

Francesco Incelli¹, Luciano Cardellicchio²,

¹ Dipartimento di Culture e Progetto, IUAV Università di Venezia, Italia

² School of Built Environment, University of New South Wales, UNSW Sydney, Australia

fincelli@iuav.it

luciano.cardellicchio@unsw.edu.au

Abstract. Questo articolo deriva da uno studio di fattibilità per una sopraelevazione a un piano della *Kent School of Architecture and Planning (KSAP)* nel Regno Unito. Questo progetto ha abbracciato due principi fondamentali dell'economia circolare: la flessibilità degli spazi interni e il *Design for Disassembly (DfD)*. Gli obiettivi sono stati la riduzione del rischio di demolizione, la conservazione del valore del materiale da costruzione, e il suo successivo utilizzo. Questi principi hanno formato la soluzione del telaio portante della sopraelevazione. In occasione di questo testo la fase di ingegnerizzazione è stata portata avanti con lo scopo di migliorare le connessioni strutturali – progettate secondo i principi DfD – con metodi di design generativo.

Parole chiave: Economia circolare; Struttura; Connessione; Smontaggio; Progettazione-per-smontaggio.

Introduzione

Questo articolo deriva da un approfondimento di uno studio di fattibilità di un ampliamento per sopraelevazione di un edificio con funzione didattica per la *Kent School of Architecture and Planning (KSAP)* nel Regno Unito. Lo studio originale, svolto nel 2018, si è concentrato sulla fattibilità tecnica della sopraelevazione, seguendo principi dell'economia circolare alla scala del progetto. La *Kent School of Architecture and Planning* ha sede nel *Marlowe Building (1965)* nel *Campus* di Canterbury dell'Università del Kent, in Inghilterra. Considerando le crescenti esigenze di spazio di studio per la scuola, nel 2018 gli autori sono stati incaricati di produrre uno studio di fattibilità per una sopraelevazione ad un piano dall'allora preside della scuola, prof. Don Gray. Data la necessità di spazi ampi per accogliere le attività di didattica architettonica all'interno della scuola e consentire un agile adattamento di essi alla potenziale trasformazione dei metodi educativi, lo sviluppo sperimentale della sopraelevazione ha posto in concetto di "flessibilità" al centro del processo di progettazione.

Designing a steel connection with a high degree of disassembly: a practice-based experience

Abstract. This article is derived from a feasibility study for a single-story elevation at the *Kent School of Architecture and Planning (KSAP)* in the United Kingdom. This project embraced two fundamental principles of the circular economy: flexibility of interior spaces and *Design for Disassembly (DfD)*. The goals were to reduce the risk of demolition and preserve the value of the building material to empower its later use. These principles formed the solution for the structural frame. For this paper, the engineering phase was carried out to improve the structural connections designed according to DfD principles and following generative design methods.

Keywords: Circular economy; Structure; Connection; Disassembly; Design for Disassembly.

La flessibilità dello spazio interno è considerato uno dei principi chiave dell'economia circolare applicato alla scala dell'edificio. Gli ambienti flessibili aumentano la durata di un edificio soddisfacendo le esigenze future e, quindi, riducono il rischio di demolizione a lungo termine. La strategia di flessibilità riguarda due ambiti: la flessibilità di progetto (o flessibilità iniziale), che consente soluzioni progettuali alternativa nell'organizzazione spaziale e la flessibilità programmata nel tempo, attuabile attraverso l'impiego di elementi tecnici appositamente studiati per garantire il soddisfacimento di esigenze future.

Poiché la richiesta funzionale della committenza suggeriva in sé un'idea di circolarità tradotta nella flessibilità interna degli spazi, il gruppo di progettazione ha deciso di abbracciare ulteriori principi circolari. La struttura portante della sopraelevazione è stata quindi pensata per ottenere la completa reversibilità del telaio strutturale secondo i principi di *Design for Disassembly (DfD)* (ISO20887, 2020).

Come dimostrato dai risultati del progetto di ricerca H2020 *Building as Material Bank (BAMB)*, la completa reversibilità dei componenti e dei sottocomponenti dell'edificio mantiene costante il valore del materiale, incoraggiandone il riutilizzo (Durmisevic, 2019). Il *Design for Disassembly* è, infatti, un concetto in cui gli edifici sono intenzionalmente progettati per il facile recupero e riutilizzo dei materiali usati una volta che la vita utile dell'edificio è conclusa.

Gli edifici tradizionali sono caratterizzati da diagrammi relazionali complessi che rappresentano la massima integrazione di tutti gli elementi edilizi in una struttura dipendente (Durmisevic and Brouwer, 2002). DfD prevede la pianificazione di tre tipi di

Introduction

This article stems from an in-depth study of the feasibility of a roof elevation for the educational building housing the *Kent School of Architecture and Planning (KSAP)* in the United Kingdom. The original study, conducted in 2018, focused on the technical feasibility of the elevation, following circular economy principles at the building scale. The *Kent School of Architecture and Planning* is housed in the *Marlowe Building (1965)* on the *Canterbury Campus* of the University of Kent, England. Given the school's growing need for studio space, the authors were commissioned to produce a feasibility study for a one-story elevation by the former Head of the School, Professor Don Gray. Given the need for large spaces to accommodate architectural teaching activities within the school and to allow for their agile adaptation to potential transformations

of educational methods, the experimental development of the roof extension placed the concept of flexibility at the heart of the design process. Interior space flexibility is considered one of the critical principles of the circular economy applied at the building scale. Flexible spaces increase the lifetime of a building by meeting future needs and, therefore, reduce the risk of long-term demolition. The flexibility strategy covers two areas: design flexibility (or initial flexibility), which allows for alternative design solutions in spatial organisation, and planned flexibility over time, which can be implemented through the use of technical elements specifically designed to ensure that future needs are met.

Since the functional request of the client suggested in itself an idea of circularity translated into the internal flexibility of spaces, the design team decided to embrace circular princi-

trasformazione che prolungano la vita degli edifici e dei loro materiali costitutivi. Il primo è la trasformazione spaziale: gli spazi di un edificio dovrebbero essere facilmente riconfigurabili per usi diversi, rendendo meno probabile che l'edificio raggiunga prematuramente la fine della sua vita. Il secondo è la trasformazione strutturale: dovrebbe essere fisicamente e finanziariamente possibile smantellare un edificio e recuperare i suoi componenti costitutivi. Il terzo è la trasformazione degli elementi e dei materiali: i componenti recuperati da un edificio dovrebbero essere di nuovo facilmente riutilizzabili, richiedendo una ricostruzione minima. Queste tre trasformazioni possono essere riassunte come adattabilità, decostruibilità e riusabilità, e costituiscono la pietra angolare del DfD. Nel nostro caso di studio, l'adattabilità era richiesta dalla funzione dell'edificio, mentre decostruibilità e riusabilità sono state implementate nel progetto del telaio strutturale.

La struttura di sopraelevazione del tetto della KSAP è progettata per coprire tre aree principali. Una zona centrale di circolazione, lunga 2 metri e 50 metri, è incorniciata da due spazi flessibili di una superficie di 600 mq ciascuno su entrambi i lati. Questa distribuzione tripartita deriva dall'allineamento di colonne e travi che rappresentano la struttura originale in cemento armato del Marlowe Building. I pilastri e le travi della sopraelevazione sono stati allineati con la posizione degli elementi strutturali sottostanti preesistenti così da garantire un trasferimento diretto dei nuovi carichi nella fondazione originale. L'allineamento strutturale ha quindi visto l'uso di una struttura a telaio con le travi primarie che si estendono per 12 metri sopra ciascuno dei due spazi flessibili e 2 metri sopra il corridoio centrale. L'utilizzo dello stesso allineamento strutturale del *Marlowe Building* per la so-

praelevazione del tetto è stato considerato non solo vantaggioso dal punto di vista strutturale, ma anche dal punto di vista spaziale, consentendo diverse configurazioni interne per l'adattabilità dello spazio a lungo termine. Il telaio strutturale è quindi stato concepito per essere idoneo ad ospitare contemporaneamente studi, uffici, aule seminari, aule per lezioni.

