

Micaela Colella

Architettura residenziale e sostenibilità

La casa prefabbricata mediterranea nell'era dell'Industria 4.0



Dottorato di Ricerca in 'Architettura: Innovazione e Patrimonio'
Consorzio Argonauti: Politecnico di Bari e Università degli Studi Roma Tre

XXX Ciclo (2015, 2016, 2017)

Tutor:
Prof. Giuseppe Fallacara

Dottorato di Ricerca in 'Architettura: Innovazione e Patrimonio'
Consorzio Argonauti: Politecnico di Bari e Università degli Studi Roma Tre

XXX Ciclo (2015, 2016, 2017)

Architettura residenziale e sostenibilità
La casa prefabbricata mediterranea nell'era dell'Industria 4.0

Dottoranda: Micaela Colella

Tutor:
Prof. Giuseppe Fallacara

Co-Tutor:
Prof.ssa Laura Briggs, Prof. Jonathan Knowles

Coordinatore:
Prof.ssa Elisabetta Pallottino

Dottorato di Ricerca in ‘Architettura: Innovazione e Patrimonio’
Curriculum: Cultura della Costruzione
XXX Ciclo (2015, 2016, 2017)

Consorzio Argonauti

- Politecnico di Bari
Via Orabona 4
70126 Bari, Italia
- Università degli Studi Roma Tre
Largo Giovanni Battista Marzi, 10
00153, Roma

Dottoranda: Micaela Colella
Matricola: 21766

Tutor: Prof. Giuseppe Fallacara
Co-Tutor: Prof.ssa Laura Briggs, Prof. Jonathan Knowles
Coordinatore del Dottorato: Prof.ssa Elisabetta Pallottino

Indice

Ringraziamenti

Abstract

INTRODUZIONE

1.	Definizione del tema di ricerca e del campo d'indagine	13
1.1.	Premessa	13
1.2.	Introduzione al tema di ricerca	14
1.3.	Struttura della tesi	16
1.4.	Definizione del campo di indagine	20

PRIMA PARTE

2.	Nozioni di sostenibilità: nascita ed evoluzione	25
2.1.	Nascita del concetto di sostenibilità	25
2.2.	La sostenibilità in architettura	31
2.3.	Il tema del buon costruire oggi: i protocolli di certificazione ambientale	41
3.	Sulle tracce della sostenibilità nella storia dell'architettura Mediterranea	51
3.1	L'architettura vernacolare come archetipo dell'architettura sostenibile	53
3.2	Le pratiche del "buon costruire" nell'architettura mediterranea	59
3.2.1	L'orientazione	61
3.2.2	L'involucro edilizio	65
3.2.3	Sistemi passivi di ventilazione e raffrescamento naturale	69
3.2.4	Sistemi di ombreggiamento e controllo solare	77

SECONDA PARTE

4.	La prefabbricazione come strumento per la sostenibilità	83
4.1.	Principi di prefabbricazione sostenibile	83
4.2.	Cenni storici sulla prefabbricazione	91
4.3.	La ricerca contemporanea sull'abitazione prefabbricata	111
4.3.1.	Il rifugio temporaneo	113
4.3.2.	L'abitazione minima	120
4.3.3.	La casa prefabbricata reversibile	132
4.3.4.	La casa prefabbricata stabile	144
4.4.	Dalla ricerca teorica alla ricerca operativa: premessa metodologica sulle sperimentazioni prototipali	152
5.	Cellula abitativa minima: sperimentazioni prototipali	157
5.1	La cupola come cellula abitativa minima	157
5.2	D-Home	160
5.2.1	Considerazioni finali e possibili sviluppi	163
5.3	Ghibli	166
5.3.1	Considerazioni finali e possibili sviluppi	172
6.	Il rifugio temporaneo: sperimentazione prototipale	175
6.1.	Just a minute	175
7.	La casa prefabbricata reversibile: sperimentazioni prototipali	183
7.1.	Ecodomus	183
7.1.1	Il progetto	184
7.1.2	Maquette di progetto	193
7.1.3	La costruzione del prototipo	195
7.1.4	Considerazioni finali e possibili sviluppi	197
7.1.5	Reportage fotografico della costruzione del prototipo	198
7.2	Un-boxed	209
7.2.1	Il progetto	211
7.2.2	Considerazioni finali e possibili sviluppi	

8.	La casa prefabbricata stabile: sperimentazione prototipale	223
8.1	SOOD	223
8.2	Il progetto	225
8.3	Maquette di progetto	233
8.4	Considerazioni finali e possibili sviluppi	235

TERZA PARTE

9.	L'abitazione nell'era dell'Industria 4.0	239
9.1.	Industria 4.0	239
9.2.	Industria 4.0 e architettura	250
9.2.1	Personalizzazione di massa	257
9.3.	Nuovi scenari per la casa nell'era dell'industria 4.0	266
9.3.1	La prefabbricazione personalizzata	272
9.3.2	La fabbricazione additiva	277

QUARTA PARTE

10.	Conclusioni	297
10.1	Contributi e nodi critici della tesi	297
10.2	Limitazioni e futuri sviluppi	299

Bibliografia

Ringraziamenti

Questa ricerca non sarebbe stata possibile senza l'aiuto di numerose persone che mi hanno sostenuta in questi tre anni. In primis, mi sento in dovere di ringraziare il Prof. Giuseppe Fallacara, per il suo costante sostegno e la sua preziosissima guida. Sono grata a lui per aver compreso appieno il valore della ricerca.

Un sentito ringraziamento va alla Prof.ssa Laura Briggs e al Prof. Jonathan Knowles per i preziosi consigli che mi hanno aiutato ad approfondire alcuni aspetti della mia ricerca.

Ringrazio il Prof. Claudio D'Amato Guerrieri per essere sempre stato un faro in questi anni di studio e per aver reso possibile questo percorso fondando il dottorato di ricerca nel Politecnico di Bari.

Ringrazio i componenti del New Fundamentals Research Group, Marco Stigliano, Ubaldo Occhinegro e Micaela Pignatelli con cui ho avuto modo di condividere diversi momenti importanti della mia ricerca.

Ringrazio tutte le aziende che hanno supportato le attività di ricerca sperimentale di questa tesi, con le quali ho avuto la fortuna e l'onore di collaborare: Pimar, Xilux, Gervasi Srl, WoodTec, Area Scs, Cerisvi, Ingegna Srl e Psts.

Ringrazio tutti i colleghi con cui ho avuto modo di scambiare opinioni sulle ricerche durante gli anni del dottorato: Prof. Alberto Pugnale, Prof. Mauro Chiarella, Prof. Jim Stevens, Prof. Renzo Lecardane, Shayani Fernando, Roberta Gadaleta e Daniele Malomo.

Infine ringrazio sentitamente Maurizio Barberio, insostituibile compagno di avventura, per il suo costante e incondizionato supporto.

Abstract

La tesi affronta il tema della costruzione di architetture residenziali secondo i principi della progettazione sostenibile nell'ambito del clima mediterraneo. Si propone di sfruttare i vantaggi legati alla prefabbricazione come mezzo per la diffusione di un'architettura residenziale di elevata qualità e salubrità, realizzata secondo un processo di fabbricazione e costruzione efficiente e controllato.

Il legame con la tradizione architettonica locale è assicurato da una progettazione olistica che riassume nel progetto i principi di progettazione bioclimatica e ottimizzazione nell'uso dei materiali, sottesi nell'architettura vernacolare. Il limite storico della prefabbricazione legato alla standardizzazione degli esiti progettuali e costruttivi è superato dai nuovi strumenti di progettazione computazionale e fabbricazione digitale che, grazie alla fabbrica flessibile dell'era dell'Industria 4.0, possono dare vita ad architetture prefabbricate totalmente personalizzate e aderenti alle caratteristiche del luogo di progetto.

INTRODUZIONE

Capitolo 1

Definizione del tema di ricerca e del campo di indagine

1.1 Premessa

La presente tesi di dottorato è stata sviluppata all'interno del XXX ciclo di Dottorato di Ricerca in "Architettura: innovazione e patrimonio", istituito dal Consorzio Argonauti (Politecnico di Bari - Università degli Studi Roma Tre). Il campo di interessi del Corso di Dottorato è il progetto di architettura, indagato nella sua prassi e nel suo approccio teorico, conoscitivo e metodologico, nella propria evoluzione storica, nelle permanenze e nelle prospettive evolutive. Il Corso di Dottorato è organizzato in tre *curricula*: cultura della costruzione, progetto filologico e progettare in un paese antico.

La presente ricerca si colloca all'interno del curriculum "cultura della costruzione", ove il progetto di architettura è indagato nella sua evoluzione storica, sulla base delle acquisizioni e delle ricerche scientifiche, tecniche e strumentali.

Il ciclo di dottorato, della durata di tre anni, è stato impostato su una divisione annuale delle principali attività: il primo anno è dedicato alle acquisizioni didattiche derivanti dalle linee di ricerca dei Docenti del Consorzio; il secondo anno è incentrato sullo sviluppo delle tematiche

di ricerca della tesi; il terzo anno è dedicato al completamento delle attività di ricerca, finalizzate alla scrittura della tesi.

La tesi si pone in continuità con le ricerche sull'aggiornamento delle tecniche costruttive tradizionali e contemporanee relative al tema della casa mediterranea, che dai primi anni Duemila costituiscono parte dell'identità culturale della Facoltà di Architettura di Bari e successivamente del Dipartimento di Scienze e dell'Ingegneria Civile e dell'Architettura del Politecnico di Bari. Questo filone di ricerca è stato intrapreso in origine dal Prof. Claudio D'Amato Guerrieri e in seguito proseguito dal Prof. Giuseppe Fallacara. La presente ricerca, supervisionata dal Prof. Fallacara, è tesa alla definizione delle nuove modalità progettuali e costruttive della casa mediterranea permesse dall'introduzione degli strumenti di progettazione computazionale, di fabbricazione digitale e robotica, e dai nuovi processi produttivi propri della nascente Industria 4.0.

1.2 Introduzione al tema di ricerca

Le tradizioni architettoniche e le pratiche del buon costruire, che hanno da sempre caratterizzato l'architettura vernacolare Mediterranea, rappresentano principi solidi dettati dall'esigenza di ottimizzare le risorse disponibili ed evitare sprechi di qualsiasi natura.

Nell'architettura vernacolare l'involucro architettonico, ad esempio, non poteva che nascere da un'adeguata risposta all'esigenza di protezione e adattamento alle condizioni climatiche esterne, attraverso l'uso efficiente del materiale da costruzione localmente disponibile.

A partire dalla rapida ricostruzione del secondo dopoguerra, con la

diffusione massiccia del sistema intelaiato in calcestruzzo armato e dei sistemi impiantistici, si assiste a un cambiamento repentino delle pratiche costruttive consolidate, che portano a una standardizzazione delle soluzioni tecnologiche, e vedono l'impiego di involucri sempre più sottili e decontestualizzati rispetto alle esigenze climatiche del luogo. Questa astrazione dal contesto climatico è stata permessa dal ruolo compensativo di impianti attivi di riscaldamento e raffrescamento che energeticamente in passato non rappresentavano un problema.

Oggi, vicini al punto di esaurimento delle risorse energetiche non rinnovabili, in una condizione di allarme ambientale globale, torna ad essere imperante la necessità di sfruttare con intelligenza gli apporti energetici rinnovabili e il comportamento passivo degli edifici, nonché un uso ottimizzato delle risorse materiali disponibili.

Nell'area climatica mediterranea, il passaggio al sistema intelaiato in calcestruzzo armato ha rappresentato uno strappo ancor più profondo con la tradizione architettonica, che ha causato la perdita di un enorme patrimonio di nozioni costruttive sorte in risposta al proprio contesto climatico. Tuttavia, nel panorama delle tecniche costruttive che si sono sviluppate con la modernità, ne emerge una che viene universalmente riconosciuta come rispondente ai principi di sviluppo sostenibile sorti in seguito alle crisi energetiche degli anni Settanta: la prefabbricazione. Nonostante la prefabbricazione offra numerosi vantaggi, essa presenta un limite che ne ha determinato storicamente l'accezione negativa con cui viene etichettata, ossia la standardizzazione degli esiti progettuali e costruttivi. Apparentemente, la casa prefabbricata può essere vista come quanto di più lontano dall'architettura vernacolare, sebbene si fondi entrambe sul medesimo principio dell'ottimizzazione e del

minimo spreco. Questo aspetto critico, benché non privo di fondamento nel passato, può essere superato definitivamente grazie agli strumenti informatici e produttivi, esito di una nuova rivoluzione industriale denominata “Industria 4.0”.

Dunque, con la presente tesi si ricercheranno i fondamentali principi di architettura passiva impiegati nella tradizione architettonica del bacino del Mediterraneo, per porli alla base di una nuova concezione architettonica che si avvalga delle più attuali tecniche della prefabbricazione e dei principi della quarta rivoluzione industriale come strumento per il costruire e vivere sostenibile.

1.3 Struttura della Tesi

La presente ricerca di dottorato si struttura in quattro parti e dieci capitoli. In essa si affrontano due grandi temi, centrali nel dibattito architettonico contemporaneo: il rapporto tra sostenibilità ambientale e tradizione architettonica, e il rapporto tra sostenibilità ambientale e innovazione dei processi progettuali e produttivi. Questi temi generali sono ricondotti ad un ambito più specifico di applicazione, identificato nel tema della casa mediterranea del futuro, che individua nelle più recenti tecniche di prefabbricazione la chiave per soddisfare le esigenze dell’abitare contemporaneo nel rispetto del contesto storico e socio-culturale di appartenenza, dell’ambiente naturale e della salute umana.

Lo studio oggetto della tesi, parte dall’analisi del concetto di sostenibilità, dal significato del termine alle sue implicazioni e applicazioni in ambito architettonico, offrendo una ricognizione panoramica sullo stato di fatto. Il fulcro di questa prima parte

è rappresentato dall'individuazione, all'interno della storia dell'architettura vernacolare del bacino del Mediterraneo, dell'applicazione dei principi alla base dei concetti di sostenibilità e di architettura bioclimatica, ancor prima che questi termini fossero conosciuti. Si giunge, in seguito, ad un esame complessivo degli strumenti che regolamentano oggi le pratiche del buon costruire, i protocolli di certificazione ambientale. Si prosegue con un'attenta disamina dei principali sistemi impiegati, in assenza delle attuali tecnologie impiantistiche, per creare condizioni di comfort interno, benessere e sicurezza. Sono quindi analizzati i criteri di orientazione degli edifici, i sistemi di ventilazione e raffrescamento naturale, i sistemi passivi per la regolazione termica ed i sistemi di ombreggiamento e controllo solare.

La seconda parte della trattazione è dedicata al tema dell'abitazione prefabbricata, analizzando quegli aspetti che hanno portato all'individuazione della tecnica della prefabbricazione architettonica come mezzo per il costruire e vivere sostenibile. Tra gli aspetti analizzati: la necessità di questo tipo di costruzioni di nascere da una progettazione integrata, che porti il progettista ad un approccio olistico, facendo sintesi degli apporti di tutte le figure professionali coinvolte nel processo sin dalle prime fasi ideative; la necessità di impiegare le logiche della prefabbricazione con l'utilizzo quasi esclusivo di materiali naturali, garantendo elevati livelli di salubrità e comfort abitativo; la possibilità di rendere l'intero edificio costruito un'opera reversibile e a basso impatto ambientale, grazie all'utilizzo del montaggio a secco delle componenti e all'impiego di fondazioni leggere.

A questo punto della trattazione, è necessario restringere il campo d'indagine dall'architettura sostenibile ottenuta per mezzo della

prefabbricazione in generale, al tema dell'abitazione, guardando agli esiti degli studi condotti finora nei centri di ricerca. Avere un quadro di riferimento completo su tali ricerche è di fondamentale importanza per comprendere come la presente tesi si inserisce all'interno di tale quadro, e qual è il contributo nuovo e proficuo da fornire alla comunità scientifica e non. Questo approfondimento ha condotto ad una classificazione, in base al grado di stanzialità e complessità delle soluzioni, in quattro principali filoni di ricerca sul tema: il rifugio temporaneo, l'abitazione minima, la casa prefabbricata reversibile e la casa prefabbricata stabile. La classificazione proposta è alla base delle sperimentazioni prototipali a cui la scrivente ha potuto prendere parte durante gli anni che l'hanno vista impegnata in questa ricerca di dottorato. Tali esperienze hanno consentito di andare oltre la speculazione teorica e di sperimentare sul campo alcuni dei temi centrali di questa tesi.

Nella terza parte vi è il passaggio emblematico di questo studio. Con il passaggio storico avvenuto a partire dagli anni Duemila, dalla progettazione computerizzata alla progettazione computazionale e con la diffusione capillare delle macchine a controllo numerico, prima, e della fabbricazione digitale e robotica, dopo, il tema della casa prefabbricata si allontana sempre di più dal concetto di standardizzazione e produzione di massa, verso una produzione sempre più personalizzata e aderente alle esigenze del committente e alla natura del luogo di progetto. Questa possibilità, che non ha al momento ancora rivelato appieno il proprio potenziale, è resa finalmente possibile dai principi produttivi insiti nella quarta Rivoluzione Industriale, denominata "Industria 4.0".

La terza parte della tesi quindi opera una approfondita analisi dei principi alla base di questa rivoluzione, individuando gli aspetti più strettamente connessi all'architettura, esplicitando potenzialità e

limiti nella possibile applicazione di questi principi nel campo delle costruzioni. Questi aspetti sono alla base di una nuova visione possibile per il tema dell'abitazione prefabbricata in area mediterranea.

Tra i vari aspetti individuati, il principio della personalizzazione di massa è certamente il più rilevante. Tale concetto, sorto negli anni Ottanta è oggi reso pienamente possibile anche alla scala architettonica, grazie alle potenzialità degli strumenti di progettazione computazionale e di fabbricazione digitale, a cui si affianca la personalizzazione dei processi produttivi, resi flessibili e riprogrammabili in tempo reale grazie alla virtualizzazione che caratterizza la quarta rivoluzione industriale. Per concepire realisticamente una personalizzazione delle soluzioni abitative, è necessario il superamento dell'attuale sistema produttivo e costruttivo, caratterizzato dal monopolio aziendale nella realizzazione delle abitazioni prefabbricate, e la messa a punto di un nuovo processo di progettazione e fabbricazione in cui il ruolo dell'architetto torni ad essere centrale.

La quarta ed ultima parte è dedicata alle considerazioni conclusive su quanto presentato in precedenza, individuando i nodi critici e i contributi originali contenuti nei vari capitoli, oltre a riflessioni sui limiti e le potenzialità della tesi sostenuta, tirando le somme del percorso di ricerca svolto.

1.4 Definizione del campo di indagine

La ricerca svolta è stata originata dalla volontà di indagare il rapporto che intercorre tra sostenibilità ambientale e tradizione architettonica, ed il rapporto da stabilire tra la sostenibilità ambientale e l'innovazione dei processi progettuali e produttivi. Considerando la vastità di queste tematiche è stato necessario tracciare dei limiti entro cui la ricerca si potesse svolgere proficuamente.

Per poter ridurre significativamente l'impatto che il settore delle costruzioni determina in termini di emissioni inquinanti e di consumo globale di risorse, e considerando l'incidenza delle abitazioni nel campo delle costruzioni, si è ritenuto utile tralasciare le architetture specialistiche e restringere il campo della ricerca alla sola architettura residenziale. Nell'ambito dell'architettura residenziale, si è ristretto ulteriormente il campo all'abitazione unifamiliare, poiché da sempre utilizzata come oggetto di sperimentazione per la ricerca architettonica teorica e applicata.

Il secondo limite tracciato è rappresentato dall'ambito geografico e storico-architettonico in cui si colloca la ricerca, i cui confini coincidono con quelli della zona climatica rappresentata dal clima mediterraneo.

Nelle regioni caratterizzate dalla prevalenza di sistemi costruttivi tradizionali elastico-lignei, il passaggio alla logica costruttiva del sistema intelaiato in calcestruzzo armato ha rappresentato un cambiamento poco invasivo, così come è stato più naturale e meno traumatico il ritorno negli ultimi anni a sistemi costruttivi in legno, ma di tipo prefabbricato. Nelle regioni caratterizzate da un sistema costruttivo tradizionale di tipo plastico-murario, invece, come quelle interessate dal clima mediterraneo, dove i forti spessori murari erano

Micaela Colella

Architettura residenziale e sostenibilità

La casa prefabbricata mediterranea nell'era dell'Industria 4.0

Cap 1. Definizione del tema di ricerca e del campo di indagine

funzionali all'ottenimento di una elevata inerzia termica per difendersi dalla calura estiva, la diffusione del sistema intelaiato in cls armato ha rappresentato un passaggio così drastico, che il ritorno a logiche progettuali passive riprese dalla tradizione storica sembra inattuabile, se non con la definizione di una nuova e diversa concezione progettuale che non imiti la tradizione costruttiva, ma ne riproponga le logiche di adattamento al contesto climatico e storico-culturale in una veste totalmente nuova.

PRIMA PARTE

Capitolo 2

Nozioni di sostenibilità: nascita ed evoluzione

2.1 Nascita del concetto di sostenibilità

L'evento che segna storicamente l'avvento della coscienza ecologista e dell'attenzione pubblica sulle questioni ambientali, è la pubblicazione nel 1962 del libro *Silent Spring*¹, della biologa statunitense Rachel Carson. Questa accurata pubblicazione scientifica, rappresenta la prima ufficiale denuncia degli effetti dannosi e irreversibili causati dallo sviluppo incontrollato dell'industria chimica, e quindi, dall'azione dell'uomo, all'ecosistema terrestre. In particolare, la Carson analizza scrupolosamente gli effetti nocivi dei pesticidi sull'ambiente, DDT in primis, che oltre a favorire la nascita di nuove generazioni di parassiti sempre più resistenti, eliminava anche i loro antagonisti naturali. Il titolo "Primavera Silenziosa", infatti, deriva dall'osservazione dell'autrice della notevole riduzione del numero di uccelli canterini nelle periferie delle cittadine americane (fig. 2.1).

Il testo ottenne un immediato riscontro di pubblico, riuscendo a influenzare l'opinione pubblica sulla messa al bando del DDT, e giungendo negli anni Ottanta al divieto di utilizzo del pesticida in

1 R. Carson, *Silent Spring*, Houghton Mifflin Company, Boston, 1962.



Fig. 2.1
Copertina del libro
Silent Spring e foto
della sua autrice,
Rachel Carson (fonte:
environmentandsociety.
org).

quasi tutti i Paesi del mondo. Questo primo fondamentale campanello d'allarme, insieme alla diffusione delle prime immagini della Terra vista dallo spazio degli anni Settanta, aprì la strada a una lenta ma inesorabile presa di coscienza sulla limitatezza delle risorse naturali terrestri e sul delicato equilibrio che ne regola la vita.

Il lungo percorso verso la consapevolezza vide una brusca accelerazione con le grandi crisi petrolifere degli anni Settanta. Nell'ottobre del 1973, l'esercito egiziano e quello siriano attaccarono simultaneamente lo stato di Israele (da sud il primo e da nord il secondo) dando avvio a una guerra, rinominata Guerra di Kippur, che vide l'esito favorevole dell'esercito israeliano su entrambi i fronti in soli venti giorni. La vittoria di Israele, appoggiata dagli USA, portò a conseguenze economiche clamorose quanto inaspettate: l'Opec (Organization of the Petroleum Exporting Countries) decise di quadruplicare il prezzo del petrolio, da 3 a 12 dollari al barile, e di ridurre l'offerta

Micaela Colella

Architettura residenziale e sostenibilità

La casa prefabbricata mediterranea nell'era dell'Industria 4.0

Cap 2. Nozioni di sostenibilità: nascita ed evoluzione



Figg. 2.2-3

Foto di repertorio delle crisi petrolifere degli anni '70 (fonti: thebalance.com; crudeoilpeak.info).

sui mercati internazionali², mirando ad ammonire altre nazioni a entrare nel merito di tali tensioni sostenendo lo stato di Israele³.

Gli anni successivi videro il susseguirsi di ulteriori rialzi del prezzo del greggio, fino ad arrivare, nel 1979, con la guerra tra Iran e Iraq, alla seconda crisi energetica globale, che travolse i bilanci economici dei Paesi dipendenti energeticamente dalle forniture petrolifere.

Il mondo occidentale apprese così quanto fosse labile il proprio modello di sviluppo basato su fonti energetiche, non solo limitate e non rinnovabili, ma per giunta, gestite in gran parte da Paesi con situazioni politiche tra le più instabili del mondo (figg. 2.2-3). Per sopperire alla crisi, molti Paesi dovettero applicare politiche di austerità al fine di ridurre drasticamente i consumi energetici e, principalmente in Europa (gli Stati Uniti e l'Unione Sovietica furono meno colpiti vista

2 T. Fanfani, *Storia Economica*, McGraw-Hill, Milano, 2010.

3 L'Egitto e la Siria godevano del sostegno della quasi totalità dei paesi arabi e anti-americani, quali: Algeria, Arabia Saudita, Giordania, Iraq, Marocco e Tunisia.

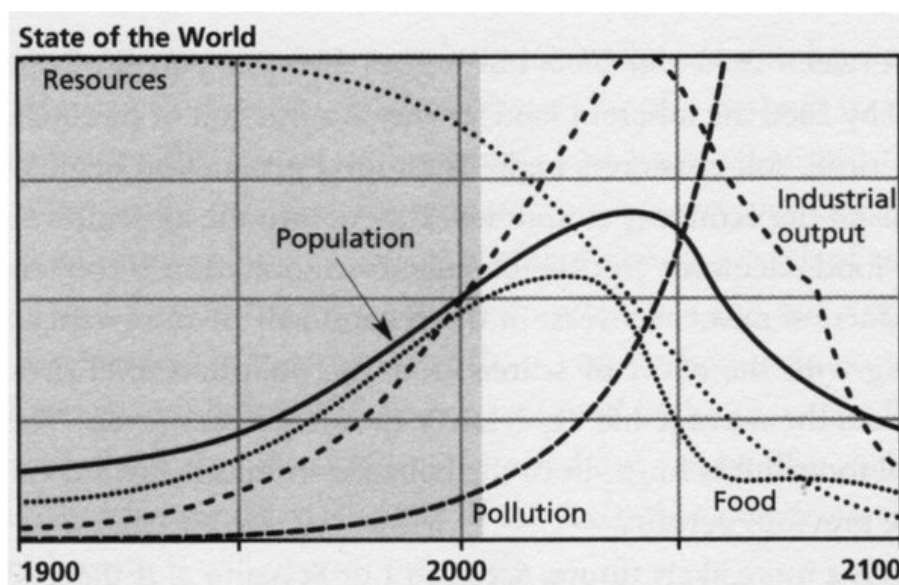
la loro disponibilità di giacimenti), si mossero i primi passi verso la ricerca di fonti energetiche alternative al petrolio. Si registrò così un crescente interesse per la produzione di energia nucleare e l'estrazione di gas naturale, ma anche per i sistemi di sfruttamento dell'energia "verde", derivante da fonti energetiche rinnovabili. Queste crisi energetiche, infatti, causarono la crisi del modello di sviluppo della civiltà industriale e solleccitarono riflessioni e dibattiti sui principi fondanti il modello, basato sull'erronea convinzione che lo sviluppo industriale e la crescita demografica potessero essere illimitati.

Già nel 1972, un gruppo di studiosi del Massachusetts Institute of Technology, aveva pubblicato il "Rapporto sui limiti dello sviluppo"⁴, l'esito di uno studio basato sull'elaborazione di una simulazione computerizzata che, ponendo come parametro di base una ipotetica crescita illimitata ed esponenziale nel tempo della popolazione mondiale, e mantenendo costante il modello di sviluppo, quindi incrementando la produzione alimentare, l'industrializzazione e l'inquinamento, computava l'interazione tra questi fattori giungendo all'evidenza che, entro un dato lasso di tempo (prossimo ai cento anni), si sarebbe giunti all'esaurimento delle risorse naturali (fig. 2.4). Nel rapporto si giungeva, infine, a considerare che, nonostante tutto, variando l'andamento esponenziale dello sviluppo, fosse possibile giungere a una condizione di equilibrio ecologico ed economico sostenibile per il futuro.

Il concetto di *sviluppo sostenibile*, è stato impiegato per la prima volta nel 1987 nel Rapporto Brundtland, commissionato dal Presidente della

4 D. H. Meadows, D. L. Meadows, J. Randers, W. W. Behrens III, *The Limits to Growth*, Universe Books, New York, 1972.

Fig. 2.4
Grafico elaborato per
The Limits to Growth,
del 1972.



Commissione mondiale sull'ambiente e lo sviluppo (da cui prese il nome), conosciuto comunemente anche con il nome di "Our Common Future". In questo rapporto lo sviluppo sostenibile viene definito come: «uno sviluppo che soddisfi i bisogni del presente senza compromettere la possibilità delle generazioni future di soddisfare i propri⁵».

Per la prima volta un documento ufficiale riconosce l'influenza esercitata dal modello di sviluppo economico basato su una previsione di crescita illimitata, sull'equilibrio dell'ecosistema terrestre, rimarcando l'importanza e l'urgenza di intervenire attraverso contromisure in grado di invertire la tendenza autodistruttiva.

La consapevolezza della responsabilità delle azioni odierne sulla vita futura del pianeta, porta alla nascita del concetto di difesa dei diritti delle generazioni future. Come rilevato da Settis: «Le generazioni future hanno, possono avere dei diritti? Non è una domanda teorica: perché parlare dei loro diritti nel futuro equivale a parlare dei nostri

5 United Nations General Assembly, *Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future*. Transmitted to the General Assembly as an Annex to document A/42/427 – Development and International Co-operation: Environment, 1987. Disponibile presso: <http://www.un-documents.net/wced-ocf.htm> (ultimo accesso: Febbraio 2017).

doveri, oggi. Equivale a orientare i nostri comportamenti oggi su quelle che potrebbero essere le conseguenze di domani⁶».

Il concetto di sviluppo sostenibile, viene accolto e man mano integrato e approfondito in altre pubblicazioni. Nel 1994, l'ICLEI (International Council for Local Environmental Initiatives) lo ha definito come lo: «Sviluppo che offre servizi ambientali, sociali ed economici di base a tutti i membri di una comunità, senza minacciare l'operabilità dei sistemi naturali, edificato e sociale da cui dipende la fornitura di tali servizi».

Nel 2001, l'UNESCO ne ha dato una definizione più ampia, includendo nel concetto l'importanza della diversità culturale: «[...] la diversità culturale è una delle radici dello sviluppo inteso non solo come crescita economica, ma anche come un mezzo per condurre una esistenza più soddisfacente sul piano intellettuale, emozionale, morale e spirituale⁷». La nozione di sviluppo sostenibile, quindi, nata dapprima in ambito ambientalista, si è estesa progressivamente alla sfera economica e sociale, partecipando alla definizione di sviluppo in quanto creazione di benessere e progresso.

In definitiva, il termine *sostenibilità*, trasferito letteralmente dall'inglese *sustainability* ha origine dal termine *sustainable* (sostenibile), nella nuova e specifica accezione di «in grado di conservarsi in equilibrio nel tempo», detto di un sistema, o «compatibile con l'equilibrio di un sistema o concorrente a tale equilibrio», detto di azioni o processi⁸. Come sostiene Andrea Segrè, di più intuitiva comprensione è il termine

6 S. Settis, *Azione popolare: Cittadini per il bene comune*, Torino, Einaudi, 2012, p.29.

7 Art 3, *Dichiarazione Universale sulla Diversità Culturale*, UNESCO, 2001.

8 N. J. Todd, J. Todd, *Progettare secondo natura*, Eleuthera, Milano, 1984.

utilizzato in lingua francese, *durabilité*, ossia durare, mantenersi nel tempo, di generazione in generazione, essere capaci di adottare una visione-azione di lungo periodo che tenga conto dei diritti di chi verrà dopo di noi e delle conseguenze future delle azioni odierne. Perché il mondo deve «mantenere la sua musica - la vita - allungando le note e la loro risonanza come si fa con il pedale del pianoforte (in inglese *sustain*)⁹».

2.2 La sostenibilità in architettura

I principi dello sviluppo sostenibile, così come si sono delineati nel tempo, non sono stati automaticamente trasposti in ambito architettonico. La nascita della cosiddetta *architettura sostenibile* o *bioarchitettura* potrebbe, in realtà, essere considerata figlia di due sequenze parallele di eventi. Da una parte le questioni energetiche e ambientali di cui si è parlato, dall'altra la scoperta, sempre a partire dagli anni Sessanta del secolo scorso, dei rischi per la salute umana dovuti oltre che alle prevedibili conseguenze dell'inquinamento, anche ai meno evidenti malesseri che le abitazioni prodotte dalle consuetudini dell'edilizia moderna hanno prodotto. Per condizione di “buona salute”, infatti, secondo una definizione del 1961 dell'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) si intende lo “Stato di completo benessere fisico, mentale e sociale”. Una visione, dunque, più ampia rispetto alla sola assenza di patologie fisiche, che comprende lo stato di benessere dell'individuo nella sfera psichica e

9 A. Segrè, *Vivere spreco zero. Una rivoluzione a portata di tutti*, Marsilio Editori, Venezia, 2013.

sociale. Questo concetto ampliato di benessere, risulta fortemente influenzato dall'ambiente costruito. Considerando la quantità di ore che si trascorre quotidianamente nella propria abitazione o sul luogo di lavoro, il benessere fisico, mentale e sociale, deve essere ritenuto come uno degli obiettivi fondamentali della progettazione.

Negli stessi anni, il medico tedesco Hubert Palm, durante la sua pratica lavorativa, nota che un numero crescente dei suoi pazienti accusa i medesimi sintomi: mal di testa, insonnia e allergie. Per venire a capo della misteriosa "epidemia", il medico monitora le diete dei propri pazienti, arrivando a stabilire infine che la causa dei malesseri fosse del tutto estranea alle abitudini alimentari ma, piuttosto, legata all'ambiente in cui essi trascorrevano la maggior parte delle proprie giornate: la casa e il luogo di lavoro.

Nel 1968, Palm, pubblica l'esito dei propri studi e le proprie scoperte nel testo intitolato "*Das gesunde Haus*"¹⁰, "La casa sana". Nella pubblicazione viene affermato che, quando la casa, chiamata "terza pelle", è malata, anche i suoi abitanti si ammalano. Ed è in questo studio che, per la prima volta, viene impiegato il termine *Baubiologie*¹¹, da cui deriverà il termine *Bioarchitettura*.

Già nel 1954, l'architetto austriaco Richard Neutra nel suo libro "*Survival through design*", ammoniva: «Nel progettare il nostro ambiente fisico, è diventato urgente sollevare il problema fondamentale della sopravvivenza nel senso più ampio del termine. Qualunque

10 H. Palm, *Das gesunde Haus: das kranke Haus und seine Heilung; unser nächster Umweltschutz; die biologische Bauordnungslehre in der Architekturaperennis; die Zivilisationskrankheit der Architektur; ein Rezeptbuch zum Selberhandeln*, Dettingen, Ordo-Verlag, 1968.

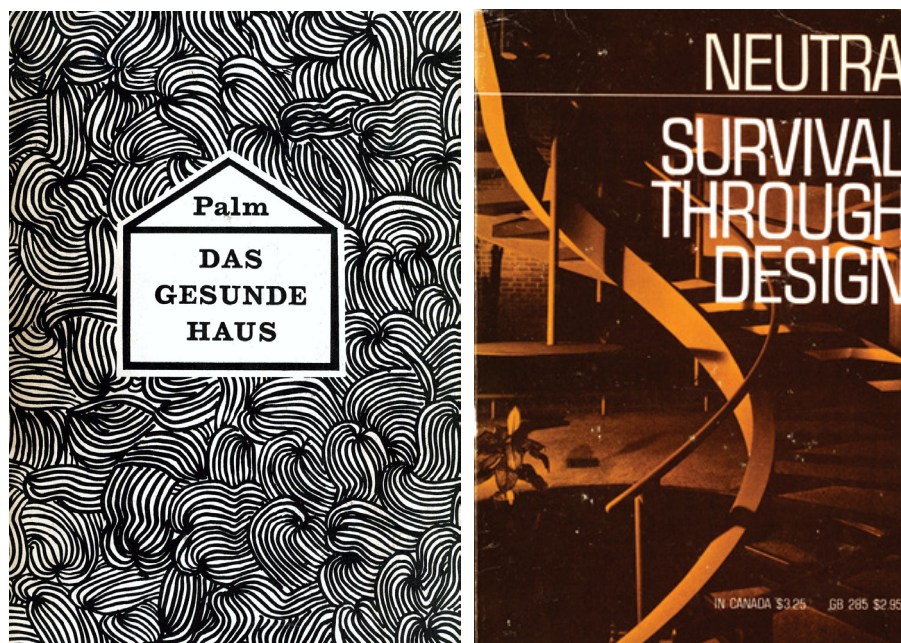
11 Considerato il fondamentale punto di partenza per i movimenti nati nei decenni successivi in Germania, come: l'Istituto per la bioedilizia, la Confederazione di Bioedilizia e Building (BAB) e la Confederazione di Architettura e Ambiente (BAU).

Fig. 2.5

Das Gesunde Haus,
(1968).

Fig. 2.6

Survival through design
(1956).



progetto che danneggi le doti umane naturali o imponga loro degli sforzi eccessivi dovrebbe essere scartato o modificato secondo le esigenze delle nostre funzioni nervose e, più gradualmente, di tutta la nostra fisiologia¹²».

Qualcuno potrebbe mostrarsi perplesso di fronte all'affermazione che le residenze costruite dal dopoguerra in poi, dotate di sistemi impiantistici, in grado di fornire in qualsiasi momento illuminazione, acqua potabile, aria calda, e ben presto anche aria fresca, possano essere considerate insalubri, e potrebbe obiettare che, a ben vedere, le abitazioni che costruivano le città prima e immediatamente dopo l'industrializzazione non erano certamente più confortevoli. Queste, infatti, erano spesso scenario di epidemie legate alla scarsa igiene, imputabile principalmente alla mancanza o inefficienza dei sistemi di drenaggio urbano. Un problema tecnico-impiantistico, quindi, risolto così come molti altri, grazie al progresso tecnologico del mondo moderno. Grandi progressi hanno riguardato, in questo periodo, anche la gestione degli

12
1956.

R. Neutra, *Progettare per sopravvivere*, Edizioni di Comunità, Milano,

spazi interni delle abitazioni, grazie alle ricerche progettuali relative alla disposizione planimetrica e funzionale degli ambienti domestici. A questo punto, per fare chiarezza, diventa di fondamentale importanza analizzare nel complesso il processo di cambiamento che ha coinvolto l'architettura del XX secolo.

L'invenzione, e la diffusione massiccia durante la ricostruzione post bellica, del sistema intelaiato in calcestruzzo armato, ha indotto i progettisti ad abbandonare le tecniche costruttive e le logiche di progettazione legate al territorio e ai materiali locali, a favore della nuova tecnologia e delle sue nuove, più semplici e veloci, logiche di progettazione e costruzione. Uno scheletro portante assicura la stabilità degli edifici, costituito di travi e pilastri che formano una griglia spaziale regolare e ripetibile, consentendo libertà di gestione delle partizioni interne e delle pareti di tamponamento esterne. Queste ultime, si presentano con spessori sempre più ridotti, non dovendo più assolvere ad una funzione strutturale, e di conseguenza, non riuscendo più a svolgere una funzione di adeguata protezione dalle condizioni climatiche esterne. In questo stesso periodo, infatti, ha inizio anche la diffusione dell'installazione dei sistemi impiantistici.

La disponibilità di sistemi di riscaldamento e raffrescamento attivo, porta velocemente i progettisti a trascurare l'importanza dell'involucro edilizio come regolatore termico. Allo stesso modo, viene tralasciata l'importanza delle aperture in facciata come strumento di regolazione dell'illuminazione e ventilazione naturale e come impareggiabile mezzo di comunicazione con la natura esterna.

Illuminante a tal proposito è la descrizione che Bruno Munari fa nel 1967 della sua stanza da visiting professor al Carpenter Center for the Visual Arts of Cambridge, in Massachusetts (USA), dove questa tendenza era ancor più marcata che in Europa:

Micaela Colella

Architettura residenziale e sostenibilità

La casa prefabbricata mediterranea nell'era dell'Industria 4.0

Cap 2. Nozioni di sostenibilità: nascita ed evoluzione

«Da noi, per esempio, se uno ha troppo caldo in camera sua cosa fa? apre la finestra. Soluzione troppo elementare; qui in America le finestre non si aprono mai, la mia, quella della mia camera, è incollata dalla vernice, proprio perché non è mai stata aperta [...]. La mia camera è riscaldata con un sistema antico: il calorifero, ma quando fa troppo caldo [...] basta accendere il raffreddamento ossia l'apparecchio per l'aria condizionata, alla gradazione voluta e, senza alcun bisogno di aprire la finestra, ecco che in un attimo la stanza si rinfresca. [...] Non so se lo avete notato ma l'aria degli apparecchi di condizionamento ha un odore speciale, sa di macchina, di lubrificante, di metallo secco, è lo stesso odore del riscaldamento nelle automobili e, dopo un po' questo odore si fa insopportabile. Sopra la porta d'ingresso della camera c'è, però un altro apparecchio ed è un ventilatore elettrico che serve proprio per cambiare l'aria della stanza: basta premere un pulsante situato nelle vicinanze ed ecco che l'aria viziata della stanza se ne va. Il rumore del condizionatore è quasi coperto dal rumore del grosso ventilatore

Fig. 2.7

Eloquente campagna di sensibilizzazione sui cambiamenti climatici (repubblica.it).



Naturalmente si potrebbero elencare molti altri aspetti trascurati o abbandonati dalla nuova edilizia, soprattutto quelli legati alle condizioni locali, che nei secoli si erano formalizzati in specifici caratteri regionali, e che tale stravolgimento culturale relegherà alla memoria degli edifici storici. Il sistema intelaiato in calcestruzzo verrà impiegato indistintamente in tutta l'edilizia civile, per le abitazioni come per gli uffici, gli ospedali e le palestre, creando nel tempo, un'unica periferia indistinguibile per ogni città del mondo, con importanti conseguenze sull'identità culturale dei luoghi.

Descrivendo la città di Tokyo, e il suo viaggio alla scoperta del Giappone, il filosofo Alain de Botton, nel suo libro "Architettura e felicità", riesce a riassumere perfettamente la questione:

«Sulla città era calato uno spirito pratico, con i suoi venti milioni di persone che si recavano al lavoro. Le strade dei quartieri degli affari erano intasate di automobili e di pendolari in abito scuro: avrei potuto essere in qualunque città. Con i loro cartelloni pubblicitari spenti, gli edifici sembravano caparbiamente ordinari. Grappoli di grattacieli anonimi dominavano il panorama e le loro forme pedestri si facevano beffe delle dodici ore di nubi e neve che avevo attraversato in volo per arrivare fino a lì. Per l'interesse architettonico, avrei potuto essere tranquillamente anche a Francoforte o a Detroit. Persino nelle zone più residenziali l'architettura era quasi completamente priva di radici etniche o di sapore locale. Ovunque c'erano enormi quartieri nuovi dove ogni casa era costruita con materiali generici e aveva forme che non avrebbero destato sorpresa in nessuna parte del mondo industrializzato. Sembrava esserci davvero molto poco di giapponese nell'architettura giapponese. Ai primi modernisti questo non sarebbe spiaciuto, perché non aspettavano altro che un'epoca razionale in cui gli stili locali scomparissero del tutto dalla loro professione così com'erano spariti dal

design industriale e commerciale. Dopo tutto non esistevano ombrelli o ponti moderni dall'aspetto locale. Adolf Loos aveva sostenuto che pretendere un genere d'architettura specificamente austriaco era tanto assurdo quanto pretendere una bicicletta o un telefono tipicamente austriaci. Se la verità era universale, perché esigere una varietà locale di architettura? Tokyo sembrava riassumere il sogno modernista di un luogo in cui non si potesse dedurre dagli edifici in che paese si era capitati¹⁴».

In definitiva, nel XX secolo, il repentino abbandono dei paradigmi costruttivi delle architetture vernacolari, ha portato alla costruzione di abitazioni stereotipate ed energivore, che hanno causato, oltre ad un consumo significativo delle fonti energetiche non rinnovabili e livelli allarmanti di inquinamento ambientale, anche la perdita del rapporto sinergico tra ambiente naturale e ambiente costruito, con la conseguente perdita dei caratteri architettonici locali e del legame dell'uomo con l'ambiente naturale e il tessuto sociale.

Quanto finora sostenuto vede una responsabilità attiva dei progettisti, poiché chiamati a trasformare irreversibilmente le risorse del pianeta con i loro progetti. In questo senso risulta importante il contributo fornito nel 1971 da Victor Papanek con “*Design for the Real World: Human Ecology and Social Change*¹⁵”, un libro considerato fondamentale per aver introdotto considerazioni ambientaliste nel mondo della progettazione. Egli fornisce una critica approfondita rispetto al mondo dei progettisti, sottolineando il loro ruolo fondamentale nello sviluppo di

14 A. de Botton, *Architettura e felicità*, Ugo Guanda Editore, Parma, 2006.

15 V. Papanek, *Design for the Real World: Human Ecology and Social Change*, Pantheon Books, New York, NY, USA, 1971.

pratiche consumistiche, contribuendo al degrado sociale ed economico. Per queste ragioni, le soluzioni da attuare in architettura per la tutela dell'ambiente e quelle da attuare per il benessere dell'uomo convergono verso lo stesso modello, chiamato: architettura sostenibile.

Ciò che l'architettura sostenibile oggi si propone di fare, in linea con i principi dello sviluppo sostenibile, è di porre rimedio a questo strappo storico, e riuscire ad affermare un nuovo modo di fare architettura, che non si rifà a questioni stilistiche e formali, ma che riprende l'approccio olistico che mai si sarebbe dovuto abbandonare. Progettare secondo i principi della sostenibilità, non è una moda, e non dovrebbe essere inteso come un metodo progettuale da scegliere piuttosto che un altro. Progettare un ambiente costruito sostenibile è una questione etica fondamentale a cui l'architetto del XXI secolo non può sottrarsi.

A questo punto, volendo sistematizzare e dare concretezza agli obiettivi dell'architettura sostenibile, può essere utile fare riferimento ad un saggio bibliografico dedicato al tema della costruzione sostenibile, edito dal gruppo della Prof.ssa Valeria Tatano (IUAV). La pubblicazione ha il merito di sistematizzare per temi le pubblicazioni più importanti edite sul tema della costruzione sostenibile, soprattutto dal punto di vista della tecnologia dell'architettura. Nel testo sono dunque individuate le caratteristiche fondamentali che devono possedere i prodotti, le costruzioni e le tecnologie sostenibili. In particolare, un prodotto (materiale o immateriale) è sostenibile se: «si prefigge di raggiungere le prestazioni caratteristiche impiegando sempre minori quantità di materia (maggiore efficienza); si basa su materiali rinnovabili e su processi produttivi non inquinanti; impiega lavorazioni e materiali non tossici; nel caso di un manufatto, è costituito da materiali omogenei, facilmente separabili in fase di manutenzione, trasformazione, smontaggio,

demolizione, smaltimento e riciclaggio¹⁶». Per estensione, costruire sostenibile significa: «curare le scelte progettuali in relazione alla forma e all'orientazione, al rapporto coperto/scoperto, al soleggiamento, all'irraggiamento, la produzione di ombre, la geometria delle pareti esterne e delle coperture; porre l'attenzione alle scelte relative agli impianti; curare le scelte relative allo “stile” costruttivo, all'uso dei materiali e componenti in ordine alla costruzione, alla manutenzione, alle emissioni nocive, alla flessibilità nel tempo, alla dismissione finale; porre attenzione alla progettazione del verde, del paesaggio, del quartiere dal momento che l'edificio da solo non è in grado di risolvere tutti i problemi»¹⁷.

Allargando lo sguardo per un momento rispetto alla sola architettura, una notevole opera di revisione bibliografica e di schematizzazione concettuale sul tema del “Design for Sustainability” (DfS) è stata fornita recentemente (2016) da Ceschin e Gaziulusoy e pubblicata sulla prestigiosa rivista *Design Studies*¹⁸. Essi forniscono un quadro esaustivo delle caratteristiche dei vari approcci del DfS rispetto ai diversi livelli di innovazione, identificando obiettivi, limitazioni e potenzialità. Rimandando alla pubblicazione citata per un quadro più esaustivo, si ritiene comunque utile riassumere qui i più importanti approcci:

- *Green design*, il cui obiettivo è il mitigamento dell'impatto ambientale, attraverso la ridefinizione delle qualità individuali dei singoli prodotti;

16 V. Manfron, G. Mucelli, P. Paganuzzi, N. Sinipoli, V. Tatano, *Costruire il progetto sostenibile: saggio bibliografico*, IUAV, Venezia, 2006, p. 2.

17 V. Manfron, G. Mucelli, P. Paganuzzi, N. Sinipoli, V. Tatano, *Costruire il progetto sostenibile: saggio bibliografico*, op. cit., p. 2.

18 F. Ceschin, I. Gaziulusoy, Evolution of design for sustainability: From product design to design for system innovations and transitions, *Design Studies* 47, 2016, pp.118-163.

- *Ecodesign*, il cui obiettivo è il mitigamento dell'impatto ambientale, attraverso un ripensamento dell'intero ciclo di vita dei prodotti, dall'estrazione delle materie prime fino al loro smaltimento;
- *Emotionally durable design* (EDD), il cui obiettivo è rinforzare ed estendere nel tempo l'attaccamento emotivo tra l'utente e il prodotto;
- *Design for sustainable behaviour* (DfSB), il cui obiettivo è di fare in modo che la gente adotti un desiderabile comportamento sostenibile ed abbandoni invece comportamenti indesiderati;
- *Biomimicry design* (BM), il cui obiettivo è l'imitazione della natura, utilizzato come un modello cui ispirarsi per il progetto di forme, prodotti e sistemi;
- *Systemic design*, il cui obiettivo è la progettazione di sistemi produttivi locali in cui i rifiuti di un processo produttivo forniscono l'input per altri processi.

Fra i vari approcci individuati, sicuramente i primi due sono i più attinenti l'architettura. Ciò è testimoniato dalla presenza in letteratura dei termini "*green architecture*" e "*eco-architecture*". Entrambi gli approcci prevedono un abbattimento dell'impatto ambientale attraverso l'adozione di soluzioni progettuali e tecniche che riguardano non solo gli aspetti più propriamente progettuali, ma che si riflettono sull'intera filiera produttiva, fino ad arrivare agli aspetti legislativi.

Concludendo, si può notare dunque che la progettazione sostenibile contemporanea, comporta un notevole sforzo in fase di progettazione e una riflessione continua su tutti i temi connessi al progetto, con l'obiettivo di giungere alla elaborazione di un progetto consapevole. Nel campo dell'architettura, per supportare e guidare queste scelte, oltre al costante progresso scientifico, sono nati una serie di protocolli di certificazione ambientale, come vedremo nel prossimo sottocapitolo.

2.3 Il tema del buon costruire oggi: i protocolli di certificazione ambientale

Prima dell'industrializzazione, la produzione di prodotti è sempre stata caratterizzata dall'uso delle risorse disponibili in misura adeguata al soddisfacimento di un fabbisogno. Con l'avvento dell'industrializzazione, il fine della produzione è rapidamente cambiato, dal raggiungimento di un più elevato standard di vita per fasce sempre più ampie di popolazione, all'incremento della produttività stessa, al solo fine di incrementarne i profitti, dando luogo a uno sfruttamento delle risorse naturali così massiccio e aggressivo da giungere in poco tempo (rispetto alla vita del pianeta Terra) al quasi totale esaurimento di queste risorse, e mettendo in pericolo la possibilità delle generazioni future di poter godere delle stesse, se a queste non viene dato il tempo di rigenerarsi. Tuttavia, la battuta d'arresto del boom economico post-bellico, l'avvento delle prime crisi energetiche e la crescente consapevolezza del ruolo di responsabilità assunto dalla produzione industriale nelle problematiche ambientali (di cui si è parlato al punto 2.1), hanno risvegliato la comune sensibilità ambientale.

Sono nati, quindi, degli strumenti di valutazione del grado di sostenibilità di processi, prodotti e servizi: le certificazioni ambientali. Queste certificazioni si presentano come uno strumento utile a indirizzare e promuovere un nuovo modello di sviluppo, accertando che i prodotti derivino da un processo di produzione sostenibile, e che altrettanto sostenibile sia l'intera vita dei prodotti, fino al loro smaltimento. Le certificazioni ambientali non sono obbligatorie, vengono richieste per iniziativa del produttore all'ente che ha elaborato il protocollo stesso di certificazione. Oltre a una distinzione dovuta al diverso tipo di prodotto o servizio cui si riferiscono, vi sono differenze sostanziali

dovute al metodo di valutazione, che può essere a punteggio o a soglia minima, ed esaminato dall'ente oppure dal produttore stesso, in una sorta di autocertificazione.

Questo fenomeno è oggi di notevole entità per alcuni settori produttivi, come quello alimentare, poiché consistenti sono i vantaggi per le aziende che vi aderiscono, dal momento che, avendo ottenuto un marchio di certificazione, queste ottengono un miglioramento dell'immagine aziendale e un immediato vantaggio sulla concorrenza. Il consumatore, infatti, in presenza di un logo di certificazione, nel momento della scelta, tende a prediligere un prodotto che ritiene di migliore qualità, anche se comporta un prezzo leggermente superiore, e in questo modo l'investimento aziendale viene rapidamente ammortizzato.

Non è possibile, tuttavia, fare un parallelo con il settore edilizio, dove il passaggio al nuovo modello di sviluppo sostenibile sta procedendo in maniera più lenta, nonostante l'importanza e l'urgenza di intervenire nel settore che più di ogni altro influisce sul consumo globale di risorse. Le ragioni sono molteplici e sono da ricercare nelle complesse prassi del processo di costruzione. Il principale fattore discriminante del settore, in mancanza di una legislazione che si pronunci imponendo regole precise, è probabilmente l'assenza di un unico soggetto con potere decisionale, sostituito da una pluralità di soggetti coinvolti: i committenti, i progettisti, le imprese costruttrici e le aziende produttrici dei materiali da costruzione. È evidente come un'architettura sostenibile in ogni suo aspetto e lungo tutto il suo percorso di vita, non possa nascere che dalla condivisione di intenti di tutti questi soggetti.

Certamente il momento decisionale più importante è da ricondurre alle prime fasi della progettazione, che vedono le scelte degli obiettivi da raggiungere a carico del committente e del progettista. Da una parte il committente deve essere avveduto, e comprendere l'importanza

della qualità dell'edificio da costruire, o riqualificare, non solo per il proprio benessere psico-fisico e per le proprie finanze future, ma anche per il rispetto dell'ambiente fisico, degli ecosistemi e delle generazioni future. D'altro canto, i progettisti devono avere le competenze per gestire un processo ben più complesso della celebrazione del proprio estro creativo, ed essere in grado di fare sintesi tra funzionalità, statica, estetica, salubrità, integrazione ambientale, sociale e culturale. Per perseguire questo intento i progettisti devono scegliere prodotti e processi adeguati, e queste scelte a lungo andare non potranno che condizionare il mercato edilizio e premiare le aziende e le imprese che si saranno adeguate, a scapito di quelle che non lo avranno fatto.

Quindi, di fatto, le ultime due categorie decisionali (le imprese costruttrici e le aziende produttrici dei materiali da costruzione) a cui oggi spesso si attribuiscono la maggior parte delle colpe, non avrebbero alcun potere decisionale se il mercato virasse in modo compatto in una nuova direzione. Come asseriva Buckminster Fuller nel 1989: «Non cambierai mai le cose combattendo la realtà esistente. Per cambiare qualcosa, costruisci un modello nuovo che renda obsoleto il modello esistente¹⁹».

Nella legislazione italiana non vi sono leggi sulla sostenibilità ambientale degli edifici. La giurisprudenza negli ultimi anni si è occupata molto del tema, concentrandosi però soltanto su uno dei suoi aspetti, seppur di grande importanza, il rendimento energetico. Probabilmente questo ha contribuito alla diffusa ed erronea convinzione che la sostenibilità e l'efficienza energetica siano sinonimi, riconducibili al medesimo concetto. Naturalmente la questione è molto più complessa ed articolata

19 Cit. in A. De Toni, R. Siagri, C. Battistella, *Anticipare il futuro: Corporate Foresight*, Egea Editore, Milano, 2015, p. 85.

e la soluzione non può essere limitata all'uso di impianti efficienti, seppur alimentati da fonti energetiche rinnovabili.

Il compito di regolare, indirizzare e promuovere la sostenibilità degli edifici, nella sua accezione più ampia e completa, è stato demandato alla stesura di norme tecniche, la cui applicazione è volontaria²⁰. Nel 2008 sono state pubblicate dall'ISO²¹, le norme tecniche internazionali per la sostenibilità delle costruzioni: ISO 15392:2008 "Sustainability in building construction - General principles". Queste, affrontano le tematiche dello sviluppo sostenibile afferenti al mondo delle costruzioni, stabilendo ed enunciando le caratteristiche necessarie per le costruzioni, i criteri tecnici applicabili alle lavorazioni e i requisiti dei materiali costruttivi. L'ISO, nel processo di normazione, pur svolgendo un tipico ruolo di schematizzazione e sintesi necessario a racchiudere una immensa quantità di nozioni in poche e chiare regole, è comunque stata in grado di integrare nelle norme variabili che tengano conto delle condizioni locali, ponendo l'accento sull'importanza di definire strategie locali, adeguate al contesto sociale.

Per il territorio italiano, nel Gennaio 2015, sono state pubblicate le Prassi di riferimento UNI/PdR 13:2015, "Sostenibilità ambientale nelle costruzioni - Strumenti operativi per la valutazione della sostenibilità", aggiornate e integrate nel Giugno 2016. La prassi, rivolta agli edifici residenziali, si presenta strutturata in due sezioni, una prima dedicata ai principi generali, metodologici e procedurali per la valutazione della

20 A differenza delle leggi, le norme tecniche non sono delle imposizioni giuridiche e la loro applicazione è volontaria, a meno che non vengano richiamate nei provvedimenti legislativi.

21 ISO: Organizzazione internazionale per la normazione (in inglese International Organization for Standardization). È la più importante organizzazione a livello mondiale per la definizione di norme tecniche.

sostenibilità degli edifici, e una seconda incentrata sull'illustrazione dei metodi di calcolo dei punteggi la cui somma darà la misura del grado di sostenibilità ambientale dell'edificio residenziale preso in esame. L'UNI/PdR 13:2015 è, infatti, stata elaborata a partire dal Protocollo ITACA²², uno strumento di valutazione del livello di sostenibilità energetica e ambientale degli edifici, il cui esito si riassume in un punteggio. Il Protocollo dell'istituto **ITACA**, è stato elaborato in risposta alla necessità delle Regioni di dotarsi di uno strumento atto a supportare le politiche territoriali di promozione della sostenibilità ambientale nel settore delle costruzioni. Approvato nel Gennaio del 2004 dalla Conferenza delle Regioni e delle Province autonome, è stato in seguito adottato da diverse Regioni italiane²³, che ne hanno elaborato una propria versione locale.

Le norme tecniche rappresentano, difatti, una messa a sistema delle disposizioni già contenute nei protocolli di certificazione ambientale degli edifici elaborati negli ultimi trent'anni per iniziativa di enti di varie nazionalità.

Sempre in Italia, il protocollo di certificazione energetico ambientale messo a punto dall'**INBAR** (Istituto Nazionale di Bioarchitettura), è relativo alla certificazione di interventi di nuova realizzazione e di recupero di immobili esistenti. Esso è caratterizzato dall'attenzione alle interrelazioni tra le diverse fasi del processo edilizio, ed infatti, la procedura di certificazione è divisa in fasi, che guidano dapprima le scelte progettuali, poi la realizzazione, ed infine, la gestione,

22 ITACA: Istituto per l'innovazione e trasparenza degli appalti e la compatibilità ambientale.

23 Le regioni che hanno adottato un proprio protocollo ITACA sono: Marche, Puglia, Umbria, Piemonte, Valle d'Aosta, Friuli Venezia Giulia, Lazio e Basilicata.

attraverso un libretto di uso e manutenzione. L'Istituto Nazionale di Bioarchitettura segue l'intero processo attraverso la nomina di un certificatore tra i propri soci esperti, che ha il compito di verificare la correttezza del lavoro e delle scelte del gruppo di progetto, il quale deve essere costituito da professionisti dalle comprovate competenze in materia di progettazione sostenibile, ai quali è demandata la scelta degli obiettivi da perseguire e dei requisiti che si intende verificare. In fase di esecuzione dell'opera è richiesta l'individuazione di un gruppo di direzione dei lavori e di imprese esecutrici che possano attestare importanti esperienze pregresse in architettura sostenibile. Solo dopo aver verificato il rispetto dei requisiti seguendo tutte le fasi della realizzazione, ivi compreso il collaudo, e possibili ulteriori verifiche strumentali, il certificatore, attraverso la stesura di una relazione, può rilasciare la certificazione, il cui punteggio finale si riassume in tre livelli: argento, oro, platino.

Il **BREEAM** (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) nato nel 1990 nel Regno Unito, è stato il primo metodo elaborato per la valutazione della sostenibilità degli edifici, diffuso ad oggi in più di settanta Paesi in tutto il mondo. Il processo di valutazione BREEAM valuta l'impatto ambientale delle costruzioni con un sistema di accreditamento di punteggi, da parte di un valutatore autorizzato, secondo le categorie: gestione del cantiere e dell'involucro edilizio, energia, risorse idriche, utilizzo del sito e impatto ecologico, salute e benessere, trasporti, materiali, rifiuti, inquinamento. In base al numero di crediti assegnati, l'edificio viene certificato come: base, buono, molto buono, eccellente, eccezionale.

Il protocollo più diffuso internazionalmente è il **LEED** (Leadership in Energy and Environmental Design), elaborato negli Stati Uniti a partire dal 1993 dall'associazione US Green Building Council. Tra i 140 Paesi in cui si è diffuso vi è l'Italia, per cui è stata messa a punto una versione locale dalla GBC Italia. Questo protocollo di certificazione prevede formulazioni diverse per: nuove costruzioni, edifici esistenti, piccole abitazioni e aree urbane. La valutazione dell'edificio è effettuata da parte di un soggetto terzo, attraverso la compilazione delle sette sezioni costitutive del LEED: sostenibilità del sito, gestione delle acque, energia ed atmosfera, materiali e risorse, qualità ambientale interna, innovazione della progettazione, priorità regionale. Queste sezioni contengono dei requisiti, fondamentali per l'ottenimento della certificazione, e dei crediti, dalla cui somma deriverà il livello di certificazione ottenuto: base, argento, oro, platino.

Uno dei protocolli più recenti, la certificazione **LBC** (*Living Building Challenge*) proposta nel 2006 dall'ILFI (*International Living Future Institute*), si presenta come il metodo di valutazione più completo e restrittivo. Questo protocollo è stato ideato con lo scopo di promuovere la rigenerazione di edifici, città e comunità. Per questo è caratterizzato da una grande attenzione per gli effetti benefici che gli interventi sul costruito generano nel loro contesto sociale e viceversa, in un continuo salto di scala tra edificio, città e comunità. Il protocollo si struttura in sette aree di performance, dette "petali": sito, acqua, energia, materiali, salute, equità, bellezza. Ognuno di questi petali è a sua volta diviso in "imperativi", per un totale di venti, da possedere necessariamente per l'ottenimento della certificazione completa LBC. È possibile ottenere due gradi inferiori di certificazione, la *Petal Certification*, che richiede il conseguimento di almeno tre dei sette petali (uno dei quali deve essere

necessariamente, acqua, energia o materiali), e la *Net Zero Energy Certification*, che premia gli edifici in grado di produrre per intero il proprio fabbisogno energetico, senza alcun ricorso a combustibili fossili. In quest'ultimo caso, è chiaro però che siamo ben lontani dagli originari propositi di sostenibilità. Uno degli elementi di maggiore innovazione del metodo è costituito dalla verifica delle prestazioni, che può avvenire soltanto dopo dodici mesi dall'entrata in funzione dell'edificio, valutando così non una previsione ma valori reali. Altro elemento innovativo è rappresentato dal tentativo di valutare fattori legati alla relazione tra edificio e fruitore, introducendo parametri di valutazione quali "bellezza e ispirazione", "salute e felicità", "equità", "ispirazione ed educazione". Il tentativo di quantificare valori soggettivi e, proprio per questo difficilmente valutabili, si può ricondurre alla volontà di riportare i bisogni dell'uomo e della comunità al centro dei processi e della progettazione. Quest'ultimo protocollo risulta talmente stringente nella valutazione che, ad oggi, si registrano soltanto dodici edifici con una certificazione completa LBC, undici edifici con una *Petal Certification* e ventidue con una *Net Zero Energy Certification*²⁴.

Oltre ai sopracitati protocolli di certificazione, che risultano essere i casi più interessanti per completezza di strutturazione ed entità di diffusione, vi sono altri standard nazionali, tra cui il notevole standard francese, HQE (*Haute Qualité Environnementale*).

È di facile deduzione come alla base dell'indolenza, con cui il concetto di sostenibilità sta entrando a far parte dei temi affrontati nella pratica dell'architettura odierna, non vi sia un problema legato

24 International Living Future Institute, *Living Building Challenge, certified case studies*. Disponibile presso: <https://living-future.org/lbc/case-studies/> (ultimo accesso: Marzo 2017).

alla mancanza di strumenti che guidino la progettazione sostenibile, perché, in mancanza di un'adeguata diffusione di corsi universitari che formino i progettisti a una visione olistica della progettazione, i numerosi protocolli di certificazione ambientale rappresentano un valido punto di riferimento in tal senso. La loro strutturazione sta diventando col tempo sempre più dettagliata, e inclusiva di variabili legate al luogo e al valore sociale della tradizione e della cultura locale. Alla base del problema, vi è piuttosto la mancanza di interesse da parte della prevalenza dei soggetti coinvolti, che sentono questi temi lontani dalle proprie esigenze cogenti e quindi rimandabili e relegabili all'immaginario di un futuro ideale. Troppo alti sono considerati gli sforzi, monetari e intellettuali, necessari per il passaggio al nuovo modello, e troppo fiavole è il legame percepito tra l'applicazione dei principi della sostenibilità e la realizzazione di una buona architettura, e al contempo tra la realizzazione di una buona architettura e il miglioramento delle condizioni di benessere attuale e futuro.

Gli sforzi andrebbero concentrati, piuttosto che nella definizione di nuovi o più stringenti protocolli, in una maggiore diffusione dei principi in essi racchiusi. Il cambiamento sarà lontano finché gli edifici certificati come ambientalmente responsabili saranno in numero così esiguo da costituire solamente delle lodevoli eccezioni, rispetto alla mole della restante attività edificatoria.

Capitolo 3

Sulle tracce della sostenibilità nella storia dell'architettura Mediterranea

Rispetto al quadro finora tracciato è importante fare un opportuno passo indietro. Infatti la tesi intende riflettere sui possibili processi di innovazione produttiva che possono riguardare la casa mediterranea nel prossimo futuro, alla luce delle innovazioni teoriche, progettuali e tecnologiche introdotte dalle recenti riflessioni sull'architettura sostenibile. A nostro modo di vedere, da un punto di vista tecnologico-costruttivo, l'innovazione più interessante riguardante il tema dell'abitazione è l'introduzione della prefabbricazione leggera, una prefabbricazione intelligente, resa possibile dalla reintroduzione di materiali naturali come il legno, resi ingegnerizzati e standardizzati attraverso nuove soluzioni tecnologiche (pensiamo ai pannelli strutturali multistrato), ma al contempo versatili e personalizzabili grazie all'utilizzo di sempre più performanti macchine a controllo numerico. A differenza di altri Paesi europei (pensiamo ad esempio ai Paesi nordici) dove la produzione di case prefabbricate è ormai uno standard, in Italia (specialmente al Sud), questo processo è ancora in divenire, ma proprio per questo pieno di potenzialità. La possibilità che in un prossimo futuro la richiesta di abitazioni di nuova concezione sia destinata ad aumentare è giustificata da almeno due motivi: 1) il patrimonio edilizio

italiano, specialmente al Sud, è in gran parte obsoleto o addirittura a rischio, fenomeno acuito dalla crisi degli ultimi anni che, a partire dal 2008, ha portato ad un crollo del mercato immobiliare e del settore delle costruzioni ed una conseguente minore manutenzione e maggior degrado del patrimonio esistente; 2) la combinazione tra obsolescenza del patrimonio esistente e il crescente rischio sismico e idrogeologico in Italia¹, rende di fondamentale importanza la messa in sicurezza delle abitazioni esistenti, ove possibile, o l'edificazione di nuove abitazioni rispondenti a criteri di sicurezza e comfort notevolmente superiori.

