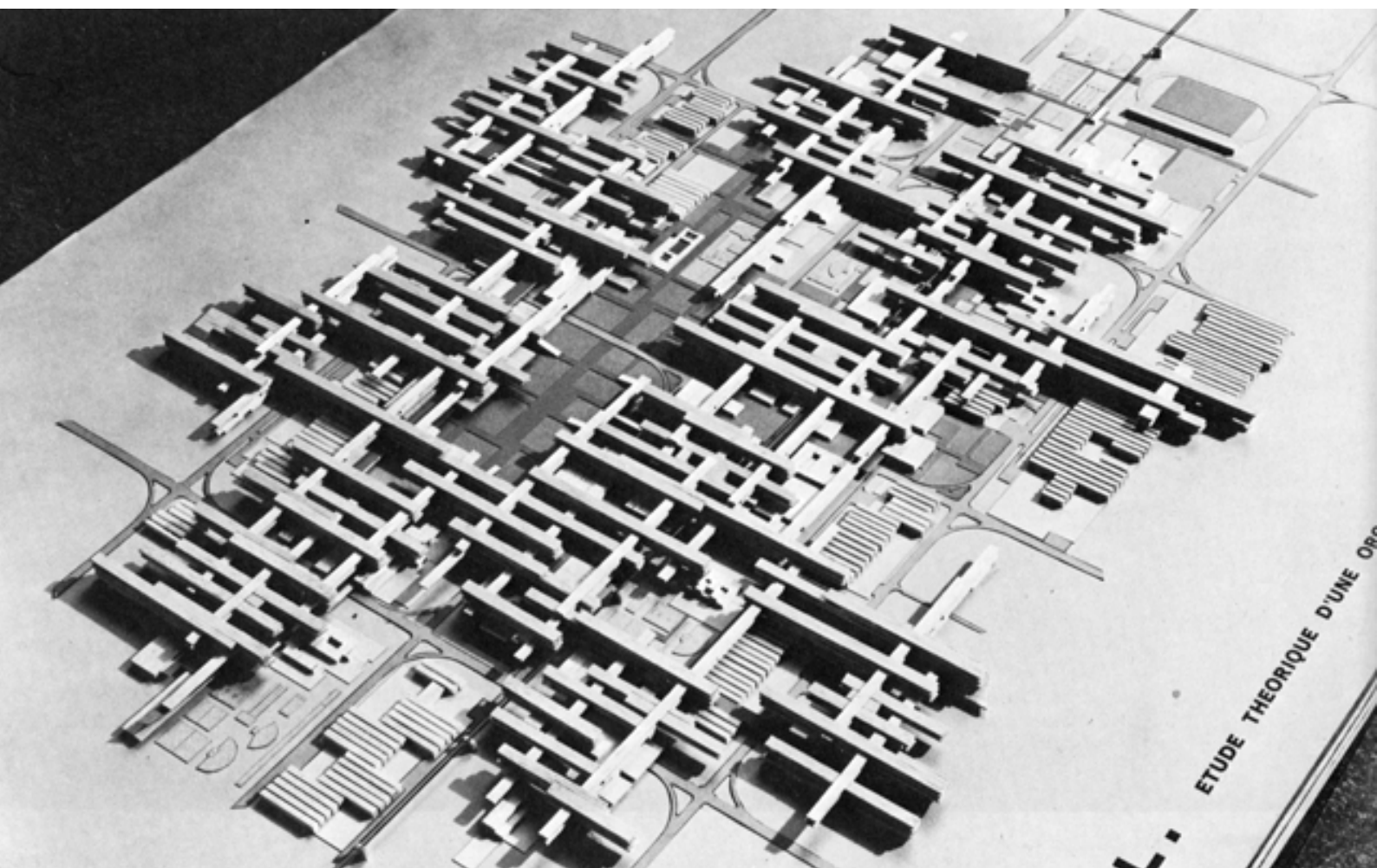
Fig. 33 - Diamonds, Gilles Retsin (2016)

Configurazione basata su un elemento discreto privo di componenti personalizzate, capace di generare strutture multiscalarì attraverso connessioni scorrevoli sulle facce laterali.



Complessità

La complessità non deriva necessariamente dalla molteplicità delle componenti, ma può emergere da una minima varietà di parti capaci di generare una massima variazione di relazioni. In questo senso, la complessità è prodotto dell'organizzazione. L'uso di elementi serializzati e quindi una minima varietà di parti permette di esplorare un ampio spettro di configurazioni attraverso la differenziazione delle interrelazioni. È dunque nel sistema di connessioni, negli accoppiamenti e nelle regole locali di aggregazione che si manifesta la ricchezza morfologica e comportamentale dell'insieme. Tale approccio sposta l'attenzione dal disegno dell'oggetto finito alla definizione del sistema relazionale che ne governa la formazione.



Polivalenza

Uno spazio polivalente è un ambiente dotato di un potenziale latente, che si manifesta attraverso l'uso e l'appropriazione da parte degli utenti. È composto da unità spaziali dalla forma esplicita, ma prive di una funzione rigidamente assegnata, favorendo così una flessibilità d'uso e una maggiore apertura ai cambiamenti. Come sottolinea Hertzberger (2014), questa caratteristica consente allo spazio di adattarsi a esigenze mutevoli nel tempo, accogliendo differenti attività senza richiedere trasformazioni sostanziali. La polivalenza si oppone all'idea di uno spazio generico o neutro: mira invece a generare un ambiente ricco di condizioni spaziali che possano attivarsi in base al contesto, valorizzando l'incertezza d'uso e l'auto-organizzazione (Hertzberger, 2014).

Un esempio emblematico di ciò è il progetto per la Centraal Beheer di Hertzberger (1972). L'edificio si fonda sull'uso sistematico di un modulo di 9 x 9 metri, scelto per la sua capacità di accogliere tutte le funzioni previste dal programma, senza imporre gerarchie rigide. Questa unità, pur avendo una forma definita, è pensata per essere interpretabile e trasformabile (Hertzberger, 2016). Il progetto assume la forma di un sistema a trama aperta, articolato in isole collegate da ponti e immerse in spazi comuni condivisi e non gerarchizzati, secondo una logica modulare che privilegia la flessibilità e l'adattabilità.

La progettazione procede dall'interno verso l'esterno, e distingue tra una struttura di base fissa, l'ossatura dell'edificio, e una zona complementare variabile, pensata per accogliere modifiche nel tempo (Hertzberger, 2016).

Questa strategia consente al sistema edilizio di evolvere senza perdere coerenza, garantendo un'elevata capacità di riconfigurazione spaziale in risposta ai cambiamenti organizzativi.

'We should consider buildings more as instruments, open to different tasks at different times'

(Hertzberger, 2020)

Fig. 34 - Le Vaudreui, Atelier de Montrouge (1979 ca.)

La ripetizione di un'unica unità genera una complessità organizzata, frutto delle interazioni e delle connessioni tra le parti

Fig. 35 - Centraal Beheer di Hertzberger, raccolta di articoli



Centraal Beheer – trivsam myrstack

Hur bör man bygga ett kontorshus idag? Som monument över arkitekten? Där allt är specialitet in i minsta detalj och brukarna inte vågar ändra en sak? Eller som monument över det mångfaldiga företaget? Eller bör det spjälka brukarna rätt ut själva hjälpa till att utforma sin miljö?

Försäkringsbolaget Centraal Beheer i Apeldoorn, Holland, har satsat på det senaste alternativet. Dess bygghandhavare W. M. Jansen, mer sociolog än tekonst, började 1968 att församma med de anställda och

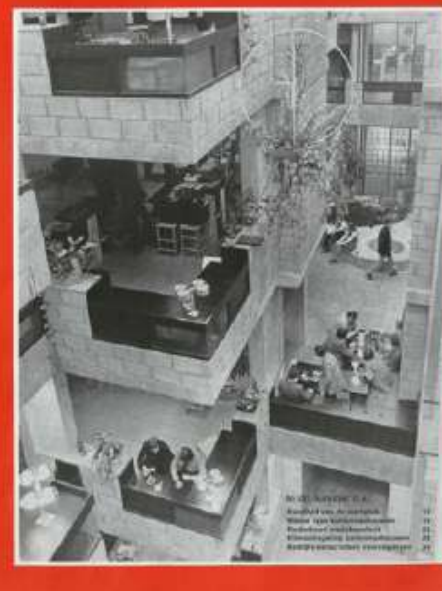
den arkitekt man valt, Herman Hertzberger, studera hur deras främsta kontorbyggnad skulle se ut för att fungera tillfredsställande för de anställda i 1975 stod huset färdigt. Kontorshuset är uppfyllt i ett stort antal huskroppar och planer nästan i sina grupperingar som den gamla klassiska medelklassens. Upplockade tak förbinder delarna med varandra och ger utrymme för utvalda yttillförläggningar och tak. Huskropparna öppnar sig mot två västra och bildar vertikala landskap av plattformar och vä-

ringar.
Uöver standarder och plöckars löp och ens behov, har de sin närmare omgivning egen smak. Arkitektonik har jämförts till Pappalooft/Amberg, till T. de Wulfes egna förklarade designkoncept, man sig med levande byggar och maist av. Den sociala infrastrukturen med här och där, Arbetstiderna över lunch i re- till sammans med be- finns kaféer och sam- per på och planform- plan, butiker, post- kontor. Här arbetar samer. Allt utstrålar glädje. Centraal Beheer, skön, adminis- stack.



de architect

centraalbeheer.com architecten | januari 2012 | nummer 1



Financie Poly
'58
BUREAULANDSCHAFT
'78



OFFICE BUILDING "CENTRAL BEHEER"

ARCHITECT: HERMAN HERTZBERGER
1968, 1975
100,000 m²

UN LIEU DE TRAVAIL POUR 1000 PERSONNES
Il semblerait difficile, à priori, impossible, de définir l'édifice construit par Herman Hertzberger à Apeldoorn, si l'on s'en réfère aux classifications habituelles. Situé à quatre-vingts km d'Amsterdam et abritant les services de la société d'assurances « Centraal Beheer », il s'agit bien, dans ce sens, d'un immeuble de bureaux. Mais par son traitement architectural si volumétrique, par la qualité et la diversité des espaces qu'il contient, par les nombreux services qu'il renferme, ce bâtiment échappe totalement à ce vocable, preuve s'il en fallait, ce retour à la pauvreté du fonctionnalisme architectural auquel nous nous adonnons le plus couramment



light and dark colors. The building's structure is made of concrete and steel, and the interior is a mix of open-plan offices and private workspaces. The building is a prime example of modernist architecture, with its emphasis on functionality and the use of materials like concrete and steel.

More evidence of the building's unique design is seen in the way the cantilevered floors are supported by a central core. This design allows for a high degree of flexibility in the way the building is used, and it is a key feature of the building's overall aesthetic.

Building the modern world today, and the new spaces to be used in many projects of the day, is a high priority. The building's design is a prime example of modernist architecture, with its emphasis on functionality and the use of materials like concrete and steel.

Centraal Beheer, wiederbesucht

Herman Hertzbergers 1972 fertiggestellter Sitz der niederländischen Versicherung in Apeldoorn ist ein Hauptwerk des Strukturalismus. Seit fast zwei Jahren steht es leer – obwohl gut erhalten und mit offensichtlichem Potenzial. Eigens für unseren Beitrag wurde das Gebäude von Christian Richters neu fotografiert

Text: Marika Böhnick | Foto: Christian Richters



INTO THE VOID

Creative architecture uses internal spaces to foster interaction and communication, says Rob Gregory of the Architectural Review

Branswick Arts works with leading architecture and design practices around the world

Buildings have a profound effect on our behavior and the way we interact with other people. As we stand with our neighbors over a common garden fence in the town and behavior of the houses, do we engage in the off-stage public performance, seeing and being seen? This interaction leads us to what it is most important in the context of the workplace, where we spend most of our waking hours. Having a more direct, comfortable chair, and a decent view makes a difference in many obvious and subtle ways.

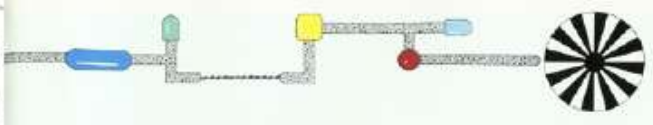
From the Man in the Grey Fleece Suit and Nicolas Telli Pier from in the 1950s and 1960s (see page 10), to the more and more open in the 1980s, practices of building, history and working environments that allowed with us over the years. But attention to workplace design have evolved considerably. Only more engineering concerns with the importance of design in terms of encouraging interaction between individuals and between departments. Of particular interest are efforts to reorganize the workplace that focus on how the space is used, rather than how it is designed for the product of business.

The current RIBA Road Guide (see page 10) and 1970s, when the idea of non-functional spaces which do have great opportunity to create and sustain. And this is typical of many of the world's best architects, who seek to exceed their clients' expectations by probing spaces and places that go beyond the original brief.

David's one person managers sometimes take a narrow view of architecture's role, seeing it primarily as one of measuring and calculating ways to achieve one of the building's goals. This is a safe starting point, necessary in those days of Pugin's, but an alternative model of practice here will not produce the best results. Architects produce their best work when they are creative, artistic, and thinking laterally. Having the look of our photographs through new eyes. The intriguing magic of a place often lies in the spaces in between the technical details. Just as our most potent, aesthetic, and inspiring moments are not in the details, it is the spaces, corridors, and unexpected spaces in buildings that connect the elements with the building's purpose and with each other. It is essential, therefore, that the designers and producers of our buildings (both private and public) recognize the potential of "the spaces in between."

A building that led the way was Norman Hertzberger's Centraal Beheer headquarters in the Dutch city of Apeldoorn. Here, Hertzberger translated the functionalist dogma to best use of space to create a space that was the opposite of the building's New-

HERMAN HERTZBERGER



Centraal Beheer di Apeldoorn: in ufficio come in casa

Apeldoorn è una tranquilla cittadina, a ca. 100 km est di Amsterdam, nel cuore di una distesa di pianure...



Although often cited as a classic example of well designed office space, both architecturally and functionally, Central Beheer is known by most designers today through photographs taken when it was completed in 1972.

CENTRAAL BEHEER: THROUGH THE MYTHS OF TIME

In 1972, the Dutch cooperative housing group Centraal Beheer moved its headquarters to Apeldoorn, 90 kilometers from Amsterdam, to an urban fringe building designed by architect Herman Hertzberger.

As with most of Hertzberger's public buildings, there were to be no walls and no roof. A multitude of windows would connect the individual housing to its purpose - a mix of residential and office space with all facilities, not just work, but also living, shopping, and socializing.

Bauwelt 5.2015

Der Großraum kann ganz anders sein. Peter W. Tügel. Gebäudeform und Central Beheer in Apeldoorn...

BÜROHAUS APELDOORN

Der Großraum kann ganz anders sein. Peter W. Tügel. Gebäudeform und Central Beheer in Apeldoorn...

Der Großraum kann ganz anders sein

Der Großraum kann ganz anders sein. Peter W. Tügel. Gebäudeform und Central Beheer in Apeldoorn...



Um 1970

entstandene Bauten sind heute Sanierungsfälle



entstandene Bauten sind heute Sanierungsfälle. Text describing the building's history and current status.



Bildbericht Michael Engler. Text describing the building's history and current status.

THE WORKPLACE. Herman Hertzberger has always been concerned with the way the people relate to one another, and this was the prime issue in his design for the Central Beheer housing office in Apeldoorn in Holland which employs around a thousand people.



Sostenibilità

Un riferimento significativo nell'ambito della sostenibilità è rappresentato dalla ricerca condotta da Philippe Block presso l'ETH di Zurigo, dove la sostenibilità del progetto è strettamente connessa alla forma e al comportamento strutturale delle geometrie architettoniche. Sfruttando capacità dei materiali di lavorare a compressione, il Block Research Group sviluppa sistemi costruttivi che riducono significativamente l'impiego di materiale, limitano l'uso di tiranti in acciaio e favoriscono la reversibilità del sistema, consentendo il riutilizzo completo dei componenti.

L'approccio si basa su strutture discrete in cui ogni elemento lavora esclusivamente a compressione, interagendo con gli altri attraverso la propria geometria e posizione reciproca. Tali strutture, prive di leganti permanenti, possono essere smontate e rimontate senza perdita di materiale, rappresentando un modello avanzato di sostenibilità architettonica. L'ottimizzazione del flusso delle forze permette inoltre di ridurre lo spessore degli elementi, diminuendo ulteriormente l'impiego di risorse (Block Research Group, n.d.).

Un esempio emblematico di questo approccio è il progetto Armadillo Vault, una volta autoportante a doppia curvatura realizzata per la Biennale di Venezia del 2016. La struttura è composta da 399 blocchi di calcare, con spessori variabili tra i 5 e i 12 cm, e copre una superficie di 75 m². La stabilità è garantita unicamente dalla geometria della forma che consente all'intera struttura di lavorare in pura compressione, senza l'uso di malta o altri leganti (Rippmann et al., 2016).

La forma della volta è ottenuta attraverso l'uso di algoritmi computazionali, che permettono di ottimizzare la distribuzione delle forze e definire la forma più efficiente. Il processo progettuale si articola in più fasi: si parte dalla definizione di una superficie di spinta tramite form finding, che identifica il nucleo resistente della sezione trasversale; da questa superficie vengono poi generati estradosso e intradosso come offset superiori e inferiori (Rippmann et al., 2016).

Questo approccio è particolarmente rilevante per il presente lavoro, che si interessa alla possibilità di riuso integrale dei materiali e all'impiego di strategie geometriche capaci di ridurre al minimo gli sprechi.

Fig. 36 - Phoenix. Block Research Group (2023)

Ponte pedonale permanente in muratura non armata realizzato tramite stampa 3D. La struttura, discretizzata e progettata per lavorare esclusivamente a compressione, consente il riutilizzo e il riciclo dei materiali impiegati, riducendo al minimo l'impiego di carpenteria tradizionale

Fig. 37 - Armadillo-vault, Block Research Group (2016)



Tettonica

La tettonica può essere intesa come il dominio in cui si articolano le relazioni tra forma, struttura e logiche costruttive. In questa prospettiva, la forma non precede la costruzione, ma emerge come esito di un processo dinamico e iterativo, fondato sull'assemblaggio di parti secondo regole semplici e ripetibili. Ne deriva una condizione in cui l'organizzazione morfologica è inseparabile dalla logica costruttiva e funzionale del sistema.

Lars Spuybroek descrive la tettonica come “un uso estetico, e non poetico, della struttura”, una materialità che informa tanto l'organizzazione delle cose quanto la loro struttura fisica (Spuybroek, 2008). In questa visione, la tettonica non è la subordinazione della forma alla struttura, ma un'articolazione sensibile che mette in relazione massing, struttura e texture attraverso le scale dell'edificio. La struttura non è astratta o geometrica: è materiale, articolata, ritmica, e genera continuità tra costruzione ed esperienza percettiva. Spuybroek parla infatti di *tectonics as continuity*, una concezione in cui esperienza ed articolazione tettonica coincidono, dando forma a un'estetica immanente, radicata nel corpo e nei materiali.

Nel capitolo “Experience, Tectonics and Continuity”, Spuybroek propone una lettura materialista ed esperienziale della tettonica, dove la struttura non è più solo supporto funzionale, ma una modalità sensibile di organizzazione dello spazio. La tettonica diventa il mezzo attraverso cui l'architettura si relaziona alla percezione corporea, in un legame profondo tra forma costruita e azione vissuta. Come afferma l'autore, “l'esperienza conta come forma principale di coinvolgimento, e la tettonica come principale forma di articolazione”. La percezione, lungi dall'essere passiva o separata dalla materia, è un'attività incorporata, un agire che costruisce e comprende il mondo attraverso il corpo. Spuybroek, seguendo la filosofia di Alva Noë, sostiene che non c'è percezione senza azione, e non c'è azione senza percezione: percepire è costruire, è assemblare.

L'architettura, in questo quadro, non rappresenta un'idea astratta, ma è organizzazione concreta del costruito: ciò che conta non è tanto l'oggetto architettonico in sé, quanto il modo in cui le sue articolazioni generano esperienze. Spuybroek propone una rilettura dei principi vitruviani — *utilitas*, *firmitas*, *venustas* — attraverso le categorie fisiche di massa, struttura e texture. La tettonica opera in tutte queste scale, generando una continuità che connette struttura, sensazione e azione, e supera la storica separazione tra geometria astratta e bellezza ornamentale.

Ne deriva un'architettura della continuità, intesa come architettura

dell'articolazione, in cui empatia e costruzione coincidono e in cui le parti non sono subordinate a un intero prestabilito, ma danno forma all'intero attraverso processi di aggregazione e variazione. La tettonica si configura quindi come una condizione configurativa, ritmica e relazionale.

In opposizione a un approccio deterministico e gerarchico, in cui l'intero precede le parti e la struttura è subordinata a un disegno unitario, la tettonica propone una logica generativa, in cui le parti esistono indipendentemente e l'intero emerge dalla loro interazione. Questo approccio trova una chiara espressione nell'architettura discreta, che rifiuta l'idea di un edificio come entità monolitica e valorizza la ripetizione, la variazione e l'aggregazione sistemica di componenti autonomi.

Un esempio significativo è il progetto per la sala concerti di Norimberga di Gilles Retsin (2018), sviluppato con Stephan Markus Albrecht. La proposta estende il concetto di architettura discreta al CLT (Cross-Laminated Timber), impiegando pannelli fresati a CNC per costituire grandi moduli cavi standardizzati, al cui interno sono integrati impianti e servizi tecnici (Retsin, 2020, 2022). L'edificio si configura come uno spazio monolitico solo in apparenza: è in realtà composto da parti ripetibili, assemblabili in configurazioni variabili, dove le categorie tradizionali di parete, trave e solaio si dissolvono in una logica costruttiva unificata e generativa. Le parti non sono concepite per una funzione prestabilita, né progettate per massimizzare prestazioni specifiche: sono elementi generici, la cui funzione emerge dalla combinazione e dall'interazione (Retsin, 2020, 2022).

Come affermato in *Discrete Timber Architecture* (Retsin, 2022), il calcolo viene impiegato per assemblare digitalmente singole parti e analizzare le configurazioni risultanti, secondo un processo basato su regole di aggregazione definite come una grammatica. In questo contesto, l'architettura non è più un'entità unificata generata da un disegno complessivo, ma un insieme potenzialmente infinito di combinazioni tra elementi autonomi. Le parti esistono indipendentemente da un progetto finale e dovrebbero essere in grado di produrre una varietà complessa di risultati, sempre ricostruibili e riconfigurabili. La tettonica, in questa accezione, non rappresenta un principio formale, ma una condizione costruttiva e relazionale, in cui le parti generano l'intero attraverso processi iterativi, e la forma e la struttura non sono mai predefinite, ma emergono dinamicamente (Gilles Retsin, 2022).

Il processo costruttivo inizia con l'utilizzo di legno reperito localmente, trasformato in pannelli prefabbricati tramite macchine CNC e robot industriali. I pannelli vengono successivamente preassemblati in

blocchi e trasportati in sito per il montaggio finale. Questo metodo, basato su elementi standardizzati, consente di ridurre costi, tempi e il numero di macchinari necessari (Retsin, 2022).

Questo approccio definisce un sistema aperto, in cui la forma architettonica è successiva al processo di costruzione, e il progetto non è la rappresentazione di un intero, ma la codifica di regole locali che permettono la crescita, l'adattabilità e il riuso. Le tecniche digitali, come il taglio CNC e la robotica, non servono qui a produrre forme uniche, ma a abilitare la ripetizione intelligente di componenti che possano essere smontati, riconfigurati e reimpiegati. La tettonica, in questo senso, non è solo espressione materica, ma condizione generativa e relazionale: un sistema in cui geometria, struttura, costruzione e percezione sono indissolubilmente connesse.

In questo quadro, la tettonica si configura non solo come criterio estetico o costruttivo, ma come principio operativo e progettuale, capace di guidare l'assemblaggio di componenti discreti e favorire una forma aperta, adattabile e riconfigurabile nel tempo.

“La tettonica consiste di una materialità che informa tanto l'organizzazione delle cose quanto la loro struttura fisica, [...] un uso estetico, e non poetico, della struttura”

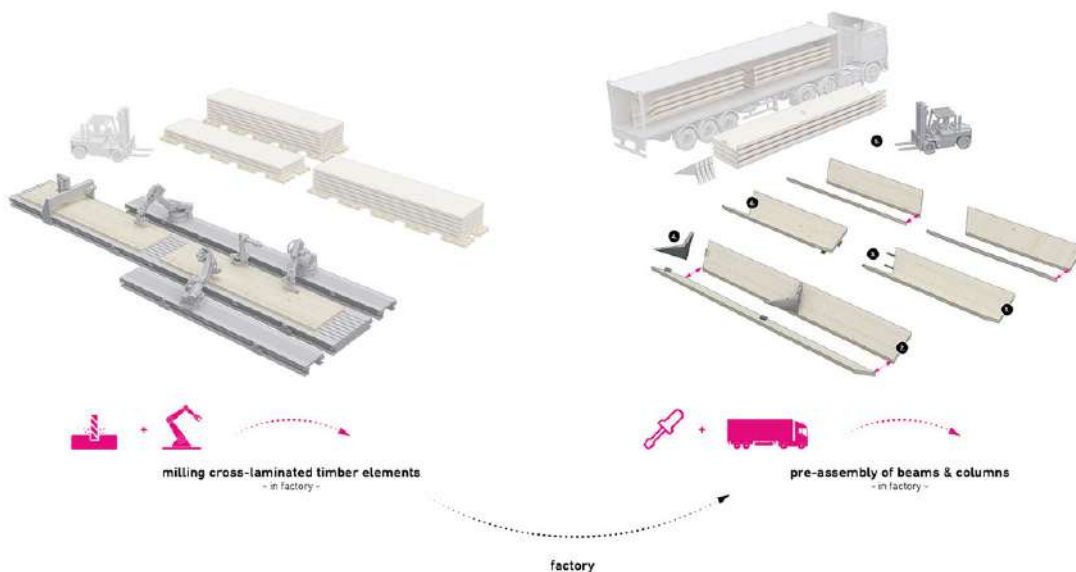
(Spuybroek, 2008)

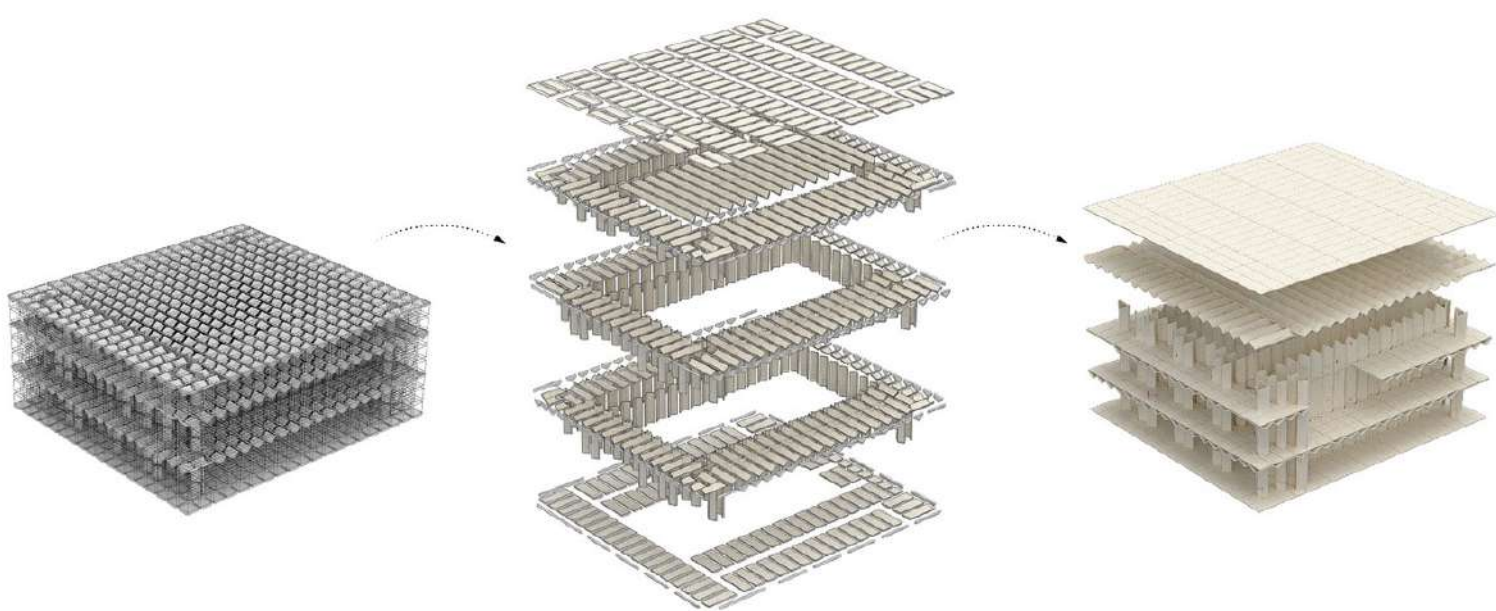
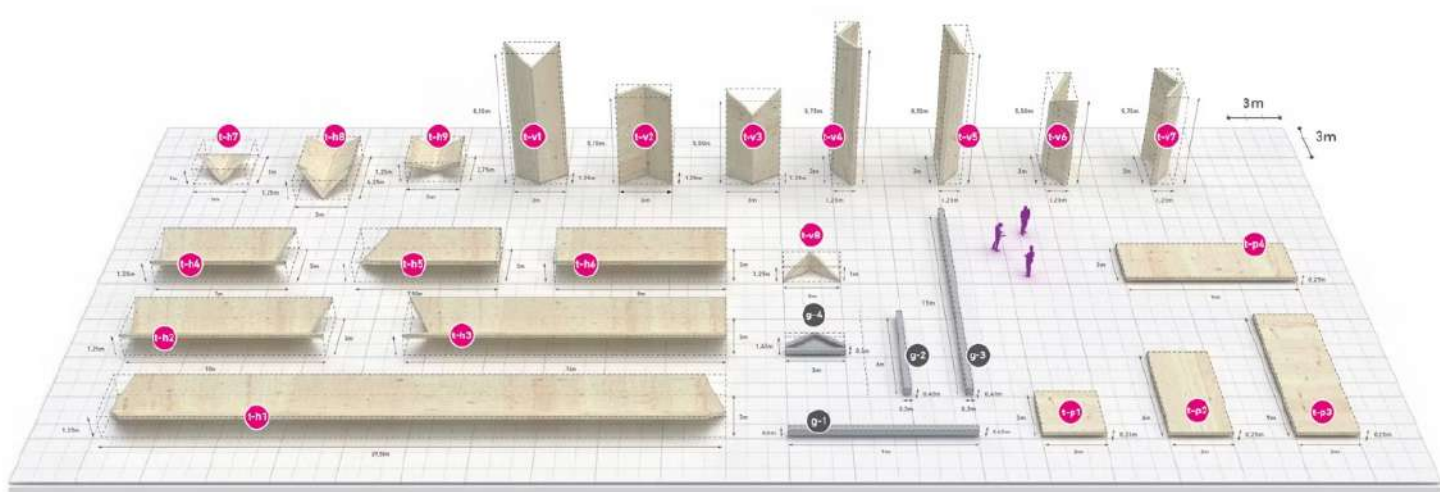
Fig. 38 - Concert Hall Norimberga, Gilles Retsin (2019)
Processo costruttivo

Fig. 39 - Concert Hall Norimberga, Gilles Retsin (2019)
Vista frontale

Fig. 40 - Concert Hall Norimberga, Gilles Retsin (2019)
Elementi del progetto

Fig. 41 - Concert Hall Norimberga, Gilles Retsin (2019)
Voxel elements
physical sheets
I-shaped modules





computational | voxel elements

tectonic | physical sheets

assembled | l-shaped modules

6. DESIGN PROCESS

Assembler

Nel contesto di questa tesi, il concetto di assemblaggio è inteso come una rete socio spaziale in cui identità, funzioni e qualità emergono dalle relazioni reciproche tra le parti, piuttosto che essere determinate a priori. Le proprietà dell'insieme non sono riducibili alla semplice somma dei suoi componenti, ma derivano dai flussi, dalle connessioni e dalle interazioni che si instaurano tra elementi materiali e immateriali, tra configurazioni spaziali e processi di territorializzazione e deterritorializzazione.

Applicare il pensiero dell'assemblaggio al progetto architettonico significa spostare l'attenzione dall'oggetto finito alle relazioni che ne rendono possibile l'emergenza, concentrandosi sulla connettività, sui gradienti e sui flussi piuttosto che sulla forma come esito statico. In questa prospettiva, il progetto non è concepito come un tutto chiuso e definito dall'esterno, ma come una molteplicità aperta, che si costruisce progressivamente e mantiene una relativa autonomia rispetto all'osservatore.

Gli assemblaggi architettonici consentono la generazione di spazi eterogenei e differenziati, in cui la diversità non è ottenuta tramite eccezioni o operazioni di collage, ma emerge dalle relazioni locali tra parti ripetibili. La coerenza complessiva dell'insieme non elimina la discontinuità, ma la rende operativa, permettendo variazioni di

organizzazione, densità e qualità spaziale a più scale. In questo senso, la teoria dell'assemblaggio fornisce un quadro concettuale adeguato ad affrontare la complessità delle relazioni parte tutto, mentre il design combinatorio rappresenta uno strumento operativo per tradurre tali principi in un processo progettuale.

Assembler come strumento computazionale

Nei capitoli precedenti è stato introdotto Assembler (Co-de-iT) come strumento computazionale. In questa sezione se ne descrive l'utilizzo operativo all'interno del processo di progetto.

Assembler è uno strumento computazionale per la progettazione di assemblaggi architettonici, basato su processi di crescita combinatoria automatizzata. Il sistema genera configurazioni spaziali attraverso l'aggiunta iterativa di parti duplicate, selezionate da un insieme limitato di componenti di base. La complessità non è quindi affidata alla varietà formale degli elementi, ma all'organizzazione e alle modalità di connessione tra parti ripetibili.

In Assembler, le parti sono trattate come oggetti di calcolo che incorporano sia informazioni geometriche sia dati relativi alla connettività. Il processo di crescita è governato da criteri deterministici basati su regole, in cui le parti stesse, intese come entità computazionali, partecipano attivamente alle operazioni che determinano l'evoluzione dell'assemblaggio a ogni iterazione (Erioli, 2025).

L'utente mantiene un ruolo centrale nel definire l'intenzionalità progettuale: controlla la geometria e la logica di connessione delle parti, imposta le euristiche del sistema e progetta le informazioni ambientali che influenzano la crescita. Allo stesso tempo, informazioni geometriche, topologiche e numeriche restano accessibili in ogni fase del processo, rendendo possibile l'integrazione con ulteriori analisi o strumenti computazionali (Erioli, 2025).

Logica di funzionamento e crescita iterativa

Il funzionamento di Assembler può essere interpretato come una simulazione iterativa che opera come un singolo agente. A ogni iterazione, il sistema risponde alla domanda fondamentale: dove aggiungere il prossimo componente? Tale interrogativo implica una serie di decisioni operative, tra cui l'individuazione di un punto dell'assemblaggio in cui intervenire, la selezione del tipo di oggetto da aggiungere e la determinazione del suo orientamento (Erioli, 2025).

A partire da uno o più oggetti iniziali, la logica di assemblaggio viene

applicata iterativamente, facendo crescere l'insieme un elemento alla volta fino al raggiungimento di una condizione di arresto definita dall'utente. La complessità del processo risiede principalmente nella definizione delle modalità di connessione tra gli oggetti e nei criteri adottati per orientare le scelte a ogni passo.

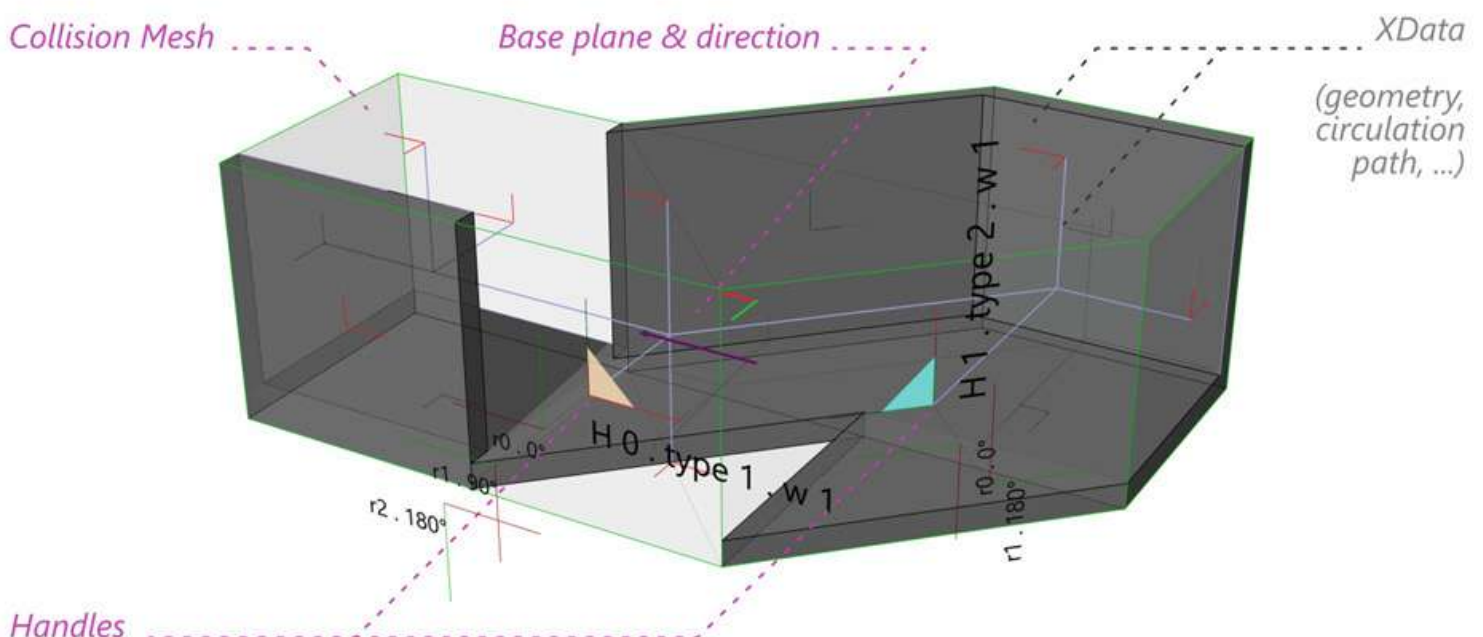
Assembly Objects e sistema di connessioni

Gli elementi fondamentali del sistema sono gli Assembly Objects (AO), che rappresentano modelli di parti ripetibili. Un assemblaggio utilizza uno o più AO unici, definiti come "tipi", e ne istanzia una copia a ogni iterazione del processo.

Ogni AO è caratterizzato da un insieme di dati essenziali: un nome identificativo, una collision mesh che rappresenta lo spazio inviolabile, comprensivo sia di pieni sia di vuoti, un piano di riferimento, un vettore direzione, un insieme di handle e un valore di peso. I handle sono piani di allineamento che funzionano come un sistema spina presa e definiscono le possibilità di connessione tra gli oggetti.

Nel momento in cui viene stabilita una connessione, l'AO già presente nell'assemblaggio assume il ruolo di ricevente, mentre l'AO aggiunto diventa il mittente. Durante il processo, per ogni AO aggiunto viene calcolato un valore associato al ricevente, che contribuisce a orientare le decisioni successive (Erioli, 2025).

Fig. 42 - Esempio di Assembly Object



Regole, criteri ed euristiche

Le possibilità di connessione tra gli AO sono definite da un insieme di regole, che delimitano lo spazio d'azione del sistema. Le regole possono essere organizzate in insiemi, filtrate e ordinate, e applicate selettivamente in base a indici globali o distribuiti nello spazio.

Accanto alle regole, Assembler utilizza criteri di selezione che funzionano come politiche decisionali a ogni iterazione. I criteri possono operare sia sulla scelta dell'AO ricevente sia sulla selezione della regola da applicare, e si basano sul confronto di valori derivanti dagli AO stessi e dai dati ambientali. Tra i criteri più significativi rientrano selezioni casuali, utilizzate principalmente a scopo esplorativo, confronti con campi scalari o vettoriali e processi di scelta pesata (Erioli, 2025).

I pesi associati a regole, AO e handle permettono di modulare ulteriormente il processo decisionale, introducendo una gerarchia di preferenze che orienta la crescita dell'assemblaggio senza determinarla in modo rigido.

Dati ambientali e campi

Il sistema può essere influenzato da dati esogeni che rappresentano l'ambiente in cui l'assemblaggio cresce. Le geometrie ambientali, definite come mesh chiuse, possono agire come contenitori, solidi o vuoti, limitando o indirizzando l'espansione attraverso controlli di collisione o di inclusione.

Un ruolo centrale è svolto dai campi, spazi tridimensionali discretizzati in voxel che contengono dati scalari, vettoriali o valori interi. I campi generano segnali distribuiti nello spazio che influenzano la posizione, l'orientamento e il tipo di AO selezionato a ogni iterazione. In questo modo, la crescita dell'assemblaggio risponde a condizioni locali, mantenendo una relazione continua con il contesto informativo in cui è immersa (Erioli, 2025).

Sequenza operativa

La logica operativa del motore di Assembler si articola in una sequenza ricorrente di quattro fasi: selezione di un ricevente idoneo, generazione e orientamento dei possibili mittenti secondo le regole applicabili, verifica della coerenza geometrica rispetto all'assemblaggio esistente e all'ambiente, selezione finale del mittente e aggiornamento dello stato complessivo dell'assemblaggio (Erioli, 2025).

XData e post processing

Al termine del processo di assemblaggio è possibile associare agli AO dei dati estesi (XData). Questi dati, che possono essere di natura geometrica, numerica o testuale, non sono applicati automaticamente a tutte le istanze, ma possono essere assegnati in modo condizionale in base a criteri definiti dall'utente, come la posizione, l'orientamento o lo stato di connettività dell'AO (Erioli, 2025).

Fig. 43 - Esempio di setup geometrie ambientali e campi

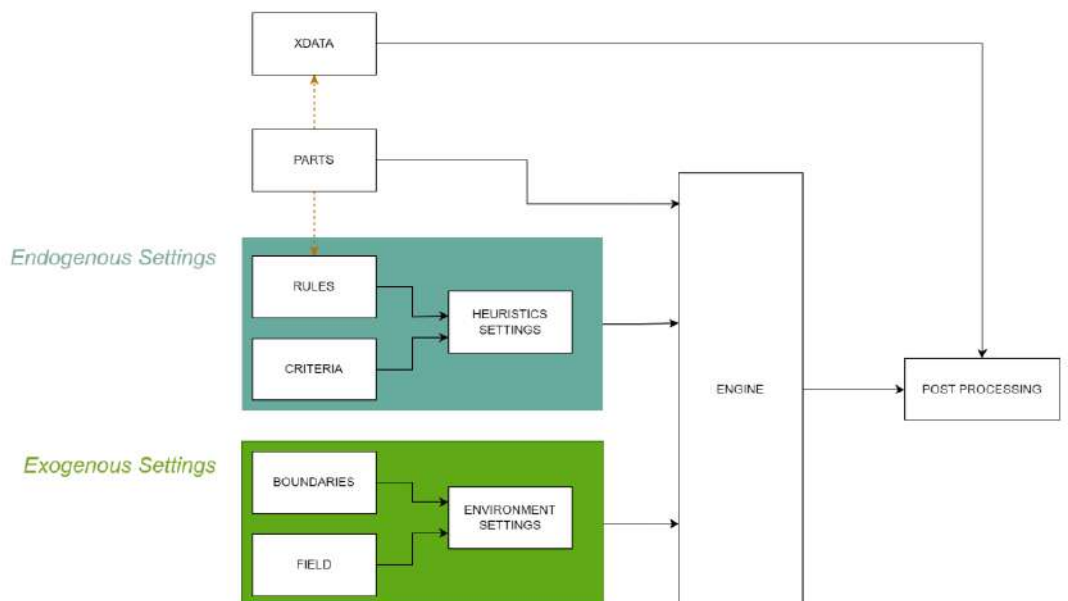
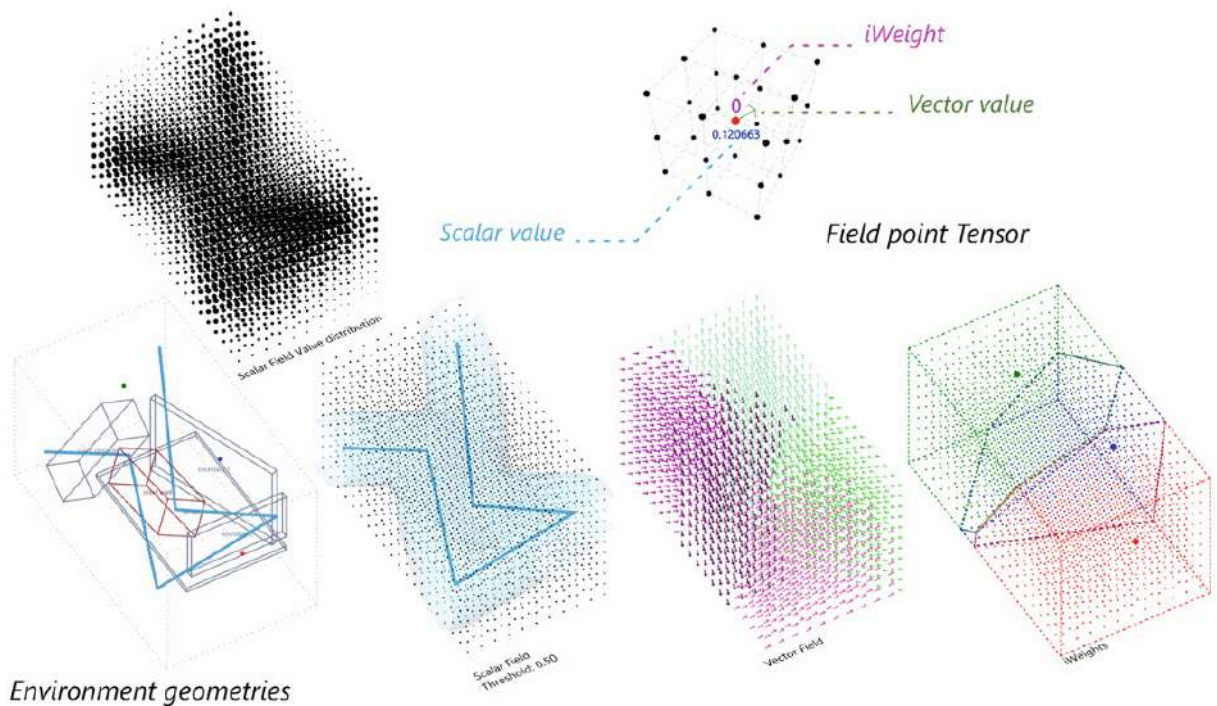


Fig. 44 - Struttura di base di una configurazione tipica di Assembler

Sperimentazioni preliminari di assemblaggio

Le prime fasi del progetto hanno seguito un percorso di sperimentazioni di assemblaggio, accompagnate da un progressivo approfondimento dei dettagli emersi e dalla scelta di un dettaglio guida per gli sviluppi successivi. Il lavoro prende avvio da uno studio preliminare sul dettaglio costruttivo in legno, inteso non come elemento secondario, ma come principio generativo del processo progettuale. In questa fase, l'attenzione si è concentrata su sistemi modulari, a secco e reversibili.

Tra i progetti analizzati, un ruolo centrale è svolto dal GC Prostho Museum Research Center di Kengo Kuma (2010). Il progetto si fonda su un sistema strutturale composto da elementi lignei di piccola sezione (6 × 6 cm), assemblati secondo un principio di incastro ripetuto, ispirato a un tradizionale giocattolo in legno della regione di Hida Takayama. L'assenza di colle o fissaggi permanenti evidenzia un approccio basato esclusivamente su geometria e modularità. La griglia lignea non assolve solo a una funzione strutturale, ma definisce anche lo spazio espositivo, dimostrando come un sistema semplice, regolato da principi locali, possa generare una struttura complessa e multifunzionale (GC Prostho Museum Research Center, 2010).

Un ulteriore riferimento è l'Odunpazari Modern Art Museum di Kengo Kuma. Il museo è costituito da volumi elementari sovrapposti, ottenuti dalla ripetizione e dallo slittamento di unità lignee simili. La variazione spaziale nasce dalla combinazione dei componenti, più che dalla forma complessiva, creando continuità con il contesto urbano circostante (Odunpazari Modern Museum, 2019).

A questi riferimenti si affiancano i progetti di Gilles Retsin, in particolare la concert hall – già analizzata nei capitoli precedenti – e il Padiglione di Tallinn (2020). Quest'ultimo è costituito da blocchi modulari assemblabili, concepiti come un sistema aperto e riconfigurabile. Ogni blocco è realizzato con fogli di compensato locali, tagliati tramite macchina CNC e assemblati a secco con bulloni. Il padiglione, con una superficie di circa 75 m², è stato montato in quattro giorni da quattro persone, senza mezzi meccanici (Retsin, 2020). Il progetto dimostra come un materiale inizialmente sottile e strutturalmente debole possa essere trasformato, attraverso un workflow digitale integrato, in un sistema costruttivo efficiente, performante e adattabile, capace di estendersi e di essere riutilizzato in contesti differenti. Questo approccio evidenzia la possibilità di applicare lo stesso metodo a sistemi più complessi e a scala architettonica utilizzando materiali lignei ingegnerizzati come il CLT (Retsin, 2020).

Fig. 45 - Museum Research Center, Kengo Kuma (2010)
Vista interni

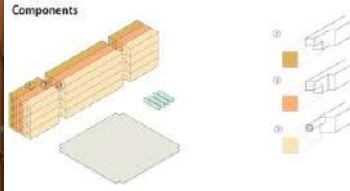
Fig. 46 - Museum Research Center, Kengo Kuma (2010)
Sistema di incastro

Fig. 47 - Museum Research Center, Kengo Kuma (2010)
Pattern generato dalla ripetizione del dettaglio

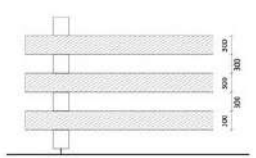
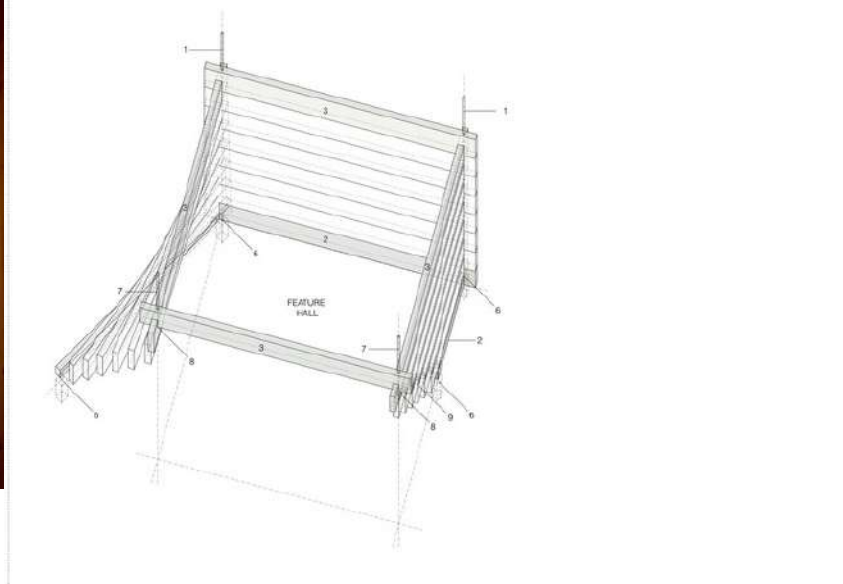
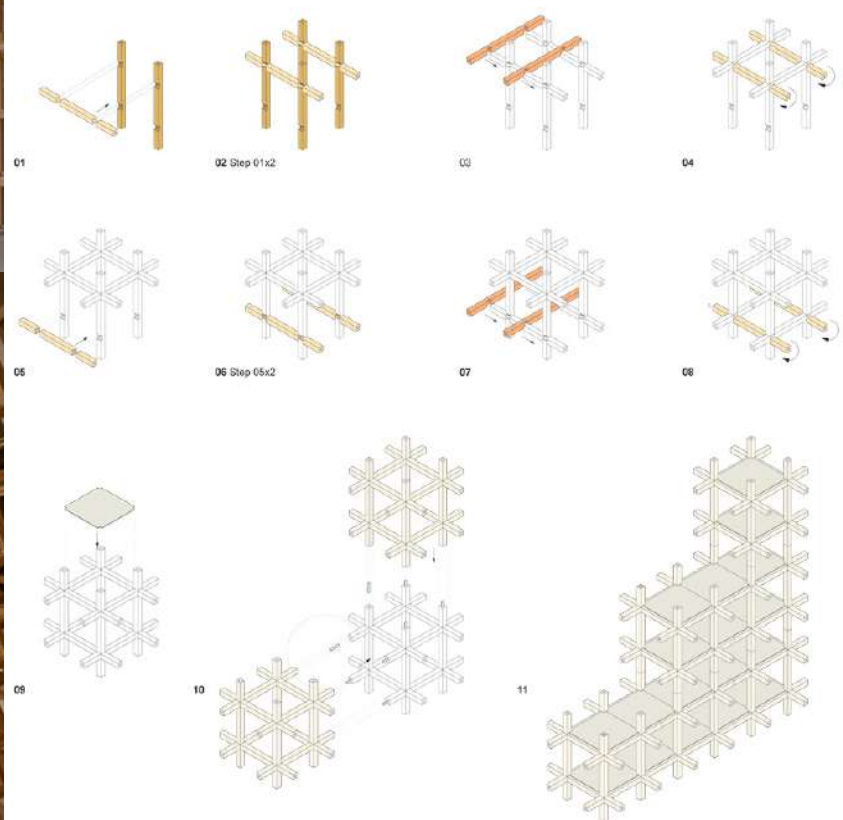
Fig. 48 - Odunpazari Modern Art Museum, Kengo Kuma (2019)
Vista interni

Fig. 49 - Odunpazari Modern Art Museum, Kengo Kuma (2019)
Dettagli di progetto

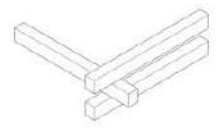
Fig. 50 - Odunpazari Modern Art Museum, Kengo Kuma (2019)
Dettagli di progetto



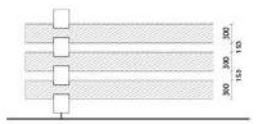
Assembly Sequence



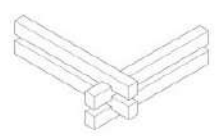
TYPE 1: Full 300mm GAP



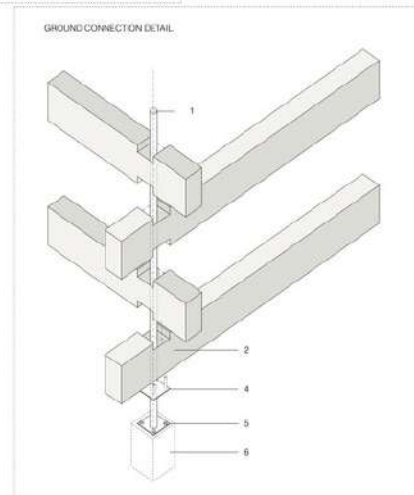
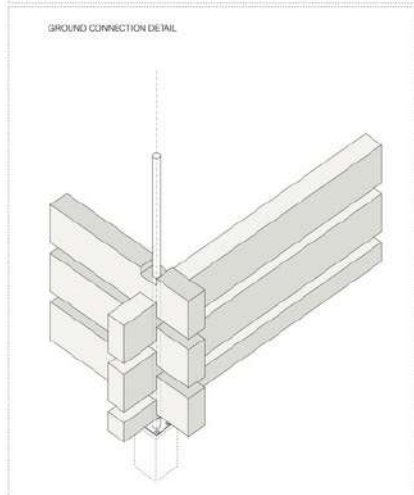
Full 300x200mm Engineered timber section w/c notches



TYPE 2: HALF 150mm GAP



Full 300x200mm Engineered timber section w/notches



Parallelamente, il progetto ha incluso una valutazione critica del materiale, considerato fin dalle prime fasi come parte attiva del sistema costruttivo. La ricerca si è concentrata sullo sviluppo di dettagli ottenuti per addizione, garantendo reversibilità, prefabbricabilità ed efficienza nell'uso delle risorse. La scelta del materiale è stata determinante, portando al confronto tra legno massiccio tradizionale e CLT. Il legno massiccio è meno versatile nelle direzioni trasversali e meno stabile in elementi lunghi e snelli, mentre il CLT distribuisce meglio le sollecitazioni in più direzioni, permettendo configurazioni spaziali complesse. Il CLT offre vantaggi produttivi e costruttivi: qualità controllata, stabilità dimensionale, realizzazione di elementi di grandi dimensioni e lavorazione CNC per dettagli precisi e riduzione degli scarti. Questi aspetti orientano il progetto verso un sistema modulare e assemblabile. La progettazione modulare e ripetitiva, con dettagli prefabbricati, assemblabili a secco e smontabili, consente anche riuso e riconfigurazione a fine vita.

In parallelo, è stata condotta una valutazione preliminare delle proprietà di un elemento di CLT variando le dimensioni di un parallelepipedo. Sono state analizzate 20 configurazioni scelte casualmente all'interno di un determinato intervallo, sia per elementi pieni sia cavi, permettendo un confronto diretto. L'analisi considera una lunghezza unitaria dell'elemento, così da rendere confrontabili i risultati. Dallo studio emerge che per altezze medie e grandi ($\geq 0,3-0,4$ m) la cavità interna offre vantaggi significativi in termini di momento d'inerzia relativo (I/V), mentre per altezze molto basse (circa 0,2 m) il vantaggio derivante dalla cavità è marginale o assente. L'uso di volumi pieni nel progetto finale risulta quindi giustificato quando gli elementi sono molto bassi o quando si desidera evitare complicazioni costruttive legate all'assemblaggio a secco di elementi cavi. In questa fase iniziale, il lavoro proseguirà utilizzando elementi pieni; l'opzione di volumi cavi sarà eventualmente valutata solo in prove più avanzate, dedicate a elementi con altezze superiori a 0,3 m.

Questi studi hanno portato alle prime sperimentazioni progettuali con lo strumento Assembler. Le prove iniziali hanno utilizzato assemblaggi di parti semplici, ripetute secondo regole variabili, esplorando diverse configurazioni volumetriche e relazioni tra gli elementi. Le soluzioni iniziali (Fig. 59) sono state sviluppate e approfondite (Fig. 60), concentrandosi sui dettagli architettonici emergenti. Alcuni dettagli sono stati selezionati e ricostruiti manualmente, diventando punto di partenza per nuovi cicli di assemblaggio e ulteriori variazioni delle regole (Fig. 61). Questo processo ha permesso di osservare configurazioni non prevedibili a partire dalla ripetizione di un singolo elemento semplice. Le sperimentazioni di questa fase hanno posto le basi per gli sviluppi successivi, orientando scelte formali, costruttive e strutturali.

