



Politecnico di Torino

Corso di Laurea magistrale
In Architettura per il progetto sostenibile

Tesi di Laurea magistrale:

**Dalla fabbricazione digitale ai processi di
prefabbricazione del progetto di architettura:**
Analisi degli scenari di innovazione e dei casi studio sperimentali.

Candidato:
Francesco Urban

Relatore:
prof. Guido Callegari

Anno accademico:
2019/2020

Indice

Introduzione.....	7
1 La fabbricazione digitale.....	10
- 1.1 L'importanza della fabbricazione digitale.....	11
- 1.2 Le costruzioni tramite fabbricazione digitale.....	14
- 1.2.1 La classificazione dei processi di stampa 3D.....	16
- 1.3 Casi studio.....	18
- 1.3.1 Fabbricazione digitale in cemento.....	18
- 1.3.1.1 Winsun – Cina.....	20
- 1.3.1.2 Amt-Specavia – Russia.....	22
- 1.3.1.3 Cobod – Danimarca.....	24
- 1.3.1.4 Apis Cor – Stati Uniti d’America.....	26
- 1.3.1.5 SQ4D – Stati Uniti d’America	28
- 1.3.2 Fabbricazione digitale in acciaio.....	30
- 1.3.2.1 MX3D – Olanda	31
- 1.3.3 Fabbricazione digitale in terra e pietra.....	34
- 1.3.3.1 Wasp – Italia	34
- 1.3.3.2 D-Shape – Inghilterra	37
- 1.3.4 Fabbricazione digitale in polimeri.....	41
- 1.3.4.1 Branch – Stati Uniti d’America	41
- 1.3.4.2 Centre for Bits and Atoms – Stati Uniti d’America	44
- 1.4 Comparazione fra i diversi sistemi di fabbricazione digitale	46
2 La prefabbricazione in legno.....	54
- 2.1 Il materiale: compensato.....	57
- 2.1.1 Processo produttivo.....	58
- 2.1.2 Tipologie e classificazioni.....	60
- 2.1.3 Proprietà e caratteristiche del compensato.....	64
- 2.2 Lo strumento: le macchine CNC.....	66
- 2.2.1 Funzionamento.....	66
- 2.2.2 Tipologie di macchine.....	68
- 2.2.3 Caratteristiche e problematiche delle lavorazioni a controllo numerico.....	70

3 La metodologia DfMA.....	72
- 3.1 La produzione di edifici.....	72
- 3.2 Il sistema DfMA.....	73
- 3.3 Principi della prefabbricazione DfMA.....	76
- 3.4 L'evoluzione in DfDMA.....	80
- 3.5 Tipologie di prefabbricazione e casi studio.....	80
4 I casi studio.....	82
- 4.1 WikiHouse.....	83
- 2nd Whalley Range Scout Hut, Petit Place, Huaxia Star Library, The Gantry at HereEast Studios, Farmhouse.....	99
- 4.2 Facit Homes.....	104
- Villa asserbo, Clelia and Diana homes, Henry & Christine, Graven Hill, Kolonihavehus Kastруп.....	112
- 4.3 U-Build.....	117
- Boar lane studios, Box House, Garden studios, Mill Lane, Internal living pods.....	125
- 4.4 Instant House.....	130
- Instant cabin, Housing for New Orleans.....	137
- 4.5 Click-Raft.....	139
- Chiu House, Callaghan c20 lab pod, CR launch, Progetto scuola kindergaten, Padiglioni mostra.....	146
- 4.6 BURST.....	151
- BURST*003, BURST*008.....	156
Conclusion.....	158
Bibliografia.....	160
Sitografia.....	161

Introduzione

Nel corso dell'ultimo decennio la rivoluzione digitale che ha già colpito molti settori industriali ha iniziato a interessare anche il settore delle costruzioni. L'introduzione del digitale promette di stravolgere gli attuali metodi costruttivi di eredità novecentesca, con un lento ma profondo cambiamento. Il grande pregio di questi nuovi sistemi produttivi digitali è la possibilità di avere un controllo totale sull'intero processo di produzione e costruzione, oltre che sulla progettazione. In questo modo promettono di aumentare al massimo l'efficienza dei processi costruttivi, ottimizzando l'uso delle risorse: materiali, economiche e di tempo. Tutto questo senza rinunciare in alcun modo alla libertà formale ed alla massima personalizzazione. In virtù di ciò la fabbricazione digitale sta lentamente attirando a sé le attenzioni di molti: centri di ricerca, start-up e aziende. Tuttavia, nonostante questi grandi pregi la diffusione della fabbricazione digitale sta ancora trovando delle resistenze.

Il primo obiettivo di questa tesi è dunque quello di cercare di comprendere quali siano questi ostacoli e quale sia la loro natura: tecnica, normativa, o economica. A partire da questa analisi si proverà dunque ad individuare in che modo la fabbricazione digitale possa oggi, nel breve termine, essere impiegata su larga scala, superando almeno in parte gli ostacoli individuati.

Per cercare di raggiungere questi obiettivi si è partiti da uno studio della fabbricazione digitale e di come questa si sia evoluta, al fine d'inquadrare al meglio i casi studio. Si è poi passati all'analisi di tutti quelli che sono i maggiori sistemi di fabbricazione digitale attualmente utilizzati. L'attenzione è stata posta principalmente sui sistemi che sono più vicini a farsi spazio sul mercato, verranno dunque solo citati tutti quei sistemi che, per quanto promettenti e innovativi, sono ancora in fase di ricerca, in accordo con l'obiettivo di trovare un sistema che fin da subito permetta di portare la fabbricazione digitale nel mercato delle costruzioni. Inoltre, ci si è concentrati principalmente sui sistemi che cercano di sviluppare dei processi produttivi nuovi, capaci di sfruttare le potenzialità della fabbricazione digitale più di quanto possano fare al momento i sistemi basati sull'automatizzazione dei processi costruttivi più comuni. Un passaggio fondamentale della tesi è stata l'analisi ed il confronto tra questi sistemi. Uno degli scopi della tesi è, infatti, anche il tentativo di dare un contesto, il più ampio possibile, approfondendo dunque sistemi costruttivi, molto vari tra loro e che usano materiali diversi. Solo in questo modo, infatti, si è ritenuto possibile andare oltre a quelli che sono i limiti dei singoli sistemi ed individuare quelli che sono i veri limiti della fabbricazione digitale.

Tra tutti i materiali affrontati la tesi dedica un approfondimento maggiore ai sistemi di fabbricazione digitale in legno, che rappresentano, in questo contesto, un caso unico in ragione delle caratteristiche proprie del materiale. Caratteristiche che sembrano indicare questo materiale, in particolare nella forma del compensato, come quello, al momento più adatto, per adottare la fabbricazione digitale. Anche in risposta ad una normativa spesso carente nel definire la possibile applicazione della fabbricazione digitale.

Si è quindi ritenuto necessario approfondire quelli che sono gli strumenti che rendono possibile e che stanno alla base della fabbricazione digitale in compensato, ovvero: il materiale e i macchinari a controllo numerico.

Inoltre, visto l'obiettivo di questa tesi di focalizzarsi sui sistemi già pronti per il mercato delle costruzioni e quindi capaci di venire incontro alle esigenze di questo. Si perciò ritenuto utile non trascurare le questioni aziendali ed industriali legate al mercato, poiché queste stabiliscono quali caratteristiche debba avere un'azienda che si occupa di fabbricazione digitale, e definiscono in parte anche le caratteristiche tecniche che i sistemi costruttivi dovranno avere. Si è dedicato dunque un

approfondimento all'approccio DfMA adottato già da molte delle start-up e aziende che si occupano di fabbricazione digitale in legno. Questa metodologia, infatti, traendo spunto da altri settori come quello dell'auto e degli arredi, fornisce delle linee guida essenziali da seguire qualora ci sia il desiderio, come nel caso della fabbricazione digitale, di progettare e ottimizzare anche il processo costruttivo, svincolato dal prodotto.

La tesi si pone infine l'obiettivo di analizzare i sistemi costruttivi a base di compensato che già usano la fabbricazione digitale, e che si stanno ritagliando la loro nicchia nel mercato delle costruzioni. Questi sistemi rappresentano un ottimo esempio di quella che può essere la via da seguire qualora s'intenda diffondere, fin da subito, la fabbricazione digitale nel mondo delle costruzioni.

1 La fabbricazione digitale

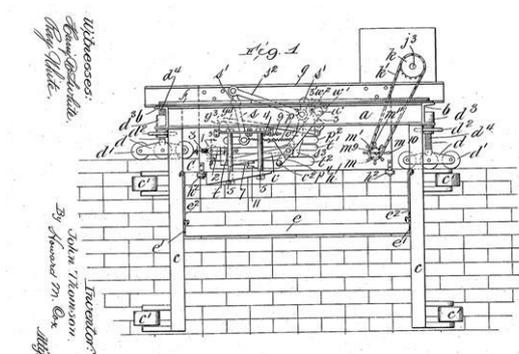
Il termine fabbricazione digitale fa riferimento ad un processo di produzione basato sull'utilizzo del digitale, in cui la produzione, la gestione e il trasferimento di tutte le informazioni necessarie alla produzione, così come l'esecuzione finale viene svolta tramite l'utilizzo di computer. Questo processo permette di creare oggetti solidi, bi o tridimensionali, con una grande libertà formale e dimensionale utilizzando materiali di ogni tipo.

Per quanto nell'accezione comune la fabbricazione digitale venga spesso associata alle moderne stampanti 3D, in realtà queste rappresentano solo una piccola parte dell'ecosistema digitale alla base di questa nuova rivoluzione industriale. La fabbricazione digitale si appoggia ad un ampio gruppo di tecnologie: produttive, sia additive che sottrattive, progettuali, CAD, e gestionali, elettronica integrata e alla rete di comunità FabLab e di tecnologie open source. Come afferma Neil Gershenfeld, direttore del Centre for Bits and Atoms all'MIT di Boston, "l'attenzione nei confronti della stampa 3D è un po' come l'attenzione sviluppata negli anni '50 per i forni a microonde. I microonde sono utili, ma non hanno rimpiazzato il resto della cucina. La cucina è più di un forno a microonde".¹

La fabbricazione digitale è già ampiamente adottata nell'industria sia per la creazione rapida di prototipi che per la creazione di prodotti finiti e utilizza tecniche diversi di fabbricazione sia additive sia sottrattive come: la stampa 3D, il taglio laser e la fresatura CNC. La sperimentazione tuttavia sta ancora proseguendo e la vera rivoluzione, secondo Gershenfeld, si avrà solo quando la parte digitale non sarà più limitata al solo processo produttivo, ma anche gli stessi materiali utilizzati saranno digitali e programmabili. "Il futuro è trasformare data in oggetti, ma non è additivo o sottrattivo".²

L'interesse per l'automatizzazione dei processi costruttivi è nato già prima dello sviluppo dei computer, con l'onda lunga della seconda rivoluzione industriale. La prima macchina per depositare mattoni è stata brevettata nel 1904 da John Thomson.³ La ricerca di un processo di produzione digitale, che utilizza macchinari controllati dal computer, è iniziata, a livello teorico, non appena si è riusciti a produrre il primo macchinario a controllo numerico nel 1952. La sperimentazione di macchinari per la posa automatica di mattoni è rifiorita attorno agli anni '60. L'esempio migliore è quello del Motor Mason, documentata in un filmato della British Pathé.⁴

A Destra: dimostrazione della Motor Mason, tratta da British Pathé. Sotto il brevetto di J.Thomson, tratto dal U.S. patent office.

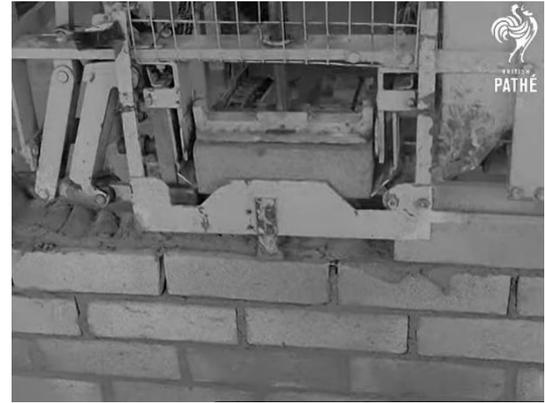


¹ Gershenfeld Neil, *How to make almost anything: the digital fabrication revolution*, in "Foreign Affairs", novembre/dicembre 2012, volume 91 numero 6, pag.44

² Gershenfeld Neil, *Ibidem*

³ Articolo sulla storia dei macchinari per la posa dei mattoni sul sito: www.theb1m.com/video/a-short-history-of-bricklaying-robots

⁴ Video di British Pathé sul sito: www.youtube.com/watch?v=4MWald1Goqk



Sopra e a lato: immagini del processo di posa dei mattoni effettuato da Motor Mason, da British Pathé

Il macchinario, muovendosi parallelo al muro, posava autonomamente sia i mattoni sia la calce, tuttavia richiedeva tre operai per poter funzionare: un operaio qualificato, per controllare la qualità dell'opera, e due operai comuni, che caricassero in continuazione i materiali sul macchinario. L'efficienza del macchinario non era perciò eccezionale, nonostante promettesse di posare i mattoni cinque o dieci volte più veloce degli operai, e per questo non ebbe successo.⁵ Si parla però di macchinari solamente automatizzati e non ancora digitalizzati. Si dovrà infatti attendere lo sviluppo dei computer e la digitalizzazione delle comunicazioni, con la diffusione del computer aided design, CAD, per arrivare ad una vera e propria produzione digitale. Nel giro di poco più di cinquant'anni si è dunque passati dalla prima macchina controllata digitalmente ad aziende capaci di produrre prototipi in massa, fino allo sviluppo dei FabLab di comunità, laboratori, dove la fabbricazione digitale è resa accessibile a tutti per l'auto fabbricazione di beni personali. A partire dal 2025, si prevede la grande crescita dei fabbricatori personali consentiranno di portare, nelle case di tutti, la fabbricazione personale. Un obiettivo facilmente raggiungibile se si pensa ai costi sempre più contenuti e al grande impegno messo nel semplificare al massimo l'uso dei macchinari e dei software di progettazione, oltretutto dallo sviluppo di diverse comunità in cui si condividono conoscenze e progetti open source.

1.1 L'importanza della fabbricazione digitale

L'interesse sulla fabbricazione digitale è aumentato fortemente negli ultimi dieci anni in relazione alla sempre maggiore attenzione posta su quella che molti ritengono la quarta rivoluzione industriale, ovvero sull'industria 4.0, che si basa sull'utilizzo di sensori e macchinari connessi tra loro e, nello specifico, sulle tecniche di produzione più tecnologicamente avanzate, advanced manufacturing.

Per quanto il significato di advanced manufacturing differisca a seconda dei tempi e del settore produttivo a cui si riferisce, si può cercare di definirla come l'uso delle tecnologie più avanzate al fine di migliorare i prodotti e l'intero processo produttivo, fino ad arrivare a comprendere, in alcune definizioni, anche le nuove metodologie di gestione dell'impresa. Volendo darne una definizione il più comprensiva possibile si possono citare le parole di Paul Fowler del National

⁵Articolo sulla storia dei macchinari per la posa dei mattoni sul sito: www.theb1m.com/video/a-short-history-of-bricklaying-robots

Council for Advanced Manufacturing “l’advanced manufacturing fa un uso estensivo del computer, dell’alta precisione e delle tecnologie d’informazione integrate con un sistema ad alte performance in modo da ottenere un sistema capace di produrre un mix eterogeneo di prodotti sia in grandi che in piccole quantità, unendo l’efficienza della produzione su larga scala e la flessibilità delle fabbricazioni su misura allo scopo di rispondere velocemente ai desideri dei clienti”.⁶ Per raggiungere questo scopo vengono applicate diverse tecnologie moderne tra cui: la prototipizzazione rapida, che si basa sui processi di stampa 3D, l’uso industriale dell’internet of things, e sistemi avanzati di automatizzazione e di robotica per la fabbricazione, con metodi di controllo ad alta precisione.

La discussione sulla fabbricazione digitale viene spesso collegata a tre problematiche ad essa connesse e molto sentite in quanto di valenza sociale e sono quella del lavoro, della proprietà intellettuale e della fabbricazione di oggetti pericolosi. Queste problematiche tuttavia non stanno limitando in alcun modo la diffusione delle macchine per la fabbricazione, che anzi aumenta sempre più. Infatti, il progressivo sviluppo della tecnologia, l’interesse generato dai FabLab e l’adozione di queste tecnologie da parte dell’industria fa sì che sempre più modelli vengano messi sul mercato a prezzi sempre più accessibili. La fabbricazione digitale si sta anche espandendo nel mondo dell’architettura, grazie soprattutto alla facilità con cui questa può essere utilizzata per realizzare forme e volumi dalla geometria complessa. Negli ultimi anni si è dunque assistito da un lato all’appropriazione, da parte dell’industria delle costruzioni, di tutta una serie di processi di produzione digitale, inizialmente pensati per altri ambiti, e dall’altro allo sviluppo di nuovi strumenti software capaci di rendere la programmazione dei macchinari digitali più semplice e intuitiva.

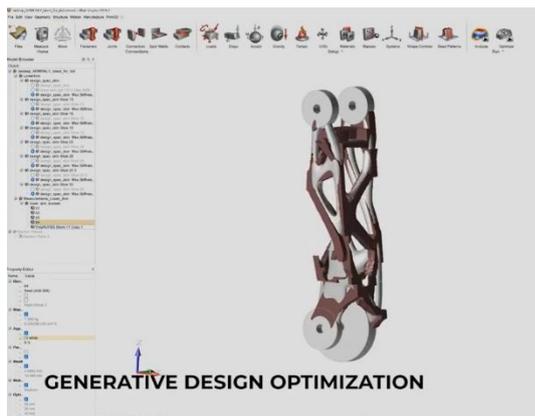
Inoltre, al di là di queste ipotetiche ricadute negative, la fabbricazione digitale porta anche numerosi benefici innegabili dal punto di vista strettamente progettuale e costruttivo. Infatti, è solo grazie ai nuovi processi costruttivi, resi possibili dall’uso di macchinari digitali, e al passaggio di informazioni, libero da interpretazioni o semplificazioni, tra il file di progetto e il macchinario che realizzerà l’elemento o l’intero edificio che è oggi possibile sfruttare appieno le potenzialità del digitale nella progettazione.

Innanzitutto, questi nuovi strumenti consentono di realizzare elementi e edifici con forme libere e complesse in modo molto più accessibile, con una facilità ed un’economia di risorse e di tempi difficilmente ottenibile coi tradizionali sistemi di fabbricazione. La fabbricazione digitale, grazie alla sua precisione e alla possibilità di eseguire movimenti più complessi, rende concreta e più accessibile la produzione e commercializzazione di questo tipo di elementi personalizzati e complessi sempre più frequenti nelle architetture moderne. Un esempio possono essere i pannelli dell’azienda FreeFab prodotti a partire da stampi in cera modellati da macchinari digitali, permettendo la più totale libertà formale, dimostrata dai pannelli a doppia curvatura della London Crossrail.

Un ulteriore sviluppo della progettazione reso possibile dalla fabbricazione digitale è il responsive design, un particolare metodo di progettazione parametrica capace di rendere i prodotti su misura. In particolare, il processo progettuale del responsive design prevede la progettazione di un oggetto base definito da dei parametri o algoritmi posti in relazione con caratteristiche fisiche reali. Al momento della produzione dunque i sensori posti sui macchinari digitali analizzano in tempo reale il mondo fisico circostante e di conseguenza ricalibrano i parametri di progetto.⁷

⁶ Voce “advanced manufacturing” sul sito: en.wikipedia.org/wiki/Advanced_manufacturing

⁷ Voce “responsive computer-aided design” sul sito: en.wikipedia.org/wiki/Responsive_computer-aided_design



Sopra: l'esempio della schermata di un software di generative design



A lato in alto: un'immagine delle fasi di costruzione della London Crossrail

A lato: lo schema del processo di fabbricazione dei pannelli FreeFab Wax, tratto dal sito dell'azienda



Infine, la fabbricazione digitale, specie se eseguita tramite processi additivi, consente di rendere concreti gli elementi progettati tramite un processo di generative design. Questo è un nuovo metodo di progettazione, fortemente automatizzato, che definisce la forma di un elemento a partire dalle forze e sollecitazioni a cui questo sarà sottoposto.⁸ Il generative design mira dunque a massimizzare l'efficienza del materiale utilizzato, ovvero di raggiungere resistenze elevate riducendo il più possibile la quantità di materiale, diminuendo così di molto il peso dell'elemento e, nel caso di fabbricazioni additive, i tempi e i costi di produzione. Il generative design è quindi un ottimo esempio di automatizzazione del processo progettuale, che non sarebbe traducibile in concreto senza l'uso di processi produttivi digitali, gli unici in grado di fabbricare elementi di una tale complessità con grande precisione e velocità di lavorazione. Nonostante il grande potenziale l'uso del generative design in architettura è limitato perché fa dipendere la forma di un elemento da considerazioni quasi esclusivamente strutturali. Attualmente dunque questo processo è utilizzato solo per realizzare elementi strutturali, come ad esempio i connettori strutturali in acciaio prodotti su misura da MX3D.

⁸ Articolo "Pensate che il design generativo sia un po' troppo acclamato? Questi esempi potrebbero farvi cambiare idea" di Scott Reese del 29/01/2019 sul sito: www.autodesk.it/redshift/design-generativo/

1.2 Le costruzioni tramite fabbricazione digitale

Poiché il mondo delle costruzioni rappresenta una delle maggiori industrie globali, ed è caratterizzata da una grande richiesta di lavoro manuale specializzato, numerose aziende si sono dimostrate interessate alle potenzialità della fabbricazione digitale nell'ambito delle costruzioni. I progetti precedentemente adottati in altri campi, soprattutto nella prototipizzazione veloce, stanno quindi venendo estesi e adattati per essere utilizzati alla scala dell'edificio. In questo modo si vuole ridurre notevolmente i tempi e i costi di costruzione senza intaccare in alcun modo la qualità costruttiva o la libertà formale.

Nell'applicare la fabbricazione digitale alla costruzione si possono adottare due approcci differenti. Il primo si basa sull'utilizzo dei macchinari a controllo numerico e di robot al fine d'automatizzare i processi costruttivi già comunemente adoperati, come nel caso della posa automatica dei mattoni. Il secondo invece, a partire dai nuovi macchinari digitali, mira a sviluppare un nuovo processo costruttivo in cui l'edificio viene stampato nella sua interezza, eliminando perciò ogni fase di assemblaggio, come ad esempio nella stampa 3D di edifici.

I comuni processi costruttivi, basati sull'assemblaggio e la posa di elementi singoli, vengono dunque trasformati adottando strumenti digitali che modificano sia la produzione degli elementi sia come questi vengono assemblati. Questa trasformazione è stata resa possibile grazie alle conoscenze sviluppate negli anni dalle aziende produttrici dei nuovi macchinari per la fabbricazione digitale, e che hanno cercato di sviluppare macchine di dimensioni sempre più grandi in grado di stampare elementi sempre più grandi, fino alla scala dell'edificio. In molti casi la fabbricazione digitale di edifici si limita dunque alla semplice prefabbricazione eseguita in azienda tramite macchinari digitali. Questa viene eseguita a varie scale, da quella del singolo componente, ad esempio i mattoni prodotti da Emerging Object, fino ad interi edifici. Tuttavia, per quanto tecnicamente possibile, la stampa in fabbrica d'interi edifici viene in molti casi evitata a causa dei trasporti di dimensioni eccezionali, che si dovrebbero effettuare. La portata della possibile rivoluzione della fabbricazione digitale, attuata in questo modo, è dunque castrata e limitata alla sola prefabbricazione di parti o moduli di edificio, che per quanto completi richiedono sempre un assemblaggio tradizionale e analogico in sito.

A lato: macchinario per la posa di mattoni Hadrian X, sviluppato da Fastbrick robotics

Sotto: uno dei mattoni stampati in 3D da Emerging Object, capaci di raffreddare gli ambienti





Sopra: il robot per la posa dei mattoni SAM100 di Construction robotics

A lato: Il robot studiato dal ETH di Zurigo

Contemporaneamente, negli ultimi anni si stanno sperimentando anche tecnologie in grado d'automatizzare l'assemblaggio degli elementi. In particolare, si stanno sviluppando sistemi in grado di effettuare autonomamente la posa di mattoni, come i robot studiati da Fastbrick robotics e Construction robotics. In questi casi si utilizzano in gran numero di piccoli robot basilari e con pochi gradi di libertà, perciò facilmente programmabili, capaci di svolgere assemblaggi modulari e di lavorare in parallelo. Si stanno sperimentando sia robot terrestri che volanti, ma non sono ancora mai stati impiegati per realizzare strutture funzionali su larga scala e non trovano un riscontro in ambito commerciale. Esistono inoltre anche sperimentazioni, come quella effettuata dal ETH di Zurigo,⁹ che si basano sull'utilizzo di bracci robotici molto più complessi, con una maggiore gamma di movimento e più gradi di libertà, che richiedono sistemi di controllo più complessi e una più difficile programmazione dei movimenti. Tutti questi sistemi dunque mirano a rendere la costruzione digitale automatizzando i normali processi di costruzione già utilizzati, piuttosto che introducendone dei nuovi. Cercano di ridurre il tempo necessario allo spostamento dei materiali e rendono possibile eseguire movimenti più complessi, non eseguibili manualmente.

Sempre nel contesto dell'automatizzazione dei comuni processi costruttivi è necessario citare i macchinari automatizzati o controllati in remoto capaci di rendere automatizzate e digitali le fasi rilievo, movimentazione della terra ed esecuzione dei lavori di fondazione. Già diffusi per la costruzione di grandi infrastrutture e in via di sperimentazione anche per applicazioni più piccole. La maggior parte delle applicazioni commerciali di questo tipo sono offerte da aziende specializzate operanti nell'industria mineraria, come ad esempio Sandvik e Klemm. Questi sistemi tuttavia non hanno ancora sostituito i tradizionali metodi di costruzioni ma si sono semplicemente affiancati.¹⁰

Dall'altro lato gli approcci che si basano sull'utilizzo delle nuove tecnologie digitali, scalate alla dimensione dell'edificio, definiscono dei nuovi processi costruttivi, capaci in questo caso di cambiare profondamente non solo gli edifici ma anche l'industria. Tra questi la famiglia più importante e numerosa è quella della stampa 3D degli edifici direttamente in sito.

⁹ Portale di alcune delle ricerche eseguite al ETH di Zurigo sul sito: gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/forschung/216.html

¹⁰ Sung-Keun Kim et al, *Construction Robot PathPlanning for Earthwork Operations*, "Journal of Computing in Civil Engineering", volume 17 numero 2, aprile 2003, pp 97–104; Tadashi Kanzaki, *Prospects for Automation and Robotics Revolutionizing Ordinary Construction Systems Through Advanced Information Technology*, atti del XXI International Symposium on Automation and Robotics in Construction, 2004; David A Bradley and Derek W Seward, *The Development, Control and Operation of an Autonomous Robotic Excavator*, "Journal of Intelligent and Robotic Systems", volume 21 numero 1, gennaio 1998, pp 73–97; Rezia M Molfino, Roberto Razzoli and Matteo Zoppi, *Autonomous Drilling Robot for Landslide Monitoring and Consolidation*, Automation in Construction, volume 17 numero 2, gennaio 2008, pp 111–21.

La classificazione dei processi di stampa 3D

Essendo, come detto, le aziende che operano tramite processi di stampa 3D le più numerose può risultare conveniente suddividere questi processi. Questa classificazione può avvenire principalmente secondo tre criteri: il sistema di movimento, la tecnologia utilizzata per la stampa, e il materiale stampato.

La prima distinzione riguarda il metodo utilizzato per spostare l'estrusore attraverso l'area di stampa. I metodi più comuni sono quello a traliccio e quello a robot. Tra questi il primo consente di avere una maggiore area di stampa, anche più del doppio di quella dei robot, che arrivano ad un raggio massimo di 4,6m, con un angolo di soli 330 gradi. Perciò nel caso si adoperino dei bracci robotici, questi andranno spostati più volte e l'edificio non potrà essere stampato in un'unica sessione, i sistemi robot sono però più facilmente spostabili e installabili in cantiere. Inoltre, per quanto le stampanti a bracci robotici, in virtù dei loro sei gradi di libertà, possono effettuare movimenti molto più complessi queste sono molto più difficili da programmare. Il grande pregio dei sistemi a traliccio rispetto ai robot è la possibilità di controllare il flusso di materiale più facilmente e con più precisione. Una caratteristica fondamentale perché permette d'interrompere il getto in corrispondenza delle aperture, o di ridurlo in modo da evitare un eccessivo deposito di materiale nei punti in cui la stampante rallenta, ad esempio gli angoli, che andrebbe rimosso a mano. Infine, le stampanti a traliccio permettono di utilizzare aggregati di diametro maggiore. Nonostante sia utilizzato molto poco per stampare edifici, per completezza si cita anche il sistema delta, utilizzato principalmente dall'azienda italiana Wasp, e accumulabile al sistema a traliccio.



A lato: La stampante a traliccio sviluppata da SQ4D

In basso a sinistra: Il sistema a Robot utilizzato da Apis cor

Sotto: La stampante di tipo delta di Wasp, alta 12m



La caratteristica chiave nel definire una stampante 3D è però la tecnologia utilizzata. Le aziende infatti non sono ancora confluite verso una metodologia di produzione comune, ma la sperimentazione è ancora aperta e si stanno esplorando diverse strade, soprattutto in relazione al materiale che s'intende utilizzare. Il sistema principale è l'estrusione di un materiale pastoso, che può essere a base di cemento, terra, polimeri, o cera, simile alla stampa FDM. In particolare, è utilizzato per stampare edifici di cemento in 3D, tramite l'estrusione continua di un sottile getto di calcestruzzo, che viene depositato strato su strato. Si possono però anche trovare sistemi particolari che combinano delle sabbie speciali con dei leganti liquidi, in un processo di stampa comunemente chiamato binder jetting. Sono sistemi molto più complessi, e perciò meno utilizzati, che richiedono l'utilizzo di due componenti: una polvere, depositata su tutta l'area di stampa, e un liquido reagente, depositato a goccia, solo in corrispondenza degli elementi da costruire. Nel momento in cui il legante entra in contatto con la polvere si sviluppa una reazione chimica che tiene unita la polvere. Poiché questi sistemi si basano solamente sull'utilizzo di polveri e leganti, sono molto studiati con lo scopo di essere utilizzati, in ambito extraterrestre, al fine di costruire edifici lunari a partire dalla regolite, ovvero la polvere lunare. L'ultimo approccio infine è relativo esclusivamente alla fabbricazione additiva di elementi in metallo, ed è la saldatura additiva. Questa tecnologia è molto simile alla tradizionale saldatura a filo, ed è l'unico metodo utilizzabile per stampare elementi in metallo.

Infine, l'ultima distinzione che si può fare tra i sistemi di produzione additiva è il tipo di materiale utilizzato, variabile a seconda delle necessità. Le aziende del settore impiegano principalmente impasti di cemento, con aggregati di diametro fino a 12mm, e in molti casi rinforzati con l'aggiunta di fibre, o in alternativa impasti di terra e paglia. Dal punto di vista materico possono risultare interessanti gli elementi creati tramite i sistemi a polvere. In questo modo si possono infatti produrre edifici in simil pietra, dall'aspetto molto simile alle pietre sedimentarie. Per ultimi, nella fabbricazione in fabbrica, si possono utilizzare materiali metallici.

1.3 Casi studio

Fabbricazione digitale in cemento

Nel nuovo contesto della fabbricazione digitale di edifici, tramite processi additivi, la porzione fortemente maggioritaria è rappresentata dalla fabbricazione digitale in cemento, che si realizza sempre tramite processi di stampa 3D dell'intero edificio oppure di macro-sezioni di questo, o dei singoli componenti. La stampa 3D tramite estrusione di cemento a differenza del getto tradizionale avviene posizionando con precisione l'ugello che, seguendo dei percorsi prestabiliti e controllati digitalmente, deposita, uno dopo l'altro, degli strati di cemento dallo spessore costante, tra i 2 e i 5cm a seconda dell'impasto.

Il grande sviluppo della digital fabrication a base di cemento si è avuto a partire dal 1995 con la brevettazione della prima importante tecnica: il contour crafting, ideato da Behrokh Khoshnevis. Questo metodo consiste nella stampa 3D di due pareti verticali, larghe fino a 5cm, che sono collegate tra loro o da motivi di riempimento, curvi o a nido d'ape, realizzati sempre in cemento e già definiti durante la programmazione del percorso seguito dall'estrusore, oppure da elementi secondari di collegamento, in acciaio o polimeri, inseriti tra gli strati ad un intervallo di circa 30cm orizzontalmente e 10-15cm verticalmente. Questi tuttavia devono ancora essere inseriti manualmente, in quanto l'automatizzazione di questo processo sta ancora venendo sperimentata. Nel caso in cui il collegamento tra le pareti non avvenga tramite l'estrusione in cemento di motivi di riempimento, ma tramite elementi secondari, Una volta completate le pareti verticali, queste vengono completate con un getto manuale di cemento.



*A sinistra: nel muro stampato da Apis Cor si può notare il collegamento tra le pareti effettuato tramite linee curve di cemento
A destra: nel muro stampato da Cobod si possono notare degli elementi secondari di collegamento*

Quest'azione, per quanto sia lontana ed in contrasto con i principi della fabbricazione digitale, è in realtà in molti casi vitale qualora si volesse perseguire questo tipo di costruzioni. In molti paesi infatti i codici di costruzione non prevedono ancora la possibilità di realizzare edifici tramite la sola estrusione del cemento. L'integrazione di un getto di cemento, eseguito in modo più convenzionale, consente dunque di superare la carenza normativa. Una volta gettato l'intero corso, di altezza di 10-15cm, si lascia passare un'ora, in modo che il cemento gettato manualmente inizi a solidificarsi e non causi un'eccessiva pressione laterale sulle pareti, per poi procede alla fabbricazione di un secondo corso.



A lato: si può notare come nell'edificio costruito da AMT-Specavia sia stato necessario inserire un'armatura di acciaio e procedere con un getto integrativo di cemento, effettuato manualmente.

Nonostante sia oggi il metodo più funzionale, il contour crafting presenta anche importanti limitazioni. Non può infatti essere utilizzato nel caso in cui l'edificio presenti sezioni variabili in altezza, si è dunque limitati all'estrusione verticale dell'impronta a terra dell'edificio. Inoltre, poiché il cemento stampato lavora prevalentemente a compressione è sempre necessario inserire manualmente degli architravi in corrispondenza delle aperture. Si stanno perciò sviluppando altri metodi capaci, tra le altre cose di una maggiore integrazione con sistemi automatizzati per la posa dei rinforzi e degli impianti.

La fabbricazione digitale in cemento è oggi il sistema per la stampa 3d di edifici più utilizzato grazie soprattutto alla somiglianza di questo sistema alle più comuni e diffuse strutture prefabbricate in cemento armato. Infatti, Molti dei record, attribuiti ad esempio al più grande edificio stampato in 3d o alla velocità di produzione, non fanno riferimento a edifici stampati in sito ma a edifici creati assemblando parti e macro-sezioni per stampate in azienda. L'esempio principale di questo tipo di produzione è rappresentato dalla azienda cinese Winsun.

Winsun - Cina

L'azienda cinese, che a partire dal 2008 si dedica alla stampa 3D di edifici in cemento rinforzato con fibre di vetro, ha ottenuto nel corso del tempo numerosi importanti risultati. Nel maggio del 2016 hanno inaugurato un edificio per uffici costruito a Dubai. La costruzione è stata realizzata assemblando in sito diciassette moduli di 13x3m, stampati in fabbrica, per un'area totale di circa 250mq.

Winsun sta ora per completare il più grande complesso stampato in 3D composto da sette edifici per un'area totale di cinque mila metri quadri, suddivisi su sette edifici, costruiti da una stampante e nove persone in un anno.

Nelle immagini le fasi di produzione in fabbrica dei moduli, il loro trasporto, l'assemblamento e il risultato finale





WINSUN

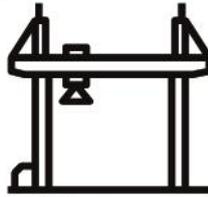
Processo

Dove?



Stabilimento

Come?



Sistema a Traliccio

Dimensioni

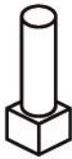
massima

stampa:

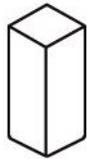


32x10x6,6m.

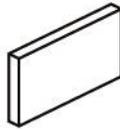
Sistemi e componenti



Fondamenta



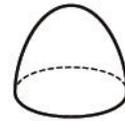
Struttura



Tamponamenti e divisori



Solai

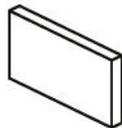


Volte



Livelli di prefabbricazione

Componenti bidimensionali



Assemblaggio:

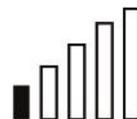


Umido

Cellule tridimensionali



Ingombro in sito:



Basso

Edificio



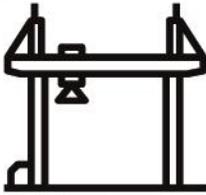
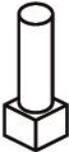
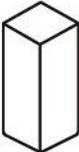
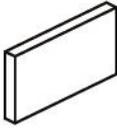
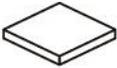
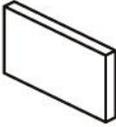
AMT- Specavia - Russia

L'azienda russa è stata la prima a costruire un edificio in Europa sfruttando i processi di stampa 3D del cemento, costruendo tra il 2015 e il 2017, una abitazione, di circa 300mq, a Yaroslavl, vicino Mosca. Tuttavia, anche in questo caso l'edificio è in realtà un assemblamento di elementi stampati in ambiente controllato. Si sono stampati un totale di seicento elementi, depositando strati di cemento standard, spessi 1cm, uno sopra l'altro ad una velocità di 15mq all'ora. Attualmente AMT-Specavia sta sviluppando anche delle stampanti in grado di stampare l'edificio direttamente in sito, e con un'area di stampa di 11,5x11x15m, espandibile per poter costruire edifici multipiano.



Nelle immagini la produzione dei singoli blocchi di cemento, la loro posa in sito assieme all'armatura di rinforzo, e il risultato finale.



Processo	Dove?	 Stabilimento	Come?	 Sistema a Traliccio	Dimensioni massima stampa:  11,5x11x15m					
	Sistemi e componenti	 Fondamenta		 Struttura		 Tamponamenti e divisori		 Solai		 Volte
Livelli di prefabbricazione		Componenti bidimensionali			Assemblaggio:	 Umido				
		Cellule tridimensionali			Ingombro in sito:	 Medio				
		Edificio								

Cobod - Danimarca

Il primo edificio europeo ad essere stato stampato in sito è invece BOD, building on demand, un piccolo ufficio di 50mq costruito per l'authority portuale di Copenhagen, nell'area di Nordhavn. Terminato nel 2018 il piccolo edificio è concepito per mettere in mostra le potenzialità del nuovo sistema costruttivo presenta perciò una forma curvilinea, difficilmente realizzabile altrimenti. Il processo di stampa dell'intero edificio è avvenuto in sito ed è stata utilizzata anche per la produzione delle fondamenta impiegando in totale cinquanta ore. Questo è il primo edificio del suo genere costruito in Europa è stato perciò complicato trovare un compromesso tra i regolamenti costruttivi danesi e la nuova tecnologia. Le autorità hanno richiesto di integrare dei pilastri armati nei muri, i muri di cemento armato sono così stati considerati come dei muri di tamponamento. I muri stampati si sono però dimostrati quattro volte più resistenti di un muro comune.

BOD è stato costruito dall'azienda Cobod che sta attualmente sviluppando la nuova stampante BOD2. Questa nuova stampante, con un sistema a traliccio espandibile a moduli di 2,5m, promette di poter stampare fino a 18m di cemento al minuto. Il nuovo ugello promette inoltre di lasciare superfici più lisce, e di utilizzare aggregati fino ad 1,2cm di diametro.



Nelle immagini la stampa in sito, sotto una copertura temporanea, dell'edificio, e la struttura finita.



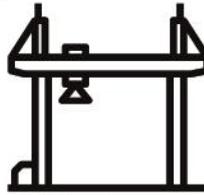
Processo

Dove?



Cantiere

Come?



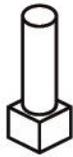
Sistema
a Traliccio

Dimensioni
massima
stampa:

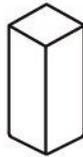


Moduli di 2,5m
max 14,6x50,5x8,1m.

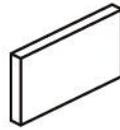
Sistemi e componenti



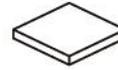
Fondamenta



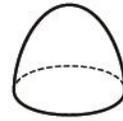
Struttura



Tamponamenti
e divisori



Solai

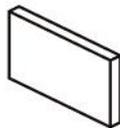


Volte



Livelli di prefabbricazione

Componenti
bidimensionali



Cellule
tridimensionali



Edificio



Assemblaggio:



Umido

Ingombro
in sito:

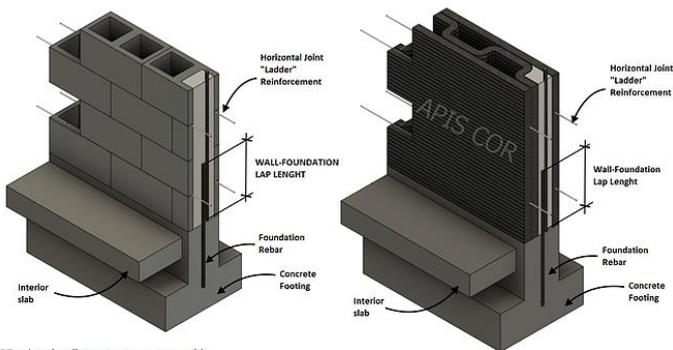


Alto

Apis Cor – Stati Uniti d’America

Il primo risultato importante ottenuto da Apis Cor è stata la stampa, nel 2017, di una casa di 38mq vicino a Mosca in solo 24 ore di lavoro e per soli dieci mila dollari. Tuttavia, il risultato più importante di Apis Cor è l’edificio più grande ad essere stato stampato direttamente in sito. Un edificio amministrativo di due piani, alto 9,5mq e con un’area di 640mq stampato a Dubai. L’edificio è stato stampato, con una mistura a base di gesso, spostando la stampante all’interno del cantiere con una gru. Anche in questo caso tuttavia si è dovuto integrare la costruzione con un getto di cemento armato eseguito in maniera tradizionale e con dei solai prefabbricati. La struttura è dunque comparabile ad un edificio costruito con blocchi di cemento.

Nelle immagini prime due immagini si può vedere il progetto pilota costruito vicino Mosca. Sotto: la costruzione dell’edificio di Dubai e uno schema prodotto da Apis cor per evidenziare le somiglianze strutturali tra il loro sistema e le strutture a blocchi di cemento.



3D printed wall structures as comparable to CMU (masonry units)

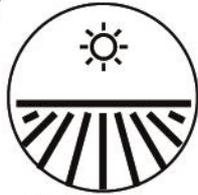
Detail 1.001.005 Version 1

Apis Cor
2019



Processo

Dove?



Cantiere

Come?



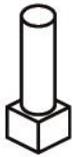
Sistema Robotico

Dimensioni massima stampa:

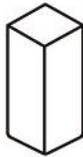


Dim. 4,5m x 1,5m h.

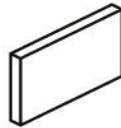
Sistemi e componenti



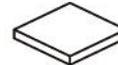
Fondamenta



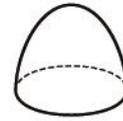
Struttura



Tamponamenti e divisori



Solai

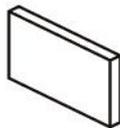


Volte



Livelli di prefabbricazione

Componenti bidimensionali



Cellule tridimensionali



Edificio



Assemblaggio:



Umido

Ingombro in sito:



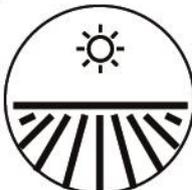
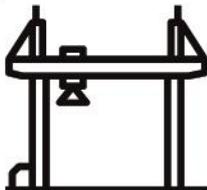
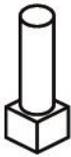
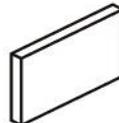
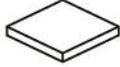
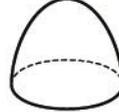
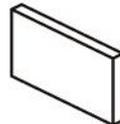
Alto

Sq4d – Stati Uniti d’America

Una delle aziende più all’avanguardia è la statunitense Sq4d, inventrice del sistema ARCS, autonomous robotic construction system. Una stampante a base di calcestruzzo, facilmente trasportabile in cantiere, capace di fabbricare un edificio di 140mq in sole 36 ore di lavoro. La stampante prodotta da Sq4d è inoltre la prima ad avere un’impronta illimitata, con un’area di stampa di 9,1x4,4xinfinito m. Il sistema ARCS è già stato applicato con successo nello stato di New York, a Patchogue, con un’abitazione di 46mq stampata in 12 ore, riducendo i costi di costruzione di circa il 70%. La sperimentazione più importante è però avvenuta a Calverton, dove è stata realizzata un’abitazione di 175mq in soli 8 giorni. Il processo di stampa ha richiesto più di 80 ore e ha riguardato il 41% della costruzione, dalle fondazioni, ai muri esterni ed interni. L’intero processo ha impiegato solo tre persone.

Le prime immagini mostrano la costruzione dell’edificio di Patchogue. Le immagini sottostanti mostrano la costruzione dell’edificio di Calverton.



Processo	Dove?		Cantiere	Come?		Sistema a Traliccio	Dimensioni massima stampa:		9,1x illimitato x4,4m.						
Sistemi e componenti		Fondamenta			Struttura			Tamponamenti e divisori			Solai			Volte	
Livelli di prefabbricazione	Componenti bidimensionali			Assemblaggio:		Umido									
	Cellule tridimensionali			Ingombro in sito:		Alto									
	Edificio														

Fabbricazione digitale in acciaio

La fabbricazione digitale di strutture in acciaio viene eseguita quasi esclusivamente tramite processi di fabbricazione additiva. Infatti, nonostante a livello teorico l'acciaio possa anche essere modellato in modo sottrattivo a partire da blocchi più grandi di materiale utilizzando frese CNC a tre o più assi, questo approccio, applicato al mondo delle costruzioni, è fortemente svantaggioso e avrebbe forti limitazioni dimensionali, oltre ad essere poco sostenibile economicamente ed ambientalmente. Dunque, le sperimentazioni attuali che mirano ad utilizzare l'acciaio nel contesto delle costruzioni digitali si sono rivolti verso processi di fabbricazione additiva che, nel caso dell'acciaio, derivano dai comuni metodi di saldatura.

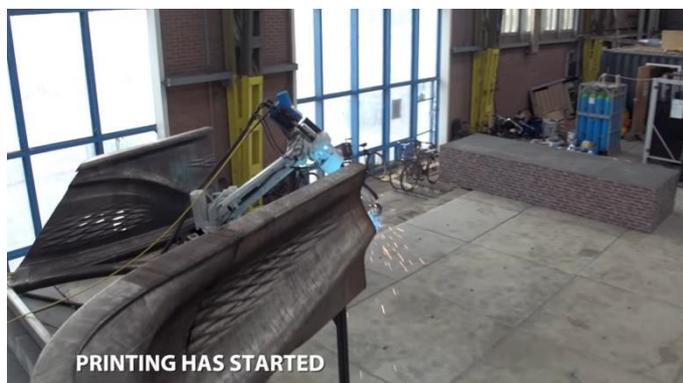
MX3D - Olanda

L'olandese MX3D Metal è la principale azienda ad occuparsi di Digital fabrication in acciaio. Per fare ciò usa un sistema di stampa 3D a bracci robotici WAAM, wire arc additive manufacturing, che effettuano dei punti di saldatura ad arco. Queste saldature sono effettuate in sequenza, una sull'altra, seguendo il percorso elaborato dal computer. Questa addizione di saldature in serie genera la struttura finale. Grazie a questo metodo un solo macchinario può arrivare a depositare fino a 2kg di materiale all'ora. Il sistema a bracci robot utilizzato da MX3D consente di produrre strutture dalla forma complessa e di sfruttare appieno i benefici forniti dal generative design. In questo modo si riduce al massimo la quantità di materiale da stampare riducendo così il tempo necessario alla produzione del modello da stampare, oltre che i costi per il materiale.

Il traguardo maggiore raggiunto dalla fabbricazione digitale in acciaio è stato la costruzione di un ponte, lungo 12,5m e largo 6,3m, posto al di sopra di un canale nel centro di Amsterdam. Questa struttura nata da una collaborazione tra MX3D, Arup, ArcelorMittal e Autodesk al fine di mostrare le potenzialità della tecnologia MX3D e rappresenta la prima costruzione di questo tipo prodotta nel mondo. Il ponte è stato progettato tramite processi di generative design e prefabbricato, nella sua interezza, in azienda. La fase di stampa ha impiegato quattro bracci robotici che hanno lavorato per sei mesi, saldando 4500kg di acciaio.

MX3D inoltre utilizza la sua tecnologia per progettare e produrre connettori strutturali in acciaio altamente adattabili. Lo scopo è quello di facilitare la costruzione, sempre più richiesta, di edifici con sistemi strutturali complessi, e di trovare un'alternativa all'uso di manodopera specializzata, sempre più difficile da reperire. I connettori sono realizzati su misura e in molti casi sono successivamente riempiti con malta. L'azienda vuole inoltre diffondere il più possibile i benefici della stampa 3D di metalli, creando robot sempre più facili da usare o stampando direttamente su richiesta. Ha poi sviluppato il primo software dedicato alla fabbricazione di questo tipo e che sfrutta i principi del generative design.