Questo scenario porterà probabilmente non solo all'edificazione di nuove parti di città, ma anche all'inserimento di nuove abitazioni all'interno dei centri storici o in contesti dall'elevato pregio architettonico, e in zone di notevole pregio ambientale.

Essendo un processo ancora non scritto, ciò consente un ripensamento dei processi progettuali inerenti una "nuova" architettura mediterranea, che deve però auspicabilmente basarsi e confrontarsi con l'importante eredità storica del patrimonio esistente. In questo senso la lettura fornita in questo capitolo, benché non esaustiva, è utile a richiamare e sistematizzare il principale filo conduttore che tiene insieme gli argomenti trattati dalla tesi, in cui si ritiene fondamentale tenere fortemente insieme gli aspetti fondanti dell'architettura mediterranea, e il suo rilancio possibile attraverso i nuovi processi produttivi, che

1 Secondo il rapporto Ance-Cresme del 2012, le aree a elevato rischio sismico in Italia sono circa il 44% della superficie nazionale (131 mila kmq) e interessano il 36% dei comuni (2.893). Nelle aree ad elevato rischio sismico vivono 21,8 milioni di persone (36% della popolazione), per un totale di 8,6 milioni di famiglie e si trovano circa 5,5 milioni di edifici tra residenziali e non residenziali. Inoltre, la popolazione residente nelle aree ad elevato rischio idrogeologico è pari a 5,8 milioni di persone (9,6% della popolazione), per un totale di 2,4 milioni di famiglie. Fonte: Ance, Primo Rapporto Ance-Cresme: Lo Stato Del Territorio Italiano 2012, 2012. Disponibile presso: <http://www.ance.it/docs/docDownload.aspx?id=8495> (ultimo accesso: Novembre 2017).

inevitabilmente coinvolgeranno anche il settore delle costruzioni e che saranno affrontati nel corso del proseguo di questa trattazione. Data la vastità dei temi affrontati dalla tesi, è stato necessario limitare in maniera netta il campo di indagine. Perciò, in questo capitolo sono elencati i soli elementi di architettura passiva presenti nell'architettura vernacolare del mediterraneo. Sono stati pertanto esclusi dall'analisi tutti i dispositivi di architettura bioclimatica contemporanei ma non rintracciabili nell'architettura tradizionale di quest'area.

3.1 L'architettura vernacolare come archetipo dell'architettura sostenibile

Il sostantivo *vernacolare*, che etimologicamente deriva dal termine latino *vernacūlu(m)*, ossia *domestico*, viene definito dai dizionari come un termine che indica il linguaggio popolare caratteristico di una limitata area geografica. Il termine vernacolare associato all'architettura ne dà, quindi, una connotazione spiccatamente locale, dall'origine empirica e non colta.

L'architettura vernacolare è l'architettura “spontanea”, “indigena”, quella che Rudolfsky definisce “l'architettura senza architetti”², costruita da coloro i quali non hanno una formazione accademica alla costruzione, ma assecondano la cultura costruttiva locale senza operare scelte stilistiche ed estetiche. Per la sua natura, l'architettura vernacolare è intrinsecamente legata al territorio su cui sorge, poiché nasce in risposta alle peculiari condizioni del luogo: condizioni climatiche (temperature estive ed invernali, escursione termica notturna, piovosità,

2 B. Rudolfsky. *Architecture without architects*, 1964.

esposizione alle principali correnti d'aria), condizioni topografiche, caratteristiche del suolo, ecc. Oltretutto, la sua costruzione, vede l'esclusivo sfruttamento delle risorse materiche locali. Difatti, prima che la globalizzazione rendesse possibile l'esportazione in breve tempo di qualsiasi tipo di materiale da costruzione, per la costruzione di un nuovo edificio non ci si poneva il problema di quale materiale e tecnologia impiegare, era scontato che i materiali da impiegare dovessero essere quelli maggiormente disponibili nella regione e la tecnica costruttiva quella più idonea allo sfruttamento delle caratteristiche del materiale impiegato. La tecnica impiegata corrispondeva allo stato della tecnica raggiunto nel corso dell'evoluzione costruttiva locale, i cui principi erano desunti dall'esperienza diretta e tramandati di generazione in generazione. Costituivano eccezione soltanto gli edifici specialistici e di rappresentanza delle istituzioni, per cui l'uso di materiali provenienti da lontano era funzionale all'ostentazione della ricchezza, quindi del potere, e non alla risoluzione di reali esigenze costruttive. Per questo, nella ricerca delle tracce dei principi di sostenibilità nella storia, è necessario focalizzare l'analisi soprattutto su un'architettura generalmente tralasciata nei corsi di storia dell'architettura, l'architettura residenziale minore, perché questa è l'unica che nel corso della storia prescinde da questioni stilistico-formali e risponde a reali esigenze costruttive entro una data economia, specchio della terra e della società che l'ha generata. Così come Giuseppe Pagano e Guarniero Daniel sostengono in "Architettura Rurale Italiana" già nel 1936:

«L'architettura rurale rappresenta la prima e immediata vittoria dell'uomo che trae dalla terra il proprio sostentamento. Vittoria dettata da una necessità, ma satura di evoluzioni artistiche. Se l'ape fa la sua cella sempre uguale, dobbiamo ricordare che l'ape si serve sempre dello stesso materiale per costruirla e che vive soltanto in determinate

Micaela Colella

Architettura residenziale e sostenibilità

La casa prefabbricata mediterranea nell'era dell'Industria 4.0

Cap 3. Sulle tracce della sostenibilità nella storia dell'architettura Mediterranea

Fig. 3.1
Architecture without
architects (1964).

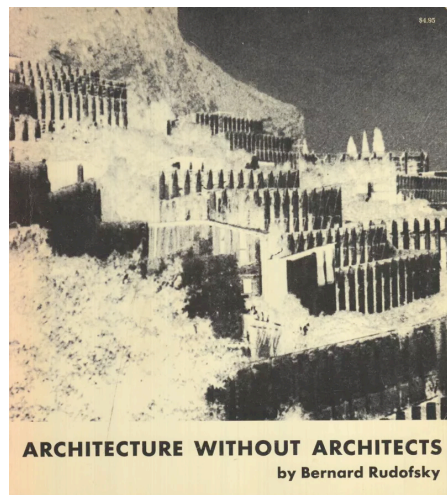


Fig. 3.2
*Architettura rurale
italiana* (1936).



condizioni di clima. L'uomo no. Esso deve sottoporre il proprio istinto alle possibilità offerte dall'ambiente. L'istinto del riparo, analogo di forma, ma diverso di sostanza, si manifesta nell'igloo eschimese o nella capanna di paglia o nel trullo, fino ad assumere apparenze sempre più evolute a seconda delle possibilità tecniche e delle condizioni economiche derivate dalla generosità del suolo. Sta però il fatto che è esistito ed esiste tuttora tutto un mondo edilizio per cui la casa non è un gioco estetico ma una necessità, non è uno sfoggio di ricchezza, ma il risultato di uno sforzo realizzato col minimo disperdimento di energia³».

L'architettura vernacolare comprende, quindi, una molteplicità di forme costruttive e insediative, che hanno inevitabilmente caratterizzato il tessuto antropico delle diverse aree climatiche e culturali, nate tutte dalla medesima esigenza di adattamento alle condizioni climatiche regionali con le risorse materiche disponibili, e le condizioni socio-economiche locali, e per questo intrinsecamente sostenibili.

Le tradizionali abitazioni montane rappresentano probabilmente

3 G. Pagano, G. Daniel, *Architettura rurale italiana*, Quaderni della Triennale, Milano, 1936.

uno dei più evidenti esempi di architettura che nasce da un rapporto sinergico tra l'uomo e la natura del luogo. Le condizioni estreme di questi luoghi rendono imperativo lo sfruttamento delle risorse naturali disponibili e non lasciano spazio ad errori progettuali. Nelle zone montuose, infatti, è necessario un adattamento a condizioni topografiche caratterizzate da terreni scoscesi e dalla presenza di numerosi punti di pericolo; oltre che da condizioni climatiche contraddistinte da frequenti e copiose precipitazioni piovose e nevose, da una forte radiazione solare e da una particolare esposizione ai venti. Per far fronte a queste esigenze, si sono sviluppati nelle zone alpine modelli costruttivi caratterizzati da un piano basamentale in pietra e calce, o pietra a secco (data la massiccia presenza di rocce scistose), che raccorda le differenze di quota del terreno ed ospita la stalla, la quale presenta aperture dalle esigue dimensioni che limitano la dispersione del calore prodotto dal bestiame, contribuendo al riscaldamento degli ambienti sovrastanti. Al di sopra di questa, infatti, si impostano i piani lignei adibiti ad abitazione. A coronare gli edifici un tetto a falde (spesso rivestito in scandole di pietra) di notevole aggetto rispetto al filo della facciata e dall'elevata inclinazione, che permette un opportuno deflusso delle acque piovane e della neve. La pendenza delle falde permette di ottenere un ampio sottotetto ligneo, con grandi aperture, che consente lo sfruttamento della ventilazione naturale per l'essiccazione del foraggio. Queste abitazioni si presentano esternamente con una sorta di spazio filtro tra gli interni e l'esterno, costituita da balconi e ballatoi, che collegano esternamente i vari ambienti e ombreggiano le facciate quando il sole è molto alto.

Questo tipo di analisi è valida e ripetibile per l'architettura spontanea dei primi insediamenti umani in qualsiasi zona della Terra, per quanto grezza e inospitale oggi possa apparire, ad occhi attenti sarà sempre

possibile individuare preziosi principi di architettura passiva che si sono persi nel corso dell'evoluzione-involuzione storica.

Un architetto contemporaneo che è indubbiamente riuscito a reinterpretare i principi dell'architettura vernacolare di un dato luogo, facendoli diventare un aspetto imprescindibile della sua attività progettuale, è stato certamente l'architetto italiano Fabrizio Carola. La sua opera è contraddistinta da un aggiornamento del linguaggio e delle tecniche costruttive dell'architettura vernacolare africana, senza che questo rappresentasse un problema per la sua libertà progettuale. Il suo pensiero circa il rapporto tra tradizione architettonica vernacolare, materiali e tecniche costruttive è ben riassunto nel suo libro "Vivendo, pensando, facendo":

«Se guardiamo la storia dell'architettura, nella maggior parte dei casi si è costruito in materiali e tecnologie appropriate, appropriate all'economia dell'edificio, economia intesa nel senso lato. In ogni paese e in ogni tempo la scelta del materiale e della tecnologia era fatta in funzione del risultato che si voleva ottenere nei limiti di una determinata economia. Questo portava quasi sempre all'uso dei materiali più facilmente disponibili e delle tecnologie che permettevano il miglior utilizzo di questi materiali. Dove c'erano foreste si costruiva in legno, dove c'era roccia si costruiva in pietra, dove c'era terra in terra. La ricerca tecnologica tendeva a ottimizzare sempre più l'impiego del materiale scelto, con l'invenzione di espedienti tecnici, per adattarlo alle diverse esigenze e situazioni climatiche.

Vi erano eccezioni a questa regola solo quando l'immagine o l'apparenza esteriore diventavano una funzione predominante rispetto alle funzioni utilitarie. Era questo il caso dei grandi imperi: quando volevano dimostrare la loro ricchezza e la loro potenza costruivano con materiali costosi che facevano venire a volte da molto lontano. [...] Perché allora

si parla tanto oggi di materiali locali e tecnologie appropriate nei discorsi sul terzo mondo? Perché la regola è stata violata in maniera massiccia; ma questa volta non per orgoglio ma per negligenza o piuttosto per pigrizia mentale e mancanza di rispetto per le culture locali e anche, bisogna pur dirlo, per interesse a vendere... e tutto sotto la bandiera dell'aiuto allo sviluppo⁴».

Il discorso dall'architetto Caròla, pur legato a riflessioni sulla situazione del Terzo Mondo, è perfettamente ascrivibile anche alla situazione attuale dell'architettura occidentale, perché palesa l'ingenuità, o come egli dice "la pigrizia mentale", con cui si è scelto di adottare un modello "universalmente valido". Per quanto assurdamente inappropriato potesse essere in un clima caldo desertico, il mondo Occidentale ha avuto la presunzione di esportare anche lì il suo nuovo modello architettonico standardizzato, nel tentativo di portare i Paesi del Terzo Mondo al proprio livello di sviluppo.

4 F. Caròla in, L. Alini, *Fabrizio Caròla. Opere e progetti 1954-2016*, Edizioni CLEAN, Napoli, 2016.

Fig. 3.3
Mappa del clima mediterraneo secondo la classificazione di Köppen.



3.2 Le pratiche del “buon costruire” nell’architettura mediterranea

Considerando la vastità delle soluzioni architettoniche prodotte nei diversi climi che caratterizzano le diverse aree del pianeta Terra, si è deciso per la presente trattazione di effettuare un focus sull’architettura del bacino del Mediterraneo.

Secondo la classificazione di Köppen⁵, quest’area è caratterizzata dalla presenza del “clima mediterraneo”, un peculiare tipo di clima, appartenente alla categoria dei climi temperati, così chiamato per la sua diffusione soprattutto nel bacino del Mediterraneo, ma presente anche in piccole aree degli Stati Uniti (principalmente la California), del Cile, dell’Australia meridionale e del Sudafrica.

Il clima mediterraneo è caratterizzato da inverni miti e piovosi ed estati calde con lunghi periodi di siccità. Le escursioni termiche nell’arco della giornata sono minime, così come la variazione di temperatura durante l’arco dell’anno è piuttosto contenuta, caratteristiche dovute sia alla latitudine che all’azione mitigatrice del mare. L’adattamento delle costruzioni a queste peculiari condizioni climatiche deve prevedere, dunque, una risposta a due esigenze opposte: da un lato, favorire gli

5 W.Köppen, *Das geographische System der Klimate*, in *Handbuch der Klimatologie*, vol. 1, Borntraeger, Berlino, 1936.

apporti termici solari e contenere le dispersioni termiche nella stagione fredda, e dall'altro, ridurre l'esposizione ai raggi solari e favorire la ventilazione naturale nelle stagioni calde. Per queste ragioni, i molteplici modelli di architettura vernacolare sviluppatasi nell'area del bacino del Mediterraneo, rappresentano una risposta a un problema sfaccettato e variabile, risolto adottando soluzioni tecniche passive adeguate alla creazione-preservazione di condizioni ottimali di comfort interno al variare delle condizioni climatiche esterne.

Di seguito si analizzeranno più approfonditamente le principali soluzioni passive adottate nell'architettura vernacolare mediterranea.

Gli aspetti considerati sono relativi principalmente ai seguenti aspetti:

- orientazione: disposizione dell'edificio rispetto ai punti cardinali;
- involucro edilizio: la pelle, l'elemento di relazione e filtro tra l'ambiente esterno e quello interno;
- sistemi passivi di ventilazione e raffrescamento naturale: metodi e dispositivi non attivi di protezione o potenziamento delle correnti d'aria naturali;
- sistemi di ombreggiamento e controllo solare: dispositivi, fissi e mobili, per favorire od ostacolare l'irraggiamento solare negli ambienti interni.

La classificazione proposta riprende principalmente lo schema tracciato dalle ricerche seminali di Victor Olgyay nel libro "Desing with climate", pioniere dell'approccio bioclimatico in architettura. Il termine "architettura bioclimatica", coniato da Olgyay a partire dagli anni Cinquanta⁶, richiama nella sua accezione originaria, un ripensamento dell'architettura sulla base di elementi di psicologia umana, della

6 V. Olgyay, "Bioclimatic approach to architecture". In *Building Research Advisory Board*, Conf. Report No. 5, National Research Council, Washington, DC, USA, 1953.

climatologia e della fisica tecnica, con una fortissima vocazione a considerare gli aspetti delle architetture regionali come preminenti, in quanto espressione spesso più naturale e armonica della relazione tra architettura e ambiente.

3.2.1 L'orientazione

Gli effetti dell'orientazione degli edifici sulla loro capacità di risultare più o meno confortevoli durante i periodi dell'anno e sul benessere fisico e mentale dell'uomo, sono ben noti da tempi remoti. La storia ci dimostra che da sempre è stata rivolta una particolare attenzione nella scelta dei siti per gli insediamenti umani (nel mondo vegetale e animale la questione è connaturata) sulla base della loro esposizione all'irraggiamento solare e alle correnti d'aria prevalenti e nella scelta dell'orientazione delle singole cellule abitative rispetto ai medesimi fattori. Negli insediamenti primitivi quanto nei trattati classici, fino ai giorni nostri, la scelta dell'orientazione dell'edificio (quand'anche non fosse possibile la scelta del sito stesso) e della disposizione degli ambienti secondo il favore degli elementi climatici costituisce un punto cardine del lavoro del progettista.

La questione dell'orientazione degli edifici rispetto ai punti cardinali necessita la valutazione di diversi aspetti, a partire dalla fascia climatica di appartenenza, dalla latitudine e altitudine del sito, che, insieme a fattori determinati della topografia locale, determinano le temperature medie, l'esposizione ai venti e alla radiazione solare.

Generalmente, nelle zone fredde gli obiettivi da perseguire sono: la conservazione del calore, il riparo dai venti principali e una buona esposizione all'insolazione invernale. Nelle zone caldo-umide la

principale esigenza è la captazione delle correnti d'aria fresche, per cui è auspicabile una esposizione sopravento. Nelle zone caldo-secche vi è l'esigenza di accumulare la minor quantità possibile di calore e di farlo disperdere rapidamente, per cui viene evitata l'esposizione a occidente che causerebbe un surriscaldamento pomeridiano.

Per le zone a clima temperato la questione è meno netta e più sfaccettata, poiché è necessario giungere a soluzioni in grado di relazionare l'esigenza di guadagno termico solare e di protezione dalle correnti fredde nei periodi sottomiscaldati, con l'esigenza di protezione dall'irraggiamento solare e captazione delle correnti fresche nei periodi surriscaldati. Gestire la captazione delle correnti d'aria, generalmente non è un problema architettonico di grossa entità, poiché i venti prevalenti stagionali spirano da differenti direzioni. Per quanto concerne, invece, la gestione degli apporti termici solari, la questione è certamente più complessa. Come già rilevato da V. Olgyay⁷, gli studi sul tema si sono intensificati nei primi anni del Novecento, con lo sviluppo di tecniche per la misurazione della radiazione solare. Nel 1920, A. Ray, J. Pidoux e C. Bardet⁸ stabilirono un indice eliotermico moltiplicando le ore di insolazione di una superficie per la temperatura media dell'aria in quel periodo. Usando questo parametro per confrontare le varie possibilità di orientazione, essi giunsero a individuare un *asse eliotermico* (per Parigi, uguale a 19° a est del nord), ossia la posizione di un piano orizzontale che riceve durante l'anno lo stesso valore eliotermico sulle due facce.

7 V. Olgyay, *Desing with climate*, Princeton university press, Princeton, NJ (USA) 1969.

8 A. Ray, J. Pidoux, G. Bardet, "La villesalubre de l'avenir: principesscientifiquesd'orientation des voiespubliques et des habitations", *Congrès international et exposition comparée des villes*, Ghent: Rapport, 1913.

Nel 1943, G. Vinaccia⁹ metteva in discussione la validità dell'asse eliotermico proponendo un *asse equisolare*, posizionato a 32° a est verso il nord, in grado di fornire pari condizioni di irraggiamento su tutti i quattro lati di un edificio. Oltre a questi contributi, sono stati elaborati ulteriori studi, da Marboutin¹⁰ nel 1931, Hilberseimer¹¹ nel 1944, Bardet¹² nel 1945, Lebreton¹³ nel 1945, che si può affermare siano giunti sostanzialmente al medesimo esito: per le migliori condizioni abitative le facciate principali degli edifici devono essere orientate a sud; le orientazioni a sud-est e sud-ovest sono tollerabili e le esposizioni a est e a ovest sono troppo calde d'estate e troppo fredde d'inverno, quindi sconsigliabili. Va inoltre sottolineato che l'esposizione a sud-est è preferibile a quella a sud-ovest, poiché, il calore solare è più utile e gradito nelle ore mattutine, quando il sole è situato a est, piuttosto che nelle ore pomeridiane quando, per effetto delle variazioni giornaliere di temperatura, è riscontrabile il picco termico giornaliero (intorno alle ore 16:00 del pomeriggio).

Un interessante esempio di orientazione ottimale nell'architettura vernacolare mediterranea è costituito dalle tradizionali abitazioni delle isole Eolie. L'orientazione delle case veniva scelto per sfruttare al meglio la ventilazione naturale in estate e ripararsi dai forti venti di tramontana invernali. Per questo si denota una predilezione per l'esposizione a meridione, con la facciata principale rivolta verso il mare¹⁴.

9 G. Vinaccia, *Per la città di domani*, Fratelli Palombi, Roma, 1943.

10 F. Marboutin, "L'actinometre et l'orientation des rues et des façades", *La technique sanitaire et municipale*, 1931.

11 L. Hilberseimer, *The new city: principles of planning*, P. Theobald, Chicago, 1944.

12 G. Bardet, "Le facteur soleil en urbanisme", *Techniques et architecture*, 1945.

13 J. Lebreton, *La cité naturell*, Editions Paul Dupont, Paris, 1945.

14 L'esposizione sul fronte mare riguardava anche questioni di sicurezza,



Oltre all'apertura di ingresso a sud, sulle facciate delle abitazioni erano presenti poche aperture di piccole dimensioni, orientate prevalentemente a sud e ad est, mentre per evitare l'ingresso di venti freddi e le dispersioni termiche invernali, il lato nord restava sempre cieco.

L'elemento peculiare di queste abitazioni è il cosiddetto *bagghiu*, una terrazza antistante la facciata meridionale, che rappresentava il vero cuore della casa nella stagione estiva. Date le alte temperature, questo ambiente aperto su tre lati e coperto da un pergolato su cui si faceva crescere la vite, ospitava tutte le mansioni della famiglia (per cui era attrezzato) e i momenti di convivialità, nella stagione calda. Mentre, con l'arrivo dell'inverno, i tralici della vite si spogliano del fogliame lasciando penetrare i raggi solari in profondità nell'abitazione riscaldando l'ambiente.

Fig. 3.4
Tradizionale casa eoliana con bagghiu (foto: Sergio Capitanio).

legate all'avvistamento tempestivo di ciò che proveniva dal mare.

3.2.2 *L'involucro edilizio*

Gli organismi edilizi che caratterizzano i paesaggi dell'area mediterranea sono contraddistinti da forme geometriche semplici e compatte. Piccoli volumi caratterizzati da involucri murari di elevato spessore, costruiti con materiali naturali dall'elevata massa, come la pietra, la cui presenza è molto diffusa in quest'area, ma anche la terra cruda e la terracotta (mattoni). L'impiego di notevoli spessori murari per la costruzione degli edifici, frequentemente ottenuti mediante l'uso di pareti a sacco, anche se è dovuto a esigenze strutturali legate alle tecnologie disponibili, piuttosto che a una diffusa conoscenza dei principi della fisica ambientale, risulta essere idoneo alla creazione di condizioni di comfort interno nei periodi surriscaldati, così insidiosi nel clima mediterraneo.

La capacità di un involucro edilizio di regolare termicamente l'ambiente interno è legata alle proprietà di trasmissione del calore da parte del materiale di cui è costituito. Un materiale con buone proprietà isolanti riesce a ridurre la trasmissione di calore tra due ambienti confinanti, quindi, la temperatura esterna condiziona in misura minore la temperatura interna. Mentre, un materiale con buone capacità di accumulo del calore, riesce a ritardare la trasmissione del calore da una parte all'altra della parete, andando a compensare le variazioni di temperatura giornaliera.

Gli involucri murari costruiti con materiali leggeri, contenendo molte particelle d'aria, sono caratterizzati da una bassa trasmittanza e buone proprietà isolanti, sono quindi idonei in condizioni di clima rigido.

Gli involucri murari costruiti con materiali dall'elevata massa, così come accade nell'architettura tradizionale mediterranea, sono invece caratterizzati da un'ottima capacità di accumulo termico, indispensabile

per preservare il comfort interno nella stagione estiva, rallentando la trasmissione termica tra l'esterno e l'interno (inerzia termica). La trasmissione del calore tra l'ambiente esterno e quello interno è così lenta che il calore accumulato dai muri perimetrali durante le ore diurne viene rilasciato soltanto durante le ore notturne, più fresche, ottenendo una temperatura interna pressoché costante¹⁵.

La natura variabile del clima mediterraneo renderebbe utile un uso congiunto di pareti pesanti dall'elevata inerzia termica, per il comfort abitativo estivo, con uno strato di materiale isolante o una camera d'aria, per l'isolamento termico invernale. La tradizione architettonica in questione non è giunta a soluzioni degne di nota in tal senso. Tuttavia, l'impiego di murature perimetrali dal fortissimo spessore, rispetto alle dimensioni degli ambienti delimitati, ha in parte arginato il problema, creando condizioni ambientali interne quasi costanti nel corso dell'anno¹⁶, e consentendo una esigua dispersione del calore derivante da fonti di calore interne, come stufe e camini.

Anche il ricorso a soluzioni di ordine spaziale, come la compattezza della forma dell'involucro edilizio è un aspetto fondamentale per l'ottimizzazione energetica. Un volume compatto presenta una superficie esterna minore, e questo si traduce in una minore superficie disperdente durante l'inverno, e una minore superficie esposta alla radiazione solare durante l'estate.

Il controllo termico dell'edificio passa anche dalle caratteristiche superficiali delle murature esterne. Un materiale che invece di assorbire la radiazione solare, la riflette in gran parte verso l'esterno, influisce

15 Il clima mediterraneo presenta una escursione termica giornaliera di pochi gradi.

16 La temperatura interna durante l'anno resta pari alla media delle temperature stagionali nell'area.



Fig. 3.5

Tipico esempio di involucro massivo in area plastico-muraria (foto: Sergio Capitanio).

positivamente sulla temperatura interna nei periodi surriscaldati. Poiché la radiazione solare rientra prevalentemente nella banda della radiazione visibile, il grado di riflessione di un materiale dipende fortemente dal suo colore. Una superficie di colore bianco è in grado di riflettere il 90% o più della radiazione incidente, mentre una superficie di colore nero ne riflette il 15% o meno¹⁷. Se le superfici esposte alla radiazione solare sono di colore bianco come le murature dipinte a calce, o molto chiaro come la pietra calcarea, come accade sovente nell'architettura vernacolare mediterranea, la temperatura superficiale delle murature sarà più bassa, consentendo una minore trasmissione del calore verso l'interno e condizionando la temperatura dell'aria con cui entra in contatto.

17 V. Olgyay, *Progettare con il clima: un approccio bioclimatico al regionalismo architettonico*, Franco Muzio Editore, Padova, 1981, p. 192.

Le abitazioni tradizionali mediterranee sono altresì caratterizzate da linearità delle superfici, semplicità strutturale, razionalità ed essenzialità delle forme¹⁸. Le aspirazioni ornamentali trovano poco spazio in queste architetture, ogni elemento architettonico ha una sua precisa funzione, così come le forme architettoniche derivano da una precisa esigenza strutturale, legata allo sfruttamento razionale delle risorse materiche locali. Così, anche la posizione e la dimensione delle aperture è strettamente correlata all'esigenza di riparare l'ambiente interno dal surriscaldamento estivo e dalla dispersione termica invernale. Le aperture, infatti, si presentano in numero minimo, in alcuni casi l'unica apertura è rappresentata dalla porta di ingresso¹⁹, di dimensioni contenute e assenti sul lato nord, poiché questa esposizione causerebbe una maggiore dispersione invernale.

Non si può tralasciare l'importanza delle peculiari aggregazioni tra gli edifici, che hanno dato luogo ai caratteristici agglomerati urbani dei centri storici mediterranei. Questi si presentano con una elevata densità costruttiva. Le costruzioni condividono tra loro diversi muri, ottenendo una fitta trama urbana organica e irregolare che lascia esposto del singolo edificio una piccola porzione di facciata (solitamente una sola o due facciate su quattro). In questo modo gli edifici si schermano a vicenda e creano tra loro strette vie di passaggio che restano in ombra per la maggior parte delle ore diurne. Inoltre, questi stretti passaggi sono spesso disposti planimetricamente in modo da incanalare le correnti d'aria fresca, rendendo certamente le strade uno spazio pubblico più

18 A. Boeri, Caratteri di sostenibilità delle tecnologie tradizionali in area mediterranea. In C. Monti, R. Roda (a cura di), *Costruire sostenibile: il Mediterraneo*, Alinea Editrice, Firenze, 2001, p. 39.

19 Un simile carattere non potrebbe mai essere ripreso dall'architettura contemporanea per ovvie ragioni di funzionalità e qualità dell'aero-illuminazione interna.

confortevole da vivere anche nei periodi surriscaldati, e offrendo un ulteriore vantaggio alle abitazioni che vi si affacciano, perché se la temperatura dell'aria in strada è più bassa, anche le correnti d'aria che entreranno nelle abitazioni saranno più fresche.

3.2.3 Sistemi passivi di ventilazione e raffrescamento naturale

Come si è detto, il clima mediterraneo è particolarmente caldo e secco nella stagione estiva, questo rende necessaria l'adozione di specifici accorgimenti a tutte le scale dell'architettura, affinché gli edifici risultino confortevoli anche nei periodi surriscaldati. In assenza di dispositivi per il raffrescamento attivo degli ambienti, nell'architettura vernacolare di tutto il bacino del Mediterraneo si è sviluppato un metodo progettuale che ha integrato, con diversi livelli di raffinatezza e complessità, logiche di sfruttamento dei principi della termodinamica per il raffrescamento passivo degli edifici.

I naturali movimenti d'aria da cui ci si protegge durante i periodi freddi, vengono sfruttati per il raffrescamento naturale degli ambienti nei periodi surriscaldati. L'azione del vento su di un edificio crea zone di cosiddetto sopravvento, a una maggiore pressione, e zone di sottovento, a una pressione minore. Questa differenza di pressione crea una corrente d'aria che, mediante le aperture esterne, attraversa l'ambiente interno. Da questo principio, deriva l'importanza della scelta della collocazione delle aperture, affinché questa sia la più favorevole alla creazione di correnti d'aria. La massima efficacia si riscontra con le aperture poste su due lati opposti, con aperture di entrata di piccole dimensioni sul lato a maggiore pressione e aperture di uscita di grandi dimensioni sul lato a minore pressione. Questo perché, mentre aperture di grandi

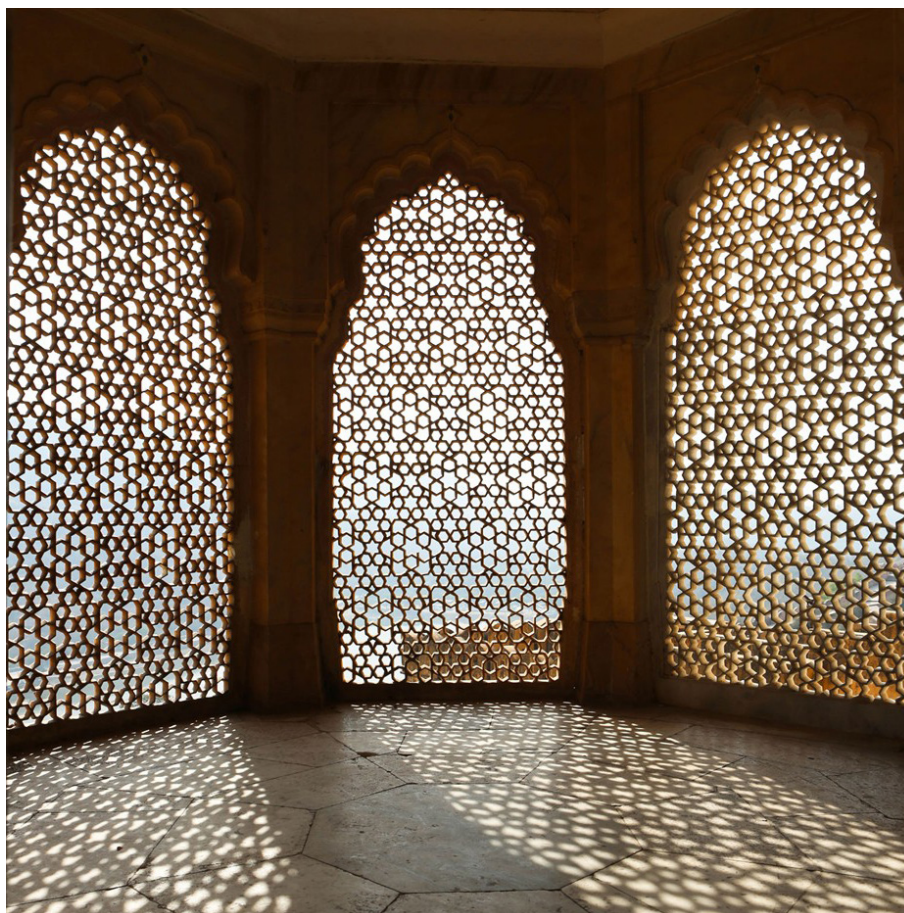


Fig. 3.6
Esempio di *mashrabiya*
(foto: bertrandou).

dimensioni su entrambi i lati creerebbero il massimo ricambio d'aria, per il raffrescamento estivo la quantità di aria in ingresso risulta essere un fattore meno rilevante della velocità della corrente d'aria stessa. Come è noto, la velocità dell'aria aumenta al ridursi della sezione in cui scorre, per questo aperture piccole sopravento e grandi aperture di uscita sottovento, garantiscono un'ottimizzazione delle correnti d'aria e un maggiore comfort interno.

Un sistema di raffrescamento passivo che sfrutta il principio fisico per cui una corrente d'aria che passa da una strettoia aumenta la sua velocità è la *mashrabiya* di origine araba. La *mashrabiya* è un sottile diaframma posizionato in corrispondenza delle aperture, costituito da un pannello traforato secondo una fitta trama geometrica. Esso rappresenta al tempo stesso uno strumento di ombreggiamento e regolazione della

radiazione solare in ingresso, di creazione di privacy, perché permette di guardare oltre senza essere visti, ma soprattutto, di potenziamento della ventilazione naturale degli ambienti, poiché l'aria proveniente dall'esterno, passando per gli stretti fori che la caratterizzano, aumenta la sua velocità, favorendo una sensazione di freschezza e sollievo anche nelle giornate più torride.

Similmente alle differenze di pressione, anche le differenze di temperatura creano moti d'aria che concorrono al comfort abitativo. La differenza di temperatura tra due volumi d'aria è associata a una differenza di densità del gas, per cui l'aria fresca, a maggiore densità, per effetto gravitazionale resta in basso, mentre l'aria calda, a densità minore, sale verso l'alto. Si origina così il noto effetto camino, ampiamente impiegato per il raffrescamento delle architetture nell'area di studio. La creazione di moti convettivi ottenuti per gravitazione, è il principio alla base del diffuso impiego di soffitti molto alti in quest'area (spesso accompagnati da un'apertura in sommità per la dissipazione del calore). Già nei più primitivi organismi edilizi di quest'area, come il trullo pugliese, la pinnetta sarda, il caprile dell'Isola d'Elba e tutte le altre capanne litiche dalla pianta circolare e la copertura a pseudo-cupola, ampiamente diffuse in quest'area, si riscontra pur nella loro semplicità e compattezza geometrica uno sfruttamento di questo espediente di raffrescamento passivo. Mentre, la loro notevole massa muraria è in grado di regolare termicamente l'edificio (come si è spiegato al punto 3.2.2.), la peculiare forma allungata verso l'alto della copertura permette la creazione di moti convettivi spontanei, dovuti alla bassa densità dell'aria calda che tende a salire restando oltre l'altezza della zona abitata.

Tuttavia, sono individuabili soluzioni che hanno sfruttato molto più efficacemente tale principio fisico, poiché, «maggiore è la differenza di

temperatura, maggiore è l'altezza tra le aperture di entrata e di uscita, e maggiori sono le loro dimensioni, tanto più energico sarà l'effetto camino»²⁰. Uno di questi sistemi è rappresentato dal patio centrale delle abitazioni mediterranee, un elemento in grado di regolare fortemente il microclima. Il patio consente di limitare fortemente l'esposizione sui fronti esterni, su cui si presentano poche aperture di modeste dimensioni, a favore di una esposizione interna, da cui captare luce e aria regolata dall'effetto camino. Il patio, infatti, avendo una conformazione geometrica tendenzialmente più alta che larga e coadiuvato dalla presenza di vari sporti, è in grado di gettare ombra sulle facciate interne per molta parte del giorno, per cui la temperatura sarà conseguentemente più bassa e piacevole in estate. A mezzogiorno, quando il sole è vicino allo zenith e colpisce la pavimentazione del patio riscaldandone l'aria, questa comincerà a salire innescando un moto convettivo. Questo moto sarà accelerato nel tardo pomeriggio, poiché l'aria calda proveniente dall'interno dell'abitazione, dove le pareti cominciano a rilasciare il calore accumulato durante la mattinata, viene richiamata ed espulsa verso l'alto dal patio, mentre l'aria fresca notturna si accumula in basso nel patio e nelle stanze. Durante l'inverno, invece, il patio consente una maggiore protezione dai venti verso l'esterno e favorisce l'accumulazione del calore.

Un sistema di ventilazione passiva ancor più performante è costituito dalle torri del vento, diffuse principalmente in Medio Oriente e nell'Africa settentrionale (figg. 3.7-8). In Iran, le torri del vento prendono il nome di *badgir*; e sono costituite da alte torri divise internamente in condotti verticali, mediante diaframmi di mattoni, che

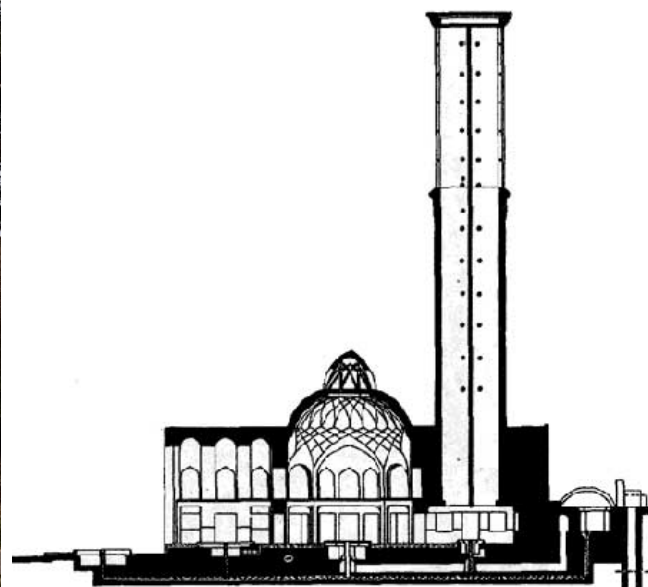
20 V. Olgyay, *Progettare con il clima: un approccio bioclimatico al regionalismo architettonico*, op. cit.

Micaela Colella

Architettura residenziale e sostenibilità

La casa prefabbricata mediterranea nell'era dell'Industria 4.0

Cap 3. *Sulle tracce della sostenibilità nella storia dell'architettura Mediterranea*



Figg. 3.7-8

Esempio di badgir, presente nel Giardino Dolat Abad e sezione corrispondente (fonte: H. Ahmadikia et al., 2012).

terminano con aperture in sommità e aperture in basso di collegamento con l'ambiente principale dell'edificio. Le aperture superiori sono posizionate in coppia, in modo tale che vi sia sempre una apertura sopravento e una sottovento. Le brezze fresche vengono captate dall'apertura sopravento e incanalate verso l'interno dell'edificio, dove l'aria calda interna più leggera verrà spinta a uscire dal condotto sottovento. Naturalmente, a una maggiore altezza della torre e a una minore sezione trasversale, corrisponde una maggiore velocità della corrente d'aria incanalata. Allo stesso tempo, a un maggiore numero di lati della torre (da 4 a 8), corrisponde una migliore efficienza, poiché maggiori sono le possibilità di captare la direzione del vento dominante. In assenza di vento, durante la notte le pareti della torre cedono il calore accumulato durante il giorno, creando una corrente ascensionale per gravitazione, mentre durante il giorno, le pareti così raffrescate riescono a raffrescare l'aria passante nel condotto. Quindi, in assenza di vento, il meccanismo si inverte e sono le pareti della torre a svolgere una funzione di regolatore termico attraverso la creazione di moti convettivi spontanei.

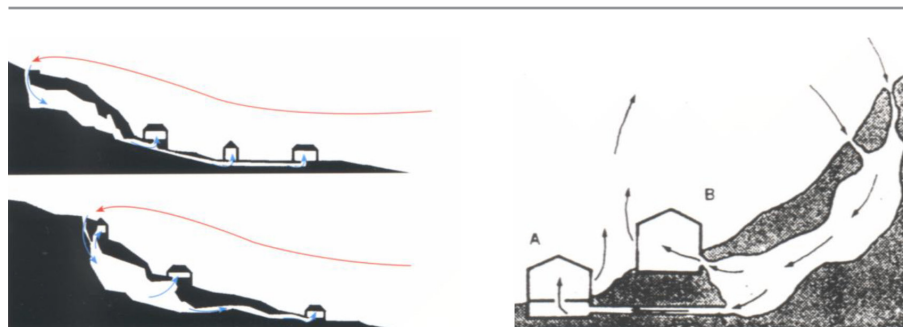


Fig. 3.9
Sezione rappresentante il sistema di ventilazione dei covoli di Costozza (fonte: Uwe Wienke, 2013).

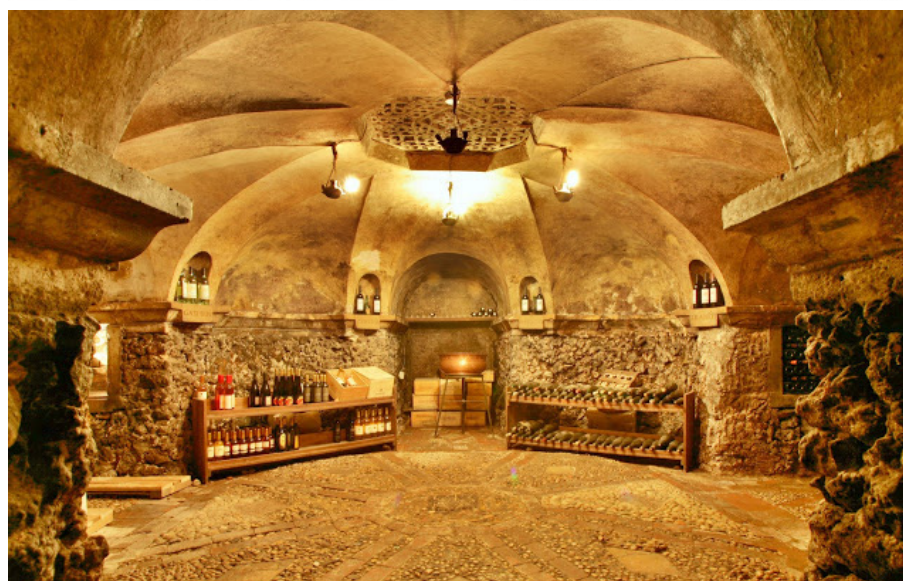


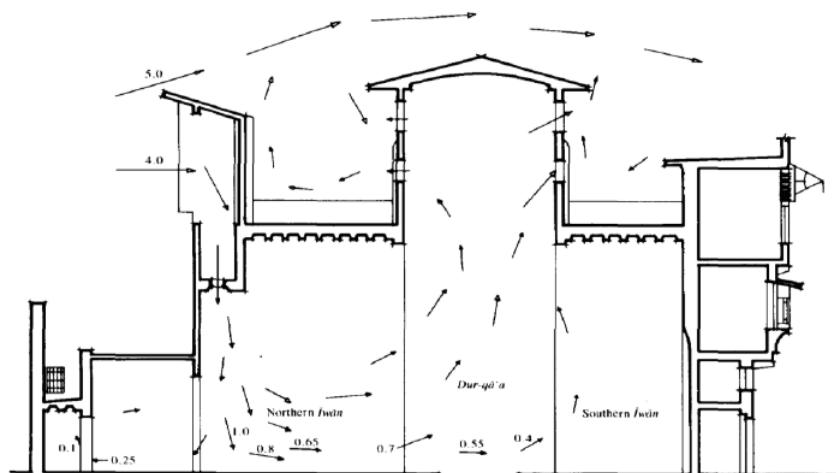
Fig. 3.10
Cantina che collega tramite la griglia posta in sommità della volta i ventidotti alla villa superiore (fonte: ilgiornaledivicenza.it).

Un espediente volto a migliorarne ulteriormente l'efficienza, è rappresentato dal posizionamento delle torri lontano dall'edificio stesso, facendo in modo che l'aria passi attraverso gallerie sotterranee, dove l'alta umidità delle pareti ne abbassa ulteriormente la temperatura, prima che questa venga convogliata nell'ambiente abitato. Questa soluzione è simile a quella descritta dal Palladio²¹ nel 1570, adottata nelle ville del vicentino situate nei pressi dei *covoli* di Costozza, un sistema di grotte e cavità sotterranee scavate nei colli Berici, probabilmente per l'estrazione della pietra e successivamente adibite alla conservazione del vino. L'aria fresca e umida dei *covoli*, a temperatura costante durante l'anno (10-12° C), è stata sfruttata per il raffrescamento degli edifici costruiti in prossimità di questi. Dei condotti, chiamati "ventidotti", collegano

21 A. Palladio, *I Quattro libri dell'architettura*, vol. 1, cap. XXVII, Venezia, 1570.

Fig. 3.11

Sezione rappresentante il sistema di raffrescamento del *malqaf* (fonte: H. El-Borombaly, L. F. Molina-Prieto, 2015).



le grotte agli ambienti sotterranei e questi con l'ambiente principale dell'abitazione dove, attraverso griglie, l'aria fresca convoglia fino ai piani superiori²² (figg. 3.9-10).

In Egitto è diffuso un altro tipo di torre del vento, il *malqaf*, che a differenza del *badgir* iraniano, presenta una sola apertura in sommità, orientata verso il vento prevalente, a nord. Il funzionamento del *malqaf* più che determinato dal singolo elemento del camino è dovuto all'intera conformazione volumetrica dell'edificio. La torre è posizionata in adiacenza ad un ambiente centrale coperto a lanterna, dove l'aria fresca convogliata dall'apertura a nord spinge quella calda a uscire attraverso aperture schermate da *mashrabiya*²³.

L'effetto rinfrescante delle torri del vento è frequentemente coadiuvato da un ulteriore elemento, ossia la presenza dell'acqua sotto forma di specchi d'acqua e fontane. Queste, posizionate al centro dell'atrio o dell'ambiente da raffrescare, per effetto evaporativo dell'acqua collaborano a una riduzione della temperatura dell'aria. È noto che

22 M. Grosso, Principi e tecniche di controllo dello scambio termico edificio-terreno, *Ambiente costruito*, gennaio-marzo 1997, p. 52-62.

23 H. El-Borombaly, L. F. Molina-Prieto, Adaptation of Vernacular Designs for Contemporary Sustainable Architecture in Middle East and Neotropical Region, *International Journal of Computer Science and Information Technology Research* 13 (4), 2015, pp.13-26.



Fig. 3.12
Sala della fontana nel
castello della Zisa di
Palermo (fonte: Città
Metropolitana di
Palermo, 2011).

nei sistemi di raffrescamento evaporativo attraverso l'acqua, il calore necessario all'evaporazione viene fornito dall'aria, che lo cede alle molecole del liquido sotto forma di calore latente; pertanto, l'aria in uscita è raffreddata ed umidificata allo stesso tempo²⁴.

Un ingegnoso espediente architettonico, basato su questo principio, si è diffuso nella Sicilia del XVIII sec., per riuscire a sfuggire all'estrema calura estiva, quando il vento di scirocco rendeva l'aria calda e irrespirabile. Individuata la posizione di una falda acquifera a una profondità inferiore ai 10 metri, si procedeva allo scavo nella roccia di una camera interrata, annessa all'abitazione principale, al centro della quale sgorgava la sorgente artificiale ottenuta dallo scavo della falda. L'elevata inerzia termica della roccia, associata al raffrescamento per evaporazione dell'acqua della sorgente e all'effetto camino provocato dall'apertura in sommità dell'ambiente, assicurava un efficace sistema di raffrescamento passivo e una condizione termica confortevole indipendentemente dalle condizioni esterne.

24 G. Guizzetti, *Costruire e abitare sul lago: un'architettura residenziale tra natura, eco compatibilità e tecnologie consapevoli*. Tesi di laurea, Politecnico di Milano – Facoltà di Architettura, a.a. 2003-04.

3.2.4 Sistemi di ombreggiamento e controllo solare

Come si è detto, l'architettura mediterranea ha dovuto svilupparsi in simbiosi con le variazioni climatiche stagionali che caratterizzano il clima mediterraneo. Queste variazioni climatiche, rendono necessaria una diversa risposta dell'edificio nei periodi surriscaldati e sottoriscaldati. Affinché nei primi l'edificio sia in grado di limitare l'ingresso di un eccessivo irraggiamento solare e nei secondi, invece, di favorirne il più possibile gli apporti termici, nell'edilizia tradizionale si sono sviluppati molti elementi di controllo solare basati su di un unico principio astronomico, ossia, la variazione quotidiana del percorso del sole rispetto all'orizzonte. La traiettoria descritta dal sole nel cielo, nel suo moto apparente rispetto alla Terra, per conseguenza dell'inclinazione dell'asse terrestre, segue nelle giornate d'estate un arco più alto e vicino allo zenith, mentre, nelle giornate invernali descrive un arco più basso e vicino all'orizzonte. Questa variazione, chiamata declinazione solare, permette di impiegare modesti aggetti orizzontali nella facciata esposta a sud per ostacolare la penetrazione dei raggi solari in estate, quando il sole è molto alto all'orizzonte. Mentre in inverno, quando il sole è basso all'orizzonte, la presenza dei medesimi aggetti non impedisce l'ingresso dei raggi solari.

Sulla base di questo assioma, il controllo solare delle architetture tradizionali mediterranee è assicurato sulla facciata sud, quella principalmente interessata dal sole alto di mezzogiorno, dalla presenza di elementi aggettanti orizzontali, come sporti di gronda, pensiline e balconi. In alcune zone (come nelle già citate abitazioni eoliane) lo stesso effetto è ottenuto dall'accostamento su questa facciata di elementi filtro, come porticati, pergolati e verande. Le facciate esposte a est e a ovest vengono colpite da raggi solari più bassi e radenti (mattutini e

pomeridiani), pertanto il cono d'ombra prodotto dagli sporti orizzontali non è sufficiente a impedire l'ingresso della radiazione solare e il surriscaldamento degli ambienti. In questo caso si predilige schermare esternamente le aperture con elementi verticali mobili e regolabili, come gli scuri o le persiane, che permettono di filtrare la luce consentendo al tempo stesso la ventilazione trasversale, di fondamentale importanza in estate. Anche elementi situati nel lato interno dell'apertura possono contribuire al reirraggiamento di una parte della radiazione solare incidente, per questo motivo diffusissimo nel sud Italia è l'uso di tendaggi di colore bianco²⁵.

La presenza di alberi e vegetazione appositamente posizionati può contribuire all'efficienza dei sistemi di ombreggiamento nella regolazione del microclima interno, avvalendosi in questo modo di un ulteriore elemento di simbiosi tra le variazioni stagionali delle esigenze dell'uomo e quelle del mondo naturale.

La presenza di vegetazione in prossimità degli edifici, oltre a rispondere a esigenze di natura psichica, ad attutire la propagazione dei suoni, a fornire condizioni di privacy e a filtrare l'aria, rappresenta un efficace strumento di regolazione termica: «D'inverno una barriera di piante sempreverdi può ridurre le dispersioni termiche degli edifici. D'estate, la superficie di erba e di foglie assorbe la radiazione solare e i loro processi di evaporazione possono raffrescare la temperatura dell'aria. Soprattutto, essi forniscono ombra nelle stagioni giuste²⁶».

L'uso di piante caducifoglie come sistema schermante è perfettamente allineato con le esigenze di ombreggiamento stagionali. La piena fioritura

25 V. Olgyay, *Progettare con il clima: un approccio bioclimatico al regionalismo architettonico*, op. cit., p. 123.

26 V. Olgyay, *Progettare con il clima: un approccio bioclimatico al regionalismo architettonico*, op. cit., p. 133.

delle piante e l'esigenza di frescura coincidono tempisticamente. In estate la rigogliosa chioma degli alberi e delle piante riesce a filtrare efficacemente la radiazione solare, creando ombra sugli edifici e raffrescando la temperatura per evaporazione. In inverno, invece, le chiome perdono le loro foglie, e i rami spogli lasciano oltrepassare la luce e riscaldare gli ambienti. Nella tradizione mediterranea, un modo frequente per sfruttare tale principio è il posizionamento antistante alla facciata esposta a sud di pergolati su cui far crescere piante rampicanti, come la vite.

Durante le prime ore del mattino e nel tardo pomeriggio, il sole è basso all'orizzonte e produce ombre molto allungate, quindi i fronti est e ovest possono essere ombreggiati facilmente con il posizionamento in punti strategici di alberature anche basse.

SECONDA PARTE

Capitolo 4

La prefabbricazione come strumento per la sostenibilità

4.1 Principi di prefabbricazione sostenibile

Nel presente capitolo verrà chiarito il rapporto che intercorre tra la costruzione secondo i principi della sostenibilità e la tecnica della prefabbricazione, e quindi la definizione della prefabbricazione come strumento utile al raggiungimento della sostenibilità nella costruzione dell'architettura residenziale.

Dai precedenti capitoli si può desumere che l'architettura vernacolare rappresenta un emblema di architettura sostenibile, poiché nasce da un atto costruttivo votato al principio di massima efficienza con il minimo dispendio di risorse disponibili. Nonostante l'architettura vernacolare sia espressione di una società preindustriale, non vi è ragione di credere che da essa non si possano estrapolare principi validi per la progettazione contemporanea. Pertanto, la sua eredità è individuabile principalmente su un piano concettuale, piuttosto che su un piano costruttivo. Secondo questa linea di pensiero, è possibile supporre di poter astrarre i principi di sostenibilità insiti nell'architettura vernacolare e trasportarli nel contesto storico attuale, dominato dall'industrializzazione dei processi produttivi. Data la complessità intrinseca dell'architettura contemporanea, per un

suo sviluppo sostenibile, è necessaria la razionalizzazione dei processi costruttivi, raggiungibile oggi attraverso l'uso della prefabbricazione.

Secondo la definizione fornita dal dizionario Treccani, «la prefabbricazione è il procedimento utilizzato nelle costruzioni meccaniche e in quelle civili, che consiste nel preparare, in luogo diverso dalla sede definitiva, gli elementi costitutivi di una struttura, che vengono successivamente trasportati e montati in sede¹».

Ryan E. Smith osserva che la parola prefabbricazione è apparsa per la prima volta nei dizionari nel 1932, e da allora la sua definizione è rimasta pressoché invariata, nella sua accezione di produzione di elementi costruttivi precedente al loro impiego in cantiere, nonostante in qualsiasi altro campo della tecnologia industriale la prefabbricazione verrebbe oggi chiamata semplicemente “produzione”. Secondo Smith, il mancato aggiornamento della terminologia denota una sorta di pregiudizio, dovuto alla mancanza di divulgazione dei progressi tecnologici nel settore delle costruzioni².

La prefabbricazione, per sua stessa natura, implica il concetto di previsione. Prevedere tutto il processo di costruzione durante la fase di progettazione, e non a posteriori, significa dover concepire il progetto attraverso un metodo che non può basarsi unicamente su considerazioni formali, ma deve rapportare costantemente l'insieme e le singole parti, secondo un rapporto coerente e sinergico.

La prefabbricazione prevede intrinsecamente una metodologia progettuale che non può prescindere da considerazioni sull'efficienza del processo costruttivo. Poiché essa comporta una programmazione

1 Treccani, "Prefabbricazione". Disponibile presso: <http://www.treccani.it/vocabolario/prefabbricazione/> (ultimo accesso: Novembre 2017).

2 R. E. Smith, *Prefab architecture: A guide to modular design and construction*, John Wiley & Sons, New York, 2011, p. XI.

precisa del progetto che conduce naturalmente a una razionalizzazione di tutte le fasi del processo costruttivo, dall'ottimizzazione dell'uso dei materiali, all'ottimizzazione dei tempi e dei costi di costruzione.

La fabbricazione dei componenti costruttivi in fabbrica, assicura una maggiore efficienza nell'uso dei materiali, riducendo drasticamente gli scarti. La qualità di questi componenti costruttivi, inoltre, risulta migliore, con caratteristiche tecniche e prestazioni certificabili, poiché diversamente da quanto avviene nei cantieri tradizionali, questi vengono prodotti in stabilimenti dedicati, da personale qualificato, in ambiente controllato, in condizioni mantenute costantemente ottimali e con la strumentazione tecnica adeguata, similmente a quanto accade nella produzione industriale di qualsiasi prodotto tecnologico.

La produzione *off-site* permette l'efficientamento energetico di tutte le fasi del processo di costruzione, poiché la produzione dei componenti viene eseguita in fabbrica, secondo le strategie di risparmio energetico aziendale, mentre l'energia impiegata nel cantiere viene significativamente ridotta, dal momento che il cantiere di concezione tradizionale si trasforma in una rapida operazione di assemblaggio a secco delle parti costitutive. A tal proposito, è importante ricordare che la prefabbricazione è principalmente riconducibile a un processo di costruzione che non prevede l'uso di leganti umidi, ma l'assemblaggio a secco degli elementi costruttivi secondo sistemi di ancoraggio meccanici (viti, bulloni, incastri, ecc.).

L'assemblaggio a secco delle parti, secondo una precisa programmazione di progetto comporta diversi vantaggi, a partire dalla velocità e precisione delle operazioni di costruzione, nonché la precisa definizione dei tempi e dei costi di costruzione, la semplificazione e la possibilità di programmazione delle attività di manutenzione, fino ad aprire la strada a nuove e inedite possibilità. Tra queste ultime, è

importante evidenziare l'opportunità di attuare nel tempo adeguamenti funzionali degli edifici così concepiti, attraverso operazioni di sostituzione di elementi, per ottenere diverse configurazioni funzionali, o per l'installazione di altri componenti più performanti. Il montaggio a secco delle parti, tipico della costruzione prefabbricata, consente anche di concepire edifici reversibili, che alla fine della loro vita utile permettono un recupero selettivo dei materiali e un loro riciclaggio o riutilizzo, risolvendo i problemi generalmente legati allo smaltimento dei materiali da costruzione.

La prefabbricazione, in sintesi, è un mezzo per produrre edifici in modo programmato, veloce, preciso, efficiente e sicuro, così come avviene per ogni altro bene realizzato attraverso un processo industriale avanzato.

Charles J. Kibert nel testo "*Sustainable construction: green building design and delivery*"³, illustra i sette principi dell'architettura sostenibile, estrapolati dalla "First International Conference on Sustainable Construction", organizzata dal Conseil International du Bâtiment⁴:

- Ridurre il consumo di risorse;
- Riutilizzare le risorse;
- Utilizzare le risorse riciclabili;
- Proteggere la natura;
- Eliminare l'uso di prodotti tossici;
- Valutare i costi nel ciclo di vita;
- Qualità della costruzione.

3 C.J. Kibert, *Sustainable construction: green building design and delivery*, John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, NJ, 2012, p. 8.

4 C. J. Kibert, *Sustainable Construction: Proceedings of the First International Conference of CIB TG 16*, University of Florida, Center for Construction & Environment, Tampa, Florida, USA, 1994.

Da un confronto tra gli appena citati sette principi dell'architettura sostenibile, con le caratteristiche della prefabbricazione precedentemente descritte, si può constatare una quasi totale rispondenza tra i vantaggi derivanti dalle prassi della prefabbricazione con i requisiti richiesti a una costruzione sostenibile; a meno di alcuni accorgimenti facilmente adottabili con la prefabbricazione, come l'uso prevalente di materiali naturali per ridurre l'impatto ambientale degli edifici attraverso la riduzione delle emissioni tossiche.

Non c'è da sorprendersi dunque se alcune recenti ricerche confermino che l'abitazione prefabbricata sia inequivocabilmente il processo di costruzione più sostenibile⁵. Ad esempio, uno studio condotto da ricercatori dell'Università del Queensland confronta il grado di sostenibilità⁶ di abitazioni realizzate con diverse modalità costruttive attraverso misurazioni strumentali⁷.

Nonostante la prefabbricazione si presenti come una adeguata risposta all'emergente esigenza di costruire e vivere sostenibile, e nonostante i progressi nel campo della produzione industriale possano costituire una risposta alla gestione della complessità intrinseca dell'architettura contemporanea, essa è ancora impiegata prevalentemente per una gestione efficiente di cantieri di grandi opere specialistiche e non si è

5 M. Johnston, M. Guaralda, S. Sawang, Sustainable innovation for Queensland's housing design: A case study, *Construction Economics and Building* 14(4), 2014, pp. 11-31.

6 Il software di valutazione impiegato produce risultati in un'unità comune di misura (CO2e) che può essere confrontata e valutata a partire dai parametri inerenti: il consumo energetico, i materiali impiegati e l'efficienza termica (orientamento, ventilazione, guadagno / esclusione solare).

7 La ricerca svolge un'analisi comparativa tra tre case diverse, ognuna progettata e costruita con metodi diversi. Una casa progettata e costruita da un architetto su misura per i propri committenti, una casa commerciale realizzata da costruttori e una casa prefabbricata conformata per soddisfare quanto più possibile i committenti.

ancora affermata come pratica consolidata di costruzione per la ben più diffusa architettura residenziale.

Le ragioni di questa mancanza di evoluzione nelle prassi della costruzione, ignorando deliberatamente gli ultimi sviluppi della tecnologia che porterebbero a una concreta e fattiva risoluzione di molti dei problemi cogenti dell'architettura minore contemporanea, sono molteplici ed imputabili alle figure concorrenti al processo edilizio.

Per perseguire lo scopo di costruire secondo i principi della sostenibilità attraverso le prassi della prefabbricazione, i progettisti dovrebbero essere pronti a gestire un processo progettuale più complesso, non più di tipo consequenziale ma orientato alla progettazione integrata. La progettazione integrata è una progettazione di concezione olistica, in cui tutti i concorrenti al processo progettuale forniscono il proprio apporto simultaneamente, perché il progetto sia frutto di un pensiero complessivo in cui tutte le parti siano interdipendenti e concorrano sinergicamente al funzionamento dell'intero organismo architettonico. Facendo in modo, ad esempio, che l'edificio sia energeticamente efficiente e sostenibile, non solo perché sono stati impiegati impianti molto efficienti, ma perché i sistemi attivi (energeticamente efficienti) compensano e concorrono al benessere ambientale perseguito da strategie passive integrate nella progettazione stessa dell'edificio. In questo modo, la costruzione finale non sarà frutto di un'aggiunta di apporti indipendenti e di successive fasi di adeguamento del progetto che, nella maggior parte dei casi, snaturano la seppur valida concezione iniziale del progettista.

Naturalmente questo nuovo *modus operandi* comporta una grande spinta propulsiva nell'evoluzione della concezione architettonica a fronte di una complessità e una responsabilità maggiore a carico del progettista, che con le sue scelte progettuali deve riuscire a fare sintesi tra tutti gli

apporti disciplinari concorrenti al progetto stesso. Le tradizionali prassi costruttive, lente ed antieconomiche, svolte da personale non qualificato secondo una esecuzione approssimativa, vanifica l'efficacia delle scelte progettuali⁸. Quindi esse dovrebbero essere abbandonate, a favore di un processo industrializzato, a costo di cambiare profondamente l'organizzazione economica del settore delle costruzioni.

Un ultimo fattore che ha certamente osteggiato l'affermarsi della prefabbricazione, perlomeno nel nostro Paese, è costituito da una sorta di diffuso pregiudizio che la vede come tecnica utile alla costruzione di edifici di scarsa qualità e scarsa durata nel tempo, adeguati più a un uso industriale che abitativo. In realtà, come si è già cercato di spiegare, la prefabbricazione permetterebbe la costruzione diffusa ed economicamente accessibile di abitazioni di qualità superiore e dalle prestazioni prevedibili e certificabili. Una diffusione su larga scala di costruzioni dal basso impatto ambientale, meno inquinanti ed energeticamente più efficienti, permetterebbe, oltre ad un miglioramento diffuso della qualità della vita, un importante cambiamento nel settore delle costruzioni che lo porterebbe a dare un reale contributo alla riduzione delle emissioni tossiche e del consumo di energie non rinnovabili a livello globale.

L'affermarsi della prefabbricazione, tuttavia, contrariamente alla visione diffusa che la immagina come un mezzo per la produzione in serie di abitazioni tutte uguali, da riproporre indifferentemente in qualsiasi zona climatica e contesto socio-culturale, dovrebbe essere accompagnata da importanti riflessioni sulle soluzioni progettuali e tecnologiche da adottare, in modo che queste risultino

8 G. Trippa, Il valore di una architettura consapevole, in G. Minguzzi (a cura di), *Architettura sostenibile: Una scelta responsabile per uno sviluppo equilibrato*, Skira, Milano, 2008, pp. 57-58.

integrate ed adeguate rispetto a quelle della tradizione architettonica locale. Questo passaggio è importante, non solo come strumento di integrazione visiva, attraverso l'uso di materiali e forme che appartengono alla tradizione architettonica locale, ma soprattutto come mezzo per estrapolare dalla tradizione i principi di architettura passiva rispondenti al luogo e alle sue caratteristiche climatiche.

Coniugare una prassi costruttiva industrializzata con soluzioni architettoniche legate al contesto non è da considerarsi una forzatura né tantomeno una visione irrealizzabile. I nuovi sviluppi della tecnologia stanno infatti andando verso una totale personalizzazione dei prodotti industrialmente fabbricati, come si spiegherà meglio nel capitolo 9.

Di seguito verrà ripercorsa la storia della prefabbricazione architettonica dalle sue origini, attraverso i passaggi nevralgici e i progetti emblematici della sua evoluzione, fino ad arrivare al presente, con una selezione di progetti che illustrano gli ultimi sviluppi della ricerca sulla prefabbricazione, ed infine, delle sperimentazioni prototipali sul tema affrontate in prima persona dalla scrivente.

4.2 Cenni storici sulla prefabbricazione

La figura dell'architetto rinascimentale che incorporava in sé tutte le figure chiave dalla progettazione e della costruzione degli edifici, abbracciandone i vari saperi, comincia a vacillare con l'avvento dell'Illuminismo, che mette in discussione il pensiero tradizionale in ogni campo della conoscenza. In architettura si verifica la progressiva scissione tra le figure dell'architetto e dell'ingegnere. L'apertura dell'École Polytechnique, alla fine del XVIII secolo, e dell'École Centrale des Arts et Manufactures, nata all'inizio dell'800, fondarono la concezione dell'architetto moderno la cui preparazione accademica doveva essere incentrata sulla tecnica e sulla composizione. Su queste basi le École Polytechnique francesi, concepirono un nuovo modello di insegnamento basato su un differente modo di pensare l'architettura e la costruzione rispetto al passato⁹. Uno dei massimi teorici del tempo, Jean-Nicolas Louis Durand mette in discussione per la prima volta i principi della triade vitruviana, sostituendo a *firmitas*, *utilitas* e *venustas* i nuovi concetti di "economia" e "convenienza"¹⁰. Questo nuovo modo di concepire la costruzione determina a partire dalla seconda metà del XIX sec. in poi, una progressiva perdita di controllo sulla costruzione da parte della figura dell'architetto, a cui subentra la figura del costruttore (e dell'ingegnere), con un conseguente scollamento tra il

9 Le opere fondanti di questo pensiero sono il "Précis des leçons d'architecture" di Jean-Nicolas Louis Durand, e il "Traité théorique et pratique de l'Art de Bâtir" di Jean-Baptiste Rondelet.

10 Nelle sue *Lezioni*, Durand definisce la convenienza come «la logicità del programma e della costruzione delle parti dell'edificio», mentre con economia l'«adattamento in termini operativi di simmetria, regolarità e semplicità». J. N. L. Durand, *Précis des leçons d'architecture données a l'École Royale Polytechnique*, (2 voll), Paris, 1817-1819. [ed.ita.] J. N. L. Durand, *Lezioni di Architettura* (a cura di E. D'Alfonso), Città Studi Edizioni, Milano, 1986.

processo di progettazione architettonica e le decisioni di produzione¹¹. Con l'avvento della Rivoluzione Industriale, gli sviluppi della scienza e dei metodi di produzione industrializzati portano a una volontà diffusa di produrre meglio, più velocemente e in modo più economico. In architettura tutto ciò condusse, insieme all'introduzione di nuovi materiali come la ghisa prima e l'acciaio dopo, a nuovi approcci nella produzione architettonica, tra cui lo sviluppo delle prime tecnologie di prefabbricazione.

