

Tra (de)scrizioni computazionali di architetture modulari per l'autocostruzione

Massimiliano Lo Turco

Andrea Rossi

Andrea Tomalini

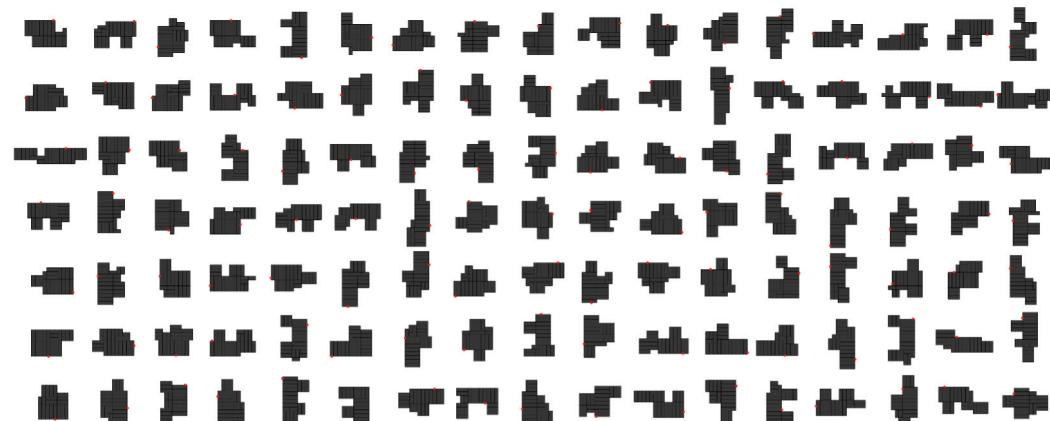
Abstract

Nel tentativo di superare la mancanza di strumenti computazionali per la progettazione combinatoria, il contributo descrive l'applicazione di un *toolkit* computazionale *open source* per la progettazione utilizzando sistemi discreti, evidenziandone gli aspetti teorici e metodologici, anche in riferimento ai grandi Maestri che hanno messo a sistema approcci parametrici ben prima della diffusione dei più recenti applicativi.

L'ambito di applicazione costituisce il pretesto per poter collaudare alcune attività sperimentali per traghettare nuovi spazi di indagine e di frontiera e di intersezione tra i diversi saperi. In particolare, il progetto di sviluppo industriale SUPREMO, sostenuto attraverso la Legge Provinciale n°6/1999 (Provincia autonoma di Trento), aiuti per la promozione della ricerca e sviluppo, si concentra sulla definizione di case modulari per l'autocostruzione, utilizzando i prodotti prefabbricati in CLT dell'azienda trentina XLAM Dolomiti, capofila del progetto. Il lavoro descrive le attività di progettazione relative alla definizione di kit per case modulari progettate comprese tra 20 e 120 metri quadri, producendo un database digitale delle varie logiche costruttive accompagnate da una prima esemplificazione di possibili configurazioni. La definizione di regole e di vincoli ha consentito di avviare il processo computazionale in modo più accessibile, coinvolgendo gli utenti nel processo generativo e ripensando gli edifici come insiemi aperti e modificabili di parti discrete.

Parole chiave

Progettazione computazionale, Modularità, Produzione off-site, Autocostruzione, Sistemi discreti.



Alcune tra i milioni di soluzioni distributive di abitazioni modulari ottenute attraverso l'approccio computazionale (elaborazione di A. Tomalini).

Introduzione

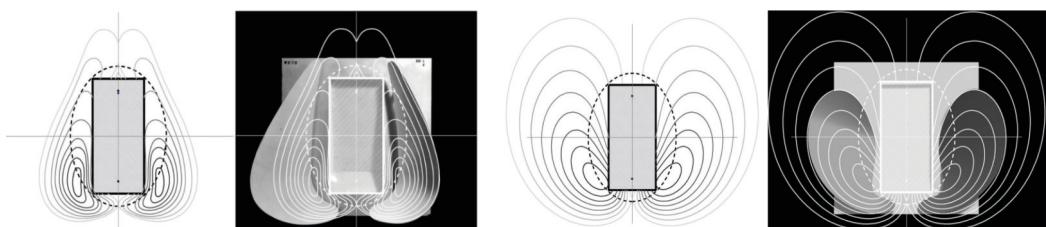
L'avanzamento delle metodologie computazionali ha profondamente influenzato il campo della composizione architettonica, consentendo un'esplorazione più ampia e sistematica delle possibilità progettuali. Questo contributo si inserisce in tale contesto, presentando una metodologia algoritmica specificatamente sviluppata per la creazione di planimetrie di soluzioni abitative a un piano a scala architettonica. Una caratteristica distintiva dell'approccio proposto è la sua capacità di integrare nativamente i vincoli tecnologici imposti dall'utilizzo di sistemi costruttivi in legno XLam. La trattazione si sviluppa attraverso diverse fasi: una prima sezione è dedicata alla sintesi dello stato dell'arte, riportando il panorama delle ricerche pertinenti e analizzando criticamente le metodologie proposte. Successivamente, viene descritto il progetto *SU.PRE.MO.* [1], funzionale all'analisi dell'approccio computazionale sviluppato per la generazione automatica e massiva delle soluzioni progettuali, evidenziandone le peculiarità, i passaggi chiave e i risultati raggiunti, valutandone l'efficacia e il potenziale impatto nel campo della progettazione architettonica con sistemi XLam.

Stato dell'arte

Per comprendere l'evoluzione del rapporto tra essere umano e ambiente costruito è fondamentale volgere lo sguardo agli albori del Novecento, con il lavoro pionieristico di Alexander Klein e di altri architetti funzionalisti tedeschi. Questi ricercatori affrontarono la progettazione partendo dalle dimensioni antropometriche standard, definendo lo spazio minimo necessario per le attività quotidiane e delineando, di conseguenza, le prime configurazioni spaziali essenziali per gli ambienti domestici. In questa linea di pensiero si inserisce il Modulor di Le Corbusier, una sintesi innovativa di principi matematici (dai numeri irrazionali alla sequenza di Fibonacci), geometrici, ergonomici e antropometrici.

Successivamente, nel dopoguerra, la volontà di conferire rigore scientifico alla generazione della forma architettonica trovò una concreta espressione nell'iniziativa di Luigi Moretti [Moretti 1971], che, insieme al matematico Bruno de Finetti, fondò l'Istituto per la Ricerca Matematica Operativa in Architettura e Urbanistica (IRMOU). Questo istituto rappresentò la culla di quella che all'epoca veniva definita architettura parametrica. Il gruppo di ricerca dell'IRMOU applicò una metodologia sistematica alla progettazione di diverse tipologie edilizie, dagli stadi alle sale cinematografiche. Il processo partiva da un'analisi approfondita del tema progettuale seguita dalla formulazione delle esigenze tradotte in relazioni geometriche tra parametri definiti.

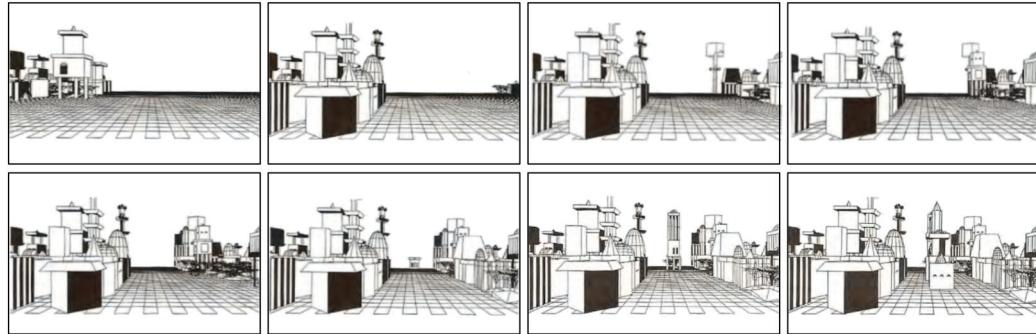
Fig. 1. Grafico delle funzioni di visibilità e sovrapposizione tra una foto del modello fisico dello stadio del nuoto di Moretti e la curva di visibilità (a sinistra). Proposta di uno stadio del nuoto progettato a partire dai risultati corretti dell'analisi esposta da Moretti (sulla destra). Immagine tratta da Canestrino 2024, pp. 121 (figg. 6, 7), 131 (fig. 8).



Attraverso la variazione di queste relazioni, ad esempio nello studio sull'equiappetibilità visiva, venivano generate molteplici soluzioni. Tuttavia, l'obiettivo principale di Moretti era superare un approccio empirico alla progettazione [Lo Turco 2012]. Con l'avvento dei primi calcolatori, l'IRMOU sperimentò precocemente l'utilizzo di strumenti informatici, anticipando di fatto gli attuali applicativi di progettazione parametrica.

Parallelamente, negli anni Settanta, l'informatica irrompeva in altri settori produttivi, influenzando anche il campo del design. In quel periodo Celestino Soddu intuì le potenzialità del

Fig. 2. Sequenza di sviluppo successivo di un modello di città aleatoria stratificata elaborata da Celestino Soddu attorno agli anni '80 [Soddu 1989, p. 93]; i riferimenti formali propri di ciascuna logica compositiva entrano in gioco con rapporti gerarchicamente diversi, così da configurare una gamma di esiti, dagli edifici antichi a quelli contemporanei, alle anticipazioni relative a contaminazioni successive.



calcolatore nella rappresentazione dinamica dei processi progettuali attraverso algoritmi. Questa visione lo portò a concepire l'arte generativa come un codice genetico di eventi artificiali, capace di generare infinite variazioni attraverso sistemi complessi dinamici. Parafrasando Focillon, Soddu sosteneva che i veri visionari fossero coloro i quali costruiscono i propri strumenti [Soddu 1989]. L'arte generativa si configura così come la creazione di eventi unici e irripetibili, con espressioni riconoscibili dell'idea generativa proprie dell'artista o del progettista.

L'approccio sistematico derivato dalla scienza dei sistemi complessi trovò quindi applicazione anche in edilizia. Agli architetti spettava il compito di formulare i problemi in termini di esigenze e bisogni fondamentali, focalizzandosi sulle interazioni della vita quotidiana. La pratica progettuale tradizionale, spesso, faticava a considerare ed elaborare simultaneamente la complessità degli elementi in gioco. La necessità di una sintesi efficace condusse alla convinzione che l'analisi combinatoria, resa possibile dall'informatica, fosse uno strumento imprescindibile. Di conseguenza, algoritmi matematici ed elaborazioni informatiche vennero impiegati per esplorare le potenziali relazioni progettuali, con l'obiettivo di estrapolare la soluzione più idonea [Garzino 2011].