Tra le iniziative di edilizia sostenibile, l'attenzione principale di DfD è particolarmente rivolta ai sistemi strutturali che rappresentano oltre il 50% del peso dell'edificio e, tradizionalmente, hanno il minor potenziale di riutilizzo (Webster and Costello, 2005). Ecco perché, in termini di progettazione per lo smontaggio (DfD), il gruppo si è concentrato ad aumentare il grado di smontaggio delle connessioni strutturali (cioè, trave a trave, trave a colonna) per consentire un facile smontaggio delle stesse e permettere il recupero totale del materiale da costruzione.

Inoltre, per perseguire un approccio sostenibile che non riguardasse solo l'economia circolare, si è scelto l'utilizzo del legno ingegnerizzato come potenziale materiale da costruzione. Questo sia per ridurre consapevolmente l'impronta di carbonio del telaio strutturale (Sinha *et al.*, 2016) sia per ridurre il peso della sopraelevazione sull'edificio originale.

La soluzione strutturale individuata durante lo studio di fattibilità (2018) ha individuato l'opportunità di collegare ogni elemento (trave, pilastro) con quello adiacente tramite un sistema di *tensegrity*. Un sistema quindi di cavi e manicotti che, per tensione indotta, connettono le parti del telaio per contatto anziché attraverso collegamenti imbullonati o avvitati. Il ricorso al sistema *tensegrity* è stato anche possibile dovuto alla natura non sismica della regione del Kent. Ecco perché è importante sottolineare che l'esplorazione di edifici completamente reversibili in una zona

ples even further. Therefore, the load-bearing structure of the elevation was designed to achieve complete reversibility of the structural frame according to Design for Disassembly (DfD) principles (ISO20887, 2020).

As demonstrated by the results of the H2020 Building as a Material Bank (BAMB) research project, the complete reversibility of building components and subcomponents keeps the value of the material constant, encouraging its reuse (Durmisevic, 2019). Design for Disassembly is a concept in which buildings are intentionally designed to recover and reuse used materials once the service life of the building is over. Traditional buildings are characterised by complex relational diagrams representing the maximum integration of all building elements into a dependent structure (Durmisevic and Brouwer, 2002). DfD involves planning for three types of transformation that extend the

life of buildings and their constituent materials:

1. Spatial transformation: a building's spaces should be easily reconfigurable for different uses, making it less likely that the building will reach the end of its life prematurely.
2. Structural transformation: it should be physically and financially possible to dismantle a building and salvage its constituent components.
3. Element and material transformation: the components recovered from a building should be easily reusable, requiring minimal reconstruction.

These three transformations can be summarised as adaptability, de-constructability, and reusability and form the cornerstone of DfD. In our project, adaptability was required by the building's function, while de-constructability and reusability were implemented in the structural frame design.

KSAP's rooftop elevation structure is designed to cover three main areas. First, an 58-yard long central circulation area is framed by two flexible spaces of 600 square feet each on either side. This tripartite distribution is derived from the alignment of columns and beams representing the underneath concrete structure of the Marlowe Building. Second, the columns and beams of the elevation were aligned with the location of the underlying pre-existing structural elements to ensure the direct transfer of the new loads into the original foundation. The structural alignment led to the development of a frame structure with the primary beams extending 12 feet above each of the two flexible spaces and 2 feet above the central corridor. Third, using the exact structural alignment as the Marlowe Building for the rooftop elevation was considered structurally advantageous and spa-

tially beneficial, allowing for different interior configurations for long-term adaptability of the space. Therefore, the structural frame was designed to be suitable to accommodate studios, offices, seminar rooms and lecture halls simultaneously.

Among sustainable building initiatives, DfD's primary focus is mainly on structural systems, which account for more than 50% of a building's weight and, traditionally, have the least potential for reuse (Webster and Costello, 2005). That is why, in terms of Design for Disassembly (DfD), the group has focused on increasing the degree to which structural connections (i.e., beam to beam, beam to column) can be disassembled easily to allow for the total recovery of building material.

Additionally, in order to pursue a sustainable approach that was not only about the circular economy, the use of engineered wood was chosen as a po-

non sismica può essere vista come una opportunità a causa della rilevanza del carico laterale nello sviluppo strutturale (Moussavi Nadoushani and Akbarnezhad, 2015).

Come noto, le pratiche sostenibili nello sviluppo dell'ambiente costruito cercano di eliminare gli sprechi, ridurre il consumo di energia (operativa e *embodied*), diminuire la domanda di nuovi materiali. Più nel dettaglio, l'economia circolare promuove la trasformazione di processi lineari – dalla costruzione alla demolizione – in processi ciclici che massimizzano il riutilizzo e riducono al minimo lo spreco di risorse (Sassi, 2008). Se paragonati ad altre destinazioni di uso e modelli di *business* (Lavagna *et al.*, 2020; Eberhardt *et al.*, 2019), le istituzioni accademiche (e più specificatamente le scuole di architettura), potrebbero essere le promotrici di innovazione circolare quando si tratta di migliorare, ampliare o costruire *ex novo* ambienti per la didattica e la ricerca.

Da casi studio come questi possono essere estratti valori di *best practice* atti ad ampliare conoscenze basate sulla pratica per promuovere lo sviluppo circolare dell'ambiente costruito. Lo scopo dell'ampliamento della *Kent School of Architecture and Planning* è già progredito oltre lo studio di fattibilità, in quanto il progetto è stato selezionato ed esposto alla 3a *Green Design Conference, Vital Cities and Reversible Buildings* organizzata dalla *Sarajevo Green Design Foundation*.

Materiali e metodi

La metodologia di ricerca seguita si è basata su un approccio pratico. Lo studio è stato supportato da un metodo per sviluppare un collegamento strutturale che non consenta danni irreversibili ai componenti del telaio strutturale, mantenendo costante

tential building material. This choice was both to make a conscious effort to reduce the carbon footprint of the structural frame (Sinha *et al.*, 2016) and to reduce the weight of the elevation on the original building. The structural solution identified during the feasibility study (2018) identified the opportunity to connect each element (beam, abutment) with the adjacent one via a tensegrity system. Therefore, a system of cables and sleeves connect the parts of the frame by contact-induced tension. This solution replaced the more conventional through bolted or screwed connections. The use of the tensegrity system was also possible due to the non-seismic nature of the Kent region. That is why it is important to note that the exploration of fully reversible buildings in a non-seismic zone can be seen as an opportunity due to the significance of lateral loading in structural develop-

ment (Moussavi Nadoushani and Akbarnezhad, 2015). As is well known, sustainable practices in developing the built environment seek to eliminate waste, reduce energy consumption (operational and embodied) and decrease the demand for new materials. The circular economy promotes the transformation of linear processes – from construction to demolition – into cyclical processes that maximise reuse and minimise resource waste (Sassi, 2008). When compared to other uses and business models (Lavagna *et al.*, 2020; Eberhardt *et al.*, 2019), academic institutions (and more specifically, schools of architecture) could be the drivers of circular innovation when it comes to improving, expanding or building from scratch space for teaching and research. From case studies such as these, best practice values can be extracted to

nel tempo il valore del materiale e, quindi, aumentandone la riutilizzabilità. Per questo testo, le fasi progettuali avvenute durante lo studio di fattibilità nel 2018 sono state seguite da implementazioni e riflessioni critiche per ottimizzare ulteriormente il progetto negli aspetti più innovativi. Più in dettaglio, al termine dello sviluppo concettuale preliminare (2018), la ricerca si è concentrata sulla fattibilità del telaio e, soprattutto, sul collegamento strutturale. Per fare ciò è stato realizzato un modello della struttura a elementi finiti per determinare il comportamento globale sotto carico permanente e variabile. In questo modo sono state individuate le forze agenti sui nodi e gli angoli di attacco dei cavi al nodo stesso.