Quando la produzione del ferro divenne diffusa¹², si pensò di produrre industrialmente elementi architettonici in massa, che potevano essere combinati per costruire infinite soluzioni progettuali. Il primo celebre esempio di architettura prefabbricata in ferro è rappresentato dal Crystal Palace, di Joseph Paxton, costruito a Londra nel 1851 per ospitare la prima Esposizione Universale, dimostrando le potenzialità tecniche ed espressive della standardizzazione industriale (fig. 4.1).

La prefabbricazione in Gran Bretagna aveva già avuto importanti precedenti, nell'opera di colonizzazione operata in India, Medio Oriente, Africa, Australia, Nuova Zelanda, Canada e Stati Uniti tra il XVI e il XVII secolo. La necessità di erigere velocemente le proprie costruzioni nelle Colonie e la scarsa dimestichezza con i materiali presenti su questi territori, li portò a progettare e fabbricare strutture in legno in patria, pronte per essere spedite via mare e assemblate direttamente sul posto. Il primissimo esempio documentato in tal senso risale al 1624, con la costruzione delle case del villaggio di

11 R. E. Smith, *Prefab architecture: A guide to modular design and construction*, op. cit., 2011, pp. 21-46.

12 Nel 1767 Adam Darby I inizia in Inghilterra la produzione di massa di barre di ghisa. Nel 1779, sarà edificato il primo ponte in ghisa di 30,5 metri di luce a Coalbrookdale, sul fiume Severn nel Regno Unito.

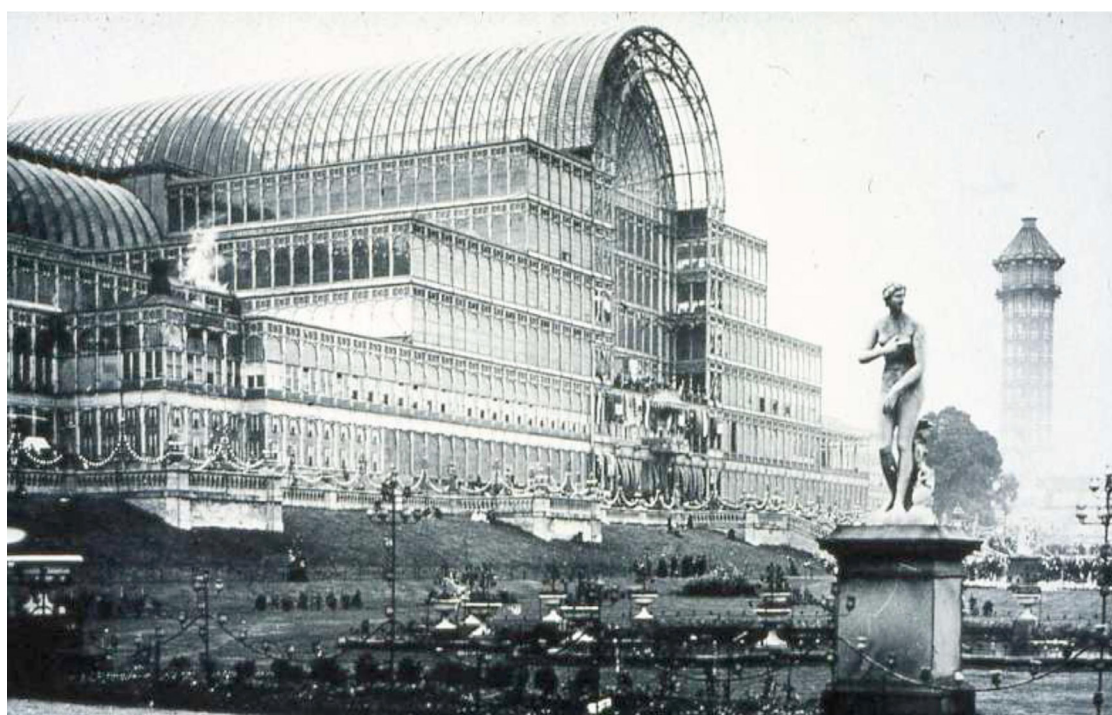


Fig. 4.1
Crystal Palace a Hyde
Park a Londra nel 1851.

pescatori di Cape Anne, nell'odierno Massachusetts¹³. Una evoluzione di queste prime elementari soluzioni architettoniche prefabbricate è rappresentata dal *Manning Portable Colonial Cottage for Emigrants*, progettato nel 1830 da John H. Manning, un costruttore londinese, per il figlio che stava emigrando in Australia (fig. 4.2). Questa abitazione era costituita da un sistema intelaiato in legno con pannelli di chiusura esterni, progettata per essere facilmente spedita e assemblata, con pezzi leggeri e maneggiabili anche da una sola persona; inoltre il sistema di montaggio prevedeva un solo tipo di avvitamento, per evitare di dover impiegare molti strumenti diversi¹⁴. Il sistema Manning ha anticipato gli odierni concetti di standardizzazione nella prefabbricazione¹⁵. Si presume inoltre, che la diffusione di questo tipo di costruzioni abbia

13 A. Arieff e B. Burkhart, *Prefab*, Gibbs Smith, Layton, 2002, p. 13.

14 R. E. Smith, *History of Prefabrication: A Cultural Survey*. In *Proceedings of the Third International Congress on Construction History*, 2009, pp. 1355-1364.

15 G. Herbert, *Pioneers of Prefabrication: The British Contribution in the Nineteenth Century*, Baltimore, Johns Hopkins University Press, 1978, pp. 11-12.

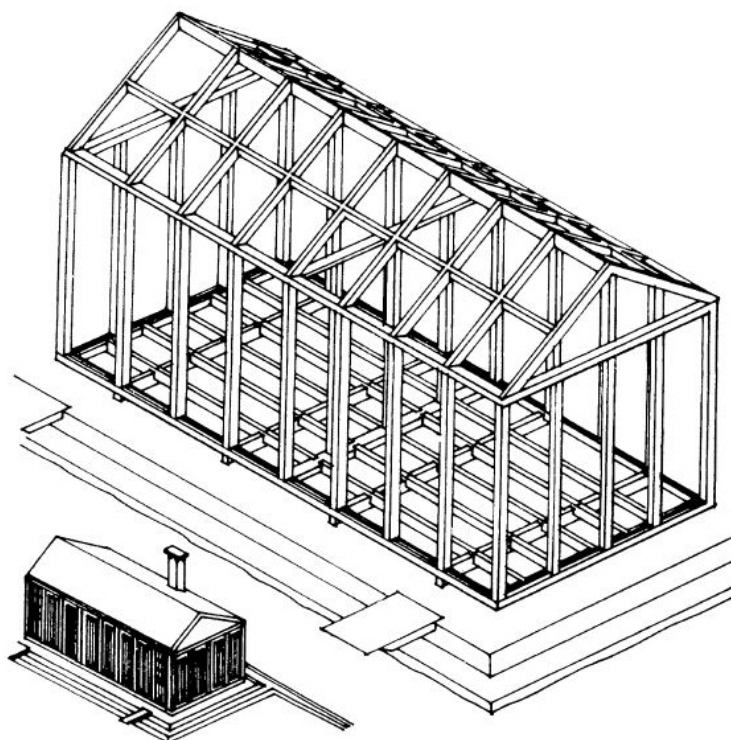


Fig. 4.2
Manning Portable
Colonial Cottage for
Emigrants, 1830.

influito sul successo del sistema costruttivo a *balloon frame* negli Stati Uniti, favorito dall'abbondante presenza di legno e dal rapido sviluppo industriale di questo Paese.

Si affermarono così tra il 1910 e il 1920 società di costruzioni, come la Aladdin Co. Ltd., la Gordon-Van Tine Co. e la Sears Modern Homes, da cui era possibile scegliere per posta case da catalogo, i cui componenti prefabbricati venivano trasportati via treno e consegnati alla stazione ferroviaria più vicina al cliente¹⁶. Descrivendo le attività della Gordon-Van Tine Company, Dale Wolicki afferma che con le cosiddette Kit Houses ogni singolo pezzo di legname veniva spedito già numerato e tagliato pronto per essere messo in opera, eliminando così la necessità di misurare e tagliare i pezzi in cantiere, e riducendo contemporaneamente lo spreco di tempo e di materiali. In questo modo, sono state costruite

16 L. Henry, "Mail-order Houses", *Canadian Museum of Civilization*.
Disponibile presso: <http://www.historymuseum.ca/cmhc/exhibitions/cpm/catalog/cat2104e.shtml#1222116> (ultimo accesso: Novembre 2017).

Micaela Colella

Architettura residenziale e sostenibilità

La casa prefabbricata mediterranea nell'era dell'Industria 4.0

Cap 4. La prefabbricazione come strumento per la sostenibilità



THE EDMONTON

If interested in this design, ask for alternative plan 127.

We want a square house—half shingled—and with a cottage roof. We want a Living Room, a Dining Room and a Kitchen on the First Floor, and FOUR Bedrooms and Bath on the Second Floor.

An astonishing number of people outline their requirements of a Home in just these terms; you will note that we have emphasized the "four" Bedrooms, as this is always an essential point. It is to meet this recognized need that we have catalogued the design Edmonton.

The Edmonton is something more than a house with a given capacity. In supplying seats for four guests in your drawing room, four kitchen chairs would probably serve all purposes of utility, but would hardly be in keeping with the other tasteful furnishings. So in the Edmonton, we have striven to satisfy other needs besides those of utility; it is an entirely charming home which will concede nothing of beauty or good taste in the most select of companies; it is a home of pretensions for a street of residents or will serve with an equal fitness as a Farm Home.

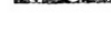
Among the Ranchers of the Western Provinces the specifications of Floor Plan commonly vary as to the first floor layout, where a large combination Kitchen and Dining Room is generally wanted with a Living Room, a First Floor Bedroom and a Hall.

To meet the needs of the Western Farmer we offer the following alternative to the Floor Plan shown. Without change in price we will move the partition between the Kitchen and the Dining Room seven feet to the right, making the Kitchen 10' x 11' and the Dining Room into a First Floor Bedroom 10' x 12'. The Living Room and Hall, and the Second Floor Plan would remain as before.

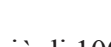
See column on page 8 and specifications on pages 11 to 13.



FIRST FLOOR PLAN



SECOND FLOOR PLAN



THIRTY

\$725⁰⁰ and Our FREE BUILDING PLANS
WILL BUILD, PAINT AND COMPLETE, READY FOR OCCUPANCY,
THIS INVITING \$1,100.00 SIX-ROOM COTTAGE.

We tell you on page 2 how we furnish, free, the plans for this house, or any of the many houses shown in this book.



MODERN HOME No. 115

With Wood Foundation, Not Excavated.

On the opposite page we illustrate a few of the materials we specify on this, our \$725.00 house.

The arrangement of this house is as follows:

FIRST FLOOR:

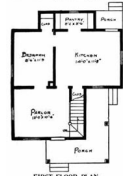
- Porch - - - 12 feet by 10 feet 6 inches
- Bedroom - - 8 feet 6 inches by 11 feet 9 inches
- Kitchen - - 14 feet by 11 feet 9 inches
- Pantry - - 8 feet 2 inches by 3 feet 6 inches

SECOND FLOOR:

- Front Bedroom, 8 feet 3 inches by 10 feet 6 inches
- Rear Bedroom, 8 feet 6 inches by 11 feet 9 inches
- Large Attic - - 14 feet by 11 feet 9 inches

All bedrooms have roomy closets.

Stair - Width, 24 feet; length, 28 feet, exclusive of porch.



FIRST FLOOR PLAN



SECOND FLOOR PLAN

GOOD MATERIALS MAKE GOOD HOUSES

When planning our houses it is a question of how good, not how cheap. This statement is easily proven by referring to some of the materials we illustrate and describe on opposite page. In using our plans, you take no risk of getting poor materials, such as might occur if the work were done by some unscrupulous contractor. The mill work specified is the best in each grade. You take no risk when building from our plans, as we positively guarantee every piece of material we furnish, and if each piece is not entirely satisfactory, it may be returned and your money will be refunded, together with all transportation charges.

BOOK OF MODERN HOMES

—9—

Sears, Roebuck & Co., Chicago, Ill.

più di 100.000 case negli Stati Uniti tra il 1908 e il 1940¹⁷. Il fallimento delle compagnie che fornivano case per posta (*mail order homes*) è stato determinato dalla Grande Depressione conseguente la crisi del 1929, che rese impossibile il pagamento dei mutui da parte degli acquirenti. Anche se queste abitazioni erano realizzate seguendo tutti i principi della prefabbricazione, la loro vera natura era nascosta da un'estetica tradizionale, utilizzando finiture e materiali tipici dell'architettura di derivazione non industriale¹⁸.

A partire dal 1930 è possibile individuare i primi esempi di abitazioni prefabbricate prodotte con materiali tipicamente industriali e basate su una nuova concezione estetica coerente con la loro natura industriale.

17 K. C. Stevenson, H. W. Jandl, *Houses by mail: A guide to houses from Sears, Roebuck and Company*, John Wiley & Sons, New York, 1986.

18 B. Bergdoll, "Home Delivery: Viscidities of a Modernist Dream from Taylorized Serial Production to Digital Customization". In B. Bergdoll, P. Christensen (a cura di), *Home Delivery: Fabricating the Modern Dwelling*, New York, Museum of Modern Art, 2008, p. 48.

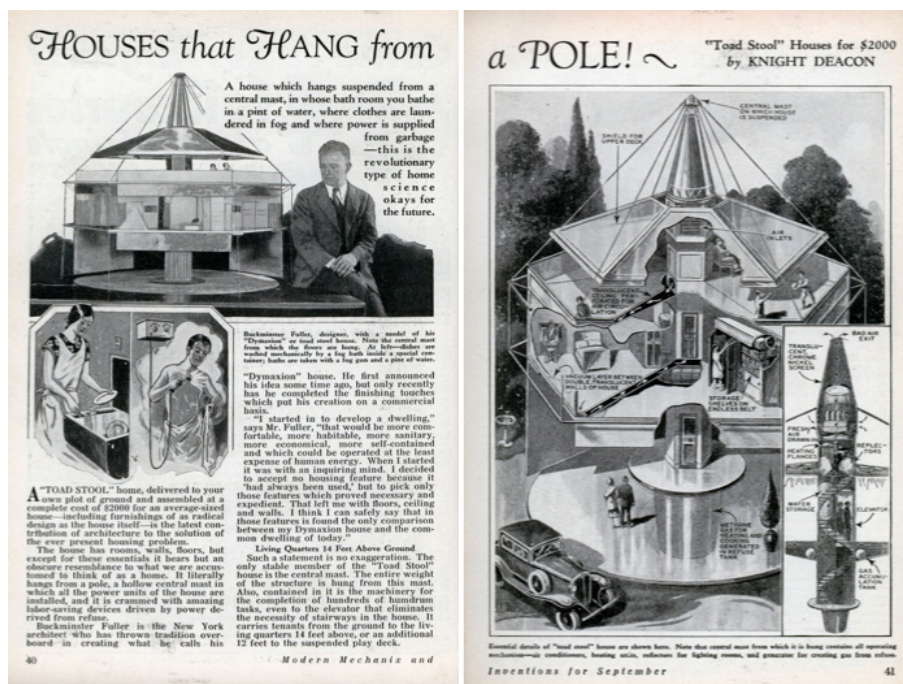


Fig. 4.5
 Primo progetto della
 Dymaxion House, 1930.

Un esempio paradigmatico è rappresentato dalla Dymaxion House, progettata tra il 1928 e il 1930 da Buckminster Fuller. Il primo prototipo era una casa esagonale di 100 m² basata su un palo portante centrale che sosteneva, attraverso un sistema di cavi, il solaio di copertura e quello di calpestio, che era dunque sollevato da terra. In questo modo, lo spazio interno era totalmente libero e poteva essere organizzato in modo flessibile dagli abitanti della casa. Il progetto, pensato per essere costruito in alluminio, prevedeva l'installazione di turbine a vento sul tetto e un sistema di cisterne per la raccolta e il riciclaggio dell'acqua piovana¹⁹. Il progetto Dymaxion, dopo una prima fase di sviluppo, è stato accantonato da Fuller e ripreso soltanto nel 1944, quando la carenza post-bellica di alloggi lo spinse a sviluppare ulteriormente il progetto, progettando i prototipi Barwise e Danbury, tuttavia mai prodotti in serie. Fuller progettò e brevettò in questi anni anche una

19 G. Merin, AD Classic: The Dymaxion House / Buckminster Fuller, ArchDaily, 2013. Disponibile presso: <https://www.archdaily.com/401528/ad-classics-the-dymaxion-house-buckminster-fuller> (ultimo accesso: Novembre 2017).

Micaela Colella

Architettura residenziale e sostenibilità

La casa prefabbricata mediterranea nell'era dell'Industria 4.0

Cap 4. La prefabbricazione come strumento per la sostenibilità

Fig. 4.6

Prototipo della
Dymaxion House
(fonte: Daderot via
Library of Congress:
U.S. Farm Security
Administration).



Fig. 4.7

La Wichita House, 1948.



zona bagno completamente prefabbricata, come parte del progetto complessivo Dymaxion. Nel 1948, William Graham acquista e combina i due prototipi, elaborando la Wichita House, una versione a pianta circolare con blocco servizi centrale e struttura leggera completamente in alluminio, abitata dalla sua famiglia fino agli anni '70 (negli anni '90 la casa è stata donata al The Henry Ford Museum).

Nel secondo dopoguerra con il ritorno dei soldati statunitensi in patria, si crea una emergenza abitativa tale che, con l'emanazione del Veteran Emergency Housing Act (VEHA) nel 1946, il governo federale prevede

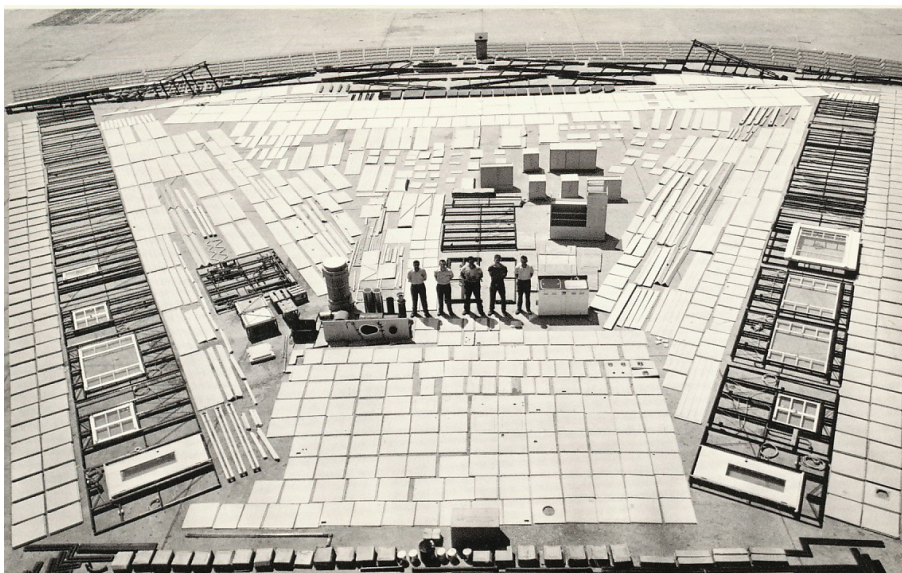


Fig. 4.8-9-10
Immagini del trasporto,
del montaggio e di
una delle case finite,
prodotte dalla Lustron
(fonte: National
Trust for Historic
Preservation).

la costruzione di 850.000 case prefabbricate in meno di due anni²⁰. Anche se questa iniziativa non sortì gli effetti sperati, incentivò comunque diverse compagnie a produrre nuovi modelli di case prefabbricate. Tra queste compagnie, le case prodotte dalla Lustron Corporation sono tra gli esempi più celebri e significativi. Le case Lustron erano case prefabbricate costituite da pannelli in acciaio smaltato molto resistenti²¹. Queste abitazioni, oltre a costare meno di una casa costruita con mezzi tradizionali (circa il 25% in meno), non necessitavano delle periodiche riparazioni e verniciature richieste dalle tradizionali case in legno, consentendo di abbattere buona parte dei costi di manutenzione. Rispetto alle società concorrenti, la Lustron Corporation la cui linea produttiva era stata adattata dalla precedente produzione di stazioni di servizio, si distinse per l'efficienza nel processo di assemblaggio facilitato dalla modularità delle sue abitazioni, i cui spazi interni erano stati progettati, da Morris Beckman, in ottica moderna sfruttando strategicamente gli spazi e facilitandone la pulizia. Ogni casa era costituita da circa 3300 pezzi, tutti consegnati su un unico mezzo a rimorchio e assemblati (su una fondazione di calcestruzzo) da un team di montaggio in circa 360 ore di lavoro²². Vennero prodotti tre modelli di abitazione, per un totale di 2.498 case costruite dalla società tra il 1948 e il 1950, di cui circa 2000 sono ancora esistenti ed abitate, seppur abbiano subito qualche opera di adeguamento ed integrazione²³.

20 R. E. Smith, *Prefab architecture: A guide to modular design and construction*, op. cit., p. 13.

21 C. G. Strandlund, *Architectural panel construction* (brevetto n. US 2416240 A), registrato il 2 Settembre 1945, pubblicato il 18 Febbraio 1947. Disponibile presso: <https://www.google.com/patents/US2416240> (ultimo accesso: Novembre 2017).

22 Mitchell, Robert J. "Whatever Happened to Lustron Homes?" *APT Bulletin*, Vol. 23, No. 2, 1991: 44-53.

23 T. T. Fetters, *The Lustron home: The history of a postwar prefabricated*



Nel 1945, è stato avviato, sempre negli Stati Uniti, un esperimento chiamato The Case Study House Program, sponsorizzato dalla rivista Arts & Architecture, che prevedeva la costruzione di case prototipo a firma di grandi architetti, come Richard Neutra, Pierre Koenig e Charles e Ray Eames. Le abitazioni dovevano essere prefabbricate, a basso costo, facilmente costruite e progettate con un forte legame con il paesaggio²⁴. Delle 36 case progettate, tra il 1945 e il 1966 ne vennero costruite 26, la maggior parte delle quali non ha mai visto la nascita di una propria gemella. Nonostante ciò, questi prototipi rappresentano ancora oggi delle icone di abitazione prefabbricata, in quanto massima espressione architettonica dell'industrializzazione dell'epoca.

Fig. 4.11
Case Study House n° 8
di Charles e Ray Eames
(fonte: Archilogic).

housing experiment, McFarland, Jefferson, NC, USA, 2001.

24 R. E. Smith, *Prefab architecture: A guide to modular design and construction*, op. cit., p. 34.

Micaela Colella

Architettura residenziale e sostenibilità

La casa prefabbricata mediterranea nell'era dell'Industria 4.0

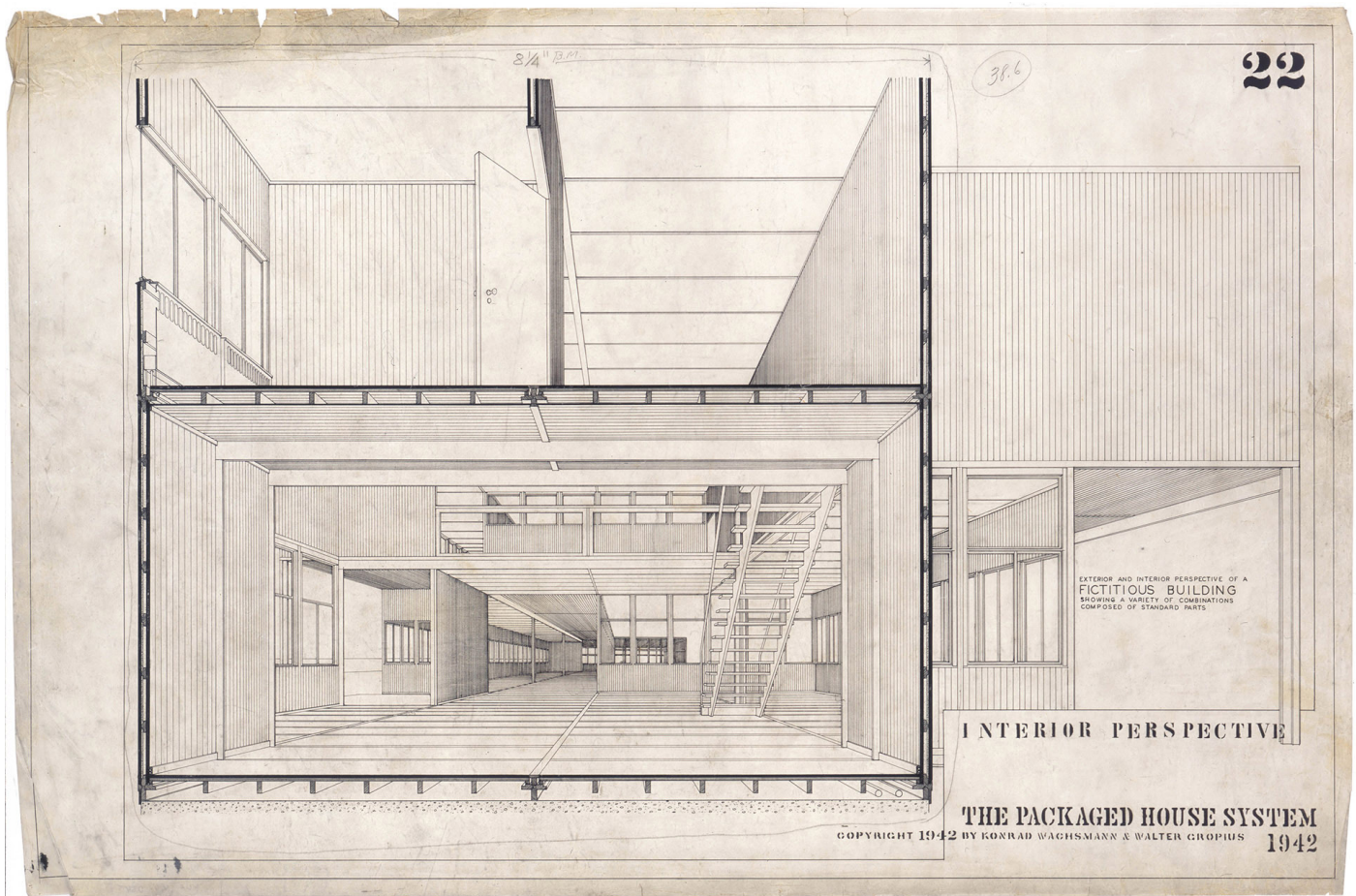
Cap 4. La prefabbricazione come strumento per la sostenibilità



Fig. 4.12
Case Study House n° 22
di Pierre Koenig (fonte:
Taschen).

Quindi, l'interesse per la progettazione e costruzione di case prefabbricate inizialmente aveva coinvolto soprattutto le compagnie di costruzioni, che avevano interesse nel fornire una risposta alla forte richiesta abitativa del secondo dopoguerra, tuttavia con il tempo si registrò un crescente interesse anche da parte di grandi nomi dell'architettura moderna, che sostennero fortemente la prefabbricazione come mezzo per ottimizzare il processo di costruzione e rendere le abitazioni economicamente più accessibili.

Tra coloro che si impegnarono nella progettazione di soluzioni abitative prefabbricate al fine di una loro diffusione di massa, si può certamente ricordare Walter Gropius, che con Konrad Wachsmann progettò e brevettò nel 1942 un sistema costruttivo per la realizzazione



Sopra:

Fig. 4.13

The Packaged House System, 1942 (fonte: Akademie der Künste, Berlin, Konrad-Wachsmann-Archiv).

Accanto:

Fig. 4.14

Fasi di realizzazione del prototipo del Packaged House System, 1942-1952 (fonte: Harvard Art Museums).

di case prefabbricate modulari²⁵. Questo progetto, noto con il nome di “Packaged House”, è basato su un sistema aperto di 10 pannelli tipo della dimensione di 40”x120”, ed è conosciuto principalmente per la sua ricchezza concettuale, poiché non è mai stato completamente eseguito né ha riscosso un successo commerciale²⁶.

Anche il francese Jean Prouvé dimostrò un fervente interesse per la prefabbricazione, con la progettazione di diverse soluzioni prefabbricate in alluminio, tra cui la “La Maison Tropicale” (1951), “La Maison du Sahara” (1958), e il celebre prototipo per stazioni di servizio (1953), oggi ricostruito al campus Vitra a Weil am Rhein. Nel 1949, Prouvé progettò un intero complesso di 14 case sperimentali a Meudon, vicino Parigi. Queste case erano realizzate con una struttura intelaiata in acciaio, pannelli di chiusura e copertura in legno, tutto progettato secondo una logica modulare e una produzione in fabbrica.

D’altro canto vi erano architetti come Mies van der Rohe che hanno usato la prefabbricazione non come strumento per la diffusione di massa delle loro opere ma come strumento atto alla realizzazione di opere uniche, rese economicamente più accessibili e tecnicamente ineccepibili attraverso l’assemblaggio di componenti industrialmente prodotti. Mies van der Rohe, con opere come casa Farnsworth (ma anche il padiglione di Barcellona, il Neue Nationalgalerie di Berlino e molte altre) ha fornito il suo contributo elaborando una nuova concezione estetica che, seppur espressamente frutto delle nuove tecnologie, viene universalmente condivisa, diventando un nuovo punto di riferimento

25 K. L. Wachsmann, W. Gropius, *Prefabricated building* (brevetto n. US 2355192 A), depositato il 30 Maggio 1942, pubblicato l’8 Agosto 1944. Disponibile presso: <https://www.google.it/patents/US2355192> (ultimo accesso: Novembre 2017).

26 A. Imperiale, *An American wartime dream: the Packaged House system of Konrad Wachsmann and Walter Gropius*, *ACSA Fall Conference*, Philadelphia, 2012.



Fig. 4.14
Prototipo della stazione
di servizio di Jean
Prouvé (fonte: Vitra).

Nella pagina accanto:
Fig. 4.15
Casa Farnsworth (fonte:
artribune).

per le successive generazioni di architetti.

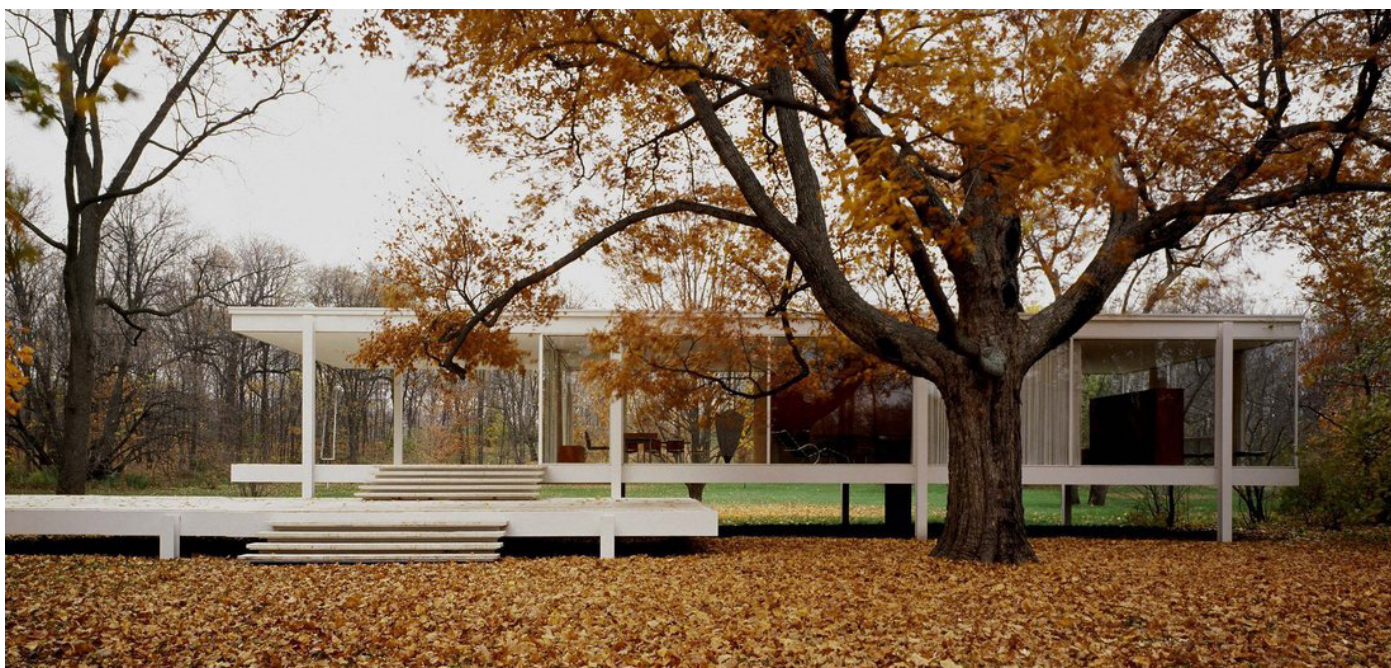
Di notevole interesse è il caso della ricostruzione di alloggi in pietra portante successiva alla Seconda Guerra Mondiale in Francia. Stefano Zerbi afferma che la tecnica costruttiva della muratura portante in pietra, che aveva perso attrattiva dopo la Prima Guerra Mondiale a causa dell'affermarsi delle strutture in ossatura di calcestruzzo armato o acciaio, torna in auge con le necessità imposte dalla ricostruzione, che «permisero di rivalutare la muratura grazie alla sua facilità di esecuzione e alle risorse ridotte necessarie alla sua realizzazione. Il protagonista di questa rinascita fu Pol Abraham, presidente della Commissione per la Normalizzazione della Muratura, che promosse un ritorno a questa tecnica attraverso un approccio industriale e scientifico. [...] L'industrializzazione dei processi produttivi e il ricorso a elementi normalizzati ripetibili sembrava essere la sola risposta possibile alla domanda crescente di nuovi edifici. [...] la normalizzazione, nel caso della muratura, si concretizza con il ricorso alle dimensioni modulari applicate a un numero ridotto di elementi, che devono adattarsi alle dimensioni normalizzate degli edifici. Gli elementi devono essere prefabbricati e la normalizzazione deve essere applicata anche ai metodi di messa in opera, per ridurre i tempi di realizzazione e ogni forma di

Micaela Colella

Architettura residenziale e sostenibilità

La casa prefabbricata mediterranea nell'era dell'Industria 4.0

Cap 4. La prefabbricazione come strumento per la sostenibilità



improvvisazione e ritocchi²⁷».

Paradigmatica in tal senso è l'opera di Fernand Pouillon, che costruì interi complessi residenziali, in Francia e in Algeria, in pietra portante impiegata in blocchi di grandi dimensioni, che rendevano la costruzione rapida, precisa ed economica. Pouillon si avvale di nuovi sistemi di lavorazione e posa in opera dei blocchi di pietra, che prevedevano l'estrazione e la squadratura in blocchi regolari già in cava con un sistema meccanizzato. I blocchi in pietra si trasformarono così in un prodotto industrializzato, che egli stesso chiamava “pietra prefabbricata”, in grado di erigere costruzioni fino a undici piani di altezza e competere così con il sistema intelaiato in calcestruzzo armato gettato in opera. Grazie a questo e alla sua capacità di organizzazione del cantiere, Pouillon riuscì a rendere le sue costruzioni in pietra massiva competitive sul mercato²⁸.

27 S. Zerbi, La pietra “pretagliata” e la ricostruzione in Francia dopo la Seconda Guerra Mondiale. In «Architettura di Pietra Journal», 22 Gennaio 2010. Disponibile presso: <http://www.architetturadi Pietra.it/wp/?p=3711> (ultimo accesso: Novembre 2017).

28 V. Pavan, Costruzione e materiali nell'opera di Fernand Pouillon. In «Architettura di Pietra Journal», 9 Dicembre 2009. Disponibile presso: <http://www.>

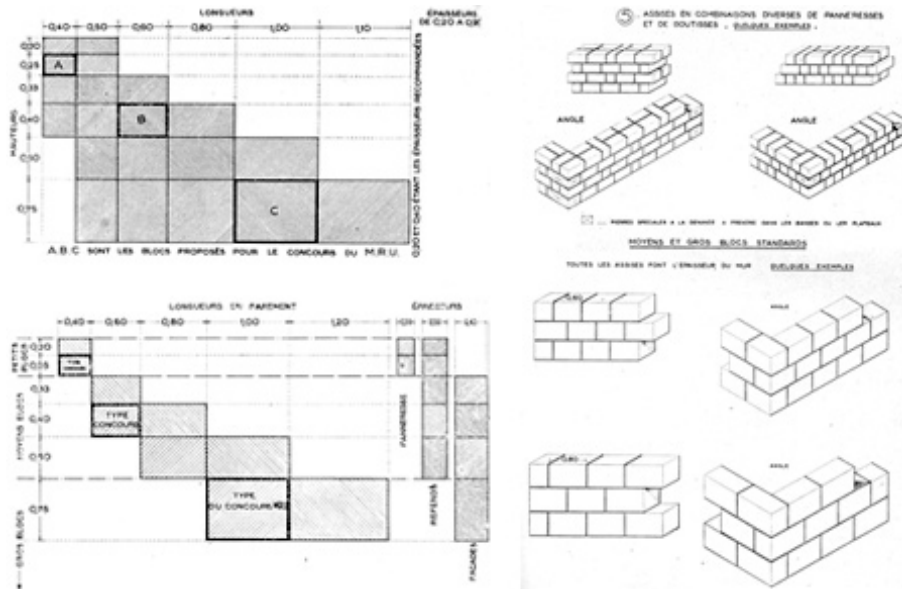


Fig. 4.16
 Estratto di una tabella per stabilire le dimensioni dei conci e schemi di apparecchiatura muraria (fonte: Germain, J. éd. 1950).



Fig. 4.17
 Complesso residenziale Climat de France, Algeri, 1954 (fonte: V. Pavan, 2009).

Negli anni si sono susseguite proposte di case progettate e costruite secondo i criteri della prefabbricazione con esiti molto diversi tra loro. Tra queste esperienze si ricordano la Zip-up House di Richard Rodgers del 1968 e la Yacht House di Richard Horden del 1983. Nel 1967, in occasione dell'Expo Mondiale a Montreal, Moshie Safdie progetta il complesso residenziale "Habitat", composto da 158 abitazioni in 354 unità modulari prefabbricate in calcestruzzo armato prefabbricato. I moduli furono impilati uno sull'altro e i vuoti tra loro hanno formato giardini all'aperto e ponti di collegamento²⁹.

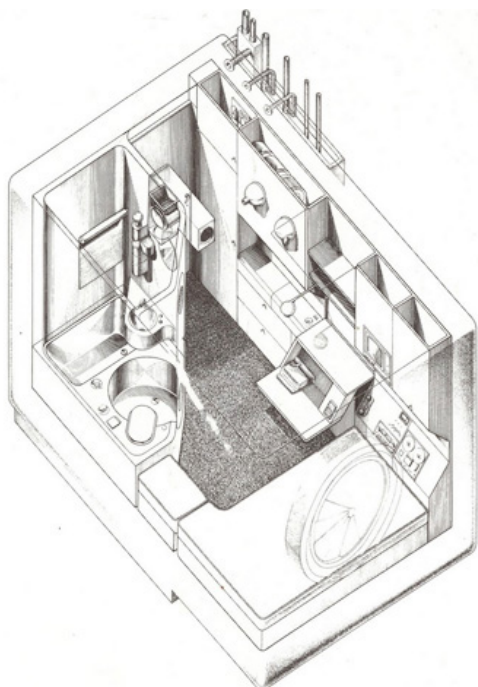
Verso la fine degli anni Sessanta gli architetti del Movimento Metabolista giapponese utilizzarono sistemi modulari prefabbricati per costruire edifici a più piani. Il progetto più noto in tal senso è certamente la Nakagin Capsule Tower dell'architetto nipponico Kishō Kurokawa del 1972. L'edificio è composto da una struttura portante centrale in calcestruzzo armato e acciaio a cui sono ancorate delle capsule abitative minime totalmente prefabbricate, sovrapposte tra loro.

Nel 1978 Renzo Piano, in collaborazione con Peter Rice, progetta e realizza la Casa Evolutiva a Bastia Umbra, un'abitazione costituita da elementi prefabbricati, la cui particolarità risiede nella possibilità di raddoppiare la superficie abitabile interna grazie alla capacità di movimentare la facciata facendola scorrere su appositi binari.

Dalle origini della prefabbricazione ad oggi non si è mai verificata una forte battuta d'arresto sulle sperimentazioni, la creazione di prototipi e la progettazione di case con i metodi e i mezzi della prefabbricazione.

architetturadi Pietra.it/wp/?p=3503 (ultimo accesso: Novembre 2017).

29 R. E. Smith, *Prefab architecture: A guide to modular design and construction*, op. cit., p. 35.



Tuttavia, nei primi anni Duemila il tema dell'abitazione prefabbricata ha visto un nuovo forte impulso grazie all'affermazione e alla diffusione delle tecnologie digitali. La nuova spinta innovatrice in questo campo della ricerca architettonica è stata promossa e incoraggiata da importanti iniziative, a partire dalla pubblicazione nel 2002 del libro *Prefab*³⁰, di Allison Arieff e Bryan Burkhart, che per la prima volta mette a sistema l'argomento, ripercorrendo la storia degli alloggi prefabbricati e presentando una serie di abitazioni che rappresentavano lo stato dell'arte della casa prefabbricata in quel momento.

Un altro importante segnale è stato lanciato dall'organizzazione di alcune importanti esposizioni, come la mostra intitolata "Some Assembly Required: Contemporary Prefabricated Houses" curata da Andrew Blauvelt, in esposizione al Walker Art Center di Minneapolis dall'8 Dicembre 2005 al 26 Marzo 2006 e al Vancouver Art Gallery

Figg. 4.18-19-20
Nakagin Capsule Tower, 1972. Spaccato assonometrico e foto interna di uno dei moduli e vista esterna (fonte: worldarchitecture).

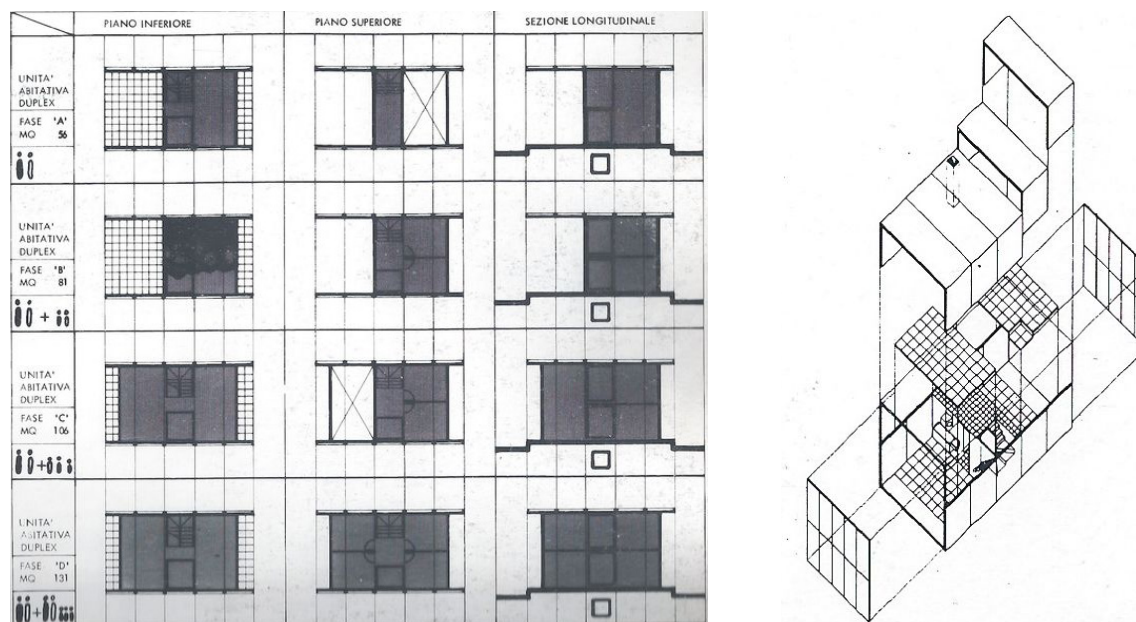
30 A. Arieff, B. Burkhart, *Prefab*, Gibbs Smith, Layton, 2002.

Micaela Colella

Architettura residenziale e sostenibilità

La casa prefabbricata mediterranea nell'era dell'Industria 4.0

Cap 4. La prefabbricazione come strumento per la sostenibilità



Figg. 4.21-22
Casa Evolutiva, Renzo
Piano, 1978 (fonte:
RPBW).

fino al 4 Settembre 2006. Questa esposizione rappresenta una denuncia contro il pensiero comune secondo cui le case prefabbricate sono costituite da strutture economiche di bassa qualità da utilizzare al più come estensione della propria abitazione principale. Nella mostra queste idee vengono confutate, esponendo progetti di alloggi prefabbricati contemporanei di grande qualità tecnica ed estetica, e promuovendo la prefabbricazione come mezzo per l'architetto, per tornare a giocare un ruolo determinante nel campo della progettazione architettonica, proponendo soluzioni economicamente competitive rispetto alle abitazioni costruite con i mezzi del cantiere tradizionale, ma qualitativamente imparagonabili³¹.

Nel 2008, dal 20 Luglio al 20 Ottobre, l'esposizione "Home Delivery: Fabricating the Modern Dwelling" curata da Barry Bergdolle Peter Christensen, presso il Museum of Modern Art (MOMA) di New York,

31 M. Swackhamer, "Some Assembly Required: Contemporary Prefabricated Houses-Edited by Andrew Blauvelt", *Journal of Architectural Education*, 60(2), 2006, pp. 68-69.

accompagnata dalla relativa pubblicazione³², segna un momento chiave, esponendo 84 progetti architettonici, che riassumono 180 anni di storia della prefabbricazione con filmati, modelli architettonici, disegni originali, fotografie, brevetti e ricostruzioni parziali. Lo scopo di questa mostra era illustrare come la casa prefabbricata rappresenti non solo un momento di riflessione sulla casa come composizione replicabile, ma anche uno sprono alla riflessione sulla sostenibilità dei processi di costruzione e sugli sviluppi della tecnologia e dell'uso dei materiali³³. Dunque nei primi anni Duemila, con le esperienze di cui si è parlato, viene messa a sistema la storia della prefabbricazione e gli si dà definitivamente la dignità di un processo costruttivo che, in seguito probabilmente all'esempio dei pionieri inglesi, ha permesso la costruzione di una importante parte del patrimonio architettonico di Paesi come gli Stati Uniti, il Canada e l'Australia. L'affermarsi in questi anni delle tecnologie digitali, inoltre, si presenta come un'occasione per potenziare il ventaglio dei vantaggi offerti da questo processo costruttivo che garantisce sia un alto grado di prevedibilità e controllo dei processi che l'hanno sempre contraddistinto, che un certo grado di personalizzazione degli esiti.

32 B. Bergdoll, Barry, P. Christensen, *Home delivery: fabricating the modern dwelling*, The Museum of Modern Art, New York 2008.

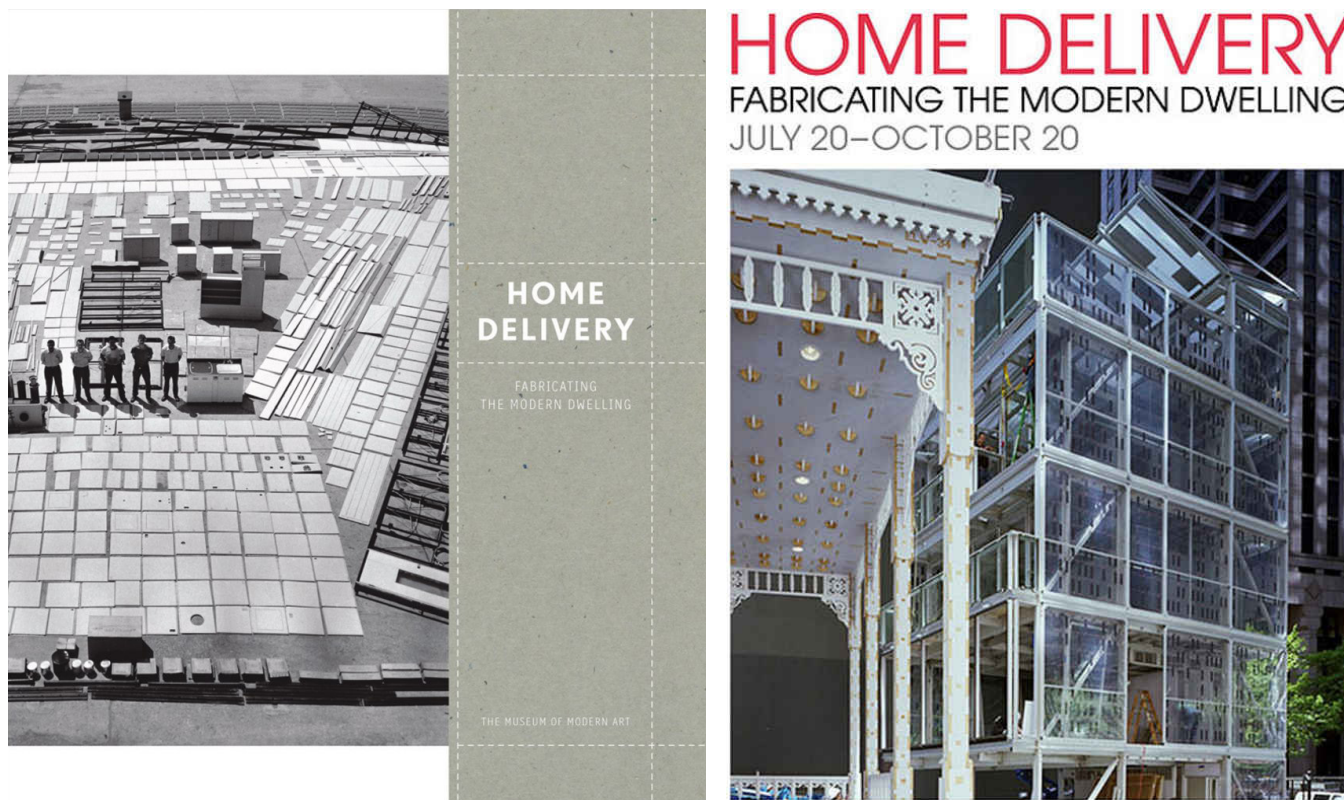
33 Moma, *Home Delivery: Fabricating the Modern Dwelling*, 2008. Disponibile presso: <https://www.moma.org/calendar/exhibitions/50> (ultimo accesso: Novembre 2017).

Micaela Colella

Architettura residenziale e sostenibilità

La casa prefabbricata mediterranea nell'era dell'Industria 4.0

Cap 4. La prefabbricazione come strumento per la sostenibilità



Figg. 4.23-24
“Home Delivery:
Fabricating the Modern
Dwelling”, copertina
della pubblicazione e
locandina della mostra,
2008 (fonte: MoMA).

4.3 La ricerca contemporanea sull’abitazione prefabbricata

La mostra dedicata dal MOMA nel 2008 può essere considerata il momento da cui riparte con un nuovo impulso innovatore la ricerca sull’abitazione prefabbricata. In questo rilancio della ricerca sulle case prefabbricate hanno assunto un ruolo importante le sperimentazioni applicate nei centri di ricerca di tutto il mondo.

Da un esame poco accurato di queste recenti ricerche si potrebbe affermare che, sperimentazioni apparentemente simili tra loro hanno condotto, in realtà, ad esiti molto differenti. Tuttavia, già da una prima fase di studio si può evincere come le importanti differenze tra questi esiti siano originate da declinazioni diverse del tema. Più specificatamente, si può constatare che al variare dei presupposti della ricerca svolta cambia notevolmente l’esito raggiunto. La prefabbricazione delle

soluzioni abitative può interessare un ampio ventaglio di condizioni differenti. Passando da uno studio finalizzato alla progettazione di soluzioni abitative temporanee e d'emergenza a studi finalizzati alla definizione di abitazioni gradualmente più stanziali e contestualizzate, la relativa risposta progettuale deve tener conto di parametri diversi.

È possibile, così, distinguere tra almeno quattro diversi filoni di ricerca, in cui si è ritenuto necessario, per far ordine e chiarezza, catalogare la molteplicità delle ricerche sul tema.

I filoni di ricerca individuati considerando le principali declinazioni di tale ricerca, sono:

- **Il rifugio temporaneo:** costruzione leggera, facilmente trasportabile e assemblabile, costruita in risposta alla necessità di un elevato numero di abitazioni temporanee per fronteggiare uno stato di emergenza;
- **L'abitazione minima:** costruzione dalle dimensioni ridotte, generalmente costituita da un unico modulo abitativo capace di rispondere alle sole funzioni minime dell'abitare, costruita in risposta all'esigenza di abitazioni stagionali o dalla frequenza fortuita;
- **La casa prefabbricata reversibile:** costruzione realizzata attraverso l'assemblaggio a secco di elementi prefabbricati, costituendo una risposta architettonica sostenibile, efficiente e reversibile alle contemporanee esigenze dell'abitare;
- **La casa prefabbricata stabile:** costruzione realizzata con elementi prefabbricati, costituendo una risposta architettonica sostenibile alle esigenze contemporanee dell'abitare, nel rispetto dei principi della casa passiva e di aderenza alla cultura architettonica del luogo.

La tabella 1 mette in relazione i principali parametri progettuali richiesti ad una abitazione prefabbricata sostenibile con le quattro principali categorie di applicazione. Dalla tabella si può evincere che, nonostante

si tratti pur sempre di soluzioni abitative prefabbricate sostenibili, i parametri necessari per la progettazione di ognuna delle quattro categorie possono essere molto diversi. Ad esempio, ad un rifugio temporaneo, la cui utilità si lega ad uno stato di emergenza, generalmente dovuto ad una calamità naturale, vengono richiesti parametri come una elevata economicità e velocità di costruzione, che può andare anche a scapito di un elevato grado di comfort abitativo e quasi certamente dell'integrazione visiva nel contesto. Allo stesso modo, un'abitazione prefabbricata, che sia permanente o potenzialmente reversibile, deve rispondere a delle caratteristiche di qualità del comfort abitativo, di prestazioni energetiche e di integrazione ambientale e visiva, che non sarebbero mai richieste ad un rifugio temporaneo o ad una abitazione minima.

Tabella 1

Rifugio Temporaneo	Abitazione minima	Casa prefabbricata reversibile	Casa prefabbricata stabile
Velocità di montaggio	Velocità di montaggio	Velocità di montaggio	Velocità di montaggio
Replicabilità	Replicabilità	Replicabilità	Replicabilità
Economicità	Economicità	Economicità	Economicità
Leggerezza	Leggerezza	Leggerezza	Leggerezza
Trasportabilità	Trasportabilità	Trasportabilità	Trasportabilità
Integrazione bioclimatica	Integrazione bioclimatica	Integrazione bioclimatica	Integrazione bioclimatica
Integrazione visiva	Integrazione visiva	Integrazione visiva	Integrazione visiva
Dimensioni ridotte	Dimensioni ridotte	Dimensioni ridotte	Dimensioni ridotte
Temporaneità	Temporaneità	Temporaneità	Temporaneità
Reversibilità	Reversibilità	Reversibilità	Reversibilità
Efficienza energetica	Efficienza energetica	Efficienza energetica	Efficienza energetica
Comfort abitativo	Comfort abitativo	Comfort abitativo	Comfort abitativo

4.3.1 Il rifugio temporaneo

Il rifugio temporaneo è una soluzione abitativa progettata per fronteggiare uno stato di emergenza in cui è richiesta la costruzione di un considerevole numero di ripari in un lasso di tempo molto breve. Questa condizione rappresenta generalmente uno stato temporaneo, immediatamente successivo a una catastrofe naturale, quindi le soluzioni architettoniche progettate per rispondere a questa condizione eccezionale, devono possedere requisiti anch'essi fuori dal comune. In particolare, in questo caso non risulta necessaria la presenza di tutte le funzioni di una abitazione canonica, come gli spazi dedicati alla convivialità, perché in uno stato di emergenza queste funzioni sono spesso svolte in ampi spazi comuni appositamente adibiti, mentre al singolo rifugio è richiesta principalmente una protezione dalle condizioni dell'ambiente esterno e la creazione di uno spazio privato per la singola famiglia. Per queste ragioni, i parametri di cui tener conto per la progettazione di rifugi temporanei saranno incentrati sulla facilità di trasporto e rapidità di assemblaggio e, conseguentemente, sulla compattezza e leggerezza delle parti componenti.

Dati questi presupposti, la prefabbricazione è stata riconosciuta dalle ricerche e sperimentazioni applicate come un incomparabile mezzo per la realizzazione di queste soluzioni temporanee, poiché limita la costruzione al solo assemblaggio di componenti già finiti. Dunque la ricerca in questo ambito si è concentrata nello studio di tecniche di assemblaggio sempre più semplici ed intuitive, per consentire anche a persone prive di competenze specifiche di partecipare alla costruzione dei villaggi temporanei e allo

Micaela Colella

Architettura residenziale e sostenibilità

La casa prefabbricata mediterranea nell'era dell'Industria 4.0

Cap 4. La prefabbricazione come strumento per la sostenibilità

stesso tempo nella messa a punto di soluzioni costruttive in grado di fornire un buon livello di comfort interno a fronte di un basso impegno economico.

Figg. 4.25-26

Shigeru Ban Architects,
New Temporary House,
2013 (fonte: Shigeru
Ban Architects).



Better Shelter

Tipologia: rifugio temporaneo

Progettista/gruppo di ricerca:

Better Shelter con Ikea Foundation e l'UNHCR

Anno: 2015

Materiali principali: telaio in acciaio, rivestimento in plastica riciclata

Dimensioni: 5,68 x 3,32 x 2,83 metri

Quello sul rifugio temporaneo è un ambito di ricerca molto sviluppato negli ultimi anni, che vede l'interesse e il coinvolgimento di importanti organizzazioni umanitarie e grandi gruppi di ricerca. Uno degli esempi più significativi di ricerca applicata e sviluppo di prototipi in questo peculiare ambito è rappresentato dalla Better Shelter, un modello di rifugio temporaneo sviluppato dall'omonimo studio svedese in collaborazione con l'Ikea Foundation e l'UNHCR (Alto commissariato delle Nazioni Unite per i rifugiati). Better Shelter è stato progettato per aiutare i rifugiati di tutto il mondo che fuggono da conflitti armati, persecuzioni o disastri naturali.

Questo rifugio temporaneo è stato progettato con l'intento di trasmettere ai propri ospiti un senso di protezione e di privacy maggiore rispetto ad una tenda. Quindi, nonostante la sua concezione sia incentrata sull'economicità, per consentirne una vasta diffusione, la rapidità di montaggio e il minimo ingombro per il trasporto, il rifugio è stato progettato per essere in grado di resistere a pioggia, neve e forti venti. La struttura del rifugio è costituita da fondazioni in acciaio e un telaio leggero in acciaio zincato, formato da componenti modulari e intercambiabili. La copertura a doppio spiovente e le pareti sono realizzate in plastica polimerica riciclata trattata con protezione

Micaela Colella

Architettura residenziale e sostenibilità

La casa prefabbricata mediterranea nell'era dell'Industria 4.0

Cap 4. La prefabbricazione come strumento per la sostenibilità

UV, per ridurre il deterioramento causato dalla forte luce solare. Le pareti presentano finestre per una adeguata ventilazione che possono essere posizionate in base alle esigenze dei fruitori, mentre sulla copertura è posizionato un pannello solare per alimentare l'illuminazione notturna. L'assemblaggio del singolo modulo abitativo, che viene consegnato in due scatole (ciascuna del peso di 80 Kg) contenenti tutto il necessario, compresi gli strumenti di montaggio e le istruzioni, richiede quattro ore di lavoro per un gruppo di quattro persone. Il montaggio completamente a secco consente di smontare e rimontare altrettanto facilmente il modulo in un sito diverso, e un eventuale sostituzione di pezzi danneggiati. La progettazione modulare del rifugio ne consente, in caso di necessità, un assemblaggio di più moduli. Nel 2015 sono già state consegnate oltre 10.000 Better Shelter nel mondo³⁴.



34 Better Shelter, "Product", 2015. Disponibile presso: <http://www.bettershelter.org/product/> (ultimo accesso: Novembre 2017).

Humanihut

Tipologia: rifugio temporaneo

Progettista/gruppo di ricerca: Humanihut

Anno: 2016

Materiali principali: pannelli di metallo termoisolati

Dimensioni: 7,3 x 3 x 2,4 metri

Humanihut è un rifugio temporaneo sviluppato dalla omonima *start-up* australiana, che si prefigge di fornire un riparo solido e termoisolato ai rifugiati di guerra e alle vittime di catastrofi naturali.

Il rifugio è stato concepito per poter essere trasportato con tutte le pareti già assemblate tra loro ma piegate, in modo tale da compattarne il volume. In questo modo è possibile trasportare sedici unità in un unico container di spedizione di dimensioni standard. Una volta raggiunto il sito d'installazione le pareti possono essere dispiegate e fissate in un lasso di tempo stimato pari a cinque minuti. Le unità abitative vengono completate con elementi d'arredo per ospitare fino a sei persone, con un piccolo servizio igienico, lavanderia e collegamento alla rete elettrica, per fare in modo che il periodo di permanenza nei rifugi sia vissuto in condizioni dignitose. Ogni unità viene infine completata da un pannello solare sulla copertura e da sistemi di riscaldamento e di depurazione dell'acqua, nella speranza che l'accesso a queste strutture contribuisca a ridurre l'alto tasso di malattie legate alla contaminazione dell'acqua, che ogni anno uccide migliaia di rifugiati. I pannelli d'acciaio che costituiscono il rifugio contengono uno strato di isolante che consente di mantenere una temperatura interna confortevole sia in climi caldi che in climi freddi. La struttura d'acciaio rende le unità molto robuste e durature, abbattendo i costi di riparazioni e sostituzioni.

Micaela Colella

Architettura residenziale e sostenibilità

La casa prefabbricata mediterranea nell'era dell'Industria 4.0

Cap 4. La prefabbricazione come strumento per la sostenibilità

Per il suo innovativo sistema di emergenza, la *start-up* Humanihut è stata inclusa nell'elenco del 2016 di Disrupt 100, che riconosce quelle *start-up* e aziende che hanno il potenziale di influenzare, cambiare o creare nuovi mercati globali³⁵.



35 Disrupt 100, "Humanihut", 2016. Disponibile presso: <http://2016.disrupt100.com/company/humanihut/> (ultimo accesso: Novembre 2017).

4.3.2 *L'abitazione minima*

Come si è detto in precedenza, per abitazione minima si intende una costruzione di piccole dimensioni, alla quale si richiede di assolvere alle sole funzioni minime dell'abitare poiché destinate a un uso temporaneo. In frequenti casi si tratta di soluzioni abitative per un uso stagionale, in altri casi per un uso fortuito, come rifugi in boschi, parchi, o zone difficilmente raggiungibili (è questo il caso ad esempio dei bivacchi montani).

Questo tipo di soluzione architettonica è frequentemente scelta come dimostratore per nuove sperimentazioni costruttive e di autosufficienza energetica, date le dimensioni ridotte e il conseguente minore sforzo economico rispetto alla costruzione di un'abitazione propriamente detta. Tuttavia essa necessita di un maggiore sforzo in termini compositivi, poiché richiede una maggiore attenzione nell'ottimizzazione dell'uso dello spazio.

Questa categoria può annoverare come celebre precedente il "Cabanon" che Le Corbusier costruì per sé nei primi anni Cinquanta a Cap-Martin in Costa Azzurra. Una residenza estiva costituita da elementi prefabbricati in legno (prodotti in Corsica), delle dimensioni complessive di 3,66 x 3,66 metri in pianta e 2,26 metri in alzato (figg. 4.27-28-29).

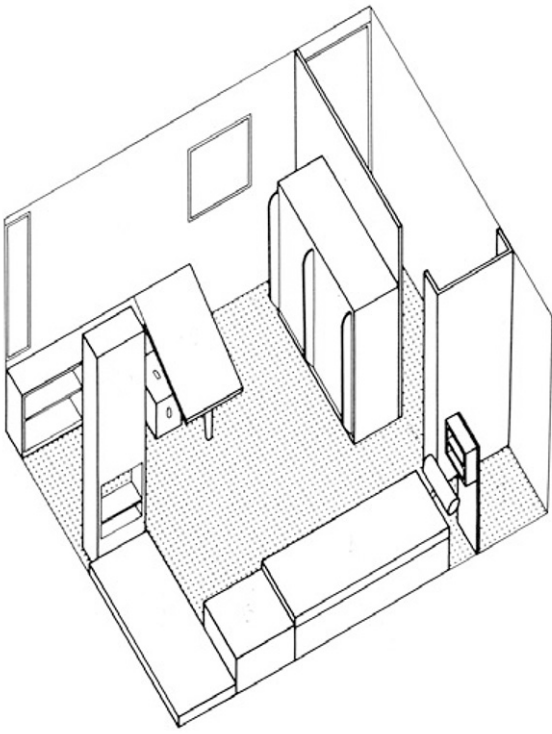
Nella pagina accanto:
Figg. 4.27-28-29
Assonometria e
immagini del Cabanon
di Le Corbusier
(fonte: Fondation Le
Corbusier).

Micaela Colella

Architettura residenziale e sostenibilità

La casa prefabbricata mediterranea nell'era dell'Industria 4.0

Cap 4. La prefabbricazione come strumento per la sostenibilità



Diogene

Tipologia: abitazione minima

Progettista/gruppo di ricerca: Renzo Piano Building Workshop

Anno: 2009-2013

Materiali principali: legno strutturale e alluminio

Dimensioni: 2,4 x 2,4 x 3,2 metri

La ricerca sull'abitazione minima ha visto negli ultimi anni lo sviluppo di alcune celebri sperimentazioni, come il modulo abitativo Diogene³⁶, sviluppato da Renzo Piano a partire dal 2009 ed esposto nel Vitra Campus di Weil am Rhein dal 2013.

Questo prototipo abitativo viene presentato come un apparato sperimentale volto a testare le potenzialità della casa minima prefabbricata, pensata per accogliere un letto, una sedia e un tavolo in un volume di 2,4 x 2,4 x 3,2 metri. Dallo sviluppo di questa idea è nato un prototipo di abitazione minima costituita da pannelli strutturali in legno rivestiti esternamente da lastre di alluminio. Il modulo abitativo è energeticamente autosufficiente e garantisce un approvvigionamento autonomo dell'acqua (attraverso un serbatoio di acqua piovana) e un costante comfort interno a prescindere dalle condizioni climatiche esterne. Risultando un sistema autonomo dalle infrastrutture di fornitura idrica ed elettrica, esso si presta ad una installazione anche in luoghi non raggiunti dall'urbanizzazione.

Seppur nella limitatissima superficie disponibile, il progetto Diogene comprende una zona giorno-notte, una toilette biologica e una zona

36 Domus, Renzo Piano: Diogene, 2013. Disponibile presso: https://www.domusweb.it/it/architettura/2013/06/13/renzo_piano_diogene.html (ultimo accesso: Novembre 2017).

Micaela Colella

Architettura residenziale e sostenibilità

La casa prefabbricata mediterranea nell'era dell'Industria 4.0

Cap 4. La prefabbricazione come strumento per la sostenibilità

cucina. Date le dimensioni estremamente compatte del modulo abitativo, esso può essere realizzato totalmente in fabbrica e trasportato sul sito completamente assemblato e finito in ogni sua parte.

In definitiva, questo modulo abitativo rappresenta un tentativo di realizzare un organismo complesso come la casa, in una versione che può essere fabbricata in serie e venduta completa come un qualsiasi altro prodotto tecnologico.