Significativi contributi sono riconducibili alla Carnegie-Mellon University di Pittsburgh, dove furono sviluppati sistemi per la costruzione basati sui principi della psicologia cognitiva. Questi sistemi possono essere categorizzati in tre approcci fondamentali. L'approccio deterministico mira a individuare la soluzione ottimale attraverso una precisa descrizione del problema, spesso impiegato per l'organizzazione spaziale. L'approccio generazionale si basa sulla definizione preventiva di regole, implementate attraverso algoritmi frattali o "grammatiche di

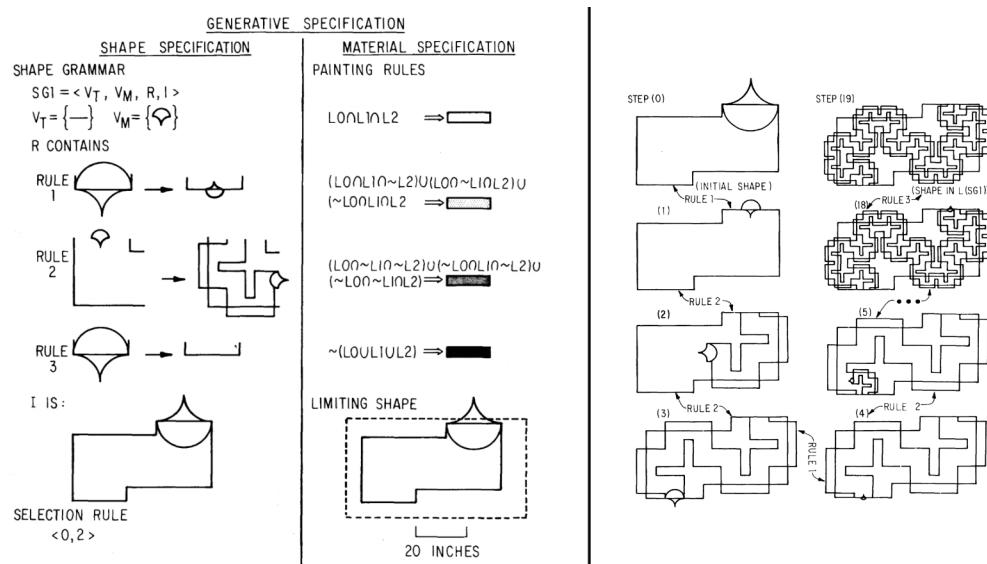


Fig. 3. Un metodo di generazione di forme che utilizza grammatiche di forme che assumono la forma come primitiva e hanno regole specifiche per la forma presentata. Sulla sinistra: Specifica completa e generativa delle classi. Sulla destra: Generazione di una forma [Stiny, Gips 1978, pp. 127 (figg. 2-6), 129 (figg. 3-6)].

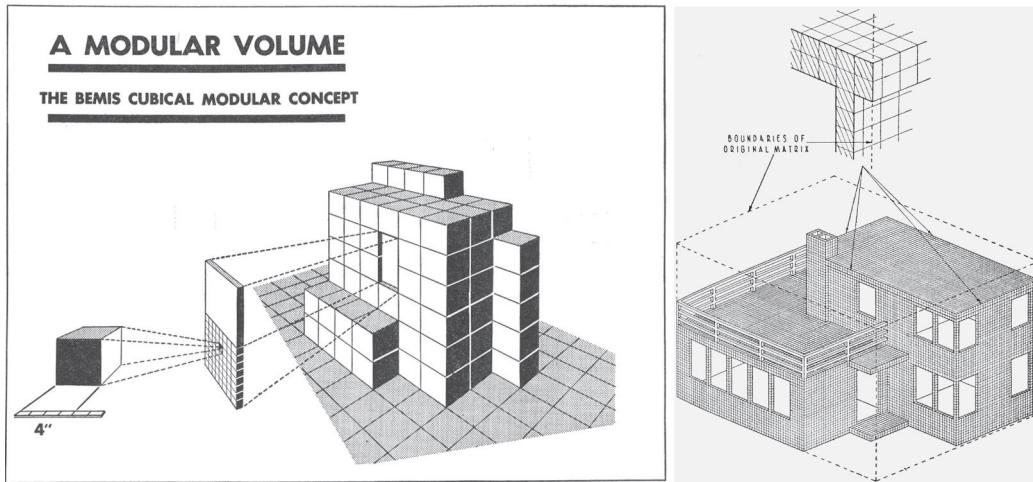


Fig. 4. Illustrazione del concetto di modulo cubico di base da 4 pollici per il coordinamento della costruzione, proposto da Albert Farwell Bemis [Bemis 1936].

forma", come nel noto protocollo formalizzato da George Stiny e James Gips [Stiny 1978]. In questo approccio, un insieme di regole di trasformazione viene applicato iterativamente a una forma iniziale, generando nuove configurazioni. Infine, l'approccio di performance, ampiamente diffuso nei software di progettazione attuali, utilizza l'intelligenza artificiale per valutare aspetti specifici di un progetto (strutturali, energetici ecc.) [Roadford, Stevens 1987]. Dal punto di vista della generazione formale, l'approccio generazionale si rivela particolarmente interessante, in linea con le teorie di Noam Chomsky sulla generazione di strutture complesse da regole semplici.

Più recentemente, la relazione tra rappresentazione progettuale e strutture computazionali è stata ulteriormente esplorata nel contesto dell'ingegneria dei materiali, con ricadute significative in architettura. Il Center for Bits and Atoms del MIT ha sviluppato il concetto di 'materiale digitale', costituito da unità discrete connesse in modo reversibile [Popescu et al. 2006]. Questi materiali mirano a colmare il divario tra la continuità del mondo reale e la discretizzazione degli strumenti computazionali utilizzati per rappresentarlo [Gershenfeld

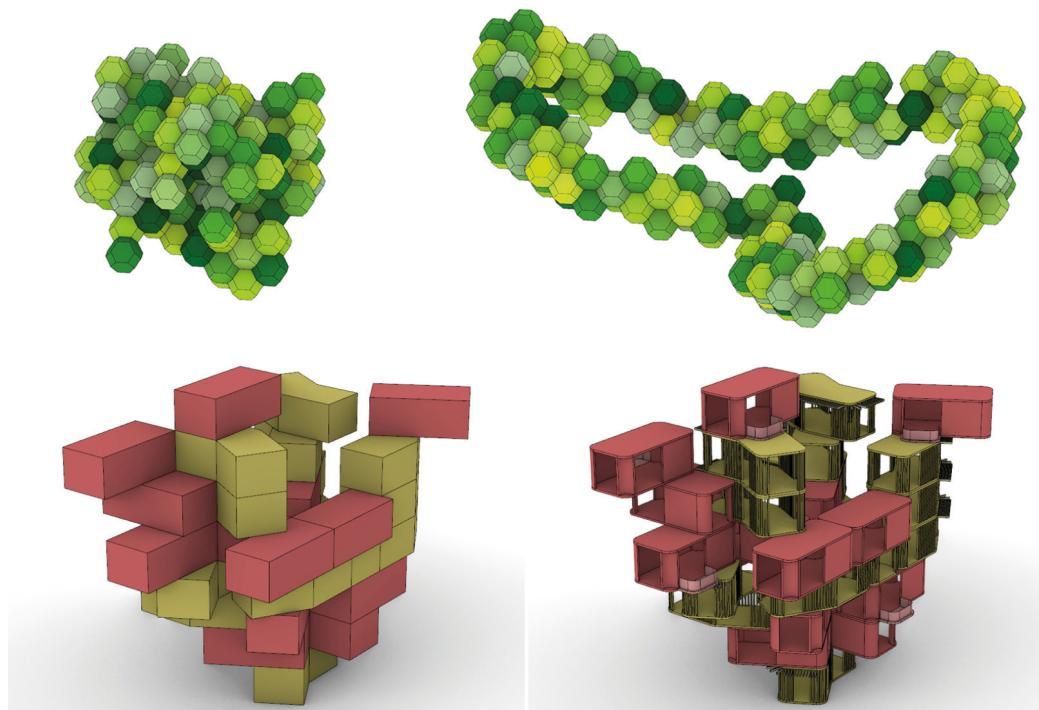


Fig. 5. In alto: a destra, aggregazione con diversi vincoli. In basso, esempio di aggregazione con parti che utilizzano diversi livelli di dettaglio (LOD): a sinistra, parte geometrica; a destra, attributi ad alto dettaglio integrati con elementi personalizzati, come balconi e ombreggiature [Rossi 2023, pp. 103 (fig. 4.4), 121 (fig. 4.22)].

et al. 2017]. Tale approccio ha trovato ulteriore sviluppo in ambito architettonico, dando origine al campo della “discrete architecture”, ragionando sulla creazione di sistemi costruttivi modulari e reversibili [Retsin 2019]. Questa tendenza si caratterizza per il passaggio da moduli definiti “funzionalmente” a moduli “generici” [Rossi 2023]. In questo scenario, si sono diffusi nuovi applicativi per la progettazione e la rappresentazione di assemblaggi composti da un vasto numero di elementi generici, tra cui il toolkit Wasp è attualmente uno dei più utilizzati [Rossi 2024].

Il progetto SU.PRE.MO.

Il progetto di ricerca SU.PRE.MO. è finalizzato allo sviluppo di un materiale ligneo innovativo, denominato SUperlegno, e alla definizione di soluzioni costruttive comprendenti elementi PREfabbricati ad alte prestazioni, MODuli abitativi per l'emergenza e soluzioni MODulari per l'autocostruzione. Il progetto ha previsto la collaborazione sinergica tra il Dipartimento di Architettura e Design (DAD) del Politecnico di Torino e Xlam Dolomiti, azienda leader nella produzione di pannelli strutturali in legno XLam (CLT). Il contributo del DAD, rappresentato dalle discipline del Disegno e della Tecnologia dell'Architettura, si concentra sul design dei moduli abitativi, con particolare attenzione all'innovazione tecnologica e di processo del progetto architettonico. Un manuale d'uso descrive le regole aggregative e l'ingegnerizzazione dei pezzi che costituiscono l'unità abitativa ed è al tempo stesso l'*input* per la definizione del processo. Il tema caratterizzante riguarda la definizione di un sistema computazionale per l'esplorazione delle possibili configurazioni, attraverso l'elaborazione di un *database* digitale. Considerando la natura modulare delle soluzioni abitative, l'elemento sfidante consiste nella definizione di un algoritmo combinatorio in grado di aggregare le diverse unità funzionali in una planimetria coerente dal punto di vista distributivo.

