



Università degli Studi di Napoli Federico II
Polo delle Scienze e delle Tecnologie

Facoltà di Architettura

Dipartimento di Configurazione e Attuazione dell'Architettura

Dottorato in:

Tecnologia e Rappresentazione dell'Architettura e dell'Ambiente

XVIII ciclo

Indirizzo: Tecnologia dell'Architettura

Settore Scientifico Disciplinare: ICAR/12

Tesi di Dottorato di Ricerca:

Gli usi innovativi del legno di piccole dimensioni in architettura

Candidato: dr. Sofia Colabella

Docente Tutor: Prof. Arch. Sergio Pone

Coordinatore e Coordinatore di indirizzo:
Prof. Arch. **Virginia Gangemi**

Indice

Introduzione

1. Verso una reale eco-compatibilità del costruire in legno

1.1 Aspetti ecologici, economici ed energetici nell'impiego del legno come materiale da costruzione.

1.2 Dal *Balloon Frame* ai nuovi ricompositi a base di legno. Un comune denominatore nella storia dell'uso del legno in architettura.

1.3 Il tema dell'eco-compatibilità nell'uso del legno in architettura.

1.4 Il bosco ceduo e la salvaguardia del patrimonio boschivo.

2. Per un'ipotesi di utilizzo sostenibile del legno in architettura fondata sull'uso dei semilavorati di piccola dimensione

2.1 Verso un utilizzo sostenibile del legno in architettura.

2.2 Progettare a partire da semilavorati del legno di piccole dimensioni: architetture realizzate.

Frei Otto, Mannheim Lattice Shell Federal Garden Exhibition, 1971.

Il precursore dei Gridshell

Tadao Ando, Padiglione del Giappone all'Expò di Siviglia. 1992 e Tempio Komyo-ji-Saijo (della Terra Pura), Saijo, 2000.

Strutture composte da elementi semplici assemblate in forme complesse e resistenti

Shigeru Ban, Thomas Herzog e Peter Zumthor, edifici dell'Expo 2000 di Hannover.

Sulla "vera" riciclabilità delle costruzioni in legno

Shigeru Ban, Wickerwork House, Nagano, 2001.

Il trionfo del principio della tessitura, una copertura come un grande cesto intrecciato

Ville Hara, Torre di avvistamento dello Zoo di Helsinki, 2002.

I gusci a griglia con struttura semplice

Edward Cullinan, Downland Gridshell per il Weald & Downland Open Air Museum, Sussex, 2002.

Gridshell a doppia maglia

2.3 Campi di utilizzo nel settore edile di strutture in legno naturale.

2.4 Progettare a partire da semilavorati del legno di piccole dimensioni: vincoli produttivi e vincoli progettuali della struttura.

3. Sperimentazione progettuale e produttiva di un solaio in legno massello derivato da semilavorati di piccola dimensione

3.1 Il progetto

3.2 La prova sperimentale

3.3 Deduzioni finali

4. Bibliografia e sitografia

Introduzione

Umberto Eco¹ sosteneva che un titolo deve confondere le idee e non irregimentarle; questo è vero per un romanzo ma non dovrebbe esserlo per una tesi di dottorato, quindi il titolo di questo lavoro rispecchia letteralmente il suo contenuto. *Usi innovativi dei semilavorati del legno di piccole dimensioni in architettura*, presenta come primo tema quello dell'innovazione tecnologica: questa, secondo Guido Nardi «offre lo spunto per riflettere sulla modernità, sulla progettualità, sulla tecnica, sulla situazione produttiva industriale, sulle aspettative sociali: come è giusto, infatti, quando si tratta di architettura, non è possibile isolarsi su un solo aspetto della realtà presa in esame»², sottolineando con ciò la reciprocità del rapporto tra innovazione tecnica e condizioni sociali, produttive ed economiche. In tal senso, nell'interrogarsi sui meccanismi che hanno regolato lo sviluppo tecnologico nella storia delle civiltà, George Basalla in *L'evoluzione della tecnologia*³ pone l'accento sul ruolo che i fattori psicologici e intellettuali, sociali e culturali, economici e militari, hanno avuto nella ricerca di alternative tecnologiche e nella loro selezione.

Nell'ambito degli studi sull'innovazione, uno dei settori più fecondi è stato quello che ha cercato nuovi usi per materiali tradizionali; negli ultimi anni, infatti, nota Anna Mangiarotti, «la scienza dei materiali è diventata il settore in grado di trainare e di determinare lo sviluppo tecnologico»⁴ e il legno, già a partire dalle prime sperimentazioni di Philibert de l'Orme nel '500, è stato costantemente coinvolto in questo processo.

La storia recente, racconta Josef Wiedemann, dimostra che «nonostante le sue possibilità di impiego straordinariamente molteplici e la sua capacità di conservarsi per millenni, il legno per un certo periodo è stato trascurato dal nuovo che avanzava. [...] Oggi siamo nuovamente consapevoli delle sue eccezionali proprietà. Il vasto lavoro di ricerca e sviluppo, in particolare negli ultimi trent'anni, ha fatto sì che il legno ritornasse a essere un elemento fondamentale nell'edilizia»⁵.

La ripresa di cui Wiedemann parla è tuttavia prevalentemente interna a quelle regioni in cui l'utilizzo del legno è strettamente legato alla tradizione

costruttiva locale (nord e centro Europa, Finlandia, Giappone, etc.), dove sono esplicitamente regolate sia la pratica costruttiva che l'utilizzo delle risorse boschive. Altra realtà è poi quella di paesi, per esempio l'Italia, in cui il legno ha trovato impieghi parziali nella costruzione degli edifici, e dove fra '800 e '900, come spiegano Umberto Barbisan e Roberto Masiero «travi in acciaio e calcestruzzo armato soppiantano quasi completamente il legno nei solai e nelle coperture, e solo sul finire del Novecento si registra un rinnovato interesse per questo materiale»⁶.

Ancora Guido Nardi ci ricorda che «lo scarto che si è prodotto tra le prestazioni offerte dall'ambiente costruito e i requisiti che ci si aspetta di vedere soddisfatti, impone oggi un'attenta riflessione sulle tecniche del costruire, che sono spesso indicate come le maggiori responsabili di questo squilibrio»⁷ e sembra non essere un caso il ricorrere sempre più diffuso, anche in Italia, soprattutto su riviste e testi specifici, al binomio costruzioni in legno – costruzioni sostenibili; tutto ciò ha costituito il punto d'inizio di questa ricerca.

1. Verso una reale eco-compatibilità del costruire in legno

1.1 Aspetti ecologici, economici ed energetici nell'impiego del legno come materiale da costruzione.

1.2 Dal Balloon Frame ai nuovi ricompositi a base di legno. Un comune denominatore nella storia dell'uso del legno in architettura.

1.3 Il tema dell'eco-compatibilità nell'uso del legno in architettura.

1.4 Il bosco ceduo e la salvaguardia del patrimonio boschivo.

1.1 Aspetti ecologici, economici ed energetici nell'impiego del legno come materiale da costruzione

Negli ultimi due decenni la globalizzazione dei mercati e le tecnologie dell'informazione si sono configurate come le due grandi forze che si sono alimentate a vicenda. Lo sviluppo della società dell'informazione ha svolto e continua a svolgere un ruolo trainante nei processi di globalizzazione, grazie alla costituzione di reti digitali globali che collegano molteplici soggetti e incoraggiano la creazione di una nuova economia globale basata sulle reti e su fattori immateriali. Il contenuto tecnologico, la qualità e il marchio del prodotto, la proprietà intellettuale, la tempestività del servizio diventano i fattori che rendono competitive e dominanti le economie. Contemporaneamente, tra le ultime acquisizioni dell'umanità è la consapevolezza che le risorse a nostra disposizione non sono illimitate e che l'uso razionale delle risorse, è la sola scelta sensata, anche e soprattutto per i molti rischi che la produzione di energia, specie quella ottenuta dalla combustione delle fonti fossili, comporta per l'ambiente e la salute.

Il legno è l'unico materiale da costruzione che, a causa del suo utilizzo in settori diversi e con finalità estremamente varie, si può definire una risorsa, dove con questo termine, il dizionario Demauro, intende «mezzo, espediente con cui è possibile provvedere a un bisogno, a una necessità», o anche «l'insieme dei mezzi e delle disponibilità produttive, che costituiscono fonte di ricchezza», e «ciascuno degli elementi che costituiscono un sistema»⁸. In particolare, il legno rientra a pieno titolo nella categoria delle risorse rinnovabili, quali le fonti inesauribili (come l'energia solare), che, in teoria, non possono essere totalmente consumate grazie alla capacità di riprodursi (biologicamente) o di rigenerarsi (fisicamente). Negli ultimi anni, l'attività dell'uomo ha gravemente ridotto alcune risorse precedentemente classificate quali rinnovabili, come il patrimonio ittico del Mare del Nord e numerose foreste. Questo si è verificato quando la risorsa è stata sfruttata a un ritmo maggiore rispetto a quello con cui è in grado di rinnovarsi, a tal proposito, infatti, Hermann Deli propone il “principio del rendimento sostenibile” per

cui in qualsiasi tipo di impresa bisogna utilizzare risorse che, nell'arco di una vita umana, possano essere rinnovate, garantendo che velocità di produzione dei rifiuti delle attività produttive e naturali capacità di assorbimento da parte degli ecosistemi in cui i rifiuti vengono immessi, siano uguali. Lo sviluppo sostenibile⁹ è un concetto strettamente connesso a quello della qualità, perché sviluppo sostenibile sostanzialmente significa qualità della vita, nelle scelte energetiche, nei trasporti e nella produzione, ma più che altro vuol dire garantire alle generazioni future una possibilità di sopravvivenza su questo pianeta¹⁰.

Già tra gli anni '60 e '70 del secolo scorso il dibattito sulla questione ambientale, nato con la formazione delle prime Associazioni Ambientaliste, ebbe come nodo centrale il rapporto tra economia e ambiente, nell'evidente necessità di preservare la qualità del patrimonio naturale e di rivedere ed equilibrare i modelli di sviluppo. Sono questi gli anni in cui si apre la strada a un dibattito profondo e a una crescente attenzione da parte della comunità scientifica e della società civile a considerare il Pianeta come sistema chiuso, nel quale ogni risorsa naturale trova i suoi limiti nella disponibilità e nella capacità di assorbimento dell'ecosistema, prendendo quindi coscienza dei limiti dello sviluppo.

Proprio lo sfruttamento dissennato delle grandi foreste del pianeta, infatti, ha messo in discussione, sui grandi numeri, l'effettiva rinnovabilità della risorsa legno. A partire da alcune iniziative intraprese dai primi movimenti ecologisti, la questione delle cosiddette foreste storiche è salita alla ribalta del dibattito sulla conservazione degli equilibri globali del sistema planetario e così hanno avuto inizio una serie di azioni finalizzate a definire la classificazione dei boschi, elaborare piani di gestione appropriati, individuare protocolli condivisi nella pianificazione dei tagli e mettere a punto vari interventi normativi tendenti a garantire la sopravvivenza delle risorse forestali. Naturalmente questo nuovo atteggiamento nasce nei paesi tradizionalmente dediti a un massiccio utilizzo del legno come materiale da costruzione quali Cina, Canada, Giappone e Nord-Europa per diffondersi lentamente nelle altre nazioni dell'Occidente avanzato.

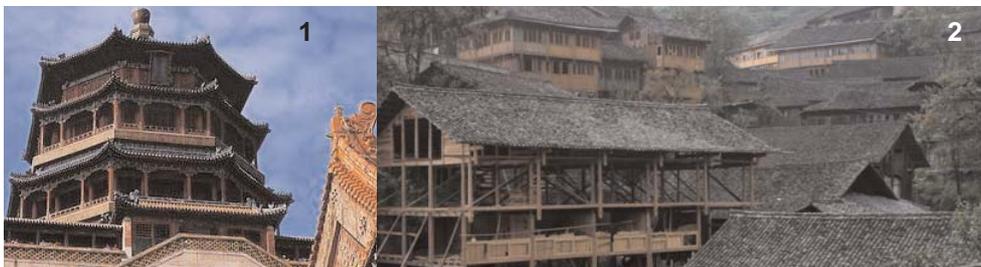


Fig. 1: Beijing, Cina, Palazzo d'Estate. Nel 1888 l'imperatrice Cixi iniziò l'opera di ricostruzione dell'antica residenza imperiale, in seguito alla distruzione compiuta dalle truppe anglo-francesi. La struttura è interamente in legno.

Fig. 2: Yang Shuo, Cina. Villaggio vicino alle risaie. Quasi tutte le costruzioni sono in legno, dalla struttura al rivestimento.

Quale importante “effetto secondario” di questo nuovo atteggiamento il mondo delle costruzioni ha appuntato il suo interesse su quei sistemi che privilegiano l'utilizzo di semilavorati di piccole dimensioni, ottenibili da alberi relativamente giovani e provenienti da colture a rapido accrescimento. Sulla scia del legno lamellare, la cui invenzione precede l'insorgere della questione ambientale, nascono altre tecnologie fondate sulla ricomposizione di piccoli o piccolissime parti lignee (si arriva fino alla dimensione del truciolo) tenute insieme con resine sintetiche che ne garantiscono la plasmabilità anche in forme tradizionalmente impensabili. Tuttavia, nell'ambito del miglioramento delle prestazioni del materiale composito, il nocciolo del problema resta proprio l'utilizzo delle colle sintetiche, che se da un lato determinano eccezionali prestazioni dal punto di vista strutturale, allo stesso tempo sono fonte di grave inquinamento. Si tratta per lo più di collanti termoindurenti, generalmente derivati dalla condensazione della formaldeide con la resorcina; la condensazione è un processo di polimerizzazione che avviene con l'eliminazione dell'acqua dalla miscela per effetto del calore e di un catalizzatore. Quando i componenti raggiungono il punto di condensazione, le parti lignee vengono cosparse con l'aggiunta del catalizzatore. Il componente più pericoloso è proprio la formaldeide¹¹ contenuta oltre che nella miscela di base, negli induritori contenenti paraformaldeide. In determinate circostanze (elevate temperature per esempio) i materiali trattati con questi prodotti rilasciano composti di formaldeide che si traducono in inquinamento dell'atmosfera e del ter-

reno dovuto allo smaltimento dei residui delle lavorazioni. L'inalazione dei vapori di formaldeide, secondo alcune ricerche condotte negli Stati Uniti, può essere dannosa per il sistema respiratorio degli uomini¹², e, in caso di incendio, il rischio di avvelenamento dovuto alla combustione di queste resine è molto elevato. Infine, la massiccia presenza di prodotti di sintesi, rende proibitivo il tradizionale metodo di dismissione delle parti lignee, derivanti dalla demolizione degli edifici, che prevedeva la trasformazione in legna da ardere e quindi una sorta di riciclaggio produttivo dei componenti alla fine del loro ciclo di vita.

Alla richiesta espressa dai movimenti ecologisti di utilizzare preferenzialmente semilavorati di piccole dimensioni provenienti da colture a rapido accrescimento, risparmiando così le foreste storiche, la ricerca tecnologica offre una risposta solo parzialmente accettabile in funzione della globale eco-compatibilità dei prodotti utilizzati. Si può quindi sostenere che per soddisfare seriamente la domanda di eco-compatibilità la ricerca nel campo degli utilizzi del legno in edilizia deve seguire due strade: da una parte è necessario investire nel settore chimico, con la sperimentazione di colle non inquinanti (come per esempio la lignina¹³, polimero naturale che tiene insieme le fibre del legno, i risultati delle cui sperimentazioni non sono tuttavia ancora soddisfacenti), e dall'altra si rende indispensabile riscoprire sistemi fondati sull'assemblaggio, escludendo i diffusissimi incollaggi chimici, di elementi costruttivi derivati da semilavorati in legno massello di piccola dimensione.

A queste considerazioni si può aggiungere che questa generica richiesta di eco-compatibilità e di utilizzo dei semilavorati del legno di piccole dimensioni incontra la necessità, avvertita in Italia sul piano economico e sociale, di riconfigurare il comparto agro forestale in crisi. In tal modo i contesti produttivi che hanno fondato la propria economia sull'utilizzo del legno si possono valorizzare e promuovere attraverso un processo di innovazione dei modelli di produzione e attraverso il recupero di un modo di gestione dei boschi che apparteneva ad una tradizione oggi in forte crisi. Questo patrimonio andrebbe peraltro integrato e come sosteneva già nel 1985 Aldo Capasso

«Oggi la sola conservazione passiva dell'ambiente, mediante vincoli e divieti, non basta a restituirci quanto abbiamo perduto. A un'attenta gestione e a una più razionale utilizzazione delle risorse rinnovabili, deve accompagnarsi una oculata politica di forestazione; è necessario inoltre che alla volontà politica e al programma economico, si affianchino la coscienza sociale e l'impegno scientifico, nella ricerca del tipo di intervento e nella scelta delle specie arboree più idonee a potenziare il nostro patrimonio forestale»¹⁴, nella convinzione che l'azione ambientale da sola non riesce a esaurire la sfida: ogni piano di intervento, infatti, deve rispondere a una visione integrata e definire impatti economici, sociali e ambientali. Lo sviluppo sostenibile, infatti, come descritto nei 27 Principi su ambiente e sviluppo sanciti nella Conferenza delle Nazioni Unite (Rio de Janeiro, 1992) assume le caratteristiche di concetto integrato, in cui si fondono e coniugano insieme le tre dimensioni fondamentali e inscindibili di Ambiente, Economia e Società.

1.2 Dal Balloon Frame ai nuovi ricompositi a base di legno. Un comune denominatore nella storia dell'uso del legno in architettura

Il citato abbinamento tra semilavorati di piccole dimensioni e collanti chimici risale solo all'ultimo secolo di storia delle costruzioni. Si può prendere in considerazione, per esempio, quella fase della storia dei procedimenti costruttivi in legno in cui si iniziano ad affermare le logiche dedotte dalla produzione industriale, e cioè quando nell'America dei primi decenni dell'Ottocento si sono costruite le prime abitazioni con il metodo che diventerà in seguito noto come *Ballon Frame*. Il sistema *Balloon Frame*, è scelto come punto di partenza della storia che si sta per narrare, perchè caratterizzato dall'utilizzo di listelli e tavole di piccola dimensione, che si iterano in maniera modulare a formare un sistema a doppia orditura collaborante all'interno di un involucro a scatola facilmente realizzabile e smontabile. Questo sistema costruttivo, sperimentato per la prima volta nel 1830 da Augustine Taylor per la realizzazione della St. Mary's Church in Fort Dearborn vicino

Fig. 3: Nello schema sono rappresentati gli eventi fondamentali che hanno segnato l'evoluzione dell'uso del legno di piccole dimensioni in architettura nel corso del XX secolo. Si è scelto di raccontare questa storia raggruppando in tre segmenti i principali eventi; dal punto di vista del progresso tecnologico, la storia dimostra come i principali obiettivi (aumentare il grado di efficienza strutturale, ridurre il coefficiente di instabilità dimensionale, aumentare la plasmabilità, la durabilità, la resistenza al fuoco e agli agenti atmosferici) siano stati effettivamente raggiunti. Sul versante delle tematiche ambientali, se da un lato appare molto confortante l'utilizzo del legno giovane e di poco pregio, che consente peraltro di mitigare la richiesta di legno proveniente da foreste antiche e protette, dall'altro non sembra ancora risolto il problema dell'inquinamento del materiale finito a causa della grande quantità di colle sintetiche utilizzate. Quest'ultimo aspetto interfaccia con il tema del riciclaggio, poiché se è vero che i compositi possono essere realizzati con legno riciclato, alla fine del loro ciclo di vita vanno considerati e quindi smaltiti come materiali plastici e non più come legno, materiale riciclabile per eccellenza.

Questi tre aspetti della vicenda si incrociano con le invenzioni che hanno reso possibile il passaggio dal lamellare ai compositi, con le norme per il loro uso in campo edilizio e con i grandi eventi tra cui le esposizioni universali in cui è stato fatto un uso del legno in applicazioni di particolare interesse.

Chicago, grazie anche all'introduzione della sega a motore, rappresenta la prima forma di industrializzazione edilizia, dove gli elementi della costruzione sono sostanzialmente due: le viti prigioniere e le aste in legno di lunghezza standard di 4 metri prodotte in segheria, che ben si adattano alle necessità di una veloce realizzazione delle case dei pionieri americani, con azioni ripetitive tipiche dei processi industriali e con manodopera non specializzata.

Dal perfezionamento dei sistemi costruttivi di matrice americana bisognerà attendere mezzo secolo per assistere ad una nuova significativa invenzione tesa a estendere i campi di utilizzo del legno in edilizia e in particolare a valorizzare l'uso dei semilavorati di piccole dimensioni. In tal senso, l'inven-

Fig. 4: Konrad Wachsmann e Walter Gropius in cantiere per il montaggio del Package House System. Sullo sfondo le pareti del sistema in fase di allestimento. A destra un treno di lavorazione per la produzione dei pezzi standardizzati. Frampton spiega come l'adozione di questo sistema «avrebbe portato a livelli di civiltà nel suburbio americano più elevati di quelli raggiunti nelle ultime quattro decadi, ed è merito di Wachsmann il fatto che queste case potessero essere assemblate in aggregati contigui e perciò, corrispondere a modelli insediativi più responsabili di quelli successivamente sviluppatisi nella tradizione statunitense». Frampton Kenneth, "I tecnocrati della Pax Americana: Wachsmann & Fuller", in «Casabella», n. 542-543, 1988, p. 43.
(fonte immagini: http://www.axxio.net/waxman/content/General_Panel/General-Panel.htm)

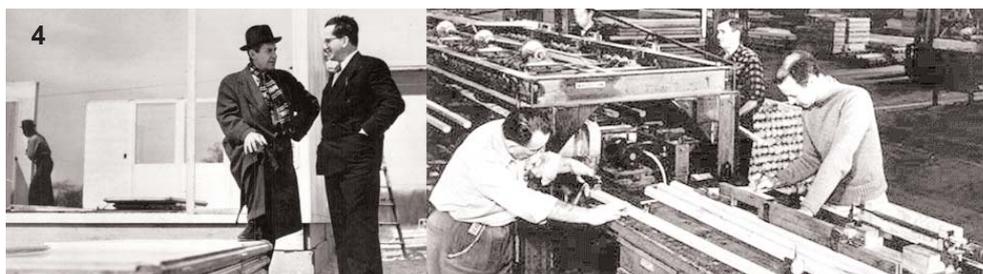




Fig. 5: Chesa Futura, Engadin Valley, Saint Moritz.

Progettisti: Foster and Partners, durata della costruzione: 2001-2002. Consulenti: Davis Langdon and Everest, Edy Toscano AG, Ove Arup and Partner, Peter Walker and Partners, R and B Engineering, mbH Emmer Pfenninger Partner AG, EN/ES/TE AG. L'edificio, composto da sei appartamenti, è realizzato con travi prefabbricate e pannelli in Kerto che garantisce la necessaria leggerezza e l'ottenimento della forma a doppia curvatura; il comportamento della struttura è paragonabile a quello di un guscio estremamente rigido.

(Fonte delle immagini: www.fosterandpartners.com, Umberto Barbisan, *Chesa Futura: Foster and Arup a Sankt Moritz*, in www.tecnologos.it).

zione di Karl Friedrich Otto Hetzer (1846-1911) nel 1905 dell'incollaggio di lamelle di legno sovrapposte, oltre a svincolare i costruttori dal limite dimensionale imposto dal tronco dell'albero, consente di utilizzare legno proveniente da colture a rapido accrescimento, di controllare i difetti delle tavole e di ridurre l'instabilità dimensionale del componente. All'Esposizione di Bruxelles del 1910 viene presentato il nuovo prodotto che nell'arco di un decennio acquista grande popolarità in Europa e soprattutto in Svizzera, dove nel 1920 si contavano più di 200 edifici costruiti con struttura in lamellare brevettato da Hetzer. Nel 1923 Max Hanisch, ingegnere e socio di Hetzer, emigra negli Stati Uniti per promuovere il nuovo materiale. L'esito non è immediatamente positivo, soprattutto perché i soli trent'anni di sperimentazione europea non sembravano sufficienti a garantire le autorità responsabili della costruzione. Solo nel 1934 Hanisch realizza nel Wisconsin una palestra con travi di 19,50 m di lunghezza. Sarà la seconda guerra mondiale a dare una forte spinta all'utilizzo del legno e del lamellare a causa della forte penuria di acciaio¹⁵.

Forse è a causa di motivazioni sostanzialmente analoghe, che tra il 1941 e il 1949, Konrad Wachsmann e Walter Gropius realizzano per la General Panel Corporation il "package house system". Si trattava di un sistema di produzione di elementi costruttivi prefabbricati in legno, da impiegare per la



Fig. 6: Edificio per uffici, Vancouver (Canada), Henry Hawthorn, 1993. Vista d'insieme e dettaglio del sistema di attacco pilastri, travi secondarie in Parallam e tiranti di controventamento. Processo di produzione tipo del Parallam: sfogliatura del tronco, essiccazione dei fogli, taglio longitudinale dei fogli, selezione strisce, applicazione del collante, assemblaggio delle strisce, pressaggio a microonde, rifinitura, taglio in senso longitudinale, piallatura, controllo della qualità e marchiatura, spedizione.

(fonte immagini: Aldo Dattomi, "I compositi a base di legno di nuova generazione - parte seconda", in *Adrastea* n. 9, 1997).

realizzazione di abitazioni nei sobborghi statunitensi nella fase postbellica. Durante la fase di sperimentazione, il prototipo è montato in sole otto ore, inclusa l'installazione degli infissi e degli impianti. Per questo progetto Wachsmann e Gropius sperimentano uno dei primi giunti universali in legno, a forma di cubo, dove convergono dodici pannelli. Il difetto del sistema, destinato alla produzione di massa, era nell'essere progettato con pezzi prefabbricati già completamente disegnati, e pertanto non modificabili in alcuna parte. Per questo motivo il sistema non raggiunge il successo sperato e come racconta Kenneth Frampton, «Sembrerebbe che il General Panel System abbia sofferto dell'abituale basso livello di ricezione che ha accompagnato quasi tutti i sistemi di abitazione progettati razionalmente negli ultimi quar-

tipo di materiale	tensione ammissibile a flessione (kg/cm ²)	peso specifico (kg/m ³)	grado di efficienza strutturale (rapporto tra tensione ammissibile a flessione e peso specifico)
lamellare	140*	500	280
microlam	215	580	370,69
parallam	200	590	338,98
intrallam	241,5	600	402,5
OSB	200	620	322,58
muratura di mattoni	10	1800	5,55
calcestruzzo armato	60	2500	24
acciaio Fe 360	1600	7850	203,82
acciaio Fe 510	2400	7850	305,75

Tab. 1: Confronto tra le caratteristiche strutturali di alcuni materiali da costruzione. (Cit. in Aldo Dattomi, "I compositi a base di legno di nuova generazione", in *Adrastea* n. 8, 1997)
 Per grado di efficienza strutturale, l'autore intende il rapporto tra tensione ammissibile a flessione, (lungo la direzione parallela alle fibre nel caso del lamellare) e peso specifico. I compositi a base di legno offrono prestazioni strutturali superiori sia rispetto ai materiali tradizionali sia rispetto al lamellare.

tipo di materiale	carico di sicurezza (kg/cm ²)	peso unitario (kg/cm ³)	carico di sicurezza / peso unitario
acciaio Fe 360	1400	0,0078	180000
acciaio Fe 510	1400	0,0078	180000
legno massello	100	0,00065	154000
legno lamellare	150	0,0007	215000
calcestruzzo armato	140	0,0025	56000
muratura di mattoni	15	0,0018	85000

Tab. 2: il rapporto carico di sicurezza e peso specifico (indicato come efficienza prestazionale) definisce per quali valori limite la capacità di resistenza del materiale è assorbita dal peso proprio.

Dati elaborati dai testi: Berti Stefano, Maurizio Piazza, Roberto Zanuttini, "Prodotti per impieghi strutturali", *Strutture di legno per un'edilizia sostenibile*, Il Sole 24 ore, Milano, 2002, p. 82 e Davoli Pietromaria, *Costruire con il legno*, Hoepli, Milano, 2001, pp. 78-79 e dal sito www.holzbau.com.

tipo di materiale	modulo di Young (kg/cm ²)	densità $\bar{\alpha}$ (kg/cm ³)	$E/\bar{\alpha}$
acciaio	2100x10 ³	7,8x10 ⁻³	26,5x10 ¹⁰
legno massello	110x10 ³	0,45x10 ⁻³	25x10 ¹⁰
calcestruzzo armato	200x10 ³	0,05x10 ⁻³	8x10 ¹⁰

Tab. 3: nel rapporto tra modulo di Young e densità il comportamento del legno si avvicina a quello dei metalli. Il legno da risultati eccezionali poiché tale rapporto privilegia i materiali leggeri e resistenti

anta anni, con la sola eccezione di quei sistemi sostenuti, nel primo dopoguerra, da ampi programmi statali, come in Francia e nell'Est europeo»¹⁶. Nella fase di ingresso del lamellare nel mondo delle costruzioni, la ricerca si sposta dalla materia prima alle colle che, originariamente di natura organica e quindi facilmente deperibili, vengono sostituite nell'arco di un trentennio con quelle sintetiche, a garanzia di maggiore durabilità. Contestualmente agli studi sul lamellare, si sviluppano quelli sui compensati dove al posto delle lamelle si utilizzano i fogli di legname, incollati in modo che le fibre di un foglio siano disposte ortogonalmente al successivo, in modo che la resistenza del materiale composito sia garantita in entrambe le direzioni.

Tutto interno alla ricerca sulla cooperazione tra legno e altri materiali che ne esaltino le caratteristiche, è uno dei primi sistemi di connessione tra legno e calcestruzzo, brevettato da Karl Mohler nel 1956, che consente un più semplice recupero dei solai in legno. Nella stessa corrente di studi si inseriscono quelli sulla tecnologia del lamellare fibrorinforzato. Il brevetto statunitense del 1977 prevedeva l'inserimento di una lamina di fibre di vetro tra l'ultima e la penultima lamella. Quando le fibre sono posizionate negli strati di colla tra le tavole, «si consegue lo scopo di aumentare il modulo di elasticità anche

più del 30% rispetto al lamellare normale e quindi a parità di condizioni di carico, di vincolo e di sezione, di ridurre le deformazioni di una misura di pari entità, pur senza allungare i tempi del processo produttivo e influenzando sui costi industriali con un aumento non superiore al 12%»¹⁷.

Sulla base del principio su cui si fonda la realizzazione del lamellare, ossia la riduzione del legno massiccio in tavole di piccole e medie dimensioni, successivamente ricomposte con adesivi strutturali che conferiscono al composito resistenze meccaniche omogenee ed efficienza strutturale superiori a quelle dell'essenza legnosa di cui è costituito, i più recenti sviluppi degli studi in materia hanno dato vita ai cosiddetti *Structural Composite Lumbers*. In tal senso, il passaggio successivo all'utilizzo delle tavole e poi degli sfogliati è segnato dall'ingresso delle scaglie (1 x 30 mm circa): sono brevettati, intorno agli anni '50, rispettivamente negli Stati Uniti e in Norvegia, l'*OSB (Oriented Strand Board)* e il *Kerto*¹⁸, compensati strutturali che garantiscono prestazioni meccaniche paragonabili o addirittura superiori a quelle del lamellare di prima qualità. La particolare lavorazione di questi multistrati strutturali consente di eliminare il materiale difettoso e quindi di ridurre con pochi scarti le irregolarità della materia prima, la cui minutezza rende quasi inesistenti i fenomeni di deformazione e quindi di instabilità dimensionale. Soprattutto, le scaglie possono essere ricavate da tronchi molto giovani, o addirittura dai rami primari, il che rende ancora minore lo spreco di legname e più facile l'approvvigionamento¹⁹. Il *Kerto*²⁰, in particolare modo, come spiega Aldo Dattomi «è prodotto e commercializzato dal gruppo Metsäliitto, composto da 130.000 proprietari privati finlandesi, che garantiscono la gestione sostenibile delle foreste, come il divieto della pratica del taglio raso e successivamente la produzione con principi ecologici più avanzati»²¹.

In tal senso si commercializzano, anche in Italia, semilavorati quali il *Bilam*²² o ancora il sistema *Wolf*²³. E ancora altri brevetti di origine statunitense si sono affacciati al nostro mercato, come l'*Intrallam*²⁴, simile per processo produttivo e per caratteristiche meccaniche e fisiche al *Parallam*²⁵. Quest'ultimo, brevettato negli Stati Uniti e in Canada, è costituito da

sfogliati di legno di conifere o di latifoglie a rapido accrescimento, per lo più pioppo, (da 2 a 3 mm di spessore, da 2 a 3 cm di larghezza, fino a 2,5 m di lunghezza), incollati e pressati per ottenere sezioni e lunghezze paragonabili a quelle del lamellare. Anche in questo caso il processo di sfogliatura garantisce l'utilizzo di fusti giovani e il minimo spreco della materia prima, poiché è poco il materiale di scarto. Per la produzione del *Parallam* si sperimenta, inoltre, la possibilità di utilizzare il legno riciclato come materia prima. Per le sue prestazioni strutturali si può considerare la migliore alternativa non solo al legno lamellare, ma anche ai tradizionali materiali da costruzione, con i suoi 200 kg/cm² di tensione ammissibile a compressione e a flessione.

1.3 Il tema dell'eco-compatibilità nell'uso del legno in architettura

Come già accennato, la storia dell'uso del legno e dei suoi derivati in architettura (lamellare, Osb, microlam, fibrorinforzati, etc.) si intreccia con quella più tristemente nota dello sfruttamento incontrollato di foreste e boschi che ha comportato nel corso del tempo la desertificazione di vaste aree del pianeta, con gravissime conseguenze ambientali.

Il problema da una parte discende dal commercio illegale di semilavorati spediti in Europa e negli Stati Uniti, poiché, nota Jacopo della Fontana, «Molte nazioni del terzo mondo dipendono pesantemente nell'economia dalle esportazioni dallo sfruttamento massiccio delle loro foreste (...) La mancata lavorazione sul posto del materiale le priva di un potenziale di lavoro interno e quindi di crescita sociale»²⁶, e dall'altro dalla trasformazione delle aree boschive in campi per l'allevamento di bestiame che in pochi anni si esaurisce: secondo gli economisti un ettaro di pascolo rende annualmente circa 60 dollari, per una durata di meno di 20 anni. Lo stesso ettaro lasciato a foresta, gestito con piani di taglio progettati in modo da non erodere le dotazioni complessive, rende in media 200 dollari l'anno per un tempo indefinito²⁷. Dal punto di vista sociale le compagnie del legno causano direttamente o indirettamente una serie di problemi. Per le popolazioni locali, infatti, le operazioni forestali arrivano inaspettate e improvvisamente

cambiano la vita del villaggio. Neppure dal punto di vista dell'occupazione tali attività garantiscono uno sviluppo possibile: quando si tratta di pratiche distruttive, le operazioni durano il tempo necessario all'esaurimento della foresta, poi si spostano altrove, segue il licenziamento dei lavoratori assunti sul luogo. In Camerun, per esempio, le condizioni di lavoro nell'industria del legno sono tra le peggiori: la paga mensile si aggira in tra i 20.000 e i 30.000 Cfa²⁸. Per ottenere il lavoro spesso bisogna pagare al responsabile del personale della compagnia una tassa che si aggira intorno ai 50.000 Cfa e devolvere il primo mese di salario per rimborsare l'onere del training professionale. I lavoratori nei magazzini e nelle segherie spesso non hanno sufficienti indumenti protettivi. La polvere di segatura provoca loro diverse malattie

tipo di materiale	elementi legnosi unitari	lungh. (mm)	largh. (mm)	sp. (mm)	leganti	impieghi
lamellare	tavole	25_500 0	80_300	15-30	colle a base di urea-formolo, resorcina-formaldeide, melammina-urea-formaldeide	elementi strutturali
microlam	sfogliati	1220_3 100	100_2500	0,8-5	resine a base di urea-formaldeide e resorcina-formaldeide	elementi strutturali
compensati strutturali (microlam, kerto)	sfogliati	1220_3 100	100_2500	0,8_5	resine a base di urea-formaldeide e resorcina-formaldeide	strutture portanti secondarie, di pareti, solai, coperture
parallam	strisce di sfogliati	2400	20_30	3	colle fenoliche o resorciniche	elementi strutturali
intrallam	strisce di sfogliati	200-300	30_50	2_3	resina poliuretanic (isocianato)	elementi strutturali, strutture portanti secondarie, di pareti, solai, coperture, componenti di infissi
OSB	schegge	60_80	10_20	0,2-0,6	resine fenoliche	elementi strutturali, strutture portanti secondarie, di pareti, solai, coperture

Tab. 4: Per ciascun materiale è indicato il tipo di semilavorato ligneo utilizzato, il tipo di colla, i possibili impieghi. Dal confronto emerge la caratteristica principale di questi compositi, ossia la piccola dimensione del materiale di base utilizzato. A partire dal lamellare, infatti, che conserva le dimensioni della tavola da 30 mm di spessore, tutti gli altri materiali si compongono di sfogliati la cui principale caratteristica è l'estrema sottigliezza (da 0.6 a 5 mm di spessore). Gli impieghi indicati sono relativi al mercato nord europeo e statunitense, non già a quello italiano, dove, per esempio, l'OSB è utilizzato sostanzialmente per gli imballaggi o per installazioni provvisorie. (I dati contenuti nella tabella sono stati elaborati a partire da informazioni contenute in Aldo Dattomi, "I compositi a base di legno di nuova generazione", in *Adrastea* n. 8, 1997).

respiratorie²⁹ anche dovute ai composti tossici necessari per proteggere il legno da parassiti e muffe. Spesso si tratta di pesticidi a base di lindano³⁰ e pentaclorofenolo³¹, il cui uso in Europa è sottoposto a rigorosi regolamenti di sicurezza³². I resti di questi prodotti tossici sono di norma abbandonati in una buca del terreno e l'inquinamento del suolo e delle falde acquifere causato da tali pratiche non è stato mai indagato. Spesso queste storie si intrecciano con la mancanza di rispetto per le tradizioni locali: alcuni alberi, infatti, come il Moabi (*Baillonella toxisperma*) e il Bubinga (*Guibourtia sp.*) in alcuni paesi dell'Africa hanno una grande importanza e sono causa di conflitto con le compagnie che li abbattano senza considerare i valori culturali tradizionali delle popolazioni locali³³. Un Moabi può raggiungere i 60 metri di altezza con un diametro di 4 metri, e rappresenta un importante punto di riferimento per chi si muove nella foresta, oltre a costituire un grande valore culturale e paesaggistico. I Moabi producono anche un prezioso olio utilizzato per cuocere nelle regioni della foresta, la cui produzione, per altro, rende molto di più del legno dell'albero abbattuto. Per porre fine a molti dei conflitti sociali con le popolazioni locali, sarebbe necessario vietare il taglio di Moabi e Bubinga.