Le fasi metodologiche intraprese sono riassunte come segue:

1. Definizione della circolarità strutturale da adottare come obiettivo;
2. Progettazione globale dell'ampliamento del *Marlowe Building*;
3. Calcolo delle forze convergenti al nodo;
4. Identificazione del nodo critico;
5. Design convenzionale del nodo;
6. Ottimizzazione attraverso il design generativo;
7. Razionalizzazione del design.

I carichi applicati alla struttura si basano su BS EN 1991-1-1 per il carico permanente e variabile e su EN 1991-1-4 per il carico del vento. Il vento è stato considerato agire in due direzioni. I risultati sono stati poi ottenuti tramite un *software* agli elementi finiti (3D FEM) ed estratti sotto forma di combinazioni di Stato Limite Ultimo (SLU) e Stato Limite di Servizio (SLS) secondo l'Eurocodice EN 1990 - Basi del progetto strutturale.

expand practice-based knowledge to promote circular development in the built environment. The scope of the Kent School of Architecture and Planning expansion has already progressed beyond the feasibility study, as the project was selected and exhibited at the 3rd Green Design Conference, Vital Cities and Reversible Buildings, organised by the Sarajevo Green Design Foundation.

Methodology

The research methodology followed was based on a practical approach. The study was supported by a method to develop a structural connection that does not allow irreversible damage to the structural frame components, keeping the value of the material constant over time and, therefore, increasing its potential reusability. For this paper, the design phases during the feasibility study in 2018 were followed by imple-

mentations and critical reflections further to optimise the project in the most innovative aspects. More specifically, upon completion of the preliminary conceptual development (2018), the research focused on the feasibility of the frame and, most importantly, the structural connection. A finite element model of the structure was created to determine the overall behaviour under permanent and variable loading. In addition, the forces acting on the nodes and the angles of attachment of the cables to the node itself were identified. The methodological steps undertaken are summarised as follows:

1. Definition of the structural circularity to be adopted as the objective;
2. Overall design of the Marlowe Building extension;
3. Calculation of forces converging at the node;
4. Identification of critical node;
5. Conventional design of the node;

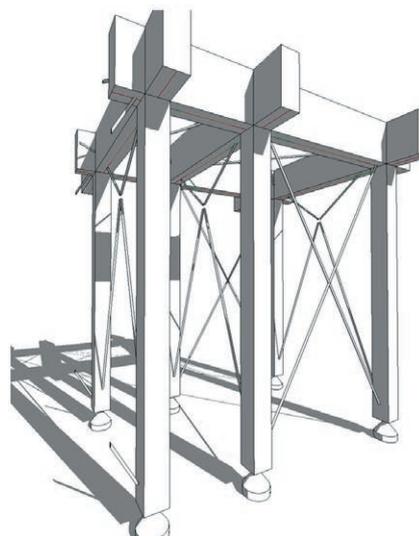
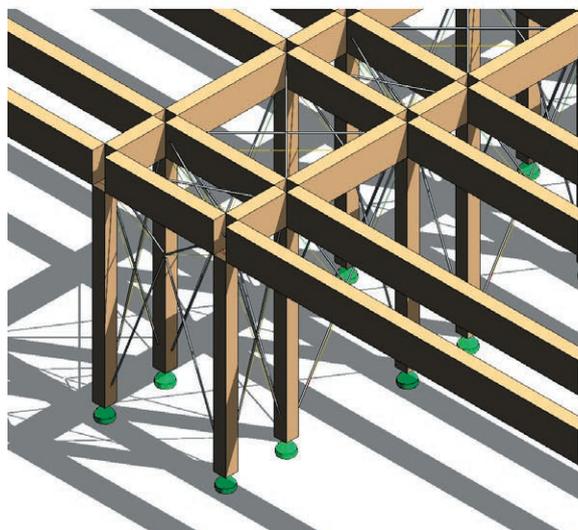
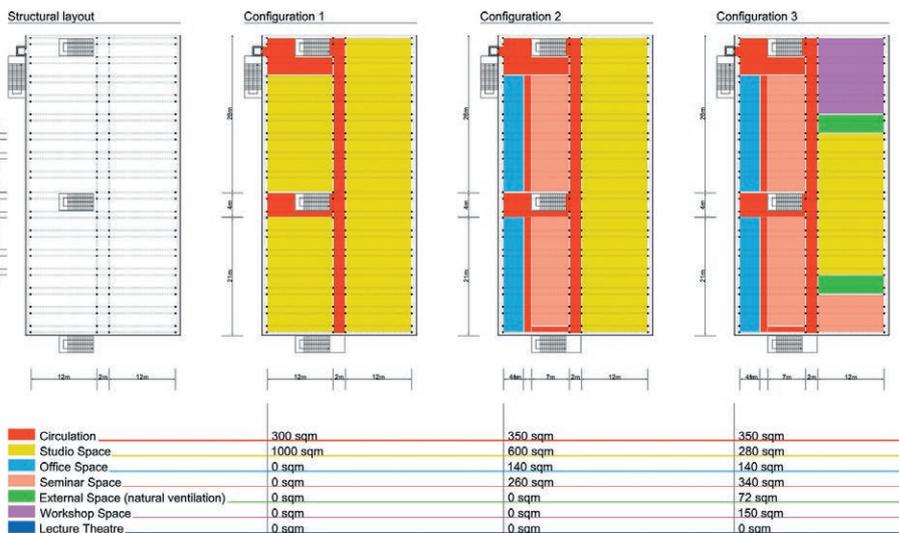
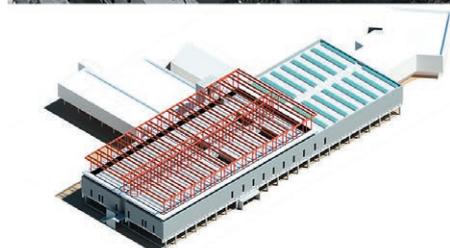
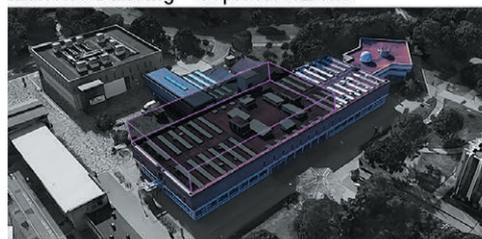
Risultati

In questo progetto, il sistema di controventamento (Figg. 1, 2) soddisfa due scopi. Il primo è la stabilità laterale complessiva della struttura. Il secondo consiste nel tenere uniti e a contatto gli elementi in legno e impedirne la separazione creando moduli auto-equilibrati della struttura.