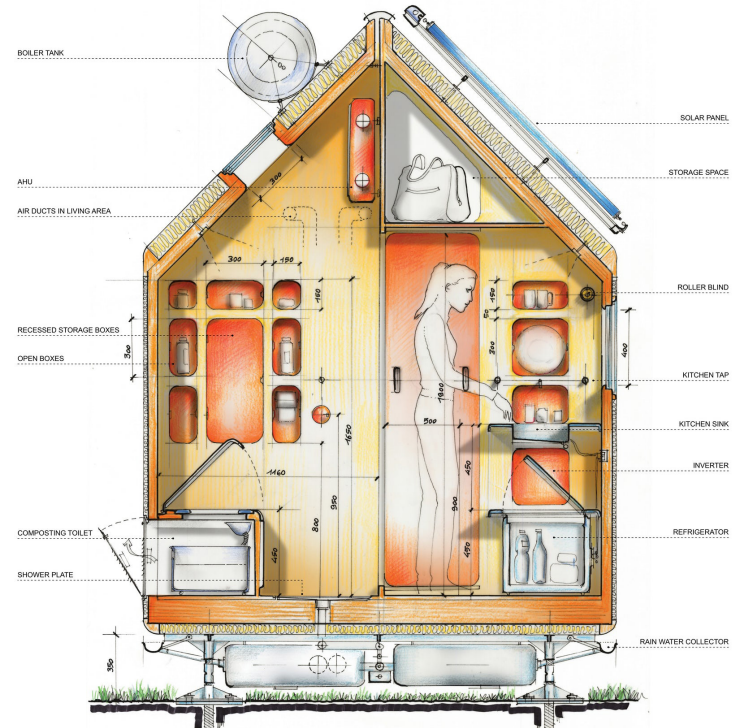
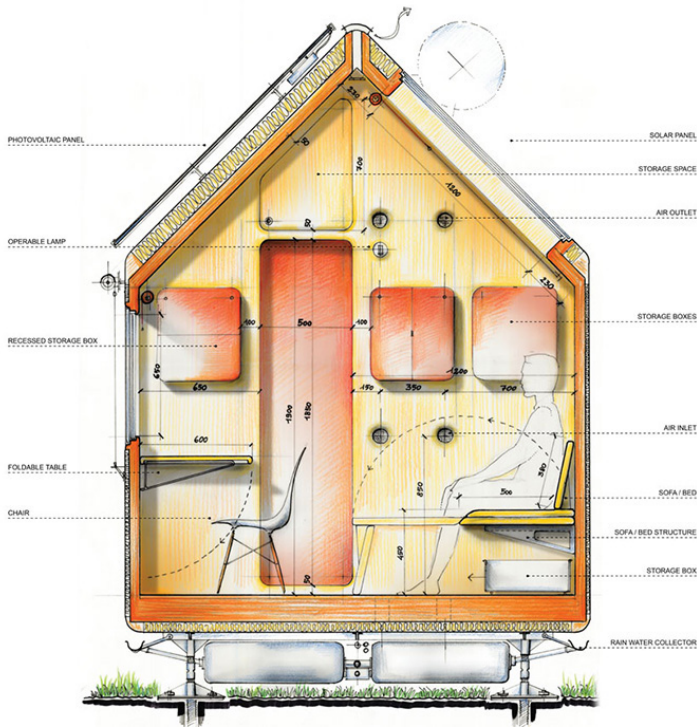


Micaela Colella

Architettura residenziale e sostenibilità

La casa prefabbricata mediterranea nell'era dell'Industria 4.0

Cap 4. La prefabbricazione come strumento per la sostenibilità



Smart Student Units

Tipologia: abitazione minima

Progettista/gruppo di ricerca: Tengbom Architects, l'Università di Lund

Anno: 2013

Materiali principali: legno strutturale multistrato

Dimensioni: 4,33 x 4 x 4, 33 metri

Il progetto delle Smart Student Units³⁷, sviluppato nel 2013 dallo studio Tengbom Architects in collaborazione con l'Università svedese di Lund, parte da un presupposto diverso rispetto al progetto Diogene di Renzo Piano. Le Smart Student Units, di cui è stato realizzato un prototipo esposto al Museo d'Arte Virserum nel Dicembre 2013, sono infatti state progettate per ospitare gli studenti fuori sede della stessa Università e pensate per rispondere alle loro specifiche esigenze. Queste costruzioni, per poter essere economicamente accessibili a degli studenti universitari, per ridurre notevolmente i consumi energetici e causare il minimo impatto ambientale, sono state sviluppate con un volume compatto (10 m² in pianta) costruito con pareti di legno strutturale multistrato, ottenute da legno disponibile localmente e presagomate in fabbrica, per poi essere facilmente assemblate in sito. Per poter ridurre al minimo le dimensioni del modulo, pur contenendo tutte le funzioni principali di una abitazione, è stato necessario progettare lo spazio interno disponibile in modo da integrare più funzioni in un singolo elemento architettonico. Ad esempio, vi sono mensole che fungono da pedate di una scala per raggiungere il soppalco e tavoli che richiudendosi fungono da sistemi oscuranti.

37 ArchDaily, Studentboende: Student Unit / Tengbom, 2013. Disponibile presso: <https://www.archdaily.com/430047/studentboende-student-unit-tengbom/> (ultimo accesso: Novembre 2017).

Micaela Colella

Architettura residenziale e sostenibilità

La casa prefabbricata mediterranea nell'era dell'Industria 4.0

Cap 4. La prefabbricazione come strumento per la sostenibilità



KODA

Tipologia: abitazione minima

Progettista/gruppo di ricerca: Kodasema

Anno: 2015

Materiali principali: calcestruzzo

Dimensioni: 3,93 x 7,22 x 3,92 metri

KODA³⁸ è una piccola abitazione prefabbricata, pensata per soddisfare in pochi metri quadri le necessità abitative di una coppia, esposta per la prima volta nel 2015 alla Biennale di Architettura di Tallinn.

La ricerca del team di progetto estone, si è focalizzata sulla messa a punto di un sistema che permettesse la realizzazione dell'unità abitativa completamente in fabbrica, in ogni sua parte e finitura, compresi gli impianti, per poter garantire alta precisione e qualità dell'intero organismo architettonico.

Il progetto è stato, inoltre, sviluppato pensando ad una abitazione reversibile, movimentabile e ricollocabile in caso di trasferimento. Per consentirne il trasporto e la movimentazione era quindi necessario progettare un volume compatto, costruito con una struttura ad alta resistenza e un peso contenuto. Questi obiettivi sono stati ottenuti costruendo i moduli abitativi in fabbrica, impiegando sottili pannelli di calcestruzzo prefabbricato ad alta resistenza, impermeabili e realizzati in modo da richiedere livelli di manutenzione molto bassi. La casa, per via della sua natura transitoria, non dispone di fondazioni permanenti. La sua leggerezza richiede un semplice sottofondo composto da materiale

38 Kodasema, "KODA", 2017. Disponibile presso: <http://www.kodasema.com/> (ultimo accesso: Novembre 2017).

Micaela Colella

Architettura residenziale e sostenibilità

La casa prefabbricata mediterranea nell'era dell'Industria 4.0

Cap 4. La prefabbricazione come strumento per la sostenibilità

inerte (ghiaia e pietrisco), che ripartisce i carichi sul terreno e ne regola il livello prima della posa in opera. Ciò consente al sottofondo di divenire reversibile in caso di movimentazione dell'unità abitativa.

Il volume contenuto del modulo, necessario per poter trasportare la casa su un mezzo a rimorchio, ed essere collocata in sito con una comune gru, è stato progettato internamente in modo da ottimizzare lo spazio a disposizione, ed ospitare in 25 m² una zona giorno con cucina, un bagno e una camera da letto su soppalco, oltre a un piccolo vano tecnico.





Micaela Colella

Architettura residenziale e sostenibilità

La casa prefabbricata mediterranea nell'era dell'Industria 4.0

Cap 4. La prefabbricazione come strumento per la sostenibilità



4.3.3 *La casa prefabbricata reversibile*

A differenza dei due filoni di ricerca di cui si è parlato precedentemente, la casa prefabbricata reversibile non ha un carattere di temporaneità, ma è destinata ad un uso stabile da parte di un intero nucleo familiare. Quindi, parametri come l'estrema leggerezza e la trasportabilità, indispensabili per i rifugi e le unità minime, vengono meno, mentre altri parametri come un elevato comfort abitativo, l'efficienza energetica, l'integrazione bioclimatica e visiva, assumono una grande importanza. Altri parametri ancora, come la velocità di costruzione e l'economicità, restano di importanza invariata, rappresentando difatti una prerogativa della prefabbricazione.

La casa prefabbricata reversibile è la tipologia abitativa che più di ogni altra è stata sviluppata nell'ambito della ricerca sulle case prefabbricate sin dalle sue prime sperimentazioni, di cui si è parlato approfonditamente al punto 4.1.

Si tratta di abitazioni realizzate attraverso l'assemblaggio a secco di elementi prefabbricati, generalmente leggeri, che richiedono fondazioni poco invasive e facilmente reversibili, spesso costituite da plinti o pali su cui poggia un sistema di travi di collegamento metalliche. Inoltre, queste abitazioni, derivando da una progettazione attenta all'efficienza dell'intero processo progettuale e costruttivo, incentrata sull'ottimizzazione delle risorse di ogni natura (materiche, energetiche, economiche, ecc.) e l'eliminazione di ogni spreco, costituisce una risposta architettonica sostenibile, efficiente e reversibile a tutte le esigenze dell'abitare.

Trattandosi di costruzioni prodotte da un processo di fabbricazione industrializzato, queste soluzioni architettoniche vengono generalmente

Micaela Colella

Architettura residenziale e sostenibilità

La casa prefabbricata mediterranea nell'era dell'Industria 4.0

Cap 4. La prefabbricazione come strumento per la sostenibilità

progettate secondo moduli costruttivi combinati in modo flessibile, al fine di adeguare il progetto alle esigenze delle persone e dei luoghi.

Nonostante gli importanti vantaggi derivanti dalla realizzazione di questo tipo di soluzioni abitative, esse portano con sé il grave rischio di incorrere nell'illusione di poter costruire abitazioni in serie da installare indifferentemente in luoghi appartenenti a differenti zone climatiche, vanificando le proposizioni di integrazione bioclimatica e di appartenenza al contesto architettonico e paesaggistico. Si pensi, ad esempio, a quanto veniva proposto negli anni del secondo dopoguerra da aziende, come la Lustron Corporation, che proponevano un unico pacchetto tecnologico per l'intero territorio statunitense, nonostante la varietà climatica di un vasto territorio come quello degli USA.

System 3

Tipologia: casa prefabbricata reversibile

Progettista/gruppo di ricerca: Oskar Leo Kaufmann e Albert Rűf

Anno: 2007-2008

Materiali principali: pannelli strutturali di legno multistrato

La casa System 3³⁹ è una struttura prefabbricata disegnata nel 2007 per la mostra tenuta al MoMA intitolata “Home Delivery: Fabricating the Modern Dwelling” (2008), in occasione della quale è stato esposto un suo prototipo. L’installazione di questa abitazione all’interno della mostra era finalizzata a dimostrare gli enormi progressi compiuti dalla prefabbricazione nella sua storia, che consentono oggi di concepire prodotti architettonici di elevata qualità tecnica ed estetica.

L’unità abitativa è stata concepita secondo un sistema scatolare costituito da pannelli strutturali di legno multistrato lavorati con macchine CNC. Tutti i componenti vengono trasportati in un unico container, pronti per essere assemblati, completi di finiture interne ed esterne, permettendo il completo montaggio in pochi giorni. L’abitazione è costituita da due moduli parallelepipedi di uguali dimensioni. Il primo è un modulo completamente prefabbricato, in cui sono integrati tutti i servizi della casa: cucina, bagno, impianti e scale. Il secondo, installato accanto al primo, è un modulo ligneo vuoto che presenta le sole bucatore di porte e finestre, ed è adibito ad ambiente principale della casa, configurato come un *open space*, dove trovano sistemazione la zona soggiorno-pranzo e la zona notte. L’abitazione è stata progettata con l’intento di perseguire

39 O. L. Kaufmann, “System 3”, 2008. Disponibile presso: <http://www.olkaufmann.com/work/08-system3-new-york/> (ultimo accesso: Novembre 2017).

Micaela Colella

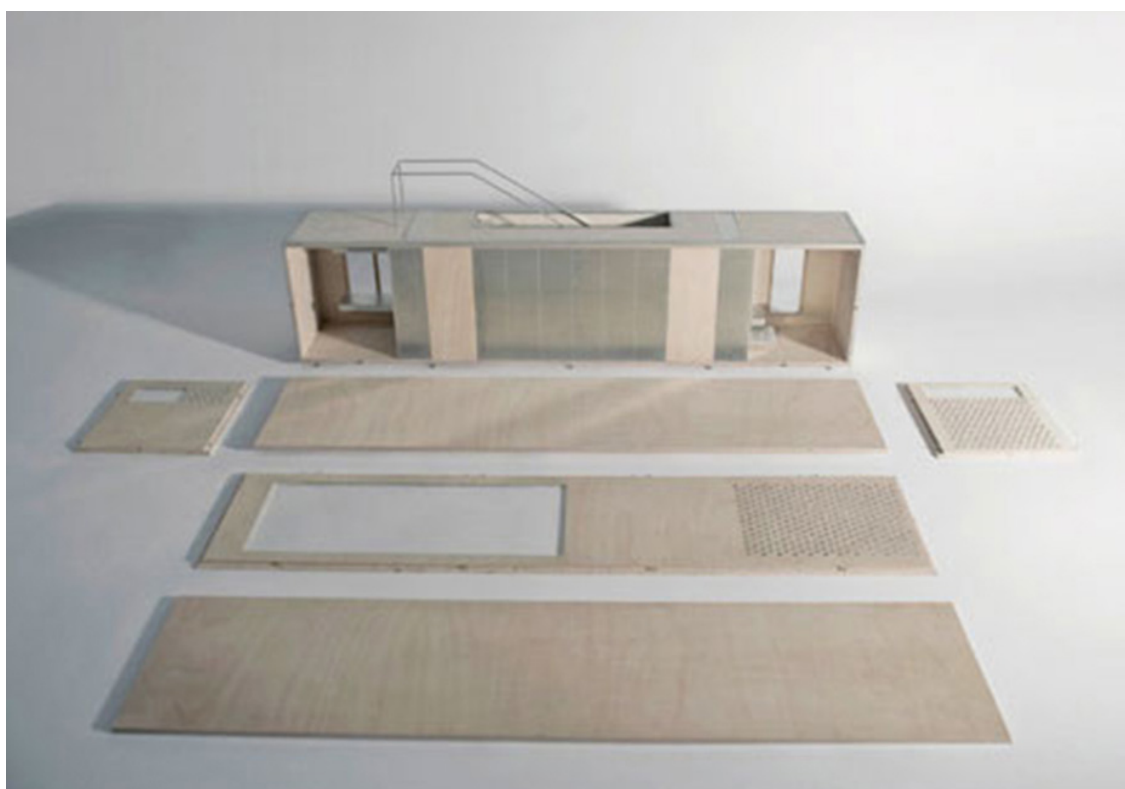
Architettura residenziale e sostenibilità

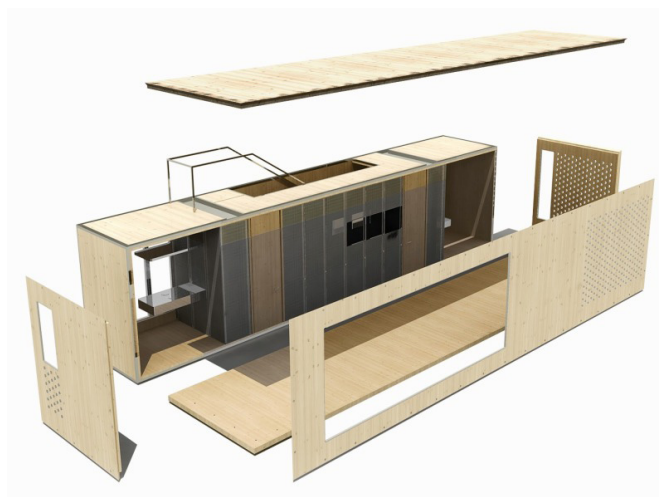
La casa prefabbricata mediterranea nell'era dell'Industria 4.0

Cap 4. La prefabbricazione come strumento per la sostenibilità

un elevato livello di sostenibilità, impiegando per l'intera struttura il legno multistrato e altri materiali rinnovabili ed ecocompatibili. L'elevata protezione termica dell'involucro e l'efficienza degli impianti impiegati minimizzano gli sprechi energetici. La progettazione modulare dell'abitazione ne permette un flessibile adeguamento nel tempo al variare delle condizioni di vita dei residenti. È possibile infatti ampliare l'abitazione per aggregazione di moduli.

Questa soluzione abitativa è stata progettata come una ideale evoluzione delle celebri proposte abitative prefabbricate del passato, con lo sguardo rivolto verso il concetto di sostenibilità, perseguita attraverso l'uso prevalente del legno e dell'efficienza delle più attuali tecnologie. Questo prototipo di abitazione dimostra la capacità dell'attuale prefabbricazione di soddisfare il bisogno di individualità e specificità attraverso una realizzazione industriale fatta "su misura" per i committenti.





Micaela Colella

Architettura residenziale e sostenibilità

La casa prefabbricata mediterranea nell'era dell'Industria 4.0

Cap 4. La prefabbricazione come strumento per la sostenibilità



MIMA House

Tipologia: casa prefabbricata reversibile

Progettista/gruppo di ricerca: MIMA

Anno: 2011

Materiali principali: legno

Dimensioni: 6 x 6 x 3 metri

La casa prefabbricata MIMA⁴⁰, che prende il nome dall'omonimo studio d'architettura portoghese che l'ha progettata nel 2011, è una soluzione abitativa sorta dall'intento di individuare un sistema di facile e veloce installazione, leggero, economico ma di buona qualità, e capace di adattarsi nel tempo al variare delle necessità dei suoi abitanti. Questo obiettivo è stato raggiunto mediante la definizione di un sistema modulare in legno multistrato basato su un modulo quadrato di 1,5 metri di lato che si ispira idealmente alle case tradizionali giapponesi, identificato dai progettisti come paradigma di leggerezza, flessibilità, comfort, armonia e essenzialità estetica. Il sistema costruttivo della casa tradizionale giapponese è stato individuato dai progettisti come un naturale precursore degli attuali sistemi di prefabbricazione ed è stato dunque utilizzato come base concettuale a cui fare riferimento per la progettazione degli elementi prefabbricati della costruzione.

Il progetto, nella sua versione prototipale costruita, è basato su una struttura a telaio completamente vetrata su tutti i lati, suddivisa in strutture modulari di legno da 1,5 x 3 metri. Le case MIMA sono dotate di pannelli di compensato aggiuntivi che possono essere posizionati all'occorrenza

40 Mima Housing, "MIMA", 2011. Disponibile presso: <http://www.mimahousing.com/mima-house#> (ultimo accesso: Novembre 2017).

Micaela Colella

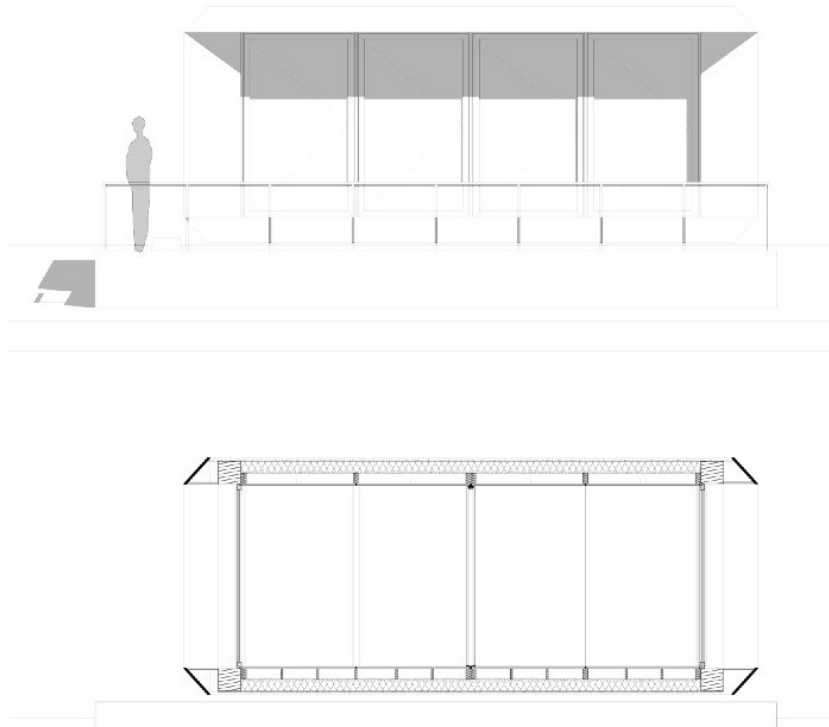
Architettura residenziale e sostenibilità

La casa prefabbricata mediterranea nell'era dell'Industria 4.0

Cap 4. La prefabbricazione come strumento per la sostenibilità

in modo da variare la configurazione iniziale della pianta o sostituire uno dei moduli vetrati di chiusura con un muro di tamponamento. A segnare i moduli interni, infatti, vi sono dei binari (sia sul pavimento che sul soffitto) che permettono l'inserimento e lo scorrimento dei pannelli-parete, dando la possibilità di una rapida e semplice riconfigurazione da parte degli stessi proprietari. Nonostante questa soluzione abitativa prefabbricata sfrutti le potenzialità della costruzione standardizzata, essa si apre a un discreto livello di personalizzazione, grazie alla possibilità di scegliere la configurazione in pianta dell'edificio, oltre che i materiali e le finiture delle pareti. Un ultimo aspetto degno di nota è costituito dalla possibilità di adeguamento dei pacchetti tecnologici alle condizioni climatiche del sito.





Micaela Colella

Architettura residenziale e sostenibilità

La casa prefabbricata mediterranea nell'era dell'Industria 4.0

Cap 4. La prefabbricazione come strumento per la sostenibilità



BiosPHera 2.0

Tipologia: casa prefabbricata reversibile

Progettista/gruppo di ricerca: WoodLab - Politecnico di Torino

Anno: 2016

Materiali principali: pannelli strutturali di legno multistrato

Il progetto BiosPHera 2.0⁴¹ nasce da una collaborazione tra ZEPHIR-Passivhaus Italia, il Politecnico di Torino DAD, l'Università della Valle d'Aosta e Vallée d'Aoste Structure con gli istituti Zephir, Minergie e PEFC, con il patrocinio della Regione Valle d'Aosta, del Comune di Courmayeur e la partecipazione di aziende nazionali e internazionali.

Il concept progettuale di BiosPHera 2.0 è stato selezionato, e adottato come linea guida su cui sviluppare il progetto finale del modulo abitativo, tra 15 proposte presentate da studenti di architettura e ingegneria provenienti da diversi Atenei italiani, che hanno partecipato a un workshop organizzato dal gruppo di ricerca Woodlab del Politecnico di Torino.

Il progetto del modulo abitativo realizzato racchiude in 25 m² tutti i servizi essenziali di una comune abitazione per due persone: zona giorno con cucina, zona notte, bagno e un piccolo vano tecnico.

Il modulo è costituito da un semplice volume parallelepipedo, sollevato dal terreno, a cui vengono sottratte due porzioni angolari per ospitare le due principali aperture della casa. L'abitazione è stata realizzata completamente in fabbrica, attraverso l'assemblaggio di pareti strutturali in legno multistrato, sagomate preliminarmente con macchine CNC, e

41 WoodLab, "Biosphera 2.0" (2016). Disponibile presso: <http://www.biosphera2.it/> (ultimo accesso: Novembre 2017).

Micaela Colella

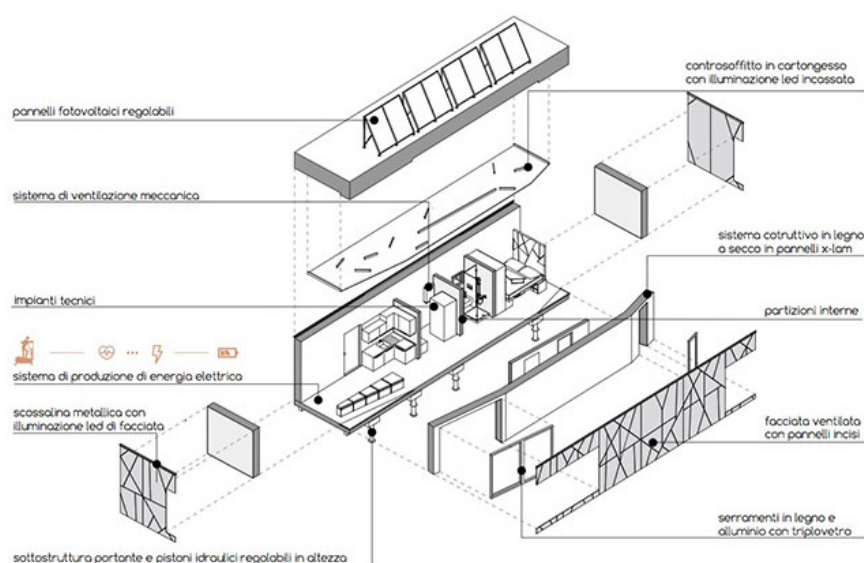
Architettura residenziale e sostenibilità

La casa prefabbricata mediterranea nell'era dell'Industria 4.0

Cap 4. La prefabbricazione come strumento per la sostenibilità

successive fasi di completamento delle finiture interne ed esterne.

Il modulo è stato progettato in modo da risultare facilmente trasportabile e adeguato a creare condizioni di comfort interno in diverse aree climatiche. Le pareti in legno multistrato permettono una minima dispersione termica, mentre efficienti impianti per lo sfruttamento dell'energia solare rendono l'abitazione energeticamente autonoma. È stata calcolata una variazione massima della temperatura interna compresa tra i 21 °C in inverno e i 25 °C in estate. Le effettive performance della casa verranno valutate nell'arco di un anno, in cui il prototipo verrà trasportato in 11 diverse località e vissuto da 22 persone.



4.3.4 La casa prefabbricata stabile

La casa prefabbricata stabile, così come la casa prefabbricata reversibile, è una tipologia abitativa destinata a un uso non temporaneo ma stabile, quindi la sua progettazione è incentrata su una elevata qualità delle soluzioni costruttive e tecnologiche, che ne assicurino elevato comfort abitativo, efficienza energetica e integrazione bioclimatica e visiva, a fronte di un processo di costruzione ottimizzato, rapido ed economico e una gestione sostenibile durante il ciclo di vita dell'immobile.

Si è ritenuto di dover compiere una distinzione tra abitazioni prefabbricate reversibili e abitazioni prefabbricate stabili in due diversi filoni di ricerca, poiché, nonostante questi filoni condividano gran parte dei principi di progettazione impiegati, vi è una differenza di approccio progettuale non trascurabile. Mentre una casa prefabbricata detta reversibile viene progettata a priori, secondo un sistema modulare e ripetibile, e successivamente adeguato secondo una combinazione spaziale e tecnologica confacente alle necessità dei committenti e del luogo di costruzione, una casa prefabbricata stabile nasce da un progetto elaborato appositamente per un committente in uno specifico sito. Per questi motivi, quest'ultimo filone di ricerca è probabilmente il più idoneo alla realizzazione di soluzioni architettoniche aderenti ai principi della casa passiva e di integrazione alla cultura architettonica del luogo.

La casa prefabbricata stabile è una soluzione abitativa più vicina, rispetto alle precedenti illustrate, alla progettazione canonica, personalizzata e su misura per il committente, per questo motivo, anche se può prevedere l'uso di componenti prefabbricati standard prodotti in serie, può risultare meno rivoluzionaria in termini di risparmio economico e di velocità di

Micaela Colella

Architettura residenziale e sostenibilità

La casa prefabbricata mediterranea nell'era dell'Industria 4.0

Cap 4. La prefabbricazione come strumento per la sostenibilità

assemblaggio, ma pur sempre incomparabile rispetto a una costruzione realizzata in un cantiere tradizionale umido in termini di precisione e ottimizzazione del processo esecutivo.

Per le sue specifiche prerogative, il processo di progettazione, fabbricazione e costruzione di questo tipo di soluzioni abitative sarà al centro dei futuri sviluppi dell'architettura residenziale, come verrà spiegato nella terza parte di questa trattazione.

Aktivhaus B10

Tipologia: casa prefabbricata stabile

Progettista/gruppo di ricerca: Werner Sobek Group

Anno: 2014

Materiali principali: legno

Il progetto Aktivhaus B10⁴², fa parte di un progetto di ricerca condotto dall'Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK), diretto da Werner Sobek e finanziato dal Ministero federale del traffico e dell'infrastruttura digitale di Berlino. Questa ricerca si incentra sull'uso di materiali e tecnologie innovative per migliorare in modo sostenibile l'ambiente costruito.

Il prototipo abitativo Aktivhaus B10 è stato costruito nel famoso quartiere Weißenhof di Stoccarda, dove l'esposizione di una abitazione concepita secondo una nuova concezione architettonica assume un carattere ancor più significativo, accanto a costruzioni che hanno indirizzato l'architettura residenziale dagli anni '20 in poi.

Il modulo abitativo è stato progettato come un volume parallelepipedo con una facciata completamente vetrata ma richiudibile da elementi mobili, che quando sono aperti fungono da terrazza.

La costruzione è stata realizzata completamente *off-site* con struttura in legno e profilati metallici ed installata su fondazioni leggere d'acciaio. La costruzione ha richiesto, così, mesi di progettazione ma un solo giorno per l'assemblaggio. L'involucro dell'abitazione è stato isolato con pannelli isolanti sottovuoto che permettono un elevato potere isolante in uno spessore ridotto. L'alta efficienza

42 F. Heinlein, *Aktivhaus B10* by Werner Sobek, Av Edition, Stoccarda, 2015.

Micaela Colella

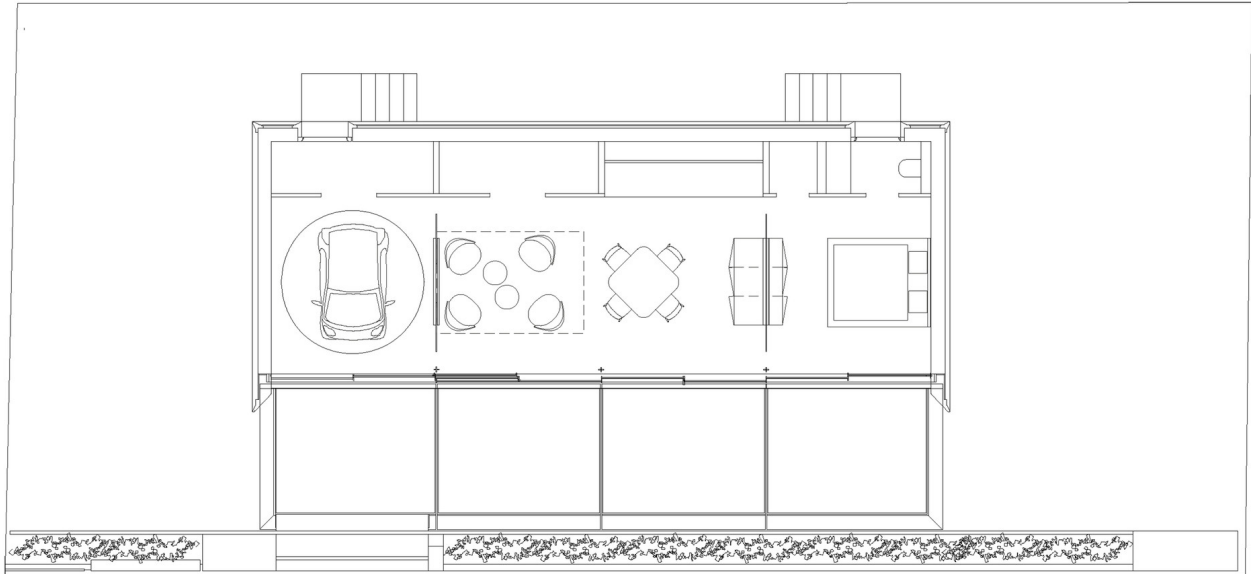
Architettura residenziale e sostenibilità

La casa prefabbricata mediterranea nell'era dell'Industria 4.0

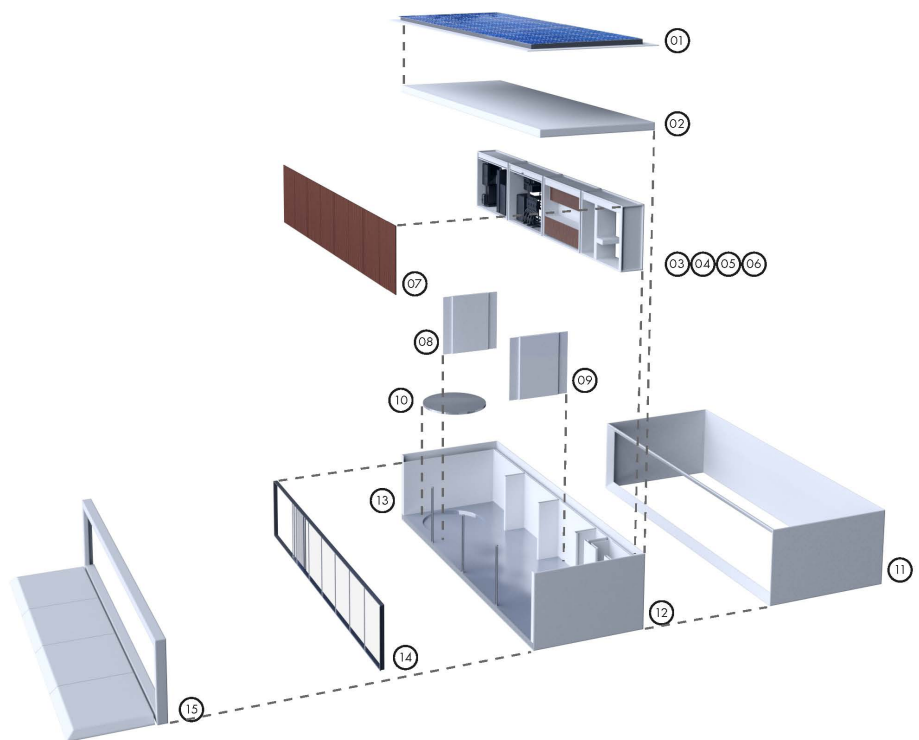
Cap 4. La prefabbricazione come strumento per la sostenibilità

dell'involucro esterno permette una ridotta dispersione termica che consente una riduzione dei consumi energetici. L'alta efficienza energetica della casa gli consente di produrre il doppio dell'energia richiesta dall'abitazione stessa, riuscendo ad alimentare anche due automobili elettriche e la casa accanto, progettata da Le Corbusier. L'abitazione, quindi, richiede consumi energetici minimi, non provoca emissioni nocive, è stata realizzata completamente con materiali riciclabili, e alla sua dismissione può essere totalmente restituita al ciclo dei materiali, senza rifiuti da smaltire.





- 01 PV-Anlage / Attika
- 02 Decke / Beleuchtung
- 03 Elektotechnik-Modul
- 04 Technische Gebäudeausrüstung
- 05 Küchen-Modul
- 06 Bad-Modul
- 07 Schiebelelemente zu Modulen
- 08 Trennwand Eingang
- 09 Trennwand Schlafen
- 10 Drehscheibe
- 11 Textilfassade / Beleuchtung
- 12 Flying Space / Wandbeläge
- 13 Boden / ELT-Versorgung
- 14 Glassfassade / Sonnenschutz
- 15 Rotationsklappe / Stahlrahmen



Micaela Colella

Architettura residenziale e sostenibilità

La casa prefabbricata mediterranea nell'era dell'Industria 4.0

Cap 4. La prefabbricazione come strumento per la sostenibilità



S(ch)austall

Tipologia: casa prefabbricata stabile

Progettista/gruppo di ricerca: Naumann Architekten

Anno: 2005

Materiali principali: pannelli strutturali di legno multistrato

La casa S(ch)austall⁴³ apre la strada a un nuovo tipo di applicazione delle logiche della prefabbricazione. Il progetto, elaborato dallo Studio Naumann Architekten di Stoccarda, è volto al recupero di una stalla, costruita nel 1780 e parzialmente distrutta durante la Seconda Guerra Mondiale. Dopo anni di utilizzo come semplice deposito di attrezzi, i proprietari hanno deciso di recuperare la costruzione per farne la loro abitazione. Lo stato in cui versavano le murature non permetteva un loro consolidamento, tuttavia i progettisti hanno scelto di non abbandonare l'idea di recuperare la struttura, ed hanno deciso di affiancare all'involucro murario storico un secondo involucro strutturale.

Il progetto del nuovo volume è stato sviluppato considerando come punto fermo la posizione delle aperture di porte e finestre, in modo tale che le nuove aperture corrispondessero con quelle esistenti. Il nuovo involucro è stato progettato e realizzato in pareti strutturali di legno multistrato, pretagliate con macchine a controllo numerico e assemblate prima della posa in opera. Successivamente, l'intera struttura in legno è stata calata dall'alto all'interno delle vecchie murature. Le due facciate sono indipendenti tra loro e non si toccano. La copertura superiore è sostenuta dalle pareti lignee ed aggetta fino a riparare la muratura storica.

43 Naumann Architekten (2005), "S(ch)austall". Disponibile presso: <http://www.fnp-architekten.de/projekte/swe/pro01.html> (ultimo accesso: Novembre 2017).

Micaela Colella

Architettura residenziale e sostenibilità

La casa prefabbricata mediterranea nell'era dell'Industria 4.0

Cap 4. La prefabbricazione come strumento per la sostenibilità

Questo progetto dimostra la versatilità delle tecniche di prefabbricazione, in grado, se opportunamente impiegate, di instaurare un dialogo proficuo con il tessuto del patrimonio esistente. In questo caso le pareti strutturali in legno ricalcano fedelmente le originarie pareti portanti in pietra e aprono la strada a nuove modalità progettuali in grado di integrare un'architettura prodotta industrialmente e su misura per uno specifico contesto, con le costruzioni tradizionali.



4.4 Dalla ricerca teorica alla ricerca operativa: premessa metodologica sulle sperimentazioni prototipali

Le sperimentazioni prototipali presentate nei prossimi capitoli hanno lo scopo di realizzare una sorta di *reportage* di alcune esperienze progettuali a cui la scrivente ha preso parte durante i tre anni di Dottorato. Alcuni progetti sono stati affrontati in gruppi di lavoro multidisciplinari, in cui al lavoro degli architetti è stato affiancato il contributo di altri specialisti come ingegneri strutturalisti e ingegneri ambientali. Pur prevedendo i progetti questo tipo di approfondimenti, si è scelto di limitare la trattazione esclusivamente agli aspetti squisitamente progettuali e tecnico-costruttivi, per fare in modo che la lettura degli stessi non risultasse disorganica rispetto al resto della tesi.

Queste esperienze progettuali hanno avuto lo scopo di indagare approfonditamente e in prima persona, gli aspetti progettuali e costruttivi inerenti il tema della prefabbricazione leggera contemporanea, in modo che esse potessero guidare coscientemente le riflessioni teoriche a supporto della tesi proposta.

Lo schema logico in cui sono inserite riprende la classificazione della ricerca internazionale sul tema, fornita nel presente capitolo. Pertanto i casi studio sono inquadrati in livelli di complessità progettuale e costruttiva crescente, in base al livello di stanzialità delle soluzioni abitative:

- Cellula abitativa minima: “Ghibli” e “D-Home”;
- Rifugio temporaneo: “Just a minute”;
- Casa prefabbricata reversibile: “Ecodomus” e “Un-boxed”;
- Casa prefabbricata stabile: “Sood”.

Si è cercato, per quanto possibile, di accompagnare l'elaborazione progettuale con la conseguente costruzione di prototipi sperimentali, al fine di verificare le speculazioni teoriche. Nonostante l'impegno profuso, ciò è stato possibile solo per alcuni progetti o per parti di essi. Per questo motivo si è ritenuto opportuno, per evitare eccessi di autoreferenzialità, di sottoporre al giudizio esterno e più ampio possibile della comunità scientifica i progetti presentati. Questo obiettivo è stato ottenuto attraverso modalità diverse in base al tipo di progetto e in base all'occasione in cui è stato esposto, pubblicato o premiato il singolo progetto. Nel dettaglio le modalità di cui sopra:

- I progetti “Ghibli” e “D-Home” sono stati presentati al convegno internazionale “*Geometrias' 17: thinking, drawing, modelling*” a Coimbra, in Portogallo (16-18 Giugno 2017), dopo un processo di *double blind review*. In precedenza, il prototipo D-Home (di cui è stato realizzato un modulo in scala reale) è stato selezionato da una commissione scientifica composta da accademici, architetti e membri dell'Associazione Disegno Industriale (ADI), per essere esposto presso il Salone del Mobile 2017 nella mostra “Puglia Crossing Identities”;
- Il progetto “Just a minute” è giunto finalista al concorso internazionale “GARS-NEPAL.TIBET Earthquake Emergency”⁴⁴. In seguito è stato premiato con il World Architecture Community Award (22th Cycle)⁴⁵ ed incluso in una importante pubblicazione accademica sul tema delle case per i rifugiati curata dal gruppo di ricerca del Prof. Jörg Friedrich del Dipartimento di Progettazione e

44 Maggiori informazioni sono disponibili presso: www.ikuku.cn/competition

45 Disponibile presso: <http://worldarchitecture.org/architecture-projects/awards-winners/?winarchive=22nd%20Cycle&cyc=22>.

Teoria dell'Architettura della Leibniz Universität di Hannover;

- Il prototipo in scala reale del progetto “Ecodomus” è stato giudicato positivamente dal commissario per i finanziamenti PO FESR Sicilia 2007/2013 (finanziatori del progetto), nel corso di una visita personale effettuata nel Dicembre 2016;
- Il progetto “Un-boxed”, oltre a numerosi riscontri ottenuti su siti internet specializzati sul tema della prefabbricazione, è stato premiato il con World Architecture Community Award (20th Cycle)⁴⁶ ed è giunto finalista al concorso internazionale indetto da Marlegno, società specializzata nella realizzazione di case prefabbricate;
- Il progetto “Sood” è stato selezionato da una commissione scientifica composta da accademici, architetti (tra cui Michele De Lucchi ed Enrico Quell) per essere esposto presso il Salone del Mobile 2015 nella mostra “Habitapulia 20/20”. In precedenza, il prototipo (di cui è stato realizzato un angolo significativo in scala reale) è stato selezionato per essere esposto durante l'Eco Build di Londra del 2015.

Dal punto di vista delle soluzioni tecnico-costruttive impiegate, si è scelto volutamente di non focalizzarsi su un materiale o una soluzione specifica. A nostro avviso questa scelta avrebbe ridotto il campo di comprensione di un tema abbastanza ampio come quello della prefabbricazione, riducendo le possibilità di comprensione critica dell'argomento. A nostro avviso, il settore della progettazione architettonica ha il dovere di avere uno sguardo ampio ed inclusivo, in modo da poter rispondere in maniera variabile ma efficace ai sempre mutevoli scenari in cui un progettista è chiamato ad operare.

46 Disponibile presso: <http://worldarchitecture.org/architecture-projects/awards-winners/?winarchive=20th%20Cycle&cyc=20>

Del resto l'introduzione di nuovi materiali, e l'utilizzo innovativo dei materiali esistenti (pensiamo ad esempio alla canapa) è un tratto distintivo dell'architettura contemporanea, e sarebbe ingenuo pensare che questo processo possa essere in qualche modo fermato, se non dalle leggi di mercato o da mutati modelli di sviluppo.

Schematizzando, i principali materiali impiegati nei progetti sono elencati nella tabella 2:

Tabella 2
Schema dei materiali
utilizzati nelle
sperimentazioni
prototipali

Materiali	Progetti					
	GH	DH	JM	ED	UB	SD
Pannelli strutturali in multistrato						
Legno multistrato						
Legno						
Pietra calcarea						
Bambù						
Plastica						
Sabbia						
Acciaio (fondazioni)						
Calcestruzzo armato (fondazioni)						

Capitolo 5

La cellula abitativa minima: sperimentazioni prototipali

5.1 La cupola come cellula abitativa minima

Una delle forme architettoniche che più frequentemente si ritrova come primitivo modello insediativo in diverse aree climatiche e culturali, è la cupola. La ritroviamo declinata in forma di igloo in area artica, dove le temperature sono talmente basse che la neve rappresenta il materiale da costruzione più facilmente reperibile. La ritroviamo in tutto il bacino mediterraneo, denominata in modo differente di luogo in luogo (per esempio: il trullo, il caprile, il kazun) ma sostanzialmente riconducibile alla stessa geometria di finta cupola, ottenuta stratificando il materiale da costruzione predominante nell'area, la pietra utilizzata a secco. Ed ancora, è possibile riconoscere la geometria di una cupola nelle case in terra cruda dei villaggi africani o mediorientali¹. È di facile intuizione, quindi, come in condizioni profondamente differenti (come quelle sopracitate), la combinazione tra il materiale maggiormente disponibile in loco e l'utilizzo della forma cupolata restino una costante costruttiva. L'esigenza primordiale dell'uomo di

¹ S. Mecca, L. Dipasquale (a cura di), *Earthen Domes and Habitats*, Edizioni ETS, Pisa, 2009.

crearsi un riparo, si è quindi spesso esplicata nella creazione di spazi cupolati, gli unici in grado di recingere e coprire in un unico gesto costruttivo.

Per questa loro capacità, gli spazi cupolati, non sono mai stati del tutto abbandonati, restando oggetto di numerose ricerche nel tempo. Certamente tra i più significativi, gli studi di R. Buckminster Fuller sulle cupole geodetiche, da lui brevettate nel 1954², strutture formate da elementi triangolari che giacciono approssimativamente sulla superficie di una sfera, costituendone una discretizzazione. Le strutture geodetiche consentono di coprire grandi volumi con minime superfici ed ottenere una elevatissima resistenza rispetto al peso della struttura. Fuller sperava che le cupole geodetiche potessero costituire una risposta all'emergenza abitativa del dopoguerra, tuttavia le loro principali applicazioni riguardarono installazioni militari. Negli anni Sessanta, negli Stati Uniti, la nascita del movimento hippie portò le generazioni dei più giovani ad abbandonare il desiderio della proprietà privata a favore dell'esperienza, della condivisione e del contatto con la natura. Questa nuova visione della vita portò le comunità hippie a trasferirsi in aree lontane dalla società civile e a costruire abitazioni fai-da-te, semplici e leggere, realizzate con mezzi e materiali economici e di fortuna. Si diffusero così pubblicazioni come *Domebook*³ e *Domebook 2*⁴, una sorta di manuale tecnico, stampato su carta riciclata, che spiegava in maniera elementare ma esaustiva (per consentirne la comprensione a chiunque) come costruire cupole

2 R. B. Fuller, *Building construction* (brevetto n. US2682235 A), 1954.
Disponibile presso: <https://www.google.com/patents/US2682235> (ultimo accesso: Maggio 2016)

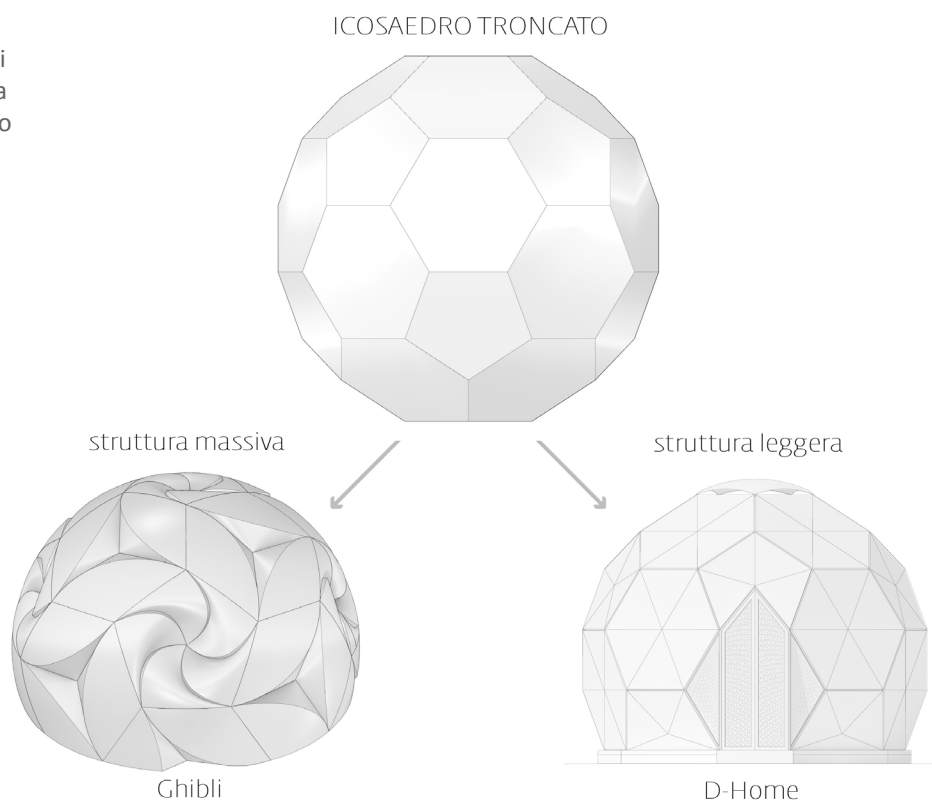
3 L. Kahn, *Domebook*, Pacific Domes, 1970.

4 L. Kahn, *Domebook 2*, Pacific Domes, 1971.

derivanti principalmente dalle geodetiche di Fuller, e altri modelli di tende e ripari con tecniche semplici e materiali facilmente reperibili.

A partire dalle riflessioni su questi temi, e riflettendo sul tema delle abitazioni minime, sono stati sviluppati due casi studio, D-Home e Ghibli, entrambi basati sulla cupola discretizzata secondo la geometria dell'icosaedro troncato, poliedro archimedeo che consente di tassellare una sfera con due soli tipi di superfici piane, un pentagono e un esagono. In questo modo, le operazioni sia di fabbricazione che di montaggio, risultano facilitate e velocizzate dalla presenza di due soli blocchi diversi tra loro. Come vedremo, D-Home è una sperimentazione che impiega un sistema leggero in legno, mentre Ghibli è una sperimentazione che impiega un sistema spingente massivo (fig. 5.1).

Fig. 5.1
Differenti declinazioni strutturali della stessa geometria: l'icosaedro troncato.



5.2.1 D-Home

Il prototipo “D-Home”⁵ è nato pensando ad una piccola architettura legata al patrimonio architettonico e culturale dell’area mediterranea, un riparo minimo temporaneo finalizzato a scopi turistici, come il campeggio.

D-Home è una piccola cupola prefabbricata in legno, di dimensione pari a 10 m² complessivi. La geometria globale della struttura si presenta come la discretizzazione di una cupola in un icosaedro troncato, costituito da facce esagonali e pentagonali, a loro volta scomposte in triangoli. Ciascun modulo costruttivo triangolare, è costituito da un pannello di chiusura, tre travi-lamelle (di 20 cm di altezza) poste sul bordo del modulo, ed ulteriori tre lamelle di controventamento, poste al centro (a formare una Y). Le lamelle presentano in mezzeria degli incavi semicircolari utili a ridurre il peso proprio della struttura, senza tuttavia comprometterne la stabilità statica. La scomposizione in moduli triangolari facilita sia le operazioni di trasporto che di assemblaggio, riducendo la dimensione degli elementi costruttivi.

Il legno, impiegato in pannelli multistrato di 20 mm di spessore, è stato preferito ad altri materiali per la sua leggerezza e stabilità dimensionale, per la convenienza economica e per la sua attitudine ad essere impiegato nell’ambito della prefabbricazione.

Nonostante la complessità dell’esito estetico, D-Home si presta ad una realizzazione agevole e veloce, limitando le operazioni di montaggio dei pannelli modulari in legno, a semplici operazioni di avvvitamento tramite viti in acciaio autofilettanti. Tutte le componenti in legno

5 Gruppo di ricerca: New Fundamentals Research Group; Supervisione scientifica: Prof. Giuseppe Fallacara; Progettisti: Giuseppe Fallacara, Micaela Colella, Maurizio Barberio. Realizzazione prototipo: WoodTec e Parisi Design.

Micaela Colella

Architettura residenziale e sostenibilità

La casa prefabbricata mediterranea nell'era dell'Industria 4.0

Cap 5. La cellula abitativa minima: sperimentazioni prototipali

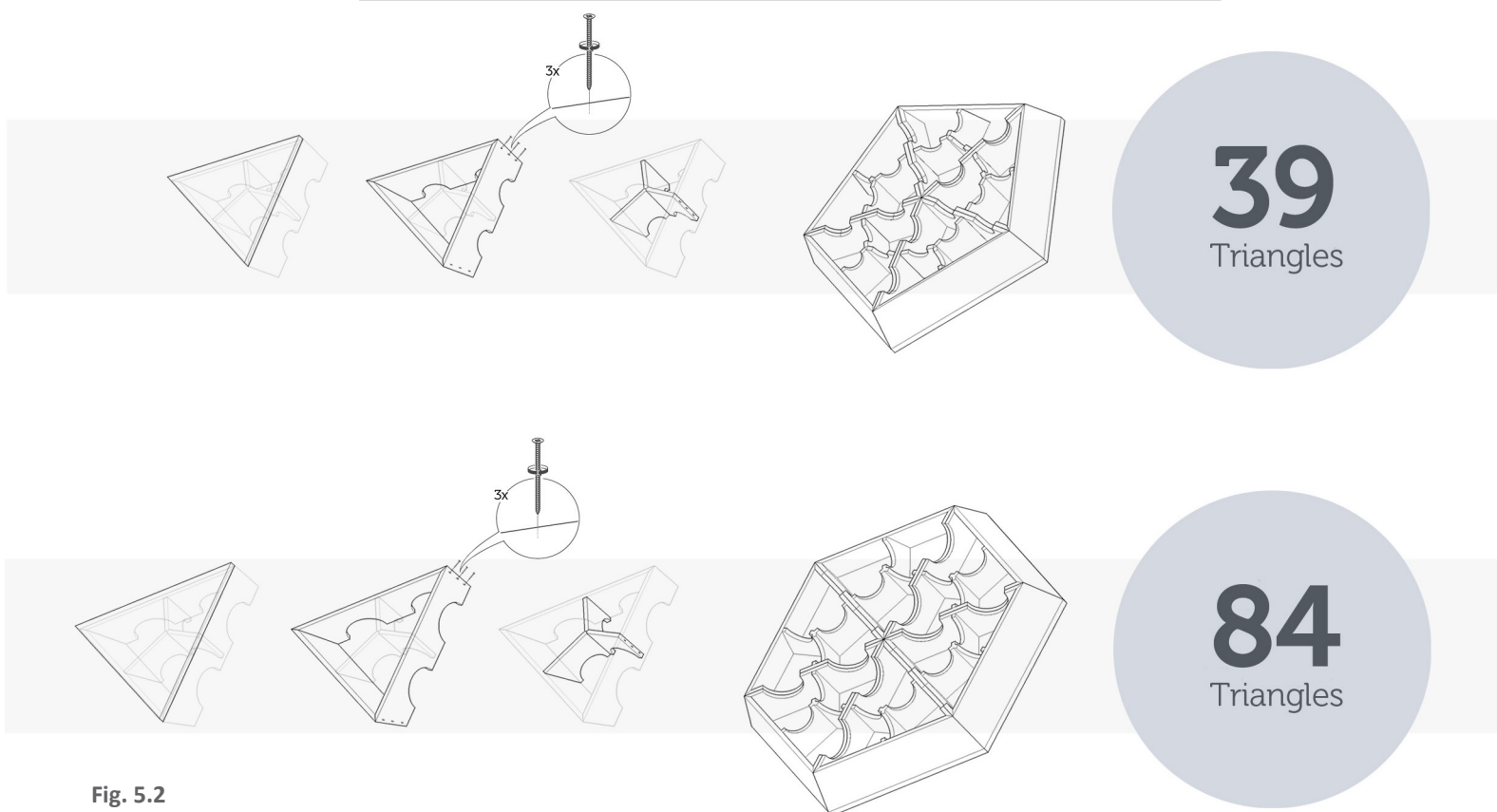


Fig. 5.2

Componenti dei moduli
pentagonali
ed esagonali.

possono essere sagomate preventivamente con macchine a controllo numerico, ma anche, più semplicemente, tagliando con sega circolare da banco i pannelli lignei secondo l'angolo formato tra due pannelli attigui. Dopo l'assemblaggio, l'involucro è reso impermeabile mediante la sigillatura dei giunti con silicone acrilico e una successiva smaltatura bianca. Il colore bianco è scelto, naturalmente, per la sua capacità di riflettere la luce solare, ed evitare così il surriscaldamento degli ambienti interni, motivo per cui è diventato nel tempo il colore dominante delle costruzioni in area mediterranea.

Nonostante le dimensioni estremamente ridotte, la temporaneità di utilizzo e la necessaria economicità di queste strutture, sono stati adottati degli accorgimenti progettuali affinché possa essere garantito il comfort interno in condizioni di calura estiva (stagione per cui è immaginato l'utilizzo prevalente). Il modulo abitativo presenta, infatti,

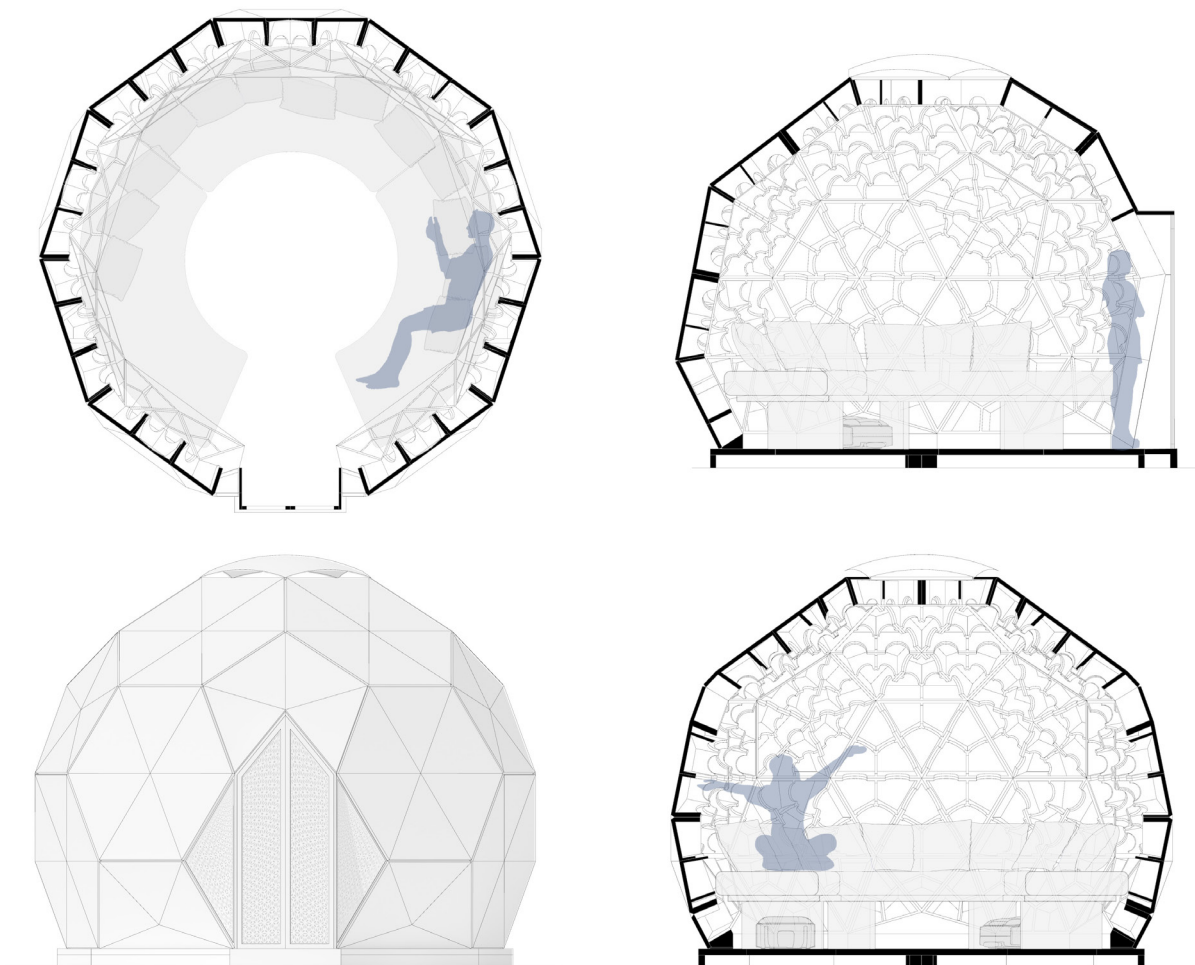


Fig. 5.3
Pianta, prospetto e
sezioni di D-Home.

un ingresso costituito da una porta traforata a doppio battente che, secondo il principio di funzionamento delle *moucharabieh* arabe, è in grado di agevolare l'ingresso di aria fresca dall'esterno. Il dispositivo di ventilazione naturale di origine araba, è riprodotto da una intricata geometria che può essere agevolmente realizzata con fresatura CNC o taglio laser. La ventilazione naturale è ulteriormente favorita dalla presenza di un'apertura sulla sommità della struttura, corrispondente a un modulo pentagonale, protetta da eventuali precipitazioni, che consente la fuoriuscita dell'aria surriscaldata, che essendo più leggera, sale verso l'alto.

Della cupola D-Home è stato realizzato il prototipo in scala reale di un modulo esagonale (fig. 5.5). In questo modo è stato possibile

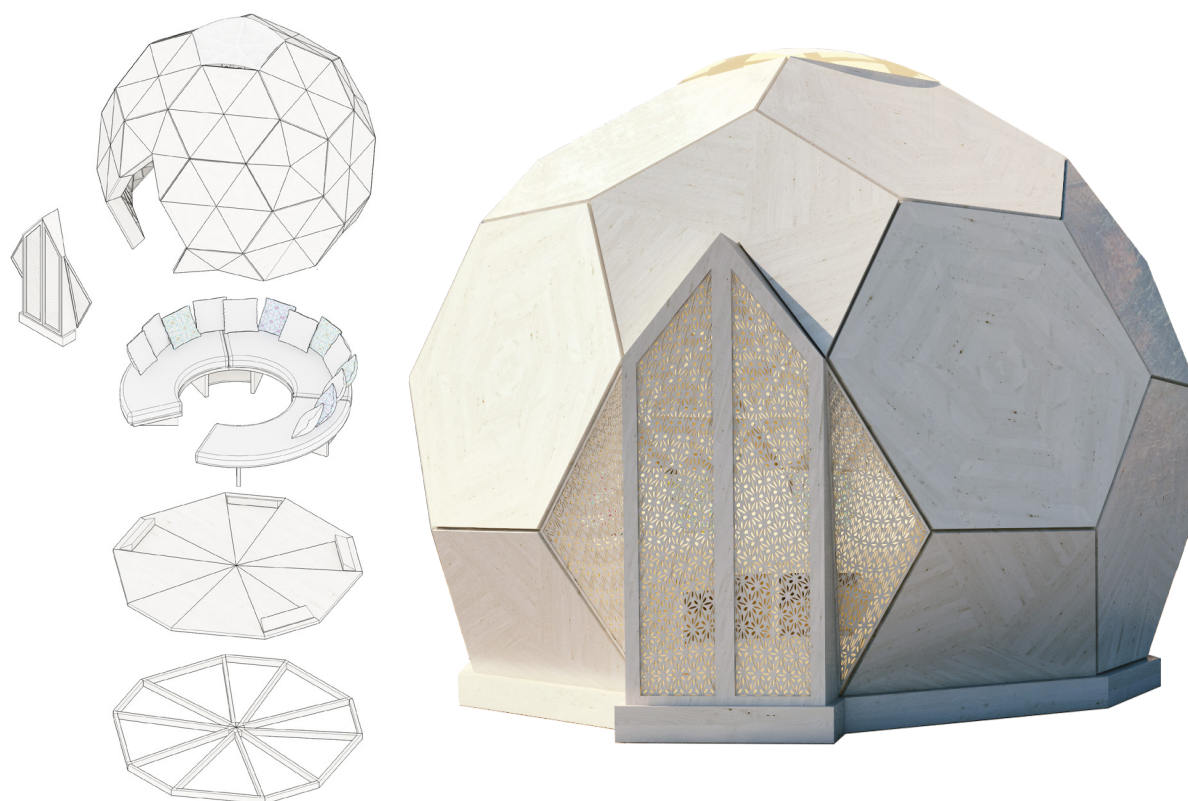


Fig. 5.4
Esploso assometrico
e fotoinserimento di
D-Home.

verificare la fattibilità della sua fabbricazione, ma non il funzionamento dell'involucro nel suo complesso, secondo le previsioni di progetto. L'esperienza ha confermato che, come già ipotizzato, l'unico elemento di relativa complessità è riscontrabile nell'angolo non retto tra i diversi moduli, necessario per restituire la geometria globale.

5.1.1 Considerazioni finali e possibili sviluppi

Futuri sviluppi potrebbero riguardare l'applicazione del sistema costruttivo di D-Home per soluzioni abitative di maggiori dimensioni, che richiedono requisiti di comfort più elevati. È possibile, infatti, migliorare agevolmente le prestazioni di isolamento del modulo abitativo utilizzando pannelli di isolamento adeguati. In tal caso, ulteriori riflessioni dovrebbero essere poste sul posizionamento delle aperture (sia porte che finestre) per garantire condizioni di illuminazione, ventilazione e sicurezza adeguate.

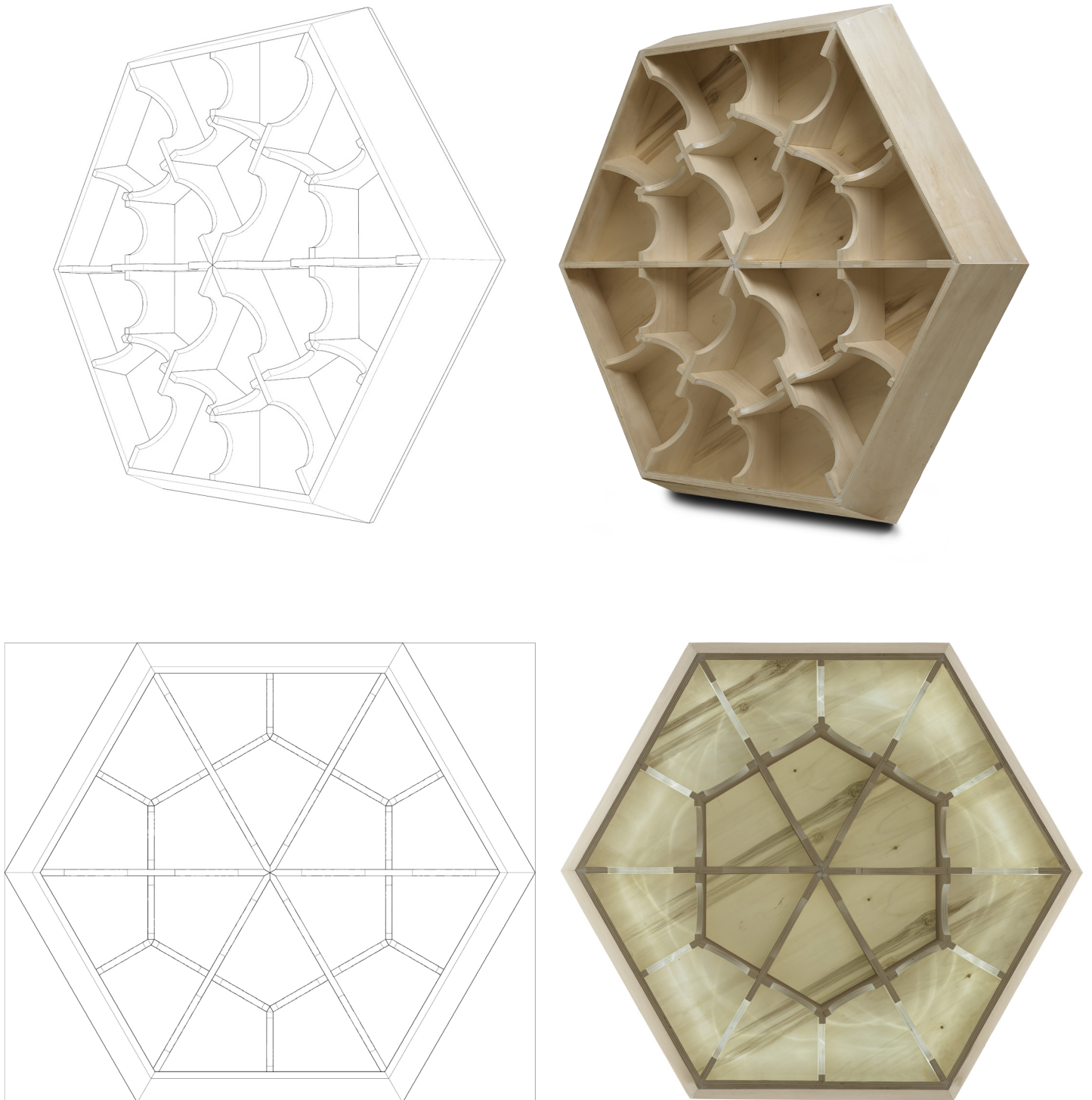


Fig. 5.5
Disegni e foto del modulo
esagonale realizzato.