Per fronteggiare queste problematiche, nel 1987 si riunisce la commissione Brundtland (Commissione Mondiale sull'Ambiente e lo Sviluppo) che definisce il concetto di *sviluppo sostenibile* e continua ancora oggi ad avere forte influenza nel dibattito sulla gestione delle foreste. Dal 1987, molte sono le pubblicazioni e gli accordi internazionali che si sono susseguiti. Tra questi la Convenzione sulla Biodiversità adottata nel 1992 dall'Unced (Conferenza delle Nazioni Unite su Ambiente e Sviluppo), l'Obiettivo 2000 dell'Organizzazione Internazionale del Legname Tropicale ed il Programma d'Azione per le Foreste, presentato al convegno di Birmingham del 1998. Nonostante ciò, la strada verso pratiche sostenibili di silvicoltura è costantemente sabotata dalle crescenti forme di estrazione e commercio illegale di legname. Al fine di garantire l'applicazione dei diversi fattori connessi al concetto di sostenibilità³⁴, sono state individuate linee guida e strumenti idonei per intervenire sulla pianificazione, sull'attività gestionale e sul mer-

cato. In tale ambito si inserisce la certificazione forestale che, sulla spinta delle principali organizzazioni non governative attive in campo ambientale, negli ultimi anni ha visto sviluppare alcuni importanti sistemi volontari di riferimento. Il più diffuso, su scala mondiale, è stato finora quello proposto dall'Fsc³⁵ (*Forest Stewardship Council*), organismo senza fini di lucro, composto dai rappresentanti di vari gruppi di interesse (Ong, industriali, commercianti, istituti di ricerca), che ha elaborato uno schema di gestione e certificazione da adattare a livello locale. Col tempo, ad esso se ne sono affiancati di nuovi, tra cui il modello di certificazione ISO 14000 (per il quale è stato elaborato un documento tecnico che ne specifica l'applicazione al settore forestale), l'Emas e, più di recente, quello del Pefc (*Pan-European Forest Certification*), che rappresenta la soluzione proposta dai proprietari forestali e da una parte della componente industriale, agli aspetti giudicati non soddisfacenti nei sistemi di ecocertificazione consolidati³⁶. Questa iniziativa ha avuto sin dall'inizio l'obiettivo di contrastare il diffondersi del commercio illegale del legno e promuovere la formazione di un mercato derivante da foreste gestite in maniera sostenibile anche attraverso l'incremento della capacità di controllo della produzione e del trasporto del legno e dei prodotti derivati. Al 31 gennaio 2005 la superficie forestale certificata Fsc ammonta, in tutto il mondo, a 51.051.689 ettari, per un totale di 678 certificati di buona gestione forestale complessivamente rilasciati. I Paesi nei quali siano stati rilasciati certificati per la buona gestione forestale e/o per la *Chain of Custody* sono in tutto 75. Anche in Italia il numero di certificazioni rilasciate secondo lo schema Fsc della *catena di custodia* continua a crescere. Nel gennaio 2005 è stata raggiunta quota 100 aziende certificate³⁷. Nell'allegato 1.1 sono segnalati i legni che certamente provengono da foreste protette e il cui uso va limitato a quelli garantiti da certificazione Fsc. Come già scritto in precedenza, la grande battaglia ecologista sulla tutela delle foreste storiche ottiene, in prima istanza, il risultato di orientare parte della ricerca finalizzata all'innovazione tecnologica verso lo sviluppo di quei sistemi costruttivi che, come il lamellare, utilizzano semilavorati di piccole dimensioni.

Gli ideatori dei nuovi compositi a base di legno (*Structural Composite Lumbers*) appaiono, dunque, particolarmente sensibili alle tematiche ambientali, in materia di gestione sostenibile delle foreste e dei boschi, del minor spreco possibile di materiale legnoso, e allo stesso tempo attenti al miglioramento delle prestazioni del materiale finale, dal punto di vista della durabilità, della resistenza meccanica, dell'efficienza strutturale. Per la produzione di questi nuovi compositi, si parte dalla possibilità di utilizzare fusti giovani per arrivare addirittura all'uso di legno riciclato come materia prima. La piccola dimensione della componente legnosa (vedi tabella 4) determina, inoltre, la possibilità di aumentare la plasmabilità del componente, come racconta Franco Laner, infatti, «se ai nuovi, poco utilizzati prodotti si aggiungono le straordinarie possibilità offerte dalle macchine a controllo numerico, capaci di modellare elementi e componenti di legno con forme, incavi, scanalature, crene e quant'altro, si capisce come la forbice fra offerta tecnologica ed esito costruttivo sia larga, tanto da giustificare il titolo di questa nota, che sostiene che ancora non c'è progetto col legno»³⁸.

Punto di debolezza di tutti i compositi a base di legno è la presenza in grandi quantità di colle sintetiche che se da un lato rendono possibile l'utilizzo di scaglie o sfoglie e quindi di processi produttivi sostenibili dal punto di vista della gestione del bosco, dall'altro rendono il materiale finito fortemente inquinante e soprattutto non riciclabile.

Gli adesivi normalmente utilizzati per la realizzazione di compositi a base di

Impatto	legno	acciaio	cls
Energia consumata (GJ)	255	389	562
Potenziale di emissione gas effetto serra (equivalenti di CO ₂)	62.183	76.453	93.573
Inquinamento atmosferico (volume critico)	3.236	5.628	6.971
Inquinamento idrico (volume critico)	407.787	1.413.784	876.189
Consumo di risorse (kg)	121.804	138.501	234.996
Rifiuti solidi (kg)	10.746	8.897	14.056

Tab. 5: Nella tabella sono riportati i risultati di una *Lca* effettuata allo scopo di confrontare l'impatto di tre alternative per la costruzione di una casa unifamiliare di 220 m² con i metodi sviluppati dall'istituto canadese per la ricerca sui materiali sostenibili Athena. I risultati sono molto vantaggiosi nel caso dell'utilizzo del legno. (La tabella è dedotta da: Zanuttini Roberto e Lavischi Paolo, *Strutture di legno: analisi del ciclo di vita e certificazioni*, in www.saie.bolognafiere.it).

Materiale da costruzione	conduttività termica
Legno	0.14 – 0.16
Mattone pieno	0.7 –
Mattone forato	0.2 – 0.25
Cls armato	2.3 –
Intonaco isolante	0.09 – 0.13

Tab. 6: Il legno, tra i materiali da costruzione è dotato di un bassissimo indice di conduttività termica. (Dati ricavati da Lavisci Paolo, *Il confort termico nelle strutture in legno*, Atti del convegno *Legno & Edilizia 2000: Sicurezza e confort nelle abitazioni con strutture di legno*, su www.infobuild.com)

legno, a partire dal lamellare fino agli ultimi *Structural Composite Lumbers*³⁹, infatti, sono a base di urea-formolo o di resorcina-formaldeide o di melammina-urea-formaldeide. Le prime, di colore bianco, hanno una tenuta mediocre, soprattutto in presenza di notevoli escursioni termiche. Non sono consigliabili per esterni e per elementi strutturali esposti agli agenti atmosferici. Per contro il loro costo è abbastanza vantaggioso. Le seconde di colore rosso-bruno, sono tra le più usate perché più resistenti all'aggressione degli agenti atmosferici, specialmente in climi caldo-umidi, consentono ottime prestazioni in ambienti difficili e conservano le proprie caratteristiche nel tempo. Sono le più costose fra le colle del legno. Le terze, di colore bianco, sono ultimamente molto utilizzate e sembrano offrire caratteristiche meccaniche assimilabili a quelle delle colle resorciniche. La normativa attuale tuttavia non consente il loro utilizzo per strutture portanti all'aperto. Come detto nel primo paragrafo, è proprio la formaldeide ad avere un impatto sull'ambiente fortemente inquinante, anche a causa dell'indistruttibilità della resina che se ne ricava⁴⁰.

Da qui affiora la necessità di osservare il processo innovativo in senso globale, come richiesto anche dai recenti provvedimenti adottati dalla politica ambientale europea e dalle nuove normative della serie ISO 14000, in cui spicca l'importanza dell'**analisi del ciclo di vita** o *Life Cycle Analysis* (Lca) in ambito produttivo in quanto strumento utile per misurare e confrontare su basi scientifiche gli impatti dei processi (o di un prodotto o di un'attività) di produzione industriale, durante tutto il ciclo di vita, per selezionare le soluzioni che consentono il risparmio delle risorse, il contenimento delle emissioni nell'ambiente, in un'osservazione globale del sistema produttivo, collegato a una coscienza ambientale che inizia a progettare la produzione industriale nell'ottica di uno sviluppo sostenibile. La definizione riportata

nella norma UNI EN ISO 14040, infatti, definisce la Lca come una «compilazione e valutazione attraverso tutto il ciclo di vita dei flussi in entrata e in uscita, nonché i potenziali impatti ambientali, di un sistema di prodotto»⁴¹.

Le quattro fasi principali di una Lca, definite dalla ISO 14040, sono: la definizione degli scopi e degli obiettivi, analisi di inventario, l'analisi degli impatti e l'interpretazione e il miglioramento⁴². In merito alle caratteristiche delle strutture di legno, particolare rilevanza risiede nelle due ultime fasi.

L'analisi degli impatti, (dove per impatto si intende il risultato fisico immediato di un'operazione, associato a uno o più effetti ambientali) infatti, ha lo scopo di evidenziare l'entità delle modificazioni ambientali derivanti dai rilasci nell'ambiente e dal consumo delle risorse, causato dalle attività produttive, calcolati nell'**Inventario**. In questa fase si produce il passaggio dal dato oggettivo calcolato durante la fase di Inventario, al giudizio di pericolosità ambientale. È evidente la difficoltà di individuare e interpretare le conseguenze causate, ad esempio dalle emissioni, perché non è possibile associare inequivocabilmente uno specifico impatto con i suoi corrispondenti effetti ambientali che potranno essere stimati solo sulla base di convenzioni. La metodologia dell'Lca consiste nell'assegnare specifici effetti ambientali noti, nel tentativo di quantificare l'entità del contributo complessivo che il processo o il prodotto arreca agli effetti considerati. Il risultato fornisce il **profilo ambientale** del sistema studiato⁴³. Gli specifici effetti caratterizzanti le categorie di impatto sono, per esempio: l'effetto serra⁴⁴; l'assottigliamento della fascia di ozono; l'abbassamento del pH di laghi, foreste, suoli agricoli, causata dall'emissione di determinati composti nell'ambiente; l'eutrofizzazione⁴⁵, la formazione di smog fotochimico; il consumo di risorse non rinnovabili; il degrado del territorio; i disturbi di tipo fisico.

La quarta fase, **interpretazione e miglioramento**, consente la scelta delle azioni necessarie per correggere il sistema produttivo, o per riprogettarlo⁴⁶. L'interazione con la sfera economica è in questa fase ovviamente più stretta che nelle precedenti perché è proprio la valutazione dell'investimento a far emergere il miglior compromesso realizzabile. Il legno, per esempio, costa 1



Fig. 1: Il bosco ceduo di Cervinara. Proprietà Le Selve del Balzo. I tronchi giovani da 12 anni sono stati appena segati. Segue il trasporto nei capannoni per le successive lavorazioni.

Mj/t di energia primaria di produzione (ossia l'energia necessaria per la produzione di una tonnellata di materiale), contro i 4 Mj/t del calcestruzzo armato, i 60 dell'acciaio, fino ai 250 dell'alluminio⁴⁷. Ma questo dato da solo non basta. Roberto Zanuttini e Paolo Lavisca propongono la comparazione degli impatti presunti nella costruzione di casa unifamiliare di 220 m², con tre tecnologie alternative; i risultati sono estremamente favorevoli alle strutture di legno⁴⁸:

Di non secondaria importanza è anche la garanzia di confort termico offerta dalle strutture in legno. La questione riguarda considerazioni di tipo energetico, fondamentali quando si tratta di edilizia sostenibile, ma anche di tipo economico; spesso i costi di un isolamento termico insufficiente vengono sottovalutati, così come i vantaggi di un isolamento termico (negli edifici di nuova costruzione, infatti, il fabbisogno di energia può essere ridotto fino a un quarto di quello degli edifici esistenti) non possono essere espressi soltanto in termini di denaro, in quanto un maggiore comfort dovuto a pareti più calde o a una riduzione dell'inquinamento di sostanze nocive sono, allo stato attuale, difficilmente quantificabili.

Nella tabella 6 sono riportati i coefficienti di conduttività termica (w/mK) di alcuni materiali. La conduttività termica è la capacità di un materiale di condurre calore. Il coefficiente indica la quantità di calore che fluisce attraverso 1 m² di materiale dello spessore di 1 m, con una differenza di temperatura tra interno ed esterno di 1 K. I materiali isolanti sono caratterizzati da un coefficiente minore di 0,1W/mK⁴⁹, pertanto il legno massello se non si può considerare un materiale isolante, è a tutti gli effetti il miglior materiale da costruzione dal punto di vista dell'isolamento termico.

1.4 Il bosco ceduo e la salvaguardia del patrimonio boschivo

Durante il convegno organizzato dalla Holzbau il 26 settembre 2003 a Bressanone, sull'utilizzo del legno in architettura oggi e sulle nuove norme che lo regolano, il professore Julius Natterer, studioso dell'argomento dagli inizi della sua carriera e autore, insieme a Thomas Herzog e Michael Volz, dell'*Atlante del legno*, afferma: «I nostri antenati piantavano e proteggevano il bosco non solo per principi altruistici, ma perché consapevoli che da questo non ricavano soltanto materiale combustibile per il loro fuoco, ma anche il materiale necessario per costruire. Il bosco svolge diverse funzioni, influenza positivamente il clima, protegge il territorio, ha un valore culturale ed estetico altissimo. **L'unico modo di salvaguardare anche per il futuro il patrimonio boschivo è quello di utilizzare il legno in edilizia**»⁵⁰.

Il settore forestale in Italia versa da anni in uno stato di grave crisi dovuta a complessi fattori economici e sociali, ma come spiega molto bene William Cunningham, «L'ideogramma cinese che indica la parola "crisi" è composto dal carattere *wei*, che significa pericolo, e dal carattere *ji*, che indica opportunità. Si tratta di una buona descrizione della situazione globale del nostro ambiente. Siamo pericolosamente vicini al punto al di là del quale non sarà possibile ripristinare le comunità biologiche e i processi biofisici naturali. (...) L'ecologo britannico Norman Myers sottolinea come la nuova generazione di studenti abbia il vantaggio di essere la prima nella storia ad avere conoscenze, risorse e motivazioni per risolvere la crisi ambientale. Sfortunatamente, aggiunge, se le soluzioni ad alcuni problemi non saranno trovate rapidamente, questa generazione potrebbe anche essere l'ultima ad avere l'opportunità di farlo»⁵¹.

Ugualmente significativo è l'allarme lanciato da Stefano Berti, Maurizio Piazza e Roberto Zanuttini, che affermano: «Il mancato taglio dei boschi provoca il loro invecchiamento biologico cui può conseguire una maggiore instabilità ecologica e una minore funzionalità (...) I boschi ben gestiti, in

cui i tagli non superano gli incrementi, continueranno a rimanere una fonte inesauribile di materia prima. È ampiamente dimostrato che una gestione intensiva ma corretta, ecologicamente sostenibile, può determinare un aumento consistente della produzione legnosa senza particolari controindicazioni di carattere ambientale»⁵². È chiaro che la produzione legnosa di cui si tratta e che è necessario recuperare sia caratterizzata da pezzature di modeste dimensioni e, contemporaneamente, è doveroso cominciare a considerare non più disponibili i legnami di grandi dimensioni provenienti da foreste antiche e protette. Una gestione sostenibile del bosco consente, inoltre, di proteggere in maniera appropriata alcuni tipi di suolo e, contemporaneamente, di conservare intatte le dotazioni complessive.

Questo principio è particolarmente valido per alcuni tipi di arboricoltura in cui la maturità è raggiunta con turni di soli 10 anni, come la pioppicoltura o il bosco ceduo. Per quanto riguarda la pioppicoltura⁵³ sono tuttora in corso in Francia, presso il *Centre Technique du bois et de l'ameublement* studi sugli impieghi del legno di pino nel lamellare. Il presupposto di queste ricerche è nel fatto che questa essenza si presta a coltivazioni estensive e di rapida crescita con ovvie conseguenze sui costi, benchè, allo stato attuale delle ricerche, sia possibile affermare che le resistenze fisico-meccaniche del pino siano inferiori del 25-30% rispetto a quelle delle conifere comunemente impiegate nella fabbricazione del lamellare⁵⁴.

Il bosco ceduo, dal latino *caeduus* ossia adatto al taglio, a sua volta, si caratterizza per la periodicità dei tagli, con cicli di ricrescita di minimo 12 anni (garantiti dalla possibilità delle latifoglie di emettere nuovi getti, detti polloni, dalla ceppaia rimasta nel terreno), che insieme a quelli di manutenzione, pulizia a due anni e sfollo a otto anni, oltre ad essere finalizzati alla produzione di grezzi e semilavorati destinati al mercato, sono funzionali alla corretta conservazione del bosco, poichè proteggono il suolo dall'erosione dovuta agli agenti atmosferici, grazie al basso peso delle piante, all'intensità del reticolo radicale e alla costante copertura del terreno.

In passato il bosco ceduo ha rappresentato una risorsa di primaria importanza poichè il breve turno di taglio (12, 24 anni) consentiva di produrre semi-

lavorati di peso e ingombro limitati, facilmente trasportabili. Tuttavia l'interesse per il bosco ceduo si è andato perdendo con conseguenze disastrose per il mercato tradizionale. Questo fenomeno è dovuto a diversi fattori: l'utilizzo di nuove fonti energetiche al posto del combustibile legno, l'evoluzione delle tecniche agricole (per citare un esempio, i pali di castagno tradizionalmente utilizzati nei vigneti sono stati sostituiti con pali in calcestruzzo), l'impiego, nel settore edilizio, di solai in calcestruzzo e acciaio e di impalcature interamente metalliche in sostituzione di quelle in tubi innocenti e tavole di abete.

La diminuita portanza economica delle colture boschive, con conseguente riduzione del valore reale dei tagli di legname, ha prodotto in molte realtà italiane l'esodo dall'attività degli operatori, la mancanza di ricambio generazionale, ma soprattutto la mancata manutenzione del bosco ceduo (in particolare non si eseguono pulizia e sfollo), che comporta l'aggravarsi del rischio incendio. Questo tema porta, evidentemente, le tematiche interne all'ecologia, nel campo dell'analisi economica, secondo i dettami di una disciplina relativamente nuova, che, come spiega ancora William Cunningham, è definita *economia ecologica*: «Questo è un campo transdisciplinare che vuole essere olistico, contestuale, sensibile ai valori ed ecocentrico. Nella sua concezione del mondo include i principi della termodinamica; tra i suoi principali interessi ha la distribuzione equa delle risorse e dei diritti nella generazione attuale e tra essa e le generazioni future, ed è anche attenta ai diritti delle altre specie. Un'importante differenza tra questo nuovo campo e quelli precedenti è il riconoscimento del mondo come un sistema aperto, dinamico, in cui il sistema economico umano è inserito in modo inestricabile»⁵⁵.

In Italia in particolar modo, la maggior parte dei boschi cedui è costituita dal castagno⁵⁶ e solo questa essenza copre una superficie di circa 700.000 ettari. Le regioni che mostrano le maggiori produzioni di legno di castagno sono Campania, Toscana, Calabria, Piemonte, Lazio dove avviene oltre il 90% della produzione nazionale. A livello regionale, con particolare riferimento alla Campania, l'industria boschiva del ceduo agisce tuttora su un mercato di

produzioni assolutamente non adeguate alle potenzialità del legno.

Dalle colture a rapido accrescimento, dunque, si possono ricavare semilavorati di piccole dimensioni (diametro del tronco non superiore a 18 cm), il che, apparentemente, fa pensare a impieghi limitati della risorsa in questione. D'altra parte, l'invenzione del legno lamellare incollato, che ha ormai circa un secolo di storia, segna un passaggio epocale nella storia delle costruzioni in legno, proprio perché per la prima volta è possibile prescindere dalle dimensioni del tronco di partenza. Ed è particolarmente interessante notare che le recenti innovazioni in materia hanno come segno comune l'utilizzo di elementi in legno di dimensioni sempre più minute, fino ad arrivare ai trucioli o addirittura, in alcuni casi, alla segatura.

- ¹ Eco Umberto, "Postille a Il nome della rosa", *Alfabeta*, 49, 1983, Bompiani, Milano, 1984, p. 8.
- ² Nardi Guido, "Innovazione. Sue caratteristiche nell'architettura", in Alessandra Zanelli (a cura di), *Ricerche di tecnologia dell'architettura*, Clup, Milano, 2000.
- ³ Basalla George, *L'evoluzione della tecnologia*, Rizzoli Libri S.p.A., Milano, 1991.
- ⁴ Mangiarotti Anna, "La questione del trasferimento: il discorso intorno all'architettura", in Nardi Guido, Andrea Campioli, Anna Mangiarotti, *Frammenti di coscienza tecnica*, Franco Angeli, Milano, 1994, p. 67.
- ⁵ Wiedemann Josef, "Il legno nella nostra vita", in Natterer Julius, Thomas Herzog, Michael Volz, *Atlante del Legno*, UTET, Torino, 1998, pp. 10-11.
- ⁶ Barbisan Umberto e Roberto Masiero, *Il labirinto di Dedalo. Per una storia delle tecniche dell'architettura*, Franco Angeli, Milano, 2000, p. 145.
- ⁷ Nardi Guido "Dal legno alla pietra: la cultura tecnica del legno tra oblio e reminescenza", *Adrastea*, n. 3, 1995.
- ⁸ <http://www.demauroparavia.it/97952>.
- ⁹ Concetto contenuto nel Rapporto Our Common Future (1987) della World Commission on Environment and Development (Commissione Brundtland), che gli diede la sua accezione più nota, ossia si tratta dello sviluppo che "garantisce i bisogni delle generazioni attuali senza compromettere la possibilità che le generazioni future riescano a soddisfare i propri".
- ¹⁰ Cfr. www.progettoprisma.net, www.corpoforestale.it.
- ¹¹ Nel 1972 la Conferenza di Stoccolma è la prima, su scala mondiale, a toccare i temi ambientali e ad adottare una Dichiarazione all'interno della quale la tutela dell'ambiente diventa parte integrante dello sviluppo compatibile con le esigenze di salvaguardia delle risorse, e in questo contesto la Terra è intesa come capitale da preservare, nel rapporto critico tra crescita ed ecosistema e del processo irreversibile costituito dallo sfruttamento delle risorse non rinnovabili.
- ¹² La formaldeide, aldeide dell'acido formico, è un gas incolore e dall'odore acre e irritante; molto solubile in acqua, reattivo in molte sintesi. Trova larghissimo impiego nella fabbricazione di resine sintetiche, colle, solventi, conservanti, disinfettanti e deodoranti, detergenti, cosmetici, tessuti. Largamente utilizzato nei materiali di costruzione, schiume isolanti, presente nel fumo di sigaretta, trova vasto impiego nelle tecniche di imbalsamazione. Può provocare, irritazione delle mucose oculari e delle prime vie aeree, iperattività bronchiale e asma.
- ¹³ Cfr. Dattomi Aldo, "i compositi a base di legno di nuova generazione", *Adrastea*, 8, 1997, pp. 30-43; www.wikipedia.org.
- ¹⁴ sostanza organica complessa che, con la cellulosa, è uno dei costituenti essenziali del legno, è un sottoprodotto dell'industria dell'estrazione della cellulosa, usato come adesivo e combustibile nella fabbricazione di laminati plastici e nell'industria cartotecnica.
- ¹⁵ Capasso Aldo, "Il legno: un materiale tradizionale per nuove produzioni", in Gangemi Virginia (a cura di), *Architettura e tecnologia appropriata*, FrancoAngeli, Milano, 1985, p. 211.
- ¹⁶ cfr. Martitegui Francisco Arringa, "Estructuras de madera", *Tectonica* n. 13, 2001.
- ¹⁷ Frampton Kenneth, "I tecnocrati della Pax Americana: Wachsmann & Fuller", in *Casabella*, n. 542-543, 1988, p. 43.
- ¹⁸ Brusati Gianfranco, Franco Laner, "Dal legno lamellare fibrinforzato al quadralam", *Adrastea* n. 13, 1999.
- ¹⁹ Si tratta di un legno "multilaminare" ossia una specie di microlamellare. Viene prodotto tramite derullati ricavati direttamente dal tronco, sovrapposti e incollati a pressione. L'aspetto esteriore non è

particolarmente interessante, ma il materiale possiede alcune caratteristiche innovative. Uno degli usi più interessanti è quello della realizzazione di anime di travi composte.

²⁰ Cfr. Dattomi Aldo, "I compensati a base di legno di nuova generazione (parte seconda)", *Adrastea* n. 9, 1997.

²¹ Cfr. www.finnforest.com.

²² Dattomi Aldo, "I compensati a base di legno di nuova generazione (parte terza)", *Adrastea* n. 10, 1997, p. 37.

²³ Profilo strutturale realizzato tramite accoppiamento per incollaggio, secondo l'altezza della sezione, di due segati con effetto di compensazione e possibilità di sezioni maggiori. Risposta interessante alla richiesta di materiali simili al legno massello ma più affidabili.

²⁴ Sistema di accoppiamento, tramite piastre dentate e pressate di segati a sezione longitudinale tronco-conica, per evitare gli sfridi di lavorazione derivanti dalla riduzione del tronco in segati a facce parallele.

²⁵ Brevetto di origine nord americana per la formazione di composti a grandi trucioli (30 cm di lunghezza per 2,5/4 cm di larghezza e 9 mm di spessore) ricavati da fenditura di tronchi di pioppo. I trucioli vengono cosparsi di resine poliuretaniche e, previo orientamento della loro fibratura, ricomposti tramite pressatura in lastre o travi.

²⁶ Parallel Strand Lumber, composito a listelli paralleli di legno da 2-3 cm di larghezza, 2-3 mm di spessore, fino a 2,5 m e resine, prodotto esclusivamente dalla Nordamericana Trust Joist Mac Millan. Il legno è ricavato da sfogliati di resinose come il Douglas e pino (conifere molto resistenti) oppure le latifoglie quale il pioppo (rapido accrescimento). La massa volumica è pari a 600 kg/m³ con contenuto di resina inferiore al 12%. Spiega Bruno Alessandri in "Il Parallam Pls", *Adrastea* n. 4, 1995, che sul versante economico il PLS, sul mercato europeo, costa il 30% in più del LL. Un impianto di LL costa 10 volte in meno e molto meno onerosi sono i costi di gestione degli impianti e ciò dipende anche dal fatto che esiste un unico depositario del brevetto. Sul versante ecologico, le specie legnose per il PLS sono più varie e il processo di sfogliatura ha meno residui rispetto alla segazione delle tavole per il LL, ma il massiccio uso di colle lascia forti interrogativi.

²⁷ della Fontana Jacopo, "Il legno", *Arca*, n. 112, febbraio 1997, p. 2.

²⁸ cfr. Ricci Maurizio, "In Amazonia la guerra del legno così scompare l'ossigeno dal pianeta", *Repubblica* 28 novembre, 2003.

²⁹ 1000 Cfa = 1,5 euro circa.

³⁰ Alcune essenze legnose tropicali hanno specifiche proprietà irritanti.

³¹ Il lindano è un insetticida a largo spettro introdotto sin dai primi anni '50, in sostituzione dell'HCH. L'HCH era stato sintetizzato nel 1825 da Faraday ed è stato utilizzato per le sue proprietà antiparassitarie dal 1942 (WHO, 1991). Il lindano ha trovato impiego soprattutto nel trattamento dei suoli, degli alberi da frutta e del legname; ma anche come prodotto antiparassitario per gli animali domestici e d'allevamento e in alcuni preparati farmaceutici per la cura e la prevenzione nell'uomo della scabbia. Attualmente il lindano non è compreso fra i principi attivi autorizzati come farmaci zootecnici in Europa.

³² Il pentaclorofenolo è un biocida universale, caratterizzato da un'alta persistenza nell'ambiente e da scarsa biodegradabilità e danneggia l'ambiente per un lungo periodo di tempo. E' uno dei biocidi più noti e utilizzati per il trattamento antiparassitario del legno e dei tessuti; impiegato anche dalle industrie conciarie, della cellulosa, della carta, delle vernici. In natura, il pentaclorofenolo è altamente inquinante, specialmente nelle acque e può causare mortalità della fauna ittica ed inquinare le acque superficiali e alle falde acquifere del sottosuolo. È direttamente in relazione con alcune tipologie di cancro, come la leucemia o il cancro allo stomaco; può causare problemi al sistema endocrino, danneggiare il fegato, i reni ed il sistema nervoso.

³³ Gli impiegati che li devono maneggiare solitamente non hanno sistemi di protezione adeguati, e

spesso non sono neppure ben informati del rischio che corrono.

³⁴ In violazione delle restrizioni imposte dalla legge, come il divieto di taglio di alberi Moabi a meno di 5 km dal più vicino villaggio.

³⁵ Nel caso dell'ecologia e dello sviluppo, (spiega Giorgio Nebbia in *Lo sviluppo sostenibile*, Edizioni Cultura della Pace, Firenze, 1991) si ritiene insostenibile una crescita economica fondata sullo sfruttamento di risorse naturali non rinnovabili tale da determinarne l'esaurimento, o sull'uso di risorse naturali rinnovabili quali, foreste, acqua e suolo al di là delle loro possibilità di rigenerazione o, che determini il graduale deterioramento della loro qualità come la desertificazione, l'inquinamento di acqua e aria, l'impoverimento della fertilità del suolo.

³⁶ <http://www.fsc-italia.it>, Sito ufficiale dell'Associazione italiana Foresta Stewardship Council. Gli enti nazionali e internazionali che hanno sviluppato un sistema per la valutazione delle colture boschive ecologicamente e socialmente sostenibili, possono presentare domanda per divenire certificatori Fsc. Al momento esistono solo 6 ditte in tutto il mondo, in grado di rilasciare questi certificati; ma ci sono già 10 milioni di ettari di foresta, in 26 paesi del mondo che hanno ricevuto questo certificato.

³⁷ Cfr. Zanuttini Roberto, "Il legno e i suoi possibili impieghi nel contesto delle olimpiadi di Torino 2006", in www.federlegno.it/associazioni/asselegno/pdf/articolo.pdf.

³⁸ Dati ricavati dal sito <http://www.fsc-italia.it>.

³⁹ Laner Franco, "Vecchi morfemi per nuovi tecnemi", *Materia*, n. 36, settembre dicembre 2001, p. 22-27.

⁴⁰ I compositi a base di legno contengono una maggiore quantità di resina rispetto al lamellare che pertanto risulta meno inquinante.

⁴¹ Cfr. Davoli Pietromaria, "Sostenibilità dei componenti in parallam" in *Costruire con il legno*, Hoepli, Milano, 2001, pp. 187-188.

⁴² Cit. in Baldo Gianluca, Massimo Marino, Stefano Rossi, *Analisi del ciclo di vita Lca, materiali prodotti, processi produttivi*, Edizioni Ambiente, Milano, 2005.

⁴³ Cfr. Zanuttini Roberto e Lavici Paolo, *Strutture in legno: analisi del ciclo di vita e certificazioni*, in www.saie.bolognafiere.it/standard.asp?l=1&m=19&p=SAIE2001Focus_14, e www.scienceinthebox.com.

⁴⁴ Alcuni ambiti principali sono: ecologia, salute, effetti su salute e sicurezza dell'uomo, risorse, riflessi sociali.

⁴⁵ Causato dalla presenza nell'atmosfera di gas che assorbono la radiazione infrarossa emessa dalla terra.

⁴⁶ Rilascio di sostanze nell'ambiente quali fertilizzanti, scarichi industriali e urbani, in genere ricchi di azoto e fosforo, che costituiscono un incremento dell'apporto di nutrienti agli organismi viventi (la cui crescita è regolata naturalmente dalla limitazione delle sostanze nutrienti essenziali), con conseguente abbassamento della concentrazione di ossigeno e quindi con effetti negativi sull'intero ecosistema.

⁴⁷ Cfr. Berti Stefano, Maurizio Piazza, Roberto Zanuttini, *Strutture di legno per un'edilizia sostenibile*, Il Sole24ore, Milano, 2002, p. 291-294.

⁴⁸ Dati ricavati dal sito www.holzbau.com e da Berti Stefano, Maurizio Piazza, Roberto Zanuttini, "Materia prima e prodotti", *Strutture di legno per un'edilizia sostenibile*, Il Sole 24 ore, Milano, 2002, p. 16.

⁴⁹ Cfr. Zanuttini Roberto e Lavici Paolo, *Strutture in legno: analisi del ciclo di vita e certificazioni*, in www.saie.bolognafiere.it/standard.asp?l=1&m=19&p=SAIE2001Focus_14.