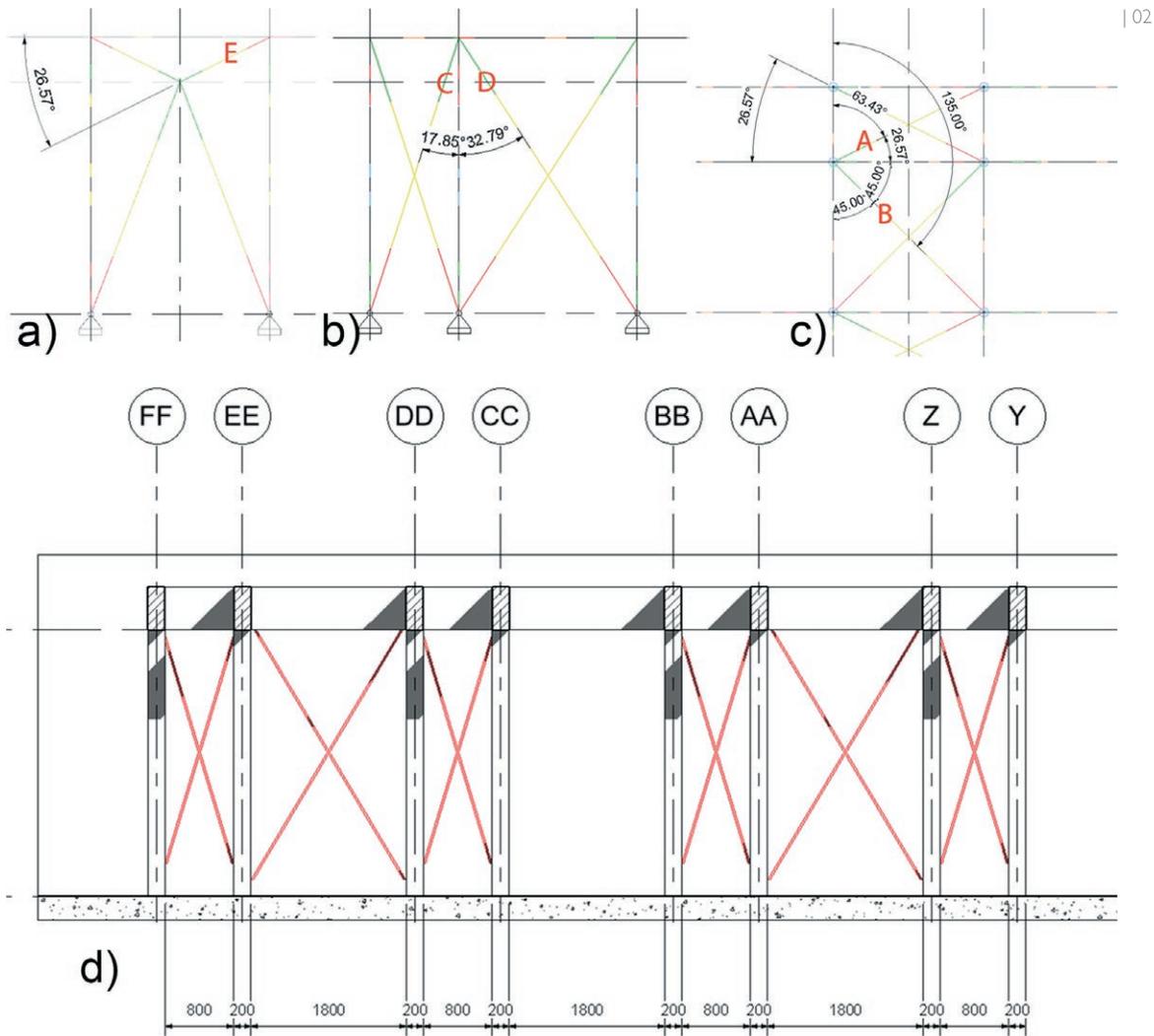
La spina centrale dell'edificio è concepita come una serie di moduli indipendenti di 2x2m con interposte travi di collegamento di 1m (Fig. 2), combinati, all'occorrenza, con moduli 4x2m con interposte travi di collegamento di 2m (Fig. 2d) al fine di favorire la realizzazione di aree di passaggio o accesso prive di cavi. La stabilità laterale in direzione trasversale è assicurata tramite connessioni resistenti a momento alla base della colonna qualora ci sia necessità di eliminare i cavi trasversalmente alla struttura

(Fig. 2a) per motivi di circolazione interna. Tali sistemi modulari sono progettati per essere inter-scambiabili a seconda delle esigenze distributive e funzionali interne associate alle partizioni secondarie e percorsi di circolazione. La strategia strutturale adottata per evitare lavorazioni distruttive sugli elementi in legno è mutuata da un sistema di *tensegrity*. Le travi in legno (luce 2m), situate nella spina dorsale dell'edificio, sono tenute insieme alle travi principali (luce 12m) e le colonne mediante azioni di contatto. Pertanto, le forze nei cavi svolgono il ruolo principale nella progettazione del nodo. Inoltre, una forza di pretensionamento viene applicata ai cavi di controvento per stabilizzare gli elementi in acciaio dei nodi. Dei cuscinetti in neoprene sono interposti tra il legno e le superfici in acciaio per fornire ulteriore attrito, essenziale alla stabilità dell'unione¹.

Marlowe Building - Sopraelevazione



Assembly drawing of the cables of the critical module and standard modules: a) cross-sectional view, b) longitudinal view, c) plan, d) grouping of post-tensioning cables to allow the creation of routing or access paths through the central plug. Cable IDs are also displayed, image of the authors



6. Optimisation through generative design;

7. Rationalisation of the design.

Loads applied to the structure were based on BS EN 1991-1-1 for permanent and variable loading and EN 1991-1-4 for wind loading. The wind load was considered to act in two directions. The results were then obtained utilising finite element software (3D FEM) and extracted in the form of Ultimate Limit State (ULS) and Serviceability Limit State (SLS) combinations according to Eurocode EN 1990 - Basis of Structural Design.

Results

In this project, the bracing system (Figs. 1, 2) fulfills two purposes. The first is the overall lateral stability of the structure. The second is to hold the wood elements together and in contact and prevent their separation by creating

self-balancing modules of the structure. The central spine of the building is conceived as a series of independent 2x2m modules with 1m connection beams in between (Fig. 2), combined, if necessary, with 4x2m modules with 2m connection beams in between (Fig. 2d) in order to facilitate cable-free passage or access areas. Lateral stability in the transverse direction is ensured using moment-resisting connections at the column base where there is a need to remove cables transversely to the structure (Fig. 2a) for internal circulation reasons. These modular systems are designed to be interchangeable according to the internal distribution and functional requirements associated with secondary partitions and circulation routes. The structural strategy adopted to avoid destructive work on the wooden elements is borrowed from a tensegrity system. The timber beams (span 2m) located in the backbone of

the building are held together with the main beams (span 12m) and columns by contact actions. Therefore, forces in the cables play the primary role in the design of the node. In addition, a pre-tensioning force is applied to the bracing cables to stabilise the steel elements of the nodes. Neoprene pads are placed between the timber and steel surfaces to provide additional friction, which is essential to the union's stability¹. The critical position for the design action is at the end of the central plug, where the 2x2m module must be connected to the adjacent 1m module to provide correct lateral stability (Fig. 1). Therefore, the critical node is located between the 2m and 1m spans. The calculated forces belong to SLS combinations and are shown in Table 1 (B², D³). These SLS forces are the input for the generative design of the steel connections between the beam and the timber columns. SLS is relevant for the

generative design as this is an internal failure state analysis for which ULS forces would not be appropriate⁴. The material used for the timber element is standard GL26, and the material for the node was treated as part of the generative design as a variable, i.e. materials of different strengths were included for the generative design, including aluminium alloys and high strength steels to capture a variety of shapes. The generative design is influenced by the strength characteristics of the material used. Starting from a preliminary proposal of a node composed of 5 mm thick steel plates (grey in Fig. 3), the beams and columns were set as obstacle entities, meaning that the algorithmically generated steel connection does not interpenetrate with the volumes of adjacent wooden elements, instead of avoiding and bypassing them as intended.

