

Il progetto esecutivo per l'esportabilità e l'assemblaggio *off/on-site* del sistema costruttivo

RICERCA E
SPERIMENTAZIONE/
RESEARCH AND
EXPERIMENTATION

Vittorino Belpoliti^a, Marta Calzolari^b, Pietromaria Davoli^c, Giampaolo Guerzoni^c,

^a College of Engineering, Architectural Engineering, University of Sharjah, United Arab Emirates

^b Dipartimento di Ingegneria e Architettura, Università degli Studi di Parma, Italia

^c Dipartimento di Architettura, Università degli Studi di Ferrara, Italia

vbelpoliti@sharjah.ac.ae
marta.calzolari@unipr.it
pietromaria.davoli@unife.it
giampaolo.guerzoni@unife.it

Abstract. Distanze geografiche, problemi logistici e assenza di materie prime, di tessuto industriale e di know-how impediscono in molti Paesi di adottare sistemi costruttivi innovativi, sostenibili, di *green building* e con elevata qualità edilizia. Per 'disseminare' tali principi nella 'colonizzazione' di nuovi mercati, occorre, quindi, pensare a come 'esportare' quei sistemi che, pur non a "km zero", risultano *green* grazie ad altre prerogative di sostenibilità. Il paper propone un metodo e un processo progettuale, produttivo ed esecutivo di "esportabilità del sistema". Si sostituisce un sistema ibrido ai modelli costruttivi con lavorazioni completamente *on-site* o con prefabbricazione *off-site*. L'esperienza di Solar Decathlon Middle East diventa caso studio della sperimentazione progettuale ed esecutiva.

Parole chiave: Trasportabilità; Sistemi strutturali standardizzati; Prefabbricazione leggera; Processi costruttivi green; Solar Decathlon Middle East 2018.

Obiettivi, ambito di riferimento e coordinate della ricerca progettuale

L'elaborazione di metodi innovativi per governare la complessità del progetto esecutivo, come traduzione fedele e reale dell'idea creativa iniziale, deve partire necessariamente da una prefigurazione particolarmente attenta della fase di realizzazione dell'edificio, evidenziandone potenziali ostacoli e rallentamenti. In molte regioni del mondo, a causa delle distanze e dei particolari contesti geografici e culturali, come pure di un sistema infrastrutturale che non favorisce l'accessibilità e l'apertura a nuovi mercati, non vi sono a livello locale le risorse di materie prime, il tessuto industriale e il know-how per adottare, in tempi brevi, tecnologie e sistemi costruttivi innovativi. Intendendo con innovativi anche la capacità di proporre un'edilizia sostenibile in termini ambientali ed economici e con elevati standard di qualità del costruito.

In una logica di forte globalizzazione del settore delle costruzioni, per riuscire a 'disseminare' principi di *green economy*, di *green*

building e di innovazione tecnologica di processo e di prodotto nelle dinamiche di 'colonizzazione' di un nuovo mercato, occorre pensare a come 'esportare' (*transfer* tecnologico) quei sistemi costruttivi che, pur non risultando a "km zero", rientrano però nell'alveo di percorsi *green* grazie ad altre prerogative legate alla declinazione della sostenibilità nel suo complesso. Tali finalità innalzano certamente la rilevanza del tema trattato.

Due codici esigenti si sommano, dando il senso degli obiettivi originali della proposta: da una parte, appunto, l'"esportabilità" di un concept ideativo e di un sistema costruttivo, identificando con il termine "esportabilità" l'insieme di quei fattori che garantiscono il successo dell'idea in un 'ambiente' diverso da quello in cui è stata concepita; dall'altra, la sua "trasportabilità", con tutta una serie di caratteristiche che devono essere soddisfatte per poter materialmente tradurre la possibilità di esportazione in una realtà attuativa *off/on-site*.

Le implicazioni economiche si basano anche sul bisogno costante da parte delle strutture aziendali di innescare nuove opportunità per la rete di influenza e penetrazione di propri prodotti e tecnologie, che porta alla ricerca di mercati inesplorati e modelli differenti di processo edilizio, arrivando necessariamente anche al ripensamento di dinamiche, filiere e assetti di produzione e distribuzione consolidati. Si tratta di un discreto motore di innovazione e di attivazione di reti di interessi fra attori e fattori produttivi, cui la ricerca universitaria può dare un significativo apporto di competenze scientifiche, soprattutto come impostazione meta-progettuale e articolazione della progettazione esecutiva del sistema tecnologico (implicazioni scientifiche).

The construction project for the exportability and assembly of the building system on/off-site

Abstract. Geographical distances, logistic problems, and the absence of raw matter, industrial fabric, and know-how prevent many countries from adopting innovative, sustainable, "green" systems for high building quality. In order to disseminate these principles through the "colonization" of new markets, it is necessary to think how to export those systems that, although not locally fabricated, are considered green thanks to other sustainable features. The paper proposes a design method and a production/construction process for the "exportability of the system". A hybrid system is proposed as an alternative to conventional construction models that are completely built on-site or prefabricated off-site. The experience of the Solar Decathlon Middle East is presented as case study for this design and build experimentation.

Keywords: Transportability; Standardized structural systems; Lightweight prefab-

rication; Green construction processes; Solar Decathlon Middle East 2018.

Objectives, field, and directions of the design research

The development of innovative methods to manage the complexity of the construction design level, as an accurate transposition of the initial creative idea, necessarily requires to carefully picture in advance the building construction process, highlighting potential obstacles and delays.

In many places in the world, due to distances, peculiar geographical and cultural contexts, and infrastructural systems that make the accessibility to new markets difficult, there is locally no raw matter, industrial arrangement, and know-how to quickly implement innovative technologies and construction systems. To this regards, the capacity to propose environmentally

and economically sustainable buildings, with high quality construction standards, is also to be considered innovative.

Working within the current significant globalization of the construction sector, disseminating principles of green economy, green building, and process/product technological innovation toward the 'colonization' of a new market, requires rethinking the technological transfer of those construction systems that, even if not locally produced, can be considered green thanks to other characteristics related to the holistic meaning of sustainability. These goals undoubtedly increase the relevance of the subject of this study.

Two requirements interlock, giving a sense of the original objectives of the proposal: on a side the "exportability" of a design concept and construction system, identifying with the term "ex-

Il paper documenta i primi esiti della ricerca che ha come obiettivo la definizione di un nuovo metodo di progettazione esecutiva, con relativo processo produttivo-realizzativo, e descrive l'esperienza di applicazione di tale approccio ad un caso studio. A partire dal 2016, infatti, le esigenze di partecipazione alla competizione internazionale universitaria Solar Decathlon (Fig. 1), edizione Middle East 2018 (SDME) nel deserto di Dubai, hanno felicemente intercettato i bisogni aziendali sopracitati. Ciò ha permesso di sviluppare e sperimentare nel concreto, nell'arco dei due anni, modelli, metodi, strumenti, esiti progettuali ed esecutivo-cantieristici di seguito brevemente documentati.

Al fine di facilitare le operazioni di "esportazione" è stato messo a punto un preciso concetto di processo progettuale, produttivo ed esecutivo che favorisce la "trasportabilità" del sistema, sostituendo un sistema ibrido (fondato su tecnologie leggere e "a secco") ai modelli costruttivi con lavorazioni completamente *on-site* o interamente con industrializzazione/prefabbricazione *off-site* (Cobbers and Jahn, 2010; Serrats, 2012).