⁵⁰ Dati ricavati da: Lavisci Paolo, *Il confort termico nelle strutture in legno*, Atti del convegno *Legno & Edilizia 2000: Sicurezza e confort nelle abitazioni con strutture di legno*, su www.infobuild.com

- ⁵¹ Testo pubblicato sul sito www.holzbau.com (il grassetto è mio).
- ⁵² Cunningham William P., *Fondamenti di ecologia*, McGraw-Hill, Milano, 2004, p. XI.
- ⁵³ Berti Stefano, Maurizio Piazza, Roberto Zanuttini, *Strutture di legno per un'edilizia sostenibile. Materie prime e prodotti, progettazione e realizzazione*, Il Sole 24 ore, Milano, 2002, p. 16.
- ⁵⁴ Sull'argomento: www.populus.it, sito del Isp, Istituto di sperimentazione per la pioppicoltura.
- ⁵⁵ cfr. Caironi Mario, Luigi Bonera, *Il legno lamellare, il calcolo*, Habitat Legno S.p.A., Edolo (BS), 1989, p. 16.
- ⁵⁶ Cunningham William P., *Fondamenti di ecologia*, McGraw-Hill, Milano, 2004, p. 198.
- ⁵⁷ Legno scuro molto resistente agli agenti atmosferici. Cresce in boschi di pianura o di collina, fino a 1200 - 1400 metri, in Europa meridionale, Africa settentrionale, Asia minore. È uno dei principali componenti della flora forestale appenninica. La sua diffusione, soprattutto come pianta coltivata, ha raggiunto il culmine verso la metà del secolo scorso, quando la castagna costituiva un importante alimento per buona parte della popolazione. Ultimamente il castagno viene anche importato,

2. Per un'ipotesi di utilizzo sostenibile del legno in architettura fondata sull'uso dei semilavorati di piccola dimensione

2.1 Verso un utilizzo sostenibile del legno in architettura.

2.2 Progettare a partire da semilavorati del legno di piccole dimensioni: architetture realizzate.

Frei Otto, Mannheim Lattice Shell Federal Garden Exhibition, 1971: Il precursore dei Gridshell

Renzo Piano e Ove Arup & Partners, Padiglione Itinerante Ibm, 1983: Sulla disponibilità dei piccoli elementi in legno a ibridarsi con altri materiali nella realizzazione di strutture

Tadao Ando, Padiglione del Giappone all'Expo di Siviglia, 1992 e Tempio Komyo-ji-Saijo (della Terra Pura), Saijo, 2000: Strutture composte da elementi semplici assemblate in forme complesse e resistenti

Shigeru Ban, Thomas Herzog e Peter Zumthor, edifici dell'Expo 2000 di Hannover: Sulla "vera" riciclabilità delle costruzioni in legno

Shigeru Ban, Wickerwork House, Nagano, 2001: Il trionfo del principio della tessitura, una copertura come un grande cesto intrecciato

Ville Hara, Torre di avvistamento dello Zoo di Helsinki, 2002: I gusci a griglia con struttura semplice

Edward Cullinan, Downland Gridshell per il Weald & Downland Open Air Museum, Sussex, 2002: Gridshell a doppia maglia

2.3 Campi di utilizzo nel settore edile di strutture in legno naturale

2.4 Progettare a partire da semilavorati del legno di piccole dimensioni: vincoli produttivi e vincoli progettuali della struttura

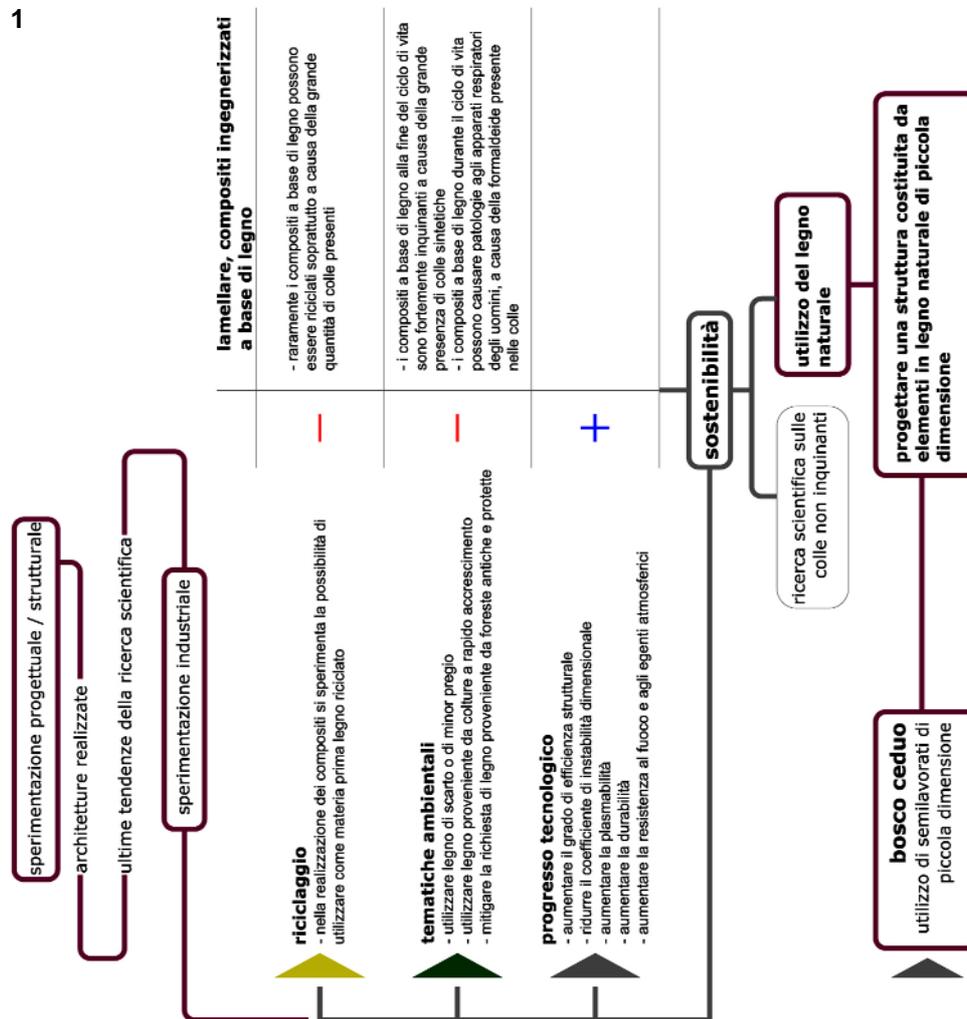


Fig. 1: schematizzazione del processo che ha portato alla definizione dell'obiettivo della tesi. I tre temi segnati dalle frecce (riciclaggio, tematiche ambientali e progresso tecnologico) derivano dallo schema presentato nel capitolo 1, relativo all'uso del legno di piccole dimensioni in architettura. Sul tema del riciclaggio e della salvaguardia dell'ambiente, i nuovi materiali a base di legno presentano non pochi problemi, la cui risoluzione potrebbe trovarsi nello studio di colle non tanto inquinanti quanto quelle attualmente disponibili. Questa analisi, incrociata con i temi relativi all'utilizzo di semilavorati derivanti da bosco ceduo, porta alla definizione dell'obiettivo.

2.1 Verso un utilizzo sostenibile del legno in architettura

Dalle coperture di grande luce, alla pelle degli edifici, dal settore edilizio a quello dell'arredamento, il legno, pur conservando le sue caratteristiche di materiale naturale e con la sua secolare tradizione costruttiva, si sta caricando di nuovi e raffinati contenuti tecnologici, e si configura ancora oggi come un "supermateriale" dal grande potenziale tecnico, adatto a essere impiega-

to nelle costruzioni a basso costo, e soprattutto ecologico¹ grazie, per esempio, alla possibilità che offre di essere utilizzato integralmente, dai resti dei semilavorati al massello vero e proprio e in azione combinata con altri materiali che ne migliorano le prestazioni. Le macchine a controllo numerico e le nuove applicazioni informatiche permettono tagli, connessioni e forme impensabili fino a pochi anni fa. Tuttavia, nonostante i molteplici vantaggi, ancora oggi nell'Europa centrale la costruzione di case unifamiliari in legno è pari solo al 10% del totale².

Fin qui, la domanda centrale è stata: esiste un uso sostenibile del legno? Accertato il principio per cui non solo esiste un uso sostenibile del legno, ma che addirittura questo uso potrebbe contrastare il dilagare delle pratiche fraudolente di taglio illegale con conseguente depauperamento del patrimonio forestale planetario, le domande che si sono immediatamente poste sono le seguenti: esiste una possibilità di utilizzare il legno per la produzione di sistemi o componenti economicamente e prestazionalmente appetibili per l'attuale mercato dell'edilizia? E se a questa domanda si può rispondere affermativamente, è possibile restare competitivi senza rinunciare a coniugare la piccola dimensione del semilavorato ligneo di partenza proveniente dai boschi del ceduo con sistemi di assemblaggio che – fin quando l'industria chimica non avrà messo a punto sistemi di incollaggio veramente ecologici – prescindano completamente dall'utilizzo delle colle attualmente disponibili?

Provare a immaginare un prodotto industriale che consentisse di rispondere affermativamente alle due domande precedenti ha significato, durante tutto il corso della ricerca, porsi l'obiettivo di progettare una struttura assemblata a secco in cui alla riduzione della dimensione degli elementi utilizzati corrispondesse un aumento del loro numero e, quindi, un aumento dei sistemi di giunzione e dei nodi. Per raggiungere l'obiettivo, senza indirizzare la produzione verso un target di costruzioni minute o verso una improponibile miniaturizzazione di tipologie esistenti, si deve immaginare che oggetti correntemente prodotti o realizzati con un pezzo unico vengono scomposti in parti più piccole che una volta assemblate ricompongano un elemento di

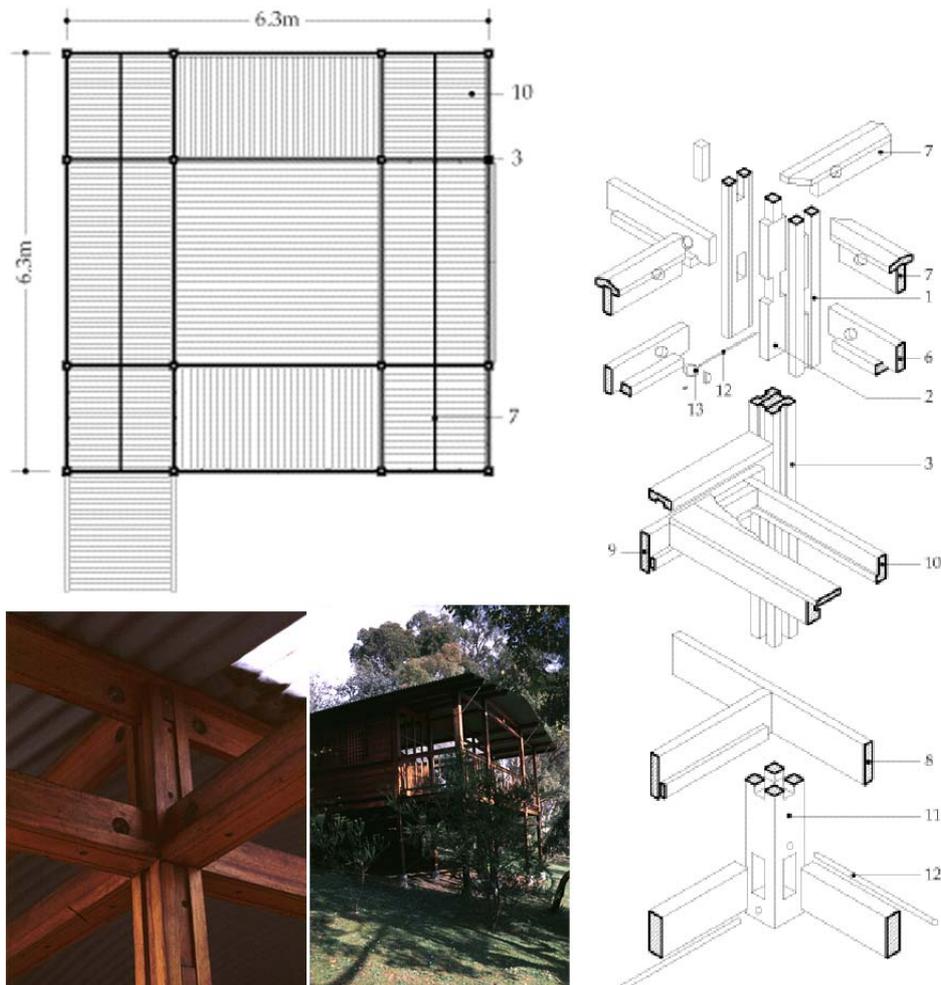


Fig. 2: Royal Tasmanian Botanical Garden, Tasmania, 1980, progettato da Helen Bennetts, Gabriele Calcagno, Shelley Indyk, Richard Le Plastief, Greg Methé, Sue Smith and Andrew Sutherland. Il team di progettazione si è posto l'obiettivo di realizzare questo manufatto (detto Wonbat 1) come prototipo per la sperimentazione di un sistema di costruzione con elementi lignei di modeste dimensioni, facilmente rinvenibili in situ, con un sistema di montaggio rapido e semplice. I nodi strutturali sono bloccati con aste filettate, mentre le pareti sono pannelli sandwich a doppia orditura collaborante. Travi e pilastri sono composti da elementi 90x30 mm.

dimensioni ordinarie.

L'ipotesi posta alla base di questa ricerca, quindi, somiglia ad alcuni ragionamenti sviluppati dai primi utilizzatori delle strutture reticolari metalliche che, come notano Giulio Pizzetti e Anna Maria Zorgno Trisciuglio, incominciarono «a sostituire all'anima piena una tralicciatura multipla molto fitta, alla quale non erano certo estranei taluni schemi tralicciati in orditura lignea già sfruttati in precedenza e riportati nell'Album di Villard de Honnecourt ed in parte reperibili nel Codice Atlantico di Leonardo, nonché numerosi ponti palladiani e, soprattutto le singolari esperienze compiute in Svizzera a partire dalla seconda metà del XVII secolo, nelle quali si ravvisa l'intento di proporre una figura strutturale ibrida "arco-trave"». Questi antesignani del reticolare operavano con il legno e, ancora vincolati alle massime dimensioni raggiungibili con i grandi tronchi, cercavano di superare i limiti imposti frazionando gli oggetti in pezzi minuti e ri-assemblandoli rispettando nuove logiche costruttive.

Questo lavoro assume come ipotesi di partenza la stessa logica, quasi a completare un percorso iniziato molto tempo fa, e si assegna l'obiettivo (v. lo schema in figura 1) di **progettare una sistema o un componente edilizio che da un lato utilizzi molti pezzi piccoli per realizzare cose che abitualmente si costruiscono con pochi elementi grandi, e, dall'altro, usi per collegare queste parti metodi di giunzione non fondati sull'uso dei collanti attualmente disponibili sul mercato.**

2.2 Progettare a partire da semilavorati del legno di piccole dimensioni: architetture realizzate

Scrivono Franco Laner nel 2001 «nonostante la pur recente, ma notevole innovazione tecnologica – di processo e di prodotto – le opere realizzate col legno assai raramente sono opere di architettura. Qualche volta sono buona edilizia, per lo più è tettonica, accozzaglia di aste e puntoni, miseri telai nel piano, semplice sopravvivenza di linguaggi e concezioni, acriticamente riciclati da altri materiali e sistemi costruttivi. Questo duro giudizio non vale

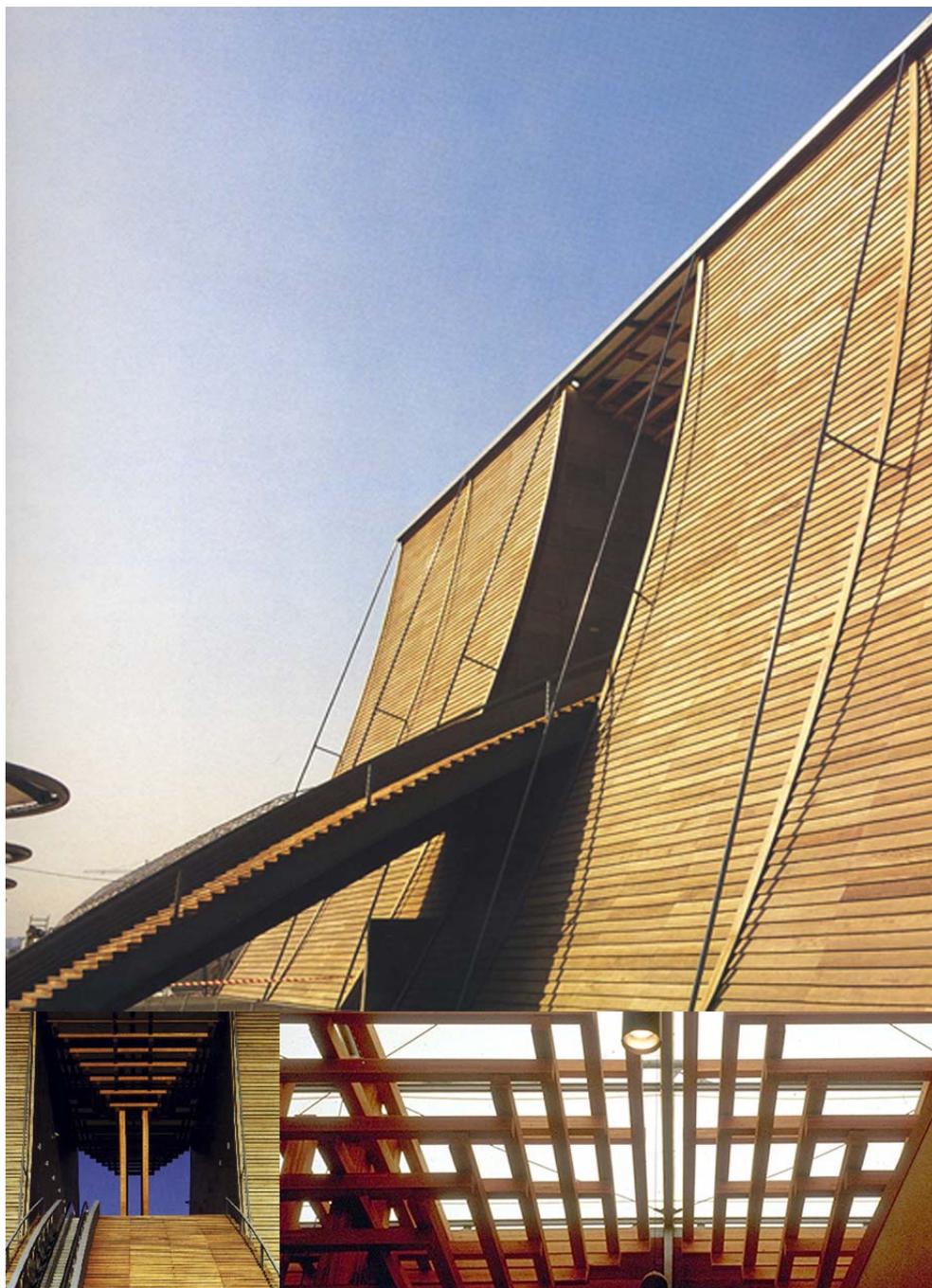


Fig. 3: Tadao Ando, Padiglione del Giappone all'Expò di Siviglia, 1992.

solo per l'architettura col legno, ma anche costruttivamente c'è da meditare, a partire dall'impostazione teorico-tecnica, che non riesce a svincolarsi dalla cultura del c.a. e dai suoi schematismi e modelli»³. Provocatoriamente Laner insiste sulla necessità di riportare all'interno del progetto di architettura l'arte del costruire attraverso la reinterpretazione di antichi materiali (il legno massello) e l'impiego intelligente di nuovi prodotti (compositi ingegnerizzati a base di legno) poiché «senza l'intelligente impiego dell'innovazione tecnologica e dei nuovi concetti di prodotto, è quasi impossibile fare architettura, che è interpretazione, o perlomeno conferma, del sedime culturale e tecnico, oltre che spirituale, dell'epoca in cui si opera»⁴. Ma è proprio grazie alla versatilità e alla flessibilità del legno e a una sorprendente ripresa dell'utilizzo di questo materiale, che siamo oggi spesso di fronte alla sperimentazione di strutture di notevole impegno statico in cui sono stati raggiunti risultati formali molto interessanti capaci di risvegliare l'interesse per questo materiale e di promuoverne un uso sempre più ardimentoso; Guido Nardi, infatti, alcuni anni prima, elogiava la «ricerca architettonica che, con grande sensibilità per le caratteristiche organiche del legno e con grande cultura della prassi costruttiva della carpenteria, ripropone l'impiego del legno nella sua struttura naturale. In questi casi si assiste alla ripresa della cultura dell'assemblaggio a secco mediante incastro, come nel padiglione dei Royal Botanical Gardens progettato da Richard Le Plastief e realizzato nel 1982 a Hobart in Tasmania, oppure all'ancora più emblematico padiglione progettato da Tadao Ando nel 1992 per l'Expo di Siviglia, dove il legno costituisce il punto di unione tra natura e artificio, tra innovazione tecnica e prassi costruttiva consolidata»⁵. E infatti, sempre più spesso, anche grazie alla spinta di nuovi software per la modellazione tridimensionale e per la prototipazione, alla crescente sensibilità per un materiale sostenibile, nonché alla commercializzazione di nuovi materiali a base di legno, iniziano ad arrivare anche dai grandi architetti dello "star system" internazionali nuovi impulsi per una nuova interpretazione dell'architettura in legno.

Le architetture che di seguito verranno analizzate, sono state scelte tra quelle in cui l'utilizzo del legno (naturale e lamellare) appare particolarmente

significativo rispetto al tema della costruzione con elementi lignei di piccole dimensioni: non già quindi cassette in tronchi o tipo *Balloon Frame*, bensì quelle architetture che indagano le possibilità espressive offerte dal legno nel campo delle strutture in coazione (dove gli elementi, come spiega Laner «sono messi in forza, costretti, in altre parole a non dormire mai»⁶, come nel caso del fasciame montato in flessione per gli scafi) e soprattutto di quelle in cui gli elementi lavorano *per forma* (per esempio le intelaiature a graticcio orientate nello spazio tridimensionale).

Si è dunque scelto di analizzare quelle architetture in cui è significativa la relazione tra il piccolo formato dell'elemento ligneo di partenza e la grande dimensione dell'oggetto finito, analizzando con particolare attenzione quelle opere in cui l'uso combinato del legno con altri materiali ne migliora sensibilmente le prestazioni. I prodromi di queste architetture risalgono alla secolare tradizione costruttiva in legno che parte dalle tende dei nomadi, formata da pali di legno a sostegno di una tenda⁷, dalle teorizzazioni scientifiche rinascimentali frutto di scambio tra i carpentieri navali e i carpentieri edili, dagli studi di Philibert De L'Orme nel 1561 contenuti nel suo libro intitolato *Nouvelles inventions pour bien bâtir* in cui si descrive la tecnica di una struttura in legno composta per assemblaggio di segmenti sottili.

E ancora ci si è ispirati al tema della "tessitura" che è merito di Gottfried Semper aver messo in luce originariamente ed interpretato nella sua *Die vier Elemente der Baukunst* (I quattro elementi dell'architettura), opera in gran parte scritta nel 1850. L'allineamento, il coronamento, la merlatura, la bordatura, il rivestimento, la cucitura, sono tra le parole chiave utilizzate da Semper, ma bisogna riferirsi anche alla regola essenziale della tessitura, l'intreccio tra trama e ordito, per individuare la matrice della struttura che informa le architetture scelte. Come spiega Kenneth Frampton, «Semper affermava che il primo manufatto strutturale in assoluto era il nodo, da cui deriverebbe la cultura edilizia primitiva dei nomadi, riferita alla tenda e alla tessitura. (...) Quindi, secondo Semper, l'elemento fondamentale era il giunto o il nodo»⁸, come preannunciato all'inizio del capitolo sulla tessitura dove diventa centrale il discorso sulla linea di giunzione. Nell'opera successiva,

*Der stil in den technischen und tektonischen Künsten*⁹ del 1860¹⁰, Semper attribuisce a ciascuno dei quattro elementi precedentemente trattati, altrettanti mestieri da artigiano: «la tessitura apparteneva all'arte della delimitazione e, di conseguenza, alle pareti laterali e al tetto; la carpenteria all'ossatura strutturale di base; la muratura al basamento; la metallurgia e la ceramica al focolare»¹¹. Naturalmente l'enunciazione di questi principi risente del clima culturale in cui Semper è immerso e quindi si riferisce alle scomposizioni tipiche della architettura classica, ma è naturale che un'attualizzazione di questo pensiero consente di estendere il settore di pertinenza della tessitura alle strutture portanti, storicamente appannaggio dell'azione della carpenteria. Come Sergio Pone sostiene in un suo recente scritto alcuni straordinari edifici realizzati nel corso del XX secolo «sono costruzioni “tutte struttura” in cui è l'involucro a dissolversi nella magia della superficie laminare che assorbe nella sua essenzialità, la gran parte dei sistemi che abitualmente compongono l'edificio»¹².

Indice delle architetture scelte:

Frei Otto e Langner Architects, Federal Garden Exhibition, Mannheim, 1971: *Il precursore dei Gridshell*

Tadao Ando, Padiglione del Giappone all'Expo di Siviglia, 1992 e Tempio Komyo-ji-Saijo (della Terra Pura), Saijo, 2000: *Strutture composte da elementi semplici assemblate in forme complesse e resistenti*

Shigeru Ban, Thomas Herzog e Peter Zumthor, edifici dell'Expo 2000 di Hannover: *Sulla “vera” riciclabilità delle costruzioni in legno*

Shigeru Ban, Wickerwork House, Nagano, 2001: *Il trionfo del principio della tessitura, una copertura come un grande cesto intrecciato*¹³

Ville Hara, Torre di avvistamento dello Zoo di Helsinki, 2002

I gusci a griglia con struttura semplice

Edward Cullinan, Downland Gridshell per il Weald & Downland Open Air Museum, Sussex, 2002¹⁴

Gridshell a doppia maglia

Per ciascuna di queste opere, le informazioni riportate partono dai dati “anagrafici”, i dati dimensionali dell’intero manufatto, i dati dimensionali e le caratteristiche fisiche dell’elemento unitario, i tipi di materiali impiegati, il rapporto tra le dimensioni dell’elemento unitario e quelle dell’intera struttura (che fornisce la pertinenza della scelta dell’architettura rispetto ai criteri informatori di questa ricerca), il numero di elementi unitari utilizzati, il modo in cui la piccola assicella di legno o legno lamellare dialoga con la forma dell’architettura finale, anche per interpretare in modo più chiaro il legame tra questa forma e il suo funzionamento statico.

Ovviamente per ciascuna opera sono indicati: nome del o dei progettisti, nome dell’opera, luogo di realizzazione, anno di realizzazione, funzione, fonti delle informazioni. Questa descrizione è accompagnata da un’immagine significativa dell’opera inserita nel suo contesto e di un’altra, che restitui-

Fig. 4: Frank Lloyd Wright, Romeo and Juliet Windmill, 1896.

La struttura della torretta ha una pianta a losanga, chiamata Romeo, che protegge l’edificio dal vento di sud ovest, Juliet, la parte di forma ottagonale si erge a formare una torre di avvistamento verso la valle.

(fonte dell’immagine: www.bluffton.edu)



sce la complessità del sistema costruttivo.

Ogni opera è stata poi analizzata in dettaglio per poter individuare (in mancanza di letture tecnologiche specifiche) i principali aspetti tipologico-dimensionali della struttura, per definire il sistema strutturale di appartenenza, in alcuni casi anche attraverso una rielaborazione tridimensionale degli elementi costruttivi, finalizzata a evidenziarne gli aspetti principali.

Si passa poi all'analisi dimensionale del manufatto, considerando le **dimensioni del manufatto in generale** in cui sono riportate le dimensioni di altezza lunghezza e larghezza dell'intero manufatto e le **dimensioni dell'elemento tecnico unitario** che compone il tutto, in cui sono riportate le dimensioni di altezza lunghezza e larghezza del modulo unitario; a seguire è riportato il **numero di elementi unitari**. Dalla definizione di questi tre valori si intende verificare quale è il rapporto tra la dimensione dell'elemento unitario (e quindi la sua leggerezza) e la dimensione del manufatto nella sua interezza, che, come già detto, risponde all'idea di studiare quelle architetture realizzate dall'assemblaggio di parti minute in legno (e affini) che compongono architetture di grande dimensione rispetto all'elemento unitario.

Questo stesso metodo di analisi dimensionale, può essere applicato anche al sistema di completamento, come dimostra il caso dell'ingresso all'Esposizione Universale di Hannover di Thomas Herzog¹⁵, la cui struttura secondaria, sostenuta da travi reticolari, è formata da un intreccio di piccoli travetti in lamellare che consentono la realizzazione della caratteristica copertura a guscio a doppia curvatura coperta poi a sua volta da una membrana in Ptfе-Etfe, riciclabile al 100%, non infiammabile, dotata di alta capacità autopulente e traslucida, fissata con funi ancorate ai costoloni longitudinali, distante 5 cm dal reticolo stesso.

Un celebre antesignano delle opere di seguito analizzate e che presenta in maniera evidente l'integrazione di piccoli elementi in un tessuto resistente è del maestro americano Frank Lloyd Wright, profondamente affascinato dai nuovi usi che le moderne tecnologie consentivano di fare del materiale legno: quando, come racconta durante una conferenza, nel 1901 «la macchi-

na ha liberato questa bellezza naturale del legno, ha permesso di eliminare la grande quantità di torture insensate a cui il legno è stato assoggettato dall'inizio del mondo, dato che è stato universalmente sottoposto ad abusi e maltrattamenti da parte di tutti i popoli, tranne che dai Giapponesi»¹⁶. Questa capacità della macchina di modellare il legno in serie, nonché la possibilità di realizzare un ordine ripetitivo eppure variabile con il sistema a *balloon frame*, è espressa nel «*Romeo and Juliet Windmill* (mulino a vento Romeo e Giulietta), realizzato da Wright nel 1896 (v. figura 2), che si presenta come una trama intrecciata, costituita da assicelle e da traversi orizzontali di legno¹⁷. (...) In un modo o nell'altro, un approccio di tipo a trama intrecciata allo spazio architettonico, forse tratto in qualche misura dal sistema Froebel, di cui Wright era a conoscenza fin dall'infanzia, predominò durante tutta la sua lunga carriera»¹⁸. Lo stesso Wright spiegherà magistralmente in una lettera indirizzata alle zie-committenti il principio ispiratore della metodologia a listoni e doghe: «Ognuno dei due è indispensabile all'altro; l'uno non potrebbe esistere senza l'altro. Romeo, come vedrete, sbrigherà tutto il lavoro e Giulietta gli si stringerà contro per sorreggerlo ed esaltarlo»¹⁹.

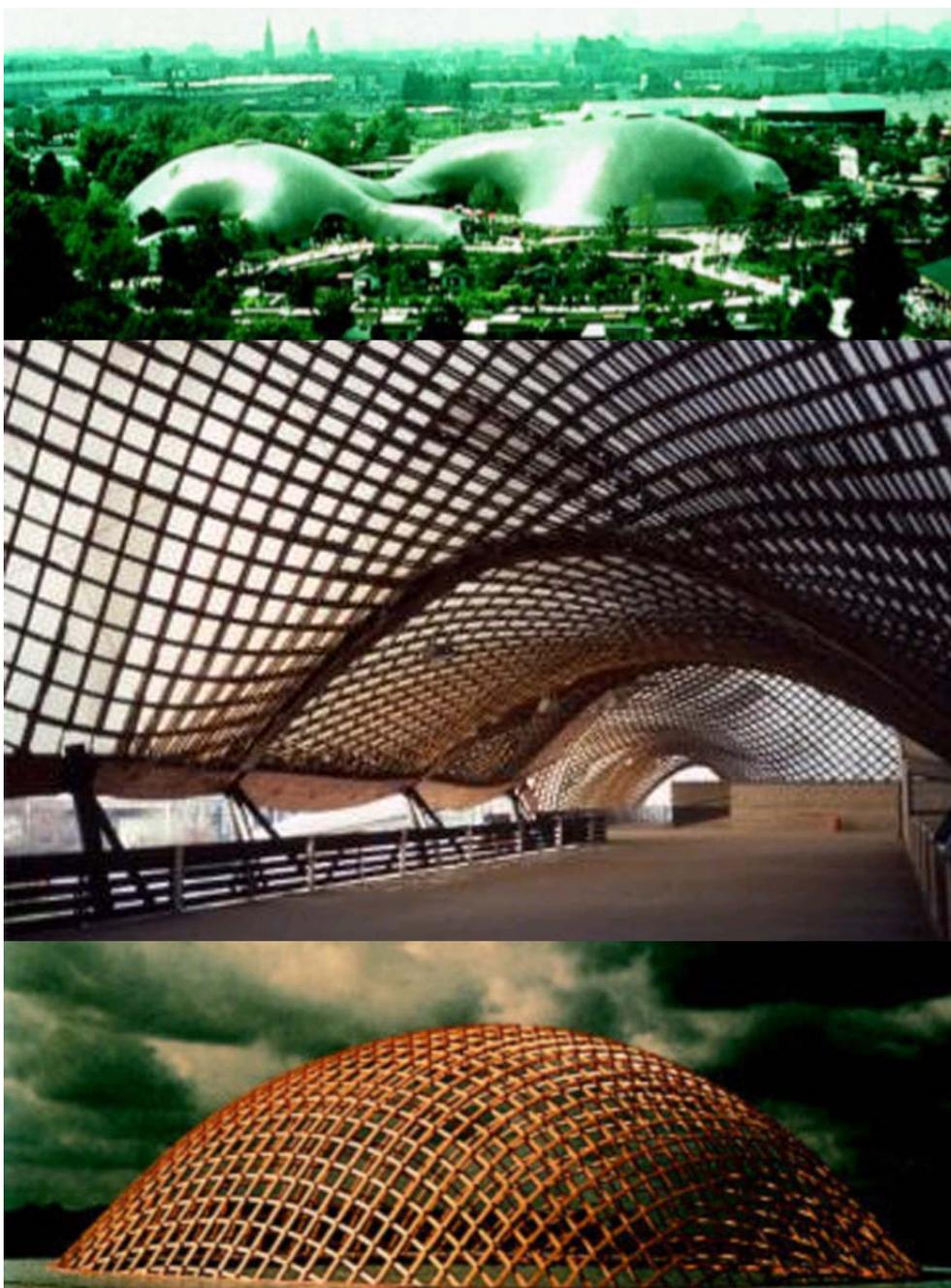


Fig. 5: Frei Otto, Mannheim Lattice Shell per la Federal Garden Exhibition, 1971.

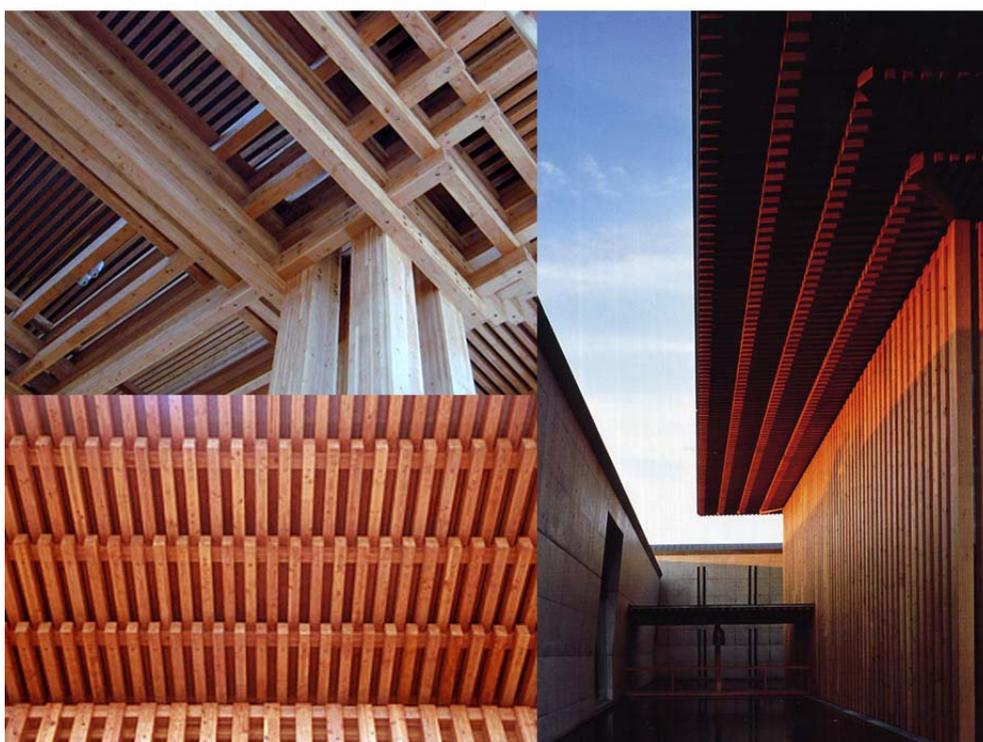
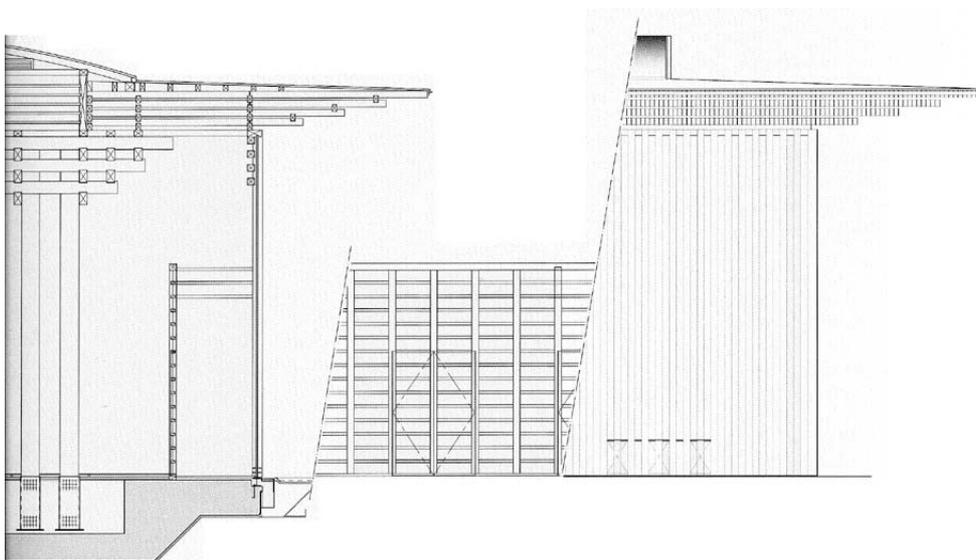


Fig. 6: Tadao Ando, Tempio Komyo-ji-Saijo (della Terra Pura), Saijo, 2000.