Le soluzioni generate hanno popolato un *dataset* di soluzioni accessibili attraverso un'interfaccia utente *web-based*. L'interfaccia sintetizza le scelte progettuali necessarie alla definizione dei moduli autocostruibili e, rispettando i vincoli tecnici predefiniti, filtra le soluzioni generate suggerendo la soluzione che più risponde alle esigenze dell'utente. Tale approccio si inserisce nel contesto più ampio dell'industria 5.0, orientata alla personalizzazione del prodotto e all'integrazione delle esigenze dell'utente finale, promuovendo l'utilizzo di materiali *bio-based* e processi di industrializzazione edilizia.

La metodologia proposta

L'attività di ricerca ha inizialmente previsto un'analisi approfondita dei *benchmark* internazionali relativi allo sviluppo di moduli abitativi, con particolare attenzione alle soluzioni per l'autocostruzione indagati per la definizione di *best practices*, sia in ambito professionale sia in ambito sperimentale e di ricerca.

Per la definizione delle regole e degli standard di aggregazione, si è fatto riferimento all'esperienza di Xlam Dolomiti: l'azienda leader nel settore ha messo a disposizione il proprio *know-how* specialistico nella produzione di pannelli strutturali XLam, ragionando su vincoli dimensionali e griglie modulari rigorose; questa attività ha richiesto l'integrazione di informazioni geometriche, alfanumeriche e topologiche per rappresentare il *layout* dei moduli abitativi, i sistemi di connessione tra gli ambienti associati alla distinta dei singoli elementi prefabbricati; in questo ambito la programmazione visuale dispone di strumenti estremamente efficaci: in particolare la *plug-in* Wasp è stata utilizzata come principale motore per la generazione delle planimetrie, grazie alle sue funzionalità avanzate per la progettazione combinatoria e alla sua struttura dei dati che mette in relazione geometria e topologia.

Il processo di generazione delle planimetrie, a partire dalle specifiche progettuali e costruttive, si compone di sei fasi interconnesse:

- generazione del *database*: partendo dalle specifiche fornite dai partner del progetto, è stato definito un *database* di unità funzionali con relative dimensioni modulari. Il *database* è stato inizialmente impostato su un foglio di calcolo per facilitarne la modifica da parte

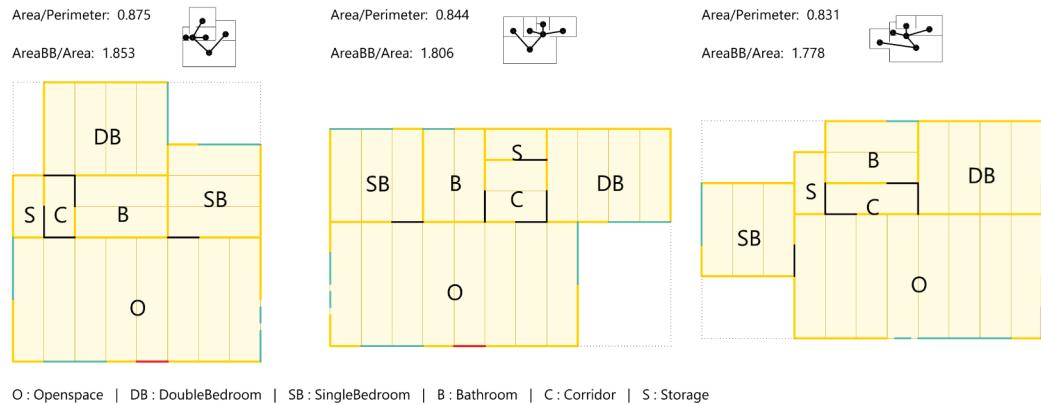


Fig. 6. Generazione di alcune soluzioni che riportano la destinazione d'uso degli ambienti, il posizionamento delle aperture (porte, finestre, accesso) e il grafo di connessione tra i locali (elaborazione di A. Tomalini).

di personale non specializzato nella programmazione; in un secondo momento è stato convertito in formato JSON per una più rapida elaborazione nell'ambiente *Grasshopper* tramite uno script personalizzato in Python;

- selezione degli ambienti e generazione della geometria delle unità: l'interfaccia VPL permette la selezione delle unità funzionali desiderate e la definizione di un intervallo di superficie utile: lo script estrae dal database tutte le combinazioni possibili tra le unità disponibili che soddisfano i requisiti di superficie. Una volta selezionate, un secondo script converte i dati dal formato JSON in classi specifiche di Wasp, includendo informazioni geometriche delle unità e sui moduli XLam che lo compongono;

- generazione delle planimetrie: dopo aver operato la selezione delle unità funzionali l'algoritmo di aggregazione stocastica di Wasp viene utilizzato per la generazione delle planimetrie. Per garantire le corrette connessioni tra gli ambienti, è stato definito un insieme di regole di adiacenza che specificano quali ambienti possono essere collegati tra loro. L'algoritmo permette inoltre di variare un valore di seed casuale, consentendo di generare molteplici soluzioni. Le planimetrie vengono poi arricchite con la definizione delle porte di collegamento tra i moduli adiacenti e convertite in un formato di dizionario personalizzato per ulteriori elaborazioni. Vengono inoltre identificate e etichettate le pareti perimetrali non vincolate, dunque potenzialmente modificabili dall'utente finale sulla piattaforma web;

- operazioni di filtro sulle planimetrie: poiché l'algoritmo utilizzato è di natura stocastica, genera un'ampia varietà di soluzioni, alcune delle quali non conformi ai requisiti progettuali e funzionali. Per questo motivo, sono stati aggiunti alcuni filtri per eliminare le soluzioni indesiderate; questi verificano rispettivamente il rapporto tra l'area e il perimetro della planimetria e il rapporto tra l'area della planimetria e l'area del rettangolo di ingombro minimo. Entrambi mirano a escludere soluzioni che non risultano sufficientemente compatte;

- generazione delle finestre: le planimetrie ritenute corrette sono arricchite dall'aggiunta di finestre, in conformità con le normative sui rapporti aeroilluminanti vigenti in diversi paesi. A tal fine, sono stati implementati due algoritmi, corrispondenti a modalità di calcolo differenti: il primo calcola il rapporto aeroilluminante richiesto per ogni singolo ambiente (corrispondente alla normativa italiana e inglese), mentre il secondo lo computa per l'intera superficie abitabile (corrispondente alla normativa francese). In entrambi i casi, vengono specificati un numero minimo e massimo di finestre per ogni tipologia e dimensione di ambiente, consentendo di controllare la loro distribuzione. Una volta definite le posizioni delle finestre, vengono aggiunti al dizionario della planimetria i relativi elementi in XLam;

- conversione ed esportazione dei dati: in questa fase il dizionario viene ulteriormente dettagliato con informazioni specifiche sulla configurazione della planimetria, quali il paese di riferimento, la superficie utile, il grafo di connettività tra gli ambienti e un codice identificativo univoco. Infine, il dizionario viene convertito in formato JSON e salvato in un file per essere aggiunto al database delle planimetrie.

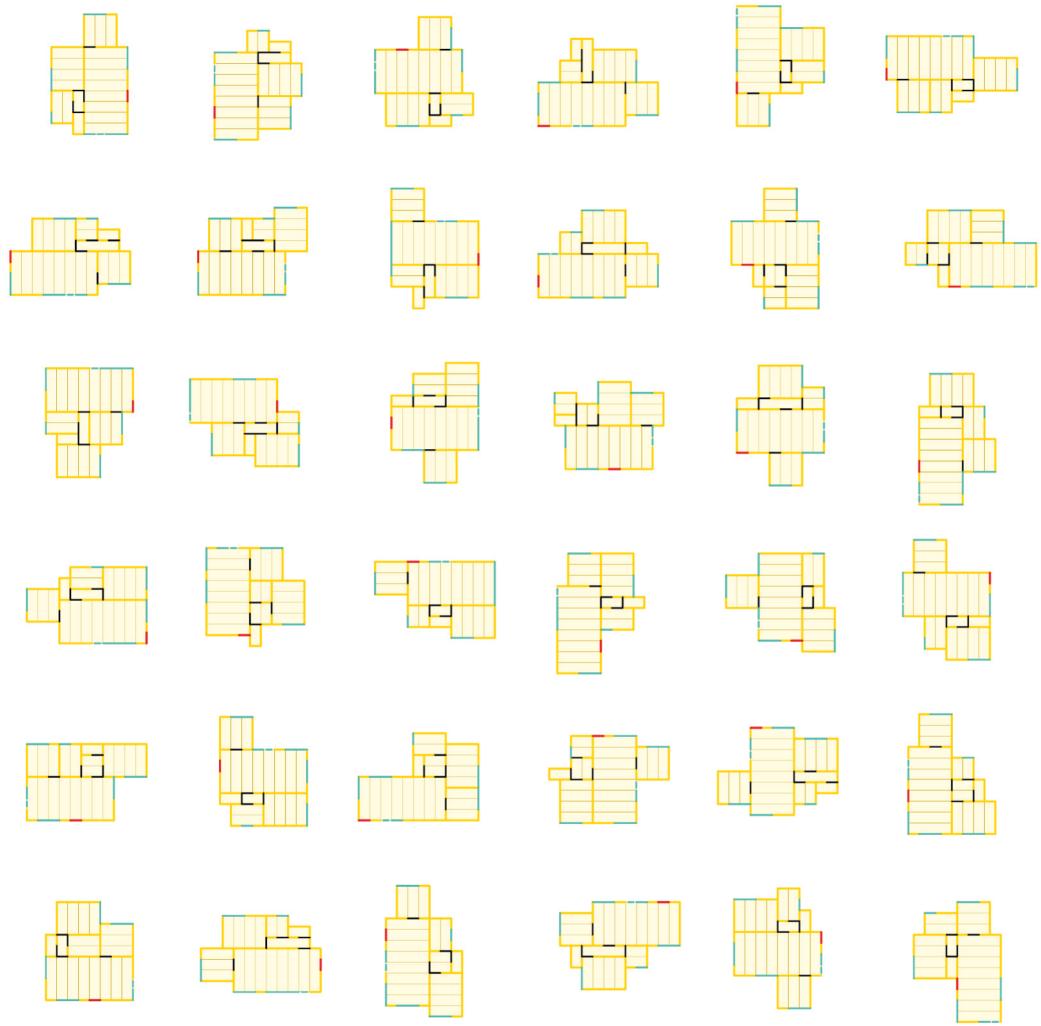


Fig. 7. Alcuni esempi di planimetrie generate coerentemente ai vincoli imposti e alla modularità degli elementi costruttivi che la compongono (elaborazione di A. Tomalini).