03 | Vista del nodo di partenza per il design generativo, immagine degli autori
View of the starting node for generative design, image of the authors

04 | Piastre vincolate (verde) per il design generativo e forze applicate. Entità ostacolo (rosso), immagine degli autori
Constrained plates (green) for generative design and applied forces. Obstacle entities (red), image of the authors

Tab. 01 | Forze di tensione afferenti al nodo
Tension forces (SLS) affecting the node

Cable ID	Axial Force (kN)
A	67
B	67 ²
C	77
D	77 ³
E	108

La posizione critica per le azioni di progetto è all'estremità della spina centrale, dove il modulo 2x2m deve essere collegato con il modulo adiacente da 1m per fornire una corretta stabilità laterale (Fig. 1). Il nodo critico si trova tra le campate di 2m e 1m. Le forze calcolate appartengono a combinazioni SLS e sono mostrate in tabella 1.

Queste forze SLS costituiscono l'input per il progetto generativo delle connessioni in acciaio tra la trave e le colonne in legno. SLS è rilevante per la progettazione generativa essendo questa un'analisi dello stato di cemento interno per la quale le forze ULS non sarebbero appropriate⁴. Il materiale utilizzato per l'elemento in legno è lo standard GL26 e il materiale per il nodo è stato trattato come parte del progetto generativo come una variabile, vale a dire, materiali di diversa resistenza sono stati inseriti per il progetto generativo tra cui leghe di alluminio e acciai ad alta resistenza per catturare una varietà di forme, essendo il design generativo influenzato dalle caratteristiche di resistenza del materiale utilizzato.

Partendo da una proposta preliminare di nodo composto di piastre di acciaio (in grigio in Fig. 3), dello spessore di 5 mm, le travi

The cable anchorage locations were identified based on constructability⁵ by leaving space in the model to allow the generation of the connection between the cable insertion point and the plate elements, with constraints applied (in green in Fig. 4).

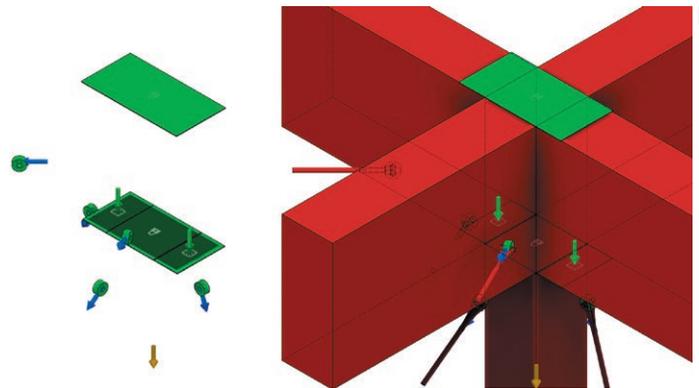
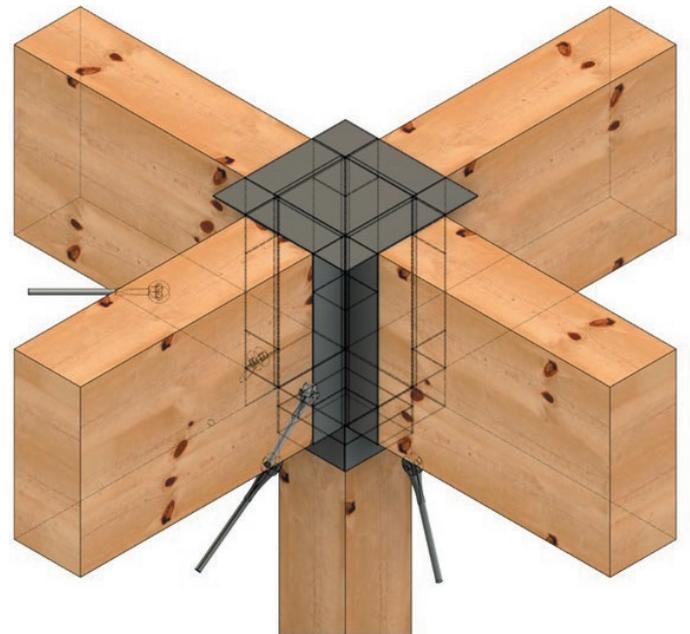
The control parameter for the chosen study is the minimisation of the steel mass to reduce CO₂ and energy incorporated in the structure. Indeed, the dependence on steel as a means of force transfer is somewhat inevitable in today's design practice.

Traditional design techniques can provide some aid for node optimisation; however, generative design is the way to produce the most optimised design from a construction perspective (Tyflopoulos *et al.*, 2018). Therefore, at the end of the generation process, a "mass" vs "maximum Von Mises Stress" scatter plot was produced to identify the optimal design (Fig. 5).

Furthermore, the method used to judge, validate and select the design considered the design aesthetics and architectural implications of circularity translated into reversibility of the structure. This approach is not to be overlooked as the perception that building reversibility and circularity is a limitation for design creativity is still strong in the industry and discourages the spread of the circular economy in construction (Cheshire, 2016).

In addition to the connection design, a record was made of hours required to define the feasibility of the building. In-depth knowledge of the dimensions of the structure's elements was crucial in designing a reversible building instead of traditional buildings for which assumptions can easily be made to estimate the fees in terms of engineering consultancy.

In order to achieve a positive outcome of the generative design of the steel



e le colonne sono state impostate come entità ostacolo, il che significa che la connessione in acciaio generata algoritmicamente non si compenetra con i volumi di elementi in legno adiacenti,

connection, 30 different analyses were created based on alternative arrangements of the contact points between the timber beams and the other parts of the connection, involving a total of 332 simulations and 180 person-hours of work.

Each configuration produced a series of positive results. Looking at the "Mass vs Max von Mises stress" graph, the selection was restricted to those connections whose maximum stress was in the range of 220 MPa to avoid ultra-high strength use of steel alloys. This would have had a significant impact on the production cost.

Of all the options, one result showed a maximum tension of 215 MPa and a mass of 40 kg, presenting an appropriate internal stress state and a low weight that is easy to handle on site. This result was selected to move forward with the design and make further evaluations. In fact, (Fig. 6) pre-