Fig. 51 - Tabella valori caso parallelepipedo pieno

Fig. 52 - Grafico valori caso parallelepipedo pieno: rapporto tra $V_{\text{pieno}}/V_{\text{cavo}}$, Volume, I/V

Fig. 53 - Grafico valori caso parallelepipedo pieno: Massa e I/V

Fig. 54 - Tabella valori caso parallelepipedo cavo

Fig. 55 - Grafico valori caso parallelepipedo cavo: rapporto tra $V_{\text{pieno}}/V_{\text{cavo}}$, Volume, I/V

Fig. 56 - Grafico valori caso parallelepipedo cavo: Massa e I/V

Fig. 57 - Grafico altezza

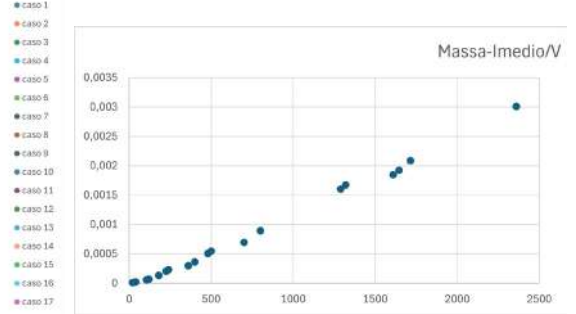
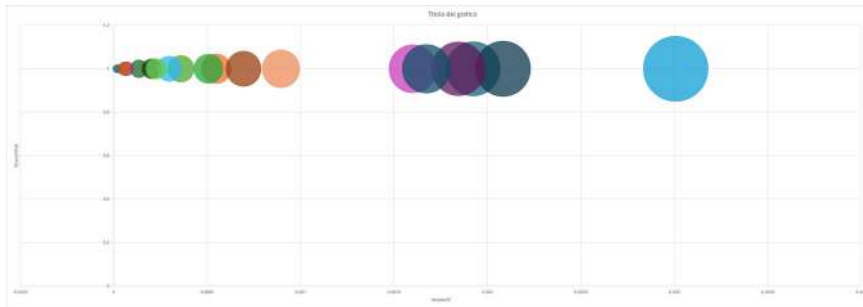
Fig. 58 - Grafico confronto caso parallelepipedo pieno e vuoto valutato su I/V

Fig. 59 - Prove di assemblaggio

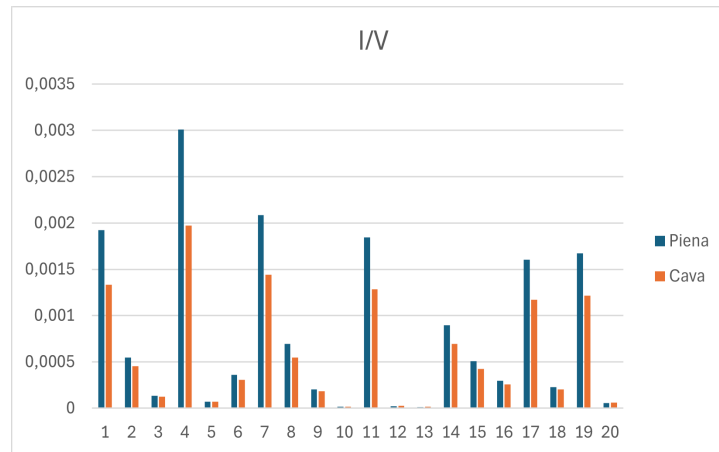
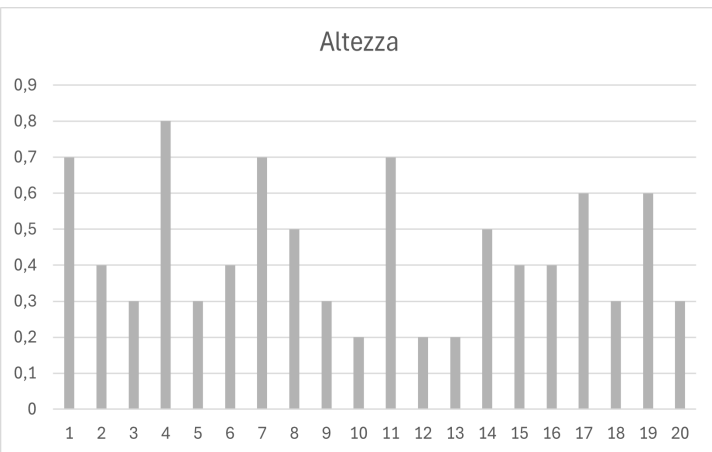
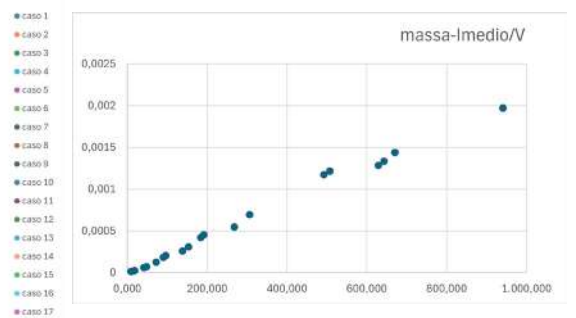
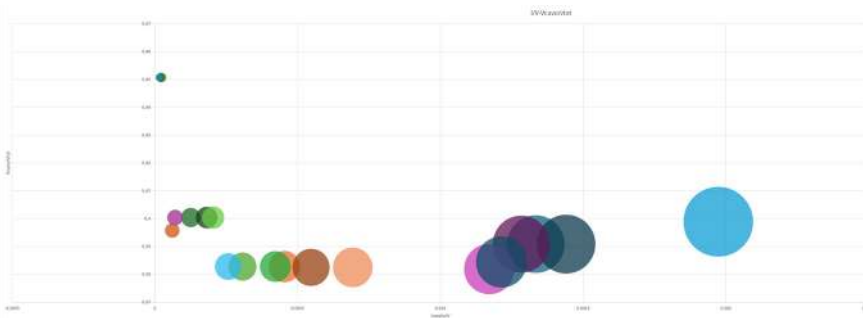
Fig. 60 - Prove di assemblaggio e selezione del dettaglio

Fig. 61 - Prove di assemblaggio e ricostruzione del dettaglio

1	Lunghezza	altezza	larghezza	spessore	volume	Vcavo/Vtot	massa (500kgm3)	ly	lx	Media lty	I/V Efficienza struttura	n componenti diversi	
caso 1	1	0,7	4,7		3,29		1	1645	6,191	0,134	3	0,001923	1
caso 2	1	0,4	2,5		1		1	500	0,534	0,013	0,27375	0,000548	1
caso 3	1	0,3	1,2		0,36		1	180	0,046	0,003	0,0243	0,000135	1
caso 4	1	0,8	5,9		4,72		1	2360	13,944	0,252	7	0,003007	1
caso 5	1	0,3	0,8		0,24		1	120	0,015	0,002	0,0082	0,000068	1
caso 6	1	0,4	2		0,8		1	400	0,277	0,011	0,144	0,00036	1
caso 7	1	0,7	4,9		3,43		1	1715	7,003	0,140	4	0,002083	1
caso 8	1	0,5	2,8		1,4		1	700	0,944	0,029	4,866	0,000695	1
caso 9	1	0,3	1,5		0,45		1	225	0,088	0,003	0,045563	0,000203	1
caso 10	1	0,2	0,3		0,06		1	30	0,001	0,000	0,000425	0,000014	1
caso 11	1	0,7	4,6		3,22		1	1610	5,809	0,131	3	0,001845	1
caso 12	1	0,2	0,4		0,08		1	40	0,001	0,000	0,0008	0,00002	1
caso 13	1	0,2	0,2		0,04		1	20	0,000	0,000	0,0002	1,00E-05	1
caso 14	1	0,5	3,2		1,6		1	800	1,399	0,033	0,716	0,000895	1
caso 15	1	0,4	2,4		0,96		1	480	0,474	0,013	0,2432	0,000507	1
caso 16	1	0,4	1,8		0,72		1	360	0,204	0,010	0,1068	0,000297	1
caso 17	1	0,6	4,3		2,58		1	1290	4,053	0,077	2	0,001601	1
caso 18	1	0,3	1,6		0,48		1	240	0,106	0,004	0,0548	0,000228	1
caso 19	1	0,6	4,4		2,64		1	1320	4,338	0,079	2	0,001673	1
caso 20	1	0,3	0,7		0,21		1	105	0,010	0,002	0,005863	0,000056	1



1 cava	Lunghezza	altezza	larghezza	spessore	volume	Vcavo/Vtot	massa (500kgm3)	ly	lx	Media lty	I/V Efficienza struttura	n componenti diversi	
caso 1	1	0,7	4,7	0,06	1,286		0,390859	642,962	6	0,134342	0,8579	0,001334	2
caso 2	1	0,4	2,5	0,06	0,383		0,382792	191,366	0,534167	0,013333	0,0869	0,000454	2
caso 3	1	0,3	1,2	0,05	0,144		0,400392	72,071	0,0459	0,0027	0,0091	0,000126	2
caso 4	1	0,8	5,9	0,1	1,883		0,398906	941,419	14	0,251733	1,8570	0,001973	2
caso 5	1	0,3	0,8	0,05	0,096		0,400392	48,047	0,0146	0,0018	0,0034	0,000071	2
caso 6	1	0,4	2	0,06	0,308		0,382792	153,117	0,277333	0,010667	0,0470	0,000307	2
caso 7	1	0,7	4,9	0,09	1,341		0,390859	670,323	7	0,140058	0,9650	0,00144	2
caso 8	1	0,5	2,8	0,07	0,535		0,382489	267,742	0,943833	0,029167	0,1463	0,000547	2
caso 9	1	0,3	1,5	0,05	0,180		0,400392	90,068	0,08775	0,003375	0,0164	0,000182	2
caso 10	1	0,2	0,3	0,04	0,027		0,450708	13,521	0,00065	0,0002	0,0002	0,000018	2
caso 11	1	0,7	4,6	0,09	1,259		0,390859	629,282	6	0,131483	0,8076	0,001283	2
caso 12	1	0,2	0,4	0,04	0,036		0,450708	18,028	0,001333	0,000267	0,0004	0,000023	2
caso 13	1	0,2	0,2	0,04	0,018		0,450708	9,014	0,000267	0,000133	0,0001	0,000015	2
caso 14	1	0,5	3,2	0,07	0,612		0,382489	305,991	1	0,033333	0,2120	0,000693	2
caso 15	1	0,4	2,4	0,06	0,367		0,382792	183,740	0,4736	0,0128	0,0775	0,000422	2
caso 16	1	0,4	1,8	0,06	0,276		0,382792	137,805	0,204	0,0096	0,0355	0,000257	2
caso 17	1	0,6	4,3	0,08	0,985		0,381917	492,673	4	0,0774	0,5769	0,001171	2
caso 18	1	0,3	1,6	0,05	0,192		0,400392	96,094	0,106	0,0036	0,0196	0,000204	2
caso 19	1	0,6	4,4	0,08	1,015		0,384455	507,480	4	0,0782	0,6159	0,001214	2
caso 20	1	0,3	0,7	0,05	0,083		0,395778	41,557	0,01015	0,001575	0,0025	0,000061	2

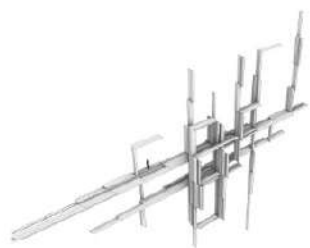
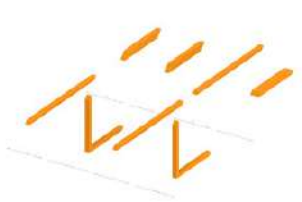
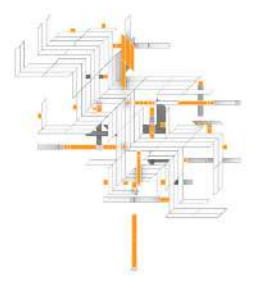
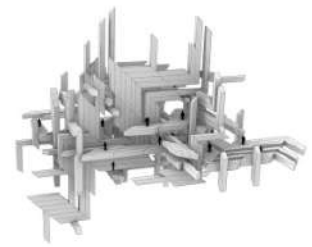
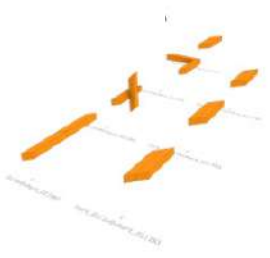
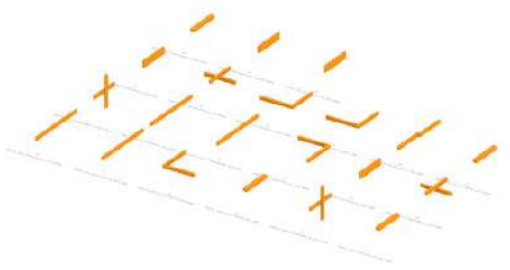
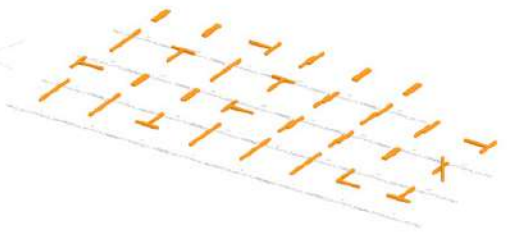
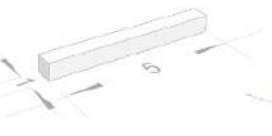
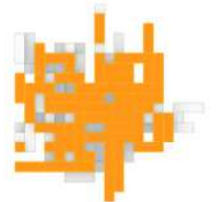
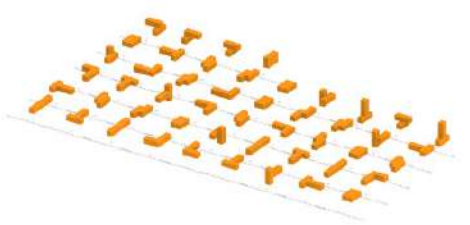
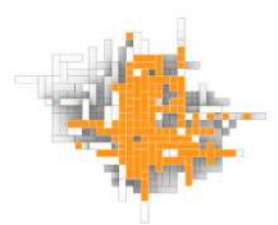
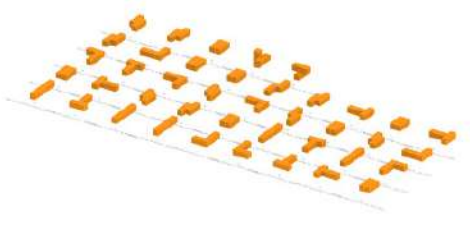


Geometria

Euristiche

Assemblaggio

Pianta

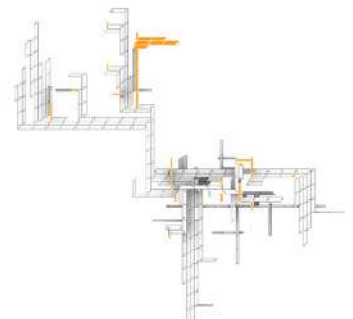
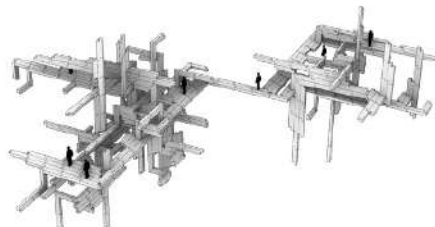
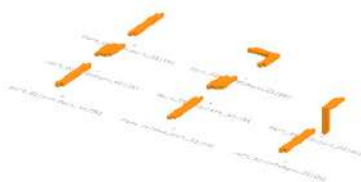
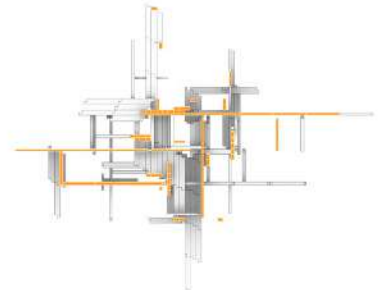
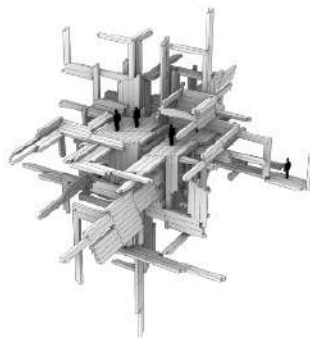
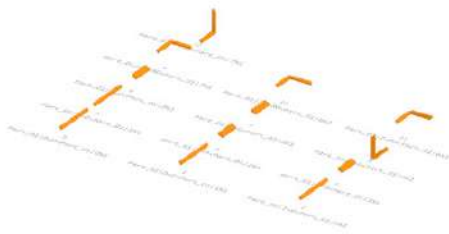
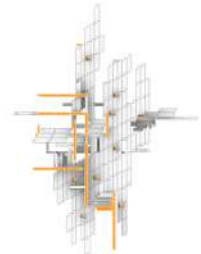
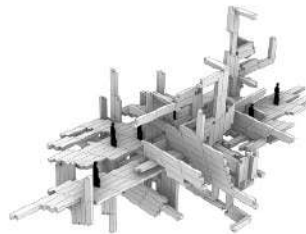
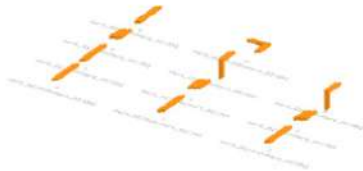
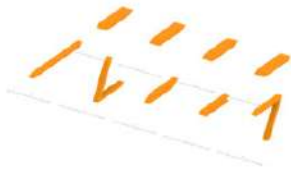
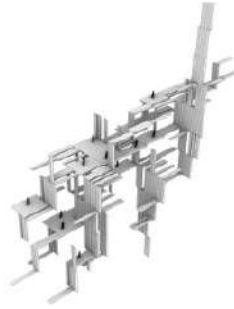
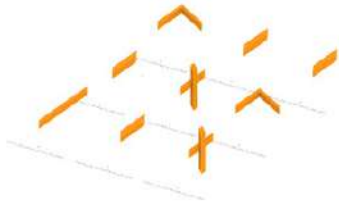


Geometria

Euristiche

Assemblaggio

Pianta

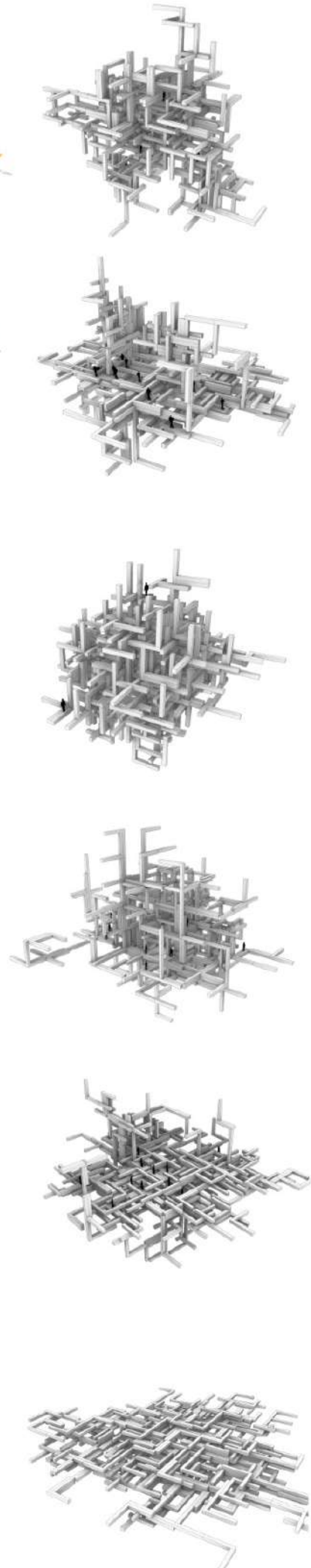
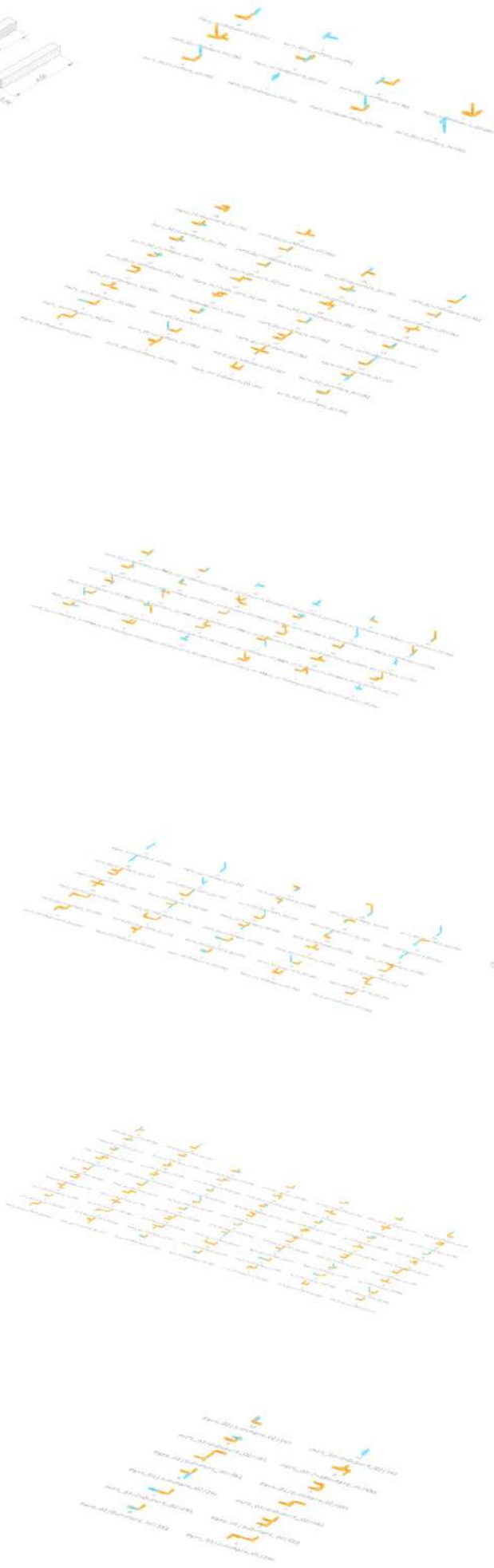


Geometria

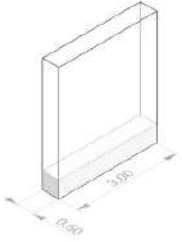
Euristiche

Assemblaggio

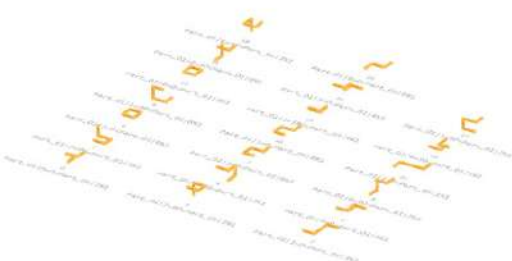
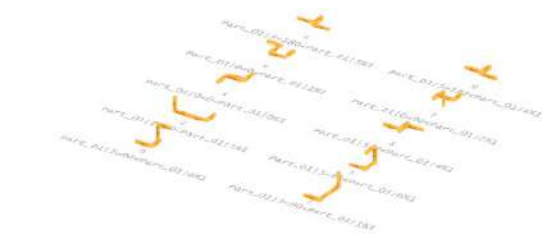
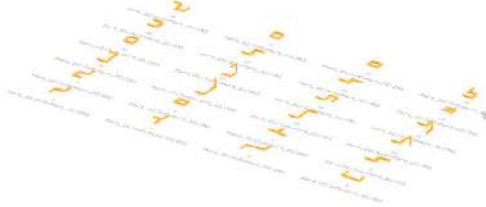
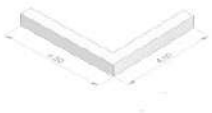
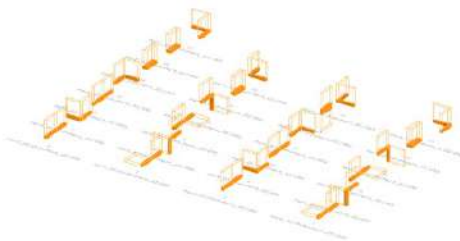
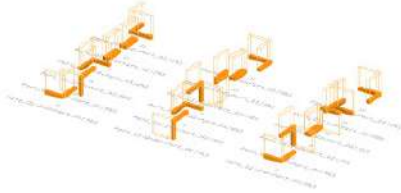
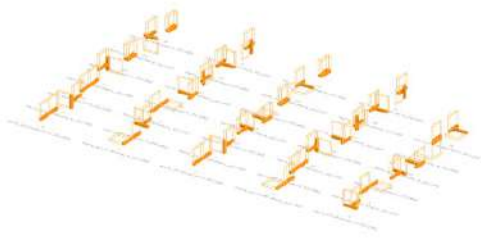
Zoom



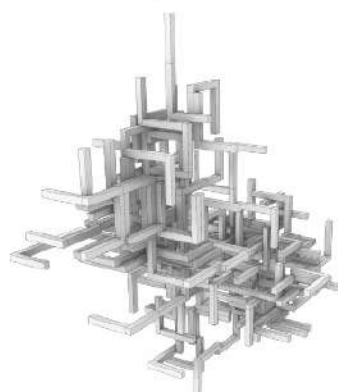
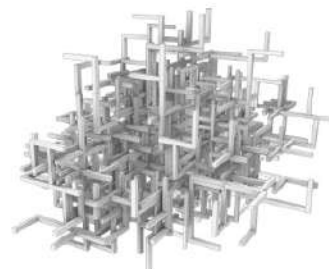
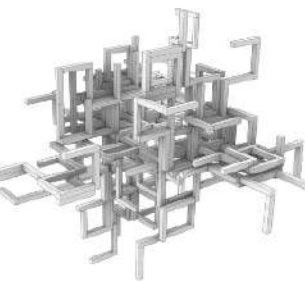
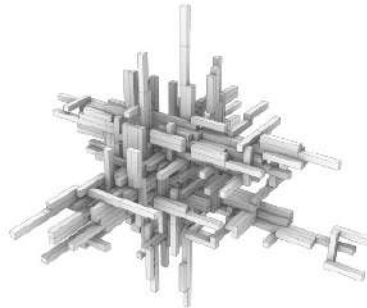
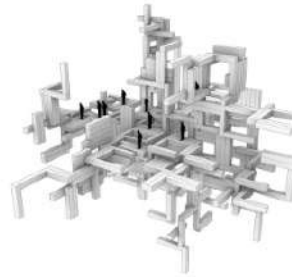
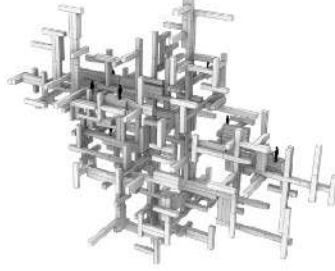
Geometria



Euristiche



Assemblaggio



Zoom

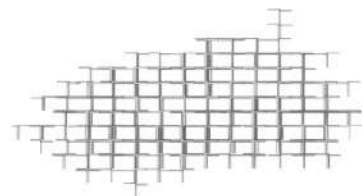
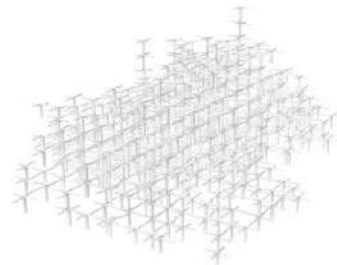
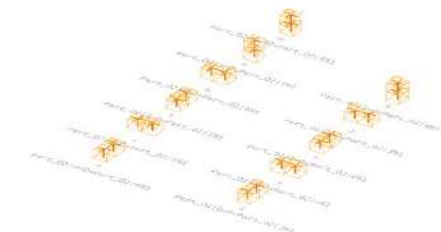
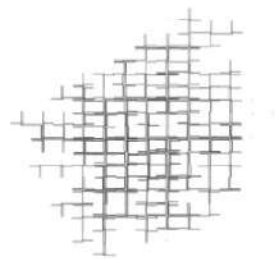
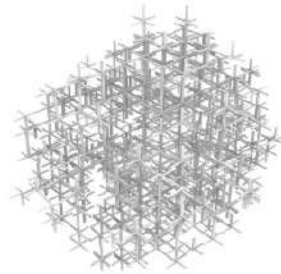
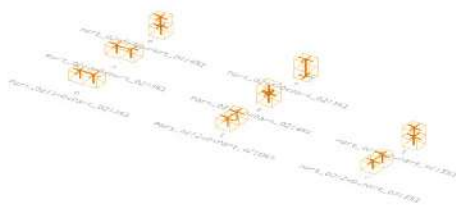
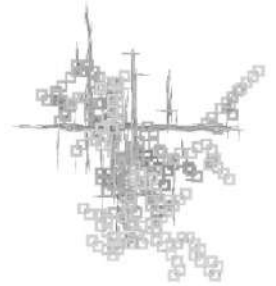
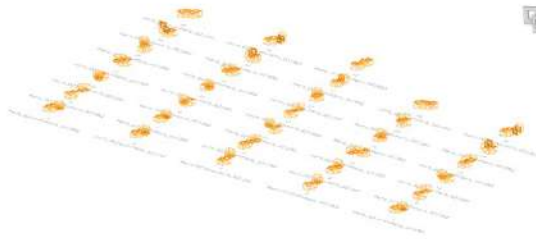
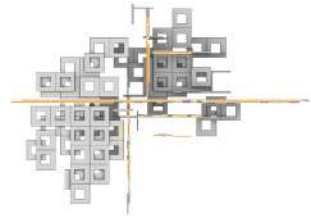
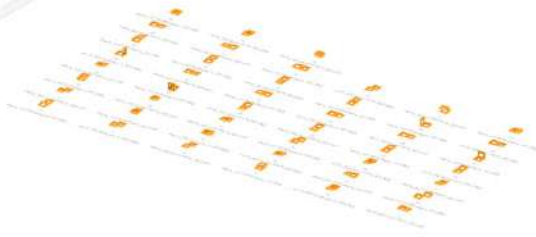
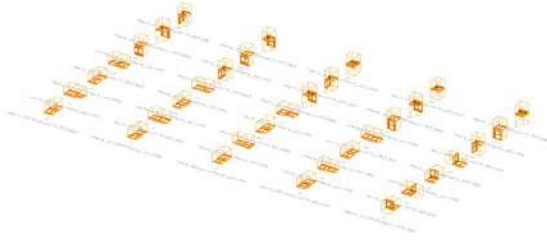
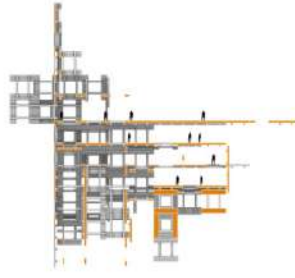
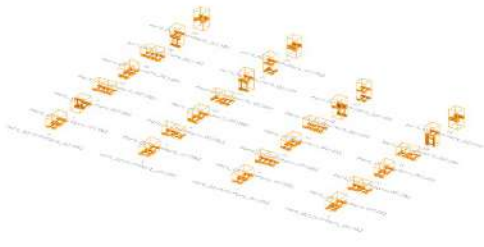


Geometria

Euristiche

Assemblaggio

Sezione

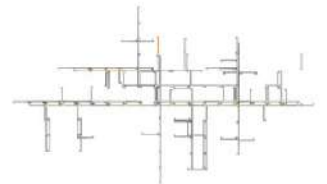
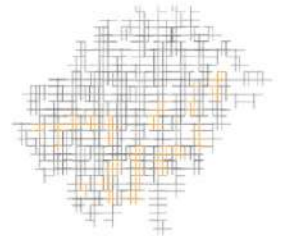
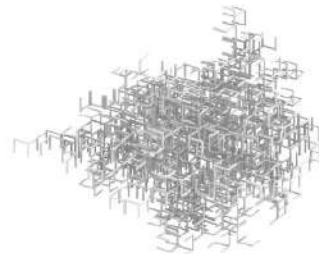
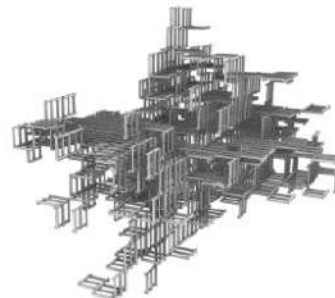
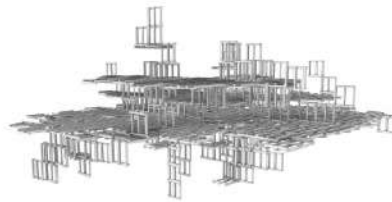
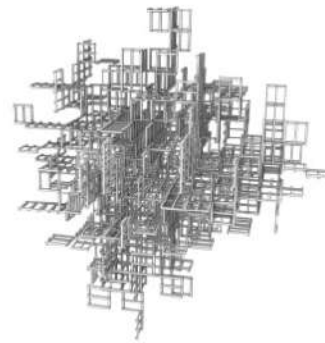
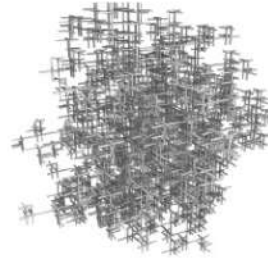
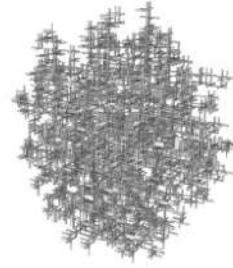
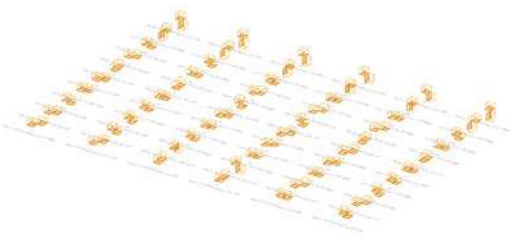
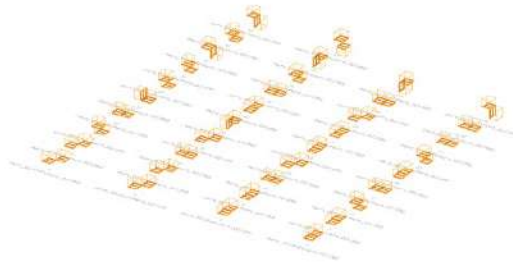
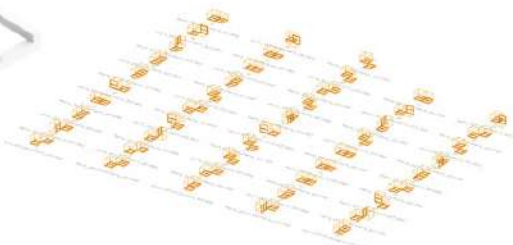
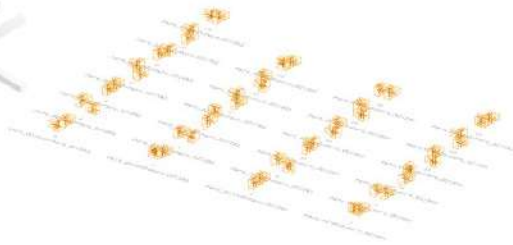
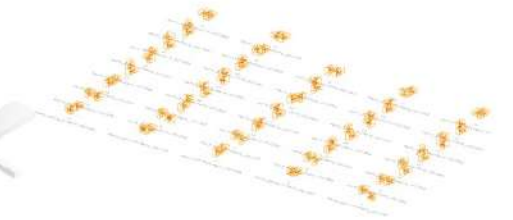


Geometria

Euristiche

Assemblaggio

Sezione



Primi test di comportamento strutturale con Karamba3D

Lo studio dei dettagli costruttivi ha costituito il punto di partenza per le prime prove di analisi strutturale e per la definizione di possibili sistemi di rinforzo. In una prima fase, il lavoro si è concentrato su prove semplificate, finalizzate a osservare come i risultati strutturali varino al modificarsi dell'assemblaggio, intervenendo sia sulle regole di aggregazione sia sulle configurazioni geometriche del sistema.

Per condurre queste analisi, il primo passo è stato l'impostazione del modello strutturale in Karamba3D. In questa fase iniziale del processo progettuale, l'analisi è stata eseguita utilizzando elementi beam, scelta coerente con l'obiettivo di esplorare in modo rapido ed efficace il comportamento globale dell'assemblaggio, prima di passare a modelli più complessi.

Il modello strutturale è stato definito assegnando agli elementi un materiale in CLT, con proprietà meccaniche derivate dalle indicazioni dell'Eurocodice (CEN – Comité Européen de Normalisation, 2004, 2004; Norme Tecniche per le Costruzioni, 2018). I carichi applicati comprendono il peso proprio degli elementi strutturali e carichi variabili, assunti pari a 2 kN/m. Per quanto riguarda i vincoli, gli elementi a contatto con il terreno sono stati modellati come incastri, mentre nel resto dell'assemblaggio i collegamenti tra gli elementi sono stati anch'essi schematizzati come incastri. La scelta di questo tipo di vincolo non è motivata dalla volontà di rappresentare in modo completamente realistico il comportamento costruttivo, ma risponde a esigenze operative e di esplorazione del sistema. L'introduzione di un maggiore grado di libertà nei vincoli avrebbe infatti limitato le possibilità di indagare il comportamento dell'assemblaggio, in particolare rispetto alle rotazioni degli elementi. È stata quindi privilegiata una fase di esplorazione del sistema che non imponesse fin da subito restrizioni eccessive, al fine di consentire una lettura chiara del comportamento strutturale dell'assemblaggio e delle relazioni tra geometria, regole di aggregazione e risposta strutturale.

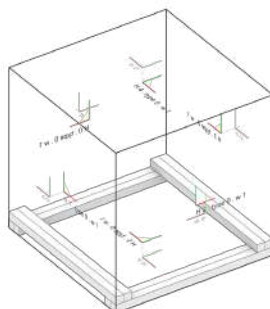
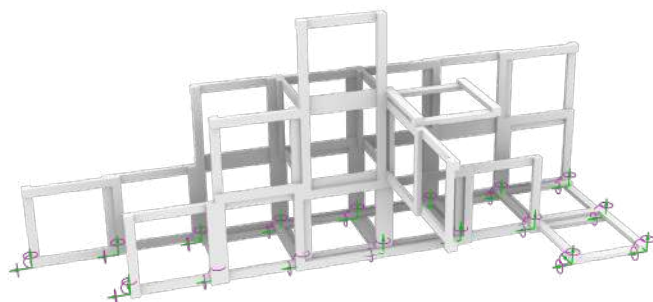
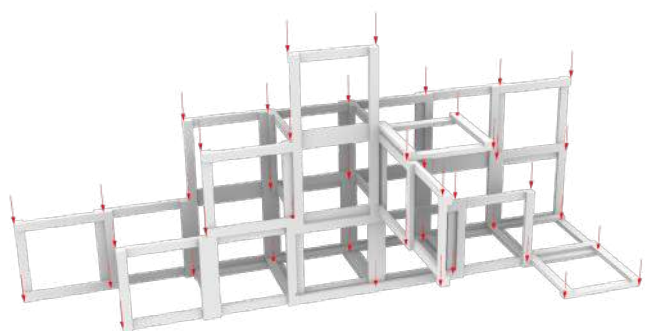
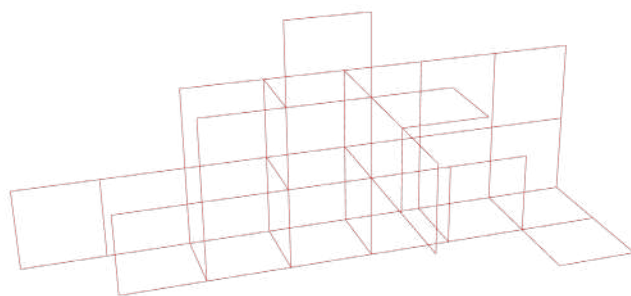
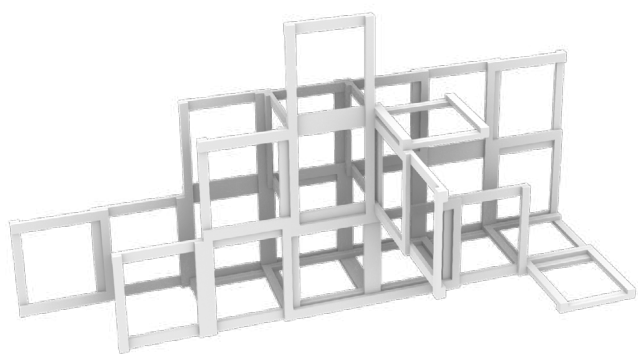


Fig. 62 - Parte (AssemblyObject), Geometria e Handle usate per l'esempio



Questo sottocapitolo intende chiarire il funzionamento e le potenzialità di Karamba3D, evidenziando quali strumenti e risultati siano stati effettivamente utilizzati come supporto alle decisioni progettuali e all'evoluzione del sistema. Una volta definiti gli elementi del modello (rappresentati, nel caso dei beam, come entità lineari) e assegnati materiali, vincoli e carichi, è possibile procedere all'analisi strutturale.

Tra i risultati restituiti da Karamba3D e valutati nel corso delle diverse prove rientra il Buckling Load Factor (BLF), un indice di sicurezza rispetto ai fenomeni di instabilità elastica sotto carichi di compressione. Il BLF indica di quanto è necessario moltiplicare i carichi applicati affinché la struttura raggiunga una condizione di instabilità. In termini concettuali, esso è definito come:

$$BLF = P_{critico} / P_{applicato}$$

dove $P_{applicato}$ rappresenta il carico attualmente agente sulla struttura e $P_{critico}$ il carico che induce il fenomeno di buckling.

Fig. 63 - Assemblaggio generato - 30 iterazioni

Fig. 64 - Schematizzazione del modello per Karamba 3D - da geometrie a linee (beam)

Fig. 65 - Esempio - carichi applicati agli estremi

Fig. 66 - Supporti a terra

Un ulteriore parametro analizzato è lo spostamento massimo (displacement), considerato come indicatore del comportamento globale dell'assemblaggio. Sono stati inoltre considerati lo stress assiale lungo l'asse degli elementi e il rapporto tra stress e resistenza del materiale (Stress/Strength Ratio), definito come:

$$\text{Stress/Strength Ratio} = \sigma_{\text{eff}}/\sigma_{\text{max}}$$

dove σ_{eff} è lo stress effettivamente calcolato nell'elemento e σ_{max} la resistenza massima del materiale. Valori superiori a 1 indicano il superamento della capacità resistente dell'elemento.

Karamba3D consente inoltre di visualizzare la deformata della struttura e la distribuzione delle forze interne, offrendo una lettura immediata del comportamento strutturale dell'assemblaggio e facilitando il confronto tra differenti configurazioni.

Tra tutti i risultati disponibili, il parametro che è stato scelto come principale fattore decisionale per orientare le scelte progettuali è il fattore di utilizzo (Utilization Factor). Questo indice sintetizza il grado di sfruttamento degli elementi strutturali rispetto alla loro capacità resistente, integrando in un unico valore gli effetti delle sollecitazioni agenti e delle proprietà del materiale. Il fattore di utilizzo consente di individuare in modo diretto le zone maggiormente sollecitate dell'assemblaggio e di confrontare in maniera efficace diverse configurazioni geometriche e regole di aggregazione, rendendolo particolarmente adatto a un processo progettuale iterativo e orientato all'esplorazione del sistema.

Nelle prove riportate in Fig. 73 è possibile osservare una sintesi di questo studio e il modo in cui il fattore di utilizzo ha guidato la collocazione delle aggiunte di rinforzo all'interno dell'assemblaggio. In questa fase del lavoro non viene effettuata una seconda analisi di verifica; l'obiettivo è piuttosto quello di utilizzare l'analisi strutturale come strumento di supporto alle decisioni progettuali, ponendo le basi metodologiche per le successive fasi di sviluppo del progetto.

Fig. 67 - Cross section - modello dell'assemblaggio generata da Karamba 3D

Fig. 68 - Cross section - Deformata

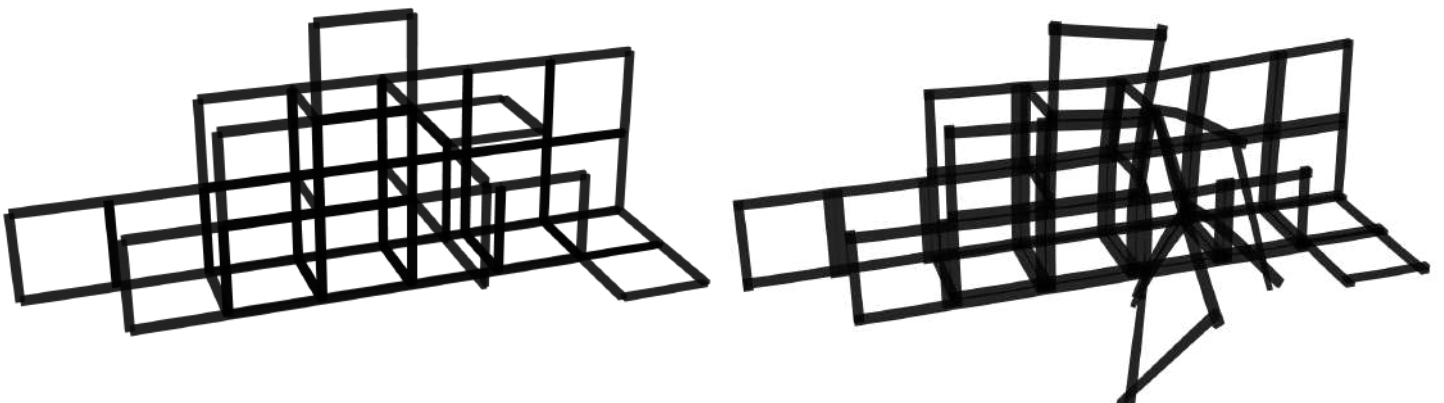


Fig. 69 - Axial Stress

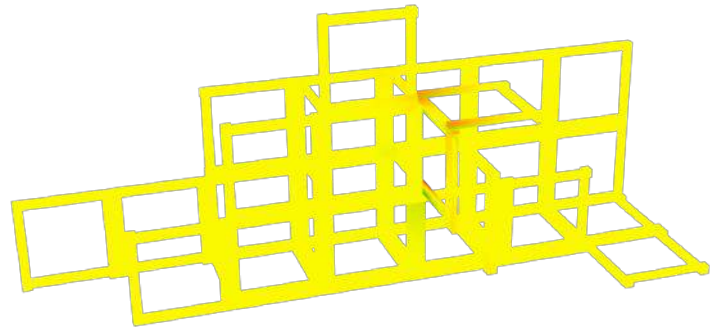
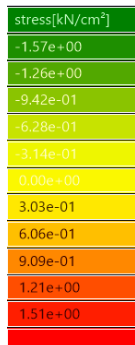


Fig. 70 - Displacement

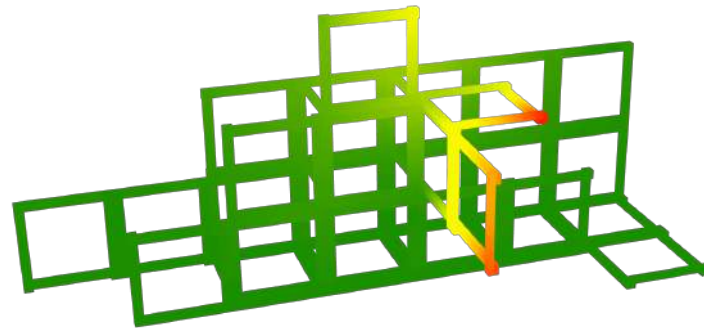
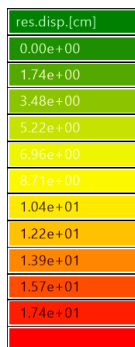


Fig. 71 - Stress/Strength Ratio

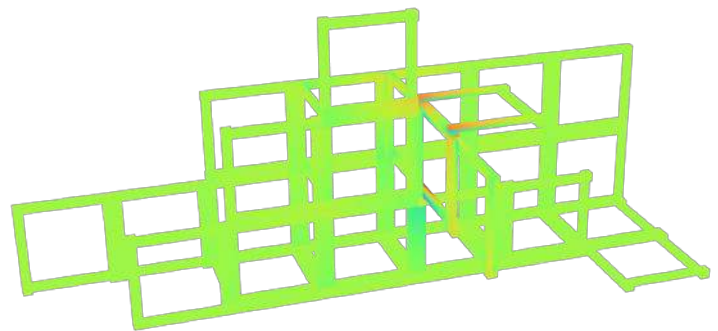
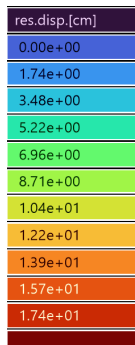


Fig. 72 - Fattore di utilizzo

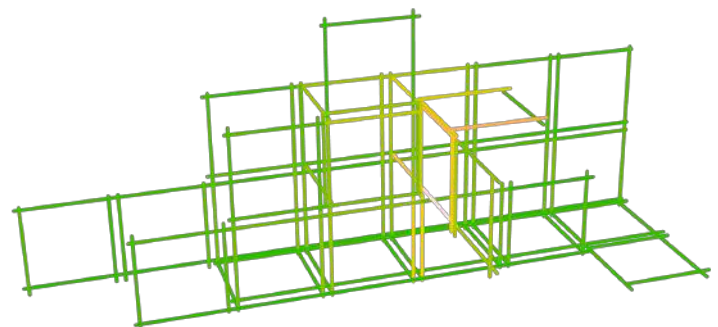
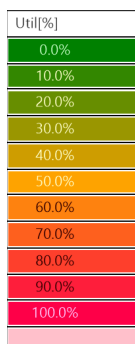
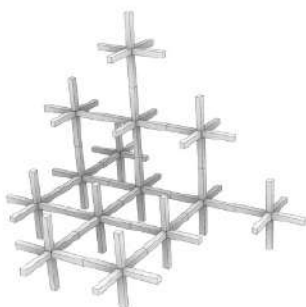
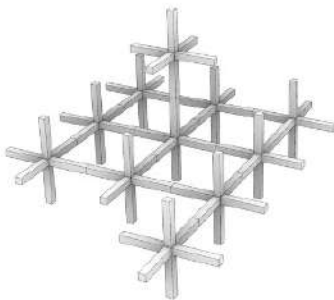
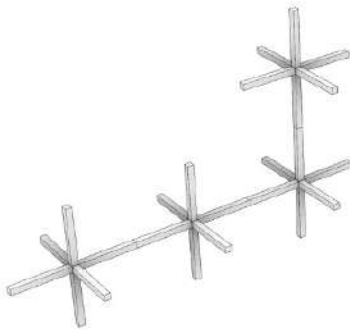
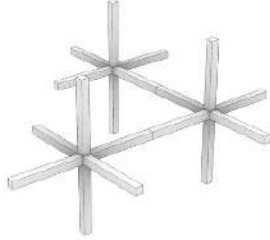


Fig. 73 - Prove di assemblaggio e analisi strutturale - Integrazione tra Karamba 3D e Assembler con elementi beam

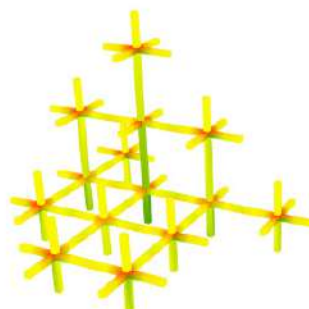
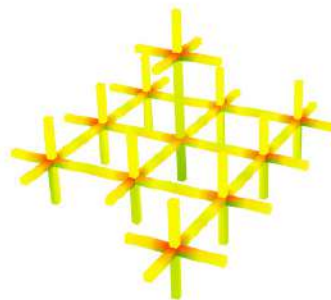
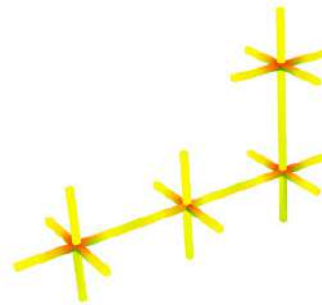
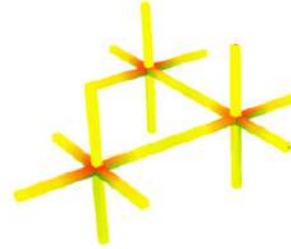
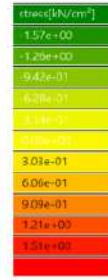
Geometria



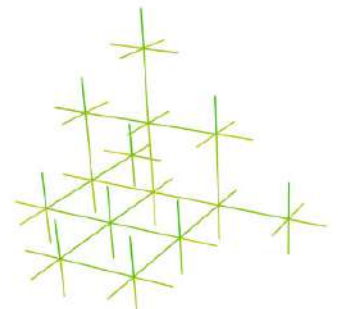
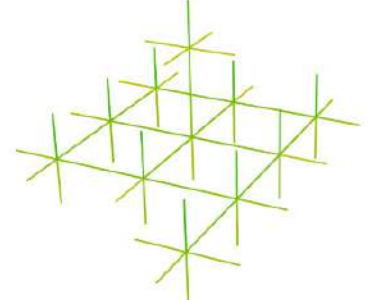
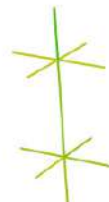
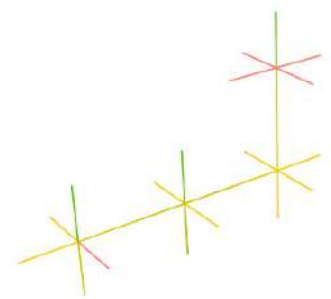
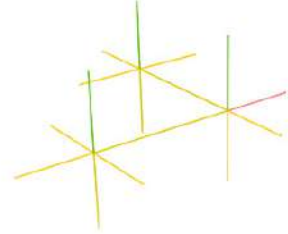
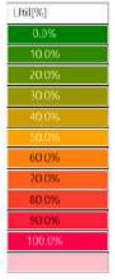
Assemblaggio



Axial stress



Fattore di utilizzo

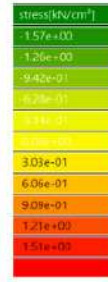


Geometria

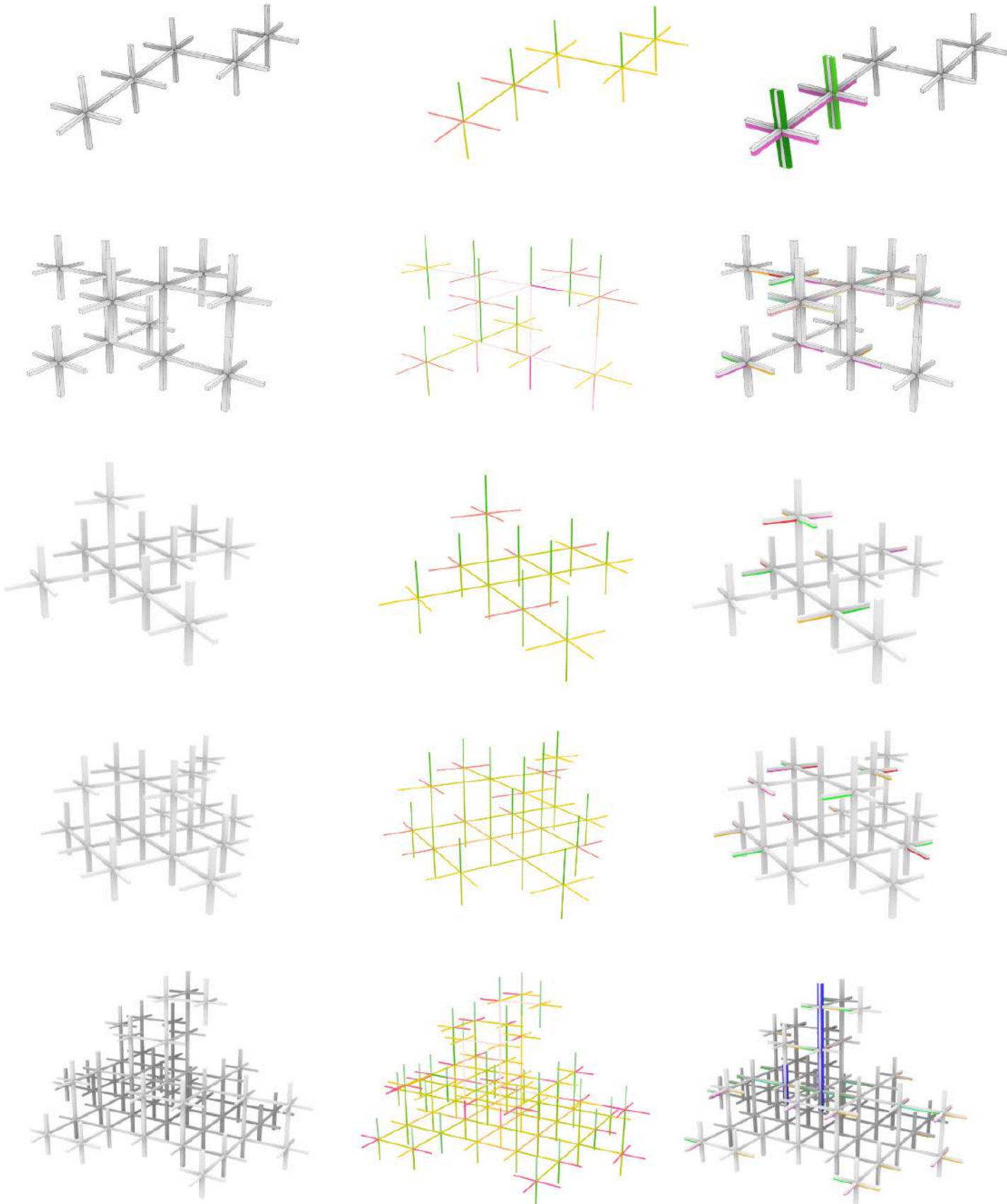
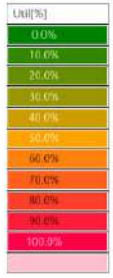


Assemblaggio

Fattore di utilizzo



Aggiunte di rinforzo



Fase esplorativa: assemblaggi, regole e configurazioni spaziali

Successivamente, il progetto ha attraversato una fase di sperimentazione attraverso l'utilizzo di Assembler. Queste prime sperimentazioni hanno riguardato assemblaggi liberi da vincoli e da influenze esterne, che crescono esclusivamente seguendo le regole (euristiche) fornite come input al sistema. Tale fase ha avuto l'obiettivo di valutare le parti, le regole di accoppiamento e le geometrie ritenute progressivamente più coerenti con gli obiettivi del progetto.

In questa fase iniziale sono state testate diverse forme e dimensioni delle collision mesh, ovvero del volume inviolabile che caratterizza ciascun Assembly Object. Tra le diverse configurazioni sperimentate, verrà qui riportata soltanto quella considerata più significativa. Questa configurazione si basa su due differenti assembly object di forma cubica, uno con lato pari a 8 m (Componente A) e l'altro con lato pari a 4 m (Componente B). Nel corso delle prove, a tali oggetti sono state applicate e modificate diverse regole di accoppiamento, al fine di osservare le variazioni spaziali e morfologiche dell'assemblaggio. Le prime sperimentazioni, riportate in Fig. 76, riguardano esclusivamente gli Assembly Object privi di geometrie interne, considerate in questa fase come un elemento successivo al processo di assemblaggio.