Metodi e fasi della ricerca: un progetto esecutivo per l'ottimizzazione del processo costruttivo

Lo studio sopracitato ha preso spunto dall'intenzione di Xlam Dolomiti s.r.l., azienda italiana che produce pannelli portanti a strati incrociati di tavole di legno

(CLT), di allargare il proprio mercato di riferimento. La ricerca ha tradotto questa esigenza nella messa a punto di un modello di progettazione esecutiva finalizzato all'esportabilità di un sistema costruttivo complesso. La strategia generale è quella di inserirsi in luoghi geograficamente e culturalmente diversi da quelli consueti e molto distanti dai modelli di stampo europeo e anglosassone;

portability" the set of factors that guarantee the success of the concept in a different environment than the one in which it was conceived; on the other, its "transportability", with several requirements to meet in order to materially export the system and apply it with a off/on-site strategy.

The economic implications are also based on the companies' constant need to trigger new network opportunities for penetration of their products and technologies in new markets. This leads to explore novel models of the construction process and to rethink the established production and distribution chains, strategies, and arrangements. This is a driver to innovate and activate networks of interests between stakeholders and productive agents, to which university's scientific research can significantly contribute, especially with regards to pre-design approach

and construction development (scientific implications).

The paper presents the first outcomes of the research, proposing the definition of a new method to address construction design and its production process, and describes the experience of its application to a case study. In fact, starting in 2016, the participation to the international academic competition Solar Decathlon (Fig. 1), Middle East 2018 edition (SDME) in the desert of Dubai, matched the above-mentioned business goals. Over the two years of the project, this event allowed developing and testing models, methods, tools, and design/construction outcomes briefly described below. With the aim of easing the export operations, a precise design, production, and construction strategy has been developed to support the "transportability" of the system, proposing a hy-

brid system (based on lightweight and dry-fix technologies) as an alternative to conventional construction models with processes either completely on-site or entirely prefabricated off-site (Cobbers and Jahn, 2010; Serrats, 2012).

modelli dove, pur con tradizioni costruttive diverse, il mercato degli edifici in legno è già diffuso e sempre più radicato nella cultura costruttiva (Steffen, 2013; Boarin *et al.*, 2016). La convergenza di questa esigenza con l'esperienza condotta per SDME è stata l'occasione per documentare una prima applicazione delle strategie sviluppate ad un caso studio, a supporto dei principi di sperimentazione inizialmente enucleati, dichiarando la centralità del progetto esecutivo per governare al meglio il processo di realizzazione in tempi estremamente ridotti. SDME ha richiesto di realizzare un edificio prototipo di innovazione tecnologica e autosufficiente energeticamente con lo scopo di innescare processi virtuosi nel mercato edilizio. Le restrittive regole della gara prevedono che, dopo due anni di progettazione, l'edificio venga costruito in due settimane. La rapidità richiesta ha indotto lo studio di un processo costruttivo che permettesse un assemblaggio rapido, indirizzando la scelta proprio sul sistema costruttivo in pannelli strutturali del tipo XLAM, reinterpretato secondo nuove procedure di assemblaggio.

Tale processo progettuale innovativo, sviluppato a partire dalle esigenze degli Emirati Arabi, ma adattabile ad altri contesti costruttivi in via di sviluppo, mira a modificare l'esperienza costruttiva tradizionale richiamando la centralità della fase meta-progettuale, come modello di coordinamento di tutte le fasi realizzative.

Il modello proposto articola il processo costruttivo in tre momenti, coincidenti con le fasi di sviluppo della ricerca e di seguito documentati:

- fase 1: progettazione esecutiva, produzione dei sub-componenti strutturali (Paese di origine) e spedizione nel Paese di destinazione;

brid system (based on lightweight and dry-fix technologies) as an alternative to conventional construction models with processes either completely on-site or entirely prefabricated off-site (Cobbers and Jahn, 2010; Serrats, 2012).

Research methods and phases: construction design to optimize the building process

The study took inspiration by the intention of Xlam Dolomiti srl, an Italian producer of cross-laminated timber panels (CLT) with load-bearing function, to expand its market horizon. The research has translated this need into the development of a construction design model aimed at the exportability of such complex construction system. The general strategy is to enter markets that are geographically and culturally different from the origin ones, and

very far from the European and Anglo-Saxon models, where timber buildings are already common and increasingly rooted in the building culture (Steffen, 2013; Boarin *et al.*, 2016), even if with different construction traditions.

The matching necessity of the CLT company with the needs for the SDME offered the opportunity to report the first application of the developed strategies to a case study, to support the experimental principles mentioned before, expressing the relevance of the construction design to efficiently manage the building process in a very short time. The SDME requested to build a technologically innovated and energy self-sufficient prototype building, with the aim of activating best-practices in the construction market. The strict rules of the competition imply that, after a 2-year design process, the building would be built in a

01 | Nella prima immagine, panoramica con gli edifici ultimati del Solar Decathlon 2009, Washington D.C., USA. Nella seconda immagine, il Solar Decathlon Middle East 2018, Dubai, UAE. Sulla sinistra, alcuni dei tendoni per i servizi centralizzati; al centro, uno dei lati frontali della spianata con alcuni degli edifici in gara; sullo sfondo, l'alto Innovation Centre simbolo del parco fotovoltaico, visibile nel deserto da molti chilometri di distanza. I team internazionali di studentesse, studenti e insegnanti universitari, supportati da aziende ed enti, si impegnano per due anni con l'obiettivo di progettare e poi arrivare a realizzare in sole due settimane una propria idea di costruzione innovativa ed energeticamente autosufficiente. L'edificio parteciperà poi direttamente alla competizione finale, dove verrà monitorato e giudicato secondo dieci criteri di gara (foto a sinistra: Richard King, Director of the U.S. Department of Energy Solar Decathlon; foto a destra: Pietromaria Davoli)

The first image shows the overview of the completed buildings of the Solar Decathlon 2009 in Washington D.C., USA. The second image shows the Solar Decathlon Middle East 2018 in Dubai, UAE. On the left, some of the tents for public services; in the centre, one of the front sides of the esplanade with some of the competing buildings; in the background, the tall Innovation Centre, landmark of the photovoltaic park and visible in the desert from many kilometres apart. The international teams of students and faculties, supported by companies and institutions, are committed for two years to the objective of designing and build in just 2-week time their own proposal of innovative and energy self-sufficient house. The buildings then compete in the final contest, where they are monitored and judged according to ten competition criteria (photo on the left: Richard King, Director of the U.S. Department of Energy Solar Decathlon; photo on the right: Pietromaria Davoli)



- fase 2: assemblaggio dei sub-componenti in componenti strutturali bi o tridimensionali ed eventuale pre-assemblaggio dell'edificio (Paese di destinazione);
- fase 3: assemblaggio finale dell'edificio in cantiere (Paese di destinazione).

La fase 1, quella della progettazione esecutiva e successiva produzione, prevede una logistica a grande distanza dal cantiere dove si reperisce più facilmente la materia prima. La sfida è il trasferimento efficiente delle conoscenze costruttive italiane per 'tradurre' le regole che ne sottendono la costruzione, senza abbassare il livello finale della qualità edilizia. I dettagli costruttivi

messi a punto in questa fase sono *experience-based* e mirano ad essere sempre customizzabili ai principi esigenziali delle normative e della cultura dei nuovi mercati edilizi. Grazie a modelli *off-site*, con elementi industrializzati, a processi di prefabbricazione, a sistemi modulari e alla possibilità di pre-assemblaggio (Tatum *et al.*, 1986; Vanegas *et al.*, 2002; Lu *et al.*, 2018) si aggiunge ai noti vantaggi di economicità e sostenibilità, riconosciuti da molti anni in particolare dall'Unione Europea (Nihar *et al.*, 2017) una risposta effettiva alla complessità di esportazione degli elementi costruttivi. Questa fase è connotata da processi virtuosi di *Life Cycle Assessment* di filiera e di prodotto delle tecnologie leggere

2-week time only. The required speed led to study a construction process that allowed a fast assembly, targeting the CLT structural system and reinterpreting it according to new assembly procedures. This innovative design process, developed from the needs of the United Arab Emirates (UAE) but adaptable to other developing countries (construction-wise), aims at modifying the traditional construction practices by stating the significance of the pre-design phase as a method to coordinate the following construction phases. The proposed model formulates the construction process in three stages, matching with the below-listed research development phases:

- phase 1: construction design, fabrication of structural sub-components (at country of origin) and shipment to the country of destination;

- phase 2: assembly of sub-components in structural 2-D or 3-D components and potential building pre-assembly (at country of destination);
- phase 3: building assembly at final site (at country of destination).