*A destra l'esempio del processo di stampa utilizzato
Sotto: L'inizio della stampa in fabbrica del ponte*

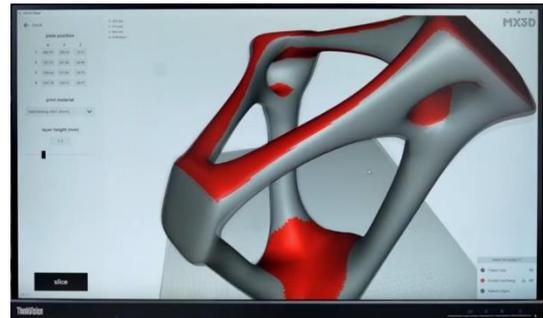




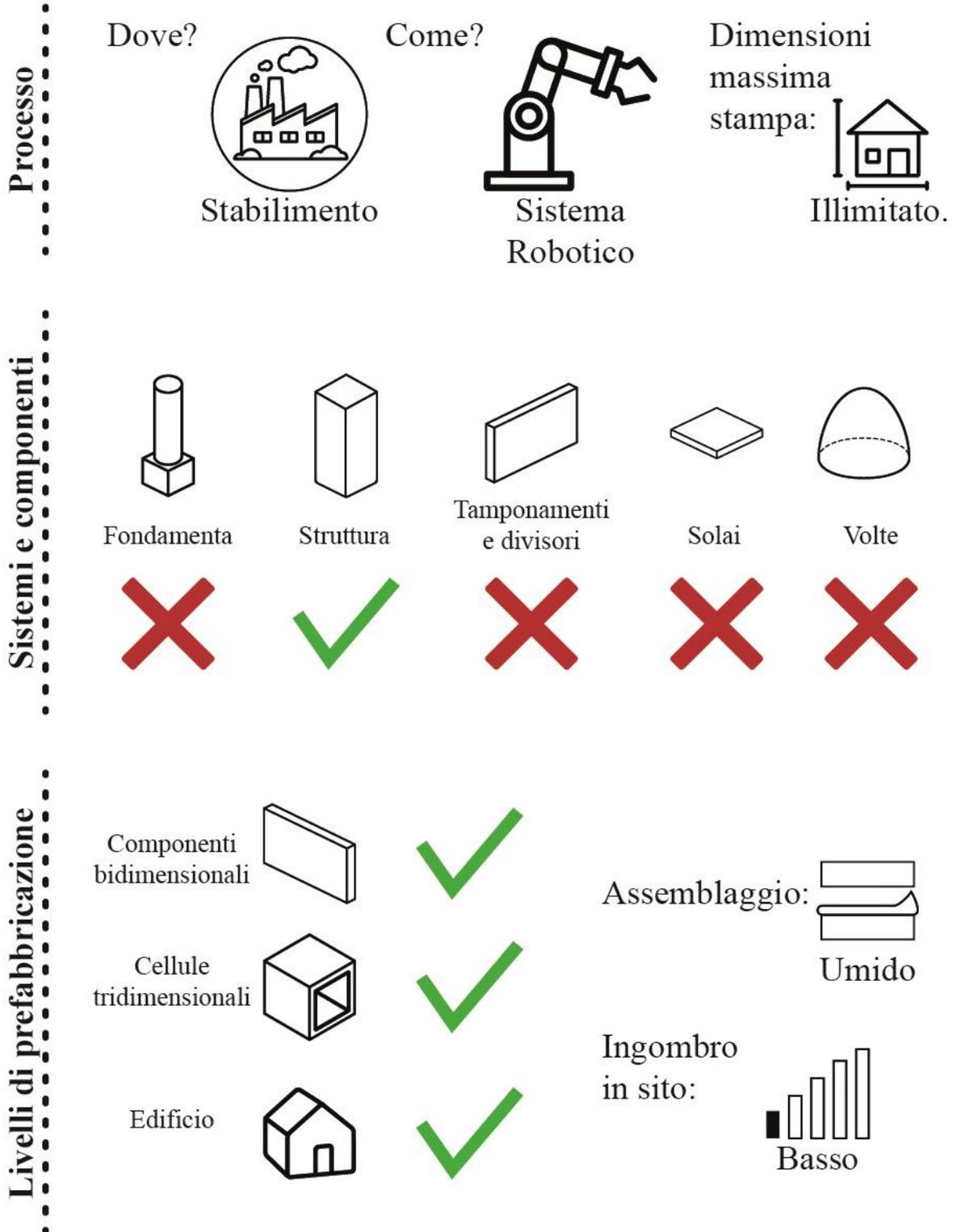
Sopra e a lato: la struttura del ponte stampata nella sua interezza e trasportata in sito.



Sotto e a lato: un esempio dei connettori MX3D, dalla fase di progetto, tramite generative design, al riempimento con malta.



MX3D



Fabbricazione digitale in terra e pietra

La fabbricazione digitale può però anche essere usata in combinazione con materiali più naturali e sostenibili come la terra reperita in loco o con polveri che, unite ad un particolare legante, sono in grado di creare un materiale simil pietra.

Wasp - Italia

Il primo caso è rappresentato al meglio dall'azienda italiana Wasp che si sta occupando di costruire, una casa per volta, un villaggio ecosostenibile nei pressi del distretto industriale di Massa Lombarda nel ravennate. Lo studio per il villaggio di Shamballa è iniziato nel 2016 e nel 2018 è stata terminata il primo edificio di prova: la casa Gaia. Si tratta di un'abitazione di 20mq costruita in dieci giorni utilizzando terra e paglia con un isolamento in loppa di riso, inserito nell'intercapedine dei muri. Per la costruzione è stata utilizzata una stampante 3D in stile delta alta 12m, tra le più alte al mondo, e si è utilizzata una mix di terra locale e paglia.

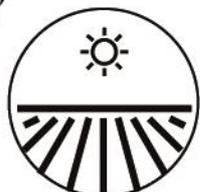
Attualmente Wasp, oltre a portare avanti il progetto di Shamballa si sta anche occupando di sviluppare nuove stampanti, tra cui una stampante modulare, più piccola, veloce ed efficiente ed in grado di stampare fino a 30cm/s permettendo di scegliere tra terra, cemento o geo-polimeri. In collaborazione con Mario Cucinella architects è inoltre iniziata la costruzione di Tecla: un altro complesso di edifici a Massa Lombarda, per i quali tuttavia le pareti in terra non avranno funzione strutturale.

Nelle prime immagini il render del villaggio di Shamballa e la costruzione della casa Gaia, mostrata a destra. In basso a destra un render degli spazi studiati per il complesso Tecla



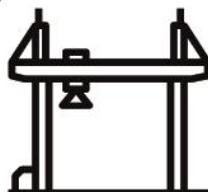
Processo

Dove?



Cantiere

Come?



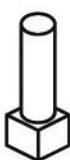
Sistema a Traliccio

Dimensioni massima stampa:



dim. 6,3m x 3m h.

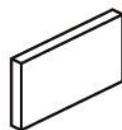
Sistemi e componenti



Fondamenta



Struttura



Tamponamenti e divisori



Solai

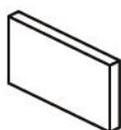


Volte



Livelli di prefabbricazione

Componenti bidimensionali



Assemblaggio:



Umido

Cellule tridimensionali



Ingombro in sito:



Alto

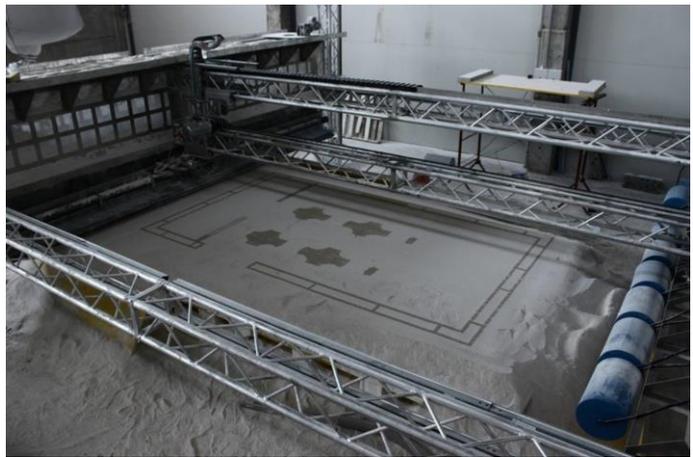
Edificio



D-Shape – Inghilterra

D-shape è una stampante brevettata nel 2008 da Enrico Dini¹¹ che permette di sfruttare la fabbricazione digitale per realizzare strutture in pietra artificiale, oltre che in cemento. Ciò è reso possibile grazie ad una tecnologia chiamata stampa a binder jetting in cui su un letto di sabbia viene depositato a goccia un legante. La reazione chimica tra i due componenti crea un materiale dalla struttura cristallina simile ad un minerale. La sabbia non è dunque un semplice inerte ma è un componente attivo capace di sviluppare legami molto più forti del comune cemento e delle resistenze a trazione tali da non richiedere l'uso di armature.

Nelle immagini si può notare quanto il risultato del processo di stampa sia simile a quello di una comune stampante a getto d'inchiostro



Il particolare processo si differenzia dagli altri già in fase di progettazione. Infatti, il modello 3D dopo essere stato tagliato in strati dallo spessore costante viene inserito in una matrice di punti che genera un file bitmap, che indica le coordinate dei punti su cui D-shape, come una comune stampante a getto d'inchiostro, dovrà rilasciare il legante. La costruzione inizia dunque posando su tutta l'area di stampa uno strato, spesso dai 5 ai 10mm, di sabbia e ossido di magnesio. Gli ugelli della stampante si muoveranno poi depositando un liquido inorganico, a base di cloruro di magnesio, che fa da legante e che reagisce con la sabbia creando un materiale simile all'arenaria dalla composizione analoga a quella del cemento Sorel. Una volta terminato lo strato la stampante si sposta verso l'alto e viene depositato un nuovo strato di sabbia. Terminato il processo di stampa si aspetta il solidificarsi del composto, 24 ore, e si procede poi dissotterrando la struttura dalla sabbia in eccesso.

Sotto a sinistra: un'immagine complessiva della stampante, si può notare lo spessore dello strato di sabbia e il sistema di movimento.

Sotto a destra: il deposito di un nuovo strato di sabbia sopra al precedente.



¹¹Brevetto metodo Dini sul sito: patents.google.com/patent/US8337736?q=enrico+dini



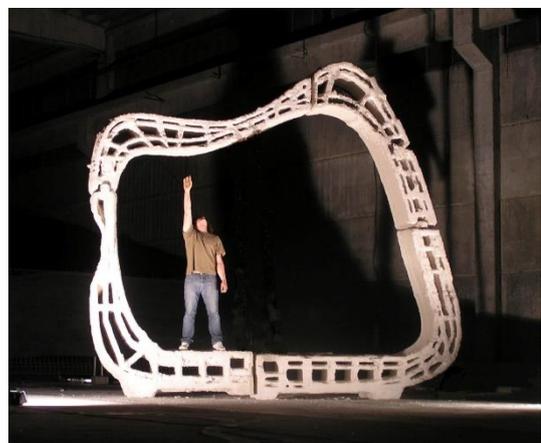
Sopra a sinistra: Si può notare come il passaggio della stampante lasci traccia degli elementi da costruire.
 Sopra a destra: L'aspirazione della sabbia in eccesso una volta terminato il processo di stampa.

Nel 2010, in occasione della triennale di Milano, si è avuta una dimostrazione delle potenzialità di D-shape con l'edificio *UnaCasaTuttaDiUnPezzo* di 2,4x4m con angolo cucina e bagno, stampata in tre settimane.

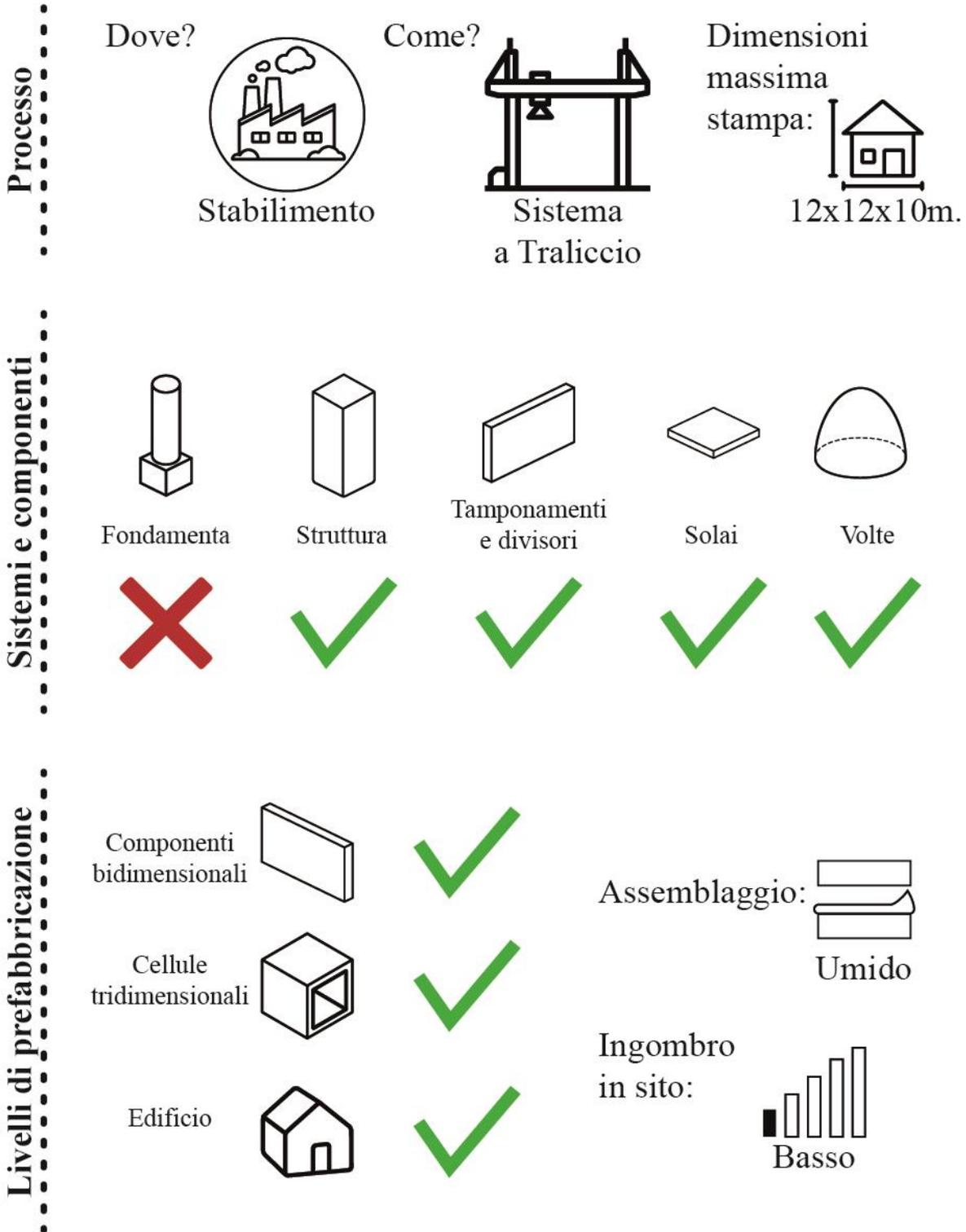
Attualmente l'azienda è impegnata nella ricostruzione dei moli e delle strutture costiere di New York progetto per il quale, grazie all'uso della fabbricazione digitale, si stima un risparmio, da parte della città, di circa 2,9 miliardi di dollari.¹² Inoltre, D-shape è impegnata nella produzione di barriere coralline artificiali e nello studio di possibili basi lunari, costruite con la polvere della luna.



Sopra: *UnaCasaTuttaDiUnPezzo* subito dopo la stampa e durante il trasporto in sito.
 A lato: Lo studio dei macro elementi che dovevano definire la sezione di Villa Rocca, il progetto di un'abitazione privata non approvato.



¹² Articolo del 12/04/2013 sul sito: www.3ders.org/articles/20130412-dshape-wins-top-prize-in-nyc-waterfront-construction-competition.html,



Fabbricazione digitale in polimeri

L'ultimo esempio di fabbricazione digitale è quella che avviene utilizzando processi di stampa 3d di polimeri plastici. Questo approccio è caratterizzato dall'uso delle tecnologie e tecniche già ampiamente diffuse, dalle stampanti a scala più piccola, e ormai consolidate. Tuttavia, è difficile trovare un modo valido per sfruttare i polimeri plastici nelle costruzioni.

Branch – Stati Uniti d’America

I principali risultati concreti sono stati ottenuti dal gruppo Branch. L'idea sviluppata dall'azienda statunitense è quella di stampare una struttura reticolare, molto fitta, che faccia da supporto interno ai muri, in un modo concettualmente simile al reticolo definito dalle armature all'interno di un pilastro. Il processo utilizzato è chiamato cellular fabrication, c-fab e permette al materiale, un mix di fibra di carbonio e ABS stampato da un braccio robotico a sei assi, di solidificarsi in uno spazio aperto, senza bisogno di supporti. Creando così una matrice di polimeri capace di assumere virtualmente ogni forma. Questo reticolo fa' quindi da supporto ad una schiuma spray, usata come riempitivo, e viene poi ricoperto da uno strato di cemento. Si stanno però sperimentando anche altri possibili riempimenti e finiture. Si ottengono così delle pareti estremamente leggere senza rinunciare in alcun modo alla capacità strutturale, riuscendo anzi a raggiungere valori di resistenza superiori di tre o quattro volte rispetto a quelli di un telaio di legno, raggiungendo quindi un elevato rapporto resistenza/peso.

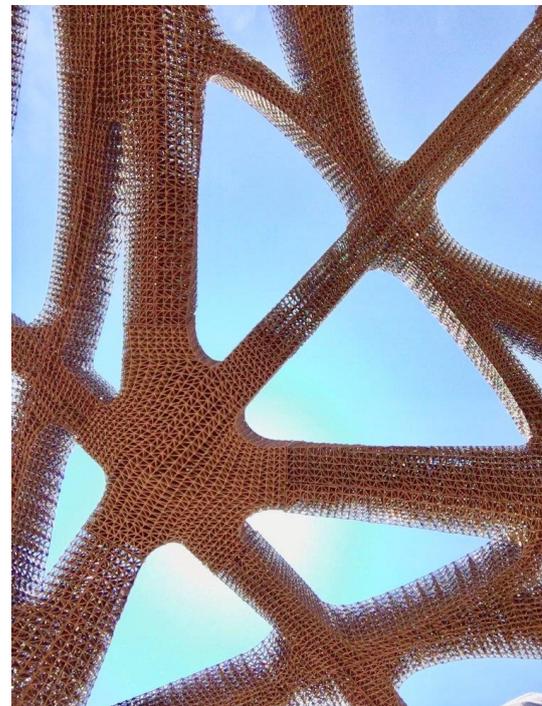
*Sotto: un campione che mostra la stratigrafia di un muro prodotto utilizzando la tecnologia Branch.
A destra: La produzione delle strutture reticolate ed un loro dettaglio.*



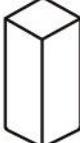
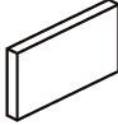
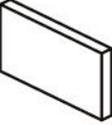
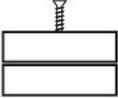
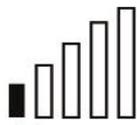
Una dimostrazione delle potenzialità del sistema è stata data a Nashville dove è stato costruito lo shop pavilion, alto 6,4m con campate di 12m. Un elegante guscio strutturale costruito a partire da 36 pannelli, stampati in fabbrica, grandi fino a 5,5m e pesanti al massimo 80kg che sono stati assemblati in sito come un puzzle, con grande velocità. Grazie alla libertà formale consentita sistema Branch si è potuto disegnare la struttura in modo che riuscisse a sviluppare le resistenze necessarie in modo puramente geometrico: aumentando la sezione nell'aree più sottoposte a compressione e ritagliando dei vuoti in corrispondenza delle aree con elevata forza verticale.



Nelle immagini l'assemblaggio, in sito, dei pannelli, sostenuti da un ponteggio temporaneo in legno, e il risultato finale.

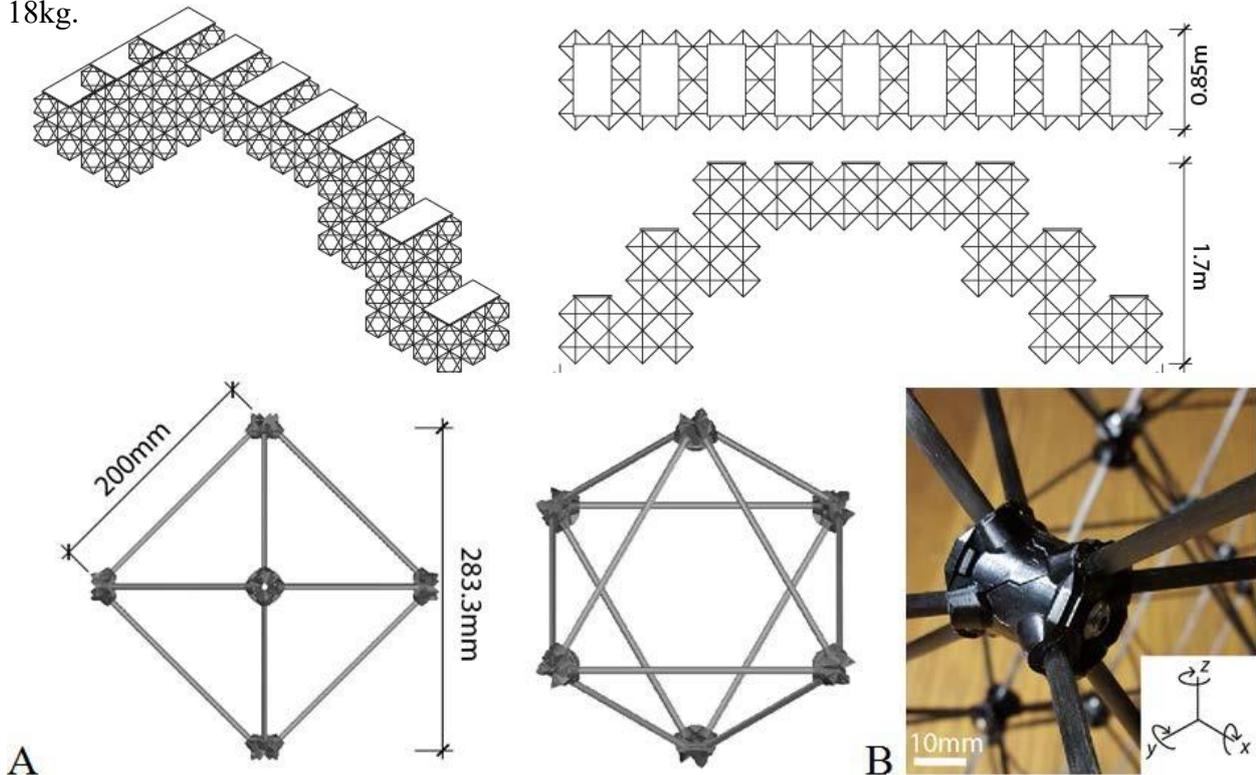




Processo	Dove?  Stabilimento	Come?  Sistema Robotico	Dimensioni massima stampa:  Illimitato.		
Sistemi e componenti	 Fondamenta 	 Struttura 	 Tamponamenti e divisori 	 Solai 	 Volte 
Livelli di prefabbricazione	Componenti bidimensionali  	Cellule tridimensionali  	Edificio  	Assemblaggio: a Secco 	Ingombro in sito:  Basso

Centre for Bits and Atoms

Nonostante esistano poche sperimentazioni pratiche l'interesse sulla fabbricazione digitale tramite polimeri è acceso. In particolare, si è distinto il Centre for Bits and Atoms all' MIT di Boston, dove versioni molto più avanzate di questi reticoli stanno venendo studiati per ogni applicazione dalla scala del micrometro alla scala dell'edificio. Si può citare come esempio gli atti della conferenza Manufacturing science and engineering del 2016.¹³ In questi viene presentato un reticolato creato assemblando a secco degli elementi piani plastici che può essere adattato in modo d'assumere diverse forme. Infatti, è stato utilizzato per creare: un ponticello di 5m la cui struttura pesa solo 18kg.



Sopra: i disegni di progetto della struttura e il dettaglio dei singoli cubi che la compongono.

A lato: un'immagine del ponte, evidenziato dalla linea tratteggiata, che risulta essere quasi invisibile.



¹³ Jenett Benjamin, Cellucci Daniel, Gregg Christine, Cheung Kenneth, Meso-scale digital materials: modular, reconfigurable, lattice-based structures, atti del congresso "manufacturing science and engineering conference" del 2016; Per approfondire: Cheung Kenneth, Digital cellular solids: reconfigurable composite materials, tesi di dottorato in Media Arts and Sciences, Scuola di architettura e pianificazione, Massachusetts institute of technology, 2012

1.4 Comparazione fra i diversi sistemi di fabbricazione digitale

La fabbricazione digitale è un processo produttivo di grandi potenzialità che, al momento però, porta con sé, oltre ad alcuni benefici, anche dei limiti importanti.

Innanzitutto, quello che dovrebbe essere uno dei punti di forza della fabbricazione digitale ovvero la totale libertà formale, in grado di permettere la produzione di forme complesse, non producibili altrimenti. Tutta questa libertà è infatti racchiusa all'interno delle ridotte dimensioni entro cui lavorano i macchinari per la fabbricazione digitale. Una volta esaurito lo spazio a disposizione sarà necessario spostare e ricalibrare il macchinario.

Inoltre, nonostante la libertà formale faciliti il passaggio verso un processo di personalizzazione di massa questa personalizzazione è in molti casi solo formale. La fabbricazione digitale infatti, volendo semplificare il processo costruttivo si affida quasi sempre ad un unico macchinario con il compito di produrre l'intero edificio. Tuttavia, questa semplificazione, che elimina la necessità di ogni altro strumento di lavoro, limita di molto il numero di lavorazioni eseguibili. Una limitazione che si esprime soprattutto nella grande difficoltà di realizzare strutture puntuali, anziché a setti, e nell'impossibilità di trattare in modo diverso le stratigrafie della struttura e dei tamponamenti, che andranno per forza realizzati con lo stesso materiale. Inoltre, molti dei processi di fabbricazione digitale non consentono ancora di realizzare solai piani o coperture a falde, che devono perciò essere realizzate in modo più tradizionale in cantiere o come elemento separato in fabbrica, se non si vuole rinunciare ai benefici della fabbricazione digitale.

Un altro beneficio della Digital fabrication è il costo molto più contenuto rispetto ad i metodi di costruzione tradizionali. Questo risparmio è da attribuirsi principalmente a tre fattori: il minore uso di manodopera, minor uso di materiale, e all'ottimizzazione del processo costruttivo, nessuna cassaforma e alloggiamenti degli impianti già previsto. Un risparmio innegabile ma su cui sono necessarie alcune osservazioni: nonostante i processi digitali si pongano come obiettivo quello di ridurre la manodopera specializzata, facendo compiere ogni lavorazione ai macchinari, in virtù del carattere innovativo di questo approccio può essere necessario formare gli addetti al controllo della produzione e del funzionamento dei macchinari. Inoltre, nonostante sia innegabile l'assenza di sprechi e una maggiore efficienza nell'uso dei materiali questa non si traduce totalmente in una minore quantità di trasporti. Infatti, è comunque necessario portare in sito una grande quantità di materie prime, che possono anche richiedere aree per lo stoccaggio più grandi rispetto a quelle necessarie per le costruzioni tradizionali. I macchinari per la fabbricazione digitale possono inoltre arrivare ad occupare anch'essi grandi quantità di spazio. Oltre ai costi minori per la manodopera e i materiali sarebbe poi opportuno valutare i costi per macchinari di fabbricazione digitale che, specie se a fabbricazione additiva, possono raggiungere valori elevati. Infine, è opportuno ricordare che l'ottimizzazione del processo costruttivo è possibile solo in funzione di un approccio progettuale già improntato fin dall'inizio verso la fabbricazione digitale.

Un'ulteriore criticità dei sistemi di fabbricazione digitale finora presentati è la loro sostenibilità ambientale. È vero, come dichiarato dalle aziende, che questi processi costruttivi, qualora operino tramite processi additivi, comportano un ridotto numero di sprechi di materiale ed eliminano la necessità di utilizzare altri materiali a supporto della costruzione, ad esempio le casseforme. Tuttavia, la quasi totalità dei sistemi di Digital fabrication si basa su metodi di costruzione bagnata. Le costruzioni realizzate sono dunque difficilmente modificabili dopo la costruzione, irreversibili e non riutilizzabili al termine della loro vita. Questa è una problematica molto grave quando si va a valutare la sostenibilità dell'edificio in relazione alla vita complessiva dell'opera e non solo limitatamente alla fase di costruzione. L'unico modo di conciliare la fabbricazione digitale con la sostenibilità ambientale è quello di rinunciare alla fabbricazione digitale dell'intero edificio

in favore di una fabbricazione digitale di singoli componenti o macro-sezioni che andranno poi assemblate a secco.

Esistono comunque dei chiari benefici della fabbricazione digitale tra cui la notevole riduzione dei tempi di lavoro e la possibilità di raggiungere livelli d'accuratezza e precisione non ottenibili altrimenti, riducendo al massimo la possibilità d'errore. Infine, la fabbricazione digitale potrebbe portare ad una riduzione degli incidenti sul lavoro. Molti dei lavori rischiosi o da svolgere in quota vengono infatti eseguiti dai macchinari digitali. Allo stesso tempo si riduce di gran lunga il numero di macchinari pesanti presenti sul cantiere e i rischi ad essi connessi.

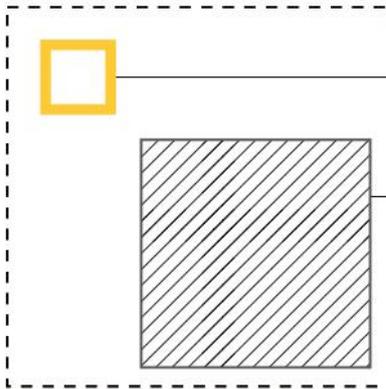
Logistica del cantiere:

Volume costruito
in fabbrica:

L'edificio arriva in cantiere come
una o più cellule tridimensionali.



Schema di cantiere



Area cantiere

Gru

Area edificio

Ingombro materiali: ■■■■

Ingombro macchinari: ■■■■

Attrezzature usate:

- gru per spostare l'edificio o
le macrosezioni.

- eventuali ponteggi per
l'assemblaggio delle macro-
sezioni.

Sotto e a lato esempi di
trasporto e montaggio di
macrosezioni.



Sopra e a lato esempi di
trasporto di volumetrie intere.

Ingombro
in sito:

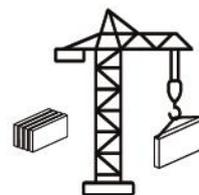


Legenda:

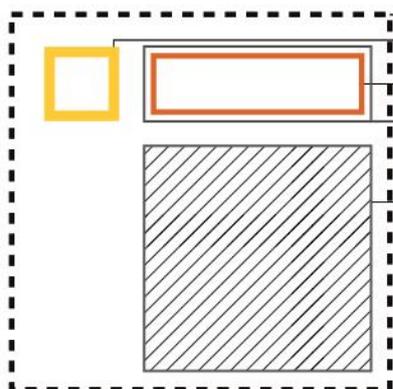
— Cemento — Acciaio — Polimeri
— Terra/Pietra — Legno

Assemblaggio di elementi:

L'edificio è costruito assemblando elementi bidimensionali prefabbricati.



Schema di cantiere



Area cantiere
Gru

Deposito elementi
Copertura provvisoria

Area edificio

Ingombro materiali:



Ingombro macchinari:



Attrezzature usate:

- copertura provvisoria per proteggere gli elementi

- eventuale gru per spostare gli elementi più pesanti

- eventuali ponteggi per l'assemblaggio di edifici a più piani

A lato esempi di depositi temporanei in cantiere degli elementi costruttivi.



A lato esempio di montaggio svolto tramite impalcature.

Ingombro in sito:



Sistema in compensato

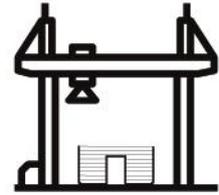


Legenda:

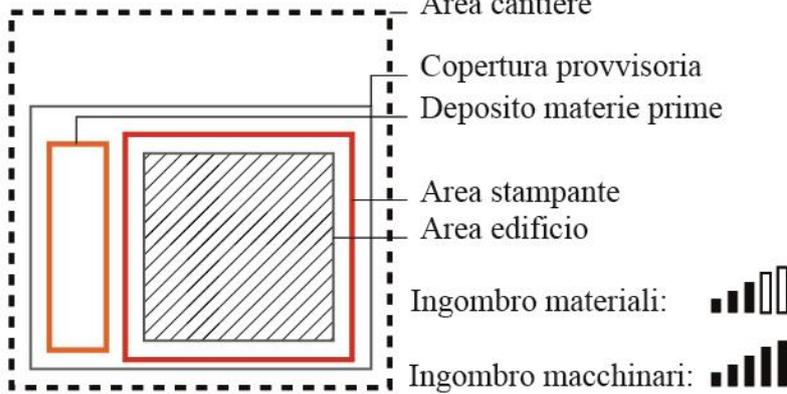
- Acciaio
- Polimeri
- Cemento
- Terra/Pietra
- Legno

Edificio stampato in cantiere:

L'edificio viene prodotto interamente in cantiere con procedure di stampa 3D.



Schema di cantiere



Attrezzature usate:

- stampante 3D
- eventuale copertura provvisoria
- eventuale gru per spostare la stampante
- eventuali ponteggi per lavori di finitura

A lato esempi l'organizzazione di cantieri con sistemi di stampa a traliccio o a bracci robotici.



A lato esempio di copertura e depositi di materie prime.

Ingombro in sito:



- Legenda:
- Acciaio
 - Polimeri
 - Cemento
 - Terra/Pietra
 - Legno

Componenti costruttivi permessi:



Solo

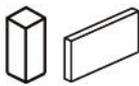
tamponamenti:

Sistemi per i quali le norme non prevedono usi strutturali, e necessitano di un getto integrativo.

Utilizzato da:



Esempio: AMT



Tamponamenti e Struttura:

Sistemi che si possono utilizzare per produrre sia elementi strutturali che di tamponamento.

Utilizzato da:



Esempio: D-shape



Solo struttura:

Sistemi che sono pensati per costruire solamente le parti strutturali.

Utilizzato da:



Esempio: MX3D

Legenda:



Cemento



Acciaio



Terra/Pietra



Polimeri



Legno

Tipi di copertura permessi:

Integrazione di copertura:

In questi casi non è tecnicamente possibile stampare insieme edificio e copertura. È necessario costruire coperture con altri materiali.

Utilizzato da:



Esempio: SQ4D, casa Calverton

Coperture a volta:

Sistemi che permettono di creare pareti non verticali, capaci di costruire delle coperture a volta.

Utilizzato da:

Solo struttura:



Esempio: Wasp, Tecla

Coperture piane:

Sistemi ad elementi o macro sezioni, che sono in grado di definire coperture piane.

Utilizzato da:



Esempio: Winsun

Legenda:

	Acciaio		Polimeri
	Cemento		Terra/Pietra
			Legno

Lavori non compresi nei sistemi:

Fondazioni:



Esempio fondazione parzialmente stampata in cemento, Wasp

Realizzabili digitalmente solo come platee o fondazioni a travi rovesce stampate in sito.

sistemi utilizzabili:



Assemblaggio:



Esempio di elementi da assemblare, Amt

In molti casi la fabbricazione digitale produce solo singoli elementi che richiedono un assemblaggio manuale in sito.

sistemi che richiedono un assemblaggio:



Impianti:



Esempio di alloggiamento sistema in compensato, Facit Homes

La fabbricazione digitale realizza gli alloggiamenti, ma la posa dei tubi viene effettuata in modo tradizionale.

Richieste soprattutto in seguito ai processi di stampa 3D, che lasciano superfici "sporche".

sistemi che non richiedono particolari finiture:



Finiture:



Esempio di superficie "grezza" realizzata dalla stampante Cobod

Legenda:

	Acciaio		Polimeri
	Cemento		Terra/Pietra
			Legno

2 La prefabbricazione in legno

Come visto dunque l'uso della fabbricazione digitale è ancora in una fase sperimentale in cui le aziende e i centri di ricerca lavorano per terminare i primi progetti pilota e perfezionare gli ultimi punti dei loro sistemi. Allo stesso tempo queste aziende stanno cercando di ottenere un ruolo attivo all'interno del mercato delle costruzioni. Il passaggio al libero mercato è, per le aziende, la fase più complicata da gestire. Da un lato infatti le aziende, specie quelle che si occupano di stampa 3D, si trovano ostacolate dai codici costruttivi locali, non ancora adeguati a questo tipo di costruzioni. Dall'altro lato, la sfida più grande, è quella di ottenere l'interesse del pubblico e di combattere la diffidenza dei possibili clienti.

Queste difficoltà potrebbero però essere agilmente superate decidendo di utilizzare il legno come materiale alla base della fabbricazione digitale. Infatti, le strutture in legno sono infatti già normate e anche quello che potrebbe sembrare un difetto, la non stampabilità, e la necessità perciò di essere assemblato manualmente, dopo essere stato tagliato dai macchinari a controllo numerico, è in questo caso un punto a favore. Solo in questo modo è infatti possibile attualmente garantire un assemblaggio a secco della struttura il che rende più facile la sperimentazione e consente di utilizzare la fabbricazione digitale anche per realizzare edifici temporanei. In questo modo è possibile aumentare il numero di edifici costruiti, sviluppando una maggiore esperienza pratica e aumentando la conoscenza dei nuovi sistemi presso il pubblico. Inoltre, la reversibilità della costruzione, e l'uso di un materiale naturale, ad eccezione fatta per i collanti, garantisce, a differenza dei sistemi presentati in precedenza, una maggiore sostenibilità dell'edificio nel corso del suo ciclo vitale.

Va inoltre precisato che l'assemblaggio manuale di elementi prefabbricati seguendo un processo di fabbricazione digitale è molto diverso da quello che è il normale processo di costruzione in sito. Con la produzione digitale l'assemblaggio può essere eseguito anche da principianti senza nessuno strumento oltre a un martello, un trapano e una scala. Infatti, tutti gli elementi sono già tagliati con una grande precisione, non raggiungibile in cantiere, in modo da rendere possibile anche un assemblaggio senza viti, e sono realizzati di una misura tale da essere facilmente maneggiabili da una o due persone. Inoltre, questi elementi prevedono già gli alloggiamenti per tutti gli impianti semplificando e rendendo più accessibile, anche a profani, il lavoro d'impianti.

L'uso del legno comporta anche un ulteriore beneficio tecnico. Nel caso del legno infatti il materiale e i macchinari utilizzati sono estremamente più comuni e a buon mercato, rispetto a quelli utilizzati dagli altri sistemi di fabbricazione digitale, trattandosi di tecnologie già sviluppate e diffuse come i macchinari a controllo numerico.

Infine, per quanto si applichino tecnologie moderne, l'uso del legno mantiene un forte appeal nel confronto del pubblico, che si sente quasi assicurato e meno diffidente. Inoltre, poiché questi edifici sorgono come assemblaggio di elementi, e non come oggetto unico stampato in un'unica seduta, i potenziali clienti hanno una libertà formale totale, svincolata da ogni questione legata all'area di lavoro dei macchinari, e molto più facilmente modificabile in futuro.

Questi punti possono far capire come il legno, oltre ad essere il materiale più sfruttato nei casi di prefabbricazione tradizionale, è anche il materiale ideale per effettuare una fabbricazione digitale, e di come, in virtù di questi punti, il legno possa addirittura diventare lo strumento catalizzatore della trasformazione e del passaggio dai sistemi costruttivi tradizionali alla fabbricazione digitale.

Questo possibile ruolo da catalizzatore è reso evidente dal numero di strutture temporanee e padiglioni che sono già state costruite tramite processi di costruzione digitale scegliendo come materiale il legno, in forma di compensato, un numero di molto maggiore rispetto alle altre

tipologie di fabbricazione digitale viste fin qui. Si possono citare come esempi strutture come l'ICD/ITKE pavilion, riedificato ogni anno con forme diverse ma quasi sempre in legno, la Roskilde dome, e molti altri padiglioni, oppure edifici stabili come la Fablab House di Madrid e il Riba refugee pavilion.



In alto: i padiglioni ICD/ITKE del 2015, sinistra, e 2019, destra.

A Lato: La biblioteca temporanea Rapana street library

Sotto: a destra il padiglione READER, a sinistra la Roskilde dome.



Sopra: La FabLab House di Madrid, a sinistra, e il Riba refugee pavilion, a destra.

Si è deciso tuttavia di non soffermarsi sui sistemi costruttivi utilizzati in questi edifici poiché si tratta molto spesso di soluzioni sviluppate specificatamente per quelle strutture. L'attenzione si è dunque spostata su quelle aziende che hanno sviluppato un sistema a priori, adattabile dunque ad ogni esigenza.

I sistemi di prefabbricazione a base di legno, che sono i più diffusi al mondo, si realizzano a partire da una grande varietà di prodotti lignei: dal legno massello al lamellare ai più moderni legni ingegnerizzati. Tuttavia, si è deciso di focalizzarsi su tutti quei sistemi a base di fogli di compensato. Questo derivato del legno è infatti quello che più di tutti si può adattare ai processi della fabbricazione digitale. È di dimensioni contenute che lo rendono adatto ad essere lavorato dai macchinari CNC; è dimensionalmente stabile in accordo dunque con l'esigenza di massima precisione; è leggero, perciò di facile assemblaggio; oltre ad essere in grado di sviluppare ottime resistenze.

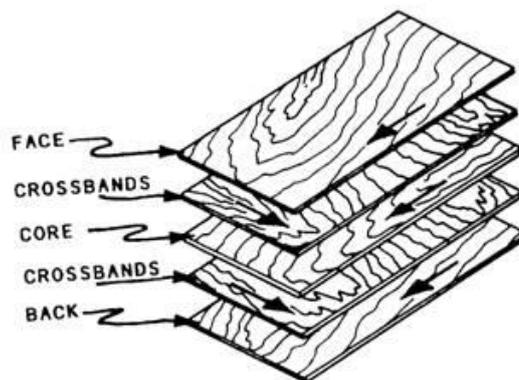
Infine, è importante specificare come la fabbricazione digitale svolta tramite l'utilizzo del legno si manifesti sempre tramite processi di prefabbricazione, essendo il legno un materiale non stampabile. Si può dunque parlare, nel caso del legno, di prefabbricazione digitale. Di conseguenza per quanto il legno sia il materiale ideale per la fabbricazione digitale, è anche un materiale che si porta dietro tutti i limiti della prefabbricazione. Al fine di superare questi limiti sarà necessario utilizzare l'approccio DfMA esposto in seguito. Prima però è necessario approfondire la conoscenza del materiale e degli strumenti usati.

2.1 Il materiale: compensato

Il compensato è un materiale derivato dalla lavorazione del legno, classificabile come legno ingegnerizzato, prodotto industrialmente a partire dal 1797. Usato inizialmente solo nell'industria dell'arredamento, a partire degli anni Novanta dell'Ottocento le sue applicazioni si sono ampliate prima alla costruzione di porte e, in seguito ad alcune innovazioni, anche al mondo dei trasporti, con l'adozione del compensato come materiale per pannellature su treni, automobili, autobus e aeroplani. Tuttavia, solo a partire dal 1928, anno in cui furono introdotti sul mercato statunitense i primi fogli standardizzati di dimensione 1,2 x 2,4m, si inizia ad utilizzare il compensato come materiale da costruzione. La sperimentazione ha continuato a cercare miglioramenti, soprattutto riguardo agli adesivi utilizzati, e ha consentito in tal modo di ampliare sempre di più il campo d'applicazione del compensato, che oggi è arrivato a rimpiazzare in molti casi l'uso del legno tradizionale.¹⁴

Il compensato è una sovrapposizione di più strati sottili di legno, che possono essere in numero dispari dai tre agli undici, che vengono incollati tra di loro in modo da formare un pannello più spesso. Gli strati di legno, detti sfogliati, sono spessi da 1 a 4 mm e sono collocati uno sopra l'altro ruotati di novanta gradi rispetto al pannello precedente e in numero dispari, in modo che l'orientamento delle fibre dei singoli strati sia simmetrico rispetto al centro del pannello. Gli strati esterni del compensato sono chiamati faccia e retro, mentre lo strato centrale è chiamato cuore.

La caratteristica principale del compensato è la rotazione reciproca dei vari strati che lo compongono che fa sì che le deformazioni dimensionali del legno dovute alle variazioni d'umidità o temperatura, le quali assumono valori diversi a seconda dell'orientamento delle fibre, siano compensate e rese uniformi in modo da non deformare il pannello e riducendo i restringimenti. La rotazione delle fibre inoltre riduce l'anisotropia del legno che compone il pannello, ovvero la variazione della resistenza posta dal materiale a seconda della direzione di provenienza delle forze. Aumenta dunque la forza del pannello finito. Infine, appare importante ricordare che la rotazione degli sfogliati per strati successivi è ciò che differenzia il compensato dal più moderno microlamellare o LVL, laminated veneer lumber, dove gli strati successivi hanno tutti lo stesso orientamento.



Lo schema mostra il diverso orientamento degli strati di compensato.

Il compensato è oggi largamente utilizzato nell'industria delle costruzioni in virtù delle sue caratteristiche. È infatti un materiale economico, prodotto in fabbrica con dimensioni precise e stabili, che non subiscono le variazioni dell'umidità atmosferica. Tuttavia, è utilizzato solo come pannellature di tamponamento, per creare ad esempio: partizioni leggere, casseforme per il cemento armato, mobili, porte e sistemi oscuranti leggeri, o come tavolato di sostegno alla pavimentazione. Non viene perciò quasi mai utilizzato come materiale strutturale a causa molto probabilmente delle ridotte sezioni offerte: i pannelli più spessi, difficilmente reperibili sul mercato, raggiungono i 3cm. La maggior parte del compensato usato è prodotto in forma di fogli piani di grandi dimensioni. Ma ne esistono anche altro tipo, dedicati soprattutto all'arredamento, la nautica e l'aeronautica, che possono essere piegati per assumere curve semplici e composte.

¹⁴Racconto del processo produttivo del compensato sul sito: www.madehow.com/Volume-4/Plywood.html

Processo produttivo

A differenza di altri pannelli lignei: truciolati, a scaglie, MDF ecc. che sono realizzati a partire da scarti di lavorazione del legno, il compensato viene realizzato a partire direttamente dalle piante che vengono appositamente coltivate. Questi alberi provengono, nella maggior parte dei casi, da foreste certificate e di proprietà delle stesse aziende produttrici di compensato. Il compensato può essere prodotto utilizzando una grande varietà di specie arboree differenti e l'essenza adottata contribuirà a determinare, almeno in parte le caratteristiche del prodotto finito. Per quanto in generale la scelta della specie arborea sia dettata più da considerazioni legate alla velocità di crescita e dalla regolarità delle fibre più che dalle caratteristiche fisico-meccaniche dell'essenza. In generale tuttavia per la produzione degli sfogliati si utilizzano alberi con tronchi di un diametro più piccolo rispetto a quelli comunemente usati per la produzione di legno massiccio

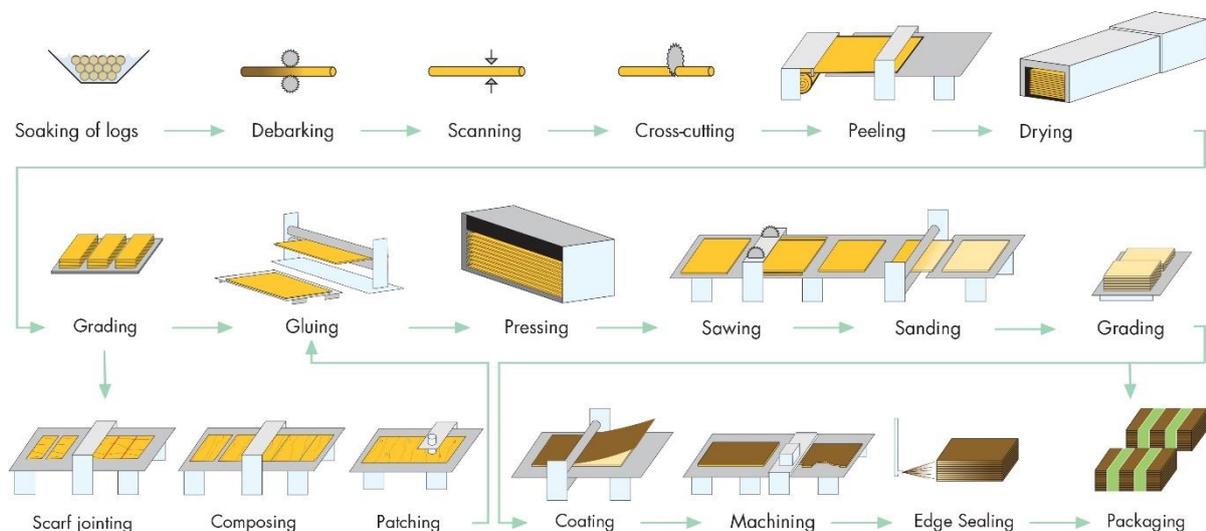
I tronchi selezionati una volta abbattuti vengono scortecciati e tagliati in sezioni, che al fine di realizzare fogli standard di larghezza 2,4m, sono lunghe tra i 2,5m e i 2,6m. Per procedere con la lavorazione è necessario che questi tronchi più piccoli siano riscaldati e assorbano dell'umidità al fine di ammorbidirne le fibre. A questo scopo vengono sottoposti ad un bagno di vapore oppure immersi in acqua calda, per un periodo che va dalle dodici alle quaranta ore, a seconda di molti fattori tra cui: il tipo di processo scelto, la specie di legno e le dimensioni del blocco.



Sopra: la fase di spelatura del tronco.

Sotto: lo schema del processo produttivo usato dall'azienda Wisa plywood.

Una volta ammorbiditi i blocchi sono portati alla macchina pelatrice, dove vengono fatti ruotare sul loro asse mentre una lama continua, posta tangenzialmente ai blocchi, taglia dai 90-240 m di sfogliati al minuto. Una volta che il blocco ha raggiunto un diametro di 305/230 mm, questo viene espulso dalla macchina che prosegue a tagliare gli altri blocchi. La lunga striscia di sfogliato ottenuta viene quindi tagliata della lunghezza desiderata, di solito, per produrre i fogli da 1,2m, viene tagliata a 1,4m.



Viene dunque eseguito un primo controllo di qualità in cerca di difetti nello sfogliato. In questa fase i singoli sfogliati vengono divisi, manualmente o automaticamente, in base al loro grado di qualità. Infine, gli sfogliati, le cui fibre erano state idratate per evitare rotture indesiderate durante la fase di taglio, vengono ora essiccati, in forno, al fine di ridurre il contenuto di umidità. Durante questa operazione gli sfogliati, che erano stati volutamente tagliati di dimensioni maggiori di quelle richieste si restringono e raggiungono dimensioni vicine a quelle dei pannelli finali.

Il processo di stratificazione e incollaggi può avvenire sia in modo manuale che semi-automatico. Gli sfogliati, ormai asciutti, sono sovrapposti uno per uno, in numero dispari, ruotando ogni volta l'orientamento delle fibre di novanta gradi, posando tra di loro uno strato di adesivo liquido spalmato mediante l'uso di rulli. I fogli incollati sono quindi caricati in una pressa a caldo, che a seconda delle aziende può contenere dai venti ai quaranta fogli, questa comprime i fogli a una pressione che varia, a seconda dello spessore dei fogli, tra i 7,5 e i 14 bar. Allo stesso tempo la pressa riscalda i fogli fino a valori compresi tra i 110 e i 160 gradi Celsius, a seconda del tipo di adesivo utilizzato. Infatti, mentre la pressione sviluppata dalla pressa serve ad assicurare un contatto ottimale tra i vari strati, il calore prodotto è necessario per far sì che i collanti sviluppino la massima resistenza. Dopo una breve attesa tra i due e i sette minuti i pannelli di compensato escono dalla pressa.



Sopra: a sinistra la sovrapposizione degli sfogliati effettuata manualmente, a destra la fase di pressatura.

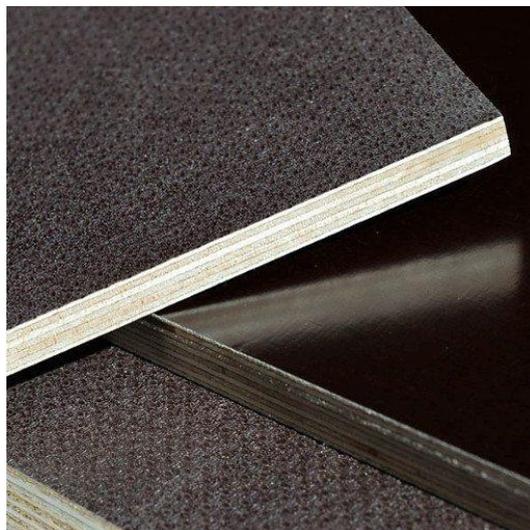
I pannelli solidificati passano quindi attraverso un paio di seghe che li tagliano rettificandoli e riducendoli alla dimensione finale. Infine, i fogli vengono levigati e marchiati con una sigla che riporta il grado che indica l'esposizione a cui è possibile esporre il pannello, la classificazione estetica, relativa agli sfogliati posti sul fronte e sul retro, e il numero identificativo dell'azienda del produttore.