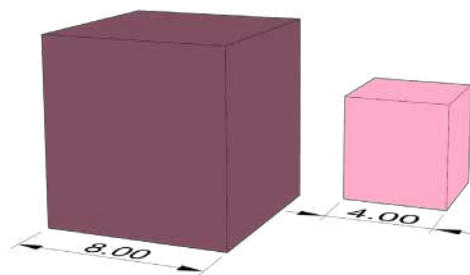


Fig. 74 - Componente A (Rosa scuro) e Componente B (Rosa chiaro)

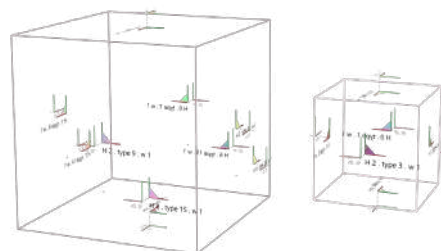


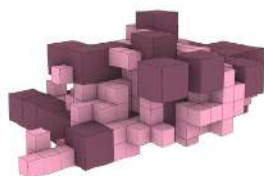
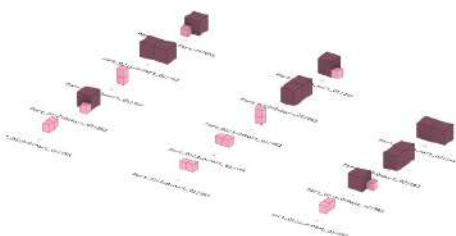
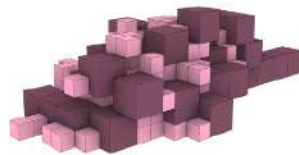
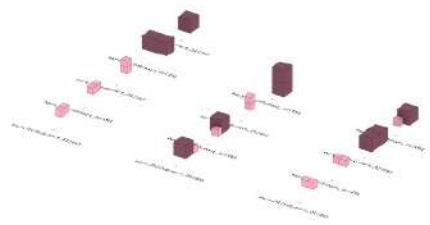
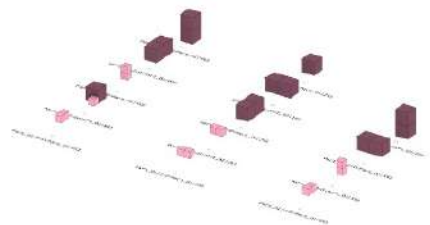
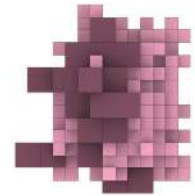
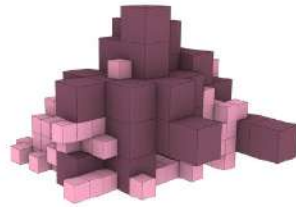
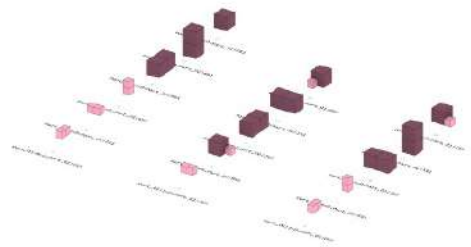
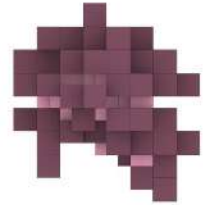
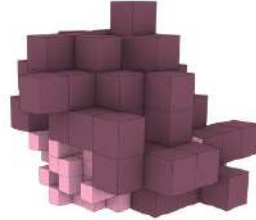
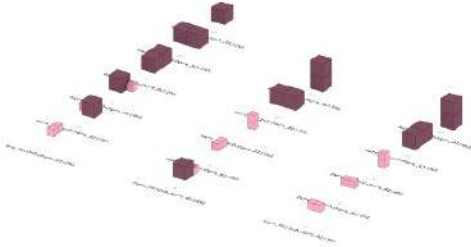
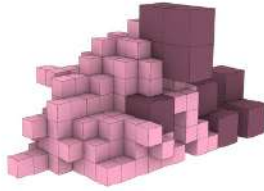
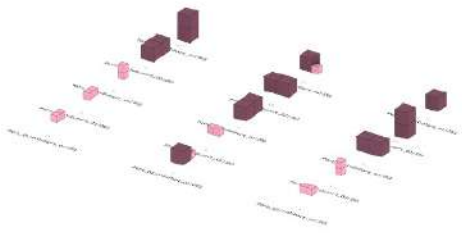
Fig. 75 - Componente A e Componente B con esempio di piani di connessione (handle)

Fig. 76 - Prove di assemblaggio, solo Assembly Object

Euristiche

Assemblaggio

Vista top



Euristiche

Assemblaggio

Assemblaggio con geometrie

Pianta

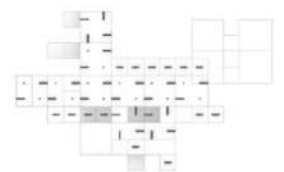
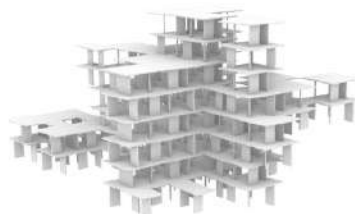
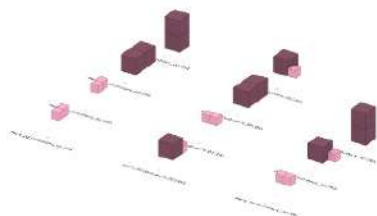
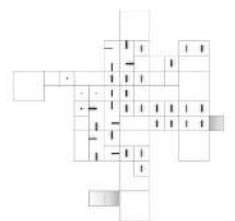
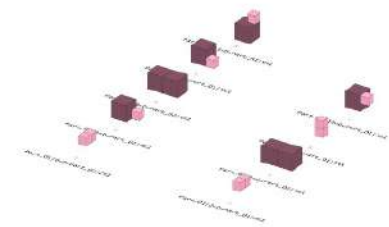
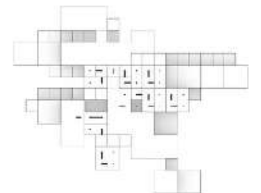
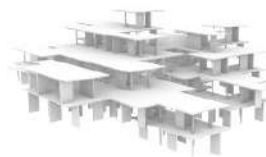
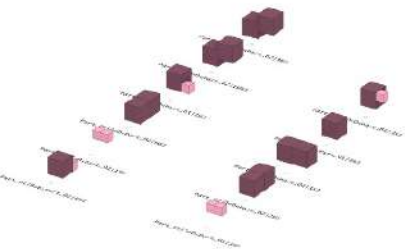
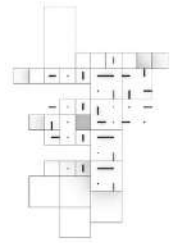
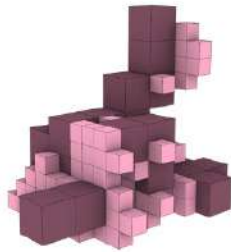
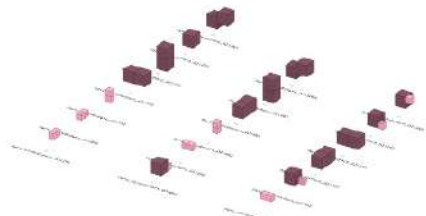
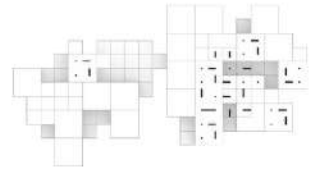
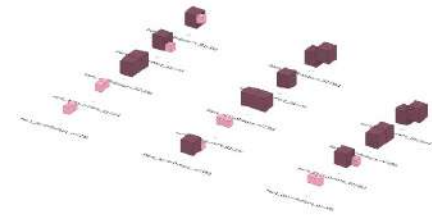
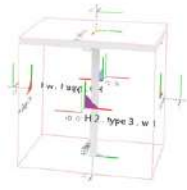
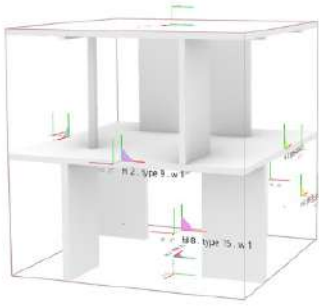


Fig. 77 - Prove di assemblaggio con geometrie interne.

Prime prove

Fig. 78 - Componente B geometria

Queste prime prove con l'introduzione delle geometrie interne hanno permesso di individuare alcuni temi critici legati alle funzioni ricercate per l'habitat. Tra questi emerge in particolare la necessità di garantire una corretta illuminazione naturale, che ha portato alla definizione di regole di assemblaggio capaci di generare facce libere e vuoti adeguati. Parallelamente, le geometrie interne sono state pensate per rispondere alle esigenze spaziali sia degli ambienti residenziali sia di quelli commerciali e collettivi.

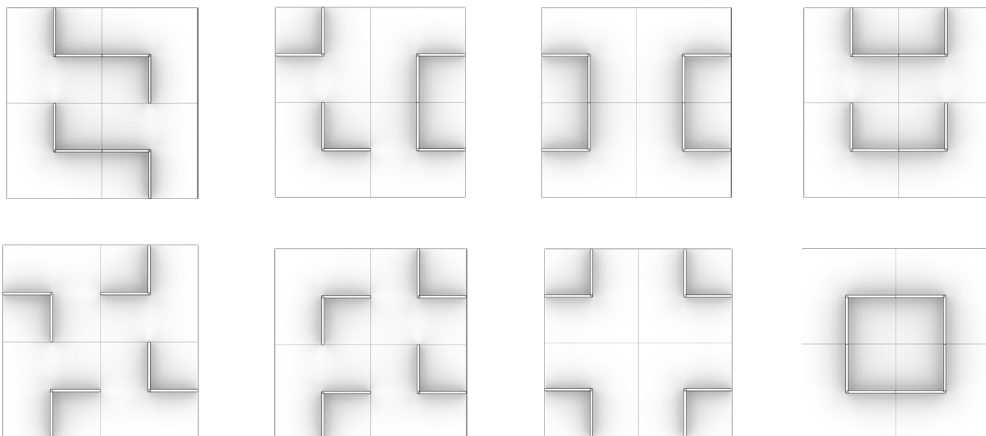
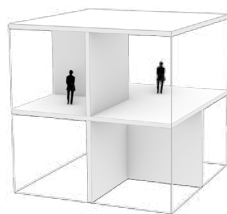


Fig. 79 - Prove di assemblaggio manuale del componente B con la geometria riportata in Fig 78

Fig. 80 - Prove di assemblaggio set A (a sinistra) caratterizzato da una crescita sfalsata in altezza, prove di assemblaggio set B (a destra). Prove con 500 iterazioni.

Queste sperimentazioni hanno avuto lo scopo di esplorare un ampio spettro di configurazioni spaziali, al fine di individuare un orientamento progettuale da sviluppare nelle fasi successive. In particolare, le prove sono state utilizzate come base per la ricerca e l'analisi di differenti set di regole, ciascuno in grado di generare specifiche qualità spaziali all'interno dell'assemblaggio.

Fig. 81 - Prove di assemblaggio set C (a sinistra) caratterizzato dall'aggiunta di rotazioni tra i piani di connessione delle parti; prove di assemblaggio set D (s destra) caratterizzate da un accoppiamento tra le parti sfalsato su un lato. Prove con 500 iterazioni.

Progressivamente, la ricerca si è orientata verso elementi di tipo lastra, abbandonando soluzioni prevalentemente lineari (beam), in quanto più coerenti con il comportamento strutturale e costruttivo del CLT. Questa scelta segna la conclusione della fase esplorativa e introduce il passaggio a una fase di verifica e affinamento strutturale, dedicata all'analisi delle lastre tramite Karamba 3D e alla definizione dei set di regole più idonei per l'assemblaggio complessivo.

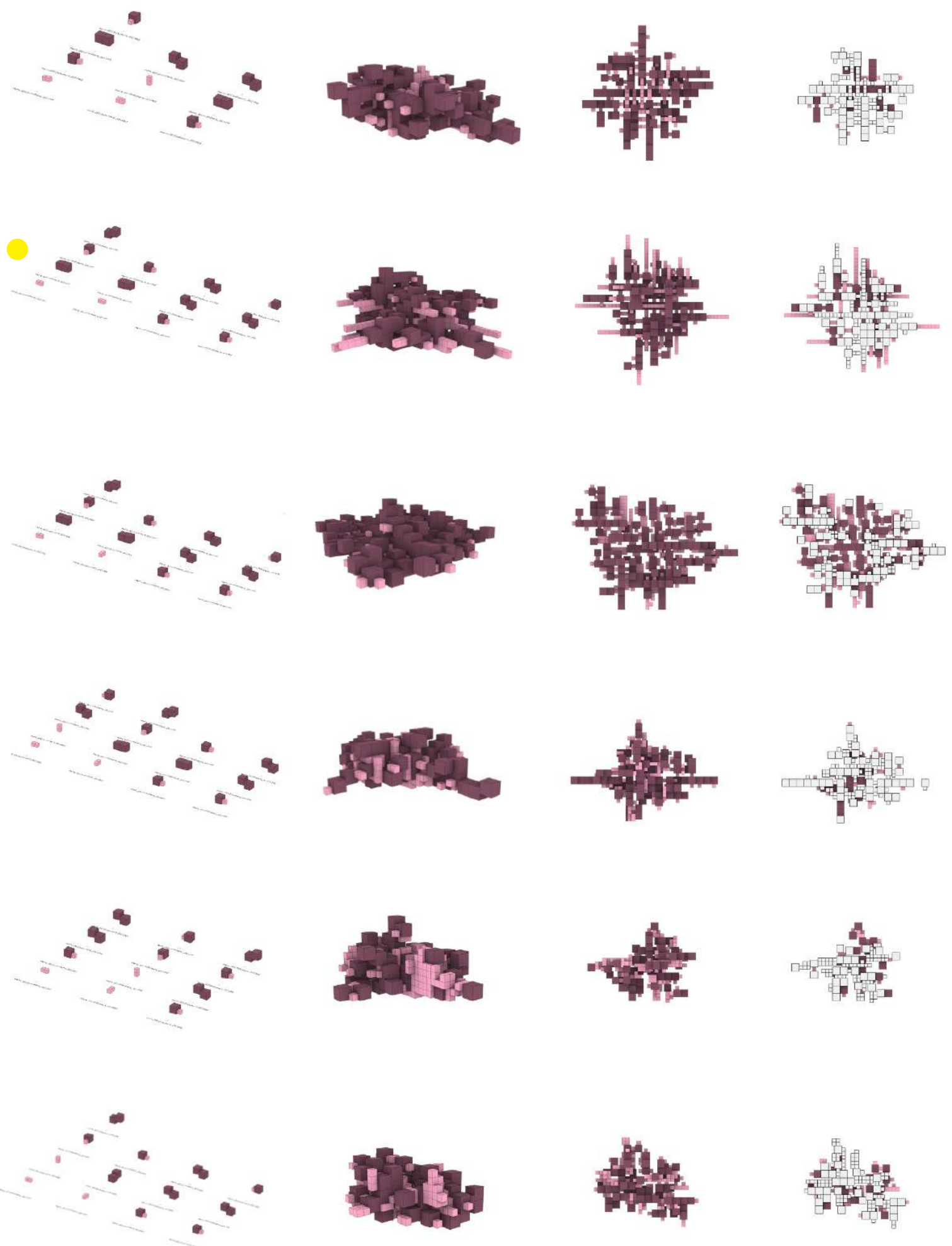
Fig. 82 - Prove di assemblaggio con variazioni di geometria interna della parte.

Euristiche

Assemblaggio

Vista top

Pianta

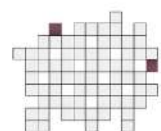
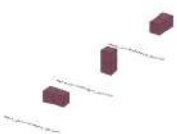
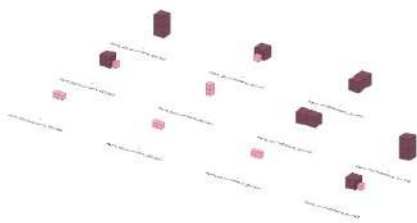
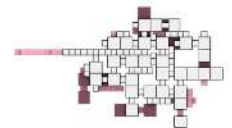
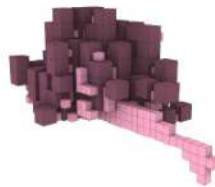
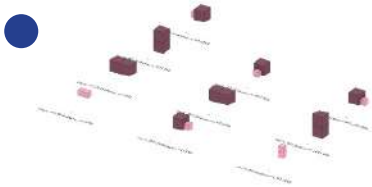
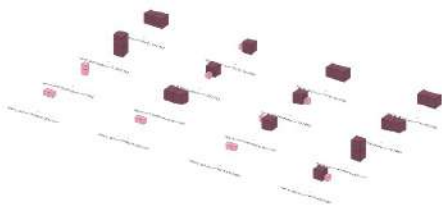
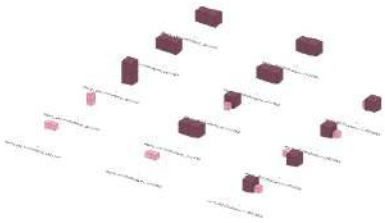
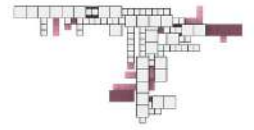
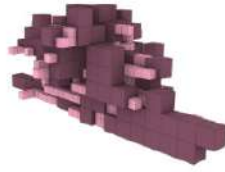
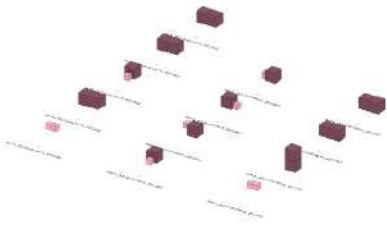


Euristiche

Assemblaggio

Vista top

Pianta

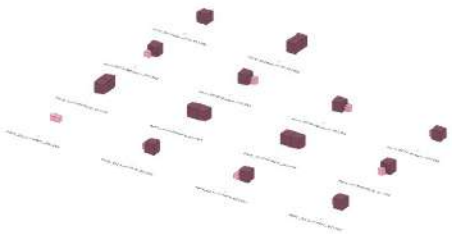
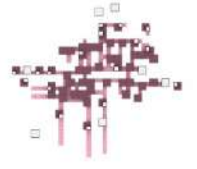
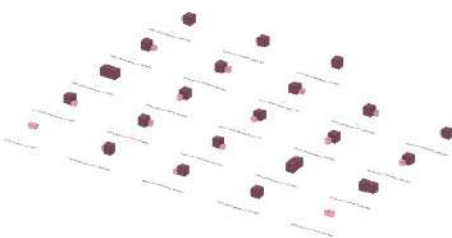
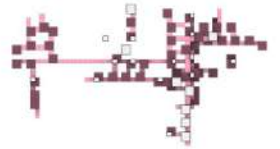
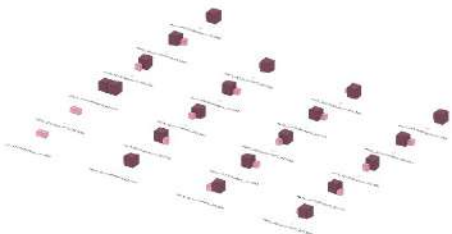
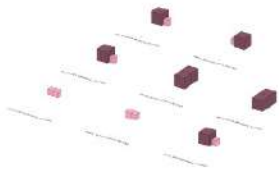
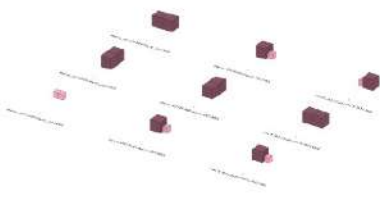


Euristiche

Assemblaggio

Vista top

Pianta

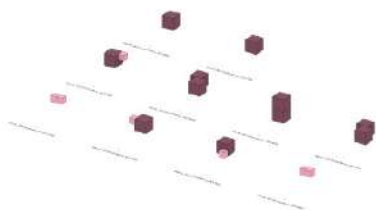
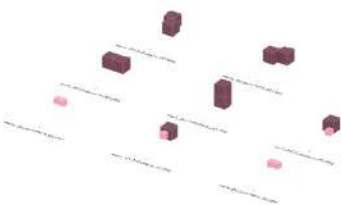
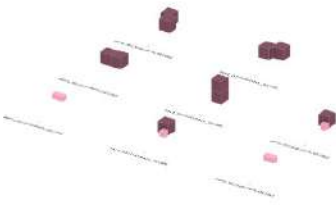
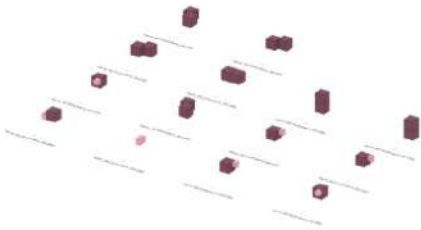
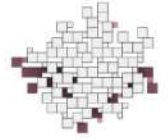
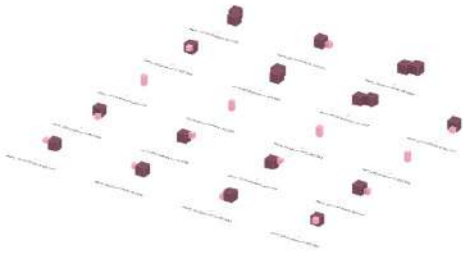


Euristiche

Assemblaggio

Vista top

Pianta

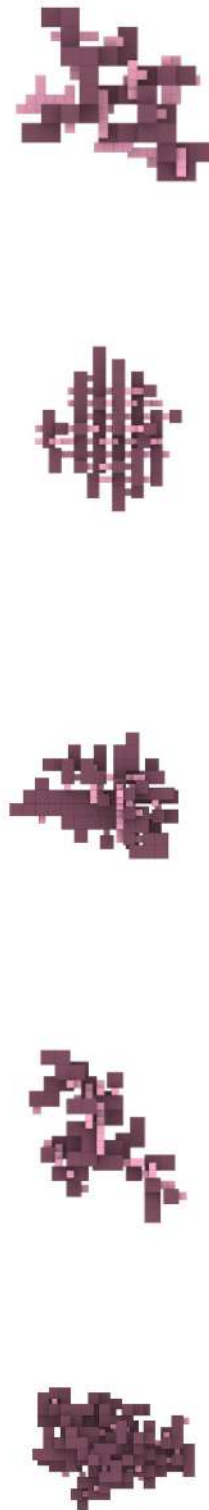
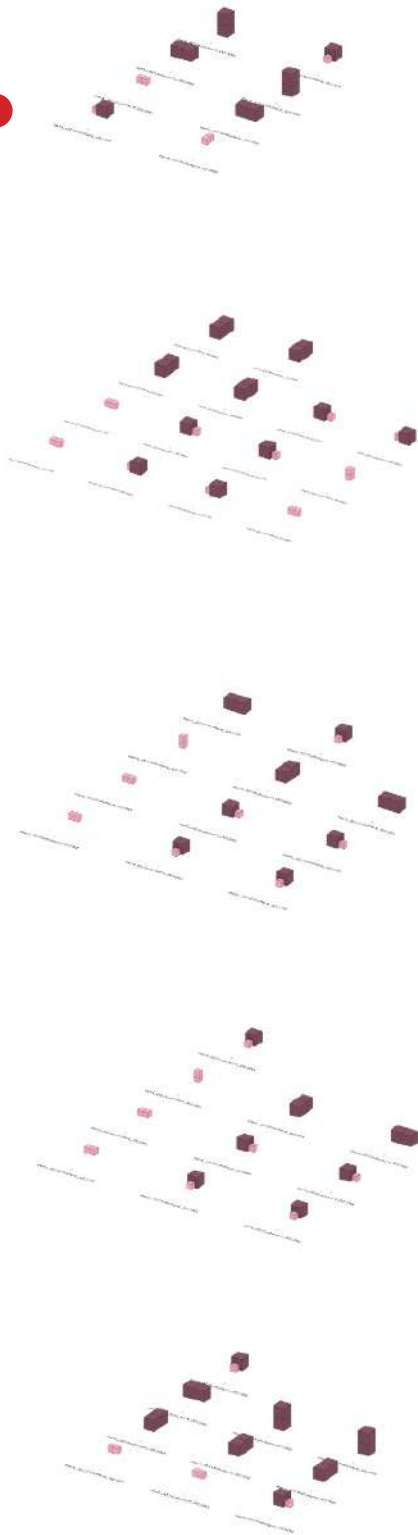


Euristiche

Assemblaggio

Vista top

Geometria 1



Geometria 2



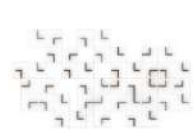
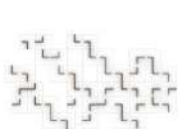
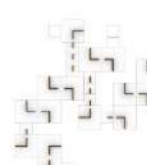
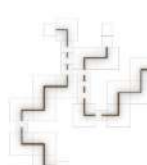
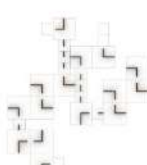
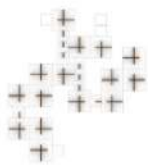
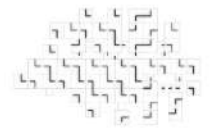
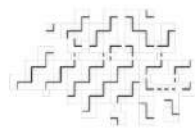
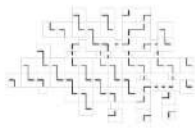
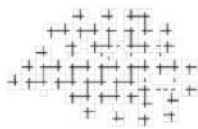
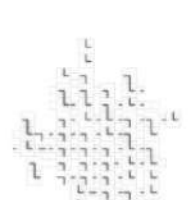
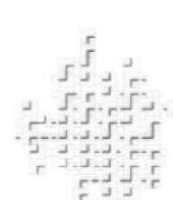
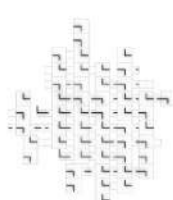
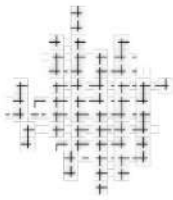
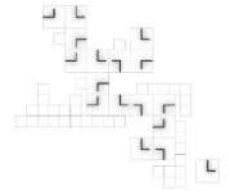
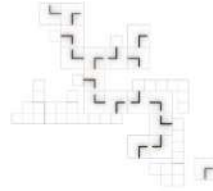
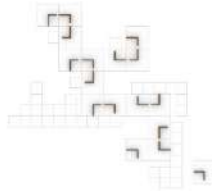
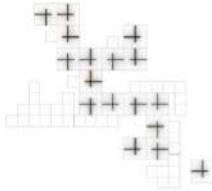
Geometria 3



Geometria 4



Geometria 5



Modellazione a lastre: criteri e considerazioni metodologiche

Le prove precedenti si erano progressivamente orientate verso elementi bidimensionali (shell) piuttosto che monodimensionali (beam). Nel passaggio dalla fase esplorativa condotta tramite Assembler a quella di verifica strutturale, è stato quindi necessario confrontare le diverse modalità di modellazione offerte da Karamba 3D, valutando i rispettivi vantaggi e limiti in relazione agli obiettivi della ricerca e alla natura del sistema strutturale in CLT.

La modellazione a beam consente un'elevata leggibilità dei risultati e un minor peso computazionale. Tuttavia, fornisce una rappresentazione semplificata del comportamento dei pannelli, risultando meno adatta a descrivere fenomeni quali la flessione fuori piano, la redistribuzione locale degli sforzi in presenza di aperture e gli effetti di instabilità, con il rischio di sottostime o sovrastime degli spostamenti.

Al contrario, la modellazione a shell offre una rappresentazione più realistica del comportamento dei pannelli in CLT, permettendo di valutare in modo più accurato le sollecitazioni locali, la flessione fuori piano e gli effetti legati a discontinuità geometriche. A fronte di questa maggiore precisione, l'approccio comporta un costo computazionale più elevato e una lettura dei risultati meno immediata, in quanto il fattore di utilizzo non è riferito direttamente all'elemento strutturale, ma alla discretizzazione della mesh.

Per questi motivi, per lo sviluppo della tesi è stato adottato un modello a lastre (shell), ritenuto più coerente con la natura e il comportamento strutturale del CLT. In Karamba 3D, la modellazione a shell richiede la definizione di una mesh bisimensionale, oltre all'impostazione di vincoli e supporti, mantenuti invariati rispetto al modello a beam. Nella maggior parte delle prove preliminari sono stati considerati come carichi il peso proprio della struttura e un carico variabile pari a 4 kN/m^2 , successivamente incrementato a 6 kN/m^2 nel progetto finale.

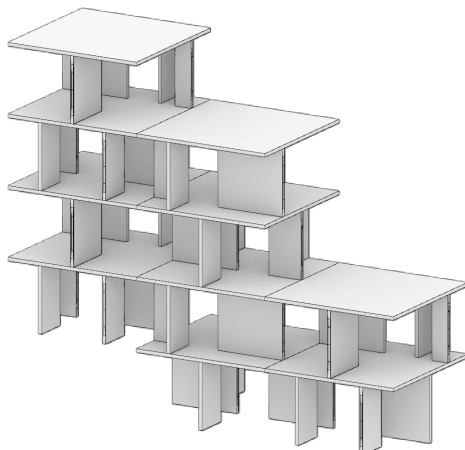


Fig. 84 - Assemblaggio generato per l'analisi

Fig. 85 - Supporti

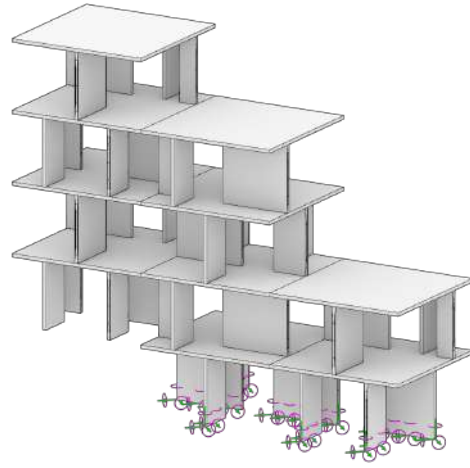


Fig. 86 - Carichi (Loads)

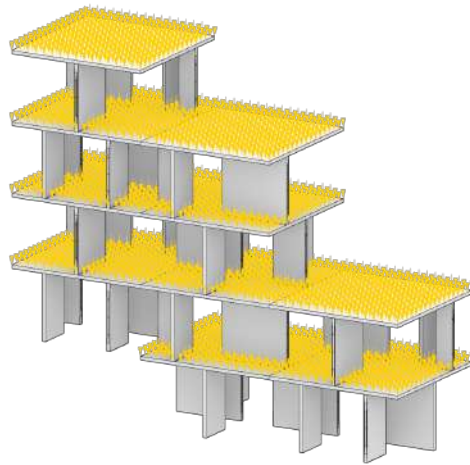


Fig. 87 - Displacement

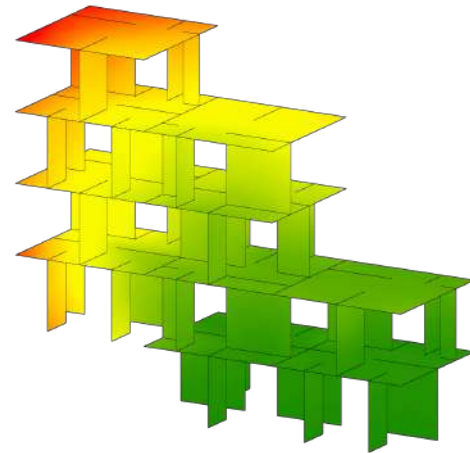
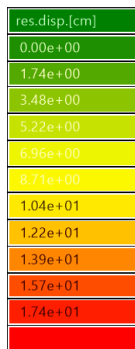
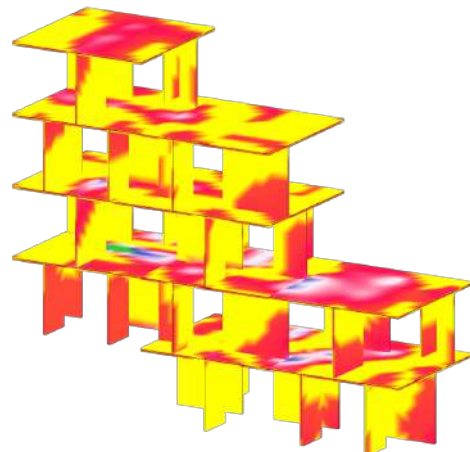
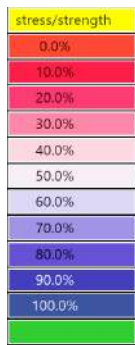


Fig. 88 - Stress/Strength Ratio

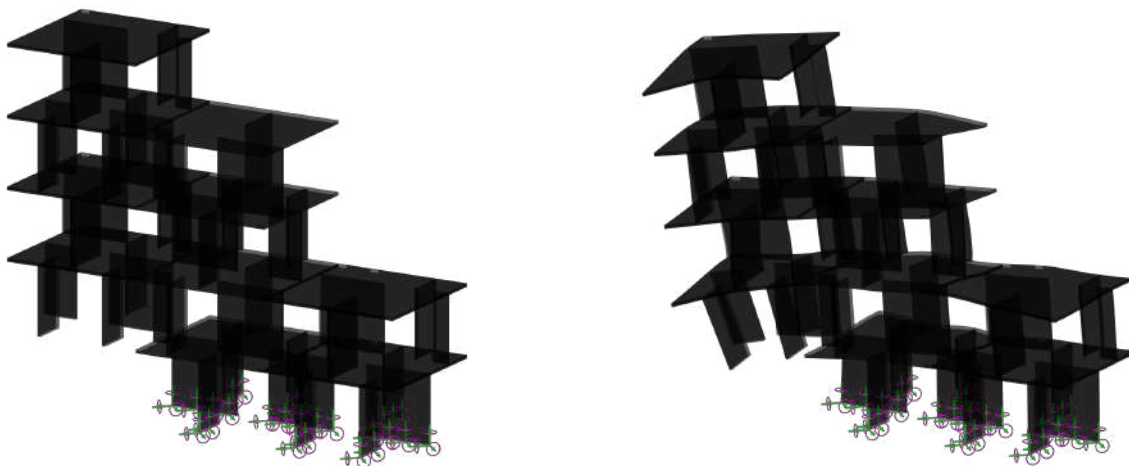


Nel caso delle lastre, il fattore di utilizzo restituito dal software è riferito agli elementi della triangolazione della mesh. Poiché, ai fini della tesi, il dato di interesse è il comportamento dell'elemento lastra nel suo complesso, si è posto il problema metodologico di come interpretare e sintetizzare tali risultati. Inoltre, la densità della mesh influisce direttamente sulla rigidità del modello e sulla distribuzione delle sollecitazioni; per questo motivo, durante le prove è stata adottata una discretizzazione costante basata su una griglia di 0,5 m, evitando un eccessivo raffinamento che avrebbe gravato sul peso computazionale del modello.

In una prima fase, il fattore di utilizzo dell'elemento è stato ricavato come valore medio dei risultati della triangolazione; tale approccio è stato ritenuto poco cautelativo. Successivamente è stato considerato il valore massimo, che si è dimostrato però eccessivamente influenzato da picchi locali, non rappresentativi del comportamento globale della lastra e potenzialmente fonte di sovradimensionamenti. Per questo motivo è stata adottata una valutazione basata sul percentile 98, inteso come il valore al di sotto del quale ricade il 98% dei risultati della triangolazione. Questo metodo consente di escludere picchi locali isolati, mantenendo al contempo una valutazione cautelativa e più rappresentativa del comportamento complessivo dell'elemento strutturale.

Fig. 89 - Cross section - modello dell'assemblaggio generata da Karamba 3D

Fig. 90 - Cross section - Deformata



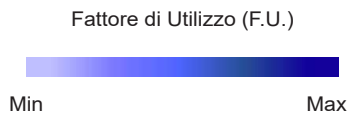


Fig. 91 - Fattore di utilizzo valutato sulla triangolazione della mesh

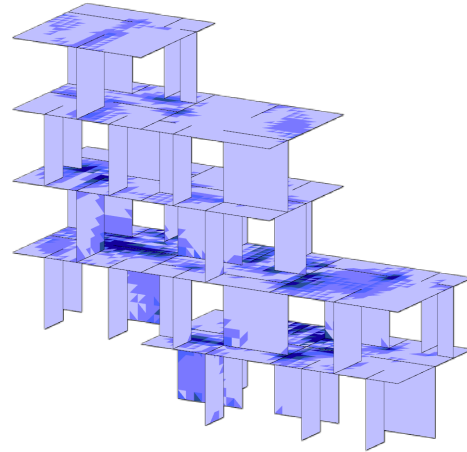


Fig. 92 - Fattore di utilizzo medio

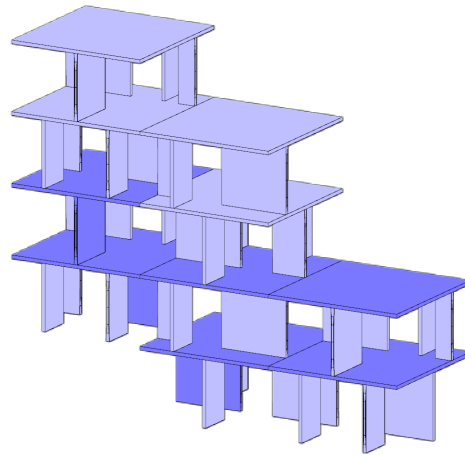


Fig. 92 - Fattore di utilizzo massimo

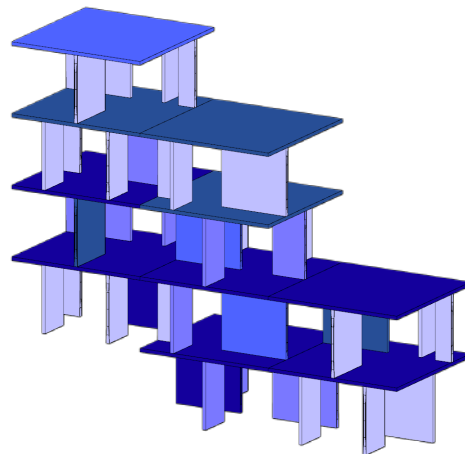
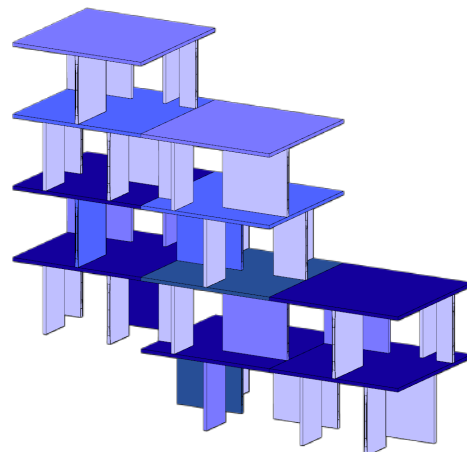


Fig. 93 - Fattore di utilizzo percentile 98



Sviluppo e valutazione dei set di regole per l'assemblaggio

Successivamente alla definizione del modello strutturale a lastre e alle prime prove esplorative condotte tramite Assembler, i due processi sono stati integrati. L'obiettivo principale di questa fase è stato generare e valutare set di regole applicabili all'assemblaggio, analizzando la crescita spaziale e strutturale delle configurazioni prodotte e comprendendo in che modo le diverse euristiche influenzino la morfologia risultante.

Per selezionare le regole più appropriate, sulla base delle sperimentazioni precedenti, è stata utilizzata una funzione di Assembler che consente di attribuire a ciascun piano di connessione un "tipo" (handle type), permettendo di definire regole di accoppiamento più selettive. Ad esempio, un handle di tipo 1 può connettersi solo con handle dello stesso tipo, mentre un handle di tipo 2 può ricevere esclusivamente handle di tipo 3 ed essere a sua volta ricevuto da handle di tipo 1 e 2. Questa classificazione limita le combinazioni geometriche e consente di controllare la compatibilità tra gli Assembly Object, riducendo la generazione di configurazioni incoerenti e migliorando la leggibilità del sistema di aggregazione.

Le regole (euristiche) definiscono le possibilità di connessione tra gli Assembly Object, costituendo il cosiddetto action space. Esse sono rappresentate come segue:

$$NR | HiR = Hr < NS | HiS \% Rw$$

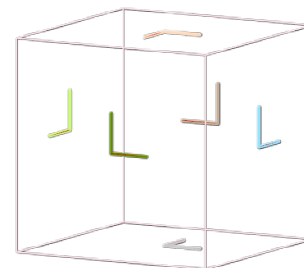
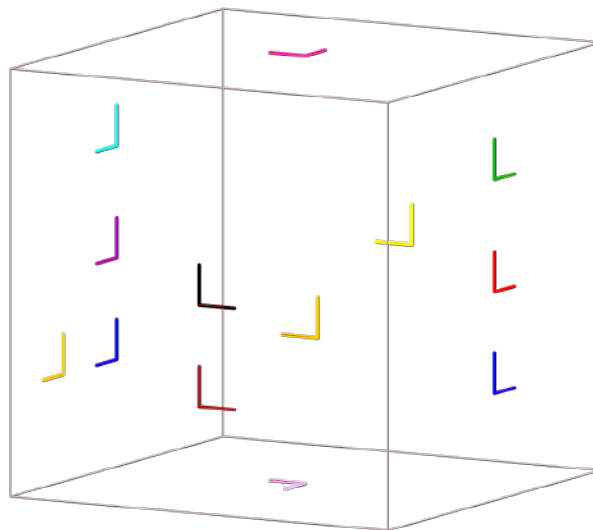
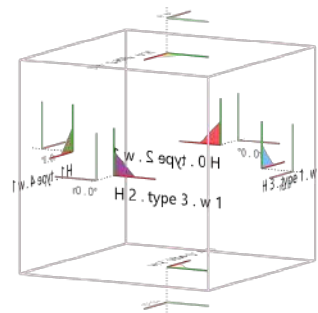
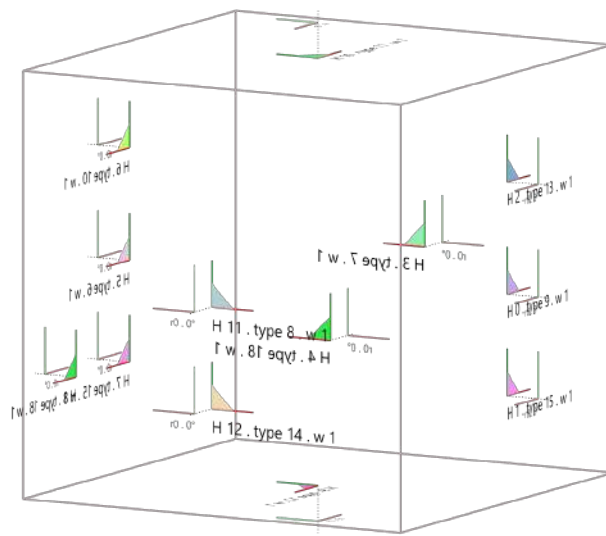
dove NR indica il nome dell'AO ricevente, HiR l'indice dell'handle ricevente, Hr la rotazione dell'handle ricevente in gradi, NS il nome dell'AO mittente, HiS l'indice dell'handle mittente e Rw il peso della regola. Il peso associato alla regola consente di influenzare la probabilità di selezione delle connessioni durante il processo generativo, introducendo un ulteriore livello di controllo sullo sviluppo dell'assemblaggio.

In questa fase è stata quindi definita l'assegnazione di un tipo per ciascun handle, riducendo le possibili combinazioni a un insieme limitato di euristiche, come riportato in Fig. X. Tali euristiche rappresentano le regole di connessione selezionabili; nei test sui singoli set solo alcune di esse vengono attivate, al fine di verificare il comportamento dei diversi assemblaggi e valutarne le ricadute spaziali e prestazionali.

Le sperimentazioni hanno riguardato configurazioni nelle quali sono stati valutati principalmente la circolazione, il potenziale di esposizione alla luce, il comportamento strutturale e le funzioni potenzialmente innestabili negli spazi generati da ciascun set. Ogni set di regole è stato testato più volte, con un numero di

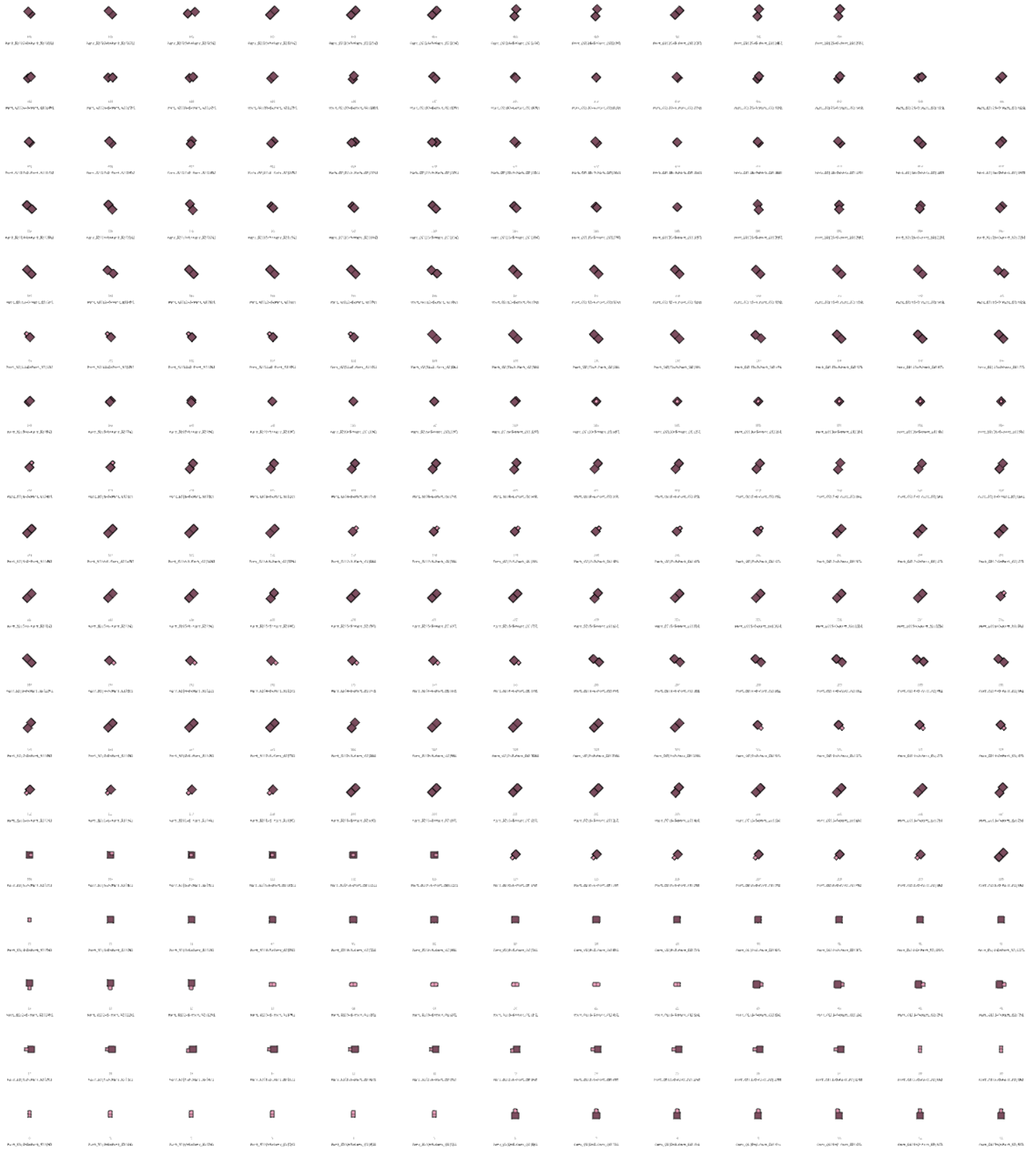
Fig. 94 - Piani di connessione assegnati

Fig. 95 - Tipi assegnati ai piani di connessione



- | | | | | | |
|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| ● Tipo 0 | ● Tipo 3 | ● Tipo 6 | ● Tipo 9 | ● Tipo 12 | ● Tipo 15 |
| ● Tipo 1 | ● Tipo 4 | ● Tipo 7 | ● Tipo 10 | ● Tipo 13 | ● Tipo 18 |
| ● Tipo 2 | ● Tipo 5 | ● Tipo 8 | ● Tipo 11 | ● Tipo 14 | |

6. DESIGN PROCESS



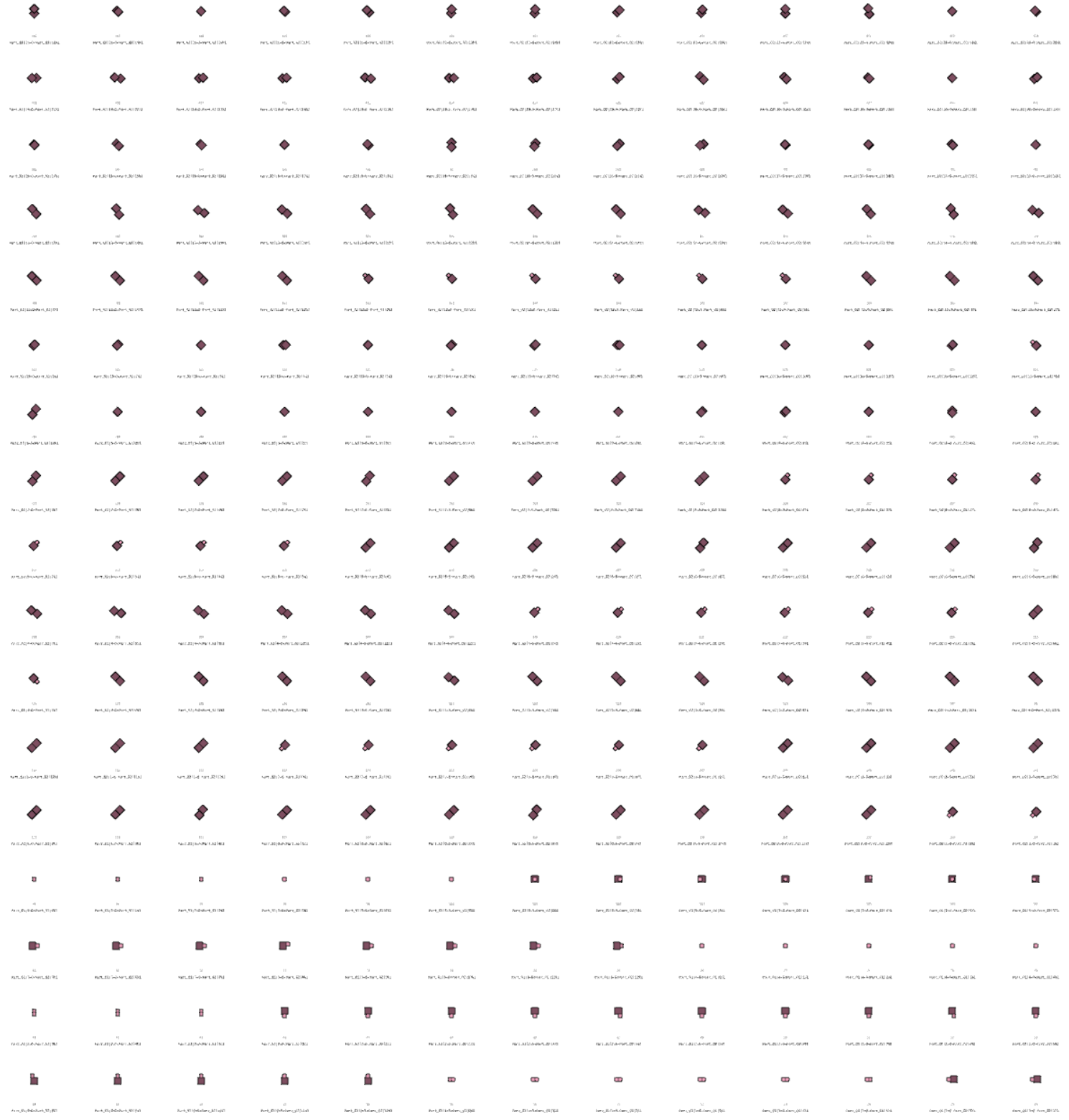
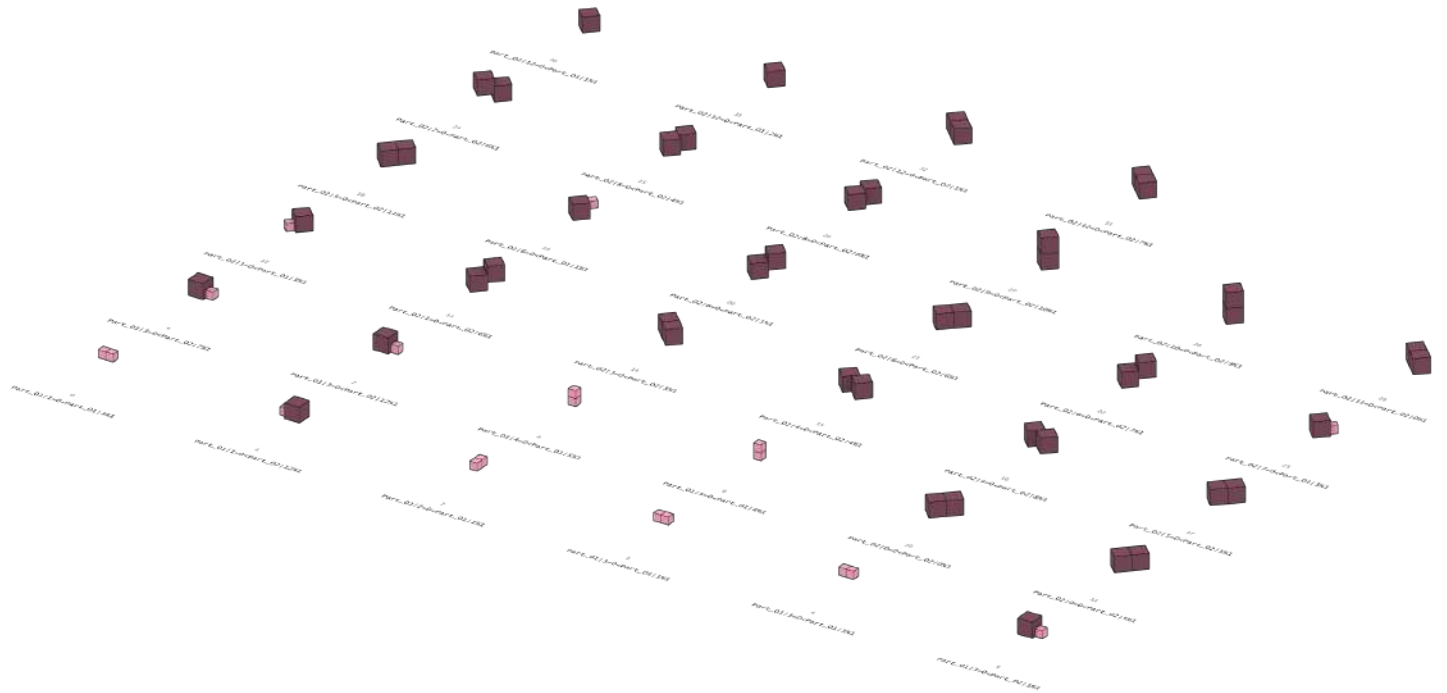


Fig. 96 - Abaco delle euristiche senza assegnazione del tipo - tutte le possibili connessioni tra le parti

6. DESIGN PROCESS



Compatibilità tra i tipi:	0<5	9<6	
	1<1	9<9	
	1<4	10<4	
	1<14	10<10	
	1<15	10<15	
	3<4	11<12	
	4<1	12<11	
	4<14	14<3	
	5<0	14<4	0<0 significa che il tipo 0 può ricevere il tipo 0.
	6<6	14<15	1<2 significa che il tipo 1 può ricevere il tipo 2.
	6<8	15<1	
	7<7	15<10	Queste regole hanno la precedenza sulla compatibilità a tipo singolo.
	8<9	18<18	

Fig. 97 - Abaco delle euristiche ridotto dall'assegnazione della compatibilità per tipo - vista top

Fig. 98 - Abaco delle euristiche ridotto dall'assegnazione della compatibilità per tipo - vista assonometrica

iterazioni variabile da 10 a 500, al fine di osservare lo sviluppo delle configurazioni spaziali e le variazioni del potenziale di esposizione e della risposta strutturale al crescere delle iterazioni. L'osservazione comparata dei diversi scenari ha permesso di individuare tendenze ricorrenti e criticità associate a specifiche combinazioni di regole.

L'analisi legata alla luce è stata condotta valutando le connessioni tra gli Assembly Object. In questa fase è stata adottata un'analisi preliminare fornita direttamente dal software Assembler, denominata connectedness (nelle analisi qui rinominata occlusione), finalizzata a ottenere una prima lettura qualitativa delle potenzialità di affaccio dell'assemblaggio.

In tale analisi, a ciascun Assembly Object viene attribuito un valore cromatico in funzione della percentuale di punti di connessione liberi (handle), ovvero non occupati da elementi adiacenti. La scala cromatica varia dal verde, indicante un oggetto con un'elevata percentuale di connessioni libere, al rosso, corrispondente a un oggetto completamente circondato e privo di connessioni disponibili. Questa rappresentazione consente di individuare rapidamente le zone maggiormente occluse e quelle potenzialmente più esposte, fornendo indicazioni utili per le successive valutazioni ambientali.

Questa valutazione non costituisce un'analisi luminosa in senso stretto, ma rappresenta uno strumento rapido per individuare le aree dell'assemblaggio caratterizzate da una maggiore disponibilità di superfici potenzialmente esposte. Essa viene pertanto assunta come base conoscitiva iniziale, utile a orientare le successive fasi di progetto e le analisi più approfondite.

Fig. 99 - Analisi svolte sui set (rosso, blu, giallo) con due diverse geometrie

Fig. 100 - Analisi svolte sui set (rosso, blu, giallo) con due ulteriori geometrie

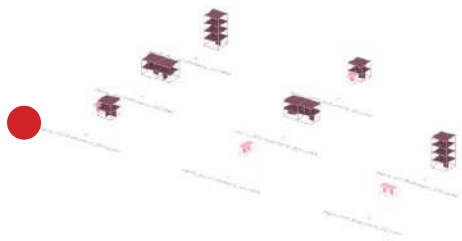
Per quanto riguarda l'analisi strutturale, eseguita tramite il software Karamba3D, è stato valutato il rapporto stress/strength, assimilabile,

Euristiche

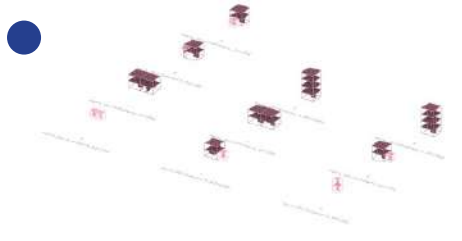
Geometria

Assemblaggio

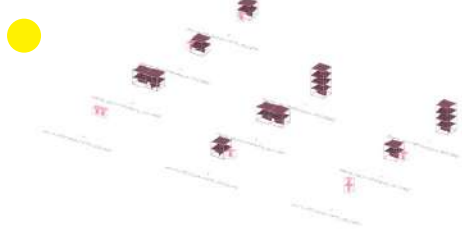
Occlusione



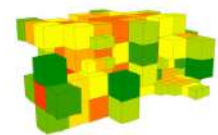
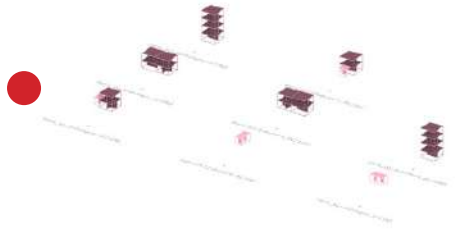
Parti completamente occluse:
0%



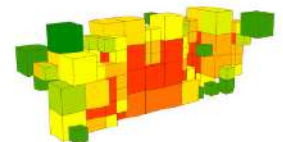
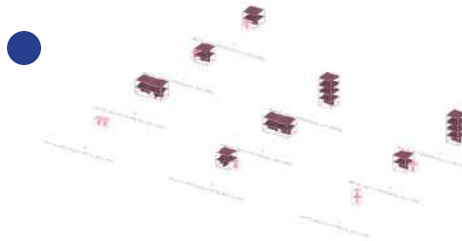
Parti completamente occluse:
3%



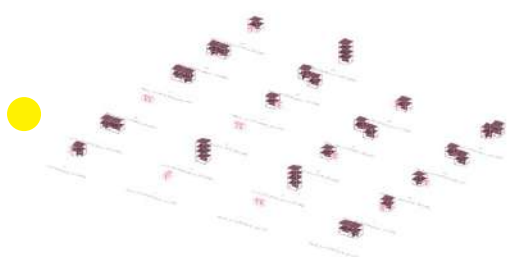
Parti completamente occluse:
0%



Parti completamente occluse:
16%



Parti completamente occluse:
3%



Parti completamente occluse:
0%

Assemblaggio con geometrie

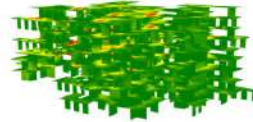
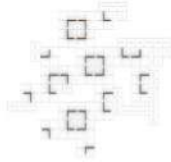
Pianta

Stress/Strenght

Analisi F.U.



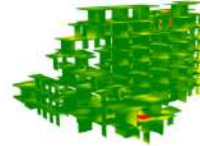
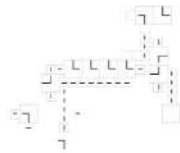
F.U. > 0.8



Range F.U:
0.000075 To 11.123943



% che supera 0.8 di utilizzo:
30 %



Range F.U:
:0.000089 To 14.061587



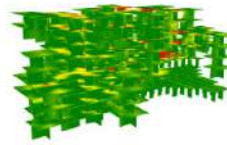
% che supera 0.8 di utilizzo:
33 %



Range F.U:
0.000057 To 220.320448



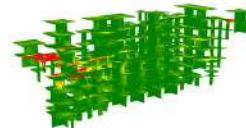
% che supera 0.8 di utilizzo:
58 %



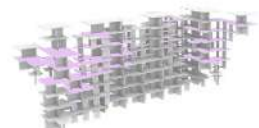
Range F.U:
0.000095 To 128.047258



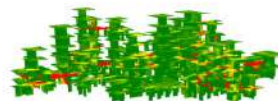
% che supera 0.8 di utilizzo:
30 %



Range F.U:
0.000089 To 1.927384



% che supera 0.8 di utilizzo:
5 %



Range F.U:
0.000089 To 57.884723



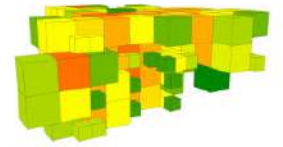
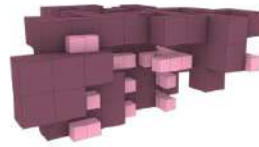
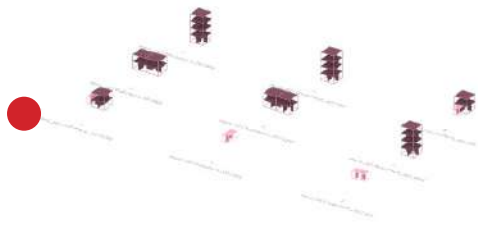
% che supera 0.8 di utilizzo:
34 %

Euristiche

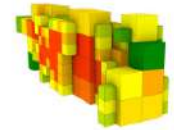
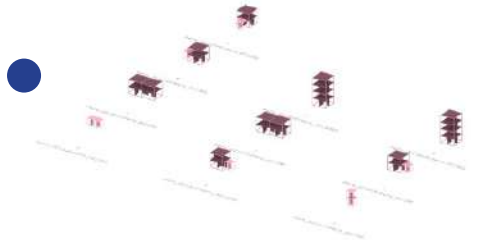
Geometria

Assemblaggio

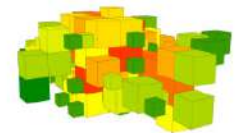
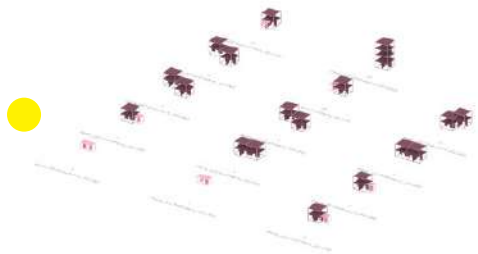
Occlusione



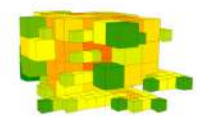
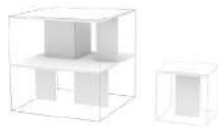
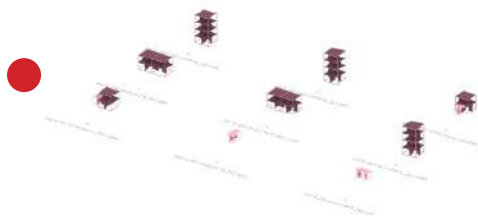
Parti completamente occluse:
0%



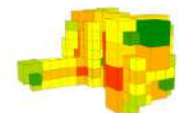
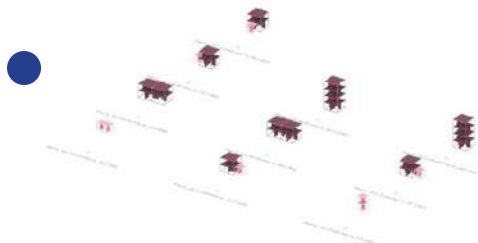
Parti completamente occluse:
3%



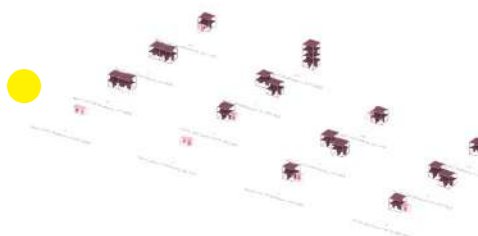
Parti completamente occluse:
1%



Parti completamente occluse:
0.5%



Parti completamente occluse:
0%



Parti completamente occluse:
0%

Assemblaggio con geometrie

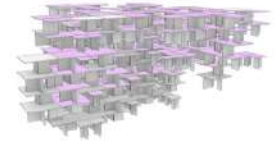
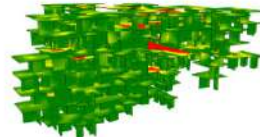
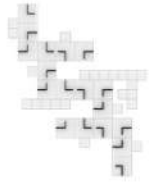
Pianta

Stress/Strenght

Analisi F.U.