Gli esiti

Il processo ha consentito la generazione di un ampio *dataset* di soluzioni, superando il milione di configurazioni, a partire da un *dataset* limitato di unità funzionali aderenti ai vincoli specificati in termini progettuali, funzionali e tecnologici. L'adozione di formati di dati aperti e di un flusso di lavoro integralmente computazionale garantisce l'adattabilità del processo a modifiche del *dataset* iniziale e a differenti dimensioni della griglia modulare. Si sottolinea che il processo è intrinsecamente indipendente dalle dimensioni del modulo, essendo quest'ultimo assunto come unità di base per la generazione. L'implementazione di filtri specifici offre la possibilità di ottimizzare il processo generativo in funzione di parametri progettuali definiti, consentendo di ottenere soluzioni con un grado di libertà variabile in base ai criteri di filtro impiegati. Infine, l'integrazione di diversi algoritmi per il posizionamento delle finestre rende il processo coerente con le normative relative al rapporto aeroilluminante vigenti nei diversi contesti internazionali.

L'analisi del *dataset* generato rende possibile identificare soluzioni congruenti con criteri distributivi che seguono approcci più consolidati. Tuttavia, per conferire all'utente un ampio margine di libertà progettuale, il processo generativo include configurazioni con geometrie perimetrali non convenzionali, pur rispondendo pienamente ai vincoli tecnologici e normativi predefiniti. Per facilitare la selezione da parte dell'utente nell'interfaccia *front-end*, le soluzioni vengono ordinate in base al rapporto area/perimetro, privilegiando le configurazioni più compatte.

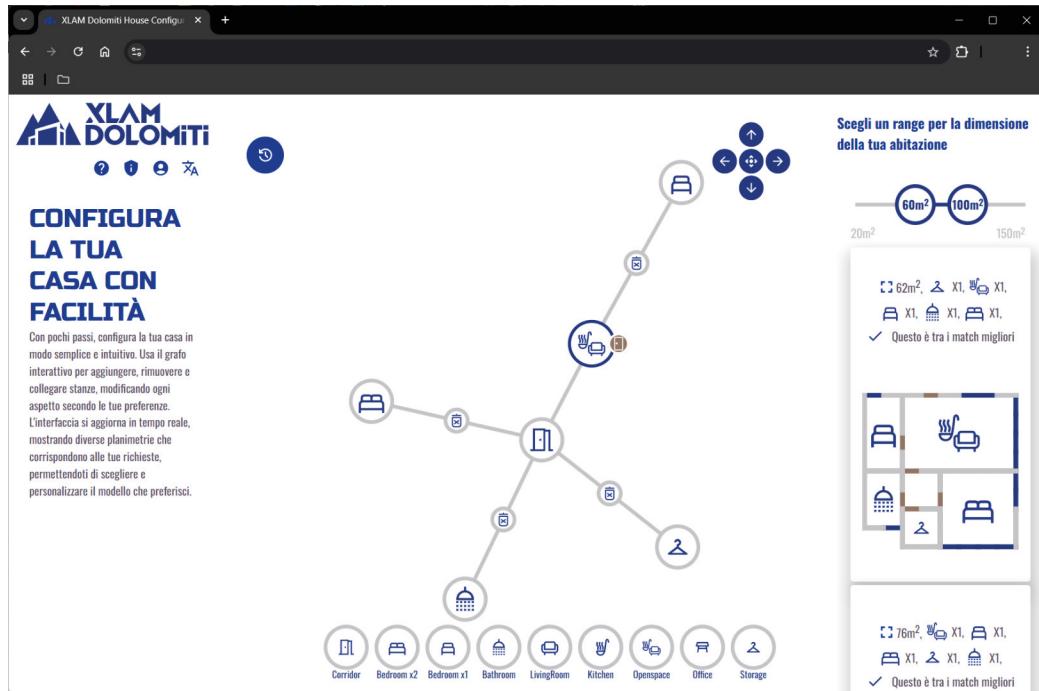


Fig. 8. Un primo screenshot dell'interfaccia utente che mostra il grafo interattivo delle connessioni tra gli ambienti e le relative distribuzioni planimetriche associate a tale grafo. L'utente può aggiungere o eliminare ambienti e definire nuove connessioni (elaborazione degli autori).

Conclusioni

L'approccio computazionale presentato si propone come strumento di supporto all'esplorazione progettuale, consentendo una facile elaborazione delle soluzioni attraverso la variazione dei parametri che ne definiscono le caratteristiche geometriche e topologiche. L'obiettivo primario è la strutturazione di sistemi di supporto alla progettazione in grado di garantire una precisa definizione del quadro dei requisiti iniziali e, conseguentemente, una verifica puntuale della conformità delle soluzioni elaborate. Riconoscendo i limiti intrinseci

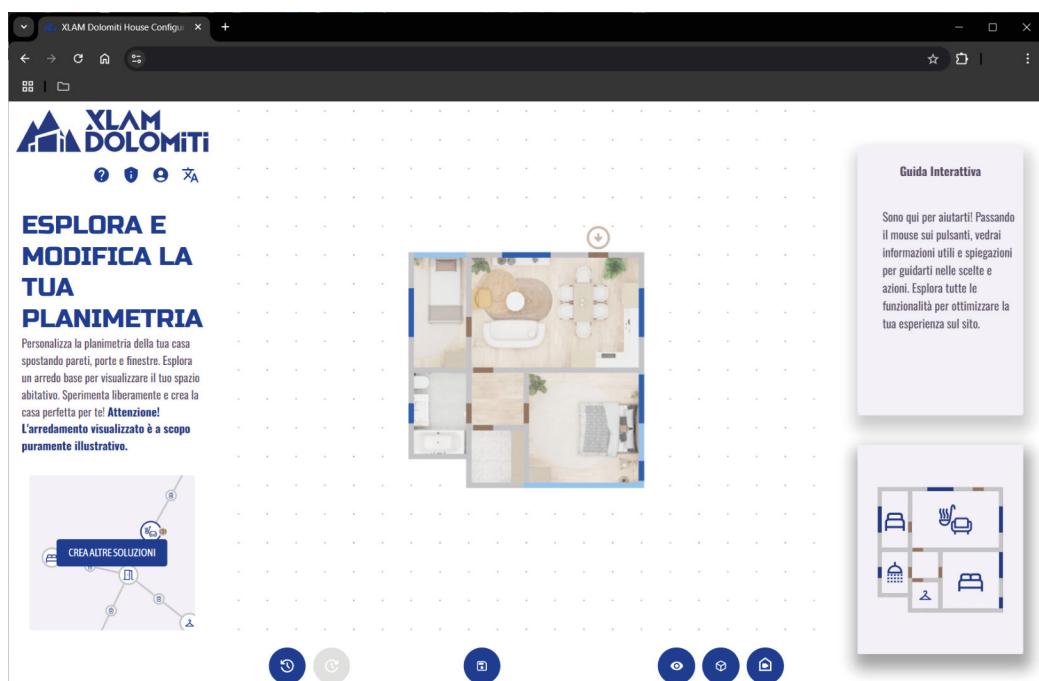


Fig. 9. Un primo screenshot dell'interfaccia front-end in cui l'utente può lavorare sulla planimetria intervenendo sulle modularità e sul posizionamento delle aperture, valutandone le modifiche in tempo reale (elaborazione degli autori).

della capacità umana nell'elaborare la complessità combinatoria derivante da molteplici variabili, e volendo superare un approccio progettuale basato esclusivamente su riferimenti storici, manualistici o esperienziali, la ricerca si è orientata verso l'impiego di algoritmi di allocazione spaziale.

Attraverso l'ausilio di strumenti computazionali, l'esperienza maturata rappresenta un'ottima modalità per produrre configurazioni logico-funzionali-compositive avanzate, assimilabili a modelli concettuali tridimensionali, in cui si ricercano soluzioni rispondenti a esigenze ben definite. L'ottimizzazione informatica trova la sua applicazione ideale laddove il fattore di prestazione è misurabile e sussiste una chiara gerarchia di valori. La traduzione dei valori architettonici in un ambiente logico e misurabile rappresenta un processo particolarmente articolato che, sebbene generi soluzioni che rispondono ai vincoli inseriti, può contestualmente sollevare nuove problematiche impreviste, evidenziando la necessità di una definizione iterativa del problema e delle relative soluzioni. In questa nuova prospettiva appare evidente che il processo di progettazione non possa essere integralmente automatizzato: l'esito è orientato verso la definizione di un *database* di soluzioni eterogenee da cui attingere piuttosto che allo sviluppo di un programma di progettazione semplificato e maggiormente vincolante.

Crediti

L'attività di ricerca multidisciplinare per lo sviluppo del progetto *SUPREMO*, oltre al Politecnico di Torino coinvolge il distretto tecnologico trentino Habitech, la Fondazione Bruno Kessler, il CNR IBE di San Michele all'Adige, l'Università di Trento, l'Università di Firenze oltre a diverse start-up, aziende innovative del settore digitale e studi professionali, tra cui Spindex che si è occupata dello sviluppo della piattaforma web-based.

Nota

[1] *SUPREMO – Super X-Lam To Prefabrication and 2D/3D Modularity* è un progetto di ricerca realizzato da XLAM Dolomiti Spa, società italiana del Gruppo Paterno, e finanziato dalla Provincia Autonoma di Trento (Italia), della durata di 36 mesi (settembre 2022 - settembre 2025).