Phase 1, concerning the construction design and the following fabrication of sub-components, implies a logistics at long distance from the final site, where it is easier to retrieve the raw matter. The challenge is the efficient transfer of Italian construction expertise to "translate" the construction rules, without compromising the final level of building quality. The construction details developed in this phase are experience-based and aim to be always customizable to the requirements of the regulations and culture of any receiving building market. The off-site models with industrialised products, the prefabrication processes, the mod-

ular systems, and the possibility of pre-assembly (Tatum *et al.*, 1986; Vanegas *et al.*, 2002; Lu *et al.*, 2018) provide an actual response to the complexity of exporting the construction elements, in addition to the known economic and sustainability advantages, particularly acknowledged by the European Union since many years (Nihar *et al.*, 2017). This phase is characterized by Life Cycle Assessment best practices of the supply chain of lightweight technologies (Campioli and Lavagna, 2013; Martinez-Rocamora *et al.*, 2016), other than a significant reduction in CO₂ emissions (Hong Dong *et al.*, 2015), thanks to the use of the timber construction system. These sustainability features can balance out the environmental impact and energy cost related to its export.

As far as shipping is concerned, the transportation of the construction ele-

ments faces the issue of their large size, traditionally standardized for road transport. For this reason, the first part of the construction design concerned the breakdown of wall and floor panels (prefabricated components) into smaller elements (sub-components) to allow shipping a compact pre-kit composed of 2-D elements. Figure 2 shows the sub-components schedule for wall panels.

The detailed study of the sub-components' connection systems has been strategic, both for checking the static safety and site construction, to construct the composed components. The computer-assisted design and the CNC fabrication allow labelling each sub-component with a unique identification code that, thanks to the elaboration of an assembly manual, allows an easy and quick organization of the construction site.

(Campioli e Lavagna, 2013; Martinez-Rocamora *et al.*, 2016), oltre che da una riduzione sensibile delle emissioni di CO₂ (Hong Dong *et al.*, 2015), grazie all'uso della tecnologia in legno. Queste caratteristiche di sostenibilità possono compensare gli impatti ambientali e i costi energetici legati all'exportazione.

Per quanto riguarda la spedizione, il trasporto via nave degli elementi costruttivi pone il problema della dimensione degli stessi, tradizionalmente standardizzata per il trasporto su gomma. Per questa ragione, la prima parte della progettazione esecutiva ha riguardato la scomposizione dei pannelli parete/solaio (componenti prefabbricati) in sub-componenti per assicurare una spedizione secondo un pre-kit compatto ad elementi bidimensionali. La figura 2 mostra l'abaco di scomposizione delle strutture di elevazione verticale.

Il dettagliato studio esecutivo dei sistemi di connessione tra i sub-componenti è stato strategico, sia in termini di sicurezza statica, sia di cantierizzazione, per ricostruire l'unitarietà dell'elemento ricomposto. La progettazione assistita e il ciclo produttivo a controllo numerico permettono di assegnare a ciascun sub-componente un proprio codice identificativo che, grazie alla creazione di un manuale di montaggio, consente una facile e veloce organizzazione del cantiere.

La fase 2 del processo è interessata nuovamente da operazioni *off-site*, per continuare ad assicurare elevati livelli di qualità, però più vicino al cantiere, nel paese di destinazione, ed è individuata dalla procedura di rapido assemblaggio a secco dei sub-componenti in componenti di dimensioni maggiori (Fig. 3).

In questa fase il modello esecutivo propone due possibili strade: inviare i componenti strutturali montati (elementi bidimensionali) al cantiere per il successivo assemblaggio finale in sito,

Phase 2 of the process once again accounts for off-site operations, to keep ensuring high quality levels, closer to the final construction site (at country of destination), and concerns the fast dry-fix assembly of the sub-component in larger components (Fig. 3).

At this phase, the construction model proposes two options: sending the assembled structural components (2-D elements) to construction site for the final on-site assembly of the building, or proceed off-site to a further pre-assembly of 3-D modules of the building (service units, technical rooms, significant parts of the volume to be built). The second option (implemented in the case study of the SDME) can be beneficial, and therefore needs to be considered from the early-stage of the construction design: if the construction site logistics is uneasy, or in case of unfavourable climatic conditions, a

preventive control of the construction phases can positively influence the final result.

For both option, the level of customization of the project or specific requirements of the construction site would suggest whether the further application of insulation, finishing layers, and MEP systems set-ups should/could be addressed off-site (option tested for the SDME) or, according to conventional methods, directly on site. The first case is closer to the lightweight prefabrication of Platform systems, which limits the flexibility on-site, but eases the process in relation to the above-mentioned issues; the second case speeds up the first part of the construction, leaving the customization of the project to the final assembly on site.

Phase 3 of the construction process (Fig. 4) occurs at the final site, where the 2-D components, or the pre-as-

sembled 3-D modules, are delivered via road transport (by means of conventional trucks) to be assembled for the final construction of the building.

oppure associarvi anche il pre-assemblaggio *off-site* di porzioni tridimensionali dell'edificio (nuclei di servizio, vani tecnici, parti significative del volume da costruire). Questa scelta (adottata nel caso studio di SDME) può essere vantaggiosa, e quindi è utile prevederla fin dallo stadio di concept esecutivo, quando la logistica del cantiere è disagiata o in situazioni climatiche avverse per le quali un controllo preventivo di alcune fasi costruttive può influenzare positivamente il risultato finale. In entrambe le alternative, il livello di personalizzazione del progetto o esigenze specifiche del cantiere suggeriscono se la successiva aggiunta di *layer* isolanti e di finitura e predisposizioni impiantistiche, dovrà/potrà essere realizzata *off-site* (opzione testata per SDME) o, secondo modelli più tradizionali, direttamente in sito. Il primo caso si avvicina ai principi di prefabbricazione leggera già sperimentati con la tecnologia *Platform*, che limita la flessibilità in opera, ma facilita il processo di fronte alle complessità prima delineate. La seconda opzione, invece, velocizza la prima parte della costruzione lasciando all'assemblaggio finale in sito la personalizzazione del progetto.

La fase 3 del processo costruttivo (Fig. 4) è quella del cantiere, in cui i componenti bidimensionali montati, o eventuali nuclei tridimensionali pre-assemblati, arrivano grazie al trasporto su gomma (con mezzi di tipo convenzionale), per essere assemblati per la realizzazione dell'edificio.

Applicazione del progetto esecutivo al caso studio: il prototipo per SDME

Il consistente lavoro svolto in fase di progettazione esecutiva e nella fase 2 di assemblaggio dei sub-componenti e di pre-assemblaggio dell'edificio (nel campus universitario di Sharjah) ha

sembled 3-D modules, are delivered via road transport (by means of conventional trucks) to be assembled for the final construction of the building.