F.U. > 0.8



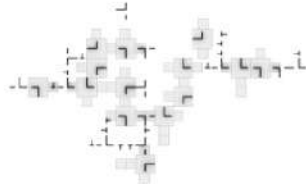
Range F.U:
0.000106 To 38.7273

% che supera 0.8 di utilizzo:
9 %



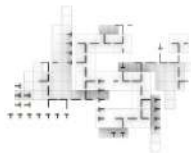
Range F.U:
0.000116 To 3.356327

% che supera 0.8 di utilizzo:
2 %



Range F.U:
0. 0 To 34.133255

% che supera 0.8 di utilizzo:
46 %



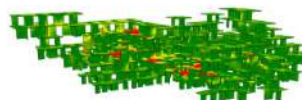
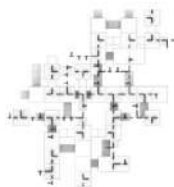
Range F.U:
0.000109 To 46.970

% che supera 0.8 di utilizzo:
16%



Range F.U:
0.000077 To 5.145064

% che supera 0.8 di utilizzo:
3%



Range F.U:
0.0001 To 31.165885

% che supera 0.8 di utilizzo:
25 %

nel caso di elementi a lastra, al fattore di utilizzo. Di tale parametro sono stati analizzati il valore minimo e il valore massimo, nonché l'intervallo complessivo (range), al fine di comprendere il grado di uniformità della distribuzione degli sforzi all'interno dell'assemblaggio. Un range contenuto indica infatti una ripartizione più omogenea delle sollecitazioni, mentre valori molto distanti tra loro evidenziano la presenza di concentrazioni di carico e potenziali criticità locali.

Fig. 101 - Nuovi set con analisi

A livello strutturale è stato inoltre valutato il fattore di utilizzo per singolo elemento, considerando in particolare il valore massimo raggiunto. È stata quindi calcolata la percentuale di elementi che superano il valore soglia di 0,8, assunto come limite prestazionale oltre il quale l'elemento può essere considerato prossimo alla saturazione della propria capacità resistente. Questo indicatore consente di confrontare i diversi set di regole anche in termini di affidabilità strutturale complessiva e di individuare eventuali configurazioni che richiedono ulteriori ottimizzazioni.

Lo studio è partito da set di regole sviluppati in precedenza, identificati dai colori rosso, blu e giallo; successivamente è stata implementata la ricerca di nuovi set di regole, dei quali vengono riportati in Fig. 101 i quattro di maggiore rilievo. Nell'immagine è inoltre riportata un'analisi dell'assemblaggio generata dal programma *Assembler* che colora gli *Assembly Object* in base alla quota del centro di ciascun elemento. Questa rappresentazione è stata utilizzata per ottenere una lettura più chiara dello sviluppo verticale dell'aggregazione e per individuare eventuali sbalzi eccessivi o discontinuità morfologiche.

Le analisi e le sperimentazioni sugli assemblaggi hanno infine portato alla selezione di cinque set di regole, identificati dai colori rosso, blu, viola, verde e grigio. Tali set costituiscono la base di partenza, per quanto riguarda le regole di assemblaggio, per gli sviluppi futuri e le successive prove progettuali, rappresentando un equilibrio tra qualità spaziale, prestazioni strutturali e potenzialità di adattamento funzionale.

Fig. 102 - Anali svolte sui nuovi set (viola, verde, grigio, nero) con due diverse geometrie

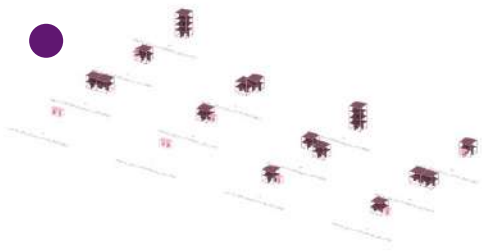
Euristiche

Assemblaggio

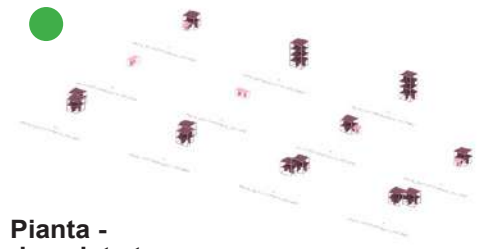
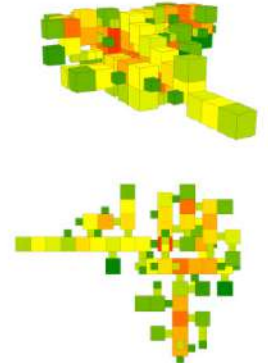
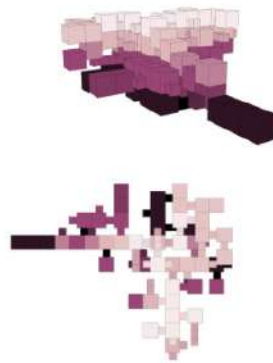
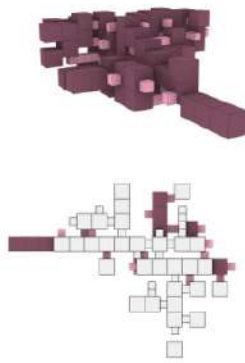
Posizione lungo Z

Occlusione

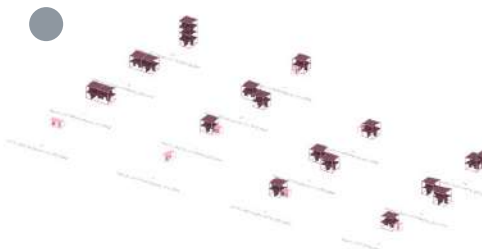
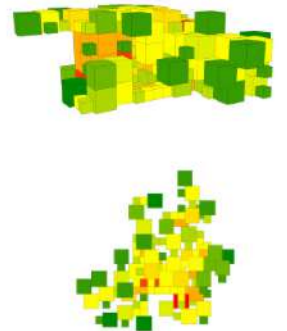
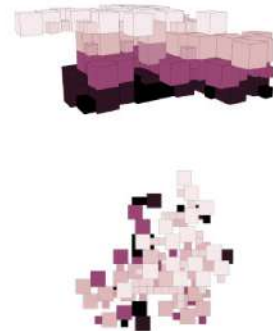
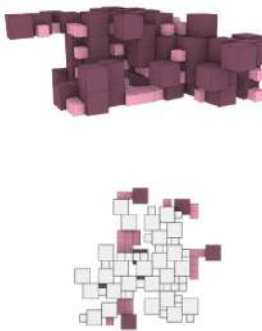
Min Max Min Max



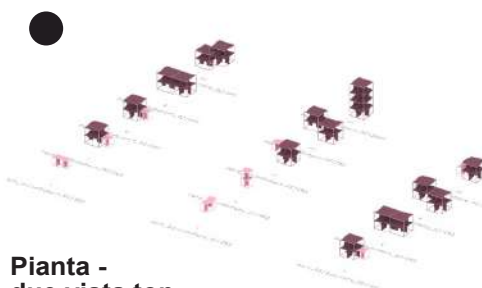
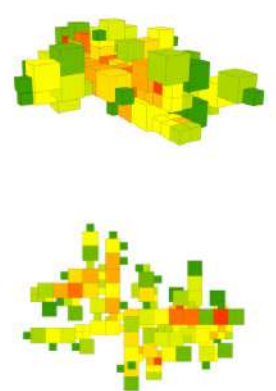
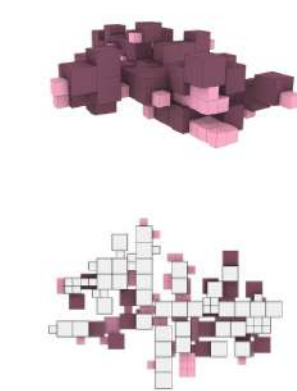
Pianta -
due vista top



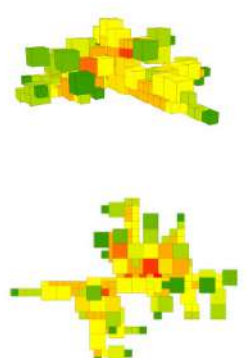
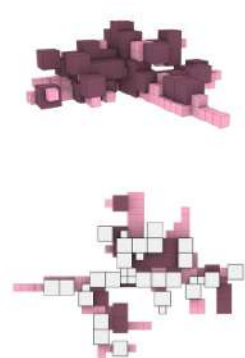
Pianta -
due vista top



Pianta -
due vista top



Pianta -
due vista top

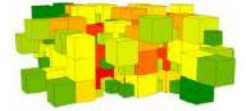
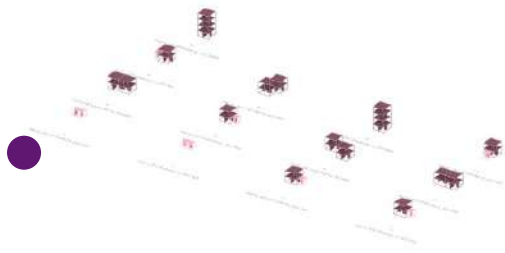


Euristiche

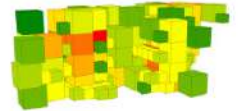
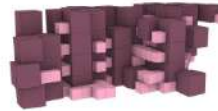
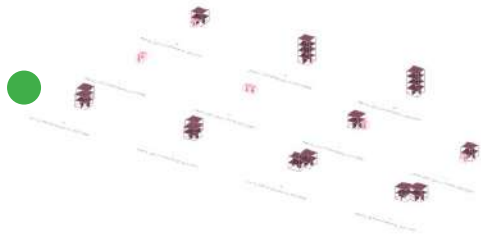
Geometria

Assemblaggio

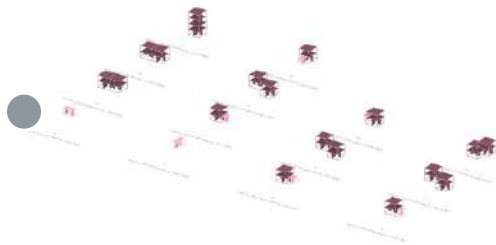
Occlusione



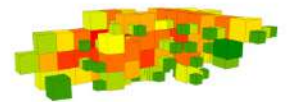
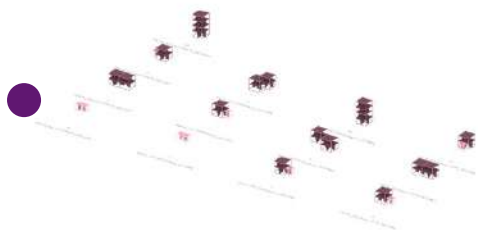
Parti completamente occluse:
1%



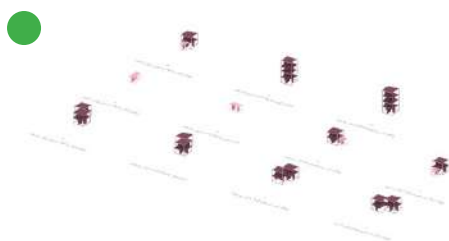
Parti completamente occluse:
3%



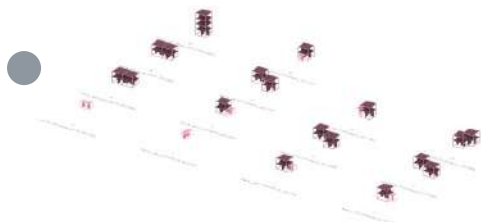
Parti completamente occluse:
4%



Parti completamente occluse:
0%



Parti completamente occluse:
3%



Parti completamente occluse:
4%

Assemblaggio con geometrie

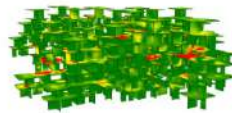
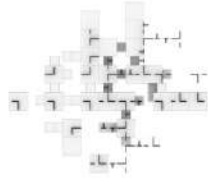
Pianta

Stress/Strenght

Analisi F.U.

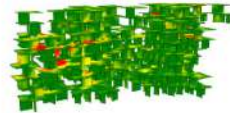


F.U. > 0.8



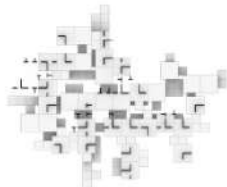
Range F.U:
0.000096 To 58.749634

% che supera 0.8 di utilizzo:
35 %



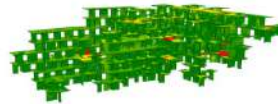
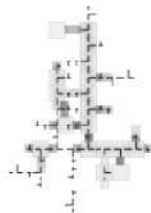
Range F.U:
0.00011 To 6.293322

% che supera 0.8 di utilizzo:
19 %



Range F.U:
0.000139 To 82.320261

% che supera 0.8 di utilizzo:
34 %



Range F.U:
0.000127 To 49.313991

% che supera 0.8 di utilizzo:
30 %



Range F.U:
0.000073 To 67.66902

% che supera 0.8 di utilizzo:
19 %



Range F.U:
0.000131 To 91.935053

% che supera 0.8 di utilizzo:
35 %

Assemblaggio, regole e feedback: costruzione adattiva del sistema di rinforzo

Una parte centrale del lavoro di tesi si è concentrata sulla definizione e sperimentazione di diversi sistemi di rinforzo strutturale, intesi come insiemi di regole capaci di modificare l'assemblaggio in risposta alle sollecitazioni rilevate dall'analisi strutturale. L'obiettivo non era individuare una singola soluzione ottimale, bensì confrontare strategie differenti, valutandone l'efficacia, la coerenza con il sistema di assemblaggio e l'impatto sulla configurazione spaziale complessiva.

Il workflow del sistema prevede una sequenza iterativa composta dalla generazione dell'assemblaggio, seguita da un'analisi strutturale e da una successiva modifica della configurazione sulla base dei risultati ottenuti. In particolare, il parametro guida è il fattore di utilizzo: gli elementi che superano la soglia di 0,8 vengono modificati attraverso l'aggiunta di componenti di rinforzo o variazioni dimensionali, seguite da una nuova analisi strutturale. Il presente sottocapitolo è quindi incentrato su tali sistemi di rinforzo e riporta i principali approcci testati.

I sistemi sperimentati possono essere ricondotti a quattro principali strategie: l'aggiunta di elementi a lastra di rinforzo, l'introduzione di elementi a lastra orientati in funzione del momento flettente, la variazione dello spessore degli elementi esistenti e l'inserimento di elementi lineari monodimensionali. Ciascuna strategia è stata analizzata singolarmente, confrontando per ogni caso le variazioni del displacement e del fattore di utilizzo prima e dopo le modifiche all'assemblaggio, secondo i criteri di analisi esplicitati nei capitoli precedenti. I risultati sono stati successivamente messi a confronto tra loro al fine di individuare la soluzione più coerente rispetto agli obiettivi del progetto.

Una delle prime prove ha previsto l'aggiunta di un elemento di rinforzo a lastra in corrispondenza delle zone maggiormente sollecitate. L'inserimento avviene quando almeno uno degli elementi appartenenti a una parte — o, nel caso della parte con lato pari a 8 m, a uno dei piani che la compongono — supera la soglia di utilizzo strutturale. Tale soglia è stata fissata a 0,8 del valore di utilizzo, calcolato sul percentile 98, al fine di escludere picchi locali isolati e intervenire solo in presenza di una sollecitazione significativa e diffusa. Questo sistema consente di attivare il rinforzo solo dove necessario, mantenendo una logica adattiva coerente con il comportamento globale dell'assemblaggio.

Una seconda strategia ha previsto l'aggiunta di elementi a lastra in funzione del momento flettente massimo. In questo caso, non solo la presenza del rinforzo, ma anche il suo orientamento vengono determinati a partire dall'analisi strutturale: la direzione del momento principale definisce infatti la rotazione dell'elemento aggiunto. Questo approccio introduce una relazione più diretta tra risultati dell'analisi e geometria generata, rendendo leggibile il legame tra sollecitazioni e forma dell'assemblaggio.

Un'ulteriore modifica ha riguardato la variazione dello spessore degli elementi esistenti in funzione del valore di utilizzo. Partendo da uno spessore iniziale di 20 cm, il sistema prevede una riduzione a 15 cm nel caso in cui il valore di utilizzo sia inferiore a 0,2, mentre al superamento della soglia di 0,3 lo spessore viene incrementato fino a 30 cm. Questa strategia consente di redistribuire il materiale in modo più efficiente, aumentando la sezione solo dove necessario e riducendola nelle zone meno sollecitate.

L'ultimo sistema di rinforzo testato prevede l'introduzione di elementi lineari monodimensionali. Questo approccio è stato inizialmente sperimentato in tre configurazioni, utilizzando regole analoghe a quelle adottate nei casi precedenti (Fig. XXX). Le diverse configurazioni e i risultati ottenuti sono messi a confronto nelle Fig. XXX, evidenziando come l'introduzione di elementi lineari consenta di rafforzare selettivamente l'assemblaggio, mantenendo una maggiore leggibilità del sistema e una minore invasività geometrica.

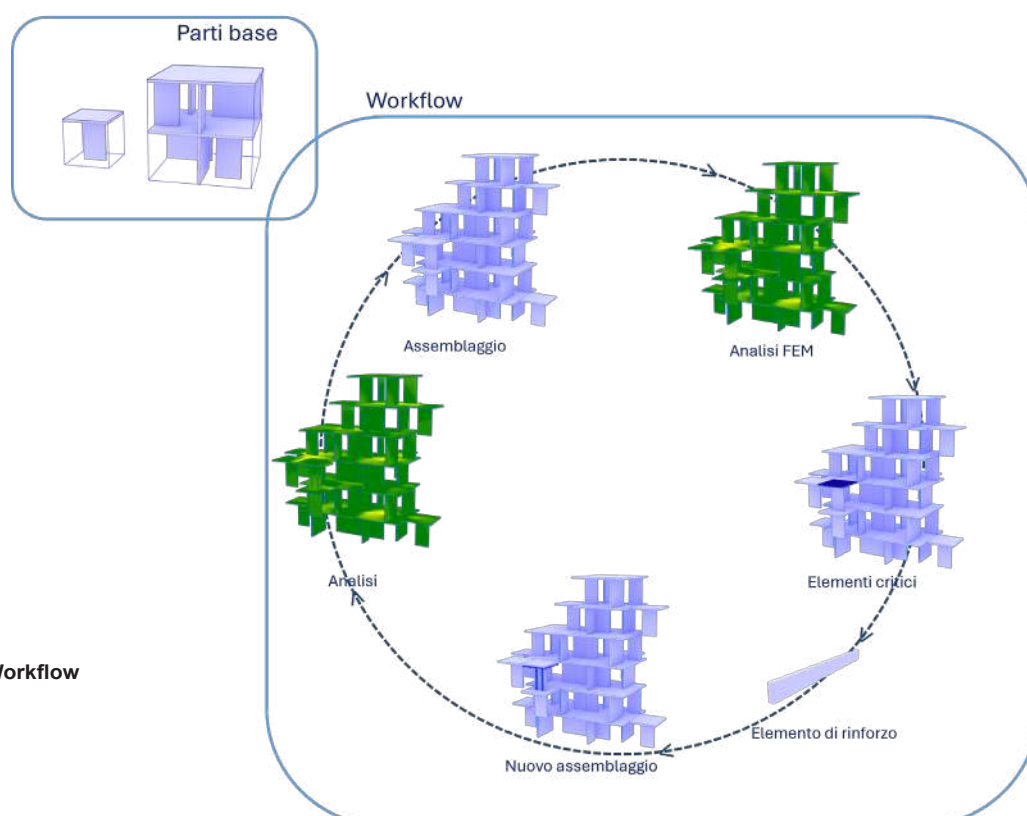
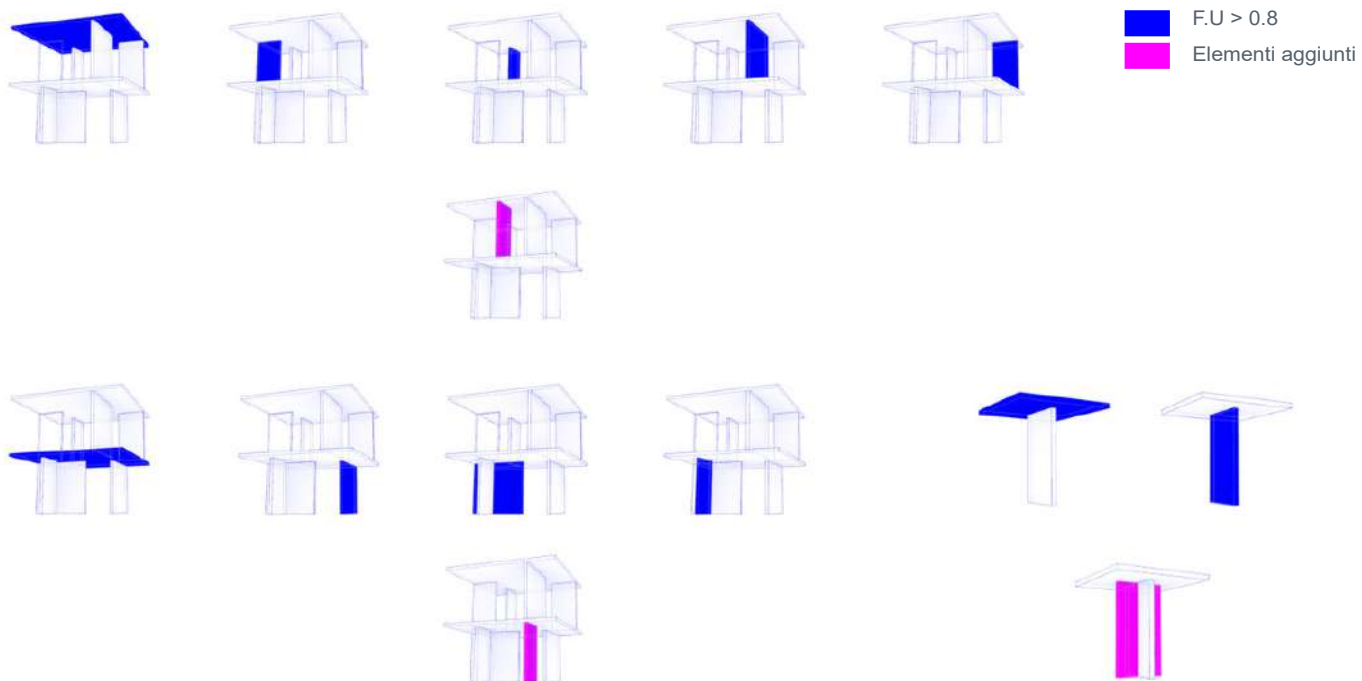


Fig. 103 - schema del Workflow seguito

**Sistema di rinforzo
aggiunta di elementi a lastra - caso 1**



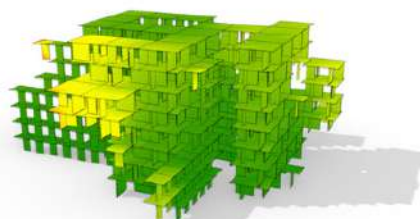
**Analisi strutturale
Spostamento (cm)**



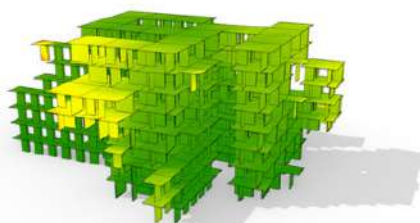
Assemblaggio



Assemblaggio modificato

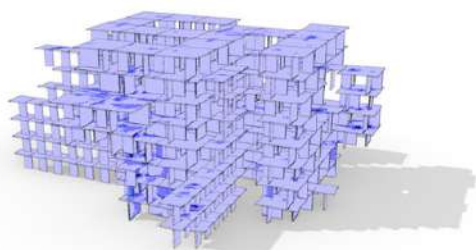


Assemblaggio - spostamento

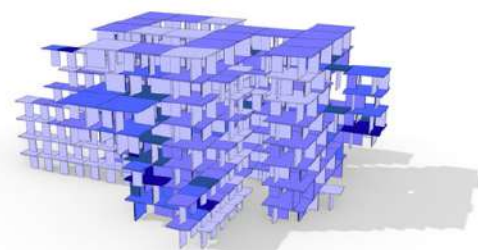


Assemblaggio modificato - spostamento

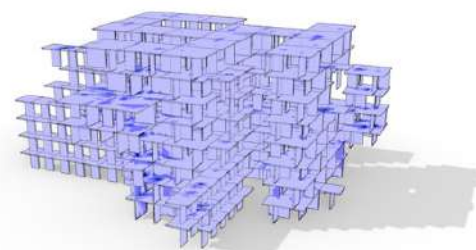
**Analisi strutturale
Fattore di Utilizzo**



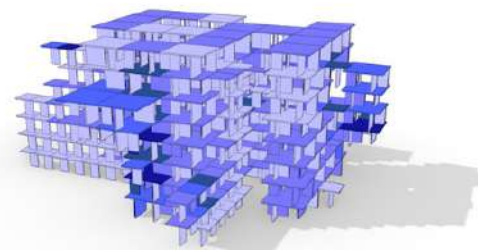
Assemblaggio - F.U.



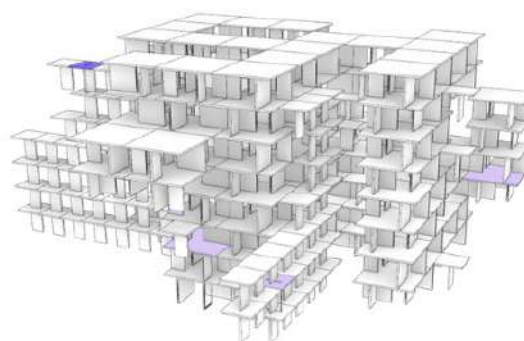
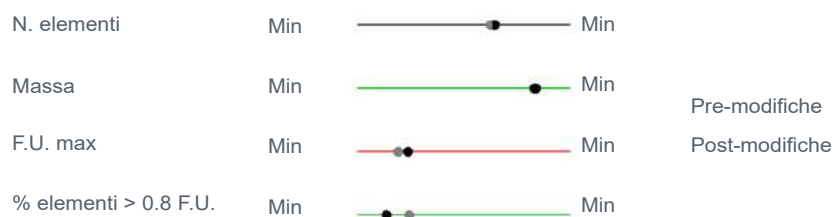
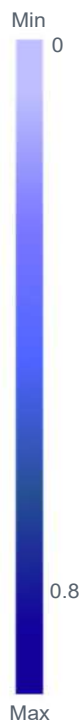
Assemblaggio - F.U. per elemento



Assemblaggio modificato - F.U.



Assemblaggio modificato - F.U. per elemento

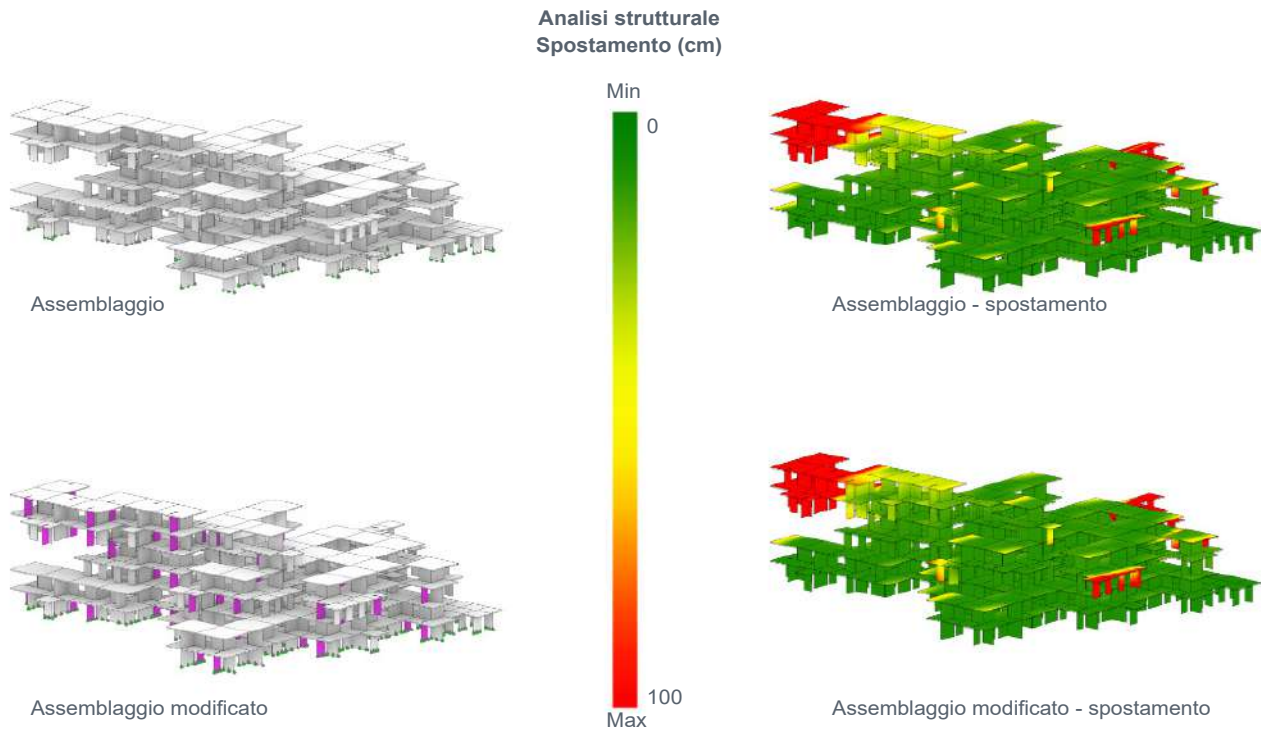
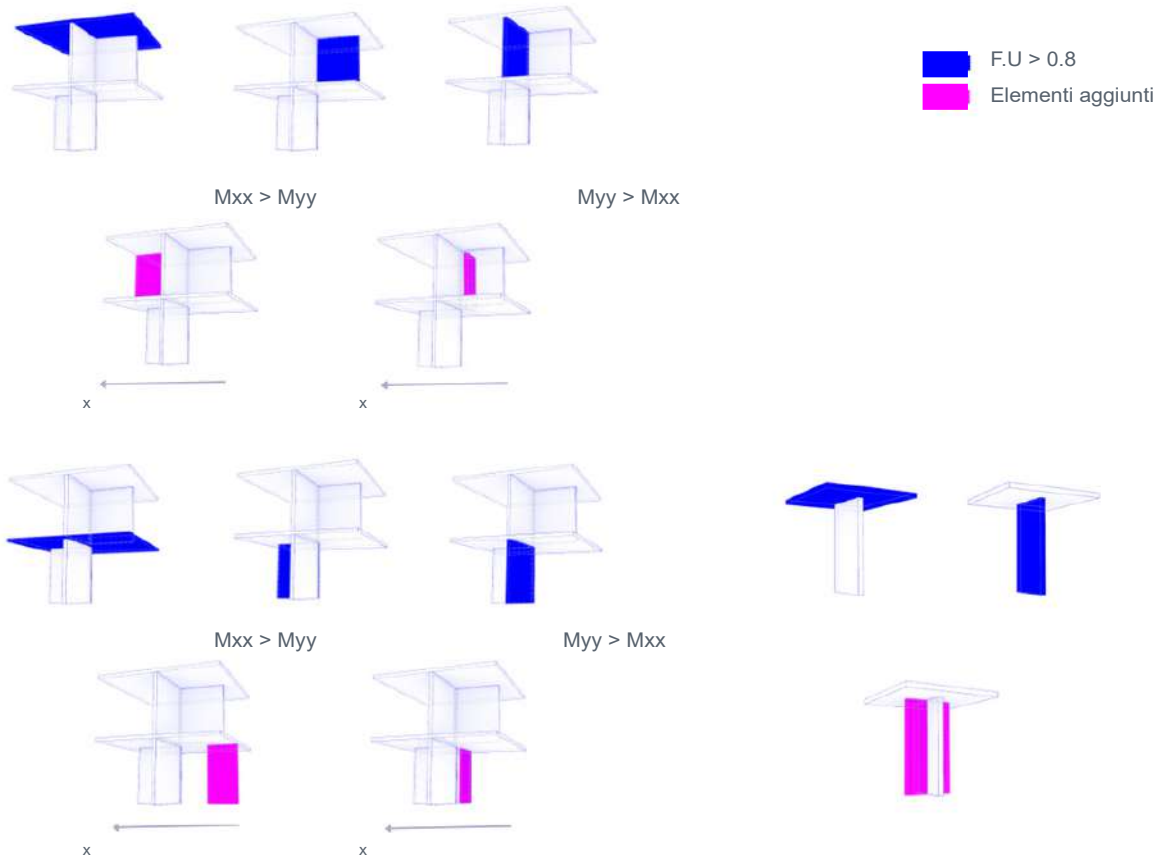


Confronto prima e dopo le modifiche

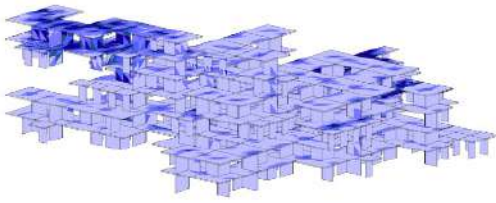
- Riduzioni sotto soglia:** elementi che superavano la soglia inizialmente ma non la superano più dopo le modifiche.
- Superamenti costanti:** elementi che risultano sopra soglia sia prima che dopo le modifiche.
- Nuovi superamenti:** elementi che superano la soglia solo a seguito delle modifiche.

**Fig. 104 - Sistema di rinforzo
caso aggiunta lastre - analisi**

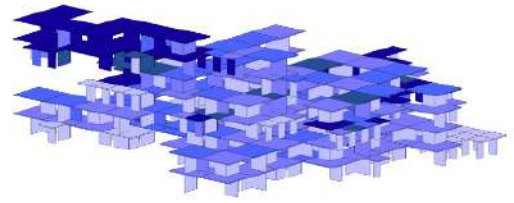
**Sistema di rinforzo
aggiunta di elementi a lastra - caso 2**



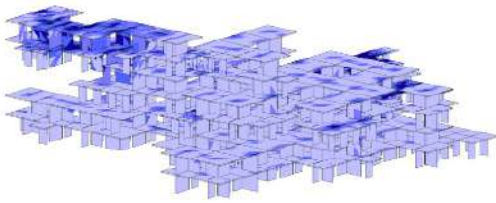
**Analisi strutturale
Fattore di Utilizzo**



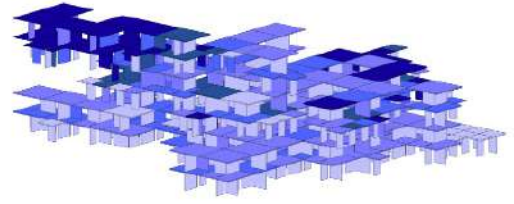
Assemblaggio - F.U.



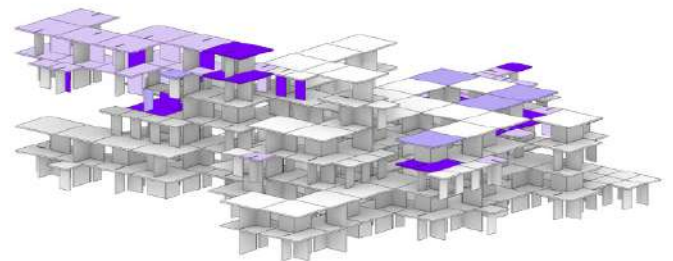
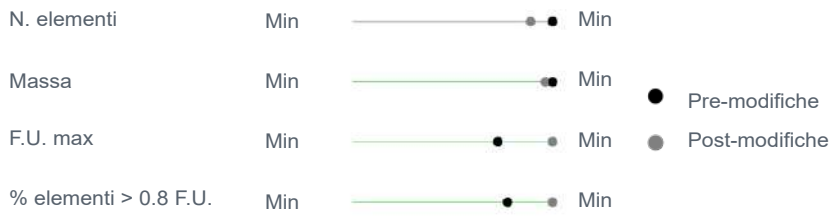
Assemblaggio - F.U. per elemento



Assemblaggio modificato - F.U.



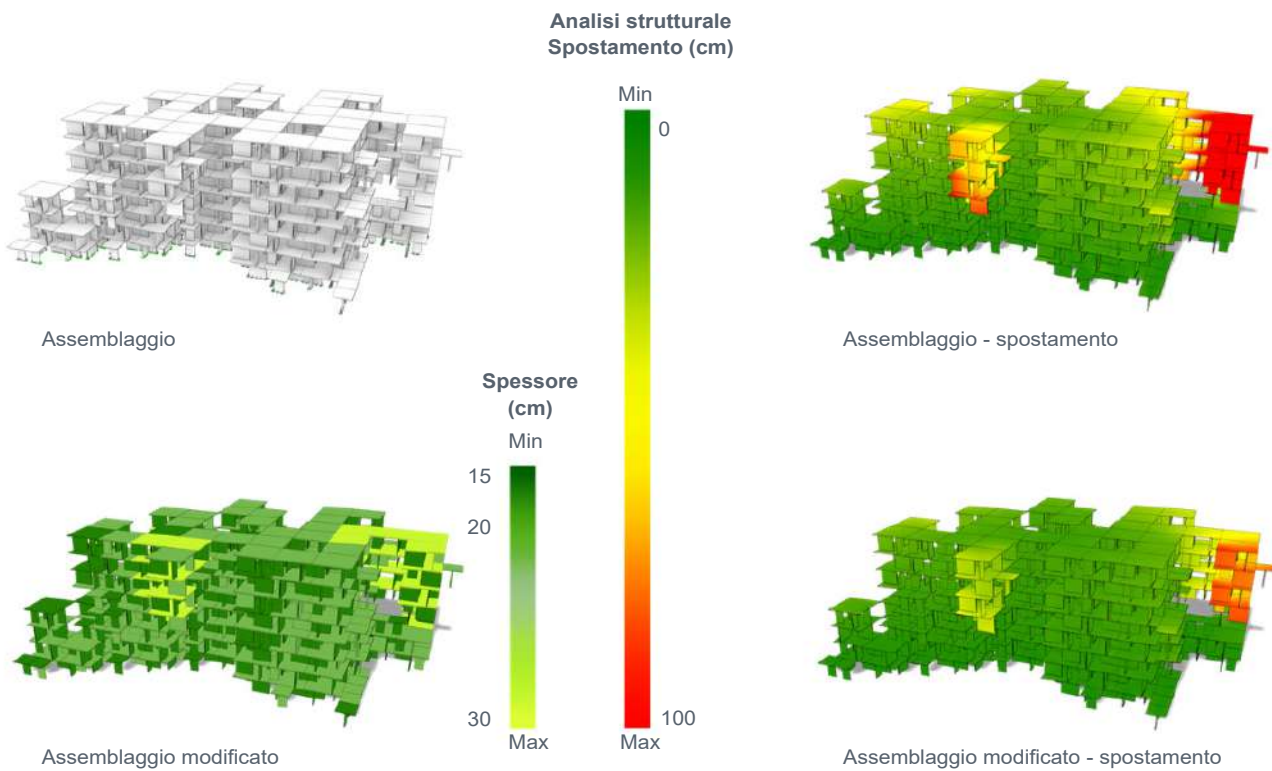
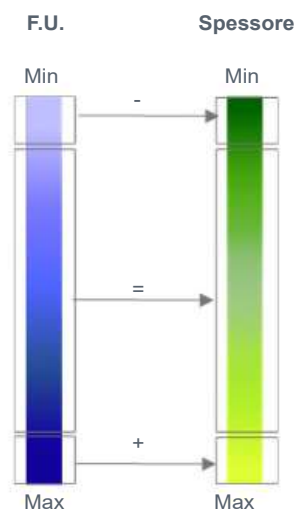
Assemblaggio modificato - F.U. per elemento



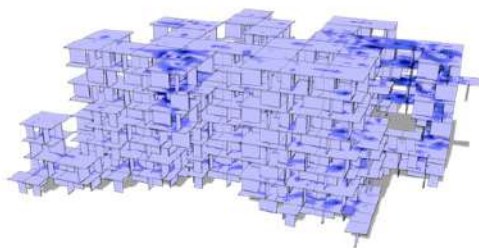
- Riduzioni sotto soglia:** elementi che superavano la soglia inizialmente ma non la superano più dopo le modifiche.
- Superamenti costanti:** elementi che risultano sopra soglia sia prima che dopo le modifiche.
- Nuovi superamenti:** elementi che superano la soglia solo a seguito delle modifiche.

Fig. 105 - Sistema di rinforzo caso aggiunta lastre in base al momento - analisi

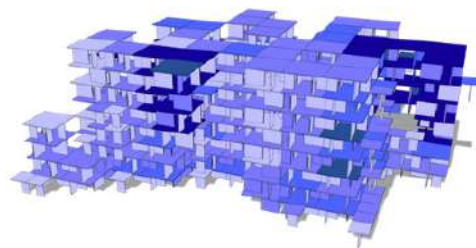
**Sistema di rinforzo
Modifica spessore**



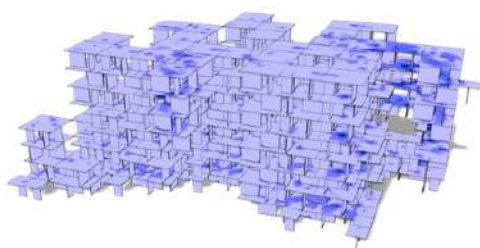
**Analisi strutturale
Fattore di Utilizzo**



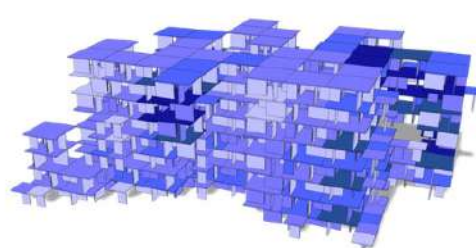
Assemblaggio - F.U



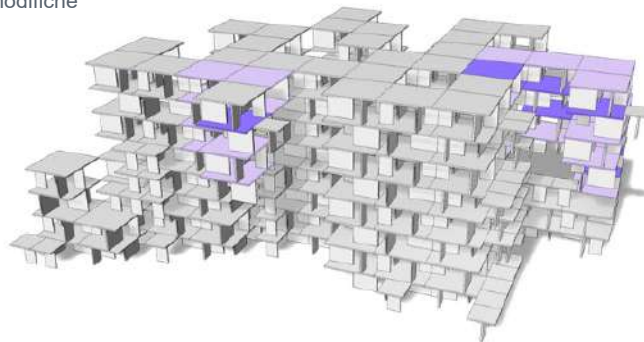
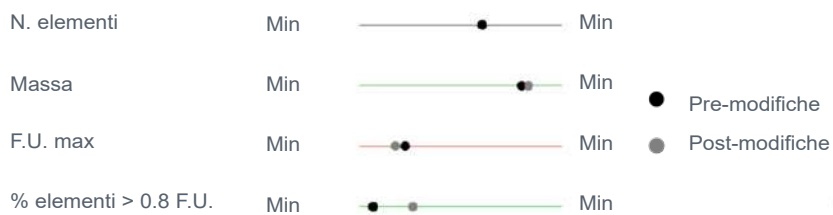
Assemblaggio - F.U per elemento



Assemblaggio modificato - F.U.



Assemblaggio modificato - F.U. per elemento

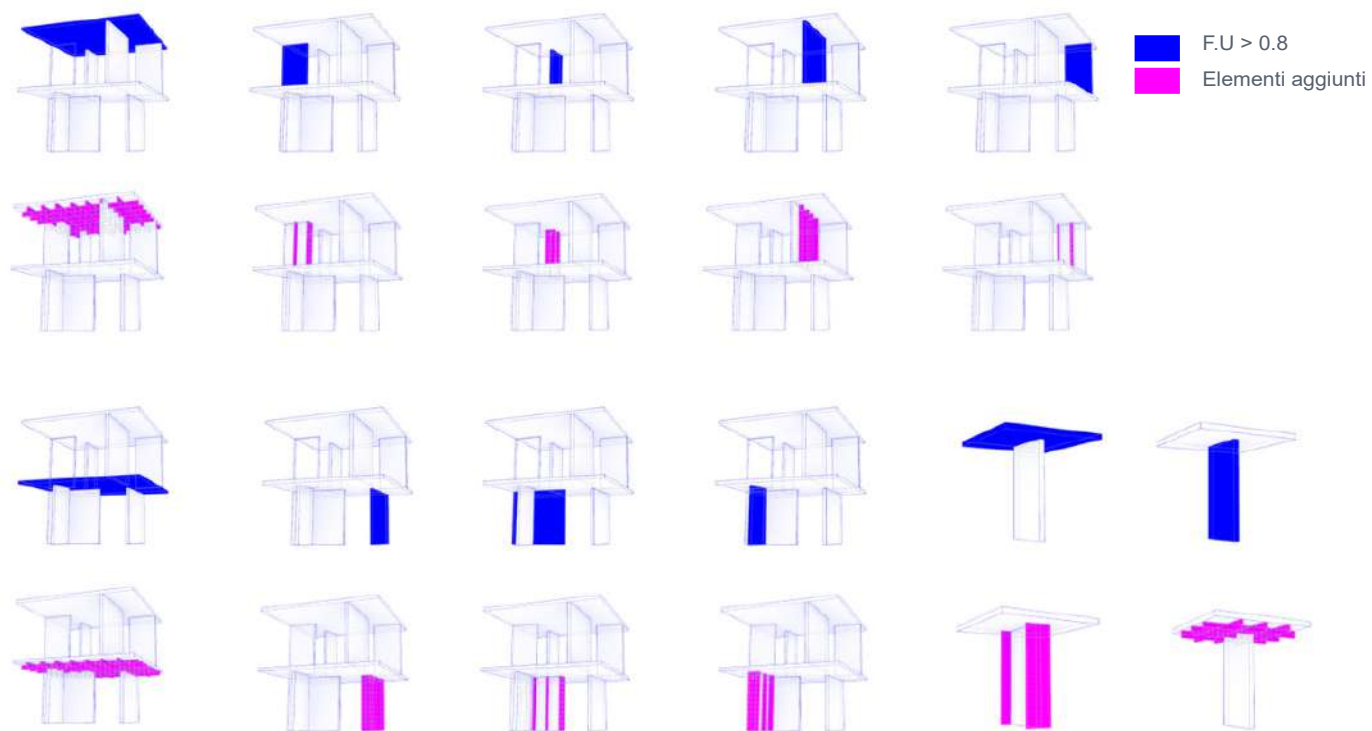


Confronto prima e dopo le modifiche

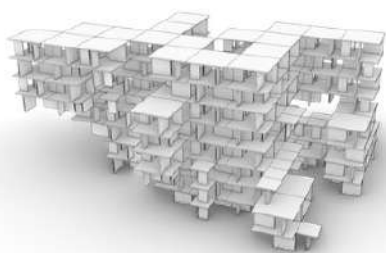
- Riduzioni sotto soglia:** elementi che superavano la soglia inizialmente ma non la superano più dopo le modifiche.
- Superamenti costanti:** elementi che risultano sopra soglia sia prima che dopo le modifiche.
- Nuovi superamenti:** elementi che superano la soglia solo a seguito delle modifiche.

Fig. 106 - Sistema di rinforzo caso modifica spessore - analisi

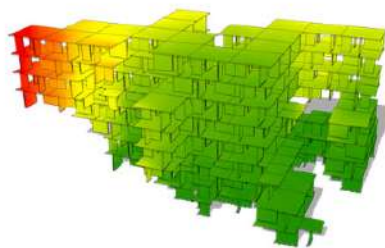
**Sistema di rinforzo
aggiunta di elementi lineari - caso 1**



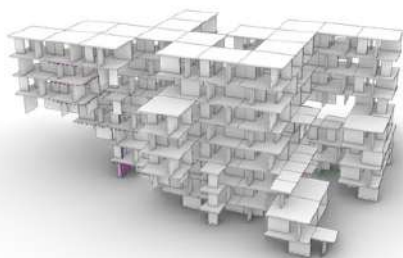
**Analisi strutturale
Spostamento (cm)**



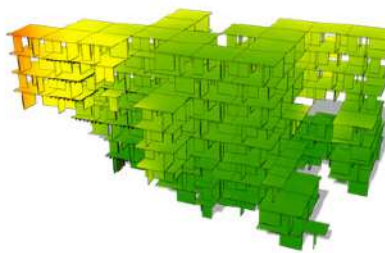
Assemblaggio



Assemblaggio - spostamento

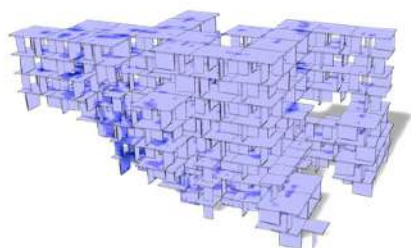


Assemblaggio modificato

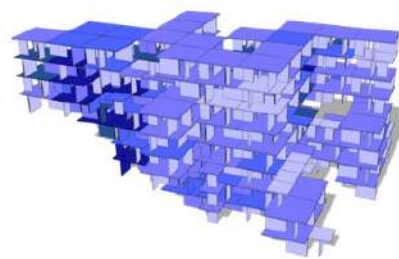


Assemblaggio modificato - spostamento

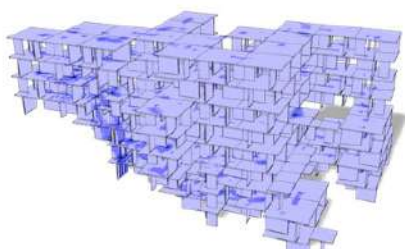
**Analisi strutturale
Fattore di Utilizzo**



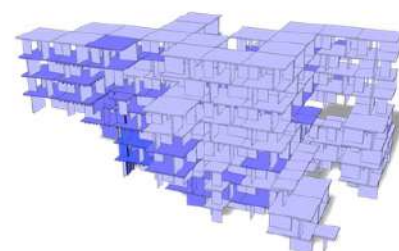
Assemblaggio - F.U.



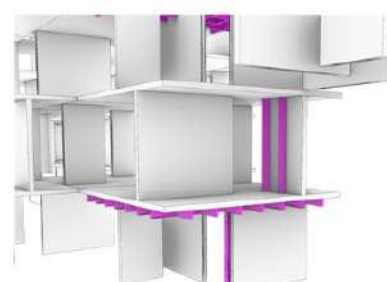
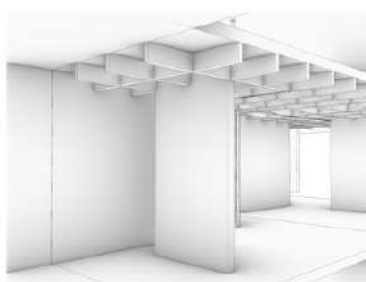
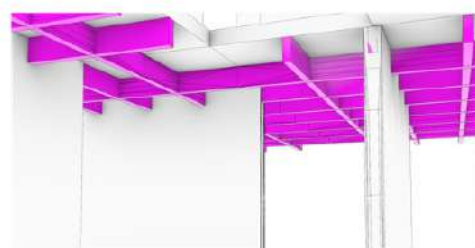
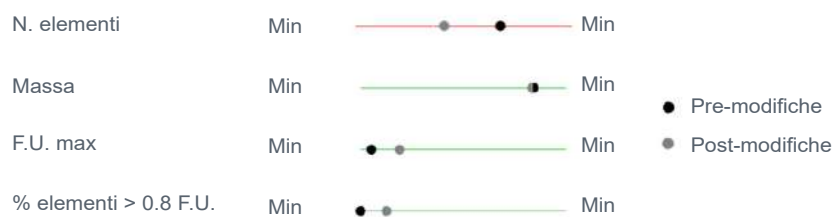
Assemblaggio - F.U. per elemento



Assemblaggio modificato - F.U.