Micaela Colella

Architettura residenziale e sostenibilità

La casa prefabbricata mediterranea nell'era dell'Industria 4.0

Cap 5. La cellula abitativa minima: sperimentazioni prototipali



Fig. 5.6
Fotoinserimento e vista interna.

5.2 Ghibli

Le aree del mondo caratterizzate da climi estremi, come le zone desertiche africane, sono segnate dalla carenza di materie prime da trasformare in materiale da costruzione e, mentre nel resto del mondo è avvenuta una lunga evoluzione delle forme architettoniche che ha portato alle odierne pratiche costruttive, probabilmente questi luoghi sono gli unici dove è ancora possibile e auspicabile sviluppare delle soluzioni abitative profondamente legate alla natura del luogo, che siano in grado di migliorare significativamente la vita dei suoi abitanti^{6,7}.



Fig. 5.7
Fotoinserimento della
cupola Ghibli.

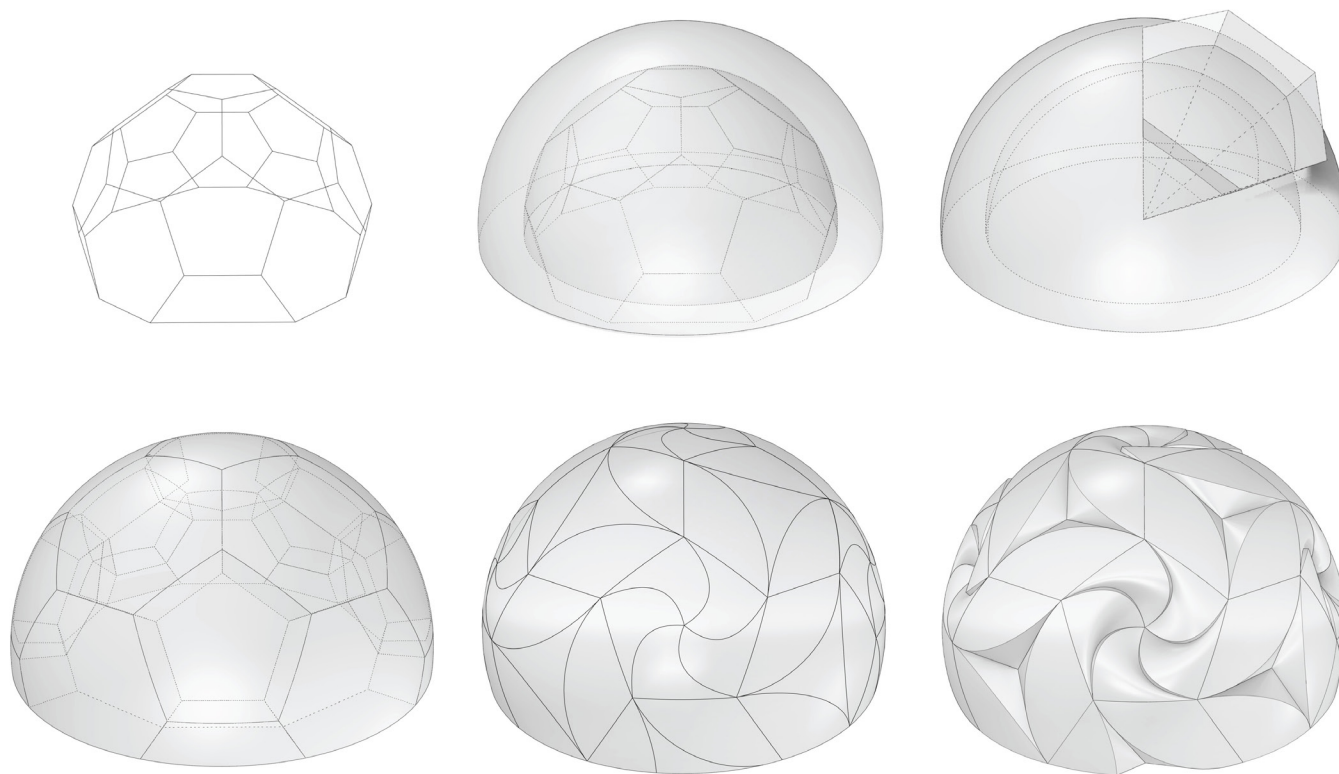
6 F. Caròla, *Vivendo, pensando, facendo...memorie di un architetto*, Intra Moenia, Napoli, 2005.

7 L. Alini, (a cura di), *Cupole per abitare. Un omaggio a Fabrizio Carola*, Libellula Edizioni, Tricase (LE), 2012.

A partire da queste riflessioni, è stato progettato il prototipo sperimentale *Ghibli*⁸, che prende il nome dal caldo vento libico proveniente da Sud-Est. Ghibli è una cellula abitativa minima, aggregabile in villaggi, realizzata secondo una geometria stereotomica semisferica estradossale. Anche in questo caso, la geometria generale è riconducibile ad una cupola discretizzata secondo un icosaedro troncato, ottimizzato per la sua costruzione con facce intradossali planari, in modo tale che vi sia sempre, per ogni blocco, una superficie piana di appoggio per il banco di lavoro. Un ulteriore elemento di semplificazione, in grado di velocizzare la costruzione, è dato dal numero esiguo di conci di cui la cupola è costituita.

Fig. 5.6

Fotoinserimento e vista interna.



8 Gruppo di ricerca: New Fundamentals Research Group; Supervisione scientifica: Prof. Giuseppe Fallacara; Progettisti: Giuseppe Fallacara, Micaela Colella. Realizzazione prototipo in pietra: PiMar.



Fig. 5.9
Fasi di costruzione della
maquette in pietra
durante lo stage.

Della cupola Ghibli è stato inizialmente realizzato un prototipo in scala con blocchi pieni in pietra leccese tagliati con una fresa a controllo numerico. L'assemblaggio di questa piccola cupola in pietra è avvenuto in uno stage formativo tenutosi al Dipartimento di Architettura dell'Università degli Studi Roma Tre nel Febbraio del 2016.

Gli studenti, dopo aver assistito alla presentazione del progetto, si sono impegnati nel montaggio del prototipo, assistiti dai tutor. Alcune difficoltà durante il montaggio sono state causate dalle seguenti criticità:

- una inadeguata preparazione dei file del percorso utensile della macchina a controllo numerico, da parte del tecnico addetto alla lavorazione, ha causato delle piccole ma decisive discrepanze geometriche rispetto al modello tridimensionale di progetto;
- gli errori di lavorazione, rispetto alla geometria originale di progetto, rendevano impossibile un montaggio preciso, perché i conci non avevano più la giusta corrispondenza tra le facce adiacenti;
- nonostante la dimensione ridotta dei conci, la loro movimentazione risultava difficoltosa a causa dell'elevato peso;
- conseguentemente alle prime due imprevedibili criticità, è stato necessario impiegare della malta per riempire i larghi giunti formati tra i conci, operazione non prevista in fase di progetto (montaggio a secco).

Delle suddette criticità, la più rilevante risulta essere il peso dei blocchi, poiché le altre possono essere facilmente evitate grazie ad un processo di fabbricazione più accurato. Da questa considerazione hanno avuto origine delle riflessioni che hanno portato ad una evoluzione del progetto.

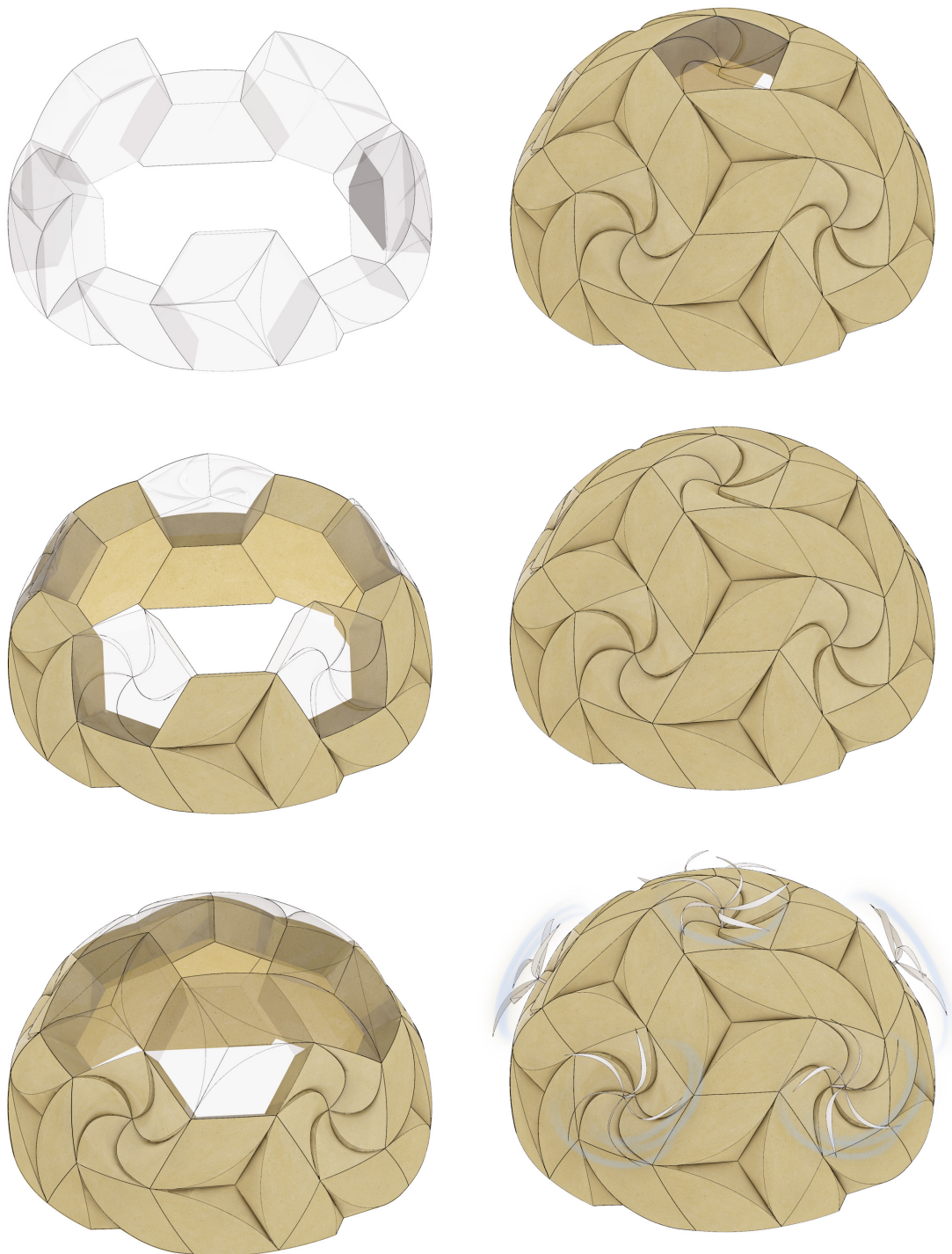


Fig. 5.10
Simulazione
tridimensionale delle
fasi di assemblaggio
della cupola.

Il nuovo progetto prevede la costruzione della cupola utilizzando un procedimento a secco, attraverso l'inserimento di un materiale inerte, facilmente reperibile in loco⁹, all'interno di involucri di plastica trasparente realizzati tramite stampaggio rotazionale di polimeri riciclati, oppure mediante stampa 3D, dopo aver effettuato tutte le dovute verifiche di stabilità del materiale (soprattutto al variare della temperatura). In questo modo, gli elementi costitutivi della cupola, gli involucri di plastica, risultano essere leggeri, e dunque, facilmente trasportabili e assemblabili senza l'ausilio di mezzi di cantiere e di personale qualificato. Tra i materiali più idonei per questo processo, vi è sicuramente la sabbia, facilmente reperibile in molti luoghi del pianeta, soprattutto i più inospitali.

I blocchi di plastica, assemblati per filari, possono essere riempiti solo dopo il loro posizionamento, entrando in compressione così filare dopo filare, fino al posizionamento del concio in chiave (fig. 5.10).

Grazie a recenti ricerche sappiamo, inoltre, che è possibile indurre la sabbia ad un processo di solidificazione. Attraverso l'uso di una soluzione contenente urea, cloruro di calcio e batteri non patogeni, il *bacillus pasteurii*, è possibile trasformare, in breve tempo, la sabbia in solida roccia arenaria, scongiurando così la fuoriuscita di materiale o la compromissione della stabilità dovuto ad un'eventuale rottura o deterioramento della plastica. La sabbia potrebbe, quindi, attraverso il trattamento appena descritto, essere impiegata nella costruzione sia di

9 Sabbia, terra, argilla sono tutti materiali idonei a essere utilizzati come materiale inerte.

strutture continue¹⁰, che di strutture discrete¹¹.

Quest'ultimo caso, risulta più aderente alla natura del progetto in esame. Come è noto, la sabbia ha un ottimo potere isolante, grazie alla sua elevata inerzia termica, ed è quindi in grado di garantire buone condizioni di comfort interno, favorito ulteriormente dalla forma emisferica dell'intradosso, in grado di migliorare la circolazione interna dell'aria.

5.2.1 Considerazioni finali e possibili sviluppi

L'esigenza dell'abitare è da sempre accompagnata dalla necessità di acqua potabile. Per questo si è scelto di conformare la superficie estradossale della cupola secondo spirali che permettano di convogliare all'interno di cisterne, poste alla base della struttura, l'acqua di condensa che si crea sulla superficie plastificata dei conci per merito della forte escursione termica notturna.

Al centro dei conci pentagonali è prevista, inoltre, la presenza di un sistema microeolico in grado di sfruttare l'energia del vento del deserto, trasformandola in energia elettrica.

La conformazione sferica della cupola e la sua specifica conformazione spiraliforme, infine, migliorano l'aerodinamicità della costruzione

10 M. Larsson, *Dune: Arenaceous Anti-Desertification Architecture*. In V. Badescu, R. B. Cathcart, (a cura di), *Macro-engineering Seawater in Unique Environments. Arid Lowlands and Water Bodies Rehabilitation*. Springer, Berlin, 2011.

11 G. K. Dosier, *Methods for making construction material using enzyme producing bacteria* (brevetto n. US 8728365 B2), 2011. Disponibile presso: <https://www.google.com/patents/US8728365> (ultimo accesso: Febbraio 2016)

Micaela Colella

Architettura residenziale e sostenibilità

La casa prefabbricata mediterranea nell'era dell'Industria 4.0

Cap 6. Il rifugio temporaneo: sperimentazione prototipale



Fig. 5.11
Fotoinserimento
della cupola.

permettendo una maggiore captazione delle correnti d'aria, e quindi una migliore performance energetica dell'impianto.

Grazie all'adozione di questi accorgimenti, la cupola Ghibli potrebbe essere in grado di offrire, oltre a un temporaneo riparo dalle estreme condizioni climatiche esterne, anche piccole quantità di energia elettrica e di acqua potabile necessarie per soddisfare le principali esigenze dell'uomo.

Capitolo 6

Il rifugio temporaneo: sperimentazione prototipale

6.1 Just a Minute

Una catastrofe naturale può rovinare la vita di una intera comunità in pochi minuti. La ricostruzione delle città colpite da questi eventi, però dura generalmente diversi anni, nei quali gli abitanti del luogo, oltre a dover affrontare la durezza del proprio stato di superstite, devono rinunciare a lungo ad un seppur parvente ritorno alla normalità, disponendo di spazi propri, di una propria casa, della propria vita.

Pensando a queste situazioni di emergenza (tristemente frequenti), si è deciso di progettare un rifugio temporaneo idoneo a fornire in breve tempo una soluzione abitativa a gruppi numerosi di persone, senza rinunciare al comfort interno e al benessere psico-fisico.

È sorto così il progetto di una casa temporanea istantanea, che può dare la possibilità di ricominciare la propria vita in “Just a Minute¹”.

Il progetto “Just a Minute” si basa su un modulo-casa semplice ma efficace, molto aperto alla personalizzazione ed anche alla possibile

1 Progettisti: Micaela Colella (capogruppo), Maurizio Barberio.



Fig. 6.1
Vista dei moduli
inseriti in un ambiente
naturale.

conversione in casa stabile. L'idea principale del progetto è quella di sfruttare materiali facilmente reperibili in molti luoghi, leggeri, resistenti ed economici, oltre che naturali e riciclabili, per realizzare un'abitazione velocemente assemblabile, leggera e compatta da trasportare, resistente (nonostante il suo carattere temporaneo) ed economica.

Si è giunti, così, alla scelta di impiegare una struttura dispiegabile (a fisarmonica), costituita da canne di bambù e completata da un involucro tessile. La struttura così concepita, consente di trasportare il modulo abitativo chiuso, occupando un ingombro di 2.5 x 4 metri e, una volta aperto, di ottenere una casa di 4 x 11.7 metri. La sua realizzazione non richiede tecnologie complesse o mano d'opera specializzata, ma solo

Micaela Colella

Architettura residenziale e sostenibilità

La casa prefabbricata mediterranea nell'era dell'Industria 4.0

Cap 6. Il rifugio temporaneo: sperimentazione prototipale

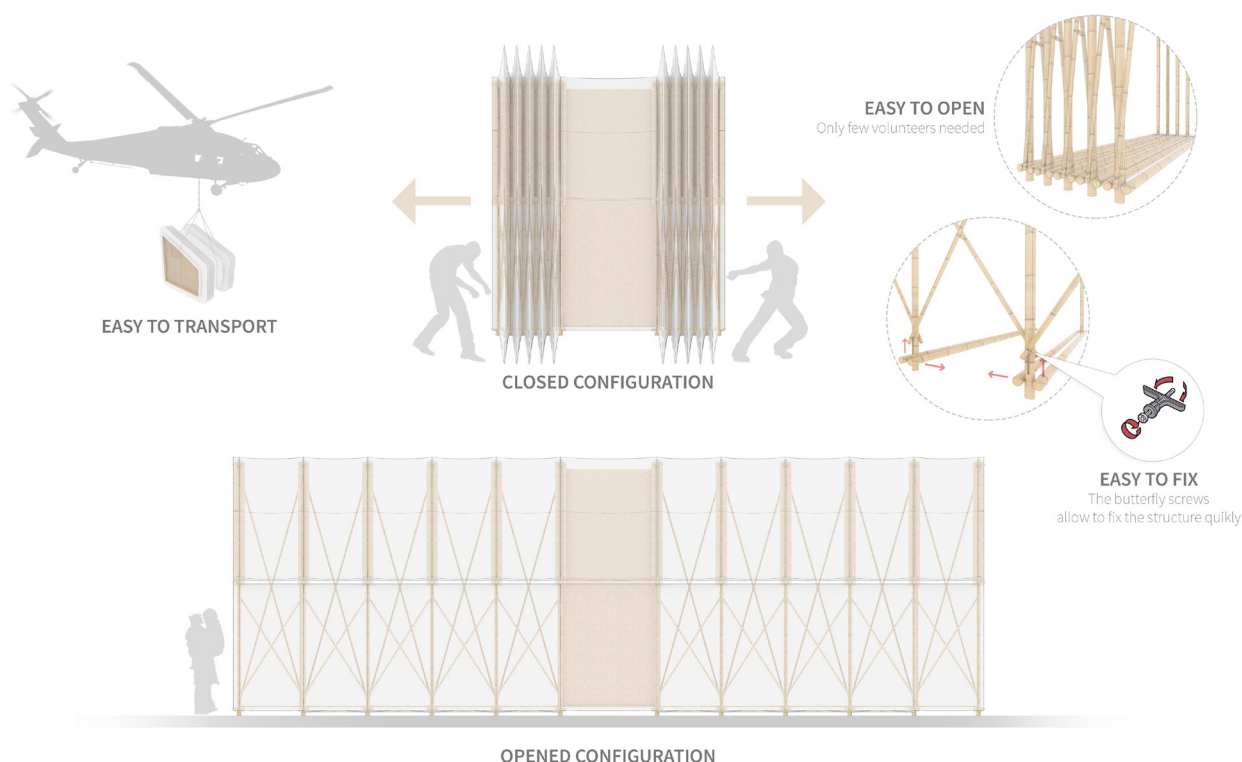


Fig. 6.2

Concept progettuale

una serie di semplici operazioni utili a preparare i vari pezzi per essere montati poi tutti insieme nella configurazione finale. La modularità della struttura consente di organizzare il processo di costruzione per fasi, come in una catena di montaggio.

Al centro della casa, costituita da pannelli di legno OSB rivestibili, vi è la parte fissa del rifugio, costituita dal blocco dei servizi (bagno e cucina) che misura 1.5 x 4 metri. Ai lati del blocco centrale, si dispiegano le due stanze principali (la zona giorno e la zona notte) di 4 x 4 metri, più una piccola zona esterna coperta di 1 x 4 metri.

Le due stanze laterali, sono costituite appunto da canne di bambù orizzontali (solaio), verticali (montanti) e oblique (tetto) del diametro di 6 cm, controventate da canne di bambù disposte a X, del diametro di 3 cm. Queste aste sono forate al centro e alle estremità, in modo da permettere alla struttura di dispiegarsi. Il fissaggio delle aste, una volta

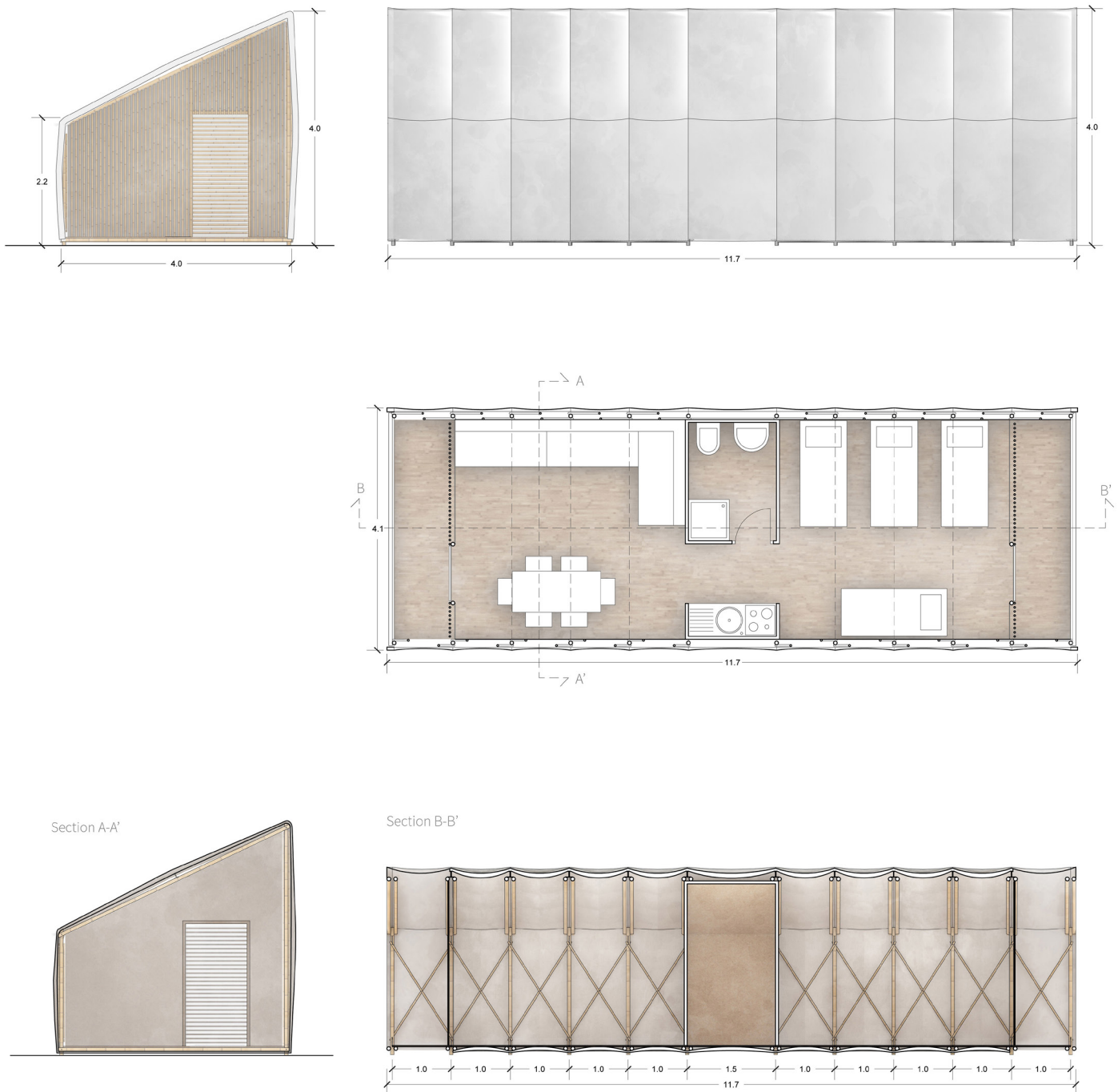


Fig. 6.3
Rappresentazioni
bidimensionali.

aperta la struttura, è assicurata tramite viti a farfalla. Questo sistema di installazione della casa richiede pochi volontari e un procedimento molto semplice, perché la casa arriva sul luogo già completamente montata, ad eccezione del pavimento che viene posizionato quando la struttura è aperta. Il meccanismo di dispiegamento della struttura è facilitato dall'utilizzo di un involucro leggero ma resistente fatto di un doppio strato di juta bianca, al cui interno è posizionata un'imbottitura in lana di pecora, che potrebbe essere realizzata con vecchi maglioni e capi di abbigliamento raccolti attraverso donazioni, garantendo l'isolamento termico sia al caldo che al freddo. Il tutto è ricoperto da una membrana impermeabile, per proteggere la casa dalla pioggia e dalla neve. Questa membrana è messa in tensione grazie a dei distanziatori che, distaccandola dallo strato di juta, consentono anche la traspirazione degli ambienti interni. Le facciate laterali sono chiuse con canne di bambù di piccolo diametro, posizionate in modo tale da rappresentare un sistema verticale di frangisole. Queste facciate sono concepite in modo da risultare versatili. Arretrate rispetto al filo dei frangisole, vi sono delle superfici trasparenti in policarbonato, che aperte danno la possibilità di ventilare adeguatamente l'interno. Anche i frangisole sono reversibili, dando la possibilità all'utente di impiegarli in estate e rimuoverli in inverno, quando è necessario l'ingresso della radiazione solare.

Il tetto inclinato consente facilmente di installare dei pannelli solari e fotovoltaici per rendere la casa energeticamente autosufficiente. L'acqua piovana può essere raccolta dal tetto ed incanalata all'interno del blocco centrale, dove è posizionata una cisterna per il suo recupero e immagazzinamento. Nel bagno, prefabbricato, sono posizionati i servizi minimi (doccia, lavandino, bagno chimico), garantendo un buon livello di igiene agli utenti. Il rifugio è pensato per famiglie numerose,

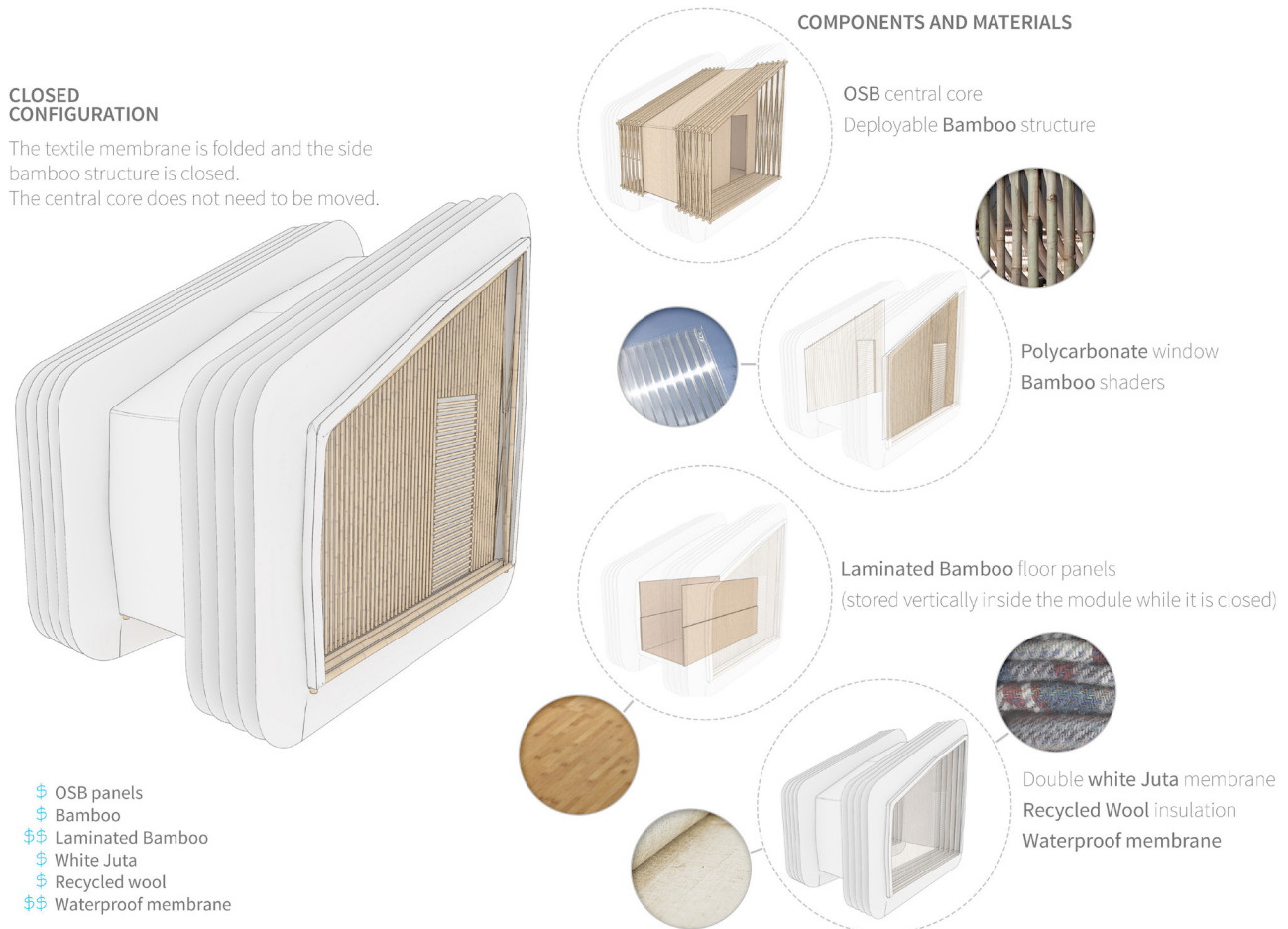


Fig. 6.4
 Schema dei materiali di progetto.

Nella pagina accanto:
Fig. 6.5
 Vista esterna.
Fig. 6.6
 Vista interna.

per cui, in base alle necessità, esso può ospitare dalle 4 fino alle 10 persone (installando letti a castello nella zona notte ed eventualmente nella zona giorno).

Questi rifugi temporanei sono pensati come piccoli moduli abitativi installati sul territorio secondo schemi aggregativi tali da formare case doppie o quadruple, fino a costituire piccoli villaggi, in modo da favorire la vita della comunità dopo la tragedia che l'ha colpita.

Micaela Colella

Architettura residenziale e sostenibilità

La casa prefabbricata mediterranea nell'era dell'Industria 4.0

Cap 2. Nozioni di sostenibilità: nascita ed evoluzione



Capitolo 7

La casa prefabbricata reversibile: sperimentazioni prototipali

7.1 Ecodomus

La progettazione del prototipo abitativo *Ecodomus*¹ ha rappresentato un importante momento di sintesi progettuale delle valutazioni e riflessioni teoriche riportate nella prima parte di questa trattazione.

Seguendo i principi della bioclimatica, *Ecodomus* è stata progettata per rispondere adeguatamente alle esigenze di un'abitazione contemporanea in clima mediterraneo. Dunque, rispetto ai precedenti casi studio, caratteristiche come la temporaneità e le restrizioni spaziali, con la conseguente condizione di limitato comfort interno, sono state abbandonate, lasciando spazio alla progettazione di ambienti idonei alla vita quotidiana, con l'utilizzo di superfici maggiori, l'attenzione

1 Gruppo di ricerca: New Fundamentals Research Group; Supervisione scientifica: Prof. Giuseppe Fallacara; Capoprogetto: Arch. Marco Stigliano; Progettisti: Giuseppe Fallacara, Marco Stigliano, Micaela Colella, Maurizio Barberio, Ubaldo Occhinegro, Micaela Pignatelli. Calcoli Strutturali: Ing. Daniele Malomo; Consulenza impianti: Arch. Giovanni Debernardis. Realizzazione del prototipo: Gervasi Srl, Ingegna Srl, Area Scs, CERISVI, PSTS. Finanziamento del progetto: PO FESR Sicilia 2007/2013, Regione Sicilia, Unione Europea.



Fig. 7.1.1
Fotoinserimento di
Ecodomus.

alla disposizione planimetrica, l'ottimizzazione dell'esposizione solare, l'attenzione all'uso dei materiali ai fini del comfort interno e della sostenibilità della costruzione e, naturalmente, particolare attenzione è stata riservata all'efficienza energetica e all'ottimizzazione strutturale. Secondo la catalogazione riportata della Seconda Parte della Tesi, per la sua natura di abitazione prefabbricata leggera, Ecodomus risulta appartenere alla categoria delle case prefabbricate reversibili.

7.1.1 Il progetto

La soluzione abitativa Ecodomus, nasce dall'idea di ottenere una tipologia architettonica basata su moduli minimi, ripetibili e aggregabili, secondo diverse configurazioni che ripropongono planimetricamente

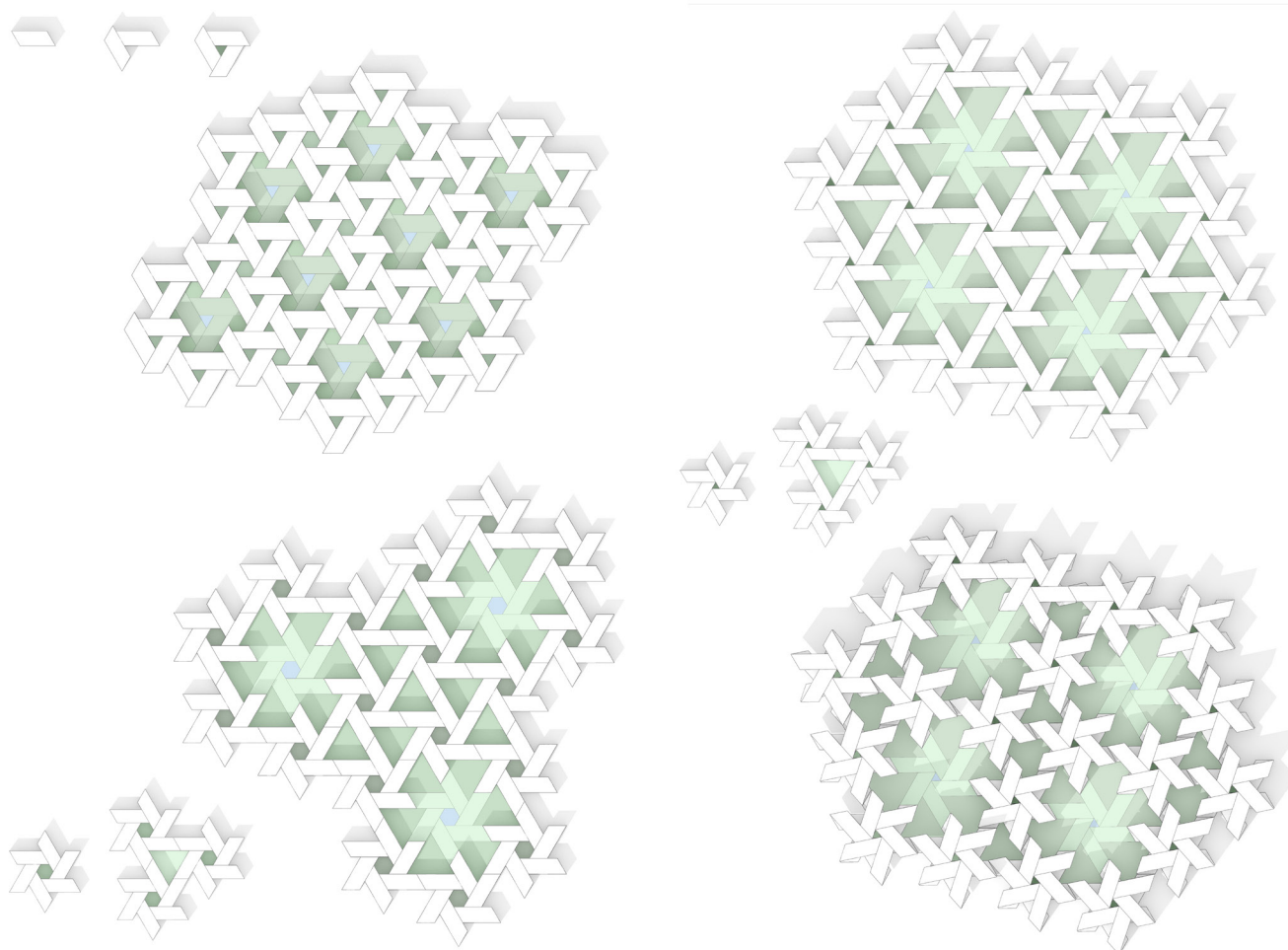


Fig. 7.1.2
Esempi di schemi
aggregativi a base
triangolare.

la complessità degli agglomerati storici della tradizione mediterranea (fig. 7.1.2). Questa disposizione planimetrica, non deve essere considerata come una scelta puramente estetica, o come un richiamo ideale al passato, poiché la sua scelta trova spiegazione nei vantaggi che gli agglomerati storici traevano da una simile conformazione. La disposizione ravvicinata e irregolare, consentiva un reciproco ombreggiamento degli edifici, ma anche delle strade, che evitando un irraggiamento diretto risultavano più vivibili anche in estate. Al fine di ottenere un'abitazione energeticamente efficiente si è scelto, non soltanto di prevedere l'installazione di un impianto fotovoltaico e solare-termico, ma di ridurre al minimo le esigenze energetiche dell'edificio. Per perseguire questo obiettivo, è stato necessario contemplare tutte le

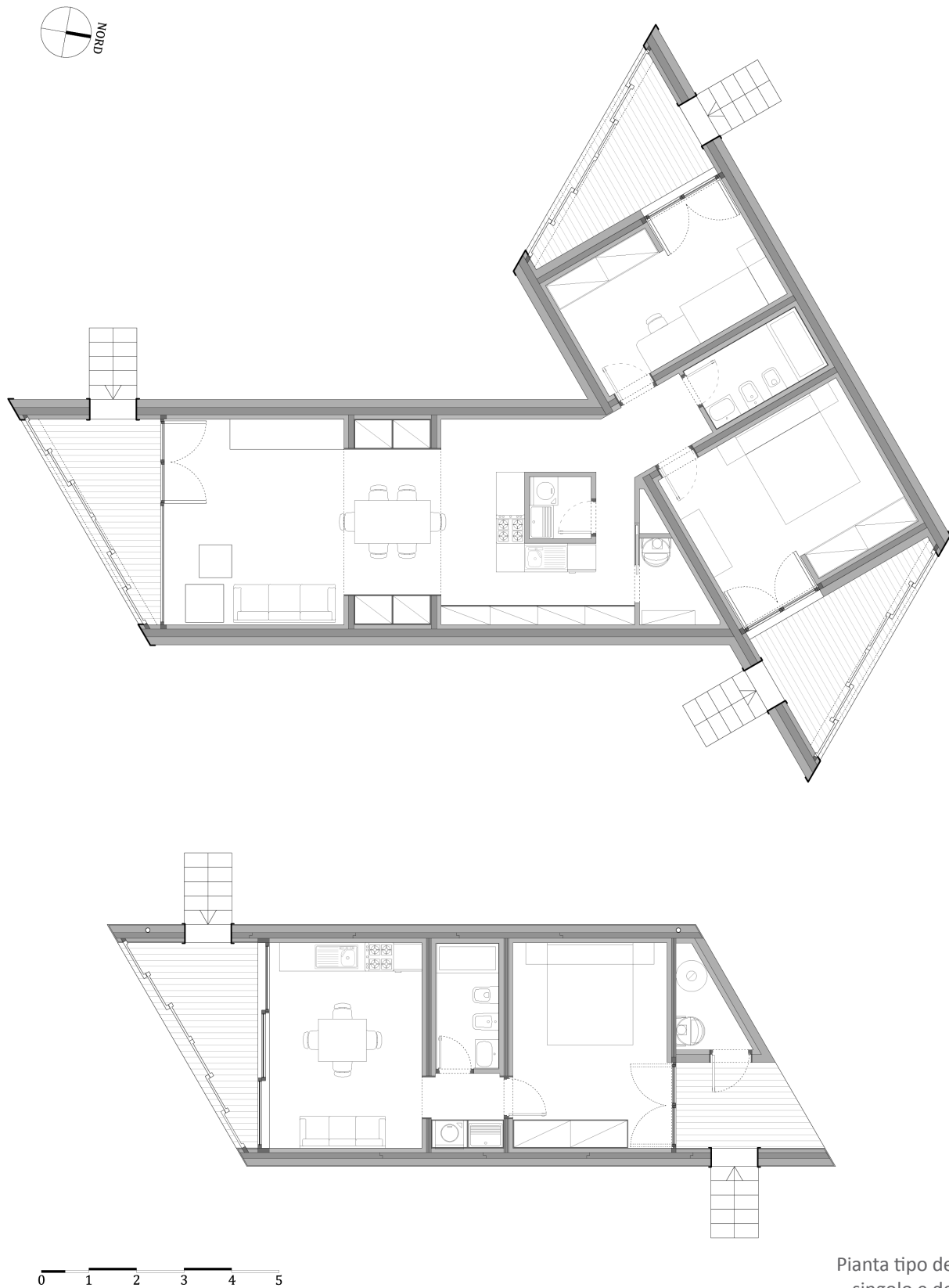


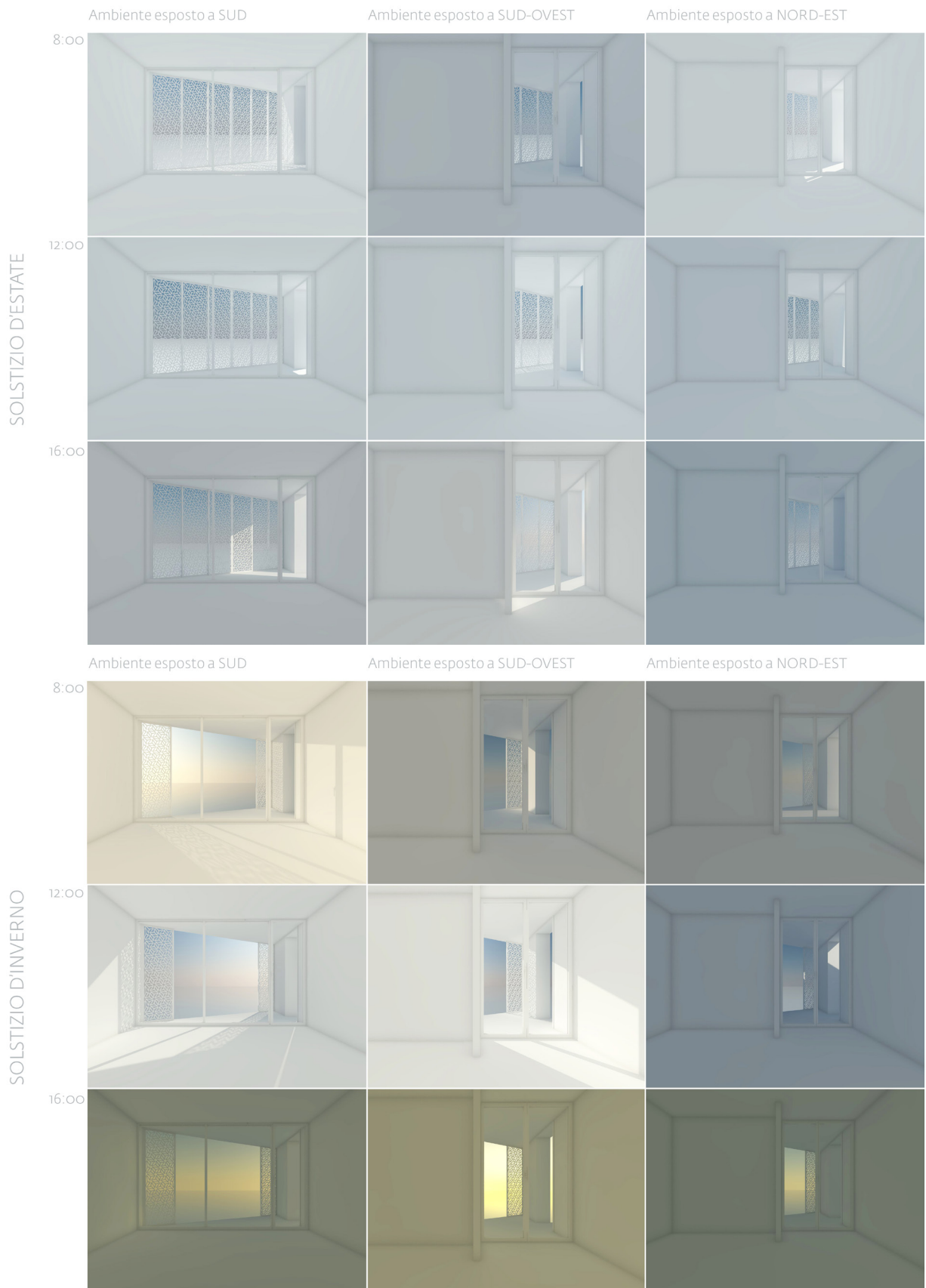
Fig. 7.1.3
Pianta tipo del modulo
singolo e del modulo
doppio.

scelte progettuali, a partire dalla forma dell'organismo architettonico che, determinando la quantità di superficie disperdente, influenza in modo decisivo le sue prestazioni energetiche; si è scelto, infatti, un volume compatto e con poche aperture.

Il modulo base che costituisce l'abitazione è identificabile geometricamente come un parallelepipedo obliquo, di superficie lorda pari a 62 m². Questa superficie è stata valutata dai progettisti, come la superficie minima entro cui, considerata la peculiare geometria planimetrica (parallelogramma), possono trovare un'adeguata risposta tutte le funzioni fondamentali dell'abitare. È possibile, tuttavia, ottenere una maggiore superficie abitabile mediante l'aggregazione di più moduli. Sono state quindi studiate soluzioni di distribuzione funzionale sia per il singolo modulo, sia per aggregazioni di più moduli (fig. 7.1.3). Al variare nel tempo delle necessità di spazio dei propri abitanti, l'abitazione può dunque rispondere aumentando la propria superficie con la costruzione di un ulteriore modulo (limitatamente alle possibilità del lotto).

Il modulo di base dell'abitazione è caratterizzato da una pianta ai cui estremi sono collocati i due ambienti principali, il living e la camera da letto, entrambi arretrati rispetto al filo della facciata con una veranda triangolare che, oltre a svolgere una funzione di ombreggiamento e di filtro con l'esterno, rettifica planimetricamente gli spazi interni. Al centro è situato il blocco dei servizi che, nel caso di aggregazione tra più moduli, funge da nodo di distribuzione tra questi.

Molta attenzione è stata rivolta alla scelta dell'orientazione. Considerando che la costruzione del prototipo sarebbe avvenuta nella città di Termini Imerese, in provincia di Palermo, si è proceduto a



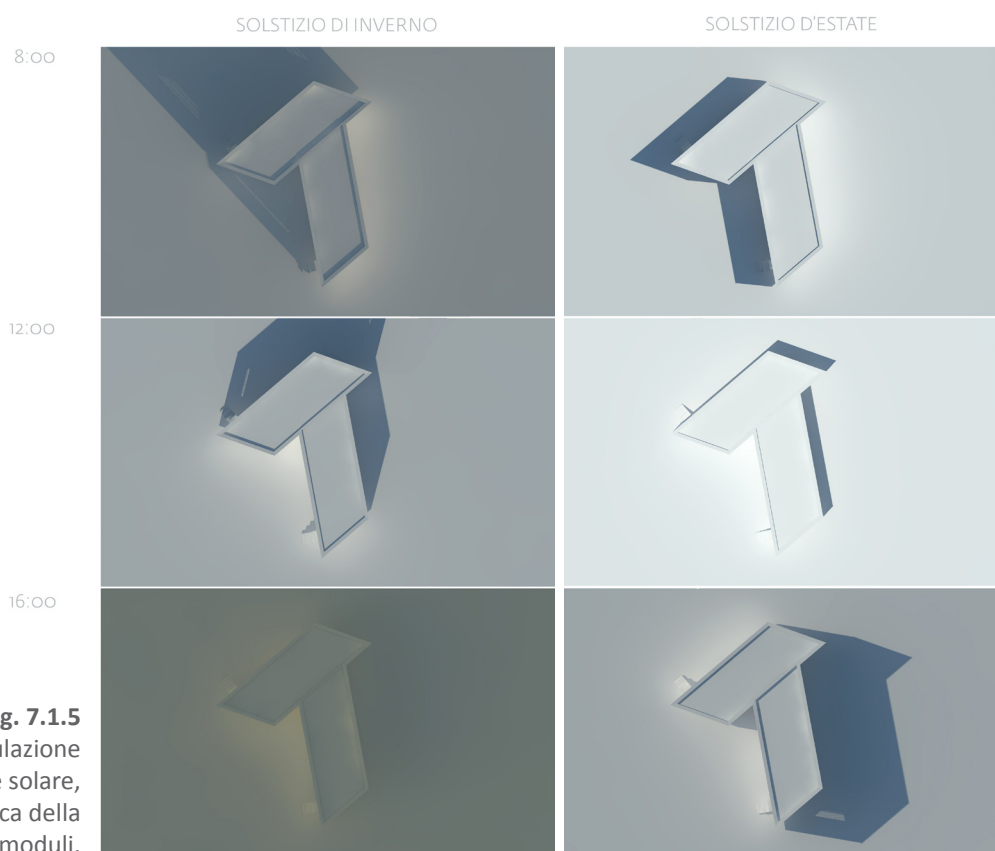


Fig. 7.1.5
Simulazione dell'esposizione solare, vista planimetrica della soluzione a due moduli.

simulare virtualmente, con il plug-in *V-Ray* del programma *Rhinoceros*, l'esposizione solare della costruzione in tre diversi momenti della giornata (ore 8:00, 12:00, 16:00) al variare delle stagioni (fig. 7.1.4).

Attraverso questo metodo di verifica, si è scelta come orientazione ottimale, rispetto alla latitudine del sito ($13,46^\circ$), un'inclinazione di 9° sull'asse nord-sud, in modo tale da favorire il comportamento passivo dell'edificio.

La posizione degli ambienti interni, rispetto all'orientazione, è stata scelta valutando l'utilizzo degli spazi durante l'arco della giornata.

Il living, ambiente della casa vissuto per un maggior numero di ore durante la giornata, è collocato sul fronte sud, in modo da sfruttare nel periodo invernale gli apporti gratuiti della radiazione solare. La casa presenta sul fronte sud un'ampia apertura vetrata che consente

Nella pagina accanto:
Fig. 7.1.4
Simulazione dell'esposizione solare degli ambienti interni, nella soluzione a due moduli, in estate (sopra) e in inverno (sotto).

una maggiore captazione dell'energia solare in inverno, quando i raggi solari, essendo più bassi all'orizzonte, penetrano direttamente nell'abitazione; mentre nel periodo estivo, essendo il sole più alto, i raggi solari si infrangono sullo sporto della copertura creando un cono d'ombra. La grande vetrata a sud è arretrata dal filo dell'edificio di 2 metri, assicurando il comfort termico interno anche durante la stagione estiva, evitando alla radiazione solare di penetrare direttamente e produrre effetti di surriscaldamento e fenomeni di abbagliamento.

I versanti esposti ad est hanno un buon soleggiamento nelle ore mattutine, più radente e prolungato in inverno, più intenso in estate. I versanti esposti ad ovest hanno medio soleggiamento nelle ore pomeridiane, più radente e prolungato in inverno, ed intenso in estate; per evitare il surriscaldamento su questo fronte sono stati previsti sistemi di ombreggiamento. Nella versione a un solo modulo abitativo, i lati esposti a est e a ovest sono completamente chiusi, a eccezione di una piccola apertura a ovest in corrispondenza del bagno. I versanti esposti a nord vengono investiti dai raggi solari solo all'alba e al tramonto con inclinazione radente al suolo, per questo, nella versione a due moduli a nord non vi sono bucatore, mentre nella versione a un solo modulo presenta una apertura di modeste dimensioni.

Un ulteriore accorgimento volto a migliorare il comportamento passivo dell'edificio, è riscontrabile nella scelta del colore bianco per l'involucro opaco dell'edificio. Il colore bianco, infatti, è in grado di riflettere più del 90% della radiazione solare visibile (vedi capitolo 3).

Un ultimo accorgimento mirato al controllo della radiazione solare è stato ripreso, rivisto e aggiornato, dalla tradizione arabo-mediterranea, la *moucharabieh*, ovvero il dispositivo di schermatura solare e di ventilazione naturale, tradizionalmente utilizzato nella cultura araba

per raffrescare gli ambienti e decorarli al tempo stesso. Tale sistema schermante caratterizza le facciate corte dei volumi, e in particolar modo, funge da schermo solare per la facciata a sud e da sistema di raffrescamento per la facciata a nord.

Strutturalmente, si è scelto di restituire al muro la sua funzione portante (rispetto alla tradizione costruttiva mediterranea), impiegando pannelli strutturali in legno X-Lam per creare un sistema scatolare, controventato al centro da due muri trasversali (in corrispondenza del blocco dei servizi). La scelta di questo sistema costruttivo è stata dettata da numerosi fattori.

L'assemblaggio di pannelli portanti in legno X-Lam, rispetto alla realizzazione di pareti in muratura portante, permette una notevole riduzione dei tempi di costruzione, oltre che ottime performance di:

- resistenza ai sismi;
- resistenza agli incendi;
- comfort abitativo;
- isolamento termico.

Uno degli aspetti del prototipo su cui maggiormente si è scelto di sperimentare, è la concezione scatolare dell'involucro portante della casa. Ecodomus, per connettere tra loro le pareti e i solai della casa impiega i tradizionali incastri "a coda di rondine", ripresi dalla tradizionale lavorazione del legno e riproposti alla scala architettonica. Questo incastro è stato poi completato con caviglie lignee inserite perpendicolarmente al senso dell'incastro a coda di rondine, che irrobustiscono la connessione, permettendo al tempo stesso la dissipazione dell'energia in caso di sisma, attraverso l'elasticità e l'omogeneità del materiale. Tale sperimentazione è volta alla riduzione dell'uso di viti e



Fig. 7.1.6
Maquette a scala reale
della connessione
sperimentale legno-
legno.

piastre metalliche per connettere le strutture dell'edificio a favore di una totale omogeneità materica e strutturale dell'involucro portante (fig. 7.1.6). Una connessione legno-legno, infatti, evitando l'uso di elementi metallici (chiodi, bulloni, staffe) evita gli effetti dell'usura provocati dall'interazione tra due materiali con proprietà fisico-chimiche profondamente diverse tra loro (condensa, ruggine, rifollamento del legno), ottenendo una giunzione più omogenea e solida rispetto ad una legno-acciaio.

La struttura lignea si presenta sollevata rispetto alla quota del terreno mediante portali di fondazione in acciaio, permettendo la ventilazione del solaio di calpestio ed evitando fenomeni di risalita dell'umidità del terreno, che potrebbero ammalorare la struttura lignea stessa.

Micaela Colella

Architettura residenziale e sostenibilità

La casa prefabbricata mediterranea nell'era dell'Industria 4.0

Cap 7. La casa prefabbricata reversibile: sperimentazioni prototipali

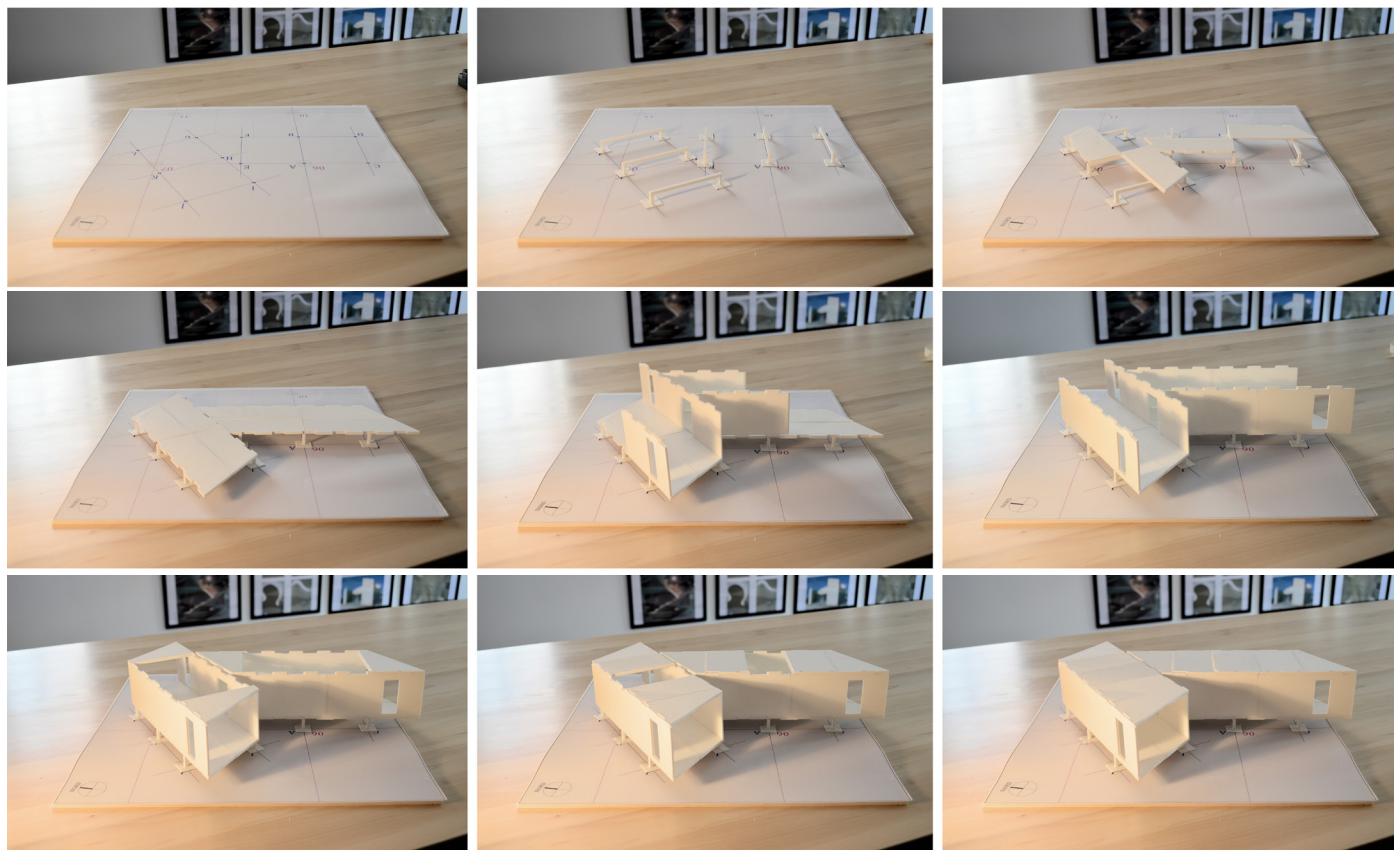


Fig. 7.1.7

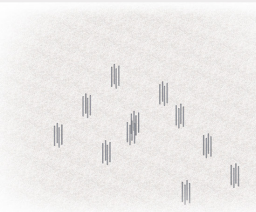
Maquette in stampa 3D della struttura per la simulazione delle fasi di montaggio.

7.1.2 *Maquette di progetto*

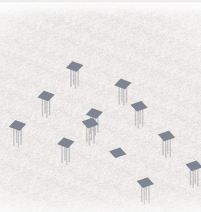
Come già sostenuto nel corso della trattazione, uno degli innegabili vantaggi della prefabbricazione, oltre alla precisione e alla velocità di esecuzione, è la possibilità di governare tutto il processo di costruzione dell'opera fin dalle prime fasi della sua progettazione. E forse ancor più importante, è l'attitudine del progettista che progetta strutture prefabbricate a valutare tutte le opportune modifiche al progetto al fine di ottimizzarne la costruzione.

Per il progetto Ecodomus è stata simulata preventivamente la costruzione, sia tramite la modellazione tridimensionale (fondamentale per le simulazioni dell'esposizione solare precedentemente illustrate),

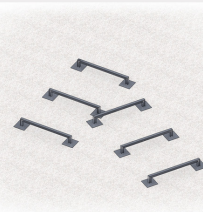
Fase 1 - Posizionamento dei tirafondi di fondazione



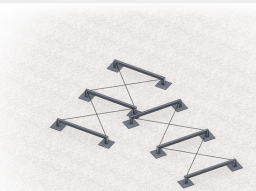
Fase 2 - Posizionamento delle piastre di fondazione



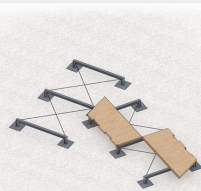
Fase 3 - Posizionamento dei telai di fondazione



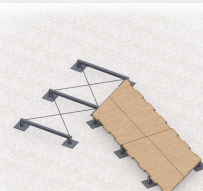
Fase 4 - Controventamento dei telai di fondazione



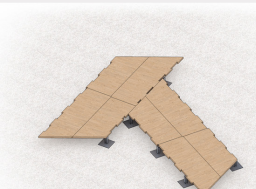
Fase 5a - Posizionamento dei pannelli-solaio in XLAM



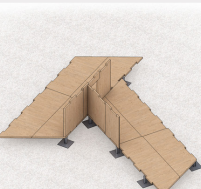
Fase 5b - Posizionamento dei pannelli-solaio in XLAM



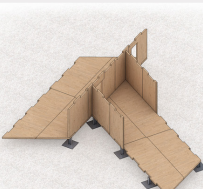
Fase 5c - Posizionamento dei pannelli-solaio in XLAM



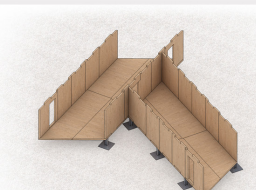
Fase 6a - Posizionamento delle pareti in XLAM



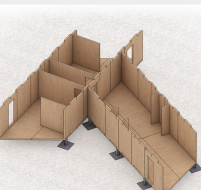
Fase 6b - Posizionamento delle pareti in XLAM



Fase 6c - Posizionamento delle pareti in XLAM



Fase 6d - Posizionamento delle pareti in XLAM



Fase 7a - Posizionamento dei pannelli di copertura in XLAM



Fase 7b - Posizionamento dei pannelli di copertura in XLAM



Fase 8 - Posizionamento dei profili porta-intonaco



Fase 9 - Posizionamento dei montanti porta-intonaco



Fase 10 - Posa in opera dell'intonaco di canapa e calce



Fase 11 - Posa in opera dei pannelli isolanti di fibra di legno



Fase 12 - Posizionamento dei listelli del tetto ventilato



Fase 13 - Posizionamento dei pannelli di legno OSB



Fase 14 - Posa in opera dello strato di guaina impermeabilizzante



Fase 15 - Finitura dell'intonaco



sia attraverso modelli fisici di studio. Un primo modello di studio è stato necessario per verificare la fattibilità della connessione legno-legno, così come ipotizzata in fase di progetto preliminare. Si è deciso di simulare in scala reale l'incastro ligneo per poter procedere successivamente in sicurezza alla realizzazione dell'intera struttura. La costruzione del modello ha dato risultati soddisfacenti, sia in termini di fattibilità realizzativa, sia in termini di robustezza e solidità dell'incastro. Ulteriori indagini, sono state svolte, naturalmente, per verificare il comportamento strutturale del nodo attraverso l'impiego di software di ingegneria strutturale, non oggetto tuttavia di questa trattazione.

Con un secondo modello di studio, sono stati riprodotti in scala, mediante la stampa 3D, tutti i pannelli strutturali X-Lam e i portali metallici di fondazione (fig. 7.1.7). Per una struttura prefabbricata l'esatta consequenzialità e la precisione di montaggio sono aspetti di fondamentale importanza e, data la dimensione e il peso degli elementi da assemblare, andrebbe evitata ogni incertezza durante le fasi di cantiere. In questo modo, è stato possibile verificare la correttezza della sequenza di assemblaggio delle parti ipotizzata preliminarmente.

7.1.3 La costruzione del prototipo

Il prototipo abitativo Ecodomus è stato realizzato nella soluzione a un singolo modulo su un suolo di proprietà della Gervasi Srl (Termini Imerese). La sua costruzione ha visto l'impiego del legno in pannelli strutturali X-Lam realizzati con cinque strati di legno massiccio di abete incollati, con il senso delle fibre alternato, mediante colle prive di formaldeide (categoria E1).

Nella pagina accanto:
Fig. 7.1.8
Simulazione 3D delle
fasi di assemblaggio di
una soluzione
a due moduli.

I pannelli-parete in X-Lam, tagliati con macchine a controllo numerico, all'arrivo in cantiere presentano già le bucatore di porte e finestre così come previsto dal progetto. La loro posa in opera è risultata notevolmente agevolata dal collegamento mediante il giunto-forma, che consente di connettere con precisione e rapidità i diversi pannelli tra loro, rinforzati poi con caviglie in legno (come previsto dall'incastro sperimentale legno-legno messo a punto per questo progetto).

La "scatola" lignea è impostata su una serie di portali in acciaio (controventati da cavi metallici) cui vengono connessi i pannelli del solaio di calpestio tramite collegamento bullonato, con l'interposizione di uno strato di guarnizione in gomma EPDM. I telai in acciaio scaricano su un sistema di piastre, a cui si congiungono mediante bullonatura, sostenute da micropali infissi nel terreno.

Successivamente alla posa dei pannelli del solaio di calpestio si procede alla posa delle pareti portanti, e quindi dei pannelli di copertura, partendo dai moduli centrali e proseguendo con quelli esterni, ricreando la scolarità del sistema.

I pannelli lignei vengono in seguito rivestiti sia internamente che esternamente per realizzare la parete finita. Internamente, le pareti vengono completate con pannelli di isolante in fibra vegetale di *kenaf* e canapa e uno strato di finitura in cartongesso. Mentre esternamente, viene realizzato uno strato di isolamento in canapa-calce, su guide di listelli di legno, finito da uno strato di biocalce e pozzolana.

Il solaio di copertura viene superiormente completato da: barriera al vapore, isolante in fibra di legno, listelli in legno di abete (per creare, al tempo stesso, una camera d'aria e la pendenza necessaria per il deflusso dell'acqua piovana), pannelli OSB e guaina impermeabilizzante.

Micaela Colella

Architettura residenziale e sostenibilità

La casa prefabbricata mediterranea nell'era dell'Industria 4.0

Cap 7. La casa prefabbricata reversibile: sperimentazioni prototipali



Fig. 7.1.9
Fotoinserimento
di Ecodomus.

7.1.4 Considerazioni finali e possibili sviluppi

Dall'esperienza di costruzione del prototipo si è potuto constatare come i tempi di realizzazione, rispetto all'edilizia tradizionale, risultino più che dimezzati, velocità che si traduce in un apprezzabile risparmio economico. Tra le diverse fasi costruttive, è risultata perfezionabile la realizzazione dello strato di isolamento con fibra di canapa, che si è rivelata più lenta e difficoltosa del previsto. Una possibile alternativa alla fibra di canapa sciolta è l'impiego di pannelli isolanti in canapa pronti per l'utilizzo, il cui impiego migliorerebbe anche la reversibilità dell'opera.

Il basso impatto ambientale dell'opera è favorito dall'impiego quasi esclusivo del legno per le componenti strutturali e di materiali naturali, biocompatibili e riciclabili per le restanti componenti. Inoltre, l'alto livello delle caratteristiche meccaniche e delle prestazioni energetiche di questi materiali, la cui produzione e messa in opera non richiede alti consumi di energia e risorse, prevedendo oltretutto

costi di gestione e manutenzione ridotti, conferiscono all'edificio alte capacità di sostenibilità nella più ampia accezione del termine.