Application of the construction design to the case study: the prototype for SDME

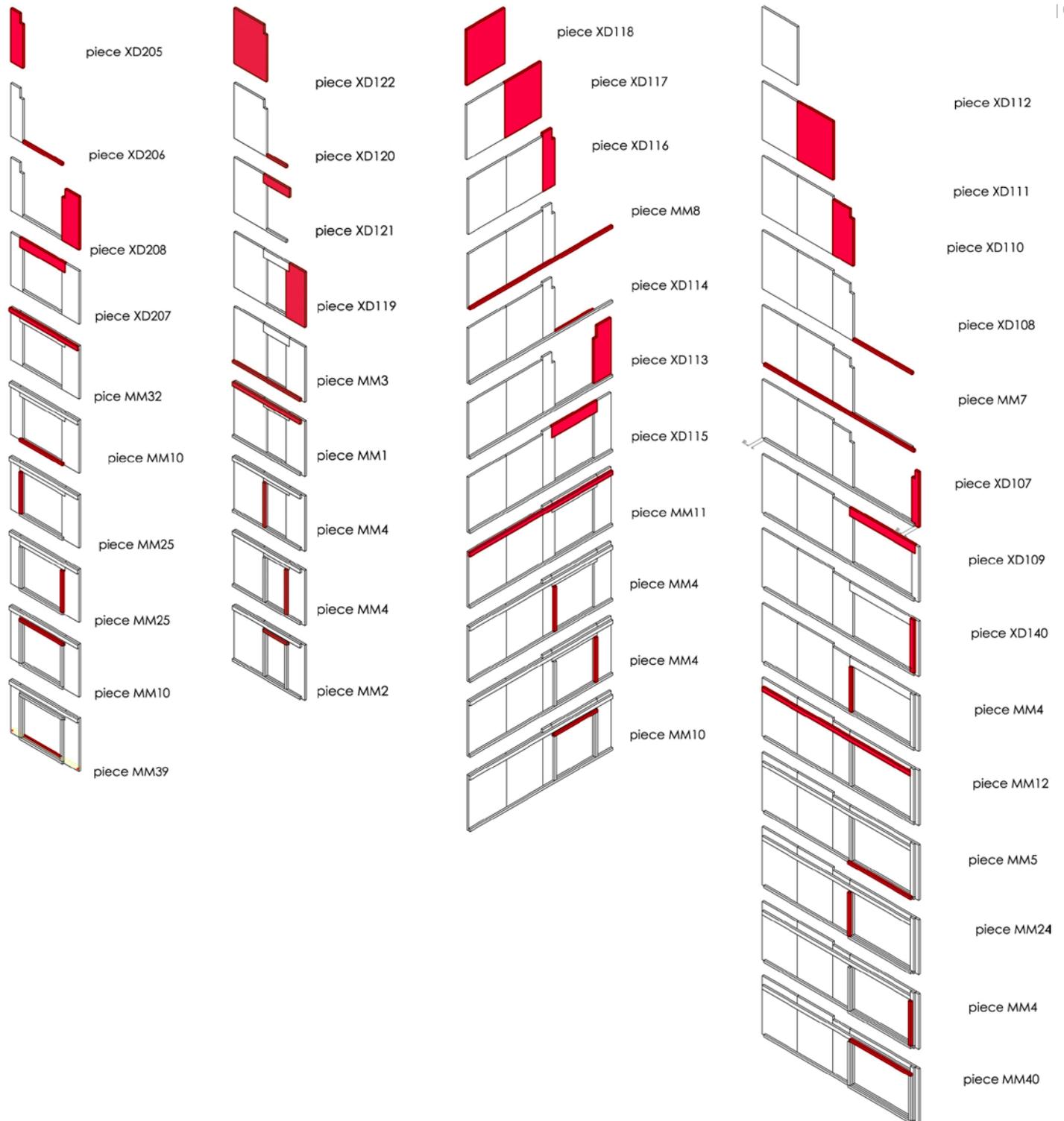
The considerable work done at the construction design phase and at the phase 2 of assembly of sub-components and pre-assembly of the building (at the university campus in Sharjah) made a basic construction site (phase 3) sufficient for the safe and quickly final assembling of the building. This also allowed the employment of unskilled labourers side-by-side students of the Universities of Sharjah and Ferrara (youngster with little or no practical know-how regarding prefabricated wood technologies), as required by the academic nature of the SDME competition.

Table 1 describes the technical data of the construction process completed in phases 1 and 2. In 14 days and with 1 team of 7 people it was possible to pre-assemble the structure of the entire building during phase 2. This was necessary, in this specific situation, due to the very short time allowed for construction at the final contest (construction phase 3) to better manage the prototype's complex assembly.

The detailed fabrication of the sub-components (in phase 1) allowed the manufacturer to load them in the containers according to a precise order, which then considerably eased and speeded up the unloading/storing operations (Fig. 5) to prepare for the following phase 2 (sub-component assembly). This organized stacking of the sub-components into the containers also allowed optimizing the volume, minimizing the number of containers

02 | Fase 1: tavola del progetto esecutivo, con estratto dell'abaco dei sub-componenti nei quali si scompongono i componenti strutturali. L'abaco si configura come un kit per agevolare il successivo montaggio dei componenti (fase 2 del processo) prima di arrivare in cantiere (fase 3) (elaborazione: Team Know-howse di cui fanno parte gli autori)

Phase 1: construction design drawings with an extract from the sub-components schedule with the breakdown of the structural components. The schedule acts as a kit to ease the following assembly of the sub-components in components (phase 2 of the process) before reaching the construction site (phase 3) (elaboration: Team Know-howse of which the authors are members)



03 | Tavola del progetto esecutivo: esempio delle dettagliate informazioni per il montaggio dei sub-componenti (fase 2). Il manuale di montaggio riporta la posizione precisa dei sub-componenti affinché venga ricomposto il pannello-parete portante (componente). La ricchezza di informazioni, sia sulle connessioni, sia sulla posizione degli elementi da montare, facilita la ricostruzione anche da parte di operatori non specializzati (elaborazione: Team Know-howse)

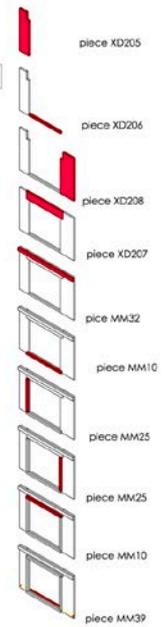
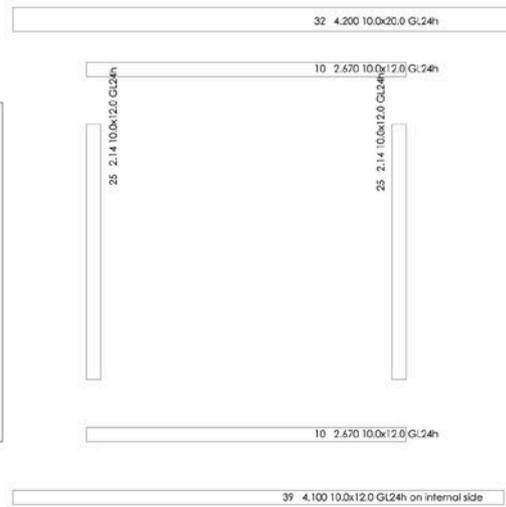
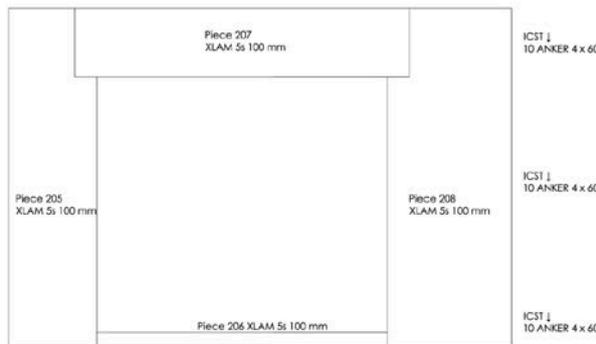
Construction design drawings: example of the detailed information for assembling the sub-components (phase 2). The assembly manual shows the precise location of each sub-component to compose the bearing-wall panel (component). The abundance of information, both on the connections and on the location of the elements to be assembled, allows the reconstruction even by non-specialized labourers (elaboration: Team Know-howse)