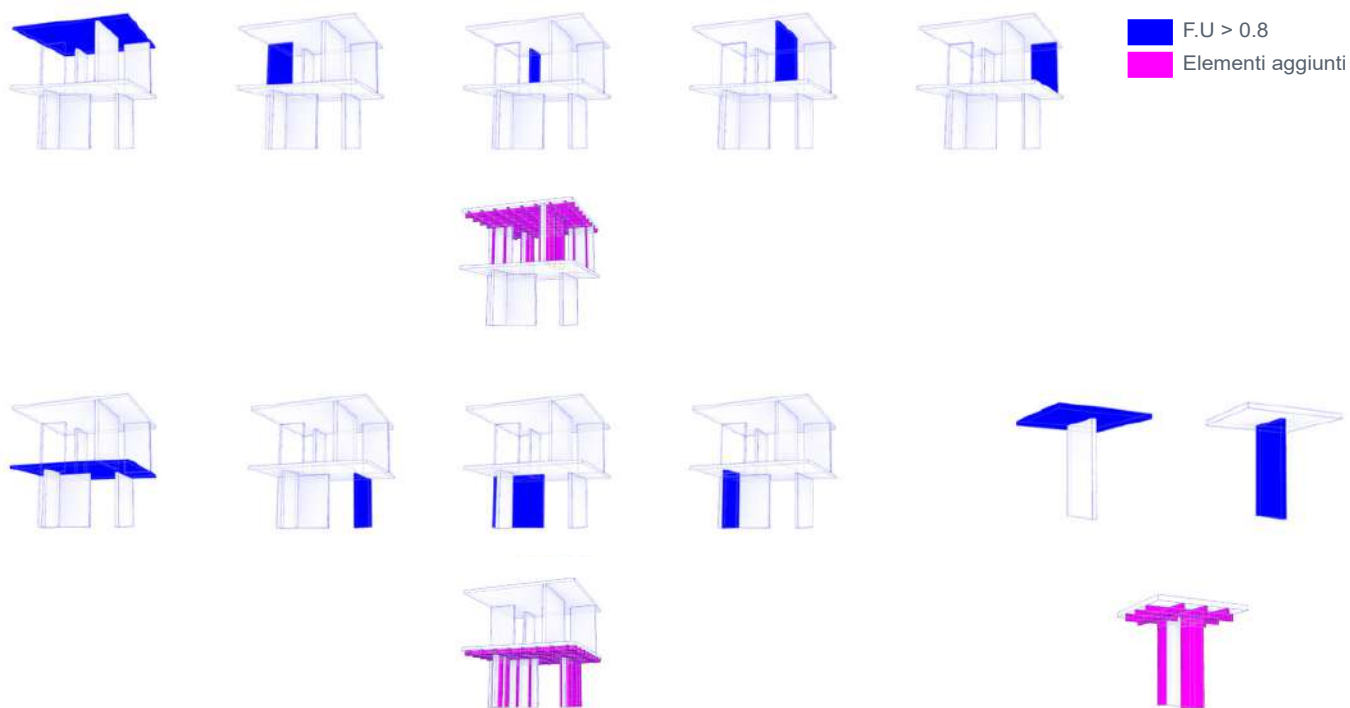
Assemblaggio modificato - F.U. per elemento



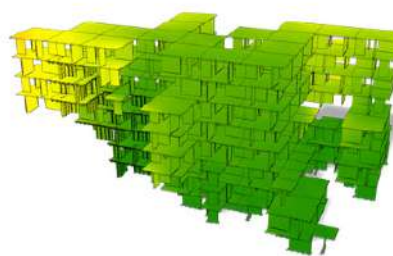
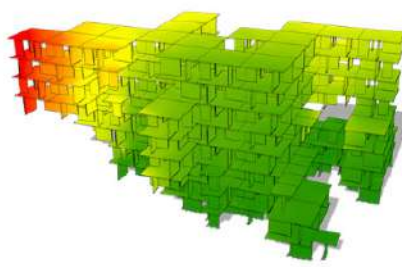
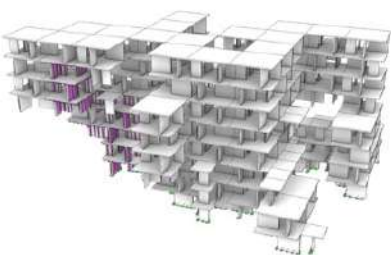
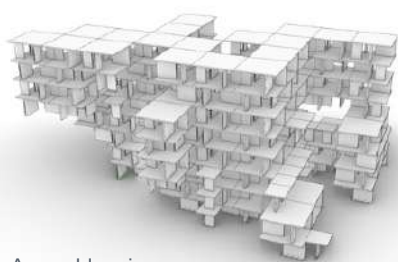
Zoom dell'assemblaggio dopo le modifiche

**Fig. 107 - Sistema di rinforzo
caso 1 aggiunta elementi
monodimensionali - analisi**

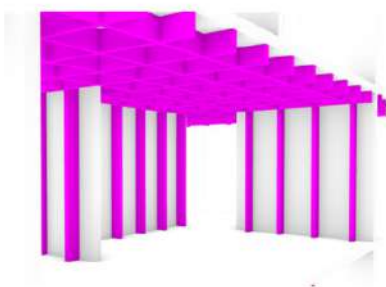
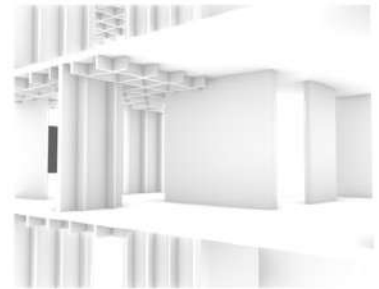
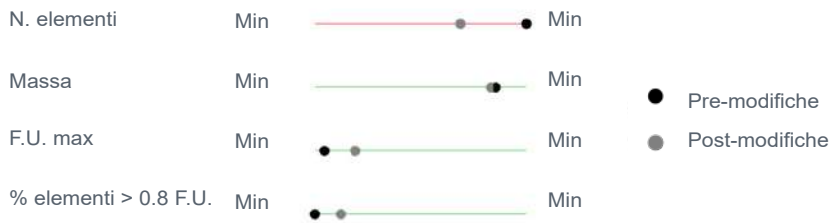
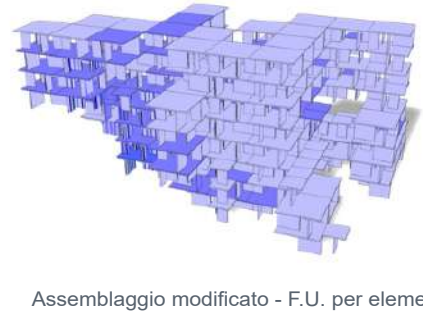
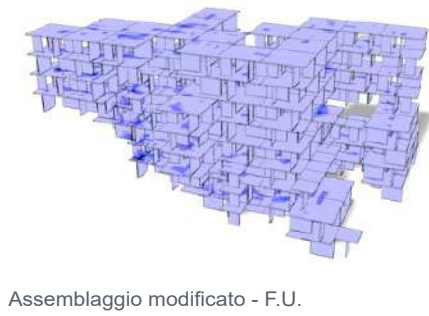
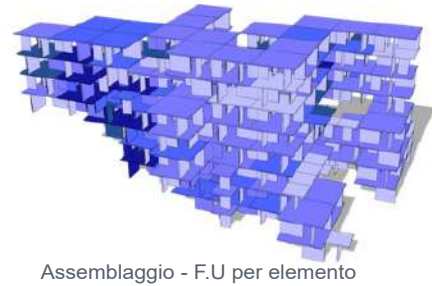
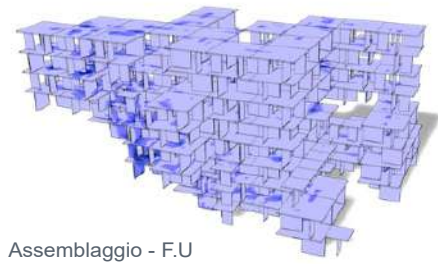
**Sistema di rinforzo
aggiunta di elementi lineari - caso 2**



**Analisi strutturale
Spostamento (cm)**



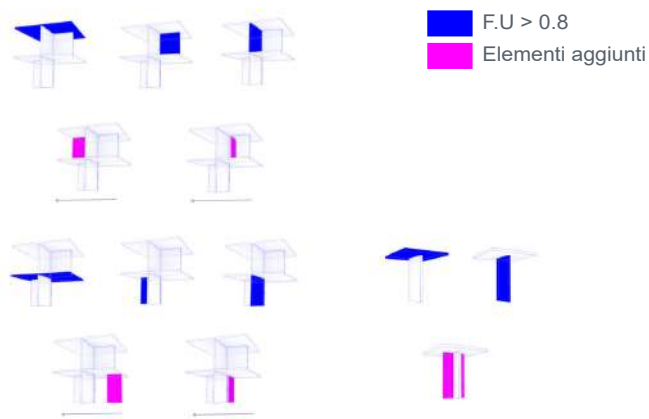
**Analisi strutturale
Fattore di Utilizzo**



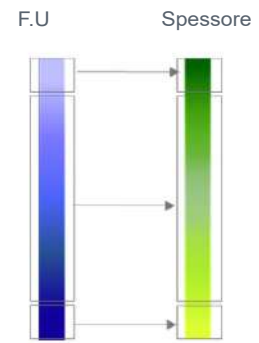
Zoom dell'assemblaggio dopo le modifiche

**Fig. 108 - Sistema di rinforzo
caso 2 aggiunta elementi
monodimensionali - analisi**

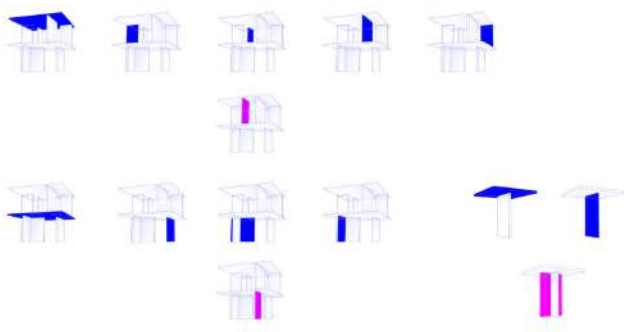
Confronto



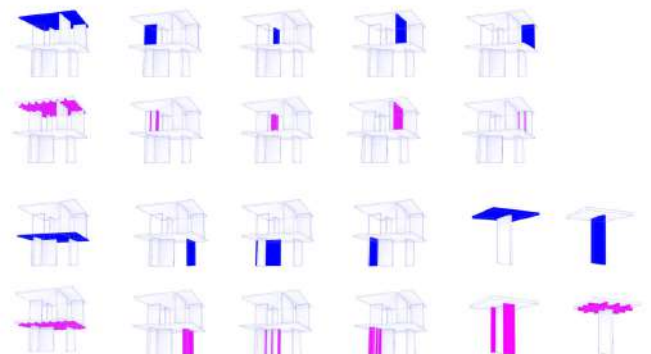
Aggiunta lastre - caso 2 - momento



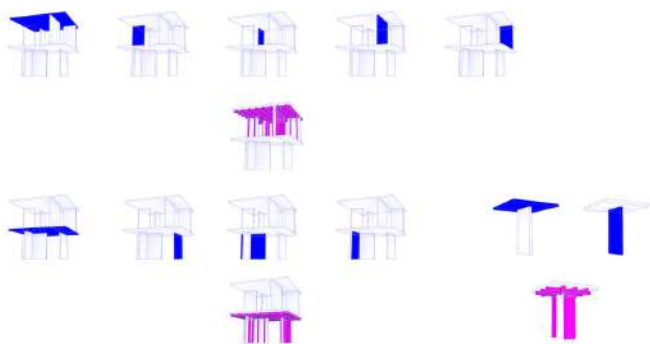
Modifica spessore



Aggiunta lastre - caso 1

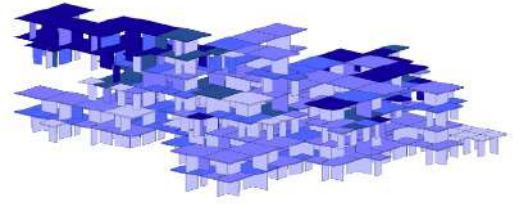
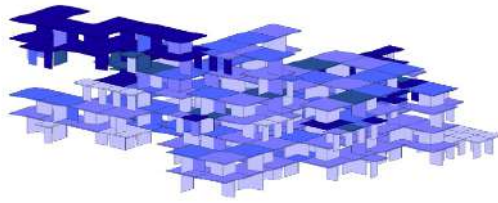


Aggiunta elementi lineari - caso 1

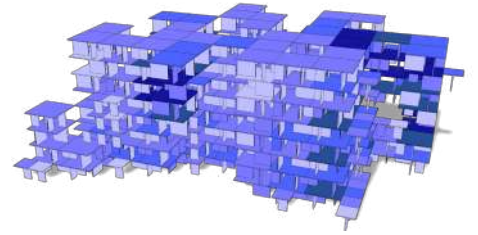
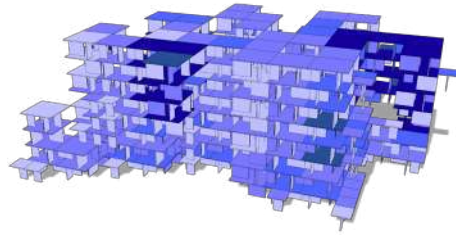


Aggiunta elementi lineari - caso 2

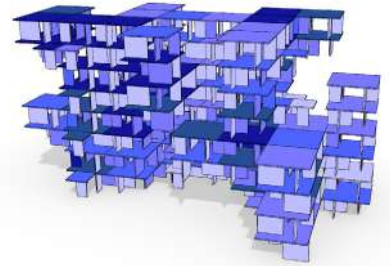
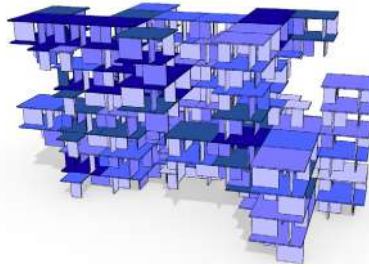
Aggiunta lastre - caso 2



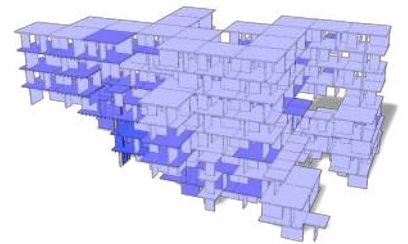
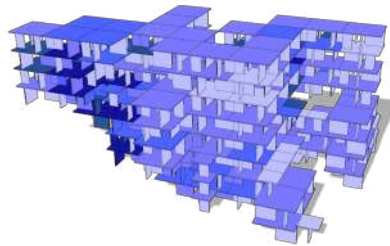
Modifica spessore



Aggiunta lastre - caso 1



Aggiunta elementi lineari - caso 1



Aggiunta elementi lineari - caso 2

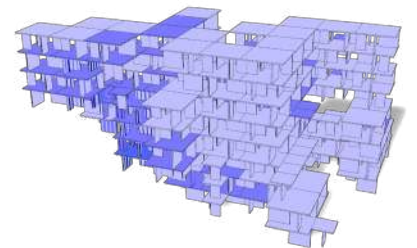
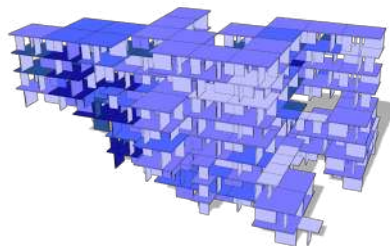


Fig. 109 - Sistema di rinforzo
- confronto

Tali risultati hanno condotto a un successivo approfondimento del sistema di rinforzo mediante elementi lineari. Sono state quindi testate ulteriori quattro configurazioni (Fig. da 111 a 114), caratterizzate dall'introduzione di elementi di base presenti in ogni AO indipendentemente dai risultati dell'analisi strutturale, con l'obiettivo di garantire continuità visiva e strutturale al sistema. In generale, tali configurazioni assumono la forma di una struttura a travi assimilabile a un cassettonato, il cui passo viene infittito al superamento della soglia di fattore di utilizzo. Tra le soluzioni testate, il caso 6 è stato selezionato come sistema di rinforzo di riferimento (Fig. 113), in quanto quello che maggiormente rende leggibile la risposta strutturale dell'assemblaggio. La configurazione adottata consente infatti di evidenziare con chiarezza le zone soggette a rinforzo e quelle che non lo richiedono, traducendo visivamente il comportamento della struttura e rendendo percepibile all'osservatore la distribuzione delle sollecitazioni.

Parallelamente ai sistemi di aggiunta e modifica, sono state testate alcune operazioni di rimozione, con l'obiettivo di semplificare l'assemblaggio e ridurre comportamenti strutturali indesiderati. Tra queste, la rimozione di AO e la rimozione di geometrie. Quest'ultima consiste nell'eliminazione degli elementi che contribuiscono in modo nullo o trascurabile alla risposta strutturale complessiva, individuati come quelli con fattore di utilizzo inferiore a 0,5. Tale operazione consente di alleggerire il sistema senza comprometterne il comportamento globale. Tuttavia, questo approccio non è stato ulteriormente sviluppato: pur risultando interessante, non è stato ritenuto coerente con l'obiettivo di definire un sistema capace di adattarsi a esigenze future, quali variazioni dei carichi, e i risultati spaziali emersi non rispecchiavano gli obiettivi del progetto.

Nel complesso, i sistemi di rinforzo sperimentati non sono stati intesi come soluzioni puntuali a un problema strutturale, ma come insiemi di regole adattive capaci di modificare localmente l'assemblaggio in risposta ai risultati dell'analisi globale. L'intero processo si basa su una logica di feedback, in cui grandezze quantitative, quali il fattore di utilizzo o il momento flettente, attivano soglie decisionali che determinano aggiunte, rimozioni o variazioni dimensionali degli elementi. Tali grandezze non sono assunte come parametri di verifica strutturale in senso normativo, bensì come indicatori comparativi utili a orientare le scelte progettuali all'interno di un processo esplorativo e iterativo.

In questo senso, il comportamento strutturale dell'assemblaggio non è imposto a priori, ma emerge dalla reiterazione di operazioni locali, ciascuna delle quali contribuisce alla stabilizzazione del sistema

nel suo insieme. Il progetto assume quindi la forma di un processo aperto e iterativo, in cui la configurazione finale non è predeterminata, ma risulta dall'interazione continua tra regole, vincoli strutturali e trasformazioni progressive dell'assemblaggio. Un aspetto centrale del sistema è inoltre la sua flessibilità e apertura a configurazioni future: trattandosi di un sistema assemblato a secco, gli elementi di rinforzo possono essere aggiunti, rimossi o riconfigurati nel tempo, consentendo all'edificio di adattarsi a variazioni dei carichi, a nuovi requisiti funzionali o a trasformazioni d'uso, senza compromettere la coerenza complessiva dell'assemblaggio.

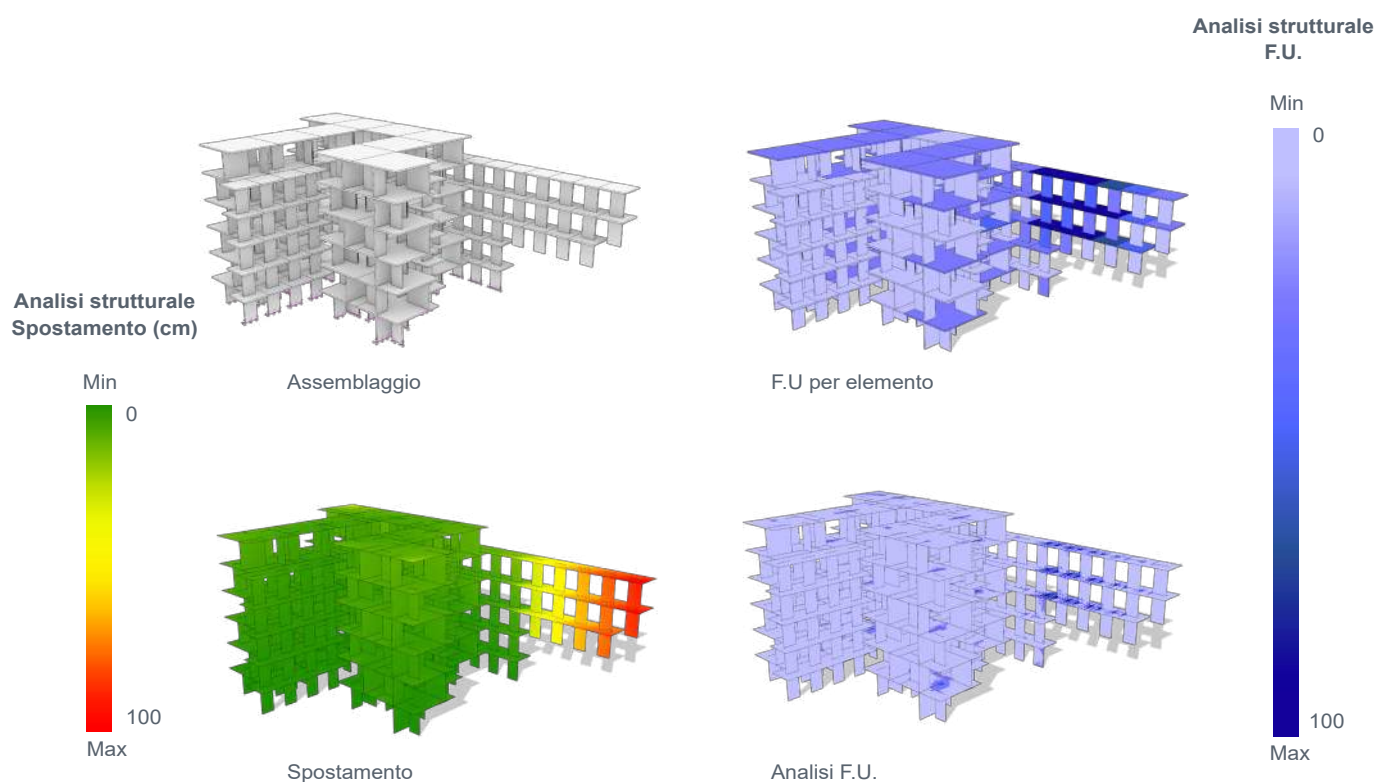
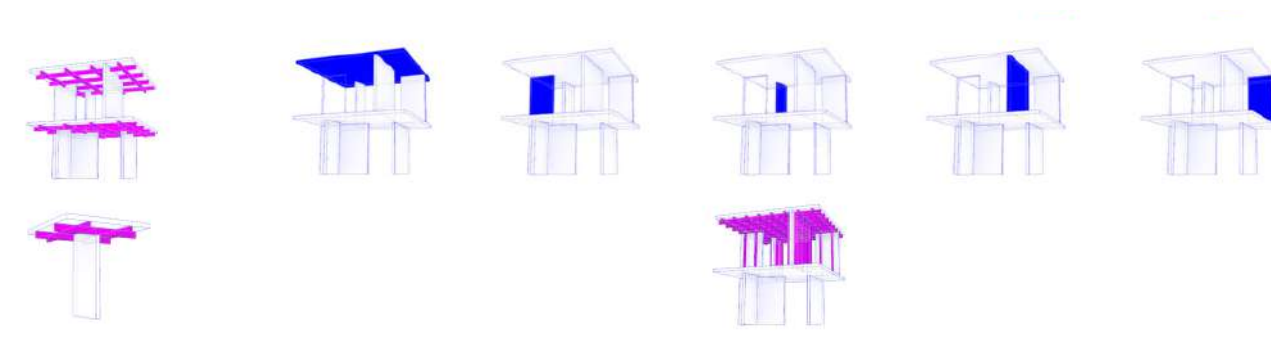


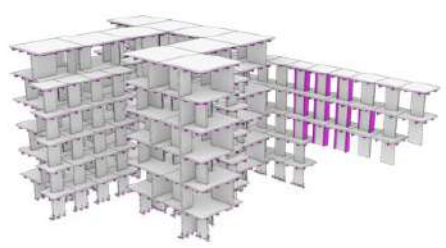
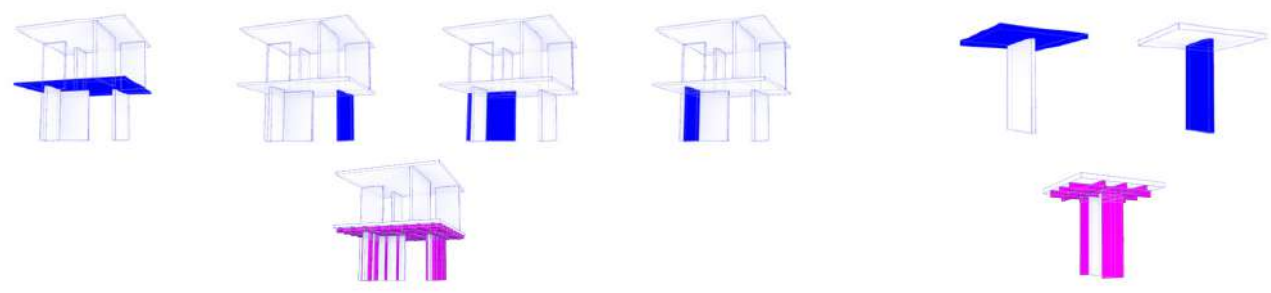
Fig. 110 - Assemblaggio 200 iterazioni con analisi
 - assemblaggi base per le prossime analisi

**Sistema di rinforzo
aggiunta di elementi lineari - caso 4**

■ F.U > 0.8
■ Elementi aggiunti



Aggiunte ad ogni componente



Assemblaggio modificato



Zoom interno



Zoom interno



Zoom interno



Zoom interno

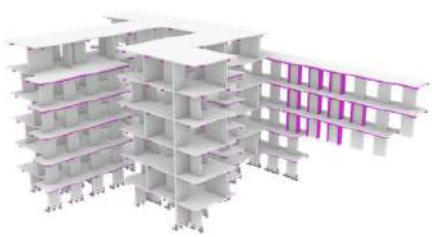
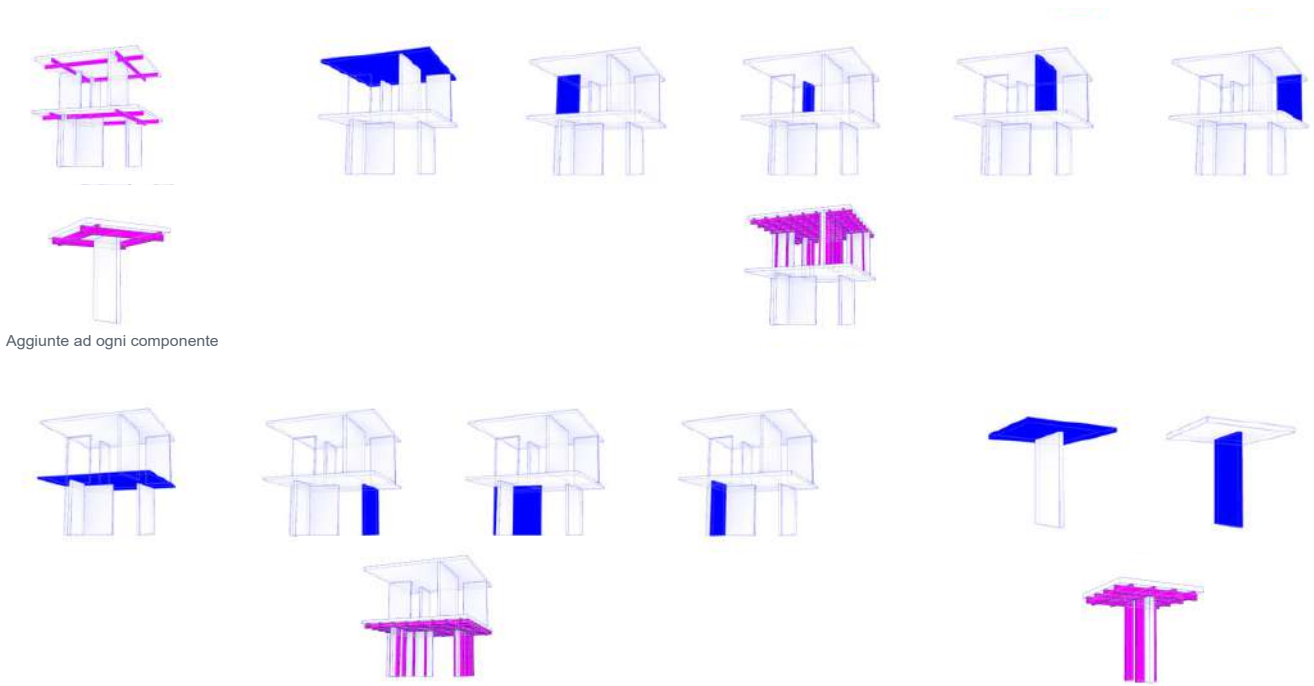


Zoom interno

**Fig. 111 - Sistema di rinforzo
caso 4 aggiunta elementi
monodimensionali**

**Sistema di rinforzo
aggiunta di elementi lineari - caso 5**

■ F.U > 0.8
■ Elementi aggiunti



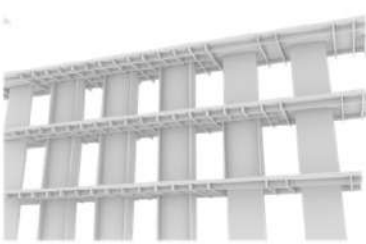
Assemblaggio modificato



Zoom interno



Bottom view



Zoom interno



Zoom interno

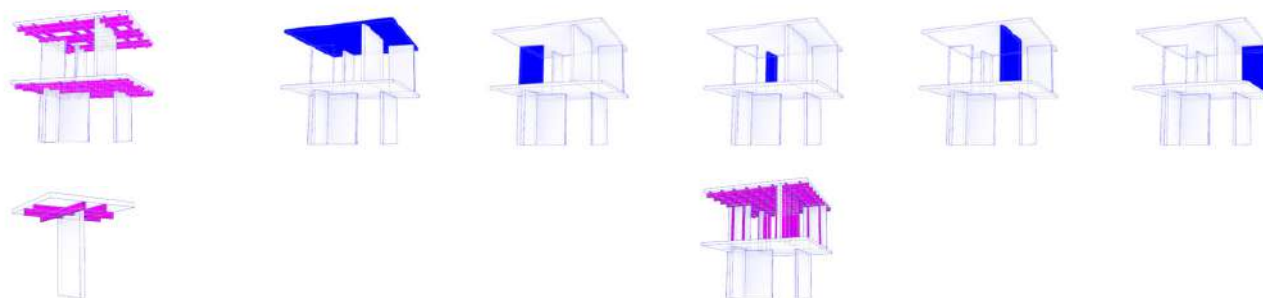


Bottom view

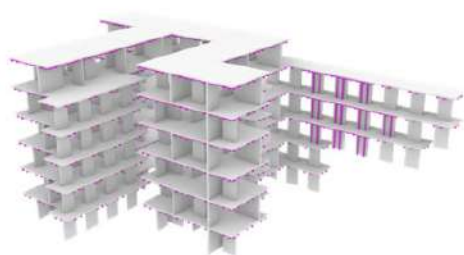
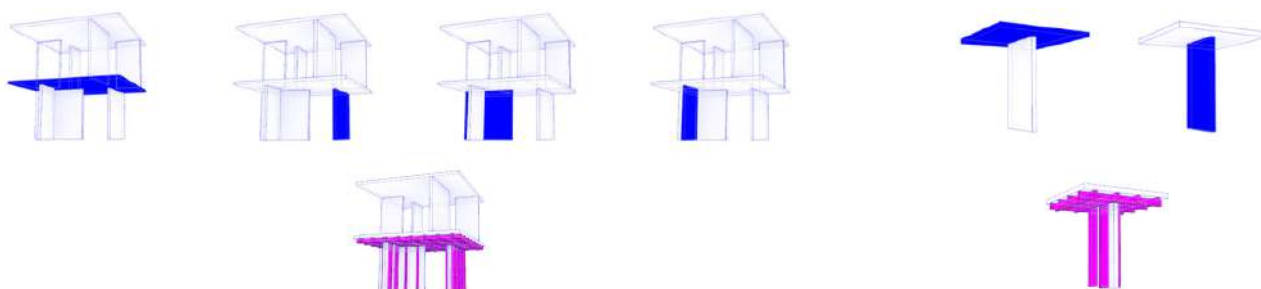
**Fig. 112 - Sistema di rinforzo
caso 5 aggiunta elementi
monodimensionali**

**Sistema di rinforzo
aggiunta di elementi lineari - caso 6**

■ F.U > 0.8
■ Elementi aggiunti



Aggiunte ad ogni componente



Assemblaggio modificato



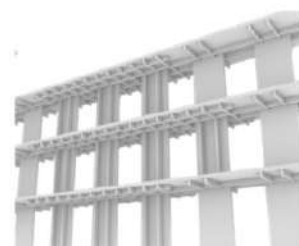
Zoom interno



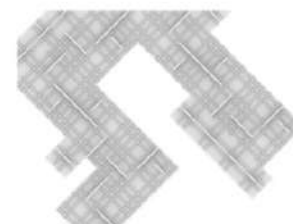
Bottom view



Zoom interno



Zoom interno

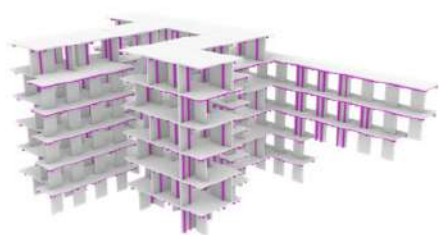
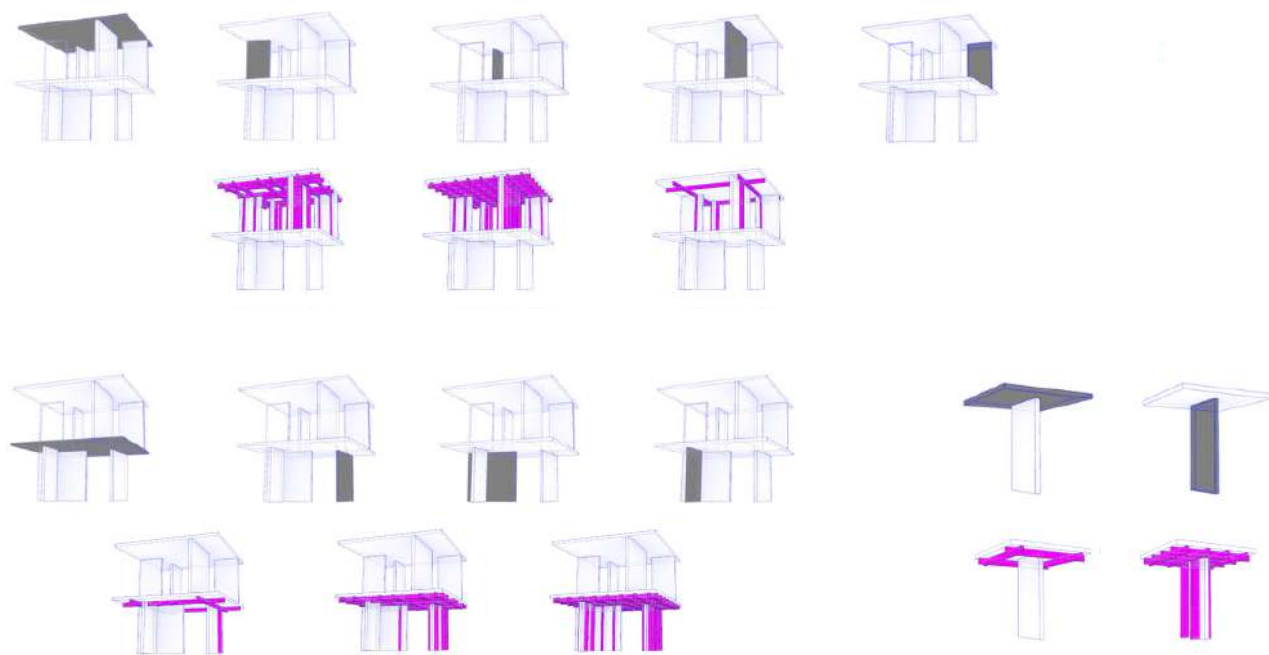


Bottom view

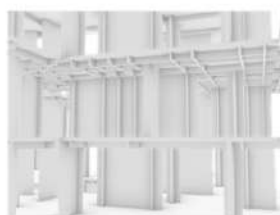
**Fig. 113 - Sistema di rinforzo
caso 6 aggiunta elementi
monodimensionali**

**Sistema di rinforzo
aggiunta di elementi lineari - caso 7**

■ F.U valutato
■ Elementi aggiunti



Assemblaggio modificato



Zoom interno



Bottom view



Zoom interno



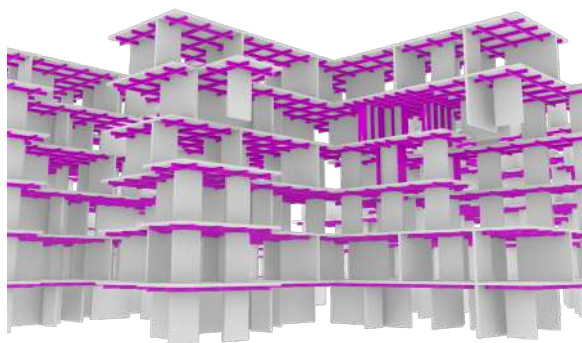
Zoom interno



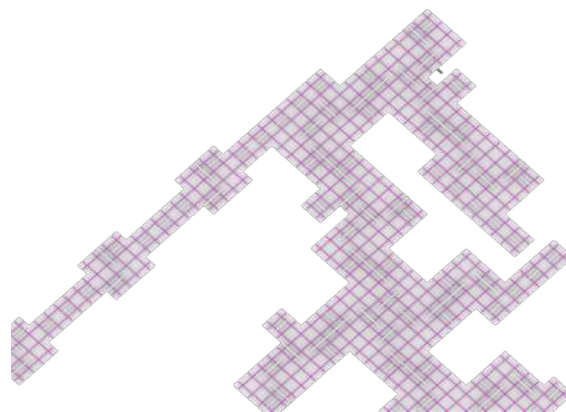
Bottom view

**Fig. 114 - Sistema di rinforzo
caso 7 aggiunta elementi
monodimensionali**

Aggiunte lineari - caso 4

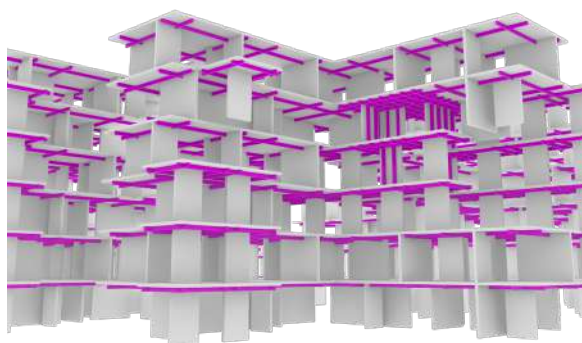


Assemblaggio con aggiunte

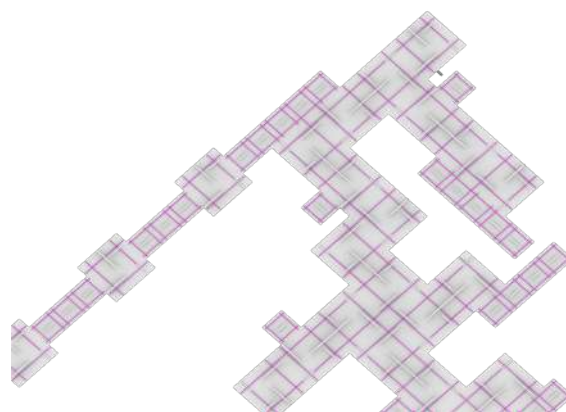


Bottom view

Aggiunte lineari - caso 5



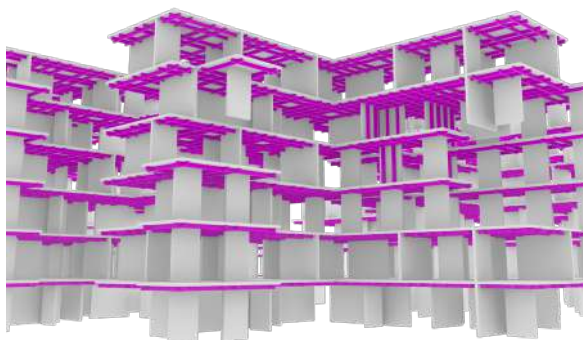
Assemblaggio con aggiunte



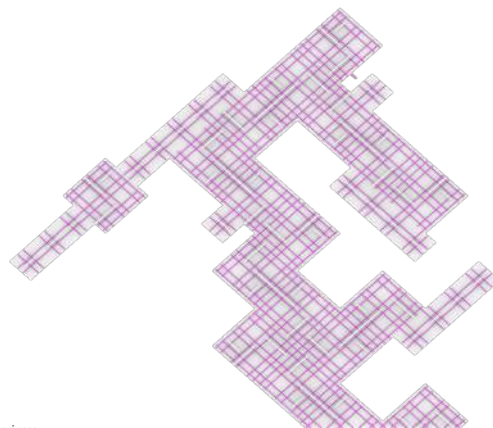
Bottom view

Fig. 115 - Sistema di rinforzo
caso elementi lineari -
confronto

Aggiunte lineari - caso 6

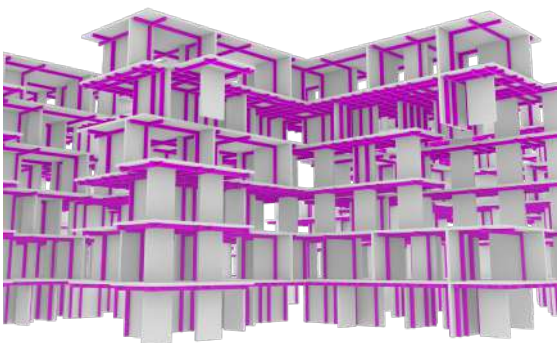


Assemblaggio con aggiunte

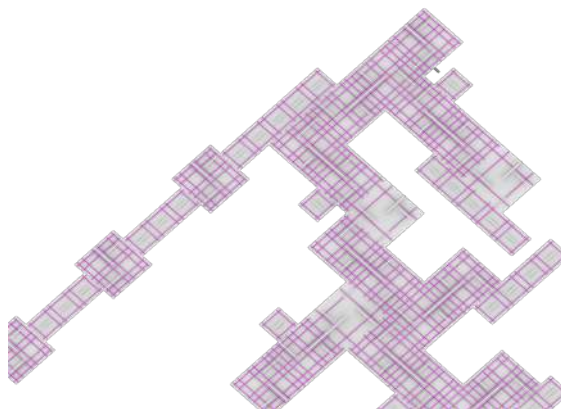


Bottom view

Aggiunte lineari - caso 7

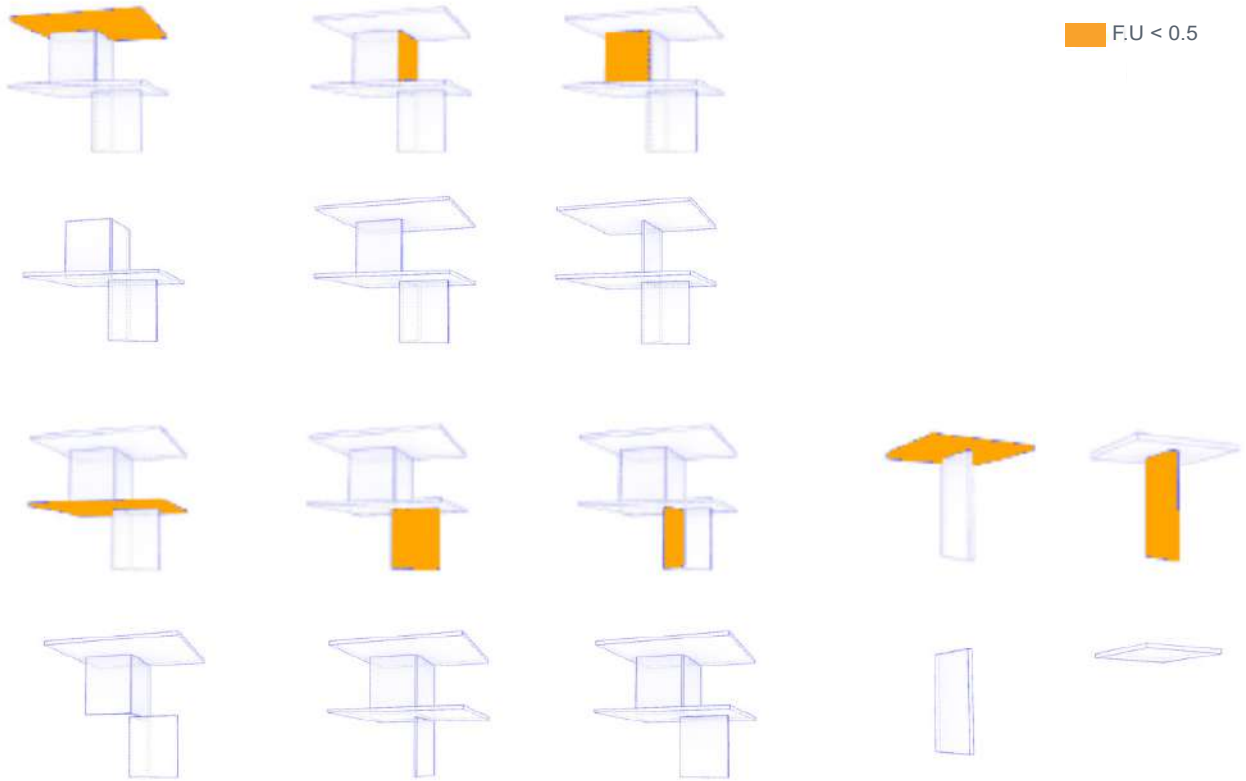


Assemblaggio con aggiunte



Bottom view

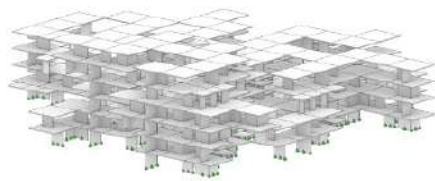
Rimozione geometrie



Analisi strutturale Spostamento (cm)



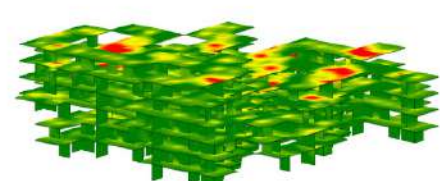
Assemblaggio



Assemblaggio modificato



Assemblaggio - spostamento



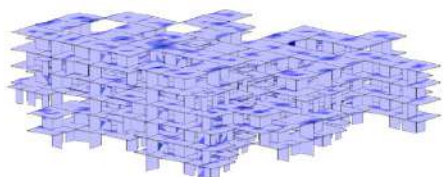
Assemblaggio modificato - spostamento

**Analisi strutturale
Fattore di Utilizzo**

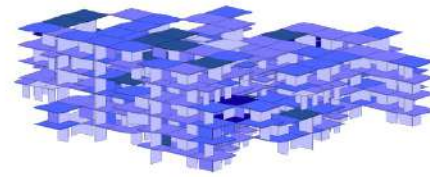
Min
0

0.8

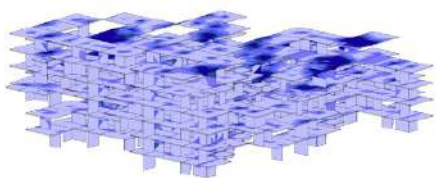
Max



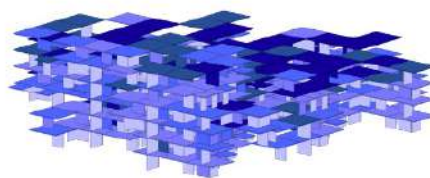
Assemblaggio - F.U.



Assemblaggio - F.U. per elemento



Assemblaggio modificato - F.U.



Assemblaggio modificato - F.U. per elemento

N. elementi

Min



Min

● Pre-modifiche
● Post-modifiche

Massa

Min



Min

F.U. max

Min



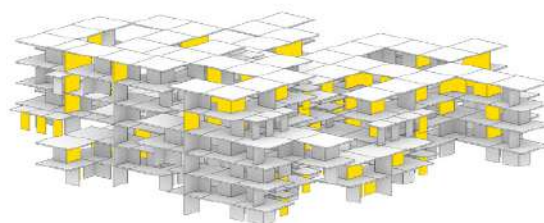
Min

% elementi > 0.8 F.U.

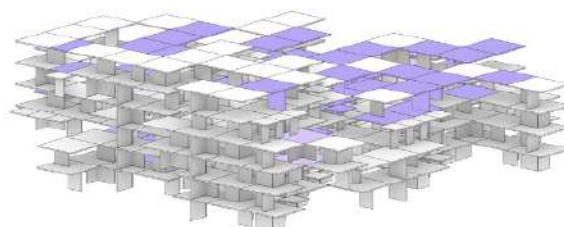
Min



Min



Elementi rimossi



Confronto prima e dopo le modifiche

- Riduzioni sotto soglia:** elementi che superavano la soglia inizialmente ma non la superano più dopo le modifiche.
- Superamenti costanti:** elementi che risultano sopra soglia sia prima che dopo le modifiche.
- Nuovi superamenti:** elementi che superano la soglia solo a seguito delle modifiche.

Fig. 116 - Rimozione di geometrie dall'assemblaggio -analisi

Ambiente

La fase preliminare del lavoro progettuale ha previsto una lettura critica e stratificata del contesto in cui si inserisce l'intervento. L'analisi ha combinato dati quantitativi e qualitativi attraverso strumenti rilievi fotografici, sopralluoghi e dati open-source. L'obiettivo è stato identificare vincoli, opportunità e caratteristiche emergenti del sito, al fine di orientare consapevolmente le scelte progettuali.

Analisi demografica

Un'analisi dei dati demografici del Comune di Bologna ha mostrato un costante incremento della popolazione, dovuto in gran parte a flussi migratori. Bologna si colloca al secondo posto in Italia per variazione percentuale di popolazione tra il 2022 e il 2023, preceduta solo da Milano (inumeridibolognametropolitana, s.d.)



Fig. 117 - Andamento demografico a Bologna al 2023

Analisi del mercato immobiliare

Lo studio del mercato immobiliare cittadino ha rilevato una tendenza di crescita dei valori sia per la compravendita sia per l'affitto, con un picco registrato a dicembre 2024. A gennaio 2025, il prezzo medio di vendita ammonta a 3 454 €/m², mentre quello di affitto raggiunge 18,5 €/m² (idealista, s.d.)



Fig. 118 - Variazione nel tempo dei costi di locazione a Bologna fino al 2025

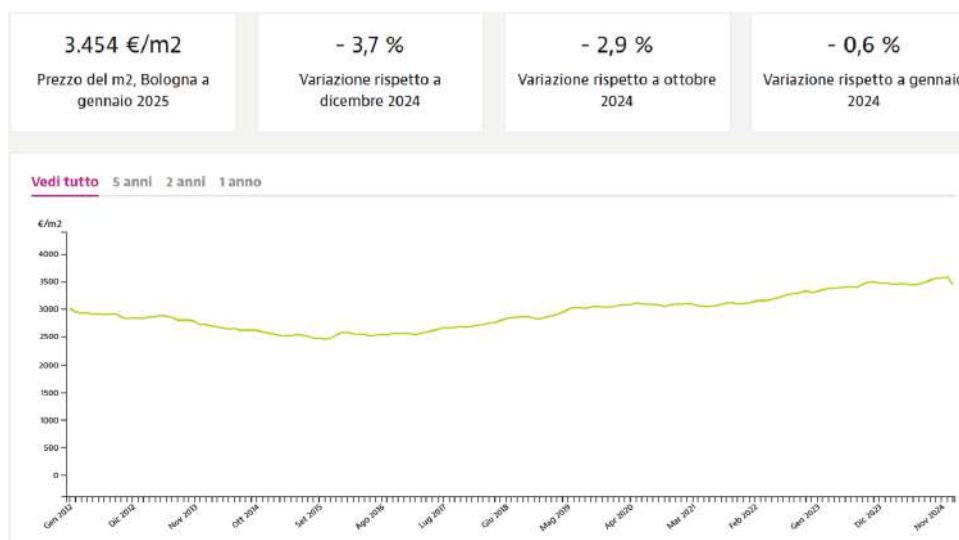


Fig. 119 - Variazione nel tempo dei costi di vendita a Bologna fino al 2025

Domanda e offerta di alloggi per studenti

L'analisi dei flussi della popolazione studentesca, combinata con i dati disponibili sull'offerta di alloggi, ha rilevato un incremento costante del fabbisogno abitativo senza un corrispondente potenziamento dell'offerta residenziale dedicata. Tale squilibrio strutturale, tra domanda in crescita e offerta insufficiente, ha determinato una pressione al rialzo sui canoni, con ripercussioni sull'accessibilità economica degli alloggi per gli studenti. (Carriero Alberto et al., 2022; La città di Bologna e le tendenze evolutive, 2019)

Dai dati emersi si delinea l'urgenza di soluzioni abitative flessibili per giovani lavoratori, studenti e famiglie, in grado di rispondere a budget limitati senza rinunciare a qualità e servizi.

Il sito: ex Caserma Perotti (quartiere Savena – Fossolo)

L'ex Caserma Perotti si estende su circa 88 000 m² nel quartiere Savena, sub area Fossolo, caratterizzata da una densità abitativa di circa 7 000 ab/km², in linea con la media del quartiere (inumeridibolognametropolitana, s.d.). A gennaio 2025 i prezzi immobiliari locali sono risultati leggermente inferiori alla media cittadina: 3 182 €/m² per la vendita e 15,15 €/m² per l'affitto (Immobiliare.it, s.d.).

Fig. 120 - Quotazioni immobiliari

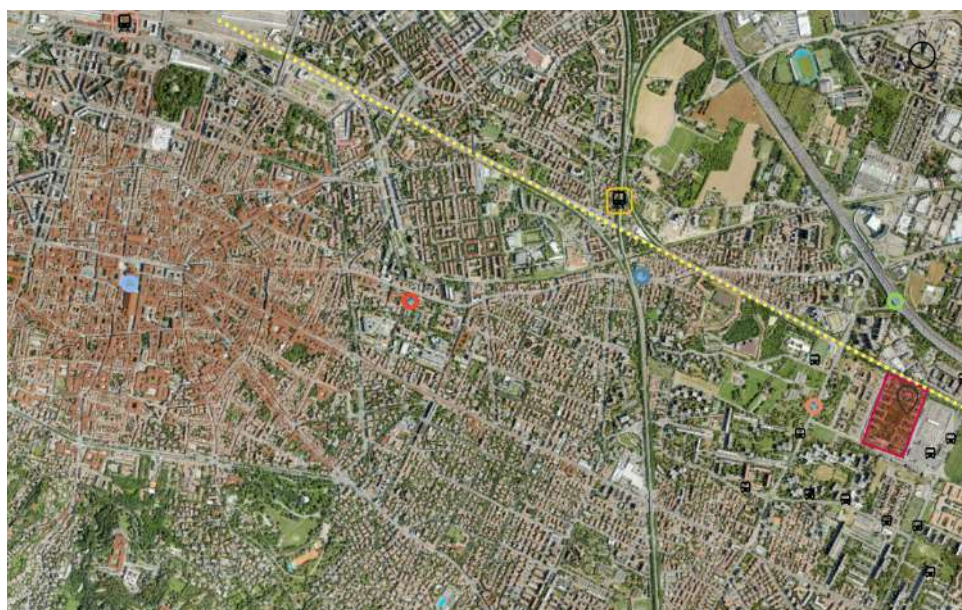
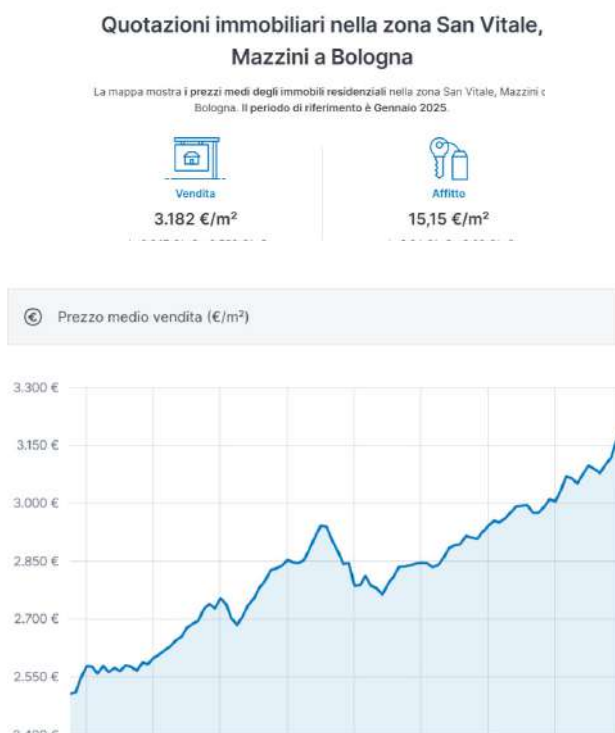


Fig. 121 - Ubicazione e accessibilità area ex caserma Perotti

- #1 Anzola-Imola
- #2 Crevalcore-Porretta Terme
- #3 Bologna-Bazzano
- #4 Bologna-Parco Città Campagna
- #5 Bologna-Trebbio
- #6 Bologna-Galliera
- #7 Bologna-Malalbergo
- #8 Bologna-Baricella
- #9 Bologna-Molinella
- #10 Bologna-Pianoro
- #11 Sasso Morelli-Casalfumane
- #12 Castel Guelfo-Castel del Rio
- #13 Sant'Agata Bolognese-Castenaso
- #14 Castel Maggiore-Medicina
- #15 Castello d'Argile-Minerbio
- #16 Crevalcore-Molinella
- #17 Tangenziale interna Bologna
- #18 Tangenziale esterna Bologna
- #19 Tangenziale interna Imola
- #20 Tangenziale esterna Imola

- Linee Bicipolitana**
- In sede protetta
 - In carreggiata
 - Verdi / naturalistici
 - Connessioni
 - Ciclabili comunali

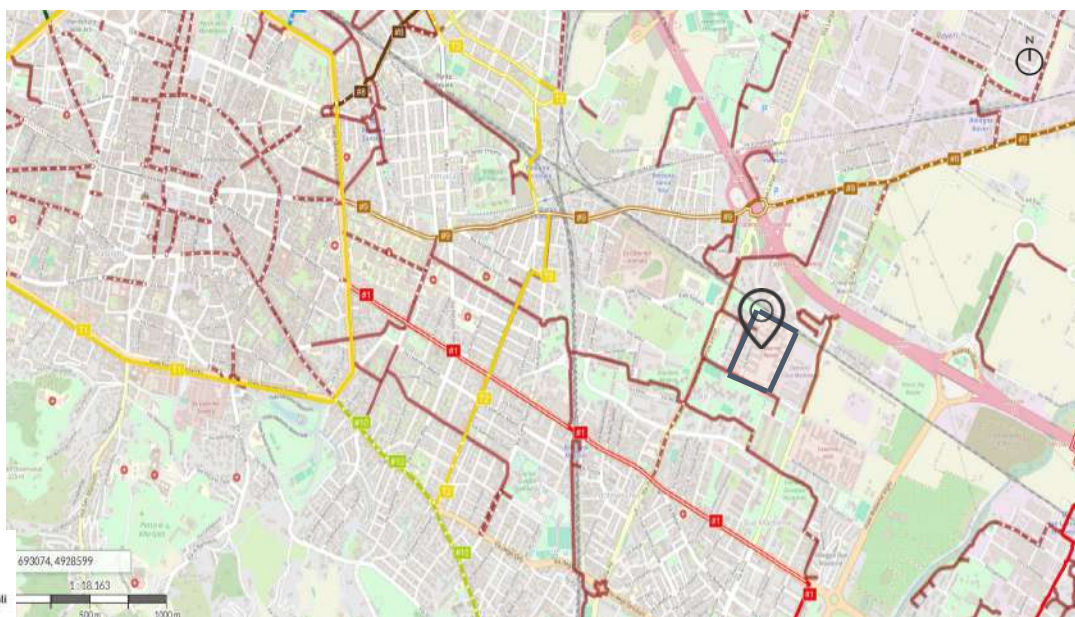


Fig. 122 - Mappa linea bicipolitana a Bologna

Fig. 123 - Mappa linea autobus a Bologna



Fig. 124 - Analisi servizi nell'area dell'ex caserma Perotti

- Spazio T-PER
- Area Militare
- Bar
- Ristoranti
- Sport
- Uffici
- Scuola
- Chiesa
- Cinema
- Supermercato
- Attività Commerciali

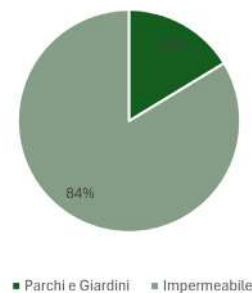


Verde pubblico e dotazioni urbane

Dalle analisi emerge che l'area, prevalentemente residenziale, è ben collegata al centro storico tramite una rete efficiente di trasporti pubblici e percorsi ciclabili. Il contesto si distingue per l'abbondanza di spazi verdi, con numerosi parchi e giardini pubblici (circa il 16% della superficie totale) che migliorano la qualità ambientale. Tuttavia, nelle immediate vicinanze, si registra una limitata presenza di servizi e attività commerciali.

Dalle analisi emerge che l'area, prevalentemente residenziale, è ben collegata al centro storico tramite una rete efficiente di trasporti pubblici e percorsi ciclabili. Il contesto si distingue per l'abbondanza di spazi verdi con numerosi parchi e giardini che migliorano la qualità ambientale. Tuttavia, nelle immediate vicinanze si riscontra una limitata presenza di servizi e attività commerciali

Fig. 128 - Analisi verde pubblico



Sulla base delle analisi preliminari, sono state quindi individuate le aree funzionali destinate alle diverse attività previste, organizzate in macro-categorie che costituiscono il quadro di riferimento programmatico per la crescita del sistema. Le percentuali riportate non definiscono quantità rigide, ma rapporti di equilibrio tra le diverse componenti:

- Residenziale: 60–70%
- Spazi commerciali e servizi: 20–30%
- Spazi pubblici e culturali: 10–20%
- Verde e spazi ricreativi: 10–20%

6. DESIGN PROCESS

- Lato deposito/ferrovia
- - - Lato verso la città

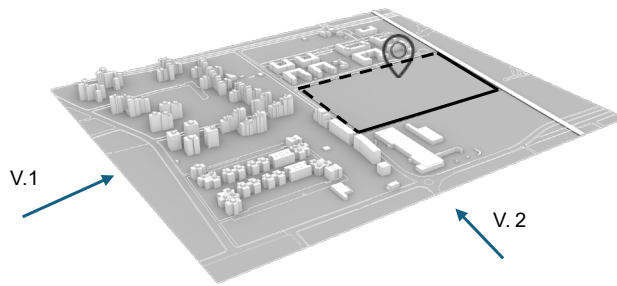
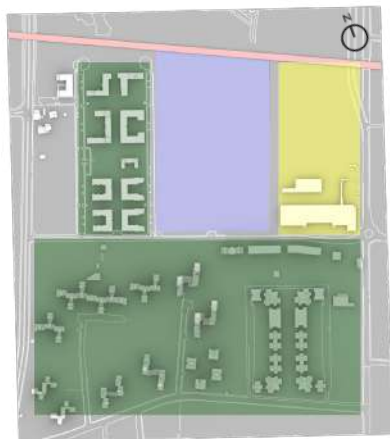


Fig. 129 - Lotto Ex Caserma Perotti



Fig. 130 - Viste frontali dell'area



Fattori del sito:

- Lotto
- Zona residenziale
- Ferrovia
- Deposito

Criteri di progetto:

- Volume di crescita
- Zone più «permeabili»
- Zone più «chiuse»
- Andamento altezza

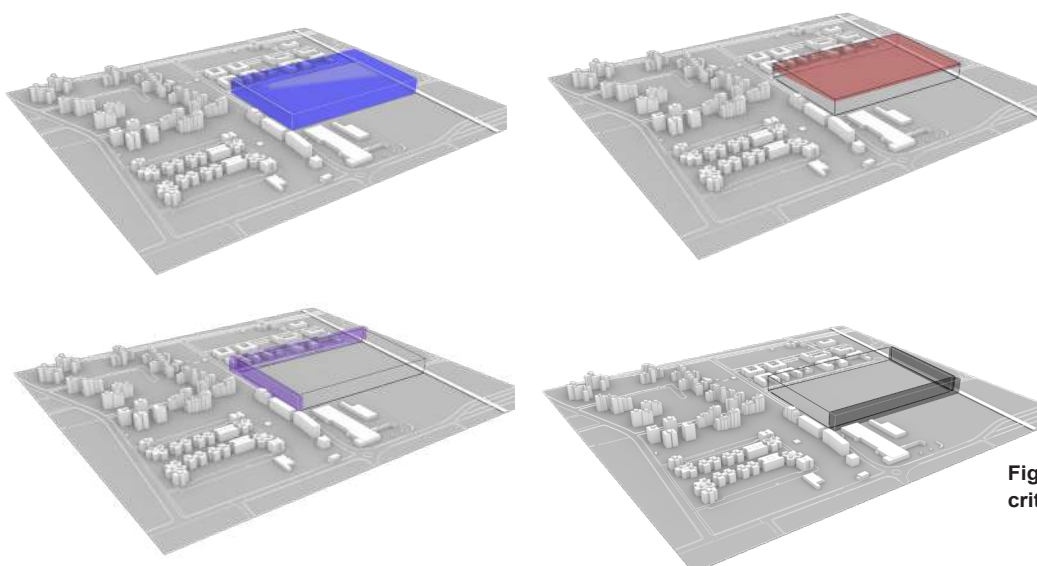


Fig. 131 - Analisi del sito e criteri di progetto

Ambiente virtuale e parametri di crescita

Le analisi condotte sul contesto urbano hanno consentito di definire l'ambiente virtuale di crescita entro cui si sviluppa l'assemblaggio. È stato individuato un volume limite di 237×378 metri, per una superficie complessiva di circa 89.000 m^2 , con un'altezza massima di 36 metri, determinata dalla presenza e dalle quote degli edifici circostanti. Tale volume rappresenta la condizione spaziale di contenimento del sistema generativo, entro cui le logiche di crescita e aggregazione possono evolvere secondo regole locali.

Questo ambiente virtuale è governato da tre parametri principali: una curva di crescita, un campo vettoriale e diversi set di regole. La curva di crescita costituisce uno dei principali parametri direzionali del sistema: essa orienta lo sviluppo dell'assemblaggio sulla base delle analisi svolte. L'obiettivo è ottenere una chiusura verso il Deposito Due Madonne e la linea ferroviaria, generando al contempo una maggiore apertura e permeabilità verso la città. Il campo vettoriale agisce invece sull'orientamento delle parti e, come per tutti e tre i parametri, sono state svolte diverse prove di modifica al fine di ottenere le configurazioni spaziali ricercate. L'ultimo elemento è costituito dai set di regole, che possono essere distribuiti nell'ambiente determinando le modalità di crescita dell'assemblaggio nelle diverse zone. I set utilizzati sono quelli analizzati precedentemente.