Riferimenti bibliografici

- Bemis, A.F. (1936). *The Evolving House, vol. III, Rationalisation*. Cambridge: The MIT Press.
- Canestrino, G. (2024). Luigi Moretti's Formalised Methods and his Use of Mathematics in the Design Process of Architettura Parametrica's Swimming Stadiums. In *Nexus Netw. J.*, vol. 27, pp. 119-137. <https://doi.org/10.1007/s00004-024-00784-x>.
- Gershenfeld, N., Gershenfeld, A., Cutcher-Gershenfeld, J. (2017). *Designing Reality: How to Survive and Thrive in the Third Digital Revolution*. New York: Basic Books.
- Garzino, G. (2011). Il Modello decisionale. The decision making model. In G. Garzino (a cura di). *Disegno (e) in_formazione : disegno politecnico. Drawing (and) information: polytechnic drawing*, pp. 51-70. Santarcangelo di Romagna: Maggioli.
- Lo Turco, M. (2012). Elogio al disegno parametrico: dalla teoria ai processi operativi - Praising parametric drawing: from theory to operational processes. In L. Carlevaris, M. Filippa (a cura di). *Elogio della teoria. Identità delle discipline del disegno e del rilievo / In praise of theory I. The fundamentals of the disciplines of representation and survey*. Atti del 37° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione, Roma, 13-15 Settembre 2012, vol. 34, pp. 293-300. Roma: Gangemi Editore.
- Moretti, L. (1971). Ricerca matematica in architettura e urbanistica. In *Moebius. Unità della cultura: architettura, urbanistica, arte*, 4(1), pp. 30-53.
- Popescu, G.A., Tushar M., Neil G. (2006). Digital Materials for Digital Printing. In *Proc. IS&T Digital Fabrication Conf.* Denver, (17-22 Settembre 2006), vol. 22, pp. 58-61. Denver: Society of Imaging Science and Technology.
- Retsin, G. (2019). Discrete Architecture in the Age of Automation. In *Architectural Design*, 89(2), pp. 6-13.
- Roadford, A., Stevens, G. (1987). *CAD Made Easy*. New York: Mc Graw Hill.
- Rossi, A. (2023). *Mediated Assemblies: An Open Source Software Approach to Combinatorial Design and Fabrication*. Tesi di Dottorato in TU Darmstadt, O. Tessmann, P. Eversmann. TU Darmstadt.
- Rossi, A. (2024). *Wasp v0.6.001: Discrete Design for Grasshopper*. <https://github.com/ar0551/Wasp>.
- Soddu, C. (1989). *Città Aleatorie*. Milano: Masson Publisher.
- Stiny, G., Gips, J. (1978). *Algorithmic Aesthetics. Computer Models for Criticism and Design in the Arts*. Berkeley and Los Angeles: University of California Press.

Autori

Massimiliano Lo Turco, Politecnico di Torino, massimiliano.loturco@polito.it
Andrea Rossi, Universitat Kassel, rossi@asl.uni-kassel.de
Andrea Tomalini, Politecnico di Torino, andrea.tomalini@polito.it

Per citare questo capitolo: Massimiliano Lo Turco, Andrea Rossi, Andrea Tomalini (2025). Tra (de)scrizioni computazionali di architetture modulari per l'autocostruzione e l'emergenza. In L. Carlevaris et al. (a cura di), *ékphrasis. Descrizioni nello spazio della rappresentazione/ékphrasis. Descriptions in the space of representation*. Atti del 46° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione. Milano: FrancoAngeli, pp. 3859-3878. DOI: 10.3280/oa-1430-c956.

Computational Description of Modular Architectures for Self-Building

Massimiliano Lo Turco
Andrea Rossi
Andrea Tomalini

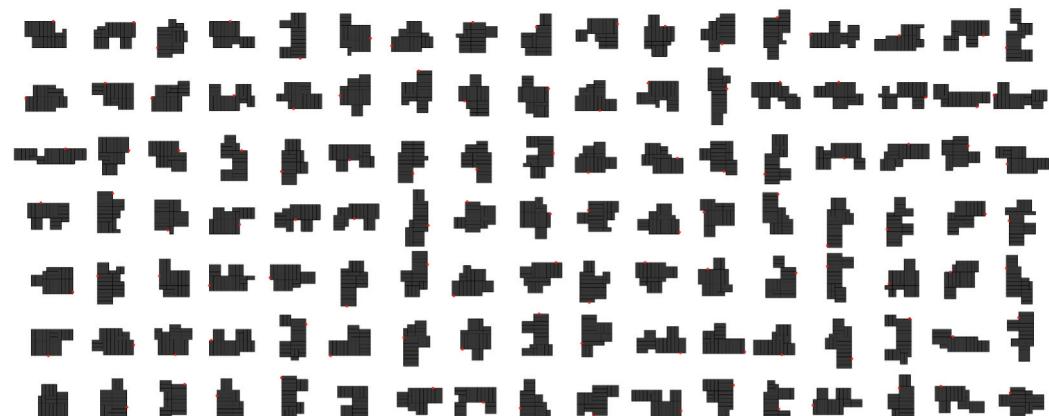
Abstract

Trying to overcome the lack of computational tools for combinatorial design, the paper describes the application of an open source computational toolkit for designing using discrete systems, highlighting its theoretical and methodological aspects, also with reference to the great masters who have set up parametric approaches before the spread of the most recent applications.

The application field constitutes the opportunity to test a number of experimental activities in order to look at new spaces of investigation and frontier and intersection between different knowledge. In particular, the SUPREMO. industrial development project, supported through Provincial Law n°6/1999 (Provincia autonoma di Trento), aid for the promotion of research and development focuses on the definition of modular houses for self-building, using CLT prefabricated products from the Trentino company XLAM Dolomiti, the project leader. The work describes the design activities related to the definition of kits for modular houses designed between 20 and 120 square metres, producing a digital database of the various construction logics accompanied by an initial exemplification of possible configurations. The definition of rules and constraints allowed the computational process to be initiated in a more accessible manner, involving users in the generative process and rethinking buildings as open and modifiable sets of discrete parts.

Keywords

Computational design, Modularity, Off-site production, Self-construction, Discrete systems.



Some solutions selected
from the millions
of modular housing
distribution, obtained
through the computational
approach (elaboration by
A. Tomalini).

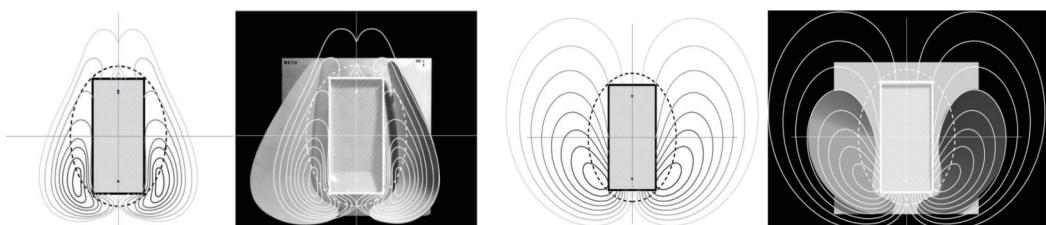
Introduction

The advancement of computational methodologies has profoundly influenced the field of the architectural design, allowing for a broader and more systematic exploration of design possibilities. This contribution is part of that context, presenting an algorithmic methodology specifically developed for the creation of single-plan housing solutions at an architectural scale. A distinctive feature of the proposed approach is its ability to natively integrate the technological constraints imposed by the use of XLam timber construction systems. The research is developed through several stages: a first section is dedicated to a summary of the state of the art, summarising the panorama of relevant research and critically analysing the proposed methodologies. Subsequently, the SUPREMO [1] project is described, functional to the analysis of the computational approach developed for the automatic and massive generation of design solutions, highlighting its peculiarities, key steps and the results achieved, evaluating its effectiveness and potential impact in the field of architectural design with XLam systems.

State of the art

To understand the evolution of the relationship between human beings and the built environment, it is essential to look back to the beginning of the 20th century, with the pioneering work of Alexander Klein and other German functionalist architects. These researchers approached the architectural design from standard anthropometric dimensions, defining the minimum space required for everyday activities and consequently outlining the first essential spatial configurations for domestic environments. Le Corbusier's Modulor, an innovative synthesis of mathematical (from irrational numbers to the Fibonacci sequence), geometric, ergonomic and anthropometric principles, fits into this line of thought. Later, in the post-war period, the desire to give scientific rigour to the generation of architectural form found concrete expression in the initiative of Luigi Moretti [Moretti 1971]. Moretti, together with mathematician Bruno de Finetti, founded the Institute for the Institute for Operational Mathematical Research in Architecture and Urbanism (IRMOU). This institute represented the origin of what was called parametric architecture at the time. The IRMOU research group applied a systematic methodology to the design of different building types, from stadiums to cinemas. The process started with an in-depth analysis of the design theme followed by the formulation of requirements translated into geometric relationships between defined parameters. Through the variation of these relationships, i.e. in the study on visual equiappetability, multiple solutions were generated. However, Moretti's main goal was to overcome an empirical

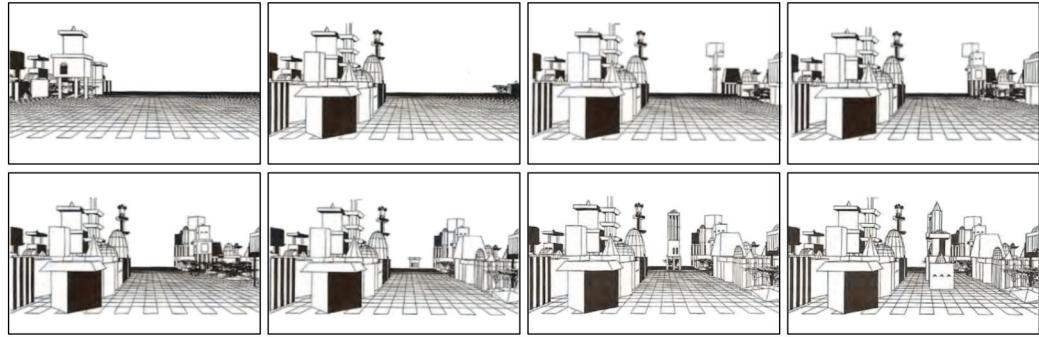
Fig. 1. Visibility function graph and superimposition between a photo of Moretti's physical model of the swimming stadium and the visibility curve (on the left). Proposed swimming stadium designed from the corrected results of Moretti's analysis (right). Image by Canestrino 2024, pp. 121 (figg. 6, 7), 131 (fig. 8).



approach to design [Lo Turco 2012]. With the advent of the first computers, the IRMOU experimented early on with the use of computer tools, effectively anticipating today's parametric design applications.