03 | WALL I

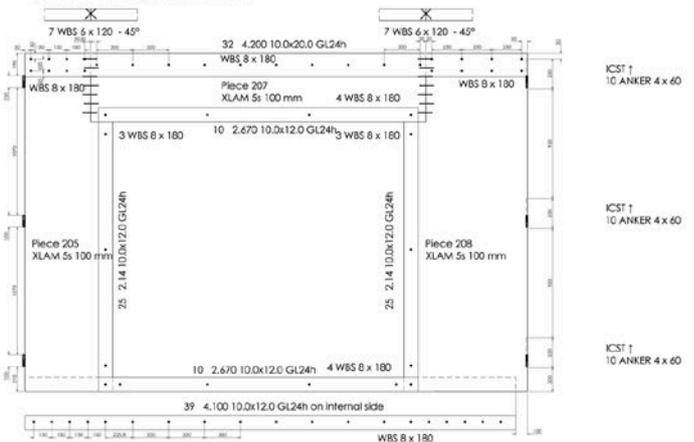
External view - Explose of Xlam Panels



External view



External view - Assembly with screw - first layer



to be shipped; as a consequence, it produced economic savings and reduced emissions of greenhouse gases associated with transport. The accurate construction design model assisted the connection (phase 2) of the 2-D components and 3-D modules (Fig. 5) by means of conventional hardware joint. This phase allowed testing this original construction process, never considered before in a conventional CLT construction site. Figure 5 shows the following pre-assembly of the structural system of the building. The pilot construction highlighted some critical issues, which partially occurred, and partly were only detected as potential:

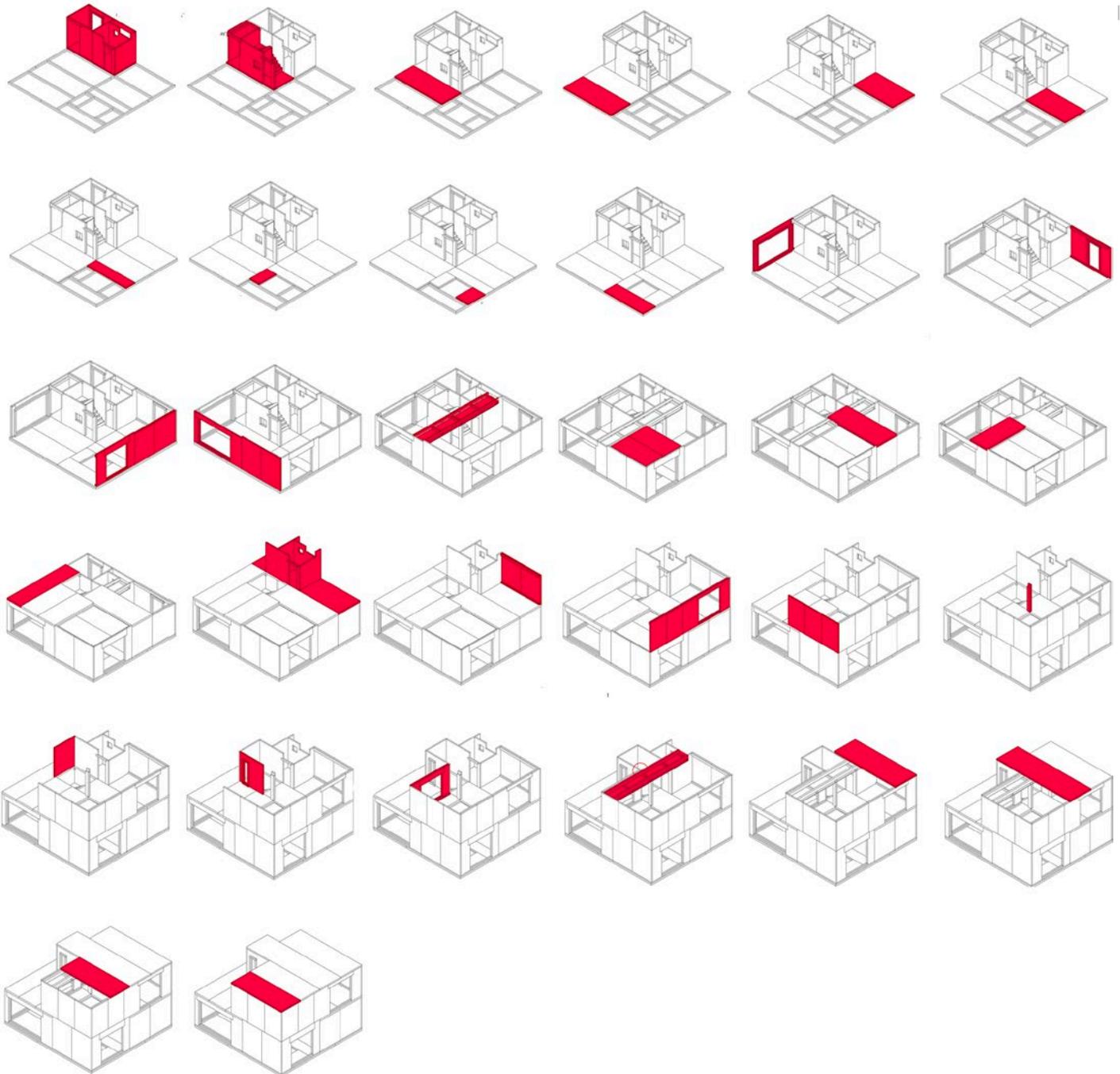
- difficulty to find suppliers of special tools for woodworking, usually not owned by local contractors, caused delays and inaccuracies in construction (corrective measure: specify the necessary tools in the assembly manual and provide them in the shipment);
- the time required for the shipment of the material (in this case about 30 days) delays the submission, even if the timber construction still allows shorter construction time than with conventional systems;
- the margin of error in labelling the sub-components could jeopardize the unloading operation of the container;

- the fast assembly, proper of the timber system, could be delayed by the contingency of sub-components forgotten or damaged in the shipment (corrective measure: provide spare parts to be adapted on site).
- Once completed the pre-assembly phase 2, the building structure was provided with MEP systems and complementary layers and finishes (Fig. 6), taking care to set these up for the forthcoming disassembly of the components/3-D modules and their transport to competition site (Fig. 6), where the final assembly prepared the building for the contest (Fig. 7). The final assembly (phase 3) complied with the competition deadlines, with-

out highlighting any particular critical issue. The reason for this success is to be found in the advanced programming of the construction design (including the full MEP systems, for the SDME), capable of allowing on-site modification and flexibility that solved the ordinary inaccuracies occurred in the pre-assembly. This was possible thanks to the CLT material adaptability, not characterizing the traditional heavy prefabrication systems (rigid due to standardized pieces following assembly rules that cannot be disregarded, and due to the nature of the material that requires new calculations at each variation). The above-described experience al-

04 | Assemblaggio in cantiere (fase 3). I componenti montati off-site vengono assemblati in sito per la realizzazione dell'edificio nel luogo di costruzione. Come si vede dalla tavola di progetto, il modello esecutivo prevede specifiche fasi di assemblaggio attraverso le quali, rapidamente e limitando le interferenze, le porzioni di edificio si compongono secondo un'univoca sequenza. Nel caso di SDME, nella fase 2 di montaggio sono state pre-assemblate porzioni tridimensionali dell'edificio per velocizzare ulteriormente l'assemblaggio finale. Nello specifico si sono realizzati off-site i due servizi igienici, il corpo scale e i plenum impiantistici (elaborazione: Team Know-howse)