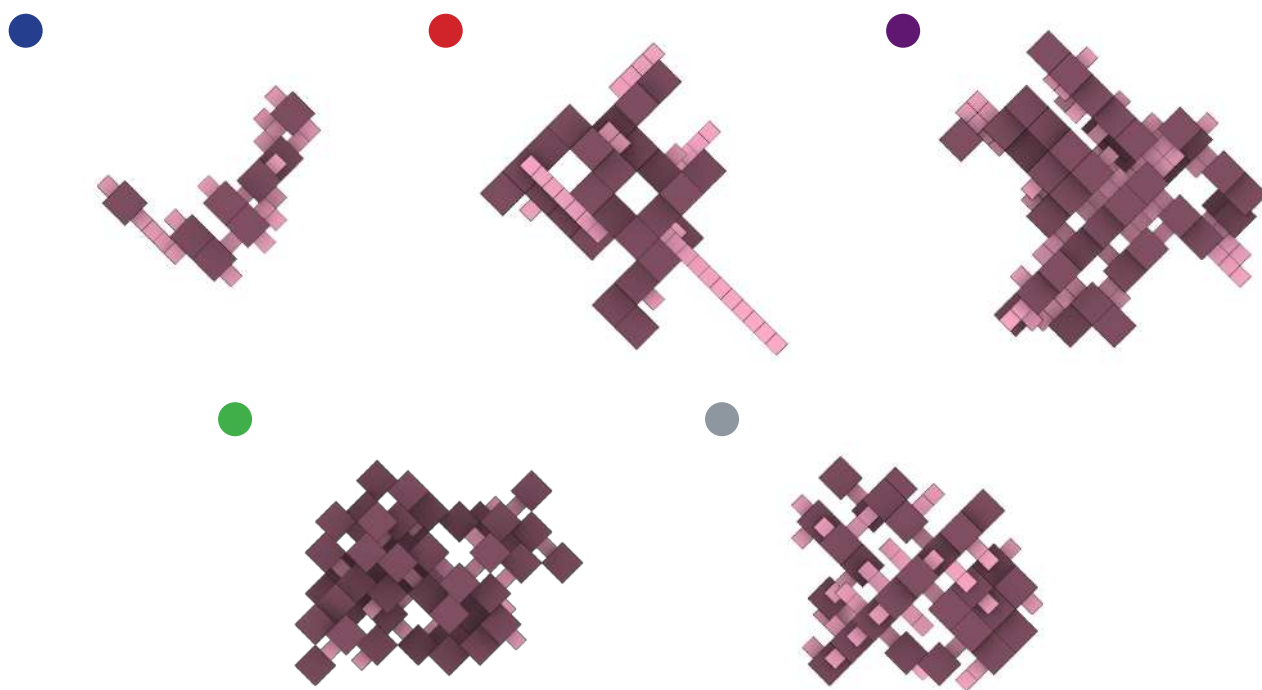
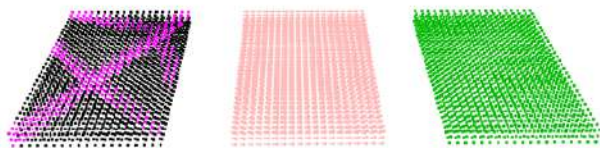
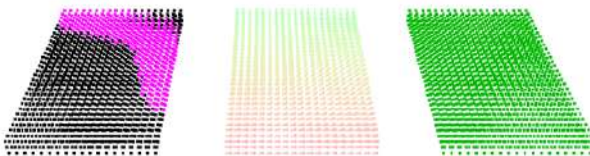
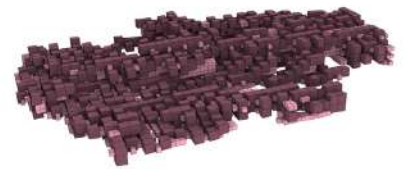
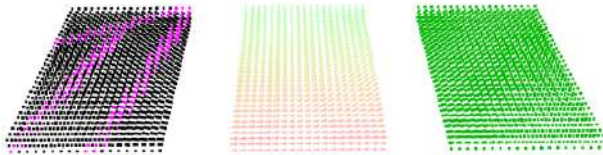
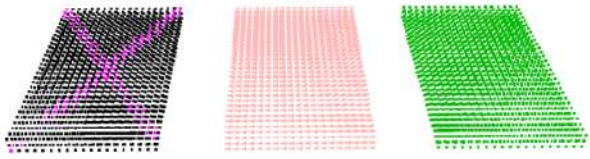


Fig. 132 - Set utilizzati nelle prove successive

Configurazione ambiente

Vista top

Assemblaggio



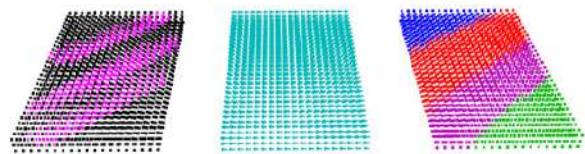
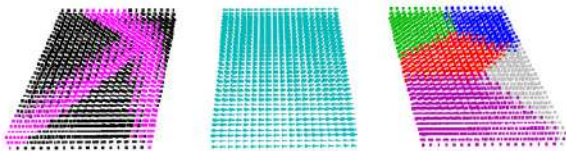
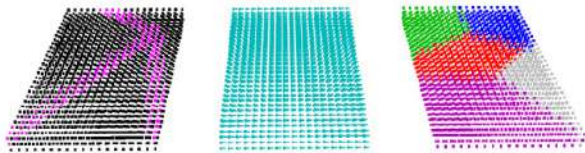
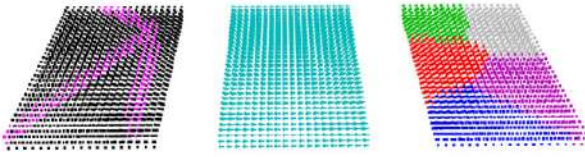


Fig. 133 - Prime prove nel campo (ambiente virtuale)

In questa fase si è deciso di ruotare la partenza dell'assemblaggio di 45 gradi rispetto al lotto. La rotazione è stata inizialmente introdotta come prova esplorativa e successivamente mantenuta poiché, a seguito di diversi test, è risultata la configurazione più efficace in termini di permeabilità e dinamicità spaziale.

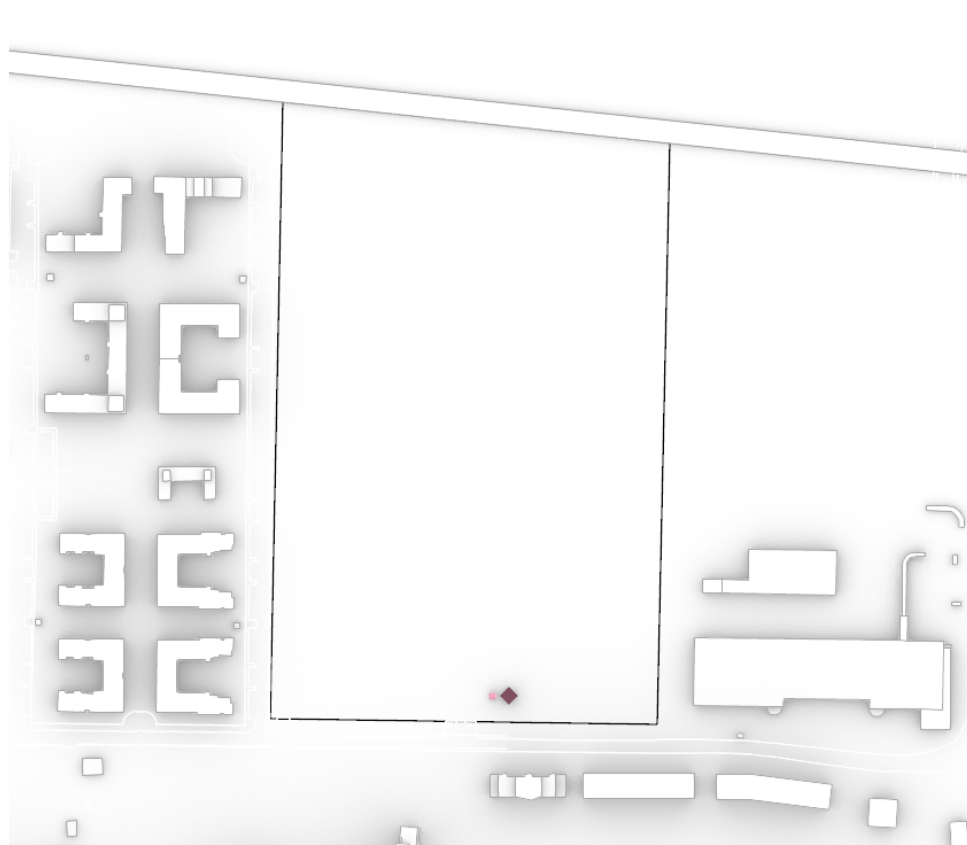


Fig. 134 - Modifica orientamento della parte di partenza

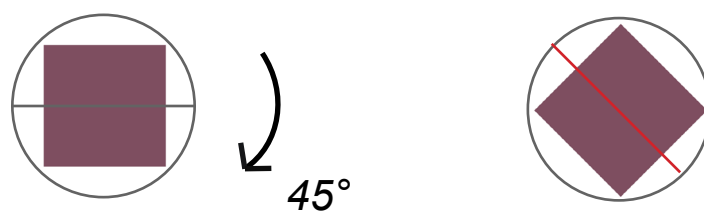
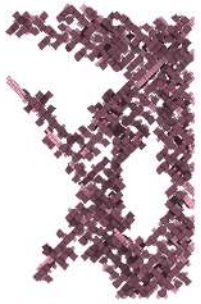
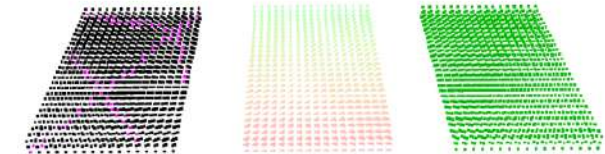
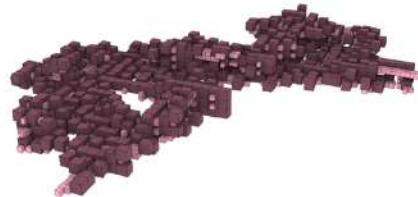
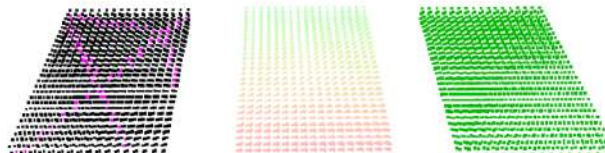
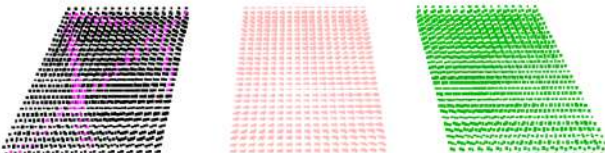
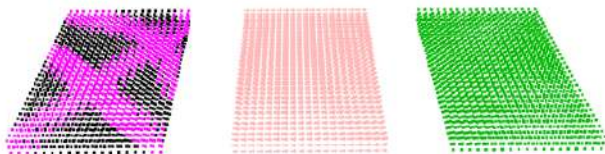


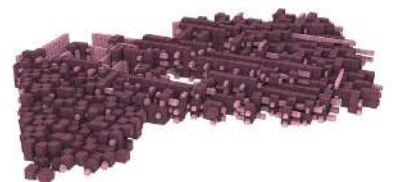
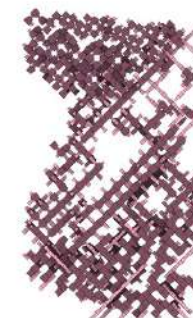
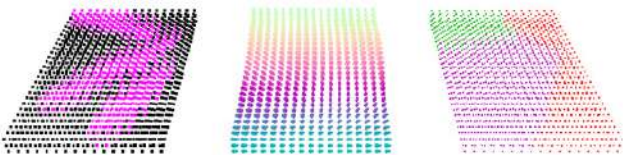
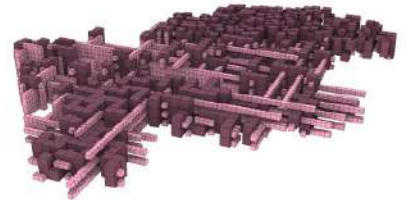
Fig. 135 - Prove di assemblaggio nel campo



Configurazione ambiente

Vista top

Assemblaggio

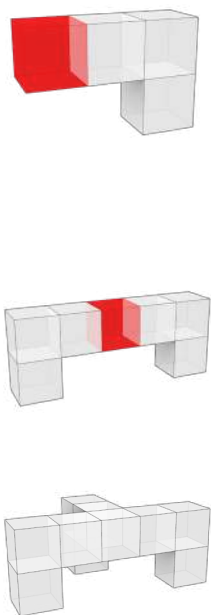


Un'altra operazione effettuata è stata la rimozione degli Assembly Object, introdotta per evitare la formazione di sbalzi e luci eccessive che avrebbero potuto generare sovraccarichi localizzati. Questo processo avviene attraverso un'operazione ciclica implementata tramite il plug-in Hoopsnake di Grasshopper. Le regole di identificazione degli AO da rimuovere includono parti a sbalzo collegate ad altre parti anch'esse a sbalzo e la presenza di non più di due affacci liberi, intesi come piani di connessione non occupati. Il processo viene ripetuto in loop fino al raggiungimento di un criterio di arresto, variato nelle diverse prove tra una scelta manuale e un numero fisso di cicli. In una fase successiva, la procedura non è stata ulteriormente sviluppata, poiché con l'avanzare dello studio del campo non si sono più creati sbalzi significativi e quindi non è stata ritenuta necessaria. Le regole per la rimozione degli Assembly Object (AO) stabiliscono che ogni parte a sbalzo sia collegata a un'altra parte a sbalzo e che l'elemento non presenti più di due affacci liberi. I criteri devono essere soddisfatti simultaneamente, così da garantire la coerenza spaziale e strutturale dell'operazione. Il processo si sviluppa attraverso un loop iterativo, ripetuto per un numero variabile di cicli. Non è previsto un criterio di arresto automatico: ogni iterazione viene avviata manualmente, consentendo di controllare l'evoluzione dell'insieme e valutare le configurazioni prodotte. Al termine di ogni ciclo, un controllo verifica l'assenza di elementi isolati o sospesi, assicurando la continuità dell'assemblaggio e la coerenza del sistema.

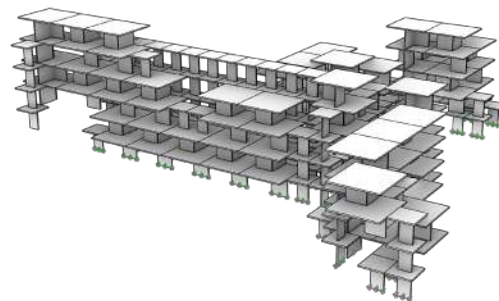
Fig. 136 - Prove di assemblaggio nel campo

Fig. 137 - Regole per la rimozione di Assembly Object

Regole del loop - rimozione AO

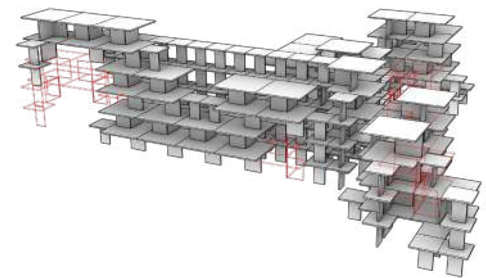


Esempio - rimozione AO

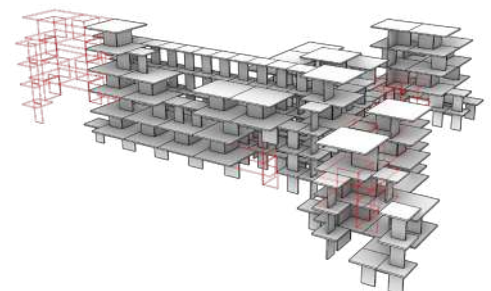


Assemblaggio con supporti

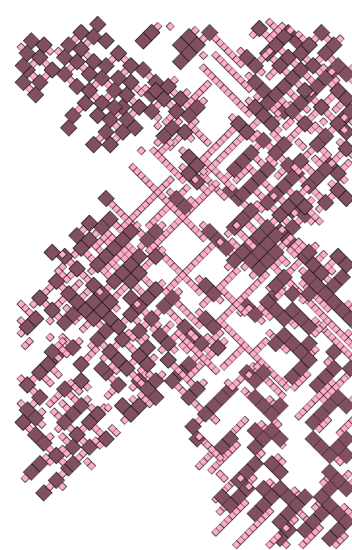
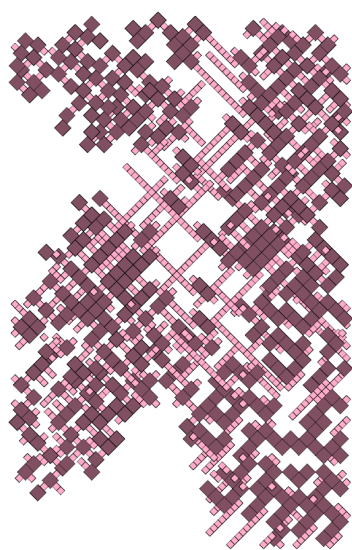
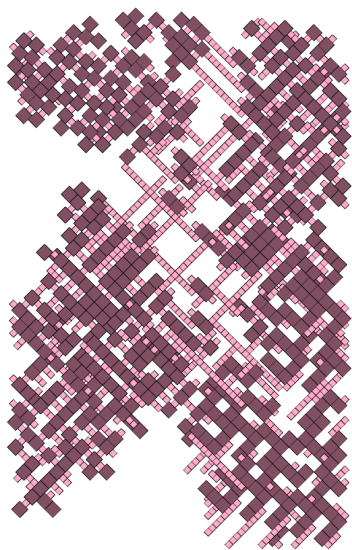
AO rimossi



Primo ciclo di rimozione



Secondo ciclo di rimozione



Assemblaggio di partenza

Primo ciclo di rimozione

Secondo ciclo di rimozione

Durante queste prove di assemblaggio è stata valutata anche la connettività per ottenere un valore di riferimento per valutare la potenzialità di esposizione alla luce solare. L'analisi è stata condotta valutando le connessioni tra gli Assembly Object e, poiché le geometrie interne non erano ancora definite, non si può parlare di illuminazione vera e propria ma di potenziale di esposizione alla luce legato agli affacci liberi valutati tramite le connessioni della parte. Tale valutazione è stata basata sul numero di facce laterali completamente libere per ciascun Assembly Object.

Per l'Assembly Object di lato 8 m, la valutazione è stata ulteriormente raffinata suddividendo il volume lungo l'asse z in due livelli ipotetici. Questo approccio ha permesso di considerare la possibilità che l'elemento si sviluppi su uno o due piani, ottenendo risultati più rappresentativi per il calcolo della connettività. Su questa base, per ciascun Assembly Object è stato attribuito un punteggio proporzionale al numero di affacci liberi. Poiché questo primo punteggio non considerava il tipo di connessione, è stato introdotto un secondo punteggio, di peso inferiore, che valuta l'oggetto a cui la faccia è connessa: una connessione a un Assembly Object di lato 4 m riceve un punteggio più alto, mentre una connessione a un Assembly Object di lato 8 m riceve un punteggio inferiore. I valori ottenuti sono stati utilizzati per definire una scala cromatica applicata a ciascun elemento, rendendo leggibile e confrontabile il potenziale di esposizione alla luce all'interno dell'assemblaggio.

Fig. 138 - Assemblaggio con rimozione Assembly Object

Di seguito viene riportata un'analisi più approfondita dei set utilizzati nelle prove di assemblaggio. L'analisi dei percorsi è stata svolta impostando, per ogni parte, possibili tracciati in funzione della sua geometria, come riportato in Fig. 140. Successivamente tali percorsi sono stati valutati attraverso il raggruppamento per lunghezza sul piano, l'individuazione del percorso più lungo e di quello più breve e la frequenza di passaggio. Quest'ultima è stata calcolata sia in funzione dei percorsi interni alla parte sia in funzione delle connessioni tra le parti. In questa fase non sono ancora stati introdotti collegamenti verticali nell'assemblaggio; pertanto, i collegamenti sono analizzati per piano.

L'analisi delle connessioni è stata svolta come mappa topologica dei collegamenti tra le parti, mentre l'analisi della qualità dello spazio valuta, in pianta, l'area visibile da un punto di osservazione. A seguito delle analisi e dei risultati di queste alcuni set non risultano lavorare molto bene a livello strutturale, si procede quindi a verificarne il funzionamento nel campo.

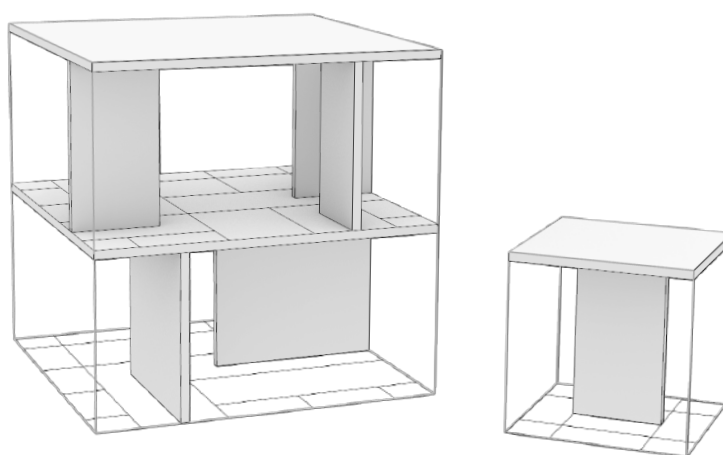
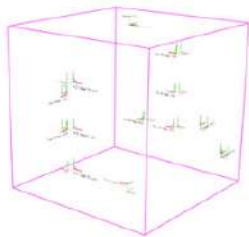


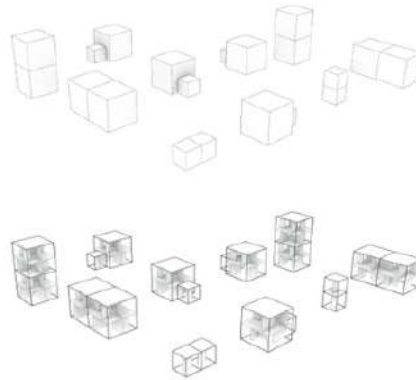
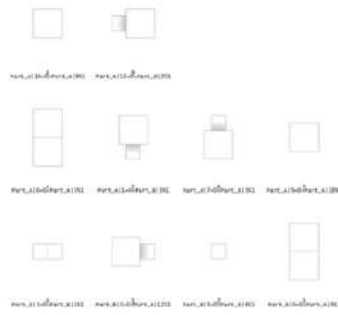
Fig. 139 - Geometrie utilizzate e circulation path impostate per l'analisi dei percorsi



Componente A - volume di collisione



Componente B - volume di collisione



Regole di connessione



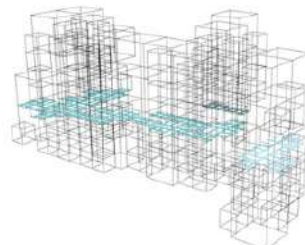
Componente A - geometria interna



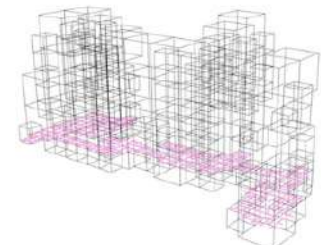
Componente B - geometria interna



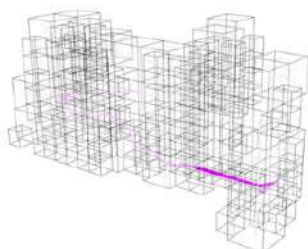
Assemblaggio 200 iterazioni



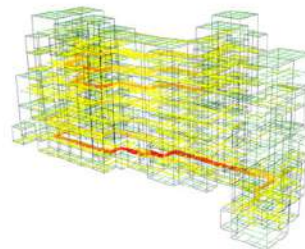
Raggruppamento percorsi in base alla lunghezza



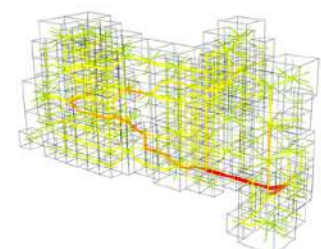
Percorso più lungo



Percorso più breve



Frequenza di passaggio nei percorsi effettivi



Frequenza di passaggio in funzione delle connessioni

Fig. 140 - Analisi set blu (regole e impostazione set, analisi percorsi)

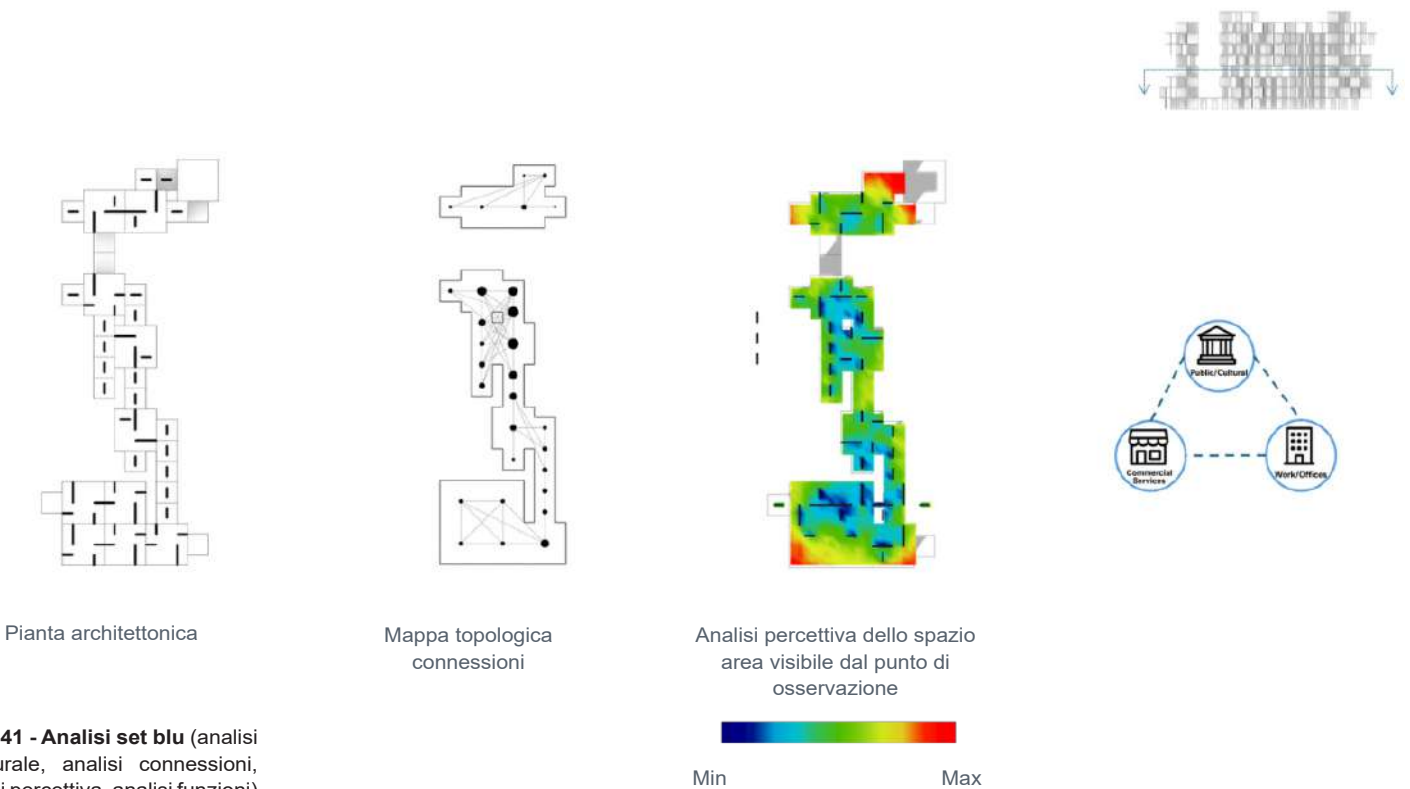
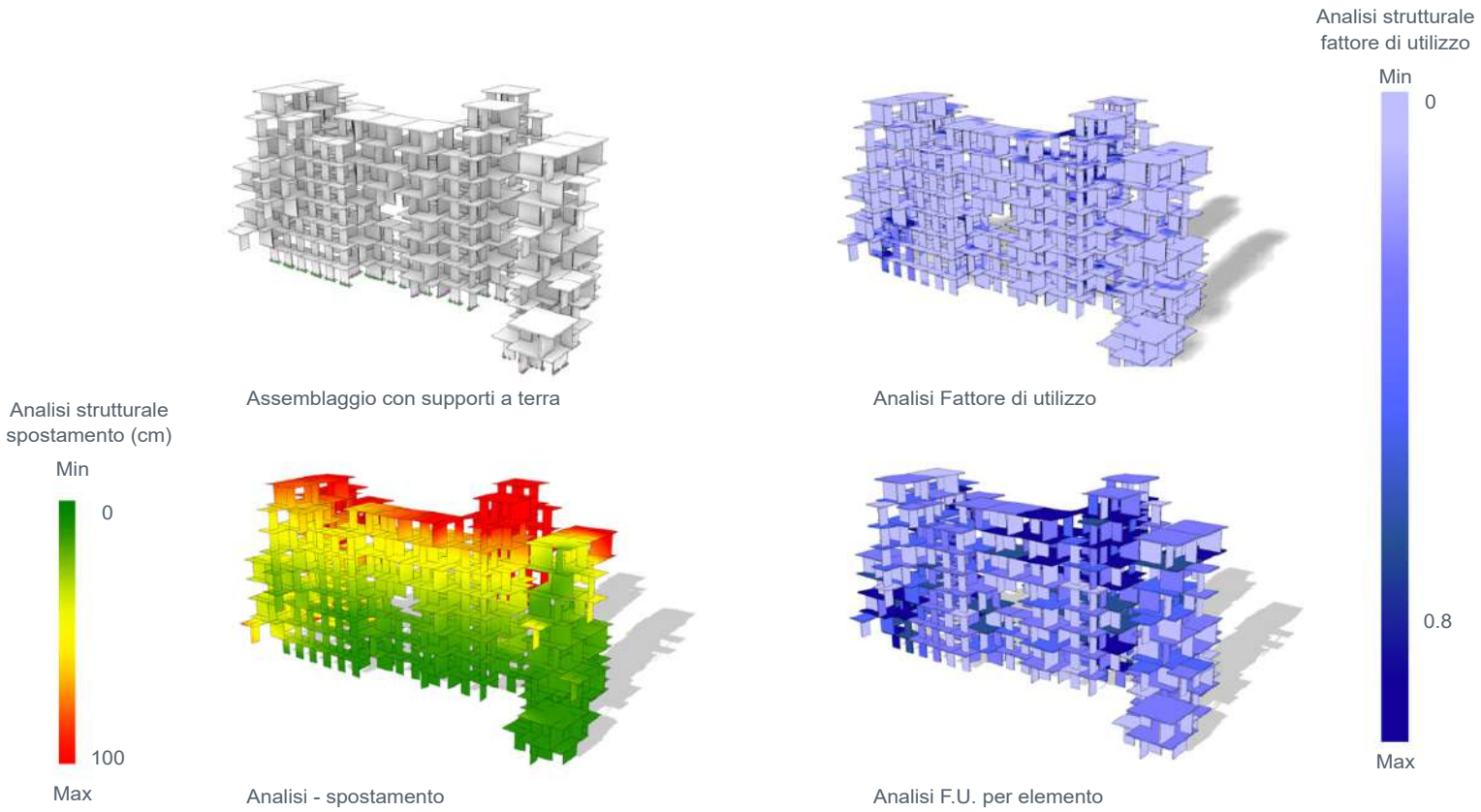
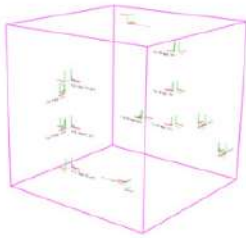
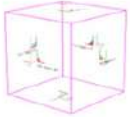


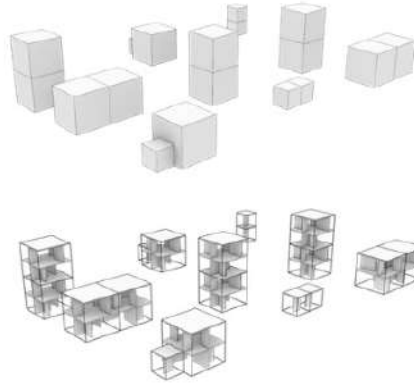
Fig. 141 - Analisi set blu (analisi strutturale, analisi connessioni, analisi percettiva, analisi funzioni)



Componente A - volume di collisione



Componente B - volume di collisione



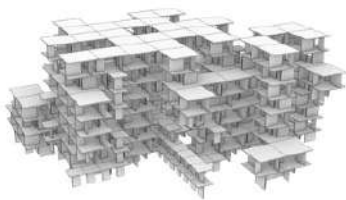
Regole di connessione



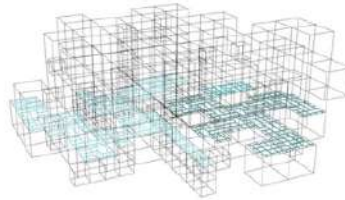
Componente A - geometria interna



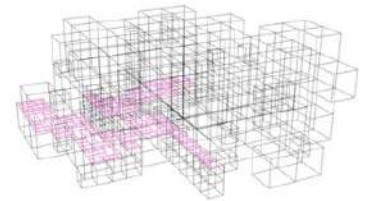
Componente B - geometria interna



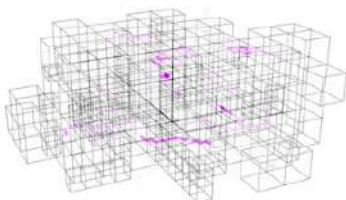
Assemblaggio 200 iterazioni



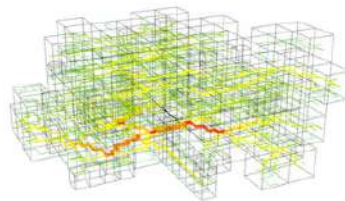
Raggruppamento percorsi in base alla lunghezza



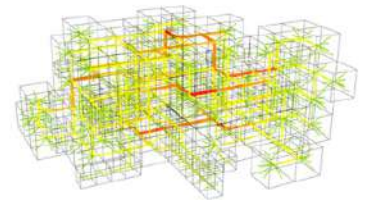
Percorso più lungo



Percorso più breve



Frequenza di passaggio nei percorsi effettivi



Frequenza di passaggio in funzione delle connessioni

Fig. 142 - Analisi set rosso
(regole e impostazione set, analisi percorsi)

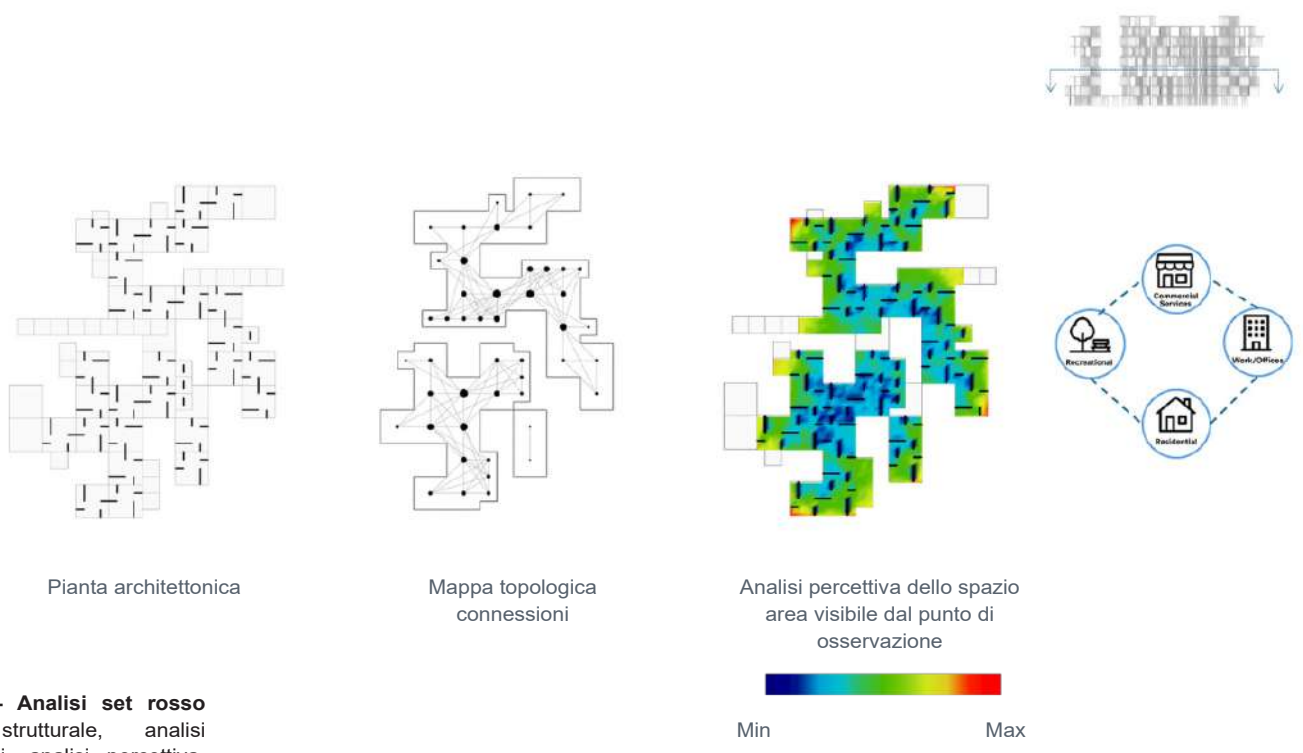
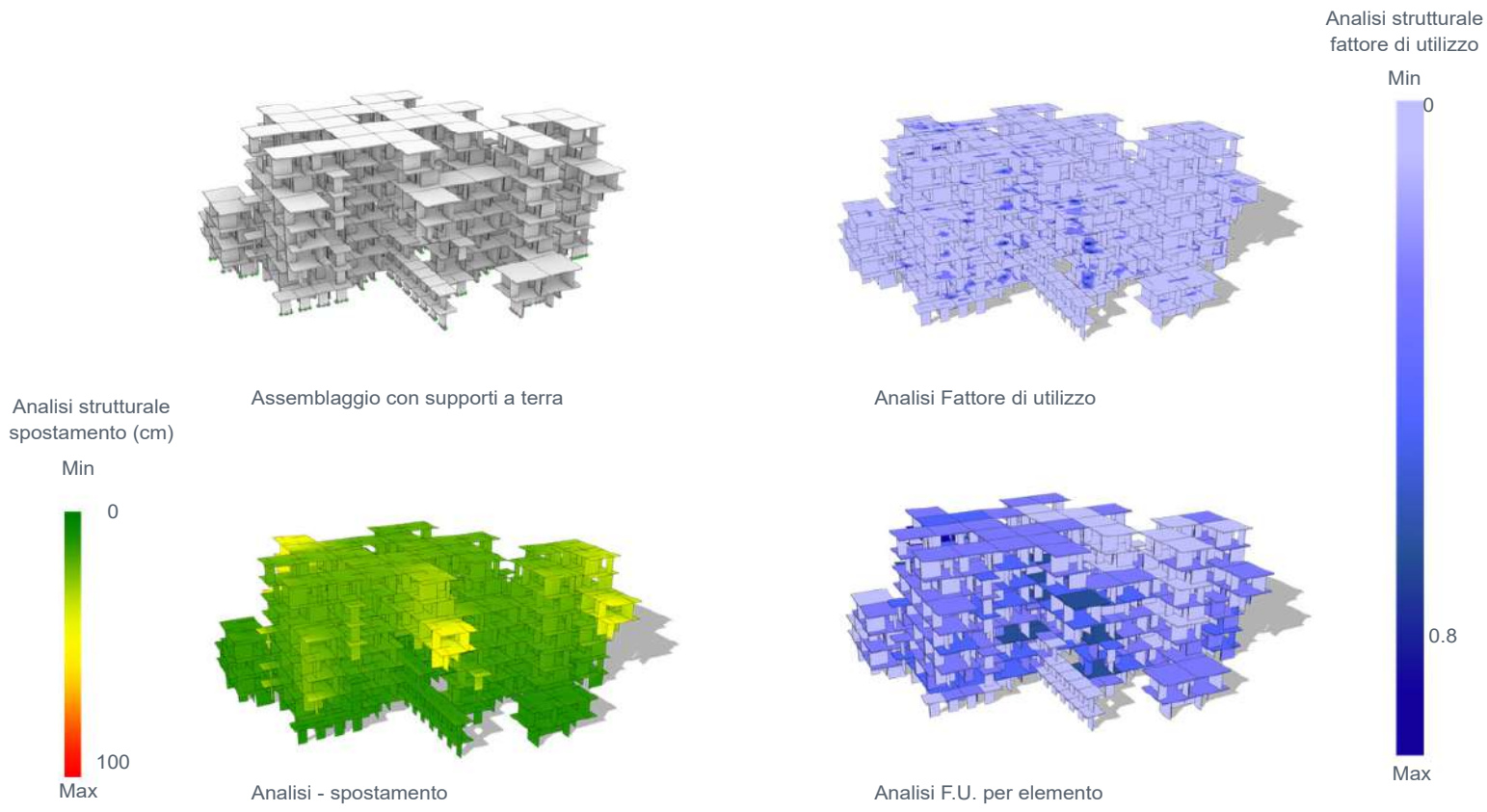
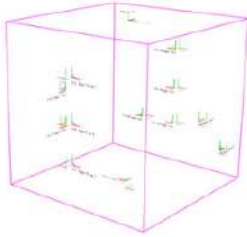
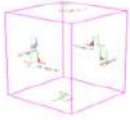


Fig. 143 - Analisi set rosso
 (analisi strutturale, analisi connessioni, analisi percettiva, analisi funzioni)



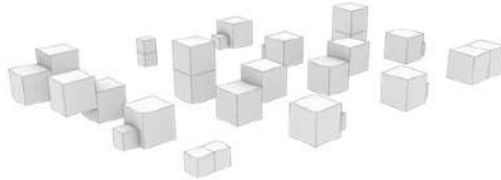
Componente A - volume di collisione



Componente B - volume di collisione

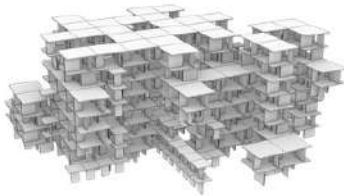


Componente A - geometria interna

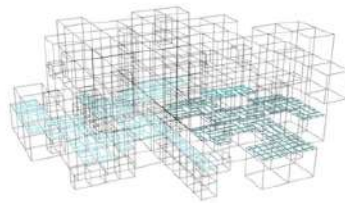


Componente B - geometria interna

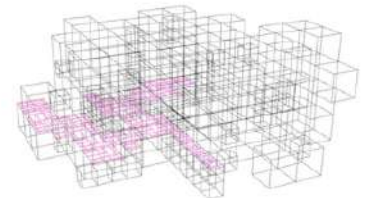
Regole di connessione



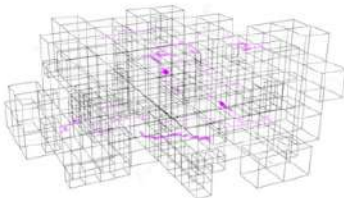
Assemblaggio 200 iterazioni



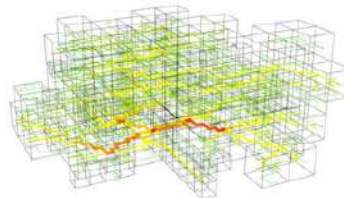
Raggruppamento percorsi in base alla lunghezza



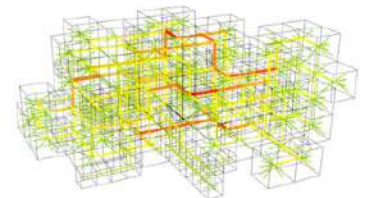
Percorso più lungo



Percorso più breve



Frequenza di passaggio nei percorsi effettivi



Frequenza di passaggio in funzione delle connessioni

Fig. 144 - Analisi set verde
(regole e impostazione set, analisi percorsi)

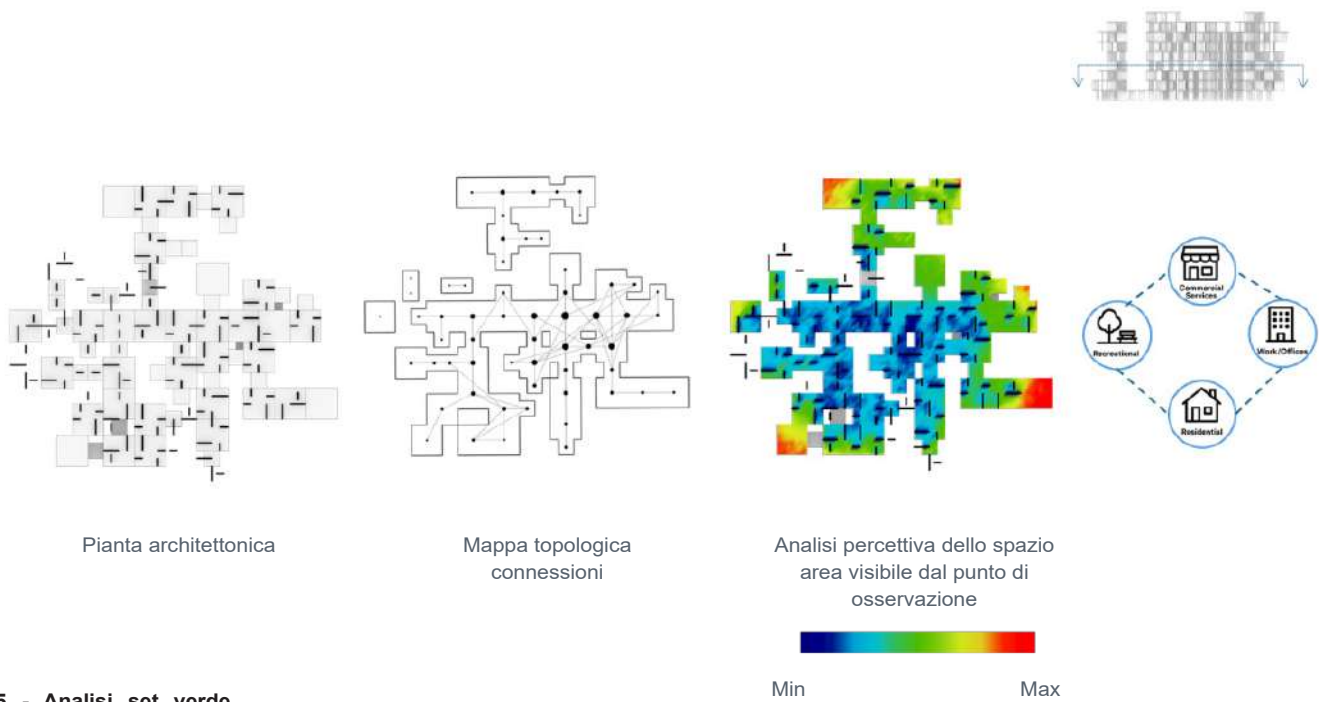
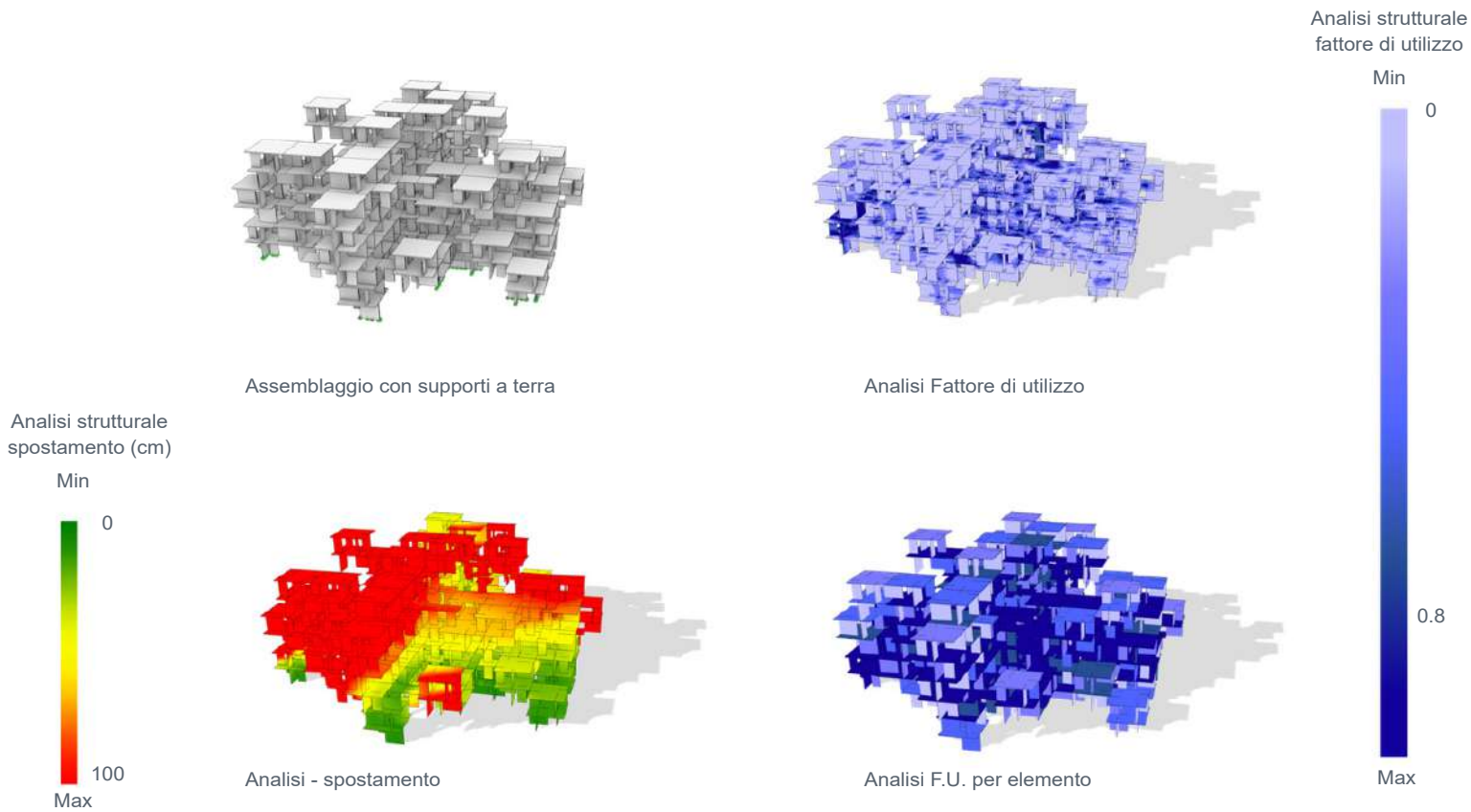
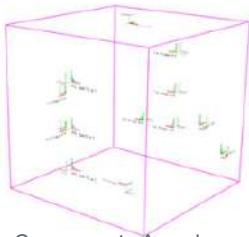
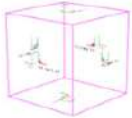


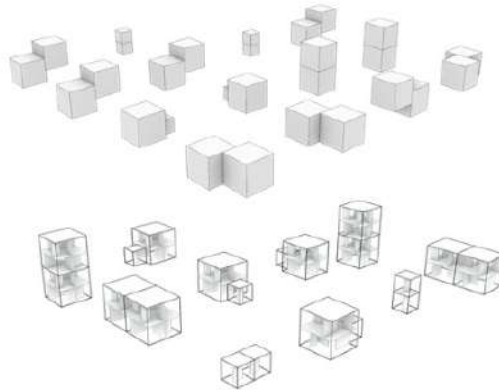
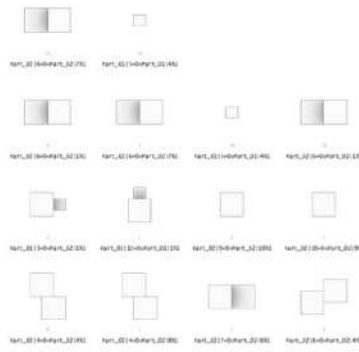
Fig. 145 - Analisi set verde
 (analisi strutturale, analisi connessioni, analisi percettiva, analisi funzioni)



Componente A - volume di collisione



Componente B - volume di collisione



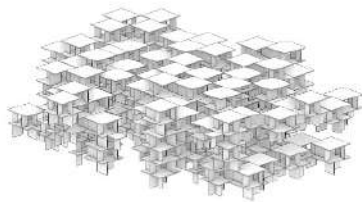
Regole di connessione



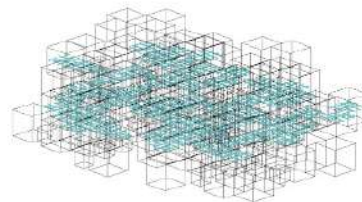
Componente A - geometria interna



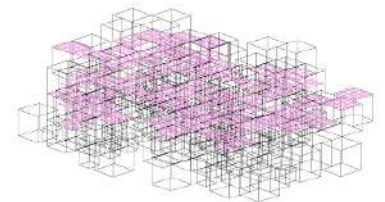
Componente B - geometria interna



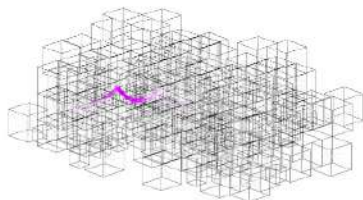
Assemblaggio 200 iterazioni



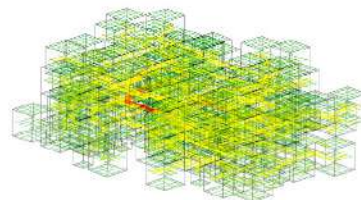
Raggruppamento percorsi in base alla lunghezza



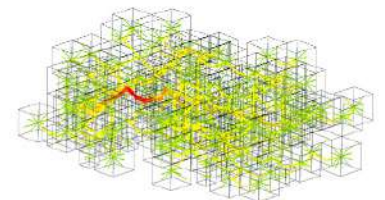
Percorso più lungo



Percorso più breve

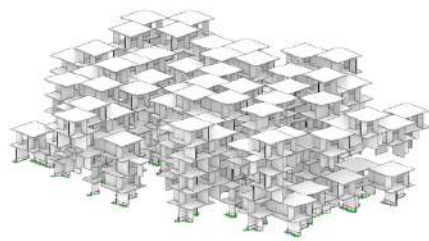


Frequenza di passaggio nei percorsi effettivi

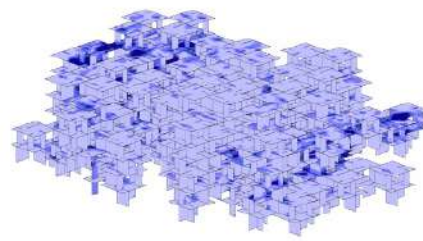


Frequenza di passaggio in funzione delle connessioni

Fig. 146 - Analisi set viola
(regole e impostazione set, analisi percorsi)



Assemblaggio con supporti a terra



Analisi Fattore di utilizzo

Analisi strutturale
fattore di utilizzo

Min

0

0.8

Max

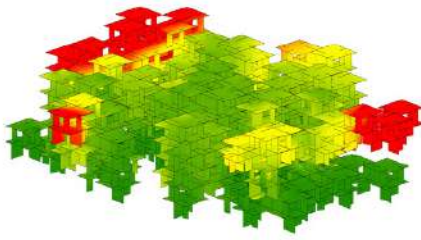
Analisi strutturale
spostamento (cm)

Min

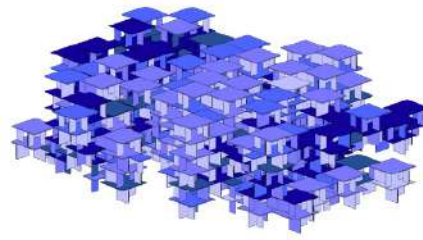
0

100

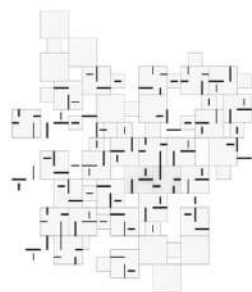
Max



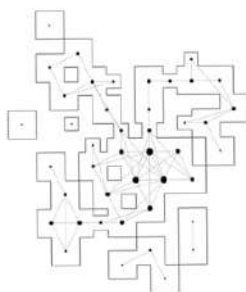
Analisi - spostamento



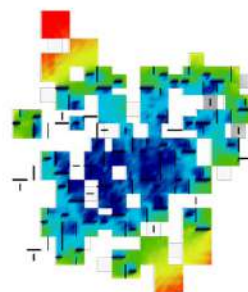
Analisi F.U. per elemento



Pianta architettonica



Mappa topologica
connessioni



Analisi percettiva dello spazio
area visibile dal punto di
osservazione



Min

Max



Fig. 147 - Analisi set viola
(analisi strutturale, analisi
connessioni, analisi percettiva,
analisi funzioni)

Spaccato Assonometrico

Pianta Architettonica

Tipo di Spazio

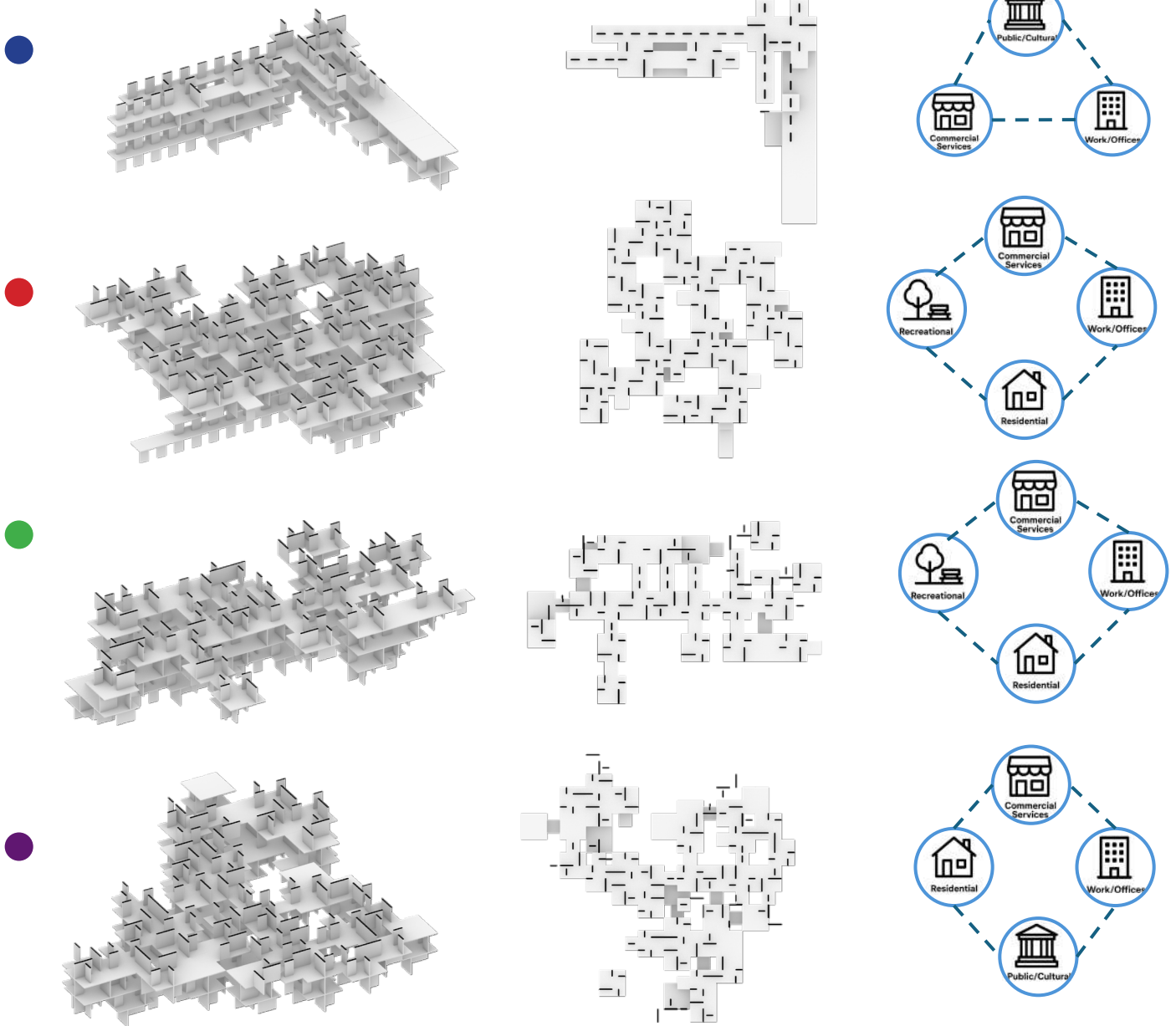
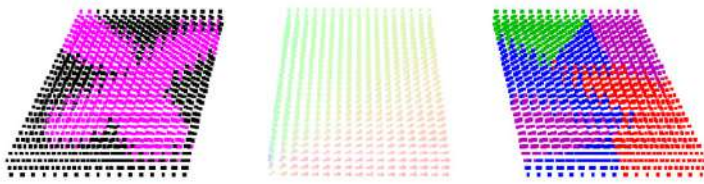


Fig. 148 - Confronto set utilizzati

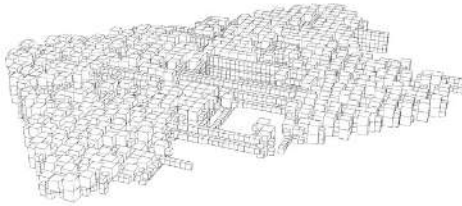
Fig. 149 - Prove di assemblaggio nel camp con analisi del potenziale di illuminazione



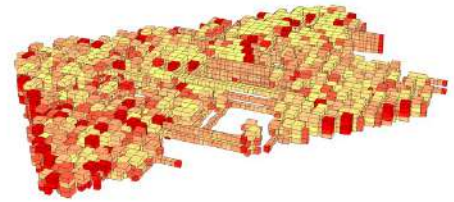
Configurazione ambiente



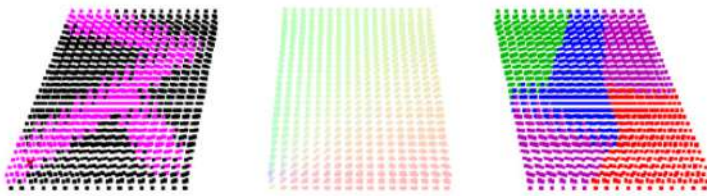
Vista top



Assemblaggio



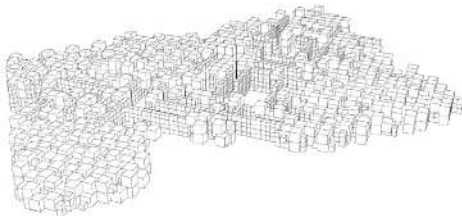
Connettività



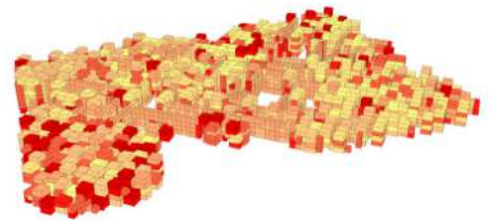
Configurazione ambiente



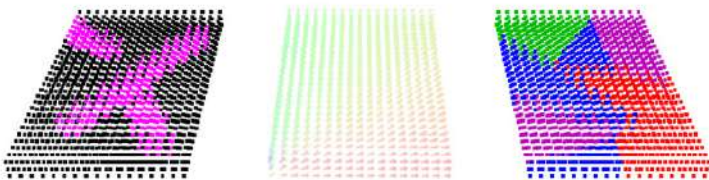
Vista top



Assemblaggio



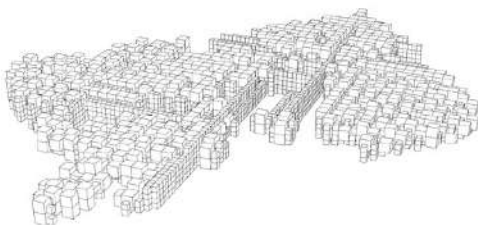
Connettività



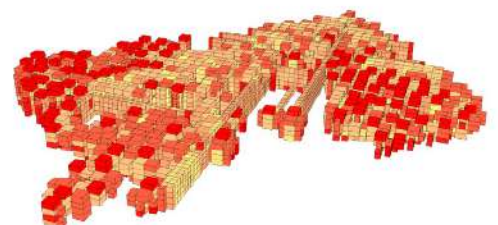
Configurazione ambiente



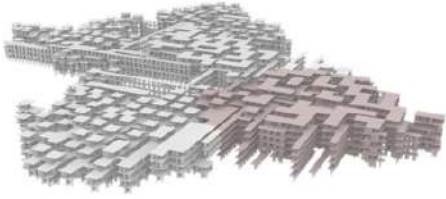
Vista top



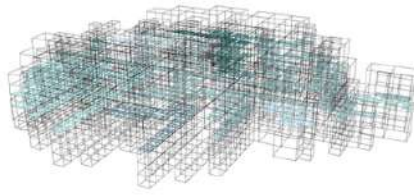
Assemblaggio



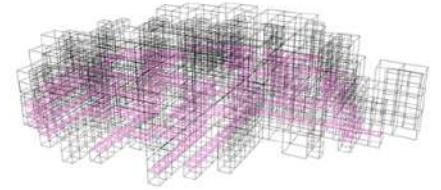
Connettività



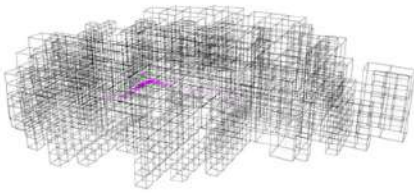
Assemblaggio 200 iterazioni



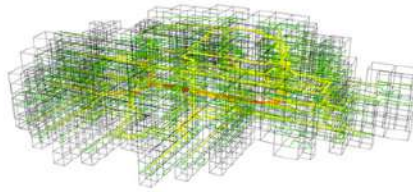
Raggruppamento percorsi in base alla lunghezza



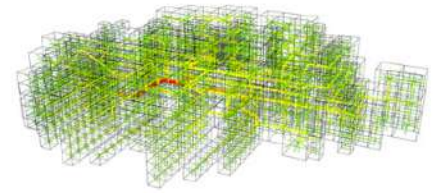
Percorso più lungo



Percorso più breve



Frequenza di passaggio nei percorsi effettivi

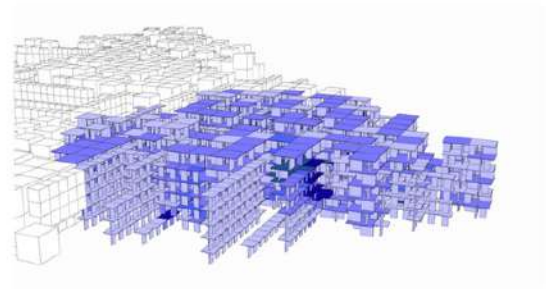


Frequenza di passaggio in funzione delle connessioni

Analisi strutturale spostamento (cm)



Assemblaggio con supporti a terra

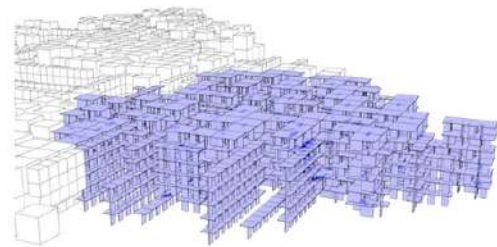


Analisi F.U. per elemento

Analisi strutturale fattore di utilizzo



Analisi - spostamento



Analisi fattore di utilizzo

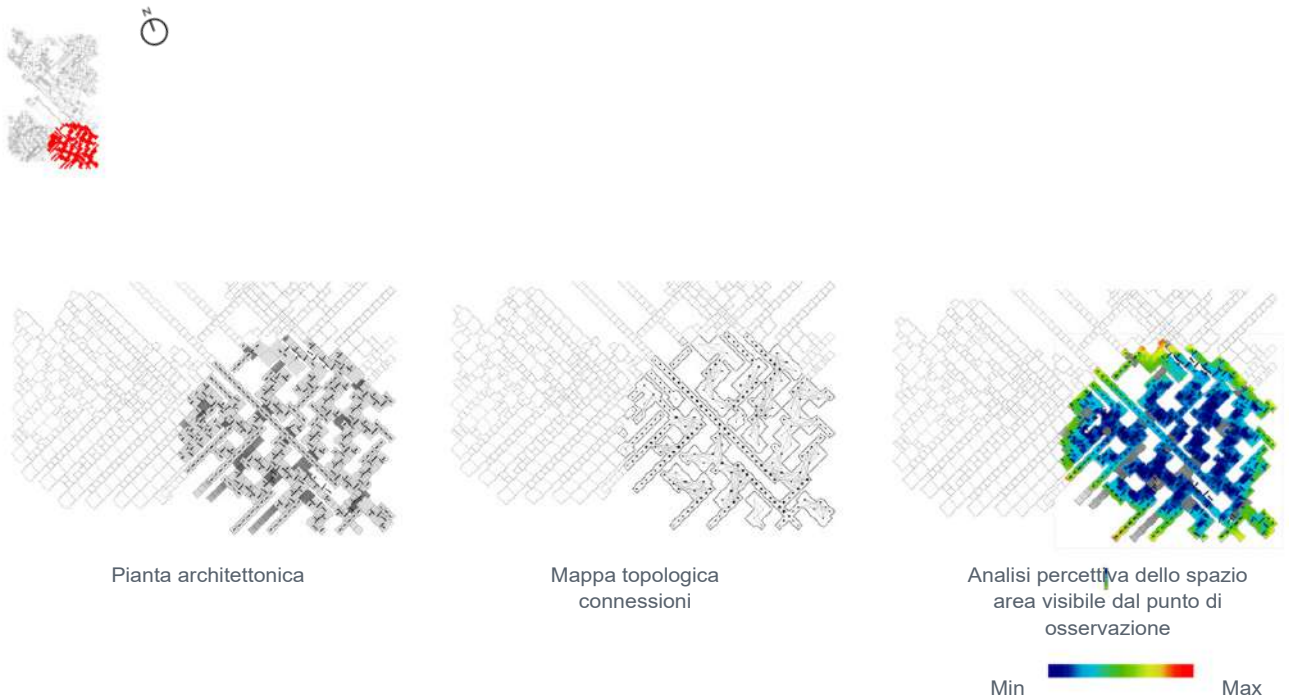


Fig. 150 - Analisi porzione di campo (analisi percorsi e analisi strutturale)

Fig. 151 - Analisi porzione di campo (pianta architettonica, analisi connessioni, analisi quality of space e analisi funzioni)

Fig. 152 - Nuove prove nel campo

A seguito di queste prove è stato selezionato un assemblaggio che rispecchia i criteri ricercati (fig. X). Questo è stato analizzato, in una sua porzione, a livello strutturale e secondo le analisi precedentemente introdotte. Ciò che è emerso è la presenza di interessanti elementi rettilinei di collegamento; tuttavia, si è scelto di potenziare il sistema di intersezioni e incroci, al fine di incrementare la continuità spaziale e la densità relazionale dell'assemblaggio. Per questo motivo sono state effettuate ulteriori prove nel campo, al fine di ottenere configurazioni con maggiore densità di relazioni. A seguito di queste prove è stato selezionato un nuovo assemblaggio, sul quale sono state svolte le medesime analisi.