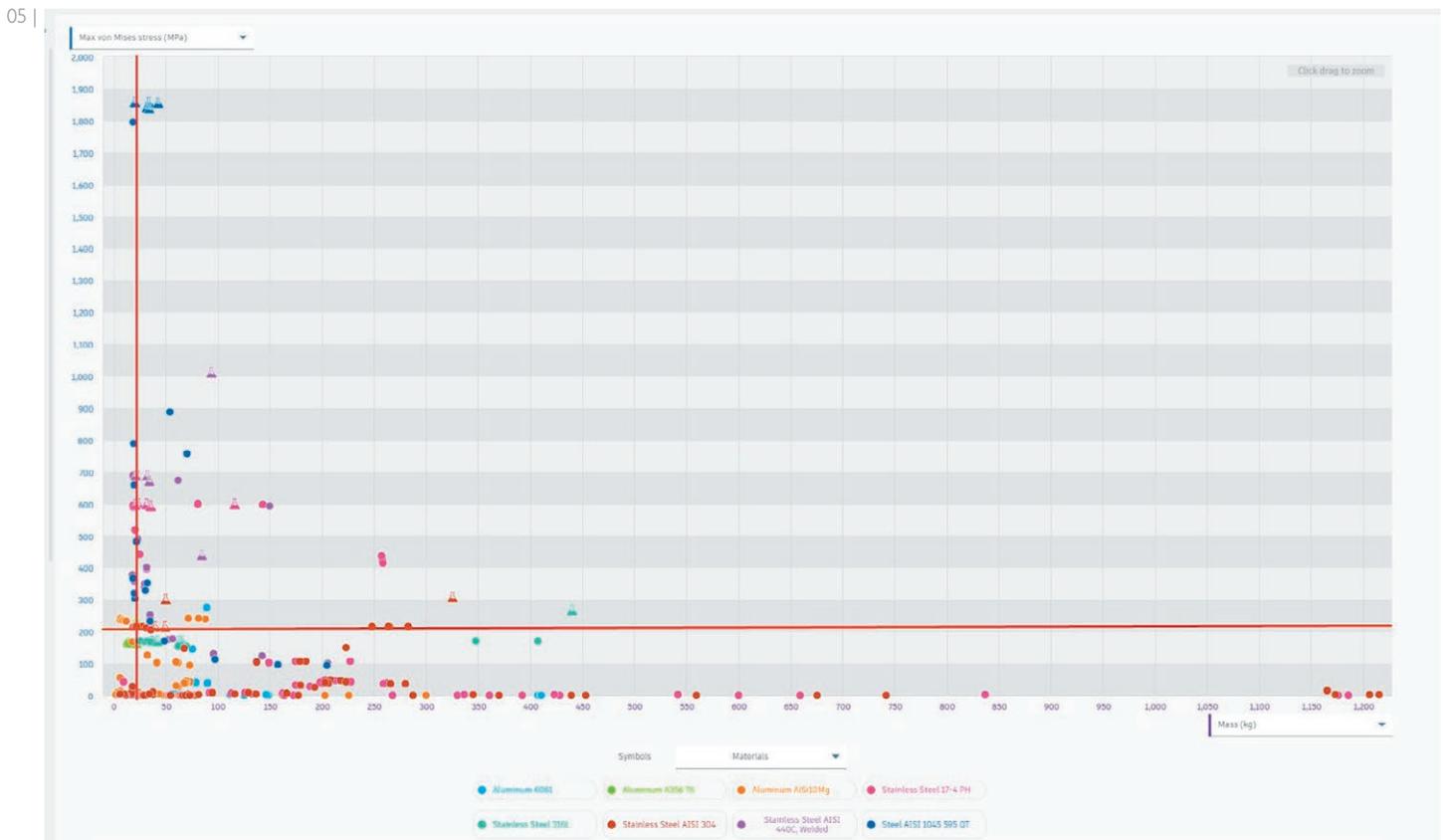
dimensioning the knot using more conventional design techniques had provided an estimated knot weight of approximately 50kg and less homogeneous material utilisation. The reduction in steel mass achieved through generative design is approximately 25%, in line with other studies on the subject (Brossard *et al.*, 2020).

Based on the assumed performance indicators, the generation ended up with a node model that allows the required level of forces to be resisted with the minimum amount of material required, meeting the requirements of strength, stability, constructability and minimisation of the carbon footprint. Furthermore, the decision to limit the steel tension stress to 215MPa allows S275 grade structural steel (275MPa yield strength) with a comfortable margin of redundancy, considering that at a preliminary stage, SLU behaviour was not fully ex-

Mass/Von Mises stress graph of all generative design results: the intersection of the red lines corresponds to the point of optimum stress and weight chosen for the final design of the node, image of the authors

piuttosto evitandoli e aggirandoli come previsto. Le sedi di ancoraggio dei cavi sono state identificate in base alla costruibilità⁵ lasciando spazio nel modello per consentire la generazione della connessione tra il punto di inserimento del cavo e gli elementi piastra, con vincoli applicati (in verde in Fig. 4). Il parametro di controllo per lo studio scelto è la minimizzazione della massa di acciaio per ridurre la quantità di CO₂ e l'energia incorporata nel manufatto. In effetti, la dipendenza dall'acciaio come mezzo per il trasferimento di forze è in qualche modo inevitabile nella pratica progettuale odierna. Le tecniche di progettazione tradizionali possono fornire un qualche ausilio per l'ottimizzazione del nodo, tuttavia il design generativo è sicuramente il modo per produrre il design più ottimizzato anche dal punto di vista della costruzione (Tyflopoulos *et al.*, 2018). Pertanto, alla fine del processo di generazione è stato prodotto un grafico a dispersione “massa” vs. “massima tensione di Von Mises” per identificare il design ottimale (Fig. 5). Inoltre, il metodo utilizzato per giudicare, convalidare e selezionare il progetto ha considerato l'estetica progettuale e le implicazioni architettoniche della circolarità tradotte in reversibilità della struttura. Questo non è da trascurare perché la percezione che la

reversibilità e la circolarità degli edifici siano un limite per la creatività progettuale è ancora forte nel settore e scoraggia la diffusione dell'economia circolare nelle costruzioni (Cheshire, 2016). È stata fatta una registrazione delle ore di progettazione necessarie per arrivare a una definizione della fattibilità dell'edificio. Una conoscenza approfondita delle dimensioni dei singoli elementi della struttura è stata fondamentale nell'approccio alla progettazione di un edificio reversibile, rispetto a quelli tradizionali per i quali si possono facilmente fare ipotesi per stimare i corrispettivi in termini di consulenza ingegneristica. Per ottenere un esito positivo del progetto generativo della connessione in acciaio, sono state create 30 diverse analisi basate su disposizioni alternative dei punti di contatto tra le travi in legno e le altre parti della connessione, per un totale di 332 simulazioni e 180 ore-uomo di lavoro. Ciascuna configurazione ha prodotto una serie di risultati positivi. Guardando il grafico “Mass vs. Max von Mises stress”, la selezione è stata ristretta a quelle connessioni la cui tensione massima era nell'intervallo di 220 MPa per evitare l'uso di leghe di acciaio ultra performanti ad alta resistenza che avrebbero avuto un impatto sul costo di produzione significativo.



Tra tutte le opzioni, un risultato ha mostrato una tensione massima di 215 MPa e una massa di 40 kg, presentando un ragionevole stato di sforzo interno e un peso estremamente ridotto e facile da maneggiare in cantiere. Questo risultato è stato selezionato per andare avanti con la progettazione e fare ulteriori valutazioni (Fig. 6). Infatti, il pre-dimensionamento del nodo con tecniche progettuali più convenzionali aveva fornito un peso stimato del nodo di circa 50kg e un'utilizzazione del materiale meno omogenea. La riduzione di massa di acciaio ottenuta grazie al ricorso al design generativo è di circa il 25%, in linea con altri studi sul tema (Brossard *et al.*, 2020). Sulla base degli indicatori di prestazione ipotizzati, la generazione si è conclusa con un modello di nodo che permette di resistere al livello di forze richieste con la minima quantità di materiale necessaria, soddisfacendo i requisiti di resistenza, stabilità, costruibilità e minimizzazione dell'impronta di carbonio. La decisione di limitare lo sforzo di tensione dell'acciaio a 215MPa è quella di consentire l'utilizzo di un acciaio strutturale di grado S275 (275MPa di carico di snervamento) con un comodo margine di ridondanza, considerando che in una fase preliminare il comportamento SLU non è stato completamente esplorato e un approccio conservativo era obbligatorio.