On-site assembly (phase 3). The components composed off-site are assembled on-site for the construction of the building. As shown in the project drawing, the construction model implies specific assembly phases to assemble the portions of the building according to a unique sequence, quickly, and limiting delays. In regards to the SDME, 3-D modules of the building were pre-assembled at phase 2 to speed up the final assembly on-site. Specifically, the bathroom pods, the staircase, and the plenums for the MEP systems were built off-site (elaboration: Team Know-howse)



| 04

lowed developing and testing the new construction process on-site, within the UAE market. The case study shows the encouraging potential of the operation, with special regard to its success in a building market such as the UAE

one. The obstacles connected to this environment, for which the developed construction model can represent a possible solution, are mainly two. First of all, a construction market based on immigrant labour coming from com-

pletely different backgrounds (and therefore without any experience in the construction sector), under 2-year contracts, and for which the employer does not invest in training. This negatively affects the construction, its qual-

ity and its schedule. Therefore, the building quality guaranteed by the proposed systems (although achieved in a very short construction time) assumes significant strength. Secondly, the UAE, and especially

Tab.01 | Tempistiche e risorse necessarie per il processo costruttivo nelle fasi 1 e 2 per SDME
Schedule and required resources for the construction process at phases 1 and 2 for SDME

consentito di condurre un cantiere finale (fase 3) snello ed essenziale, capace di assemblare velocemente il manufatto. Questo ha permesso, inoltre, di impiegare operai non specializzati affiancati, come richiesto dalla natura accademica del concorso SDME, dagli studenti delle Università di Sharjah e di Ferrara (giovani con poco o nessun know-how pratico riguardo alle tecnologie di prefabbricazione in legno).

La tabella 1 descrive i dati tecnici del processo costruttivo svolto nelle fasi 1 e 2, evidenziando come in soli 14 giorni e con 1 team composto da 7 persone si è potuto pre-assemblare la struttura dell'intero edificio durante la fase 2. Questo, infatti, si è reso necessario nel caso specifico a causa delle tempistiche di costruzione estremamente ridotte previste per il contest finale (fase 3 di cantiere) per gestire al meglio la complessità realizzativa del prototipo.

La dettagliata fabbricazione dei sub-componenti (nella fase 1) ha permesso al produttore di caricarli nei container secondo un

preciso ordine, che ha poi notevolmente facilitato e velocizzato le operazioni di scarico (Fig. 5) in funzione della successiva fase di assemblaggio dei sub-componenti (fase 2). Tale organizzazione dei sub-componenti ha inoltre consentito di ottimizzarne lo spazio, minimizzando il numero di container da spedire, con conseguente risparmio economico e ridotte emissioni di gas serra associate al momento del trasporto.

Il modello di progetto esecutivo messo a punto ha facilitato il montaggio (fase 2) dei componenti bidimensionali e dei moduli tridimensionali (Fig. 5) mediante ferramenta convenzionale. Questa fase ha permesso di testare il processo costruttivo del tutto originale, non contemplato nel cantiere in CLT tradizionale. Sempre nella figura 5 si documenta il successivo pre-assemblaggio del grezzo strutturale dell'edificio.

Il cantiere pilota ha evidenziato alcune criticità, in parte effettivamente verificatesi, in parte solamente rilevate come potenziali:
 - il difficile reperimento di appositi strumenti per la lavorazio-

Tab.01 |

Project phases	Task	Time [days]	Resources [containers/workers/equipment]
Phase 1 Production & shipping	Loading (at origin) 150 (CLT and Glulam elements) loose sub-components in an organized fashion	1	1 skilled* foreman 4 skilled* labourers 1 crane and rigger
	Shipping From Venice commercial port (Italy) to Sharjah commercial port (UAE)	30	If loose sub-components: 1 container - 40' open-top 1 container - 20' open-top
	Unloading (at destination) to create organized piles of sub-components	1	1 unskilled* foreman 4 unskilled* labourers 1 crane and rigger
Phase 2 Components' building & building pre-assembly	Building 12 structural components and 3D modules (by the sub-components assembly)	6	1 team** comprising: 1 skilled* labourer 2 unskilled* labourers 1 crane and rigger
	Pre-assembly of the building (by the structural components and 3D modules assembly)	6	1 team comprising: 1 skilled* foreman 1 rigger 4 unskilled* labourers
Summary		14	1 container - 40' open-top 1 container - 20' open-top 1 skilled* foreman 1 unskilled* foreman 1 skilled* labourer 4 unskilled* labourers 1 crane and rigger

*refers to expertise in timber construction

**if multiple teams are involved, the time to complete the task decreases accordingly

05 | Fase 1 (in alto): uno dei due container contenenti i sub-componenti prodotti in Italia e arrivati via nave alla University of Sharjah, UAE. Le operazioni di scarico sono state gestite da 1 direttore lavori non specializzato, 1 gru (con operatore) e 4 operai non specializzati. L'organizzazione a pile è stata agevolata dalla precisa numerazione di ogni sub-componente. Fase 2 (in basso): montaggio dei componenti strutturali e pre-assemblaggio dell'edificio. In evidenza il pannello-parete di cui al dettaglio tecnico di figura 3, montato e sollevato per essere collocato nell'area di stoccaggio (prime due immagini in basso). Pre-assemblaggio del grezzo strutturale con, nel dettaglio: il sollevamento di un componente-parete (in basso al centro) per il suo posizionamento in opera; il parziale pre-assemblaggio del primo piano (in basso a destra). La squadra (con un solo operaio specializzato) che segue il manuale esecutivo per il montaggio dei componenti (in alto a destra) (foto:Vittorino Belpoliti)

Phase 1 (top): one of the two containers with the sub-components produced in Italy and delivered by boat at the University of Sharjah, UAE. The unloading operations were managed by 1 non-specialized foreman, 1 crane (with rigger), and 4 unskilled labourers. The precise labelling of each sub-component eased the organization in piles. Phase 2 (bottom): assembly of the structural sub-components in components and pre-assembly of the building. The image shows the wall-panel displayed in the technical detail of figure 3, composed and lifted by the crane to be placed in the storage area (first two images below). Pre-assembly of the building structure: detail of a wall component (bottom-centre) lifted for its positioning; partial pre-assembly of the first floor (bottom-right). The team (with 1 skilled labourer only) that follows the construction manual for assembling the sub-components (top right) (photo:Vittorino Belpoliti)

ne del legno, usualmente non in possesso delle imprese locali, ha causato ritardi e imprecisioni nelle lavorazioni (correttivo: indicare già nel manuale di montaggio gli strumenti necessari e fornirli nella spedizione);

- il tempo necessario per la spedizione del materiale (in questo caso circa 30 giorni) dilata le tempistiche, anche se il modello costruttivo consente comunque cantieri più brevi rispetto a quelli con sistemi convenzionali;
- il margine di errore nella catalogazione dei sub-componenti potrebbe mettere in crisi le operazioni di scarico del container;
- l'imprevisto che un sub-componente venga dimenticato o danneggiato nella spedizione potrebbe vanificare le vantaggiose tempistiche di cantiere (correttivo: prevedere alcuni sub-componenti di scorta da adattare in opera).

Una volta finita la fase 2 di pre-assemblaggio, si è optato per dotare l'edificio di impianti, stratigrafie complementari e finiture (Fig. 6), facendo attenzione a predisporre questi per l'imminente disassemblaggio e trasporto al sito di concorso dei componenti/moduli tridimensionali (Fig. 6), dove l'assemblaggio finale ha reso pronto l'edificio stesso per il contest (Fig. 7).