Nonostante la produzione di compensato faccia un uso mediamente efficiente del legno, ci sono ancora notevoli sprechi durante il processo produttivo, soprattutto nella prima fase di sfogliatura del tronco. Infatti, in molti casi solo il 50-75% del volume di legno usabile viene effettivamente utilizzato per realizzare i pannelli. Per questo motivo si stanno ultimamente sviluppando tecnologie che consentano di utilizzare anche le parti che nella produzione del compensato, e di altri prodotti, vengono normalmente scartate, come ad esempio i pannelli OSB. Tuttavia, per quanto riguarda il consumo d'energia per la fabbricazione dei pannelli, il compensato presenta valori più elevati rispetto a quelli degli altri prodotti derivati dal legno. L'energia richiesta dal processo, PER, è di 10,4 MJ per ogni Kg di materiale, ed è superata solo da quella dei pannelli di fibra a media ed alta densità, MDF e HDF. Questa misura, a differenza della più nota embodied energy, tiene conto solamente dell'energia consumata in fase di produzione senza considerare il ciclo di vita e i trasporti, si può però facilmente immaginare quanto le tre fasi di riscaldamento del legno: il bagno in acqua bollente, l'essiccazione, la pressatura a caldo siano energeticamente le più dispendiose.

Tipologie e classificazioni

La prima caratteristica che, nel corso del processo di fabbricazione, contribuisce a definire quelle che saranno le proprietà del pannello di compensato prodotto è il tipo di legno usato. Il compensato infatti può essere prodotto usando sia legni duri sia legni dolci o, in alcuni casi, da una combinazione dei due tipi. Le essenze più comunemente usate, per quanto riguarda i legni duri, sono: frassino, acero, mogano, quercia e teak. Mentre tra i legni dolci viene utilizzato prevalentemente l'abete duglas, oppure diverse varietà di pino, cedro, abete rosso e sequoia. Generalmente si può affermare che i legni dolci siano più leggeri ed economici e per questo sono molto spesso utilizzati anche per svolgere funzioni strutturali nonostante siano meno resistenti dei legni duri. Questi ultimi infatti in virtù del loro costo sono utilizzati solamente qualora siano strettamente necessari e per le loro qualità estetiche. Infine, nel caso dei pannelli di compensato composito questi sono realizzati prevalentemente accoppiando al rivestimento di sfogliati un pannello centrale di truciolato o legno massiccio, in modo da poter raggiungere spessori maggiori.

Questi normali pannelli di compensato possono infine essere ricoperti con liquidi al fine di migliorarne l'aspetto estetico o trattati chimicamente per aumentarne la resistenza al fuoco o al deterioramento. Inoltre, a queste diverse tipologie di compensato disponibili in commercio, che differiscono solamente per il tipo di essenza utilizzata, si affiancano altri compensati speciali. Questi hanno le cui facce ricoperte da film sottili di diversi materiali: plastici, metallici, formica, carta resinata o tessuto piegato. In base al rivestimento scelto si possono raggiungere livelli più elevati di resistenza all'umidità, all'abrasione superficiale o aumentare la capacità del pannello di trattenere la vernice. Questi compensati speciali si dicono overlaid plywood e sono usati comunemente nel mondo dei trasporti e nelle industrie agricole oltre che nelle costruzioni.



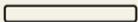
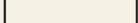
In alto a destra: un pannello OSB.

Sopra e a sinistra: pannelli di compensato con rivestito con fenolici e plastici.

Un'altra particolare tipologia di compensato può essere considerata quella dei pannelli OSB, Oriented Straw Board, una versione che fa un uso più attento ed efficace della materia prima. Questa tecnologia consiste infatti nel triturare l'intero tronco, anziché sfogliarlo per solo una sua

parte. I fogli utilizzati dai pannelli OSB non sono dunque massicci come nel compensato ma sono realizzati utilizzando le schegge di legno orientate nella stessa direzione. Il processo produttivo prosegue poi in maniera analoga a quella del compensato sovrapponendo i fogli con direzioni diverse, il tutto facendo un grande uso di adesivi. In generale si può affermare che i pannelli OSB siano più forti del normale compensato e costino leggermente di meno.

Dal punto di vista delle dimensioni i pannelli presenti in commercio variano in spessore dai 1,6mm ai 76mm, seppure i più comuni siano compresi nell'intervallo che va dai 6,4mm ai 19mm. Queste variazioni sono possibili da un lato grazie al diverso numero di strati e dall'altro grazie all'uso di sfogliati di spessori diversi. Infatti, lo spessore degli stessi sfogliati può variare tra l'uno e i quattro millimetri, e può cambiare anche all'interno dello stesso pannello, tra il cuore, gli strati intermedi e il rivestimento del foglio di compensato, con la semplice accortezza che lo spessore degli strati

Actual Thickness of Plywood		
	nominal	actual
	1/4"	7/32"
	3/8"	11/32"
	1/2"	15/32"
	3/4"	23/32"

Sopra: una tabella indicativa di quale possa essere la differenza tra gli spessori nominale e reali. Fonte: <https://www.inchcalculator.com/actual-plywood-thickness-size/>

sia sempre essere simmetrico attorno al centro del pannello. Le dimensioni più comuni per i fogli di compensato sono 1220mm di larghezza e 2440mm di lunghezza. Tuttavia, si trovano anche pannelli di larghezza 90cm e 150cm o la cui lunghezza arriva, con incrementi progressivi di 30cm, fino ai 3,6m. Inoltre, è possibile trovare fogli ancora più grandi nel caso di compensato ad uso nautico.

Lo studio delle dimensioni dei pannelli disponibili in commercio fa emerge un'importante questione relativa a quanto le misure nominali, indicate dai produttori, corrispondano effettivamente a quelle del prodotto finito. Il problema, che nei comuni sistemi costruttivi è ampiamente trascurabile, diventa pressante nel caso, qui considerato, di sistemi costruttivi basati sull'utilizzo dei pannelli di compensato. È quindi richiesta una particolare attenzione sul reale spessore dei fogli, che, soprattutto in quei sistemi basati su incastri a secco, può portare notevoli difficoltà in fase di progettazione e produzione e richiede un'attenta gestione delle tolleranze.

Il compensato è classificato in relazione a tre diversi parametri: la classe di qualità, la classe di utilizzo, e la classe di incollaggio.

La classe di qualità si basa su criteri come l'uniformità di colore e la presenza di nodi, crepe o difetti superficiali. Infatti, per quanto il compensato sia un materiale definibile come ingegnerizzato resta comunque il derivato di un materiale naturale, per cui come nel caso del legno massiccio, non esiste il pannello di compensato perfetto. Ogni pannello ha dei difetti ed è unico. La quantità e il posizionamento di questi determina il grado di qualità del compensato in base agli standard e alle norme vigenti. Fa riferimento alle norme UNI EN 635-1, "pannelli di legno compensato-classificazione in base all'aspetto delle facce - generalità" di carattere più generale e la UNI EN 635-2 "pannelli di legno compensato – classificazione in base all'aspetto delle facce – latifoglie" che determina le caratteristiche standard dei pannelli e li suddivide in classi: E, I, II, III, IV da quella priva di difetti E a quella con più difetti IV. Ogni pannello di compensato viene classificato con due lettere, che indicano il grado di qualità rispettivamente del fronte e del retro.



Sopra: Degli esempi della classificazione in base all'aspetto delle facce. Da sinistra a destra, E, I, II, III, IV

La classificazione in base all'uso viene definita nella norma UNI EN 335 "durabilità del legno e dei prodotti a base di legno – classi di utilizzo: definizioni, applicazione al legno massiccio e prodotti a base di legno". Questa norma prevede l'identificazione di tre classi di utilizzo in relazione al luogo in cui i pannelli possono essere collocati e la relativa umidità, in quanto questa rappresenta il principale fattore di degrado del compensato. Le classi d'uso sono tre: il compensato per esterno, il compensato per interni, e il compensato marino, che viene usato in ambito nautico, spesso con l'aggiunta di vernici protettive, per resistere all'attacco dell'acqua e dei funghi senza sfogliarsi.

La classificazione più importante però è quella riguardante la tipologia di adesivi usati, che è fondamentale per definire le capacità di resistenza meccanica dei pannelli, e ne indica dunque il possibile uso strutturale dei pannelli. Gli adesivi possono essere classificati a seconda dell'ambiente in cui possono essere utilizzati o alla funzione più o meno strutturale.

La prima suddivisione fa riferimento alle norme UNI EN 314 parti 1 e 2, che definiscono tre diverse classi: classe di incollaggio 1, per uso in ambiente secco, di solito ottenuta con adesivi ureici UF. Classe di incollaggio 2, per uso in ambiente umido, ottenuta con adesivi ureici rinforzati MUF. Classe di incollaggio 3, per uso in ambiente esterno, solitamente ottenuta con adesivi melaminici o fenolici MUF, MF o PF.

La seconda suddivisione prevede che nel caso dei pannelli strutturali siano utilizzati collanti di tipo A, ovvero resine termoindurenti a base di fenolo-formaldeide, PF, capaci di creare legami molto forti e durabili completamente resistenti all'acqua, alla bollitura e alle intemperie, arrivando anche a sopportare l'esposizione all'acqua salmastra e ai cambiamenti di temperatura. Questi adesivi sono forniti in forma liquida, in polvere o in pellicola e si induriscono con l'applicazione di calore durante la fase di pressatura, aggiungendo in alcuni casi un additivo indurente contenente formaldeide. All'aspetto le linee di colla appaiono molto scure.

Possono avere usi strutturali anche i pannelli con legami di tipo B ottenuti con adesivi a base di melammina-urea-formaldeide, MUF. Questi adesivi sono simili a quelli a base di urea-formaldeide, usati nei compensati ad uso interno, ma con l'aggiunta di melammina, in sostituzione di parte dell'urea, al fine di accrescerne la resistenza all'acqua e alle intemperie. I collanti di tipo B hanno infatti una resistenza media all'acqua, pur non sono idonei per impieghi marini. Ogni qual volta l'utilizzo dei pannelli non obblighi l'adozione di resine fenolo-formaldeide, si preferisce utilizzare collanti MUF per motivi economici e per il colore più chiaro delle linee di colla.

Per i compensati ad uso non strutturale e in ambienti interni sono utilizzati invece legami di tipo C o D. Entrambi questi legami sono quindi prodotti con adesivi a base di urea-formaldeide, UF, ma presentano tuttavia delle differenze. I legami di tipo C infatti sono leggermente più resistenti all'umidità della tipologia D, i pannelli con questo tipo di legami saranno quindi adottati negli ambienti interni in cui si ha una maggiore umidità, come il bagno o la cucina, o nel caso in cui si voglia verniciarli. I pannelli con legami di tipo D invece possono essere utilizzati solo in ambienti

interni non troppo umidi, senza essere verniciati. In generale gli adesivi UF sono molto versatili, che vengono induriti sempre tramite pressatura a caldo, ma in questo caso le temperature possono essere minori. Questo tipo di adesivi sono caratterizzati da una bassa resistenza al calore e all'acqua, e decadono abbastanza velocemente se esposti ad acqua, umidità o cambi di temperatura. In caso di incendio tendono inoltre a sfogliarsi. In questo caso le linee di incollaggio prodotte sono di colore chiaro.¹⁵

È importante ricordare che, per quanto negli ultimi anni si cerchi di evitarle, molte delle resine utilizzate, sia per i pannelli strutturali che per i pannelli non strutturali sono a base di formaldeide. Una sostanza che si presenta in natura come un gas incolore caratterizzato da un odore pungente. La formaldeide è uno dei così detti composti organici volatili, Voc. Sono sostanze aeriformi gassose o vaporose di origine organica dispersi nell'aria quando evaporano sostanze come solventi e combustibili, o quando si essiccano i prodotti liquidi o pastosi, oppure, anche se meno evidenti tramite la propagazione delle impurità non saldamente incorporate nei prodotti, che sono rilasciate lentamente dalla superficie del prodotto nell'aria, come nel caso dei ritardanti di fiamma e agenti biocidi. Sono sostanze che ad alte concentrazioni sono dannose per la salute e l'esposizione può portare effetti dannosi sulla salute, inclusi mal di testa, vertigini, affaticamento, nausea, danni al fegato e ai reni e cancro.¹⁶ In particolare, la formaldeide è un gas irritante per le mucose oculari e delle prime vie aeree e a dosi elevate è potenzialmente cancerogeno. La formaldeide viene liberata soprattutto dai compensati che usano adesivi UF, polimeri altamente reattivi ed economici, a causa della loro scarsa resistenza all'idrolisi e della presenza al loro interno di formaldeide libera che non ha reagito. Tuttavia, anche nel caso degli adesivi contenenti melanina, in basse (UMF) o alte (MUF) percentuali, che garantiscono una maggiore stabilità all'idrolisi, le emissioni di formaldeide sono rilevanti. Normalmente le concentrazioni di VOC negli ambienti interni sono basse e presentano pochi rischi per la salute o la sicurezza umana. Tuttavia, sono state rilevate concentrazioni particolarmente elevate di questo gas in situazioni particolari come case prefabbricate di recente costruzione, soprattutto se in combinazione all'uso di mobili in truciolato e parquet prefiniti.¹⁷ Per quanto la formaldeide sia il VOC più rischioso contenuto nel compensato, questo non è l'unico esistono dei VOC chiamati terpeni rilasciati da materiali di origine naturale, come il legno, o composti che si possono formare durante le reazioni tra ossigeno, ozono o acqua con ingredienti naturali come legno e oli vegetali.¹⁸ È perciò importante che gli ambienti siano ben ventilati, specie nel caso degli edifici, come quelli a sistemi strutturali ad elementi piani in compensato, che sono studiati per essere a tenuta dell'aria, a nei quali si corre il rischio di non avere un adeguato ricambio d'aria.

¹⁵ Uzielli Luca, Il manuale del legno strutturale, Mancosu, Roma 2001

¹⁶ Zylkowski Steve, Frihart Charles, Volatile Organic Compound emissions from engineered wood products, United States Department of Agriculture, 2017

¹⁷ Athanassiadou Eleftheria, Ohlmeyer Martin, Emissions of Formaldehyde and VOC from Wood-based Panels, in Performance in Use and New Products of Wood Based Composites, capitolo XI in COST Action WG3 (E49), performance in use and new products of wood based composites, a cura di Brunel university press, Londra 2009

¹⁸ Athanassiadou Eleftheria, Ibidem

Proprietà e caratteristiche del compensato.¹⁹

Nonostante il compensato sia composto in maggior parte da legno dal punto di vista fisico e meccanico le sue caratteristiche non sono totalmente uguali a quelle della specie arborea che lo compongono, ma sono influenzate anche da altri fattori. Questi sono principalmente di natura geometrica, come il numero, la composizione e lo spessore degli strati, ma anche fattori legati al materiale, come il grado di umidità presente all'interno del pannello, e gli adesivi utilizzati. Fondamentale è la stratificazione degli sfogliati con orientamenti diversi delle fibre che rende uniformi le resistenze e le deformazioni, limitando fortemente l'anisotropia del legno massiccio.

La verifica delle proprietà fisiche e meccaniche del compensato in adempimento ai requisiti necessari per l'uso strutturale viene eseguita dalla singola azienda produttrice, che ne garantisce il rispetto delle regole. Essendo il compensato un materiale che si presenta nella maggior parte dei casi come elementi di forma piana bidimensionale le risposte strutturali che il materiale è in grado di fornire vanno studiate diversamente a seconda se le tensioni agiscono sul piano del pannello o siano perpendicolari al piano del pannello. Questa distinzione è molto importante qualora si voglia studiare il comportamento a flessione del compensato. Infatti, nel caso in cui la forza sia perpendicolare al piano del pannello questa oltre a causare l'inflessione del pannello genera anche una sollecitazione di taglio, detta rolling shear, che agisce tra i vari strati che compongono il pannello, sollecitando le linee di colla. Nel caso, molto frequente: ad esempio nelle travi con sezione a I o scatolari, in cui la forza di flessione sia nel piano del pannello, oltre ad una leggera flessione del pannello si genera una tensione a taglio perpendicolare al piano del pannello. Tuttavia, in questo caso il taglio si ripercuote sull'intero pannello, che è in grado di sviluppare una resistenza a taglio molto maggiore di quella sviluppata dai singoli sfogliati come nel caso della flessione perpendicolare.

Per quanto riguarda le sollecitazioni a trazione o compressione che i pannelli di compensato potrebbero subire si consiglia in particolare di evitare le tensioni di trazione perpendicolari al piano del pannello. Queste tensioni infatti, se molto elevate, potrebbero provocare lo scollamento tra gli sfogliati costituenti il pannello. Le tensioni di compressione perpendicolare invece provocano deformazioni più piccole di quelle che, sotto le stesse tensioni, si verificherebbero in un analogo pannello di legno massiccio della stessa essenza, poiché la pressatura a cui sono sottoposti i pannelli di compensato diminuisce la deformazione trasversale da schiacciamento. Infine, nel caso di trazioni o compressioni nel piano del pannello la deformazione subita dal pannello può essere facilmente calcolata sommando la rigidità dei vari strati.

Inoltre, il compensato presenta, grazie alla sua stratificazione, un'ottima resistenza tensile, che distribuisce le forze su un'area più grande riducendo le tensioni. In questo modo il compensato può sopportare, per brevi periodi, sovraccarichi fino al doppio della resistenza nominale. Grazie a questa particolare resistenza il compensato è in grado di fornire buone risposte alle azioni sismiche o ai forti venti.

Le resistenze sviluppate dal compensato risultano ancora più interessanti in relazione alla massa volumica del prodotto. Infatti, per quanto il peso specifico del compensato sia in generale più elevato di quella del legno di cui è composto a causa della percentuale di adesivo e della pressione di incollaggio, grazie al suo design stratificato il compensato riesce a sviluppare resistenze più elevate e a raggiungere un rapporto resistenza/peso maggiore di quello del legno massiccio. Questa leggerezza lo rende ideale per la realizzazione di tavolati, muri sottoposti a taglio o travi reticolari.

¹⁹ Redatto sulla base di: Uzielli Luca, Il manuale del legno strutturale, Mancosu, Roma 2001

Dal punto di vista strutturale una caratteristica non trascurabile è quella del creep, ovvero il continuo aumento, nel corso di periodi molto lunghi, della deformazione del compensato qualora questo sia sottoposto ad un carico costante. Nel caso del compensato, e del legno in generale, una delle cause del creep risiede anche nell'umidità contenuta nel legno. Inoltre, questo fenomeno è leggermente più rilevante di quanto non lo sia per il legno massiccio a causa della presenza nel compensato delle linee di colla, che per quanto solidificate conservano una certa elasticità.

Una delle proprietà più importanti per il compensato, che ne guida la scelta tra le varie tipologie disponibili in commercio è la resistenza all'umidità. Come nel caso del legno massiccio anche nel caso del compensato la percentuale di umidità contenuta nel pannello dipende dalla igroscopicità del legno che compone gli sfogliati, ovvero dalla variazione dell'acqua contenute nelle fibre del legno al variare delle condizioni igroscopiche dell'aria circostante. Tuttavia, nel caso del compensato, l'umidità di equilibrio è leggermente inferiore rispetto a quella del rispettivo legno di derivazione, in virtù della presenza delle linee di colla. Infatti, la scelta del tipo di adesivo utilizzato per produrre i pannelli contribuisce fortemente all'aumento della resistenza all'umidità del compensato.

La percentuale di umidità contenuta nel legno del compensato è infatti fondamentale nel determinare molte delle caratteristiche fisiche del compensato. Nel caso in cui il compensato assorba una quantità eccessiva di umidità questa può causare, nei casi più gravi, un indebolimento strutturale del pannello oltre che generare delle deformazioni. Sono proprio queste ultime a rappresentare un possibile ostacolo alla costruzione degli edifici in compensato. Infatti, per quanto la stratificazione degli sfogliati faccia sì che le deformazioni provocate siano minime e uniformi lungo le due dimensioni del piano, circa 0,02% di variazione dimensionale per ogni 1% di variazione dell'umidità contenuta nel pannello, la deformazione perpendicolare al piano del pannello è simile a quello del legno massiccio. Questo rigonfiamento, o ritiro, radiale, che modifica gli spessori del pannello, qualora accada durante la fase di montaggio, è spesso la causa di rallentamenti nella costruzione, poiché rende impossibile procedere all'assemblaggio degli elementi, che, realizzati con precisione digitale, sono studiati per essere montati senza alcuna tolleranza, e non sopporta dunque queste deformazioni dimensionali. Per queste ragioni nei progetti di dimensioni maggiori, non assemblati in fabbrica, spesso si provvede a coprire il sito con teli impermeabili. Nel caso, invece, di progetti più piccoli, molto spesso, i pannelli di compensato vengono trattati con uno strato di vernice idrorepellente, che ne aumenta la resistenza e l'impermeabilità.

Assicurarsi che il compensato sia ben impermeabilizzato e protetto dal contatto dell'acqua è essenziale nel determinare la durabilità del materiale, che di norma è garantito, dai produttori per sessant'anni, ma che se ben protetto può durare molto più a lungo. Il controllo del livello d'umidità è anche fondamentale al fine di evitare attacchi da parte di funghi e insetti xilofagi. In generale comunque si può affermare che la durabilità del compensato, a differenza del legno massiccio, dipende molto poco dalla specie arborea, ma da: lo spessore degli sfogliati, la composizione del pannello, le proprietà dell'adesivo e la sua quantità. Un aumento della durabilità può essere ottenuto impiegando per gli sfogliati più resistenti, oppure mediante un trattamento di protezione chimica. L'uso di particolari trattamenti superficiali può infatti donare al compensato delle buone resistenze chimiche o al fuoco, anche se in questo caso molto spesso si preferisce associare al solo compensato altri materiali come avviene in prodotti come il cartongesso o fibrocemento.

Tutte queste proprietà, unite alla facilità d'uso, rendono il compensato un materiale estremamente vario e flessibile nell'utilizzo. A differenza del legno tradizionale, infatti, il compensato può essere fabbricato per rispondere a qualunque esigenza semplicemente modificando il numero di sfogliati e il tipo di legno e collante usato, il tutto per ottenere un materiale forte, leggero e durevole, adatto ad essere utilizzato in sistemi a secco, e facilmente riutilizzabile.

2.2 Lo strumento: le macchine CNC

I macchinari a controllo numerico, detti anche CNC, computer numerical control, sono una famiglia di macchine utensili automatizzate. In cui le operazioni sono studiate e preimpostate a tavolino attraverso dei software specifici e i movimenti della macchina sono controllati da un dispositivo elettronico integrato. Questa caratteristica permette di svolgere lavorazioni di grande precisione raggiungendo alti standard qualitativi contenendo allo stesso tempo i tempi di produzione. La tecnologia CNC è applicabile ad una grande varietà di macchinari e soprattutto è utilizzabile sia nella più tradizionale fabbricazione sottrattiva, in cui i pezzi vengono prodotti scavando un blocco più grande di materiale, sia nella più avanzata fabbricazione additiva, in cui tramite processi di stampa 3D i pezzi sono creati tramite il deposito di filamenti fusi di materiale.

I macchinari CNC rappresentano un'evoluzione delle precedenti macchine CN, che non consentivano il controllo delle operazioni da parte del computer. Usate inizialmente solo per lavorazioni meccaniche di alta precisione, si sono diffusi su larga scala a partire dagli anni '80 e sono oggi molto diffuse. Grazie alla loro flessibilità d'impiego, infatti, sono utilizzate in quasi ogni campo: dall'industria dei grandi trasporti fino al modellismo, dalla falegnameria alla costruzione di circuiti stampati.²⁰

Nel settore delle costruzioni la tecnologia CNC è già utilizzata da parte di alcune aziende giapponesi impiegate nella produzione dei prefabbricati, assieme ai concetti di produzione flessibile e personalizzazione, e riducendo così l'intervento umano alla sola supervisione. Sono dunque stati utilizzati principalmente per realizzare villette mono-famigliari per il mercato giapponese di alto livello, che vengono fabbricate off-site e montate in sito.

Le macchine a controllo numerico non sono da confondersi con i più moderni ed evoluti bracci o sistemi robotici, che sono di fatto un'ulteriore evoluzione della tecnologia CNC. I macchinari CNC, infatti, sono automatizzati a priori, nello spazio astratto del computer, non sono perciò in grado d'interagire con l'ambiente esterno in modo autonomo in caso di collisioni o imprevisti. Per questo motivo le operazioni svolte dal macchinario CNC devono sempre essere supervisionate da un addetto, il quale, oltre ad impostare il programma e preparare i pezzi da lavorare, interviene in caso di problemi o correzioni nella lavorazione. I moderni robot invece si basano su una rete di sensori che analizzano l'ambiente circostante e sono così in grado di adattarsi ad ogni modifica in esso e ad eventuali ostacoli improvvisi.

Il funzionamento

Le macchine a controllo numerico possono essere considerate come delle tradizionali macchine utensili, come ad esempio: fresatrici, piegatrici, punzonatrici, che anziché essere utilizzate da un addetto sono attivate da un computer esterno. Il processo produttivo impiegato perciò non subisce alcun tipo di modifica, e gli stessi macchinari CNC sono costruiti in modo molto simile, presentando solo alcune aggiunte, ai corrispettivi macchinari ad uso manuale. Tuttavia, a differenza dei macchinari tradizionali, le macchine a controllo numerico non sono composte solamente da componenti fisici, ma fanno anche un grande affidamento su componenti software. Sono questi programmi infatti a guidare le operazioni della macchina, creando una comunicazione diretta tra i software di progettazione e il computer che controlla la macchina. I software utilizzati per la fabbricazione dei pezzi sono di due tipi, i software CAD e i software CAM, e vanno utilizzati entrambi in sequenza. Nel caso di macchine CNC operanti tramite processi di fabbricazione additiva, i software CAM possono essere sostituiti da programmi più semplici chiamati Slicer.

²⁰Voce "macchina a controllo numerico" sul sito: it.wikipedia.org/wiki/Macchina_a_controllo_numerico

La prima famiglia di programmi sono i CAD, Computer Aided Design, che sono comunemente utilizzati dagli studi tecnici per eseguire i disegni di progetto. Questi programmi consentono di realizzare modelli vettoriali in due e tre dimensioni. Una volta realizzato il modello dell'elemento che si vuole fabbricare è necessario utilizzare un software CAM, Computer Aided Manufacturing. Questi software analizzano i modelli geometrici tridimensionali, inserendo i disegni CAD all'interno di uno spazio cartesiano, da cui vengono estrapolate le coordinate di ogni punto. A partire da queste i software CAM deducono una sequenza di percorsi utensile, che devono essere seguiti dalla macchina al fine di realizzare l'elemento. Questo processo progettuale è stato notevolmente semplificato negli ultimi anni grazie allo sviluppo di nuovi programmi capaci di unire al loro interno la parte CAD e la parte CAM, permettendo così di modellare le parti e programmare i percorsi utensile utilizzando un solo programma.

I software CAM svolgono inoltre l'importante funzione di traduzione dal linguaggio del software al linguaggio della macchina, affinché questa possa interpretarli correttamente. Il linguaggio comunemente utilizzato dalla macchina per leggere il set d'istruzioni è detto G-code, detto anche standard ISO, in riferimento allo standard ISO 6983, che ne definisce la grammatica, stabilendo una base comune a tutte le macchine CNC. Questo però solo in teoria dato che in pratica tutti i costruttori modificano e ampliano le funzioni previste dalla norma ISO facendo sì che si crei una moltitudine di "dialetti" diversi, per i quali la normativa è solo una linea guida, che va integrata con i manuali forniti dai costruttori. È importante notare come, per quanto il passaggio dal modello tridimensionale al G-code venga compiuto attraverso i software CAM, lo studio e la capacità di programmare, da parte dell'operatore o progettista, direttamente in G-code può rivelarsi molto utile, sia nel caso di pezzi semplici, per i quali la modellazione impiegherebbe più tempo della programmazione diretta, sia per alcune operazioni particolari, non sopportate dai software o temporanee, in quanto dipendenti da un cambio di strumentazione. Accanto a questo linguaggio principale esistono poi numerosi linguaggi di programmazione proprietari.

Le istruzioni necessarie a creare il pezzo arrivano dunque alla macchina sotto forma di sequenza numerica. Il computer della macchina, detto anche controller, legge il G-code e ne estrapola tutte le informazioni necessarie alla fabbricazione. Innanzitutto, i numeri sono convertiti nelle coordinate di un grafico a tre dimensioni XYZ, grazie alle quali la macchina riesce a capire esattamente dove posizionarsi, muovendo i suoi assi con movimenti precisi, ma anche informazioni più specifiche come il movimento dell'estrusore, nella stampa 3D, o la velocità di rotazione, nel caso delle frese. Molto spesso nei macchinari di ultima generazione il computer di controllo è diviso in due parti: una posta a lato della macchina nell'armadio elettrico, e una separata, esterna alla macchina, alla portata dell'operatore, che mostra a video le indicazioni e i menu necessari per il controllo e permettendo il collegamento con un eventuale computer esterno.

il computer si preoccupa anche di monitorare in tempo reale la posizione e il movimento dei vari assi analizzando i dati che gli sono inviati dagli encoder. Ogni asse è dotato dunque del proprio encoder che permettono al controllo di conoscere in ogni istante la posizione della testa di lavorazione rispetto al pezzo. Esistono diversi tipi di encoder, a seconda del funzionamento: a righe ottiche o rotativi, e a seconda del loro sistema di riferimento: assoluti o relativi.

È importante tenere presente che la precisione dei macchinari a controllo numerico, soprattutto per le lavorazioni a bassa tolleranza, dipende fortemente dall'accuratezza con cui, durante la fase di programmazione CAM, si sono definiti e misurati gli strumenti e gli inserti che saranno utilizzati dalla macchina. Il computer che gestisce i processi di fabbricazione a controllo numerico, infatti, non vede ciò che realmente accade, ma ne ha solamente un'idea astratta, basata sui dati che gli sono stati forniti. Perciò, qualora la lunghezza o il diametro degli strumenti di taglio dovesse essere diverso da quello indicato, il pezzo sarà errato e non conforme al progetto.

Tipologie di macchine

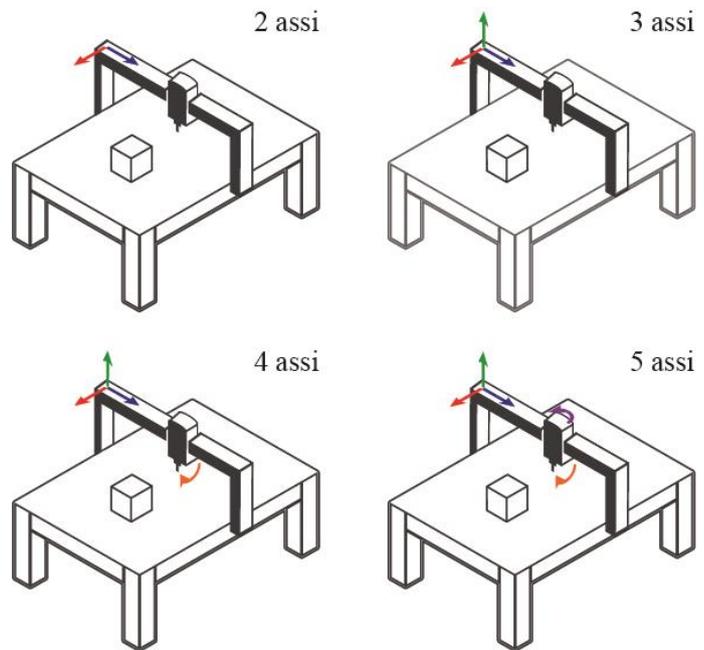
Il panorama delle macchine CNC disponibili sul mercato è molto vasto. Le applicazioni più frequenti di questa tecnologia sono tre: le foratrici, il tornio, e le fresatrici. La fresatrice è la macchina a controllo numerico più comune, essendo utilizzata sia a livello industriale che a livello artigianale. Nelle frese il materiale viene fissato al piano di lavoro e, tramite la rotazione dell'utensile, viene modellato asportando il materiale in eccesso. In modo analogo, le foratrici che però permettono solamente di forare l'elemento. Contrariamente nei torni è il blocco di materiale da lavorare che viene fatto ruotare contro l'utensile da taglio, che rimane fisso. Oltre a queste tre applicazioni tradizionali, il controllo numerico è utilizzato anche da altri tipi di macchine con tecnologie e impieghi diversi: dalle più tradizionali punzonatrici e piegatrici alle macchine da taglio più moderne: al laser, al plasma, a getto d'acqua o a filo caldo. Infine, diffuse a partire dagli ultimi anni, i macchinari di stampa 3D.



In senso orario a partire da in alto a destra: una fresa a due assi, una macchina di taglio al plasma, una piccola stampante 3D a tre assi, un tornio.

La caratteristica più importante, nel definire una macchina CNC, è il numero di assi di cui essa dispone, ad ogni asse corrisponde infatti un grado di libertà. Perciò maggiore è il numero di assi maggiore saranno le direzioni lungo cui l'utensile potrà muoversi e ruotare; di conseguenza sarà possibile per la macchina eseguire lavorazioni geometricamente più complesse.

Le macchine CNC a 2 assi consentono movimenti solo su X e Y, ciò significa che non permettono nessuna variazione di profondità, ma solo lavorazioni piane. Per i pezzi che richiedono anche una lavorazione in profondità è necessario un macchinario a 2,5 o 3 assi, entrambe le tipologie consentono all'utensile di muoversi verticalmente, nel primo il movimento è però limitato e può procedere solo a passi discreti e mentre il movimento sugli altri assi è fermo. Le macchine CNC a 3 assi invece possono lavorare simultaneamente in altezza, larghezza e profondità, e sono così ottime per lavorazioni su superfici a forma libera. Nel caso delle macchine a 4 assi viene aggiunto il movimento di rotazione dell'utensile o del pezzo da lavorare, questa rotazione, a seconda del macchinario, può essere interpolata con gli altri tre assi o avvenire solo quando gli altri sono fermi. Le macchine a 5 assi invece uniscono sia la rotazione della testa porta utensile che del pezzo in lavorazione. Questi macchinari possono realizzare praticamente qualsiasi tipo di sagoma purché la concavità del pezzo non lo porti a cozzare contro l'utensile. Queste macchine consentono di lavorare anche su pezzi di grandissime dimensioni, ad esempio turbine, eliche navali e scocche per motori, ma sono molto costose.



Schematizzazione degli assi di una fresa CNC.

Le frese più comuni sono a 3 assi o la versione più economica a 2,5 assi, ma in commercio si trovano anche macchine a 4 o 5 assi. Per i torni generalmente si va da 2 ai 5 assi, mentre le macchine punzonatrici o per il taglio si limitano ai 2 o 3 assi. Esistono inoltre macchine particolari con una maggiore quantità di assi come le piegatrici e le pannellatrici che possono arrivare rispettivamente a 11 e 24 assi. Nell'industria dei trasporti è invece possibile trovare macchine speciali che combinano due testate indipendenti, per un totale di 8 o 10 assi, in modo da velocizzare le operazioni. Infine, le stampanti 3D sono in grado di realizzare una qualunque forma tridimensionale immaginabile con 3 assi, cosa non sempre possibile per le frese che nel caso di profili sferici o concavi che richiedono macchine a 4 assi. Questi consentono d'inclinare l'utensile rispetto a tutti i piani consentendo di realizzare figure complesse e organiche, difficilmente ottenibili con lavorazioni manuali. Le teste inclinabili inoltre velocizzano la lavorazione consentendo di sfruttare a pieno l'utensile, evitando di utilizzare la parte dell'utensile a velocità zero, il centro di rotazione della fresa.

Al fine di produrre sistemi costruttivi a partire dai pannelli di compensato le macchine a controllo numerico utilizzate sono fresatrici. Per sottrarre materiale vengono utilizzate degli utensili: frese e bulini. Queste sono disponibili sul mercato in grande varietà per ogni tipo di profilo da intagliare e materiale da lavorare, ognuno con i suoi parametri di utilizzo, come la profondità, la velocità di rotazione, la temperatura e l'avanzamento, al fine di prolungarne il più possibile la durata e non rovinare il materiale che si intende lavorare. Le frese più comuni sono a profilo elicoidale, ma esistono anche frese sferiche e semisferiche.

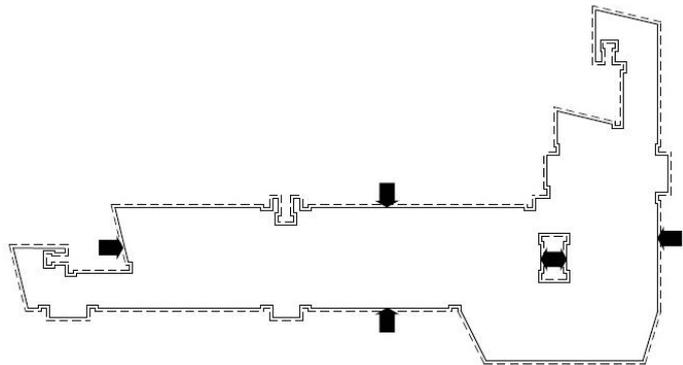
Caratteristiche e problematiche delle lavorazioni a controllo numerico

L'adozione di macchine a controllo numerico portano dunque benefici sia dal punto di vista della velocità di realizzazione dei pezzi, sia per quanto riguarda la qualità di fabbricazione.

Non è possibile dare una indicazione precisa sulla durata e la velocità di taglio, in quanto questa dipende fortemente sia dal materiale e dalla lavorazione da compiere sia da altri importanti dati tecnici come la profondità della singola passata e la velocità di rotazione della fresa. Si può tuttavia indicare, come riferimento, l'intervallo che va dagli 80 ai 300 cm al minuto. Il settaggio della velocità corretta è un'azione molto importante poiché da questa dipendono sia la qualità del taglio, che potrebbe risultare ruvido o bruciacciato, che la durabilità della fresa, che potrebbe perfino rompersi.

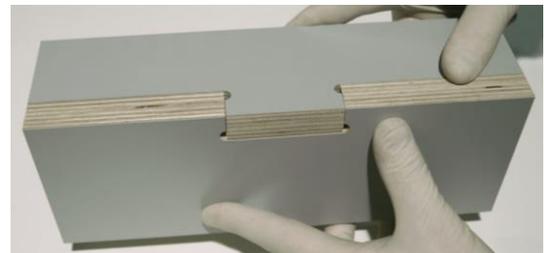
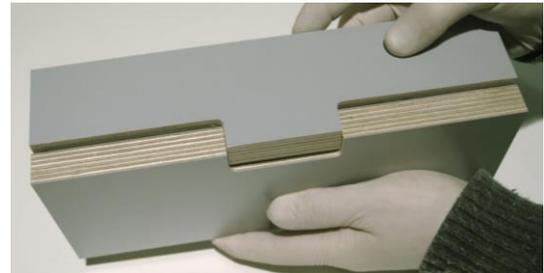
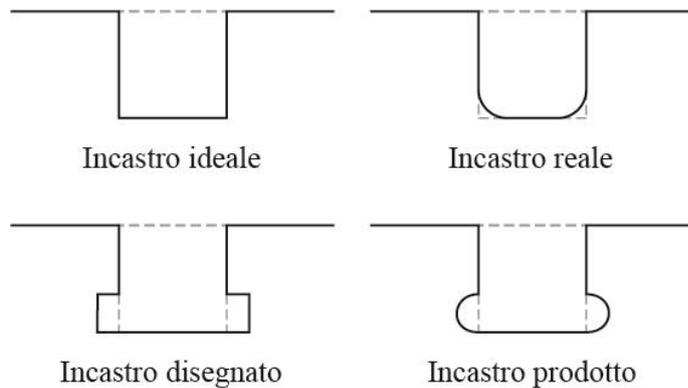
Allo stesso tempo la precisione e la perfetta aderenza al progetto digitale consentono di ottenere elementi di una qualità e soprattutto di un'uniformità molto maggiore rispetto a quella che si otterrebbe con una lavorazione manuale. Questi benefici, contrariamente a quanto si potrebbe pensare, si fanno sempre più rilevanti più le operazioni richieste per la fabbricazione sono complesse, i macchinari più avanzati, ad esempio, ruotando la testina lungo due assi, possono realizzare tagli inclinati e modellare grandi superfici curve o cavità molto strette difficilmente realizzabili con una realizzazione manuale. In questi casi il guadagno in termini di tempo e precisione rispetto alla produzione manuale è veramente incolmabile. Inoltre, la precisione dei macchinari a controllo numerico è tale da rendere, nell'ambito delle costruzioni e in molti altri casi, trascurabile l'errore di misura dei vari elementi. Basta infatti una comune macchina CNC di qualità media per modellare i pezzi con la precisione di un centesimo di millimetro, mentre le macchine migliori possono arrivare anche al millesimo di millimetro di tolleranza.

Paradossalmente però una precisione così elevata può anche essere causa di problemi e difficoltà in fase di montaggio, soprattutto nel caso di strutture ad incastro. Infatti, per quanto la tecnologia digitale consenta di realizzare incastri e connessioni perfettamente tangenti, questi sono spesso impossibili, o troppo complessi da realizzare nella realtà per via dei loro incastri troppo stretti. Inoltre, le stesse dimensioni dei pezzi d'assemblare possono variare a seconda del materiale e delle condizioni ambientali a cui sono sottoposti. Perciò nell'ambito delle costruzioni è necessario rinunciare, almeno in parte a questa precisione quasi assoluta, e introdurre, durante la fase progettuale, delle tolleranze. Per fare questo i profili degli elementi da produrre sono ristretti, tramite degli offset, di un valore solitamente compreso tra 0,1 e 0,3mm. I pezzi prodotti sono dunque più piccoli e tolleranti di quelli ideali, in questo modo si ottiene una maggiore facilità e velocità d'assemblaggio, senza intaccare la qualità della connessione.



L'immagine mostra schematicamente come l'elemento da fresare sia stato rimpicciolito, tramite offset, al fine d'introdurre una tolleranza costruttiva.

La caratteristica delle lavorazioni eseguite con le macchine a controllo numerico che più influenza la forma dei pezzi lavorati è il diametro minimo della fresa che impedisce di realizzare angoli vivi. Gli angoli appaiono così sempre stondati e impediscono di creare connessioni solide negli incastri. Per evitare tutto ciò è necessario inserire di progetto degli “scarichi”, chiamati dogbones in inglese. In questo modo la fresa effettuerà dei tagli più lunghi per poi tornare in dietro ed effettuare così un angolo senza ostruzioni interne. Un’ultima accortezza riguardo agli angoli è su come disegnare gli scarichi, infatti non è necessario modellarli come elementi curvilinei aventi il diametro della fresa, che potrebbero appesantire troppo il file, ma come semplici rettangoli, sarà poi la macchina stessa a tagliarli come elementi curvi.



Sopra: uno schema che mostra la problematica dei dogbones e come vengono realizzati.

A Lato: le immagini mostrano un incastro con e senza dogbones.

Infine, un ulteriore fattore che può influire negativamente sulla qualità della lavorazione è la corretta collocazione del macchinario, un aspetto trascurabile per le produzioni in fabbrica, ma che diventa rilevante per quei sistemi che prevedono di collocare l’impianto produttivo direttamente in sito. In questo caso infatti è importante livellare bene la macchina al fine di consentire una corretta lavorazione, e garantire una temperatura dell’ambiente interno di almeno dodici gradi, per non rischiare che la macchina si danneggi.

3 La metodologia DfMA

3.1 La produzione di edifici

Nonostante le grandi innovazioni dell'ultimo secolo, come l'introduzione del cemento armato e dell'acciaio, il modo in cui ci si approccia alla costruzione ha subito pochi cambiamenti. Questo non solo dal punto di vista fisico e dei metodi adoperati, ma anche dal punto di vista della catena di distribuzione dietro agli edifici e dal punto di vista del modello di business dietro queste.

La mancanza di questo cambiamento fa sì che i moderni sistemi di costruzione appaiano in difficoltà di fronte alle sfide poste dalla contemporaneità: il sempre crescente bisogno di nuove costruzioni, l'esigenza di costruzioni temporanee e immediate, e la ricerca di materiali e costruzioni ambientalmente ed energeticamente sostenibili. Tuttavia, questi sistemi si portano anche dietro, fin dalla nascita, delle inefficienze che in passato erano trascurabili, e che nei sistemi moderni rappresentavano già un miglioramento rispetto a quanto avveniva nei sistemi tradizionali di costruzione, in muratura o Blockhaus, ma che ora, anche in relazione alle nuove possibilità offerte da digitale, assumono una certa rilevanza.

Innanzitutto, i moderni sistemi costruttivi richiedono lunghi tempi di costruzione. Per una casa, ad esempio, sono necessari dai sei ai nove mesi di lavoro a cui si devono sommare circa un anno di tempo per la progettazione e le autorizzazioni. I tempi proibitivi sono sicuramente dettati in gran parte da questioni tecniche, come ad esempio i tempi di stagionatura del cemento. Tuttavia, ad aggravare la situazione si aggiunge anche la complessità delle costruzioni moderne. Nei cantieri vengono infatti compiute un gran numero di lavorazioni diverse, che si moltiplicano in modo esponenziale all'aumentare del numero di materiali previsti. Tutta questa complessità ha un impatto considerevole sui tempi di cantiere oltre che richiedere manodopera d'esperienza, più costosa. La lentezza di questi sistemi costruttivi però non dipende solamente dalla fase di cantiere. Infatti, anche la fase di progettazione, comunemente ritenuta più avanzata a livello tecnologico e metodologico, spesso non sfrutta al massimo le potenzialità dei nuovi software digitali e l'automatizzazione da essi concessa, progettando gli edifici come casi unici e dovendo così ripartire da zero ogni volta.

La seconda problematica è che i sistemi moderni non risolvono un problema storicamente legato alle costruzioni ovvero quello dell'imprevedibilità. Causata da diversi fattori tra cui la complessità delle lavorazioni, che possono causare ritardi o difetti che rischiano di creare altri ritardi a cascata. Questa imprevedibilità oltre che sui tempi si riflette anche sui costi di costruzione. Statistiche effettuate sui dati del settore pubblico nel Regno Unito indicano che per ogni sterlina spesa in edifici, solo 51,3 pence finiscono nell'edificio stesso mentre il resto viene speso soprattutto nel processo e nel rischio.²¹ Ciò è un grande deterrente alla costruzione da parte di piccole imprese o autocostruttori, che potrebbero permettersi di costruire un edificio, ma non possono assumersi i rischi derivati dalla costruzione. La produzione di nuovi edifici è perciò portata avanti solo da un esiguo numero di persone ed è guidata dal desiderio del profitto e non dal bisogno di un'abitazione. La logica speculativa porta dunque alla costruzione di edifici di bassa qualità.

Di fronte a questi limiti che si riscontrano nel processo costruttivo dei sistemi comunemente usati si è diffusa negli architetti una fascinazione, sempre ricorrente, verso la prefabbricazione. La risposta ai problemi di processo infatti è stata individuata, fin da subito, nell'estensione dell'approccio industriale al campo delle costruzioni.

²¹ Centre for digital built Britain, *Platforms: bridging the gap between construction + manufacturing*, univeristy of Cambridge, 2018

A differenza degli edifici, infatti, i prodotti industriali sono caratterizzati da un processo di produzione dominato da una razionalità scientifica e misurabile. Tutto è prevedibile e previsto, tutto è studiato e controllato in modo da garantire la conformità del prodotto finale al progetto iniziale. Non ci sono ritardi, imprevisti o modifiche. Inoltre, il prodotto è realizzato con estrema velocità, suddividendo l'intero processo in una serie di operazioni elementari. Appare dunque evidente per quale ragione questo processo, che dà pieni poteri all'architetto, consentendogli di controllarne ogni punto, e che dona la tranquillità della certezza ai clienti, sia così desiderato. Si possono citare gli sforzi più emblematici svolti in questa direzione dai moderni come: le case prefabbricate di Le Corbusier, casa Dom-ino 1914 e Citrohan 1922, o gli studi del Bauhaus e casa Sommerfeld 1920, dalle Usonian houses di Wright, ai più sperimentali Jean Prouvé e Buckminster Fuller.

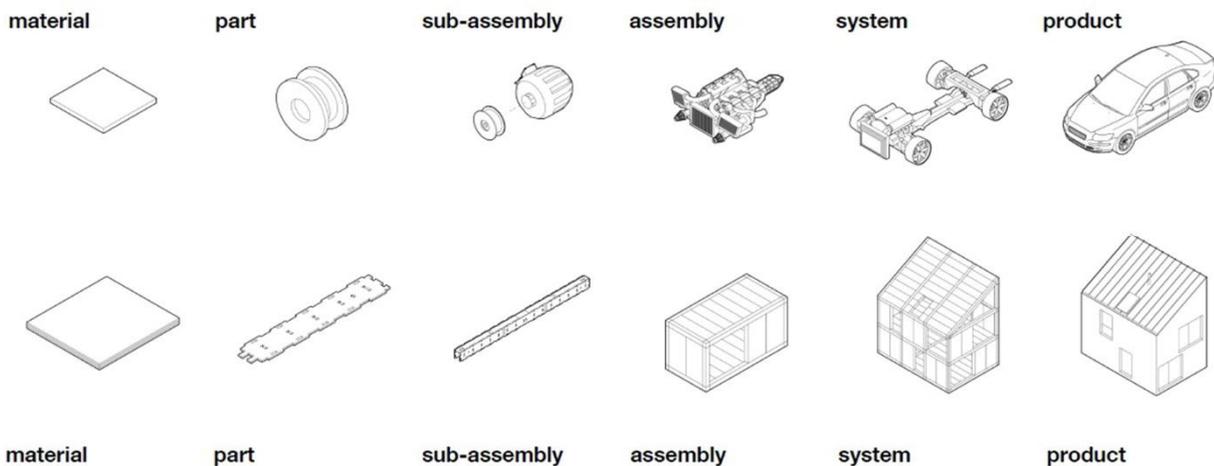
Tuttavia, le case prefabbricate non hanno mai conquistato grandi fette di mercato e il loro maggiore utilizzo resta legato alle strutture post-catastrofi. Questo è dovuto al fatto che la prefabbricazione non sia mai riuscita veramente a convincere e conquistare quelli che dovranno essere i clienti finali. Gli edifici prefabbricati sono sempre stati percepiti come poco personalizzabili, e di poca qualità. Questa impressione è probabilmente dovuta a due fattori: il fatto che gli edifici prefabbricati sono realizzati spesso prima di conoscere il cliente e non fatti "su misura" per lui, e la velocità con cui viene poi eseguito il montaggio, che sembra non consentire alcun tipo di dedizione e controllo della qualità. Inoltre, anche dal punto di vista produttivo le strutture prefabbricate non rappresentano un investimento attrattivo, in quanto impiantare uno stabilimento produttivo capace di produrre edifici prefabbricati richiede, da parte dell'azienda, un grande investimento iniziale. Ciò crea un circolo vizioso in cui le aziende non investono a causa dello scarso interesse del mercato e il pubblico, che per questo non trova una sufficiente varietà di scelta, si disinteressa. Negli ultimi anni però, grazie allo sviluppo e alla diffusione di nuove tecnologie e nuovi software e all'adozione di un particolare approccio progettuale è possibile immaginare scenari di produzione diversi, che non richiedano ingenti investimenti iniziali. Attualmente infatti sono presenti sul mercato diverse realtà produttive che, sfruttando questo nuovo approccio, stanno facendo tornare attrattiva l'idea della costruzione prefabbricata.