At the same time, in the 1970s, information technology broke into other production sectors, also influencing the field of the architectural design. At that time, Celestino Soddu realised the potential of the computer in the dynamic representation of design processes through algorithms. This vision led him to conceive generative art as a genetic code of

Fig. 2. Sequence of successive development of a stratified aleatory city model elaborated by Celestino Soddu around the 1980s [Soddu 1989, p. 93]: the formal references proper to each compositional logic come into play with hierarchically different relationships, so as to configure a range of outcomes, from ancient to contemporary buildings, to anticipations of later contaminations.



artificial events, capable of generating infinite variations through complex dynamic systems. Paraphrasing Focillon, Soddu claimed that the true visionaries are those who build their own tools [Soddu 1989]. Generative art is thus configured as the creation of unique and unrepeatable events, with recognisable expressions of the generative idea belonging to the artist or the designer.

The systematic approach derived from complex systems science also found application in construction. Architects were tasked with formulating problems in terms of fundamental needs and requirements, focusing on the interactions of everyday life. Traditional design practice often struggled to simultaneously consider and process the complexity of the elements involved. The need for effective synthesis led to the conviction that combinatorial analysis, made possible by computer science, was an indispensable tool. Consequently, mathematical algorithms and computer processing were employed to explore potential design relationships, with the aim of extrapolating the most suitable solution [Garzino 2011]. Significant contributions can be traced back to Carnegie-Mellon University in Pittsburgh, where building systems based on the principles of cognitive psychology were developed. These systems can be categorised into three basic approaches. The deterministic approach aims to find the optimal solution through a precise description of the problem, often used for spatial organisation. The generational approach is based on the prior definition of rules, implemented through fractal algorithms or 'shape grammars', as in the well-known protocol formalised by George Stiny and James Gips [Stiny 1978]. In this approach, a set of transformation rules is applied iteratively to an initial shape, generating new configurations. Finally, the performance approach, widely used in current architectural design software, uses artificial

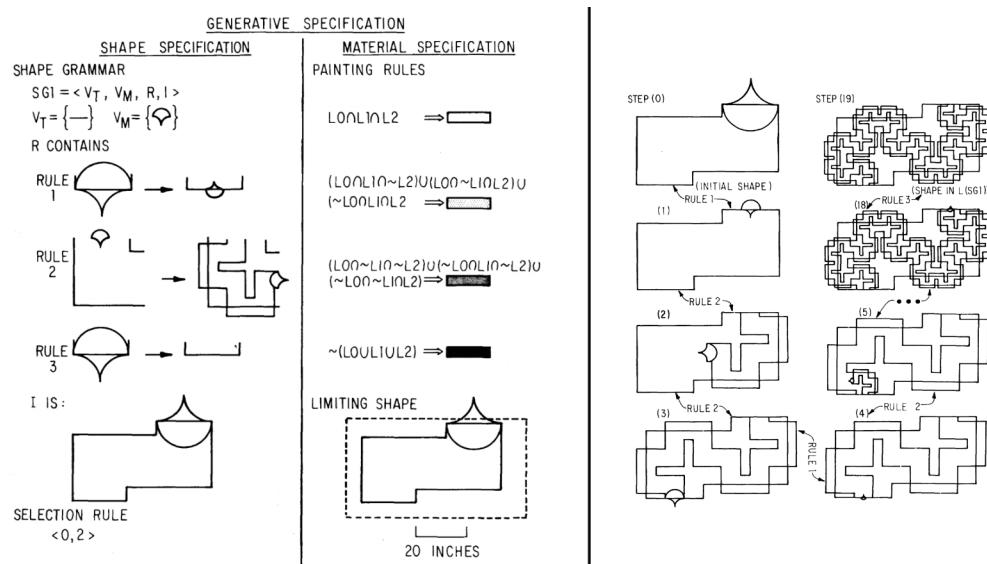


Fig. 3. A method of generating shapes using shape grammars that take the shape as primitive and have rules specific to the shape presented. On the left: Complete and generative specification of classes. On the right: Generation of a shape [Stiny, Gips 1978, pp. 127 (figg. 2-6), 129 (figg. 3-6)].

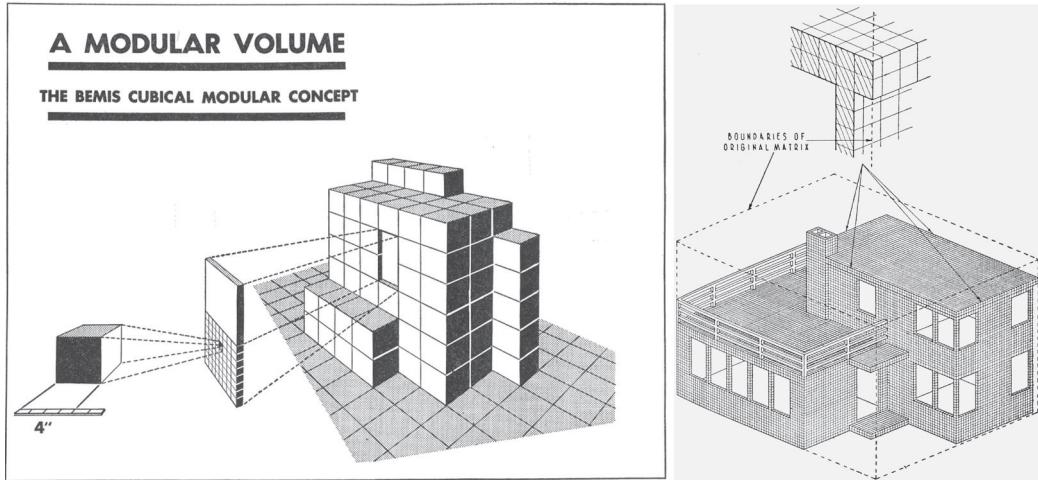


Fig. 4. Illustration of the concept for a 4-inch basic cubic module for building coordination, proposed by Albert Farwell Bemis [Bemis 1936].

intelligence to evaluate specific aspects of a project (structural, energy etc.) [Roadford & Stevens 1987]. From the formal generation perspective, the generational approach is particularly interesting, in line with Noam Chomsky's theories on the generation of complex structures starting from simple rules.

More recently, the relationship between the design representation and the computational structures has been further explored in the context of materials engineering, with significant spin-offs in architecture. The Centre for Bits and Atoms at MIT has developed the concept of 'digital materials', consisting of discrete units that are reversibly connected [Popescu *et al.* 2006]. These materials aim to bridge the gap between the continuity of the real world and the discretisation of the computational tools used to represent it [Gershenfeld *et al.* 2017]. This approach has found further development in architecture, giving rise to the field of 'discrete architecture', reasoning about the creation of modular and reversible building systems [Retsin 2019]. This trend is characterised by a shift from 'functionally' defined modules to 'generic' modules [Rossi 2023]. In this scenario, new applications for the design

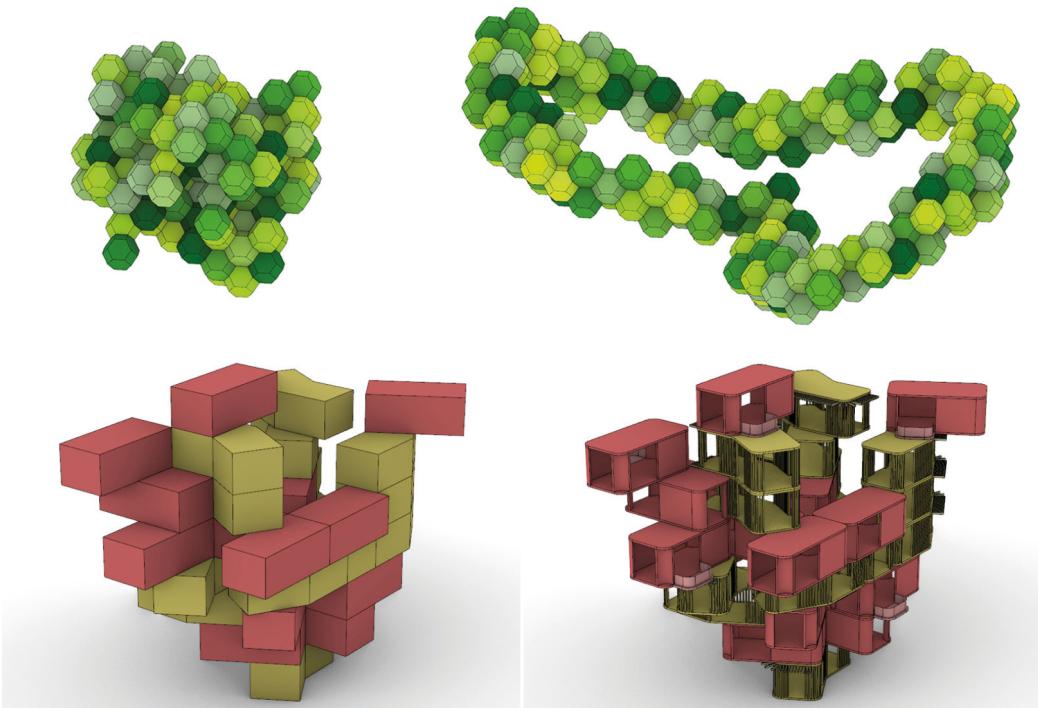


Fig. 5. Top, aggregation with different constraints. Bottom, example aggregation with parts using different levels of detail (LOD): left, part geometry; right, high detailed attributes with custom additions, such as balconies and shadings [Rossi 2023, pp. 103 (fig. 4.4), 121 (fig. 4.22)].

and representation of assemblies composed of a large number of generic elements have become widespread, among which the Wasp toolkit is currently one of the most widely used [Rossi 2024].