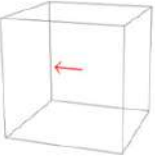
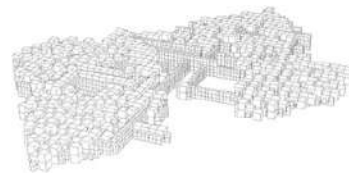
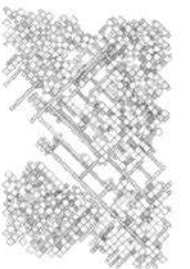
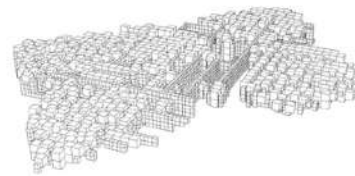
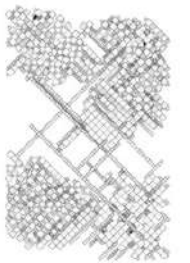
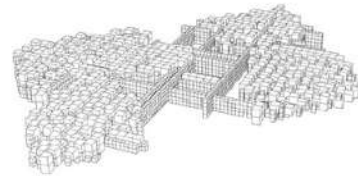
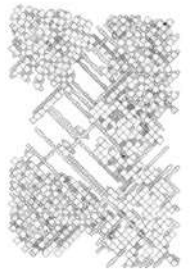
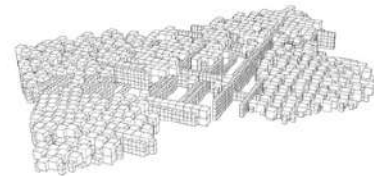
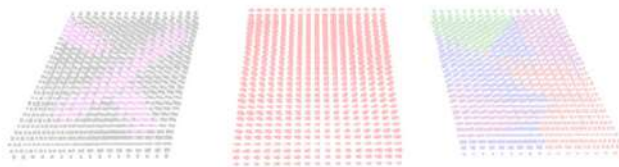
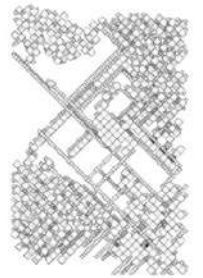
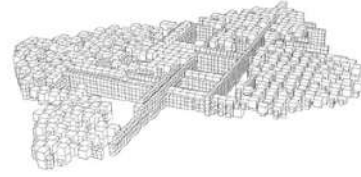
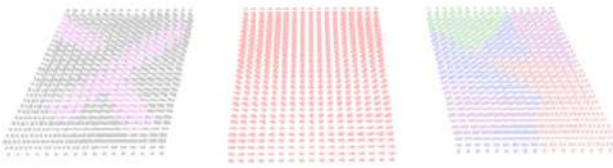
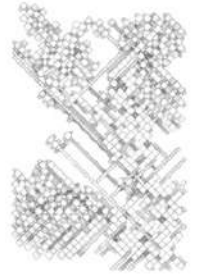
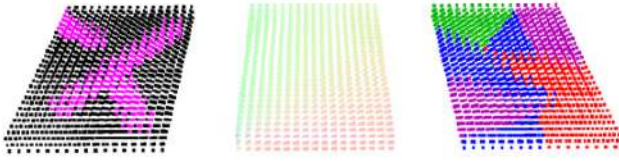
Successivamente, anche in parallelo a queste verifiche, è stata avviata una fase di prove modificando la geometria interna delle parti al fine di ottenere gli spazi ricercati. La scelta della geometria è stata quindi guidata dalla qualità degli spazi ottenuti.

Nel capitolo successivo verrà approfondito lo sviluppo e l'analisi dell'assemblaggio scelto.

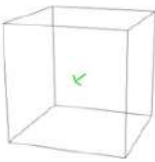
Configurazione ambiente

Assemblaggio

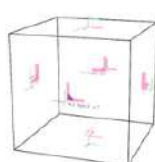
Vista top



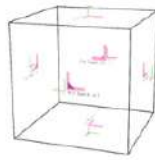
Vettore



Vettore



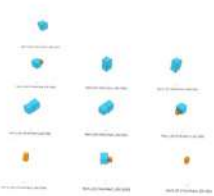
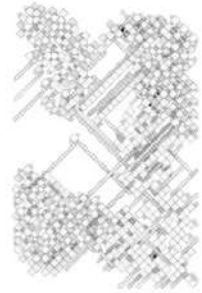
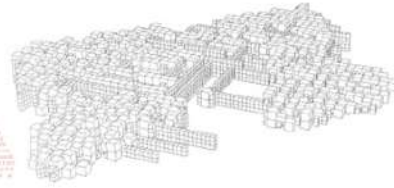
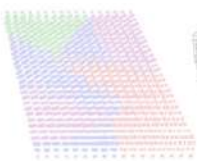
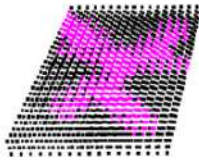
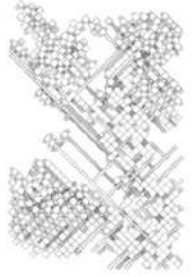
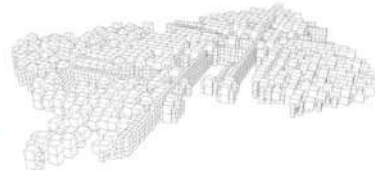
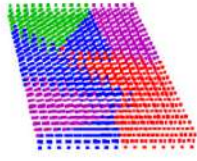
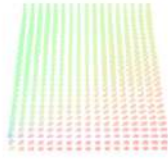
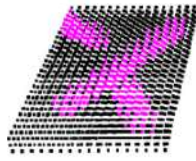
Peso handle



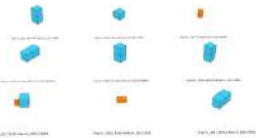
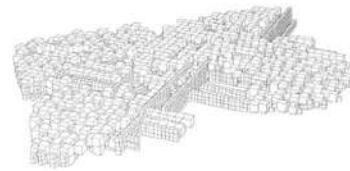
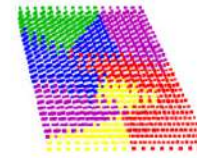
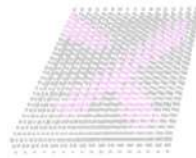
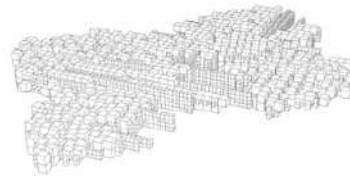
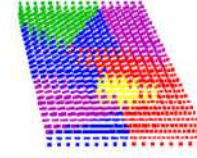
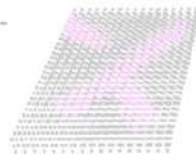
Configurazione ambiente

Assemblaggio

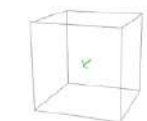
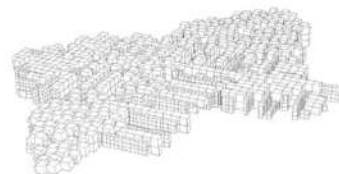
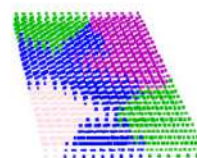
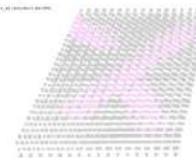
Vista top



Euristiche set giallo



Euristiche set rosa



Vettore

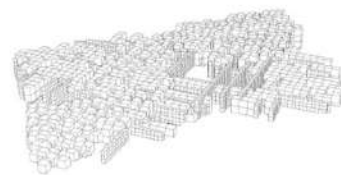
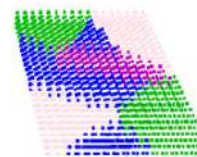
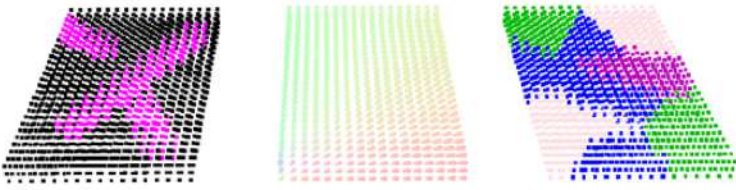


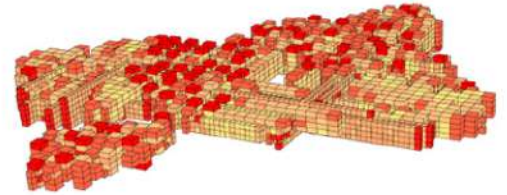
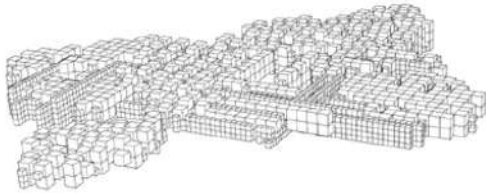
Fig. 152 - Nuove prove nel campo



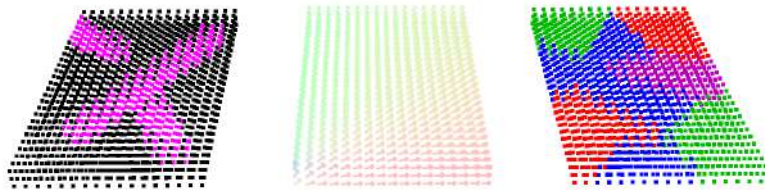
Configurazione ambiente



Vista top



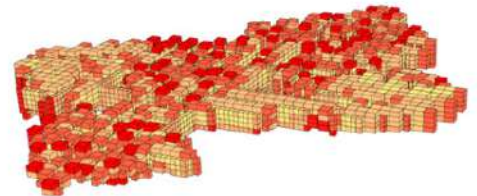
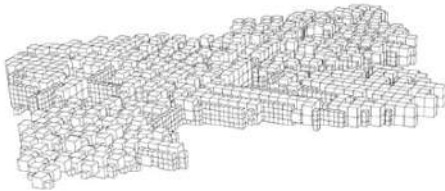
Connettività



Configurazione ambiente

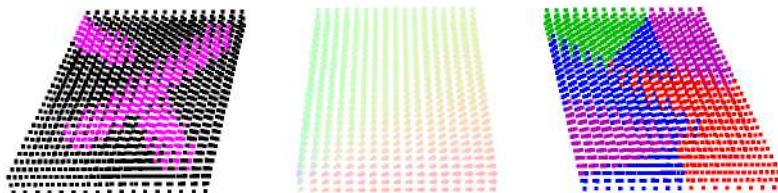


Vista top



Connettività

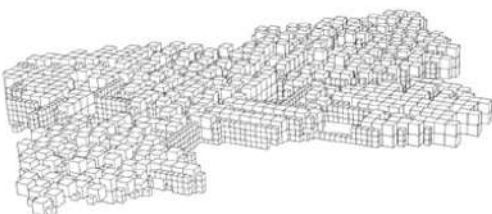
Assemblaggio



Configurazione ambiente




Vista top



Connettività

Assemblaggio

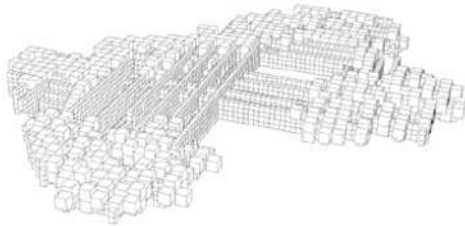
Connettività
 Min  Max



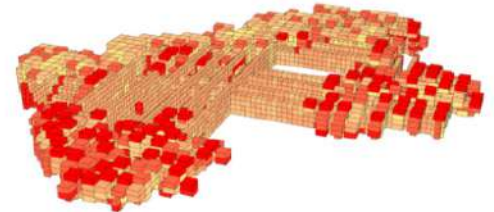
Configurazione ambiente



Vista top



Assemblaggio



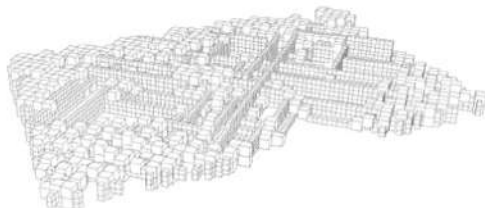
Connettività



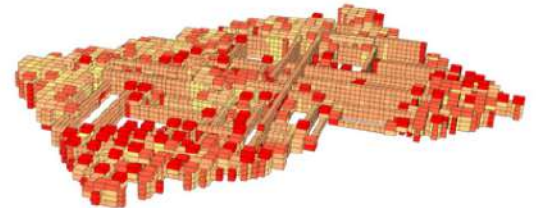
Configurazione ambiente



Vista top



Assemblaggio



Connettività

L'ultimo assemblaggio riportato in Fig. 153 è quello selezionato per il proseguimento del progetto. Le geometrie interne degli Assembly Object saranno approfondite nel capitolo successivo. In questa fase, la linea adottata ha previsto la variazione di tali geometrie nelle diverse prove condotte nel campo: grazie ad Assembler è stato possibile testare numerose configurazioni e valutarne gli effetti sull'aggregazione. Per chiarezza narrativa, non è stato riportato un diagramma riassuntivo dell'intero processo esplorativo; verranno invece presentate esclusivamente le configurazioni conclusive. I criteri di selezione adottati sono coerenti con quelli applicati nel resto del progetto e privilegiano le soluzioni capaci di garantire maggiore coerenza costruttiva e qualità spaziale.

Fig. 153 - Nuove prove nel campo con analisi potenziale di esposizione



7. PROGETTO

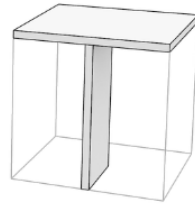
A seguito delle prove e delle analisi esposte nei capitoli precedenti, il lavoro entra in una fase successiva di definizione del sistema finale. Partendo dalle impostazioni dell'ultimo ambiente virtuale presentato nel capitolo di design process, il lavoro prosegue con una fase di definizione del sistema finale, nella quale le configurazioni sperimentate vengono implementate e completate, definendo l'assetto finale del sistema.

Una prima fase del processo ha riguardato la definizione delle geometrie interne attraverso l'esecuzione di diverse prove iterative. Queste sperimentazioni hanno portato all'individuazione di due geometrie base, una per ciascuna delle due parti del sistema, e di due varianti di configurazione, anch'esse differenziate per le due parti. A queste si aggiungono tre geometrie di collegamento verticale, che garantiscono continuità spaziale e strutturale tra i diversi livelli. Le geometrie interne corrispondono al componente A, caratterizzato da un lato di 8 metri, mentre la geometria esterna è associata al componente B, con lato di 4 metri. Questi cambi di configurazione avvengono secondo regole impostate nel sistema, principalmente legate all'altezza, all'orientamento e alle distanza reciproca tra questi elementi.

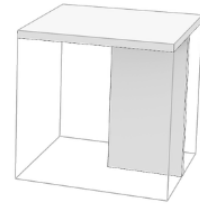
7. PROGETTO



Componente B -
configurazione 1



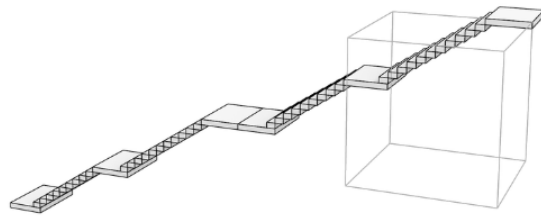
Componente B -
configurazione 2



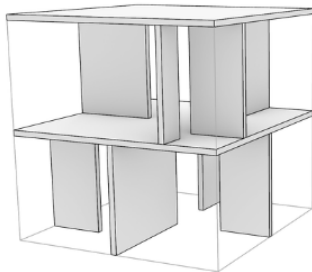
Componente B -
configurazione 3



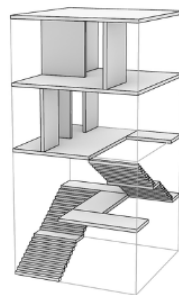
Parti con configurazione 1 o 2, possibili
posioni per collegamento verticale



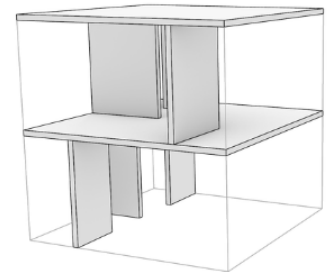
Componente B -
collegamento verticale



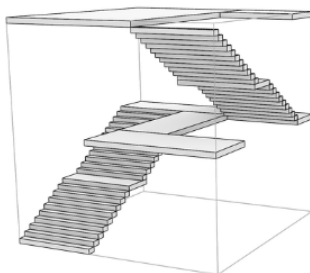
Componente A -
configurazione base



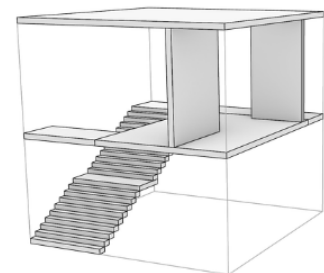
Componente A - regola per
configurazione 1



Componente A -
configurazione 1



Componente A -
collegamento verticale



Componente A -
collegamento verticale
all'ultimo piano

A partire da una configurazione base sono state previste dei cambi di configurazione per le parti includendo anche i collegamenti verticali. per A partire da queste configurazioni è stato definito un sistema di chiusure, come riportato in fig. X, in grado di completare il modulo e controllare il grado di apertura verso l'esterno. Il sistema di chiusure è realizzato interamente in CLT, in continuità con la logica costruttiva dell'intero progetto. Tuttavia, esso non è stato considerato nell'analisi strutturale, in quanto inteso come elemento modificabile nel tempo in base alle esigenze d'uso. Questa scelta consente di mantenere aperta la possibilità di trasformazione e adattamento dell'involucro, senza compromettere la stabilità del sistema portante.

Fig. 154 - Geometrie componente A e componente B

Fig. 155 - Sistema di chiusure componente A

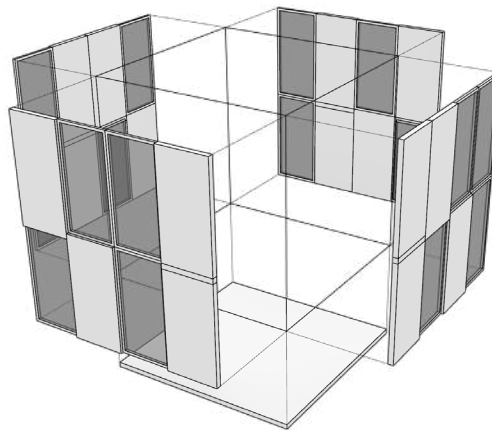
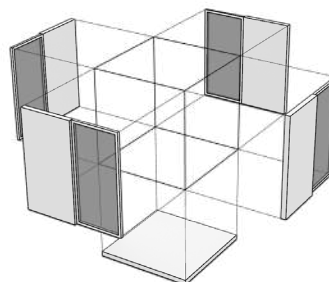


Fig. 156 - Sistema di chiusure componente B



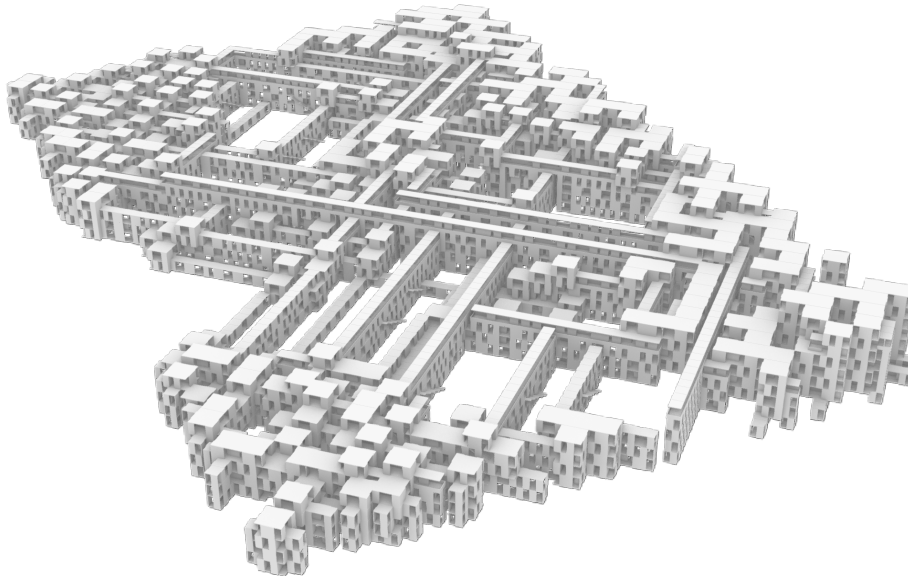


Fig. 157 - Assemblaggio con sistema di chiusure

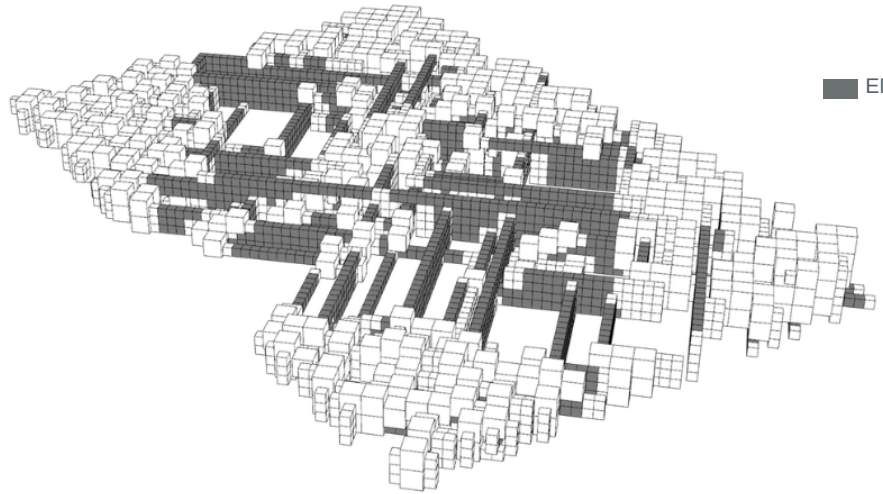
Con l'obiettivo di aumentare la permeabilità dell'assemblaggio e favorire una maggiore relazione tra interno ed esterno, sono state condotte diverse prove di modifica delle geometrie e delle chiusure in elementi puntuali del sistema. Negli elementi evidenziati in fig. 158 non è stata mantenuta la chiusura standard adottata nel resto del progetto. In una prima fase è stato sperimentato l'inserimento di un parapetto semplice, introducendo l'idea di spazi aperti e affacci diretti.

Successivamente, per incrementare ulteriormente la permeabilità, sono state attuate diverse strategie. Le geometrie sono state modificate attraverso l'alternanza di pieni e vuoti. In alcuni casi l'elemento verticale è stato ruotato; in altri è stato rimosso selettivamente. Sono state inoltre sottratte porzioni dell'assemblaggio per generare un sistema di vuoti. A queste operazioni si aggiungono l'inserimento di un pergolato, che riprende il sistema di aggiunte e l'introduzione di sbalzi e rientranze, capaci di articolare il prospetto e generare spazi di transizione tra interno ed esterno.

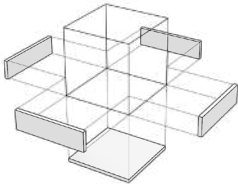
Fig. 158 - Modifica al sistema di chiusure - primo caso

Fig. 159 - Modifica al sistema di chiusure - secondo caso

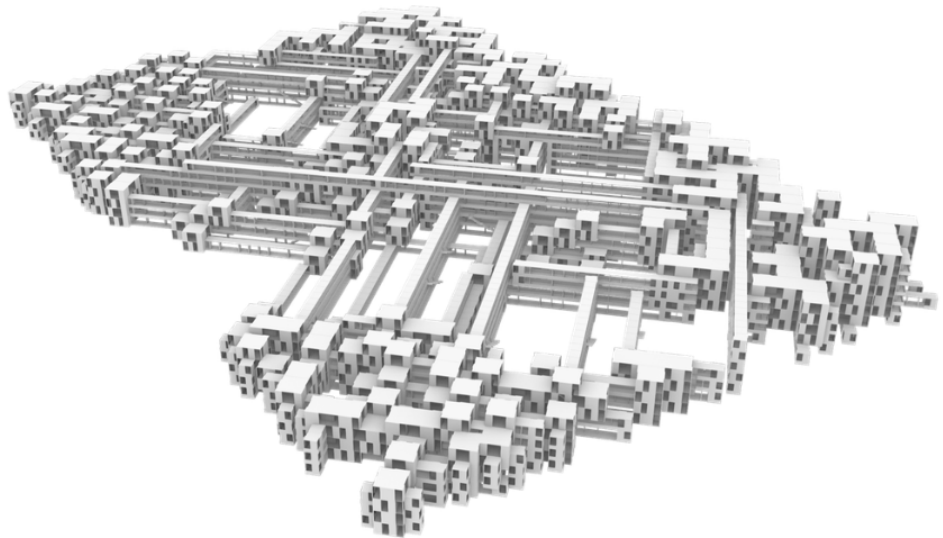
Fig. 160 - Modifica al sistema di chiusure - terzo caso



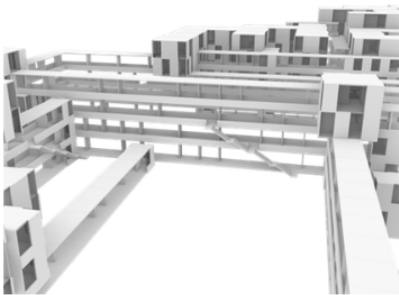
■ Elementi modificati



Nuova chiusura per gli
elementi selezionati



Assemblaggio modificato



Vista dell'assemblaggio



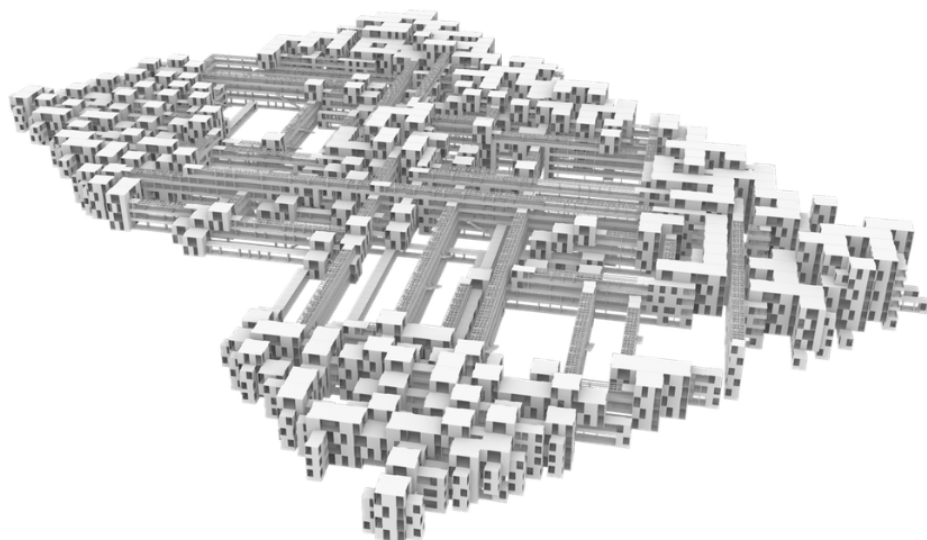
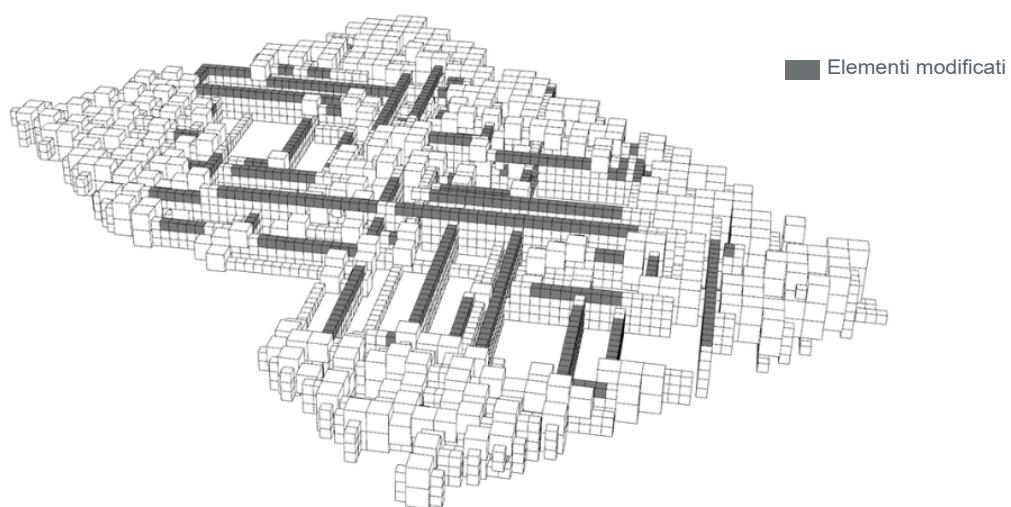
Vista dell'assemblaggio



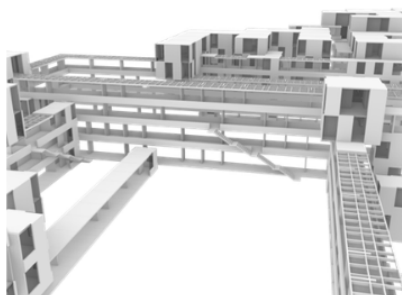
7. PROGETTO



Nuova chiusura per gli
elementi selezionati



Assemblaggio modificato



Vista dell'assemblaggio



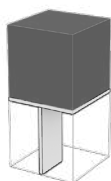
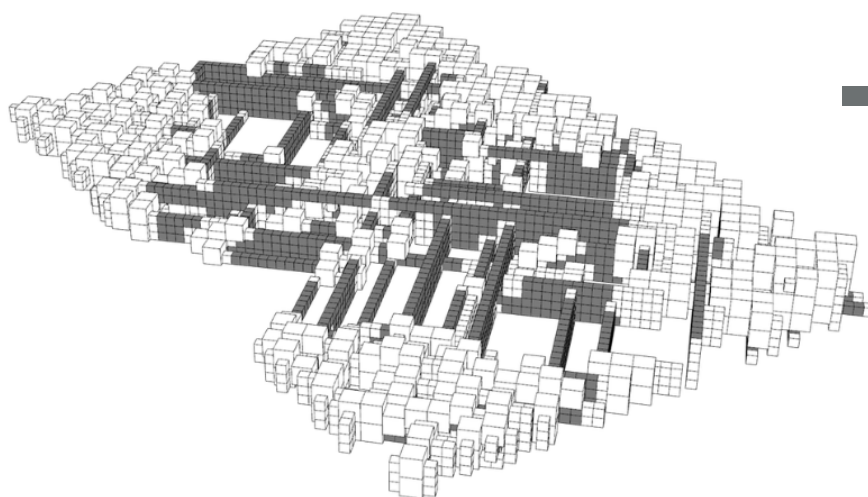
Vista dell'assemblaggio



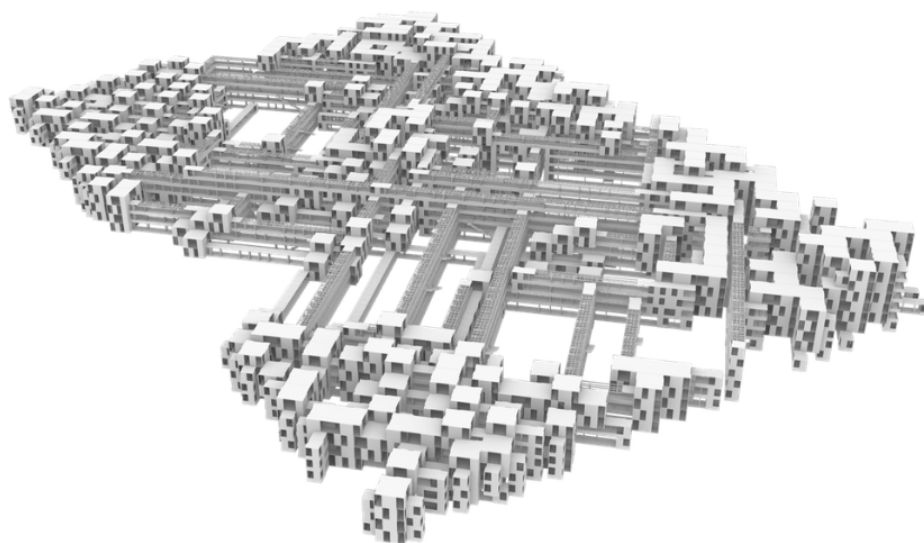
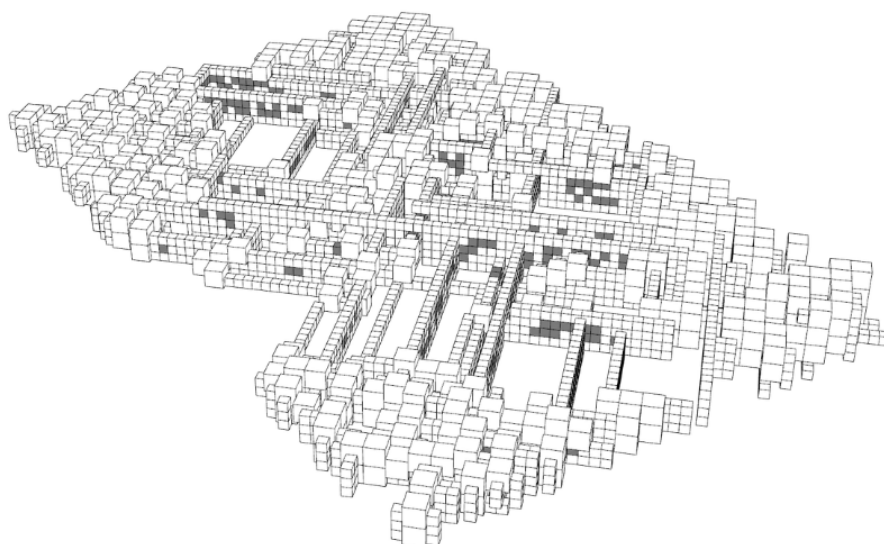
■ Elementi modificati



Nuova chiusura per gli
elementi selezionati



Ulteriore criterio di
selezione degli elementi
da modificare



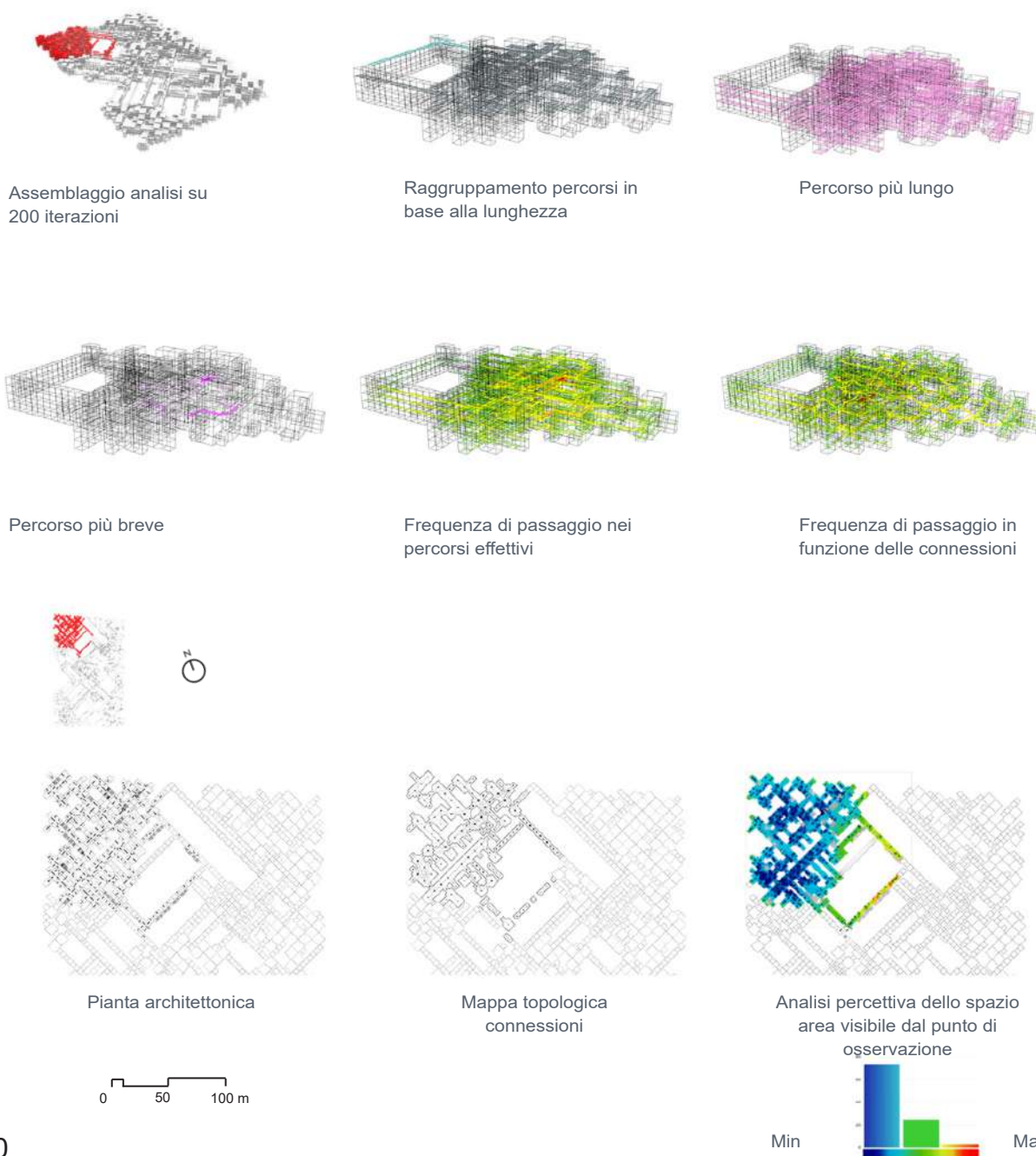
Assemblaggio modificato


Tra le diverse configurazioni testate è stata selezionata l'ultima soluzione, che prevede sia l'inserimento del pergolato sia l'introduzione di sporgenze e rientranze, generando elementi a sbalzo. Questa configurazione consente di bilanciare esigenze di permeabilità, articolazione spaziale e riconoscibilità del sistema, mantenendo al contempo la coerenza con le regole generative che governano l'assemblaggio.

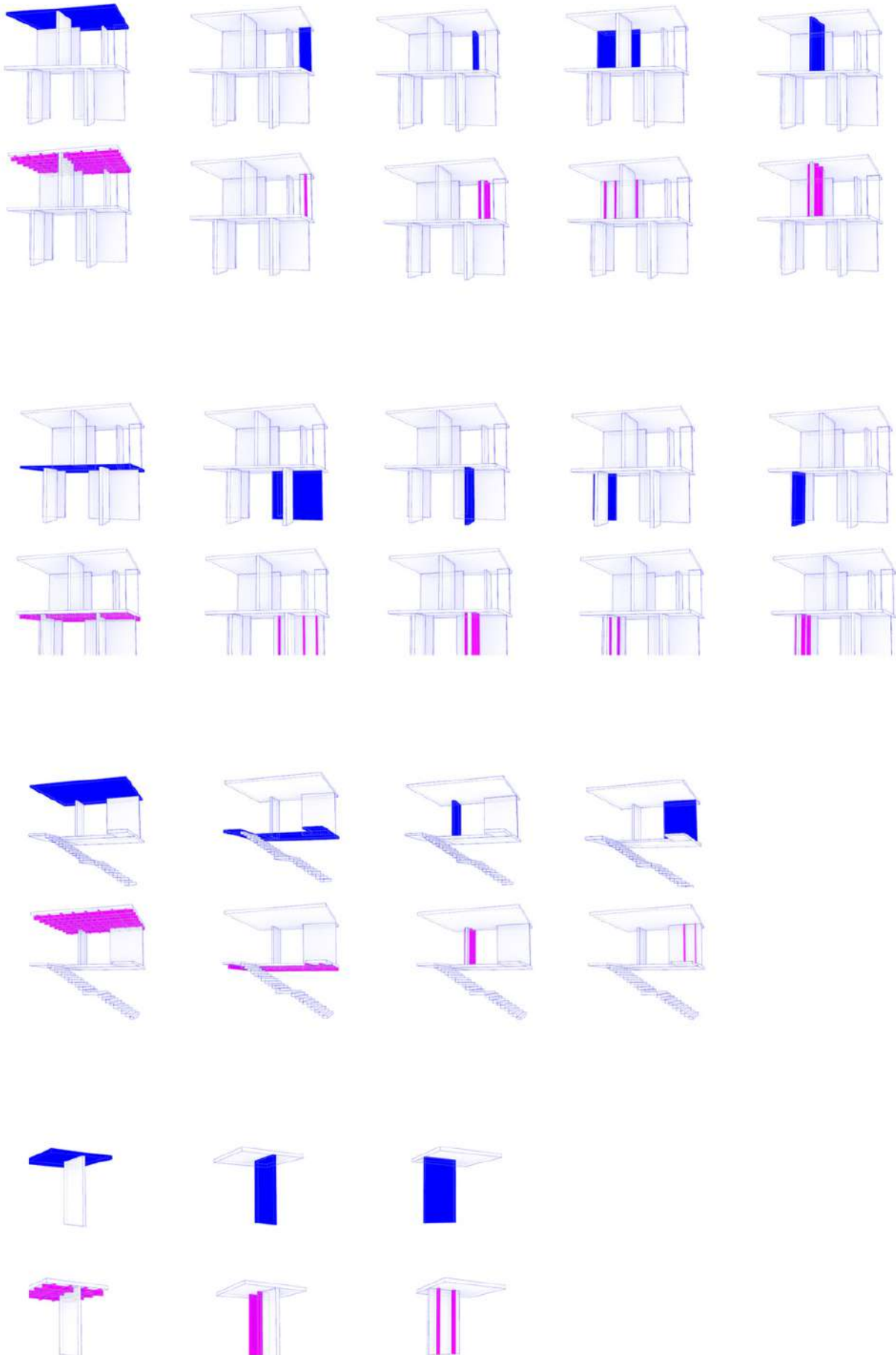
Successivamente sono state svolte analisi su una porzione dell'assemblaggio, in continuità con quelle presentate nel capitolo precedente, con particolare attenzione ai percorsi, al comportamento strutturale prima e dopo le modifiche apportate al sistema strutturale.

Fig. 161 - Analisi porzione di assemblaggio - analisi dei percorsi, mappa topologica e analisi percettiva dello spazio

Fig. 162 - Sistema di aggiunte



 F.U > 0.8
 Elementi aggiunti



7. PROGETTO

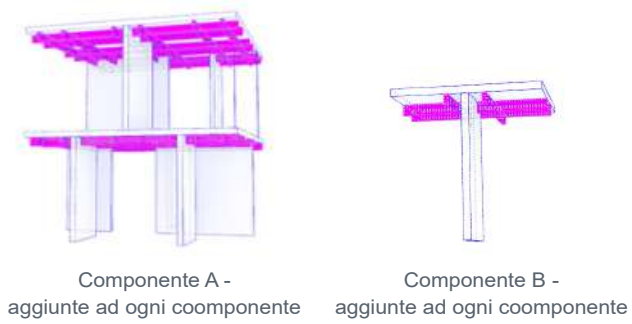
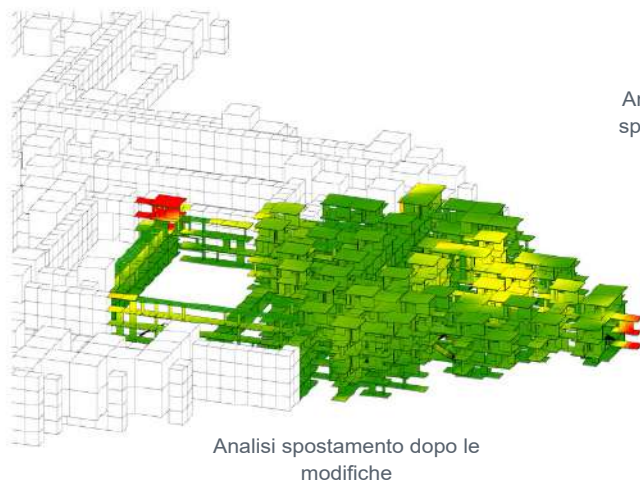
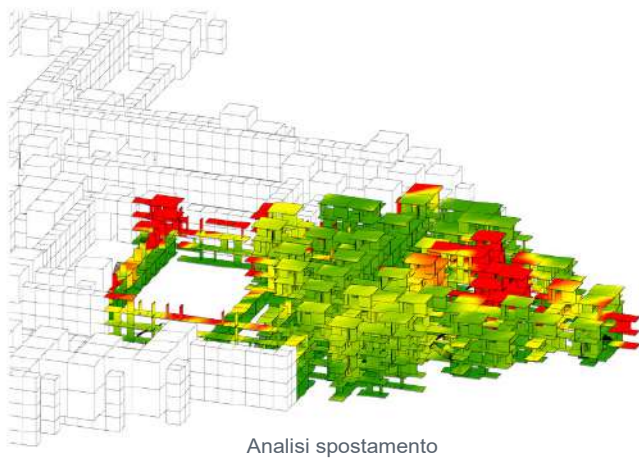
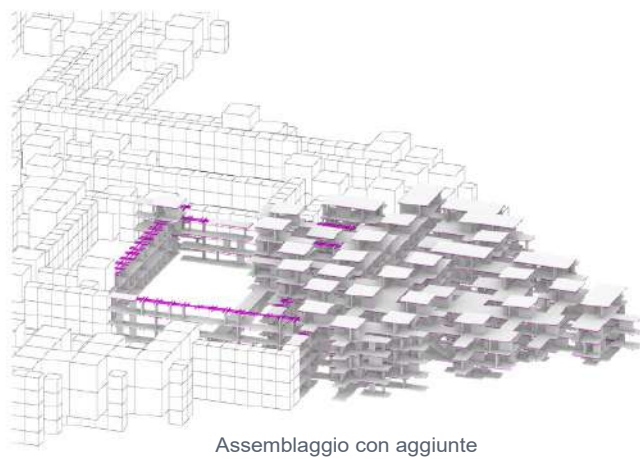
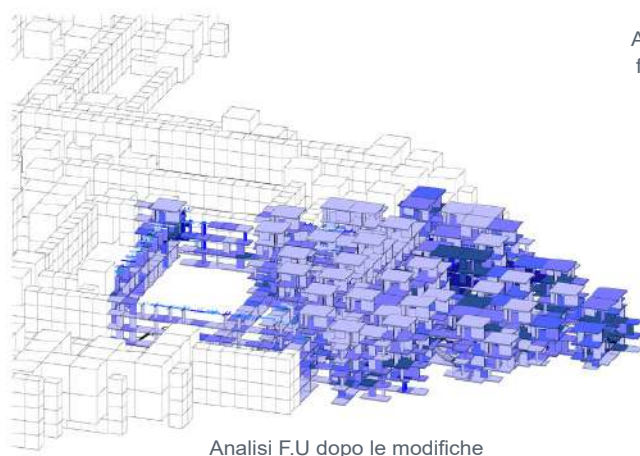
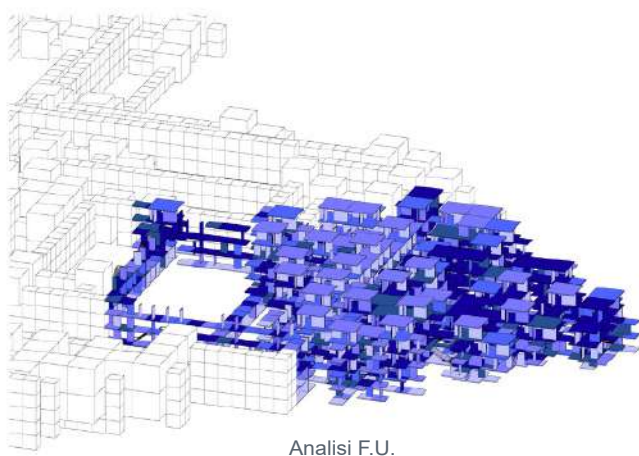
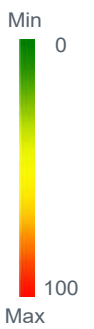


Fig. 163 - Geometrie aggiunte ad ogni componente

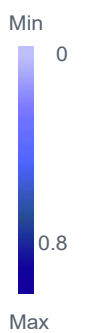
Fig. 164 - Analisi strutturale porzione di assemblaggio

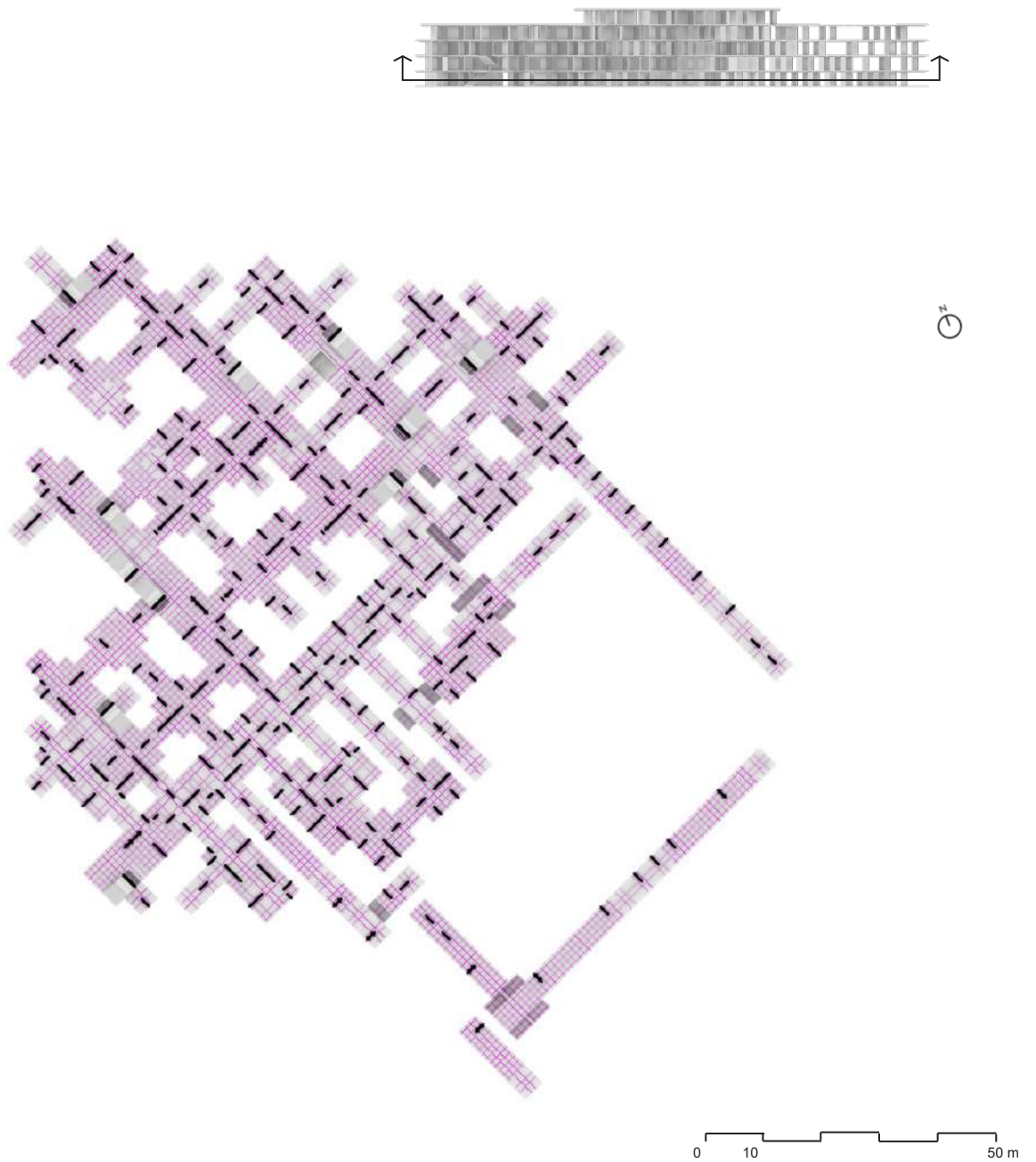


Analisi strutturale
spostamento (cm)



Analisi strutturale
fattore di utilizzo





A completamento del progetto sono stati introdotti parapetti ed elementi di arredo. L'arredo non viene concepito come elemento aggiunto a posteriori, ma come parte integrante del sistema di aggiunte. Al sistema è stato inoltre integrato un ulteriore livello di aggiunte in facciata che segue le stesse regole di quello strutturale e ha l'obiettivo di aumentare la leggibilità del processo generativo, rendendo esplicita in facciata la logica aggregativa che governa l'intero progetto.