3.2 Il sistema DfMA

Molte delle nuove aziende che si occupano di costruzione prefabbricata nascono dall'idea di applicare, al mondo delle costruzioni, il processo produttivo usato per tutti i prodotti d'uso comune, che richiedono di essere prodotti in tempi rapidi senza rinunciare alla qualità, come automobili o smartphone, per la produzione di edifici. Questo approccio è nato come unione di due metodologie progettuali preesistenti il Design for manufacture, progetto per la produzione, che mira a semplificare la fabbricazione delle parti, e il Design for assembly, progetto per l'assemblaggio, che è una metodologia progettuale volta a facilitare l'assemblaggio degli elementi. Questo approccio è quindi chiamato Design for manufacture & assembly, progetto per la fabbricazione e l'assemblaggio, in sigla DfMA.²²

Per quanto a differenza dei prodotti comuni, gli edifici non siano riducibili ad un unico modello universale, poiché ogni abitazione deve rispondere ad esigenze diverse. Tuttavia, è possibile sviluppare sistemi standardizzati, tipo LEGO, capaci di rendere universali e modulari i componenti di un edificio, permettendo comunque la totale personalizzazione nell'assemblaggio di quei componenti. Si può paragonare questo alla creazione di un alfabeto composto da elementi limitati e basilari, ma che assemblati creano un'infinità di forme, capaci di soddisfare ogni esigenza.

²²Voce "DfMA" sul sito: [www.designingbuildings.co.uk/wiki/Design_for_Manufacture_and_Assembly_\(DfMA\)](http://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Design_for_Manufacture_and_Assembly_(DfMA))



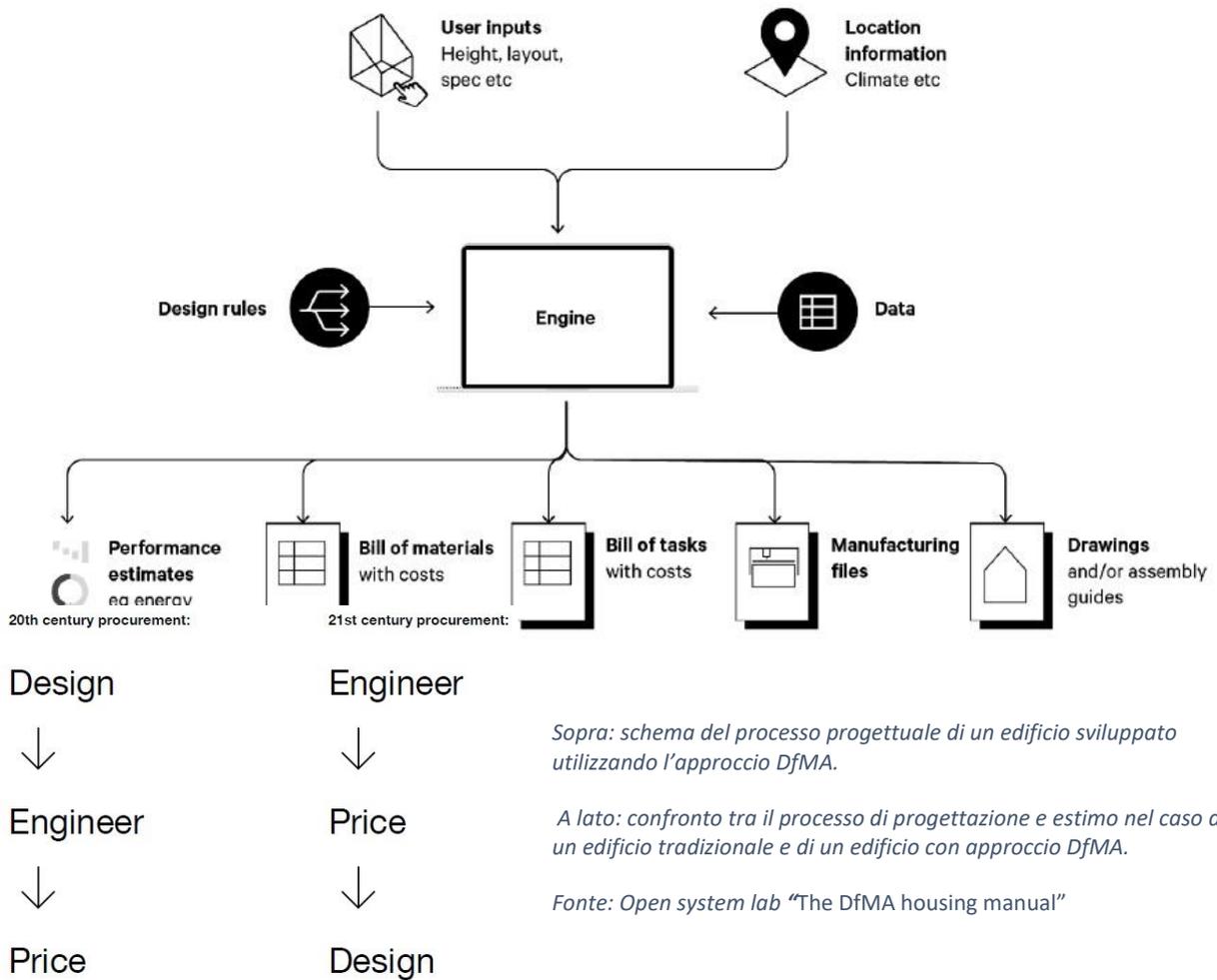
*Lo schema mette in luce come si possa suddividere un edificio in un insieme di componenti standard, come un'automobile.
Fonte: Open system lab "The DfMA housing manual"*

L'edificio, inteso come prodotto, deve quindi venire scomposto in sottocomponenti suddivisi a loro volta in singole parti modulari. Questa suddivisione ha il pregio di ridurre la complessità e la varietà dei "prodotti" finali in elementi base altamente standardizzabili. È quindi possibile avere una produzione molto più snella delle singole parti. In tal modo l'azienda può concentrarsi su un minor numero di linee produttive diminuendo l'investimento iniziale necessario, ma consentendo allo stesso tempo di avere produzioni più precise, con una qualità maggiore, e molto più veloci.

Un'altra ricaduta positiva derivata dalla scomposizione dell'edificio in elementi base è rintracciabile nel trasporto dei prodotti. Infatti, essendo gli elementi base degli elementi piani questi possono essere spediti come dei flat-pack, pacchi piatti, maneggevoli e poco ingombranti. Un esempio conosciuto è quello dei mobili Ikea che sono consegnati in pacchi di dimensioni ridotte. Trasportabili con pressoché qualunque mezzo, i flat-pack permettono di raggiungere luoghi normalmente preclusi ai tradizionali edifici prefabbricati, assemblati in fabbrica e consegnati in buona parte già montati facendo ricorso a tir e gru.

Le parti modulari sono inoltre progettate per essere assemblate il più velocemente e facilmente possibile. Come regola generale si può affermare che più i singoli componenti dell'edificio, ad esempio i portali, sono indipendenti dal sistema complessivo dell'edificio più l'assemblaggio è rapido, in quanto può avvenire in contemporanea e indipendentemente dallo stato del resto della costruzione e quindi non è soggetto a rallentamenti provocati da imprevisti esterni. Questa indipendenza delle parti è anche molto utile dal punto di vista della manutenzione dove, date le diverse durate di vita dei vari elementi, che richiedono di essere mantenuti in momenti diversi, è molto più funzionale poter accedere ai vari elementi separatamente e agire dunque in modo diretto e immediato sull'elemento da sostituire. Inoltre, l'approccio DfMA rendendo più facile e veloce la costruzione ha il grande pregio di facilitare il progetto e limitare i costi, riducendo i ritardi e le incertezze.

Il secondo punto cardine dei sistemi DfMA è l'importanza data dall'uso del digitale durante tutte le fasi: da quella progettuale a quella di fabbricazione e infine nella fase di manutenzione. Nella fase di progetto tradizionalmente si procede a partire dall'idea compositiva e formale dell'edificio a cui fa poi seguito una riflessione costruttiva, su come questo verrà realizzato concretamente, e che viene effettuata in modo specifico per ogni progetto, ripartendo dunque ogni volta da zero. Solo dopo tutte queste fasi si poteva avere un'idea dei costi di costruzione dell'edificio.



Nei sistemi DfMA invece si vuole invertire questo normale processo progettuale. Inizialmente la squadra di progetto si occupa di sviluppare una serie di pre-progetti standardizzati e parametrici, già definiti in ogni dettaglio costruttivo, e dei quali è già stato calcolato il prezzo. Questi pre-progetti sono poi personalizzati in base alle esigenze dei clienti e del sito, sapendo già come ogni modifica compositiva andrà a modificare il prezzo finale e i processi costruttivi. Quindi il processo DfMA consente innanzitutto di aumentare la trasparenza dei costi, certi e dettagliati fin dall'inizio, ma anche di migliorare la produttività poiché non è più necessario ridefinire i costi e le tecniche costruttive di ogni singola soluzione progettuale ma basterà riferirsi ai pre-progetti già calcolati. Tutto ciò è ovviamente possibile solamente grazie ai moderni software parametrici, che permettono anche la creazione di computi e di check-list da seguire in fase di costruzione.

Inoltre, il digitale viene esteso anche alla fase di produzione degli elementi base. I macchinari ricevono le informazioni relative al pezzo da produrre direttamente in digitale evitando ogni passaggio di mano e interpretazione. Questo garantisce la totale corrispondenza tra il progetto e le parti, e di conseguenza l'edificio finito.

Infine, la progettazione digitale, producendo dei modelli 3D che sono l'esatta copia dell'edificio fisico che si è costruito, facilita di molto le operazioni di manutenzione. Il modello contiene infatti tutte le informazioni necessarie a sapere quali elementi vanno sostituiti e quando, oltre ad essere un riferimento sicuro per sapere dove è collocato l'elemento da sostituire e come raggiungerlo.

3.3 Principi della prefabbricazione DfMA

In virtù di tutte queste qualità il mondo delle costruzioni ha iniziato ad interessarsi all'approccio DfMA per realizzare abitazioni in grande quantità, come nelle comuni aziende di prefabbricati, ma ottimizzando la produzione e ottenendo standard qualitativi più alti, applicando l'innovazione digitale e il processo produttivo tipico dei prodotti di design per ottimizzare tutte le fasi di vita dell'edificio. Al fine di raggiungere questo scopo la progettazione degli edifici prefabbricati segue delle linee guida, qui indicate divise per le fasi di lavorazione.²³ Più la progettazione del prodotto riesce a rispondere a queste linee guida più l'approccio DfMA è completo ed efficace.

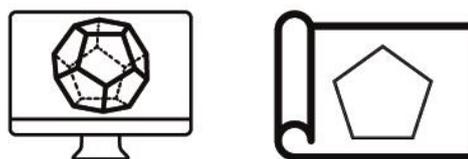
Per quanto la metodologia DfMA possa favorire e incentivare lo sviluppo degli edifici prefabbricati, è importante ricordare che, a differenza di altri tipi di prodotti, le costruzioni sono sottoposte a codici di regolamentazione molto più stringenti che variano da nazione a nazione. Perciò alla facilità di produzione si accompagna la difficoltà della certificazione. Per quanto in alcuni paesi può essere possibile una approvazione "per tipo" accompagnata da un controllo di qualità, anziché dover ricorrere all'ispezione di ogni singolo edificio.

Progettare per la fabbricazione: ovvero cercare di ridurre al minimo i costi, i tempi e il consumo di materiale durante la produzione, ma anche semplificare i processi produttivi e ridurre i trasporti, riducendo così i costi d'impianto della fabbrica e aumentandone l'efficienza e la precisione.

Progettare per ridurre le quantità: di tempo, costo, abilità, rischio, energia, materiali e sprechi, in tutte le fasi di vita. Prioritizzando la riduzione di quelli che rappresentano i limiti maggiori per il luogo in cui si costruisce.

Ad esempio, nelle località difficilmente accessibili, rendere gli elementi facili da maneggiare, e che si possano trasportare e assemblare con attrezzi economici.

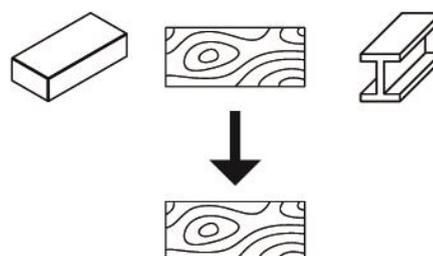
Prefabbricare la complessità: assemblare ogni parte che richiede particolari conoscenze o abilità in modo da trasferire la conoscenza dai lavoratori specializzati ai file digitali, apribili e replicabili da chiunque. Ad esempio usando macchine di taglio CNC e numerando le parti.



Usare meno tecniche possibili: ogni tecnica o procedura richiede tempo per essere imparata e appresa, o l'affidamento dei lavori ad operai specializzati.

Ad esempio usando metodi standard di incastro, anche se tra componenti differenti.

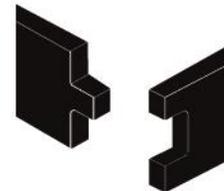
Ridurre al minimo i differenti materiali e componenti: la complessità, soprattutto a livello logistico, aumenta esponenzialmente all'aumentare dei materiali e degli elementi.



²³ Linee guida tratte da: Open system lab, The DfMA housing manual, versione 1.1 maggio 2019

Progettare per l'assemblaggio: creare componenti il più possibile "plug and play" in modo da ridurre i tempi, i costi, e la complessità dell'assemblaggio. Introdurre sistemi per l'arrivo just-in-time degli elementi, riducendo lo stoccaggio di materiali in sito. Ridurre al minimo l'uso di macchinari e permettere a diverse squadre di lavorare contemporaneamente in modo indipendente, senza trascurare, ma addirittura aumentando la sicurezza del cantiere.

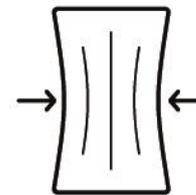
Usare processi a secco: i sistemi bagnati sono disordinati, inconsistenti, lenti e impossibili da disassemblare. Le parti invece devono essere incastrate, legate, inbullonate, o avvitate assieme. L'eccezioni possono essere vernici, o sigillature, facili da applicare, che si espandono per riempire le fughe.



Lo standard della precisione: tutti i componenti devono essere fabbricati con la giusta precisione, in modo che una volta montato l'edificio sia il più accurato possibile e che nessun elemento prefabbricato necessiti modifiche in sito. Di solito le parti hanno un'accuratezza di +/- 1mm ma possono essere anche inferiori.



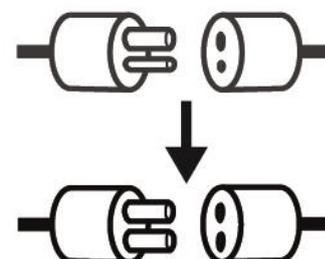
Progettare le tolleranze: progettare sistemi e componenti capaci di assorbire le piccole variazioni dimensionali che possono risultare dall'uso di materiali diversi, dall'espansione termica o igrometrica, dal vento o cedimenti. Usare elementi che, se assolutamente necessario, possano essere modificati. Ad esempio fatti di legno dolce in modo che possano essere martellati, piallati o tagliati.



Etichettare: ogni parte in modo che possano essere assemblate controllando il meno possibile i disegni.



Poka Yoke: progettare a prova d'errore, modellando le parti in modo che sia impossibile assemblarle nel verso sbagliato o rendendole simmetriche in modo che il verso non sia importante.



Progettare "canarini": inserire elementi visibili che indichino chiaramente se qualcosa è montato in modo sbagliato, mancante o non funziona correttamente.

Ad esempio con controlli di qualità binari. Una parte o è inserita o non è inserita, se è dentro è corretta, se no non è corretta, e se non è inserita la sua assenza è facilmente individuata.

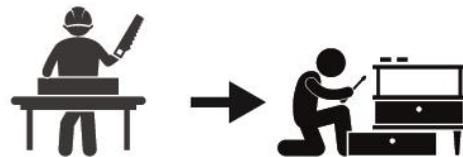
Tagliare fuori le dipendenze: evitare o separare completamente ogni compito che richiede abilità particolari e che possono ritardare la costruzione dell'edificio, come ad esempio la posa degli impianti o la realizzazione delle fondamenta.

Ad esempio rendendo gli impianti installabili in ogni momento o pre-assemblando i componenti complessi, in modo che siano pronti per essere semplicemente posati quando necessario.

Ridurre i rischi: cercando di minimizzare le procedure pericolose come il lavoro in altezza o con macchinari pericolosi, e progettando sistemi di sicurezza. Ad esempio alcuni edifici Dfma vengono forniti con corrimani provvisori già posati nei piani superiori, rimossi solo al completamento della costruzione.



Assumere montatori, non costruttori: molte imprese di costruzioni tradizionali troveranno difficile cambiare la loro mentalità e abitudine. Sarà più facile fare riferimento ad aziende di montatori.



Progettare per la manutenzione: sviluppare i sistemi in modo da renderli indipendenti così da rendere più semplice ed economico riparare e sostituire i componenti durante la vita dell'edificio. È fondamentale assicurare un facile accesso agli impianti, e l'indipendenza tra struttura e impianti.

Ordinare le parti ahead-of-time o just-in-time: in modo da non ritardare mai i lavori, questo può richiedere lo stockaggio in sito o in fabbrica, ma può essere minimizzato con la produzione just-in-time.



Componenti interoperabili: rendere possibili sistemi "product-agnostic" in cui è possibile sostituire uno specifico prodotto per uno alternativo se richiesto. Soprattutto quando si parla di fondazioni, poichè i diversi siti richiedono tipi diversi di fondazione.



Progettare per il disassemblaggio: come per l'assemblaggio anche l'eventuale disassemblaggio deve essere reso il più semplice e veloce possibile senza tuttavia trascurare la sicurezza in cantiere. Bisogna progettare inoltre in modo da permettere il riutilizzo di più elementi possibile.

Progettare per l'economia circolare: usare elementi che possono essere recuperati e riusati, completamente riciclabili o, nel peggiore dei casi, bruciabili per produrre energia. Etichettare le parti con le informazioni necessarie a rendere più facile la manutenzione o il riuso.



A queste linee guida, che si riferiscono alle fasi di vita dell'edificio, si aggiungono quattro ulteriori consigli utili. Lo scopo di questi è quello di aiutare le aziende a far sì che i loro edifici prefabbricati raggiungano e risultino appetibili al maggior numero di persone possibili, senza allo stesso tempo rinunciare alla capacità di andare in contro alle esigenze di tutti. Fondamentale è anche lo sviluppo continuo del prodotto e del processo produttivo, per il quale non è importante solamente avere nuove idee, ma anche sperimentarle e verificarne la validità.

Progettare per la nuova normalità: evitare di produrre case dall'aspetto prefabbricato o alternativo. Lavorare con la percezione culturale in modo da farle sembrare robuste e renderle desiderabili. Ad esempio scegliendo rivestimenti di pregio e coperture in accordo col contesto.



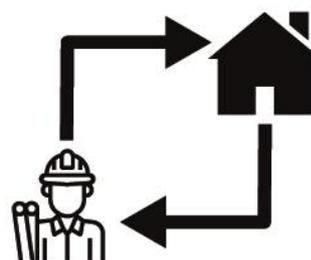
Creare un menù personalizzabile: i clienti raramente vogliono un'infinità di possibilità, meglio creare un menu di scelte, tutte funzionali, rendendo il prezzo trasparente, in modo che i clienti possano vedere subito le implicazioni delle loro decisioni, suddividendo i costi per componenti e al mq.



Kaizen: continuo miglioramento, incoraggiando chiunque lavori in qualunque punto della catena a suggerire miglioramenti.

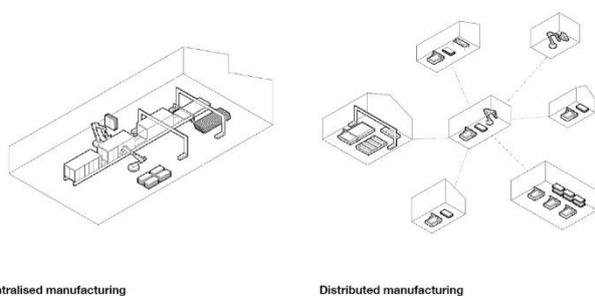


Raccogliere più feedback possibili: cercando di misurare e raccogliere i dati del funzionamento, sia durante la costruzione sia durante la sua vita, in modo da poter migliorare le versioni successive.



3.4 L'evoluzione in DfDMA

Il progetto per la fabbricazione e l'assemblaggio nella sua accezione più comune non si preoccupa di definire, coi suoi principi e linee guida, come debba essere l'impianto produttivo, e, per quanto l'approccio DfMA si è sviluppato, a partire dagli anni '70, all'interno di un contesto fatto principalmente di aziende centralizzate, questo è in linea teorica adattabile ad ogni tipo di produzione. Oggi tuttavia la metodologia DfMA si sta evolvendo in direzione di un approccio produttivo che sia distribuito sul territorio. Le radici di questa posizione si trovano nella massima Keynesiana "è più facile spedire ricette piuttosto che torte e biscotti" e l'obiettivo che ci si pone è il contenimento dei costi e delle emissioni derivate dai trasporti. Il DfMA diventa quindi DfDMA "design for distributed manufacture & assembly", progetto per la fabbricazione e assemblaggio distribuito. Questo nuovo approccio si basa, in modo ancora più deciso del precedente, sull'uso del digitale e del web, utilizzato come strumento imprescindibile per il trasferimento d'informazioni e per la comunicazione tra il progetto e la produzione, che, in questo caso, possono trovarsi anche a grandi distanze l'uno dall'altro.



Confronto tra una fabbricazione centralizzata e una distribuita.

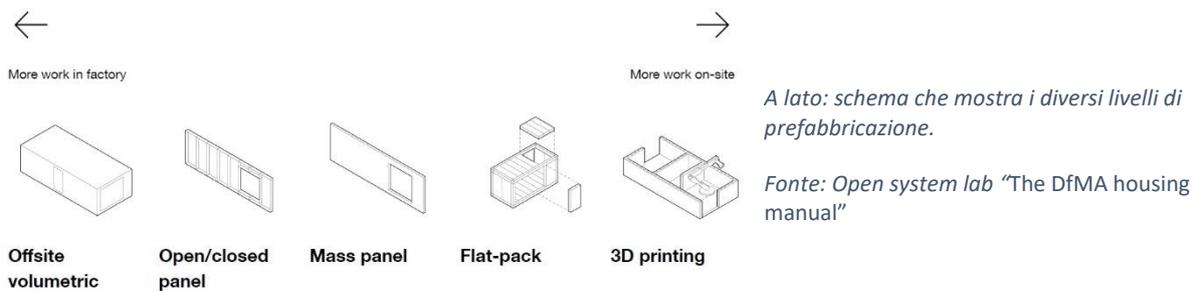
Fonte: Open system lab "The DfMA housing manual"

L'approccio DfDMA è stato favorito anche dal continuo calo dei prezzi per i macchinari CNC a piccola scala o di stampanti 3D. Questo perché nella metodologia DfDMA non esiste un'unica grande fabbrica centralizzata, con i suoi costi elevati, ma una rete di microfabbriche locali, che possono essere impianti stabili o macchinari per la produzione collocati temporaneamente in cantiere. Queste microfabbriche grazie alla loro flessibilità permettono di produrre una grande varietà di elementi, che possono venire distribuiti anche online sotto licenza.

Per quanto la produzione distribuita possa essere in alcuni casi meno efficiente delle tradizionali fabbriche centralizzate, poiché non esiste una singola linea produttiva su cui concentrare tutti gli sforzi, ma si tratta piuttosto di una sorta di ecosistema di linee produttive in un complesso sistema di relazioni. Il sistema DfDMA è più resiliente e accessibile economicamente, favorendo così la nascita di piccole imprese, che vista la loro diffusione sul territorio portano allo sviluppo dell'economie locali.

3.5 Tipologie di prefabbricazione e casi studio

Nel mondo delle costruzioni il sistema DfMA si è quindi largamente diffuso tra le aziende che si occupano di edifici prefabbricati come strumento essenziale per ottimizzare e semplificare la produzione dei prodotti, in modo da poterne ridurre i costi senza intaccarne la qualità produttiva. Questa metodologia può essere facilmente adattata a tutti i diversi tipi di prefabbricazione che queste aziende adottano. La prefabbricazione, nell'ambito delle costruzioni, può infatti essere sviluppata a gradi diversi su una scala che va dalla totale produzione in azienda alla fabbricazione in cantiere, e in tutti questi casi è possibile adottare un approccio DfMA.



Sopra: una abitazione costruita interamente in fabbrica da Urban splash.

Nel caso in cui la costruzione avvenga quasi totalmente in fabbrica, e gli edifici vengano trasportati in sito già quasi completamente assemblati, si può parlare di volumetrie create fuori sito. Alcuni esempi sono: le abitazioni BoKlok realizzate in Scandinavia da Ikea in collaborazione con Skanska, le inglesi House di Urban splash o le abitazioni di NU living.



Sopra: una parete del sistema LoCaL di Accord trasportata in sito con una gru.

Qualora gli edifici vengano trasportati in sito sotto forma di pannelli di grosse dimensioni, che definiscono interamente le pareti, e che perciò prevedono una quota di lavoro da compiere in sito che può anche arrivare ad essere importante tanto quanto quella in fabbrica. A seconda della tipologia costruttiva possono essere a pannelli massicci o a pannelli leggeri. Un tipico esempio di sistema prefabbricato a pannello massiccio che adotta l'approccio DfMA è quello di molte aziende produttrici di edifici in Xlam, mentre esempi della tecnologia a pannelli leggeri sono: L&G homes, Leko, LoCaL di Accord.

Il metodo di prefabbricazione più vicino ai dettami della produzione DfMA è quello degli edifici consegnati sotto forma di flat-pack, una versione più maneggevole dei sistemi a pannelli, ma che richiede una maggiore mole di lavoro da svolgere in cantiere, dove non solo bisogna assemblare assieme le pareti, come nei sistemi a pannelli, ma anche montare le stesse pareti a partire da elementi basilari e modulari di dimensioni ridotte. All'interno di questa categoria si trovano i sistemi costruttivi che nascono da elementi piani di compensato che verranno trattati in seguito, ma anche altri sistemi che usano pannelli, non di compensato, di dimensione minore delle campate, si cita ad esempio Tufeco che utilizza pannelli in vetro riciclato.

Infine, l'ultimo tipo di prefabbricazione, la più avanzata e ancora in sperimentazione, è quella eseguita interamente in sito, in cui il cantiere diventa fabbrica. È questo il caso della stampa 3D degli edifici, sperimentata da aziende presentate in precedenza come Apis Cor.

4 Casi studio

L'approccio DfMA unito all'uso dei macchinari a controllo numerico è alla base di tutti i sistemi di fabbricazione digitale a base di compensato. Di seguito sono riportati quelli che sono i maggiori sistemi di questo tipo, come WikiHouse e Facit Homes, e altri sistemi, ancora non consolidati, che si trovano ancora in una fase preliminare. Questi sistemi sono stati scelti perché, oltre ad essere quelli più pronti ad essere immessi sul mercato, rappresentano inoltre quanto possano essere variegata le soluzioni costruttive proposte.

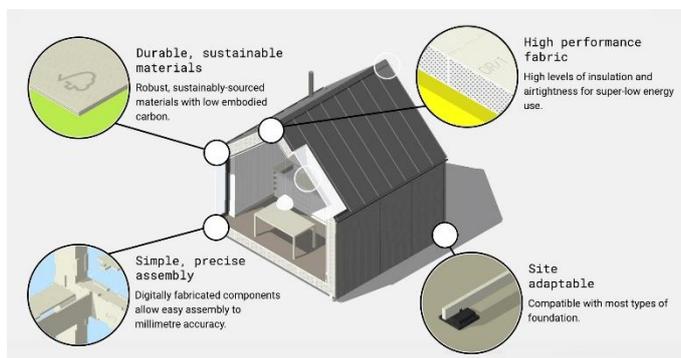
Tutti questi casi studio sono inoltre caratterizzati da una diversa aspirazione. WikiHouse nasce come sistema Open source e fa' dell'accessibilità la sua vocazione, dall'altro lato Facit Homes è una azienda privata, fortemente protettiva nei confronti del proprio sistema, che utilizza la fabbricazione digitale per offrire ai propri clienti un servizio completo chiavi in mano. I sistemi U-Build e Instant House che pongono una grande attenzione alle comunità e si offrono come strumenti in grado di soddisfare le loro esigenze di spazi comunitari, e nel caso di Instant House una grande attenzione viene rivolta anche alla fabbricazione in paesi in via di sviluppo o in situazioni post-emergenziali. Infine, sistemi come Click-Raft che nascono con il desiderio di trovare un sistema per costruire un rifugio semplice ed essenziale o come BURST che trovano nei sistemi costruttivi in compensato lo strumento adatto per realizzare un processo costruttivo e progettuale totalmente digitalizzato ed automatizzato e parametrizzato.

4.1 WikiHouse

WikiHouse è una metodologia costruttiva progetta, gestita e sviluppata a partire da 2001, da Open systems lab, una compagnia no-profit fondata da Alastair Parvin. Il sistema WikiHouse non è quindi di proprietà di una impresa di costruzioni o di una fabbrica di servizi prefabbricati, ma è al centro di una rete, sempre crescente, di studi di architetti, ingegneri e aziende produttrici, alla quale chiunque può associarsi, e che offre una vasta gamma di servizi in molte parti del mondo. L'identità di WikiHouse, come network di professionisti, facilita e velocizza la diffusione del nuovo sistema nel mondo. Già a partire dal 2013 e 2015, infatti, c'è stata una grande espansione che ha portato alla nascita di importanti reti ed esperienze nazionali. Tra queste hanno assunto una grande rilevanza, ed occorre citare le esperienze olandesi, neozelandesi, austriache e di città come Rio de Janeiro, Detroit e New York.

A lato: l'edificio costruito da WikiHouse ad Almere in Olanda.

Sotto: un piccolo edificio costruito sulle alpi austriache.



L'obiettivo accessibilità

La missione di WikiHouse è quindi di mettere gli strumenti e la conoscenza sviluppati da questa rete di professionisti al servizio di tutta la comunità in modo da permettere ad ogni cittadino di progettare, costruire e assemblare i propri edifici, sviluppandoli in modo economico, sostenibile e di qualità. L'obiettivo è quindi quello di rendere la progettazione democratica e accessibile per tutti, ponendo al centro l'utente finale e costruendo edifici che sono spazi in cui vivere e non beni immobiliari da vendere. L'attenzione è posta sul cliente e sulla società, nel suo senso più ampio del termine: dall'urbanizzazione e il cambiamento climatico fino alla crisi economica e alla disegualianza sociale, che ha reso impossibile per molte persone l'acquisto di una casa. Questo significa però non solo permettere l'acquisto di una casa da parte di una fetta, la più grande possibile, della popolazione, ma anche fare sì che questa possa essere progettata su misura del cliente da parte del cliente stesso, utilizzando elementi pre-progettati da parte degli architetti, il cui lavoro è in questo modo accessibile da fasce più ampie della popolazione. La rete di professionisti dietro al sistema WikiHouse infatti crede che il futuro del mercato delle costruzioni sia da ricercarsi nel settore "Long-tail" o il "Citizen sector", ovvero in piccoli gruppi di singoli cittadini che

acquistano un vasto terreno su cui ognuno di loro costruisce la propria abitazione. Le costruzioni basate sul sistema WikiHouse perciò non si preoccupano di generare una rendita economica per gli investitori, ma di soddisfare al meglio le esigenze dei futuri occupanti. Questo approccio ha diversi aspetti positivi come l'assenza del rischio di mercato e la maggiore velocità di realizzazione dovuta alla mancanza di speculazioni, oltre alla qualità artigianale nella costruzione, e ha come unico ostacolo, l'inesperienza dei committenti.

L'approccio Open-source

Al fine di rendere veramente democratica e accessibile a tutti la progettazione, tutte le tecnologie che compongono il sistema WikiHouse sono distribuite in modo open-source,²⁴ per poter poi essere utilizzate da chiunque, modificando e riadattando di volta in volta il sistema per venire in contro alle specifiche esigenze.

L'open-source è un fenomeno contemporaneo figlio di una società sempre più aperta alla condivisione, capace di sviluppare una maggiore intelligenza collettiva. Essere open-source significa condividere tutte le informazioni e darne la libertà di modifica, a tal proposito si può citare ad esempio di sistema open-source l'enciclopedia online Wikipedia, da cui WikiHouse trae ispirazione per il nome. La condivisione di tutte le informazioni, oltre a rendere più trasparente il sistema, facilita la sperimentazione da parti di tutti gli interessati, moltiplicando la velocità con cui il sistema si evolve, e favorendone lo sviluppo di soluzioni sempre nuove capaci di adattare il sistema ai singoli casi progettuali oltre che l'adattamento ad ogni condizione del sito e necessità funzionale. Questo continuo di sviluppo e sperimentazione sul campo viene poi condiviso e reso accessibile a tutti, sviluppando una collaborazione, tra tutti i professionisti facenti parte della rete, capace di ridurre i tempi di progettazione e risolvere i problemi molto più complessi del normale. Tuttavia, anche i sistemi open-source presentano dei lati negativi, tra questi il più importante riguarda l'affidabilità delle informazioni condivise dal momento che queste possono essere modificate da chiunque.

Essere open-source significa quindi che tutte le informazioni riguardanti: gli elementi del sistema costruttivo, la loro realizzazione e la metodologia da seguire nelle fasi di progettazione, produzione e costruzione sono distribuite apertamente e gratuitamente a tutti, consultabili e scaricabili tramite l'internet. La tecnologia WikiHouse è quindi utilizzabile da tutti, in modo gratuito e senza dover avanzare alcuna richiesta, con un'unica limitazione che impedisce di commercializzare prodotti Wikihouse.

Questo approccio open-source, per quanto lodevole, presenta tuttavia una discrepanza tra la dichiarata aspirazione all'accessibilità e il modo in cui le informazioni vengono gestite e diffuse. Infatti, pur riferendosi soprattutto a coloro che desiderano iniziare un progetto di autocostruzione, i metodi di progettazione digitale utilizzati da WikiHouse sono poco conosciuti dai non professionisti. Per questo motivo diventa imprescindibile la rete di professionisti legata al progetto, che fornisce una serie di servizi di consultazione e supporto: dall'introduzione al sistema, e la ricerca dei professionisti necessari fino alle fasi di progettazione, costruzione e controllo qualità. Inoltre, a causa dell'ambigua affidabilità delle informazioni, condivise all'interno di un sistema dove tutti possono modificarle, si ha l'impossibilità di fornire una garanzia sugli elementi che fanno parte del sistema WikiHouse, il cui rischio ricade quindi nelle mani di chi le adotta.

²⁴Portale per la libera condivisione dei file di disegno sul sito: <https://github.com/wikihouseproject>

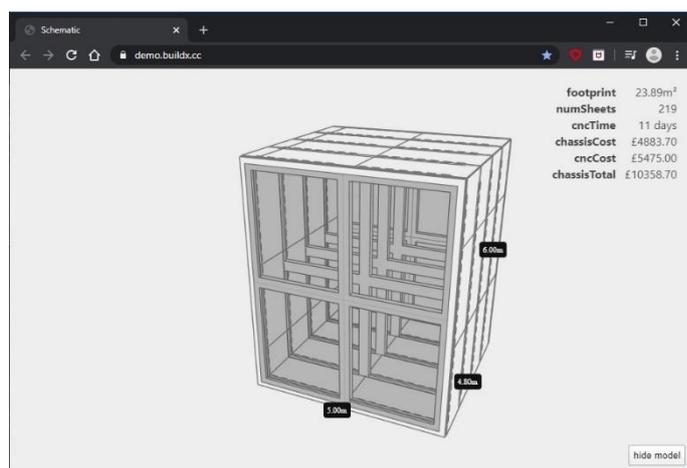
I principi DfMA e Digital Fabrication

La rete di aziende e progettisti, che si è riunita attorno al sistema WikiHouse, mira a sviluppare un nuovo sistema costruttivo e che sfrutti a pieno le possibilità offerte dalle più moderne tecnologie, in termini di progettazione e fabbricazione. Un sistema capace di produrre edifici di alta qualità, sostenibili ambientalmente e accessibili a tutti tramite l'adozione di sistemi strutturali realizzati a partire da elementi piani di compensato.

Al fine di raggiungere questo scopo, la comunità di progettisti si è auto-regolamentata, fornendo alcune linee guida meta-progettuali che guidano la progettazione. Il sistema WikiHouse deve perciò essere progettato con un orientamento all'intero ciclo di vita dell'edificio: utilizzando materiali economici e riutilizzabili. Bisogna progettare elementi base che siano facilmente adattabili a luoghi ed esigenze diverse. Occorre soprattutto progettare riferendosi alla nuova normalità: case abitabili da chiunque, senza distinzione di classe; ricordandosi di costruire edifici accessibili e usufruibili.

WikiHouse si basa fortemente sull'adozione metodologia DfMA. È quindi un sistema adattabile composto da elementi base standardizzati, facilmente modificabile senza costi aggiuntivi, in modo da creare abitazioni uniche su misura dei clienti. Gli edifici possono essere assemblati rapidamente e con precisione, senza per questo dover richiedere l'uso di manodopera specializzata, ma restando semplice e accessibile a tutti, anche piccole imprese o autocostruttori.

WikiHouse inoltre trova nell'approccio DfDMA, estensione del semplice DfMA, una delle ragioni fondanti, per la quale si è sviluppata la rete di aziende attorno al sistema. È quindi basato su una rete di micro-fabbriche digitali, che creano una catena di distribuzione flessibile e globale, un ecosistema che non è ancorato a nessuna soluzione specifica, ma che partendo dai pochi principi fondamentali di WikiHouse è adattabile ad ogni soluzione particolare. Tutto questo senza dover sostenere gli elevati costi d'impianto e di gestione dell'industria tradizionale. WikiHouse mira quindi a essere una alternativa concreta all'edilizia tradizionale non solo dal punto di vista costruttivo ma anche dal punto di vista economico.



A lato: una schermata della piattaforma BuildX, si può notare come il portale calcoli in tempo reale in numero di fogli di compensato necessari, il tempo per il taglio e il costo della struttura.

Il progetto Wikihouse è partito avendo fin da subito il desiderio di trasformare completamente il mondo delle costruzioni grazie all'uso intensivo del digitale in ogni fase del progetto. Al fine di facilitare e velocizzare le operazioni, garantendo allo stesso tempo un maggior controllo e standard qualitativi più alti. L'uso del digitale, specie in fase progettuale, si amplia sempre di più, come dimostra in recente progetto per gli HereEast studios a Londra, trattato tra i casi studio, in cui si è insistito fortemente sulla parametrizzazione del progetto e sulla possibilità di modificare la forma finale semplicemente cambiando alcuni valori numerici. Inoltre, si sta sviluppando, già da alcuni anni, la piattaforma online Buildx, una piattaforma smart che semplifichi la progettazione

implementando fortemente l'automazione e i big data nel processo, attualmente già consultabile (<https://demo.buildx.cc/>) anche se ancora in alpha testing. Tramite questa piattaforma, chiunque abbia un accesso internet, può progettare la propria struttura WikiHouse, purché abbia forma rettangolare. È infatti sufficiente inserire le dimensioni desiderate per ottenere una restituzione grafica in 3D della struttura. Inoltre, specificando alcuni dettagli costruttivi, come il tipo di compensato e d'isolante, la piattaforma fornirà già un preventivo dei costi necessari per i materiali e il taglio della struttura.

Lo sviluppo

Negli anni il progetto Wikihouse, grazie all'approccio open-source e alla comunità riunita attorno a progetto, si è evoluto costantemente e ha sviluppato diverse tecnologie, più o meno sperimentate in cantiere.

Tuttavia, sono emerse anche alcune criticità circa il modo in cui questo sviluppo è portato avanti. Se da un lato è vero che l'approccio open-source favorisca lo sviluppo, poiché permette di ampliare il gruppo di ricerca ben oltre quelle che, con un approccio non aperto, potrebbero essere le capacità di una singola azienda produttrice, trasformando tutti i "clienti" e gli interessati al sistema in possibili ricercatori. Dall'altro lato, forse anche a causa del tipo di piattaforma scelta per la condivisione dei file (<https://github.com/>), si verifica una grande dispersione di questa attività di ricerca. Manca infatti un sistema di coordinamento e di cooperazione alla ricerca, per cui, per quanto si faccia parte di una comunità, si sviluppano molto spesso progetti individuali come testimoniato dalla presenza di più progetti, indipendenti tra loro, per la realizzazione di browser viewer o plug-in per Sketchup. La mancata coordinazione viene avvertita anche nell'ambito più stretto del solo sistema costruttivo, infatti, per quanto lo sviluppo proceda su molteplici rami separati, manca uno strumento che riunisca tutte queste varianti in un'unica versione capace di comprendere a suo interno tutte le migliorie trovate. Inoltre, risulta complicato, specie per un neofita della piattaforma, avere ben chiaro come si è sviluppato il sistema in tutte le sue diramazioni ed individuare la soluzione più avanzata e adatta alle sue esigenze, senza ricorrere al supporto della rete di professionisti.

Tra tutte le tecnologie sviluppate la principale, al cuore di tutti gli edifici WikiHouse costruiti fino ad ora, è il sistema strutturale a portali Wren. Questo sistema ha subito diversi cambiamenti nel corso del tempo. La variante più rilevante, sviluppata a partire dal 2017, è il sistema Swift, molto diverso, nelle sue parti, rispetto all'originale Wren, e con particolari accorgimenti strutturali che gli consentono di raggiungere luci i 4,8m, rispetto ai 3,6m del sistema normale, seppur mantenga inalterati i principi base. Inoltre, la variante Swift semplifica le parti, velocizzando così la produzione e l'assemblaggio. Ultimamente si sta però progettando un nuovo sistema, denominato Blackbird, che, sempre a partire da elementi piani in compensato, mira a realizzare una struttura composta da travi e pilastri. Questa nuova tecnologia permetterà di ridurre il numero di pezzi unici da tagliare, semplificando e velocizzando la fabbricazione e l'assemblaggio delle parti, e un flusso di lavoro nettamente migliorato rispetto all'attuale sistema Wren, oltretutto aumentare ulteriormente la libertà compositiva.

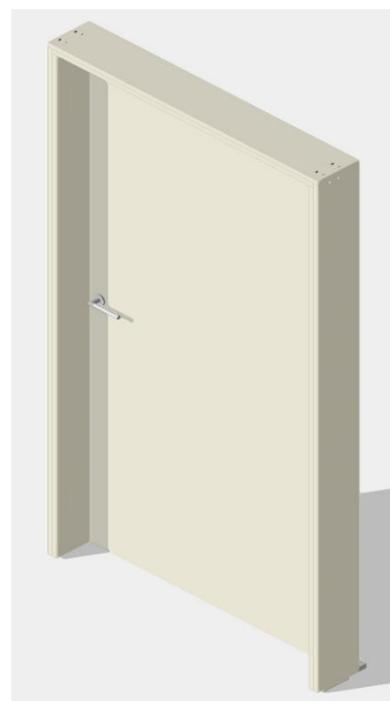
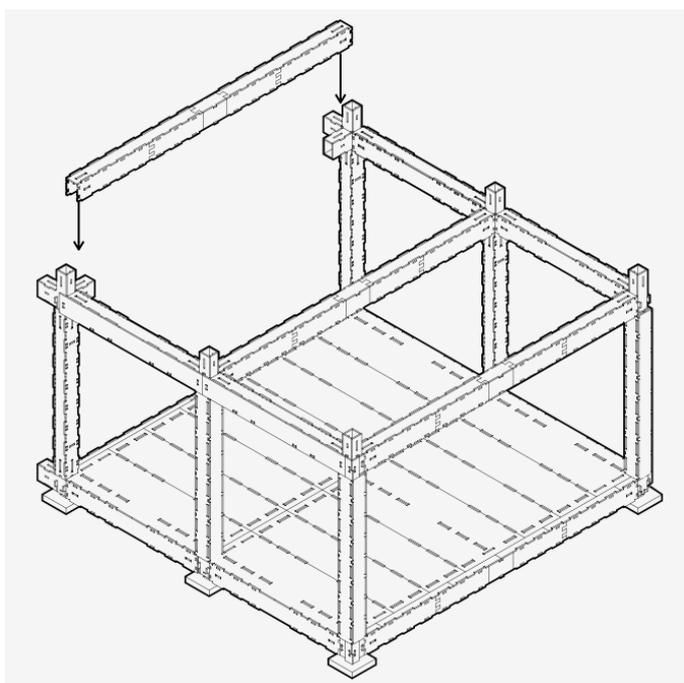
Oltre ai sistemi strutturali però la comunità di WikiHouse si è anche occupata di sviluppare Weaver, una metodologia per produrre e costruire delle partizioni interne agli edifici totalmente indipendenti rispetto alla struttura, e perciò facilmente modificabili. Infine, si sta sperimentando la possibilità di produrre le porte interne utilizzando lo stesso metodo produttivo del sistema WikiHouse. Una delle sfide più importanti però è quella riguardate i sistemi impiantistici e la loro integrazione con le strutture WikiHouse. L'obiettivo è progettare elementi capaci di semplificare e velocizzare l'inserimento degli impianti, minimizzando i ritardi e facilitando la manutenzione.

Wren: struttura a portali	
fase di sviluppo:	beta
costo medio:	325 £/mq
luce massima:	3,6 m
altezza massima:	2 piani

Blackbird: struttura trave-piastro	
fase di sviluppo:	alfa
costo medio:	250 £/mq
luce massima:	4,5 m
altezza massima:	3 piani

Weaver: kit per muri interni	
fase di sviluppo:	beta
costo medio:	60 £/mq
luce massima:	-
altezza massima:	4,8 m

Owl: kit per porta interna	
fase di sviluppo:	alfa
costo medio:	250 £/cad.
largh. massima:	1 m
altezza massima:	2,1 m



In alto: tabella riassuntiva dei sistemi sviluppati da WikiHouse.

Sopra: l'unica immagine diffusa fino ad ora del sistema Blackbird e della porta Owl.

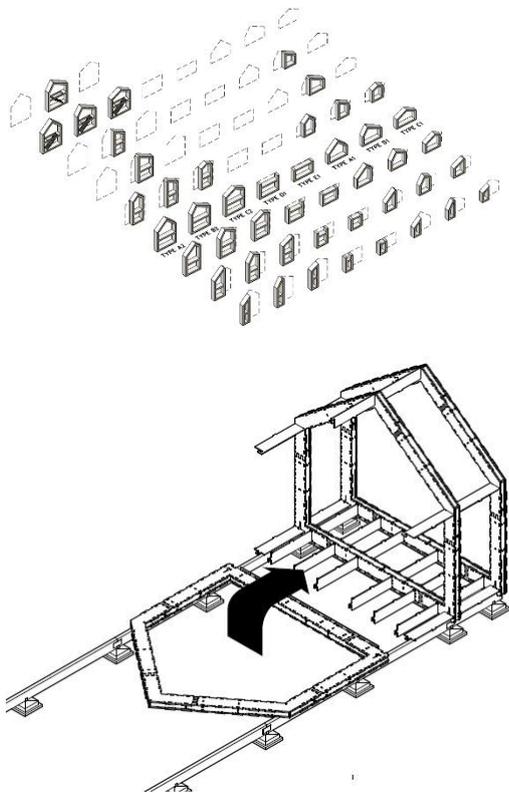
A lato: vista aerea del progetto De stripmaker.

Dal punto di vista progettuale si sta cercando di sviluppare dei progetti su larga scala, che prevedono la costruzione di comunità alternative da parte di persone desiderose di costruirsi da soli la propria casa. L'esperienza più promettente sotto questo punto di vista sta nascendo ad Almere in Olanda. Il progetto chiamato De stripmaker e guidato dallo studio Woninbouwatelier, fa parte del progetto europeo housing 4.0 incentrato sulla produzione di abitazioni ambientalmente sostenibili e fabbricate digitalmente. Si prevede la costruzione di 28 abitazioni economiche, destinate a famiglie piccole con il reddito appena al di sopra della soglia dei sussidi per l'affitto, che vanno dai 50 ai 90 mq, con un costo compreso tra i 160 e i 225 mila euro e che verranno autoconstruite dalle stesse famiglie, adottando il sistema Swift. Il progetto sarà realizzato in due fasi, ognuna di 14 case. Attualmente si è conclusa con successo l'assegnazione dei lotti e si sta provvedendo alla progettazione delle abitazioni su misura delle famiglie.

Tipologia strutturale

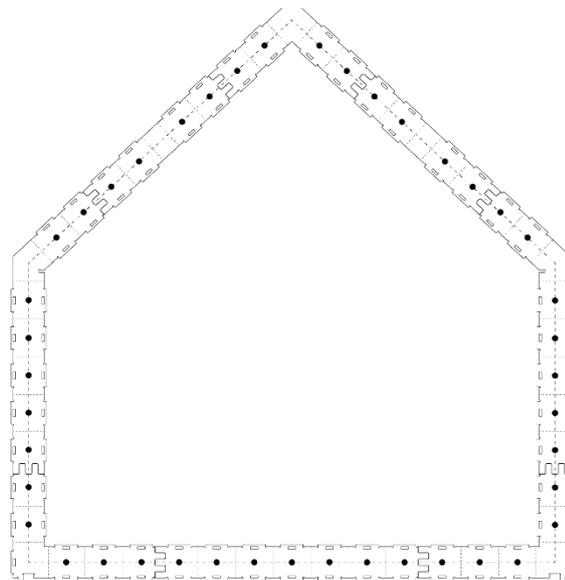
Alla base del sistema WikiHouse c'è una struttura realizzata, come tutto l'edificio, montando assieme degli elementi piani, realizzati in compensato o OSB. Questo assemblaggio crea degli elementi scatolari, riempiti di materiale isolante, che reggeranno l'edificio.

Nel caso di un edificio costruito utilizzando il sistema Wren la struttura è composta da portali bidimensionali. Questi portali sono composti da due pilastri collegati rigidamente tra loro da una traversa alla base e alla sommità dalle travi inclinate che definiscono la copertura. Si ottiene così un edificio che, nella maggior parte dei casi, avrà una forma allungata, e può sempre essere facilmente prolungato aggiungendo altri portali alla sequenza. I portali definiscono quindi la sagoma dell'edificio, rappresentandone una sezione. La forma dei portali, infatti, segue sempre quello che sarà il profilo dell'edificio. Questa stretta correlazione tuttavia non limita eccessivamente il progetto formale dell'edificio, dato che è possibile realizzare una grande varietà di portali, potendo così dare ogni forma immaginabile all'edificio. La maggiore limitazione formale e compositiva derivata dall'uso di una struttura a portali è causata dall'obbligo di posare i portali ad un interasse costante, di 1,2m, ciò rende impossibile la posa, nelle pareti perpendicolari ai portali, di ogni apertura la cui larghezza superi i 1,2m.



A lato: uno schema rappresentante solo alcune delle numerose forme che posso assumere i portali.

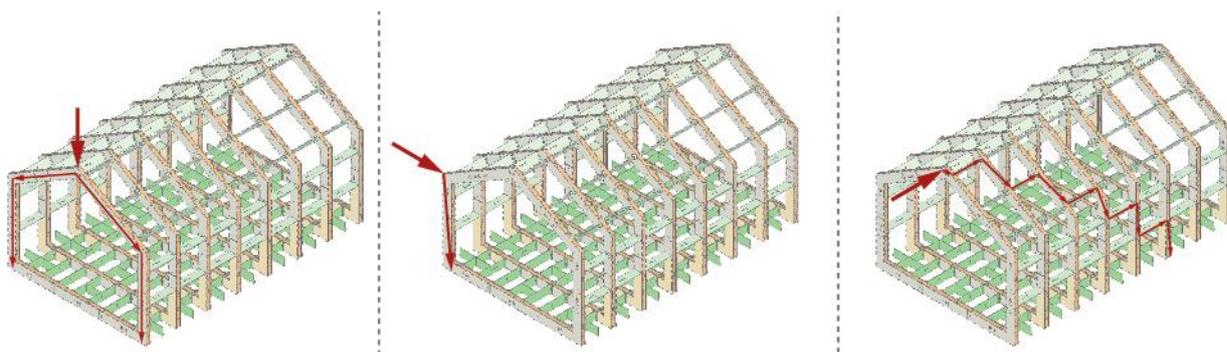
Sotto: a sinistra, un'immagine tratta dai manuali WikiHouse che mostra l'assemblaggio dei portali. A destra, un portale comune, in cui si può notare la suddivisione in elementi più piccoli.