Frei Otto, Mannheim Lattice Shell per la Federal Garden Exhibition, 1971

Il precursore dei Gridshell

Circa ottanta anni dopo, Frei Otto dimostra con un'opera di straordinario ingegno e abilità costruttiva le incredibili possibilità dell'utilizzo delle "tessiture" in elementi lignei di sezione ridotta per la realizzazione di una copertura di grande luce: si tratta del Mannheim Lattice Shell per la Federal Garden Exhibition del 1971, sottilissimo guscio formato dall'unione di un doppio strato di assicelle di legno 50x50 mm di sezione giuntati ogni 50 cm, concepito in collaborazione con il gruppo di progettazione Carlfried Mutschel and Partners' e, per i calcoli statici, con il gruppo di specialisti della Ove Arup, noti come *Structures 3*, Edmund "Ted" Happold, Ian Liddel e Michael Dickson; il tutto realizzato grazie alla maestria del costruttore Wilhelm Poppensieker, della Michael Gärtner GmbH e della Wehmeyer GmbH & Co. Per questa opera, sono stati utilizzati ben 72 km di assicelle di abete canadese collegate tra loro in una griglia a doppio strato, per una superficie complessiva di 4700 m². La griglia è stata portata alla sua particolare forma tridimensionale facendo uso di impalcature a torre; una volta in posizione i nodi sono stati bloccati e fissati ai piloni; quindi utilizzando un sistema di cavi, che hanno anche funzione di controvento, è stata solidarizzata la pelle alla struttura.

Il carico è trasferito ai nodi per l'attrito indotto dai bulloni; la forma della struttura e il suo sistema di giunzioni è tale per cui un carico verticale uniformemente distribuito determina solo sforzi di compressione nelle aste; la spinta laterale del vento o quella asimmetrica della neve è comunque assorbita dal sistema di cavi che corre in diagonale rispetto alla griglia. Con i suoi 80 metri di massima luce libera, è una delle più grandi coperture resistenti a compressione²⁰. Il Mannheim Lattice Shell mette in luce le straordinarie potenzialità di questa tipologia strutturale, in seguito definita **Gridshell**, particolarmente interessante perché presenta un rapporto tra leggerezza e resistenza molto vantaggioso; inoltre evidenzia come negli anni Settanta esistesse ancora molto da sperimentare nella cultura costruttiva del legno, forse pre-

maturamente abbandonata, soprattutto in Europa, a vantaggio delle concorrenti strutture in acciaio e in calcestruzzo armato. La grande curiosità intellettuale e l'atteggiamento naturalmente sperimentale di Frei Otto generano, anche in questo settore (come peraltro in quello delle tensostrutture), un'opera che risulterà paradigmatica per le generazioni successive. E forse non è un caso che sia proprio Otto a "inventare" questo modo di costruire utilizzando l'esperienza ventennale accumulata nell'osservazione di come si deformano trama e ordito dei tessuti delle sue tensostrutture quando sono portati ad assumere una forma a doppia curvatura.

Tadao Ando, Padiglione del Giappone all'Expo di Siviglia. 1992 e Tempio Komyo-ji-Saijo (della Terra Pura), Saijo, 2000

Strutture composte da elementi semplici assemblate in forme complesse e resistenti

Per restare nel settore delle costruzioni temporanee, il Padiglione del Giappone all'Expo di Siviglia del 1992, progettato da Tadao Ando, si configura come «una grande tenda che si fa costruzione nel tema del provvisorio, cioè attraverso un processo costruttivo che considera la fase realizzativa come un momento d'opportunità fruitiva e non determinante, ma aperta, come se si dovesse proseguire nel futuro a un suo smontaggio e ricostruzione»²¹. Qui il sistema costruttivo in legno, che liberamente reinterpreta le forme dell'architettura tradizionale giapponese, è integrato e irrigidito mediante connessioni ed elementi metallici. Il tema dell'ibridazione delle tecniche esecutive e dei materiali si amplia con la combinazione delle conoscenze relative al processo costruttivo, così il legno i giunti e la carpenteria metallica sono svedesi, la tecnologia delle lamine in legno è di derivazione tedesca, la tecnologia manifatturiera è giapponese. L'edificio dimostra così la disponibilità del legno a giocare la sua parte in costruzioni "ibride" in cui il ruolo strutturale si scompone e i vari materiali sono utilizzati per il lavoro

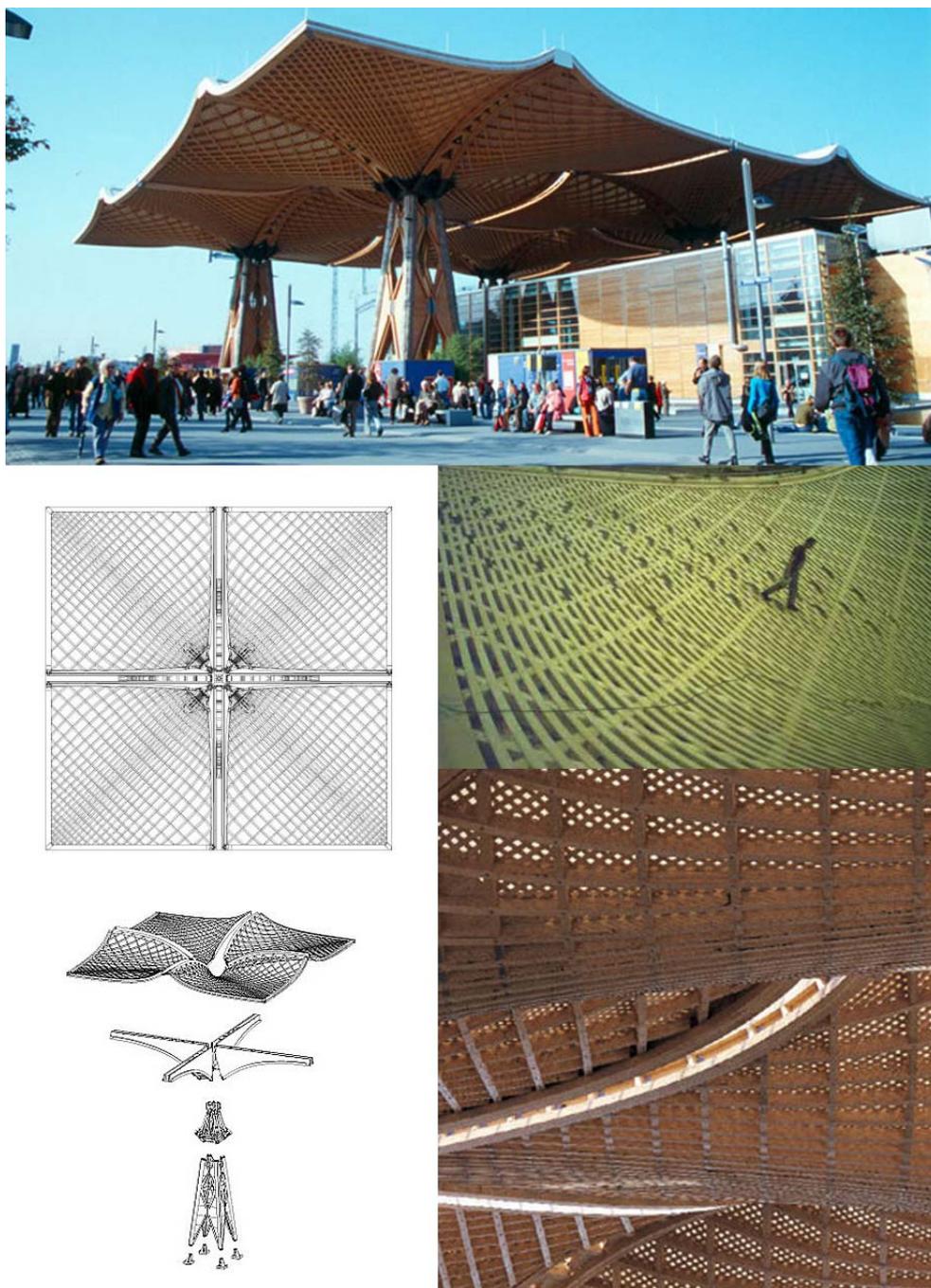


Fig. 7: Thomas Herzog, Expodach, ingresso all'Expo 2000 di Hannover.

che sanno svolgere meglio.

In pianta il padiglione misura 60x40 metri e raggiunge la massima altezza di 25 metri²². I pilastri si compongono di quattro montanti in legno lamellare di pino a sezione quadrata su cui si imposta un traliccio di travi, a sezione quadrata 26x26 cm, che si allarga progressivamente verso l'alto, quasi a mediare il passaggio tra le colonne e la copertura. In legno compensato sono le lamine curve di rivestimento delle superfici esterne. Il metallo è utilizzato per gli elementi di sostegno del rivestimento delle pareti esterne e per la sovrastruttura di copertura rivestita da un sottile schermo in teflon.

Analoga relazione tra pilastri, graticcio di travi e copertura è quella del Tempio Komyo-ji-Saijo (della Terra Pura) nella piccola città di Saijo, nella prefettura di Ehime, in Giappone progettato ancora da Tadao Ando e realizzato nel 2000, in sostituzione di un antico tempio risalente all'epoca Edo, costruito originariamente circa duecentocinquanta anni fa, ma totalmente degradato e non più adeguato alle attività religiose che vi si svolgevano. In riferimento al sistema costruttivo originario del tempio, l'intento dei progettisti è stato quello di riferirsi alla tradizione costruttiva giapponese, che come



racconta Tadao Ando stesso «è l'*assemblaggio*: numerosi elementi in legno che prendono forma quando vengono montati insieme»²³. Con questa logi-

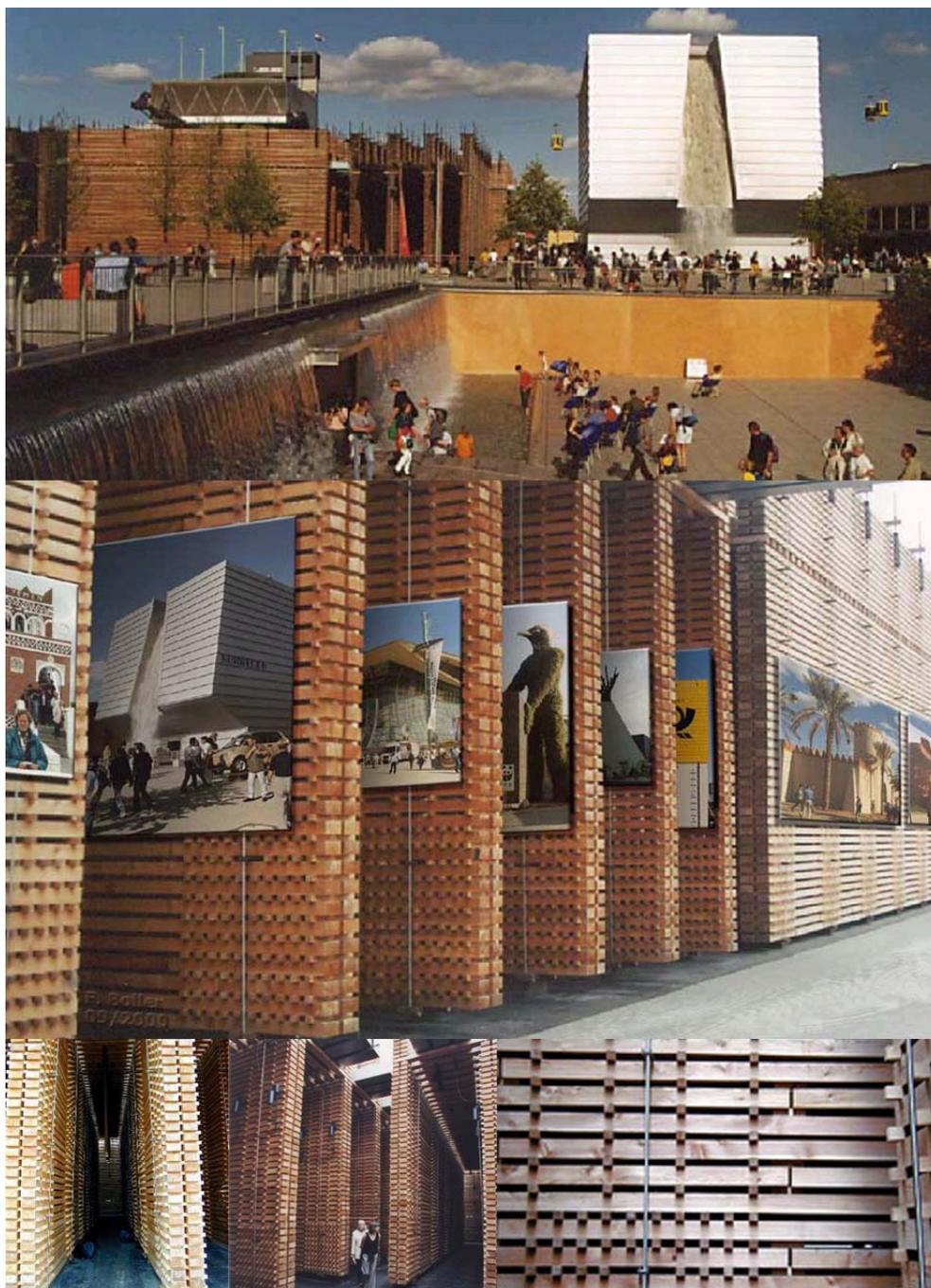


Fig. 9: Peter Zumthor, Padiglione Svizzero all'Expo 2000 di Hannover.
Definito da Zumthor stesso *Corpo Sonoro*, il padiglione ha ospitato animazioni teatrali, di danza, e piccoli concerti

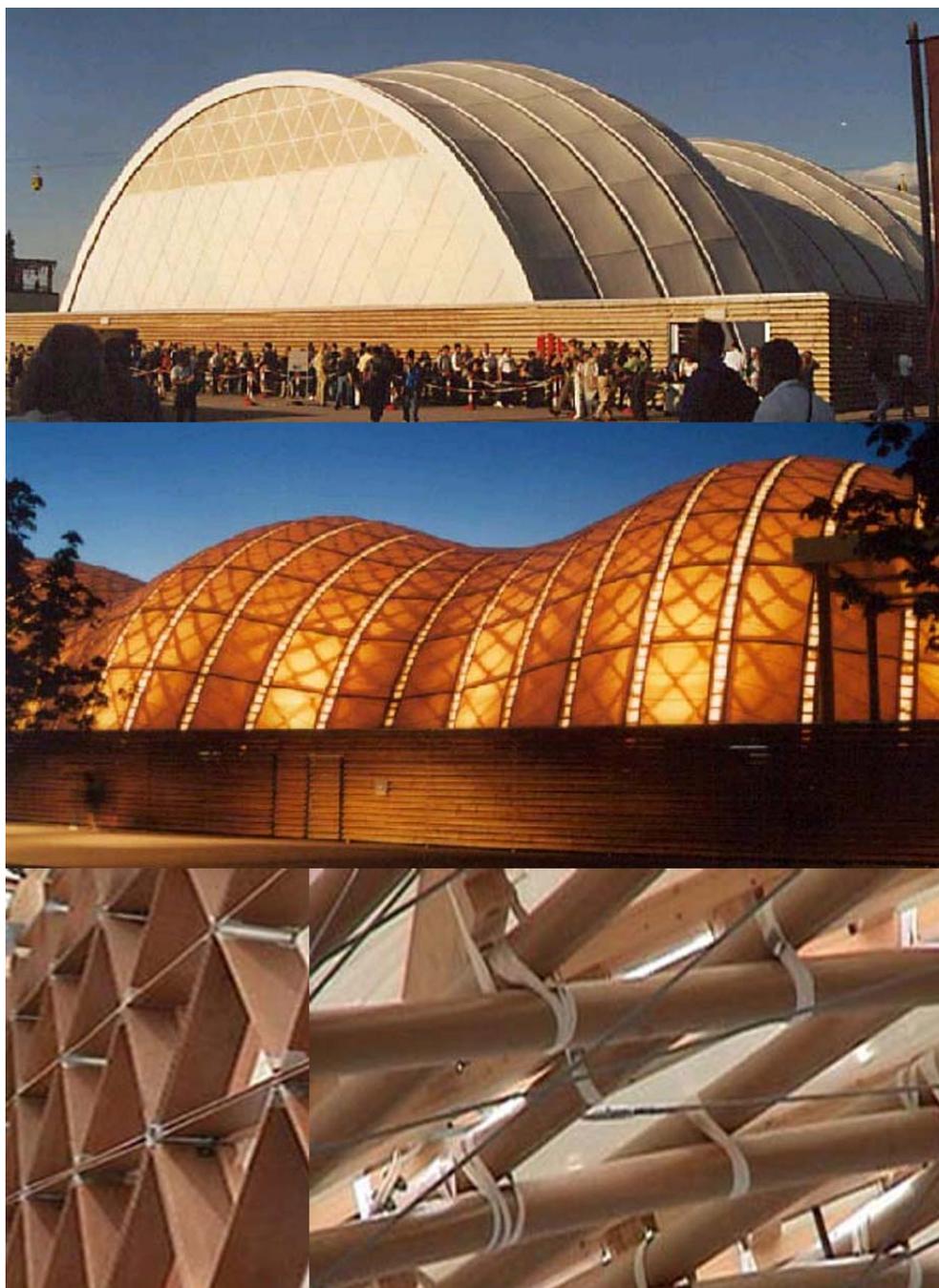


Fig. 10: Shigeru Ban, Padiglione Giapponese dell'Expo 2000 di Hannover.
Il padiglione è stato concepito con la consulenza di Frei Otto, Buro Happold e Stefan Polony.

ca l'ampio spazio centrale è stato coperto da due gruppi di travi incrociate, sorrette da un sistema di sedici colonne divise in quattro gruppi di pilastri in legno lamellare da 42x42 cm. Il primo gruppo di 96 travi sovrapposte in 10 strati ha sezione pari a 27x18 cm; il secondo comprende travetti in lamellare da 15x10 cm disposti ogni 20 cm, sovrapposti in 4 strati. L'ambiente più importante è uno spazio luminoso delimitato da uno schermo di vetro smerigliato e circondato da una parete esterna costituita da pali di 15x21 cm, disposti ad intervalli regolari di 15 cm, con inserti di vetro che li distanziano.

Queste due opere di Tadao Ando sono particolarmente interessanti proprio per la straordinaria capacità del maestro giapponese di interpretare concretamente il principio dell'assemblaggio che si può tradurre nella capacità di conformare, unendo molti elementi piccoli e dalla geometria estremamente semplice, strutture complesse e anche strutturalmente audaci, **resistenti per forma**, capaci cioè di moltiplicare esponenzialmente la resistenza di ciascun elemento, grazie alla sapiente interazione delle parti elementari che le costituiscono nello spazio.

Shigeru Ban, Thomas Herzog e Peter Zumthor, edifici dell'Expo 2000 di Hannover

Sulla "vera" riciclabilità delle costruzioni in legno

L'Expo 2000 di Hannover ha avuto come tema propulsore, il rispetto dell'ambiente²⁴, in un clima di grande attenzione alla programmazione degli interventi, dove significativa è stata la grande attenzione accordata al legno come materiale da costruzione duttile e con buone caratteristiche tecniche e soprattutto risorsa rinnovabile di fondamentale importanza nell'ottica di procedere verso un possibile sviluppo sostenibile, da utilizzare sperimentalmente in una nuova dimensione altamente tecnologica. Molti dei padiglioni, infatti, sono stati concepiti per essere, a fine manifestazione, smontati e rimontati altrove, grazie a strutture flessibili e materiali riutilizzabili, addirittura biodegradabili, come il padiglione progettato da Shigeru Ban composto di tubi di cartone e lacci di stoffa che tengono in piedi le tre cupole. Si tratta dell'edificio di carta più grande (72.8 metri di larghezza per 15.5 di altezza) del mondo, riciclabile sino all'ultimo millimetro, realizzato con i tubi di cartone, resi celebri dalla Paper Dome (Osaka 1998) e dalla Paper Log House (Kobe 1995).

Non è un caso che l'opera emblematica della manifestazione sia stata l'Expodach²⁵ di Thomas Herzog, la grande copertura lignea con immensi moduli a fungo posti nel cuore della fiera, composta da 10 ombrelli con superficie di circa 40x40 metri ciascuno e un'altezza di 20 metri. Ogni elemento si compone di quattro gusci reticolari nervati in legno a doppia curvatura e perimetro non rettilineo, quattro travi a sbalzo, un nodo centrale in acciaio e il pilone a torre. Ciascun guscio, a sua volta, è formato dalla sovrapposizione di due strati di listelli in legno lamellare, coperto da una membrana²⁶ in Ptfе-Etfe riciclabile al 100%, ancorata ai costoloni longitudinali, a 5 cm di distanza dal reticolo stesso.

Nella stessa manifestazione, un'esemplare interpretazione dell'uso del legno è stata offerta dal padiglione svizzero denominato "Corpo acustico" progettato da Peter Zumthor, i cui spazi sono circoscritti da setti di legname impi-

lato senza giunzioni, facilmente riciclabile al termine delle manifestazioni. Il legname, inoltre, al momento della realizzazione era ancora fresco ed ha raggiunto la giusta stagionatura durante i cinque mesi di durata della manifestazione; le deformazioni sono state impedito dai cavi di acciaio.

Si tratta di una costruzione in legno simile a un labirinto a cielo aperto, con le pareti in legno alte 9 metri, montate parallele le une alle altre a formare corridoi stretti; tali pareti sono formate da travi lignee, di taglio uniforme, sovrapposte, alternati a listelli; queste pile di legno di larice e di pino svizzeri sono compresse da cavi in tensione e grandi molle d'acciaio; in tal modo, la struttura è tenuta insieme dall'attrito che deriva dai punti di pressione delle travi sovrapposte, il tutto in assenza di chiodi e di colla. Alla chiusura dell'Expo, l'intera costruzione è stata smontata e le travi destinate ad altro uso.

In definitiva da questa esperienza si può dedurre che la riciclabilità reale dei prodotti della dismissione delle costruzioni non è una caratteristica peculiare di alcuni materiali da costruzione, per la quale alcuni risultano più riciclabili ed altri meno, bensì un elemento del progetto di architettura. Se la riciclabilità è inserita nel quadro esigenziale originario e fortemente perseguita solo a queste condizioni diventa da un lato un obiettivo perseguibile e ragionevole e dall'altro un interessante e stimolante "materiale" per la formazione del progetto di architettura.



Fig. 12: Ville Hara, Torre di avvistamento dello Zoo di Helsinki, 2002.

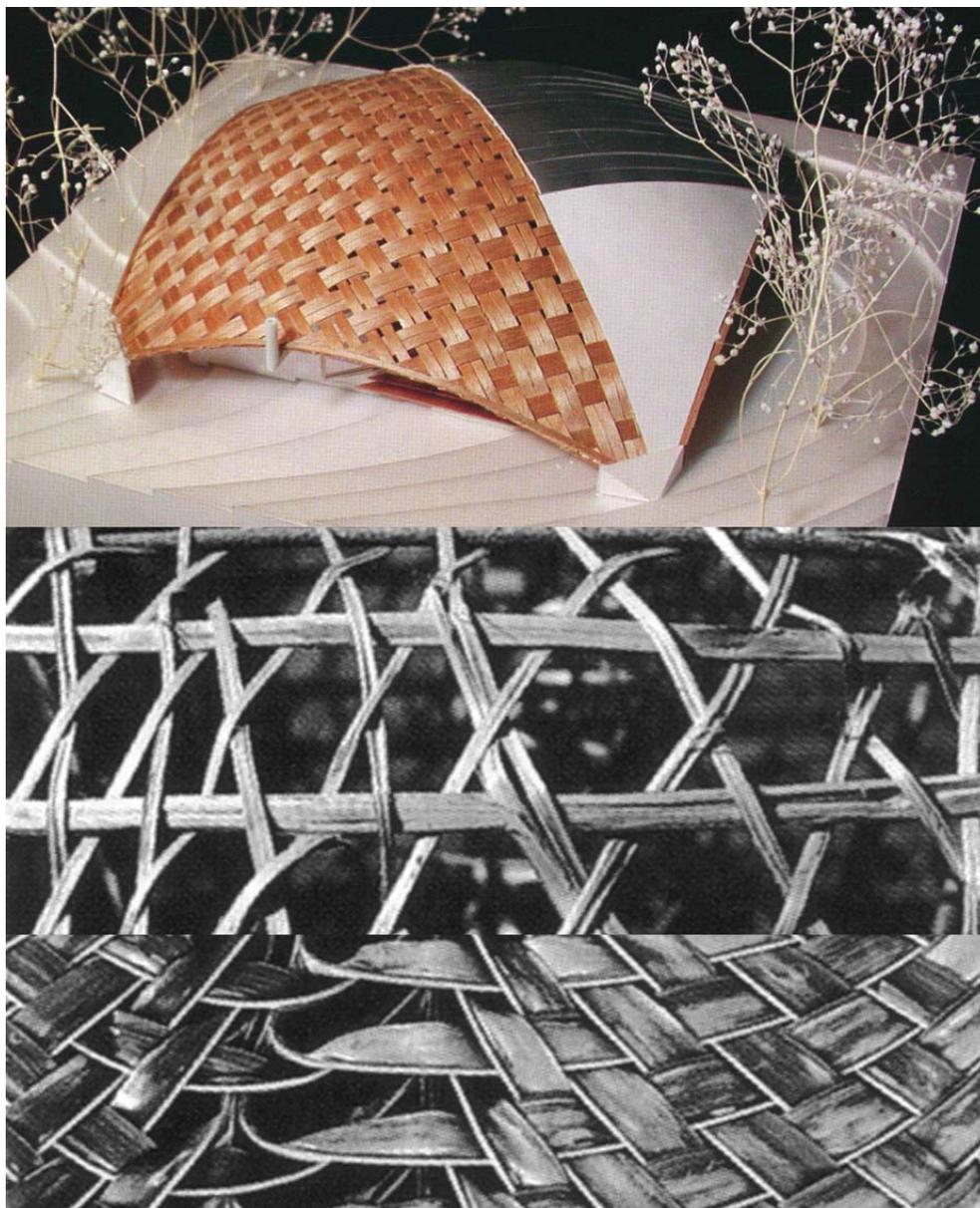


Fig. 11: Shigeru Ban, Wickerwork House, Nagano, 2001.

Shigeru Ban, Wickerwork House, Nagano, 2001

Il trionfo del principio della tessitura, una copertura come un grande cesto intrecciato

Ancora in tema di gusci tessuti con elementi minuti in legno, Shigeru Ban, progetta con la collaborazione di Arup Japan nel 2001, la Wickerwork House a Nagano, in Giappone²⁷, casa per weekend immersa nella foresta, per una coppia, formata da un parallelepipedo in vetro, coperto da una cupola formata dall'intreccio di strisce di compensato di larice, per realizzare la quale Ban utilizza lo stesso principio strutturale che è alla base del funzionamento del guscio a graticcio in bamboo da lui stesso sperimentato nel Forest Park Pavilion; qui le parti che formano l'intreccio sono suddivise in elementi più piccoli e poi assemblate in opera. Nella Wickerwork House le strisce prefabbricate di compensato misurano 1.60x0.30 metri e sono giuntate in opera dopo essere state interconnesse in modo da incurvarsi naturalmente, operazione agevolata naturalmente dalla leggerezza e sottigliezza del compensato. Una volta montata, la cupola è protetta con uno strato di schiuma poliuretana e con un successivo strato di plastiche rinforzate con fibra di vetro che garantisce l'impermeabilità.

L'opera discende dalle ultime ricerche di Ban in materia di griglie di bamboo o di legno in coazione, e dalla collaborazione con la Arup Associates. La tessitura della volta, risultante dall'intersezione delle strisce di compensato, consente al carico di distribuirsi lungo la superficie curva, secondo lo schema delle volte sottili o dei gusci.

Ville Hara, Torre di avvistamento dello Zoo di Helsinki, 2002

I gusci a griglia con struttura semplice

La torre di avvistamento dello zoo di Helsinki di Ville Hara, costruita nel 2002 da un gruppo di dodici studenti coadiuvati nella risoluzione dei problemi tecnici e nello sviluppo della costruzione da un loro professore, Jan Söderlund e dall'architetto Risto Huttunen, si presenta come una trama intrecciata costituita da aste di un unico materiale. La complessa geometria è ottenuta con un tessuto, di assicelle in legno da 6x6 cm di sezione, curvati in cantiere e serrati con 600 giunti.

Questa complicata forma tessuta, dopo un secolo e mezzo dalle teorie di Semper, conserva la logica della trama e dell'ordito strutturale ma si sviluppa, attraverso nuovi strumenti di controllo e di progettazione e si è potuta materializzare grazie a un sofisticato modello tridimensionale cad ottenuto attraverso la scansione 3d dell'omologo modello realizzato con la plastilina²⁸. I nuovi software per la progettazione e le macchine a controllo numerico che ne garantiscono la realizzazione, lasciano intuire i nuovi possibili sviluppi dell'architettura in legno.

Come per la Mannheim Lattice Shell di Otto anche in questo caso si realizza una struttura la cui forma viene ottenuta portando gli elementi in uno stato di coazione e poi serrandoli insieme tramite giunzioni estremamente semplificate. La fase più impegnativa della costruzione, è stata per l'appunto la piegatura delle aste di legno, fornite dallo sponsor del progetto, l'azienda forestale Kuningaspalkki, dello scheletro portante, che dovevano sembrare vere e proprie costole. In questo caso il guscio resistente viene realizzato con un'orditura di asticelle disposte secondo giaciture ortogonali poi deformate, come si deformano trama e ordito del tessuto, per assumere la forma resistente della superficie a doppia curvatura.

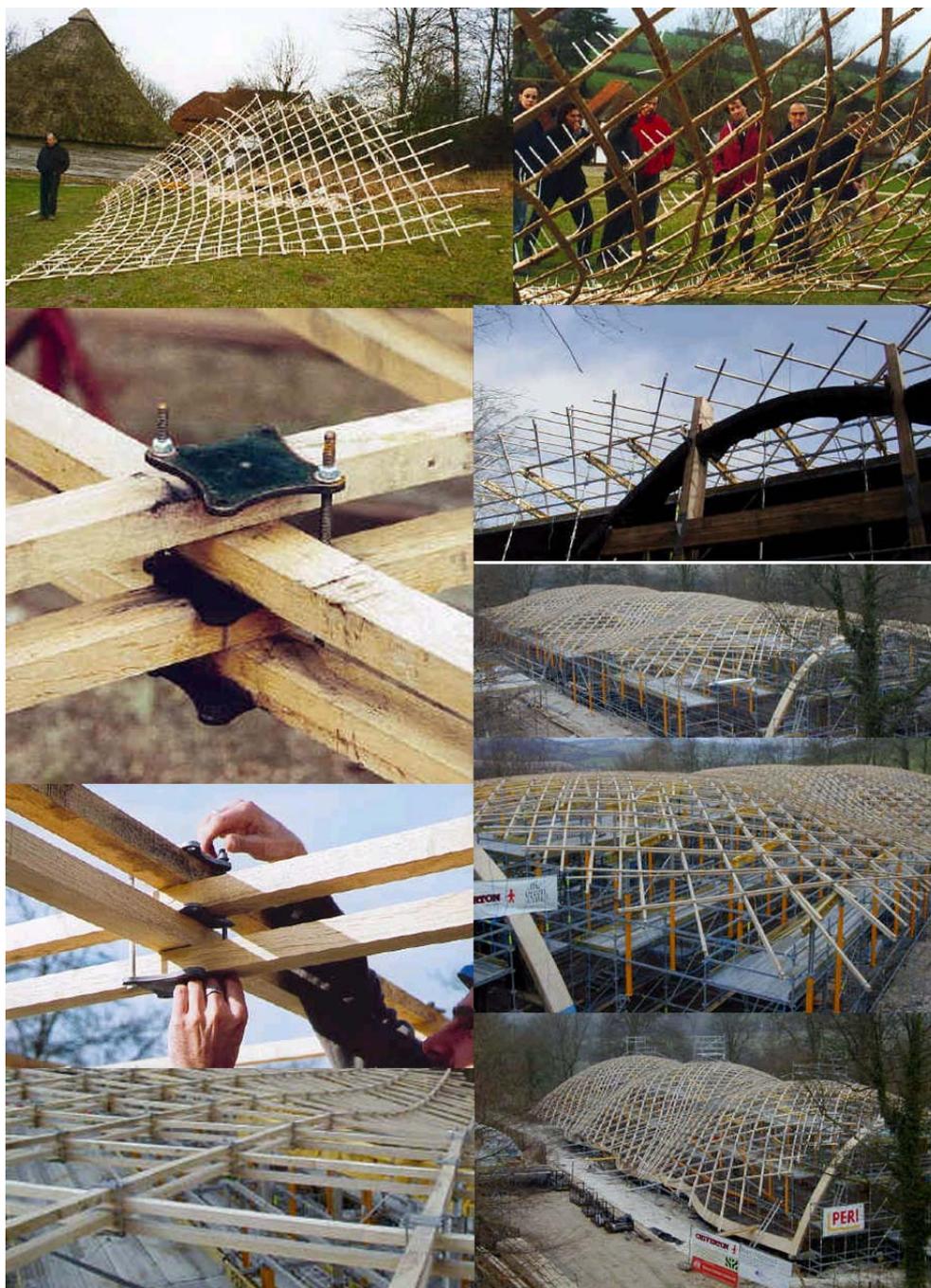


Fig. 13: Edward Cullinan, Downland Gridshell per il Weald & Downland Open Air. Fasi di montaggio della struttura, dalla sperimentazione di un prototipo di piccole dimensioni, alla copertura dei laboratori.

Edward Cullinan, Downland Gridshell per il Weald & Downland Open Air Museum, Sussex, 2002

Gridshell a doppia maglia

Ancora nell'Expo di Hannover 2000 l'architetto giapponese Shigeru Ban utilizzando la consulenza proprio di Frei Otto proporrà, per la realizzazione del padiglione giapponese²⁹, una costruzione ancora fondata sul tipo strutturale della Mannheim Lattice Shell, ma realizzata in tubi di cartone.

Nel 2002, il gruppo di progettazione Edward Cullinan Architects realizza nel Sussex, in Inghilterra, il Downland Gridshell per il Weald & Downland Open Air Museum, dove, oltre alla rielaborazione del modello presentato da Otto per il Lattice Shell, si utilizza anche lo stesso materiale: il legno. La copertura di questo edificio è un guscio lungo 50 metri, largo 12 e alto 10 metri, realizzato con una griglia a doppio strato formata da assicelle di legno di quercia di 20x40 mm connesse ogni 40 cm con in tutto più di 1000 bulloni. Ogni nervatura è quindi composta da due assicelle che, incrociandosi con l'altra famiglia di elementi forma un nodo che prevede una sovrapposizione di quattro listoni.