The SU.PRE.MO. project

The SU.PRE.MO. research project is aimed at the development of an innovative wood material, called SUperlegno, and at the definition of constructive solutions including high-performance PREfabricated elements, emergency housing MODuli and MOdular solutions for self-construction. The project involved the synergic collaboration between the Department of Architecture and Design (DAD) of the Politecnico di Torino and Xlam Dolomiti, a leading company in the production of structural panels in XLam (CLT) wood. DAD's contribution, represented by the disciplines of Drawing and Architectural Technology and , focuses on the definition of housing modules, with particular attention to technological and process innovation in architectural design. A user manual describes the aggregation rules and the engineering of the parts that make up the housing unit; at the same time this constitutes the input for the process definition. The characterising theme concerns the definition of a computational system for the exploration of possible configurations, through the elaboration of a digital database. Considering the modular nature of the housing solutions, the challenging element consists in the definition of a combinatorial algorithm capable of aggregating the different functional units into a distributionally coherent plan.

The generated solutions populated a dataset of solutions accessible through a web-based user interface. The interface summarises the design choices required to define the self-build modules and, respecting the predefined technical constraints, filters the generated solutions by suggesting the solution that best fits the user's needs. This approach is part of the broader context of Industry 5.0, oriented towards product customisation and the integration of end-user needs, promoting the use of bio-based materials and building industrialisation processes.

The proposed methodology

The research activity initially involved an in-depth analysis of international benchmarks relating to the development of housing modules, with particular attention to self-building solutions investigated for the definition of best practices, both in the professional field and in the experimental and research field.

The experience of Xlam Dolomiti was essential for the definition of the rules and standards of aggregation, thanks to its expertise in the production of structural XLam panels, reasoning on dimensional constraints and rigorous modular grids; this activity required the integration of geometric, alphanumeric and topological information to represent the layout of the housing modules, the connection systems between the rooms associated with the bill of materials of the individual prefabricated elements; in this area the visual programming language has extremely effective tools: in particular, the Wasp plug-in was used as the main engine for generating floor plans, thanks to its advanced functionality for combinatorial design and its data structure linking geometry and topology.

Starting from the design and construction specifications, the plan generation process consists of six interconnected phases:

- database generation: based on the specifications provided by the project partners, a database of functional units with associated modular dimensions was defined. The database was initially set up on a spreadsheet to facilitate editing by non-programming personnel; it was later converted to JSON format for faster processing in the Grasshopper environment via a customised script in *Python*;

- selection of environments and generation of unit geometry: the VPL interface allows the selection of the desired functional units and the definition of a useful surface area range: the script extracts from the database all the possible combinations of available units that meet the surface area requirements. Once selected, a second script converts the data

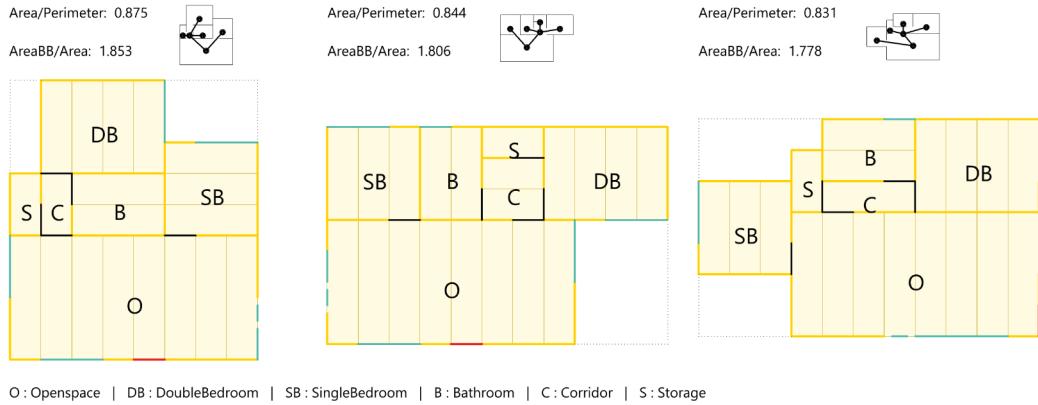


Fig. 6. Generation of some design solutions showing the room name, the topology of the openings (doors, windows, access) and the connection graph between rooms (elaboration by A. Tomalini).

from the JSON format into Wasp-specific classes, including geometric information about the units and the XLam modules;

- floor plan generation: after making the selection of functional units, Wasp's stochastic aggregation algorithm is used to generate floor plans. To ensure the correct connections the environments, a set of adjacency rules has been defined that specify which environments can be connected to each other. The algorithm also allows a random "seed" value to vary, allowing multiple solutions to be generated. The floor plans are then enriched by defining connecting ports between adjacent modules and converted to a custom dictionary format for further processing. Unbound perimeter walls are also identified and labeled, thus potentially editable by the end user on the web platform;

- filter operations on floor plans: since the algorithm used is stochastic, it generates a wide variety of solutions, some of which do not conform to design and functional requirements. For this reason, a number of filters have been added to eliminate undesired solutions; these check the ratio between the area and the perimeter of the plan and the ratio between the area of the plan and the area of the minimum footprint rectangle, respectively. Both aim to exclude solutions that are not sufficiently compact;

- generation of windows: floor plans that are considered to be correct are enriched by the addition of windows, in accordance with the regulations on air-to-light ratios in force in various countries. For this purpose, two algorithms have been implemented, corresponding to different calculation methods: the first calculates the required aero-illumination ratio for each individual room (corresponding to the Italian and UK regulations), while the second calculates it for the entire living area (corresponding to the French regulations). In both cases, a minimum and maximum number of windows are specified for each type and size of room, allowing their distribution to be controlled. Once the window positions have been defined, the relevant XLam elements are added to the plan dictionary;

- data conversion and export: In this phase, the dictionary is further detailed with specific information about the floor plan configuration, such as the reference country, the usable area, the connectivity graph between rooms and a unique identification code. Finally, the dictionary is converted into a JSON format and saved in a file to be added to the plan database.

The outcomes

The process enabled the generation of a large dataset of solutions, exceeding one million configurations, from a limited dataset of functional units adhering to specified design, functional and technological constraints. The adoption of open data formats and a fully computational workflow guarantees the adaptability of the process to changes in the initial dataset and different modular grid sizes. It is emphasised that the process is inherently independent of module size, assumed as the basic unit for generation. The implementation of specific filters offers the possibility of optimising the generative process according to defined design parameters, allowing for solutions with a variable degree of freedom depending on the filter

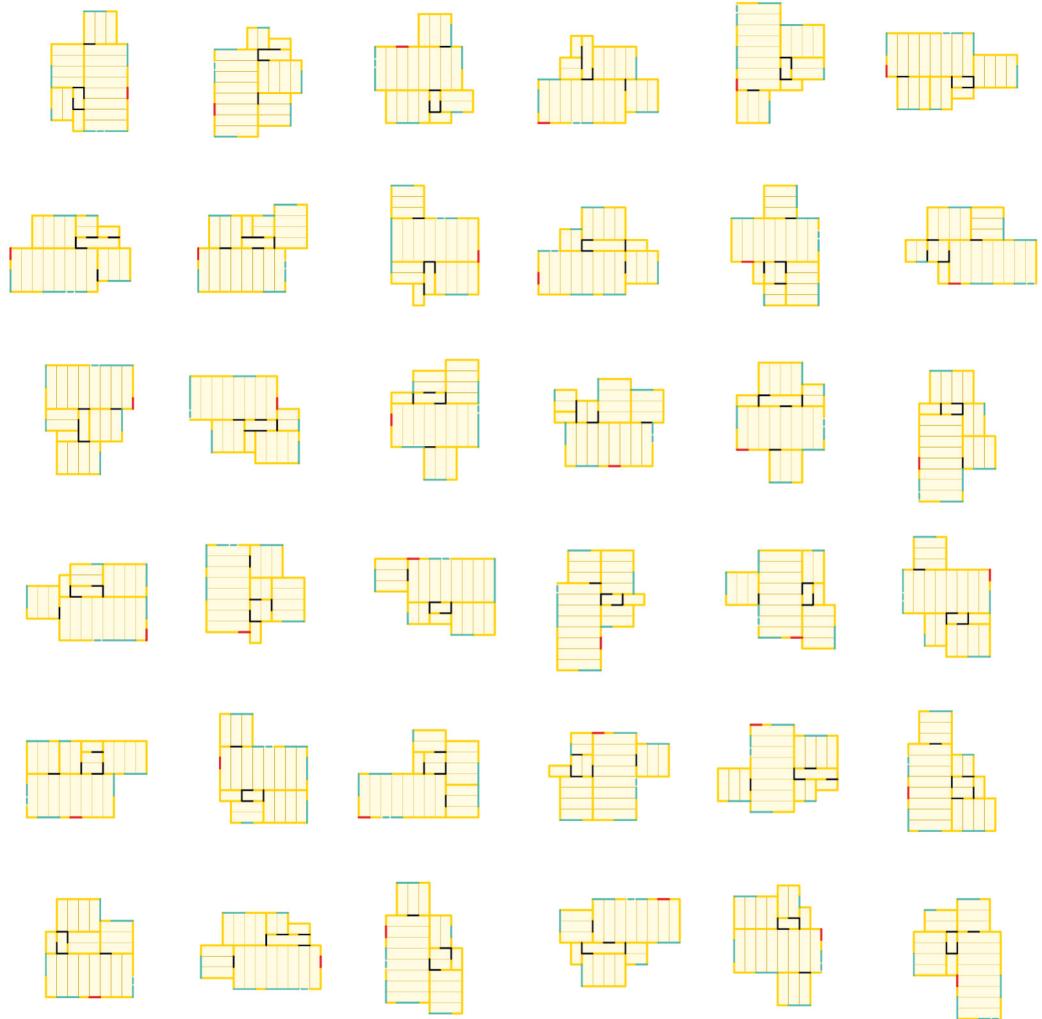


Fig. 7. Some examples of floor plans generated in accordance with the constraints imposed and the modularity of the building elements (elaboration by A. Tomalini).

criteria employed. Finally, the integration of different algorithms for the positioning of windows makes the process consistent with the regulations concerning the aero-illumination ratio in force in the different international contexts.

The analysis of the generated dataset enables the identification of solutions congruent with distribution criteria that follow more established approaches. However, in order to give the user a wide margin of design freedom, the generative process includes configurations with unconventional perimeter geometries, while fully complying with predefined technological and regulatory constraints. To facilitate user selection in the front-end interface, solutions are sorted according to area/perimeter ratio, favouring the most compact configurations.