Nel progetto del portale strutturale si possono riscontrare alcuni accorgimenti interessanti. Dal punto di vista strutturale va notato come, nella progettazione del portale, nel sistema WikiHouse, a differenza dei sistemi tradizionali, siano presenti sempre degli elementi continui negli angoli della sezione, ovvero nelle zone sottoposte alle tensioni maggiori. Una grande attenzione inoltre è messa nel posizionamento degli elementi secondari di connessione tra i portali, massimizzando l'efficienza. Infine, un accorgimento utile alla produzione: gli elementi angolari tendono ad essere il più lunghi possibile su un lato e il più corti possibile dall'altro in modo da minimizzare gli sfridi prodotti in fase di taglio. E un accorgimento al montaggio, per cui i connettori, soprattutto quelli posti più in alto sono progettati in modo da dover essere solo infilati all'interno di appositi alloggiamenti, senza incastrici particolari, in modo da ridurre le operazioni rischiose eseguite in quota.

L'edificio è così suddiviso in campate modulari, con piastrine di dimensione 30x15cm, ad eccezione delle campate contenenti eventuali scale interne, e pressoché indipendenti, ad eccezione degli elementi secondari posti a fare da collegamento tra i portali. Nel caso in cui si voglia costruire un edificio di dimensioni maggiori e su due piani è sufficiente suddividere i portali aggiungendo, al loro interno le travi e i pilastri necessari. La struttura così creata è una struttura monolitica ma il cui sviluppo è possibile solo in direzione.

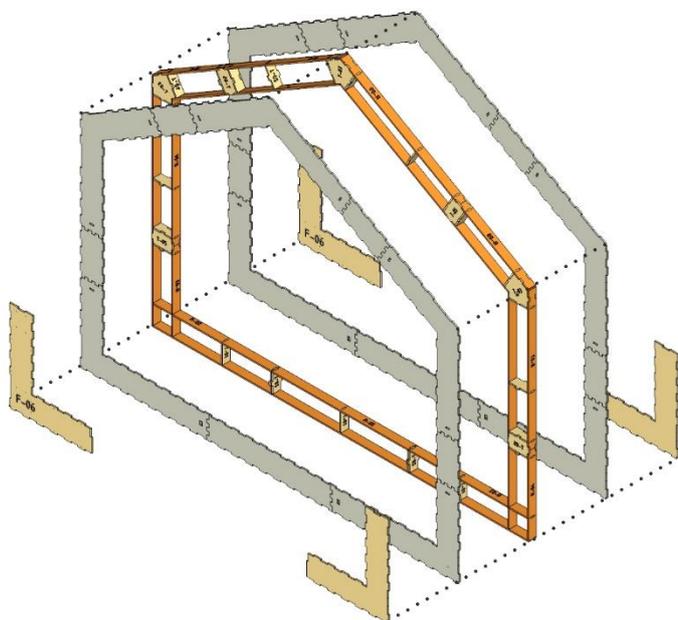
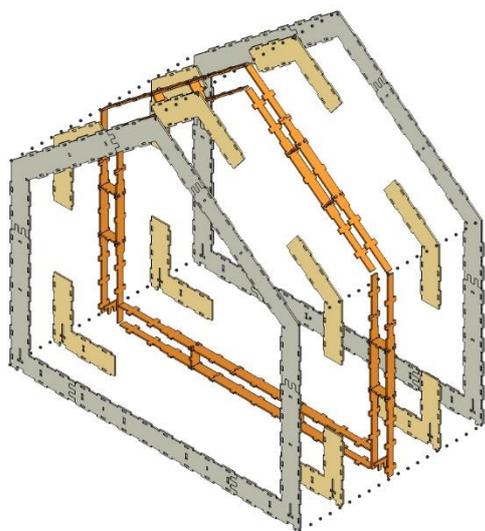
La struttura a portale rappresenta un'ottima risposta ai carichi verticali e orizzontali, purché quest'ultimi siano paralleli al piano del portale. La criticità maggiore per le strutture a portale è rappresentata dalle spinte orizzontali perpendicolari al piano del portale, che agiscono quindi su quello che normalmente è il lato più corto dell'edificio. Per contrastare queste spinte è fondamentale garantire un buon collegamento tra i portali posti in sequenza, in modo che la spinta venga distribuita su tutti i portali e non solo su quello di facciata. Il collegamento tra i portali è garantito, oltre che dal piano comune del solaio contro terra, anche da elementi secondari collocati orizzontalmente tra i portali, solitamente con un passo di 60cm, e in misura minore dai pannelli in compensato di tamponamento. La struttura WikiHouse Wren, realizzata in questo modo riesce quindi a raggiungere delle luci massime di 3,6m e costruire edifici di due piani, mentre nella sua variante Swift, grazie a semplici modifiche nel disegno degli elementi, il rivestimento interno ed esterno svolgono una maggiore funzione strutturale, rispetto a quella svolta nel vecchio sistema, e si possono così raggiungere luci di 4,8m, pur restando sempre vincolati all'interasse di 1,2m tra i portali.



Lo schema vuole mettere in luce il flusso delle forze all'interno della struttura in seguito a sollecitazioni agenti sul piano X, Y o Z

Per quanto riguarda il nuovo sistema Blackbird siccome molti degli incastri di questo nuovo sistema sono nuovi e, non avendo ancora terminato i test strutturali, il gruppo di professionisti che si sta occupando dello sviluppo ha deciso di non pubblicare ancora i disegni del nuovo metodo perciò le informazioni a riguardo sono poche e scarse. Si sa però che il sistema non sarà più basato su una struttura a portali ma su una più moderna struttura a travi e pilastri. In questo modo si consentirà una libertà compositiva ancora maggiore, svincolando l'edificio dalla rigida sequenza, data dagli interassi fissi, dei portali.

Abaco degli elementi



In alto: esploso dei portali del sistema Wren.
Sopra: esploso dei portali del sistema Swift.

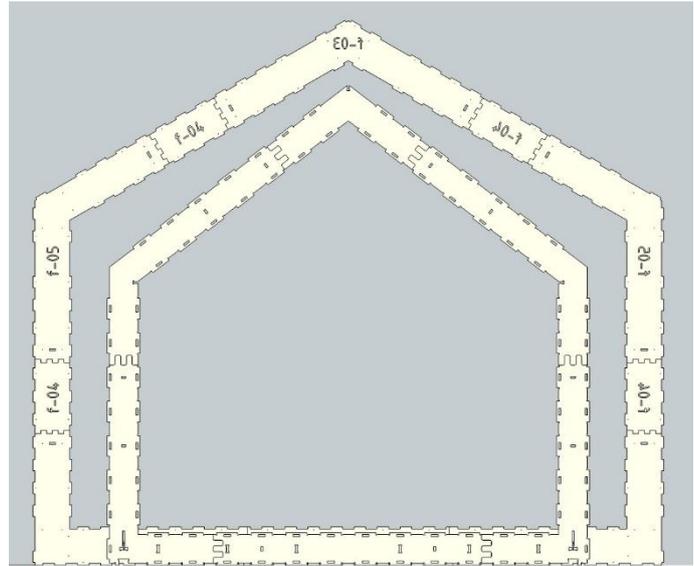
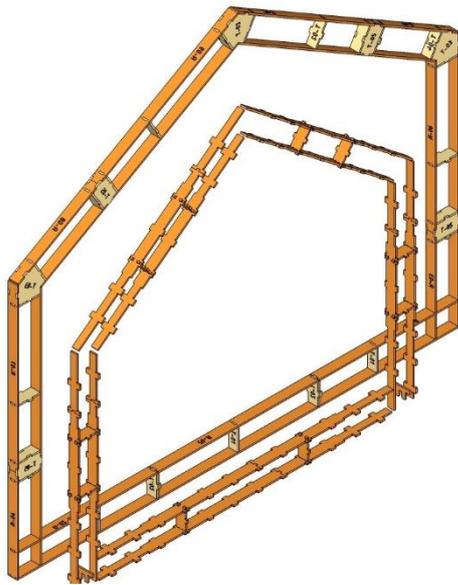
I portali, al cuore del sistema, sono di fatto degli elementi scatolari rettangolari, solitamente 15x30cm, creati a partire dai fogli di compensato spesso 1,8mm, che una volta tagliati, vengono assemblati assieme, sfruttando un sistema ad incastro e servendosi dell'aiuto di viti di fissaggio.

Perciò per quanto i portali siano elementi tridimensionali, la loro progettazione è affrontata come una sovrapposizione di strati, bidimensionale, ognuno dei quali svolge una funzione ben precisa. In particolare, i portali sono formati da cinque strati: due strati costituiscono le facce laterali del portale, un solo strato, seppure doppio, costituisce le facce interne ed esterne del portale e tiene connesse le quattro facce, due strati svolgono la funzione di irrigidimento della struttura nei punti critici.

Nella struttura dei portali si può inoltre riscontrare la maggiore differenza tra i sistemi Wren e Swift, che fa trasparire una differente mentalità e approccio al problema strutturale. Nel primo caso infatti l'attenzione era posta soprattutto sulle facce laterali del portale, che essendo poste di taglio, sono ideali per svolgere la funzione strutturale. Questi lati sono fortemente rafforzati, raddoppiando la struttura agli angoli. Gli altri lati invece sono relegati alla funzione di semplici connettori e stabilizzatori, tant'è che in alcuni casi di alcuni padiglioni o stand non soggetti ad un carico eccessivo, questi lati possono essere rimossi e sostituiti da elementi secondari.

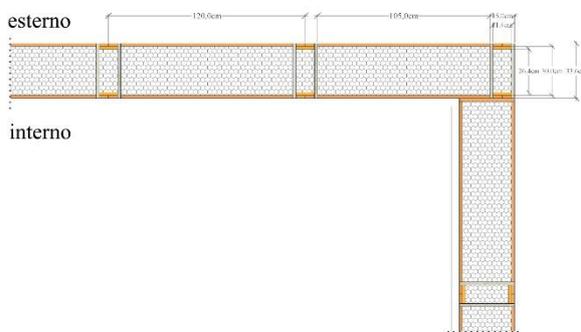
Nel caso del sistema Swift invece, anche le facce interne ed esterne del portale svolgono una funzione strutturale, e sono loro a ricevere il maggior numero di irrigidimenti. Le due facce sono connesse rigidamente e si comportano così come un corpo massiccio, nel mentre le facce laterali sono meno rinforzate ed iniziano ora ad apparire come un semplice rivestimento, pur continuando invece a svolgere anch'esse una importante funzione strutturale. In questo modo il sistema Swift riesce a ottenere prestazioni strutturali migliori.

Inoltre, il nuovo approccio sviluppato con Swift consente una estrema semplificazione delle parti, evidente se si paragonano gli strati di connessione di entrambi i sistemi. Nel vecchio sistema Wren le facce interne ed esterne dei portali erano riccamente lavorate in modo da incastrarsi al meglio con gli altri lati. Nel sistema Swift invece gli elementi che compongono questa parte tendono ad avere una sezione il più possibile costante e regolare, per non intaccare la funzione strutturale.



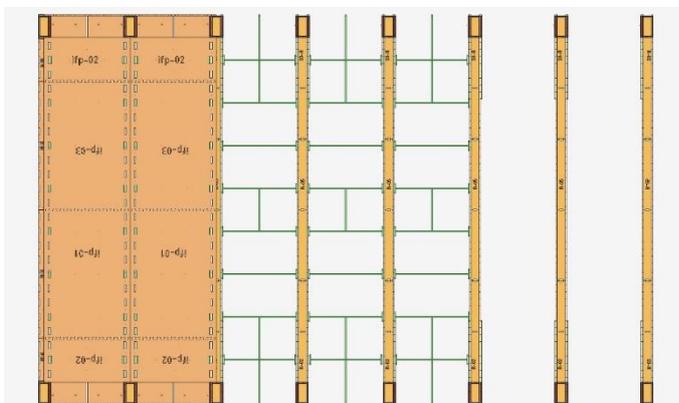
Sopra: il confronto tra gli elementi strutturali del sistema Swift, più grande, e il sistema Wren, più piccolo.

Tra i portali, che vengono posati a un interasse di 1,2m, vengono poi posate due lastre di compensato, rispettivamente all'interno e all'esterno, già predisposte per essere incastrate nei portali, definendo in tal modo le pareti e la copertura. Nel caso in cui l'altezza dell'edificio superi l'altezza del pannello, si uniranno tra loro più pannelli tramite degli incastrati a pettine. Queste lastre non hanno alcuna funzione strutturale se non quella di garantire un ulteriore collegamento tra i singoli portali. All'interno dei tamponamenti viene poi collocato l'isolante, che può essere sfuso o in pannelli. La stratigrafia perimetrale, al netto delle finiture interne e del rivestimento di facciata, è quindi estremamente semplice.



Dall'esterno:

- membrana antivento
- pannello di tamponamento in compensato, 1,8mm
- isolamento ad intercapedine, 30cm
- barriera al vapore
- pannello di tamponamento in compensato, 1,8mm.



In alto: la sezione orizzontale di una porzione di muro, si può notare la continuità quasi totale dell'isolamento.

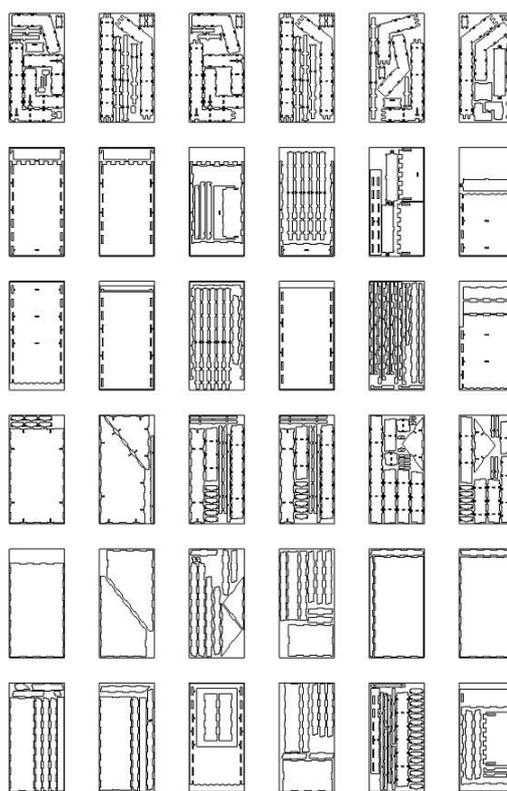
Sopra: la vista di un solaio, a destra solo le travi principali, al centro con gli elementi secondari di connessione, a sinistra completo.

La struttura dei solai è molto simile a quella delle pareti e della copertura. Ad ogni portale corrisponde infatti una trave di solaio, realizzata esattamente come le altre, tra queste travi si trova un reticolo di elementi secondari, più fitto rispetto a quello delle pareti, alti quanto le travi, realizzato con pannelli di compensato incastrati e avvitati alle travi principali. Nel caso di solai realizzati contro terra, gli spazi definiti dalla griglia di elementi secondari sono riempiti con materiale isolante.

Progettazione e Fabbricazione

Dal punto di vista pratico la produzione degli elementi del sistema WikiHouse si basa su tre principi chiave. Il progetto digitale grazie al quale vengono creati dei modelli parametrici 3D dell'edificio che permettono di creare automaticamente i modelli di dettaglio e i file di taglio da inviare alle macchine CNC. La fabbricazione locale, ovvero una rete di micro-fabbriche distribuita sul territorio, chiunque può creare una nuova fabbrica e iniziare subito a produrre gli elementi necessari con grande precisione. Il facile assemblaggio: tutti i componenti devono poter essere assemblati velocemente e con precisione da chiunque, anche da persone inesperte.

La progettazione parte dunque da software di progettazione 3D come Sketchup o Rhinoceros, per i quali si stanno sviluppando plug-in che semplifichino la progettazione. La scelta del software risulta essere una scelta cruciale, a seconda del programma scelto infatti la fase progettuale potrà essere più o meno complessa e veloce. Inoltre, solo alcuni programmi possono essere adottati per eseguire una progettazione parametrica e maggiormente automatizzata. A partire da questi modelli si estraggono poi i file di fabbricazione: un insieme di file in 2D, di formato dxf o .dwg, che rappresentano il profilo di tutti gli elementi da tagliare, già suddivisi e raggruppati in quelli che saranno poi i fogli di compensato da tagliare. L'ultimo passaggio prevede la conversione di questi file in file g-code, il linguaggio comunemente utilizzato dalle macchine CNC che taglieranno tutti i pezzi. Questi file verranno inviati a uno o più centri taglio delocalizzati.

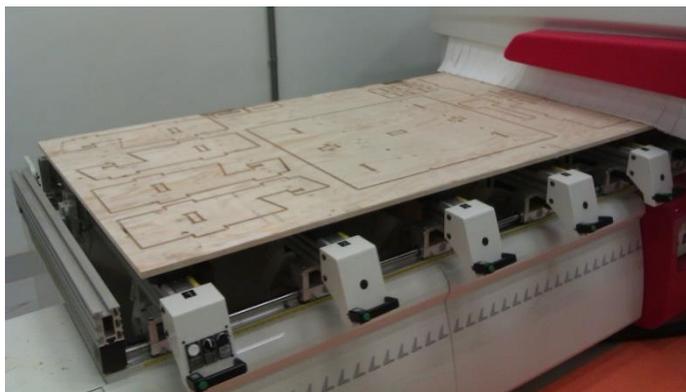


A sinistra: la fase di progettazione degli elementi e la produzione in un piccolo centro di tagli CNC.

A destra: un esempio dei file di taglio prodotti dai software, in cui le parti da stampare sono raggruppate in fogli di compensato.

Per la fabbricazione degli elementi si parte da fogli di compensato di dimensione 2440x1220mm, spessi 18mm, occasionalmente si ammette anche l'uso di fogli spessi 6 o 12mm. In teoria possono essere pannelli composti da qualunque tipo di legno purché certificati FSC, ma di solito si usa compensato di pecci o di betulla, essendo questi i più comuni sul mercato. In alternativa al compensato è ammesso anche l'uso i pannelli OSB strutturali. Al fine di realizzare delle strutture

solide e allo stesso tempo di rapido montaggio è fondamentale che gli incastri siano realizzati con la massima precisione. Tuttavia, questa precisione non è data solo dalla macchina per il taglio a CNC ma anche da una attenta gestione delle tolleranze in fase di progetto. Le tolleranze vanno definite a partire dallo spessore dei fogli di compensato, spessore che varia, rispetto allo spessore nominale di 18mm, a seconda del produttore. I file standard distribuiti dal progetto WikiHouse presentano degli offset standard di 0,25mm, e in alcuni casi anche maggiori al fine di garantire incastri molto difficili da disassemblare. Questi offset determinano una tolleranza massima, rispetto allo spessore dei fogli di 18mm \pm 0,5mm. Nel caso in cui dei pannelli di compensato non rientrassero all'interno di questo intervallo di tolleranza essi potranno essere utilizzati solo come pannellatura di tamponamento e di copertura.



A lato e sotto: il processo di taglio e marchiatura degli elementi.

In basso a sinistra: un assemblaggio di prova svolto in fabbrica.



In generale tutti i componenti di WikiHouse richiedono di essere tagliati da un lato solo e possono quindi essere tagliati da ogni macchina CNC capace di tagliare fogli di dimensione 2440x1220mm. Il tempo necessario al taglio dei pezzi varia fortemente a seconda del macchinario utilizzato e degli elementi, tuttavia si può considerare, come regola empirica, che il taglio di un foglio impieghi dai 15 ai 30 minuti. Durante questo tempo è fortemente consigliato svolgere un test d'assemblaggio di almeno un elemento per tipo, al fine di controllare le tolleranze, e un controllo della qualità del taglio. Inoltre, assemblare le parti nel mentre gli elementi successivi vengono tagliati permette di controllare la regolarità dei tagli e di intervenire subito nel caso in cui ci siano problemi con questi. Facilita inoltre lo stoccaggio, riducendo il rischio di perdita delle parti. Sempre durante la fase di taglio tutti gli elementi prodotti vengono marchiati con un codice identificativo in modo da facilitare il montaggio finale ed evitare errori.

Costruzione

Le fondazioni vengono di solito preparate in anticipo, in modo da poter procedere al montaggio dell'edificio non appena le parti tagliate arrivino in cantiere. La struttura WikiHouse si adatta ad ogni tipo di fondazione, di solito vengono adottate soluzioni puntuali o travi continue, in modo da ridurre gli scavi e l'uso di calcestruzzo. Tuttavia, la scelta della soluzione migliore non è così immediata. L'uso di fondazioni puntuali può infatti portare a cedimenti differenziati, che fanno sorgere importanti tensioni interne nel caso di strutture ad incastro, perciò, in caso di terreni soggetti al fenomeno, può rivelarsi utile l'uso di fondazioni a platea, che evitano i cedimenti localizzati. Una grande attenzione va posta nel verificare la planarità delle fondazioni, che deve avere un errore massimo di $+ o - 5\text{mm}$ al fine di garantire una corretta posa e che non si generino tensioni nella struttura. Al di sopra delle fondazioni viene collocata una membrana impermeabile e delle travi di radice in legno.



A lato: delle fondazioni pronte per l'alloggiamento della struttura.

Sotto: a sinistra, il trasporto di elementi già assemblati. A destra, il trasporto degli elementi tagliati sotto forma di flat-pack



Gli elementi fabbricati, una volta etichettati, possono arrivare in sito sotto forma di elementi piani, facilmente trasportabili in forma di flat-pack o come parti già pre-assemblate. Questa decisione va presa tenendo conto delle difficoltà e dei costi di trasporto, della disponibilità di uno spazio dove depositare e assemblare gli elementi in sito, e del tempo a disposizione. Infatti, se da un lato assemblare le parti in fabbrica, durante la produzione, consente di risparmiare tempo, dall'altro lato il trasporto degli elementi piani, ancora da assemblare è più agevole, e in alcuni casi l'unico modo possibile. In ogni caso è importante evitare che gli elementi o le parti si bagnino durante il trasporto e durante la permanenza in cantiere.

La costruzione inizia assemblando i portali, qual ora questi non arrivino già assemblati. L'assemblaggio viene svolto sul terreno, inserendo già all'interno dei portali il materiale l'isolante. Nel caso di edifici a due o più piani i portali non vengono montati interamente, ma ci si limita ai soli pilastri uniti dalla traversa alla base, in modo da non complicarne il sollevamento e la posa in opera. L'assemblaggio dei portali richiede circa una o due ore a portale. Una volta assemblati, i

portali vengono sollevati e posati sulla trave di radice, ma non ancora fissati. Si procede poi collegando tra di loro i portali con gli elementi secondari che svolgeranno la funzione d'irrigidimento longitudinale, 10 minuti a portale. I portali vengono così allineati, messi in quadro e fissati tra di loro. Solo a questo punto i portali vengono avvitati alla trave di radice.



A lato: l'assemblaggio di un portale, si può notare l'isolante collocato all'interno.

Sotto: a sinistra, l'innalzamento di un portale, limitato al piano terra. A destra, una serie di portali triangolari già innalzati e pronti ad essere fissati



Si procede poi montando il solaio contro terra, predisponendo gli opportuni passaggi per gli impianti, e montando la pannellatura esterna di tamponamento, in modo da chiudere la struttura e limitare l'esposizione agli agenti atmosferici delle parti interne. I pannelli sono posati e avvitati alla struttura in circa 3-10 minuti l'uno. Nel caso di edifici a due o più piani, si procede ora al montaggio della parte superiore dei portali, un'operazione complessa in quanto eseguita su delle scale e che richiede perciò circa 30 minuti a portale per essere portata a compimento. Infine, si procede alla posa della pannellatura esterna anche nella parte superiore dell'edificio impiegando circa 5-10 minuti a pannello.



A lato: in alto, la posa degli elementi secondari tra le travi del solaio contro terra. Sotto, un solaio contro terra in fase che sta venendo isolato e chiuso.

Sopra: la posa delle pannellature perimetrali esterne al fine di proteggere parzialmente la struttura durante la fase di cantiere.

Una volta chiusa la struttura si posa l'isolante interno, per uno spessore di 25cm. L'isolante può essere di diversi materiali e di diverso tipo: in pannelli o sfuso. Molto spesso, in nome dell'accessibilità economica, vengono utilizzati materiali sintetici, in modo da raggiungere alte prestazioni ad un costo sostenibile per tutti, come desiderato dal sistema WikiHouse. Tuttavia, questi materiali, presenti in commercio in forma di pannelli richiedono tempi molto maggiori per la posa in opera e, a seconda della complessità formale dell'edificio, possono produrre una grande quantità di sfridi. Per le finestre viene lasciato un vano al netto della dimensione del telaio. Sul lato interno della parete, a contatto con l'isolante, viene poi posata una barriera al vapore, e la pannellatura interna in compensato. Tutta l'operazione richiede 1-2 giorni, a seconda delle dimensioni. La costruzione della struttura richiede di solito una quindicina di giorni. Sulla tamponatura esterna invece viene graffettato un telo antivento, facendo attenzione a risvoltarlo nello spessore del muro in prossimità delle finestre. La posa dura circa 2-4 ore. Vengono posati tutti gli infissi, collocati a filo esterno, in modo da rendere tutto l'edificio impermeabile all'aria. Sul telo antivento vengono avvitate dei listelli, che creano una camera d'aria e su cui verrà in seguito fissato il rivestimento di facciata. Viene anche posata la copertura in lamiera e le grondaie. All'interno vengono posati gli impianti ed eseguite finiture.



A lato: il rivestimento con la membrana antivento. Sotto: la posa del rivestimento di facciata in legno.





In alto: a sinistra, la posa delle tamponature interne. A destra la copertura terminata.

A lato: il rivestimento interno con la barriera al vapore e la posa degli impianti.

Sopra: la realizzazione di un tramezzo interno.

Il rischio maggiore durante la fase di cantiere è rappresentato dalla pioggia che rischia di degradare e deformare i componenti lignei, per cui in alcuni casi si è perfino deciso di ricoprire l'edificio con teli di copertura temporanei. I tempi di costruzione, rispetto ad una costruzione comune, sono più molto più brevi per realizzare la struttura, soprattutto rispetto alle costruzioni in calcestruzzo, non dovendo tenere conto dei tempi di stagionatura. Tuttavia, si è spesso riscontrato che i tempi per la posa delle tamponature e finiture si sono rilevati più lunghi dei rispettivi tempi nel caso di costruzioni tradizionali, anche se in buona parte dipendono dall'inesperienza di chi di solito usa i sistemi WikiHouse. Per quanto riguarda invece l'ottenimento dei certificati di agibilità molti paesi trattano il sistema WikiHouse come ogni altra struttura a timber frame e richiede perciò la revisione di un ingegnere strutturale.

Casi studio:

2nd Whalley Range Scout Hut: Manchester 2019, architecture unknow

Il progetto per la nuova sede del gruppo locale di scout è una delle più grandi strutture realizzate con il sistema WikiHouse e con alcune delle luci maggiori. Inoltre, a differenza di ogni altro progetto WikiHouse a larga scala, in questo caso la produzione delle singole parti che saranno assemblate per creare la struttura è guidata interamente dal cliente. I lavori sono partiti alla fine del giugno 2019 ed ha occupato le prime cinque settimane di lavoro con la demolizione del vecchio edificio e la preparazione delle fondamenta al fine di renderle adatte ad accogliere la nuova struttura. A partire dal 27 luglio si è iniziato l'assemblaggio degli elementi WikiHouse, questi sono arrivati in sito in fogli pretagliati e sono stati assemblati da venti volontari in due fine settimana di agosto. Nella terza ed ultima fase i lavori sono stati affidati ad una azienda di costruzioni che si è occupata di mettere assieme le parti, impermeabilizzarle e provvedere alla posa di copertura, impianti, rivestimenti e tutte le finiture interne. La struttura WikiHouse è stata montata in soli 21 giorni, mentre l'intera costruzione ha richiesto circa quattro mesi, con un costo totale di duecento cinque mila sterline.



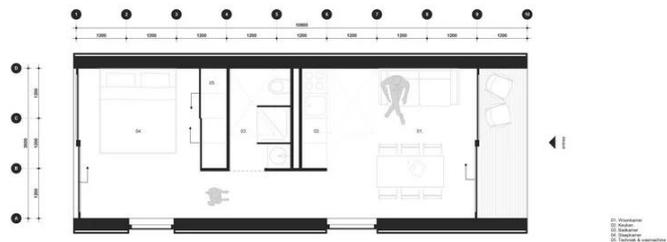
Sopra: il render di progetto dell'edificio.

Sotto e a lato: diverse fasi di lavoro: l'assemblaggio dei portali, la posa del solaio contro terra e dei portali, la posa delle tamponature.



Petit Place, Zwijndrecht, Olanda meridionale 2018, RoosRos architecten

Il progetto dello studio olandese RoosRos vuole essere una miglioria e una semplificazione del sistema WikiHouse. Il petit place è un kit di montaggio che permette il montaggio di edifici con dimensione compresa tra i 270 e i 10 mila piedi quadrati (da 25 a 1000mq circa). L'esempio mostrato sotto è di 40mq. Il petit place è progettato per essere collocato ovunque. Infatti, l'idea, alla base del progetto, è di vivere dove si desidera, in una città o in un paese, su terra o su acqua, in campagna o in montagna. "Vogliamo dimostrare che anche le persone in giovane età possono costruire la propria casa". Basata sulle esigenze della sharing economy, Petit place permette di risparmiare su tempi e costi e offre così ai giovani la libertà desiderata. La struttura a portali è realizzata con compensato di pino privo di formaldeide, impermeabilizzata con una guaina in gore-tex che protegge dall'acqua e dal vento. Gli esterni prevedono una serie di pannelli solari capaci di generare 9000 Kw/h all'anno. Il costo per una casa, finiture escluse, parte da venticinque mila euro.



Sopra: la pianta dell'edificio e i possibili rivestimenti con cui è realizzabile.

Sotto: le immagini della costruzione del Petit Place, sotto un tendone temporaneo, e l'edificio terminato.



Huaxia Star Library: Cina 2018, Dot architects.

Una libreria pubblica, con annessa sala lettura costruita nella Cina rurale, in un'area con un alto tasso di povertà oltre che con risorse e capacità progettuali limitate. L'edificio è stato donato alla comunità locale dalla banca della regione Huaxia bank, ed è stata costruita dagli stessi studenti che partecipavano ad un programma d'internship all'interno della banca, in modo da poter sopperire ai problemi di manodopera.

L'uso di questa manodopera volontaria, non specializzata, e disponibile con orari limitati ha portato alla scelta di eseguire in fabbrica non solo il taglio delle singole parti ma anche il loro assemblaggio e isolamento. Gli elementi sono dunque arrivati in sito già assemblati e l'unico compito della manodopera locale era quello di posare e fissare tra di loro i portali già creati. In questo modo si sono ridotti i tempi di costruzione in sito ad una sola settimana, durante la quale i volontari posavano in fila i portali, creando volumi allungati e con una sezione uniforme caratterizzata da una copertura a falde che richiama le costruzioni locali. In questo caso si è preferito l'uso di pannelli OSB al normale compensato.



Viste interne e di complesso dell'edificio costruito.

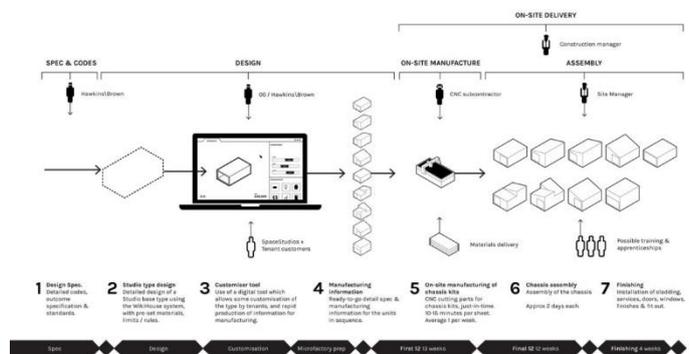


The Gantry at HereEast Studios: Londra 2018, Hawkins Brown architects,

Collocato ad East London, all'interno del progetto di riuso del broadcast center delle olimpiadi del 2012. Si tratta di un edificio di tre piani che è stato trasformato sventrando la vecchia struttura ed inserendo al suo interno ventuno nuove microstrutture aventi la funzione di studio per artisti e creativi. I nuovi studi, della dimensione di 8x8m, sono disposti a scacchiera all'interno della struttura preesistente al fine di bilanciare meglio i carichi. Inoltre, si è deciso di collocare sul retro gli studi a due piani e in facciata quelli ad un solo piano. Per movimentare la facciata si è voluto utilizzare per gli studi delle forme e dei rivestimenti sempre diversi, dal policarbonato all'erba artificiale. Per fare questo è stato necessario associare al file di progetto, di ogni studio, un foglio Excel su cui si trovano i valori parametrici che ne definiscono la forma e che modificano automaticamente i file di taglio, mentre allo stesso tempo uno script di Dynamo Studio traduce questi parametri di definizione formale nel modello Revit della struttura. Tutti i ventuno studi sono stati prodotti e assemblati contemporaneamente richiedendo dai 7 ai 10 giorni, a seconda della complessità formale e del rivestimento scelto, per l'assemblaggio.

A lato: schema del processo progettuale parametrico, che ha definito la forma delle unità.

Sotto: i lavori di costruzione di due delle unità e le immagini di tre unità completate.



Farmhouse: Rugby, Warwickshire 2017, architecture OO.

Un'abitazione dal costo contenuto utilizzata dai lavoratori agricoli della fattoria. È una delle prime grandi abitazioni realizzate col sistema WikiHouse ed è la prima su due piani. Ad eccezione delle fondazioni, realizzate a travi rovesce in cemento armato, e degli impianti, tutti i lavori, dall'assemblaggio delle singole parti al montaggio della struttura fino alle finiture sono stati eseguiti dai futuri proprietari con l'aiuto di familiari e amici. Le parti in compensato sono state tagliate a Sheffield, a 130km dal sito di costruzione, e sono arrivate in cantiere a più riprese, dove sono state immagazzinate, assieme con i pannelli d'isolante, in un garage temporaneo, allestito per l'occasione. La costruzione della struttura è stata veloce, nella prima settimana si è posata tutta la struttura del piano inferiore, tuttavia la poca manodopera disponibile e la possibilità di dedicarsi alla costruzione solo nei fine settimana hanno allungato notevolmente i tempi di costruzione, soprattutto nella fase di finitura dove è emersa tutta la mancanza di esperienza da parte degli autocostruttori.



Le diverse immagini dei lavori di costruzione della Farmhouse sono tratte dal blog: awikifarmhouse.wordpress.com che ne racconta il processo costruttivo.



4.2 Facit Homes

Facit homes è una azienda inglese fondata nel 2007 da parte di Bruce Bell che si occupa di progettare e costruire abitazioni private utilizzando il sistema costruttivo ad elementi bidimensionali in compensato sviluppato dalla azienda stessa. Dal 2011 lo studio danese Een til een, degli architetti Frederik Agdrup e Nicholas Bjørndal, è diventato il distributore ufficiale del sistema Facit in Danimarca.

L'obbiettivo è quindi quello di soddisfare al massimo ogni esigenza dei clienti offrendo un servizio di qualità ad ottimo costo. Questo significa creare degli edifici accoglienti, capaci di far sentire le persone a casa, con ambienti allo stesso tempo moderni ed eleganti. Non limitare in alcun modo le esigenze spaziali, sviluppare quindi un sistema capace di realizzare piante altamente flessibili, multiscopo e adattabili ad ogni desiderio della clientela come un vestito su misura, e soprattutto un sistema che permetta di realizzare grandi aperture, in modo da far entrare molta luce all'interno dell'edificio e metterlo in comunicazione con la natura circostante. Il tutto unito ai dettagli di qualità artigianale e all'accurata scelta dei materiali, e all'attenzione per la funzionalità.

Il sistema Facit Homes non è quindi il fine dell'azienda ma è soltanto il mezzo che si è ritenuto migliore per raggiungere lo scopo di costruzione e vendita delle abitazioni. Facit Homes ha, a differenza degli altri sistemi che si concentrano molto di più sullo sviluppo di progetti, un approccio molto più imprenditoriale al problema, con un punto di vista chiaramente improntato al costruire abitazioni per i propri clienti. È una vera e propria azienda di costruzioni che è nata in risposta ad un sentimento di frustrazione provato nel constatare quello che è lo status quo dell'industria delle costruzioni, e davanti agli attuali sistemi di costruzione, giudicati ormai datati e inefficienti. Facit Homes si pose dunque l'obbiettivo di cambiare i moderni metodi di progettazione e di costruzione, in modo che il processo di costruzione non sia più soggetto alla moltitudine di fattori che possono rallentare i lavori ed aumentare i costi, come, ad esempio: l'interpretazione dei disegni e ai fraintendimenti da questi provocati, o la difficile gestione dei dati che fa nascere differenze tra il progetto pensato e presentato al cliente e l'edificio costruito. Il nuovo sistema deve essere in grado di fornire ai clienti un servizio più intelligente e funzionale degli attuali.

Per via di questo desiderio di fornire un servizio controllabile e sicuro è fondamentale che Facit Homes diventi l'interlocutore unico del cliente, arrivando a comprendere al suo interno e a gestire ogni fase da quella progettuale a quella produttiva e costruttiva. Solo in questo modo l'azienda può gestire e controllare l'intero processo, e quindi soddisfare a pieno gli alti standard qualitativi e le esigenze della clientela, riducendo al minimo ogni possibilità di errore e d'imprecisione che si possa verificare in corso d'opera. Questo non sarebbe possibile se Facit Homes non avesse deciso, fin da subito, di adottare le moderne tecniche di fabbricazione digitale che consentono di unire la trasparenza e controllabilità del processo con la velocità produttiva e l'alta qualità di realizzazione, irrinunciabile al fine di realizzare case ad alta performance energetica, con la massima personalizzazione delle forme e dei volumi, producendo così, in breve tempo, case sostenibili e fatte su misura per il cliente. Questo perché grazie alla fabbricazione digitale quindi gli edifici di Facit Homes sono così realizzate con precisione meccanica e un elevato controllo di qualità che rende l'edificio costruito la copia esatta del modello 3D in tutte le informazioni formali, quantitative, qualitative, di prezzo e le posizioni di ogni elemento.

L'adozione dell'approccio DfMA e della fabbricazione digitale, oltre che influenzare fortemente la progettazione degli edifici e semplificare la gestione del processo, ha importanti ripercussioni anche sull'edificio concreto che verrà costruito. In particolare, il sistema Facit Homes pone una grande attenzione sul rapporto tra la struttura e gli impianti. Gli edifici vengono infatti progettati e costruiti prevedendo già la collocazione di ogni cavo, tubo e condotto che compone i sistemi

impiantistici, e la struttura è realizzata così in modo da unirsi, senza soluzione di continuità, con tutti i componenti ed integrare al suo interno tutti gli impianti, prevedendone già gli alloggiamenti. I benefici dell'uso del digitale non sono dunque limitati alla produzione o alla costruzione ma sono rilevanti anche durante la fase di costruzione: velocizzando i tempi ed eliminando la necessità di compiere lavorazioni o modifiche in cantiere. Tutto questo sempre senza limitare in alcun modo a libertà formale e le possibilità di personalizzazione in quanto ogni struttura è realizzata su misura.

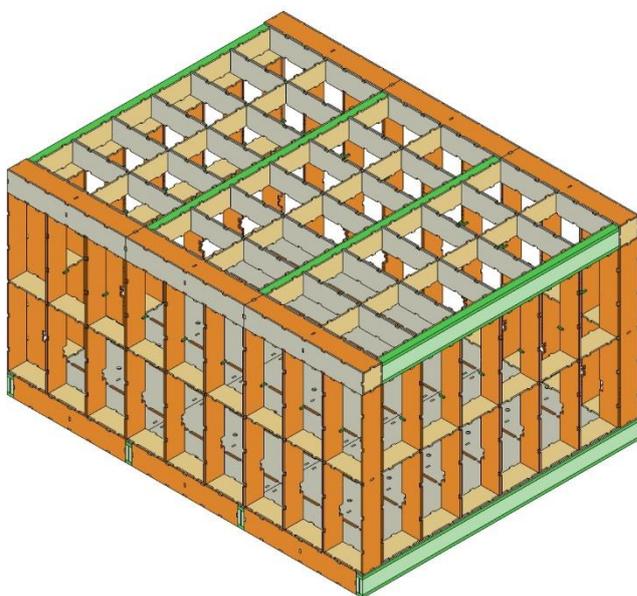
Facit homes sfrutta dunque l'approccio DfMA in modo da poter riunire in sé tutte le competenze e le fasi di lavoro necessarie per realizzare la casa richiesta dai clienti. In questo modo Facit Homes mira a fornire un servizio "chiavi in mano" realmente completo e trasparente, in cui l'impresa si assume tutto il controllo e tutte le responsabilità. Per il cliente non c'è quindi bisogno di cercare un costruttore affidabile e temere ritardi o cambiamenti al progetto concordato, in quanto tutto il processo gestito da Facit Homes. Inoltre, anche nel caso in cui il cliente voglia occuparsi in prima persona delle fasi finali di finitura e arredo, Facit Homes offre un servizio di assistenza e aiuto alla progettazione e fornendo i dati completi su quella che è la situazione dell'edificio affidato al cliente per la gestione, gli interni e la finitura delle superfici interne.

Un altro beneficio dato dei sistemi DfMA e sfruttato da Facit Homes al fine di costruire un rapporto di fiducia con il cliente capace di eliminare ogni preoccupazione e tensione, è la possibilità di conoscere in anticipo e con certezza i costi di costruzione. Infatti, i modelli 3D, usati fin dalle prime fasi di progettazione, contengono al loro interno già tutte le informazioni necessarie per definire il prezzo totale della costruzione, e permettono inoltre di vedere in tempo reale come eventuali modifiche all'edificio vadano ad incidere sul prezzo finale. In questo modo si può offrire ai clienti anche un metodo per controllare i costi e gestire il budget, basato su una dettagliata pianificazione dei costi, che non sarebbe possibile nel caso di edifici costruiti con i sistemi comuni.

Infine, Facit Homes pone una grande attenzione all'efficienza energetica delle sue abitazioni, ottenuta però progettando edifici che prioritizzano la conservazione dell'energia piuttosto che la generazione di energia pulita. Si realizzano perciò abitazioni fortemente isolate, con un attento orientamento a sud e con rivestimenti ad alta tenuta all'aria. Al fine dell'efficienza energetica una particolare cura è posta sulla scelta degli impianti, vengono ad esempio adottati termostati intelligenti, capaci di controllare la fornitura di calore, a pavimento, per ogni ambiente, e per il ricambio dell'aria, si usa un sistema di ventilazione forzata capace di riutilizzare fino al 94% del calore dell'aria esausta. Grande attenzione anche nella scelta degli infissi che vengono realizzati appositamente per Facit Homes in legno e alluminio e sono capaci di ridurre di molto le dispersioni ma allo stesso tempo, grazie alla cornice sottile, permettono l'ingresso di una maggior quantità di luce. Sono poi offerti come optional: luci led a basso consumo, riscaldamento a zone, pannelli solari e pompe di calore, per ottenere un maggiore risparmio d'energia.

Tipologia strutturale

Gli edifici costruiti da Facit Homes presentano una struttura equiparabile a quella dei più comuni edifici timber frame. Ogni elemento dell'involucro infatti è costituito da un reticolo uniforme di montanti in compensato. Nel caso delle strutture Facit questi montanti sono in realtà i lati esterni delle scatole che costituiscono la base del sistema. Il reticolo strutturale è quindi composto da montanti spessi 3,6cm, la cui profondità è solitamente di 30cm, e che vengono collocati ad un interasse costante di 60cm, con delle possibili modifiche dell'interasse nel caso in cui la campata presenti delle aperture. I montanti verticali sono collegati tra di loro dai lati corti delle scatole e da ulteriori elementi posti a metà delle stesse, in modo da rispondere meglio alle spinte laterali e da evitare fenomeni d'instabilità al carico di punta. Dal punto di vista strutturale le facce delle scatole, pur definendo un ulteriore rinforzo, hanno poca importanza.



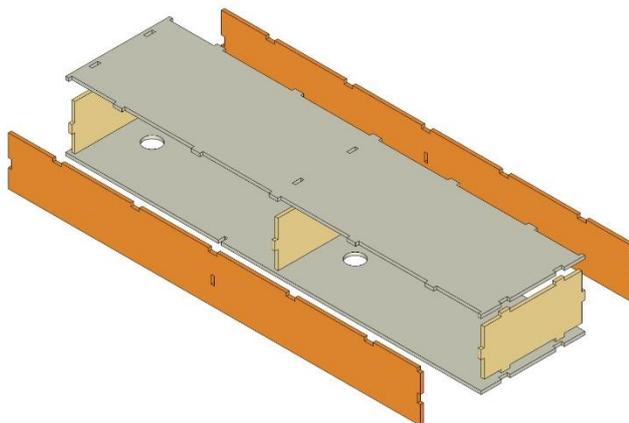
Sopra: schema strutturale di un edificio Facit Homes a cui sono state rimosse le facce delle scatole.

A lato: due immagini relative alla realizzazione della copertura, in entrambi i casi sono state utilizzate travi esterne al sistema, lamellari o I-joist.

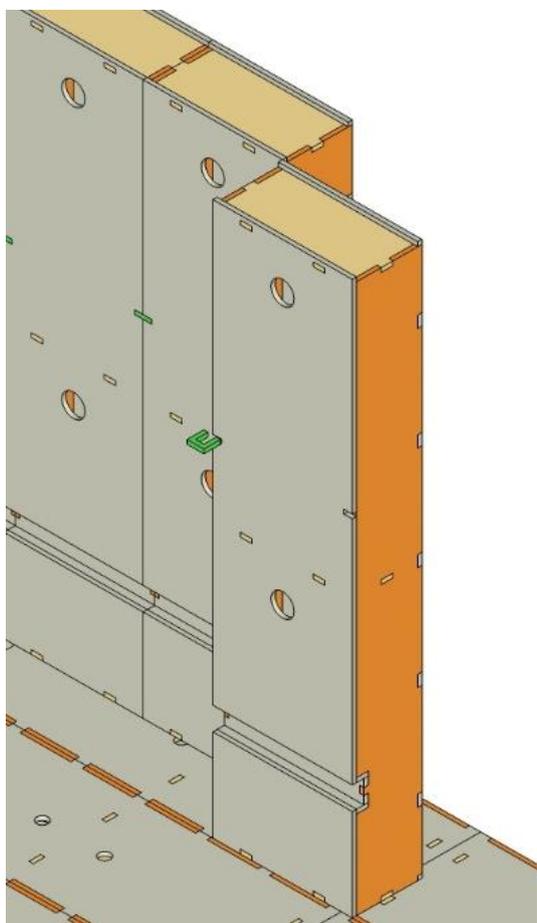
La problematica maggiore da punto di vista strutturale è la realizzazione dei solai o della copertura che non può avvenire utilizzando solamente le scatole Facit. In tutti gli altri casi analizzati l'esecuzione di queste parti avviene tramite l'inserimento di travature non realizzate a partire da elementi piani di compensato, e usando le scatole di compensato, fortemente modificate al fine di alloggiare l'impiantistica, semplicemente come riempitivo tra le travi. Le travi adottate sono nella maggior parte dei casi travi I-joists di Kerto, con anima in OSB, ma possono essere adoperate anche normali travi di legno ingegnerizzato.

Abaco degli elementi

Gli edifici Facit sono costruiti a partire da delle scatole, riempite di materiale isolante, realizzate a partire da fogli di compensato e assemblate in modo da formare le pareti dell'edificio e le tamponature dei solai. Le scatole realizzate hanno, nella maggior parte dei casi, una dimensione standard di 60x240x30cm.



Esploso di una scatola Facit Homes.



Schema della posa delle scatole di parete e dell'unione di queste tramite elementi a U. Si può notare in basso nelle scatole la rientranza per l'alloggiamento degli impianti

Le scatole sono assemblate tramite un sistema d'incastri, aiutandosi con un martello di gomma. Per prima cosa vengono inseriti i lati corti e il divisorio interno, che serve per dare maggiore rigidità sulla lunghezza. Successivamente viene posata la seconda faccia della scatola e i lati lunghi, che sono incastrati solo con la faccia esterna e con i lati corti. Infine le scatole vengono inchiodate o avvitate in modo da garantire una maggiore tenuta. Infatti, a differenza degli altri sistemi in cui le scatole vengono posate ancora aperte, per consentire di posare l'isolante in un secondo momento, in questo caso sono posate già completamente montate e l'isolante verrà poi insufflato all'interno.

A differenza di altri sistemi basati sull'utilizzo di scatole di compensato, le scatole Facit Homes sono realizzate in modo da ricoprire tutta l'altezza dell'interpiano con una sola scatola alta 240cm: il raggiungimento di altezze maggiori è garantito dall'uso di cordoli di collegamento tra parete e solaio più alti. Questo significa che l'assemblaggio delle pareti avviene semplicemente unendo tra loro le scatole adiacenti. Questa unione avviene tramite dei ganci realizzati in compensato che vengono incastrati dall'interno tra le scatole utilizzando martelli di gomma.

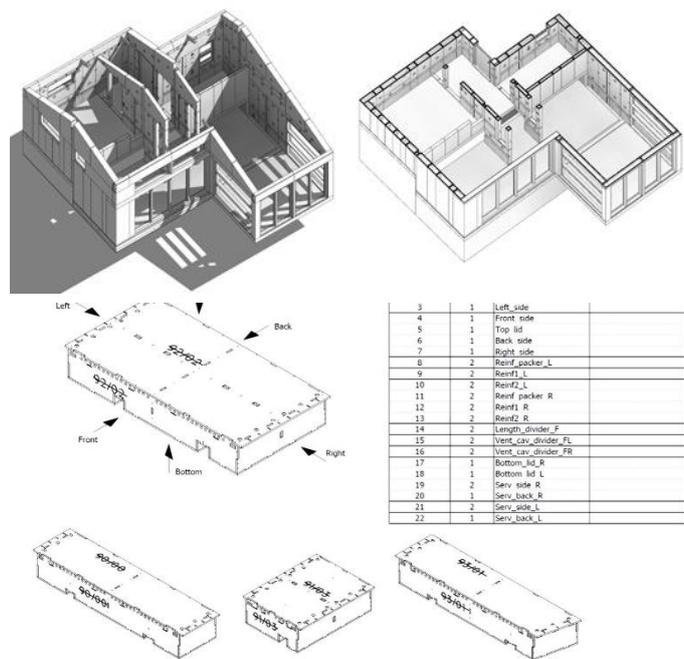
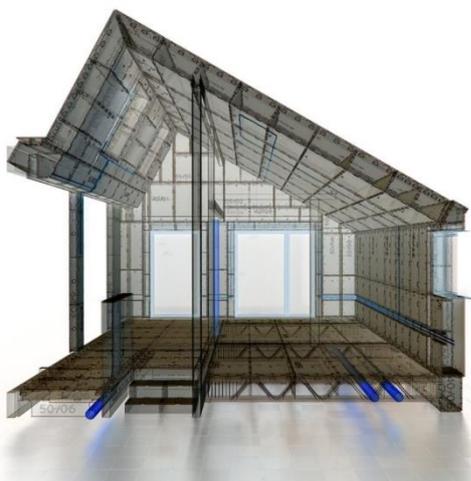
Progettazione e Fabbricazione

Il cuore del sistema costruttivo di Facit è la fase di progettazione su cui è posta la maggior parte dell'attenzione. Facit Homes ha nel tempo sviluppato una propria metodologia progettuale chiamata D-process. Questo processo consente all'azienda di progettare e fabbricare digitalmente ogni elemento coinvolto nella costruzione degli edifici Facit Homes, dagli arredi e le scale all'edificio stesso. Questo processo si basa sull'utilizzo di modelli tridimensionali che, contenendo al loro interno ogni informazione: quantitativa, qualitativa, posizionale e dimensionale, consentono di tenere sotto controllo l'intero edificio in ogni suo componente in ogni istante. In particolare, la forza del sistema è data dalla possibilità, sviluppata dal D-process, di tenere assieme in un singolo modello struttura e impianti, in modo da semplificarne la successiva posa.