La copertura prefabbricata è stata posata a terra e gradualmente sollevata nella configurazione finale, in modo da piegare e torcere la pianta quadrata da 40x40 cm in una forma di diamante. La forma tridimensionale della griglia è bloccata dalle rotaie orizzontali che sostengono il rivestimento. Le prime sperimentazioni sono state effettuate con una griglia di assicelle sottili unite con la plastica per una prima embrionale verifica delle possibilità strutturali della griglia. Alle due estremità sono collocati due archi e una trave incrociata in lamellare di larice siberiano³⁰. La griglia è composta da 600 assicelle la cui lunghezza totale è di 12 km. La quercia³¹ verde è stata scelta per questa struttura per l'alto contenuto di umidità che conferisce agli elementi costruttivi grande flessibilità, essenziale durante il processo di curvatura in entrambi i sensi delle assicelle. Una volta assunta la posizione finale, l'essiccamento naturale ha reso stabile la struttura. Il tetto, con la sua griglia montata contiene 12 tonnellate di legname. Le assicelle sono poste sui



Fig. 14: Edward Cullinan, Downland Gridshell per il Weald & Downland Open Air.

supporti per formare il primo strato della griglia. Il giunto è realizzato con due piastre d'acciaio galvanizzato serrate con quattro bulloni esterni. Uno spinotto in acciaio collega le due assicelle interne, appositamente forate, mentre le due esterne sono intere per meglio seguire la curvatura della struttura. Dopo circa tre settimane di progressive deformazioni, la copertura ha raggiunto la forma desiderata; le ultime registrazioni alla figura sono state effettuate prima dell'aggiunta dei pannelli curvi di chiusura³². Questo progetto dimostra, come spesso Franco Laner ha scritto e le costruzioni navali dimostrato, che il legno si presta molto bene a essere utilizzato nei regimi di coazione, curvato e sottoposto a presollecitazioni che ne incrementano la capacità portante. E ancora adotta il principio della tessitura e degli elementi semplici che solo tramite l'assemblaggio assumono forme complesse e particolarmente resistenti.

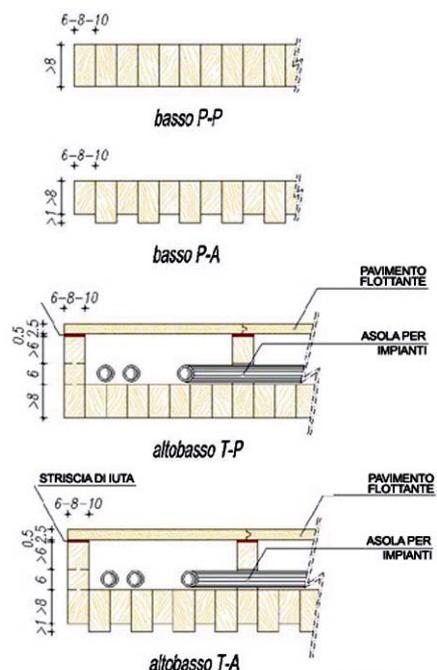


Fig. 15: Sistema brevettato LegnoLegno. Da sinistra una delle fasi intermedie nel montaggio del solaio; le sole per il passaggio degli impianti; il sistema a doppia orditura; per l'appoggio al muro si prevede la sistemazione di un profilo a L su cui è interposto un materassino di juta.

2.3 Campi di utilizzo nel settore edile di strutture in legno naturale

Nel passaggio dalle realizzazioni straordinarie, descritte nel paragrafo precedente, all'architettura diffusa, si è posta la necessità di verificare quali potessero essere gli elementi costruttivi suscettibili di una produzione di serie da destinare al mercato dell'edilizia così come risulta oggi connotato.

Fig. 16: Sezioni tipo del solaio *LegnoLegno*



A una prima analisi del panorama proposto dal Saie 2004 e dalla Fiera di Verona del 2005 (febbraio), gli elementi di sostanziale novità, emersi nel campo della produzione per l'edilizia di sistemi e componenti in legno, sono stati, in prima istanza, la casa prefabbricata completa e i solai lignei prefabbricati e quelli che abbinano al legno altri materiali, come il calcestruzzo armato, il laterizio o i tondini di acciaio, ecc., con lo scopo di migliorarne alcune specifiche prestazioni. Il settore della casa prefabbricata che oggi si pone sul mercato come alternativa ecologica per gli insediamenti residenziali, ma anche per la realizzazione di scuole, pale-

stre, piccoli centri sociali, e che garantisce rapidità di montaggio a secco, elevato comfort interno³³, sicurezza, durabilità e resistenza al sisma, si configura come una delle prossime sfide della produzione edilizia europea.

Queste abitazioni, tipiche della tradizione costruttiva di paesi ricchi di foreste, generalmente sono realizzate secondo le tre principali tipologie costruttive: *Blockhause*³⁴, o sistema in perline, *Platform framing*, o sistema a pannelli³⁵ e *Holzrahmenbau o Timberframe* o sistema a telaio³⁶. Queste costruzioni hanno in comune l'esattezza del processo di produzione, laddove la loro realizzazione avviene in officina in condizioni ambientali controllate³⁷, dove la precisione degli incastri e dei collegamenti nella realizzazione degli elementi strutturali è garantita dall'utilizzo di macchine a controllo numerico. A conferma del fatto che nelle ultime versioni queste case cominciano a non configurarsi più come le classiche baite di montagna protagoniste dell'immaginario collettivo, è l'intervento di Nicola Sinopoli che, in occasione del Saie 2004 racconta come le aziende «finalmente reinventano la casa di legno senza riproporre fino alla noia il modello della casa di "Heidi": Rubner e Balken³⁸, in particolare, hanno proposto le soluzioni più convincenti»³⁹.

Accanto alle case prefabbricate in legno, anche il settore dei solai in legno, che trova il suo principale mercato tra gli interventi di recupero, è oggi oggetto di rinnovato interesse da parte delle aziende produttrici, come è dimostrato dall'ingresso nel mercato edilizio di alcuni componenti particolarmente interessanti. Tuttavia, in considerazione della volontà di utilizzare i semilavorati di piccole dimensioni derivanti dallo sfruttamento regolamentato del bosco ceduo, è sembrato sin dall'inizio più idoneo il settore dei solai rispetto a quello delle costruzioni complete, sicuramente troppo complesse per presentare una così spinta unificazione dei semilavorati di base e inoltre tradizionalmente ostico per il pubblico italiano che non ha nella sua cultura abitativa l'idea dell'acquisto della casa a catalogo.

Da menzionare per semplicità costruttiva e soprattutto per il sistema di assemblaggio completamente a secco, in cui non è previsto l'uso delle colle, è il sistema brevettato *LegnoLego*, solaio composto da conci, formati da tavole essiccate e forate, assemblate con perni in legno duro infilati a secco,

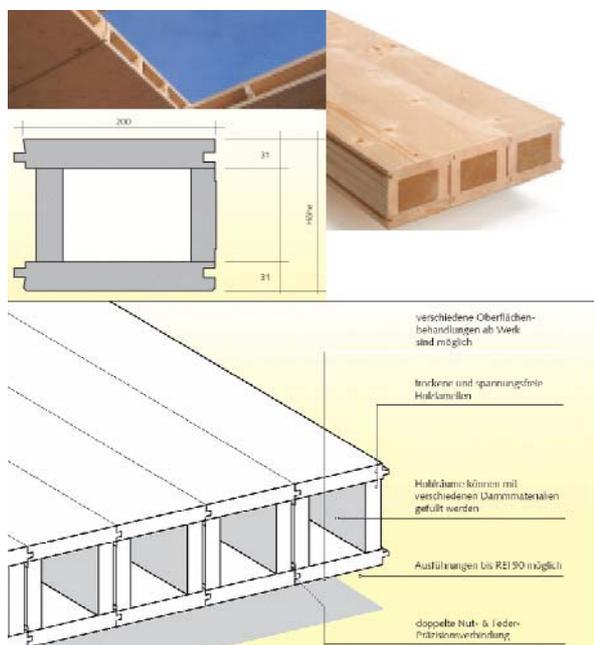


Fig. 17: Gli elementi di solaio *Lignatur* vengono forniti in cantiere già assemblati e montati con una gru.

In fase di produzione il legno, dopo un primo esame visivo che consente di eliminare le tavole difettose, viene portato al livello di umidità costante del 10%. Successivamente si passa alla piallatura e successivo incollaggio delle lamelle. Su richiesta della committenza si inserisce l'isolante, poi nella pressa ad alta frequenza le fughe di colla vengono indurite. Con la pialla a quattro lato vengono effettuate le rifiniture speciali, le scanalature e le bisellature. Dopo la realizzazione dei profili si passa alle vernici di protezione. Infine prima della spedizione i profili sono avvolti in pellicole protettive e numerati in funzione della sequenza di montaggio.

che formano moduli prefabbricati lunghi fino a 13 metri e larghi 1 metro, con terminali da realizzare su misura; questi possono essere ricoperti da carta kraft o guaina traspirante e coibentati da pannelli di sughero o in fibra di legno. Il sistema è stato studiato da Pietro Canderle e dall'ingegnere strutturista Stanislaw Pereswiet Solta con la chiara idea di fare a meno del collante sintetico, e soprattutto di utilizzare listoni di piccola dimensione, 4 o 5 cm per 10 o 12 cm di altezza, affiancati e resi solidali dalle spine. La piastra ha spessore variabile da 80 a 280 mm, e quindi un Rei variabile da 36 a 121 minuti.

L'incatenamento trasversale dei moduli, predisposto per facilitare il montaggio e per limitare le dilatazioni trasversali, si ottiene mediante inserimento di barre di acciaio inox al posto di alcuni perni di legno. Nelle zone sismiche, i moduli, che si comportano come una piastra unidirezionale, hanno le barre di acciaio inox inserite ogni 90÷120 cm. Il montaggio è rapido e non necessita di personale qualificato⁴⁰. Il vano tecnico per il passaggio degli impianti è coperto da un assito su cui è posato un materassino di juta da 5 mm ed un pavimento prefinito flottante in legno dotato di incastro speciale che non necessita né di colle né di chiodi; in qualsiasi momento è possibile sgancia-

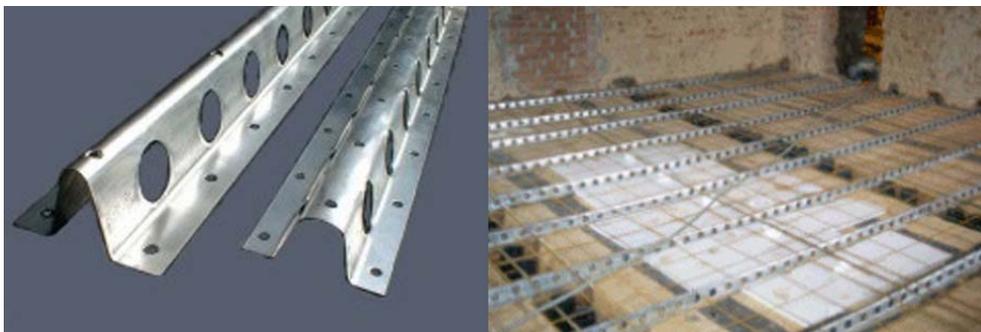


Fig. 18: Connettore a traliccio LPR, progettato da Franco Laner e Peter Cox

re il pavimento, arrotolare la juta e sollevare l'assito tecnico per le ispezioni. Altro aspetto rilevante è la possibilità di collocare la massa dove le esigenze statiche la richiedono, con ciò riducendo l'impiego della materia prima. Di particolare interesse è l'assenza di resine o altri additivi chimici (limitati ad alcuni pezzi speciali) per la realizzazione dei componenti, che, dopo l'essiccazione vengono impregnati mediante bagno in sali di boro⁴¹. Con ciò si riducono al minimo le fasi di incollatura e pressatura, nonché i tempi di presa, il che garantisce un'economia di produzione e la riduzione dei pericoli per la salute sia della manodopera che degli utenti finali⁴².

Interessante per l'alto grado di soddisfacimento dei requisiti di isolamento termico e acustico è il sistema di solaio *Lignatur*⁴³, brevetto tedesco di solaio alveolare a sezione composita, realizzato con tavole montate a scatola, con giunti di precisione a doppia scanalatura, le cui cavità possono essere riempite con materiali isolanti di diverso tipo; gli elementi, una volta assemblati, creano una superficie continua che immediatamente entra in esercizio. L'altezza standard parte da 80 mm e con un incremento di 20 mm arriva fino a 320 mm. La larghezza standard è pari a 514 mm o 1000 mm e la lunghezza massima è pari a 16 metri. Si possono ottenere classi di resistenza al fuoco pari a 90 ReI.

Rispetto al solaio *Legnolego* la luce massima ottenibile è di 16 metri contro 13, ma anche in questo caso per l'attacco alle strutture preesistenti si utilizzano elementi realizzati su misura rispetto alle forme e alle dimensioni richieste. Sembra soddisfacente il rapporto tra peso (e quindi utilizzo della materia prima) e portanza del solaio.

Di tutta altra natura, ma molto diffusi nel mercato edilizio, sono i solai misti in legno e calcestruzzo, pratica certamente antica, che risale alla tecnica romana di realizzazione delle coperture mediante sovrapposizione di elementi in laterizio su travetti in legno, su cui insiste ancora oggi buona parte della ricerca industriale e universitaria. Di questo sistema costruttivo si trovano tracce nei manuali ottocenteschi, e ancor prima in alcune costruzioni rurali europee. Tuttavia è solo nella prima metà del '900 che questa tecnologia torna sul mercato edilizio, con l'integrazione del calcestruzzo, grazie anche agli studi di Karl Mohler, che, nel 1956, propone di far collaborare legno e cemento mediante l'uso di connessioni appositamente studiate. Il principio informatore di queste sperimentazioni, nato nell'ambito del recupero e dell'adeguamento statico e funzionale del patrimonio edilizio esistente, sta nella ricerca del connettore che consenta ai due materiali di lavorare insieme al meglio, che è poi l'oggetto di numerosi brevetti che si sono susseguiti nel tempo, come il Sistema Turrini – Piazza (1983), in cui i travetti di legno collaborano con una soletta in conglomerato cementizio di nuova formazione, per mezzo di tondini d'acciaio FeB44K, incollati in appositi fori praticati nel legno; o il Sistema Llear⁴⁴ (1991), in cui il collegamento tra travetti in lamellare, tavelle e calcestruzzo, è assicurato da un traliccio metallico posto in una scanalatura praticata all'estradosso del travetto stesso, o ancora il sistema LPR brevettato da Franco Laner e Peter Cox, in cui la connessione avviene con un traliccio posto all'estradosso della trave senza ricorrere a tagli nell'assito in corrispondenza delle travi, né a resine epossidiche⁴⁵. Questo genere di sperimentazione, tuttavia, per quanto sensibile al tema della piccola dimensione degli elementi lignei di partenza, non risponde al requisito di reversibilità, di riciclabilità e di sostituibilità parziale della struttura.

A metà tra i pochi esempi di solai completamente realizzati in legno e i molti misti legno-calcestruzzo, si colloca uno dei brevetti della Cenci Legno S.a.s., il solaio *Luxsol Ecologico KVH - KVH*, del tipo *Hundlegno*, in cui emerge l'utilizzo degli adesivi strutturali *Xepox*⁴⁶. Questo sistema si realizza attraverso la successione delle seguenti fasi⁴⁷:

1. posa delle aste KVH Select a doppia maschiatura sul banchinaggio provvisorio; le aste KVH sono prelavorate con macchina tipo Hundegger a controllo numerico per la lavorazione del legno destinato alla formazione di strutture portanti;
2. spalmatura della resina e fissaggio dei traversi con viti autoperforanti per legno, che garantiscono il contatto legno/legno;
3. completamento del telaio con spalmatura della resina e fissaggio delle aste di irrigidimento;
4. distesa di sughero naturale in granuli mm 4/14; applicazione delle resine sul bordo superiore dei traversi e delle aste di irrigidimento;
5. completamento con riporto di manto in tavole a doppia maschiatura, per garantire il contatto legno/legno.

In questo caso, contrariamente a quanto avviene nel caso dei solai *Legnolego* e *Lignatur*, il sistema è reso irreversibile e inquinante, soprattutto alla fine del ciclo di vita, a causa della presenza delle resine, che se da un lato sono garanzia di sicurezza e di stabilità, dall'altro contravvengono al principio fondamentale su cui si fonda questa ricerca, ossia la scelta di sistemi strutturali che garantiscano alti livelli di eco-compatibilità durante tutto il ciclo di vita del sistema.

Di natura sperimentale è il solaio a *cellula integrata*, progettato da Adriano Maule⁴⁸, a partire dallo studio sugli stati di coazione del legno indotti dalla pre-sollecitazione impressa da apposite barre di acciaio che consente al sistema, formato da lamelle in legno di abete di piccolo spessore, di reagire come una struttura continua. Il solaio, assemblato a secco in cantiere, si compone di due strati separati di lamelle (3.8x12 cm) con anime di collegamento in *Microllam*, che formano vani di alloggio per gli impianti. Il solaio poggia su un cordolo in calcestruzzo armato, forato per la tesatura delle tavole. Questo sistema, affine per la logica costruttiva di conferire solidità strutturale fra gli elementi mediante l'attrito tra le tavole che a sua volta è garantito dalle spine di legno o di acciaio, al solaio *LegnoLeggo*, per quanto non ancora disponibile sul mercato edilizio, ben risponde ai requisiti sopra indicati, soprattutto per l'assenza di colle e di leganti cementizi, che, quando non sono inquinan-

ti, rendono comunque irreversibile e molto faticosamente smontabile la struttura.

2.4 Progettare a partire da semilavorati del legno di piccole dimensioni: vincoli produttivi e vincoli progettuali della struttura

Nell'ipotesi di valorizzare le potenzialità della risorsa legno, nello specifico della produzione derivante da bosco ceduo, attraverso il suo uso in edilizia, questo progetto di ricerca si è posto l'obiettivo, semplice ma ambizioso, di tenere insieme ricerca, industria, politiche ambientali, risorse rinnovabili e umane. Per questo motivo i vincoli che per primi sono stati presi in considerazione sono stati quelli derivanti dal produttore (*Le Selve del Balzo S.r.l.*), che ha posto grandi limitazioni, soprattutto in termini di costo della materia prima, da cui sono poi dipese le successive scelte in termini di dimensioni dell'elemento unitario.

I **vincoli produttivi**, in tal senso, partono dall'analisi dall'albero di partenza e, quindi dal bosco, per poi passare agli impianti di essiccazione e di lavorazione del legno. L'impianto di segagione del tondame di castagno di bosco ceduo, infatti, prevede la presenza di doppia pialla ad avanzamento automatico per la sfaccettatura contemporanea dei due lati opposti, in modo che con due soli passaggi, il tronco viene scortecciato. Si passa poi alla segagione con riduzione del tronco in tavole e alla regolarizzazione dei bordi. Durante questa fase la massima attenzione viene posta sulla percentuale di sfridi che deve essere quanto più possibile contenuta. Da ciò dipende l'utilizzo non già della massima dimensione di sezione, ma di una intermedia che consenta di ottenere da un tronco il maggior numero possibile di tavole.

Nel caso di ceduo da 24 anni, (gli altri cicli di taglio sono a 12 e 36 anni) quindi, le tavole hanno lunghezza massima pari a 6 metri, e sezione da 10x5 cm, misure derivanti dal processo di ottimizzazione dei tagli. Nel caso di ceduo di 12 anni, la lunghezza massima è pari a 3 metri e la sezione raggiunge i 3x8 cm.

Il sistema strutturale, dunque, aveva sin dall'inizio il grande limite di dover essere composto dall'assemblaggio di elementi lignei di piccola dimensione, poco più grandi delle comuni tavole da parquet.

Da una sommaria stima economica del costo del solo materiale grezzo, si è verificato che questo è, nel caso del ceduo a 12 anni, pari a circa 1/3 di quel-

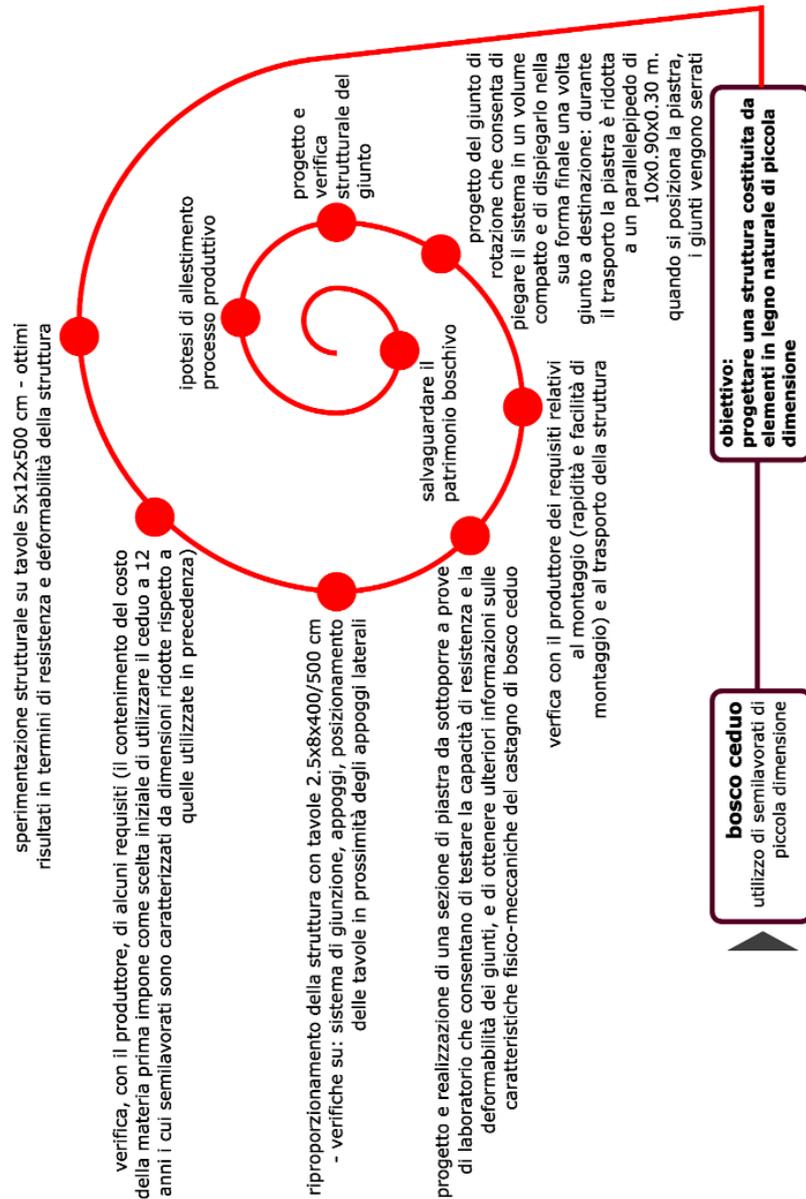


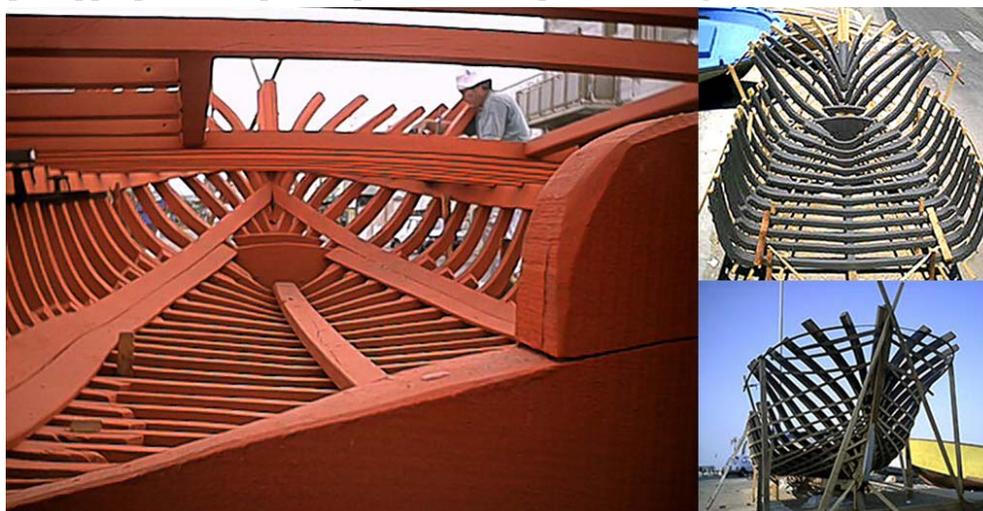
Fig. 19: Diagramma sintetico del processo che ha portato dal progetto iniziale di utilizzare tavole grandi e costose, all'opportunità finale di utilizzare quelle derivanti da rotazione di taglio da 12 anni.

lo della stessa quantità di materiale del ceduo da 24. Da qui è stato posto un ulteriore vincolo al progetto della struttura, legato alla volontà di tenere basso il costo della materia prima e, quindi, di utilizzare la massima quanti-

tà di tavole derivanti da colture da 12 anni, piuttosto che quelle da 24, le cui dimensioni avrebbero certamente agevolato la progettazione della piastra, ma sarebbero state troppo costose.

I semilavorati, di forma rettangolare non necessitano di particolari sagomature o lavorazioni aggiuntive, a eccezione delle azioni di taglio e di foratura. Infine, per ciò che riguarda l'ultima fase di lavorazione del legno prima che questo arrivi nell'officina del carpentiere, ossia la stagionatura, si prevede il trasferimento delle tavole in un piazzale di stoccaggio all'aperto o in appositi essiccatoi, all'interno dei quali il processo naturale viene accelerato e controllato. Tra i due metodi, la stagionatura forzata consente di ridurre al minimo la perdita di materiale (che per la stagionatura naturale raggiunge in alcuni casi il 40%) e di contenere al minimo i tempi (l'intera operazione dura pochi giorni contro i due/tre anni della stagionatura naturale) ma, naturalmente risulta più costosa. Nel caso di utilizzi strutturali, la stagionatura forzata è da preferire perché consente di assegnare il grado di umidità preferito e anche per la maggiore affidabilità del materiale ottenuto. Nel caso della piastra in oggetto, si è scelto, d'accordo con il produttore, la stagionatura forzata.

Da questi primi dati, quindi, si è scelto come punto di partenza l'ipotesi di utilizzare elementi minuti; ciò ha comportato, soprattutto durante la prima fase della ricerca, la necessità di stabilire quale fosse la tipologia strutturale più appropriata, e quindi quale fosse la più corretta geometria delle masse



nello spazio, dove e come collocare le connessioni tra le tavole, a quali elementi e materiali ricorrere per i sistemi di giunzione, considerando la volontà, espressa sin dal principio, di non utilizzare le colle attualmente presenti sul mercato, e, infine, come recuperare l'intelligenza costruttiva contenuta negli esempi delle architetture realizzate descritte in precedenza e nei componenti edilizi scelti come esempi positivi attualmente in commercio in Italia. Fattori, questi, che si possono definire i **vincoli progettuali**, scelti a partire dalle caratteristiche peculiari del legno, che come spiega Franco Laner, «date le sue elevate caratteristiche meccaniche, in rapporto al peso – si consideri solo il confronto col calcestruzzo, che pesa cinque volte di più ed offre le stesse resistenze – abbisogna di una concezione strutturale assolutamente peculiare che in sintesi si richiama al “controventamento”, ovvero deve essere concepito spazialmente, tridimensionalmente, non nel piano, così da unire resistenza e leggerezza, forza e snellezza, destino ultimo del progetto col legno. Al telaio, al setto, caratterizzati dalle direzioni x e y, va aggiunta dunque la coordinata z. Tutti i codici costruttivi col legno mostrano questa necessità di concezione tridimensionale»⁴⁹, principio questo, che dimostra anche un'aspirazione alla riduzione di peso che va compensata con l'esatta collocazione nello spazio del poco materiale che resta e quindi con lo studio della forma più giusta per le parti resistenti, come insegnano i carpentieri navali capaci di immaginare la loro opera in tre dimensioni, per meglio poter resistere alle sollecitazioni del mare e del vento.

Conclusa questa fase di elaborazione del progetto, secondo uno schema ricorsivo, si è reso necessario verificare le ipotesi fatte attraverso l'esplicitazione di una serie di vincoli, a partire dalle norme generali che regolano l'utilizzo del legno in architettura, per arrivare allo specifico della resistenza al fuoco, al sisma e al tema della durabilità (**vincoli normativi**).

Per quanto riguarda la spinosa situazione della normativa italiana nel settore delle costruzioni in legno oggi, Franco Laner introduce così la questione: «Nel nostro Paese non c'è normativa che disciplini il progetto, il calcolo, l'esecuzione ed il collaudo delle strutture in legno. Perciò ogni progettista si comporta come meglio crede: assumendo norme straniere e la maggior parte

fa riferimento alle norme tedesche DIN 1052, oppure fa riferimento all'EuroCodice 5, codice europeo sul legno, ancora in fase sperimentale, disponibile in versione italiana presso l'UNI»⁵⁰. Ciò vale anche, seppur con minore problematicità, per gli altri materiali da costruzione a causa soprattutto della transizione verso nuovi provvedimenti normativi tendenti ad incorporare le più avanzate metodologie di calcolo e di verifica che, oltre a presentare una maggiore valenza scientifica, potranno consentire in futuro di unificare le legislazioni tecniche dei vari Paesi della Comunità Europea. In questo delicato momento di transizione, in atto già da alcuni anni, sono poi emerse delle richieste urgenti per la messa in sicurezza di edifici esistenti, nonché per la realizzazione di nuovi, nelle zone a rischio sismico, con la conseguente emanazione di alcuni Decreti sulla classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica. Nello specifico delle costruzioni di legno, come dichiara Laner, l'Italia non era dotata di uno strumento legislativo specifico, nonostante la presenza di costruzioni di notevole impegno statico costruite con il legno: per esse i tecnici si erano necessariamente rivolti a normative consolidate di altri paesi europei, in primo luogo della Germania (norma DIN 1052 e norme collegate).

In Italia, infatti, sono stati tradotti e approvati con Decreto Ministeriale gli Eurocodici, emanati dal Comitato Europeo di Normalizzazione, 2 (Uni En 1992 – Calcestruzzo) e 3 (Uni En 1993 – Acciaio) e sono stati rilasciati nel 1996, dal Ministero dei Lavori Pubblici, i relativi Documenti Applicativi Nazionali (Nad).

Per le costruzioni in legno, invece, dieci anni fa fu pubblicato sulla rivista *l'Edilizia*, l'articolo “L'EuroCodice 5 – Strutture di legno”, (Env 1995), a firma dei professori Hans Jorgen Larsen e Ario Ceccotti, che si suddivide in in tre parti:

Env 1995-1.1: regole generali e regole per gli edifici.

Env 1995-1.2: regole generali, progettazione strutturale contro l'incendio.

Env 1995 parte 2: ponti.

Purtroppo l'EuroCodice 5 non ha avuto la stessa sorte degli EuroCodici 2 e

3 poiché non è mai stato pubblicato il relativo Nad, dal momento che l'autorità competente, il Ministero dei Lavori Pubblici, non ha mai promulgato una norma italiana sul legno. L'EuroCodice 5 è, infatti, norma sperimentale e volontaria (Env) e potrebbe essere utilizzata al pari di altre norme Europee di "comprovata validità"⁵¹ e lungamente sperimentate⁵².

Nell'ambito di tale revisione della legislazione tecnica nazionale, nel 1999 si è riunita a Roma la commissione incaricata della redazione delle *Norme tecniche italiane per la progettazione, esecuzione e collaudo delle costruzioni in legno* (N.i.co.le.) la cui bozza, elaborata a dicembre 2001, è stata rapidamente discussa, rivista e, ricevuto nel 2002 il parere positivo del Cnr, è stata votata al Consiglio superiore dei Lavori Pubblici. Anche nella revisione della cosiddetta *Ordinanza sismica* è stato completato il paragrafo relativo alle costruzioni di legno.

Parallelamente alla predisposizione delle bozze per la futura normativa nazionale, è in corso un'altra importante attività normativa per l'implementazione, in Italia, degli EuroCodici nella versione definitiva (En) in modo che questi possano essere utilizzati a livello nazionale; tale implementazione risulterà fondamentale per la messa a punto delle Direttive Europee, in particolare della Direttiva Materiali da Costruzione.

La situazione di incertezza legata al passaggio verso nuove metodologie di calcolo è comunque comune a tutti i Paesi Europei; in Italia, per lo specifico settore del legno, tale situazione è certamente aggravata dalla mancanza di una precedente e consolidata normativa nazionale⁵³ e per di più è caratterizzato dalla mancanza di coordinamento delle Organizzazioni professionali.

Questa situazione di incertezza è per di più legata alla oggettiva difficoltà a normare il materiale legno massello, le cui caratteristiche sono fortemente condizionate dal luogo di provenienza dei fusti, dallo specifico trattamento dei boschi, dal fatto che si tratta di materiale vivo, il cui comportamento non può seguire quello standardizzato dei materiali industrializzati; proprio su questo specifico argomento, infatti, come si vedrà in seguito, proprio il particolare castagno di Cervinara⁵⁴ (materia prima da cui trae spunto questa

tesi), è stato dimostrato avere resistenze caratteristiche superiori a quelle delle omologhe essenze provenienti da altre regioni.

Nell'allegato 1.2 – *Normativa di riferimento per le costruzioni in legno massello*, si riportano le principali norme che regolano l'utilizzo del legno tondo e dei segati in Italia.

Tema principale nell'ambito dell'uso del legno in edilizia è la sua **resistenza al fuoco**⁵⁵. Su questo argomento, ancora oggi, non tutti sanno che gli effetti di un incendio su una costruzione sono meno rapidamente distruttivi per il legno, che non per altri materiali quali metalli, pietre, cemento, perché le pietre e i mattoni, portati a elevate temperature si rompono facilmente. I metalli diventano incandescenti, si dilatano e, a circa 5000 gradi perdono quasi la metà della loro resistenza. Con questi materiali, quindi, si possono verificare crolli improvvisi, non soltanto delle strutture orizzontali, ma anche per rovesciamento dei muri di sostegno (dilatazione longitudinale delle travi). Nel caso del legno (vale d'esempio il Teatro La Fenice a Venezia, la Cappella della Sindone a Torino, ecc.), invece, l'incendio determina una progressiva carbonizzazione dall'esterno verso l'interno della sezione che, comunque, non porta a cedimenti subitanei e lascia il legno non ancora carbonizzato efficiente dal punto di vista meccanico anche se la sua temperatura è aumentata. La rottura avviene quando la parte della sezione non ancora carbonizzata è talmente ridotta da non riuscire più ad assolvere alla sua funzione portante, pertanto la perdita di efficienza di una struttura di legno avviene per riduzione della sezione e non per decadimento delle caratteristiche meccaniche. Il processo di carbonizzazione può portare alla rottura dell'elemento strutturale in un tempo compreso fra alcuni minuti primi e alcune ore, in funzione della specie legnosa ma soprattutto delle dimensioni originarie della sezione; infatti, a parità di condizioni, una riduzione di alcuni centimetri è determinante per portare a rottura elementi di piccola sezione (ad esempio i travicelli e l'orditura minuta in genere) mentre è poco influente nel caso di travi di grossa sezione. Per contro gli elementi strutturali di acciaio non bruciano ma il materiale subisce un rapido decadimento delle

caratteristiche meccaniche in funzione della temperatura; ad esempio nella C. M. int. n. 91 14/09/61 *Norme di sicurezza per la protezione contro il fuoco dei fabbricati a struttura in acciaio destinati ad uso civile*, è previsto che un elemento strutturale di acciaio non protetto abbia una resistenza al fuoco di 15 minuti indipendentemente dalle sue dimensioni e dallo stato di sollecitazione; per conferire resistenza al fuoco superiore ai 15 minuti è necessario che gli elementi strutturali metallici siano protetti con vernici intumescenti o con rivestimenti ad alta resistenza.

Nelle costruzioni in calcestruzzo armato la resistenza al fuoco è determinata dallo spessore del rivestimento delle armature metalliche, copriferro ed eventuale rivestimento. Nelle strutture di legno i punti deboli sono le unioni metalliche a vista, come scarpe, piastre, ecc. che, se non protette, sono le prime a cedere durante l'incendio. L'innesco del meccanismo di combustione si ha intorno ai 200°C, l'inizio del degrado, con la plasticizzazione della lignina, si ha intorno ai 120°C

I requisiti richiesti per un elemento da costruzione, sia strutturale o no, riguardano la **resistenza** al fuoco e la **reazione** al fuoco.

Secondo il D. M. int. 30/11/83 *Termini, definizioni generali e simboli grafici di prevenzione incendi*, la **resistenza** al fuoco è definita come l'attitudine di un elemento da costruzione a conservare, in un dato intervallo temporale, in tutto o in parte la stabilità R, la tenuta E, l'isolamento I⁵⁶.

Il requisito di resistenza al fuoco per le strutture è limitato alla sola stabilità **R**; esso corrisponde al tempo che trascorre dall'inizio dell'incendio al crollo della struttura ed è espresso in minuti primi.