Tuttavia, bisogna sottolineare che per realizzare il prototipo è stato necessario trasportare in Sicilia dei pannelli X-Lam prodotti in Austria. Per incrementare ulteriormente il livello di sostenibilità del processo, sarebbe auspicabile l'impiego di materiali che non necessitino di un lungo trasporto su gomma.

Il prototipo Ecodomus sembra confermare la diffusa tendenza a progettare abitazioni prefabbricate solo della tipologia unifamiliare isolata, aspetto che probabilmente determina in parte, lo scarso interesse sull'argomento da parte di ampi strati della popolazione. Tuttavia, con questo progetto, oltre ad aver previsto le aggregazioni planimetriche di cui si è detto, si è considerata la possibilità di aggregazioni di più moduli in altezza. Certamente, portare a compimento una simile sperimentazione richiederebbe maggiori risorse, sia intellettuali (calcoli strutturali più complessi) che economiche, ma, considerando la crescente preoccupazione per il consumo del suolo, sarebbe una importante evoluzione di questo tipo di sperimentazioni.

7.1.5 Reportage fotografico della costruzione del prototipo

Di seguito sono illustrate, tramite reportage fotografico, tutte le fasi di costruzione e assemblaggio del prototipo Ecodomus.

Il modulo è stato completato nel mese di Dicembre del 2016, e la sua realizzazione è stata effettuata interamente secondo le disposizioni del progetto, a meno degli arredi impiegati per gli interni, che sono stati messi a disposizione dalla Gervasi srl.

Micaela Colella

Architettura residenziale e sostenibilità

La casa prefabbricata mediterranea nell'era dell'Industria 4.0

Cap 7. La casa prefabbricata reversibile: sperimentazioni prototipali



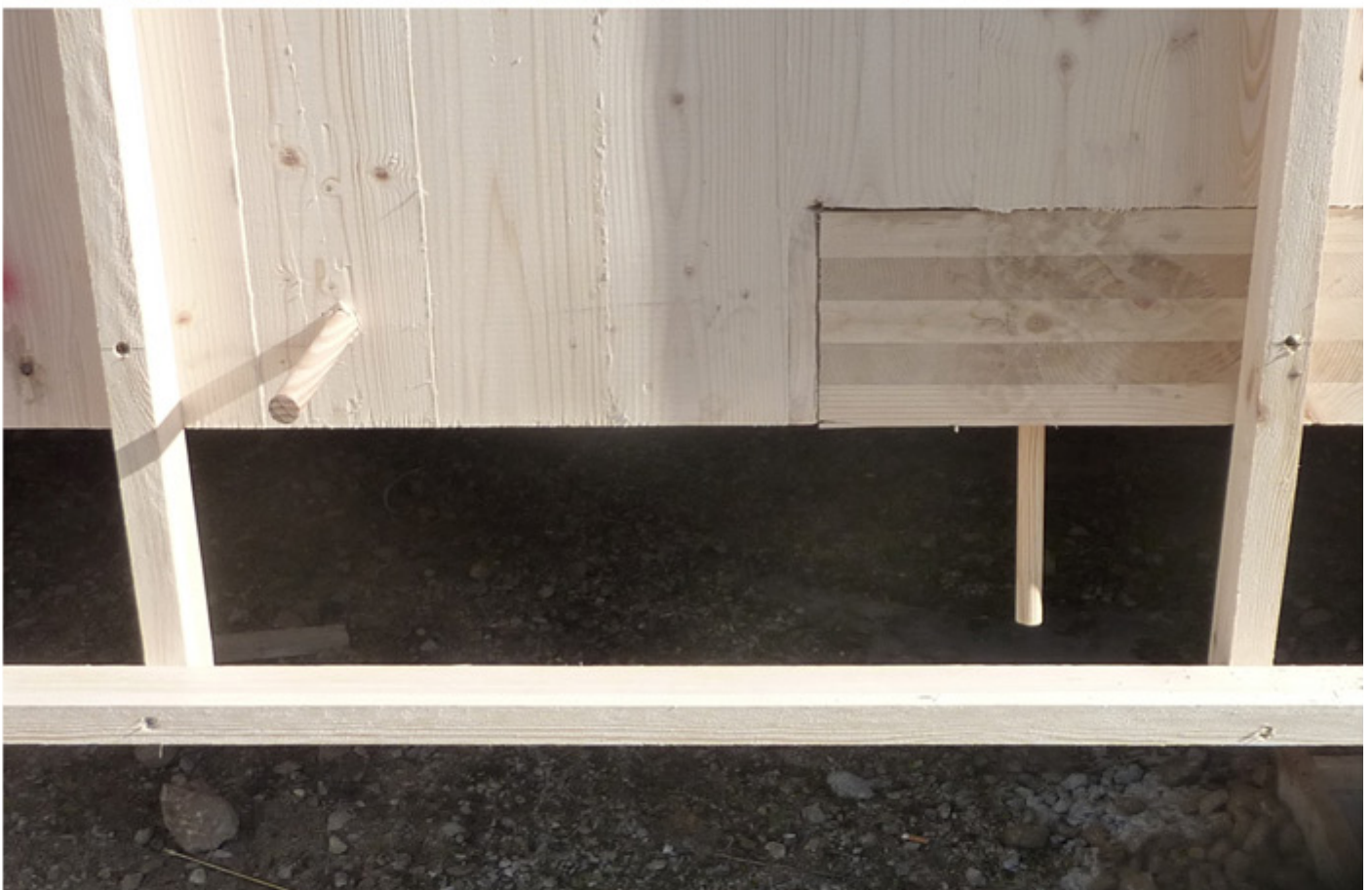


Micaela Colella

Architettura residenziale e sostenibilità

La casa prefabbricata mediterranea nell'era dell'Industria 4.0

Cap 7. La casa prefabbricata reversibile: sperimentazioni prototipali





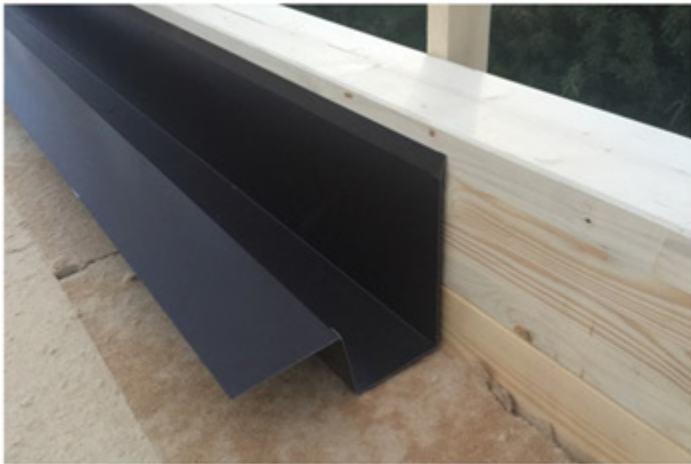
Micaela Colella

Architettura residenziale e sostenibilità

La casa prefabbricata mediterranea nell'era dell'Industria 4.0

Cap 7. La casa prefabbricata reversibile: sperimentazioni prototipali



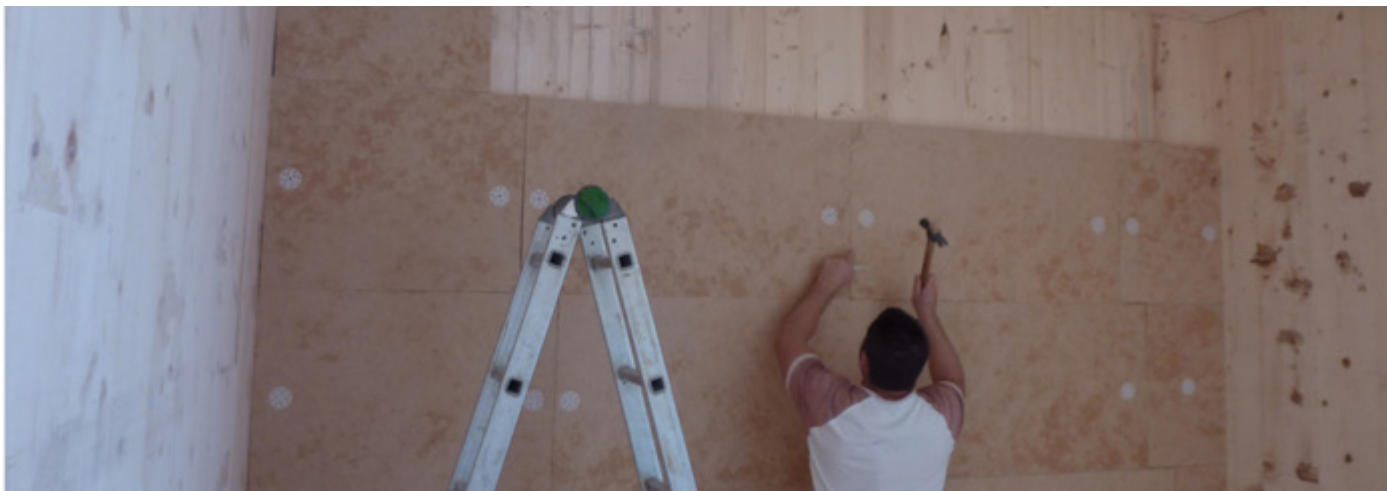


Micaela Colella

Architettura residenziale e sostenibilità

La casa prefabbricata mediterranea nell'era dell'Industria 4.0

Cap 7. La casa prefabbricata reversibile: sperimentazioni prototipali



Consorzio Argonauti (Politecnico di Bari - Università degli Studi Roma Tre)
DR in Architettura: Innovazione e Patrimonio,
Curriculum: Cultura della Costruzione
XXX Ciclo (novembre 2014 - ottobre 2017)



Micaela Colella

Architettura residenziale e sostenibilità

La casa prefabbricata mediterranea nell'era dell'Industria 4.0

Cap 7. La casa prefabbricata reversibile: sperimentazioni prototipali



7.2 Un-boxed

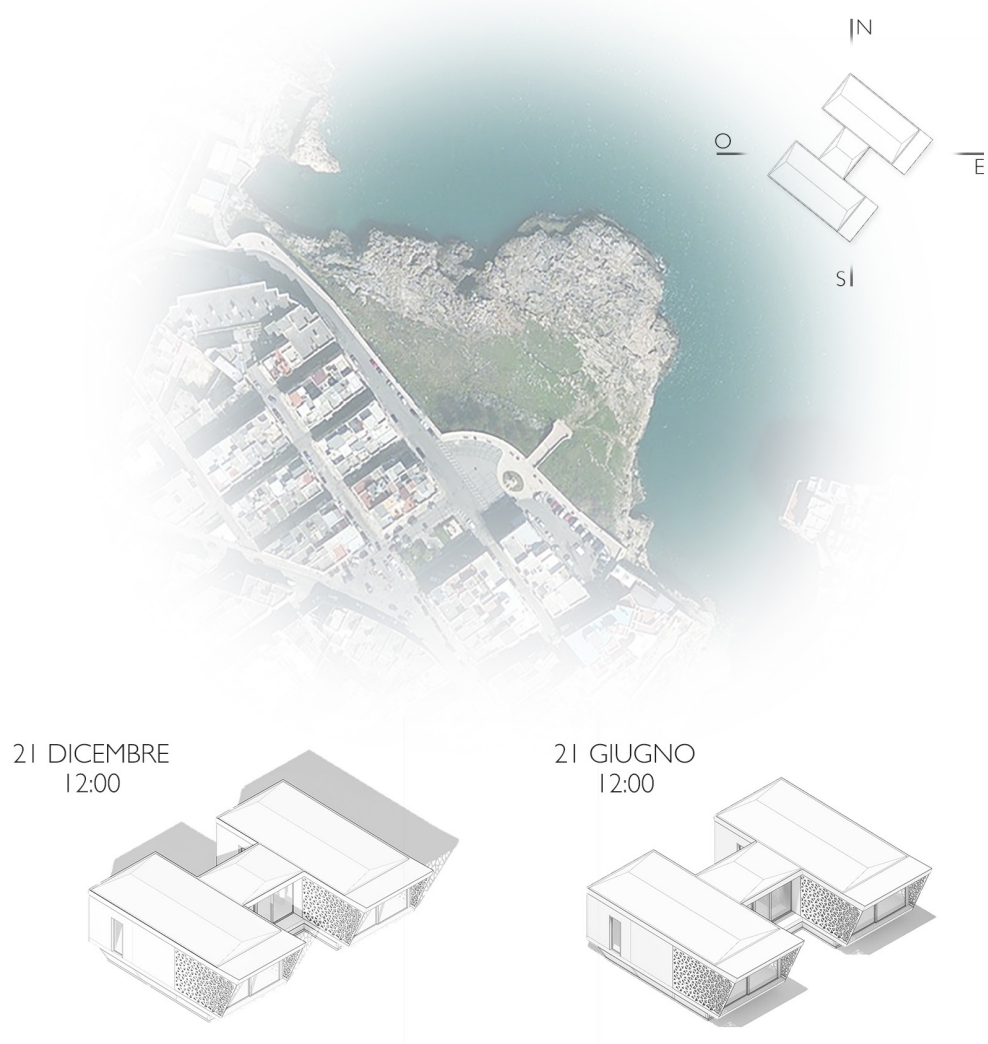
La progettazione del prototipo abitativo *Un-boxed*² ha rappresentato un'ulteriore momento di sperimentazione progettuale sul tema delle case prefabbricate reversibili. La diffusione recente in area mediterranea di sistemi costruttivi in muratura portante lignea, ha fornito lo spunto per lo sviluppo di un progetto che potesse impiegare tali sistemi costruttivi di nuova generazione, implementandoli in una riflessione più generale sul futuro della casa mediterranea. Costruire una casa con pareti portanti, come una casa con struttura in pannelli strutturali multistrato, significa costruire a tutti gli effetti una “scatola”.

Questo assunto viene affrontato come una risorsa preziosa piuttosto che come un limite. Il progetto si pone, infatti, l'obiettivo di andare oltre i limiti imposti da una struttura muraria scatolare tradizionale: da qui il nome *Un-boxed*. La scatola muraria difatti rappresenta il tema compositivo-costruttivo di buona parte delle abitazioni del patrimonio architettonico del mediterraneo. Pur tenendo fede a questo assunto compositivo, con il progetto *Un-boxed* si è voluto sperimentare l'inserimento di elementi compositivi non direttamente connessi a questa tradizione, introdotti più di recente grazie agli sviluppi dell'architettura moderna (ad es. l'uso di ampie superfici vetrate) o dalle recenti applicazioni della bioclimatica (ad es. l'uso di sistemi di oscuramento *bris-soleil*).

“L'apertura della scatola” muraria è permessa dall'utilizzo di un sistema costruttivo fatto di pannelli strutturali in legno massiccio, una tipologia costruttiva che non ha ancora realizzato il suo potenziale come valida alternativa agli edifici in muratura o a telaio. *Un-boxed* si configura dunque come una possibile trasposizione lignea dei caratteri tipici

2 Progettisti: Micaela Colella (capogruppo), Maurizio Barberio.

della casa mediterranea, resi ancora più evidenti dalla scelta del colore dominante della casa stessa (il bianco), il rapporto con la luce solare e il dialogo con la natura circostante.



	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DEC
Media Alta (°C)	11,0	12,7	14,5	19,1	23,4	29,8	33,6	32,1	24,1	18,5	12,6	9,4
Media Bassa (°C)	4,1	4,9	5,6	6,8	11,7	16,0	17,7	18,3	12,4	9,6	5,7	2,5
Precipitazioni(mm)	9,15	56,65	208,04	90,43	59,19	29,97	0,0	3,05	72,64	79,01	75,07	133,59
Umidità media (%)	83,7	85,0	84,7	77,3	75,1	65,7	50,9	61,3	70,8	83,6	85,3	88,7

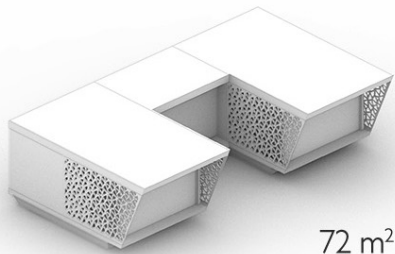
Fig. 7.2.1
 Orientazione della casa, ombreggiamento durante gli equinozi e dati climatici di Polignano a Mare.

7.2.1 Il progetto

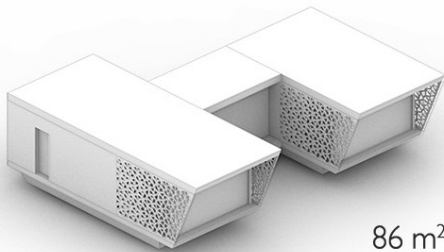
Il progetto è basato sulla elevata standardizzazione dei moduli costruttivi e la loro totale prefabbricazione, consentendo la possibilità di studiare diverse soluzioni planimetriche e aggregative. L'abitazione è studiata per essere inserita sulla costa rocciosa della cittadina pugliese di Polignano a Mare (fig. 7.2.1).

La fig. 7.2.2 mostra quattro soluzioni abitative studiate per diverse esigenze di spazio, ottenibili impiegando gli stessi elementi modulari. Le quattro soluzioni studiate, ed in particolare la versione da 100 m², prevedono una netta divisione tra zona giorno e zona notte, collegate da un passaggio vetrato posto al centro dell'abitazione.

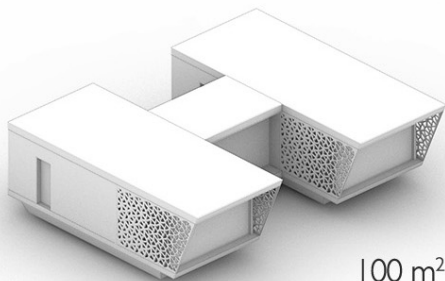
Questa soluzione progettuale, che a prima vista può sembrare estranea alla tradizione mediterranea, in realtà è ispirata alle pergole antistanti le case mediterranee, che costituivano in passato dei veri e propri ambienti della casa abitati all'aperto. Queste case (pensiamo alle case eoliane) prevedevano, infatti, una cellula abitativa in muratura, chiusa e introversa, ed un ambiente esterno arioso e aperto alla natura circostante. *Un-boxed* prevede il raddoppio della cellula abitativa, in asse rispetto alla zona vetrata e completamente apribile dell'abitazione, in modo tale che esso diventi un vero e proprio passaggio nella natura, in grado di ristabilire il contatto con l'ambiente circostante (e lo scorrere del tempo) ad ogni passaggio tra le due zone della casa. Un celebre precedente in tal senso è rappresentato da Can Lis, la casa che Jørn Utzon costruì per sé e la sua famiglia a Maiorca negli anni Settanta. La casa si compone di quattro cellule abitative in muratura, collegate tra loro da un sistema di logge aperte, con funzione di collegamento e di soggiorno all'aperto. In *Un-boxed* la posizione del passaggio vetrato consente di utilizzare la zona centrale della casa come serra solare nella stagione invernale,



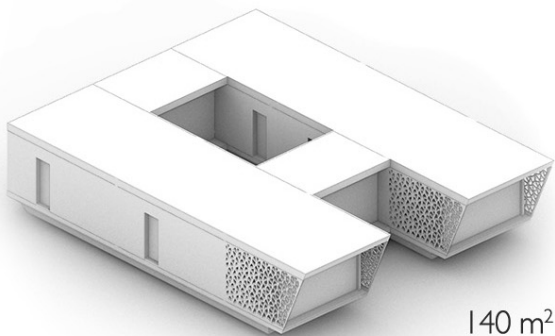
72 m²



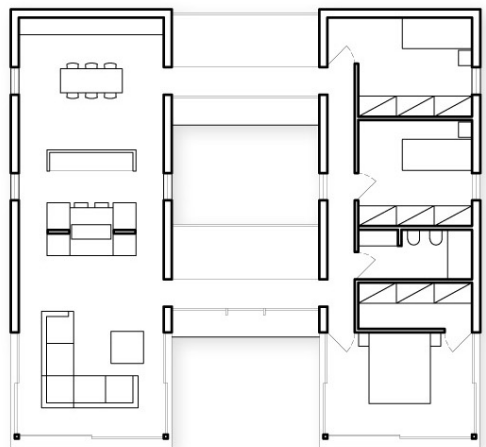
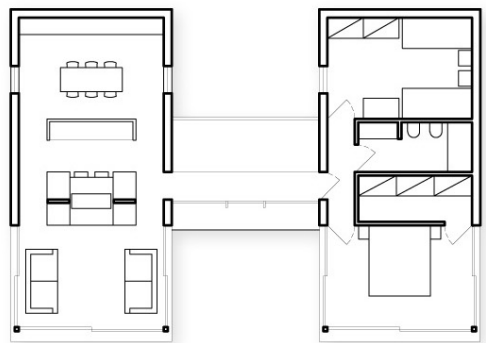
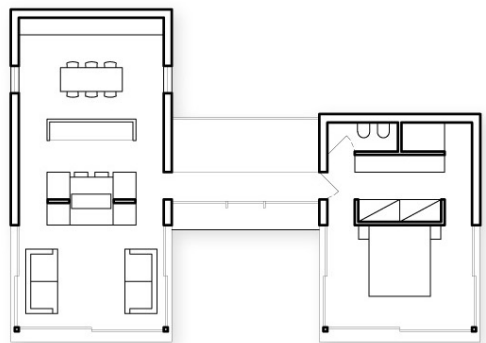
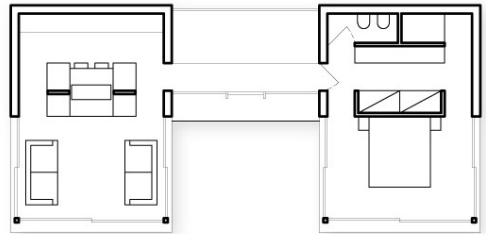
86 m²

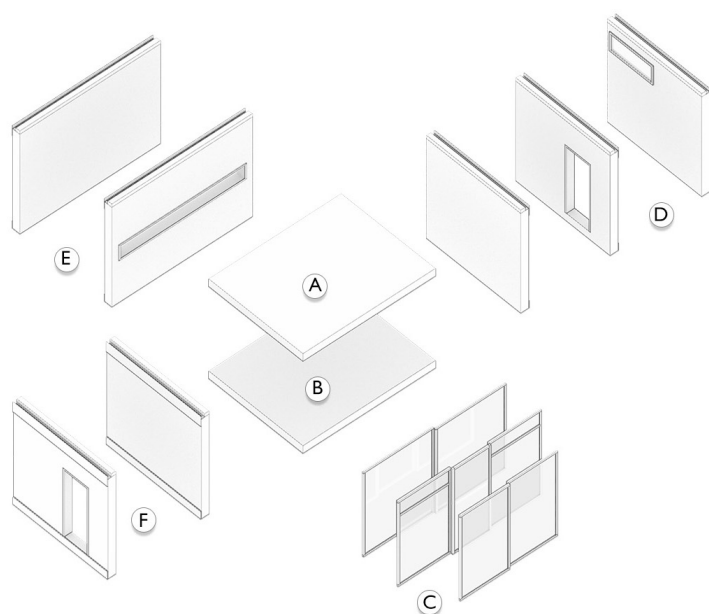


100 m²



140 m²





MODULI

- A. Pannello di copertura
- B. Pannello solaio
- C. Infissi
- D. Pannelli parete laterali tipo 1
- E. Pannelli parete posteriori
- F. Pannelli parete laterali tipo 2

Fig. 7.2.3
Moduli strutturali e tecnologici di Un-boxed.

permettendo al calore accumulato di essere convogliato nei due blocchi laterali. Mentre, nella stagione estiva, aprendo le superfici vetrate, il passaggio stesso si trasforma in un soggiorno all'aperto, migliorando inoltre la ventilazione trasversale nei due blocchi della zona giorno e della zona notte.

L'edificio è stato progettato secondo elementi costruttivi di base: solai, pareti, infissi, gronde, ecc. (fig. 7.2.3). Essi sono concepiti per essere montati il più possibile finiti, limitando al massimo le operazioni di rifinitura, in modo da velocizzare le operazioni di montaggio, prediligendo soluzioni costruttive a secco reversibili³. Il progetto dell'abitazione prevede l'impiego di materiali che la rendono quasi totalmente riciclabile. Superiormente, la copertura a bassa inclinazione (5%) consente la posa di tegole solari (tecnologia Tegosolar), capaci

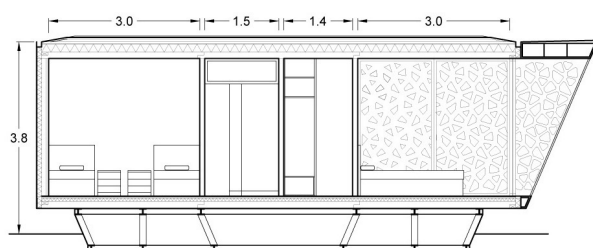
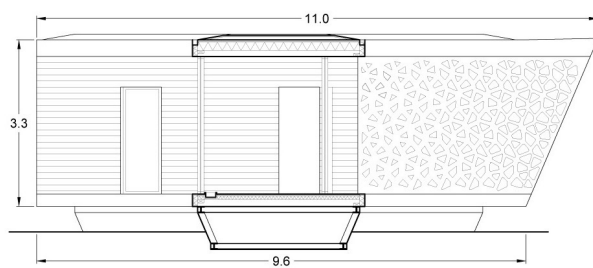
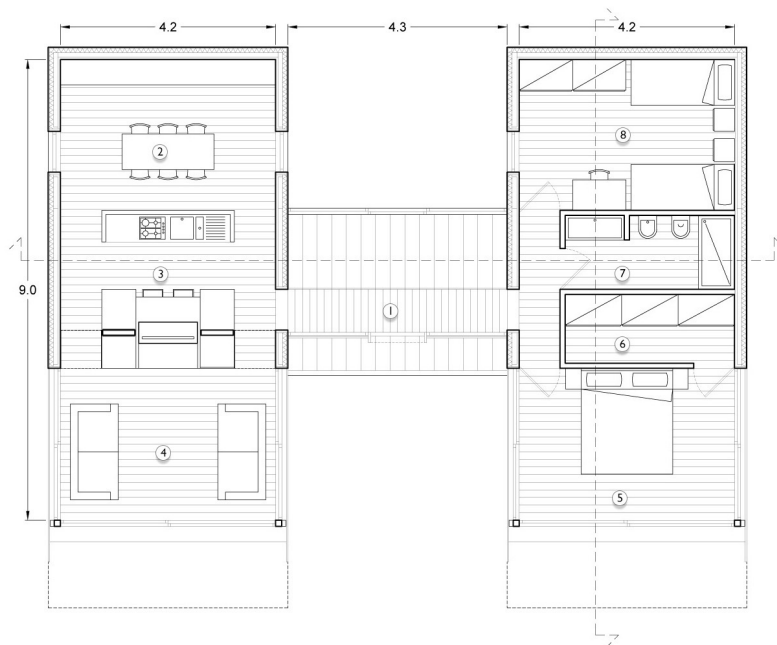
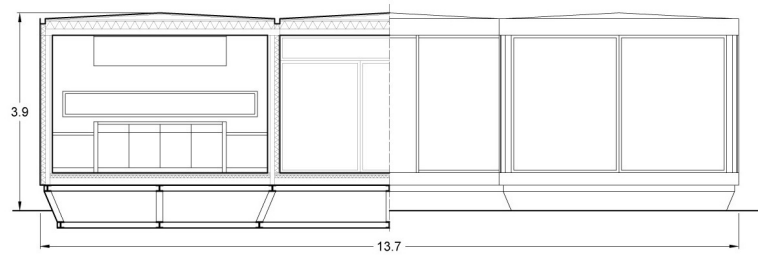
Nella pagina accanto:

Fig.7.2.2

Soluzioni modulari di base per la realizzazione di abitazioni unifamiliari.

3 Il gruppo portoghese di progettazione Mima ha recentemente messo a punto un sistema di finiture reversibili da posare a secco, con il progetto Mima Housing: <http://www.mimahousing.com/process-1/>

Fig. 7.2.4
 Rappresentazioni
 ortogonali della casa.



1. Ingresso/corridoio: area relax
2. Sala pranzo: zona conviviale
3. Zona pasti veloci
4. Soggiorno
5. Camera matrimoniale
6. Cabina armadio
7. Bagno
8. Camera da letto doppia

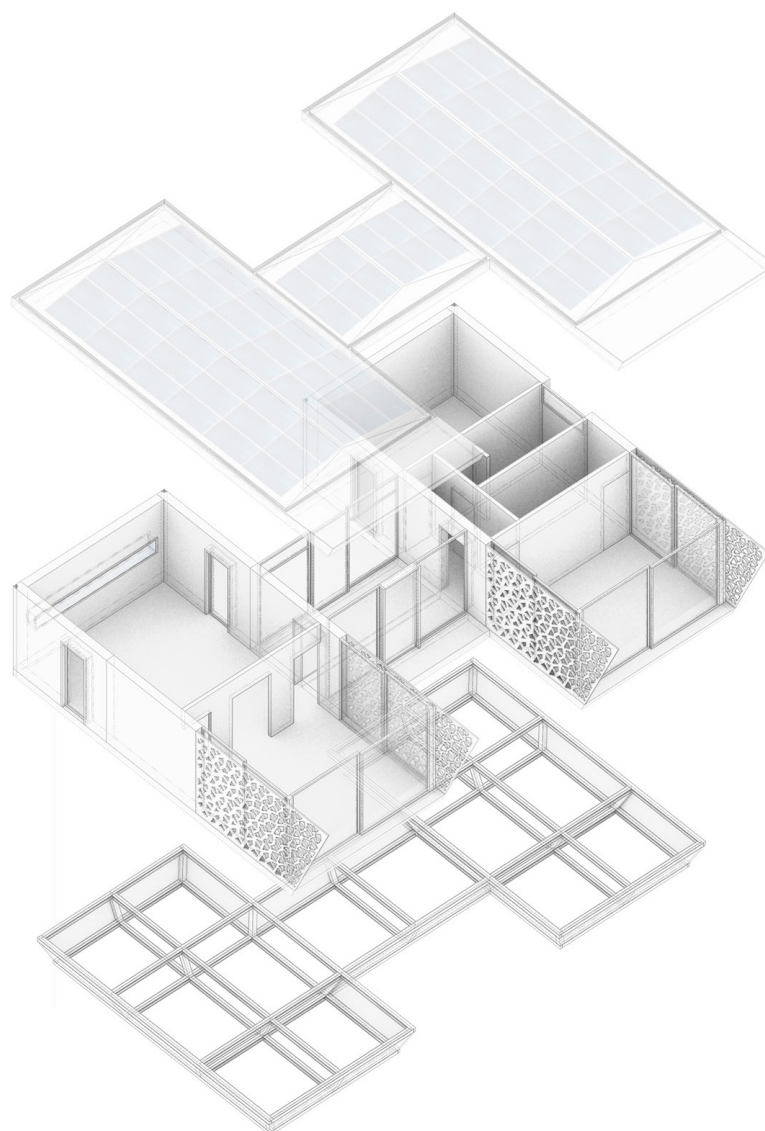
Micaela Colella

Architettura residenziale e sostenibilità

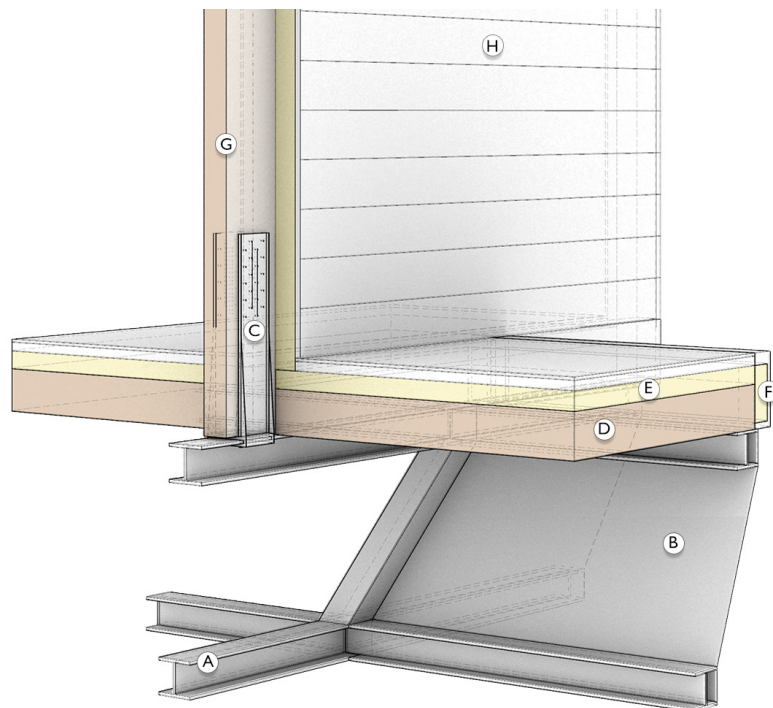
La casa prefabbricata mediterranea nell'era dell'Industria 4.0

Cap 7. La casa prefabbricata reversibile: sperimentazioni prototipali

Fig. 7.2.5
Assonometria della
casa.

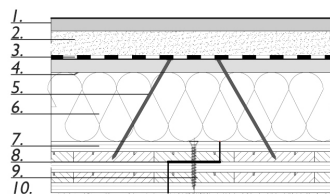


di produrre energia elettrica e termica e fungere contemporaneamente da copertura vera e propria. La fondazione innovativa in acciaio la rende altresì completamente smontabile ed eventualmente spostabile. La leggerezza della struttura consente di ridurre o eliminare lo scavo di fondazione (in base alla natura del terreno). La struttura di fondazione sopraeleva la casa, isolandola dall'umidità del terreno, con la possibilità eventuale di ospitare una parte degli impianti al suo interno (fig. 7.2.5).



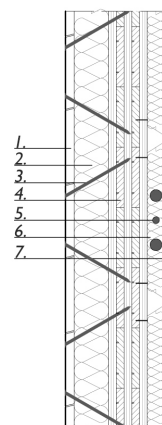
Copertura

1. Tegola solare
2. Strato di riempimento leggero
3. Impermeabilizzante bituminoso elastomerico + membrana traspirante
4. Pannello MDF
5. Viti dotate di punta autoforante a doppio filetto
6. Isolante in fibra di legno densità 45 kg/m³
7. Pannello multistrato strutturale
8. Nastro fonoassorbente
9. Vite per legno autoforante
10. Intonaco



Parete

1. Assi in legno
2. Isolante in fibra di legno densità 150 kg/m³
3. Viti dotate di punta autoforante a doppio filetto
4. Pannello multistrato strutturale
5. Tubi porta impianti
6. Isolante in fibra di canapa densità 40 kg/m³
7. Pannelli di cartongesso + idropittura



Solaio

1. Listone di parquet + colla di fissaggio
2. Massetto
3. Isolante in fibra di legno densità 45 kg/m³
4. Pannello multistrato strutturale
5. Nastro fonoassorbente
6. Vite per legno autoforante
7. Trave HEB 120

Spaccato

- A. Trave IPE 120
- B. Piastra protettiva in alluminio
- C. Staffa d'ancoraggio
- D. Solaio - Pannello multistrato strutturale
- E. Solaio - Isolante in fibra di legno
- F. Solaio - Scossalina in alluminio + isolante in fibra di legno
- G. Parete - Pannello multistrato strutturale
- H. Parete - Assi in legno

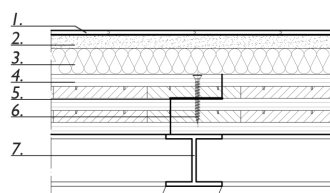


Fig. 7.2.6
 Dettagli costruttivi
 dell'abitazione.

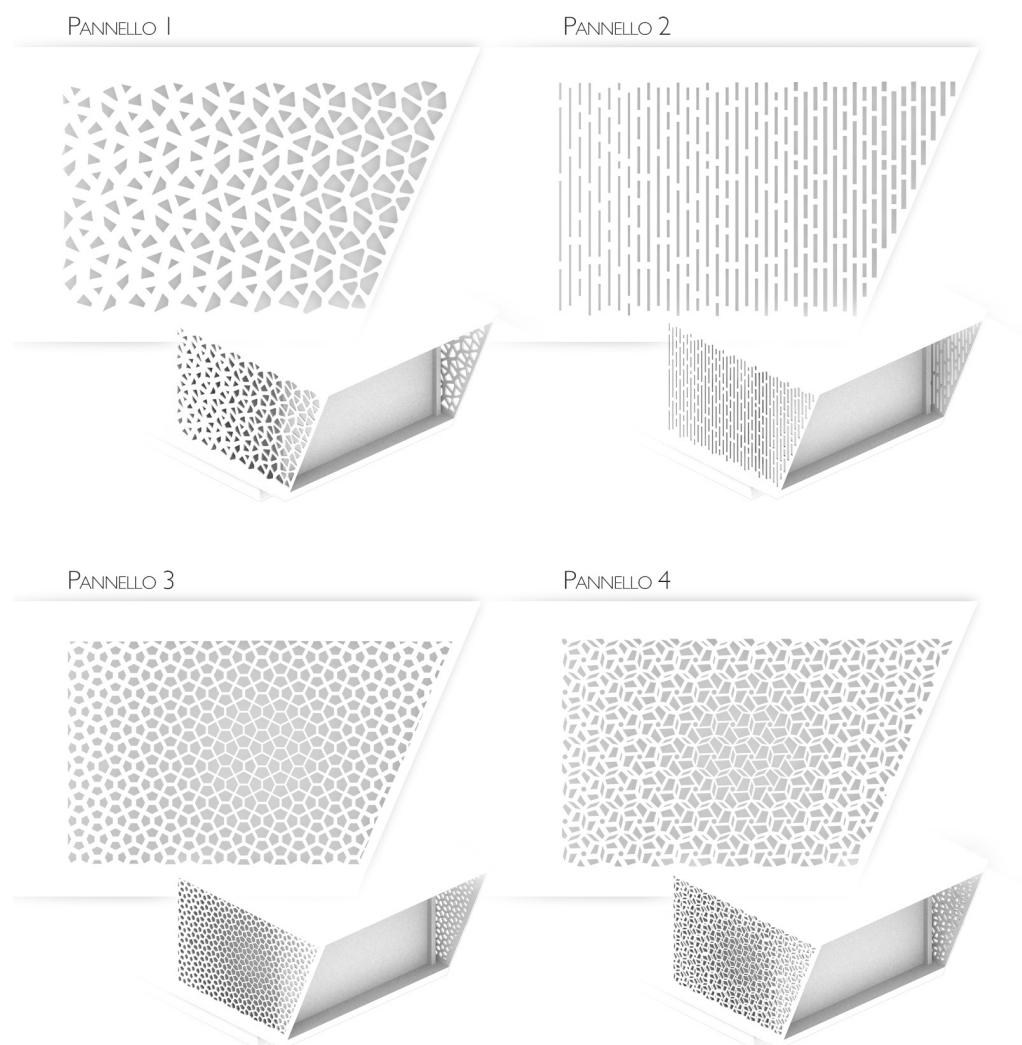
Micaela Colella

Architettura residenziale e sostenibilità

La casa prefabbricata mediterranea nell'era dell'Industria 4.0

Cap 7. La casa prefabbricata reversibile: sperimentazioni prototipali

Fig. 7.2.7
Esempio di personalizzazione dei pannelli ombreggianti.



I pannelli laterali presentano un intricato traforo realizzabile facilmente mediante l'impiego di macchine a controllo numerico taglio laser. Essi, oltre ad assolvere una funzione ombreggiante e a favorire la ventilazione naturale durante la stagione estiva, offrono la possibilità di essere personalizzati secondo le necessità del cliente o del luogo dove la casa è ubicata. La fig. 7.2.7 mostra quattro possibili esempi.

Nonostante l'attenzione rivolta allo studio di soluzioni in grado di abbattere i costi di costruzione, risulta evidente la volontà di progettare una casa dall'alto valore architettonico ed estetico. Questa intenzione si riflette nell'*interior design* della casa, dove arredi studiati su misura si



Micaela Colella

Architettura residenziale e sostenibilità

La casa prefabbricata mediterranea nell'era dell'Industria 4.0

Cap 7. La casa prefabbricata reversibile: sperimentazioni prototipali



Fig. 7.2.10
Zona giorno.

alternano ad arredi scelti da catalogo, dimostrando l'elevato potenziale di questa tipologia di case, qualora adeguatamente progettate con attenzione al dettaglio, sia dal punto di vista tecnico che estetico.

Il nome “*Un-boxed*” guida simbolicamente la progettazione della zona giorno. Una grande parete attrezzata diventa il cuore pulsante della vita della casa: il focolare (un moderno biocamino) domina la prospettiva centrale della zona giorno, sia dalla cucina/sala pranzo che dal soggiorno; da ogni punto è possibile trapiantare oltre esso verso la parte opposta del vano e, ancora, verso l'esterno tramite le finestre senza soluzione di continuità.

Nella pagina accanto:
Fig. 7.2.8
Vista esterna della casa.
Fig. 7.2.9
Vista interna della zona pranzo

7.2.2 Considerazioni finali e possibili sviluppi

Questo tipo di esercitazione progettuale mostra la possibilità di scegliere un nuovo approccio progettuale in grado di aprire la strada ad interessanti soluzioni industriali, che nulla tolgono al legame dell'architettura con il luogo e le sue peculiarità, e tra l'uomo e le sue specifiche esigenze. Attraverso una produzione in serie flessibile, l'abitazione può prevedere un elevato livello di personalizzazione senza produrre tuttavia un incremento eccessivo dei costi di costruzione, e al tempo stesso velocizzando notevolmente i tempi di realizzazione, dato che ci si limita quasi esclusivamente ad operazioni di montaggio a secco, che permettono altresì la reversibilità degli interventi. Inoltre, sfruttando la grande flessibilità di questi strumenti progettuali e di fabbricazione, è possibile progettare seguendo i principi della bioclimatica, anche quando questi, come accade nel clima mediterraneo, richiedono specifiche esigenze stagionali.

Nella pagina accanto:

Fig. 7.2.12
Zona notte

Fig. 7.2.13
Passaggio coperto

Fig. 7.2.11
Zona notte



Micaela Colella

Architettura residenziale e sostenibilità

La casa prefabbricata mediterranea nell'era dell'Industria 4.0

Cap 8. La casa prefabbricata stabile: sperimentazione prototipale



Capitolo 8

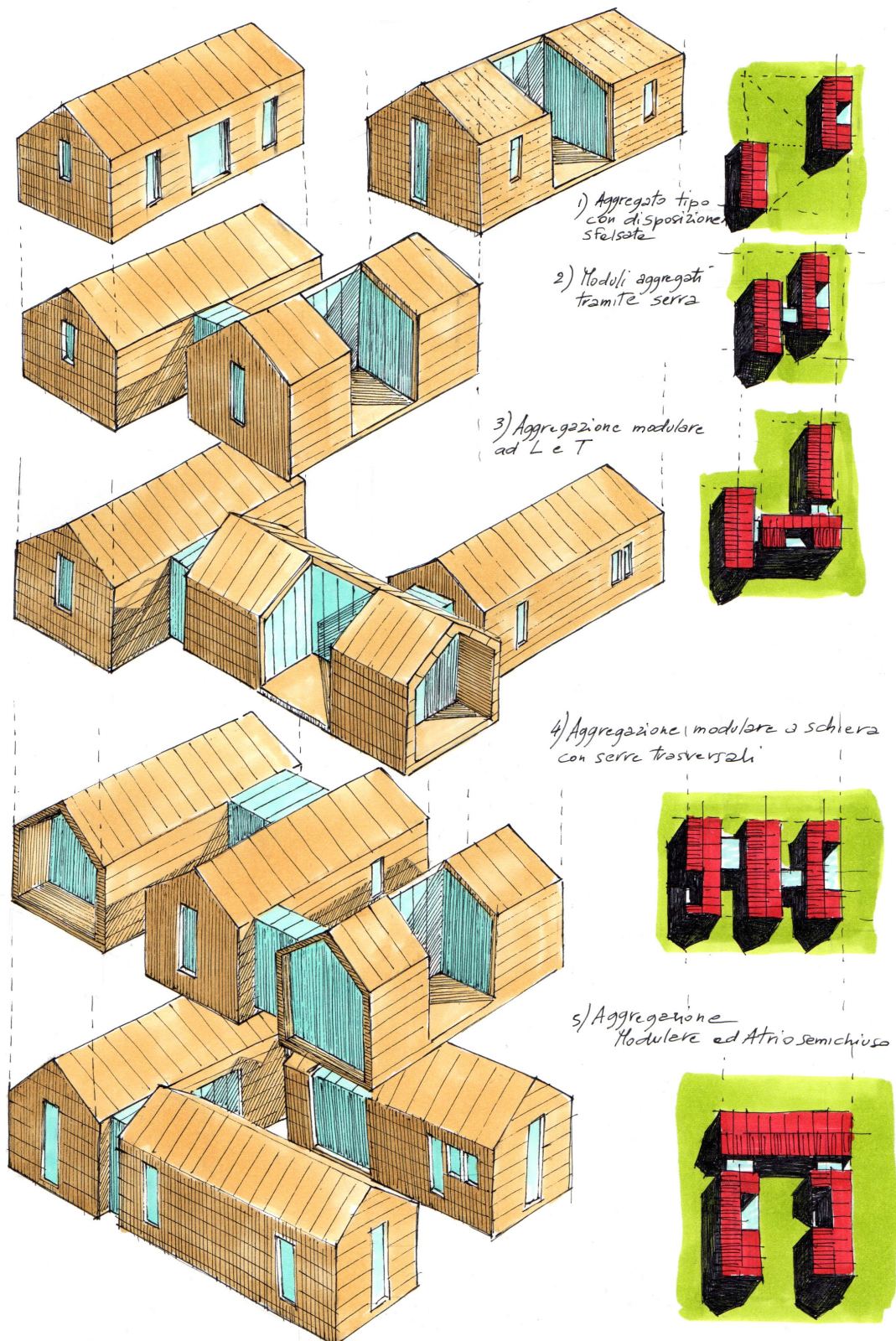
La casa prefabbricata stabile: sperimentazione prototipale

8.1 SOOD

Il prototipo abitativo SOOD¹ nasce da una naturale evoluzione delle ricerche condotte nel Dipartimento di Scienze dell'Ingegneria Civile e dell'Architettura del Politecnico di Bari, su tematiche legate alla costruzione di abitazioni ecosostenibili in materiali naturali che si legano alla tradizione architettonica del territorio pugliese. La prima esperienza applicata di questa ricerca si è concretizzata con la realizzazione del prototipo Astonyshine in collaborazione con l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture Paris – Malaquais che ha partecipato al Solar Decathlon Europe 2012, e successivamente con la Solar Natural House² realizzata in Puglia nel 2013, uno dei primi prototipi abitativi, energeticamente autosufficiente, in pietra e legno.

1 Gruppo di ricerca: New Fundamentals Research Group; Supervisione scientifica: Prof. Giuseppe Fallacara; Capoprogetto: Prof. Giuseppe Fallacara; Progettisti: Giuseppe Fallacara, Marco Stigliano, Micaela Colella, Maurizio Barberio, Ubaldo Occhinegro. Realizzazione del prototipo: Xilux, PiMar.

2 G. Fallacara, M. Stigliano, Solar Natural House. In *Architettura di Pietra Journal*, 2014.



Nella pagina accanto:
Fig. 8.1
composizioni
volumetriche
(U. Occhinegro, 2015).

Secondo la catalogazione proposta nel quarto capitolo di questa trattazione, la casa SOOD rientra nella categoria delle case prefabbricate stabili, poiché nasce da un processo produttivo prefabbricato, ma secondo un progetto ideato per inserirsi in maniera stabile in contesti architettonici in cui l'utilizzo della pietra rappresenta un carattere prevalente.

Il progetto è stato originato, infatti, dalla volontà di sperimentare un metodo innovativo per costruire abitazioni prefabbricate adeguate al clima e al contesto storico-culturale dell'area del Mediterraneo, attraverso un uso inedito dei materiali naturali appartenenti alla tradizione architettonica di quest'area: la pietra e il legno³.

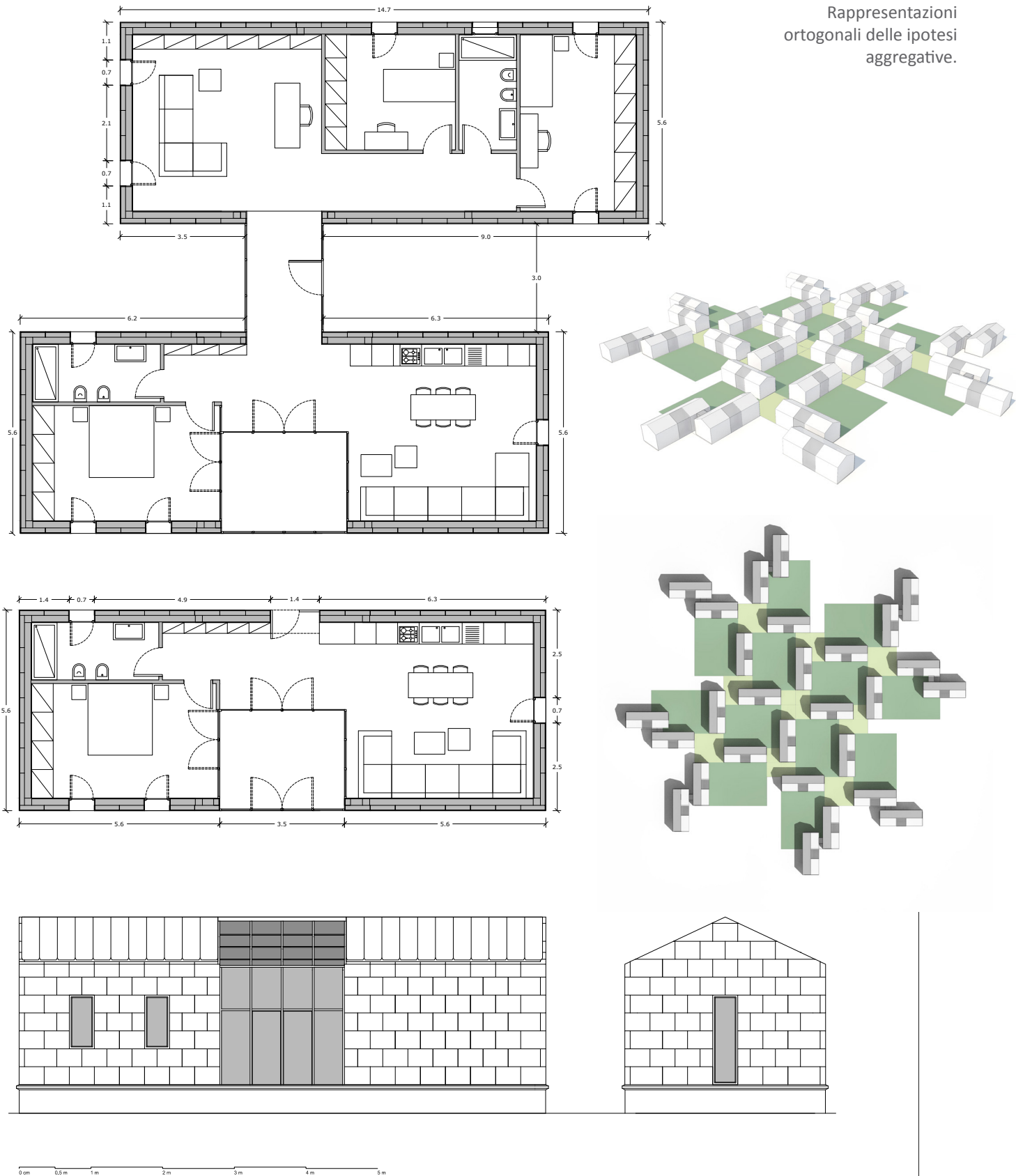
8.2 Il progetto

Il progetto di SOOD è stato concepito secondo una logica modulare, che ne consente una progettazione flessibile, impiegando un modulo pari a 5,5 metri per la campata e una lunghezza variabile, in modo da ottenere, attraverso aggregazioni del modulo di base, delle composizioni volumetriche variabili (fig. 8.1).

L'elemento base, nonché il principale elemento di innovazione dell'intero progetto è rappresentato dai blocchi che costruiscono l'involucro murario della casa. Ogni blocco è costituito da una lastra di pietra calcarea, che svolge il ruolo di rivestimento esterno, e da strati alternati di legno e materiale isolante (3 di legno e 2 di isolante),

3 Un'azienda francese, la *Pierre-Bois Habitat* ha sviluppato un sistema per certi versi simile chiamato *Pierre Bio 'Mur*, con conci spessi 40 cm costituiti da due strati di pietra con l'interposizione di uno strato di isolante.

Fig. 8.2
Rappresentazioni
ortogonali delle ipotesi
aggregative.



Micaela Colella

Architettura residenziale e sostenibilità

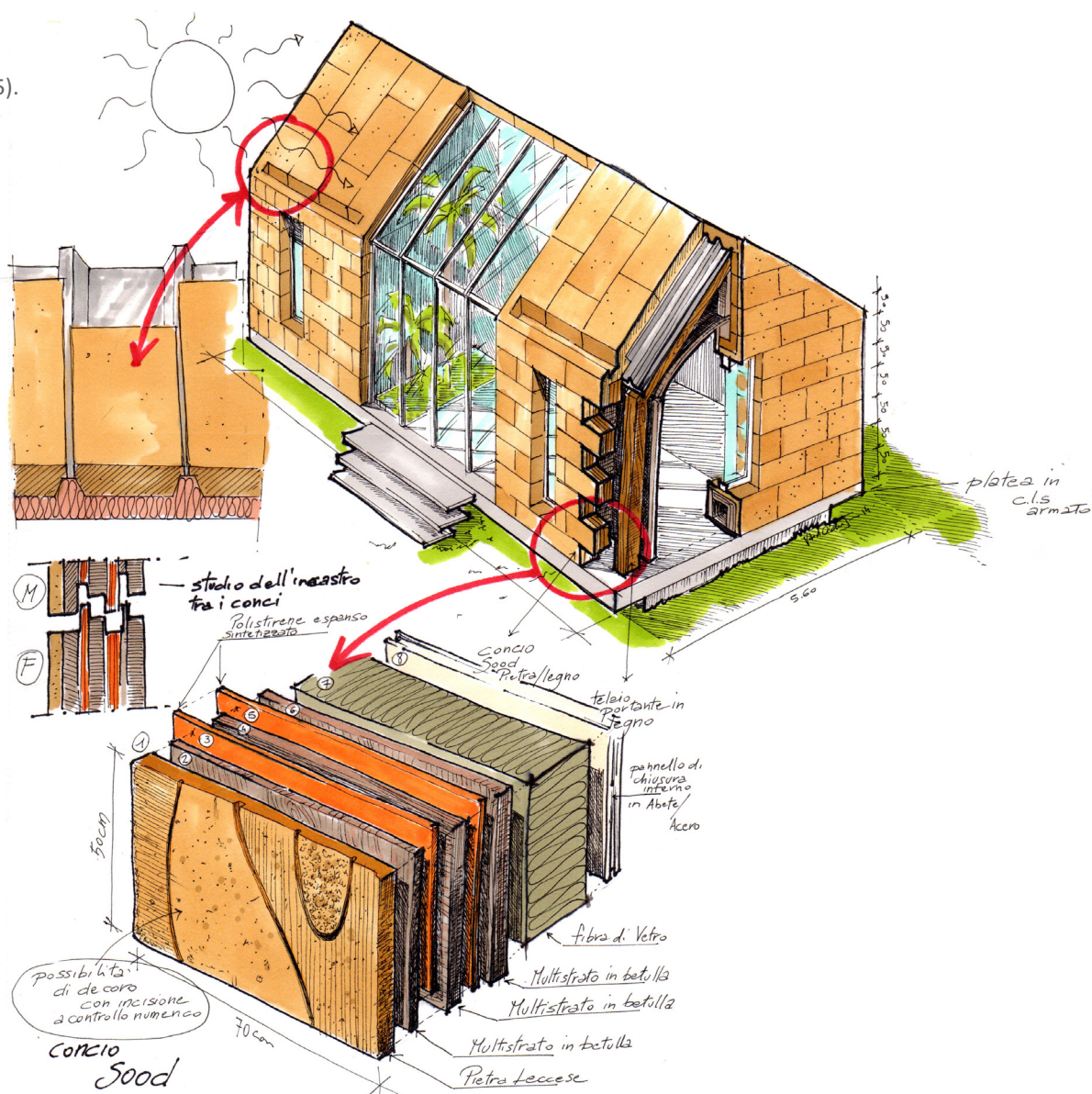
La casa prefabbricata mediterranea nell'era dell'Industria 4.0

Cap 8. La casa prefabbricata stabile: sperimentazione prototipale

Fig. 8.3

Schizzi dei dettagli costruttivi

(U. Occhinegro, 2015).



che svolgono la funzione di isolante termo-acustico e da sostegno per la muratura stessa. Ogni blocco viene posato in opera attraverso un semplice incastro maschio-femmina. In questo modo in un unico gesto viene costruita una parete autoportante già rifinita esternamente dalla superficie lapidea. I tempi e i costi di costruzione di una abitazione in pietra costruita tradizionalmente vengono così ridotti da una significativa semplificazione delle fasi di montaggio in cantiere.

Il modulo abitativo di base della casa è dal volume molto semplice ed

Consorzio Argonauti (Politecnico di Bari - Università degli Studi Roma Tre)
DR in Architettura: Innovazione e Patrimonio,
Curriculum: Cultura della Costruzione
XXX Ciclo (novembre 2014 - ottobre 2017)



Micaela Colella

Architettura residenziale e sostenibilità

La casa prefabbricata mediterranea nell'era dell'Industria 4.0

Cap 8. La casa prefabbricata stabile: sperimentazione prototipale

Nella pagina accanto:

Figg. 8.4-5

Viste esterne di ipotesi insediative in diversi contesti.

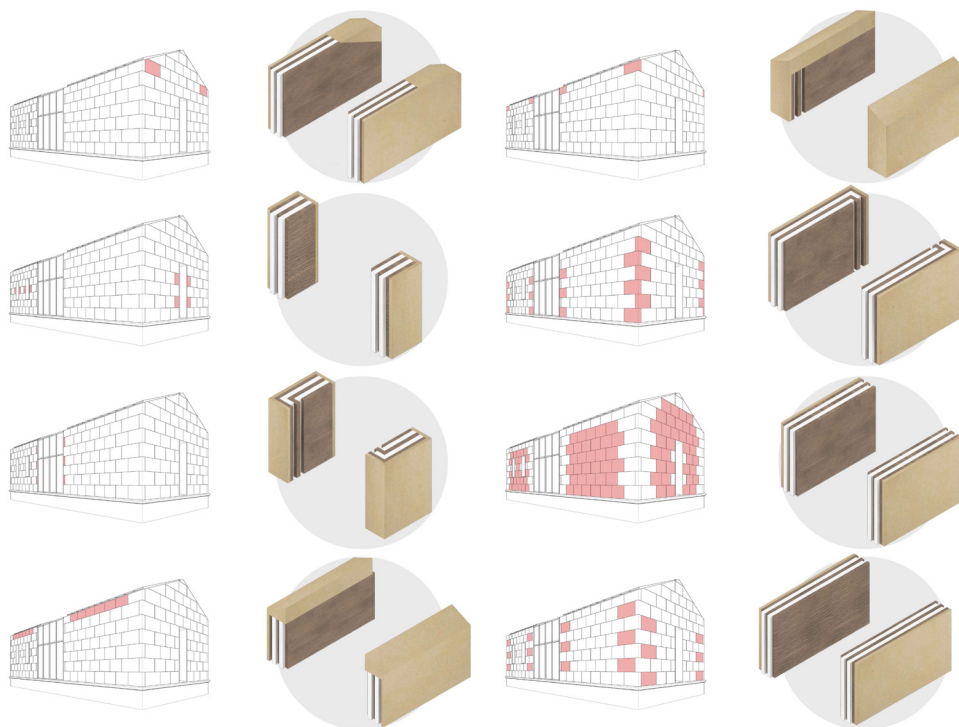


Fig. 8.6

Schema degli otto conci costitutivi del modulo abitativo.

estremamente compatto, in modo da ridurre al massimo la superficie disperdente dell'involucro edilizio, ed è pensato con una sezione a doppia falda inclinata che richiama la forma archetipica della casa. L'espressione formale della volumetria esterna è fortemente monomaterica, utilizzando la pietra calcarea su tutte le superfici sia verticali che di copertura. La compattezza della massa lapidea è interrotta soltanto dalla presenza delle aperture vetrate e soprattutto della serra solare, pensata come volume in "negativo" che conserva tuttavia la forma compatta della casa.

Oltre all'utilizzo di materiali naturali, la sostenibilità dell'edificio è perseguita anche attraverso il rispetto dei principi della casa passiva. Ad esempio, la presenza della serra solare come sistema solare passivo, diventa necessaria per raggiungere l'elevato livello di efficienza energetica a cui la casa mira. Il suo funzionamento secondo fenomeni di effetto serra, e la successiva diffusione del calore negli ambienti



Nella pagina accanto:
Figg. 8.7-8.8
Viste degli interni.

adiacenti, migliora la performance del sistema impiantistico in inverno; mentre in estate, attraverso l'apertura delle vetrate, contribuisce alla ventilazione naturale. La casa è progettata per fornire un equilibrato ricambio d'aria e un efficiente smaltimento dell'umidità. L'utilizzo di materiali naturali non trattati e certificati rende possibile il riutilizzo o riciclaggio di tutti gli elementi.

Il sistema costruttivo utilizzato da SOOD prevede la realizzazione in sito di una piattaforma orizzontale, che può essere costruita in calcestruzzo armato, o in acciaio, a seconda delle caratteristiche del terreno.

La fase successiva prevede la posa in opera di una struttura ad ossatura portante di legno (*Holzskelettbauweise*), costituita da pilastri, travi, controventi e capriate. La struttura portante può essere scomposta in settori e realizzata in fabbrica, riducendo le operazioni di montaggio in cantiere. Terminata la struttura portante si realizza l'involucro attraverso la posa in opera del blocco prefabbricato. Il blocco è realizzato per tamponare sia le pareti verticali che le superfici orizzontali, mediante l'impiego di pezzi speciali (8 blocchi in tutto) adattati ad assecondare la geometria a doppia falda della casa.

La successiva finitura interna dell'involucro potrà essere realizzata secondo le necessità del singolo intervento utilizzando ad esempio una *boiserie* in legno per le pareti ed una volta in legno per il soffitto, permettendo così di incrementare le prestazioni dell'involucro utilizzando un ulteriore strato di materiale isolante o in alternativa di materiale ad elevata inerzia termica.

Il design interno di SOOD è progettato secondo principi di flessibilità di utilizzo, con mobili ed attrezzature a scomparsa realizzati in materiali naturali che riducono l'inquinamento interno e privilegiano la qualità della vita ed il benessere psico-fisico dell'uomo.



Nella pagina accanto:

Fig. 8.9

Fasi costruttive della
maquette di progetto in
scala 1:2.

8.3 Maquette di progetto

Del progetto SOOD è stata costruita una *tranche* angolare in scala 1:2, esposta in occasione delle manifestazioni fieristiche dell'Eco Build di Londra e del Salone del Mobile di Milano del 2015.

I conci sono stati prodotti in fabbrica, secondo la seguente procedura di fabbricazione:

- si parte da un primo strato di legno, che viene incollato con uno strato di isolante⁴;
- si prosegue nella fase di incollaggio dei complessivi 5 strati alternati di legno e isolante;
- si sottopongono gli strati incollati a pressione meccanica utilizzando una pressa. Questa operazione rende l'incollaggio tra i vari strati molto più performante;
- infine, si appone la lastra di finitura in pietra leccese al blocco legno-isolante ottenuto al punto precedente. Lo strato in pietra può essere costituito da una lastra semplicemente piana, oppure decorata superficialmente.

Con la costruzione della *tranche* si è potuta sperimentare l'efficacia del sistema di montaggio dei blocchi, soprattutto per quanto concerne gli angoli dell'edificio. La *tranche* è stata montata nell'arco di un pomeriggio da due persone. La leggerezza dei blocchi ha permesso la loro agevole movimentazione, favorendo anche le operazioni di montaggio. La costruzione della struttura portante vera e propria non è stata possibile e si è proceduto alla realizzazione di una struttura di supporto che approssimasse geometricamente la struttura portante,

4 In fase di test è stato impiegato uno strato di polistirene espanso, ma l'isolante previsto in fase di produzione è la fibra di legno.



Fig. 8.10
Maquette di progetto in
scala 1:2.

fatta in legname comune opportunamente assemblato. Si è proceduto in seguito alla posa in opera della *boiserie* lignea.

8.4 Considerazioni finali e possibili sviluppi

La *tranche* costruita ha dato delle prime indicazioni positive in merito alle potenzialità del sistema costruttivo basato sul blocco pietra-legno. Tuttavia è necessario segnalare che la costruzione del prototipo complessivo in scala reale dell'abitazione sarebbe l'unico modo per poter verificare concretamente le previsioni progettuali.

La costruzione del prototipo, già progettato in tutti i suoi aspetti, dovrebbe avvenire nel prossimo futuro, ma non entro la finalizzazione del presente documento. Nel frattempo diversi test sono in atto per verificare il comportamento del sistema di incollaggio nel tempo. I test e i dettagli relativi all'incollaggio non possono essere rivelati perché coperti da brevetto.

Dal punto di vista estetico-formale è possibile asserire che il blocco, soprattutto per quanto riguarda i nodi costruttivi, rappresenta una innovativa soluzione in grado di esaltare l'eredità della tradizione architettonica plastico-muraria dell'area mediterranea, pur coniugandola con le modalità innovative proprie delle più moderne tecniche di prefabbricazione.

Infine, un ulteriore campo di applicazione del blocco SOOD potrebbe essere nel campo della riqualificazione ambientale di edifici dallo scarso valore architettonico ed energetico, costituendo una possibile alternativa agli attuali sistemi di coibentazione "a cappotto".

TERZA PARTE

Capitolo 9

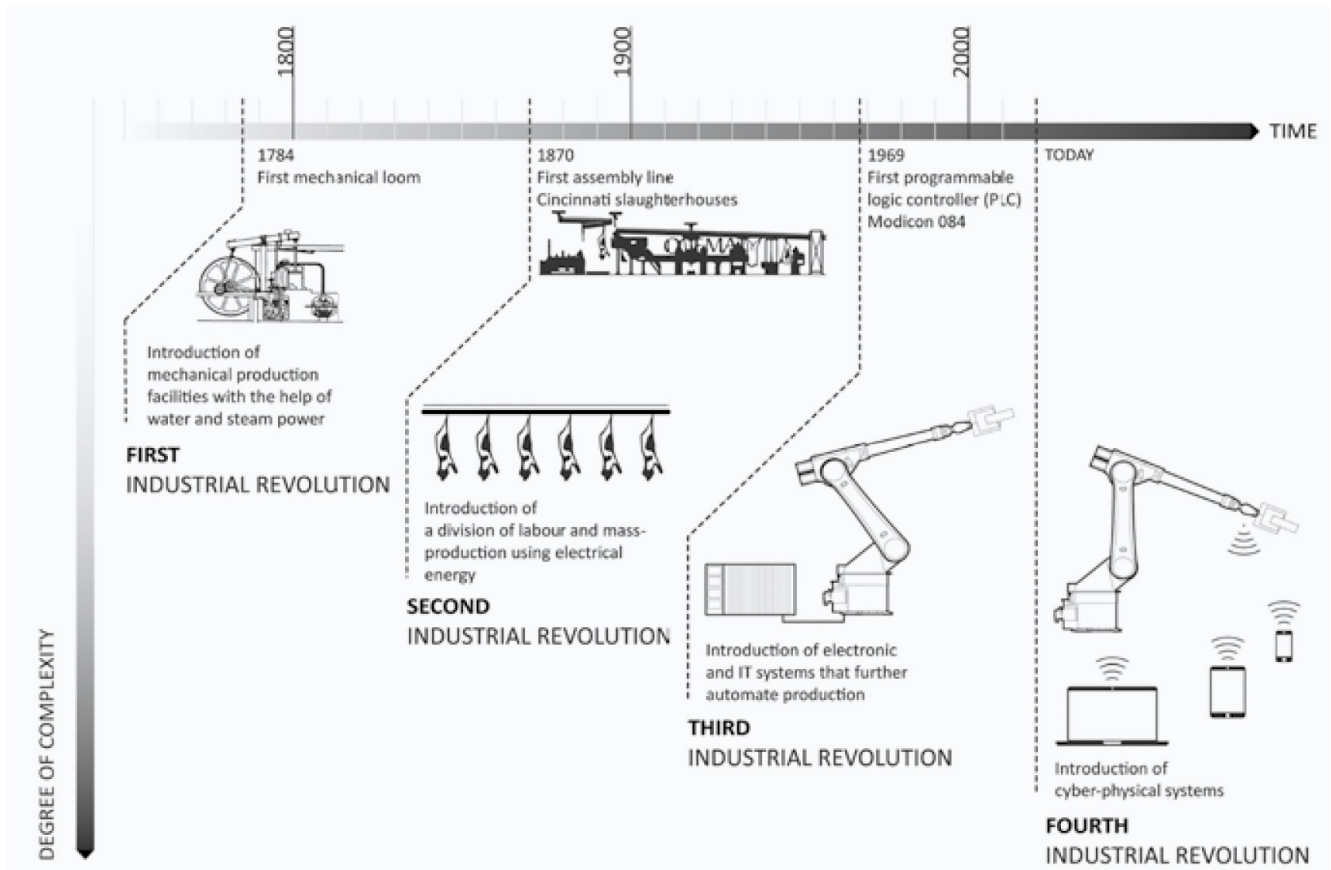
L'abitazione nell'era dell'Industria 4.0

9.1 Industria 4.0

Nella seconda metà del XVIII secolo, l'introduzione della macchina a vapore ha innescato la cosiddetta prima rivoluzione industriale, dando il via a un processo in rapida evoluzione, che ha stravolto la società e il suo intero sistema economico, prima basato sulla produzione agricola e artigianale, e in seguito fondato su una produzione di tipo industriale, che ha consentito la realizzazione di un volume di produzione maggiore in minor tempo.