La progettazione nasce quindi a partire da una libreria di elementi Facit Homes utilizzabili come componenti sul software BIM Revit. Facit Homes quindi, oltre a sfruttare i benefici offerti dall'approccio DfMA e dalla fabbricazione digitale, sfrutta anche i benefici derivati dalla progettazione BIM. Il modello ottenuto contiene anche tutte le informazioni necessarie per la sua scomposizione in superfici piane e la successiva distribuzione di questi profili sui fogli di compensato in modo da minimizzare lo spreco di materiale. Dal modello BIM si passa quindi direttamente al linguaggio della macchina CNC. Nonostante l'idea iniziale fosse di rilasciare gratuitamente le librerie di componenti, con annessi file g-code, si è infine deciso di sottoscrivere delle collaborazioni esclusive con alcuni progettisti.

Per quanto riguarda la progettazione Facit Homes, come tutti i sistemi analizzati, fabbrica tutti gli elementi a partire da fogli di compensato di dimensione 2440x1220mm, tagliati tramite macchinari CNC. Tuttavia, nel caso Facit Homes il macchinario di taglio a controllo numerico viene posizionato direttamente in sito, il che comporta la quasi totale eliminazione dei trasporti, in quanto gli elementi vengono prodotti in sito, la possibilità, per l'azienda, di non avere uno proprio stabilimento produttivo, e la capacità di modificare o adattare in tempo reale in cantiere ogni elemento che si voglia. Tuttavia, questo approccio di fabbricazione in sito, richiede spazi importanti per lo stoccaggio e la fabbricazione, e non è perciò sempre possibile, in quei casi le parti vengono fabbricate in un'officina e arrivano in sito già assemblate.

A lato: immagini del modello Bim di un edificio Facit da cui è possibile trarre l'abaco di tutti i componenti, come mostrato in basso. Sotto: visualizzazione dell'integrazione tra struttura e impianti.



COMPONENTS DESIGNED IN-HOUSE BY PRODUCT TEAM

FACIT
HOMES

Costruzione

La struttura di Facit Homes è adattabile ad ogni tipo di fondazione che il sito possa richiedere. In molti casi sono state utilizzate fondazioni con micropali a vite in acciaio che possono essere posate senza effettuare scavi, riducendo dunque il bisogno di noleggiare macchinari pesanti, e rendono anche le abitazioni, oltre all'edificio, totalmente smontabili e reversibili senza lasciare alcuna traccia sull'ambiente e potendo essere riutilizzabili. Inoltre, questo tipo di fondazioni sono molto più rapide da posare e, essendo in acciaio, non richiedono periodi di stagionatura, permettono dunque di contenere i tempi e i costi. Tuttavia, l'azienda suggerisce di adottare una fondazione a platea calda. Questo particolare tipo di fondazione infatti permette di ottenere una grande inerzia termica capace di mantenere costante la temperatura interna. È dunque l'ideale per gli edifici Facit le cui performance ambientali sono molto vicine a quelle delle case passive, inoltre, per quanto non siano al livello delle fondazioni su micropali, le fondazioni a platea calda richiedono una minore quantità di scavi e di cemento necessario rispetto alle platee più tradizionali, contenendo in parte i tempi.



A sinistra: sopra un solaio contro terra posato su fondazioni a micropali. Sotto i lavori d'isolamento di una fondazione a travi. A destra: una fondazione a platea su cui è stata posata una radice in compensato su cui verranno fissate le scatole della parete.

Nel caso in cui si opti per delle fondazioni a micropali sopra di questi verranno posizionate delle travi di legno sopra di queste vengono collocate le travi che realizzeranno il solaio del piano terra, rialzato di circa 30cm dal livello del suolo. Tra una trave e l'altra si collocano le prime scatole di compensato, che determinano il piano di pavimento. Le travi collocate sopra i micropali e la faccia inferiore del solaio sono rivestite con una vernice bitumica come protezione dall'umidità. Durante la costruzione del solaio contro terra vengono predisposti gli allacciamenti per gli impianti. Nel caso invece in cui l'edificio sia costruito a partire da una fondazione a platea, il primo passaggio sarà allora la posa, in corrispondenza di quelli che saranno i futuri muri dell'edificio, di una membrana contro la risalita dell'umidità e di un cordolo realizzato in compensato su cui si incasteranno le scatole della parete.

Si assemblano dunque le scatole che comporranno le pareti che essendo maneggiabili da una sola persona possono venire facilmente posati in opera. Le scatole, che coprono l'intero interpiano vengono dunque posate semplicemente affiancate, e unite tra di loro con dei ganci a U, realizzati in compensato, posti ad altezza petto. Per quanto questa unione tra le scatole possa sembrare debole bisogna ricordare come le pareti siano realizzate con livelli molto alti di precisione tali da creare un attrito, tra le scatole, che limita di molto ogni movimento indesiderato da parte delle scatole.



Sopra: a destra, la posa delle scatole perimetrali. A sinistra, la posa degli elementi di collegamento tra parete e solaio e degli architravi.

Sotto e a lato: la posa delle scatole di tamponatura della copertura.



Al di sopra delle scatole vengono poi posati degli ulteriori elementi in compensato. Questi servono per realizzare l'unione tra le pareti e il solaio o la falda di copertura. I solai e la copertura vengono realizzati utilizzando travi in legno, lamellare o, nella maggior parte dei casi, I-joists. Tra le travi vengono poi posate delle scatole di compensato con la funzione di tamponamento. Per quanto riguarda i solai interpiano, le scatole di tamponamento possono assumere forme e spessori molto vari in relazione alle diverse esigenze impiantistiche, in particolare per il passaggio dei condotti dell'impianto di ventilazione.

Una volta terminata la costruzione della struttura i lavori proseguono con il rivestimento, dell'intero edificio, con una guaina d'impermeabilizzazione e un telo antivento, in modo da dare alla costruzione la tenuta all'aria. Al di sopra di questi stati di protezione, vengono collocati dei listelli in legno che faranno da supporto al rivestimento. All'interno vengono posati gli infissi, raddoppiando la struttura di compensato, e collocandoli sul filo interno della parete, in modo da proteggerli dagli agenti atmosferici.



A sinistra: in alto, la posa degli impianti elettrici nella rientranza già prevista in fase di progetto. Sotto, il rivestimento esterno al di sopra del telo antivento.

A destra: l'insufflaggio dell'isolamento sfuso nell'intercapedini delle scatole perimetrali.

In seguito, non appena l'edificio sia diventato totalmente impermeabile, è possibile provvedere all'isolamento delle pareti e della copertura. Facit Homes usa esclusivamente isolanti sfusi, di solito in fiocchi di cellulosa riciclata dai giornali. Questo particolare sistema d'isolamento, tramite l'insufflaggio dell'isolante all'interno della parete, permette di mantenere pulito il cantiere, velocizza le lavorazioni, e riduce gli sprechi e gli sfridi. Infine, vengono posati gli impianti, che sono praticamente alloggiati in canalature già predisposte nelle scatole di compensato.

Casi studio

Villa asserbo, Asserbo 2011, Een til een

Costruita vicina alla foresta di Asserbo, è il primo edificio Facit costruito in Danimarca da parte dello studio Een til een. L'abitazione, di 125mq, è costruita attorno ad un ampio ambiente centrale, su cui si aprono le camere private; a dare carattere all'edificio è la copertura le cui falde, spezzate e sfalsate, provocano un gioco di luce e riflessi. A differenza degli edifici inglesi, la fabbricazione, che ha utilizzato circa 820 fogli di compensato, è avvenuta in fabbrica e le circa 400 parti sono state consegnate in sito già assemblate. L'edificio collocato su fondazioni con pali a vite, che sollevano l'edificio di circa 30cm fa inoltre uso di travi I-joists di Kerto e OSB per realizzare il solaio contro terra e la copertura. L'intera costruzione ha richiesto sei settimane di lavoro.



A sinistra: immagini del montaggio della copertura e dell'edificio in fase di costruzione

Sotto: immagini dell'edificio terminato.



Clelia and Diana homes, Hertfordshire 2012, Facit Homes

Terminata nel 2012 è stata la prima applicazione a scala reale del sistema Facit Homes e la sua realizzazione è stata illustrata nel secondo episodio della dodicesima stagione della serie televisiva Grandi Progetti.

L'abitazione, disposta su due piani, è stata realizzata a partire da 500 scatole di compensato assemblate in sito impiegando circa quattro minuti a scatola. Per la realizzazione del solaio contro terra, poggiato su delle travi in legno lamellare e un sistema di fondazione con micropali a vite in acciaio, sono state richieste due settimane di lavoro, mentre l'innalzamento delle pareti che delimitano il piano terra ha impiegato appena una giornata di lavoro. L'intera struttura di compensato è stata quindi innalzata in otto settimane, dopo le quali ci si è dedicati ai lavori d'impermeabilizzazione, alla posa delle finestre e dell'isolante e alle finiture. L'intera abitazione è stata completata in sette mesi.



Le immagini della costruzione sono state tratte dalla serie televisiva Grand Design. Sotto: le immagini dell'edificio concluso.



Henry & Christine, Berkhamsted, Hertfordshire 2014, Facit Homes

Rappresenta una delle tante ville private realizzate da Facit Homes in tutta l'Inghilterra. Si tratta di abitazioni di alto livello, in questo caso il costo si aggira tra il milione e il milione e mezzo di sterline, la cui realizzazione è possibile solamente sfruttando appieno le possibilità di personalizzazione e l'alta qualità offerta dalla fabbricazione digitale.

In questo caso l'esigenza fu quella di creare una abitazione moderna, dotata di open-space, e di qualità, capace di coniugare le alte performance ambientali e le ultime tecnologie con la facilità d'uso. All'interno dell'abitazione le finestre e l'illuminazione sono totalmente automatizzati e controllabili da dei comandi posti in ogni stanza, il sistema di ventilazione meccanica avanzata permette un costante ricambio d'aria senza tuttavia disperdere il calore interno e mantenendo il corretto livello d'umidità interna, e il riscaldamento a pavimento, controllabile con un'applicazione, si spegne da solo nei giorni invernali più assolati. Un edificio altamente tecnologico in cui tutti i sistemi sia quelli impiantistici sia quelli dell'intrattenimento, audio e internet, sono già previsti in fase progettuale e integrati all'interno delle stesse scatole strutturali.



A lato: le immagini della costruzione del secondo piano dell'abitazione tramite la posa delle scatole perimetrali.

Sotto: la struttura rivestita dal telo antivento e le immagini dell'edificio terminato.



Graven Hill, Bicester 2019, Facit Homes

Costruito all'interno di un progetto più ampio volto a realizzare una comunità di edifici sostenibili e auto-costruiti a Bicester in Inghilterra. L'abitazione disposta su due piani comprende un ampio open space e quattro camere da letto e raggiunge ottime prestazioni energetiche. Questo grazie al particolare sistema di fondazione in cui, nel formare una platea, si alternano travi di cemento armato a blocchi d'isolamento in polistirolo, capace di raggiungere valori molto bassi di trasmittanza termica pari a $0,07 \text{ W/m}^2\text{K}$, unito ai 28cm d'isolamento ad intercapedine previsti dal sistema Facit per le pareti e la copertura, e ai sistemi avanzati di riscaldamento a pavimento e di controllo della temperatura

L'intera abitazione ha richiesto l'uso di circa 1300 fogli di compensato di abete rosso. Questi sono stati tagliati e assemblati in fabbrica richiedendo un lavoro di circa tre settimane e sono poi stati consegnati già assemblati.

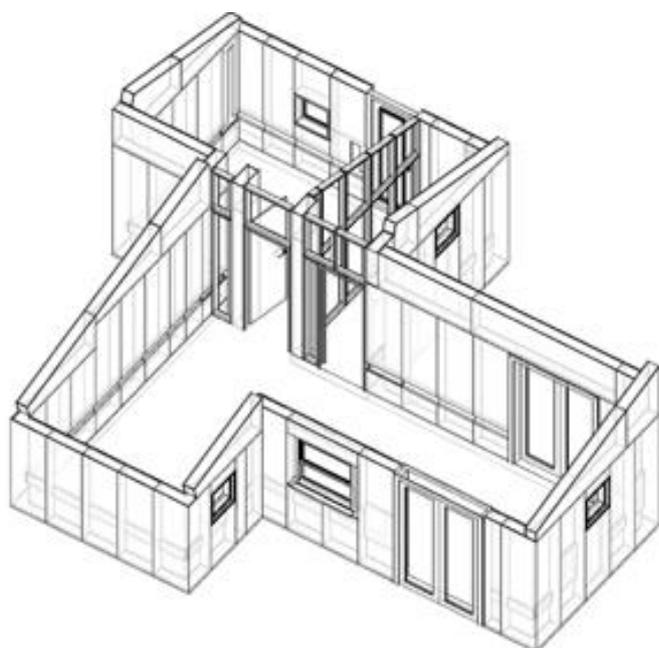
*Le immagini della costruzione dell'edificio sono state tratte dal blog:
www.self-build.co.uk/our-authors/marc-laura-marsdale
Sotto: l'edificio terminato*



Kolonihavehus Kastrup, Kastrup 2011, Een til een

Si tratta di una piccola casa di 45mq costruita in Danimarca vicino al forte di Kastrup destinata ad essere un appartamento per le vacanze estiva. L'abitazione per quanto abbia linee moderne e minimaliste s'ispira infatti allo stile tipico delle case delle colonie estive danesi, soprattutto nel rapporto che si instaura tra l'edificio e i due giardini, sul fronte e sul retro.

L'edificio dimostra anche come il sistema Facit non sia adatto esclusivamente alla realizzazione di grandi edifici a due piani ma di come sia utilizzabile anche per la costruzione di edifici di dimensioni ridotte. Tuttavia, anche in questo caso, la copertura prevede l'utilizzo di elementi non fabbricati digitalmente a partire dai fogli di compensato; basando infatti la propria resistenza sull'uso di travi I-joists.



A lato: il modello Bim dell'edificio, si può notare come la costruzione sia già suddivisa in scatole.

Sotto e in basso a sinistra: le immagini della posa della copertura.

In basso: l'edificio completato.



4.3 U-Build

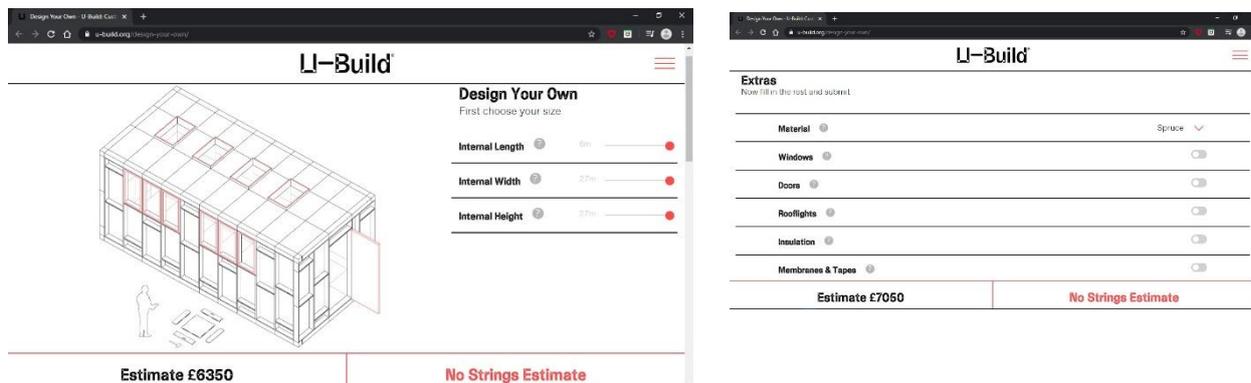
U-Build è un sistema modulare sviluppato dallo studio londinese Bark in collaborazione con Structure workshop a partire dal 2017.

L'obiettivo posto è quello di rendere il processo di costruzione più semplice e lineare, affinché chiunque abbia una discreta capacità di fai da te possa progettare e costruire il proprio spazio. Mira quindi così a cambiare il modo in cui le persone pensano e costruiscono gli edifici: semplificare il processo significa permettere a tutti di parteciparvi, rendendo accessibile e inclusivo il mondo delle costruzioni. Una democratizzazione del processo che non si riferisce però solo alla fase di costruzione dell'edificio, ma vuole riguardare anche e soprattutto la fase progettuale. Il desiderio di rendere la progettazione aperta e accessibile nasce dal desiderio di costruire edifici che siano realmente rappresentativi e utili, che siano quindi pieni di significato per chi ha preso parte al processo. È una metodologia per la costruzione di edifici che vuole riferirsi, oltre che alle singole persone, anche e soprattutto alle piccole comunità, dando loro uno strumento e il supporto necessario per costruire edifici dalla comunità per la comunità.

Questa semplificazione dei procedimenti progettuale e costruttivo, posta al centro del sistema U-Build, scomponendo e suddividendo l'intero processo in una sequenza di azioni semplici, che possono essere svolte da chiunque e svolte in parallelo da più persone, in modo da ridurre i tempi di costruzione e il denaro necessario. Un apporto fondamentale, ai fini della semplificazione, è dato dall'utilizzo della metodologia DfMA. Tra i benefici offerti da questo sistema produttivo c'è infatti l'opportunità, offerta ai costruttori, di avere il pieno controllo di ogni fase del processo, dalla progettazione alla costruzione. Questa è una possibilità importante, in grado di far sì che gli autocostruttori, non si sentano sopraffatti dal mondo, per loro tutto nuovo, delle costruzioni, e possano affrontarlo nel migliore dei modi, con ordine e semplicità. Unendo dunque il controllo dato dalla metodologia DfMA con la semplicità e linearità del processo costruttivo U-build si crea quindi un sistema accessibile, a portata di persone e piccole comunità che desiderano costruire da soli la propria abitazione, pur senza avere alcuna esperienza in merito. Il tutto unito alla certezza dei costi e dei tempi necessari per portare a termine il progetto.

Come detto la semplificazione proposta da U-Build investe anche la fase progettuale della costruzione, che viene estremamente semplificata. Ad esempio, nel caso in cui si voglia costruire un semplice edificio rettangolare, di modeste dimensioni, è possibile configurarlo direttamente dal sito di U-Build (<https://u-build.org/design-your-own/>). In questa piattaforma, semplicemente inserendo le misure desiderate, è possibile visualizzare in tempo reale il modello 3D di come sarà la struttura dell'edificio. All'interno del sito la gamma di misure possibili è limitata e modulare: per la lunghezza sono disponibili dimensioni dai 2,4 ai 6m con moduli da 60cm, per la larghezza le misure disponibili sono solo 2,1 / 2,4 / 2,7m. Anche per l'altezza sono presenti solo tre possibili misure: 2,1 / 2,4 / 2,7m. Tuttavia, dallo studio dei casi studio appare evidente che il sistema può essere adattato per coprire un range molto più ampio di misure. Queste limitazioni sono perciò esclusivamente funzionali allo strumento di configurazione via web, e ogni altra misura è disponibile su richiesta. Dopo aver definito le dimensioni il sito permette ai clienti di scegliere il materiale con cui si desidera che sia realizzata la struttura. La scelta prevede tre possibilità: OSB strutturale, compensato di abete rosso o compensato di betulla; e ha notevoli ripercussioni sul prezzo finale: nel passaggio da OSB al compensato di betulla si ha un incremento di circa il 50%. Oltre alla struttura grezza è anche possibile richiedere la fornitura di tutti gli altri elementi che andranno a costituire l'edificio, qualora non si volesse provvedere autonomamente alla ricerca. Tra questi elementi opzionali si trovano: le finestre e i lucernari, con telaio in compensato, da trattare con un coating protettivo, e policarbonato con sigillature in gomma, la porta, anch'essa in compensato da trattare e con sigillatura in gomma, l'isolante in lana di pecora già tagliato su misura, la guaina di copertura e d'impermeabilizzazione oltre che la membrana traspirante per le

pareti, coi relativi nastri adesivi per la posa. Una volta definite tutte le specifiche e confermato l'ordine inizia la produzione dell'edificio, che verrà poi spedito da U-Build direttamente sul sito sottoforma di flat-pack e potrà essere facilmente assemblato dal cliente.



Sopra: a sinistra l'immagine dell'edificio prodotto nella piattaforma web. A destra, le possibili personalizzazioni offerte dalla stessa e la stima del costo finale.

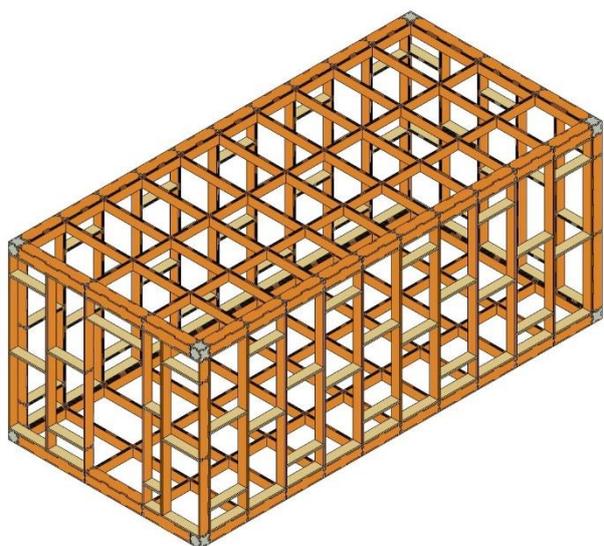
U-build è infatti un sistema di costruzione basato su semplici blocchi, che vengono spediti in kit di montaggio, sovrapposti in modo da formare muri, solai e anche mobili. All'interno del kit sono anche presenti delle istruzioni di montaggio e i contatti dell'assistenza tecnica che si può contattare nel caso si riscontrino delle difficoltà nella costruzione. Eventualmente, nel caso di progetti di gruppo o comunitari, U-Build offre anche un corso di preparazione, durante il quale gli esperti dell'azienda verranno in sito e aiuteranno ad assemblare i box e a costruire la struttura. Nonostante U-Build sia attrezzata per svolgere anche il servizio di costruzione, si incoraggia fortemente l'autocostruzione in quanto più economica, e considerata più soddisfacente per il cliente. L'assemblaggio dei blocchi e dell'intero edificio avviene utilizzando solamente martelli e trapani. Inoltre, l'attenta progettazione di U-Build fa sì che tutti i pezzi necessari alla costruzione siano di ridotte dimensioni e facilmente maneggiabile, l'intero edificio può così essere realizzato anche da una o due persone solamente.

In ragione di questa vocazione all'autocostruzione e all'essere utilizzato da parte di persone spesso inesperte, il sistema pone una grande attenzione sulla sicurezza in cantiere. U-Build cerca di ridurre al minimo il rischio di incidenti in fase di cantiere, per fare ciò limita fortemente l'uso di macchinari pesanti e adopera elementi leggeri e facilmente maneggiabili. Tuttavia, per l'assemblaggio di edifici che prevedono più di un piano fuori terra è comunque consigliato l'utilizzo di ponteggi fissi e di una copertura per proteggere i pannelli e i lavoratori dalla pioggia.

Infine, l'ultimo obiettivo di U-Build è quello di realizzare tutto ciò senza rinunciare a seguire i dettami dell'economia circolare. Vengono quindi usati una ristretta selezione di materiali naturali scelti appositamente in virtù della loro durevolezza e sostenibilità, senza tuttavia rinunciare ad un buon rapporto qualità-prezzo. La struttura è quindi costruita con compensato di abete o betulla o OSB, come isolante viene impiegata la lana di pecora, e anche le guaine impermeabilizzanti sono in materiale riciclabile. Gli edifici, inoltre, oltre a essere veloci da montare, sono progettati in modo da poter essere agilmente smontati una volta terminata la loro funzione, per essere ricollocati altrove o alla fine del loro ciclo di vita, per essere o riciclati.

Tipologia strutturale

La struttura degli edifici costruiti con il sistema U-Build può essere facilmente accomunata a quella degli edifici timber frame. Ogni elemento dell'involucro infatti è costituito da un reticolo uniforme di montanti in compensato. Nel caso di U-Build questi montanti sono in realtà i lati esterni delle scatole che costituiscono la base del sistema, che vengono avvitate tra loro. Il reticolo strutturale è quindi composto da elementi spessi 3,6cm, la cui profondità varia a seconda dei carichi previsti, e che vengono collocati ad un interasse costante di 60cm, con l'unica eccezione della campata in cui sarà collocata la porta d'ingresso. I montanti verticali sono collegati tra di loro dai lati corti delle scatole, in modo da rispondere meglio alle spinte laterali e da evitare fenomeni d'instabilità al carico di punta. Dal punto di vista strutturale le facce delle scatole, pur definendo un ulteriore rinforzo, hanno poca importanza.



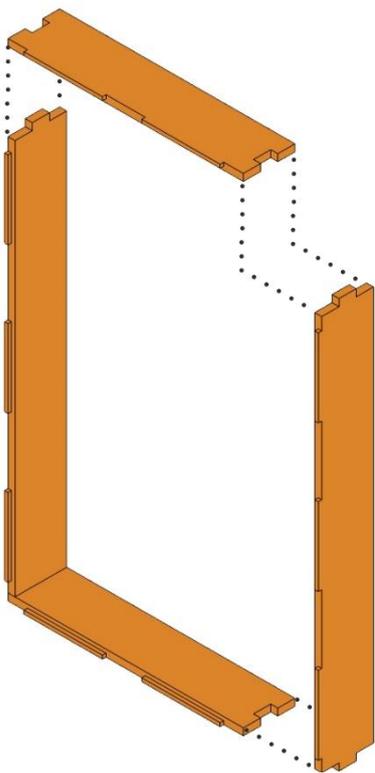
In alto a destra: una schematizzazione della struttura U-build, senza le facce delle scatole.

In alto: immagini di travi aggiuntive utilizzate per sostenere le coperture.

A lato: la struttura in legno ingegnerizzato di un solaio intermedio, in cui le scatole di compensato sono usate solo come tamponamento.

La mancanza maggiore del sistema U-Build è quella riguardante i solai. Infatti, solo in alcuni casi specifici, ovvero per edifici di piccole dimensioni o coperture soggette solo al loro peso, questi vengono realizzati utilizzando solamente le scatole. In tutti gli altri casi analizzati si è provveduto ad inserire delle travature aggiuntive all'interno della copertura, realizzate o aggiungendo ulteriori strati di compensato tra le scatole, o inserendo delle vere e proprie travi di legno ingegnerizzato e relegando le scatole al ruolo di tamponamento.

Abaco degli elementi

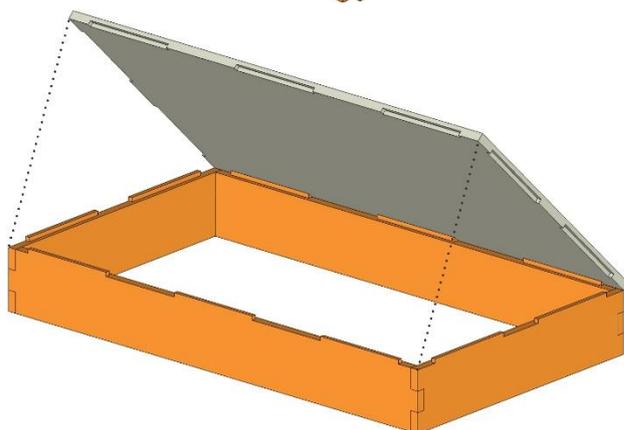


U-Build è un sistema altamente scalabile, utilizzabile perciò per realizzare opere di ogni dimensione, dal mobile agli edifici a più piani. Questo è possibile facendo affidamento ad un sistema di elementi modulari.

Alla base di U-Build si trovano delle scatole realizzate in compensato larghe 60 e 30cm. Queste scatole sono utilizzate per realizzare pareti, perimetrali e interne, coperture e in alcuni casi solai, e arredi di diverso genere. Tutti gli elementi di connessione sono standard, in modo da non complicare l'assemblaggio.

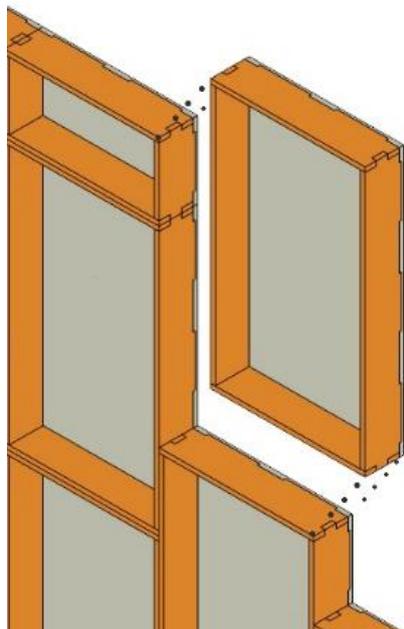
L'assemblaggio delle scatole inizia unendo tra loro i quattro lati. Questa unione avviene solamente tramite l'uso d'incastri, e richiede solo l'uso di un martello di gomma.

A lato: l'assemblaggio dei lati perimetrali della scatola.



Una volta assemblati i quattro lati viene posato il pannello interno di compensato. Questo pannello a differenza di quello esterno è modellato in modo da potersi incastrare nei quattro lati precedentemente montati. Il pannello viene poi fissato con delle viti, e svolge perciò un ruolo importante nel garantire la coesione delle scatole.

A lato: l'assemblaggio delle facciate della scatola.



Le scatole così montate sono pronte per essere assemblate tra di loro. È sufficiente posizionare le scatole una sopra l'altra e avvitare tra loro le scatole, in modo da garantire una perfetta unione tra le parti.

A lato: la posa e l'unione delle diverse scatole.

Progettazione e Fabbricazione

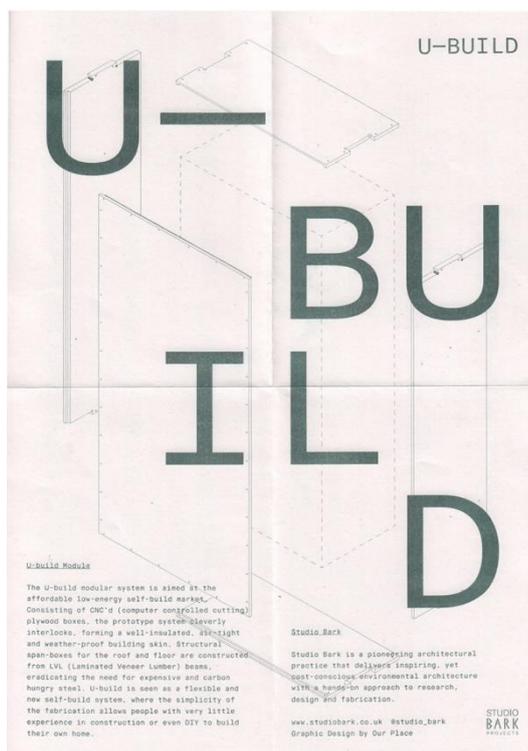
Oltre alla piattaforma di progettazione online, descritta in precedenza, che permette ai clienti di visualizzare il loro edificio e, una volta configurato secondo le loro necessità, di inoltrare direttamente l'ordine all'azienda. In questo caso la fase di progettazione è di fatto eliminata: infatti il cliente si trova a scegliere il suo edificio all'interno una gamma di modelli di diverse dimensioni già completamente definiti dal punto di vista progettuale. Si tratta quindi a tutti gli effetti di modelli prefabbricati da catalogo, che non hanno bisogno di alcuna progettazione aggiuntiva, ad eccezione di eventuali richieste specifiche. In questi casi appena eseguito l'ordine si può inviare direttamente i file di taglio a Cut and Construct, l'azienda che si occupa del taglio degli elementi.

Solo nel caso invece in cui il cliente desideri costruire edifici più complessi ed articolati si avrà una vera e propria fase di progettazione che verrà portata avanti dallo studio Bark che ha sviluppato il sistema in questi anni. Tuttavia, anche in questo caso la progettazione, essendo basata su un sistema parametrizzato in cui tutti gli elementi nascono come assemblaggio del medesimo modulo base, richiede tempi molto brevi per essere portata a termine.

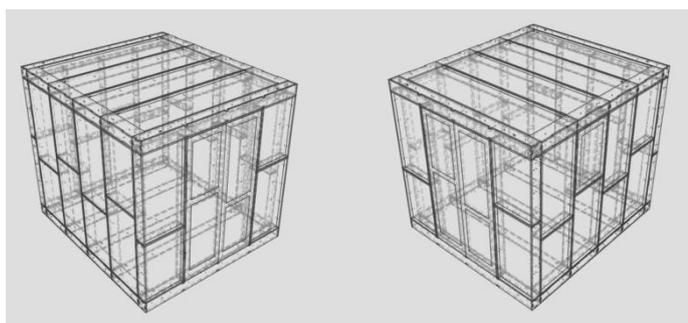
Una volta terminata la progettazione, dal modello 3D vengono estratti i profili bidimensionali degli elementi da tagliare. Tutti questi profili vengono raggruppati e suddivisi nei fogli di compensato. I file sono quindi inviati a Cut and Construct un'azienda londinese che si occupa del taglio degli elementi utilizzando macchine di taglio CNC. I pannelli possono essere realizzati in compensato di abete o betulla con l'alternativa dei pannelli OSB.

Quindi, a differenza dei sistemi analizzati, U-Build si affida ad un sistema di produzione totalmente accentrato che fa riferimento ad una sola azienda per il taglio di tutti gli edifici. Questa scelta appare discutibile poiché si tratta di una scelta in controtendenza rispetto all'obiettivo di sostenibilità posta dal sistema, poiché richiede che i pezzi fabbricati siano poi inviati fino al sito di costruzione, posto anche a centinaia di chilometri di distanza, senza considerare l'opportunità di una produzione più prossima al sito. Tuttavia, questo approccio al taglio degli elementi ha anche i suoi punti di forza; permette infatti di creare un legame molto più forte tra progettisti e produttori,

che non si formerebbe nel caso di una produzione distribuita sul territorio e affidata a centri di taglio sempre diversi, e grazie alla quale il sistema U-Build è in grado di raggiungere una maggiore consapevolezza su tutti i dettagli della produzione, le criticità, le tempistiche e un miglior feedback in generale. Una volta tagliati tutti gli elementi necessari questi vengono spediti in sito sotto forma di flat pack come un kit d'assemblaggio.



A lato: la copertina di un manuale d'istruzioni U-Build.
Sotto: il modello a fil di ferro di una struttura U-Build.



Costruzione

Poiché gli edifici costruiti con il sistema U-build sono in grande maggioranza edifici di ridotte dimensioni, la loro struttura è molto leggera e non c'è la necessità di costruire delle vere e proprie fondazioni permanenti come platee o plinti di cemento. Nel caso di strutture esterne è infatti sufficiente posare l'edificio su dei blocchi di cemento, mentre per strutture collocate in ambienti interni si possono usare dei bancali di legno, facili da alzare o se necessario si può collocare la struttura su delle ruote. Tuttavia, qualora si volesse adottare il sistema U-build per realizzare edifici di grandi dimensioni sarà opportuno realizzare delle vere e proprie fondazioni. Gli edifici costruiti con il sistema U-Build fanno sempre ricorso a fondazioni a platea che viene poi ricoperta con una barriera al vapore, per evitare che l'umidità di risalita dal terreno possa intaccare gli elementi in compensato.



Sopra: le scatole U-Build già assemblate e pronte al montaggio, immagazzinate in un ambiente chiuso per proteggerle dall'umidità.

A lato: la posa delle scatole perimetrali collocate sopra un cordolo in cemento.



Gli elementi arrivano in cantiere già tagliati e in comodi kit di montaggio. Si procede subito con la prima operazione da compiere, ovvero l'assemblaggio delle scatole, che avviene tramite semplici incastri e connettori standard, e che prevede il solo uso di un martello di gomma e un avvitatore elettrico. L'assemblaggio di ogni scatola richiede circa dieci minuti di lavoro.

Il primo passo della costruzione è l'assemblaggio e la posa in opera del solaio contro terra. Si procede perciò posando le scatole che comporranno il pavimento, e le eventuali travi di rinforzo del solaio, direttamente al di sopra della barriera al vapore. A mano a mano che la posa procede, assicurandosi che le scatole siano nella corretta posizione, si avvitano assieme tutti gli elementi.

Successivamente si inizia a costruire i muri perimetrali dell'edificio posando le scatole, con la faccia aperta rivolta verso l'esterno. Si procede dunque a strati posando una fila dopo l'altra e avvitando tra loro le scatole una volta che l'intera fila sia stata posata. Poiché le tolleranze previste, grazie alla produzione digitale, sono minime è importante inizialmente non avvitare eccessivamente le scatole, per non rischiare che le successive non entrino in posizione. Una volta che tutte le scatole, delle pareti sono in posizione è possibile stringere completamente le viti di fissaggio, proseguendo in cerchio, dal basso all'alto. Questo renderà l'intero edificio diventerà così molto più forte e rigido.



Sopra: a sinistra, la struttura dei solai intermedi, rinforzata con travi. A destra, la posa delle scatole del solaio, aperte su lato superiore.

La copertura dell'edificio non ha limitazioni formali e può essere realizzata sia a falde sia piana o anche verde. Tuttavia, U-Build consiglia l'utilizzo di tetti piani poiché questi hanno il miglior rapporto qualità-prezzo. La costruzione del tetto è leggermente più complessa rispetto a quella del solaio contro terra in quanto la necessità di una leggera pendenza richiede di prestare un notevole attenzione alle piccole differenze tra gli elementi d'assemblare. Inoltre, per il tetto ci si avvale dell'utilizzo di travi in legno comuni, che non essendo prodotte con macchinari a controllo numerico sono spesso realizzate con una precisione dimensionale inferiore a quella delle scatole U-Build. Questa discrepanza può quindi fare insorgere problemi vista la bassa tolleranza del sistema.



A lato: Il dettaglio della copertura, ricoperta di OSB dopo aver posato un isolante a pannelli rigidi.

Sotto: la posa dell'isolamento nelle intercapedini delle pareti.





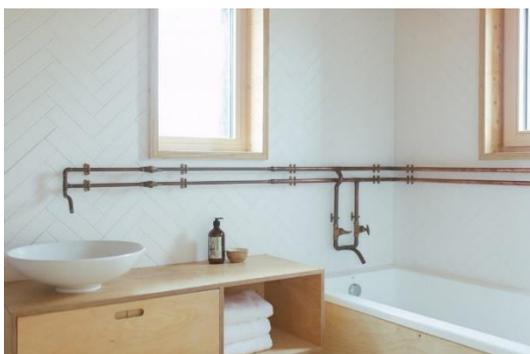
*A lato: la posa della membrana impermeabilizzante.
Sopra: l'isolamento a pannelli rigidi della copertura.*

Una volta chiuso l'involucro dell'edificio si procede dunque coll'isolamento della struttura. L'isolante in lana di pecora viene consegnato sul cantiere già tagliato di misura in modo da poter essere collocato facilmente e senza produrre sfridi all'interno delle scatole perimetrali, che erano state lasciate aperte sul lato esterno della costruzione. L'isolante è poi coperto da due strati di membrana traspirante e impermeabilizzante, prima di poter essere rivestito. Nel caso invece di edifici collocati in ambienti interni, e che non richiedono perciò uno strato d'isolamento, la struttura delle scatole è solitamente lasciata esposta.

A differenza delle pareti, dove l'isolante è collocato all'interno delle scatole, nella copertura l'isolante è solitamente posto al di sopra del piano definito dalle scatole ed è realizzato con dei pannelli SIP, pannelli strutturali isolati, in OSB, con uno spessore di 10cm. Questi pannelli vengono tagliati con una sega ed incollati alla copertura. Una volta posati, questi pannelli vengono rivestiti con una guaina butilica impermeabilizzante e dal rivestimento scelto per la copertura. Allo stesso tempo vengono posati sulle facciate i listelli di supporto e il rivestimento realizzato di solito con pannelli in legno.

La maggioranza dei progetti eseguiti con il sistema U-Build non prevedono finiture interne, se non in specifici punti, e sono caratterizzati soprattutto dalla posa a vista degli impianti, che sono trattati come un elemento di arredo e di disegno degli spazi. Per cui le scatole vengono semplicemente trattate con vernici protettive e, nel caso di forti esposizioni solari, anche con una cera protettiva volta ad evitare che il compensato scolorisca a causa dell'incidenza dei raggi UV. U-Build consiglia inoltre l'installazione di un piccolo sprinkler e l'adozione di altre misure di protezione dagli incendi, come ad esempio l'uso di un ritardante per le fiamme sul rivestimento esterno, qualora questo fosse in legno. Queste soluzioni sono giudicate più economiche e sostenibili oltre che meno invasive rispetto al tradizionale rivestimento in cartongesso.

Esempi delle finiture interne con impianti a vista degli edifici U-Build.



Casi studio:

Boar lane studios, Leeds city centre 2016, Studio Bark

Sviluppato in collaborazione con East street arts, è un progetto di retrofitting che coinvolge il piano terra di un vecchio negozio. Il progetto prevede l'autocostruzione di cinque mini-unità, destinate a diventare studi per artisti. Il progetto è servito come test per verificare la costruibilità del sistema da parte di persone con poca esperienza.

L'intero processo di costruzione è durato due giorni. Sono stati usati solamente materiali naturali o riciclati come: compensato, lana di pecora, policarbonato riciclato, e gli edifici sono completamente smontabili e rimontabili, in modo da poter essere riutilizzati in altri luoghi una volta che scadrà la concessione per lo spazio attuale, rendendo molto più sostenibile l'investimento economico della organizzazione. Il costo totale, per tutte e cinque le unità è stato di 25 mila sterline, 5 mila sterline a studio.

Le prime immagini mostrano le fasi di costruzione delle micro-unità.

In basso: le unità completate e la vista d'insieme del complesso.



Box House, Bicester 2019, Studio Bark

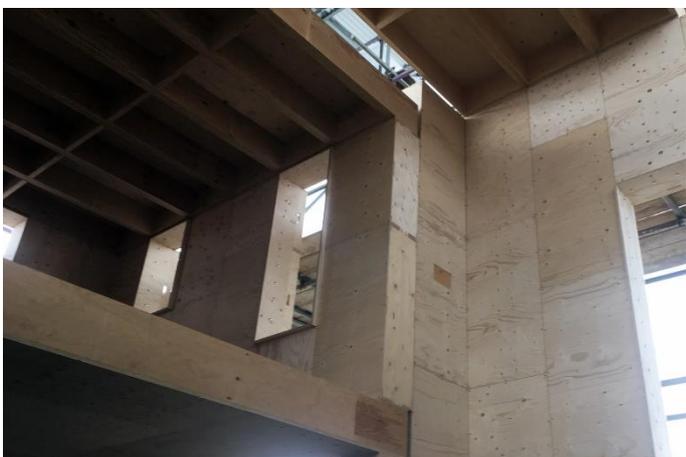
La casa è uno dei 10 progetti pilota dell'ambizioso piano "The Graven Hill", che prevede lo sviluppo di 1900 abitazioni progettate su misura e autocostruite. La sua costruzione è stata documentata dal programma televisivo Grand Design: the street nel quarto episodio della prima stagione. La casa è suddivisa su 2 piani, con 2 camere da letto e la possibilità, in futuro, di costruirne una terza, ampliando il primo piano, per un totale di 90mq. L'isolamento è così efficace che l'abitazione non necessita di radiatori, ma è sufficiente un singolo giro di un tubo in rame da 22mm, lasciato a vista come decorazione. La casa beneficia inoltre di un tetto verde e un sistema di pannelli solari capaci di produrre 2kWp. Atmos Lab hanno confermato che l'impronta di carbonio per l'edificio è di circa 238 kgCO₂/mq comparati ai 550kgCO₂/mq di una casa tradizionale. Il costo totale è stato di 201 mila sterline, IVA esclusa, la costruzione è durata in totale 4 mesi: 4 settimane per la struttura, realizzata con 380 scatole in compensato, e 8 settimane per le partizioni interne e le finiture.



A lato: le foto del processo costruttivo, tratte dalla trasmissione Grand Design.

Sotto: la pianta del piano terra.

In basso: le immagini dell'edificio terminato.



Garden studios, Stratford Londra 2016, Studio Bark

È il primo edificio U-Build autocostruito a partire da un kit di montaggio spedito in sito. Il progetto riguarda la costruzione di un piccolo spazio familiare e di studio. La collocazione dell'edificio, nel cortile su retro della casa, ha reso necessario il trasporto di tutte le parti utili attraverso la casa, e reso impossibile portare in sito i macchinari necessari alla fabbricazione. Tutte gli elementi sono perciò stati tagliati in un paio di giorni in piccole parti. Essendo il primo edificio U-Build si sono riscontrate alcune difficoltà in fase di montaggio dovute alla scarsa tolleranza prevista in fase di progettazione.

Tutto l'edificio è in compensato di betulla, trattato con vernici protettive per evitare il fenomeno di scolorimento causato dai raggi UV e con una cera protettiva, mentre i pannelli di rivestimento esterni sono trattati anche con un ritardante per le fiamme. Come isolante per le pareti è stata utilizzata lana di pecora, posata da fuori all'interno delle scatole, mentre un isolamento più tradizionale, in pannelli rigidi spessi 10cm, per la copertura. Il costo totale per questo mini-studio realizzato in autocostruzione è stato di 18 mila sterline. Va inoltre specificato che nonostante tutta la struttura sia costruita con le scatole U-Build, per la struttura principale della copertura si è preferito utilizzare delle travi in legno.



Le prime immagini rappresentano il processo costruttivo dell'edificio e sono tratte dal blog: studiobark.co.uk/a-u-builders-self-build-diary/

In basso: l'edificio completato.



Mill Lane, Essex 2018, Studio Bark

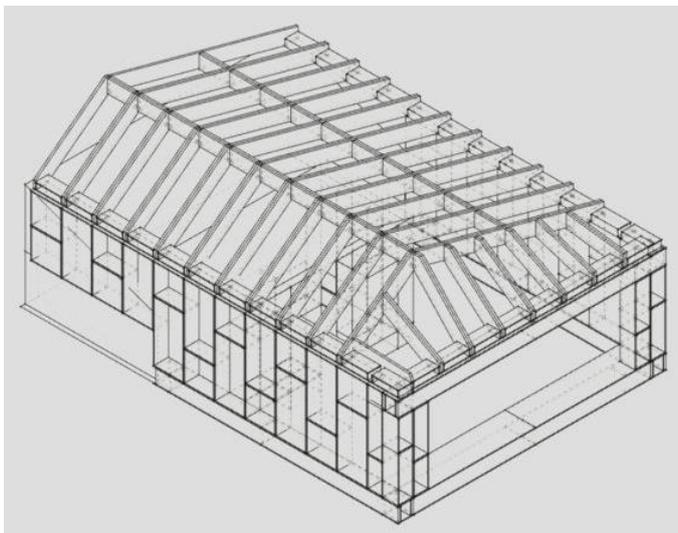
Il progetto rappresenta l'estensione di un cottage dell'Ottocento. Il nuovo ampliamento ospita una camera da letto matrimoniale con bagno e sporge oltre il piano sottostante.

Il progetto è uno dei migliori esempi di quanto il sistema U-Build sia flessibile e adattabile ad ogni forma, ben al di là delle scatole prefabbricate con tetto piano. La copertura di questa estensione è infatti composta da tre falde asimmetriche. Anche in questo caso la copertura è stata realizzata unendo alle scatole U-Build delle travi aggiuntive, in compensato laminato. Vista la forma particolare della copertura è stato necessario compiere uno studio accurato e preciso di ogni pezzo, che non essendo più standardizzati fanno sì che aumentino i costi e la complessità del progetto. L'intera costruzione è perciò durata circa quattro mesi.

A lato: il modello Bim dell'ampliamento.

Sotto: le fasi di costruzione.

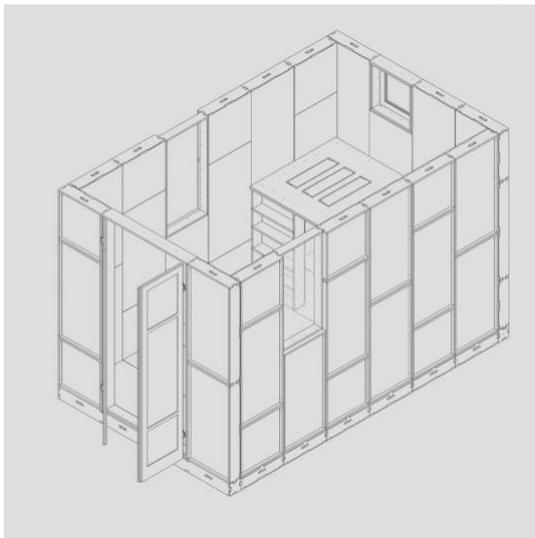
In basso: la struttura una volta terminata.



Internal living pods, 2017, Studio Bark

Gli internal living pods sono uno dei primi progetti sviluppati da Studio Bark utilizzando il sistema U-Build. Queste unità sono utilizzate per creare una stanza all'interno di un ambiente più grande, fornendo molteplici possibilità di ri-uso di larghi spazi sottoutilizzati, come vecchi edifici industriali. Può essere usato come locale da giorno o da notte, come zona ospitalità, uffici o area servizi.

Il sistema U-Build inoltre rende queste unità completamente smontabili, sono perciò adatte anche per usi temporanei, come spazi pop-up o unità a servizio di una più dura trasformazione dell'edificio ospitante. Ogni unità impiega solo un giorno per essere costruita e la sua presenza non intacca minimamente l'edificio ospitante, potendo addirittura essere montato su ruote.



Sopra: un'immagine del modello Bim.
A lato e in basso: l'unità terminata.



4.4 Instant House

Instant House nasce nel 2004 come progetto di ricerca sviluppato da un gruppo di ricercatori del MIT di Boston guidati dal professore Larry Sass e dedicati alla ricerca nel campo della digital fabrication e delle possibili applicazioni del digitale alla progettazione e produzione di edifici, concentrandosi soprattutto su come la fabbricazione digitale possa essere utilizzata nell'ambito di una crisi abitativa urgente come avviene in seguito a disastri naturali o migrazioni di massa.