La **reazione** al fuoco è definita dal D. M. 48 del 26/06/84 come il grado di partecipazione di un materiale combustibile al fuoco al quale è sottoposto. Riguardo a ciò i materiali sono assegnati alle classi 0, 1, 2, 3, 4, 5 con l'aumentare della loro partecipazione alla combustione; quelli di classe 0 sono incombustibili. Il legno ed i prodotti a base di legno hanno reazione al fuoco 3 o 4. Il requisito di reazione al fuoco generalmente è richiesto per i soli elementi non strutturali, pertanto nella presente trattazione non sarà esaminato oltre.

La **resistenza al fuoco** di un elemento strutturale di legno può essere valutata con il metodo sperimentale o con quello analitico. Il primo prevede, secondo la C. M. int. n. 91 14/09/61 *Norme di sicurezza per la protezione contro il fuoco dei fabbricati a struttura in acciaio destinati ad uso civile*, prove in forno su elementi analoghi a quelli di effettivo impiego nella costruzione, dello stesso tipo e dimensioni e soggetti agli stessi carichi di progetto.

Nel calcolo analitico della resistenza al fuoco bisogna rispettare alcune ipotesi di base:

- la carbonizzazione procede perpendicolarmente alle superfici esposte con velocità costante;
- il legno conserva inalterate le proprie caratteristiche di resistenza e rigidità nella parte non ancora combusta;
- il calcolo è eseguito allo stato limite ultimo di collasso utilizzando quindi le tensioni di rottura.

I valori da assumersi nel calcolo analitico si possono ricavare dai seguenti documenti:

- dalla legge (lettera circolare M. int. 26/11/90 *Resistenza al fuoco di strutture portanti in legno* per la resistenza meccanica e D. M. int. 8/3/85 *Direttive sulle misure più urgenti ed essenziali di prevenzione incendi per il rilascio del nulla osta provvisorio* per la velocità di carbonizzazione) che però non fornisce indicazioni circa la combinazione di carico da assumersi e che peraltro non fa distinzione fra le specie legnose e le classi di qualità meccanica;
- dalla norma UNI 9504 *Procedimento analitico per valutare la resistenza al fuoco degli elementi costruttivi di legno* che però non è legge, la quale fornisce valori cautelativi rispetto alle leggi sopra citate;
- dalla norma UNI ENV 1995-1-2 *Eurocodice 5 - progettazione di strutture di legno - parte 1-2 progettazione strutturale contro l'incendio* che è il miglior documento dal punto di vista scientifico, anch'esso non è legge ma una norma sperimentale; questo documento fornisce tre metodi di calcolo, il primo dei quali (metodo della sezione efficace) è il più semplice ma anche il più cautelativo;

- dal Manuale di Ingegneria Civile ESAC-Zanichelli-Cremonese al capitolo XI, *Strutture di Legno* (a cura del Prof. Ario Ceccotti).

Questi metodi fanno riferimento al legno privo di protezioni quali rivestimenti, vernici, ecc. Nel caso di protezione si fa riferimento alla circolare M. int. 7/12/87, per cui si possono utilizzare controsoffitti, purché classificati per conferire alle strutture in acciaio una resistenza al fuoco uguale o superiore a 45'; in tal caso la resistenza al fuoco delle strutture sarà incrementata di un numero di minuti corrispondenti ai risultati delle prove riportati nel certificato del controsoffitto. Analogamente, la circolare M. int. 26/11/90 consente, per il raggiungimento delle prescritte caratteristiche di resistenza al fuoco, il rivestimento di strutture portanti in legno con elementi in legno naturale. Il calcolo della resistenza al fuoco si esegue assumendo una velocità di carbonizzazione costante anche nel rivestimento. Infine esistono in commercio vernici per legno che ritardano l'ignizione, che possono essere omologati, secondo il D. M. int. 6/3/92, in classi di reazione al fuoco ma non di resistenza al fuoco. Questi prodotti abbassano la velocità di penetrazione della carbonizzazione, fino a dimezzarla, e ritardano l'ignizione; ma non possono essere omologati per legge come vernici per conferire resistenza al fuoco per mancanza di normativa in materia. E', però possibile determinare la resistenza al fuoco di un elemento strutturale trattato con vernici igniritardanti utilizzando il metodo sperimentale.

Nel progetto della piastra di solaio, si è scelto di lasciare parzialmente a vista, la struttura; con ciò, inevitabilmente, si prescinde dall'utilizzo di elementi protettivi esterni, tipo pannelli in gesso o in fibra minerale dotati di Rei adeguato.

Nel tentativo di prolungare nel tempo le prestazioni della piastra in caso di incendio, non potendo contare su sezioni di grande dimensione, poiché questo è imprescindibile punto di partenza, nonché titolo della tesi, si è percorsa la strada della protezione del legno con vernici intumescenti, che formano sul legno, a elevate temperature, una sorta di scudo termico.

In particolare, si è preso spunto dall'esperienza della Fenice di Venezia⁵⁷, nella fase di ricostruzione post incendio. Dalle prove di laboratorio effettua-

te dai progettisti, si è verificato che l'utilizzo di due mani di vernice intumescente consente di ottenere un ritardo dell'inizio della carbonizzazione pari rispettivamente a:

- 10-15 minuti, se si utilizza un sistema antidistacco per la vernice, costituito da una rete pressoché invisibile in fibra di vetro fissata con graffette;
- alcuni minuti in assenza di sistema antidistacco: in tal caso, infatti, la vernice cade abbastanza rapidamente e il legno risulta privo di protezione.

Secondo quanto prescritto dal regolamento italiano, gli elementi strutturali in legno devono garantire una protezione al fuoco almeno pari a Rei 90. Ciò si può ottenere utilizzando essenze legnose di prima classe di qualità (cfr. Din 4074), trattate con vernici o sali minerali, che le rendono di classe 1 di reazione al fuoco, secondo la *tabella di classificazione dei materiali in base ai metodi di prova Iso dis 1182.2, cse rf 1/75/a, cse rf 2/75/a, cse rf 3/77* (cfr. D.M. 26 giugno 1984). Questi trattamenti sono consigliati soprattutto per evitare che il legno costituisca esca iniziale per l'incendio rallentando nella prima fase il processo di combustione. Le vernici intumescenti possono essere coprenti o trasparenti, generalmente a base di acqua in due componenti separati (polimeri vinilici), che garantiscono la riduzione della reazione al fuoco per incrementare la resistenza al fuoco delle parti in legno, attraverso un processo di microespansione superficiale dei componenti che formano nel legno uno strato altamente coibente atto a rallentare l'aumento della temperatura⁵⁸. La scelta delle vernici intumescenti, discende anche dalla protezione dal fuoco che offrono, con una formula innovativa che non lascia pellicole sulla superficie perché lascia aperti i pori del legno, che così continuano ad assorbire e a cedere umidità in equilibrio con l'ambiente⁵⁹.

Queste vernici si basano sulla chimica dei borati idrosolubili, che sono stati oggetto di attenti studi nel corso degli ultimi 50 anni nel campo del trattamento protettivo del legno. I borati hanno la caratteristica peculiare di avere una tossicità così bassa per l'uomo da essere frequentemente usati in prodotti per uso domestico, e, in quanto sali naturali, hanno un impatto ambientale molto basso; hanno una tensione di vapore pressoché nulla, e perciò rimangono definitivamente nel legno, che è continuamente protetto⁶⁰.

Le unioni previste nella piastra di progetto sono in acciaio, che se non protetto è vulnerabile all'incendio. Valide indicazioni sulla resistenza al fuoco delle unioni si trovano solo nell'UNI ENV 1995-1-2. Per quanto riguarda le unioni legno-legno ed acciaio-legno che fanno uso di elementi metallici di collegamento (piastre, chiodi, spinotti, bulloni, anelli, ecc.) si fa distinzione fra unioni protette da rivestimento in legno e non. Nel caso delle unioni non protette se gli elementi metallici di collegamento sono inseriti nel legno rispettando le distanze minime dai bordi prescritte per il calcolo a freddo, allora l'unione ha $R=15$; per classi di resistenza superiori bisogna incrementare le distanze dai bordi e lo spessore dei legni proporzionalmente ai minuti di resistenza la fuoco richiesta eccedenti i 15. Se l'unione è protetta, le protezioni (in legno o in materiali a base di legno incollato o opportunamente chiodato al giunto) devono avere spessore proporzionale ai minuti di resistenza al fuoco richiesta eccedenti i 15. La resistenza al fuoco delle strutture deve essere confrontata con la classe dell'edificio che è la resistenza al fuoco richiesta espressa in minuti primi (da 15 a 180); nel caso degli edifici contenenti strutture di legno nella determinazione del carico d'incendio bisogna tener conto anche della presenza delle strutture di legno le quali si sommano agli altri materiali combustibili non strutturali.

Dall'analisi delle quattro norme anzidette, si verifica che non ci sono indicazioni chiare sul calcolo della resistenza la fuoco delle strutture di legno, in tal senso si può dire che:

- la legge fornisce indicazioni sommarie ed opinabili: la velocità di carbonizzazione non dipende dalle caratteristiche fisiche e dalla specie legnosa, la resistenza a rottura del legno non dipende dalla specie legnosa e dalla classe di qualità e, in ogni caso, è piuttosto elevata, la combinazione di carico è penalizzante, mancano indicazioni relative ai giunti;
- anche la UNI 9504 fornisce indicazioni sommarie ed opinabili: la velocità di carbonizzazione non dipende dalle caratteristiche fisiche e dalla specie legnosa ma c'è la sola distinzione massiccio-lamellare, la resistenza a rottura del legno è piuttosto bassa, la combinazione di carico è penalizzante, mancano indicazioni relative ai giunti; è generalmente accettato nelle pratiche di

prevenzione incendi anche se non ha valore di legge;

- L'Eurocodice 5 UNI ENV 1995-1-2 è il documento più completo ed affidabile, fornisce metodi di calcolo piuttosto laboriosi, ma non ha valore di legge;
- Le indicazioni contenute nel Manuale di Ingegneria Civile Esac-Zanichelli-Cremonese sono affidabili e di facile applicazione, ma anche in questo caso mancano indicazioni sul calcolo dei giunti⁶¹.

I quattro metodi forniscono risultati molto diversi fra loro, e in particolare la UNI 9504 determina risultati forse troppo prudenziali. In ogni caso, dall'esame della normativa antincendio si deduce che non esiste alcun divieto all'utilizzo del legno per le strutture portanti; per le nuove strutture la possibilità di aumentare la resistenza al fuoco semplicemente aumentando la sezione o proteggendo l'elemento strutturale con legno o altri materiali consente di usare con fiducia il legno anche negli edifici soggetti a prevenzione incendi⁶².

Per avere una prima idea della resistenza al fuoco della piastra progettata sono stati effettuati i calcoli secondo la norma *UNI ENV 1995-1-2 Eurocodice 5* (metodo della sezione efficace); si riportano i risultati ottenuti:

Luce $L = 5,00$ m

Interasse $i = 0,5$ m

Materiale	β_0 (mm/min.)
a) Conifere	
Legno massiccio con massa volumica caratteristica ≥ 290 kg/m ³ ed una dimensione minima di 35 mm	0.8
Legno lamellare incollato con massa volumica caratteristica ≥ 290 kg/m ³	0.7
Pannelli di legno con massa volumica caratteristica di 450 ed una dimensione minima di 20 mm	0.9
b) Latifoglie (legno massiccio o legno lamellare incollato) con massa volumica caratteristica ≥ 450 kg/m ³ e quercia	0.5
c) Latifoglie (legno massiccio o legno lamellare incollato) con massa volumica caratteristica ≥ 290 kg/m ³ e quercia	0.7

Tab. 1: Definizione della velocità di carbonizzazione in base alla massa volumica e all'essenza

Base sezione $b = 80 \text{ mm}$

Altezza sezione $h = 25 / 270 \text{ mm}$

Carico permanente⁶³ $G = 1,5 \text{ kN/m}^2$

Carico di esercizio $Q = 2,0 \text{ kN/m}^2$

Tempo: R

Dalla tabella n. 1 si deduce che per il legno di castagno, latifoglia, con massa volumica superiore a 450 kg/m^3 , la velocità di carbonizzazione è pari a 0.5 mm/min . Il carico di esercizio deve essere moltiplicato per 0.5 e sommato al carico permanente:

$$q = (G + 0,5 \times Q) \times i = (1,5 + 0,5 \times 2,0) \times 0,5 = 1,25 \text{ kN/m}$$

Il momento è:

$$M = \frac{q \times L^2}{8} = 3.91 \text{ kN.m} = 3.910.000 \text{ kN.mm}$$

Per ricavare le dimensioni della sezione resistente bisogna aggiungere una quantità fissa pari a 7 mm .

$$b_{ef} = b - 2(V_{car} \times R + 7) = 80 - 2(0,5 \times 5 + 7) = 62 \text{ mm}$$

$$h_{ef} = h - (V_{car} \times R + 7) = 25 - (0,5 \times 5 + 7) = 16 \text{ mm}$$

$$W_{ef} = \frac{b_{ef} \times h_{ef}^3}{6} = \frac{62 \times 16^3}{6} = 42325.333 \text{ mm}^3$$

Per il legno massiccio di castagno, la resistenza ultima a flessione è pari al prodotto di quattro parametri:

$$k_{mod,fi}=1$$

$$k_{fi}=1.25 \text{ (legno massiccio)}$$

$$f_{m,k} = 80 \text{ N/mm}^2 \text{ (resistenza normale)}$$

$$\gamma_{M,fi}=1$$

$$f_{m,fi,d} = 80 \times 1.25 = 100 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma = \frac{3.910.000}{42325.333} = 92 < 100$$

$$42325.333$$

Il Rei trovato, chiaramente molto basso, si riferisce alla sola tavola di legno tra i nodi ogni 50 cm e non tiene conto della direzione dell'incendio, quindi se la propagazione avviene dal basso si romperà la prima tavola dopo i primi cinque minuti e così in sequenza fino alla sesta.

Per il calcolo della resistenza nei nodi, si è scelto, per semplicità di calcolo,

di considerare la sezione piena. In tal modo i risultati ottenuti sono:

$$b_{cf} = b - 2(V_{car} \times R + 7) = 80 - 2(0.5 \times 60 + 7) = 6 \text{ mm}$$

$$h_{cf} = h - (V_{car} \times R + 7) = 270 - (0.5 \times 60 + 7) = 233 \text{ mm}$$

$$W_{cf} = \frac{b_{cf} \times h_{cf}^3}{6} = \frac{6 \times 233^3}{6} = 12649337 \text{ mm}^3$$

$$k_{mod,fi} = 1.0$$

$$k_{fi} = 1.25 \text{ (legno massiccio)}$$

$$f_{m,k} = 80 \text{ N/mm}^2 \text{ (resistenza normale)}$$

$$\gamma_{M,fi} = 1.0$$

$$f_{m,fi,d} = 80 \times 1.25 = 100 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma = \frac{3,910,000}{12649337} = 3 < 100$$

Dai calcoli effettuati si evince, sostanzialmente, che, dal punto di vista della sicurezza al fuoco, il punto debole della struttura è la minuta sezione delle tavole tra nodo e nodo, che offre ben poca resistenza al propagarsi dell'incendio. Per altro, il difetto della struttura così come è stata congeniata, è nella progressiva perdita di collegamento, in caso d'incendio, tra i nodi, dove è concentrata la massa, che posseggono una resistenza ben superiore rispetto alle tavole. Questo inconveniente potrebbe essere risolto collegando i nodi oltre che con le tavole, anche con un piatto di acciaio posto in una scanalatura nella parte superiore dell'ultima tavola, in modo da tenere uniti i nodi per un tempo superiore rispetto a quello computato.

I calcoli effettuati, rappresentano, in sostanza, una prima stima sommaria degli effetti del fuoco sulla piastra di solaio, che serve per individuare qualitativamente i nodi problematici del sistema, senza tenere conto, per esempio, del fatto che si sceglierà un controsoffitto Re_i 180, che consentirà alle tavole superiori di bruciare molto tempo dopo, e che il sistema sarà completato da un assito che proteggerà le tavole poste in alto, o che si potranno utilizzare impregnanti igniritardanti che, per quanto stabilito dalla legge, conferiscono un incremento di resistenza di 10-15 minuti alla struttura.

In ogni caso, per brevità ed esattezza, sono oggi disponibili software, come *CPI win Legno*, che consentono, tenendo conto delle tre normative diverse (Uni, Circolare M.I., EuroCodici 5), di effettuare la verifica di resistenza al fuoco di strutture in legno, travi, solai, pilastri, di forma rettangolare o circo-

lare. Si tiene conto delle eventuali rastremazioni, intagli, protezioni con vernici, pannelli, ecc., in modo da realizzare una *relazione di calcolo* completa in ogni suo aspetto⁶⁴.

Altro capitolo centrale nella normativa italiana è quello riguardante l'**antisismicità**⁶⁵.

Al contrario di quanto si ritiene nella prevenzione dal rischio incendio in edilizia, il legno è considerato un materiale da costruzione adatto, addirittura consigliabile per costruire in zona sismica, a patto che si ponga la dovuta attenzione nella progettazione e realizzazione dei dettagli strutturali. Al verificarsi di un evento sismico, le costruzioni in legno offrono molti vantaggi in termini di sicurezza rispetto ai sistemi costruttivi tradizionali, in virtù della loro elevata deformabilità, della buona capacità di dissipare energia e del ridotto peso degli elementi strutturali. Queste caratteristiche sono riscontrabili nel buon comportamento di edifici realizzati con sistemi strutturali in legno durante i passati terremoti, e da una delle caratteristiche principali del legno, ossia la **Leggerezza**. I valori massimi delle sollecitazioni provocate dall'azione sismica, infatti, sono, per la legge di Newton, direttamente proporzionali alle masse proprie e portate dalla struttura e all'accelerazione massima che queste ultime subiscono. Le strutture in legno, confrontate con le strutture realizzate con materiali da costruzione tradizionali, sono leggere e pertanto le sollecitazioni indotte dall'azione sismica sono notevolmente inferiori. Il peso specifico del legno massiccio di conifera, per esempio, è pari circa a 500 kg/m³; ciò significa che il rapporto tra peso specifico e resistenza è simile a quello dell'acciaio ed è 5 volte inferiore a quello del calcestruzzo.

Il secondo importante parametro è la **Resistenza** che, nel legno è dello stesso ordine di grandezza di quella del calcestruzzo, ma con in più la resistenza a trazione. Il legno però, a causa delle sue proprietà viscoelastiche, presenta una spiccata dipendenza delle caratteristiche meccaniche in funzione della durata del carico. In particolare, se sottoposto a carichi istantanei, quali ad esempio l'azione sismica, le proprietà di resistenza hanno un incremento pari al 10% del valore corrispondente a carichi di durata di 5 minuti e al 50%

del corrispondente valore riferito ai carichi di lunga durata.

La **Deformabilità** dipende dal valore medio del modulo elastico del legno in direzione parallela a quella delle fibre ed è all'incirca un terzo di quello del calcestruzzo. Anche per il valore del modulo elastico, a causa del comportamento viscoelastico del legno, si ha un incremento per carichi istantanei pari al 20% e più. In ogni caso il fatto che il legno sia deformabile implica un'alta flessibilità che si può tradurre in un aumento del periodo proprio di oscillazione e, quindi, in una minore suscettibilità della struttura nei confronti dell'azione sismica. Tuttavia l'utilizzo del legno in zona sismica può essere sconsigliabile per la sua **Fragilità**, dovuta alla presenza dei difetti inevitabilmente presenti, per esempio i nodi, soprattutto all'aumentare delle dimensioni della sezione e del volume di materiale sollecitato, a causa dell'aumentare della probabilità di trovare un'imperfezione determinante nella zona più sollecitata. Il problema si supera mediante l'utilizzo di elementi meccanici di collegamento, i quali avendo uno spiccato comportamento plastico, permettono il raggiungimento di livelli di duttilità maggiori di 1 per tutto l'organismo strutturale. Soprattutto nel caso di edifici per l'edilizia residenziale a intelaiatura in legno e rivestimento in compensato strutturale o OSB, dove la presenza di migliaia di chiodi che collegano gli elementi portanti di legno massiccio ai pannelli di compensato svolgono un ruolo fondamentale nel raggiungimento del livello di duttilità necessario al buon comportamento dell'edificio sotto l'azione del terremoto.

Il criterio attuale nella progettazione delle strutture in zona sismica prevede che gli edifici siano in grado di resistere al "terremoto di servizio" (evento sismico moderato con un periodo di ritorno di 50 anni, vale a dire pari al periodo di vita utile previsto per la struttura), senza subire danni significativi o eccessive deformazioni che ne limitino l'utilizzo. Inoltre gli edifici devono essere in grado di resistere, senza che avvenga il collasso completo della struttura, al "terremoto ultimo" (evento sismico di notevole intensità, ma con una bassa probabilità che avvenga, con un periodo di ritorno di 250 anni).

La progettazione antisismica, secondo l'Eurocodice 8, prevede che le strut-

ture siano concepite secondo il *Criterio della gerarchia delle resistenze*, ossia è necessario che gli elementi strutturali a comportamento plastico raggiungano lo stato post-elastico, quando gli elementi a comportamento fragile sono ancora in fase elastica e lontani dalla rottura⁶⁶. L'attitudine di una struttura a sviluppare deformazioni plastiche nei suoi elementi strutturali e di dissipare energia senza arrivare alla rottura è una parte essenziale della sua capacità di resistere alle azioni sismiche. Un elemento strutturale di legno ha un comportamento lineare elastico sino alla rottura, e sotto l'effetto di un carico ciclico mostra un comportamento spiccatamente fragile, sia per effetto dei nodi e sia perché non c'è dissipazione di energia, a eccezione di alcune zone con compressione perpendicolare alla fibratura. I giunti incollati hanno anche loro un comportamento elastico, e non contribuiscono né al comportamento plastico della struttura né alla dissipazione di energia. Ciò significa che le strutture in legno composte da giunti incollati ed elementi assemblati con vincoli perfetti, per esempio, debbano essere considerate come strutture non dissipative, senza alcun comportamento plastico.

Il comportamento duttile e la capacità di dissipare energia possono essere raggiunti con le connessioni fra gli elementi strutturali se queste sono "semi-rigide", come molte connessioni meccaniche, piuttosto che "rigide" come le connessioni incollate. Nel progetto della piastra di solaio dunque, la scelta di progettare giunzioni meccaniche senza mai fare uso di colle, nata dalla volontà di rendere la piastra di solaio completamente reversibile e riciclabile, si dimostra adeguata rispetto all'ottenimento di uno spiccato comportamento plastico.

La **Duttilità** è valutata attraverso il fattore di struttura q , definibile come rapporto fra l'accelerazione di picco del terremoto che porta al crollo la struttura e l'accelerazione di picco che porta la struttura al raggiungimento del limite elastico. In tal modo si tiene conto della capacità di dissipazione di energia della struttura attraverso un comportamento duttile. I valori del fattore di struttura sono ovviamente diversi in funzione del tipo di materiale utilizzato, delle caratteristiche dei giunti e del tipo di struttura. Nel caso di strutture poco dissipative tale valore è pari a 1.

L'EuroCodice 8, nella parte riferita alle strutture di legno, identifica il corretto valore del fattore di struttura da adottare in funzione del sistema costruttivo e del tipo di giunti che lo compongono; con ciò si definiscono le tipologie strutturali ammesse ed il corrispondente valore del fattore di struttura q . Queste sono:

Strutture non dissipative, senza o solo con alcuni giunti con connettori meccanici, $q=1$.

Strutture poco dissipative, con poche ma efficaci zone dissipative, $q=1.5$.

Strutture mediamente dissipative quali edifici con pareti verticali resistenti alle azioni orizzontali dove il rivestimento è incollato al telaio. I solai sono interconnessi per mezzo di connettori meccanici, $q=2$.

La piastra di solaio progettata si può considerare, per il tipo di giunto, mediamente dissipativa ($q=2$).

Strutture con buon comportamento dissipativo, quali edifici con elementi verticali in grado di sopportare anche azioni di tipo orizzontale, dove il rivestimento è meccanicamente collegato alla struttura intelaiata, $q=3$.

I **giunti** realizzati con connettori meccanici presentano uno spiccato comportamento plastico se sono rispettate le prescrizioni riguardanti gli interassi fra i connettori e le distanze dai bordi e dalle estremità degli elementi lignei. Questo è dovuto a due fenomeni che avvengono contemporaneamente: il rifollamento del legno e la plasticizzazione dei connettori metallici.

In caso di applicazione di un carico ciclico, come è l'azione sismica, la combinazione di questi due comportamenti permette, con una rapida inversione della forza applicata, la possibilità di raggiungere quel comportamento duttile e dissipativo che è indispensabile per resistere all'azione sismica. I cicli del diagramma carico-spostamento assumono una configurazione a "farfalla" il cui corpo centrale si assottiglia man mano che si va verso valori più alti del carico. L'assottigliamento del ciclo è dovuto al fatto che i giunti meccanici si sono fatti posto nel legno e a ogni incremento del carico continuano a farsene sempre di più, e solo una piccola parte della deformazione del legno, dovuta all'azione concentrata del connettore, viene recuperata elasticamente, quindi all'inversione del carico si hanno grandi spostamenti per modesti

incrementi o decrementi del carico. Ciò determina deformazioni cospicue prima di giungere alla rottura o per frattura localizzata del legno o per crisi dell'elemento di collegamento, e conseguentemente di dissipare una notevole quantità di energia per isteresi.

Nella piastra di solaio si è tenuto conto di questa prescrizione, come è evidenziato nei disegni riportati.

Infine la **Durabilità** è l'ultimo parametro da tenere in considerazione nella progettazione con il legno. Questa caratteristica è la capacità di un materiale di mantenere nel tempo le caratteristiche fisico meccaniche e di aspetto possedute nel momento della sua messa in opera, che per definizione non appartiene naturalmente al legno, il cui processo di deterioramento è dovuto a cause diverse tra cui principalmente la presenza di acqua che favorisce la proliferazione di batteri e funghi, e degli insetti xilofagi. Quando non è possibile proteggere il legno dall'acqua e dal sole, si rende necessario impregnarlo con sali minerali spinti a pressione e in profondità; in tal caso il legname stagionato, con umidità media prossima al punto di saturazione delle pareti cellulari viene introdotto nell'autoclave dove si procede a creare un vuoto di 0,7 atmosfere, che svuota la cavità delle cellule dell'aria. Si introduce l'antisettico che per differenza di pressione comincia ad entrare nel legno; durante questa fase la pressione tende a ritornare ai livelli normali. Su questo ultimo tema, si dibatte la letteratura scientifica, spesso incline a preferire l'utilizzo di sostanze chimiche che garantiscano durabilità al legno (soprattutto delle parti più deteriorabili) anche a scapito dell'inquinamento che da esse deriva. È ancora Franco Laner a esprimere a tal proposito un parere molto convincente: «l'osservazione delle opere del passato mi ha portato ad una convinzione: vana è la ricerca della lunga vita del legno! Sapendo però che alcune parti, quelle a maggior contatto con l'acqua, con l'umidità o esposte ai raggi ultravioletti, ad attacchi biotici o xilofagi, degraderanno velocemente, si farà in modo – con attenta progettazione tecnologica – che le parti deteriorate si possano facilmente sostituire, oppure si farà in modo da proteggerle con elementi di sacrificio. Il progetto col legno dovrebbe dunque

essere progetto di **sostituibilità**. Parti o elementi sostituibili garantiranno la durabilità dell'opera»⁶⁷. Ancora oggi, infatti, sono disponibili ai nostri occhi gli splendidi tempi lignei giapponesi proprio perché intere parti o addirittura l'insieme sono stati oggetto di sostituzioni sapienti, come per l'usanza di ricostruire regolarmente il tempio di Ise Jingu in Giappone secondo cicli prestabiliti, ogni venti anni, dal 750 d.C. fino a oggi⁶⁸.

Il progetto della durabilità delle architetture in legno, come spiega ancora Laner, non può essere necessariamente conservazione della materia, «semplicemente il più delle volte basterebbe sostituire il pezzo deteriorato, senza ricorrere a resine e pastrocchi di cui non si conosce nemmeno l'esito. La sostituzione, con semplici incalzi o fettoni, o con l'intero elemento strutturale, è ancor più lecita se proprio la struttura è stata progettata per rendere facile la sostituzione del pezzo fuori servizio»⁶⁹. Ciò significa in realtà che le unioni per collegare gli elementi sono fra i dettagli ed i particolari costruttivi più importanti e delicati della tecnologia del legno, sia nella concezione che nella realizzazione.

I maggiori danni alle strutture lignee, infatti, derivano da studi, calcoli, progettazione o esecuzione sbagliata dei nodi e non, come è diffusa credenza, dal fuoco.

Il prof. Maurizio Piazza in un grafico presentato a Verona nel 2001 per la mostra *Legno-edilizia*, considera come causa di difetti e rotture di costruzioni in legno per il 18% il vento, al 12% la cattiva esecuzione o progettazione dei sistemi di assemblaggio al 10% i funghi, al 9% gli insetti e solo l'1% al fuoco.

Pertanto si è reso necessario nel progetto della piastra di solaio il calcolo della massima resistenza in esercizio, osservando in una prima fase che non insorgessero giochi o anomalie funzionali, o addirittura deformazioni del giunto; si è posta la necessità di evitare eccentricità delle forze agenti rispetto alla direzione delle fibre e quindi delle tavole, e di rispettare le distanze minime e lo spessore minimo degli elementi che compongono gli organismi di assemblaggio. La sostituibilità per parti della struttura è garantita oltre che dall'utilizzo esclusivo dell'assemblaggio a secco (tutto è avvitato e solo in

pochi casi si fa uso di chiodi), anche dal fatto che le tavole possono essere smontate dopo avere staccato le tavole inchiodate del pavimento, se il guasto è nella parte superiore o viceversa svitare i connettori del cartongesso nel caso in cui siano rovinate le tavole della parte inferiore.

Note

¹ Scrive il prof. Antonio Frattari in occasione della conferenza “Sostenibilità ambientale delle costruzioni in legno” tenutasi in occasione del Saie 2004: «La sostenibilità ambientale delle costruzioni di legno investe molteplici aspetti da quelli tecnico-scientifici a quelli sociali, fino ad una loro maggiore interazione che può essere prevista pensando agli sviluppi futuri. (...) La sostenibilità del legno nelle costruzioni è anche nella sua capacità di creare lavoro. Basti pensare agli addetti alla filiera legno: dalla foresta, alla segheria, ai semilavorati. A questi si aggiungano poi i carpentieri, i montatori e i venditori; tutti attori di un processo edilizio che basa il suo essere e il suo futuro sulla produzione e sull'impiego di un materiale che trova ulteriore valenza di sostenibilità anche nella sua rinnovabilità»

² Cfr. Schittich Christian, “Costruire in legno oggi”, *Detail*, n. 5, 2002, p. 544.

³ Pizzetti Giulio e Anna Maria Zorgno Trisciunglio, *Principi statici e forme strutturali*, Utet, Torino, 1980, p. 637.

⁴ Laner Franco, “Vecchi morfemi per nuovi tecnemi”, *Materia*, n. 36, settembre – dicembre 2001, p. 22.

⁵ *Ib.*

⁶ Nardi Guido, “Le nuove strutture in legno”, *l'Arca* n. 74, 1993, pp. 80-81.

⁷ Laner Franco, “Mettere in forza, la chiesa della Compagnia di Gesù a Cordoba, Argentina”, *Adrastea*, 18, 2001, p. 4.

⁸ La cui ragione d'uso sono da ricercare nella necessità di smontare e trasportare in pezzi leggeri e maneggevoli l'intera struttura.

- ⁹ Frampton Kenneth, "L'origine della tettonica: forma nucleo e forma artistica nell'Illuminismo tedesco, 1750-1870", *Tettonica e architettura. Poetica della forma architettonica nel XIX e XX secolo*, (1995), tr. it. Skira, Milano, 1999, p. 108.
- ¹⁰ Semper Gottfried, (1977) *Der Stil in den technischen und tektonischen Künsten, oder praktische Aesthetik, ein Handbuch für Techniker, Künstler und Kunstfreunde, 2 vols, Mittenwald: Maander Kunstverlag*, tr. it. Augusto Romano Burelli, *Lo stile nelle arti tecniche e tettoniche, o Estetica pratica: manuale per tecnici, artisti e amatori*, Laterza, Bari, 1992.
- ¹¹ Semper raccoglieva in questa opera epocale una gran quantità di osservazioni empiriche e di riflessioni teoriche divenute poi punto di riferimento imprescindibile per chiunque dopo di lui avesse voluto accostarsi alla questione dello stile nelle arti figurative, nell'artigianato, nell'architettura: in una parola, nelle arti *spaziali*. Per la sua insistenza sul *Können*, sul *saper fare*, e per la sua attenzione per le questioni connesse ai materiali e alle tecniche, Semper appariva il pericoloso avversario materialista e tecnicista contro cui erano chiamate a battersi le teorie spiritualistiche e teleologiche dello stile sviluppatesi verso la fine del diciannovesimo secolo, *in primis* quelle di Riegl e Wölfflin, volte entrambe all'individuazione di un *Wollen*, di un *voler vedere* come motore del divenire artistico.
- ¹² Frampton Kenneth, "L'origine della tettonica: forma nucleo e forma artistica nell'Illuminismo tedesco, 1750-1870", *Tettonica e architettura. Poetica della forma architettonica nel XIX e XX secolo*, (1995), tr. it. Skira, Milano, 1999, p. 109.
- ¹³ Sergio Pone, *L'idea di struttura*, FrancoAngeli, Milano, 2005, p. 60.
- ¹⁴ McQuaid Matilda, *Shigeru Ban*, Phaidon, New York, 2003, p. 112.
- ¹⁵ www.edwardcullinanarchitects.com/projects/cultural/downland.
- ¹⁶ Cfr. www.herzog-und-partner.de.
- ¹⁷ Wright Frank Lloyd, *Antologia dell'architettura moderna. Testi, manifesti, utopie*, (1960) tr. it. Zanichelli, Bologna, 1988, p. 96.
- ¹⁸ Cfr. www.taliesinpreservation.org.
- ¹⁹ Frampton Kenneth, "Frank Lloyd Wright e la tettonica tessile", *Tettonica e architettura. Poetica della forma architettonica nel XIX e XX secolo*, (1995), tr. it. Skira, Milano, 1999, p. 125-127.
- ²⁰ Frank Lloyd Wright, *Una Autobiografia* (1932), tr. it. Jaka Book, Milano, 1995, p. 125.
- ²¹ Cfr. Otto Frei e Rash Bodo, *Finding Form*, Axel Menges, 1995, pp. 138-145, Webster John; "Spanning the Gap Between Architecture and Engineering", http://oak.arch.utas.edu.au/research/spanning_gap.asp
- ²² Marano Antonio, *Legno e metallo. Soluzioni progettuali dall'integrazione materiali diversi*, FrancoAngeli, Milano, 1994, p. 68.
- ²³ Cfr. Dal Co Francesco, *Tadao Ando*, Electa, Milano, 1994, p. 380.
- ²⁴ Ando Tadao, "Tempio della Terra Pura", *The plan*, 004, 2003, p. 24.
- ²⁵ Ispirandosi, infatti, alla Conferenza di Rio de Janeiro del 1992, e all'auspicio di migliorare le condizioni economico-sociali umane, il filo conduttore dell'Expo 2000 di Hannover, per il quale furono convocati più di 150 paesi, è espresso dal titolo stesso della manifestazione: "Uomo, Natura, Tecnica". Molti dei padiglioni, infatti, sono stati pensati per essere smontati e riciclati, o realizzati con materiali eco-compatibili, come il già menzionato padiglione giapponese di Shigeru Ban, quasi interamente realizzato in carta e stoffa con una struttura in tubi di cartone pressato e cavi in acciaio, che alla fine della manifestazione si trasforma in quaderni o giornali. Quello svizzero, progettato da Peter Zumthor è stato ideato per diventare materiale da costruzione perfettamente riutilizzabile, vista l'assoluta mancanza di colla o chiodi nel fitto insieme delle travi di legno.
- ²⁶ Cfr. Mombelli Rossella Letizia, "Tetto scultura", *Materia*, 36, 2001, pp. 34-45.
- ²⁷ Prodotta e lavorata senza additivi, trasparente, non infiammabile con alta capacità autopulente e

traslucida.

²⁸ McQuaid Matilda, *Shigeru Ban*, Phaidon, New York, 2003, p. 112.

²⁹ Cfr. Zappa Alfredo, "L'albero della cuccagna", *Costruire*, 257, 2004, pp. 170-182 e Laura della Badia, *Bubble. Ville Hara*, www.floornature.com, www.arcspace.com/architects/ville_hara/tower.