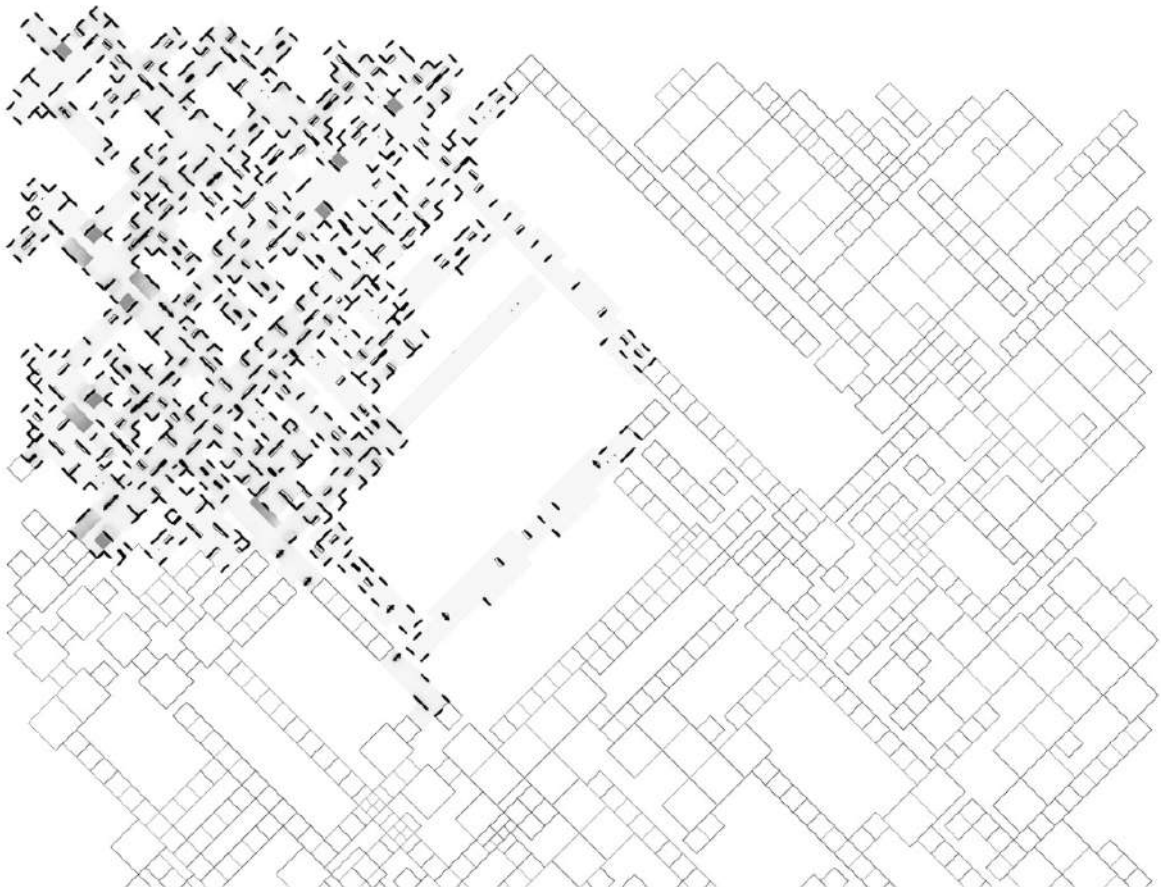
Fig. 165 - Porzione di
 assemblaggio modificata -
 vista dal basso



Componente B - possibili configurazioni di arredo



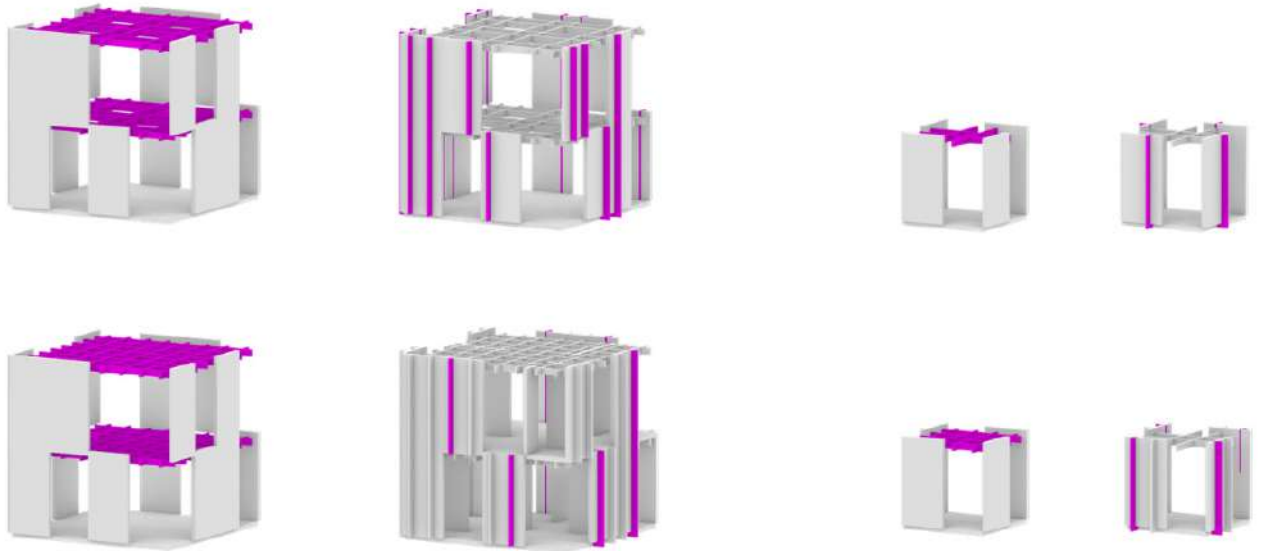
Componente A - possibili configurazioni di arredo



Pianta porzione di assemblaggio analizzata con chiusure e arredo



Vista assemblaggio



Sistema di aggiunte in facciata

Fig. 166 - Sistema di arredo

Fig. 167 - Pianta porzione di assemblaggio

Fig. 168 - Sistema di aggiunte in facciata



Vista assemblaggio con sistema di aggiunte in facciata



Fig. 169 - Pianta assemblaggio
- piano terra

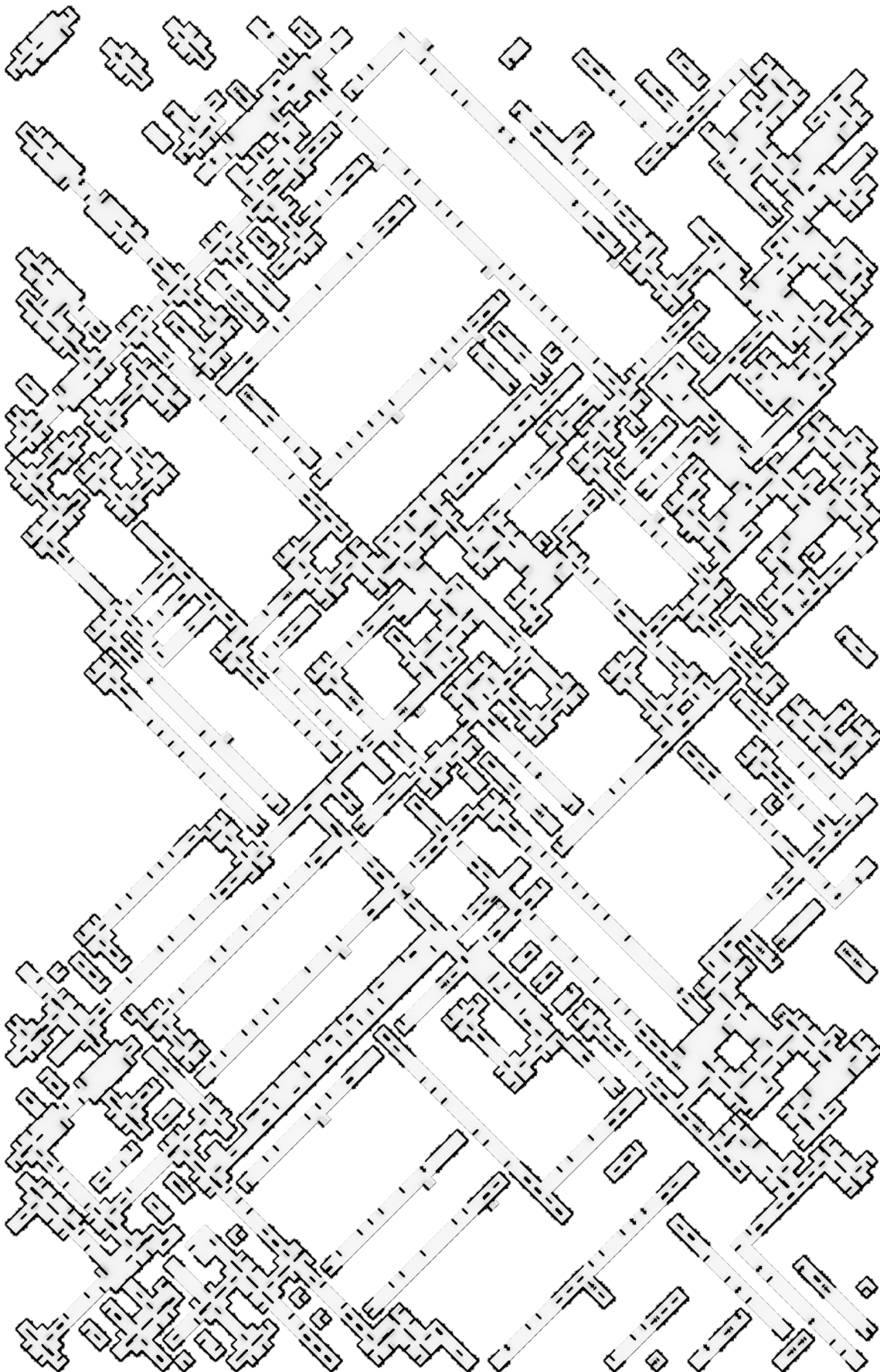
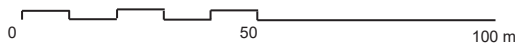
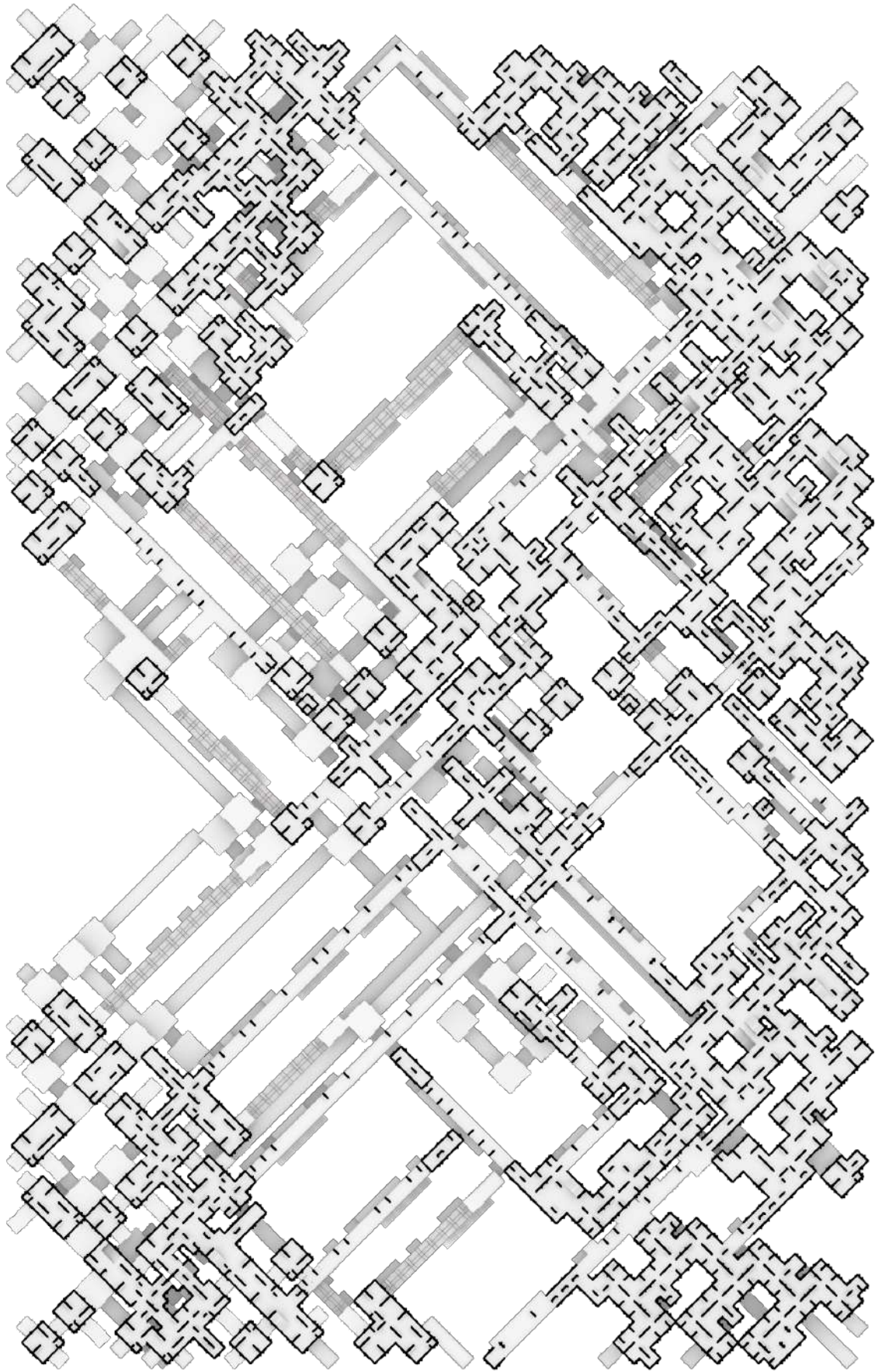
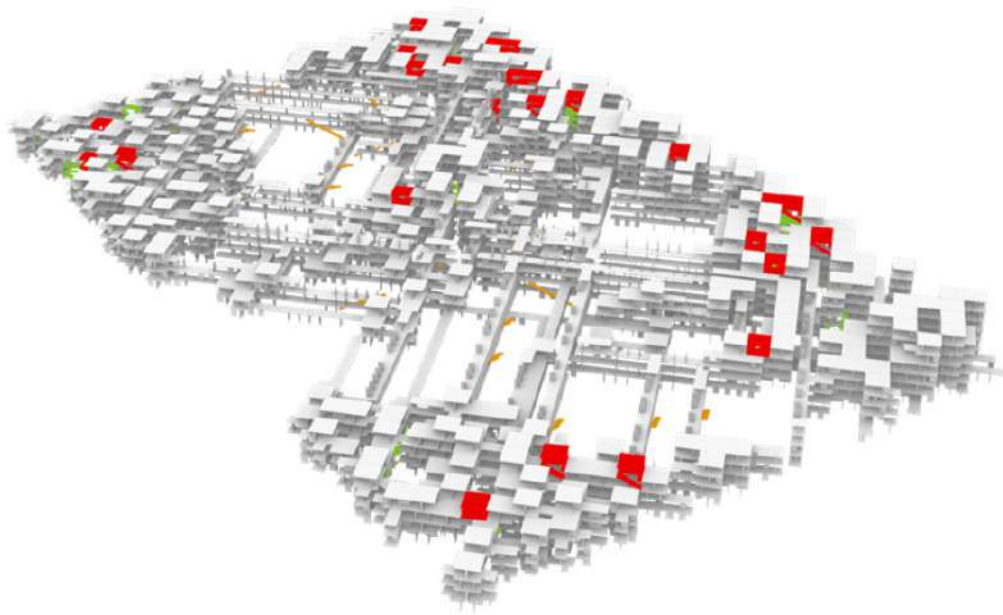


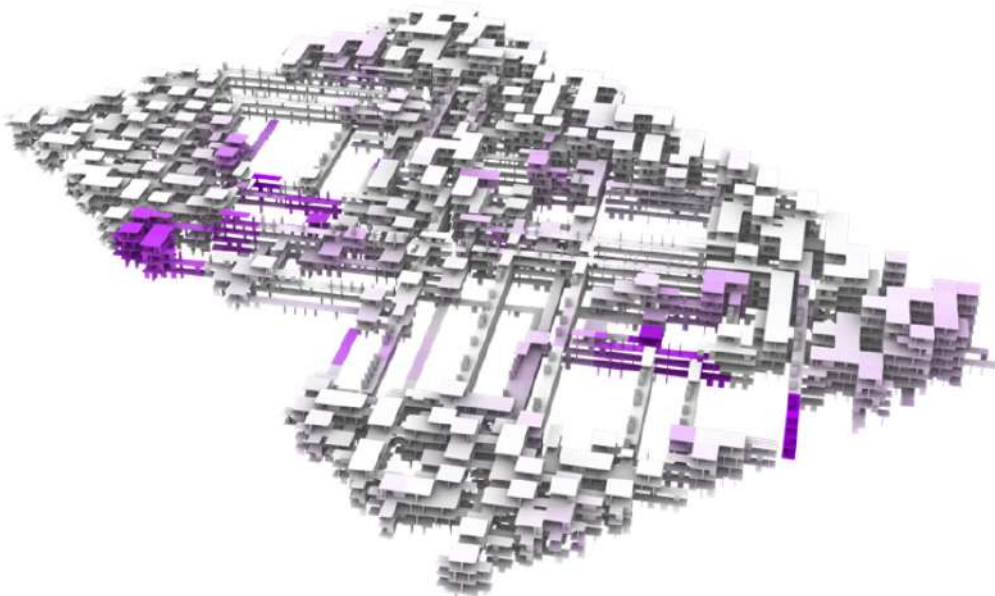
Fig. 170 - Pianta assemblaggio
- quarto piano



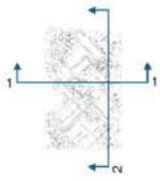


Disposizione collegamenti verticali nell'assemblaggio

Min  Max



Distanza da collegamento verticale



Dim. 8m x 8m x 0.2m
Numero: 2008



Dim. 4m x 4m x 0.2m
Numero: 6268



Dim. 4m x 3m x 0.2m
Numero: 721



Dim. 4m x 2m x 0.2m
Numero: 16960



Dim. 4m x 1m x 0.2m
Numero: 630

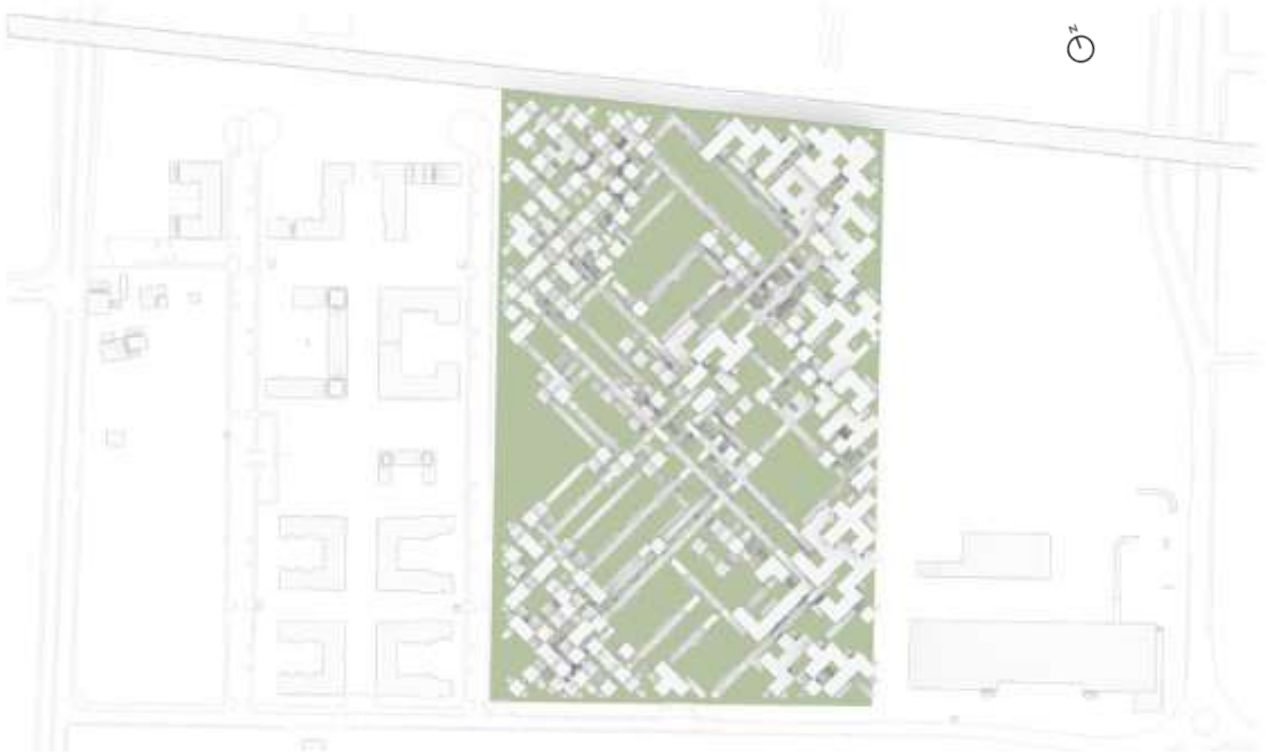


Dim. 4m x 0.1m x 0.3m
Numero: 78790

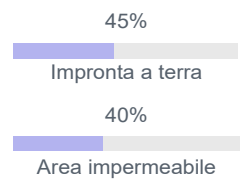
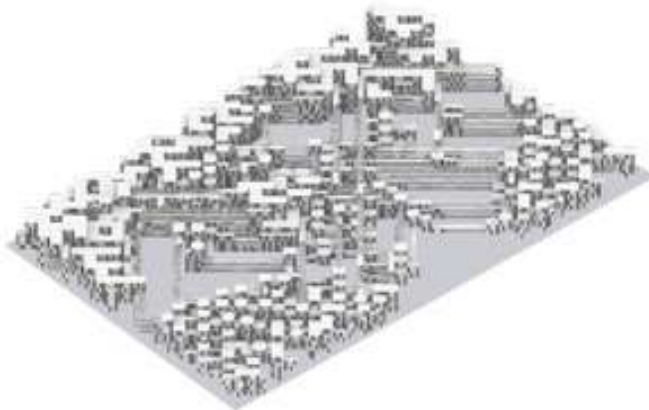
Fig. 170 - Analisi collegamenti verticali

Fig. 171 - Sezioni

Fig. 172 - Tutti gli elementi utilizzati per la generazione dell'assemblaggio



0 50 100 m



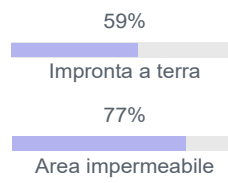
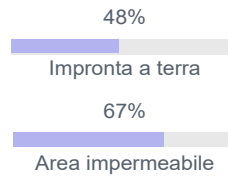
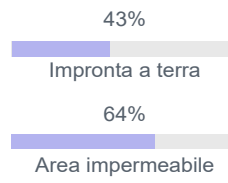
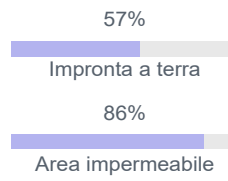
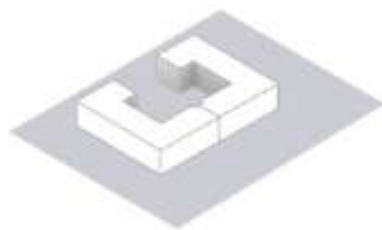


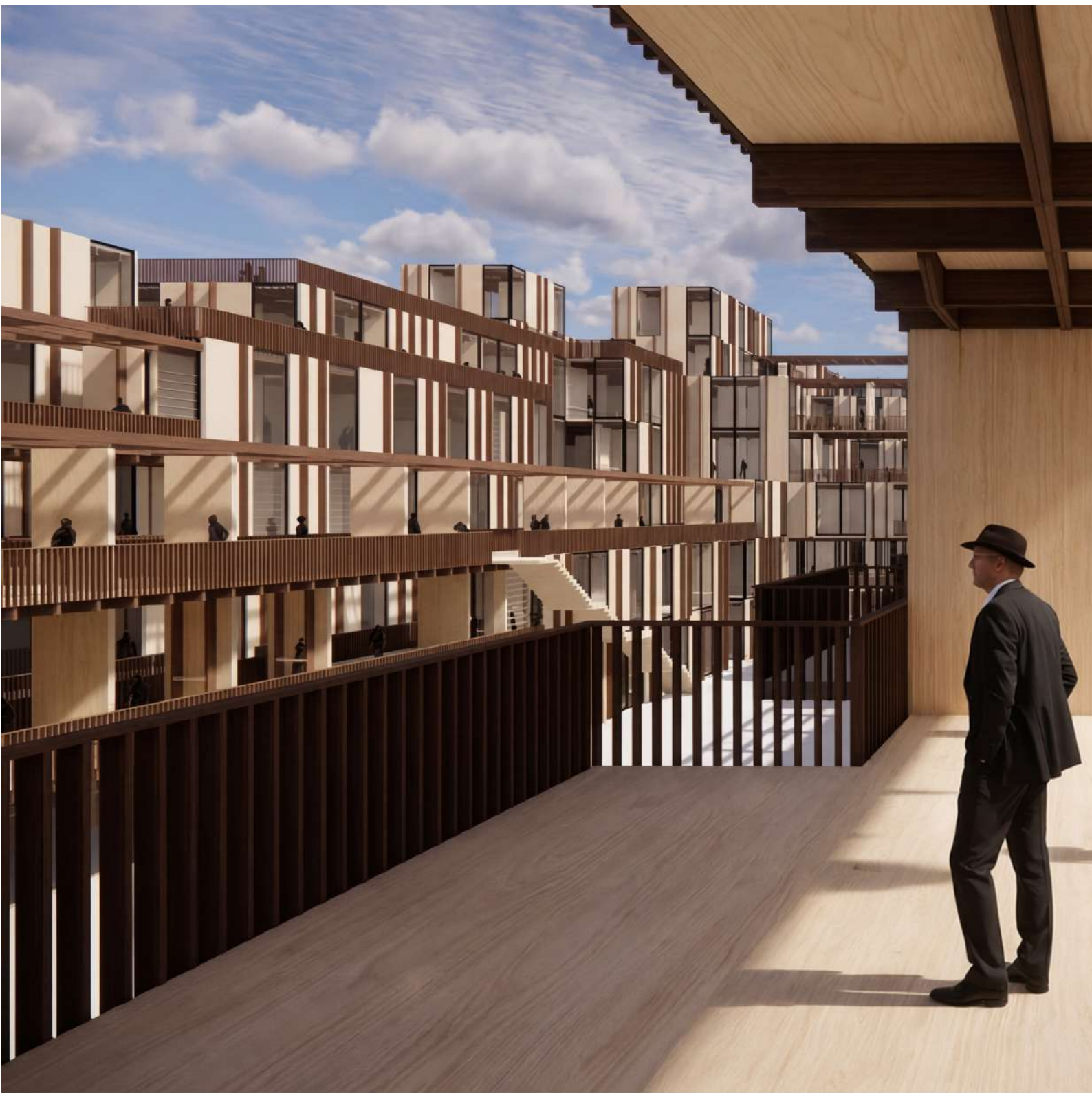
Fig. 173 - Analisi impronta a terra e area impermeabile - confronto con gli edifici della zona



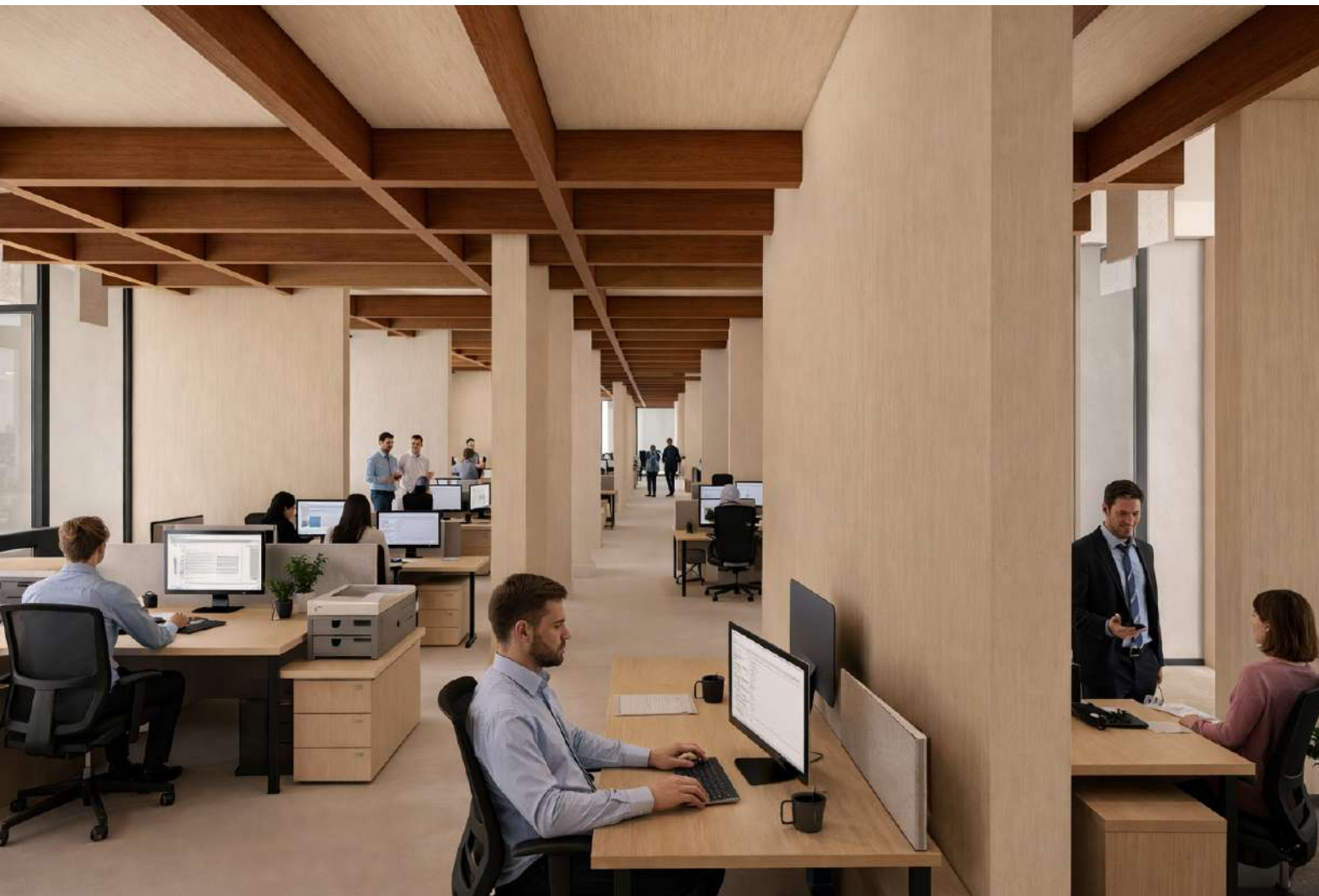


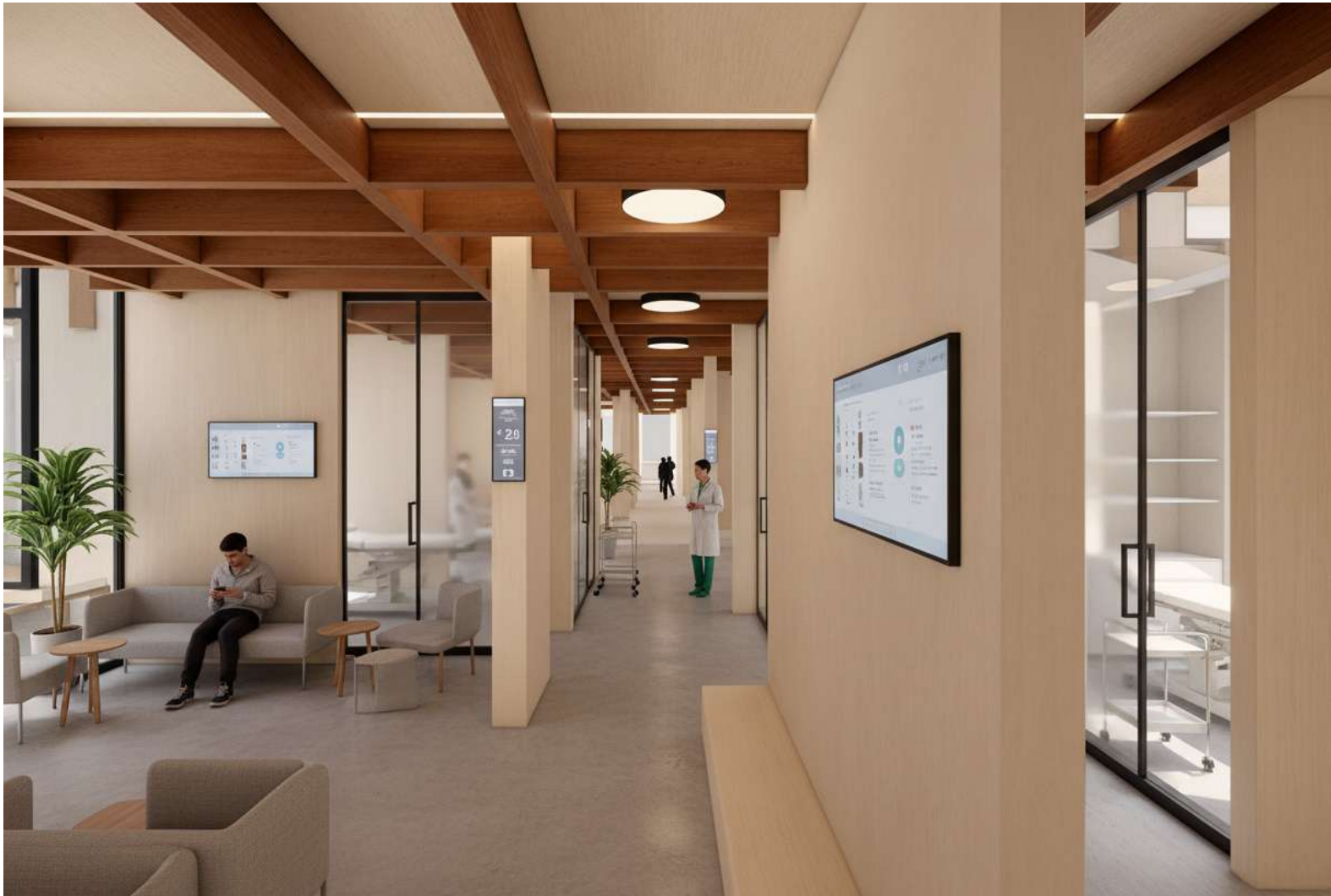




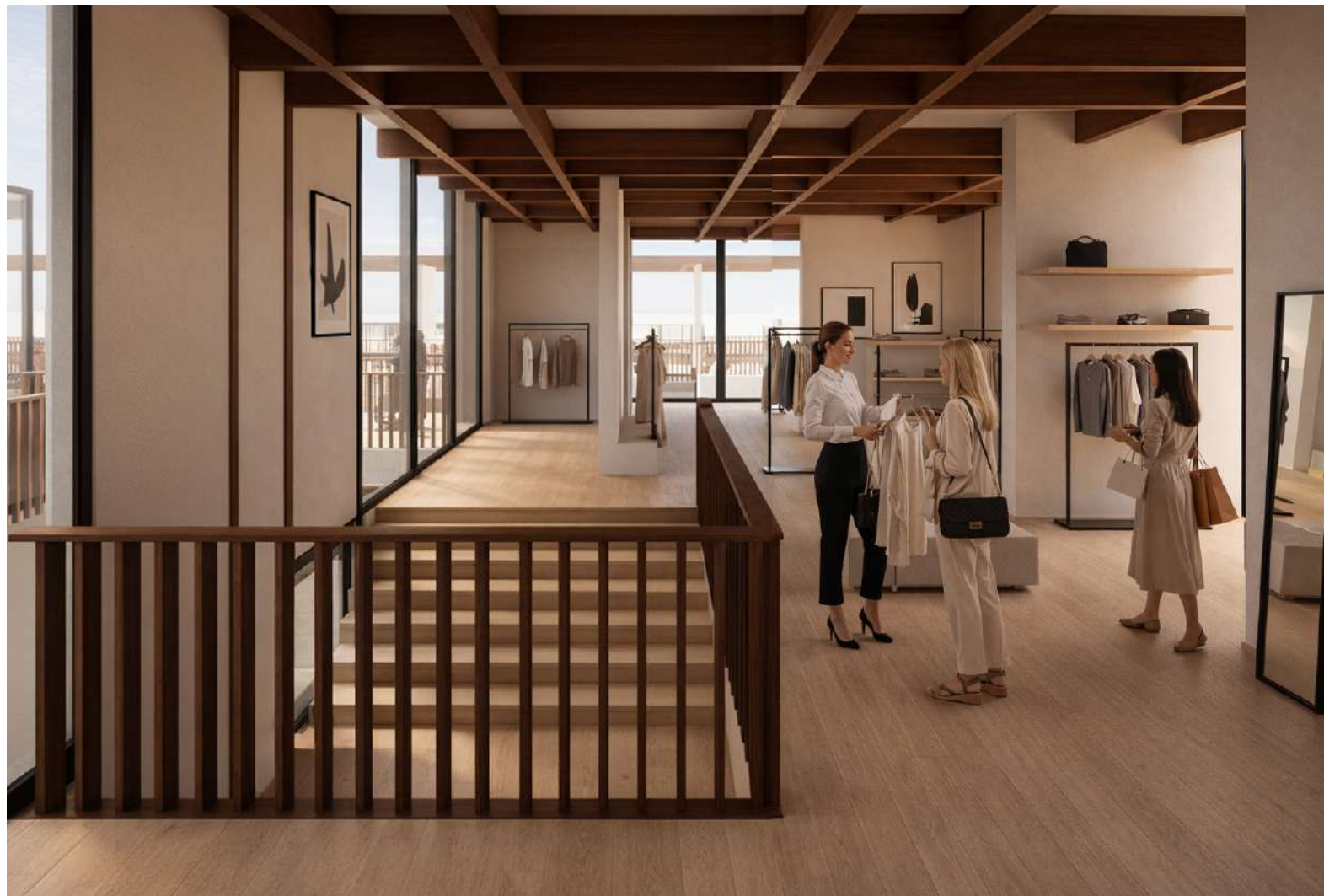














8. CONCLUSIONI

Il progetto sviluppato in questa tesi propone un sistema architettonico in legno per la generazione di un habitat, inteso come un ambiente residenziale integrato, in cui la funzione abitativa costituisce il fulcro attorno al quale si articolano spazi culturali, commerciali, ricreativi e collettivi.

La complessità architettonica è affrontata attraverso un principio di economia dei mezzi, inteso non semplicemente come riduzione delle risorse impiegate, ma come capacità di raggiungere un obiettivo con il minimo sforzo necessario rispetto a ciò che si intende massimizzare. Questo principio si traduce nell'uso di un numero limitato di elementi ricorrenti, la cui ridondanza permette di generare configurazioni spaziali differenti. La complessità del sistema deriva dalla varietà delle relazioni che si instaurano tra elementi ripetuti, secondo una logica di combinazione controllata.

In questa prospettiva, il sistema architettonico si configura come adattivo e polivalente. L'adattabilità si manifesta su più livelli: da un lato, il sistema può essere applicato in contesti differenti, mantenendo una struttura di base riconfigurabile in funzione delle condizioni specifiche dell'ambiente; dall'altro, l'architettura è in grado di evolversi nel tempo, adattandosi alle esigenze mutevoli degli utenti e alle diverse modalità di utilizzo dello spazio.

Il progetto si fonda su un principio di assemblaggio a secco, che consente di modificare, integrare o sostituire gli elementi nel tempo. L'impiego di componenti standardizzati e ridotti semplifica e accelera il processo costruttivo, mentre l'aggiunta di elementi strutturali locali

permette di rispondere a specifiche condizioni di carico, consentendo al sistema di adattarsi alle necessità.

Un aspetto centrale riguarda la relazione tra struttura e architettura: gli elementi di rinforzo, oltre a garantire le prestazioni strutturali, partecipano alla definizione dello spazio e alla costruzione dell'estetica dell'edificio. L'integrazione tra comportamento strutturale e configurazione architettonica rende così leggibile il funzionamento della struttura, il modo in cui il sistema reagisce alle sollecitazioni diventa visibile e interpretabile nello spazio costruito. Gli stessi elementi possono inoltre assumere ulteriori funzioni d'uso, come componenti di arredo.

Il progetto è stato reso possibile grazie a un approccio computazionale, che ha integrato strumenti di progettazione generativa e analisi strutturale in un processo iterativo continuo. L'utilizzo di strumenti come Assembler e Karamba3D ha consentito di esplorare configurazioni spaziali diverse, valutandone simultaneamente le prestazioni strutturali e le potenzialità architettoniche. Il processo progettuale si è configurato come un sistema di feedback tra forma e struttura, in cui le informazioni generate dall'analisi guidano le scelte successive.

L'impiego di strumenti computazionali comporta tuttavia alcune criticità, in particolare la curva di apprendimento e le competenze richieste per padroneggiarli. Nonostante ciò, essi offrono un vantaggio significativo, permettendo di affrontare scenari complessi e di gestire le molteplici relazioni tra geometria, struttura e processo costruttivo.

Nel complesso, il progetto dimostra come un approccio sistemico e computazionale possa superare la tradizionale separazione tra ideazione e costruzione, restituendo continuità tra forma, tecnica e processo. L'architettura emerge così come un sistema dinamico di relazioni tra elementi, materiali e forze, piuttosto che come oggetto statico.

In questa prospettiva, il progetto non è inteso come una configurazione definitiva, ma come un modello operativo capace di essere ulteriormente sviluppato e adattato a contesti differenti. Possibili sviluppi futuri potrebbero riguardare l'approfondimento delle modalità di fabbricazione, la variazione dei parametri prestazionali e l'applicazione in altri ambienti modificandone gli input.

In conclusione, la combinazione tra pensiero sistemico, progettazione computazionale e logiche costruttive apre nuove possibilità per l'architettura contemporanea, permettendo di affrontare la complessità attraverso sistemi dinamici e adattivi, in grado di adattarsi nel tempo.

BIBLIOGRAFIA

AD Classics: German Pavilion, Expo '67 / Frei Otto and Rolf Gutbrod. (2015, aprile 27). ArchDaily. Recuperato da <https://www.archdaily.com/623689/ad-classics-german-pavilion-expo-67-frei-otto-and-rolf-gutbrod>

Alexander, C. (1968). Systems Generating Systems. *Architectural Design*, 38, 605–610.

Anderson, C., & Karmon, D. (2015). On foot: Architecture and movement. *The Architectural Review*. Recuperato da <https://www.architectural-review.com/essays/what-does-the-extraordinary-activity-of-walking-upright-bring-to-the-study-of-architecture>

Bai, J., Galika, A., & Pu, Q. (2018). Bartlett School of Architecture. *Blockerties: Research on Spatial Transactions and Architectural Forms*.

Carpó, M. (1993). Ten years of folding (Folding in architecture). *Architectural Design*, 63.

Carpó, M. (2011). *The Alphabet and the Algorithm* (1° ed.). The MIT Press.

Carpó, M. (2017). *The Second Digital Turn: Design Beyond Intelligence*. MIT Press.

Carpó, M. (2023). A Short (but Believable) History of the Digital Turn in Architecture. e-flux Architecture. Recuperato da <https://editor.e-flux.com/2023/04/a-short-but-believable-history-of-the-digital-turn-in-architecture/>

flux-systems.com/files/528659_e-flux-architecture-a-short-but-believable-history-of-the-digital-turn-in-architecture.pdf

CEN – Comité Européen de Normalisation. (2004). Eurocodice 5: Progettazione delle strutture di legno – Parte 1-1: Regole generali e regole per edifici (EN 1995-1-1).

Colchester, J. (2016). *Systems + Complexity: An Overview*. CreateSpace Independent Publishing Platform.

Dovey, K. (2013). *Assembling Architecture*. In H. Frichot & S. Loo (a cura di), *Deleuze and Architecture* (pp. 131–148). Edinburgh University Press.

Emergence: Morphogenetic Design Strategies. (2004). Architectural Design.

Erioli, A. (2025). *Assembler—A Tool for Computational Decision at Scale in the Combinatorial Generation of Architectural Spaces*. In *Formal Methods in Architecture*. Springer Nature Switzerland AG.

Frazer, J. (1995). *An Evolutionary Architecture*. Architectural Association Publications.

Gardner, M. (1970). The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game "Life". *Scientific American*, 223(4), 120–123.

Hertzberger, H. (2014). Polyvalence: The Competence of Form and Space with Regard to Different Interpretations. *Architectural Design*, 84(5), 106–113.

Hertzberger, H. (2016). *The Future of the Building*. Centraal Beheer. Recuperato da <https://www.hertzberger.nl/images/nieuws/TheFutureOfTheBuildingCentraalBeheer2016.pdf>

Hertzberger, H. (2020, maggio 27). Herman Hertzberger: Letter to a young architect [Lettera]. Recuperato da <https://www.architectural-review.com/essays/letters-to-a-young-architect/herman-hertzberger-letter-to-a-young-architect>

Hildebrand, S., & Bergmann, E. (2015). *Form-finding, form-shaping, designing architecture*. SilvanaEditoriale.

Jacobs, J. (1992). *The Death and Life of Great American Cities*. Vintage Books.

Johnson, S. (2001). *Emergence: The Connected Lives of Ants, Brains, Cities, and Software* (Reprint ed.). Scribner.

Kazemzade, M., & Shakouri, R. (2017). Enhancing Social Interaction in Residential Complexes: Case Study: Esfahan. *Space Ontology International Journal*.

Lynn, G. (1993a). Architectural Curvilinearity: The Folded, the Pliant and the Supple (Folding in architecture). *Architectural Design*, 63.

Lynn, G. (1993b). Folding in architecture. *Architectural Design*, 63.

Material Computation. (2012). *Architectural Design*.

Norme Tecniche per le Costruzioni, DM 17/01/2018 NTC 2018 § Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana. (2018)

Retsin, G. (2020). Discrete Timber Assembly. In J. Burry, J. Sabin, B. Sheil, & M. Skavara, *Fabricate 2020: Making Resilient Architecture*. UCL Press.

Retsin, G. (2020). Fresh from the Forest: Raw, Discrete and Fully Automated. In *Ideas, Representations/Applications and Fabrication* (pp. 102–109).

Retsin, G. (2022). *Discrete Timber Architecture*. Bartlett Design Research Folios.

Reiser, J., & Umemoto, N. (2006). *Atlas of Novel Tectonics*. Princeton Architectural Press.

Rippmann, M., Mele, T. V., Popescu, M., Augustynowicz, E., Echenagucia, T. M., Barentin, C. C., Frick, U., & Block, P. (2016). The Armadillo Vault: Computational Design and Digital Fabrication of a Freeform Stone Shell. *Advances in Architectural Geometry 2016*, 344–363.

Snooks, R. (2012). Detail as procedural information. *ArchitectureAU*. Recuperato da <https://architectureau.com/articles/detail-as-procedural-information/>

Sanchez, J. (2016). Combinatorial design: Non-parametric computational design strategies. *ACADIA Proceedings*.

Spuybroek, L. (2008). Experience, Tectonics and Continuity. In *The Architecture of Continuity: Essays and Conversations* (pp. 12–30). V2_Publishing.

Stiny, G. (1980). Kindergarten grammars: Designing with Froebel's building gifts. *Environment and Planning B*, 7, 409–462.

Van de Worp, M. (2014). Rubens Structures: A Different Lightness Through Performance Adaptability. *Architectural Design*, 89, 54–61.

Alessio Erioli - Co-de-iT. (2023). Assembler (Versione 1.2.2) [Software]. Recuperato da <https://www.food4rhino.com/en/app/assembler>

Autodesk, Inc. (1982). AutoCAD [Software]. Recuperato da <https://www.autodesk.com/products/autocad>

AutoDesSys, Inc. (1991). form·Z (Versione 1.0) [Software]. Recuperato da <https://www.autodessys.com/formz>

Clemens Preisinger. (2024). Karamba3D (Versione 3.1.50414.0) [Software]. Recuperato da <https://www.karamba3d.com>

Dassault Systèmes SE. (1992). CATIA (Versione CATIA V3) [Software]. Recuperato da <https://www.3ds.com/products/catia>

David Rutten. (2025). Grasshopper (Versione 1.0.0008) [Software]. Robert McNeel & Associates. Recuperato da <https://www.grasshopper3d.com/page/download-1>

Robert McNeel & Associates. (2025). Rhinoceros 3D (Versione 8.18.25100.11001) [Software]. Recuperato da <https://www.rhino3d.com/it/>

SITOGRAFIA

Block Research Group. (s.d.). Block Research Group. Recuperato 18 maggio 2025, da <https://brg.ethz.ch/>

Buckminster Fuller Institute. (s.d.). Buckminster Fuller Institute. Recuperato 22 maggio 2025, da <https://www.bfi.org/>

Dream Builders: Recreating the Original Vision for Habitat 67 with an Unreal Engine and RealityCapture Sample Project. (s.d.). Unreal Engine. Recuperato 19 maggio 2025, da <https://www.unrealengine.com/en-US/spotlights/dream-builders-recreating-the-original-vision-for-habitat-67-with-an-unreal-engine-and-realitycapture-sample-project>

Final Wooden House by Sou Fujimoto Architects—Thisispaper. (s.d.). Thisispaper. Recuperato 22 maggio 2025, da <https://www.thisispaper.com/mag/final-wooden-house-sou-fujimoto-architects>

Final Wooden House: Il futuro primitivo di Sou Fujimoto. (2020, giugno 29). INFOBUILD. Recuperato da <https://www.infobuild.it/progetti/final-wooden-house-futuro-primitivo-sou-fujimoto-legno/>

GC Prosth Museum Research Center. (2010). Kengo Kuma and Associates. Recuperato da <https://kkaa.co.jp/en/project/gc-prosth-museum-research-center/>

Habitat '67. (s.d.). Habitat 67 Project. Recuperato 19 maggio 2025, da <https://www.safdiearchitects.com/projects/habitat-67>

Idealista. (2025). Idealista. Recuperato da <https://www.idealista.it/>

Inumeridibolognametropolitana. (2023).
Inumeridibolognametropolitana. Recuperato da <https://inumeridibolognametropolitana.it/>

Makoto Sei Watanabe. (2005). Kashiwanoha CSt. Recuperato da <https://www.makoto-architect.com/kashiwanohaCSt.html>

Odunpazari Modern Museum. (s.d.). Kengo Kuma and Associates. Recuperato 27 gennaio 2026, da <https://kkaa.co.jp/en/project/odunpazari-modern-museum/>

Polyomino. (2014). Plethora Project. Recuperato da <https://www.plethora-project.com/polyomino-1>

Shoei Yoh Archive. (2019). Shoei Yoh Archive. Recuperato da <https://shoeyoh.com/index.html>

The Interlace. (2013). OMA. Recuperato da <https://www.oma.com/projects/the-interlace>

Yokohama Port Terminal. (s.d.). Architectuul. Recuperato 3 giugno 2025, da <https://architectuul.com/architecture/yokohama-port-terminal>

Yusuhara Wooden Bridge Museum. (2010). Kengo Kuma and Associates. Recuperato da <https://kkaa.co.jp/en/project/yusuhara-wooden-bridge-museum/>

RIFERIMENTI IMMAGINI

Fig. 1 – Final Wooden House by Sou Fujimoto Architects — Thisispaper. (s.d.). Recuperato 22 maggio 2025, da <https://www.thisispaper.com/mag/final-wooden-house-sou-fujimoto-architects>

Fig. 2 – 13 Types of Wood Joints and Their Uses. (2021). Engineering Learn. <https://engineeringlearn.com/13-types-of-wood-joints-and-the-uses-with-pictures/>

Fig. 3 – Yusuhara Wooden Bridge Museum. (2010). Kengo Kuma and Associates. <https://kkaa.co.jp/en/project/yusuhara-wooden-bridge-museum/>

Fig. 4 – Palazzetto dello Sport. (2015). ArchiDiAP. <https://archidiap.com/opera/palazzetto-dello-sport/>

Fig. 5 – Cupole geodetiche di B. Fuller | Dalla Realtà al Progetto — Dal Progetto alla Realtà. (s.d.). Recuperato 22 maggio 2025, da <https://www2.edu.lascuola.it/esdigit/LSD-Digit/LSD-TecnologieTecGrafiche/da-geometrie-rette-curve/cupole-geodetiche-di-b-fuller-0.html>

Fig. 6 – Christophe Le Gac. (2016). L'architecture à l'heure du numérique, des algorithmes au projet. Perspectives. <https://journals.openedition.org/perspective/14830?lang=en>

Fig. 7 – Freddie.Lawther. (2016, agosto 10). Cedric Prices Fun Palace. Medium. https://medium.com/@Lawther_Freddie_2956665/cedric-prices-fun-palace-f1c80674f175

Fig. 8 – Michael Hansmeyer—Digital Grotesque I. (2013). Michael Hansmeyer - Computational Architecture. <http://www.michael-hansmeyer.com/digital-grotesque-I>

Fig. 9 – Material Computation. (2012). Architectural Design.

Fig. 10 – Material Computation. (2012). Architectural Design.

Fig. 11 – Carpo, M. (2023). A Short (but Believable) History of the Digital Turn in Architecture. e-flux Architecture. https://editor.e-flux-systems.com/files/528659_e-flux-architecture-a-short-but-believable-history-of-the-digital-turn-in-architecture.pdf

Fig. 12 – Makoto Sei Watanabe. (2005). <https://www.makoto-architect.com/kashiwanohaCSt.html>

Fig. 13 – Van de Worp, M. (2014). Rubens Structures: A Different Lightness Through Performance Adaptability. Architectural Design, 89, 54–61.

Fig. 14 – Frei Otto, Il Padiglione Tedesco, EXPO 1967. (2015, marzo 11). METALOCUS. <https://www.metalocus.es/en/news/frei-otto-german-pavilion-expo-1967>

Fig. 15 – Shoei Yoh Archive. (2019). <https://shoeyoh.com/index.html>

Fig. 16 – Yokohama Port Terminal. (s.d.). Architectuul. <https://architectuul.com/architecture/yokohama-port-terminal>

Fig. 17 – Gardner, M. (1970). The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game "Life". Scientific American, 223(4), 120–123.

Fig. 18 – Polyomino. (2014). Plethora Project. <https://www.plethora-project.com/polyomino-1>

Fig. 20 – Junyi Bai, Anna Galika, & Qiuru Pu. (2018). Bartlett School of Architecture. Blockerties: Research on spatial transactions and architectural forms.

Fig. 22 – The Interlace. (2013). OMA. <https://www.oma.com/projects/the-interlace>

Fig. 23 – Inumeridibolognametropolitana. (2023). <https://inumeridibolognametropolitana.it/>

Fig. 24 – Inumeridibolognametropolitana. (2023). <https://>

inumeridibolognametropolitana.it/

Fig. 25 – Carriero Alberto, Scotti Benedetta, & Valdes Carlo. (2022). Student housing: Quale futuro tra pubblico e privato? (CDP Brief). Cassa Depositi e Prestiti (CDP). <https://www.cdp.it>

Fig. 29 – Habitat '67 Research. (2016, aprile 5). Alicia Reyes. <https://aliciarch.com/portfolio/habitat-67-research/>

Fig. 30 – Habitat '67. (s.d.). <https://www.safdiearchitects.com/projects/habitat-67>

Fig. 31 – iris yee—Habitat 67. (s.d.). Recuperato 5 ottobre 2025, da <https://iris-yee.com/habitat-67>

Fig. 32 – Herman Hertzberger. (2016). The Future of the building. Centraal Beheer. <https://www.hertzberger.nl/images/nieuws/TheFutureOfTheBuildingCentraalBeheer2016.pdf>

Fig. 33 – Gilles Retsin. (2016). Discrete Assembly and Digital Materials in Architecture. ECAADE, 1(34), 143–151.

Fig. 34 – Cupers, K. (2016). Géographie Volontaire and the Territorial Logic of Architecture. Architectural Histories, 4(1). <https://doi.org/10.5334/ah.209>

Fig. 35 – Herman Hertzberger. (2016). The Future of the building. Centraal Beheer. <https://www.hertzberger.nl/images/nieuws/TheFutureOfTheBuildingCentraalBeheer2016.pdf>

Fig. 36 – Block Research Group. (s.d.). Recuperato 18 maggio 2025, da <https://brg.ethz.ch/>

Fig. 37 – Block Research Group. (s.d.). Recuperato 18 maggio 2025, da <https://brg.ethz.ch/>

Fig. 38 – Architects Propose World's First Prefabricated Cross Laminated Timber Concert Hall for Nuremberg. (2019, dicembre 7). ArchDaily. <https://www.archdaily.com/929685/architects-propose-worlds-first-prefabricated-cross-laminated-timber-concert-hall-for-nuremberg>

Fig. 39 – Architects Propose World's First Prefabricated Cross Laminated Timber Concert Hall for Nuremberg. (2019, dicembre 7). ArchDaily. <https://www.archdaily.com/929685/architects-propose-worlds-first-prefabricated-cross-laminated-timber-concert-hall-for-nuremberg>

Fig. 40 – Architects Propose World’s First Prefabricated Cross Laminated Timber Concert Hall for Nuremberg. (2019, dicembre 7). ArchDaily. <https://www.archdaily.com/929685/architects-propose-worlds-first-prefabricated-cross-laminated-timber-concert-hall-for-nuremberg>

Fig. 41 – Architects Propose World’s First Prefabricated Cross Laminated Timber Concert Hall for Nuremberg. (2019, dicembre 7). ArchDaily. <https://www.archdaily.com/929685/architects-propose-worlds-first-prefabricated-cross-laminated-timber-concert-hall-for-nuremberg>

Fig. 42 – Erioli, A. (2025). Assembler—A Tool for Computational Decision at Scale in the Combinatorial Generation of Architectural Spaces. In *Formal Methods in Architecture*. Springer Nature Switzerland AG.

Fig. 43 – Erioli, A. (2025). Assembler—A Tool for Computational Decision at Scale in the Combinatorial Generation of Architectural Spaces. In *Formal Methods in Architecture*. Springer Nature Switzerland AG.

Fig. 44 – Erioli, A. (2025). Assembler—A Tool for Computational Decision at Scale in the Combinatorial Generation of Architectural Spaces. In *Formal Methods in Architecture*. Springer Nature Switzerland AG.

Fig. 45 – GC Prostho Museum Research Center. (2010). Kengo Kuma and Associates. <https://kkaa.co.jp/en/project/gc-prostho-museum-research-center/>

Fig. 46 – Eduardo. (2022, maggio 10). The use of wood and technique: Kengo Kuma. Grupo Gubia. <https://grupogubia.com/en/use-wood-technique-kengo-kuma/>

Fig. 47 – GC Prostho Museum Research Center. (2010). Kengo Kuma and Associates. <https://kkaa.co.jp/en/project/gc-prostho-museum-research-center/>

Fig. 48 – Odunpazari Modern Museum. (s.d.). Kengo Kuma and Associates. <https://kkaa.co.jp/en/project/odunpazari-modern-museum/>

Fig. 49 – Gallery of Odunpazari Modern Art Museum / Kengo Kuma & Associates—27. (s.d.). ArchDaily. <https://www.archdaily.com/924542/odunpazari-modern-art-museum-kengo-kuma-and-associates>

Fig. 50 – Gallery of Odunpazari Modern Art Museum / Kengo Kuma & Associates—27. (s.d.). ArchDaily. <https://www.archdaily.com/924542/odunpazari-modern-art-museum-kengo-kuma-and-associates>

(Fig. 51 → Fig. 116 saltati come richiesto)

Fig. 117 – Popolazione Bologna (2001 2023) Grafici su dati ISTAT, s.d. <https://www.tuttitalia.it/emilia-romagna/32-bologna/statistiche/popolazione-andamento-demografico/>

Fig. 118 – Idealista. (2025). <https://www.idealista.it/>

Fig. 119 – Idealista. (2025). <https://www.idealista.it/>

Fig. 120 – Immobiliare.it. (s.d.). Recuperato 18 maggio 2025, da <https://www.immobiliare.it/mercato-immobiliare/emilia-romagna/bologna/san-vitale-mazzini/>

Fig. 121 – Google Earth. (s.d.). Recuperato 18 maggio 2025, da <https://earth.google.com>

Fig. 122 – Bicipolitana bolognese. (2025). <https://www.bicipolitanabolognese.it>

Fig. 123 – Mappa linee bus Bologna. (s.d.). [Mappa]. Tper. https://www.tper.it/sites/default/files/ESTERNO_mappa_2019.pdf

Fig. 124 – Google Earth. (s.d.). Recuperato 18 maggio 2025, da <https://earth.google.com/>

Fig. 125 – GeoViewer. (2025). Geoportale. <https://geoportale.regione.emilia-romagna.it/mappe/geo-viewer>

Fig. 126 – Explore — Comune di Bologna. (s.d.). <https://opendata.comune.bologna.it/explore/?sort=modified&refine.features=analyze>