Sono stati fatti ulteriori passi per convertire la connessione monolitica, risultante dal progetto generativo, in una ad alto livello di smontaggio. Infatti, visto il peso estremamente ridotto è stato sufficiente dividere il nodo in due parti (come mostrato in Fig. 7). La prima si trova nella parte superiore del nodo e funge da coperchio fissato con bulloni al resto della connessione, quest'ultima prodotta in unità singola con tecniche di produzione additiva (Thomas and Gilbert, 2014). Sono state ammesse tolleranze per l'inserimento delle travi longitudinali nel nodo, la cui tenuta

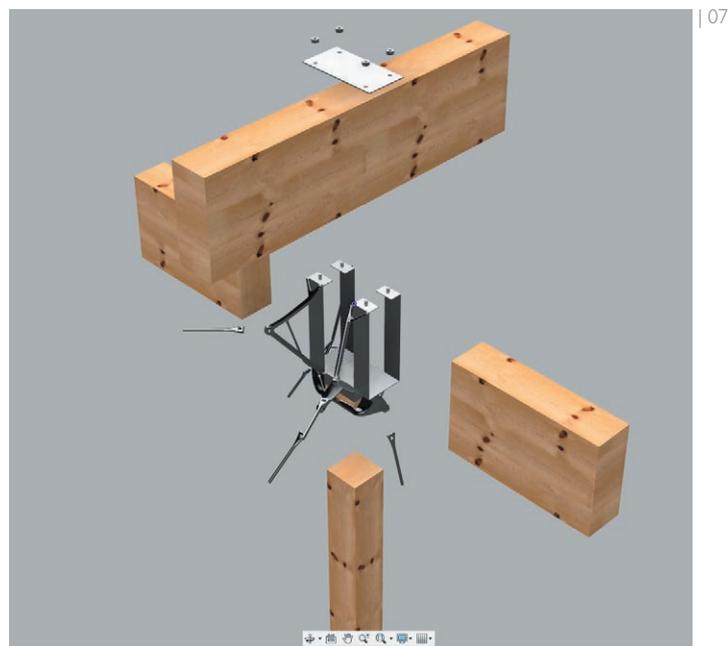
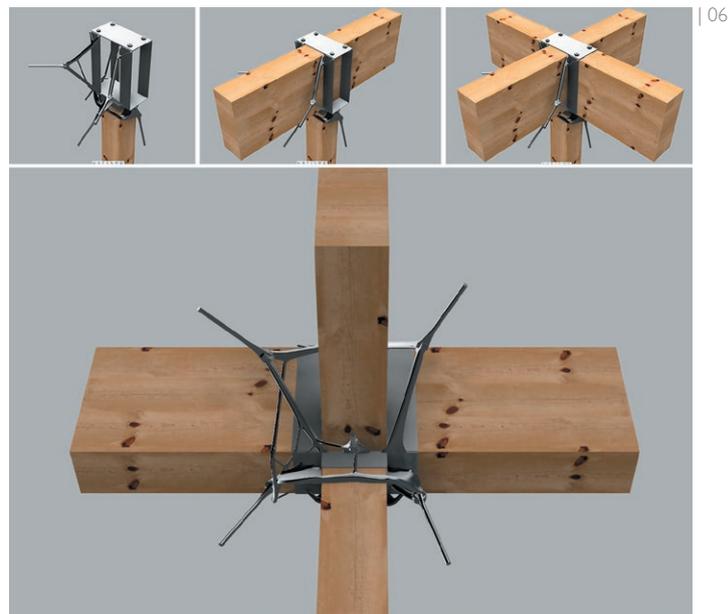
ploded, and a conservative approach was mandatory.

Further steps were taken to convert the monolithic connection, resulting from the generative design, into one with a high level of disassembly. Indeed, given the low weight, it was sufficient to divide the node into two parts (as shown in Fig. 7). The first one is located at the top of the node and acts as a cover fixed with bolts to the rest of the connection, the latter being produced as a single unit using additive manufacturing techniques (Thomas and Gilbert, 2014). Tolerances have been allowed to insert the longitudinal beams into the node, whose tightness is ensured by the contact action of the 1m and 2m short beams, arranged on the global longitudinal axis, and the main beams passing through. Neoprene pads located on any contact surface between timber and steel are compressed once

the node is assembled and the top flange bolted on.

Discussion

The central aspect that emerged from the results is that in order to "design for disassembly", architectural designers must exercise a high level of control over structural variables from the preliminary stage. The high level of flexibility required of the structure means that the estimation of forces and stress states cannot be left to a later detailed phase. This is because the engineering phase of structural connections is at the top of the decision-making process. From our practice-based approach, it has become evident that the feasibility of the overall structural strategy can only be fully assessed after the detailed design of the connections is practically finalised. Furthermore, the strict adherence to the requirement to not



cause irreversible damage to the timber elements introduced the opportunity to rethink timber/steel interfaces, promoting materials in a tension-compression-friction approach rather than a bending-cutting-rolling approach that would result from traditional bolted connections. On the other hand, there is a reduction in the time required to design the timber elements because they are essentially "stored" in the building and are responsible for transferring actions to the steel cable system but are not affected by holes or unions.

The steel node also shows peculiar structuralism, celebrating its essential function in the structure as a catalyst of the structural strategy. Thus, it creates additional value in promoting cir-

cular values, especially in a school of architecture.

The implication, structurally and from a design point of view, is that the tensile elements become the catalyst for the building's very existence. Modularity ensures flexibility of use and reconfiguration of the structure for different functions. Therefore, the presented structural system is fully reversible at both the building and detail scale (Durmisevic, 2006). Timber elements can be reused entirely as long as the directions and magnitudes of the forces in the node produce a stress state similar to the calculated state. In fact, an additional safety factor, in our case designing the node stressed at 215MPa against a

è assicurata dall'azione di contatto delle travi corte di 1m e 2m, disposte sull'asse longitudinale globale, e delle travi principali che passano attraverso. I cuscinetti in neoprene, situati su qualsiasi superficie di contatto tra legno e acciaio, vengono compressi una volta assemblato il nodo e imbullonata la flangia superiore.

Discussione

L'aspetto principale emerso dai risultati è che, per "progettare per lo smontaggio", i progettisti architettonici devono esercitare un alto livello di controllo sulle variabili strutturali sin dalla fase preliminare. L'elevato livello di flessibilità richiesto alla struttura fa sì che la stima delle forze e dello stato di sollecitazione non possa essere lasciata ad una fase di dettaglio successiva. Questo perché l'ingegnerizzazione delle connessioni strutturali è al vertice gerarchico del processo decisionale. Dal nostro approccio basato sulla pratica è stato reso evidente che la fattibilità della strategia strutturale globale può essere pienamente valutata solo dopo che il progetto dettagliato delle connessioni è praticamente finalizzato. Inoltre, la stretta aderenza al requisito di non provocare danno irreversibile agli elementi in legno, ha introdotto l'opportunità di ripensare le interfacce legno/acciaio, promuovendo l'utilizzo dei materiali in un approccio tensione-compressione-atrito piuttosto che un approccio flessione-taglio-rifollamento che deriverebbe dalle tradizionali unioni bullonate. Di contro, si è riscontrata una riduzione dei tempi legati alla progettazione degli elementi in legno perché gli stessi sono sostanzialmente "immagazzinati" nell'edificio e deputati a trasferire le azioni al sistema di cavi in acciaio ma non sono interessati da fori o unioni. Il nodo in acciaio mostra anche un peculiare strutturalismo che celebra la sua importante funzione nella struttura come cataliz-

maximum strength of 275Mpa, implies that in the case of geometric reconfiguration of the structural modules, the connection can be re-analysed according to the modified configuration and magnitude of the forces, instead of being redesigned from scratch or rebuilt. The assembly/disassembly procedures are designed so that the primary and transfer beams slide into the connection unit before the top flange (cover) is closed, and friction is induced on the contact surfaces. This means that the dimensions of the spans can be changed and the steel node applied to the new configuration.

Conclusion

The research shows how the implementation of the integrated principle of architectural and structural reversibility is fundamental for construct-

ing buildings that adhere to the circular economy concept. Following a bottom-up approach, the innovative aspects resulting from this study can inform the design of circular buildings with a broader scope. This confirms that an intensive engineering phase characterises reversible buildings at the beginning of the design process, and the project of the Kent School of Architecture and Planning's roof extension confirmed this result. A standard sequence of phases such as concept design, preliminary design, detailed design and construction design can be a limitation for circular buildings that - as demonstrated - require an intensive engineering phase at the beginning (Bourke and Kyle, 2019).