³⁰ Lo spazio interno del padiglione (progettato da Shigeru Ban con la collaborazione di Frei Otto e la consulenza strutturale di Buro Happold) è definito da una struttura a guscio sostenuta da supporti tubolari che ne determinano i limiti. Nel punto più ampio la struttura è larga 34 m e alta 15 m. Il modello è stato creato con l'aiuto di Robot Millennium, programma per l'edilizia destinato all'analisi delle strutture. La geometria della costruzione è stata realizzata con autocad. Il modello generato in Robot Millennium abbracciava 6656 elementi, cui sono stati applicate la rigidità e le proprietà del materiale ottenute in base ai test effettuati dalla ditta Buro Happold. (cfr. <http://robot-structures.com/ita>). Ciò che Ban propone nel suo padiglione è una mirabile sintesi tra un materiale riciclabile e a basso costo e installazioni dotate di grande eleganza e qualità architettonica, caratteristiche raramente associate all'idea di insediamento temporaneo.

³¹ Legno molto durevole che richiede minimi trattamenti di superficie.

³² Il legno è stato scelto a controllo visivo. Per ridurre al minimo lo spreco di legname, le sezioni difettose sono state rimosse e le assicelle restanti sono state unite a 40 atmosfere di pressione con giunto a pettine e colla poliuretanic. La lunghezza finale ottenuta è di 6 metri.

³³ Cfr. www.wealddown.co.uk/downland-gridshell-construction-progress.htm.

³⁴ Grazie, per esempio, alle nuove tecnologie produttive, in grado di offrire sistemi efficaci d'isolamento termico.

³⁵ Sistema di assemblaggio in cantiere delle pareti mediante sovrapposizione o incastratura di strati di perline con diverse sezioni strutturali, in funzione delle esigenze e con incastrature nelle tre direzioni spaziali. I solai a piano terra e gli orizzontamenti intermedi possono essere costruiti in molte varianti, ma sono generalmente supportati da una struttura lignea a travi e travetti o a strati di legno incrociati a garanzia di massima stabilità. Le aziende che utilizzano per la struttura di solaio il sistema a travi e travetti sono la maggioranza, tra queste: Edilegno2, Rubner haus, Wolf system, Casedani. Si tratta di una tipologia ormai superata a causa, tra le altre cose, dell'alto fabbisogno di legno e della difficoltà a isolarla contro i passaggi di aria, a causa dei cedimenti e dei ritiri delle travi orizzontali.

³⁶ Sistema molto resistente e stabile di pre-assemblaggio in fabbrica della trama strutturale costituita dalle singole pareti con un telaio bidirezionale di tavole, che si presta ad essere in seguito rivestito con diversi materiali di finitura. La standardizzazione degli elementi garantisce basso costo, poco materiale di scarto e montaggio rapido, ma i macchinari per la lavorazione sono piuttosto costosi.

³⁷ Sistema diffuso già da diverso tempo in Canada e nei Paesi dell'Europa del nord. Richiede legno con spessori ridotti e in quantità limitata, è di facile lavorazione, non necessita di grossi macchinari, è leggero e, pertanto, facile da trasportare e da montare. (Cfr. Ceccotti Ario, "Dai boschi del Trentino la casa del futuro", presentazione del progetto Case Fiemme, Seminario 22/11/2004).

³⁸ Cfr. Menicali Umberto, "Wood, sweet wood", *Costruire*, 260, 2005, pp. 66-71.

³⁹ www.rubner.com, www.balken.it.

⁴⁰ Sinopoli Nicola, "Saie 2004. I sintomi ci sono" *Costruire*, 259, 2005, p. 78.

⁴¹ Cfr. www.legnolego.it.

⁴² Cfr. La Franca Giuseppe, "Niente colla sono sano", in *Cantiere*, gennaio 2000, pp. 40-45.

⁴³ Cfr. Marchi Giovanni, "Costruire in legno con un sistema flessibile ed ecologico" in *Ingegneri Ferraresi, Atti del 47° Congresso Nazionale Ingegneri Microturbine a gas*, settembre dicembre 2002.

⁴⁴ www.lignatur.de.

- 45 La tavella in cotto, di dimensione standard unica 50x20x5 cm, con superficie sabbiata è prodotta dalla Rdb. Per maggiori informazioni: www.rdb.it.
- 46 Cfr. www.petercoxitalia.it. e Laner Franco, "Solai misti legno e cls", *Modulo*, 244, settembre 1998.
- 47 Maxi adesivo epossidico bicomponente per strutture in legno, Legno Armato, Legno-Cemento, etc. È di tipo termoindurente, e, una volta polimerizzata, diventa chimicamente inerte. Ciò significa che la sua struttura molecolare non è più modificabile. Di conseguenza la sua resistenza caratteristica rimane immutata.
- 48 Cfr. www.cenci.com.
- 49 Maule Adriano, "Solaio a cellula integrata", *Adrastea*, 15, 2000, pp. 14-19.
- 50 Laner Franco, "Vecchi morfemi per nuovi tecne", *Materia*, n. 36, settembre – dicembre 2001, p. 24.
- 51 Laner Franco, "Costruzioni in legno", *Materia*, n. 36, settembre – dicembre 2001, pp. 96.
- 52 Cfr. Piazza Maurizio, *Il legno lamellare: le nuove prospettive dell'innovazione progettuale*, Relazione al Forum di Bressanone, 26 settembre 2003.
- 53 Si fa riferimento alle DIN 1052 tedesche (norme generali di calcolo estremamente valide e complete) del 1933, la cui ultima revisione risale al 1996, alle norme francesi del 1981, Regles C. B. 71, e alle SIA 164, svizzere.
- 54 Cfr. Piazza Maurizio, *Relazione Saie 2004*, in www.palazzoroccabruna.it/FileAllegati/Saie/2004.it
- 55 Centro agricolo ai piedi del gruppo montuoso del Partenio, in provincia di Avellino
- 56 Molte informazioni relative alla sicurezza al fuoco sono state dedotte dall'intervento *Progettare la sicurezza. La sicurezza al fuoco* dell'Ing. Marco Lauriola, al convegno *Sicurezza e comfort nelle abitazioni con strutture di legno*, Verona 16 giugno 2001.
- 57 Si definiscono: **R** stabilità: attitudine di un elemento da costruzione a conservare la resistenza meccanica sotto l'azione del fuoco; **E** tenuta: attitudine di un elemento da costruzione a non lasciar passare né produrre - se sottoposto all'azione del fuoco su un lato - fiamme, vapori o gas caldi sul lato non esposto; **I** isolamento termico: attitudine di un elemento da costruzione a ridurre, entro un dato limite, la trasmissione del calore.
- 58 Cfr. www.ricostruzionefenice.it.
- 59 Generalmente queste vernici sono applicate a pennello, rullo o spruzzo, previa miscela dei due componenti, nelle quantità atte a garantire la classe di resistenza al fuoco richiesta Rei 30, 45, 60, 90. Le superfici di supporto devono essere esenti da sostanze che potrebbero pregiudicare la perfetta adesione e penetrazione. L'idoneità del prodotto a essere utilizzato come protettivo contro l'azione del fuoco su strutture di legno, deve essere comprovata dalla certificazione sperimentale, eseguita presso laboratori specializzati e riconosciuti, che ne consenta un'adeguata caratterizzazione sia in termini prestazionali, sia in termini di influenza sulla riduzione della velocità di carbonizzazione. Per ciascuna classe di resistenza al fuoco richiesta, la quantità da adottare deve essere calcolata, in funzione del tipo di elemento e del grado di sollecitazione. Il prodotto deve essere infine corredato a norma di legge da adeguata documentazione con certificazione di tipo sperimentale o analitico e a firma di un professionista abilitato.
- 60 Se i pori venissero chiusi con un prodotto filmogeno il legno rischierebbe di marcire. Il pH è generalmente neutro, per rispettare la struttura chimica del legno la cui durata non ne è alterata, i ritardanti di fiamma a pH acido, infatti, decomporrebbero lentamente la fibra cellulosa, con un grave effetto sulla durata delle strutture.
- 61 Cfr. www.aithon.it, www.protect.it, www.amonncosma.it, www.italintumescenti.it.
- Per ogni fornitura di vernice intumescente per la resistenza al fuoco deve essere fornita, ai sensi del D.M. 4/5/98, una documentazione composta dalla Certificazione di resistenza al fuoco di elementi por-

tanti e/o separanti, la Relazione di calcolo di resistenza al fuoco di elementi portanti e/o separanti, Certificato di conformità del prodotto, il certificato di conformità delle strutture e il Certificato di corretta posa in opera.

⁶² Cfr. Piazza Maurizio, “Perché scegliere il legno per una struttura alla quale si richiede una resistenza al fuoco?”, intervento al convegno *La resistenza al fuoco delle strutture lignee. Aspetti normativi e implicazioni progettuali*, settembre 2005.

⁶³ In generale, con il recente DM 10/03/2005, relativo alle “Classi di reazione al fuoco per i prodotti da costruzione da impiegarsi nelle opere per le quali è prescritto il requisito della sicurezza in caso d'incendio” si recepisce il sistema europeo di classificazione di reazione al fuoco dei materiali da costruzione. Secondo il decreto, in riferimento alla direttiva europea 89/106/CE, un materiale garantisce la sicurezza in caso di incendio, quando la capacità portante di un edificio è assicurata per un certo tempo; quando il fuoco si propaga fra gli ambienti della stessa opera in modo limitato; quando è limitata la diffusione del fuoco e del fumo anche alle opere vicine; quando agli occupanti è garantita la possibilità di uscire o di essere soccorsi e quando le squadre di soccorso sono messi in condizione di lavorare in sicurezza. Per resistenza al fuoco si deve intendere l'attitudine di un elemento da costruzione, quale componente o struttura, a conservare, per un certo tempo, in tutto o in parte le caratteristiche di *stabilità* intesa come l'attitudine del materiale a conservare la resistenza meccanica nonostante l'azione del fuoco; *tenuta* intesa come l'attitudine del materiale di non lasciar produrre né passare il fuoco attraverso il materiale e neanche fumo, fiamme, vapori e gas; *isolamento termico* inteso come l'attitudine di un materiale a ridurre entro un limite la trasmissione del calore.

⁶⁴ Per definire i carichi da assumere nel calcolo, le leggi in materia di prevenzione incendi rimandano al D. M. LL PP 16/1/96, *Norme tecniche relative ai criteri generali per la verifica di sicurezza delle costruzioni e dei carichi e sovraccarichi*, in questo documento non è indicata la combinazione di carico permanente sia presente

3. Sperimentazione progettuale e produttiva di un solaio in legno massello derivato da semilavorati di piccola dimensione

3.1 Il progetto

3.2 La prova sperimentale

3.3 Deduzioni finali

3.1 Il progetto

L'idea su cui si fonda il progetto della piastra di solaio, nasce dalla volontà di realizzare una struttura a doppia orditura ortogonale di quelle che già Zigmunt Stanislaw Makowski nel suo celebre *Strutture spaziali in acciaio* del 1963, definiva grigliati piani, tra i quali: «il più conosciuto e il più frequentemente riscontrato in pratica è il grigliato rettangolare, nel quale le travi si incrociano ad angolo retto e sono parallele alle pareti portanti»¹. Tali costruzioni consentono una notevole riduzione della dimensione degli elementi componenti rispetto alle strutture a orditura semplice soprattutto nei campi di solaio in cui le due dimensioni non differiscono di molto.

Importante esempio di queste strutture si può considerare la Nuova Galleria d'arte Moderna di Berlino², concepita da Mies van der Rohe, in cui la grande piastra quadrata di copertura è realizzata con un solaio a graticcio di circa sessanta metri di lato appoggiato su otto pilastri posti all'estremità della quinta e della tredicesima delle diciotto travi che compongono le due serie. La grande copertura berlinese è realizzata incrociando travi metalliche solidarizzate nei punti di incrocio tramite saldatura e tale metodo rende i giunti dei veri e propri punti di forza dell'intera struttura.

Le equivalenti strutture graticciate costruite in legno sono usualmente realizzate praticando una serie di incalzi alternativamente sulla faccia superiore e sulla faccia inferiore delle travi da incrociare, in corrispondenza dei nodi, in modo da poter incastrare la trave superiore in quella sottostante. Questa modalità costruttiva genera, al contrario di quanto descritto per la struttura metallica miesiana, un indebolimento del graticcio proprio nel nodo, dove la sezione lignea si assottiglia anziché aumentare di spessore.



Fig. 1: Nuova Galleria di Arte Moderna, architetto Mies van der Rohe, Potsdammer strasse 50, 1965-1968,

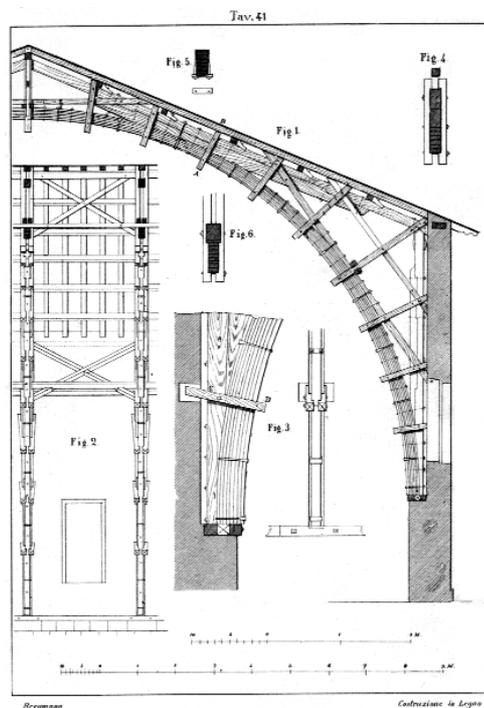


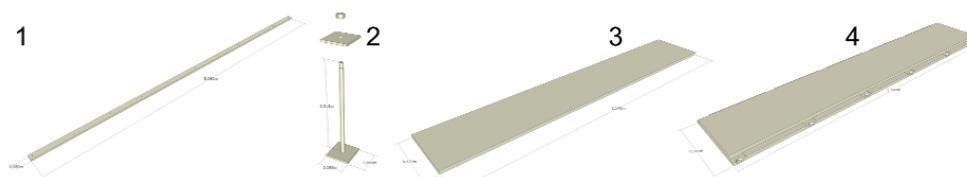
Fig. 2: Illustrazione tratta da Gustavo Adolfo Breyman, "Costruzioni in legno", in *Trattato generale di costruzioni civili con cenni speciali intorno alle costruzioni grandiose*, vol. II, sul sistema costruttivo ad archi composti da tavole di legno bullonate, progettato dal colonnello Emy nel 1823. Questa travatura viene considerata un antesignano del legno lamellare, ma a differenza di quest'ultimo non prevede l'uso di colle.

L'idea di base dalla quale prende le mosse questo progetto è quella di trasformare, anche nella struttura lignea, il nodo in punto di massima resistenza.

Tenendo presente da un lato la lezione di Philibert De L'Orme e dall'altro la volontà di utilizzare semilavorati di piccole dimensioni, il progetto si è quindi orientato verso una struttura relativamente più leggera nelle sue parti lineari e che però raddoppiasse la quantità di materia in corrispondenza degli incroci utilizzando il principio elaborato per la costruzione della Mannheim Lattice Shell di Frei Otto ed "ereditato" e sviluppato dalle recenti gridshell descritte nel secondo capitolo. A partire dalla suggestione fornita dalla singolare geometria che formano le dita di due mani che si incrociano, i travetti costituenti il solaio sono stati pensati come un'alternanza di cinque listoni a sezione piena (2,5 x 8 cm) con quattro equivalenti vuote, in cui trovano posto, nell'incrocio collocato ogni 50 cm, altrettanti elementi appartenenti al sistema analogo e ortogonale. In questo punto una barra filettata attraversa l'intero nodo e viene serrata nella parte inferiore e superiore per formare un parallelepipedo resistente pieno, di 8x8x25 cm disposto in verticale. La rete

di questi parallelepipedi verticali uniti dai travetti traforati e più leggeri, forma una struttura molto resistente che, fin dai primi tentativi di calcolo, ha offerto risultati sorprendenti.

Questi risultati sono ulteriormente migliorati quando la struttura è stata completata con gli elementi che realizzano l'orizzontamento vero e proprio, realizzato con le stesse tavole in legno di castagno da bosco ceduo da 12 anni, dello spessore di 2.5 cm appositamente sagomate per occupare la fascia di 42 cm che resta tra le ultime tavolette che compongono una delle famiglie di travetti. Al di sopra viene messo in opera un ultimo tavolato disposto in direzione ortogonale al precedente e fissato a questo con viti autofilettanti. Questa doppia orditura ha contribuito all'irrigidimento della faccia superiore del solaio e quindi ne ha migliorato ulteriormente le prestazioni strutturali.



Si prevede infine di inserire una pannellatura di controsoffitto tra la seconda e la terza fila di listoni realizzato con lastre di lana minerale pressata, classe 0 di reazione al fuoco, Rei 180, capacità di abbattimento del rumore dell'84%. Questo materiale oltre a realizzare la finitura dell'intradosso consente di offrire un ulteriore livello di isolamento termo-acustico tra i piani separati dalla piastra di solaio e consente di realizzare una intercapedine di 5 cm in cui ospitare un ulteriore materassino di materiale isolante e gli eventuali passaggi impiantistici che si rendessero necessari.

Per confermare scientificamente la bontà dell'intuizione strutturale posta alla base del ragionamento sviluppato nel paragrafo precedente si è provveduto a elaborare, utilizzando alcuni software di calcolo strutturale, un modello in grado di riprodurre l'esatto funzionamento della piastra di solaio una volta realizzata. Per simulare il comportamento del nodo composto dalla barra

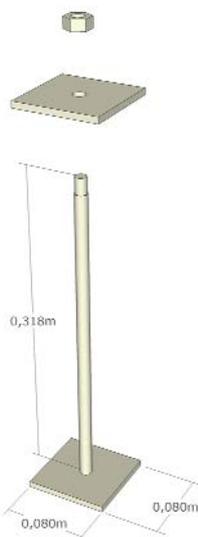


Fig. 4:

filettata serrata sopra e sotto si è fatto ricorso all'inserimento di un'asta strutturale, incastrata con tutti i listoni che incrocia, riproducendo un graticcio composto da due serie di travi multiple parallele con nodi incastrati. Il singolo travetto, composto da cinque listoni paralleli da 25 x 80 mm distanziati tra loro di 25 mm dall'altra serie di listoni ortogonali forma una figura strutturale che potrebbe richiamare una trave vierendeel composta da una successione (secondo gli assi y e z) di maglie rettangolari formate da elementi tutti incastrati tra di loro. L'intera piastra quindi assume la configurazione di un graticcio composto da due serie di travi equivalenti incastrate in tutti i nodi rispetto ai carichi verticali ed incernierate rispetto ai carichi orizzontali. Questa teorica labilità viene compensata dalla posa del doppio assito orizzontale che, fissato alle ultime serie di listoni componenti il graticcio, assolve alla funzione di irrigidimento rispetto ai carichi orizzontali.

Il sistema fin qui descritto non tiene conto della necessaria variabilità dimensionale che, nella sconfinata casistica dell'edilizia, ci si può trovare ad affrontare, dato che il solaio di progetto è vincolato ad una successione di maglie quadrate di 50 x 50 cm. Per introdurre tale variabilità bisogna coin-

		numero fori										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
interassi tra i fori	44	88	132	176	220	264	308	352	396	440	484	
	46	92	138	184	230	276	322	368	414	460	506	
	48	96	144	192	240	288	336	384	432	480	528	
	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	
	52	104	156	208	260	312	364	416	468	520	572	
	54	108	162	216	270	324	378	432	486	540	594	
	56	112	168	224	280	336	392	448	504	560	616	

Tab. 1: Nelle righe di questa tabella sono riportate le distanze tra gli assi dei fori, mentre nelle colonne è indicato il numero di fori. I valori contenuti nelle celle indicano la lunghezza dei travetti di solaio. Si nota come i numeri evidenziati presentano la distribuzione dei valori più regolare.

volgere il parametro produttivo; infatti esistono sul mercato delle macchine denominate perforatrici multiple in cui una batteria di punte di trapano sincronizzate sono azionate simultaneamente da una slitta a movimento verticale. Tramite questo movimento si possono praticare fori a distanze fisse e con estrema precisione.

Naturalmente i mandrini a cui si fissano le punte sono situati a loro volta su piccole slitte che ne consentono la traslazione relativa. Questa caratteristica della macchina consente di prevedere, senza particolari aggravii produttivi, la realizzazione di piccoli scatti modulari nella collocazione dei fori che potranno quindi distare tra di loro di 48, 50 e 52 cm e dare luogo a misure variabili: utilizzando undici travetti (che corrispondono a 10 quadrati) si otterrà con la foratura a 48 cm una campo strutturale di 4,80 m con quella da 50 di 5,00 m e con quella da 52 di 5,20 m.

Combinando la misura dell'interasse con il numero di fori si ottengono le dimensioni riportate nella tabella seguente che, disposte in serie e considerando i valori più diffusi per la realizzazione di un campo di solaio (3.00 – 5.50 metri), danno luogo ad una successione di misure la cui differenza varia da un massimo di 24 cm ad un minimo di 8 cm.

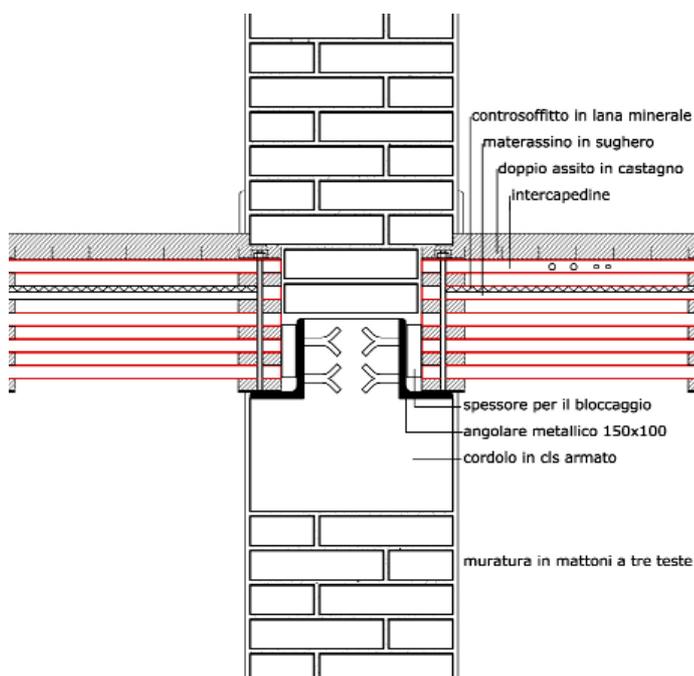


Fig. 5: Ipotesi 1:
Dettaglio dell'aggancio
della piastra con una
muratura di mattoni a tre
teste.
Sistema ad appoggio con-
tinuo.
Nodo interno.

Con gli scatti modulari del quadrato di base si intende provvedere alla variabilità nell'ambito dimensionale delle decine di centimetri mentre per la variabilità più fine e per i piccoli fuori squadra il sistema prevede la compen-

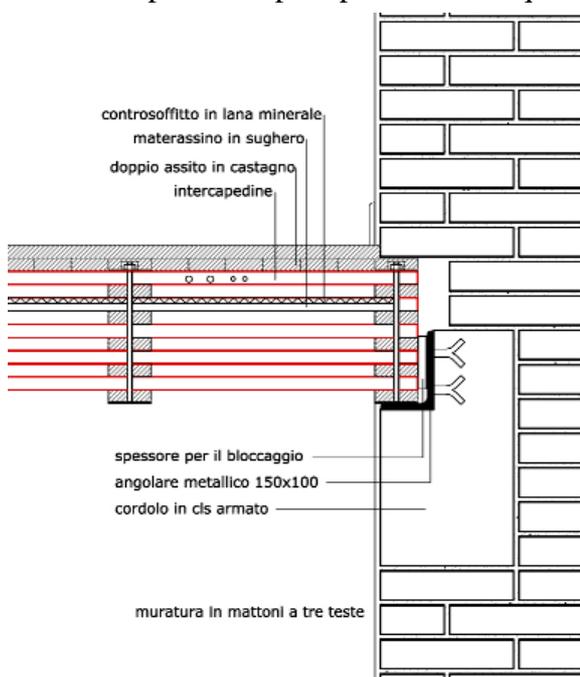


Fig. 6: Ipotesi 1:
Dettaglio dell'aggancio della piastra con una muratura di mattoni a tre teste.
Sistema ad appoggio continuo.
Nodo di facciata.

sazione nell'ambito di pochi centimetri grazie alla geometria dell'appoggio. L'appoggio perimetrale della piastra è stato progettato secondo due ipotesi alternative. Nella prima si persegue l'obiettivo della massima semplicità produttiva, e quindi della massima economicità, mentre attraverso la seconda si intende ottenere una maggiore versatilità di impiego dell'intero sistema. Nella prima ipotesi la piastra di solaio è delimitata dall'ultima serie di nodi e viene appoggiata, tramite l'intradosso della piastra inferiore della barra filettata utilizzata per il serraggio del nodo, ad un profilo metallico a "L", nel caso di struttura in muratura portante o in calcestruzzo armato, o ad una larga piastra saldata all'intradosso della trave nel caso di struttura metallica. Il definitivo bloccaggio della piastra si raggiunge attraverso l'inserimento di adeguati spessori lignei nell'intercapedine che si forma in corrispondenza dell'appoggio. Questo sistema, estremamente economico e di immediata realizzazione, non consente tolleranze oltre i 4 cm per appoggio e non prevede una soluzione adeguata per campi di forma non esattamente rettangolare.

La seconda ipotesi prende le mosse proprio dal tentativo di risolvere tali questioni. Infatti la piastra prevede che le tavolette componenti i travetti sporgano rispetto all'ultimo nodo interno e vadano autonomamente a cercarsi l'appoggio alla struttura principale. Tale appoggio si realizza attraverso un "pet-

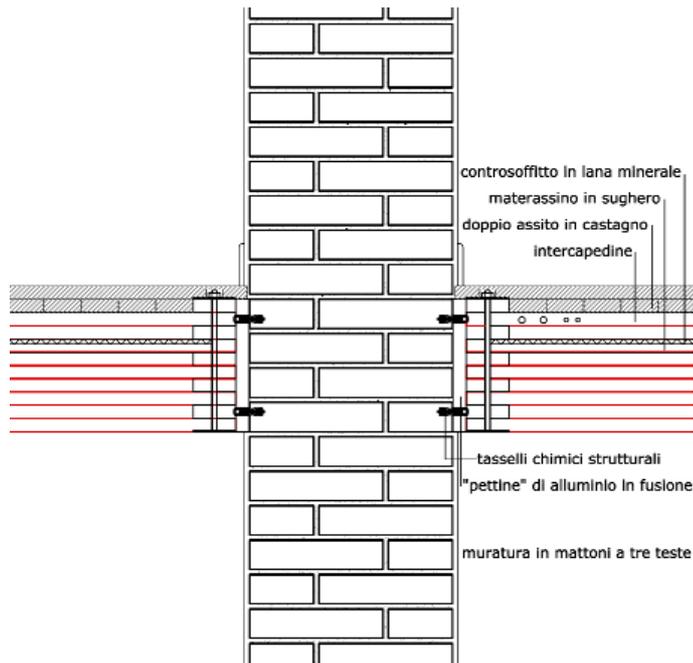


Fig. 7: Ipotesi 2:
 Dettaglio dell'aggancio
 della piastra con una
 muratura di mattoni a tre
 teste.
 Sistema ad appoggio pun-
 tuale.
 Nodo interno.

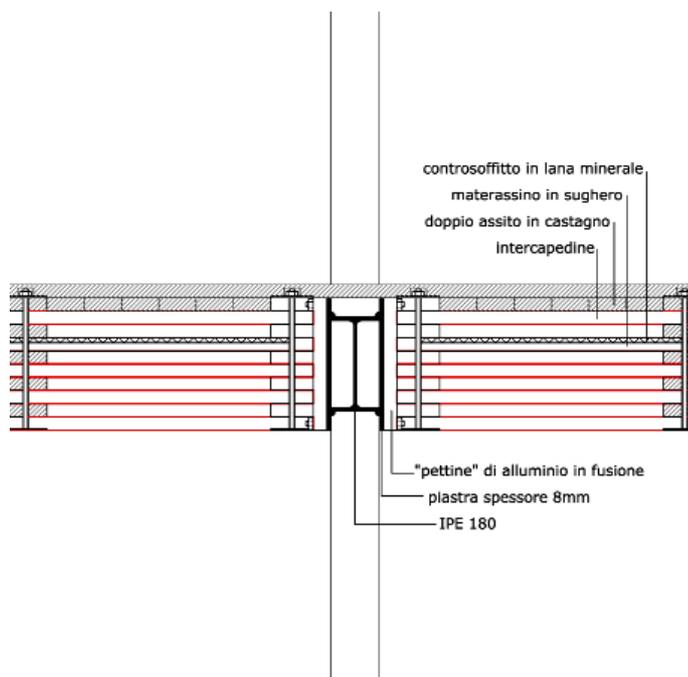


Fig. 8: Ipotesi 2:
 Dettaglio dell'aggancio
 della piastra con una strut-
 tura in acciaio.
 Sistema ad appoggio pun-
 tuale.
 Nodo interno.

tine” in alluminio realizzato in fusione che si incastra con le 5 o 6 tavolette che formano i travetti della piastra, tramite una barra filettata simile a quella utilizzata per i nodi interni. Il pettine porta sulla faccia posteriore una flangia dotata di quattro fori con i quali si solidarizza alla struttura principale, sia essa in muratura o in calcestruzzo armato, attraverso tasselli chimici strutturali. Questo sistema risulta più adatto alle applicazioni nel campo del recupero e consente, attraverso il taglio e la realizzazione degli ultimi fori in situ, di ottenere il massimo livello di variabilità dimensionale ed anche la massima flessibilità nella configurazione di geometrie non cartesiane.

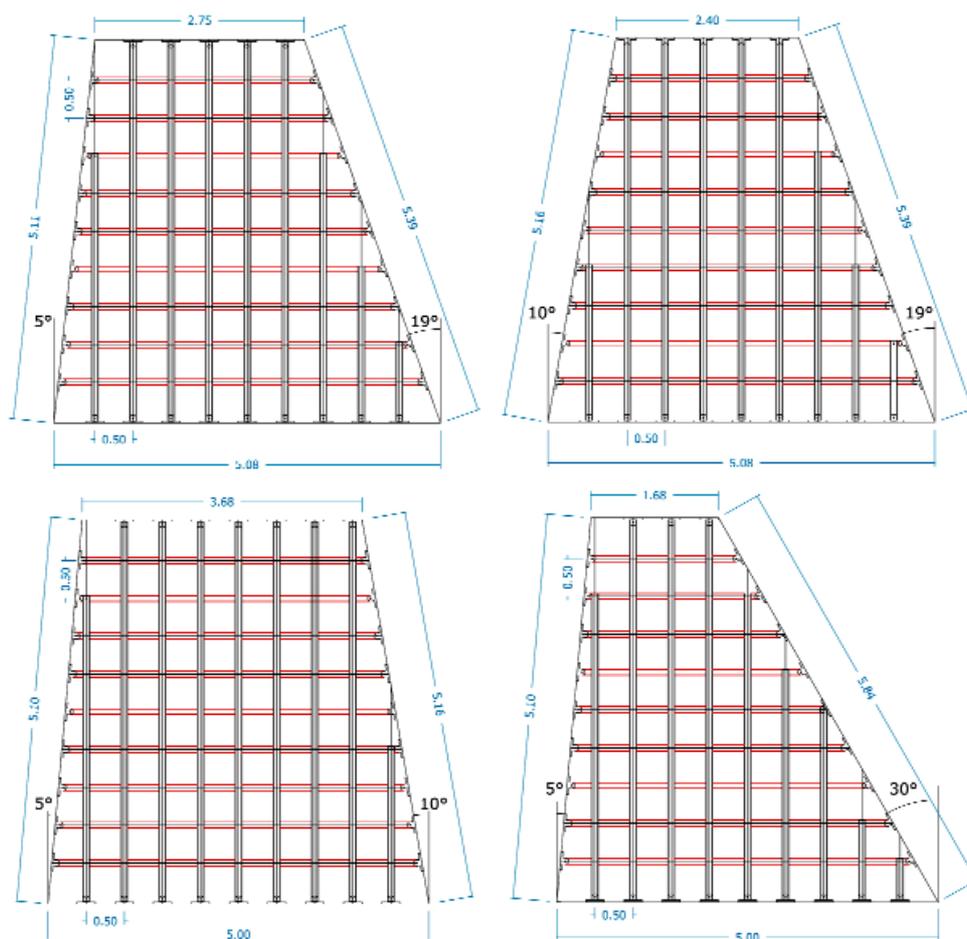


Fig. 9a, 9b, 9c, 9d: Variazioni della forma della piastra rispetto alle possibili giaciture non cartesiane.

3.2 La prova sperimentale

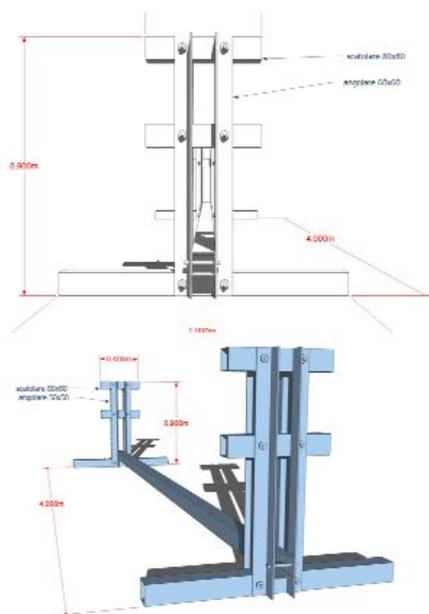


Fig. 10: Progetto dei supporti metallici per simulare la condizione di appoggio del travetto.

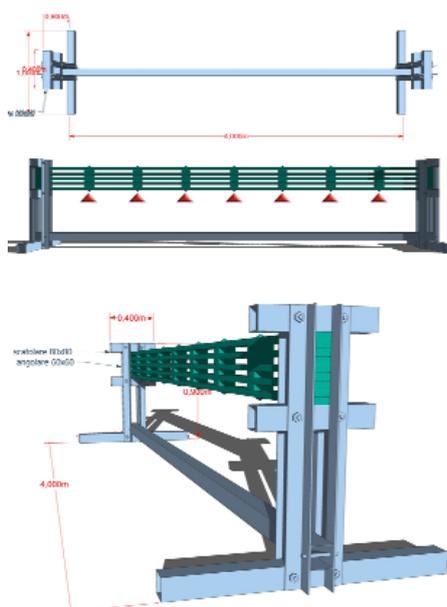


Fig. 11: Simulazione delle condizioni di carico del travetto.

Come prima prova è stato condotto un esperimento finalizzato a verificare le caratteristiche del legno di castagno che si sarebbe utilizzato per la produzione calcolando il modulo elastico proprio del materiale in questione verificando se i dati ottenuti sperimentalmente fossero congruenti con quelli riportati dalla pubblicistica corrente. Caricati e scaricati quattro listoni differenti con un peso unitario di cinque kg e sviluppato il calcolo conseguente si è verificato che il momento di inerzia era pari a 110.000 N/mq contro gli 80.000 – 85.000 N/mq riportati dalle pubblicazioni di settore.

E' stato quindi realizzato un travetto unitario del campo di solaio di 4,00 x 4,00 m composto da sei listoni di 4,00 metri di lunghezza con una sezione di 2,5 x 8 cm assemblati tramite posa in opera di cinque serie di distanziatori realizzati con dadi della stessa sezione ma della lunghezza di 8 cm. Nei nove punti di incrocio è stata messa in opera una barra filettata di 12 mm di diametro serrata sopra e sotto con dadi in acciaio inox M12 e adeguate rondelle.

Il travetto è stato quindi montato, utilizzando la prima e l'ultima delle nove barre filettate, sui supporti metallici predisposti, simulando una condizione di appog-

gio, ed è stato caricato nei sette nodi liberi della struttura, mediante la posa di sette carichi del peso di 25 kg.

L'abbassamento in mezzeria, misurato con un calibro elettronico centesima-



Fig. 12: Il travetto caricato, gli abbassamenti misurati con il calibro micrometrico e la successione delle fasi di carico della struttura.



le, in prima istanza è risultato di 7,68; scaricando il travetto e ricaricandolo altre due volte il valore dell'abbassamento è leggermente salito fino a 8.05 mm.