Conclusions

The computational approach presented is proposed as a support tool for design exploration, allowing easy elaboration of solutions through the variation of parameters that define their geometric and topological features. The primary objective is the structuring of design support systems capable of guaranteeing a precise definition of the initial requirements framework and, consequently, a precise verification of the compliance of the elaborated solutions. The authors acknowledge the intrinsic limits of the human capacity to process the combinatorial complexity resulting from multiple variables; so the research aims to

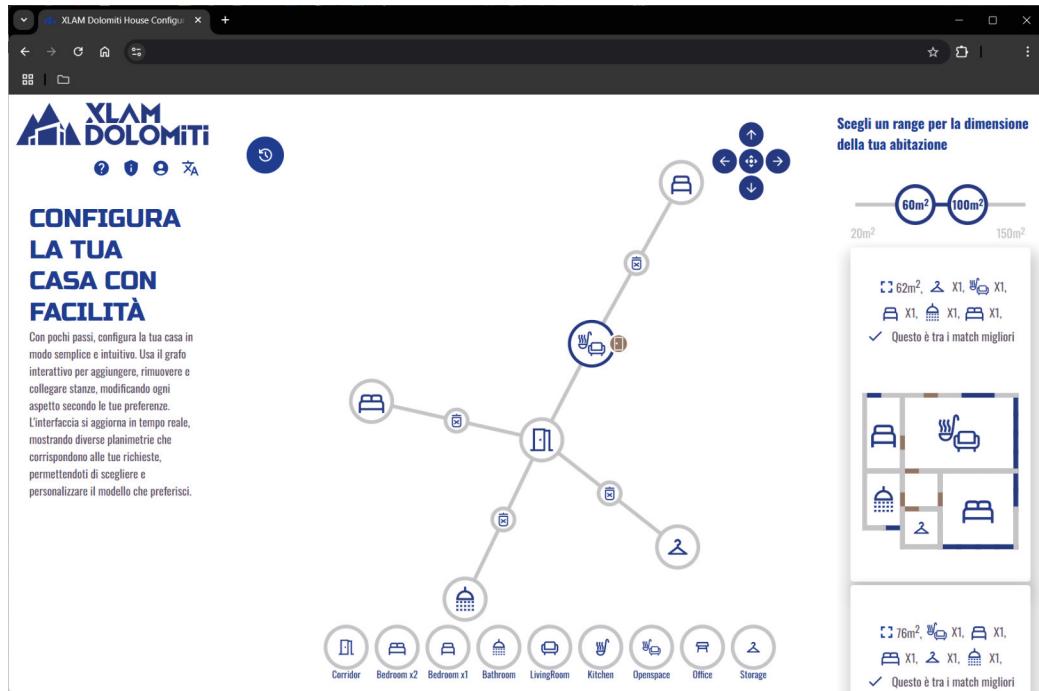


Fig. 8. A first screenshot of the user interface showing the interactive graph of the connections between the rooms and the planimetric distributions associated with this graph. The user can add or delete rooms and define new connections (elaboration by the authors).

overcome a design approach based exclusively on historical, manual or experiential references, turning towards the use of spatial allocation algorithms. With the aid of computational tools, the experience gained is an excellent way to produce advanced logic-functional-design solutions, which can be likened to three-dimensional conceptual models, in which solutions are sought for well-defined requirements. Computer optimisation finds its ideal application where the performance factor is measurable and there

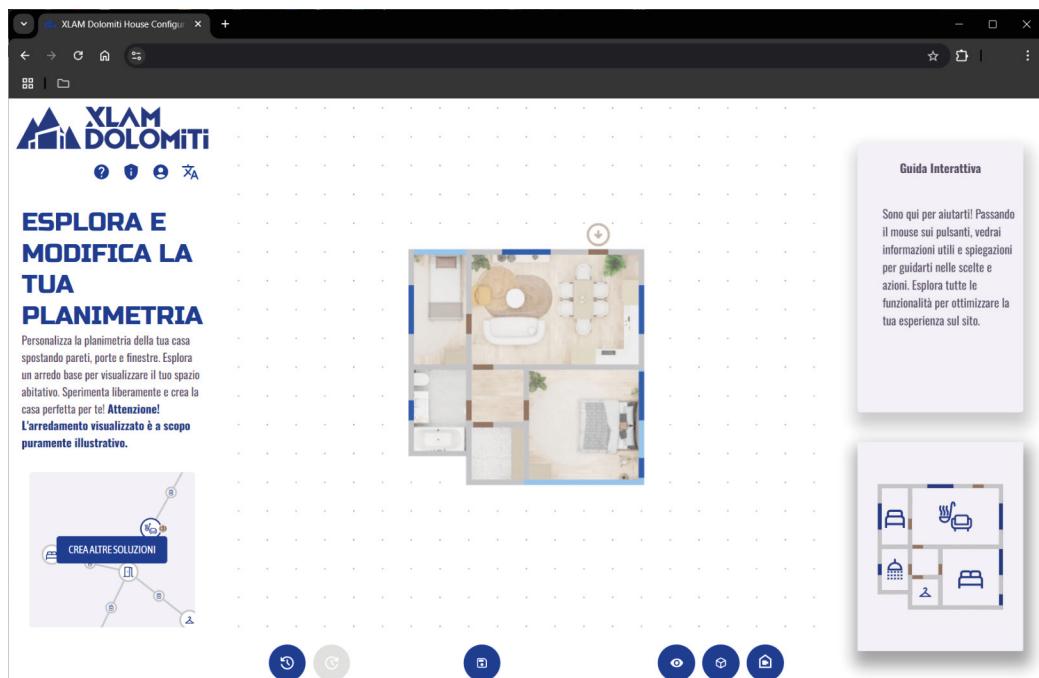


Fig. 9. A first screenshot of the front end interface in which the user can also work on the floor plan by intervening on the modularity and positioning of openings, evaluating changes in real time (elaboration by the authors).

is a clear hierarchy of values. The translation of architectural values into a logical and measurable environment represents a particularly articulated process which, although it generates solutions that meet the inserted constraints, may at the same time raise new unforeseen problems, highlighting the need for an iterative definition of the problem and its solutions. In this new perspective, it is evident that the design process cannot be fully automated: the outcome is geared towards the definition of a database of heterogeneous solutions from which to draw rather than the development of a simplified and more constraining design programme.

Credits

The multidisciplinary research activity for the development of the SUPREMO. project, in addition to the Politecnico di Torino, involves the Trentino technology district Habitech, the Fondazione Bruno Kessler, the CNR IBE of San Michele all'Adige, the University of Trento, the University of Florence, as well as various start-ups, innovative companies in the digital sector and professional firms, including Spindox, which was responsible for the development of the web-based platform.

Note

[1] SUPREMO – from Super X-Lam To Prefabrication and 2D/3D Modularity is a research project carried out by XLAM Dolomiti Spa, a Paterno Group Italian company, and funded by the Autonomous Province of Trento (Italy), lasting 36 months (September 2022 - September 2025).

Reference List

- Bemis, A.F. (1936). *The Evolving House, vol. III, Rationalisation*. Cambridge: The MIT Press.
- Canestrino, G. (2024). Luigi Moretti's Formalised Methods and his Use of Mathematics in the Design Process of Architettura Parametrica's Swimming Stadiums. In *Nexus Netw. J.*, vol. 27, pp. 119-137. <https://doi.org/10.1007/s00004-024-00784-x>.
- Gershenfeld, N., Gershenfeld, A., Cutcher-Gershenfeld, J. (2017). *Designing Reality: How to Survive and Thrive in the Third Digital Revolution*. New York: Basic Books.
- Garzino, G. (2011). Il Modello decisionale. The decision making model. In G. Garzino (a cura di). *Disegno (e) in_formazione : disegno politecnico. Drawing (and) information: polytechnic drawing*, pp. 51-70. Santarcangelo di Romagna: Maggioli.
- Lo Turco, M. (2012). Elogio al disegno parametrico: dalla teoria ai processi operativi - Praising parametric drawing: from theory to operational processes. In L. Carlevaris, M. Filippa (a cura di). *Elogio della teoria. Identità delle discipline del disegno e del rilievo / In praise of theory I. The fundamentals of the disciplines of representation and survey*. Atti del 37° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione, Roma, 13-15 Settembre 2012, vol. 34, pp. 293-300. Roma: Gangemi Editore.
- Moretti, L. (1971). Ricerca matematica in architettura e urbanistica. In *Moebius. Unità della cultura: architettura, urbanistica, arte*, 4(1), pp. 30-53.
- Popescu, G.A., Tushar M., Neil G. (2006). Digital Materials for Digital Printing. In *Proc. IS&T Digital Fabrication Conf.* Denver, (17-22 Settembre 2006), vol. 22, pp. 58-61. Denver: Society of Imaging Science and Technology.
- Retsin, G. (2019). Discrete Architecture in the Age of Automation. In *Architectural Design*, 89(2), pp. 6-13.
- Roadford, A., Stevens, G. (1987). *CAD Made Easy*. New York: Mc Graw Hill.
- Rossi, A. (2023). *Mediated Assemblies: An Open Source Software Approach to Combinatorial Design and Fabrication*. Tesi di Dottorato in TU Darmstadt, O. Tessmann, P. Eversmann. TU Darmstadt.
- Rossi, A. (2024). *Wasp v0.6.001: Discrete Design for Grasshopper*. <https://github.com/ar0551/Wasp>.
- Soddu, C. (1989). *Città Aleatorie*. Milano: Masson Publisher.
- Stiny, G., Gips, J. (1978). *Algorithmic Aesthetics. Computer Models for Criticism and Design in the Arts*. Berkeley and Los Angeles: University of California Press.

Authors

Massimiliano Lo Turco, Politecnico di Torino, massimiliano.loturco@polito.it
Andrea Rossi, Universitat Kassel, rossi@asl.uni-kassel.de
Andrea Tomalini, Politecnico di Torino, andrea.tomalini@polito.it

Per citare questo capitolo: Massimiliano Lo Turco, Andrea Rossi, Andrea Tomalini (2025). Computational Description of Modular Architectures for Self-Building. In L. Carlevaris et al. (Eds.), *èkphrasis. Descrizioni nello spazio della rappresentazione/èkphrasis. Descriptions in the space of representation*. Proceedings of the 46th International Conference of Representation Disciplines Teachers. Milano: FrancoAngeli, pp. 3859-3878. DOI: 10.3280/oa-1430-c956.