Questo processo, sul finire del XIX secolo, ha subito una nuova accelerazione, nota come seconda rivoluzione industriale, dovuta all'introduzione dell'elettricità, della produzione di prodotti chimici, dell'estrazione del petrolio e soprattutto della produzione in serie grazie all'introduzione della catena di montaggio.

A partire dagli anni Settanta del secolo scorso si assiste alla diffusione pervasiva dell'elettronica, delle telecomunicazioni e soprattutto dell'informatica, delineando una terza rivoluzione industriale, anche detta rivoluzione digitale, caratterizzata principalmente dalla



automazione della produzione.

Oggi siamo alle soglie della quarta svolta epocale nell'incessante e ineludibile corsa verso il progresso tecnologico. Questo nuovo punto nodale nell'evoluzione tecnologica ha assunto la denominazione di Industria 4.0 a partire dal 2011, quando H. Kagermann, W. Lukas e W. Wahlster presentarono, alla Fiera di Hannover, la loro proposta strategica per rafforzare la competitività dell'industria manifatturiera tedesca, successivamente adottata dal governo federale tedesco¹, intitolandola *Industrie 4.0*².

Fig. 9.1
 Schema riassuntivo
 delle quattro rivoluzioni
 industriali
 (A. Menges, 2015).

1 La Germania sta precedendo e fornendo linee guida agli altri Paesi europei in questo processo evolutivo.

2 H. Kagermann, W. Lukas, W. Wahlster, *Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution*. Disponibile presso: <http://www.vdi-nachrichten.com/Technik-Gesellschaft/Industrie-40-Mit-Internet-Dinge-Weg-4-industriellen-Revolution> (ultimo accesso: Settembre 2017).

I notevoli risultati rapidamente raggiunti dall'industria tedesca hanno prodotto una sorta di corsa all'Industria 4.0 da parte di tecnici, accademici e istituzioni. Tuttavia, non costituendo un tema storicizzato, ma in assoluto divenire, nonostante il vivissimo interesse internazionale, non esiste ancora una precisa definizione di cosa si intenda per Industria 4.0. Tendenzialmente, con l'uso della dicitura Industria 4.0, si intende genericamente il complesso delle nuove tecnologie e dei nuovi fattori produttivi e di organizzazione del lavoro, i quali, oltre a modificare il modo di produrre, modificheranno profondamente anche le relazioni tra gli attori economici, compresi i consumatori, con rilevanti effetti sul mercato del lavoro e sulla stessa organizzazione sociale³.

Per poter stabilire una definizione più tecnica ed approfondita, attraverso i principi fondanti di questa nuova era tecnologica, molto accurata ed estesa è la revisione bibliografica sulle pubblicazioni inerenti l'Industria 4.0 tracciata da Hermann et al. nel 2015⁴. In questa pubblicazione, sono identificate come componenti chiave fondanti l'Industria 4.0: i Sistemi Cyber-Fisici (*Cyber-Physical Systems*), l'Internet delle Cose (*Internet of Things*), l'Internet dei Servizi (*Internet of Services*), e la Fabbrica Intelligente (*Smart Factory*).

Il sistema cyber-fisico (CPS) è costituito da una fusione tra lo spazio fisico e quello virtuale. È un ciclo continuo di scambio di dati, tra processi fisici e calcoli informatici, che rende possibile l'influenza dei primi sui secondi e viceversa. I processi fisici producono dati che

3 A. Magone, T. Mazali, (a cura di). *Industria 4.0. Uomini e macchine nella fabbrica digitale*. Edizioni Guerini e Associati SpA, Milano, 2016.

4 M. Hermann, T. Pentek, & B. Otto, Design principles for industrie 4.0 scenarios. A literature review. In *System Sciences (HICSS), 2016 49th Hawaii International Conference on* (pp. 3928-3937), IEEE, 2016.

vengono raccolti, memorizzati e analizzati da sistemi dotati di sensori e compatibili con la rete. Per cui, ad un processo fisico consegue una elaborazione informatica a cui è associata una risposta nel mondo fisico in tempo reale.

I sistemi cyber-fisici sono gli elementi alla base della definizione dell'Internet delle Cose e dell'Internet dei Servizi. Le cose, gli oggetti che incorporano dispositivi tecnologici che creano un'interfaccia tra mondo fisico e digitale, possono essere intesi come sistemi cyber-fisici, per cui l'Internet delle Cose (IoT) può essere definito come una rete in cui i sistemi cyber-fisici interagiscono e cooperano tra loro secondo schemi predefiniti⁵. Per *Internet of Things*, il cui concetto è stato introdotto per la prima volta nel 1999 da Kevin Ashton⁶, si intende, quindi, un nuovo metodo di utilizzo della rete virtuale all'interno dello spazio fisico, ossia, la possibilità di far interagire tra loro parti del mondo fisico, gli oggetti, attraverso la rete informatica.

Con l'Internet dei Servizi (IoS) si assiste ad un salto di scala, in cui i sistemi cyber-fisici sono costituiti non più dai singoli oggetti, ma dalle singole attività della catena del valore⁷ delle imprese. Per cui, lo sviluppo di questa tecnologia consente una nuova modalità di gestione

5 D. Giusto, A. Iera, G. Morabito, L. Atzori, (a cura di). *The Internet of Things*, Springer, 2010.

6 Direttore e cofondatore del consorzio di ricerca Auto-ID Center con sede al MIT.

7 La catena del valore è un modello, teorizzato da Michael Porter nel 1985, che permette di descrivere la struttura di una organizzazione come un insieme limitato di processi. Secondo questo modello, un'organizzazione è vista come un insieme di 9 processi, di cui 5 primari e 4 di supporto. I 5 processi primari sono: logistica in ingresso, attività operative, logistica in uscita, marketing e vendite, assistenza al cliente e servizi. I quattro processi di supporto, invece sono: approvvigionamenti, gestione delle risorse umane, sviluppo delle tecnologie, attività infrastrutturali. Fonte: https://it.wikipedia.org/wiki/Catena_del_valore (ultimo accesso: Ottobre 2017).

aziendale, caratterizzata da una distribuzione dinamica delle attività⁸. Sulla base delle definizioni già fornite per il sistema cyber-fisico e l'Internet delle Cose, la Fabbrica Intelligente (*Smart Factory*) può essere definita come una fabbrica in cui i sistemi cyber-fisici comunicano attraverso l'IoT, in modo da assistere le persone e le macchine nell'esecuzione dei loro compiti⁹. I sistemi cyber-fisici creano una copia virtuale del mondo fisico e dei suoi processi, per cui nella continua connessione e interazione tra mondo fisico e virtuale, tra le macchine fra loro e con gli esseri umani, all'interno delle Fabbriche Intelligenti è possibile prendere decisioni in remoto e riorganizzare i processi in tempo reale. In questo modo, si creano i presupposti, ad esempio, per una produzione flessibile e "intelligente", ossia basata sulla reale domanda di un dato prodotto in un dato momento in tempo reale.

Si può sostenere, dunque, che il punto cardine della rivoluzione in atto sia l'ingresso del mondo virtuale in quello reale, attraverso l'*Internet of Things* e l'*Internet of Services*. Stiamo assistendo alla progressiva fusione tra il mondo fisico e quello informatico, in un nuovo concetto di sistema cyber-fisico. Come spiegato da Kagermann et al.:

«In futuro, le imprese creeranno reti globali che incorporeranno i propri macchinari, sistemi di magazzinaggio e impianti di produzione in forma di *Cyber-Physical Systems* (CPS). Nell'ambiente di produzione, questi sistemi *Cyber-Physical* comprendono macchine intelligenti, sistemi di immagazzinaggio e impianti di produzione in grado di scambiare autonomamente informazioni, attivare azioni e controlli in modo

8 PlattformIndustrie 4.0.,2014:Industrie 4.0 - White paperFuEThemen. Disponibile presso: http://www.plattform-i40.de/sites/default/files/Whitepaper_Forschung%20Stand%203.%20April%202014_0.pdf (ultimo accesso: Settembre 2017)

9 M. Hermann, T. Pentek, & B. Otto, Design principles for industrie 4.0 scenarios. A literature review. Op. cit., p. 10.

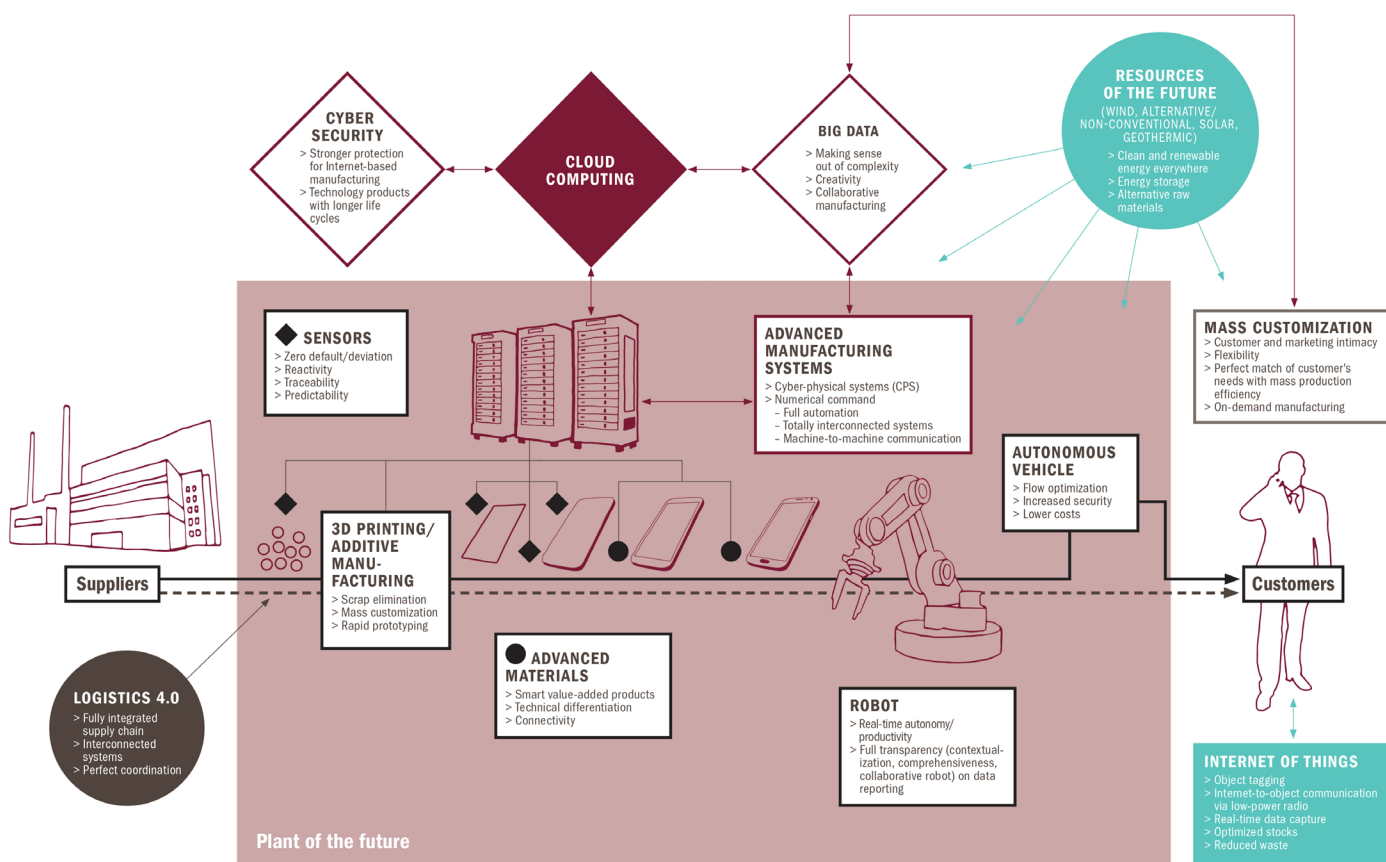


Fig. 9.2
La fabbrica del futuro
(Roland Berger, 2014).

indipendente. Ciò apporta miglioramenti fondamentali nei processi industriali che interessano la produzione, l'ingegneria, l'utilizzo dei materiali e la catena di approvvigionamento e la gestione del ciclo di vita»¹⁰.

In definitiva, è il complesso delle suddette tecnologie a definire il concetto di Industria 4.0. Grazie all'introduzione di queste nuove tecnologie è possibile fare un quadro dei principi che caratterizzano la manifattura nella nuova era industriale. Come si è detto, il tema non è storicizzato e le interpretazioni sono molteplici, dai confini ancora molto sfocati, a volte in contraddizione tra loro. Data la necessità di compiere delle scelte, per una chiara messa a sistema dell'argomento,

10 H. Kagermann, W. Wahlster, J. Helbig (a cura di), Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0: *Final report of the Industrie 4.0 Working Group*, 2013.

la scrivente ha deciso di distinguere tra:

- le nuove tecnologie (CPS, IoT, IoS, *Smart Factory*);
- i nuovi principi introdotti nel mondo della produzione (*Real-Time Capability*, virtualizzazione, decentramento, servitizzazione, interoperabilità, personalizzazione di massa);
- i nuovi servizi alla base delle suddette innovazioni (*big data*, *cloud computing*).

Come è semplice dedurre dalla descrizione delle nuove tecnologie, esse si basano sull'analisi di un'enorme quantità di dati. I dati, infatti, vengono spesso considerati il bene essenziale della nuova era. Per questo, elementi fondamentali per l'affermazione del 4.0 sono i servizi di *big data* (grandi dati) e *cloud computing* (nuvola informatica), servizi di archiviazione, elaborazione e trasmissione di dati, in mancanza dei quali, la produzione e la raccolta dei dati diventa sostanzialmente inutile.

Diversi sono i principi che elevano la fabbrica a 4.0, aprendo a nuovi e innovativi scenari. I CPS monitorano attraverso sensori i processi fisici e sono in grado al contempo analizzare e confrontare i dati raccolti con modelli di simulazione virtuali. Vi è, di conseguenza, un costante controllo della correttezza dei processi, ed eventuali errori o incongruenze vengono segnalati in tempo reale (*Real-Time Capability*). Gli impianti interconnessi sono capaci di ricalibrare il piano di produzione, rilanciare la produzione su altre macchine e ottimizzare i processi. In questo modo l'uomo è supportato dalle macchine stesse nella loro complessa gestione e, mentre in passato per ogni cambiamento nella catena di produzione erano necessarie settimane di prove gestite da personale altamente qualificato, grazie alla **virtualizzazione** (*virtualization*), ossia l'uso dei modelli di simulazione, le prove preliminari alla produzione avvengono nel mondo virtuale ed il tempo

in cui le macchine sono ferme si riduce notevolmente, con un enorme risparmio in termini economici¹¹.

I CPS sono, dunque, in grado di prendere decisioni e di svolgere i loro compiti in modo autonomo. Pertanto, la pianificazione e il controllo costante in situ non sono più necessari, rendendo possibile il **decentramento** (*decentralization*) della produzione e delle decisioni, che possono essere gestite e controllate in remoto. Questo comporta, naturalmente, un minore sforzo e una minore quantità di tempo dedicata dagli addetti al lavoro in fabbrica, ma al contempo un maggiore impegno nella fase di progettazione delle macchine e dei processi. Ciò determinerà un cambiamento nelle modalità lavorative, sempre più incentrate sul lavoro intellettuale altamente qualificato e sempre meno incentrate sul lavoro fisico (compensato dal lavoro delle macchine). Nell'industria 4.0, i robot e gli esseri umani lavoreranno fianco a fianco, grazie all'utilizzo di interfacce uomo-macchina intelligenti. L'utilizzo di questi robot di nuova generazione, definiti *smart robot*, comprenderà innumerevoli funzioni, dalla produzione alla logistica fino alla gestione dell'ufficio¹².

La connessione costante tra beni prodotti e l'azienda produttrice (sempre grazie all'installazione di sensori) sta conducendo verso un'integrazione profonda tra beni fisici e servizi. Questo processo, detto di **servitizzazione** della manifattura (*service orientation*), favorirà formule imprenditoriali che oltre a vendere un prodotto offriranno un

11 M. Blanchet, T. Rinn, G. Von Thaden, G. DeThieulloy (a cura di), *Industry 4.0: The new industrial revolution-How Europe will succeed*, Monaco di Baviera, Roland Berger Strategy Consultants GmbH, 2014. http://www.rolandberger.com/media/pdf/Roland_Berger_TAB_Industry_4_0_2014_0403.pdf (ultimo accesso: Ottobre 2017)

12 M. Blanchet, T. Rinn, G. Von Thaden, G. DeThieulloy (a cura di), *Industry 4.0: The new industrial revolution-How Europe will succeed*, Op. cit. p. 8.

costante servizio di assistenza. L'assistenza al cliente sarà completamente ripensata, con un ribaltamento dei ruoli, sarà l'azienda infatti a controllare in remoto la funzionalità del prodotto e ad intervenire in caso di anomalie, guasti, avvenuta obsolescenza o esaurimento di parte dei prodotti, come già avviene ad esempio nella gestione dei motori per aerei prodotti dalla RollsRoyce¹³. In questo modo, si andrà sempre più verso un mercato in cui l'acquisto di beni sarà sostituito dall'acquisto di servizi, per cui l'azienda produttrice resta la proprietaria del bene e ne assicura l'efficienza, la manutenzione e l'eventuale sostituzione. Questo tipo di mercato non può che avere delle conseguenze positive dal punto di vista della sostenibilità ambientale, poiché, ad esempio lo smaltimento dei prodotti obsoleti o giunti alla fine del proprio ciclo di vita, non sarà più affidato ai consumatori, ma sarà gestito in modo efficiente dalle stesse aziende.

Un fattore di fondamentale importanza per lo sviluppo delle visioni 4.0, è l'**interoperabilità** (*interoperability*), ossia garantire, attraverso il rispetto di normative comuni, che tutti i CPS siano in grado di comunicare tra loro, anche se appartenenti a produttori diversi, in modo tale da creare una rete aperta in cui tutti parlano lo stesso linguaggio¹⁴.

I suddetti principi descrivono un modello produttivo altamente flessibile, in grado di modificare e riorganizzare la produzione in tempi ristretti, grazie anche all'alto grado di modularità che

13 A. Magone, T. Mazali, (a cura di), *Industria 4.0. Uomini e macchine nella fabbrica digitale*. Op. cit., p. 70.

14 DIN e. V., DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE (a cura di), *GERMAN STANDARDIZATION ROADMAP: Industry 4.0 (version 2)*, Berlino-Francoforte, DIN e. V., DKE, 2016. <https://www.din.de/blob/65354/f5252239daa596d8c4d1f24b40e4486d/roadmap-i4-0-e-data.pdf> (ultimo accesso: Ottobre 2017).

caratterizzerà le sue componenti¹⁵. Questo, insieme alla capacità di raccogliere ed elaborare in tempo reale una enorme quantità di dati, tra cui i bisogni e i desideri del consumatore, renderà possibile attuare una produzione industriale di tipo personalizzato. Pertanto, i desideri e i bisogni specifici del singolo consumatore torneranno a occupare il ruolo centrale che ricoprivano nella produzione artigianale. Questo scenario è definito **personalizzazione di massa**¹⁶.

Concludendo, una delle più rilevanti conseguenze dell'applicazione dell'Internet delle Cose e dell'Internet dei Servizi al mondo industriale, oltre al cambiamento nel ruolo che l'uomo avrà nel ciclo produttivo, è rappresentato dal profondo cambiamento nelle modalità e nei volumi di produzione. Potendo conoscere in tempo reale le richieste e le esigenze dei consumatori e disponendo al tempo stesso di una grande flessibilità della fabbrica, in grado di variare per ogni ciclo produttivo il bene realizzato, le canoniche produzioni seriali con immagazzinaggio di grandi quantità di prodotti perdono di senso, aprendo la strada ad una produzione personalizzata e su richiesta, tornando a una dimensione dei volumi di produzione e a una personalizzazione dei beni prodotti più vicina al mondo artigianale che a quello della serialità industriale. Conseguentemente, pur considerando i soli cambiamenti legati all'impiego di tali tecnologie nella produzione industriale, i vantaggi che ne derivano sono molteplici e di notevole entità; vi è la possibilità di una riduzione degli sprechi legati agli eccessi di produzione, l'ottimizzazione dell'energia e dei materiali impiegati e una riduzione

15 La modularità viene considerata in alcune pubblicazioni essa stessa uno dei principi dell'industria 4.0.

16 Il concetto di personalizzazione di massa sarà ripreso e approfondito al punto 9.2.1, ad esso dedicato.

della necessità di spazio costruito destinato allo stoccaggio dei prodotti. A differenza delle precedenti rivoluzioni industriali, che avevano come principale risultato il miglioramento delle condizioni di vita attraverso l'aumento della produttività, quest'ultima rivoluzione industriale ha il potenziale per migliorare significativamente le condizioni di vita dell'uomo (e probabilmente del pianeta Terra) non attraverso un aumento della produzione, ma mediante l'ottimizzazione delle risorse disponibili in una produzione più cosciente, mirata e personalizzata. Come in tutte le precedenti rivoluzioni tecnologiche, comportando un radicale cambiamento nel modo di vivere e di relazionarsi, ma soprattutto nel modo di lavorare e di produrre, il suo arrivo è visto dai più con un misto di scetticismo sulle reali potenzialità e di timore che la tecnologia possa infine sopraffare l'uomo e sostituirlo nel suo lavoro, facendolo divenire inutile ai fini della produttività. Ma il processo evolutivo non si può arrestare, esso è già in atto, e le domande da porsi non dovrebbero riguardare la sua legittimità, ma piuttosto le modalità di sfruttamento di questo nuovo enorme potenziale al fine di fornire soluzioni a problemi cogenti.

9.2 Industria 4.0 e architettura

I nuovi scenari delineati dall'avvento della quarta rivoluzione industriale stanno producendo un cambiamento nel modo di pensare la società e il mondo del lavoro del prossimo futuro, con la definizione ad esempio di nuove figure professionali, ma l'ambito maggiormente investito dal cambiamento sarà naturalmente l'industria, con un ripensamento della sua gestione, delle modalità di produzione e dei prodotti stessi.

Nonostante, negli ultimi decenni sia stato un ambito di flemmatico e osteggiato progresso tecnologico, rispetto ad esempio alla rapida evoluzione dell'industria automobilistica, riteniamo che il mondo delle costruzioni sia destinato a divenire uno dei principali campi di applicazione dell'Industria 4.0.

Come asserisce Achim Menges¹⁷, «la costruzione dell'architettura è certamente diversa dalla produzione in altri campi e, la costruzione in loco in particolar modo, è riuscita fino ad oggi a sfuggire alle logiche dell'automazione e dell'industrializzazione. Ma non c'è dubbio che, come i precedenti avanzamenti tecnologici hanno avuto una grande influenza sullo sviluppo di altre industrie, le idee, le logiche e le tecnologie dell'Industria 4.0 avranno un impatto significativo sia sulla concezione che sulla produzione di architettura. Inoltre, è importante ricordare che la quarta rivoluzione industriale è diversa dalle tre precedenti, perché il suo obiettivo primario non è aumentare la produttività, bensì creare livelli più elevati di flessibilità, adattabilità e integrazione. Questa trasformazione industriale può pertanto avere un effetto ancor maggiore delle precedenti in relazione alla progettazione

17 Direttore dell'Institute for Computational Design and Construction (ICD) all'Università di Stoccarda.

architettonica¹⁸». Non vi è dubbio che l'innovazione più importante avvenuta negli ultimi trent'anni nel settore della progettazione sia la diffusione dei sistemi CAD (*Computer Aided Design*) prima, e CAM (*Computer Aided Manufacturing*) dopo. Una rivoluzione i cui primi esperimenti fondamentali possono essere in realtà fatti risalire agli anni Sessanta e Settanta, presso il Massachusetts Institute of Technology, grazie all'opera di ricercatori di primo piano come Ivan Sutherland, che elaborò SketchPad, il software progenitore dei moderni sistemi CAD, e Nicholas Negroponte, fondatore dell'Architecture Machine Group, gruppo di ricerca dedito allo studio e alla elaborazione delle prime interfacce uomo-macchina. Nonostante questa lunga storia, l'uso ancora predominante degli strumenti CAD è rappresentato semplicemente da una versione computerizzata (*computerization*¹⁹) delle tecniche di disegno tradizionali. Tuttavia, a partire dai primi anni Duemila, una nuova rivoluzione digitale (forse pienamente digitale) ha iniziato ad affermarsi: dalla progettazione CAD si passa alla progettazione computazionale. Come infatti afferma T. Kostas, mentre l'informatizzazione avvenuta negli ultimi decenni può essere ricondotta alla digitalizzazione di processi consolidati, definiti e predeterminati per migliorarne l'efficienza, la precisione e il flusso di lavoro, al contrario, la progettazione computazionale riguarda l'esplorazione algoritmica di processi indeterminati²⁰.

Menges e Ahlquist, a tal proposito notano: «Dove i processi computerizzati iniziano con lo specifico e terminano con l'oggetto,

18 A. Menges, *The New Cyber-Physical Making in Architecture: Computational Construction*, *Architectural Design* 85 (5), 2015, p. 31.

19 K. Terzidis, *Algorithmic Architecture*, Architectural Press, Oxford, 2006.

20 A tal proposito si veda: T. Kostas, *Algorithmic Architecture*; Elsevier, Oxford, 2006, p. XI.

i processi computazionali iniziano con proprietà elementari e regole generative per terminare con le informazioni dalle quali deriva la forma intesa come sistema dinamico²¹».

Perché è importante porre l'accento su questo passaggio dal nostro punto di vista? Questo passaggio si rende necessario poiché la progettazione computazionale è l'unica in grado di dialogare proficuamente con i processi di virtualizzazione propri dell'Industria 4.0. Infatti la creazione veramente computazionale comporta lo svolgimento di un processo di materializzazione esplorativo, guidato da risposte cyber-fisiche, che estende (le proprietà) del progetto piuttosto che semplicemente realizzarlo²². Le macchine, quindi, rese "intelligenti" e in grado, non solo di eseguire i compiti secondo schemi predefiniti, ma di elaborare risposte alternative per migliorare l'efficienza dei processi e riorganizzare conseguentemente la produzione, entrano a far parte con il loro contributo nel processo di progettazione computazionale.

Riprendendo le tecnologie caratterizzanti l'industria 4.0 e immaginando una applicazione dei loro principi al campo della progettazione architettonica, è possibile delineare i fattibili scenari che potrebbero configurarsi nell'architettura dell'era 4.0. A partire dal principio della virtualizzazione, è possibile dunque individuare almeno tre livelli di virtualizzazione:

- virtualizzazione del progetto, ossia processi previsionali in grado di riguardare più fattori simultaneamente, grazie allo sviluppo

21 Citazione originale (trad. a cura dell'autore): «Where computer-aided processes begin with the specific and end with the object, computational processes start with elemental properties and generative rules to end with information which derives form as a dynamic system», da: A. Menges e S. Ahlquist (a cura di), *Computational Design Thinking* (AD Reader), Wiley, Londra, 2011, p.13.

22 A. Menges, *The New Cyber-Physical Making in Architecture: Computational Construction*, *Architectural Design*. Op cit, p. 32.

sempre più sofisticato dei programmi di modellazione tridimensionale e computazionale. Per citare solo alcuni esempi, è possibile virtualizzare il comportamento climatico di un edificio, simulando la posizione del sole in un dato orario di un dato giorno in una precisa posizione sul globo terrestre e il conseguente irraggiamento (a cielo sereno); o le fasi del processo di costruzione e dell'intero ciclo di vita di un progetto, grazie ai software di *Building Information Modelling* (BIM); oppure in grado di analizzare il comportamento strutturale degli edifici, e così via;

- virtualizzazione del processo di fabbricazione CAD/CAM, ossia processi di previsione, controllo e verifica preventiva delle fasi di *Computer Aided Manufacturing*, riferite sia alla singola lavorazione che a più lavorazioni consequenziali;

- virtualizzazione del processo produttivo, ossia processi possibili grazie all'avvento dell'Industria 4.0, in cui ad essere previsto e verificato nel mondo virtuale è l'intero processo produttivo della fabbrica.

L'affermazione di una “virtualizzazione integrata” può rappresentare dunque una strada possibile, dato che i progettisti sono già abituati ad un approccio lavorativo con una importante componente di virtualizzazione, aspetto che costituirebbe un elemento chiave per l'interazione tra il processo di progettazione e quello di realizzazione industriale. In altre parole, al progettista sarebbe concesso di concorrere alla gestione del processo industriale, attraverso una progettazione integrata che sia in grado di contemplare sin dalle fasi di progettazione le modalità di fabbricazione e di produzione industriale. Viceversa, il progetto computazionale del progettista diventa materia di lavoro e di analisi “critica” da parte delle macchine intelligenti coinvolte nelle varie fasi del processo di progettazione e costruzione, le quali possono elaborare e segnalare possibili modifiche finalizzate all'ottimizzazione di un processo, relativamente, ad esempio, all'impiego ottimale di un

materiale secondo le sue prestazioni, o per ridurne gli scarti, ecc²³. È questo un aspetto che porta con sé una serie di criticità, relative soprattutto all’interscambio di dati tra un processo e l’altro, da cui nasce conseguentemente la necessità di poter lavorare su piattaforme software comuni o che siano in grado di interfacciarsi tra loro. In uno stato di interconnessione tra gli strumenti di progettazione e gli strumenti di fabbricazione e costruzione, in un continuo scambio di dati e controllo dei processi fisici, l’intero processo diverrebbe “informato” (*informed*) – e non semplicemente informatizzato – arricchito e guidato dalla “nuvola di dati” elaborati in tempo reale.

In questo quadro, il ruolo del progettista non va considerato come un ruolo marginale. La “nuvola di dati” può costituire uno strumento di straordinario potenziale per l’architetto che può vantare buone doti da regista del processo di progettazione e costruzione. Immaginando l’applicazione delle tecnologie caratterizzanti l’industria 4.0 al campo della progettazione architettonica, il lavoro dell’architetto sarebbe naturalmente supportato dalle potenzialità dei nuovi strumenti, ma diverrebbe al contempo più arduo e greve di responsabilità, poiché il progetto diverrebbe sempre più integrato, frutto di una concezione olistica che non si potrebbe più ignorare. Basti pensare alla possibilità di progettare con il supporto di uno strumento software sempre connesso, in grado di informare e conseguentemente condizionare il progetto con dati relativi al sito di progetto, ai processi che lo vedono coinvolto, ad esempio ai dati ambientali (dati climatici, rischio sismico, presenza di campi elettromagnetici ecc.), e dover fare in modo che ogni

23 In realtà le possibili casistiche sono talmente tante da rendere difficile una loro individuazione a priori.

condizione rientri nel progetto con una adeguata risposta architettonica. Al contempo, il lavoro del progettista non si limiterebbe alla produzione di disegni utili al cantiere, ma potrebbe (e dovrebbe) consentire la gestione dei processi di fabbricazione e costruzione attraverso strumenti di simulazione dei processi stessi, cosa che, in ultima istanza, consentirebbe anche l'ottimizzazione delle risorse a disposizione, siano esse materiche, energetiche, economiche, ecc.

Superato il momento progettuale, le ricadute delle tecnologie 4.0, potrebbero essere non di meno importanti e fondamentali se applicate alla costruzione vera e propria. Infatti, la costruzione ottenuta da un processo produttivo 4.0, sarà dotata di sensori e dispositivi tecnologici che renderanno essa stessa un prodotto *smart*, connesso alla rete e capace di reagire, secondo diverse configurazioni, all'elaborazione di dati ricevuti in tempo reale. Un banale esempio spesso proposto per spiegare la capacità delle tecnologie 4.0 di entrare nella vita quotidiana delle persone, è rappresentato dalla possibilità che la nostra sveglia "decida" di svegliarci prima dell'orario prestabilito, perché il traffico creato da un incidente verificatosi lungo il tragitto che facciamo ogni giorno per andare in ufficio potrebbe farci ritardare. Naturalmente, anche se questo esempio risulta utile alla comprensione dell'interconnessione che caratterizza la quarta rivoluzione industriale, riguarda un'applicazione quasi insignificante rispetto alle possibilità offerte da queste tecnologie. Le nuove tecnologie potrebbero entrare a far parte della nuova generazione di abitazioni, non solo attraverso elementi minori come l'arredo e gli elettrodomestici, ma anche attraverso l'installazione di sensori in componenti edilizi strutturali assicurando il monitoraggio delle prestazioni strutturali, in componenti impiantistiche per monitorarne l'integrità e l'efficienza energetica, e allo stesso modo

garantire il controllo dei valori legati alla salubrità e al comfort abitativo. Le nuove abitazioni si avvantaggerebbero così del principio di servitizzazione, per cui vi sarebbe la possibilità di individuare in remoto dall'azienda produttrice, l'usura, il malfunzionamento, o l'imminente guasto di un componente edilizio, permettendo un intervento tempestivo con una manutenzione mirata e poco invasiva.

Le caratteristiche delineate finora, benché probabilmente non descritte esaustivamente data l'attualità del tema, ci fanno intuire quanto sia fondamentale l'impiego esclusivo di componenti prefabbricati montati a secco. Questa condizione è assolutamente indispensabile per i seguenti motivi:

- adeguatezza rispetto ai processi di progettazione digitale e computazionale;
- aderenza totale rispetto ai processi di fabbricazione digitale o robotica, soprattutto rispetto ai sistemi umidi o misti, che notoriamente sono processi di fabbricazione/costruzione poco accurati e poco controllabili;
- maggior precisione in fase di fabbricazione dei componenti edilizi, in ambiente controllato in condizioni costantemente ottimali;
- maggior precisione in fase di costruzione/assemblaggio dei componenti edilizi;
- maggiore aderenza tra le prestazioni strutturali ed energetiche di progetto e quelle effettive, grazie alla precisione di tutte le fasi di esecuzione e all'utilizzo di elementi dalle prestazioni certificate;
- minore produzione di rifiuti e materiale di scarto in fase di fabbricazione e costruzione;
- possibilità, se opportunamente previsto in fase di progetto, di poter sostituire parti non più idonee alla funzione a cui devono assolvere.

Alla luce delle considerazioni sin qui esposte, è opportuno riflettere su uno degli aspetti più rilevanti che l'Industria 4.0 potrebbe mettere in atto e che, è bene precisarlo, può portare a superare i limiti stessi dei processi di prefabbricazione per come li abbiamo conosciuti fino ad ora: la personalizzazione di massa.

9.2.1 Personalizzazione di massa

Nel ventaglio dei cambiamenti che l'avvento delle nuove tecnologie renderanno possibili in campo architettonico, certamente la piena realizzazione della personalizzazione di massa sarà uno dei traguardi più rilevanti.

La produzione in serie su larga scala ha rappresentato nel XX secolo la soluzione ideale per la diffusione di prodotti a basso costo. La standardizzazione necessaria a questo tipo di produzione industriale si è diffusa in tutti gli ambiti del design, dall'abbigliamento all'arredo, dal campo automobilistico al mondo della costruzione.

Risale agli anni Novanta del secolo scorso l'emergere di una nuova concezione di produzione industriale destinata a costituire il paradigma post-Fordiano nell'economia del XXI secolo: la personalizzazione di massa. Il termine, tradotto dall'anglosassone *mass customization* e coniato dall'economista Stanley Davis nel 1987²⁴, è definibile come «la strategia di produzione di beni e servizi orientata a soddisfare i bisogni individuali dei clienti e contemporaneamente preservare l'efficienza

24 S. M. Davis, M. Sciacchitano, *Futuro perfetto*, Edizioni di Comunità, Milano, 1988.

della produzione di massa»²⁵. I prodotti vengono quindi realizzati su misura e a progetto, e non più come produzione standard e su previsioni di mercato²⁶, garantendo al contempo la qualità controllata di un prodotto industriale a costi di produzione e prezzi di vendita contenuti. Nel 1996, alcuni economisti, come J. Lampel e H. Mintzberg, avevano previsto il cambiamento che si sarebbe prodotto nel mercato a più di vent'anni di distanza: «La storia economica statunitense degli ultimi 100 anni parla di una produzione e distribuzione di massa di prodotti standardizzati. [...] Al centro di questa trasformazione ci sono state le strategie basate sulla standardizzazione: la standardizzazione del gusto che ha consentito la progettazione standardizzata, la standardizzazione del design che ha consentito la produzione di massa meccanizzata e la conseguente standardizzazione dei prodotti destinati alla distribuzione di massa. [...] Non è un incidente storico che la personalizzazione è ora promossa con lo stesso entusiasmo con cui la standardizzazione è stata promossa quasi un secolo fa. Il movimento di personalizzazione di oggi è una reazione a importanti forze economiche e tecnologiche, tanto quanto il movimento di standardizzazione lo era al suo tempo²⁷».

25 M. M. Tseng, J. Jiao, Mass Customization. In G. Salvendy, *Handbook of Industrial Engineering: Technology and Operations Management*, Third Edition, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, U.S.A., 2001.

26 I. Paoletti, *Costruire le forme complesse: Innovazione, industrializzazione e trasferimento per il progetto di architettura*, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna, 2010, p. 35.

27 J. Lampel, H. Mintzberg, Customizing customization, *Sloan management review*, 38(1), 21, 1996. Traduzione dall'originale: "The history of U.S. business during the past 100 years has been a story of mass production and mass distribution of standardized goods. [...] At the heart of this transformation were strategies based on standardization: standardization of taste that allowed for standardized design, standardization of design that allowed for mechanized mass production, and a resulting standardization of products that allowed for mass distribution. [...] It is not an accident of history that customization is now promoted with the same enthusiasm with which standardization was promoted almost a century ago. Today's customization movement is a reaction to significant economic and

Tuttavia, la loro visione imperniata su argomentazioni di carattere più prettamente economico li aveva condotti a pensare che il passaggio al nuovo tipo di produzione, non sarebbe tornato a promuovere un modello di personalizzazione simile a quello preindustriale, con una personalizzazione che va dalla progettazione, alla fabbricazione, all'assemblaggio, fino alla distribuzione dei prodotti. Essi piuttosto parlavano di *customized standardization*, un modello intermedio tra la pura standardizzazione industriale e la pura personalizzazione preindustriale, con una progettazione e una fabbricazione standardizzata e un assemblaggio e una distribuzione personalizzata. Non era ancora contemplata la possibilità di una fabbricazione industriale di elementi progettati su misura, se non commissionati da grandi operazioni ad altissimo budget come quelle aerospaziali.

Nei successivi vent'anni un crescente grado di personalizzazione è stato introdotto in svariati segmenti dell'economia, dall'offerta di servizi alla produzione di beni; dalla semplice scelta di finiture e colori, fino alla scelta dei materiali, a fronte di una spesa uguale o poco più elevata rispetto a quella relativa all'acquisto del prodotto standard dello stesso produttore²⁸. Tuttavia, la personalizzazione era ancora difficilmente di natura dimensionale o geometrica. Qualora il prodotto personalizzabile fosse un bene fisico e non un servizio, derivando da un processo di fabbricazione rigido, esso restava sostanzialmente lo stesso, a meno di variazioni indirizzate più all'adeguamento al gusto estetico che all'adattamento a reali necessità di utilizzo del compratore.

Anche quando la personalizzazione ha fatto il suo ingresso nel mercato

technological forces, much as the standardization movement was in its time".

28 B. Kolarevic, From Mass Customisation to Design 'Democratisation', *Architectural Design*, 85(6), 48-53, 2015.

delle costruzioni prefabbricate, questa è stata limitata alla possibilità da parte del committente di scegliere tra determinate configurazioni e finiture in un limitato campionario di scelte prestabilite dall'azienda produttrice, in maniera non molto dissimile dalla personalizzazione di un oggetto di design o di un capo di abbigliamento, ignorando quindi la complessità intrinseca dell'architettura e il necessario adeguamento di questa alle particolari condizioni del caso.

Tuttavia, sarebbe un errore imputare una simile mancanza, di adeguamento delle soluzioni tecniche e di considerazione per il senso di appartenenza ai luoghi, alle sole abitazioni prefabbricate, quando per un secolo si è costruito in cantieri umidi secondo un tale grado di standardizzazione che avrebbe avuto un senso solo nella produzione in serie industriale. L'adozione di standard per l'architettura, soprattutto residenziale, era difatti promosso con entusiasmo all'inizio del Novecento come mezzo per industrializzare la costruzione e raggiungere così una perfezione tecnologica simile a quella dell'automobile. Le Corbusier, che ne è stato uno dei principali promotori, scriveva ne "L'urbanistica": «[...] se si vuole industrializzare un cantiere edile bisogna passare dall'anacronistico sistema di costruire ogni singolo appartamento in base alle specifiche richieste dei clienti alla costruzione dell'intera strada o addirittura dell'intero quartiere²⁹». E ancora nel libro "Verso un'architettura": «Bisogna cercare di fissare degli standard per affrontare il problema della perfezione. [...] Se il problema dell'abitazione, dell'appartamento, venisse studiato come si studia un telaio d'automobile, si vedrebbero rapidamente trasformate e migliorate le nostre case. Se le case fossero costruite industrialmente, in serie, come dei telai di automobile, si vedrebbero sorgere rapidamente

29 Le Corbusier, *L'urbanistica*, Il saggiatore, Milano, 2011, p. 75.

forme inattese, ma sane, definibili, e l'estetica verrebbe formulata con una precisione sorprendente³⁰».

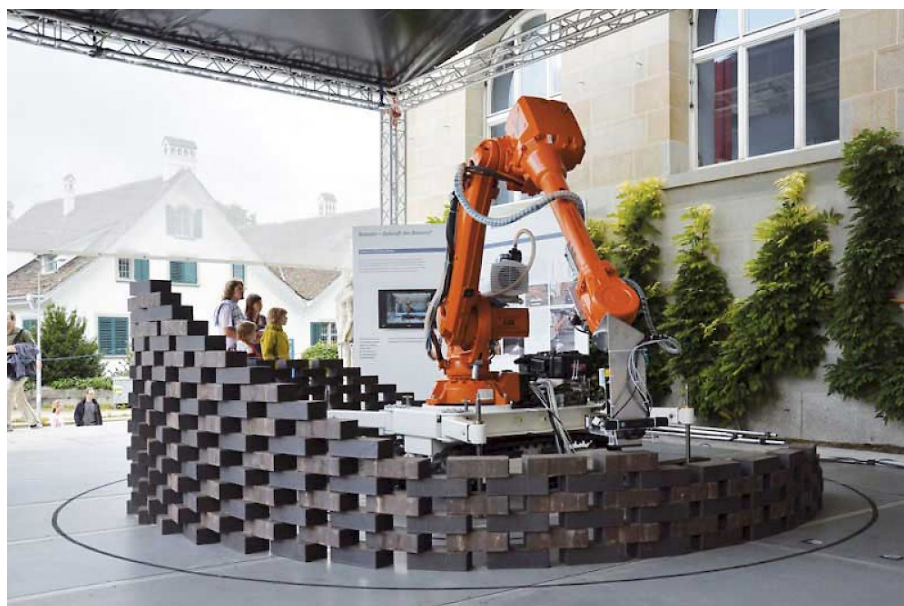
Quindi, la standardizzazione promossa e incoraggiata anche da Le Corbusier, era finalizzata a portare le logiche e l'efficienza della produzione industriale in architettura, e fare in modo che l'industrializzazione delle costruzioni alla stregua dell'industria automobilistica, divenisse un mezzo per raggiungere un elevato standard qualitativo accessibile a tutti. Di contro però, per poter sfruttare l'efficienza della produzione in serie industriale, era necessario rinunciare alla personalizzazione dell'abitazione in base alle specifiche esigenze dei clienti, sostituendole con regole di standardizzazione, ottenute attraverso l'individuazione di medie e statistiche derivanti dalla sperimentazione e dell'analisi continua dei risultati ottenuti. La produzione architettonica residenziale non si è avvantaggiata fino in fondo delle potenzialità dell'industrializzazione, ma paradossalmente ha seguito fortemente il principio della standardizzazione che era ad essa subordinata. Per cui, a partire dagli anni della fervente costruzione-ricostruzione successiva alla Seconda Guerra Mondiale, si è diffusa un'architettura residenziale sostanzialmente standardizzata sia nelle soluzioni spaziali, che nelle soluzioni tecnologiche, con pacchetti murari praticamente immutati a prescindere dalla localizzazione. Eppure, la realizzazione di queste costruzioni avveniva e avviene per lo più in cantieri umidi, la cui gestione è affidata al lavoro manuale dei lavoratori edili ed è ben distante dalla precisione tecnica e dall'ottimizzazione delle risorse tipiche della fabbrica. È come se l'industria automobilistica producesse automobili in serie, tutte uguali ma con metodo artigianale. In questo caso la standardizzazione del prodotto perderebbe di senso,

l'artigianalità del lavoro, con i suoi tempi dilatati e i suoi prezzi elevati, non sarebbe compensata dalla creazione di un prodotto unico e calzante rispetto alle esigenze del compratore.

Oggi, come si è detto precedentemente, le enormi potenzialità offerte dagli strumenti e dai principi dell'Industria 4.0, hanno aperto la strada ad una elevata flessibilità della fabbrica che permette una personalizzazione a tutti i livelli della produzione industriale. Inoltre, il settore delle costruzioni è stato coinvolto, a partire dagli anni Duemila, in un ulteriore processo di innovazione, che ha riguardato i processi progettuali, attraverso l'introduzione dei programmi di progettazione parametrico-computazionale. Questi software permettono una rapida variazione dell'esito progettuale al variare dei parametri di progetto, a fronte di un maggiore impegno in fase progettuale. L'impiego di questi strumenti, proprio per la loro capacità di superare la staticità dei processi progettuali computerizzati e di concorrere "attivamente" all'ottimizzazione della costruzione, trova ragion d'essere e compimento nella fabbricazione digitale. Per fabbricazione digitale, si intende un processo in cui il prodotto è ottenuto partendo da un modello digitale ed è fabbricato attraverso una macchina controllata da un computer.

Come afferma Ingrid Paoletti: «La digitalizzazione della produzione nell'era dell'Industria 4.0 è lentamente ma fortemente impegnata anche nel settore delle costruzioni. La possibilità di introdurre la personalizzazione di massa dei prodotti è possibile grazie a due fattori molto importanti: processo di progettazione computazionale e nuove macchine avanzate di produzione. Questi due avanzamenti possono influenzare l'industria delle costruzioni, verso il 4.0, portando a fornire non solo prodotti personalizzati per progetti speciali, ma anche per aumentare la qualità della costruzione in generale con tecniche

Fig. 9.3
Costruzione di un muro
in mattoni tramite
braccio robotico
(gramazio e kohler).



che possono essere progettate ad hoc e personalizzate in materia e tecnologia con un costo vicino alla produzione standard³¹».

Come si è detto, infatti, uno degli scopi ultimi di questa nuova rivoluzione industriale è rappresentato dal miglioramento della qualità della vita attraverso un miglioramento della qualità del prodotto finale (oltre agli altri aspetti di cui si è parlato più approfonditamente ai punti precedenti) e non mediante l'aumento della quantità di produzione e, nel caso dell'industria delle costruzioni questo è particolarmente vero, in quanto, la possibilità di una personalizzazione su vasta scala è strettamente connessa alla qualità dell'architettura.

Negli ultimi anni «ricercatori e designer provenienti da tutto il mondo stanno sviluppando un'architettura sperimentale, dai prototipi fino alla scala dei piccoli padiglioni, in collaborazione con i produttori industriali e con l'uso di macchine avanzate di fabbricazione. Questa ricerca globale ha fornito l'opportunità di analizzare, studiare e condividere soluzioni non convenzionali. Tuttavia, la sfida più grande in futuro sarà

31 I. Paoletti, "Mass Customization in the Era of Industry 4.0: Towards Immaterial Building Technology." *Informed Architecture*. Springer, Cham, 2018, pp. 77-87.

l'attuazione di questi risultati alla scala della costruzione, affrontando la complessità e gli alti standard tipici dell'ambiente costruito della nostra epoca»³².

Su questo punto i pionieri della fabbricazione robotica Fabio Gramazio e Matthias Kohler, dell'ETH di Zurigo, sostengono che l'utilizzo degli strumenti di progettazione e costruzione avanzati sono in grado di stimolare lo sviluppo del concetto di personalizzazione e hanno il potenziale per creare una grande quantità di nuovi componenti edilizi che, avendo la possibilità di essere prodotti una sola volta in via esclusiva, possono raggiungere un alto livello di performance e di personalizzazione, superando la stagnazione derivante da una produzione ripetitiva nelle costruzioni³³.

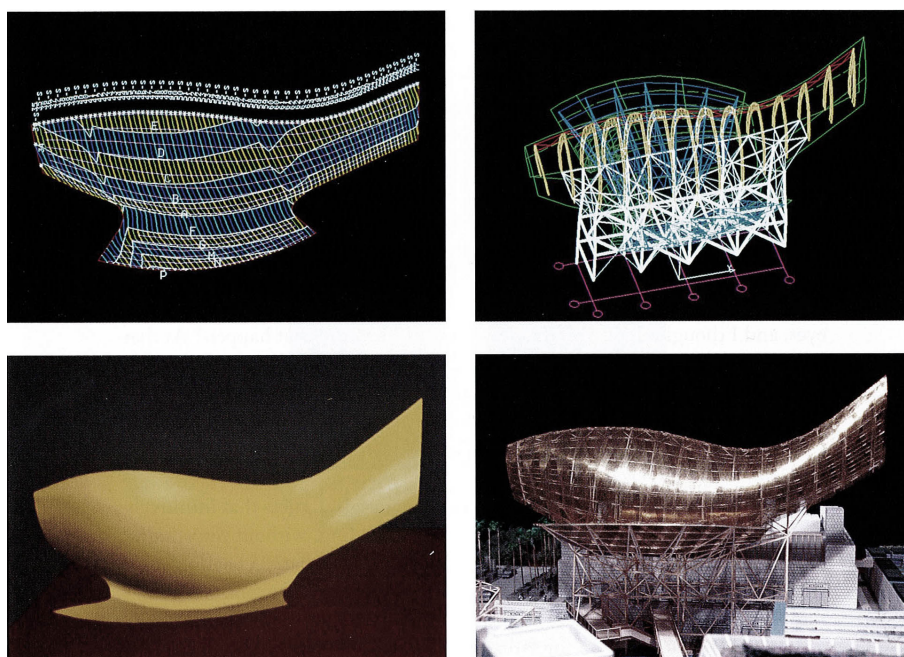
Tuttavia, sarebbe importante non solo che la fabbricazione digitale entrasse nel mondo delle costruzioni, superando la fase sperimentale di produzione di piccoli padiglioni, ma che si diffondesse come metodo da adottare per la costruzione di edifici residenziali e non solo di costruzioni ardite relative a progetti ad alto budget e dalle forme complesse. Infatti, i processi di personalizzazione avanzata (*advanced customization*) dell'architettura "non-standard"³⁴ si riferiscono soprattutto a progetti dove la complessità è sostanzialmente geometrica. Uno dei primi esempi di fabbricazione digitale in architettura è avvenuto

32 R. Naboni, Roberto, I. Paoletti, *Advanced Customization in Architectural Design and Construction*, Springer, Milano, 2015.

33 J. Willmann, M. Kohler & F. Gramazio, *The Robotic touch: How robots change architecture*, Zurigo, Park Books, 2014.

34 Non-standard Architecture è il nome di una mostra molto importante, organizzata al Centre Pompidou di Parigi da Frédéric Migayroue Zeynep Mennan tra dicembre 2003 e marzo 2004. In questa mostra una serie di architetti e designer della prima era digitale, come Un Studio, Kas Oosterhuis, Greg Lynn, Objectile, espongono una serie di progetti in cui si afferma potentemente la nuova architettura digitale. In questa mostra le forme complesse possibili grazie agli strumenti di modellazione tridimensionale vengono esaltati e portati alla ribalta.

Fig. 9.4
Modello
tridimensionale
e maquette del
padiglione di
Barcellona,
Frank O. Gehry, 1992
(fonte: Gehry Partners
LPP).



per opera di Frank O. Gehry, con il progetto del padiglione a forma di pesce a Barcellona nel 1992. Con questo progetto, per la prima volta le complesse geometrie della struttura sono trasferite direttamente dal modello digitale alla fase di fabbricazione con macchine a controllo numerico³⁵. Branko Kolarevic fa notare che grazie a questo precedente una nuova generazione di architetti realizzò che era possibile trasferire le informazioni del modello digitale alle fasi di fabbricazione e costruzione, grazie all'impiego delle macchine a controllo numerico³⁶. Per questo motivo la personalizzazione di massa si è sviluppata nel tempo in architettura in una accezione principalmente formale, dove ciò che era indagato era sostanzialmente la complessità geometrica del componente edilizio, reso ormai economicamente sostenibile e tecnologicamente fabbricabile. Ma se è il processo di personalizzazione in sé il dato importante, allora esso può essere applicato anche a progetti

35 R. Naboni, & I. Paoletti, *Advanced customization in architectural design and construction*, op. cit., p. 8.

36 B. Kolarevic (a cura di), *Architecture in the digital age: design and manufacturing*, Abingdon-on-Thames, UK, Taylor & Francis, 2004.

più semplici dal punto di vista geometrico, come avviene comunemente per le abitazioni. Molta ricerca è stata fatta negli ultimi anni sul tema della personalizzazione avanzata, basti pensare alla proliferazione di padiglioni temporanei fabbricati digitalmente, mentre il tema della personalizzazione dei componenti edilizi dalla geometria più semplice richiederebbe sicuramente maggiore attenzione da parte di ricercatori e progettisti.

9.3 Nuovi scenari per la casa nell'era dell'industria 4.0

Una tecnologia cambia il mondo soltanto quando diventa necessaria e disponibile per tutti. Non v'è dubbio che il prossimo logico passaggio nell'avanzata tecnologica 4.0, sia la diffusione e l'accessibilità di tali potenzialità alle più ampie fasce della società.

Per ottenere questa diffusione si dovrebbe ragionevolmente passare oltre che dall'applicazione nella produzione di beni e servizi, che già da sola imprimerebbe una straordinaria impronta positiva sulla sostenibilità del modello economico, anche per l'applicazione nel campo delle costruzioni. E in quest'ultimo ambito, si dovrebbe superare la fase di sperimentazione applicata a piccoli padiglioni dalle forme complesse o a grandi strutture specialistiche, per passare all'applicazione sull'edilizia residenziale, tanto più auspicabile sia per diffusione che per rilevanza del cambiamento che produrrebbe. Basti pensare al risparmio energetico che si otterrebbe attraverso l'efficientamento delle abitazioni e del loro processo costruttivo, moltiplicato per i numeri dell'edilizia abitativa.

Per l'applicazione dei principi dell'Industria 4.0 all'architettura residenziale un ineludibile presupposto è costituito dall'abbandono dell'attuale sistema del mercato delle costruzioni, in cui la gestione delle

imprese edili gioca un ruolo determinante, muovendo le redini di tutto il processo di costruzione³⁷. In Italia le imprese edili sono gestite dalla figura professionale del costruttore edile, rivestita da un soggetto che per legge, non deve necessariamente possedere un'istruzione tecnica né tantomeno architettonica. I requisiti di legge ad esso necessari, infatti, riguardano principalmente le condizioni economiche e l'assenza di procedimenti penali pendenti a proprio carico. Certo, esiste l'obbligo di legge per l'impresa edile di nominare un responsabile tecnico, ma anche ad egli non sono richieste particolari competenze in materia architettonica³⁸. Bisogna, inoltre, considerare che quest'ultimo soggetto resta pur sempre un dipendente del primo, le cui scelte sono certamente più orientate ad una speculazione economica che condizionate dall'impatto ecologico o sociologico causato dalle proprie costruzioni. Costruzioni in cui si tenderà a perpetrare sempre lo stesso modello, se non con un lento progresso dovuto principalmente al necessario

37 Ryan E. Smith in: *Prefab architecture: A guide to modular design and construction* (2011), p. 24, afferma che il problema del maggior peso del costruttore rispetto all'architetto nel processo di costruzione risale già alla seconda metà del XIX sec.: «In 1850, as architecture was emerging as a profession, contractors began to take on larger projects managing all aspects of building construction. During this time, the architect's control and supervision of construction and advisory role to the client was called into question. Speculative office buildings and other development projects gave contractors much more power than architects over the final outcome of building projects. As advances in building materials and methods increased and trades became ever more specialized, the architect eventually became less significant in the building industry, being seen as less of a resource to the client when compared with the builder».

38 Secondo l'articolo 7 del disegno di legge n.1192/2013, "Disposizioni per la disciplina dell'accesso all'attività imprenditoriale nel settore dell'edilizia": «il responsabile tecnico deve avere, fra i requisiti professionali, almeno uno fra: iscrizione agli ordini di ingegneri o architetti o al collegio dei periti industriali o dei geometri ed esercizio della professione da almeno due anni; laurea in ingegneria o architettura o diploma di istruzione tecnica o professionale, certificato di specializzazione tecnica superiore con indirizzo edilizia; esperienza professionale di operaio qualificato del settore; frequenza di un corso di formazione professionale e superamento del relativo esame».

adeguamento a nuove disposizioni di legge. Finché ci sarà questa falla nel mercato delle costruzioni private, vi sarà un divario troppo grande tra i temi della discussione accademica e la realtà quotidiana dei cantieri edili.

Probabilmente per scavalcare questo sistema stagnante, le cui mosse sono dettate in misura preponderante da interessi economici, e poter condurre delle significative sperimentazioni applicate sul tema della casa, sono sorti negli ultimi anni diversi nuovi modelli operativi. Uno di questi è rappresentato dalla nascita di una nuova figura professionale, l'*archipreneur*, ossia l'architetto-imprenditore³⁹. Questo, occupandosi di tutto il processo costruttivo, dalla progettazione alla costruzione degli edifici, evita i condizionamenti derivanti sia dalle imprese costruttrici che dai committenti, offrendo così con il proprio lavoro, non più un servizio ma un prodotto finito⁴⁰.

Negli ultimi anni sono sorti, inoltre, numerosi prototipi di case innovative progettate da centri di ricerca e prodotte in autocostruzione, grazie all'utilizzo degli strumenti tipici dei Fab Lab. I Fab Lab si sono diffusi in seguito all'apertura del primo laboratorio di fabbricazione digitale nel 2001 al MIT, ad opera di Neil Gershenfeld, direttore del *Center for Bits and Atoms*. Il concetto alla base del primo Fab Lab si sviluppa proprio a partire dall'intuizione di Neil Gershenfeld circa l'importanza della sperimentazione diretta degli studenti attraverso la prototipazione dei loro progetti con macchine a controllo numerico, poiché il futuro della produzione appariva già orientato verso la fabbricazione di oggetti

39 T. Maescher, *The Archipreneur Concept*, Archipreneur, 2016.

40 Per maggiori dettagli è possibile consultare: E. Reinholdt, *Architect and Entrepreneur: A Field Guide to Building, Branding, and Marketing Your Startup Design Business*, 30X40 Design Workshop Press, Mount Desert, ME, U.S.A., 2015.

e macchine su richiesta⁴¹. Negli anni, la strumentazione tipica dei Fab Lab si è estesa fino a comprendere: frese a controllo numerico, macchine laser cutter, stampanti 3D, postazioni di saldatura e di lavorazioni elettroniche.

Il primo significativo esempio di costruzione di una abitazione sperimentale con gli strumenti del Fab Lab è rappresentato dalla Fab Lab House⁴². Un prototipo di casa a basso impatto ambientale coprodotto dall'Instituto de Arquitectura Avanzada de Catalunya (IAAC) e dal Center for Bits and Atoms del MIT, vincitrice del Solar Decathlon Europe 2010. Con questa sperimentazione si intendeva dimostrare la possibilità di ottenere un'abitazione, energeticamente autosufficiente, ricorrendo all'utilizzo di strumentazioni facilmente reperibili in qualsiasi laboratorio di fabbricazione digitale, abbattendo così i costi di distribuzione e di trasporto.

«Il potenziale cliente seleziona in Internet dimensione, forma, disposizione interna e poi, ovunque nel mondo, appoggiandosi ai laboratori Fab Lab può recuperare gli elementi prefabbricati, ottenuti tramite taglio al laser controllato da computer di lastre di legno compensato. I pezzi sono consegnati in sito e facilmente assemblati: in questo modo si ottiene una casa di 75 mq in meno di due settimane⁴³».

41 N. Gershenfeld, *Fab: the coming revolution on your desktop - from personal computers to personal fabrication*, Basic Books, New York, 2005.

42 Fab Lab House, "Home", 2010. Disponibile presso: <http://www.fablabhouse.com/en> (ultimo accesso: Ottobre 2017).

43 F. Gallanti, *Fab Lab House. I raggi del sole curvano: un prototipo di casa auto-sufficiente realizzato dagli studenti di IAAC e MIT*. Disponibile presso: <http://www.abitare.it/it/design/2011/01/31/fab-lab-house/> (ultimo accesso: Ottobre 2017).

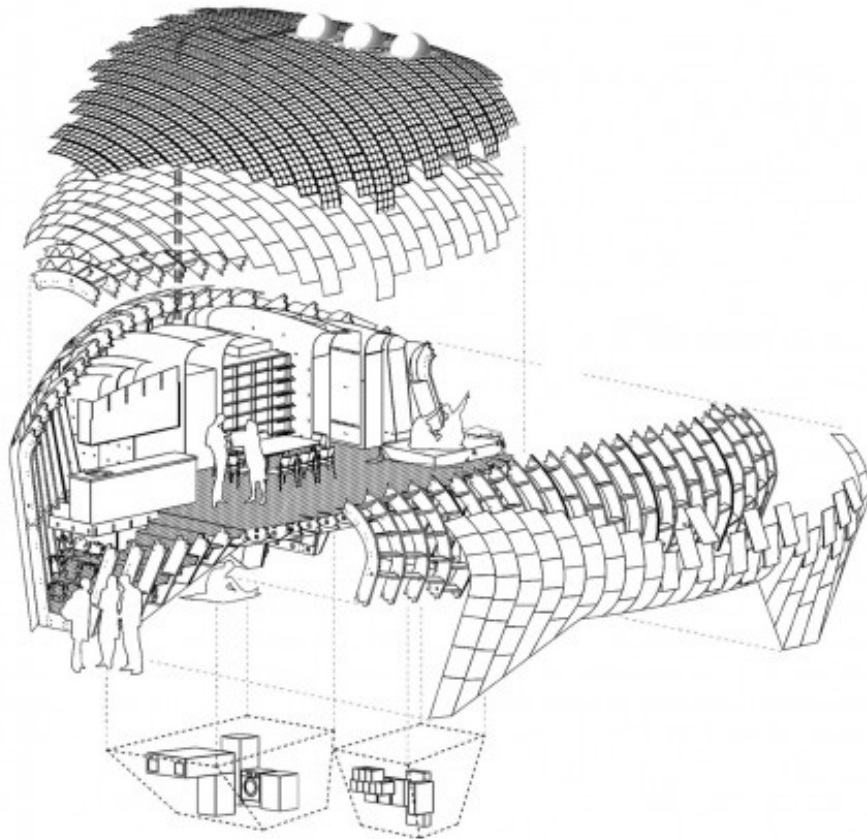


Fig. 9.5
Fab Lab House, esploso
assonometrico e
realizzazione del
prototipo
(fonte: IAAC).



Micaela Colella

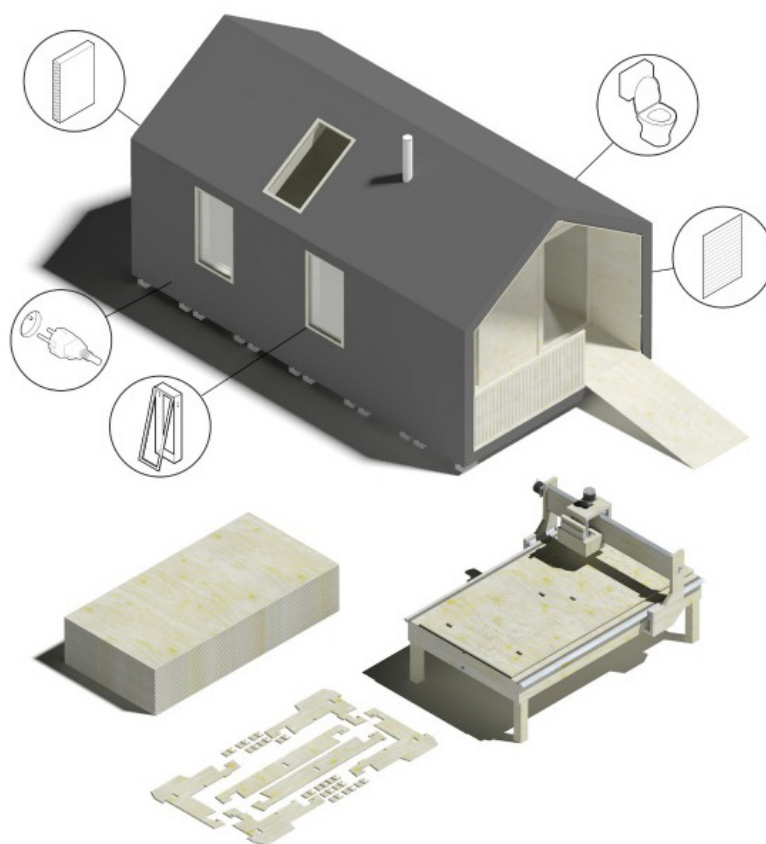
Architettura residenziale e sostenibilità

La casa prefabbricata mediterranea nell'era dell'Industria 4.0

Cap 9. L'abitazione nell'era dell'Industria 4.0

Fig. 9.10

Modulo abitativo tipo di WikiHouse (fonte: wikihouse.cc).



Un altro significativo esempio è rappresentato dalla WikiHouse⁴⁴, un progetto *open-source* nato nel 2011 grazie ad Alastair Parvin e Nick Ierodionou, che si prefigge di rendere più facile e democratica la costruzione di piccole abitazioni sostenibili in legno. Il progetto si basa sull'idea di dare la possibilità a chiunque lo desideri di accedere a una libreria di modelli tridimensionali di abitazioni e modificarle secondo le proprie esigenze, ottenendo automaticamente e gratuitamente i file utili alla produzione, mediante fresatura CNC, di tutti i pezzi necessari alla costruzione della casa.

Per rendere l'assemblaggio semplice e realizzabile da tutti, questo sistema non richiede pezzi speciali in materiali diversi dal legno (non sono previste viti, bulloni o simili), ma tutte le connessioni sono

44 WikiHouse, "Library", 2017. Disponibile presso: <https://wikihouse.cc/library> (ultimo accesso: Ottobre 2017).

ottenute mediante incastri legno-legno. Una struttura così concepita, associata alla fornitura di un kit di costruzione simile a quello fornito per l'assemblaggio di un mobile, consente la costruzione di una piccola casa con il coinvolgimento di un gruppo di due o tre persone, senza alcuna competenza specifica, in un lasso di tempo di circa un giorno⁴⁵. Al momento il sistema è in grado di assistere la costruzione del solo scheletro portante dell'edificio, che necessita degli opportuni completamenti, ma rappresenta comunque un importante esempio di partecipazione e di personalizzazione degli utenti finali, permesso dall'uso degli strumenti di progettazione computazionale e di fabbricazione digitale.