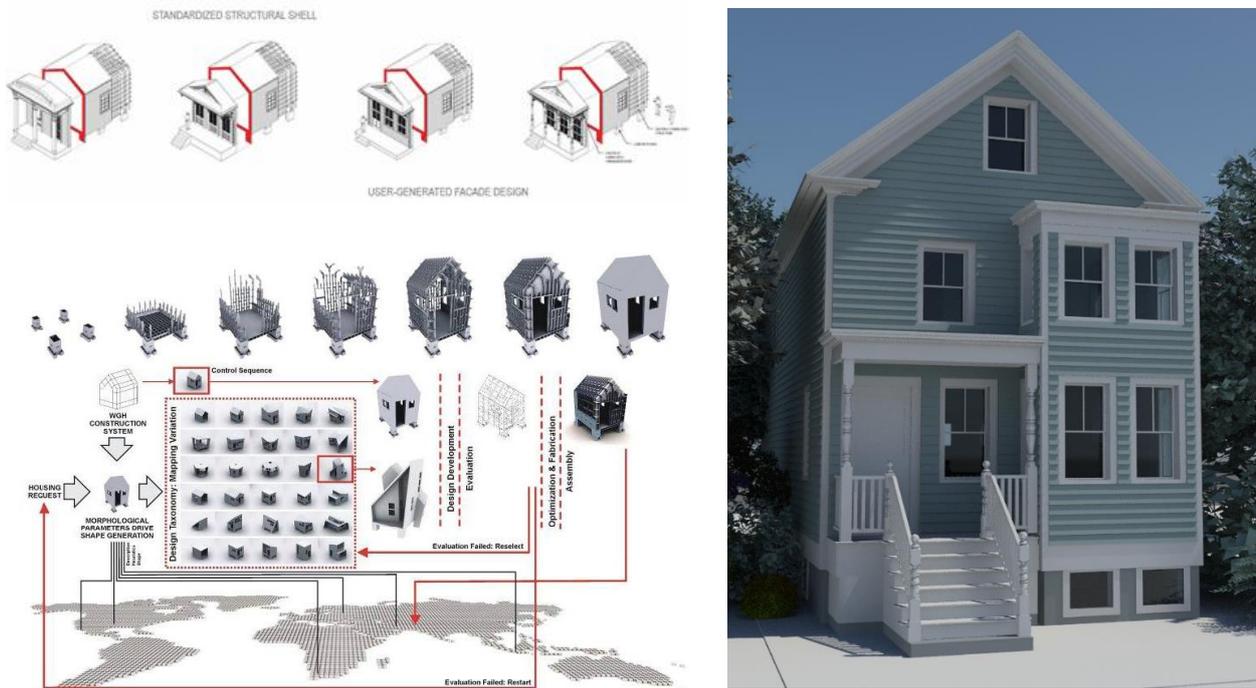
Il progetto cerca dunque di dare una risposta al bisogno impellente di nuove abitazioni, ordinarie ma soprattutto d'emergenza riferendosi principalmente alle comunità rurali. La ricerca è quindi partita da una analisi degli edifici prefabbricati che vengono attualmente adottati in tali territori nei periodi di crisi. Queste possono essere principalmente di tre tipi: le case mobili, interamente prodotte in fabbrica e consegnate già preparate, le case prefabbricate, che vengono trasportate scomposte in pochi grandi elementi, le abitazioni d'emergenza di piccole dimensioni e bassa qualità realizzate spesso con materiali economici e disponibili in grandi quantità. Per quanto riguarda invece gli edifici realizzati in sito questi nascono combinando strumenti manuali tradizionali e prodotti industriali come guaine impermeabilizzanti e isolanti. Questo tipo di costruzioni, che adottano molto spesso un sistema costruttivo a telaio di legno, per quanto veloci da costruire, richiedono l'uso di manodopera specializzata e in grado di saper leggere i disegni tecnici. Molto spesso poi questi edifici fanno ricorso a una grande varietà di materiali diversi, ognuno dei quali richiede l'uso di uno strumento specifico per la sua produzione e posa, il che complica notevolmente il processo costruttivo. Oltre a ciò, anche la fase progettuale, in queste aree, può incontrare ostacoli importanti. Nelle aree rurali e meno sviluppate la possibilità di reperire disegni in cantiere spesso non è scontata a causa di ragioni tecniche, politiche o finanziarie. e la stessa produzione dei disegni di progetto richiede tempi molto lunghi. Inoltre, l'estrazione delle misure dai disegni e le diverse fasi a cui queste vengono sottoposte: pianificazione, taglio e assemblaggio, amplificano le possibilità d'errore e dilatando di molto i tempi. Per questi motivi è proibitivo e costoso pensare di applicare ad una costruzione svolta in un sito di questo tipo e in queste condizioni gli stessi metodi utilizzati per la costruzione di edifici convenzionali.

In risposta a tutte queste criticità si è deciso di sviluppare il sistema Instant House, accumulabile ai sistemi DfMA, ovvero un sistema rapidamente consegnabile e scalabile per produrre edifici timber frame altamente personalizzabili in modo da riuscire a venire in contro a tutte le esigenze che si possono riscontrare nelle comunità rurali, permettendo di costruire rapidamente piccoli edifici come scuole, piccoli ospedali e abitazioni, senza negare il bisogno di personalizzazione e di adattamento al contesto, di solito trascurato nelle abitazioni d'emergenza. Uno degli obiettivi principali di Instant House è quindi quello di fornire al cliente la possibilità di scegliere tra una grande varietà di forme, che possano rispecchiare tutti i diversi contesti architettonici e culturali in cui si vorrà costruire.

La caratteristica principale di Instant House è quindi quella di essere un sistema di costruzione flessibile capace di coniugare una personalizzazione di massa con la fabbricazione istantanea. Al fine di ottenere questo obiettivo Instant House si affida all'uso di componenti personalizzabili di massa e di elementi standardizzati, questi si applicano a scale diverse dal dettaglio alla struttura. Ad esempio, il corpo principale è un guscio strutturale standardizzato al quale viene applicato un portico frontale personalizzato.

La varietà formale è resa possibile dalla scomposizione del progetto in elementi modulari, che sono poi fabbricati facendo ricorso ai macchinari CNC. Per fare questo il sistema Instant House segue i metodi alla base del progetto generativo, generative design), esplorando la proposta per un nuovo linguaggio costruttivo e un nuovo modo di produrre l'edificio in sito utilizzando macchine ad alta precisione. Partendo da un modello 3D, passando per file 2D compatibili con le macchine

CNC, utilizzando un "grammatica" predefinita per suddividere il modello in componenti elementari basati su un insieme di relazioni predefinite tra i fogli di compensato, per poi arrivare all'elemento finito, tramite un assemblaggio manuale. La nuova dicotomia è che tutti gli elementi sono fabbricati digitalmente e montati manualmente con un martello di gomma. Il processo nega l'uso dei disegni ad ogni fase del progetto.



A sinistra: in alto, la schematizzazione del rapporto tra facciata personalizzata e corpo standardizzato. Sotto, schema del processo di generazione della forma. A destra: render del progetto Housing for Somerville, volto a mostrare la personalizzazione stilistica di facciata.

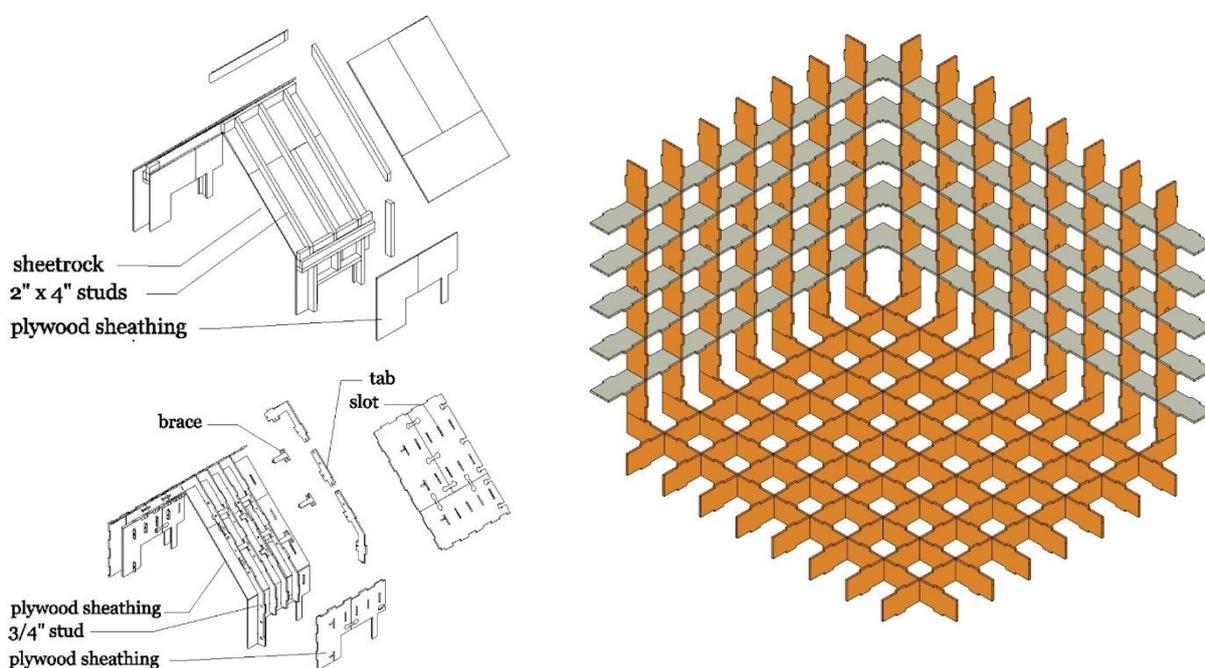
Infatti, l'attenzione sviluppata per le comunità rurali e di paesi non sviluppati o per situazioni post-emergenziali, ha estremizzato e reso molto più evidente la dicotomia, riscontrabile in tutti i sistemi di prefabbricazione per elementi piani di legno, tra progetto digitale e costruzione manuale. Nei sistemi prefabbricati infatti è molto forte la spinta verso una progettazione, e fabbricazione, completamente digitale. I progetti sono tutti basati su modelli 3D, quasi sempre BIM, parametrizzati e basati su modelli pre-progettuali già definiti dal punto di vista costruttivo e di costo. Inoltre, la stessa fabbricazione degli elementi avviene tramite l'uso di programmi capaci di suddividere il modello in elementi piani distribuendoli nei fogli di compensato e dei file g-code delle macchine CNC, evitando interpretazioni e rendendo realizzabile un progetto "senza carta" e altamente tecnologico. Allo stesso tempo questi sistemi prefabbricati ricercano, nella fase costruttiva, un approccio, quasi primitivo, che si basi sull'uso di pochi e semplici strumenti: un martello, un trapano e una scala, per montare assieme degli elementi già formalmente definiti e che, essendo in gran parte uguali, rendono impossibile ogni errore di montaggio. La costruzione, così come la progettazione, può teoricamente avvenire "senza carta" o disegni, e compiuta da persone senza alcuna specializzazione.

La decisione di progettare un sistema dedicato soprattutto alle comunità rurali ha portato alla scelta di localizzare la stessa produzione dei singoli elementi nei pressi dei piccoli villaggi dove si costruiranno gli edifici, considerando anche la forza lavoro locale come una risorsa da poter valorizzare nel processo di costruzione. Il coinvolgimento in prima persona di quelli che in futuro usufruiranno degli edifici costruiti fa sì che questi si sentano in potere di apportare tutte le modifiche necessarie per rendere l'edificio conforme alle loro esigenze, cosa che spesso non accade quando il pubblico costruisce in zone poco sviluppate, specie se si usano edifici prefabbricati, progettati senza conoscenza del luogo e delle esigenze della popolazione. Inoltre, l'impianto in loco delle micro-fabbriche può rappresentare un elemento utile per sviluppare l'economia locale.

Tipologia strutturale

Nonostante la grande attenzione riservata alla progettazione e alla fabbricazione digitale dal punto di vista strutturale gli edifici realizzati con il sistema Instant House si dimostrano essere fortemente tradizionali. La struttura riprende infatti quella degli edifici timber frame, una struttura tipica e molto diffusa negli Stati Uniti, in linea oltre che con le esigenze produttive e costruttive anche con l'idea di costruire edifici legati al contesto e agli stili locali.

La struttura è perciò realizzata come un semplice reticolo di elementi piani in compensato, della larghezza di circa 20cm e suddivisi in pezzi lunghi circa 120cm, che vengono posizionati con un interasse che va dai 20 ai 40cm a seconda delle dimensioni dell'edificio. Nel caso di edifici bassi, come quelli costruiti fin ora, che prevedono la realizzazione di un solo piano fuori terra, non è necessario introdurre alcun elemento di controventatura all'interno delle pareti.



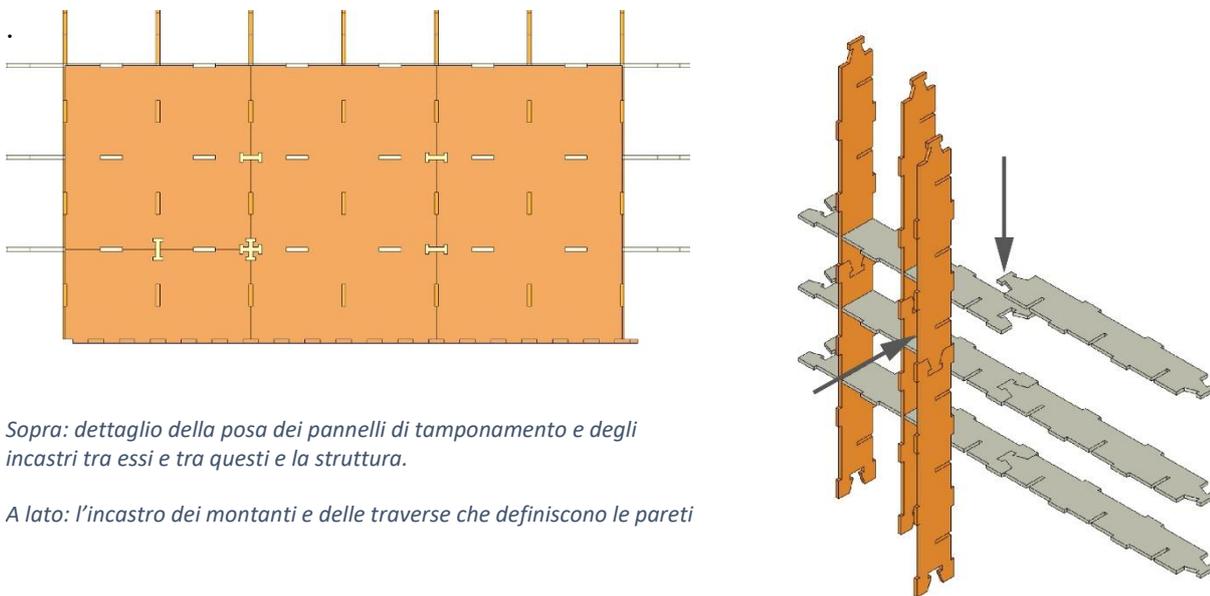
A sinistra: esplosi di confronto tra il sistema timber frame e Instant House.

A destra: spaccato semplificato della struttura.

La caratteristica principale e maggiormente innovativa del sistema è l'assenza di alcun tipo di adesivo, chiodi o viti. Il montaggio infatti è eseguito solamente tramite incastri tra gli elementi piani. A garantire la tenuta della struttura sono quindi le sole forze di attrito, che si sviluppano tra le parti. Questo particolare accorgimento, oltre a semplificare e velocizzare la fase di montaggio, rendendo per altro superfluo l'uso degli avvitatori elettrici, permette di semplificare anche la fase di calcolo strutturale. Infatti, durante la fase di verifica delle resistenze non è più necessario tenere conto della presenza di viti o altri elementi secondari di congiunzione.

Abaco degli elementi

Un grande beneficio dato dal lavorare con macchinari CNC direttamente in cantiere sta nel fatto che operazioni complesse possono essere risolte come parte del processo di generazione della forma. Negli edifici tradizionali ad esempio gli elementi di legno sono uniti tra loro tramite chiodi o viti. Questo processo richiede una grande quantità di consumabili, chiodi o viti, e di elettricità. In questo caso in oltre il processo di assemblaggio è diviso in due compiti separati: allineare gli elementi e unire gli elementi. Nel caso di instant house invece questi due processi sono uniti nel semplice processo di taglio, che definisce nei singoli elementi degli incastri tali da garantire che la coesione delle parti avvenga per semplice attrito. Gli elementi che compongono la griglia strutturale sono incastrati tra di loro utilizzando incastri maschio-femmina, per gli elementi complanari, e a mezzo legno tra gli elementi verticali e orizzontali. Per quanto riguarda le pannellature di rivestimento interno ed esterno, queste prevedono tre tipi diversi d'incastro, usati a seconda delle necessità: ad angolo, nel piano, e perpendicolari.²⁵



Sopra: dettaglio della posa dei pannelli di tamponamento e degli incastri tra essi e tra questi e la struttura.

A lato: l'incastro dei montanti e delle traverse che definiscono le pareti

Come per tutti i sistemi basati sull'uso degli incastri, anche nel caso degli edifici Instant House è importante avere un buon controllo delle tolleranze, soprattutto se si vuole assemblare l'edificio senza l'uso di adesivi o viti di fissaggio. Infatti, degli alti livelli di tolleranza significa che gli l'assemblaggio degli incastri avvenga solo tramite frizione. Livelli bassi di tolleranza invece fanno sì che l'incastro sia un modo di auto-allineamento delle parti in attesa di ricevere altre forme di congiunzione.

²⁵ Informazioni tratte da: Sass Lawrence, Botha Marcel, The Instant House: a model of design production with digital fabrication, in "International journal of architectural computing", numero 4 volume 4, dicembre 2016

Progettazione e Fabbricazione

Poiché lo scopo principale del sistema Instant House è quello di creare rifugi, anche in situazioni d'emergenza, che non rispondano alle sole esigenze di spazio e sicurezza degli abitanti ma che cerca anche di rispondere alle esigenze formali ed estetiche, l'uso di un processo di progettazione totalmente digitale è indispensabile. Infatti, per quanto la struttura alla base del sistema sia fortemente modulare e prefabbricata, e quindi facilmente progettabile e adattabile ad ogni situazione, lo stesso non si può dire per tutti quegli elementi ornamentali, che vogliono ricreare gli stili dell'architettura locale, e che sono unici e diversi per ogni edificio.

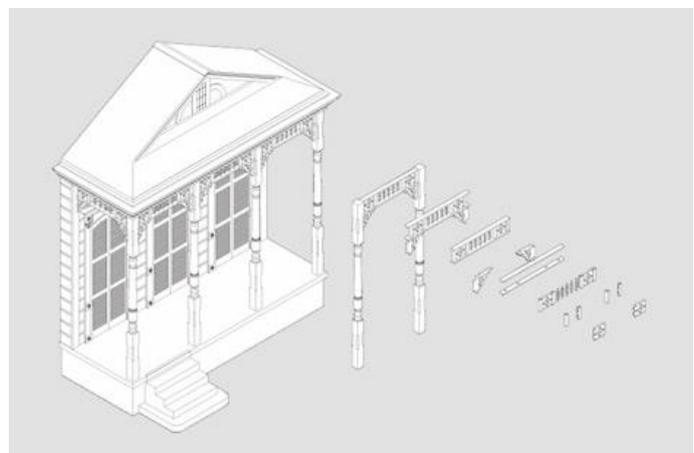
Fornire una personalizzazione estensiva dell'aspetto di ogni casa, riproducendo stili antichi moderni e un processo che necessita di alcune fasi di lavoro preliminari: la digitalizzazione, ovvero il passaggio dalle foto di riferimento ai disegni di prospetto e poi da questi a dei modelli 3D; la materializzazione, che scompone il modello 3D creato nei singoli componenti e in parti concretamente realizzabili e funzionanti; la stampa 3D di un modello in scala 1:30 al fine di controllare il risultato della fase di materializzazione. Tutto questo processo è applicato solo a parti specifiche dell'edificio, di solito solo la facciata.



A lato: schema del processo di digitalizzazione delle facciate.

In basso a sinistra: dettaglio di uno dei modellini di studio a scala 1:30

In basso: esploso degli elementi che compongono le decorazioni di facciata.



Una volta terminato il progetto viene solitamente realizzato un modellino in scala, di solito 1:6, eseguito con taglio al laser, da usare come guida per la costruzione e in modo da rilevare eventuali errori contenuti nel progetto CAD. In alcuni casi inoltre si sono realizzati modelli parziali, in scala 1:1, per testare l'uso di materiali diversi come l'OSB, e analizzare il comportamento delle parti esposte ai climi dei diversi luoghi.

Come per gli altri sistemi ci si affida a macchinari CNC per velocizzare e semplificare il processo di taglio degli elementi. Tuttavia, in questo caso i macchinari, assieme con i computer necessari per la progettazione, sono collocati direttamente in sito creando una micro-fabbrica dei componenti, come nei cantieri tradizionali dove i carpentieri costruivano la casa a partire dai materiali stoccati in cantiere. Si possono così progettare e costruire interi villaggi senza il bisogno di infrastrutture eccessive, e a grande distanza dal luogo di progettazione, grazie ai due nuovi fattori introdotti dalla produzione digitale: i macchinari portatili, e le nuove descrizioni degli

edifici in CAD che permettono produzioni più veloci e assemblaggi più facili. Inoltre, secondo i ricercatori del MIT, l'uso di strumenti portatili per la fabbricazione digitale permette di semplificare la produzione e consentire la costruzione di edifici di qualità anche in aree rurali. Soprattutto è cruciale affinché ci sia la possibilità di variare forme e layout senza perdere gli alti livelli di qualità dati dalla produzione in fabbrica. Ciò facilita inoltre l'apporto di eventuali modifiche in corso d'opera, quasi impossibile nel caso di strutture prefabbricate ed inviate sul sito.

Inoltre, la stretta connessione tra progettazione e produzione consente d'eliminare le operazioni più complesse. Negli edifici tradizionali ad esempio gli elementi di legno sono uniti tra loro tramite chiodi o viti, un processo che richiede una grande quantità di consumabili e di elettricità oltre che numerose lavorazioni dell'elemento: taglio, collocazione, fissaggio. Nel caso di Instant House invece avviene tutto in un unico passaggio, quello di taglio, che definisce nei singoli elementi degli incastri maschio-femmina, facendo sì che la coesione delle parti sia garantita per semplice attrito, questo è possibile grazie ad un attento studio delle tolleranze. Degli alti livelli di tolleranza consente che l'assemblaggio degli incastri avvenga solo tramite frizione, mentre livelli bassi di tolleranza renderebbero l'incastro semplicemente un modo di auto-allineamento delle parti in attesa di ricevere altre forme di congiunzione come viti o adesivi.

Costruzione

Si prevede che la maggior parte degli edifici, prodotti col sistema Instant House, siano di dimensioni ridotte, perciò si consiglia l'uso di semplici fondazioni realizzate fuori terra con dei blocchi di muratura come appoggi, in modo da aiutare l'edificio a distribuire il peso della struttura sul terreno in modo più uniforme, oltre a sollevare e proteggere l'edificio da eventuali alluvioni. Le parti necessarie, sono fabbricate seguendo l'ordine di costruzione direttamente in sito, queste vengono impermeabilizzate con cura applicando un sigillante, in modo da evitare fenomeni di degrado che possono essere causati da eventuali infiltrazioni d'acqua.

La costruzione dell'edificio inizia quindi posando, sopra ai blocchi di fondazione, una griglia di listelli assemblata utilizzando degli incastri capaci di definire un solaio strutturale rigido, questa griglia viene poi chiusa con le pannellature di pavimento in compensato. All'interno di questa griglia di pavimento è già predisposto l'alloggiamento per i listelli della parete che saranno fissati all'interno della griglia di pavimento per poi a definire le pareti, in modo da garantire una unione perfetta tra pavimento e pareti, e allo stesso i listelli della copertura entreranno nelle pareti per ancorarsi ai listelli di questa, allo scopo di creare un rigido involucro strutturale che tenga uniti pareti, pavimento e copertura.

Sotto: a sinistra, la griglia strutturale di un solaio contro terra. A destra, la posa dei primi montanti, è possibile notare la fondazione fuori terra.



I muri sono costituiti da una struttura interna in montanti di compensato, il cui spessore, 20cm, definisce la larghezza del muro, che viene poi rivestito con i pannelli. L'attenta progettazione fa sì che i pannelli di rivestimento siano più piccoli di 1,8x1,2m e nessuno più grande di 2,5m, in modo che tutti i pannelli siano agilmente maneggiabili da una persona sola. Ogni componente è poi allineato a mano o con un piede di porco e incastrato utilizzando un martello.



Le immagini mostrano da punti di vista diversi la struttura delle pareti, in via di rivestimento, e l'inizio di costruzione della copertura.



Il rifugio risultante è così un complesso sistema di componenti incastrati tra di loro, dove a forza tra gli elementi è data dall'incrocio di elementi e un assemblaggio capace di eliminare di auto-correggere eventuali errori. Tutto l'assemblaggio è estremamente rapido, nel caso ad esempio di un piccolo locale di 8mq ci sono volute solo 35 ore.

Casi studio:

Instant cabin, 2005, Design Fabrication Group

Si tratta del primo prototipo del sistema Instant House in scala 1:1, utilizzato per testare la fattibilità pratica del sistema. L'edificio ha la forma semplice di un rettangolo con tetto a due falde, con le aperture posizionate in modo casuale su tutti i lati. Le dimensioni interne sono di 8x10 piedi (circa 2,5x3m) e i muri hanno uno spessore di 20cm.

Il progetto è stato portato avanti da un gruppo di quattro volontari utilizzando solo cinque strumenti: pc, software, macchina CNC, martello di gomma e piede di porco. I primi quattro giorni della settimana erano dedicati al taglio delle parti necessarie e il quinto all'assemblaggio. Si sono utilizzati in tutto 114 fogli di compensato, della misura 1220x2440mm, da cui sono stati tagliate 984 parti, successivamente impermeabilizzate. L'edificio è stato assemblato senza l'utilizzo di chiodi, viti o colle, e i singoli elementi stanno insieme grazie al semplice attrito grazie ad un complesso sistema d'incastri, che tuttavia non ha richiesto la consultazione di alcun disegno da parte dei costruttori. L'edificio è stato tagliato in 55 ore e assemblato in 35 ore.



A lato e sotto: la costruzione del progetto pilota.

In basso: l'assemblamento della struttura di copertura, e l'edificio concluso.



Housing for New Orleans, New York 2008, Design Fabrication Group

Presentata in occasione della mostra al MOMA home delivery, l'obiettivo era quello di offrire una soluzione per la ricostruzione della città di New Orleans dopo l'uragano Katrina, fornendo un edificio montabile rapidamente e altamente personalizzabile, offrendo anche la possibilità di ornare l'edificio. La personalizzazione dell'edificio inoltre permette di mostrare appieno le potenzialità dei sistemi di costruzione con elementi piani, capaci di coniugare la personalizzazione di massa con la fabbricazione istantanea.

Le dimensioni interne dell'edificio sono 4,5x7,6m con una altezza di 5,4m e muri spessi 25cm. Le parti sono state tagliate fuori sito a causa del divieto imposto dal regolamento cittadino. La struttura è composta da 1163 componenti, tagliati da 578 fogli di compensato da 18mm, mentre il rivestimento è realizzato con 5401 parti, da 95 fogli di compensato da 12mm. Tutte queste parti sarebbero normalmente tenute assieme per semplice attrito ma a causa dei divieti del regolamento edilizio della città di New York si è dovuta incollare tra loro le parti. La struttura base è stata assemblata in 18 giorni mentre per gli ornamenti e le finiture sono stati necessari 5 giorni. In totale 23 giorni di lavoro per 4 persone.

Nelle prime immagini il processo di costruzione della struttura.

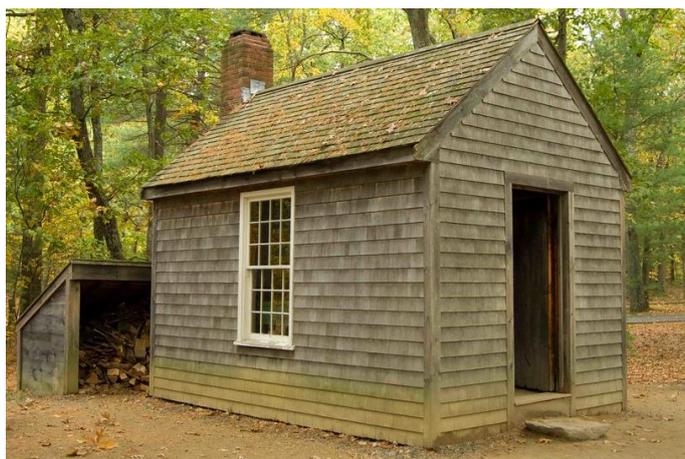
In basso: l'edificio concluso con la facciata realizzata in stile con ornamenti in compensato fabbricati digitalmente.



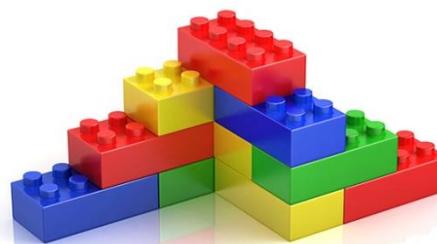
4.5 Click-Raft

Click-Raft è un sistema costruttivo sviluppato a partire dal 2008 in Nuova Zelanda, per opera dell'architetto Chris Moller e diffuso in seguito anche in Olanda.

Il riscaldamento globale è una delle sfide più grandi che l'umanità sta affrontando in questo periodo, c'è tuttavia una grande resistenza al cambiamento dovuta dalla difficoltà ad abbandonare la tradizione. Per esempio, la grande industria delle costruzioni, nonostante la sua evidente inefficienza è conservativa, attaccata ai modi di costruire del passato e lenta nel suo rinnovarsi, mentre invece è necessario un cambiamento radicale al fine di ridurre la produzione di CO₂ adottando nuovi modi di costruire. Tuttavia, l'obiettivo di fornire una casa all'umanità intera è quasi impossibile da compiere con un unico sistema costruttivo, poiché questo richiederebbe la possibilità di sviluppare un'enorme varietà di forme e soluzioni insediative e abitative in modo da rispondere alle esigenze di tutti. Quindi, quello che un singolo sistema costruttivo, come Click-Raft, può fare è limitare l'uso di risorse naturali e massimizzare, allo stesso tempo, il soddisfacimento dei bisogni essenziali dell'uomo pur in modo economico. Lo scopo di Click-Raft non è perciò quello utopistico di diventare l'abitazione dell'umanità, ma quello auto-limitato che mira, in modo concreto, a svolgere al meglio, e nel modo più sostenibile possibile, i compiti per i quali è applicato, ed è per questo che può essere un grande stimolo al cambiamento. L'ambizione di Click-Raft è di costruire con una qualità migliore, molto più velocemente ed economicamente. Con la convinzione che il tempo sia maturo per case radicali a basso impatto, economiche e che possano essere installate in posti dove vivere e lavorare a contatto con la natura.



Sopra: il rifugio di H. Thoreau a Walden Pond.
A lato: in alto, l'essenziale Citroen Tpv. In basso, i Lego.



Infatti, è centrale in Click-Raft la volontà di ritrovare un contatto con la natura, di creare rifugi che possano entrare in risonanza con essa. Per raggiungere questo scopo il sistema si affida al minimale e all'essenzialità, che prende ispirazione, su diretta espressione di Chris Moller, da tre esperienze: il rifugio di Henry Thoreau a Walden Pond, la Citroen Tpv, e i Lego. Con la convinzione però che queste esperienze del passato non siano più sufficienti e che ci sia la necessità di aggiornarle, di andare oltre, poiché l'uomo, e con esso l'abitare minimo, è cambiato molto dai tempi di Thoreau e oggi chiunque ha bisogno di essere connesso e di elettricità. Perciò chiunque occuperà quel rifugio, sia esso un esploratore, o un cittadino, dovrà comunque essere sempre connesso fornito di elettricità. Il rifugio contemporaneo deve perciò essere pensato tenendo conto anche di questi

bisogni. Questo è reso possibile grazie al rapido progredire delle fonti energetiche alternative colle quali è possibile alimentare questi rifugi in modo totalmente rinnovabile. Rendono inoltre possibile una completa integrazione dei sistemi energetici con la struttura e i componenti dell'edificio. La tecnologia digitale è quindi vista come parte integrante dell'edificio e allo stesso tempo l'edificio diventa parte della rete elettronica. Questo permette agli occupanti di conoscere, controllare e gestire tutti i processi e i flussi riguardanti energia, acqua, cibo e informazioni, diventando un'unità autonoma che unisce vita e lavoro elettronico e che educa gli occupanti.

Dal punto di vista pratico e progettuale il sistema Click-Raft nasce da un desiderio di sperimentare e di esplorare tutta una serie di nuove necessità dell'architettura contemporanea, come ad esempio le sopraelevazioni, e dalla domanda su come sia possibile portare avanti tale ricerca, se sia possibile sperimentare non tanto con disegni e progetti, ma creando e modificando i singoli componenti. Con il desiderio di accelerare la ricezione dei feedback, derivanti da queste sperimentazioni, rendendo così più veloce la ricerca.

In risposta a queste domande si è deciso di adottare un sistema di sperimentazione basata sull'utilizzo di mini-prototipi come strumento strategico per sviluppare velocemente nuove idee. È infatti un metodo pratico, oltre che efficace ed economico, per testare nuove strutture e implementare nuovi processi di costruzione a basso impatto. Si può prendere ad esempio l'industria nautica dove molte tecnologie sono inizialmente sviluppate e sperimentate sulle imbarcazioni più piccole per poi essere applicate anche alle navi di taglia più grande, finendo così per modificare radicalmente l'intera produzione. Click-Raft mira ad applicare un approccio simile, a basso costo e dal basso, anche all'industria delle costruzioni, dove prototipi, sviluppati da più persone in luoghi differenti, potrebbero spingere l'intera industria verso l'adozione di nuovi metodi, approcci e materiali, portando così una vera innovazione dei modi di costruire. Inoltre, c'è l'idea che un approccio dal basso e open-source possa essere molto più appropriato, per il sistema Click-Raft, di quanto non sia un'azienda su larga scala, e che renda più facile per gli auto-costruttori mantenere bassi i costi.



A sinistra: uno dei kit di gioco e montaggio in scala di Click-Raft, e uno degli incontri collettivi effettuati per diffondere il sistema. Sotto: un modellino utilizzato come mini prototipo del sistema.



A rendere possibile questa continua sperimentazione e prototipizzazione ci sono due aspetti importanti del sistema: la scalabilità, e la semplicità. La struttura Click-Raft, a differenza dei tradizionali edifici in legno si basa infatti sull'utilizzo di elementi molto semplici, che possono facilmente essere incastrati tra di loro. Perciò questi sono considerati come una sorta di "schizzo" concreto e tridimensionale e sono un importante strumento di sperimentazione, grazie ai quali questa diventa un processo giocoso di costruzione, come nel caso dei Lego, e perciò più accessibile a tutti. Grazie a questi elementi semplici è quindi possibile sviluppare e provare una grande quantità di strutture e volumetrie complesse semplicemente provando e giocando, lasciandosi guidare dalle proprie necessità. Tutto ciò è reso possibile dalla fabbricazione digitale e dal fatto che Click-Raft, come gli altri sistemi analizzati, faccia uso di macchinari CNC, capaci di unire la precisione di taglio alla velocità, per produrre questi elementi semplici, senza limitazioni sulla forma e contenendo i costi.

Questo sistema mira dunque al coinvolgimento di un gran numero di persone, desiderose di sperimentare e di costruirsi il proprio rifugio a contatto con la natura, sviluppando dal basso nuove soluzioni e una nuova mentalità capace di trasformare l'intero mondo delle costruzioni. Diventa tuttavia cruciale la domanda su come comunicare con il grande pubblico per diffondere la conoscenza del sistema, come permettere alle persone di sfruttare a pieno il potenziale dell'autocostruzione, e come aiutarle nel passaggio verso una nuova mentalità. Domande che devono ancora trovare una risposta prima di poter realizzare il cambiamento ipotizzato da Click-Raft, in cui la moltitudine di auto-costruttori di mini-prototipi sostituisce le poche grandi aziende tradizionali. Da costoso e difficile a economico e facile. Da edifici ad alto impatto ambientale a edifici autonomi e sostenibili. Da costruzioni specifiche al sito e fisse a costruzioni adattabili al sito e ricollocabili. Da materiali non riciclabili a materiali riciclabili. Da struttura più rete ad una struttura che è anche rete.

In ultima analisi Click-Raft è un sistema veloce e facile da montare che, in virtù della sua flessibilità e scalabilità, è particolarmente indicato per essere applicato in progetti di dimensioni economiche, di diverse dimensioni, altamente adattabili ad ogni esigenza. L'obiettivo principale di Click-Raft è quello di realizzare delle micro-unità abitative e lavorative ad un costo contenuto, inferiore ai dieci mila dollari. Queste devono essere facilmente consegnabili, costruite quindi con materiali reperibili ovunque, ed assemblabili rapidamente, anche al ritmo di una al giorno. Devono inoltre richiedere poca manutenzione ed essere autonome, in modo da poter essere installate anche in luoghi isolati. La flessibilità del sistema lo rende adattabile ad ogni contesto e siti anche molto diversi. In particolare, il sistema è perfetto per gli edifici collocati su siti temporanei e dall'ecosistema fragile, che non può essere compromesso, o in luoghi difficilmente raggiungibili. Questo grazie ad una attenta scelta dei materiali, all'uso di sistemi energetici l'autonomi integrati nella struttura, alla leggerezza della struttura e alle dimensioni contenute. Click-Raft è quindi un ottimo sistema per realizzare rifugi, anche d'emergenza, capanni di lavoro o studio, mini appartamenti o sopraelevazioni, non solo come progetti personali di autocostruzione, ma anche all'interno di più ampie politiche di riqualificazione del territorio a scala urbana che mirano a coinvolgere la popolazione stimolando interventi dal basso. Tuttavia, è sbagliato pensare a Click-Raft come un sistema limitato alla costruzione di piccole unità. Infatti, in virtù della sua scalabilità è possibile unire molto facilmente tra loro diverse unità al fine di creare edifici anche di grandi dimensioni.

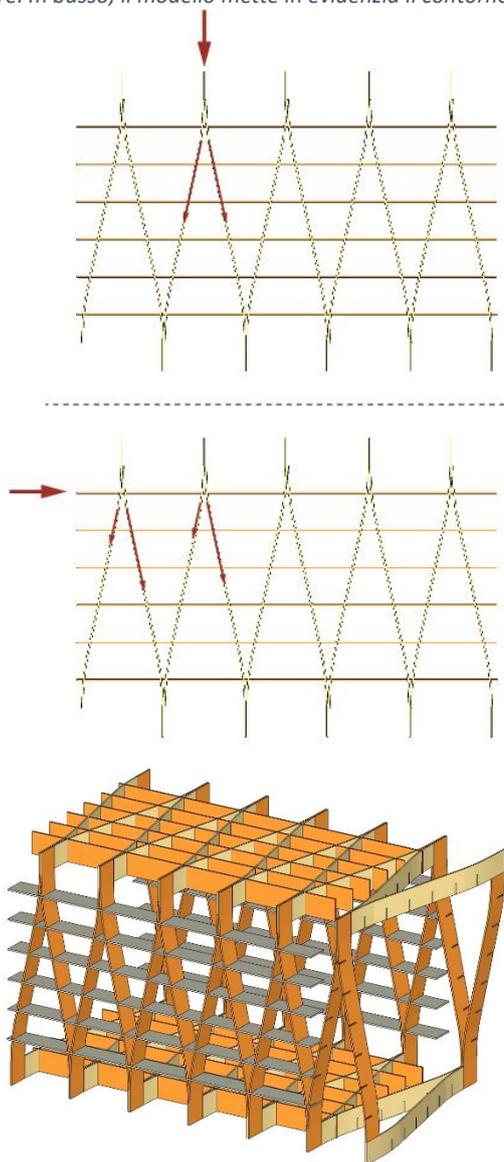
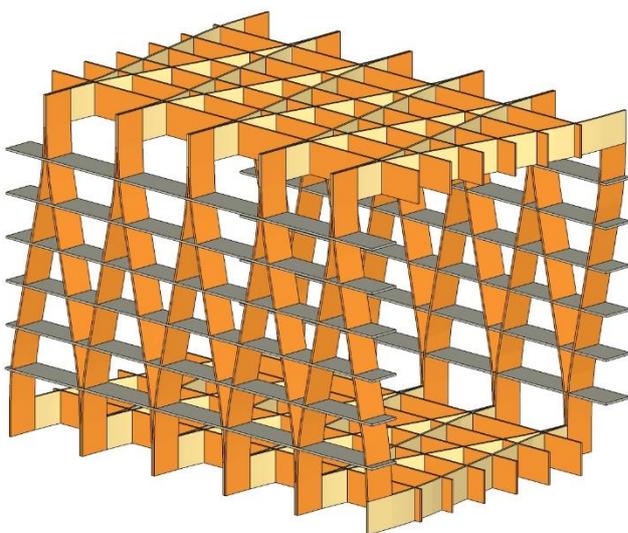
Tipologia strutturale

Le strutture Click-Raft sono composte come reticolati formati da elementi in tensione, lineari e curvilinei, intersecati tra loro e fissati facilmente tramite incastrici a mezzo legno. Queste griglie strutturali, paragonabili a delle piastre rigide sono alla base di tutti gli elementi principali dell'edificio: pavimento, muri e copertura.

La caratteristica più peculiare del sistema sta nel fatto che la griglia costituita non sia ortogonale, ma sia invece composta da maglie trapezoidali e irregolare. I pregi di questa particolare conformazione stanno nella risposta della griglia alle forze agenti nel piano. I carichi verticali non gravano solamente su un montante ma vengono suddivisi tra due di questi, mentre i carichi orizzontali non richiedono l'uso di controventature, in quanto sono gli stessi montanti ad essere già posti inclinati. Tuttavia, questa soluzione porta con sé anche la necessità di introdurre degli elementi, generalmente in legno ingegnerizzato, che definiscono un contorno dritto e regolare della struttura. In alcuni casi inoltre vengono introdotti, al di sopra delle griglie che definiscono i muri perimetrali degli elementi in legno ingegnerizzato al fine di definire l'inclinazione della falda di copertura.

A sinistra: uno schema rappresentante la griglia strutturale del sistema. in basso, un esempio su cui si possono notare gli elementi di legno ingegnerizzato posti al termine della griglia e per definire la pendenza della falda.

A destra: uno schema delle risposte strutturali offerte dalla griglia irregolare. In basso, il modello mette in evidenza il contorno irregolare della struttura.

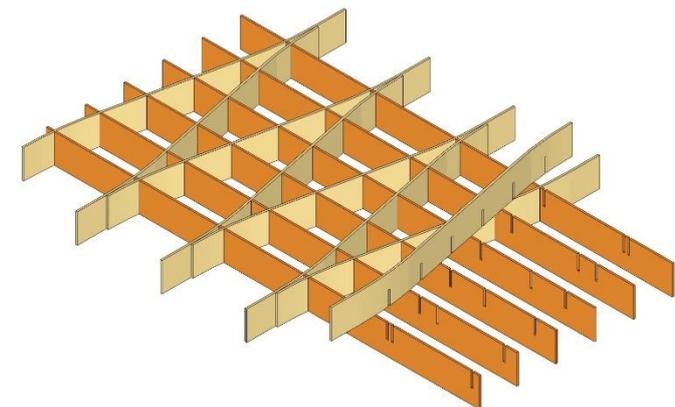


Abaco degli elementi

Le griglie alla base della struttura sono realizzate a partire da semplici strisce di compensato, di larghezza 30cm, tagliate a partire da fogli di dimensione 2440x1220mm. Per quanto questo renda tutto il processo produttivo e costruttivo molto più semplice, questo fa anche emergere la prima criticità. Infatti, avendo i pannelli una lunghezza massima di 2,44m, questa sarà anche a lunghezza massima delle strisce di compensato prodotte, il che significa che, per produrre edifici più alti o solai più larghi di tale misura, sarà necessario unire assieme due griglie. Una operazione di per sé semplice, che avviene tramite imbullonatura, ma che riduce l'efficacia del sistema Click-Raft. Le griglie sono realizzate semplicemente incastrando tra di loro le strisce di compensato utilizzando martelli di gomma. L'assemblaggio delle griglie non prevede l'utilizzo di viti o chiodi ed è perciò molto più semplice da montare e smontare.

A sinistra: modello di una griglia Click-Raft. In basso, si può notare i bulloni che uniscono le due griglie adiacenti.

A destra: i montanti della griglia pronti ad essere assemblati. In basso, dettaglio dell'incastro tra i montanti e gli elementi orizzontali.



A differenza degli altri sistemi che utilizzano elementi piani in compensato in questo caso non sono previste pannellature in compensato per il rivestimento esterno ed interno della struttura. Al loro posto è previsto l'utilizzo di una serie di rivestimenti esterni come pannelli in policarbonato multicamera, pannelli isolati di compensato o metallo. Internamente la griglia Click-Raft è lasciata a vista e utilizzata come scalfalatura o parete attrezzata integrata nella struttura, o nei casi più estremi ulteriori strati d'isolamento.

Progettazione e Fabbricazione

Come è stato detto, il sistema Click-Raft è costituito da elementi molto semplici che una volta assemblati tra loro, creano delle griglie utilizzabili in maniera indistinta per realizzare ogni cosa: solai, pareti e copertura. Inoltre, anche lo sviluppo delle nuove tecnologie si basa principalmente sull'uso di mini-prototipi e sul gioco e dunque una sperimentazione pratica e concreta, indipendentemente dalla scala in cui questa avviene. Per via di queste caratteristiche, uniche del sistema Click-Raft, la fase progettuale non sembra assumere quella grande importanza che ricopre in tutti i sistemi basati sulla fabbricazione digitale o l'approccio DfMA.

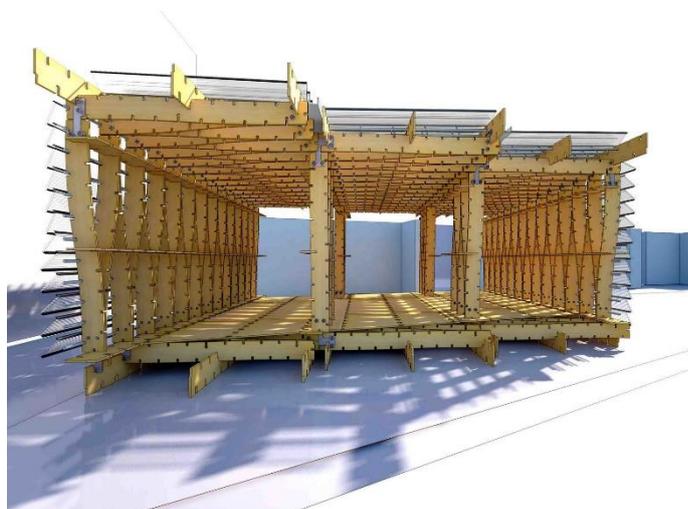
In effetti la progettazione degli edifici Click-Raft è eseguita in maniera relativamente tradizionale utilizzando software, come Sketchup, che, per quanto siano di modellazione 3D, non utilizzano alcun tipo di parametrizzazione o automatizzazione, che non sia derivata dalla semplice modularità degli elementi costruttivi. È escluso anche l'utilizzo di software BIM.

La semplicità degli elementi strutturali, che richiedono un limitato numero di tagli, e la quasi totale uniformità degli elementi, oltre all'utilizzo di una tipologia strutturale che utilizza un minor numero di elementi, a differenza dei sistemi scatolari, rende la produzione degli edifici particolarmente agile, anche per un edificio fabbricato digitalmente. Il taglio di tutti gli elementi in compensato necessari alla costruzione tramite i macchinari per il taglio a controllo numerico viene effettuata da parte di aziende terze e viene eseguita interamente in fabbrica. Una volta tagliate tutte le parti si prosegue sempre ad un assemblaggio di prova dell'edificio, che avviene in modo totale o parziale a seconda delle dimensioni, e che ha lo scopo di verificare la correttezza degli incastrati strutturali e delle tolleranze.

A lato: il taglio di uno dei pannelli di compensato

Sotto: uno dei render di studio.

In basso a destra: immagine di un test di montaggio svolta in fabbrica.



Costruzione

Gli edifici Click-Raft, in virtù della loro leggerezza, non richiedono fondazioni ingombranti. Molto spesso infatti si adottano fondazioni a pali, in acciaio o legno, su cui vengono poi posizionate delle travi che sorreggeranno il solaio del piano terra, ma in alcuni casi si può anche ricorrere all'uso di fondazioni fuori terra, realizzate con semplici blocchi di cemento poggiati sul terreno. Per queste ragioni Click-Raft si dimostra un sistema perfetto per gli edifici temporanei o collocati in siti dall'ecosistema fragile e per tutti quei casi in cui il sito si riveli irraggiungibile dai mezzi pesanti.

La costruzione della struttura è semplice e ripetitiva. Come prima cosa si assembla la griglia di pavimento, incastrando tra loro, con incastri a mezzo legno, le Click-Leaf. Successivamente vengono posati i montanti verticali della struttura, imbullonandoli al solaio contro terra. Questi montanti si trovano solo su due dei quattro lati, generalmente i più lunghi, in modo da avere coperture con luci minori. I montanti vengono poi uniti tra di loro incastrando, a diverse altezze, gli elementi orizzontali. Lo stesso processo è infine ripetuto per la realizzazione della copertura.

L'edificio viene poi terminato rivestendolo all'esterno con pannelli isolanti SIP o policarbonato alveolare, che garantiscono la tenuta all'aria e agli agenti atmosferici e isolano termicamente l'ambiente con un cappotto esterno. Risulta problematica la posa degli impianti che, per quanto totalmente indipendenti dalla struttura, sono resi meno fruibili in quanto posizionati nel tamponamento dietro alla struttura.

In senso orario: diverse fasi di montaggio: l'arrivo del flat-pack, l'assemblaggio della griglia, e la sua posa, la posa della copertura.



Casi studio:

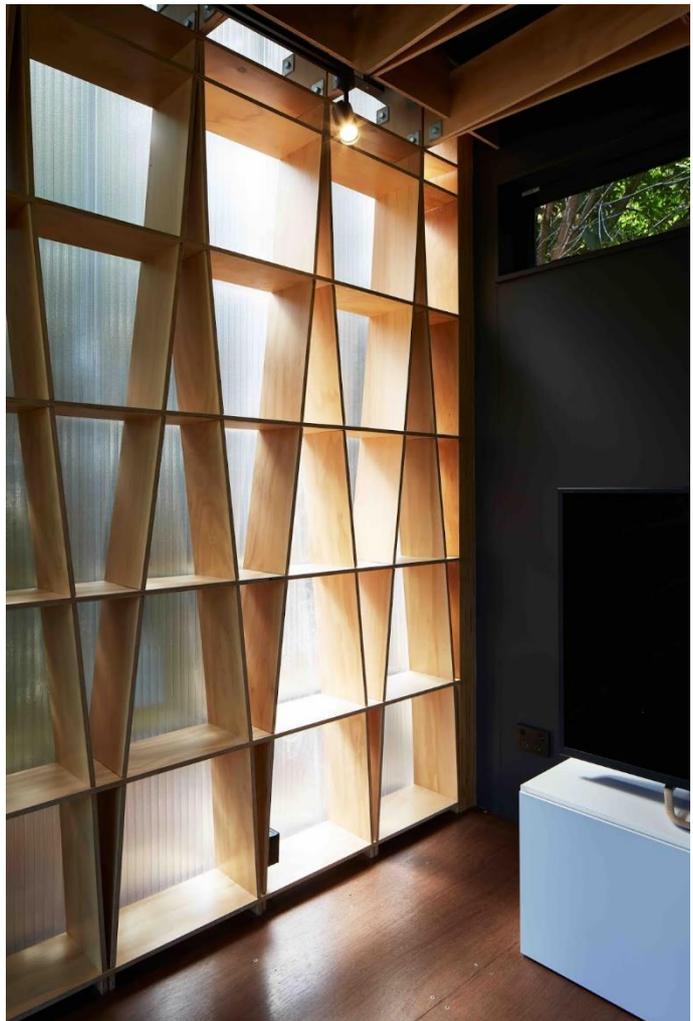
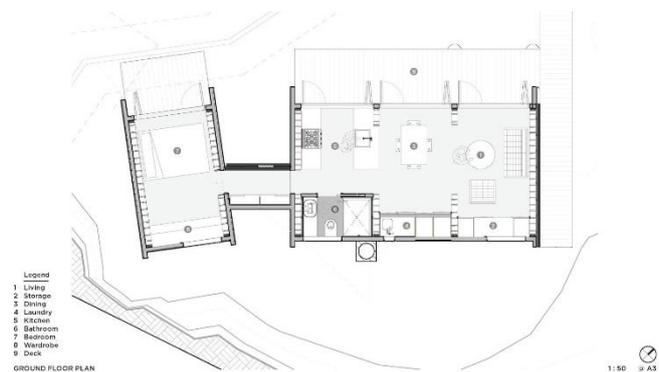
Chiu House, 2018, CMA+U

La prima abitazione costruita utilizzando il sistema Click-Raft è composta unendo due moduli Click-Raft standard, uno da 30mq per la zona giorno e uno da 10mq per la zona notte. L'edificio è rivestito utilizzando pannelli di compensato o metallo, già isolati e pannelli multistrato di policarbonato. L'intera abitazione è prefabbricata e spedita in flat-pack. L'edificio è realizzato utilizzando materiali naturali e raggiunge ottimi livelli di sostenibilità soprattutto grazie al suo essere totalmente indipendente a livello energetico. Il sistema elettrico è collegato ai pannelli solari posizionati sulla copertura, sotto il pavimento sono presenti dei serbatoi d'accumulo dell'acqua piovana.