L'assemblaggio finale (fase 3) ha rispettato le tempistiche di concorso, senza evidenziare particolari criticità. La ragione di tale successo è proprio da ritrovarsi nella evoluta programmazione esecutiva (per SDME inclusiva dell'intero apparato impiantistico), capace di ammettere variazioni e flessibilità in opera che hanno risolto le fisiologiche imprecisioni avvenute nel pre-as-

semblaggio. Ciò è stato possibile grazie all'adattabilità materica del CLT, al contrario del tradizionale prefabbricato pesante (rigido sia a causa di pezzi standardizzati con regole di montaggio non derogabili, sia della natura del materiale che necessita di nuovi calcoli ad ogni variazione).

L'esperienza appena documentata ha permesso di mettere a punto e testare sul campo, all'interno del mercato emiratino, il nuovo processo costruttivo. Il caso studio fa emergere potenzialità incoraggianti di successo dell'operazione, in particolare per un mercato edilizio come quello degli UAE. Le criticità che caratterizzano tale contesto, per le quali il modello di progettazione esecutiva messo a punto può rappresentare una possibile soluzione, sono prevalentemente due. Innanzitutto, un mercato delle costruzioni che si basa su maestranze di immigrati provenienti da attività completamente diverse (e quindi senza alcuna esperienza nel settore edile), messe sotto contratto per periodi di soli due anni e per i quali, di conseguenza, il datore di lavoro non investe nella formazione. Ciò influenza negativamente il cantiere, la sua qualità e le sue tempistiche. Assume dunque una forza significativa la qualità edilizia garantita dai nuovi sistemi proposti, pur con un'estrema velocità di cantiere.

In secondo luogo, gli UAE, e specialmente Dubai, stanno diversificando le strategie economiche (UAE Vision 2021), rafforzando i settori turistico e imprenditoriale e divergendo dall'uso esclusivo del petrolio quale risorsa energetica (Said *et al.*, 2018). Tuttavia, il settore delle costruzioni rimane oggi il principale



06 | Fase 2 (in alto): esecuzione degli strati di completamento e delle finiture sul grezzo strutturale. In evidenza la posa di isolamento, barriera al vapore, placcature, elementi metallici e della pelle esterna in tessuto teso. Fase 3 (in basso): disassemblaggio dell'edificio e carico dei componenti/moduli tridimensionali (già con predisposizioni impiantistiche e finiture) sui mezzi di trasporto al sito di assemblaggio finale (contest di gara) (foto:Vittorino Belpoliti)

Phase 2 (top): installation of finishing layers on the structure, including insulation panels, vapour barrier, panelling, metal hardware, and outer skin in tensile fabric. Phase 3 (bottom): disassembly of the building and loading of 3-D modules (already provided with finishing and MEP systems set-up) on the trucks for the transportation to the final assembly site (competition contest) (photo: Niccolò Di Virgilio)

06 |



motore di sviluppo del Paese. Le previsioni di crescita demografica, pari al 6,5% annuo (Dubai Statistic Centre, 2016), e l'imminente traguardo di Expo 2020 hanno ulteriormente accelerato la già inarrestabile attività edilizia. Ciò fa supporre che tecnologie edilizie di veloce realizzazione (a fronte di una qualità certa del risultato e di una spesa contenuta) possano inserirsi nel mercato degli UAE in alternativa o a integrazione del sistema costruttivo

convenzionale in cemento armato, che oggi manifesta anche limiti in riferimento all'origine e al *Life Cycle Assessment* delle materie prime.

In questo scenario i sistemi costruttivi a secco in legno possono rappresentare un'alternativa, perché contraddistinti da un vantaggioso *carbon footprint*, grazie alla filiera controllata di crescita, taglio e produzione.

Dubai, are diversifying economic policies (UAE Vision 2021), strengthening the tourism and business sectors and diverging from the exclusive use of oil as an energy resource (Said *et al.*, 2018). However, the construction sector remains today the country's main driver of the development. The population growth forecasts of 6.5% per annum (Dubai Statistic Center, 2016) and the upcoming goal of Expo 2020 have further accelerated the already unstoppable construction activity. This implies that fast-to-build construction technologies (standing the high quality of the outcome and the contained expense) can fit into the UAE market as alternative or integration to the conventional reinforced concrete construction system, which today also manifests limits in regards to the origin and Life Cycle Assessment of its raw matter.

Within this scenario, dry-fix timber systems can represent an alternative, as they are characterized by an advantageous carbon footprint granted by the controlled chain of growth, harvesting, and fabrication.

Outcomes and final discussion

The developed construction approach allowed exporting the CLT-based construction system in a new market, managing at the same time the transportability of the construction elements in an efficient manner and offering margins of economic feasibility to the export of the product. The experience and the prototype for the SDME represent the first pilot project (concrete outcome of the research and tangible proof of achievement of the proposed objectives) of the ongoing design and construction experimentation. As following developments of the

research, in order to move from the mere experimentation to an extended application to the market, it will be necessary to focus on the corrective measures, highlighted on site, that might limit the potential of the construction model (for instance the ones already mentioned in the previous paragraph, or the need to reach the right calibration of finishing levels between phase 2 and phase 3). The developed procedure, beyond the specific aspects for the SDME, is based on strategic factors in a more general perspective of repeatability:

- eco-compatibility and recyclability of materials, with certified supply chain, LCA, and environmental label;
- environmental and economic sustainability of the process;
- reduction of the production waste scraps;

- transportability and optimization of the system (use of lightweight technologies to reduced the transported weight);
- combinability of components to adapt to different functional requirements;
- fast construction of phase 3 (particularly useful to solve construction problems in remote sites, with problems of accessibility or with labourers exposed to environmental hazards, and to limit on-site construction-related pollution);
- ease of disassembly/reversibility in the case of temporary construction until disposal (for itinerant relocation, or for temporary use/reconfiguration of a «transportable» and «transformable» building - Zanelli, 2003).

The CLT standardized structural technology, integration/evolution of tradi-



Risultati e riflessioni conclusive

Il progetto esecutivo elaborato ha permesso di esportare il sistema costruttivo basato sulla tecnologia CLT in un nuovo mercato, gestendone parallelamente la trasportabilità degli elementi costruttivi in maniera efficiente e offrendo margini di fattibilità economica all'esportazione del prodotto.

L'esperienza e il prototipo per SDME rappresentano il primo progetto pilota (esito concreto della ricerca e prova tangibile del raggiungimento degli obiettivi proposti) della sperimentazione progettuale ed esecutiva in corso.

Come successivi sviluppi, per passare dalla sperimentazione a una possibile riproposizione più estesa sul mercato, si dovranno studiare i correttivi ai limiti del modello evidenziati dalle fasi di cantierizzazione (v. a esempio quelli già espressi nel precedente paragrafo o la necessità di arrivare alla giusta calibrazione fra i livelli di finitura dei componenti fra la fase 2 e la fase 3).

La procedura messa a punto, al di là degli aspetti contingenti per SDME, si basa su concetti strategici in un'ottica di replicabilità più generale:

tional materials, was proven adequate even for hot climates and with high humidity levels. It is capable to assist a construction design strategy comprising a set of structural elements that can be transported at great distances, and then can be finished with local products (in an interesting "glocal" perspective, to calibrate the performances of the resulting building adapting to the different climates and cultural demands). Although it is mostly acknowledged as imported system, it allows for a good level of involvement of local companies and labourers (social sustainability).

Such features of the developed material and system seem to be a good option especially for developing countries, overall if in urgent needs to accommodate the demographic growth, and therefore can increase their building stock by means of strategies that are

compatible with the planet safeguard. According to the changing needs of the community, the proposed system can provide interesting design ideas for an architecture 'quickly ready to use' that leaves a mark when needed and removes it when it is no longer useful («relocatable building» and «dismantable building» - Kronenburg, 1995), also thanks to its reversibility (Bologna, 2002) and impermanence in sensitive or protected contexts.