L'applicazione dei principi dell'Industria 4.0 all'architettura residenziale, come si è detto per l'architettura in generale, passerà necessariamente attraverso la progettazione computazionale e la successiva fabbricazione e costruzione digitale. In relazione ai principi che sottendono queste due tecnologie, è possibile individuare due possibili processi costruttivi che, non a caso, stanno diventando il fulcro delle ricerche e delle sperimentazioni di centri di ricerca accademici e non, e di finanziamenti e investimenti e pubblici e privati. Stiamo parlando dell'*additive manufacturing* (fabbricazione additiva) e di una prefabbricazione di nuova concezione, la prefabbricazione personalizzata. Sono questi i due scenari entro cui, a nostro avviso, si svilupperanno le abitazioni del prossimo futuro.

45 R. Naboni, & I. Paoletti, *Advanced customization in architectural design and construction*, op. cit., p. 24.

9.3.1 La prefabbricazione personalizzata

Al punto 9.3 si è detto delle prime sperimentazioni in autocostruzione di abitazioni con gli strumenti tipici dei Fab Lab. Questi prototipi sfruttano le potenzialità degli strumenti di fabbricazione digitale per la realizzazione di componenti prefabbricati per costruire soluzioni personalizzate a basso costo. Tuttavia, per una reale diffusione di soluzioni abitative ottenute per assemblaggio di elementi costruttivi prefabbricati *custom*, e per ottenere esiti che vadano oltre l'approssimazione esecutiva dei piccoli prototipi, verso una perfezione tecnica difficilmente raggiungibile con l'autocostruzione, è necessario che i principi della *mass customization* (nella sua nuova accezione derivante dall'affermazione dell'Industria 4.0) entrino a far parte della realtà quotidiana delle imprese che si occupano di abitazioni prefabbricate.

La tipologia della casa prefabbricata è una tipologia per cui è tornato oggi un certo interesse di pubblico grazie alla sua capacità di rispettare alti standard qualitativi (certificabili) a fronte di costi di costruzione relativamente bassi. La realizzazione di queste costruzioni è gestita quasi esclusivamente da aziende specializzate nella lavorazione del legno. Secondo una comparazione effettuata prendendo in considerazione diciassette aziende partner⁴⁶ di Lignius, l'Associazione Nazionale Italiana Case Prefabbricate in Legno, si è potuto constatare che le aziende di questo settore propongono soluzioni tecniche che comprendono generalmente uno o due sistemi strutturali, un sistema a telaio e un sistema massivo con pareti X-Lam, e una scelta che va da 2

⁴⁶ Le aziende partner considerate afferiscono alle categorie Lignius Certified Member e Lignius Member.

a 4 pacchetti tecnologici murari. In questo modo, ogni azienda mette a punto i propri pacchetti tecnologici certificati e i propri sistemi costruttivi brevettati, per cui la costruzione delle abitazioni diventa “seriale”, ottimizzando tempi e costi di costruzione. Inoltre, la maggior parte delle aziende propongono una serie di soluzioni abitative monofamiliari o bifamiliari da catalogo, ossia delle soluzioni predeterminate che possono essere scelte in toto dai clienti oppure modificate in minima parte. Delle aziende prese in considerazione, la maggior parte affianca alla vendita di case da catalogo la progettazione interna all’azienda di case personalizzate utilizzando i propri pacchetti costruttivi, oppure si apre alla realizzazione di progetti messi a punto da progettisti esterni, adeguando il progetto all’uso delle loro soluzioni tecniche. Solo una piccola parte di queste aziende, non propone alcuna soluzione predeterminata, ne architettonicamente ne tecnologicamente, mettendo a disposizione il proprio *know-how* per la realizzazione di un progetto completamente personalizzato. In quest’ultimo caso il ruolo dell’impresa non è rappresentato dalla vendita di un prodotto, ma di un servizio subordinato al lavoro dell’architetto.

A nostro avviso, quest’ultima modalità operativa si riflette nella qualità degli esiti architettonici che, per via del processo di personalizzazione, tende ad essere più elevata rispetto alla qualità architettonica raggiungibile attraverso la costruzione di case standardizzate (da catalogo). Queste ultime, infatti, quand’anche progettate da professionisti altamente qualificati e perfettamente realizzate secondo altissimi standard tecnologici, presenteranno sempre un concettuale punto debole, poiché figlie di un processo di adattamento piuttosto che di una progettazione totalmente personalizzata, ossia generata dalla natura stessa del luogo e dall’identità dei suoi fruitori.

Nel campo della prefabbricazione residenziale, non esiste al momento una cultura tecnologica condivisa tra le aziende, ognuna di esse sviluppa soluzioni tecniche indipendenti soggette a un proprio brevetto e in concorrenza tra loro. Ciò non contribuisce a diffondere una solida cultura teorica e tecnica sull'argomento e comporta la necessità da parte di committenti e progettisti di rivolgersi ad un'azienda per trasformare la propria idea progettuale in architettura costruita, riducendo le possibilità di controllo del progetto da parte del progettista, che dovrà limitarsi ad elaborare un progetto architettonico di massima che sarà poi ingegnerizzato dall'impresa stessa.

Se si considera la quasi totale assenza di aziende di case prefabbricate nel sud Italia, è facile dedurre che qualora in quest'area si volesse ricorrere alla prefabbricazione per la costruzione di un'abitazione, sarebbe necessario rivolgersi a una delle numerose aziende con sede nel nord Italia⁴⁷, le quali verosimilmente sviluppano soluzioni tecnologiche lontane dalle necessità del clima mediterraneo. Se si considera poi la possibilità (tutt'altro che remota) di un rapporto diretto azienda-committente il problema si estenderà a comprendere, oltre alla possibile inadeguatezza tecnica, anche l'incoerenza delle soluzioni architettoniche rispetto al contesto storico-culturale.

Visto il quadro di riferimento, è di fondamentale importanza che, nell'affermazione e diffusione della prefabbricazione, come mezzo per il passaggio ad un processo di costruzione e un ciclo di vita più sostenibile degli edifici, non si scavalchi l'insostituibile lavoro

47 Secondo il Rapporto Case ed Edifici in Legno 2015, predisposto dal Centro Studi Federlegno Arredo, per conto di Assolegno, la maggior parte delle aziende italiane che realizzano case prefabbricate hanno sede in Trentino Alto Adige (49), Lombardia (42) e Veneto (35).

dell'architetto, passando a un nuovo modello di progettazione e costruzione basato sulla standardizzazione che, seppur dovrebbe essere in linea di principio più efficiente ed ecologico, resterebbe ancora una volta decontestualizzato (soprattutto in area mediterranea).

In ultima analisi, il ruolo cardine nel passaggio ad un'architettura prodotta con mezzi di produzione di massa ma con l'individualità di un prodotto artigianale, risiede proprio nel lavoro dell'architetto. Il progettista, attraverso la progettazione computazionale, è al centro del nuovo iter progettuale-produttivo consentito dai principi dell'Industria 4.0 e dalla fabbricazione digitale.

Il nuovo iter qui proposto è già stato sperimentato da alcuni architetti avanguardisti. I primi risultati in tal senso sono stati ottenuti da una azienda californiana, chiamata Cover, fondata nel 2014 da due architetti, Alexis Rivas e Jemuel Joseph. I due architetti spinti dalla convinzione dell'utilità degli strumenti digitali per l'ottimizzazione del processo di progettazione e costruzione, hanno realizzato un proprio software di progettazione che attraverso algoritmi informa il progetto di ogni possibile condizionamento, dalle informazioni geospaziali, come il percorso del sole per la determinazione della posizione delle pareti e delle superfici vetrate, alle disposizioni urbanistiche comunali, dai dettagli del sito di costruzione allo stile di vita dei committenti. I progetti elaborati dal progettista con l'aiuto di questo strumento software, dopo aver passato il vaglio dei committenti, passa ad una fase di ottimizzazione informatica del processo di fabbricazione dei componenti. Successivamente le parti dell'edificio vengono prodotte su misura in fabbrica e semplicemente assemblate a secco sul sito. Spostando il processo di costruzione in fabbrica, la società dichiara di aver registrato una riduzione nella produzione di materiale di scarto

pari circa all'80%. Inoltre, l'uso della tecnologia digitale non solo agevola la costruzione di abitazioni energeticamente più efficienti, ma la precisa esecuzione possibile in un ambiente controllato ne garantisce la corrispondenza con quanto previsto in fase di progettazione.

Dunque, la costruzione di strutture prefabbricate, così come si vedrà in seguito per la fabbricazione additiva, si presta perfettamente a diventare un processo completamente digitalizzato. Il progettista sviluppa il proprio progetto (computazionale), che viene trasmesso alle macchine di fabbricazione digitale, ottimizzando il processo per la realizzazione dei componenti, al fine di ridurre sprechi di qualsiasi natura. Tutti i componenti vengono realizzati e infine assemblati secondo una precisione possibile solo in un processo industrializzato, rispecchiando così gli alti standard qualitativi previsti dal progetto nella costruzione finita.

9.3.2 La fabbricazione additiva

La fabbricazione additiva, ossia la realizzazione di un oggetto tridimensionale a partire da un modello 3D digitale, tramite un processo per addizione e non per sottrazione di materiale, ha origine nel 1986, quando Chuck Hull deposita il brevetto della stereolitografia, il primo metodo di prototipazione rapida, che egli definisce come un metodo per creare oggetti solidi da successivi strati induriti di polimero liquido fotosensibile colpito da luce ultravioletta⁴⁸.

48 C. W. Hull, *Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography*, brevetto n.US4575330 A, registrato l'8 Agosto 1984, pubblicato l'11 Marzo 1986.

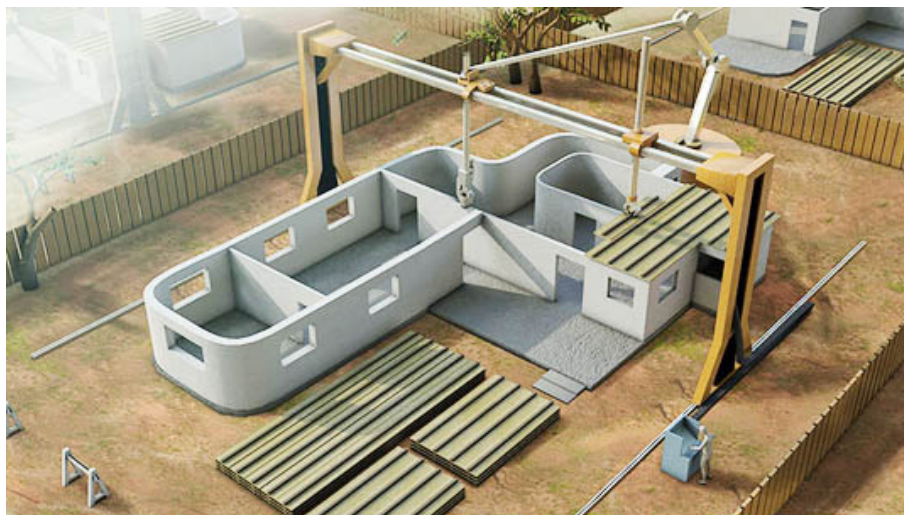


Fig. 9.11
Rappresentazione
del processo di
fabbricazione additiva
proposto dalla Contour
Crafting Corporation
(fonte: Contour Crafting
Corporation).

Dal 1986 ad oggi, sono stati sviluppati ulteriori metodi e strumentazioni per la fabbricazione additiva, caratterizzati dall'impiego di diversi materiali e diversi processi di fabbricazione a cui corrisponde un grado di precisione adeguato all'ambito di applicazione. Nel campo delle costruzioni, le principali tecniche impiegate per la fabbricazione additiva sono costituite dal *material extrusion* e dal *binder jetting*. Il *material extrusion* è un processo in cui il materiale è depositato, strato dopo strato, tramite estrusione da un apposito ugello⁴⁹.

Questo metodo è stato sfruttato nel campo delle costruzioni per la prima volta dalla Contour Crafting Corporation, un'azienda fondata in California nel 2008 da Behrokh Khoshnevis. L'intuizione dell'azienda sussiste nell'impiego della fabbricazione additiva per l'estrusione di conglomerato cementizio attraverso gru di grandi dimensioni informaticamente controllate, al fine di costruire edifici a basso costo per fornire rapidamente alloggi nelle zone colpite da calamità naturali.

In Italia è stato avviato nel 2012 un progetto di ricerca intitolato WASP (World Advanced Saving Project) che, nel solco delle ricerche

49 I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies* (2nd edition), New York, NY, USA, Springer, 2015, p. 35.



Fig. 9.12
BigDelta della WASP
e un dettaglio del
processo di estrusione
(fonte: WASP).

già avviate in California, impiega una tecnica simile di estrusione di materiale per la costruzione di edifici. Il progetto WASP ha messo a punto una stampante 3D dell'altezza di 12 metri, chiamata BigDelta, con cui si stanno svolgendo delle sperimentazioni per la stampa di costruzioni con un impasto di argilla e paglia.

Questa tecnologia sperimentale, attualmente impegnata nella costruzione di un eco-villaggio stampato nella cittadina di Massa Lombarda, chiamato Parco Tecnologico di Shamballa, appare ancora in uno stato embrionale, i risultati prodotti presentano infatti un esito estetico rudimentale. Un aspetto critico di tale approccio è rappresentato dalla necessità di utilizzare una stampante di notevoli dimensioni vista l'esigenza di contenere l'intero volume della costruzione. D'altro canto, un aspetto degno di nota è costituito dalla possibilità di impiegare materiale reperito in loco, con costi di costruzione, consumi energetici e produzione di rifiuti limitatissimi.

Con il proposito di sfruttare tali potenzialità è stato introdotto dalla WASP il *Maker Economy Starter Kit*, uno starter kit che contiene in un container tutta la strumentazione necessaria per costruire abitazioni con materiali reperiti sul territorio (compresa la BigDelta) con l'obiettivo



Fig. 9.13
XTreeE Pavilion, 2016
(fonte: XtreeE.eu).

di «creare micro comunità autosufficienti che nascono e crescono sulla base del sapere collettivo grazie a mezzi di autoproduzione avanzati, accessibili a tutti⁵⁰».

Un altro interessante caso di impiego delle logiche di fabbricazione additiva, tramite estrusione di materiale da costruzione, è rappresentato dal lavoro dell'azienda XtreeE, nata in Francia nel 2015. La XtreeE si sta specializzando nella costruzione di edifici e componenti caratterizzati dall'uso di forme complesse. Per il progetto XtreeE Pavilion, costruito a Vélizy (Francia) nel 2016, i progettisti dell'azienda si sono avvalsi della collaborazione della Dassault Systèmes, lavorando in *cloud* sulla piattaforma 3DEXperience messa a punto da questi ultimi, per lavorare

50 WASP, "Maker Economy Starter Kit", 2016. Disponibile presso: <http://www.wasproject.it/w/progetti-stampanti-3d/maker-economy-starter-kit/> (ultimo accesso: Ottobre 2017).

Micaela Colella

Architettura residenziale e sostenibilità

La casa prefabbricata mediterranea nell'era dell'Industria 4.0

Cap 9. L'abitazione nell'era dell'Industria 4.0

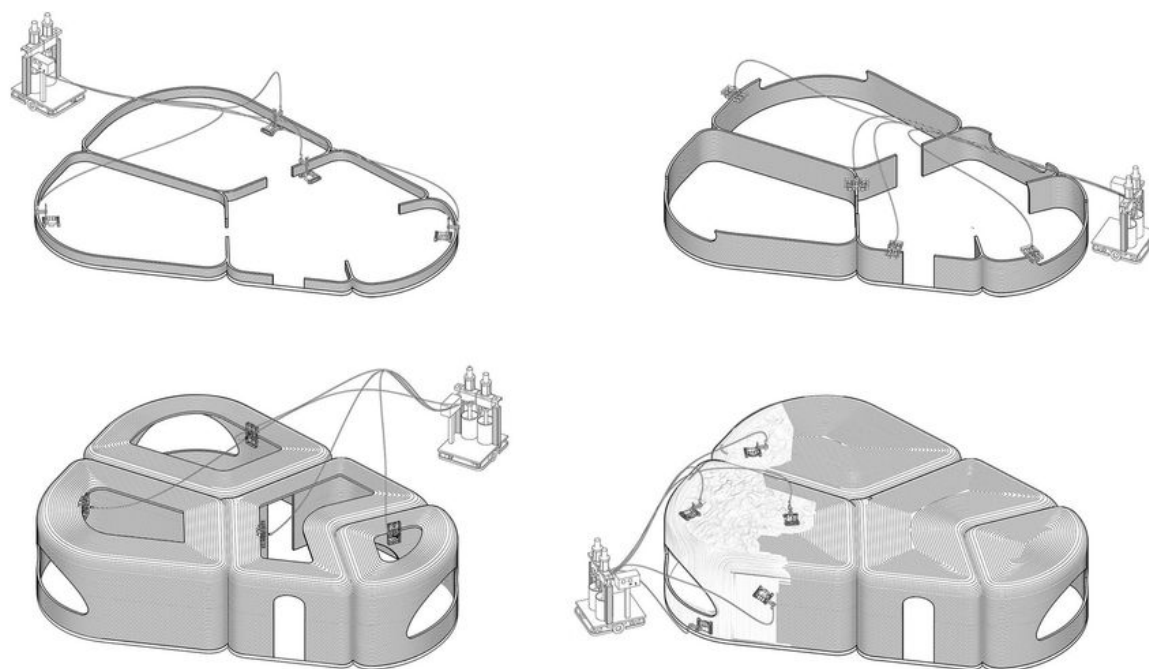


Fig. 9.14
Fabbricazione additiva
con i minibuilders
(fonte: IAAC).

in maniera collaborativa alla progettazione, simulazione e convalida digitale in 3D della forma, della topologia e della fabbricazione della struttura⁵¹. Per la realizzazione di questo prototipo è stato utilizzato un cemento sperimentale sviluppato da Lafarge Holcim e il robot industriale IRB8700 di ABB.

Un team di ricercatori dell'IAAC, coordinato da Sasa Jokic e Petr Novikov, ha cercato di superare i limiti dimensionali per la produzione additiva alla scala architettonica, legati alle dimensioni della stampante o all'estensione del braccio robotico, mettendo a punto un sistema che impiega mini robot mobili che stampano in 3D, chiamati *minibuilders*⁵². I *minibuilders*, connessi a un robot centrale che li rifornisce del materiale da stampare, si distinguono in tre tipi: i primi sono deputati

51 Domus, *XtreeEPavilion: biomimetica e additiva, è l'architettura del futuro*, 2016. Disponibile presso: <http://specials.domusweb.it/innovation-it/xtreeepavilion-e-larchitettura-del-futuro/> (ultimo accesso: Ottobre 2017).

52 IAAC, "Minibuilders", 2014. Disponibile presso: <http://robots.iaac.net/> (ultimo accesso: Ottobre 2017).

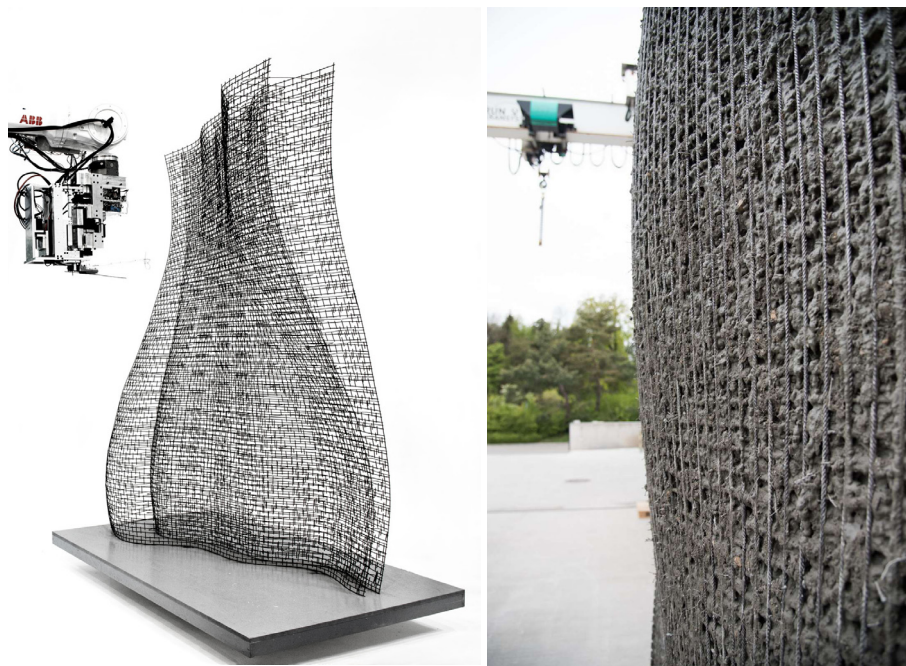


Fig. 9.15
Tecnologia robotica
Mesh Mould (fonte:
ETH, 2017).

alla creazione degli strati di fondazione seguendo un percorso tracciato sul piano d'appoggio; successivamente subentrano i secondi che, agganciandosi ai primi strati, sono deputati alla creazione dei muri di elevazione e delle coperture secondo il progetto; infine, subentra un terzo tipo di robot, in grado di muoversi in verticale lungo i muri grazie ad un sistema di ancoraggio sottovuoto, che stampa un ulteriore strato di materiale di rinforzo. Nonostante il sistema presenti interessanti aspetti di innovazione, la sperimentazione sembra non aver dato ancora risultati concreti alla scala architettonica.

Gli ultimi sviluppi della fabbricazione additiva su interi edifici, sono riconducibili alle sperimentazioni in corso in Svizzera, presso l'ETH di Zurigo, dove un gruppo multidisciplinare di ricercatori sta lavorando, in collaborazione con partner commerciali, al progetto chiamato DFab House. DFab House è una struttura di tre piani destinata ad ospitare le residenze e gli uffici dei ricercatori ospiti nel campus di Dübendorf, la cui progettazione e realizzazione è prevista impiegando prevalentemente processi digitali, per dimostrare come le tecnologie digitali possano

rendere i processi di progettazione e costruzione più sostenibili ed efficienti⁵³. Tra i quattro metodi costruttivi utilizzati per la costruzione del progetto, la tecnologia Mesh Mould impiega un processo robotizzato per la costruzione non-standard in calcestruzzo armato. Il sistema consiste nel creare l'armatura in acciaio attraverso un processo additivo in cui piccoli pezzi di armatura vengono assemblati e saldati da un robot appositamente progettato, assecondando la geometria a forma libera della struttura. In questo modo una doppia armatura metallica consente di eliminare la necessità di realizzare le casseforme che conteranno il getto di calcestruzzo, con un conseguente risparmio economico e di materiale⁵⁴.

Nonostante si stiano conducendo numerose sperimentazioni finalizzate alla realizzazione di costruzioni monolitiche con tecniche che impiegano l'estrusione di materiale, queste presentano ancora un'esecuzione con un significativo grado di approssimazione. Ulteriori elementi di criticità sono legati alla natura sostanzialmente monomaterica e monolitica delle costruzioni, le cui dimensioni sono al momento condizionate dalle dimensioni della stampante o dal raggio di azione dei bracci robotici. Le stesse problematiche si riscontrano anche nei tentativi di fabbricare architetture in un unico elemento monolitico con la tecnica a secco di *additive manufacturing*, ossia il *binder jetting*.

53 The National Centre of Competence in Research (NCCR) Digital Fabrication, *Building with Robots and 3D Printers: Construction of the DFAB HOUSE Up and Running*, 2017. Disponibile presso: <http://www.dfab.ch/achievements/building-with-robots-and-3d-printers-construction-of-the-dfab-house-up-and-running/> (ultimo accesso: Ottobre 2017).

54 N. Hack, W. V. Lauer, F. Gramazio, M. Kohler, "Mesh Mould: Robotically Fabricated Metal Meshes as Concrete Formwork and Reinforcement". In *Proceedings of the 11th International Symposium on Ferrocement and 3rd ICTRC International Conference on Textile Reinforced Concrete*, 2015.

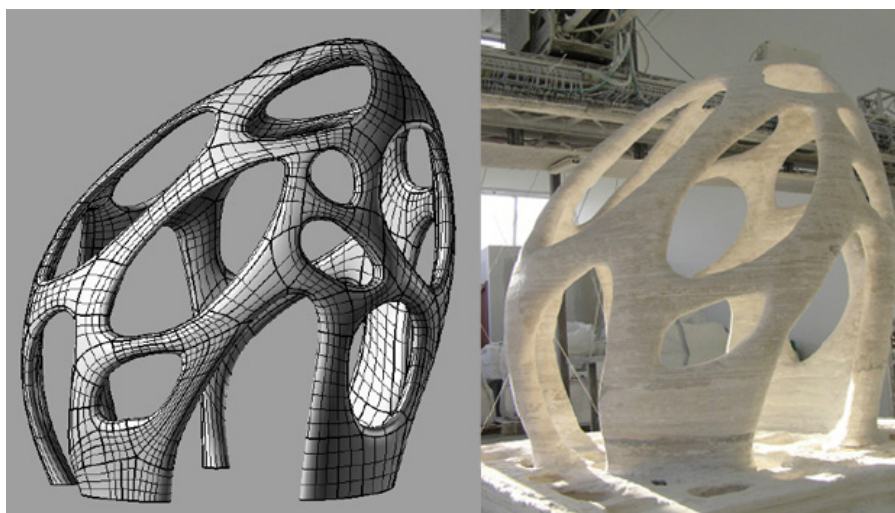


Fig. 9.16
Radiolaria pavilion,
Shiro Studio, 2009
(fonte: D-Shape, 2009).

Il *binder jetting*, è un processo in cui un legante è stampato, strato dopo strato, su un letto di materiale inerte in polvere. Le parti in cui non è spruzzato il legante fanno da supporto per lo strato successivo⁵⁵.

Questo metodo è stato portato per la prima volta alla scala architettonica dall'azienda Monolite UK Ltd, fondata da Enrico Dini nel 2006, dopo aver depositato il brevetto della D-Shape⁵⁶, una grande stampante 3D (ingombro di 6 x 6 m) per la realizzazione di costruzioni in un conglomerato lapideo costituito da sabbia e da un legante a base di magnesio⁵⁷. Nonostante le dimensioni della stampante e l'obiettivo per cui è stata progettata, questa è stata finora impiegata maggiormente per installazioni scultoree e solo sporadicamente in architettura. L'esempio più significativo è individuabile nel Radiolaria pavilion (2009), un padiglione monolitico inscritto in un cubo di 3 m di lato, progettato da Shiro Studio, che dimostra la capacità della D-Shape di stampare una struttura complessa a forma libera.

55 I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies* (2nd edition), op. cit., p. 35.

56 E. Dini, R. Nannini, M. Chiarugi, *Method and device for building automatically conglomerate structures*, brevetto n. CA 2602071 A1, registrato il 16 Marzo 2006, pubblicato il 28 Settembre 2006.

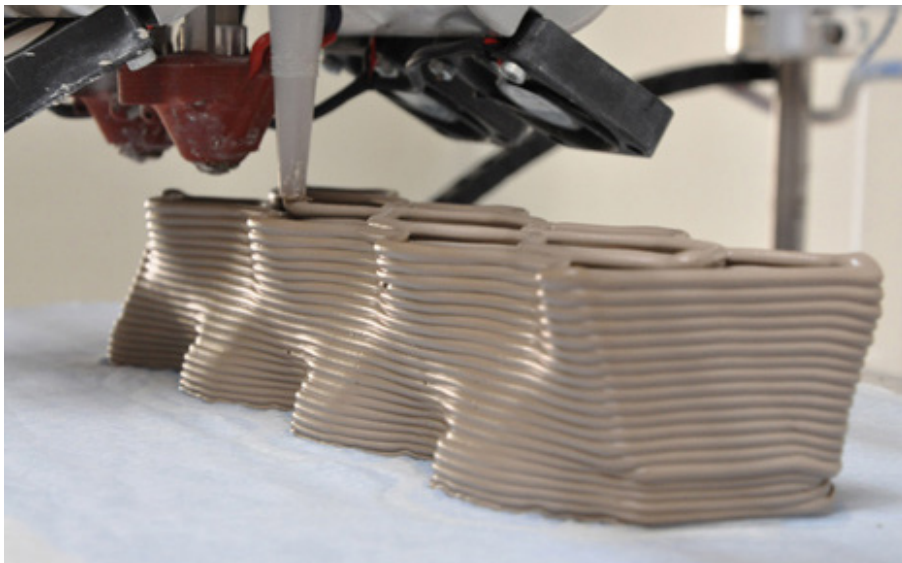
57 In una prima versione il legante utilizzato era costituito da resina epossidica, successivamente sostituito da un legante a base di magnesio.

Fig. 9.17
Prototipo di struttura a
forma libera ottenuto
tramite fabbricazione
additiva (fonte: IMCRC).

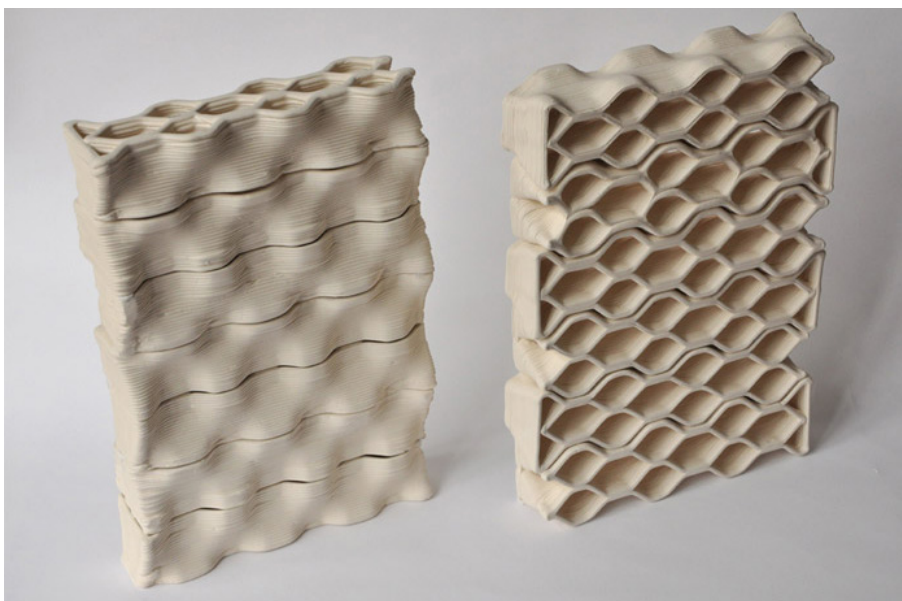


Lo sviluppo delle tecniche di *additive manufacturing* potrebbero portare, da una parte alla stampa dell'intera costruzione, in una sorta di nuovo cantiere umido in cui la mano dell'operatore è sostituita idealmente dall'estrusore della stampante, e dall'altra alla stampa di componenti edili personalizzati assemblati tra loro successivamente. La stampa di strutture ottenute per elementi discreti può essere ricondotta, similmente a quanto fatto per la stampa di strutture monolitiche, in tecniche a umido (*material extrusion*) e tecniche a secco (*binder jetting*).

Tra i più significativi esempi di strutture per elementi discreti stampati per estrusione di materiale vi è il progetto di ricerca *Freeform Construction* condotto a partire dal 2006, da ricercatori dell'*Innovative Manufacturing and Construction Research Center (IMCRC)* dell'Università di Loughborough. Il fine delle loro sperimentazioni è dimostrare la possibilità di creare strutture dalle forme complesse, che non potrebbero essere prodotte da processi convenzionali, grazie a macchine che traducono le informazioni digitali nella creazione di



Figg. 9.18-19-20
Stampaggio di mattoni
da costruzione in
materiale ceramico
(fonte: Brian Peters,
2013).



Micaela Colella

Architettura residenziale e sostenibilità

La casa prefabbricata mediterranea nell'era dell'Industria 4.0

Cap 9. L'abitazione nell'era dell'Industria 4.0

Fig. 9.21
Installazione urbana,
Urban Cabin, (fonte:
DUS Architects, 2015).



complessi componenti costruttivi, grazie a una precisa estrusione del calcestruzzo controllata digitalmente. Le potenziali applicazioni includono: pannelli di rivestimento a doppia curvatura, componenti strutturali complessi e componenti architettonici⁵⁸.

Una sperimentazione che parte da simili presupposti è quella condotta dall'architetto Brian Peters, che ha lavorato alla realizzazione di una stampante 3D per la stampa di mattoni da costruzione in materiale ceramico. Da questa idea è sorto il progetto denominato Building Bytes, che prevede un lavoro simultaneo di stampanti 3D in una sorta

58 R. A. Buswell, R. C. Soar, A. G. F. Gibb, A. Thorpe, *Freeform Construction Application Research*, Springer, Dordrecht, 2006. 773-780.

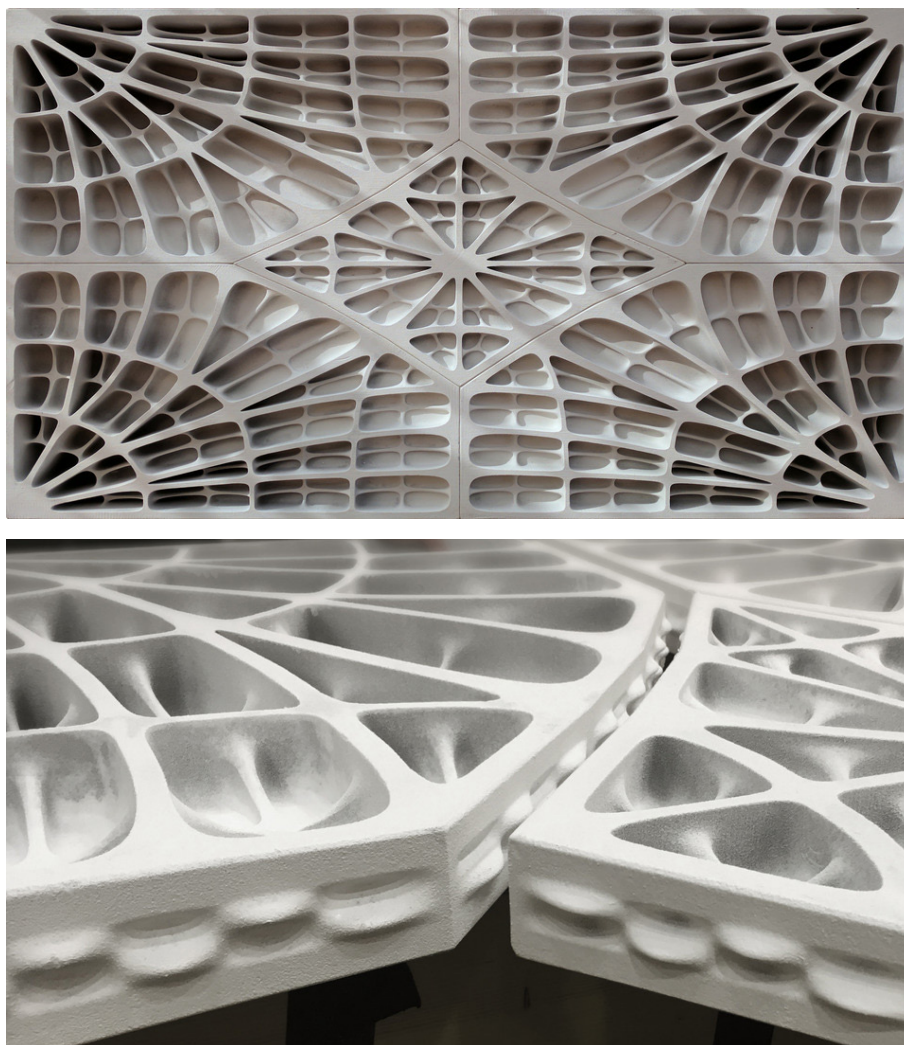


Fig. 9.22
3D-printed floor system
(fonte: Block Research
Group, 2016).

di fabbrica di mattoni mobile e poco costosa per la costruzione su larga scala, che potrebbe impiegare il materiale da costruzione disponibile localmente.

Risultati architettonicamente interessanti ottenuti da un processo di stampa per estrusione, sono prodotti dallo studio olandese DUS Architects, che ha messo a punto una stampante chiamata XL 3D Printer, per la costruzione di edifici su richiesta, realizzati su misura. La stampante XL, che può stampare fino a un volume di dimensioni 1,6 x 1,6 x 4,5 metri, è stata pensata per l'estrusione di materiali plastici di origine biologica (bioplastica) e riciclabili, ma si stanno

conducendo sperimentazioni che prevedono l'uso di ulteriori materiali, come un derivato del legno stampabile. Con questa tecnologia la DUS Architects ha già sperimentato la costruzione alla scala architettonica, in progetti come l'Urban Cabin (2015), una installazione urbana di 8 m² interamente stampata in 3D, e l'Europe Building (2015), un padiglione temporaneo per incontri istituzionali dei primi ministri europei, per il quale è stato stampato l'involucro esterno⁵⁹.

Sulla sperimentazione della stampa a secco, con la tecnica del *binder jetting*, per la costruzione per componenti architettonici discreti, sono significativi gli studi condotti dal Block Research Group. Lo studio del gruppo di ricerca mira a sfruttare la flessibilità geometrica dei processi di produzione additivi per la realizzazione di componenti strutturalmente ottimizzati e al tempo stesso economicamente fattibili. Il Block Research Group ha impiegato la tecnologia del *binder jetting* per costruire un prototipo di solaio funicolare composto da cinque elementi discreti interbloccanti, la cui geometria complessa è determinata computazionalmente dal flusso delle forze interno alla struttura. In questo modo l'altezza del solaio può essere notevolmente ridotta, lavorando a pura compressione, senza l'utilizzo di armature metalliche. La complessa geometria che ne deriva, sarebbe difficilmente realizzabile con tecniche costruttive tradizionali e richiederebbe l'impiego di costose casseforme. Grazie alla fabbricazione additiva, invece, la forma ottimizzata può essere facilmente riprodotta con una precisione pari alla dimensione del granello di sabbia⁶⁰.

59 DUS Architects, "Manifesto". Disponibile presso: <http://houseofdus.com/#section-manifesto> (ultimo accesso: Ottobre 2017).

60 P.Block, M.Rippmann,T.VanMele, Compressive assemblies: Bottom-up performance for a new form of construction,*AD Architectural Design*,87(4): 104-109,2017 (July/August).*Special issue S. Tibbits (Ed.) - Autonomous Assembly: Designing for a new era of collective construction.*



Un'applicazione altrettanto interessante della stampa per elementi discreti è rappresentato certamente dalla Quake Column sviluppata da Emerging Objects⁶¹. Quake Column è un prototipo, sviluppato in un composto a base di sabbia, di un sistema costruttivo studiato per resistere alle sollecitazioni sismiche, grazie alla dissipazione dell'energia tra i componenti montati a secco, geometricamente modellati secondo i principi antisismici desunti dalle costruzioni Inca, caratterizzate da giunti inclinati (sia in prospettiva che all'interno dello spessore murario) privi di malta e da angoli smussati. A differenza delle costruzioni Inca, i cui blocchi pesavano diverse tonnellate, i blocchi della Quake

Fig. 9.23
Quake Column (fonte:
Emerging Objects,
2014).

61 Emerging Objects, "QuakeColumn", 2014. Disponibile presso:<http://www.emergingobjects.com/project/quake-column/> (ultimo accesso: Ottobre 2017).

Column, essendo stampati in 3D possono essere cavi, risultando molto più leggeri. Inoltre, i blocchi presentano un sistema per facilitare la movimentazione manuale (una sorta di maniglia integrata) e sono numerati per facilitarne l'assemblaggio⁶².

In definitiva, con il supporto degli esempi illustrati, è possibile affermare che la fabbricazione additiva rappresenta certamente una coerente applicazione delle tecnologie di progettazione computazionale e di fabbricazione digitale, e quindi una strada percorribile attraverso lo sviluppo dell'Industria 4.0 in architettura.

Come abbiamo visto, è possibile ricondurre i differenti approcci alla fabbricazione additiva, sostanzialmente a quattro categorie:

- estrusione di composti umidi, per la fabbricazione di edifici monolitici;
- estrusione di composti umidi, per la fabbricazione di elementi discreti;
- solidificazione per strati di polveri, per la fabbricazione di edifici monolitici;
- solidificazione per strati di polveri, per la fabbricazione di elementi discreti.

Confrontando i quattro approcci e gli esiti delle relative sperimentazioni prototipali, a nostro parere si evince che, a prescindere che si tratti di un procedimento umido o a secco, la costruzione per elementi discreti precedentemente stampati, rispetto alla stampa dell'intero edificio

⁶² Domus, *QuakeColumn*, 2014. Disponibile presso: https://www.domusweb.it/it/notizie/2014/10/20/quake_column.html (ultimo accesso: Ottobre 2017).

in un'unica soluzione monolitica, risulta avere un più alto grado di precisione esecutiva e, al tempo stesso, subisce meno condizionamenti causati dalle limitazioni spaziali delle stampanti o del raggio di azione dei bracci robotici, costituendo una valida alternativa alla fabbricazione di elementi edilizi con mezzi tradizionali.

Non vi sono dubbi sullo stato ancora embrionale della ricerca sulla fabbricazione additiva in ambito architettonico, tuttavia è altrettanto indubbio che in un lasso di tempo relativamente breve questa abbia compiuto un'evoluzione notevole. Con la creazione di macchinari sempre più efficienti, si è passati gradualmente a livelli di precisione maggiori e all'impiego di composti di materiali sempre più idonei alla definizione di sistemi staticamente efficaci ed ecologicamente compatibili.

La fabbricazione additiva potrebbe giocare un importante ruolo nel passaggio ad una industria delle costruzioni più sostenibile. Attraverso la fabbricazione additiva è possibile creare elementi dalla forma ottimizzata ottenuta attraverso strategie computazionali, eliminando gli sprechi di materiale, di tempo e di denaro necessari per la fabbricazione ottenuta per sottrazione di materiale o per la creazione di casseforme e controstampi. Diventa così fattibile e accessibile realizzare forme complesse che non sarebbero neanche pensabili usando metodi di fabbricazione tradizionali.

La fabbricazione digitale apre alla possibilità di lavorare diffusamente con prodotti non standard, pensati e creati in relazione a uno specifico progetto o adeguati ad esso, con l'impiego dei materiali di volta in volta più idonei alla natura del progetto o alla disponibilità locale. Inoltre, la possibilità di fabbricare gli elementi costruttivi nello stesso sito della costruzione, trasportando le sole stampanti come una sorta di fabbrica

mobile, o affidando la fabbricazione dei componenti relativi a un dato progetto a uno dei centri di fabbricazione digitale diffusi sul territorio, ridurrebbe notevolmente i consumi energetici e l'inquinamento prodotto dal trasporto sul cantiere di tutti i componenti edilizi dalle rispettive fabbriche.

Considerando infine il carattere massivo (plastico-murario) tipico dell'architettura mediterranea, la costruzione per blocchi ottenuti tramite processo additivo di composti di derivazione lapidea può rappresentare una naturale evoluzione dei processi di costruzione dell'architettura tradizionale. La fabbricazione diffusa e accessibile di elementi costruttivi complessi e personalizzati può riaprire la strada alla costruzione di forme complesse, come le strutture voltate della tradizione mediterranea, rese esecutivamente più semplici, economicamente più accessibili ed energeticamente-staticamente ottimizzate dalle tecnologie 4.0.

QUARTA PARTE

Capitolo 10

Conclusioni

10.1 Contributi e nodi critici della tesi

Si ritiene utile ripercorre ordinatamente lo sviluppo dell'intera tesi, affinché si rendano chiari ed evidenti i nodi critici della trattazione e lo sviluppo logico che lega saldamente i temi trattati nei capitoli, affinché rappresenti un contributo chiaro, seppur non esaustivo, sul tema trattato. Ripercorrendo la tesi:

- Nella prima parte della trattazione, si è cercato di ripercorrere brevemente i passaggi storici e le cause scatenanti che hanno condotto all'emergenza energetica e ambientale globale, per cui oggi si parla sempre con maggiore frequenza e pressione di architettura sostenibile. Il legame tra architettura sostenibile di nuova concezione e i principi di ottimizzazione delle risorse e del minimo spreco dell'architettura vernacolare è ormai tema ampiamente assodato e appartiene alla conoscenza consolidata del dibattito e della ricerca architettonica. Ciò nonostante, si è ritenuto opportuno completare questa prima parte della trattazione illustrando i basilari principi di bioclimatica e i principali sistemi passivi impiegati nell'architettura vernacolare. L'analisi è stata circoscritta alla sola architettura vernacolare dell'area mediterranea, campo d'indagine entro il quale la tesi si colloca.

- La seconda parte della trattazione propone una lettura della storia della prefabbricazione, illustrando i progetti pionieristici che, a prescindere dall'esito estetico (sempre opinabile), hanno contribuito al processo evolutivo dell'architettura residenziale prefabbricata. Con il sostegno della storia e dei più recenti sviluppi tecnologici, la tesi ha potuto riconoscere nella prefabbricazione il più efficace mezzo per realizzare un'architettura caratterizzata da elevati livelli di sostenibilità ambientale e, grazie all'intrinseca efficienza dei processi produttivi che la contraddistinguono, consentirne la diffusione nei più ampi strati della società.

Al fine di fare ordine e chiarezza, colmando una lacuna nella pluralità delle ricerche contemporanee inerenti il tema dell'abitazione prefabbricata, si è ritenuto necessario compiere una inedita catalogazione, basata sul grado di stanzialità e complessità delle soluzioni architettoniche prodotte. Sono stati illustrati più approfonditamente, a titolo esemplificativo, alcuni casi paradigmatici inquadrati secondo la catalogazione proposta.

Secondo la stessa catalogazione, sono state elaborate e illustrate sei sperimentazioni prototipali che, secondo differenti modalità, concorrono a dimostrare concretamente le possibilità offerte dalle odierne tecniche di prefabbricazione.

- Con la terza parte si è voluto sistematizzare e rendere chiari i concetti fondanti della nascente Industria 4.0, sulla base delle principali pubblicazioni scientifiche inerenti il tema.

Questo ramo della ricerca, non ancora storicizzato e affrontato quasi esclusivamente da professionalità di altre discipline, è stato in questa trattazione ricondotto ai temi dell'architettura. In particolare, è stata data una lettura critica rispetto ai temi dell'abitazione prefabbricata, che ha permesso di individuare due possibili strade per lo sviluppo di abitazioni

prefabbricate di nuova concezione, che siano in grado di superare i limiti storici della casa prefabbricata derivanti dalla produzione di massa. In questa parte della tesi si giunge a definire i principi progettuali e tecnici secondo cui si rende possibile la piena realizzazione di case prefabbricate “su misura”, attraverso l’introduzione della fabbrica flessibile e la conseguente piena realizzazione del concetto di personalizzazione di massa.

Si ritiene che le possibilità offerte dall’Industria 4.0, insieme agli strumenti di progettazione computazionale, di fabbricazione digitale e robotica, possano portare nel prossimo futuro alla realizzazione di abitazioni prefabbricate totalmente personalizzate, realizzate tenendo conto del complesso di parametri inerenti il luogo e lo stile di vita delle persone. Più precisamente, le strade individuate dalla presente ricerca sono quelle della prefabbricazione avanzata e della fabbricazione additiva. La tesi giunge a dimostrare, per i motivi succitati, che entrambe le strade sono ampiamente percorribili anche in ambito mediterraneo.

10.2 Limitazioni e futuri sviluppi

Le presenti considerazioni conclusive non possono che sottolineare l’ovvia limitatezza della ricerca svolta rispetto agli ampi temi trattati dalla stessa. Nella convinzione che un lavoro di ricerca non possa essere definito tale se può ritenersi completamente concluso, il lavoro svolto ha avuto come intento principale quello di fornire una sistematizzazione inedita del tema di ricerca, al fine di sensibilizzare il lavoro di altri ricercatori e auspicabilmente fissare un nuovo orizzonte che apra la strada ad ulteriori riflessioni.

La volontà di sperimentazione pratica a sostegno delle argomentazioni trattate si è potuta compiere con la costruzione al vero e per intero di una sola abitazione prefabbricata, Ecodomus. Questa abitazione, pur non assumendo certamente il valore di compiuta dimostrazione di tutti i temi trattati, entro i limiti di una sperimentazione prototipale, ha costituito un importante momento conoscitivo per poter affrontare con consapevolezza e cognizione di causa il tema della costruzione di abitazioni con i metodi della prefabbricazione in area climatica mediterranea.

In particolare, è giusto evidenziare che le esperienze progettuali, contenute nella seconda parte della tesi, sono incentrate sulla sperimentazione sulla prefabbricazione come strumento per la sostenibilità, e solo in seguito e per merito di queste esperienze è stato possibile intravedere le potenzialità dei principi dell'Industria 4.0, e poi comprendere l'importanza dell'applicazione di tali principi all'architettura prefabbricata. Alla luce di questa considerazione, è chiaro che molta ricerca e sperimentazioni potrebbero ancora essere portate avanti al fine di giungere a una piena applicazione dei principi dell'Industria 4.0 all'architettura residenziale prefabbricata.

In particolar modo sarebbe importante riuscire ad elaborare strumenti di progettazione computazionale integrati che informino e condizionino automaticamente il modello tridimensionale secondo parametri legati alla particolare condizione bioclimatica in cui il progetto si inserisce, ed includere i principi desunti dall'esperienza secolare dell'architettura vernacolare, in un processo senza soluzione di continuità tra le fasi di progettazione, di fabbricazione e di costruzione.

Micaela Colella

Architettura residenziale e sostenibilità

La casa prefabbricata mediterranea nell'era dell'Industria 4.0

Cap 10. Conclusioni

Bibliografia

Capitolo 2

R. Carson, *Silent Spring*, Houghton Mifflin Company, Boston, 1962.

F. Ceschin, I. Gaziulusoy, Evolution of design for sustainability: From product design to design for system innovations and transitions, *Design Studies* 47, 2016, pp.118-163.

A. de Botton, *Architettura e felicità*, Ugo Guanda Editore, Parma, 2006.

A. De Toni, R. Siagri, C. Battistella, *Anticipare il futuro: Corporate Foresight*, Egea Editore, Milano, 2015, p. 85.

B. Edwards, *Sustainable architecture: European directives and building design*, Butterworth Architecture, Oxford, 1999.

T. Fanfani, *Storia Economica*, McGraw-Hill, Milano, 2010.

B. Hopwood, M. Mellor, G. O'Brien, Sustainable development: mapping different approaches, *Sustainable development*, 13(1), 2005.

International Living Future Institute, *Living Building Challenge, certified case studies*. Disponibile presso: <https://living-future.org/lbc/case-studies/> (ultimo accesso: Marzo 2017).

V. Manfron, G. Mucelli, P. Paganuzzi, N. Sinipoli, V. Tatano, *Costruire il progetto sostenibile: saggio bibliografico*, IUAV, Venezia, 2006.

D. H. Meadows, D. L. Meadows, J. Randers, W. W. Behrens III, *The Limits to Growth*, Universe Books, New York, 1972.

G. Minguzzi (a cura di), *Architettura sostenibile: Una scelta responsabile per uno sviluppo equilibrato*, Skira, Milano, 2008

B. Munari, *Design e comunicazione visiva*, Editori Laterza, Bari, 1968.

R. Neutra, *Progettare per sopravvivere*, Edizioni di Comunità, Milano, 1956.

H. Palm, *Das gesunde Haus: das kranke Haus und seine Heilung; unser nächster Umweltschutz; die biologische Bauordnungslehre in der Architekturaperennis; die Zivilisationskrankheit der Architektur; ein Rezeptbuch zum Selberhandeln*, Dettingen, Ordo-Verlag, 1968.

V. Papanek, *Design for the Real World: Human Ecology and Social Change*, Pantheon Books, New York, NY, USA, 1971.

A. Segrè, *Vivere spreco zero. Una rivoluzione a portata di tutti*, Marsilio Editori, Venezia, 2013.

S. Settis, *Azione popolare: Cittadini per il bene comune*, Torino, Einaudi, 2012, p.29.

J. Steele, *Sustainable architecture: principles, paradigms, and case studies*, McGraw-Hill, New York, NY, USA, 1997.

N. J. Todd, J. Todd, *Progettare secondo natura*, Eleuthera, Milano, 1984.

United Nations General Assembly, *Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future*. Transmitted to the General Assembly as an Annex to document A/42/427 – Development and International Co-operation: Environment, 1987. Disponibile presso: <http://www.un-documents.net/wced-ocf.htm> (ultimo accesso: Febbraio 2017).

Capitolo 3

G. Bardet, *Le facteur soleil en urbanisme*, *Techniques et architecture*, 1945.

A. Boeri, *Caratteri di sostenibilità delle tecnologie tradizionali in area mediterranea*. In C. Monti, R. Roda (a cura di), *Costruire sostenibile: il Mediterraneo*, Alinea Editrice, Firenze, 2001.

F. Caròla in, L. Alini, *Fabrizio Caròla. Opere e progetti 1954-2016*, Edizioni CLEAN, Napoli, 2016.

H. El-Borombaly, L. F. Molina-Prieto, *Adaptation of Vernacular Designs for Contemporary Sustainable Architecture in Middle East and Neotropical Region*, *International Journal of Computer Science and Information Technology Research* 13 (4), 2015.

H. Fathy, *Natural energy and vernacular architecture*, University of

Chicago press, Chicago, IL, USA, 1986.

H. Fathy, *Architecture for the poor: an experiment in rural Egypt*, University of Chicago press, Chicago, IL, USA, 2010.

H. Glassie, *Vernacular architecture*, Indiana University Press, Bloomington, USA, 2000.

M. Grosso, Principi e tecniche di controllo dello scambio termico edificio-terreno, *Ambiente costruito*, gennaio-marzo 1997.

G. Guizzetti, *Costruire e abitare sul lago: un'architettura residenziale tra natura, eco compatibilità e tecnologie consapevoli*. Tesi di laurea, Politecnico di Milano – Facoltà di Architettura, a.a. 2003-04.

L. Hilberseimer, *The new city: principles of planning*, P. Theobald, Chicago, 1944.

W.Köppen, *Das geographische System der Klimate*, in *Handbuch der Klimatologie*, vol. 1, Borntraeger, Berlino, 1936.

J. Lebreton, *La cité naturelle*. Editions Paul Dupont, Paris, 1945.

F. Marboutin, “L’actinometre et l’orientation des rues et des façades”, *La technique sanitaire et municipale*, 1931.

C. Monti, R. Roda (a cura di), *Costruire sostenibile: il Mediterraneo*, Alinea Editrice, Firenze, 2001.

P. Oliver, *Encyclopedia of vernacular architecture of the world*, Cambridge University Press, Cambridge, UK-New York, NY, USA 1997.

V. Olgyay, “Bioclimatic approach to architecture”. In *Building Research Advisory Board*, Conf. Report No. 5, National Research Council, Washington, DC, USA, 1953.

V. Olgyay, *Desing with climate*, Princeton university press, Princeton, NJ (USA) 1969.

V. Olgyay, *Progettare con il clima: un approccio bioclimatico al regionalismo architettonico*, Franco Muzio Editore, Padova, 1981.

G. Pagano, G. Daniel, *Architettura rurale italiana*, Quaderni della Triennale, Milano, 1936.

A. Palladio, *I Quattro libri dell'architettura*, vol. 1, cap. XXVII, Venezia, 1570.

B. Rudolfsky. *Architecture without architects*, 1964.

G. Vinaccia, *Per la città di domani*, Fratelli Palombi, Roma, 1943.

Capitolo 4

ArchDaily, Studentboende: Student Unit / Tengbom, 2013. Disponibile presso: <https://www.archdaily.com/430047/studentboende-student-unit-tengbom/> (ultimo accesso: Novembre 2017).

A. Arieff e B. Burkhardt, *Prefab*, Gibbs Smith, Layton, 2002.

B. Bergdoll, “Home Delivery: Viscidities of a Modernist Dream from Taylorized Serial Production to Digital Customization”. In B. Bergdoll, P. Christensen (a cura di), *Home Delivery: Fabricating the Modern Dwelling*, New York, Museum of Modern Art, 2008, p. 48.

Better Shelter, “Product”, 2015. Disponibile presso: <http://www.bettershelter.org/product/> (ultimo accesso: Novembre 2017).

Disrupt 100, “Humanihut”, 2016. Disponibile presso: <http://2016.disrupt100.com/company/humanihut/> (ultimo accesso: Novembre 2017).

Domus, Renzo Piano: Diogene, 2013. Disponibile presso: https://www.domusweb.it/it/architettura/2013/06/13/renzo_piano_diogene.html (ultimo accesso: Novembre 2017).

T. T. Feters, *The Lustron home: The history of a postwar prefabricated housing experiment*, McFarland, Jefferson, NC, USA, 2001.

L. Henry, “Mail-order Houses”, *Canadian Museum of Civilization*. Disponibile presso: <http://www.historymuseum.ca/cmhc/exhibitions/cpm/catalog/cat2104e.shtml#1222116> (ultimo accesso: Novembre 2017).

M. Johnston, M. Guaralda, S. Sawang, Sustainable innovation for Queensland’s housing design: A case study, *Construction Economics and Building* 14(4), 2014, pp. 11-31.

O. L. Kaufmann, “System 3”, 2008. Disponibile presso: <http://www.olkaufmann.com/work/08-system3-new-york/> (ultimo accesso: Novembre 2017).

Kodasema, “KODA”, 2017. Disponibile presso: <http://www.kodasema.com/> (ultimo accesso: Novembre 2017).

C. J. Kibert, *Sustainable Construction: Proceedings of the First International Conference of CIB TG 16*, University of Florida, Center for Construction & Environment, Tampa, Florida, USA, 1994.

C.J. Kibert, *Sustainable construction: green building design and delivery*, John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, NJ, 2012.

A. Imperiale, An American wartime dream: the Packaged House system of Konrad Wachsmann and Walter Gropius, *ACSA Fall Conference*, Philadelphia, 2012.

G. Merin, AD Classic: The Dymaxion House / Buckminster Fuller, ArchDaily, 2013. Disponibile presso: <https://www.archdaily.com/401528/ad-classics-the-dymaxion-house-buckminster-fuller> (ultimo accesso: Novembre 2017).

Mima Housing, “MIMA”, 2011. Disponibile presso: <http://www.mimahousing.com/mima-house#> (ultimo accesso: Novembre 2017).

R. J. Mitchell, Whatever Happened to Lustron Homes?, *APT Bulletin*, Vol. 23, No. 2, 1991.

V. Pavan, Costruzione e materiali nell'opera di Fernand Pouillon. In «Architettura di Pietra Journal», 9 Dicembre 2009. Disponibile presso: <http://www.architetturadi Pietra.it/wp/?p=3503> (ultimo accesso: Novembre 2017).

R. E. Smith, History of Prefabrication: A Cultural Survey. In *Proceedings of the Third International Congress on Construction History*, 2009.

R. E. Smith, *Prefab architecture: A guide to modular design and construction*, John Wiley & Sons, New York, 2011.

K. C. Stevenson,, H. W. Jandl, *Houses by mail: A guide to houses from Sears, Roebuck and Company*, John Wiley & Sons, New York, 1986.

C. G. Strandlund, *Architectural panel construction*(brevetto n. US 2416240 A), registrato il 2 Settembre 1945, pubblicato il 18 Febbraio 1947. Disponibile presso: <https://www.google.com/patents/US2416240> (ultimo accesso: Novembre 2017).

M. Swackhamer, “Some Assembly Required: Contemporary Prefabricated Houses-Edited by Andrew Blauvelt”, *Journal of Architectural Education*, 60(2), 2006.

G. Trippa, Il valore di una architettura consapevole, in G. Minguzzi (a cura di), *Architettura sostenibile: Una scelta responsabile per uno sviluppo equilibrato*, Skira, Milano, 2008.

K. L. Wachsmann, W. Gropius, *Prefabricated building* (brevetto n. US 2355192 A), depositato il 30 Maggio 1942, pubblicato l'8 Agosto 1944. Disponibile presso: <https://www.google.it/patents/US2355192> (ultimo accesso: Novembre 2017).

WoodLab, "Biosphera 2.0", 2016. Disponibile presso: <http://www.biosphera2.it/> (ultimo accesso: Novembre 2017).

S. Zerbi, La pietra "pretagliata" e la ricostruzione in Francia dopo la Seconda Guerra Mondiale. In «Architettura di Pietra Journal», 22 Gennaio 2010. Disponibile presso: <http://www.architetturadi Pietra.it/wp/?p=3711> (ultimo accesso: Novembre 2017).

Capitolo 5

L. Alini, (a cura di), *Cupole per abitare. Un omaggio a Fabrizio Carola*, Libellula Edizioni, Tricase (LE), 2012.

F. Carola, *Vivendo, pensando, facendo...memorie di un architetto*, Intra Moenia, Napoli, 2005.

G. K. Dosier, *Methods for making construction material using enzyme producing bacteria* (brevetto n. US 8728365 B2), 2011. Disponibile presso: <https://www.google.com/patents/US8728365> (ultimo accesso: Febbraio 2016)

R. B. Fuller, *Building construction* (brevetto n. US2682235 A), 1954. Disponibile presso: <https://www.google.com/patents/US2682235> (ultimo accesso: Maggio 2016)

L. Kahn, *Domebook*, Pacific Domes, 1970.

L. Kahn, *Domebook 2*, Pacific Domes, 1971.

M. Larsson, *Dune: Arenaceous Anti-Desertification Architecture*. In V. Badescu, R. B. Cathcart, (a cura di), *Macro-engineering Seawater in Unique Environments. Arid Lowlands and Water Bodies Rehabilitation*. Springer, Berlin, 2011.

S. Mecca, L. Dipasquale (a cura di), *Earthen Domes and Habitats*, Edizioni ETS, Pisa, 2009.

Capitolo 8

G. Fallacara, M. Stigliano, Solar Natural House. In *Architettura di Pietra Journal*, 2014.

Capitolo 9

M. Blanchet, T. Rinn, G. Von Thaden, G. DeThieulloy (a cura di), *Industry 4.0: The new industrial revolution-How Europe will succeed*, Monaco di Baviera, Roland Berger Strategy Consultants GmbH, 2014.

R. A. Buswell, R. C. Soar, A. G. F. Gibb, A. Thorpe, *Freeform Construction Application Research*, Springer, Dordrecht, 2006.

S. M. Davis, M. Sciacchitano, *Futuro perfetto*, Edizioni di Comunità, Milano, 1988.

DIN e. V., DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE (a cura di), *GERMAN STANDARDIZATION ROADMAP: Industry 4.0 (version 2)*, Berlino-Francoforte, DIN e. V., DKE, 2016. <https://www.din.de/blob/65354/f5252239daa596d8c4d1f24b40e4486d/roadmap-i4-0-e-data.pdf> (ultimo accesso: Ottobre 2017).

E. Dini, R. Nannini, M. Chiarugi, *Method and device for building automatically conglomerate structures*, brevetto n. CA 2602071 A1, registrato il 16 Marzo 2006, pubblicato il 28 Settembre 2006.

Domus, *Quake Column*, 2014. Disponibile presso: https://www.domusweb.it/it/notizie/2014/10/20/quake_column.html (ultimo accesso: Ottobre 2017).

Domus, *XtreeE Pavilion: biomimetica e additiva, è l'architettura del futuro*, 2016. Disponibile presso: <http://specials.domusweb.it/it/innovation-it/xtreee-pavilion-e-larchitettura-del-futuro/> (ultimo accesso: Ottobre 2017).

DUS Architects, "Manifesto". Disponibile presso: <http://houseofdus.com/#section-manifesto> (ultimo accesso: Ottobre 2017).

Emerging Objects, "Quake Column", 2014. Disponibile presso: <http://www.emergingobjects.com/project/quake-column/> (ultimo accesso: Ottobre 2017).

Fab Lab House, "Home", 2010. Disponibile presso: <http://www.fablabhouse.com/en> (ultimo accesso: Ottobre 2017).

F. Gallanti, *Fab Lab House. I raggi del sole curvano: un prototipo di casa auto-sufficiente realizzato dagli studenti di IAAC e MIT*. Disponibile presso: <http://www.abitare.it/it/design/2011/01/31/fab-lab-house/> (ultimo accesso: Ottobre 2017).

I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies*

(2nd edition), New York, NY, USA, Springer, 2015.

D. Giusto, A. Iera, G. Morabito, L. Atzori, (a cura di). *The Internet of Things*, Springer, 2010.

N. Hack, W. V. Lauer, F. Gramazio, M. Kohler, “Mesh Mould: Robotically Fabricated Metal Meshes as Concrete Formwork and Reinforcement”. In *Proceedings of the 11th International Symposium on Ferrocement and 3rd ICTRC International Conference on Textile Reinforced Concrete*, 2015.

M. Hermann, T. Pentek, & B. Otto, Design principles for industrie 4.0 scenarios. A literature review. In *System Sciences (HICSS), 2016 49th Hawaii International Conference on* (pp. 3928-3937), IEEE, 2016.

IAAC, “Minibuilders”, 2014. Disponibile presso: <http://robots.iaac.net/> (ultimo accesso: Ottobre 2017).

H. Kagermann, W. Lukas, W. Wahlster, *Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution*. Disponibile presso: <http://www.vdi-nachrichten.com/Technik-Gesellschaft/Industrie-40-Mit-Internet-Dinge-Weg-4-industriellen-Revolution> (ultimo accesso: Settembre 2017).

H. Kagermann, W. Wahlster, J. Helbig (a cura di), Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0: *Final report of the Industrie 4.0 Working Group*, 2013.

B. Kolarevic (a cura di), *Architecture in the digital age: design and manufacturing*, Abingdon-on-Thames, UK, Taylor & Francis, 2004.

B. Kolarevic, From Mass Customisation to Design ‘Democratisation’, *Architectural Design*, 85(6), 48-53, 2015.

J. Lampel, H. Mintzberg, Customizing customization, *Sloan management review*, 38(1), 21, 1996.

Le Corbusier, *L’urbanistica*, Il saggiatore, Milano, 2011.

Le Corbusier, *Verso una Architettura*, Longanesi, Milano, 2003.

T. Maescher, *The Archipreneur Concept*, Archipreneur, 2016.

A. Magone, T. Mazali, (a cura di). *Industria 4.0. Uomini e macchine nella fabbrica digitale*. Edizioni Guerini e Associati SpA, Milano, 2016.

A. Menges e S. Ahlquist (a cura di), *Computational Design Thinking* (AD Reader), Wiley, Londra, 2011.

A. Menges, The New Cyber-Physical Making in Architecture: Computational Construction, *Architectural Design* 85 (5), 2015, p. 31.

R. Naboni, I. Paoletti, *Advanced Customization in Architectural Design and Construction*, Springer, Milano, 2015.

I. Paoletti, *Costruire le forme complesse: Innovazione, industrializzazione e trasferimento per il progetto di architettura*, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna, 2010..

I. Paoletti, “Mass Customization in the Era of Industry 4.0: Towards Immaterial Building Technology.” *Informed Architecture*. Springer, Cham, 2018.

Plattform Industrie 4.0., 2014: Industrie 4.0 - White paper FuE Themen. Disponibile presso: http://www.plattform-i40.de/sites/default/files/Whitepaper_Forschung%20Stand%203.%20April%202014_0.pdf (ultimo accesso: Settembre 2017).

K. Terzidis, *Algorithmic Architecture*, Architectural Press, Oxford, 2006.

The National Centre of Competence in Research (NCCR) Digital Fabrication, *Building with Robots and 3D Printers: Construction of the DFAB HOUSE Up and Running*, 2017. Disponibile presso: <http://www.dfab.ch/achievements/building-with-robots-and-3d-printers-construction-of-the-dfab-house-up-and-running/> (ultimo accesso: Ottobre 2017).

M. M. Tseng, J. Jiao, Mass Customization. In G. Salvendy, *Handbook of Industrial Engineering: Technology and Operations Management*, Third Edition, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, U.S.A., 2001.

WASP, “Maker Economy Starter Kit”, 2016. Disponibile presso: <http://www.wasproject.it/w/progetti-stampanti-3d/maker-economy-starter-kit/> (ultimo accesso: Ottobre 2017).

J. Willmann, M. Kohler & F. Gramazio, *The Robotic touch: How robots change architecture*, Zurigo, Park Books, 2014.

WikiHouse, “Library”, 2017. Disponibile presso: <https://wikihouse.cc/library> (ultimo accesso: Ottobre 2017).

C. W. Hull, *Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography*, brevetto n.US4575330 A, registrato l’8 Agosto 1984, pubblicato l’11 Marzo 1986.