A lato: la pianta dell'edificio

Sotto: l'assemblaggio di prova in fabbrica

In basso: la casa una volta terminata.

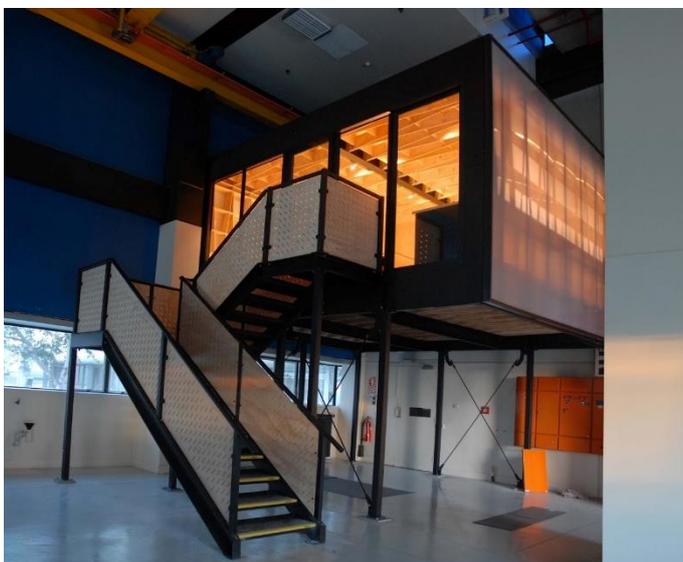
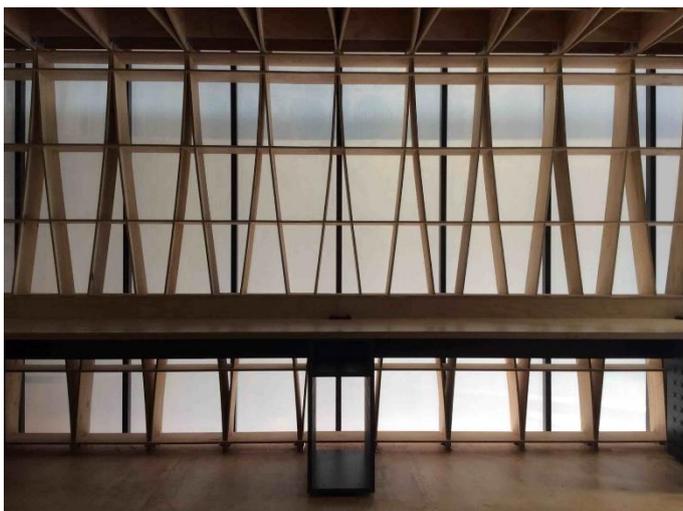


Callaghan c20 lab pod, 2010, CMA+U

Il progetto riguarda la costruzione di una piccola unità, di circa 20mq, destinata a svolgere la funzione di uffici, e capace di ospitare al suo interno lo spazio per sei ricercatori. Gli uffici sono collocati all'interno di un più grande capannone utilizzato da Callaghan innovation per svolgere le sue attività di ricerca. Perciò per non ostacolare e limitare le attività del resto del laboratorio si è deciso di rialzare la nuova costruzione utilizzando una sottostruttura metallica. La struttura Click-Raft è rivestita da pannelli isolati di compensato e pannelli di policarbonato, che permettono ai ricercatori di controllare le attività svolte nel laboratorio sottostante e creano piacevoli giochi di luce.



*A lato: le griglie montate in fabbrica
Sotto: le fasi di costruzione, al di sopra della base
metallica
In basso: l'edificio una volta terminato.*



CR launch, CMA+U

Si tratta di una micro-unità di soli 10mq destinata a svolgere la funzione di padiglione chiuso e zona giorno. La particolare collocazione dell'edificio, lungo un terreno scosceso, ha reso necessario l'uso di fondazioni capaci di definire il piano su cui è stato assemblato l'edificio. Per realizzare queste fondazioni, in virtù della leggerezza del sistema Click-Raft, sono bastate delle semplici travi di legno. Altre due travi di legno sono state adottate per dare maggiore resistenza alla copertura, e sono state poste in corrispondenza della linea di colmo e della linea di gronda. La costruzione del piccolo edificio ha richiesto in tutto solo un paio di giorni ed è stata portata avanti da un piccolo gruppo di amici.



A lato e sotto: immagini della costruzione

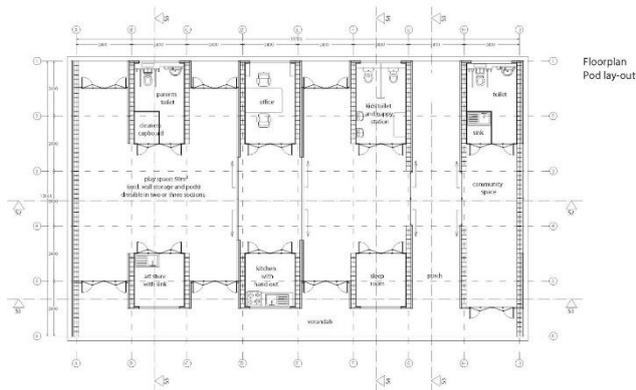
In basso: la posa delle finiture interne e la struttura completata.



Progetto scuola kindergaten, 2018, CMA+U

Il progetto vuole essere esplorare le potenzialità del sistema Click-Raft come metodo utile al fine di contribuire alla ricostruzione della città australiana di Chistchurch, colpita da un violento terremoto nel 2018. L'edificio deve quindi saper coniugare assieme l'economicità della costruzione, per la quale si spera di contenere il costo del nuovo edificio entro i due mila dollari al mq rispetto ai tre mila dollari al mq di un tradizionale sistema costruttivo, la resistenza ai terremoti e la velocità di montaggio, vitale nel processo di ricostruzione post-emergenziale.

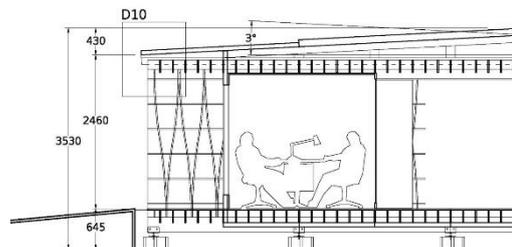
La scuola è progettata per essere altamente flessibile e adattabile alle esigenze didattiche. Grazie a due pareti mobili è infatti possibile creare differenti configurazioni spaziali: un unico open space di 90mq, due spazi, isolati acusticamente tra di loro, di 54mq e 36mq, oppure tre spazi distinti, due da 36mq e uno da 18mq.



CMA+U

www.cma-u.com studio@cma-u.com +64 21 774305 © copywrite CMA+U limited

*A lato: una delle piante proposte.
Sotto: la sezione dell'edificio.
In basso: viste interne di progetto.*



Padiglioni mostra, CMA+U

La costruzione di questi padiglioni si è rivelata, negli anni, essere molto importante per lo sviluppo del sistema stesso. Sono infatti concepiti a un lato come strumenti per la sperimentazione, prototipi in scala 1:1, per testare i nuovi elementi e la facilità di assemblaggio Dall'altro lato rappresentano un ottimo modo per pubblicizzare e far conoscere il sistema.

*A lato: un padiglione quadrato costruito in Olanda.
Sotto: le fasi di costruzione del padiglione per la mostra Hive.*

In basso a destra: il padiglione per l'esposizione Puke Ariki, e il dettaglio della copertura di un piccolo padiglione di deposito.



4.6 BURST

A partire dal 2003 lo studio americano Guthrie Architects, in collaborazione con SYSTEM architects, ha sviluppato il sistema BURST, il cui nome richiama l'apertura della struttura che arriva in sito schiacciata su sé stessa, per facilitare il trasporto, e viene poi dispiegata rivelando la forma dell'intero edificio.

Il sistema vuole essere un'alternativa ai sistemi tradizionalmente adottati per produrre abitazioni su ampia scala ritenuti colpevoli di ridurre le abitazioni prefabbricate ad un semplice insieme di scatole predefinite che, per quanto possano essere assemblati in modi diversi, questi sono limitati dalla loro forma di scatola. Ogni edificio creato con il metodo BURST ha invece la possibilità di creare spazi e volumetrie uniche, ampliando quello che fino ad ora è stato lo spettro formale della prefabbricazione e dell'architettura domestica. Il sistema funziona, come per gli altri sistemi, come un kit di montaggio, ma i piccoli elementi che lo compongono possono essere assemblati con una libertà formale tale da rendere questo sistema veramente flessibile e adattabile a tutte le esigenze del sito e della committenza.

Inoltre, per gli architetti dietro al progetto BURST lo scopo della prefabbricazione non è, come tradizionalmente è stato interpretato, quello di realizzare abitazioni economiche e accessibili a tutti, ma quello di sfruttare a pieno le potenzialità offerte dalla progettazione digitale, in modo da rendere sistemico il processo di progettazione, automatizzandolo e basandolo su regole specifiche e costanti in ogni occasione. "la prefabbricazione non è per risparmiare ma per controllare il rischio" dice Jeremy Edmiston di SYSTEM architects.²⁶ È quindi un sistema di prefabbricazione che non si preoccupa di standardizzare un singolo progetto, per poi ammortizzarne i costi grazie alla produzione di massa, ma cerca di standardizzare il processo stesso di progettazione, sintetizzando un insieme di regole universali, adottate spesso inconsciamente dagli architetti, al fine di definire un metodo certo per la progettazione. Un metodo quindi che possa essere utilizzato per sviluppare un processo di progettazione digitale totalmente automatizzato e parametrico. Il rischio che si vuole eliminare infatti non è limitato al solo rischio di cantiere: ritardi di costruzione e aumento dei costi, ma è inteso anche come rischio di progettazione, che è anche una delle maggiori fonti dei rischi di cantiere. Questo perché il processo di progettazione di un edificio, a causa della sua mancanza di sistematicità, e del suo procedere in maniera diversa a seconda dei casi, è un processo altamente incerto, che non dà garanzie, e nei casi più gravi rischia di non tenere conto di tutti i fattori e le problematiche legate alla progettazione, mettendo così in difficoltà fin dall'inizio il raggiungimento dei livelli qualitativi richiesti.

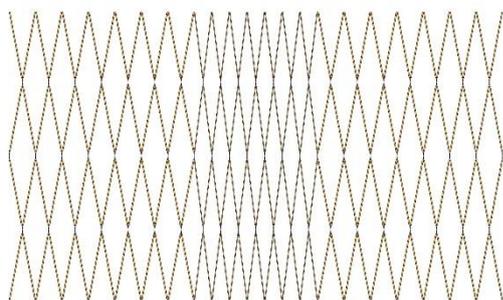
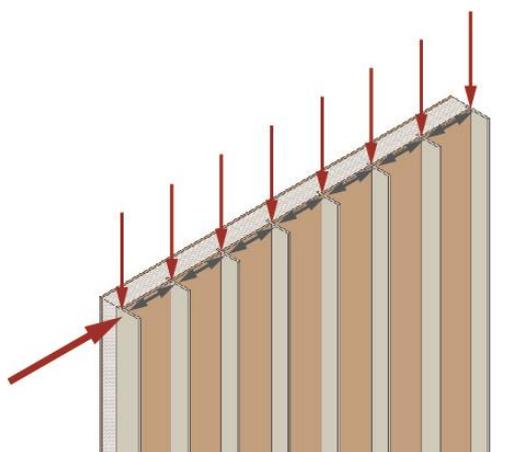
Per la progettazione degli edifici BURST si basa dunque su un sistema fortemente digitalizzato per creare edifici perfettamente adattati alle condizioni del sito e alle esigenze della committenza. Inoltre, gli edifici BURST promettono di ottenere ottimi livelli di comfort termico semplicemente utilizzando sistemi passivi, e favorendo o evitando gli effetti prodotti dalla luce solare diretta e dall'esposizione ai venti. Il grado d'apertura della griglia, ad esempio, soprattutto quella di facciata, è determinato, oltre che da questioni strutturali, anche da fattori ambientali. La trama può essere infatti aperta o chiusa per evitare un eccessivo riscaldamento solare o, al contrario, per favorire un maggiore raffrescamento portato dal vento. La sostenibilità è inoltre ricercata nella struttura e nel processo costruttivo, utilizzando strutture a tensione, resistenti e leggere, riducendo la quantità di materiale necessario e semplificando il trasporto.

²⁶Articolo di Chris Knapp del 4/12/2013 sul sito: www.archdaily.com/453236/why-it-s-time-to-give-up-on-prefab

Tipologia strutturale

L'idea alla base degli edifici BURST è quella di creare un sistema che partendo da semplici elementi piani possa definire volumetrie più complesse, e che sappia unire leggerezza e forza, in grado di resistere ad alluvioni, uragani e terremoti. Ciò è possibile solo utilizzando un sistema a tensione, capace di raggiungere alti livelli di resistenza utilizzando un ridotto quantitativo di materiale, alleggerendo in questo modo la struttura. L'edificio è avvolto quindi da una serie di costole, la cui profondità è variabile a seconda dei carichi, che proseguono fino a determinare dei solai reticolati. Al fine di avere solai di spessore costante, le costole non possono modificare la propria profondità perciò i solai assumono la forma di un reticolato a rombi, che si allargano e si restringono a seconda dell'entità dei carichi ipotizzati e inseriti nel programma. Creando inoltre una struttura più organica e meno rigida delle tradizionali griglie quadrate.

Inoltre, la griglia a rombi, rispetto a quella ortogonale più comune, garantisce una migliore resistenza alle forze orizzontali, come ad esempio il vento. Queste forze infatti sono molto più forti sui bordi dell'edificio che non al centro, perciò le due facce, del rombo, si avvicinano per dare maggiore rigidità al perimetro, mentre al centro dell'edificio si aprono per collocarsi più facilmente in corrispondenza dei muri.



In alto: lo schema mostra come le resistenze, in grigio, generate dai pannelli SIP, sia necessario al fine di resistere alle sollecitazioni in rosso.

Sopra: il disegno della struttura del solaio mostra come questa si possa dilatare e contrarre in risposta ai carichi previsti sul piano.

A lato: dettaglio strutturale.

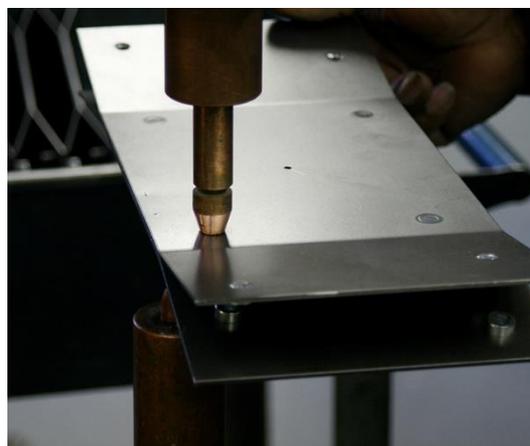
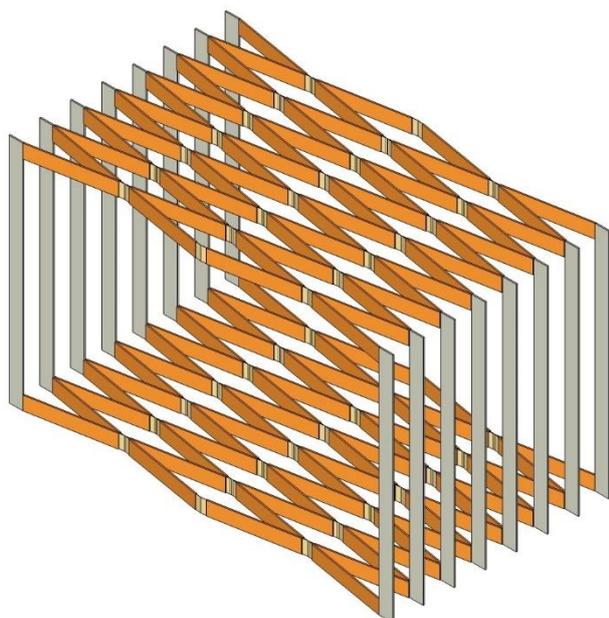


La struttura così creata è quindi in grado di resistere a carichi notevoli, tuttavia, a causa della sua esilità e leggerezza, risulta essere anche estremamente instabile e necessita dunque di ulteriori irrigidimenti prima di poter svolgere il proprio compito strutturale al massimo delle capacità. Le costole definiscono dunque la struttura ma non sarebbero complete senza un rivestimento, che come una sovrastruttura, sia in grado di tenerle fisse e stabili al loro posto, non solo in risposta ai

carichi orizzontali, ma anche ai carichi verticali che potrebbero provocare fenomeni d'instabilità al carico di punta. Gli edifici BURST adottano perciò un rivestimento di facciata con pannelli SIP, pannelli strutturali isolati, che sono pretagliati prevedendo già l'alloggiamento delle costole strutturali. Questa instabilità si manifesta soprattutto nelle pareti mentre risulta essere trascurabile nei solai e sulla copertura, solitamente piana, che perciò non richiedono un irrigidimento così massiccio, ma è sufficiente la pannellatura di supporto al pavimento e alla copertura. Una volta che le costole sono posizionate e, grazie al rivestimento, tutto è bloccato in posizione, come una pelle del tamburo una volta messa in tensione, la struttura può svolgere a pieno la sua funzione. È importante, in fase di cantiere, qualora la posa dei SIP non avvenga subito dopo la posa della struttura, predisporre degli elementi temporanei d'irrigidimento.

Abaco degli elementi

Per quanto le costole che formano gli edifici BURST appaiano articolati e complessi, questo è dovuto quasi esclusivamente ad un desiderio formale che vuole rompere l'idea della scatola prefabbricata e mira alla costruzione di volumetrie più complesse. Tuttavia, a livello teorico questi elementi possono essere molto semplici. Questa semplicità e pulizia formale degli elementi è dovuta al fatto che il sistema BURST, a differenza degli altri, non prevede l'utilizzo d'incastri, ma si affida esclusivamente all'unione tramite clips di acciaio, avvitate o imbullonate agli elementi in compensato.



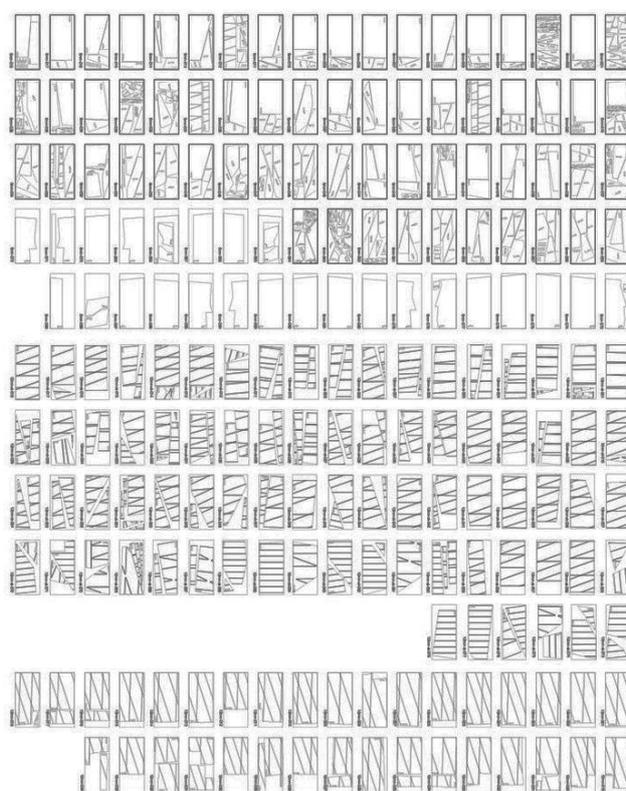
A sinistra: un modello schematico della struttura BURST.

A destra: dettaglio di una delle clips in acciaio utilizzate per realizzare i solai.

Per quanto l'aver eliminato gli incastri semplifichi e velocizzi la produzione degli elementi in compensato, non si può affermare con certezza che velocizzi l'intero processo di fabbricazione in quanto la produzione delle clips può richiedere tempo e rallentare così il processo. Va inoltre ricordato che buona parte degli elementi in compensato sono pezzi unici, dei quali non è possibile fare scorta, ma che vanno prodotti caso per caso e che, senza una logistica adeguata, il montaggio può essere rallentato dalla ricerca dei pezzi e dalla continua necessità di consultare i disegni.

Progettazione e Fabbricazione

Come detto in precedenza il sistema BURST mira ad eliminare ogni rischio ed imprecisione legati non solo alla costruzione, ma anche alla progettazione, per fare ciò il sistema si basa esclusivamente su programmi di progettazione parametrica avanzati. La progettazione quindi inizia sempre partendo da dati certi, verificabili e scientifici, basati sulle caratteristiche fisiche del sito e sulle esigenze funzionali della committenza come ad esempio: l'angolo d'incidenza solare estiva, la direzione dei venti prevalenti, il numero di occupanti ecc. Questi semplici dati, che contengono al loro interno tutte le richieste specifiche che il progetto deve soddisfare, uniti ai dati relativi alla verifica strutturale vengono inseriti in dei software appositi, come formZ e vectorworks, che progettano l'edificio e ne determina la forma sulla base di formule fisse che permettono di creare spazi altamente adattabili e modificabili. Una volta che il programma ha creato il progetto dell'edificio questo viene esploso nei singoli pezzi utilizzando il software String IT, che calcola la disposizione ottimale dei vari elementi nei fogli di compensato per minimizzare gli sprechi, riducendo l'uso di compensato del 20%.



*A sinistra: in alto, un modellino di progetto. In basso, la suddivisione in sito di tutti gli elementi unici tagliati.
A destra: l'immagine delle parti uniche da tagliare raggruppate all'interno dei fogli di compensato.*

È importante ricordare che la progettazione si basa su un processo parametrico, che adatta caso per caso ogni elemento alle esigenze strutturali e di spazio, e che non è quindi un semplice assemblaggio di elementi predefiniti e pre-calcolati. Ciò comporta che ogni pezzo di ogni edificio, ad eccezione di edifici particolarmente simmetrici, sia un pezzo unico, e che non esistano elementi standard, il che comporta notevoli complicazioni logistiche in fase di stoccaggio e assemblaggio.

Per quanto riguarda la produzione degli elementi, il sistema BURST è adattabile sia alla produzione in fabbrica che in sito, e in casi di necessità la struttura può anche essere assemblata in stabilimento, in modo da limitare le opere di cantiere alla posa dei pannelli esterni e alla realizzazione delle finiture.

Costruzione

Poiché gli edifici BURST tendono solitamente ad essere collocati in posizione rialzata, in modo da ottenere performance termiche migliori nei mesi più caldi, la struttura non poggia direttamente sulle fondazioni a plinto ma su una coppia di putrelle poste al di sopra dei pilotis d'acciaio.

La costruzione della struttura può essere eseguita in fabbrica o in sito. Nel caso in cui la struttura venga montata direttamente in sito la costruzione segue le fasi di lavoro tradizionali per cui si assembla il pavimento e lo si posa al di sopra delle putrelle, si montano le costole strutturali delle pareti e della copertura, tenendole in posizione fissandole con degli elementi temporanei, per poi proseguire con il fissaggio della pannellatura di rivestimento.



Sopra: la posa delle costole che compongono il solaio contro terra

A lato: la posa delle costole di copertura,



Nel caso in cui invece la struttura sia montata in fabbrica, questa vengono montate con delle speciali clip pieghevoli in acciaio, la struttura arriva così già in gran parte montata e viene semplicemente aperta e posata sulle putrelle di sostegno, prima di essere rivestita con i pannelli SIP di rinforzo.



A lato: si può vedere come la struttura, arrivata piatta, sia aperta in sito.

Sotto: la posa dei pannelli SIP di facciata.



Casi studio:

BURST*003, Australia 2003, Guthier Architects

BURST*003, costruita in Australia nel 2003, è stato il primo edificio in scala 1:1 ad essere realizzato utilizzando il sistema BURST. Rispetto alle precedenti sperimentazioni del sistema, questa è la prima versione ad utilizzare un sistema di facciata SIP, pannelli strutturali isolati, che svolgono un fondamentale ruolo d'irrigidimento della struttura, collegando e fissando tra loro le varie costole strutturali.

La facciata realizzata con pannelli SIP consente anche di raggiungere ottimi livelli d'isolamento. Tuttavia, questo non è l'unico sistema utilizzato dalla casa al fine di garantire il confort termico all'interno dell'edificio. Il riscaldamento solare è infatti evitato utilizzando gli sport della copertura e l'arretramento delle finestre, mentre la ventilazione è favorita dal rialzamento della casa. L'edificio è stato costruito a partire da 1100 parti uniche di compensato marino da 18mm, tagliate al laser, e unite tra di loro utilizzando clip a X di acciaio inox appositamente studiate. La costruzione è costata in totale 250 mila dollari, per una abitazione di 1500 piedi quadrati, circa 140mq.



In alto: la pianta dell'edificio e la posa dei montanti del primo piano, tenuti in posizione da elementi temporanei.

A lato: dettaglio del solaio rialzato.

In basso: a sinistra, la struttura quasi conclusa. A destra, l'edificio finito.



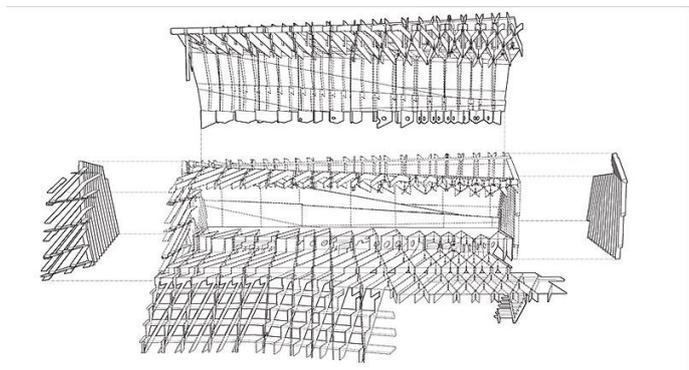
BURST*008, New York 2008, Guthrie Architects

Commissionata dal MOMA di New York in occasione della mostra Home delivery: fabricating the modern dwelling. È realizzata in compensato e vetro e posata sopra una sottostruttura di acciaio che, oltre a svolgere la funzione di fondazione, rialza la casa di un piano. Non potendo produrre i pezzi direttamente sul sito si è reso necessario, per la costruzione dell'edificio, il noleggio di un magazzino di circa 1860mq a Brooklyn. Qui un gruppo di 24 persone a tagliato, a partire da 400 fogli di compensato, più di 1100 pezzi unici, con la profondità delle costole che varia dai dai 25 ai 105cm. Questi pezzi sono stati prima assemblati tra di loro e poi ripiegati per essere trasportati in sito. La costruzione ha richiesto quindi un totale di 10 settimane, di cui 4 in fabbrica e 6 in sito.

A lato: il modello esploso della struttura.

Sotto: La struttura una volta tagliata, e l'edificio terminato.

In basso a destra: dettaglio interno delle costole, si può notare come queste siano parzialmente inserite nei pannelli di facciata.



Conclusione

La fabbricazione digitale è dunque un termine che racchiude una grande quantità di processi, che si basano tutti sugli stessi principi ma che sperimentano approcci diversi al mondo delle costruzioni. La fabbricazione digitale è ancora in una fase di evoluzione e, anche nel caso dei processi che appaiono più consolidati esiste un perfezionamento continuo, per cercare di eliminare tutti gli ostacoli tecnici.

La tesi ha cercato di indicare una via da seguire qualora si vogliano realizzare edifici utilizzando fabbricazione digitale, in quello che è lo stato attuale della sperimentazione. Sono emersi perciò nel corso di questa disamina i numerosi ostacoli che ne limitano la diffusione. Pur senza soffermarsi troppo sui limiti tecnici, che per quanto siano ancora presenti sono destinati a risolversi autonomamente in seguito ad il proseguire delle ricerche ed allo sviluppo tecnologico. Eccezion fatta per la scarsa sostenibilità ambientale di molti di questi sistemi, che trae origine proprio dalle caratteristiche tecniche di questi, in particolare al fatto che molti di questi sono sistemi d'assemblaggio umido.

È emerso inoltre il grosso limite alla sperimentazione posto dalla normativa e dai codici di costruzione, che in molti casi non consentono di utilizzare le moderne tecnologie di fabbricazione digitale additiva per realizzare la struttura degli edifici. Limiti che hanno fatto pensare all'uso del legno come catalizzatore del passaggio dalla fabbricazione tradizionale a quella digitale.

Tuttavia, in conclusione, è opportuno osservare come esistano anche altri ostacoli, più sistemici, al diffondersi della fabbricazione digitale nel campo delle costruzioni. Innanzitutto, è necessario ripensare gli attuali processi progettuali e produttivi al fine di adattarli alla fabbricazione digitale. Inoltre, al giorno d'oggi lo sforzo richiesto per la ricerca, unito alla natura stessa della fabbricazione digitale, che mira a porre sotto controllo l'intero processo produttivo, fa sì che le singole aziende tendano a sviluppare dei sistemi costruttivi proprietari. In questo modo tuttavia si frattura ancora di più il piccolo mercato della fabbricazione digitale e si pone il cliente di fronte ad una vasta offerta di soluzioni tecniche che, in molti casi, differiscono tra di loro solo per dettagli minimi, e che non fanno che confondere ancora di più le idee del pubblico. Inoltre, la fervida attività di ricerca che sviluppa sistemi sempre nuovi per la fabbricazione digitale di edifici non aiuta di certo ad aumentare la chiarezza del mercato. Senza contare che la carica fortemente innovativa di queste aziende, data non solo dall'uso della fabbricazione digitale ma anche dall'uso dell'approccio DfMA, aumenta la diffidenza dei possibili clienti.

Infine, è importante rilevare come in queste nuove aziende ci sia un forte sbilanciamento tra la fase progettuale e produttiva, con la prima che si fa carico della maggioranza dei problemi produttivi, assumendo così un peso molto maggiore rispetto a quello che ha nei sistemi tradizionali.

Dall'analisi della fabbricazione digitale è emerso come i sistemi che sono più vicini ad utilizzare la fabbricazione digitale nel contesto del libero mercato sono tutti quelli che l'adoperano sotto forma di prefabbricazione digitale. La tesi ha cercato perciò di approfondire il tema della prefabbricazione più avanzata, come l'approccio DfMA. Per far emergere come questo possa risolvere molti dei problemi tipici della prefabbricazione e possa in questo modo favorire anche la diffusione dei sistemi di fabbricazione digitale ad elementi bidimensionali. Evidenziando, inoltre, quanto questo approccio possa influenzare lo sviluppo tecnico e formale dei sistemi costruttivi che lo adattano.

L'ultima analisi, riguardante il mondo della fabbricazione digitale ad elementi piani di compensato, ha evidenziato quanto questo sia vasto e variegato, e di come le diverse aziende

impegnate stiano lavorando sempre di più nel tentativo di pubblicizzare i loro sistemi raggiungendo il maggior numero di persone possibile.

Un buon segnale è dato dall'ottima diffusione territoriale di queste aziende che riescono, anche e soprattutto grazie alla comunità WikiHouse, a toccare molte delle nazioni maggiori. In Italia questo modo di costruire è arrivato nel 2019 quando è stato terminato il nuovo centro funzionale di Accumuli, città della provincia di Rimini distrutta dal sisma del 2016. Questo edificio, la cui struttura portante è realizzata in compensato di okume, si basa sul sistema della Veener house elaborato dallo studio giapponese Kobayashi Maki Design Workshop, rielaborato al fine di essere adattato alle esigenze normative italiana. Un sistema a portali che non si è ritenuto necessario approfondire in quanto molto simile, concettualmente e formalmente al più diffuso WikiHouse.



Immagini dei portali e del processo costruttivo usato a Accumuli, si noti la somiglianza col sistema WikiHouse.



Tuttavia, sono ancora troppi pochi gli edifici costruiti e solo raramente è stata abbandonata la piccola scala, del singolo rifugio o padiglione, per realizzare strutture più grandi e complesse. Preoccupano quindi le difficoltà che questi stanno trovando nella loro diffusione, per quanto attribuibili più alla resistenza dell'industria al cambiamento che non a delle mancanze di questi sistemi. Infine, bisogna ricordare il grande vincolo, nel caso della fabbricazione digitale in legno, rappresentato dalla necessità di assemblaggio degli elementi prefabbricati.

Si avverte ora la pressante necessità di svolgere un confronto dettagliato tra questi sistemi al fine di raggiungere una sintesi capace, con una scelta coscienziosa, di definire, tra i diversi approcci adottati dalle aziende, quale sia la strada migliore da seguire. Dunque, solo in questo modo è possibile superare questa fase di raccolta e catalogazione dei dati per passare ad una fase maggiormente propositiva. Per quanto, a tal fine, sia però necessario superare la mancanza, per alcuni sistemi, di alcuni dei dati utili al confronto. Si rischierebbe altrimenti di basarsi eccessivamente su supposizioni

Bisogna inoltre assumere un atteggiamento critico sulla valutazione dei pregi e delle mancanze della fabbricazione digitale. Questa rischia infatti di essere fin troppo prematura, riferendosi ad un fenomeno non ancora consolidato e in continua espansione ed evoluzione. La consapevolezza di questa instabilità è quindi fondamentale.

Bibliografia

Parte 1: fabbricazione digitale

- [1] David A Bradley and Derek W Seward, *The Development, Control and Operation of an Autonomous Robotic Excavator*, “Journal of Intelligent and Robotic Systems”, volume 21 numero 1, gennaio 1998, pp 73–97.
- [2] Sung-Keun Kim et al, *Construction Robot PathPlanning for Earthwork Operations*, “Journal of Computing in Civil Engineering”, volume 17 numero 2, aprile 2003, pp 97–104.
- [3] Tadashi Kanzaki, *Prospects for Automation and Robotics Revolutionizing Ordinary Construction Systems Through Advanced Information Technology*, atti del XXI International Symposium on Automation and Robotics in Construction, 2004
- [4] Rezia M Molfino, Roberto Razzoli and Matteo Zoppi, *Autonomous Drilling Robot for Landslide Monitoring and Consolidation*, “Automation in Construction”, volume 17 numero 2, gennaio 2008, pp 111–21.
- [5] Cheung Kenneth, *Digital cellular solids: reconfigurable composite materials*, tesi di dottorato in Media Arts and Sciences, Scuola di architettura e pianificazione, Massachusetts institute of technology, 2012
- [6] Neil Gershenfeld, *How to make almost anything: the digital fabrication revolution*, in “Foreign Affairs”, novembre/dicembre 2012, volume 91 numero 6
- [7] Jenett Benjamin, Cellucci Daniel, Gregg Christine, Cheung Kenneth, *Meso-scale digital materials: modular, reconfigurable, lattice-based structures*, atti del congresso “manufacturing science and engineering conference” del 2016
- [8] Luca Caneparo, *Digital Fabrication in Architecture, Engineering and Construction*, Springer, 2016

Parte 2: prefabbricazione in legno

- [1] Uzielli Luca, *Il manuale del legno strutturale*, Mancosu, Roma 2001
- [2] Athanassiadou Eleftheria, Ohlmeyer Martin, *Emissions of Formaldehyde and VOC from Wood-based Panels, in Performance in Use and New Products of Wood Based Composites*, capitolo XI in COST Action WG3 (E49), *performance in use and new products of wood based composites*, a cura di Brunel university press, Londra 2009
- [3] Giachino Davide Maria, *Legno: manuale per progettare in Italia*, Utet scienze tecniche, Torino 2013.
- [4] Zylkowski Steve, Frihart Charles, *Volatile Organic Compound emissions from engineered wood products*, United States Department of Agriculture, 2017
- [5] Patel Yusef, *file to factory: a case study of automated prefabrication house-building methods for small-to-medium enterprises*, Unitec ePress Occasional and discussion paper series, numero 10, anno 2017.
- [6] Deidda Andrea, *Il pioppo come materia prima per l'edilizia: studio ed elaborazione degli impianti, dalla coltura alla produzione, di un pannello di compensato, con metodologia LCA*, Tesi di Laurea magistrale in architettura per il progetto sostenibile, Politecnico di Torino, a.a. 2017/2018, relatore Pagliolico Simonetta, correlatore Carbonaro Corrado.
- [7] Caramia Federica, *Approccio circolare per l'industria del compensato: innovazione tecnologica con gli scarti di produzione*, Tesi di Laurea magistrale in architettura per il progetto sostenibile, Politecnico di Torino, a.a. 2018/2019, relatore Pagliolico Simonetta, correlatore Carbonaro Corrado, Castro Gaetano, Shtrepi Louena.
- [8] Open system lab, *WikiHouse manufacturing guide*, versione 1.0 2019, manuale consultabile online al: <https://www.wikihouse.cc/Resources>

Parte 3: approccio DfMA

[1] Centre for digital built Britain, *Platforms: bridging the gap between construction + manufacturing*, univeristy of Cambridge, 2018

[2] Open system lab, *The DfMA housing manual*, versione 1.1 maggio 2019, manuale consultabile online al: <https://www.wikihouse.cc/Resources>

Parte 4: casi studio

[2] Bergdoll Barry, Christensen Peter, *Home delivery: fabricating the modern dwelling*, The Museum of Modern art New York, Boston 2008

[3] Sass Lawrence, Botha Marcel, *The Instant House: a model of design production with digital fabrication*, in “International journal of architectural computing“, numero 4 volume 4, dicembre 2016

[1] Aimone Giggio Monica, Ronco Valentina, *Architettura in compensato: il caso WikiHouse: studio della fattibilità economica e ambientale finalizzato alla progettazione di un modulo per cicloturisti realizzato con elementi piani*, Tesi di Laurea magistrale in architettura per il progetto sostenibile, Politecnico di Torino, 2017, relatori Callegari Guido, Carbonaro Corrado, Rebaudengo Manuela.

Sitografia

consultati in data 3/09/2020

Parte 1: fabbricazione digitale

[1] Articolo “Digital fabrication is so much more than 3D printing” di Olivia Solon del 13/03/2013 sul sito: www.wired.co.uk/article/digital-fabrication

[2] sito The center for bits and atoms: <http://cba.mit.edu/>

[3] Voce “generative design” sul sito: https://en.wikipedia.org/wiki/Generative_design

[4] Articolo “Pensate che il design generativo sia un po’ troppo acclamato? Questi esempi potrebbero farvi cambiare idea” di Scott Reese del 29/01/2019 sul sito:

www.autodesk.it/redshift/design-generativo/

[5] Voce “responsive computer- aided design” sul sito:

https://en.wikipedia.org/wiki/Responsive_computer-aided_design

[6] Voce “construction 3D printing” sul sito:

https://en.wikipedia.org/wiki/Construction_3D_printing

[7] Articolo” Additive Construction: From the 3D-Printed House to the 3D-Printed High-Rise” di Michael Molitch-Hou del 31/05/2018 sul sito:

www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/17038/Additive-Construction-From-the-3D-Printed-House-to-the-3D-Printed-High-Rise.aspx

[8] Sito dell'azienda Fastbrick robotics: www.fbr.com.au/view/hadrian-x

[9] Sito dell'azienda Construction robotics: www.construction-robotics.com/

[10] Articolo “ In-situ Fabricator: An autonomous construction robot“ ad opera di NCCR digital

fabrication del 9/10/2015 sul sito: <https://robohub.org/in-situ-fabricator-an-autonomous-construction-robot/>

[11] Portale di alcune delle ricerche eseguite al ETH di Zurigo sul sito: <https://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/forschung/216.html>

[12] Articolo sulla storia dei macchinari per la posa dei mattoni sul sito: www.theblm.com/video/a-short-history-of-bricklaying-robots

[13] Sito dell'azienda Sandvik: www.rocktechnology.sandvik/

[14] Sito dell'azienda Klemm: www.klemm-bohrtechnik.de/startseite/

[15] Articolo “concrete 3D printer – Introduction, Working, Types, Applications, Advantages & Disadvantages“ del 4/06/2020 sul sito: www.engineeringbrother.com/2020/04/concrete-3d-printer.html

[16] Articolo “500-Square-Foot House 3D Printed in 12 Hours“ di Michael Molitch-Hou del 12/08/2019 sul sito: www.engineering.com/BIM/ArticleID/19446/500-Square-Foot-House-3D-Printed-in-12-Hours.aspx

[17] Articolo “World’s Largest 3D-Printed Building in Dubai“ di Farah Saleem del 29/01/2020 sul sito: www.engineering.com/BIM/ArticleID/19863/Worlds-Largest-3D-Printed-Building-in-Dubai.aspx?e_src=relart

[18] Articolo “Cobod Begins Distributing BOD2 Construction 3D Printing“ di Michael Molitch-Hou del 08/04/2019 sul sito:

www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/18932/COBOD-Begins-Distributing-BOD2-Construction-3D-Printing.aspx?e_src=relart

[19] Articolo “SQ4D INC. BUILDS WORLD’S LARGEST PERMITTED 3D PRINTED HOME IN CALVERTON, N.Y.“ di Mary Salmonsens del 30/01/2020 sul sito:

www.builderonline.com/building/structure-durability/sq4d-inc-builds-worlds-largest-permitted-3d-printed-home-in-calverton-n-y_o

[20] Articolo “The House That 3D Printing Built“ di Jeffrey Heimgartner del 24/03/2017 sul sito: www.engineering.com/BIM/ArticleID/14566/The-House-That-3D-Printing-Built.aspx,

[21] Articolo “Dubai Unveils First 3D-Printed Office Building“ di Michael Molitch-Hou del 26/05/2016 sul sito:

www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/12225/Dubai-Unveils-First-3D-Printed-Office-Building.aspx?e_src=relart

[22] Articolo “Group of Russian Machining and 3D Printing Companies Constructs 3D Printed Residential House“ di Sarah Saunders del 25/10/2017 sul sito: <https://3dprint.com/192043/3d-printed-residential-home-russia/>

[23] Sito dell'azienda Winsun: www.winsun3d.com/En/

[24] Sito dell'azienda Apis Cor: www.apis-cor.com/

[25] Sito dell'azienda Cobod: <https://cobod.com/>

[26] Sito dell'azienda Amt-specavia: <https://specavia.pro/>

[27] Sito dell'azienda SQ4D: www.sq4d.com/

[28] Sito dell'azienda MX3D: <https://mx3d.com/>

[29] Brevetto D-shape: <https://patents.google.com/patent/US8337736?q=enrico+dini>

[30] Sito dell'azienda D-shape: <https://d-shape.com/>

[31] Voce “d-shape“ sul sito: <https://en.wikipedia.org/wiki/D-Shape>

[32] Sito dell'azienda Wasp: www.3dwasp.com/en

[33] Articolo “The WASP BigDelta Takes Starring Role in Building Shamballa, 3D Printed DIY Village with New Economic Vision“ di Bridget O’Neal del 19/07/2016 sul sito: <https://3dprint.com/142884/wasp-bigdelta-shamballa/>

[34] Sito dell'azienda Branch: www.branch.technology/

[35] Articolo “World’s largest 3D-printed structure unveiled in Tennessee“ di Alex Bazeley del 20/07/2018 sul sito:

[www.curbed.com/2018/7/20/17596060/3d-printing-branch-technology-nashville-tennessee,](http://www.curbed.com/2018/7/20/17596060/3d-printing-branch-technology-nashville-tennessee)

Parte 2: prefabbricazione in legno

[1] Voce “plywood“ sul sito: www.designingbuildings.co.uk/wiki/Plywood

[2] Racconto del processo produttivo del compensato sul sito:

www.madehow.com/Volume-4/Plywood.html

[3] Sito dell'azienda Wisa plywood: www.wisaplywood.com/products/product-catalogue

[4] Voce “volatile organic compounds“ sul sito:

www.designingbuildings.co.uk/wiki/Volatile_organic_compounds_VOC

[5] Voce “composti organici volatili” sul sito:

https://it.wikipedia.org/wiki/Composti_organici_volatili

[6] Guida del governo australiano alle costruzioni sostenibili sul sito:

www.yourhome.gov.au/materials/embodied-energy

[7] Racconto del processo produttivo del compensato sul sito:

<https://cwc.ca/how-to-build-with-wood/wood-products/panel-products/plywood/>

[8] Dati sulla variazione degli spessori reali dei fogli di compensato sul sito:

<http://theplywood.com/thickness>

[9] Slide di corso sul CNC milling prodotte da Massimo Menichelli, Aalto university sul sito:

www.slideshare.net/openp2pdesign/digital-fabrication-studio-cnc-milling

[10] Slide “introduzione alla fresatura a controllo numerico“ a cura del Fablab di Torino sul sito:

[www.slideshare.net/FablabItalia/2-introduzione-alla-fresatura-a-controllo-numeric,](http://www.slideshare.net/FablabItalia/2-introduzione-alla-fresatura-a-controllo-numeric)

Parte 3: approccio DfMA

[1] Stienstra David, *Introduction to design for (cost effective) assembly and manufacturing*,

slide di corso Rose Hulman institute of technology. consultabile online:

me.gatech.edu/files/capstone/L071ME4182DFA

[2] Articolo “DFMA, una tecnica green” di Emanuela Bianchi del 10/05/2013 sul sito:

www.ilprogettistainindustriale.it/dfma-una-tecnica-green/

Parte 4: casi studio

[1] Sito del progetto Wikihouse: www.wikihouse.cc/

[2] Portale per la libera condivisione dei file di disegno: <https://github.com/wikihouseproject>

[3] Portale per la progettazione online in fase beta sul sito: <https://demo.buildx.cc/>

[4] Sito dello studio architecture unknown: www.architectureunknown.co.uk/

[5] Articolo “Free: Download a Construction Kit to Build Your Own “WikiHouse” di Janelle Zara:

<https://architizer.com/blog/practice/materials/wikihouse-the-open-source-diy-home/>

[6] Sito del progetto Wikihouse olandese: <https://wikihousesnl.cc/>

[7] sito della fondazione dietro al progetto Wikihouse: www.architecture00.net/architecture

[8] Blog sulla costruzione della Farmhouse: <https://awikifarmhouse.wordpress.com/>

- [9] Sito del progetto Petit place: www.petitplace.nl/
- [10] Sito del progetto De stripmaker: <https://wikihousedestripmaker.nl/>
- [11] Sito dello studio Hawkins/Brown: www.hawkinsbrown.com/projects/the-gantry-at-here-east
- [12] Sito dello studio RossRos: www.roosros.nl/project/wikihouse
- [13] Articolo “Prefabricated modular library by Dot Architects built in just seven days“ di Alyn Griffiths del 2/12/2018 sul sito: www.dezeen.com/2018/12/02/huaxia-star-library-dot-architects-prefabricated-modular-open-source/
- [14] Video processo di costruzione Farmhouse: <https://vimeo.com/148211980>
- [15] Sito dell'azienda Facit Homes: <http://facit-homes.com/>
- [16] Sito dello studio Een til een: <http://eentileen.dk/forside>
- [17] Serie televisiva: Grand designs: Grand designs, *Hertfordshire the computer cut house*, channel 4, stagione 12 episodio 2
- [18] Blog sulla costruzione di Graven Hill sul sito: www.self-build.co.uk/our-authors/marc-lauramarsdale/
- [19] Articolo “Digital fabrication does away with housebuilding headaches“ di Shane Hickey del 23/08/2015 sul sito: www.theguardian.com/business/2015/aug/23/digital-fabrication-housebuilding-headaches-facit-homes
- [20] Articolo “An Entire House That You Snap Together, Like A Toy“ di Suzanne Labarre del 17/08/2012 sul sito: www.fastcompany.com/1670525/an-entire-house-that-you-snap-together-like-a-toy#1,
- [21] Articolo “Iværksættere CNC-fræser helt hus“ di Ulrik Andersen del 9/11/2011 sul sito: <https://ing.dk/artikel/ivaerksaettere-cnc-fraeser-helt-hus-123898>
- [22] Video sul sistema Facit Homes: <https://vimeo.com/59581274>
- [23] Sito del sistema U-build: <https://u-build.org/>
- [24] Sito dello studio Bark: <https://studiobark.co.uk/projects/>
- [25] Serie televisiva: Grand designs: the street, *Chris & Roxie*, channel 4, stagione 1 episodio 4
- [26] Articolo “Studio Bark's flat-pack U-build system lets anyone self-build“ di Lizzie Crook del 10/05/2019 sul sito: www.dezeen.com/2019/05/10/ubuild-studio-bark-modular-architecture/?li_source=LI&li_medium=recommended_movies_block
- [27] Portale gruppo di ricerca design fabrication group: <https://ddf.mit.edu/>
- [28] Articolo “ShopBot CNC Housebuilding“ di Ted Hall del 15/05/2008 sul sito: www.shopbotblog.com/2008/05/shopbot-cnc-housebuilding/
- [29] Blog con immagini dell'esposizione del MOMA: www.weatherpattern.com/2008/08/home-delivery-at-moma-computational-architecture/
- [30] Blog di sviluppo del sistema Click-Raft: <http://click-raft.blogspot.com/>
- [31] Sito dello studio Cma+u: <https://cma-u.com/projects/>
- [32] Articolo “CNC – the new approach to building“ di Thomas Denhardt del 9/02/2016 sul sito: <https://architecturenow.co.nz/articles/cnc-the-new-approach-to-building/>
- [33] Sito dello studio Gauthier architects: <http://gauthierarchitects.com/work.html>
- [34] Sito dello studio Workshop: www.studioworkshop.com.au/#/new-gallery-4/
- [35] Articolo “MoMA's Prefab-Housing Project“ di Gabrielle Birkner del 29/05/2008 sul sito: www.nysun.com/arts/turning-a-1200-piece-puzzle-into-a-home-with-moma/78789/
- [36] Articolo “Bursting Out“ di Peter Hall del 1/12/2006 sul sito: www.metropolismag.com/uncategorized/bursting-out/
- [37] Video sul processo costruttivo: <https://vimeo.com/65580436>
- [38] Articolo “why it is time to give up on prefab“ di Chris Knapp del 4/12/2013 sul sito: www.archdaily.com/453236/why-it-s-time-to-give-up-on-prefab

[39] Articolo “Accupoli: il primo edificio italiano in compensato portante“ di Emanuele Meloni del 20/08/2019 sul sito: www.architetturaecosostenibile.it/architettura/progetti/accupoli-edificio-compensato-portante-278

[40] Sito del sistema veneer house: www.veneerhouse.com/

[41] Sito dello studio Kobayashi Maki Design Workshop: www.kmdw.com/

Le immagini dei casi studio illustrati sono state tratte, salvo dove indicato diversamente, dai siti e dai social media delle aziende e degli studi professionali che si sono occupati delle costruzioni.