- eco-compatibilità e riciclabilità dei materiali, con filiera, LCA e Label ambientali certificati;
- sostenibilità ambientale ed economica del processo;
- limitazione degli sfridi di produzione;
- trasportabilità e ottimizzazione del sistema (impiego di tecnologie 'leggere' con ridotti pesi di trasporto);
- aggregabilità dei componenti per adattarsi alle diverse esigenze funzionali;
- rapidità di costruzione della fase 3 (particolarmente utile per risolvere i problemi di cantierizzazione in luoghi remoti con problemi di accessibilità o criticità ambientali per i laboratori esposti e per limitare i livelli di inquinamento indotti dal cantiere);
- nel caso di esigenze di "temporaneità", facilitazione delle operazioni di disassemblaggio/reversibilità costruttiva (in un'ottica di ricollocamento itinerante o di temporaneità e riconfigurazione di un organismo «trasportabile» e «trasformabile» - Zanelli, 2003), fino alla dismissione.

La tecnologia strutturale standardizzata del CLT, integrazione/evoluzione di materiali tradizionali, si è dimostrata adeguata anche a climi caldi e con forti escursioni di umidità. È in grado di favorire una progettualità esecutiva fatta di un insieme di elementi strutturali trasportabili anche a grandi distanze, che poi possono essere completati in termini stratigrafici con tecnologie maggiormente locali (in un'interessante ottica "glocal", per calibrare le prestazioni adeguandosi alle diverse sollecitazioni climatiche e alle molteplici istanze culturali). Nonostante si connoti in gran parte come tecnologia di importazione, permette, inoltre, un buon livello di coinvolgimento di imprese e maestranze locali (sostenibilità sociale).

Tali prerogative del materiale e del sistema messo a punto sembrano essere un buon viatico soprattutto per i paesi in via di sviluppo e/o con esigenze urgenti di aumento del parco edilizio secondo una crescita compatibile con la tutela del Pianeta. Anche per le condizioni di reversibilità (Bologna, 2002) e non permanenza dell'intervento in contesti sensibili o tutelati, al mutare delle esigenze della collettività, il sistema proposto può fornire interessanti spunti e supporti progettuali per un'architettura 'rapidamente pronta all'uso', che lascia il segno quando serve e lo

toglie quando non più utile («relocatable building» e «demontable building» – Kronenburg, 1995).

ACKNOWLEDGEMENTS

Pietromaria Davoli: first and last paragraph.

Marta Calzolari: second paragraph.

Vittorino Belpoliti: third paragraph.

Gianpaolo Guerzoni: consulting as expert in timber construction systems.

Scheda di progetto/Project data

Titolo/Title	KNOW HOWse
Progettista/Author	Team KNOW HOWse (University of Sharjah, UAE; University of Ferrara, Italy) www.knowhowse.ae
Partners/Consulting partners	Sharjah Investment and Development Authority – Shurooq; Sheikh Zayed Housing Programme
Sponsor, imprese e fornitori/ Sponsors, companies and suppliers	Alba Tower Construction; DUBCO Construction; Xlam Dolomiti; Pandre Special Integration; OffGrid Group of Companies; Schueco Middle East; ALICO Aluminium and Light Industries; Gulf Glass Industries; OHM Star Electromechanic; Bee'ah Sharjah Environment Company; Alufoot; Master Events; Watery International Group; Buzzi & Buzzi; Aquamag - Magnesita Panel Building Material Trading; Al Weqaya Fire Fighting; Soltech; Rothoblaas; Crestron; Hydraloop international; The Mail Room Restaurant & Cafe; Risala Furniture; Italian Industry & Commerce Office in the UAE; Sharjah Architectural Student Association
Committente/Client	Solar Decathlon Middle East 2018 in Dubai
Luogo/Location	Mohammed Bin Rashid Solar Park, Dubai
Dimensione/Size	108 m ²
Tipologia/Typology	Villa indipendente/Independent villa
Tecnologia/Construction system	Prefabbricazione leggera a pannelli in legno a strati incrociati/ <i>Prefabrication with cross-laminated timber panels</i>
Specifiche/Specs	Prototipo innovativo ad elevate prestazioni energetiche/ <i>Innovative prototype with high energy performance</i>
Costo totale/Total cost	€ 650.000
Finanziamenti/Grants	Cash/Cash € 125.000 Materials/Services € 525.000

REFERENCES

- Boarin, P., Calzolari, M. and Davoli, P. (2018), “Two timber construction models: tradition without innovation or innovation without tradition?”, *Techne, Journal of Technology for Architecture and Environment*, n. 4, pp. 68-78.
- Bologna, R. (Ed.) (2002), *La reversibilità del costruire. Labitazione transitoria in una prospettiva sostenibile*, Maggioli Editore, Rimini.
- Campioli, A. and Lavagna, M. (2013), “Environmental innovations in the construction sector and life cycle approach”, *Techne, Journal of Technology for Architecture and Environment*, n. 5, pp. 66-73.
- Cobbers, A. and Jahn, O. (Gössel, P., Ed.) (2010), *Prefab Houses*, TASCHEN, Colonia (Germany).
- Tatum, C.B., Vanegas, J.A. and Williams, J.M. (1986), *Constructability Improvement Using Prefabrication, Preassembly, and Modularization*, Technical Report, Stanford University.
- Dubai statistic centre (2017), “Population by Gender and Age Groups - Emirate of Dubai”, available at: <https://www.dsc.gov.ae/en-us/> (accessed 27th February 2019).
- Fenner, A. E., Kibert, C. J., Woo, J., Morque, S., Razkenari, M., Hakim, H. and Lu X. (2018), “The carbon footprint of buildings: A review of methodologies and applications”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 94, pp. 1142-1152.
- Kronenburg, R. (1995), *House in Motion. The Genesis, History and Development of Portable Building*, Academy Edition, London.
- Martinez-Rocamora, A., Solís-Guzmán, J.C and Marrero, M. (2016), “LCA databases focused on construction materials: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 58, pp. 565-573.
- Said, Z., Alshehhi, A.A., Mehmood, A. (2018), “Predictions of UAE’s renewable energy mix in 2030”, *Renewable Energy*, Vol. 118, pp. 779-789.
- Serrats, M. (2012), *Prefab Houses. Sostenibili, economici, all'avanguardia*, Logos, Modena.
- Lehmann, S. (2013), “Low carbon construction systems using prefabricated engineered solid wood panels for urban infill to significantly reduce greenhouse gas emissions”, *Sustainable Cities and Society*, Vol. 6, pp. 57-67.
- “UAE vision 2021”, available at: <https://www.vision2021.ae/en> (accessed 27th February 2019).
- Vanegas, J.A., Haas, C.T. and Fagerlund, W.R. (2002), “Construction Industry Institute (CII) Preliminary Research on Prefabrication, Pre-assembly, Modularization, and Off-site Fabrication in Construction. Technical Report”, available at: <https://smartechnology.gatech.edu/handle/1853/10883> (accessed 22nd February 2019).
- Nanyam, V., Sawhney, A. and Gupta P. (2017), “Evaluating Offsite Technologies for Affordable Housing”, *Procedia Engineering*, Vol. 196, pp. 135-143.
- Lu, W., Chen, K., Xue, F. and Pan, W. (2018), “Searching for an optimal level of prefabrication in construction: An analytical framework”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 201, pp. 236-245.
- Dong, Y., Jaillon, L., Chu, P., Poon, C.S. (2015), “Comparing carbon emissions of precast and cast-in-situ construction methods – A case study of high-rise private building”, *Construction and Building Materials*, Vol. 99, pp. 39-53.
- Zanelli, A. (2003), *Trasportabile Trasformabile. Idee e tecniche per architettura in movimento*, Libreria CLUP, Milano.