The study also shows how the detailed design of the beam-pillar connection with a high degree of disassembly was a key factor for the circularity of the build-

ing even at the feasibility study stage. Holistically, this research demonstrates that adopting a structuralist approach provides an opportunity for designers to exercise their creativity on a type of building typology (reversible buildings) and design requirement (circular economy) often perceived as limiting and too prescriptive.

Further, exploration of the implementation of a steel-free approach connected with a high degree of disassembly would undoubtedly be a goal for the continuation of this study to assess the practicality of a carbon-neutral, fully sustainable and reversible design.

zatore della strategia strutturale e crea valore aggiunto alla percezione della qualità dell'edificio e nella promozione di valori circolari, specialmente in una scuola di architettura. L'implicazione, strutturalmente e dal punto di vista progettuale, è che gli elementi di trazione diventino il catalizzatore dell'esistenza stessa dell'edificio. La modularità garantisce flessibilità di utilizzo e la riconfigurazione della struttura per diverse funzioni. Il sistema strutturale presentato è quindi completamente reversibile sia alla scala dell'edificio che la scala del dettaglio (Durmisevic, 2006). Ciò significa che gli elementi in legno possono essere completamente riutilizzati così come le connessioni in acciaio che possono essere riutilizzate fintanto che le direzioni e le grandezze delle forze nel nodo producano uno stato di tensione simile allo stato calcolato. Infatti, applicare un fattore di sicurezza aggiuntivo, nel nostro caso progettare il nodo sollecitato a 215MPa contro una resistenza massima di 275Mpa, implica che in caso di riconfigurazione geometrica dei moduli strutturali la connessione può essere semplicemente rianalizzata in base alla configurazione modificata e all'entità delle forze, invece di essere riprogettata da zero o ricostruita. Le procedure di montaggio / smontaggio sono concepite affinché le travi principali e le travi di trasferimento scorrano all'interno dell'unità di connessione prima che la flangia superiore (coperchio) venga chiusa e venga indotto l'attrito sulle superfici a contatto. Ciò significa che le dimensioni delle campate possono essere modificate e il nodo in acciaio applicato alla nuova configurazione.

Conclusion

La ricerca mostra come l'implementazione del principio integrato di reversibilità architettonica e strutturale sia fundamenta-

tain more reliable data with practical significance, so the effect of the friction component is postponed until further development of this study.

² Maximum tension between A and B.
³ Maximum tension between C and D.
⁴ The generative design algorithm is relevant in the elastic field.
⁵ Access and manoeuvring of the tools for fixing the cables and anchorages to the node were considered.

NOTES

¹ The effect of friction between the node and the timber elements mediated by the neoprene bearings was assumed but not modelled in the simulation. The reason is that it will be required to test a real-life model to ob-

le per la costruzione di edifici che aderiscono al concetto di economia circolare. Seguendo un approccio *bottom-up*, gli aspetti innovativi risultanti da questo studio possono informare la procedura per progettare edifici circolari di portata più ampia. Ciò conferma che gli edifici reversibili sono caratterizzati da un'intensa fase di ingegnerizzazione all'inizio del processo di progettazione e il caso di studio del progetto per la sopraelevazione della *Kent School of Architecture and Planning* ha confermato questo risultato. Una sequenza standard di fasi come il *concept design*, il progetto preliminare, il progetto di dettaglio, il progetto di costruzione può costituire un limite per gli edifici circolari che – come dimostrato – richiedono una fase ingegneristica intensiva all'inizio (Bourke and Kyle, 2019).

Dallo studio emerge anche come il progetto di dettaglio del collegamento trave-pilastro con elevato grado di smontaggio abbia rappresentato un fattore chiave per la circolarità dell'edificio anche in fase di studio di fattibilità.

Olisticamente questa ricerca dimostra che l'adozione di un approccio strutturalista costituisce l'opportunità per i progettisti di esercitare la propria creatività su un tipo di tipologia edilizia (edifici reversibili) e esigenza progettuale (economia circolare) spesso percepite come limitative e troppo prescrittive.

Un'ulteriore esplorazione dell'implementazione di un approccio senza acciaio in una connessione con un alto grado di disassemblaggio sarebbe sicuramente un obiettivo per la prosecuzione di questo studio allo scopo di valutare la praticità di un *design "carbon neutral"*, totalmente sostenibile e reversibile.

NOTE

¹ L'effetto dell'attrito tra il nodo e gli elementi in legno mediato dai cuscinetti in neoprene è stato ipotizzato ma non modellato nella simulazione. Il motivo è che sarà richiesto di testare un modello al vero per ottenere dati più affidabili con un significato pratico, quindi l'effetto della componente di attrito è rimandato all'ulteriore sviluppo di questo studio.

² Massima trazione tra A e B.

³ Massima trazione tra C e D.

⁴ L'algoritmo di progettazione generativa è rilevante in campo elastico.

⁵ Sono state prese in considerazione l'accesso e la manovra degli strumenti per il fissaggio dei cavi e dell'ancoraggio al nodo.

REFERENCES

Bourke, K. and Kyle, B. (2019), "Service life planning and durability in the context of circular economy assessments – initial aspects for review", *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 46, n. 11, pp. 1074-1079.

Brossard, M. et al. (2020), "How generative design could reshape the future of product development", available at: <https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Business%20Functions/Operations/Our%20Insights/How%20generative%20design%20could%20reshape%20the%20future%20of%20product%20development/How-generative-design-could-reshape-the-future-of-product-development.pdf> (accessed 1 February 2021).

Cheshire, D. (2016), *Building Revolutions*, RIBA Publishing, London, UK.

Durmisevic, E. (2006), *Transformable building structures: design for disassembly as a way to introduce sustainable engineering to building design & construction*, Delft Press, Delft, The Netherlands.

Durmisevic, E. (2019), *Exploration for reversible buildings*, BAMB Consortium, Maastricht, The Netherlands.

Durmisevic, E. and Brouwer, J. (2002), "Design Aspects of Decomposable Building Structures", in Chini, A. and Schultmann, F. (Eds.), *CIB Task Group 39 – Deconstruction, 3rd Annual Meeting*, Karlsruhe, Germany.

Eberhardt, L.C.M., Birgisdóttir, H. and Birkved, M. (2019), "Life cycle assessment of a Danish office building designed for disassembly", *Building Research & Information*, Vol. 47, n. 6, pp. 666-680.

ISO20887 (2020), *Design for disassembly and adaptability of buildings*, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

Lavagna, M., Campioli, A., Dalla Valle, A., Giorgi, S. and Caroli, T. (2020), "Strategie costruttive e valutazioni ambientali per la temporaneità, circolarità e reversibilità", *Techne, Journal of Technology for Architecture and Environment*, Vol. 20, Firenze University Press, Firenze, Italia, pp. 157-166.

Moussavi Nadoushani, Z.S. and Akbarnezhad, A. (2015), "Effect of structural system on the life cycle carbon footprint of buildings", *Energy and Buildings*, Vol. 102, pp. 337-346.

Sassi, P. (2008), "Defining Closed-Loop Material Cycle Construction", *Building Research & Information*, Vol. 36, n. 5, pp. 509-519.

Sinha, R., Lennartsson, M. and Frostell, B. (2016), "Environmental footprint assessment of building structures: A comparative study", *Building and Environment*, Vol. 104, pp. 162-171.

Thomas, D. and Gilbert, S. (2014), *Costs and Cost Effectiveness of Additive Manufacturing. A Literature Review and Discussion*, Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, USA.

Tyflopoulos, E., Tollnes Flem, D., Steinert, M. and Olsen, A. (2018), *State of the art of generative design and topology*, Linköping, Sweden.

Webster, M.D. and Costello, D.T. (2005), *Designing Structural System for Deconstruction: How to Extend a New Building's Useful Life and Prevent it from going to Waste When the End finally comes*, Atlanta, USA.