Il risultato ottenuto utilizzando il modello di calcolo informatizzato, precedentemente descritto, su una ipotesi strutturale fondata sulla stessa geometria, con le stesse condizioni di appoggio e di carico è stato invece di 8,23 mm. L'errore contenuto nei limiti del 2% consente di considerare i risultati virtuali sufficientemente attendibili. In sostanza risulta confermata l'ipotesi che, indotta con l'avvitatura dei bulloni un'adeguata trazione nelle barre filettate, i nodi reagiscono come degli incastri.

Dal punto di vista tecnologico la scelta di utilizzare tra il dado e la superficie del legno in luogo delle tradizionali rondelle un ripartitore metallico quadrato di 8 x 8 x 0,6 cm discende dalla osservazione di come con coppie di serraggio estremamente basse la rondella (troppo piccola) penetrasse nel corpo del legno impedendo di ottenere nell'asta filettata lo sforzo di trazione necessario.

Un'altra importante deduzione emersa dall'esperienza del montaggio è la relativa complessità delle operazioni di infilaggio dell'asta filettata attraverso 10 o addirittura 12 fori (di poco più larghi) appartenenti a 10 o 12 listoni diversi. Infatti, soprattutto i primi infilaggi sono risultati decisamente laboriosi poiché richiedono continui colpi di aggiustaggio sulle aste da congiun-

gere. Se si pensa che il travetto prevede l'assemblaggio di listoni con dadini (questi secondi molto più maneggevoli) mentre la struttura completa prevede incroci di listoni con altri listoni e se si immagina che l'operazione è stata condotta in laboratorio ad una altezza e con condizioni estremamente più comode di quelle che verosimilmente si possono trovare sul cantiere, è presumibile che le difficoltà aumentino e quindi che si allunghino a dismisura i tempi per il montaggio.

3.3 *Deduzioni finali*

Una volta ottenuta la certezza sull'affidabilità dei risultati provenienti dall'utilizzo del software di calcolo strutturale si è provveduto a sviluppare il modello relativo alla condizione più svantaggiosa tra quelle ipotizzate per la possibile produzione. Il campo prescelto è stato quello più grande, ossia quello che misura 5.50 x 5.50 metri, formato da travetti a loro volta composti da 5 listoni da 25 x 80 mm distanziati di 25 mm così da formare un pacchetto che al rustico misura 25 cm e che, completato con il doppio assito, raggiunge i 27.5 cm di spessore. Questo elemento tecnico presenta un peso di 1951 kg così ripartito:

struttura in listoni di castagno	858	kg
pannello di fibre minerali per controsoffitto	113	kg
doppio assito in legno di castagno per solaio	980	kg

Il campo di solaio è stato sottoposto a un carico uniformemente distribuito di 200 kg/m² e si è ipotizzato un vincolo esterno di appoggio di tutti i nodi perimetrali. Sottoposto a queste condizioni la struttura mostra un abbassamento massimo in mezzeria di 1.233 cm. Evidenzia inoltre, per ciò che riguarda le parti di massello, una sollecitazione massima rispetto agli sforzi di flessione pari a 70.01 daN/cm² contro la massima ammissibile di 100 daN/cm², e, rispetto agli sforzi di taglio, di 2.24 daN/cm² contro i 10 daN/cm² ammissibili. Per ciò che riguarda infine l'assito in assi di castagno, invece, si registra una sollecitazione massima a flessione pari a 65 daN/cm² contro i 100 daN/cm² ammissibili.

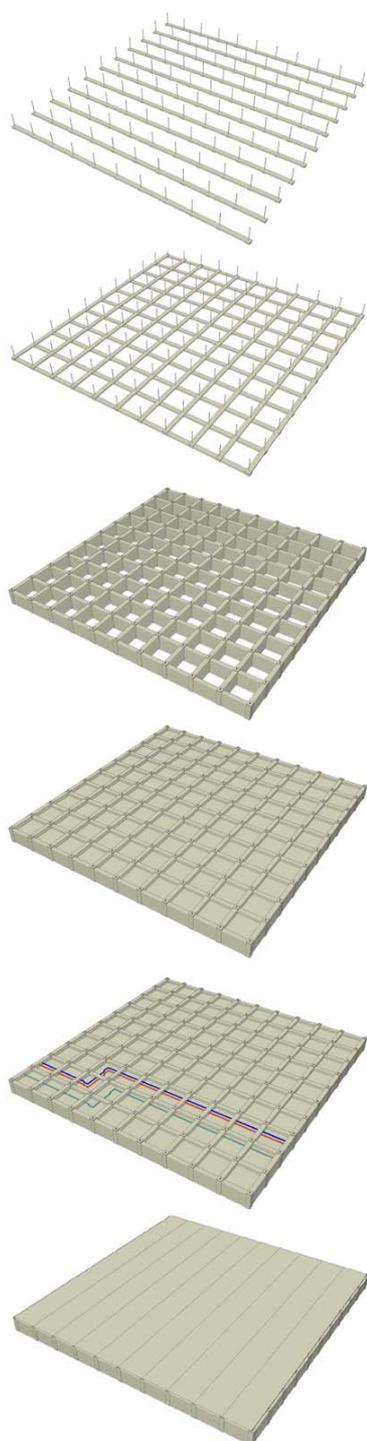


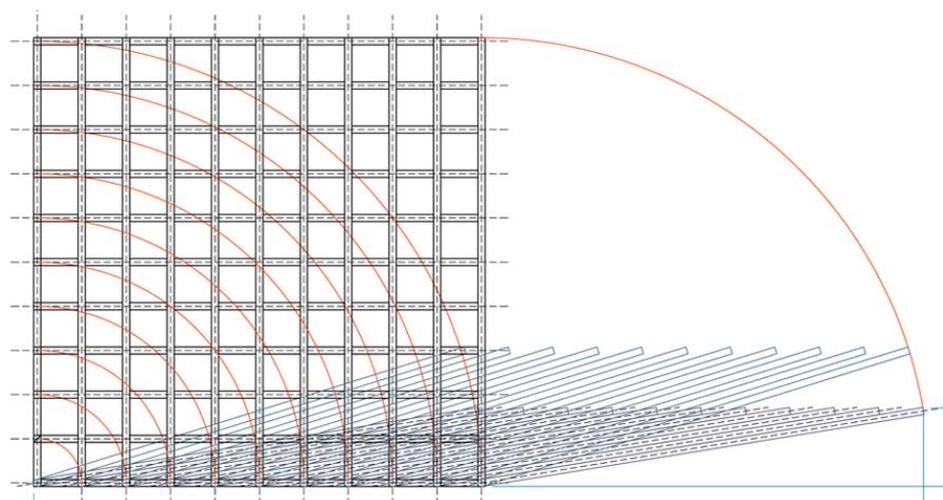
Fig. 14: Successione delle fasi di montaggio della piastra di solaio

Il risultato positivo ottenuto relativamente all'elemento più complesso consente di estendere questo dato a tutti gli elementi composti con travetti di cinque listoni. Nel caso in cui si ipotizzi una luce libera pari a 3.50 metri, dall'applicazione del modello di calcolo si deduce la possibilità di ridurre il numero dei listoni da cinque a quattro, portando così lo spessore totale del solaio dai 27,5 cm a 22,5 cm.

Relativamente alle questioni più squisitamente tecnologiche, emerse dalla sperimentazione condotta sul travetto unitario, per semplificare le operazioni in cantiere si è deciso di suddividere l'assemblaggio della piastra di solaio, e in particolare la creazione del nodo interno, in due operazioni distinte: quella dell'infilaggio delle barre filettate - che, come descritto in precedenza, è risultata la più complessa data la necessità di allineare perfettamente i fori praticati nel legno - e quella di serraggio dei bulloni.

Se si immagina di pre-assemblare la piastra in officina, la prima operazione, condotta su adeguati banchi di lavoro, si semplifica enormemente; inoltre la natura del nodo consente di "compattare" la struttura non serrando completamente i bulloni e facendo ruotare il sistema di aste disposte lungo l'asse x fino a portarsi quasi sulla giacitura dell'asse y. In tal modo, ad esempio, una piastra di solaio delle dimensioni di 5.00 x 5.00 x 0.25 si trasforma in un solido,

con pianta romboidale, delle dimensioni di 0.89 x 10.01 x 0.25, più allungata e maneggevole durante la fase di trasporto e comunque compatibile con le dimensioni di un normale mezzo di trasporto. La struttura una volta scaricata sul cantiere viene quindi “dispiegata” così da assumere la sua forma rettangolare, che viene “fissata” in piano serrando i nodi. A questo punto si provvede all’infilaggio dei pannelli di controsoffitto e alla posa in opera della piastra nel sito di esercizio; si predispongono quindi gli eventuali passaggi impiantistici che la costruzione richiede e si provvede alla posa in opera di un eventuale strato di isolamento termico. Con il montaggio del doppio assito ligneo si completa il montaggio del sistema e si può sollecitare la piastra con i carichi di esercizio. La descrizione fin qui effettuata, riguarda chiaramente la realizzazione del solaio nel caso di costruzione di nuova realizzazione, ma nel caso del cantiere di recupero, tali operazioni sono verosimilmente non direttamente compatibili con il layout di montaggio previsto. In tal caso, infatti, si ipotizza che la struttura sia fornita sotto forma di elementi dis-assemblati e che si provveda al suo montaggio in opera. L’operazione, che per le nuove realizzazioni appare rapida e priva di particolari difficoltà, in tal caso occuperà un lasso maggiore di tempo; tuttavia tale prestazione va confrontata con i tempi comunque dilatati che richiede il montaggio di componenti di grandi dimensioni nel cantiere di recupero. La piastra di solaio, anche completamente dis-assemblata, in compenso offre il non trascurabile vantaggio di essere composta da pezzi leggerissimi



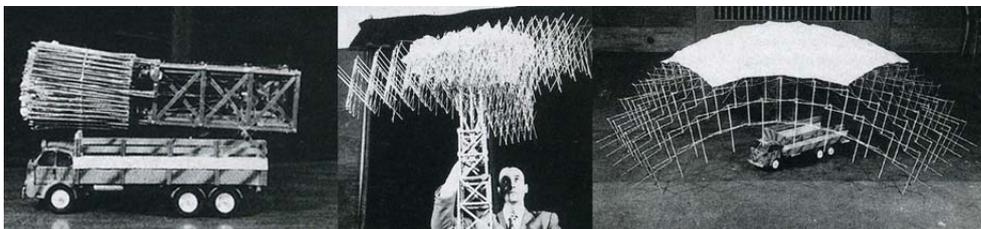


Fig. 16: Le strutture dispiegabili di Emilio Perez Pinero.

e tutti movimentabili a mano da un operaio solo. La ridottissima complessità strutturale e la semplicità di movimentazione degli elementi compensa largamente una certa laboriosità delle operazioni di montaggio e rende questo sistema costruttivo adatto anche agli interventi di recupero.

La struttura così concepita rientra a pieno titolo nell'ambito dei **sistemi dispiegabili** e cioè quelle strutture progettate in modo da poter essere piegate in volumi compatti durante il trasporto e dispiegate nella loro forma finale una volta giunte sul luogo del montaggio.

Tale appartenenza iscrive questa ricerca in un filone che parte forse dagli studi di Emilio Pérez Piñero, uno tra i primi interpreti delle strutture dispiegabili, che, nel racconto di Emilio Pérez Belda «consacrerà tutta la sua attività professionale a sistemi strutturali facili da montare, da erigere e da trasportare: essenzialmente strutture rigide piegabili e smontabili. Si applica nel 1964 alla realizzazione della sua prima opera importante. Si tratta di un padiglione per esposizioni trasportabile, costituito da una struttura piegabile in alluminio di 8000 mq in cui progetto e montaggio durarono in tutto tre mesi. Approfondisce poi le sue ricerche, costruendo modelli a scala ridotta. Comincia ad interessarsi alle cupole geodetiche, per le quali concepisce un metodo molto semplificato di montaggio e smontaggio utilizzando elementi prefabbricati composti di 12 barre, evitando così il successivo montaggio barra per barra ... Costruisce un teatro mobile per 2400 spettatori, poi una cupola reticolare smontabile dotata di sala di proiezione per 1500 spettatori. Il montaggio, come lo smontaggio di queste cupole è realizzabile in tre o quattro giorni».

Nel solco tracciato da Piñero si inseriscono le più recenti sperimentazioni del gruppo di progettazione Estran. A proposito della realizzazione del



Fig. 17: Padiglione del Venezuela all'Expo di Siviglia del 1992. Architetti: Grupo Estran. Nelle immagini le fasi di montaggio che si sono protratte per un giorno appena.

Padiglione del Venezuela all'Expo di Siviglia del 1992 i progettisti, Henrique e Carlos H. Hernandez e Ralph Herminy in collaborazione con Waclaw Zalewsky raccontano: «la costruzione del padiglione si realizzò con enormi limitazioni di tempo per la fabbricazione, per il trasporto e il montaggio. Come risposta a questi dati la copertura dell'edificio fu costruita utilizzando la tecnologia delle strutture trasformabili, consistente in un metodo costruttivo concepito per facilitare il processo di fabbricazione, trasporto ed erezione. I suoi componenti, assemblati in fabbrica, si trasportano e si immagazzinano in forma di volumi piegati che si dispiegano e fissano in opera, per poi essere ripiegati e imballati nuovamente per trasportarli al ritorno in Venezuela. Si è concepita una struttura trasformabile in alluminio, formata da travi reticolari connesse tra loro da cerniere che permettono, a tutte le connessioni, di piegarsi in una direzione, i suoi componenti sono tubolari di sezione circolare con nodi in alluminio estruso». Leggerezza della struttura, rapidità di montaggio, facilità di trasporto e il massimo contenimento dei costi hanno rappresentato sin dall'inizio i punti fissi, i requisiti da rispettare nell'ideare l'opera. Si trattava di concepire il progetto a partire dalle strategie esecutive.

Il padiglione, che si presenta come un grande piano inclinato chiuso sui due lati e libero da

sostegni intermedi, contenente una sala audiovisiva e uno spazio espositivo, è realizzato con travi reticolari, costituite da tubolari in alluminio, connesse da cerniere che consentono alla struttura di dispiegarsi in una sola direzione; così realizzato, il volume della struttura piegata è pari ad 1/7 della struttura una volta montata.

Il montaggio della struttura avviene in due fasi sostanziali: durante la prima, la struttura dispiegata assume la sua forma definitiva; durante la seconda, ruota intorno al suo segmento di base e assume la sua posizione definitiva. Il nodo è una cerniera cilindrica dotata di un “fondo corsa” che interrompe il movimento. Le operazioni di montaggio sono state concluse in una sola giornata e con soli due movimenti di gru per ogni modulo strutturale. L'edificio è infine completato da un sistema di pannelli leggeri di due tipi: uno per la copertura ed uno per le superfici laterali, con cui in pochi giorni la struttura è stata completata, finiture incluse.



Fig. 18: Il nodo-macchina progettato dal Grupo Estran per il Padiglione del Venezuela all'Expo di Siviglia.

Ancora Antonella Falotico descrivendo l'intelligenza costruttiva di questo edificio parla del sistema strutturale proposto da Hernandez: «L'elemento chiave dell'intero sistema è rappresentato chiaramente dal nodo che collega le travi reticolari e che, alla stregua di una macchina, permette alla struttura di aprirsi con un unico movimento ... Al suo interno è introiettata tutta l'intelligenza della costruzione e parte della sua logica organizzativa. Il pezzo cioè assume la valenza della macchina necessaria al montaggio che in tal modo diventa parte dell'edificio»³. In sostanza il nodo strutturale del Padiglione del Venezuela è pensato per funzionare in tre condizioni differenti che sono la fase di trasporto, il momento del dispiegamento della struttura e, infine, la fase di esercizio. Nella fase intermedia il nodo assume il ruolo di macchina utensile che consente, con il suo modo di essere, di trasformare la

geometria della struttura. È a questa triplice natura del nodo, e quindi al concetto di **nodo-macchina**, che si è riferito il progetto della piastra di solaio che, seppure con geometrie e logiche costruttive estremamente semplificate, adotta un nodo strutturale che consente l'assemblaggio delle parti nella prima fase, la rotazione delle aste nella seconda (fase in cui svolge il ruolo di cerniera) e la configurazione finale quando, una volta serrato definitivamente, assume il ruolo dell'incastro.

Note

¹ Zigmunt Stanislaw Makoski, *Strutture spaziali in acciaio*, (1963), tr. It. Edizioni del Centro Italiano Sviluppi Impiego Acciaio, Milano, 1977, p.14

² Sulla concezione strutturale della Nuova Galleria d'Arte moderna, molto interessante è il testo dei proff. Salvatore Bisogni e Fabrizio Lauro, in Aa. vv., *Considerazioni sulla scienza e sull'arte del costruire*, in *Restauro* 139/1997, Edizioni scientifiche italiane, Napoli, 1997, pp. 65-87

³ s.v. in Aa. vv. *L'art de l'ingénieur*, Editions du Centre Pompidou, Parigi, 1997, pp. 360 –361

⁴ Descrizione del padiglione contenuta nel sito www.grupoestran.com.

⁵ cfr. Antonella Falotico, *Cantiere e costruzione*, Liguori, Napoli, 2003, pp. 126-144.

⁶ *Ibidem*, pp. 137-138

4. Bibliografia e sitografia

Testi di carattere generale

- Aa. vv. *L'art de l'ingénieur*, Editions du Centre Pompidou, Parigi, 1997.
- Alini Luigi, *Strategie esecutive. L'integrazione delle competenze all'interno del progetto di architettura*, Liguori, Napoli, 2000.
- Baldo Gianluca, Massimo Marino, Stefano Rossi, *Analisi del ciclo di vita Lca, materiali prodotti, processi produttivi*, Edizioni Ambiente, Milano, 2005.
- Barbisan Umberto, *La ricerca dell'archetipo costruttivo*, FrancoAngeli, Milano, 1994.
- Barbisan Umberto, Roberto Masiero, *Il labirinto di Dedalo. Per una storia delle tecniche dell'architettura*, FrancoAngeli, Milano, 2000.
- Basalla George, *L'evoluzione della tecnologia*, Rizzoli Libri Spa, Milano, 1991.
- Boyd Robin, *Orientamenti nuovi nell'architettura giapponese*, Electa, Milano, 1969.
- Carbonara Pasquale, *Architettura pratica*, Utet, Torino, 1980.
- Capasso Aldo (a cura di), *Architettura e leggerezza. Il significato del peso nella costruzione*, Maggioli, Rimini, 1999.
- Cetica Pier Angelo, *R. B. Fuller. Uno spazio per la tecnologia*, Cedam, Padova, 1985.
- Ciribini Giuseppe (a cura di), *Tecnologie della costruzione*, La Nuova Italia Scientifica, Roma, 1992.
- Claudi de Saint Mihiel Claudio (a cura di), *Le forme dell'innovazione*, Pinelli, Milano, 1999.
- Cunningham William P., *Fondamenti di ecologia*, (1983) tr. it. McGraw-Hill, Milano, 2004.
- Dal Co Francesco, *Tadao Ando*, Electa, Milano, 1994.
- De Fusco Renato, *Storia dell'architettura contemporanea*, Laterza, Bari, 1974.
- Falotico Antonella, *Cantiere e costruzione*, Liguori, Napoli, 2003.
- Frampton Kenneth, *Storia dell'architettura moderna*, (1980), tr. it. Zanichelli, Bologna, 1993.
- Frampton Kenneth, *Tettonica e architettura. Poetica della forma architettonica nel XIX e XX secolo*, (1995), tr. it. Skira, Milano, 1999.
- Gangemi Virginia, *Cultura e impegno progettuale*, FrancoAngeli, Milano, 1992.
- Geymonat Ludovico e Giorello Giulio, *Le ragioni della scienza*, Laterza, Bari, 1985.
- Giedion Sigfried, *Spazio tempo e architettura* (1941), tr. it. Hoepli, Milano, 1981.
- Gordon James E., *Strutture*, Mondadori, Milano, 1979.
- Gössel Peter e Gabriele Leuthäuser, *Architettura del XX secolo*, Benedikt Taschen, Verlag, 1991.
- Koiré Alexandre, *Dal mondo del Pressappoco all'Universo della precisione. Tecniche, strumenti, e filosofia dal mondo classico alla rivoluzione scientifica*, Einaudi, Torino, 1967.
- La Creta Rosalba, Truppi Carlo, *L'architetto tra tecnologia e progetto*, FrancoAngeli, Milano, 1994.
- Losasso Mario, *Architettura tecnologia e complessità*, Clean, Napoli, 1991.
- Maldonado Tomàs, *La speranza progettuale*, Einaudi, Torino, 1970.
- Maldonado Tomàs (a cura di), *Tecnica e cultura*, Feltrinelli, Milano, 1979.
- Mangiarotti Anna, *Gli elementi tecnici del progetto*, Angeli, Milano, 1989.
- Mangiarotti Anna, *Il progetto di architettura dall'euristico all'esecutivo*, Clup, Milano, 2000.
- Nardi Guido, *Le nuove radici antiche*, FrancoAngeli, Milano, 1986.

- Nardi Guido, Andrea Campioli, Anna Mangiarotti, *Frammenti di coscienza tecnica*, FrancoAngeli, Milano, 1994.
- Nardi Guido (a cura di), *Aspettando il progetto*, FrancoAngeli, Milano, 1996.
- Nardi Guido, *Tecnologie dell'architettura. Teorie e storia*, Clup, Milano, 2001.
- Nardi Guido, *Percorsi di un pensiero progettuale*, Clup, Milano, 2003.
- Nervi Pierluigi, *Costruire correttamente*, Hoepli, Milano, 1965.
- Nervi Pier Luigi, *Scienza o arte del costruire?*, Città Studi Edizioni, Milano, 1997.
- Otto Frei e Rash Bodo, *Finding Form*, Axel Menges, 1995.
- Perriccioli Massimo (a cura di), *Trasparenti leggerezze. Sei lezioni di Cultura tecnologica della progettazione*, Rinascita, Ascoli Piceno, 1998.
- Pizzetti Giulio e Anna Maria Zorgno Trisciuglio, *Principi statici e forme strutturali*, Utet, Torino, 1980.
- Pone Sergio, *L'idea di struttura*, FrancoAngeli, Milano, 2005.
- Salvadori Mario e Robert Heller, *Le strutture in architettura* (1975), tr. it. Hatlaslibri, Milano, 1992.
- Salvadori Mario, *Perché gli edifici stanno in piedi* (1980), tr. it. Strumenti Bompiani, Milano, 2000.
- Semper Gottfried, *Lo stile nelle arti tecniche e tettoniche, o Estetica pratica: manuale per tecnici, artisti e amatori* (1977), tr. it. Augusto Romano Burelli, Laterza, Bari, 1992.
- Sinopoli Nicola, *La tecnologia invisibile*, FrancoAngeli, Milano, 1997.
- Sinopoli Nicola, Valeria Tatano (a cura di), *Sulle tracce dell'innovazione. Tra tecniche e architettura*, FrancoAngeli, Milano, 2002.
- Tessenow Heinrich, *Osservazioni elementari sul costruire* (1916), tr. it. FrancoAngeli, Milano, 1974.
- Thompson D'Arcy Wentworth, *Crescita e forma*, (1961), tr. it. Bollati Boringhieri, Torino, 1969.
- Torroja Eduardo, *La concezione strutturale*, Città Studi, Milano, 1995.
- Truppi Carlo, *Continuità e mutamento. Il tempo nell'innovazione tecnica e nell'evoluzione dell'architettura*, FrancoAngeli, Milano, 1994.
- Truppi Carlo (a cura di), *La città del progetto*, Liguori, Napoli, 1999.
- Vitale Augusto et al., *Argomenti per il costruire contemporaneo*, FrancoAngeli, Milano, 1996.
- Zanelli Alessandra, *Ricerche di tecnologia dell'architettura*, Clup, Milano, 2000.
- Wright Frank Lloyd, *Una autobiografia*, (1932) tr. it. Jaca Book, Milano, 1985.
- Wright Frank Lloyd, *Antologia dell'architettura moderna. Testi, manifesti, utopie*, (1960) tr. it. Zanichelli, Bologna, 1988.

Testi riguardanti l'utilizzo del legno in architettura

Aspetti di sostenibilità ambientale per la tecnologia del legno

- Aa. vv., *Costruire edifici sani. Guida alla scelta dei prodotti*, Maggioli, Rimini, 1996.
Berti Stefano, Maurizio Piazza, Roberto Zanuttini, *Strutture di legno per un'edilizia sostenibile. Materie prime e prodotti, progettazione e realizzazione*, Il Sole 24 ore, Milano, 2002.

Manualistica sulla tecnologia del legno

- Barbisan Umberto e Franco Laner, *I solai in legno*, Franco Angeli, Milano, 1995.
Bounous Giancarlo, *Il Castagno. Coltura, ambiente e utilizzazioni in Italia e nel mondo*, Il Sole 24 ore, Bologna, 2002.
Calmosi Michela, "Le possibilità di applicazione del legno strutturale composito: progetto di un sistema costruttivo", in Zanelli Alessandra (a cura di), *Ricerche di tecnologia dell'architettura*, Clup, Milano, 2000.
Davoli Pietromaria, *Costruire con il legno*, Hoepli, Milano, 2001.
Laner Franco, "Solai misti legno e cls", *Modulo*, 244, settembre 1998.
Breyman Gustavo Adolfo, "Costruzioni in legno", in *Trattato generale di costruzioni civili*, vol. II, Vallardi, Milano, 1889.

Architettura a strutture in legno

- Brusati Gianfranco, "Sperimentazioni con il legno strutturale", in Nardi Guido (a cura di), *Aspettando il progetto*, Franco Angeli, Milano, 1996, p. 189.
Capasso Aldo, "Il legno: un materiale tradizionale per nuove produzioni", in Gangemi Virginia (a cura di), *Architettura e tecnologia appropriata*, FrancoAngeli, Milano, 1985.
Capasso Aldo, Rosalba La Creta, Augusto Vitale, "Un sistema a struttura in legno", *Il legno*, n. 1, 1983.
Dini, Massimo, *Renzo Piano. Progetti e architetture 1964-1983*, Electa, Milano, 1983.
Frampton Kenneth, "I tecnocrati della Pax Americana: Wachsmann & Fuller", *Casabella*, n. 542-543, 1988.
Herzog Thomas, *Architecture + Technology*, Prestel, Monaco, 2002.
Laner Franco, *Il legno lamellare incollato: il progetto*, edizioni Habitat legno, Edolo, 1988.
La Creta Rosalba e Amirante Isabella, *Cupole per abitare*, Quaderni dell'Istituto di Tecnologia dell'Architettura, Napoli, 1978.
Marano Antonio, *Legno e Metallo, soluzioni progettuali dall'integrazione di materiali diversi*, Franco Angeli, Milano, 1994.
Mc Quaid Matilda, *Shigeru Ban*, Phaidon, Londra, 2003.
Minke Gernot, "Holzflächentragwerke", *Zodiac*, n. 22, ottobre 1973.
Mombelli Rossella, "Tetto scultura", *Materia* n. 36, settembre – dicembre 2001.
Natterer Julius, Thomas Herzog, Michael Volz, *Atlante del Legno* (1996), tr. it. UTET, Torino, 1998.
Nardi Guido, "Le nuove strutture in legno", *Arca*, n. 74, 1993.
Nardi Guido, "Dal legno alla pietra", *Adrastea*, n. 3, 1995.
Piano Renzo, *Giornale di bordo*, Passigli, Firenze, 1997.
Schittich Christian, "Costruire in legno oggi", *Detail*, n.5, 2002, p. 544.
Adrastea nn. 1-19.
"Il legno", *Arca*, n. 112, 1997.
"Shigeru Ban", *GG portfolio*, Barcellona, 1997.

“Pelle di Legno”, *Arca Plus*, n. 19, 1998.

“Madera (I)”, *Tectonica* n. 1, 2000.

“Madera (II)”, *Tectonica* n. 13, 2001.

“Architettura in legno”, *Materia*, n. 36, settembre – dicembre 2001.

“Bauen mit holz”, *Detail*, n. 1/2, 2004.

Dimensionamento della struttura

Caironi Mario, Luigi Bonera, *Il legno lamellare incollato: il calcolo*, Edizioni Habitat legno, Edolo, 1989.

Ceccotti Ario, “Strutture in legno” in Aa. Vv., *Manuale di ingegneria civile*, Zanichelli, Cremona,

Cenci Giovanni, *Strutture in legno*, Palutan, Milano, 1980.

De Angelis Alideo, *Progettazione e calcolo delle strutture in legno lamellare*, Dei S.r.l., Tipografia del genio civile, Roma, 1993.

Giordano Guglielmo, *Tecnica delle costruzioni in legno*, Hoepli, Milano, 1993.

Normativa sull'uso del legno in edilizia

Ceccotti Ario, “Progettare la sicurezza. La Norma Italiana per le COstruzioni in LEgno (NICOLE)”, Atti del convegno *Sicurezza e comfort nelle abitazioni con strutture di legno*, Verona, 2001.

Ruffino Michele, *La resistenza al fuoco delle strutture in legno*, C.L.U.T., Torino, 1986.

Siti riguardanti l'utilizzo del legno in architettura

Legno e Architettura:

www.architectureforsale.com
www.grupoestran.com
www.rpbw.com
www.edwardcullinanarchitects.com

Legno e ambiente:

www.miw.it
Sito di approfondimento sui temi della sostenibilità locale e sull'ambiente.
www.greenpeace.it
Sito del movimento ambientalista più noto del mondo.
www.fao.org
Food And Agriculture Organization Of The United Nations. Fondata nel 1945, è un foro neutrale dove le nazioni si incontrano per negoziare accordi e discutere linee di condotta. Aiuta i paesi in via di sviluppo e i paesi in transizione a modernizzare e migliorare l'agricoltura, la selvicoltura e la pesca, e assicurare a tutti una buona alimentazione. Dalla fondazione, nel
www.athenasmi.ca
Istituto canadese *Athena* per la ricerca sui materiali sostenibili. Organizzazione no-profit che offre servizi di consulenza, ricerca, formazione.
www.environdc.com
Sito dell'*Environmental Design Collaborative*, utile introduzione alla bioedilizia e ai metodi, materiali e principi del costruire sostenibile.
www.arch.hku.hk/research/beer/
Building Energy Efficiency Research, Sito dell'Università di Hong Kong, Dipartimento di Architettura sulle tecnologie energetiche in Hong Kong e nel resto del mondo. Sono presentati i metodi di simulazione per l'analisi energetica degli edifici.
www.agores.org
A global overview of renewable energy sources. Tra le attività: programmazione di strategie per implementare le risorse energetiche rinnovabili; informazioni sui metodi e sui tipi di risorse rinnovabili da utilizzare nel settore edilizio.
www.greenhousenet.com
Green House Network, organizzazione statunitense no-profit, per lo sviluppo di un movimento che fermi il riscaldamento globale del pianeta.
www.euros.ge.it
La società *Ecotecnologie Urbane Ricerca Operativa e Sistemi*, è un centro di ricerca privato che si occupa di: ricerca, progettazione, realizzazione e diffusione a livello Comunitario di tecnologie urbane ad alta compatibilità ambientale, al fine di promuovere prodotti e processi innovativi finalizzati al miglioramento della qualità urbana, sia per conto delle piccole e medie imprese operanti nei settori del rinnovo e della manutenzione urbana, sia a favore di aziende territoriali, organismi e amministrazioni pubbliche, nell'ambito di programmi regionali, nazionali e comunitari.
www.lanuovaecologia.it
Quotidiano di Legambiente.

Compositi a base di legno:

www.finnforest.com

Finnforest è la più grande azienda di prodotti a base di legno dell'Europa ed è parte del gruppo Metsäliitto.

Sistemi di strutture miste legno calcestruzzo:

www.bcbstrutture.it

Azienda operante nel settore delle strutture in legno lamellare e massiccio. Propone il sistema *Kertrave*, per la realizzazione di solai composti da travetti in legno nella cui scanalatura viene posto un traliccio metallico e i connettori per il successivo getto in calcestruzzo.

www.grossolegnami.it

Strutture miste in legno e calcestruzzo finalizzate al mercato del recupero. Contenuto interessante: manuale tecnico per l'utilizzo del legno, con schematizzazione di analisi dei carichi, elasticità, rigidità, per strutture in legno e miste legno-calcestruzzo.

www.coperlegno.com

Contenuto interessante: solaio *Compound*, composto da travetti in legno lamellare, traliccio metallico, soletta in calcestruzzo.

www.armalam.it

Contenuto interessante: brevetto del legno armato con acciaio e fibre di carbonio. Schema di produzione delle travi e del relativo solaio, schema di calcolo, applicazioni.

www.woodbeton.it

Contenuto interessante: *Prepanel*, struttura di solaio in trave in legno lamellare travetti in legno o lamellare e caldana in calcestruzzo da 5 cm e rete elettrosaldata.

www.habitatlegno.it

Si riportano due brevetti di Solaio in legno collaboranti. 1. Habitat System Beton: connettore a secco per strutture miste legno e calcestruzzo proposto e brevettato da Habitat Legno. 2. Llear: solaio ad intradesso a vista costituito da travetti in legno lamellare armati con un traliccio in acciaio, con interposte tavole in cotto a superficie sabbiata, prodotte dalla Rdb. La struttura mista legno-laterizio è completata superiormente da una soletta in calcestruzzo armata con rete elettrosaldata.

www.gruppoeraclit.it

Pannelli in fibra di legno mineralizzata con magnesio.

Aziende produttrici di legno lamellare:

www.holzbau.com

Contenuto interessante: abstract di convegni e seminari organizzati dalla ditta stessa e calendario di quelli in programma, esempi di architetture da loro realizzate, raccolte di studi e ricerche relative al lamellare, normativa, informazioni tecniche sul ciclo produttivo, schede tecniche sul comportamento statico. Non contiene link.

www.masterholz.it

Contenuto interessante: esempi di architetture da loro realizzate, normativa, informazioni tecniche sul ciclo produttivo e sul controllo di qualità, schede tecniche sul comportamento statico. Non contiene link.

www.interholz.it

Contenuto interessante: esempi di architetture da loro realizzate, normativa, informazioni tecniche sul ciclo produttivo, schede sul comportamento del lamellare sottoposto a

diverse condizioni di umidità e relativi accorgimenti tecnici, schematizzazione del comportamento statico. Non contiene link.

Aziende produttrici di legno

www.federlegno.it

Federazione italiana delle industrie del legno, del sughero, del mobile e dell'arredamento. 2200 aziende iscritte. Contenuto interessante: normativa di riferimento, articoli da convegni (Zanuttini Roberto, *Il legno e suoi possibili impieghi nel contesto delle olimpiadi invernali di Torino 2006*, 2001; *convegno strutture in legno in zona sismica...*)

Riviste informatiche e istituti per lo sviluppo del legno:

www.tecnologos.it

A cura di Umberto Barbisan, contiene gli abstract delle tesi di laurea discusse presso lo Iuav, articoli di alcuni studiosi italiani del legno come Umberto Barbisan, Franco Laner, Matteo Guardini; informazioni circa importanti brevetti nel campo delle strutture in legno, (ad esempio il Sistema Messina-Paolini, 1983; sistema Llear, 1991; Sistema di connettori legno-calcestruzzo Turrini-Piazza 1983; sistema Alessi, Raffagli, Lamborghini 1989); sommario delle riviste *Adrastea* e *Tecnologos*. Link: università e biblioteche italiane, riviste, ditte.

www.xylon.it

Mensile per la tecnologia, il commercio, l'industria e l'artigianato del legno.

www.agroselviter.unito.it/selvic

Gruppo di ricerca del sistema foresta-legno del Dipartimento di Agronomia, selvicoltura e gestione del territorio cui afferisce il prof. di Tecnologia del legno Roberto Zanuttini.

www.itl.tn.cnr.it

Consiglio Nazionale delle Ricerche – Istituto per la valorizzazione del Legno e delle Specie Arboree – Sezione territoriale di Trento. Link: istituti italiani e mondiali per lo studio del legno.

www.irl.fi.cnr.it

Consiglio Nazionale delle Ricerche – Istituto per la Ricerca sul Legno – Sezione territoriale di Firenze. Link: istituti italiani e mondiali per lo studio del legno .

www.isafa.it/scientifica/area_scientifica

Ente pubblico di ricerca – Istituto sperimentale per l'assestamento forestale

www.bois-construction.org

Sito francese del CNDB e CTBA, istituti nazionali per lo sviluppo del legno nel settore delle costruzioni. Contiene indicazioni sul legno come materia prima, sui tipi di essenze e sulle specifiche possibilità di impiego, sulle tecniche di lavorazione, sui prodotti e sui sistemi costruttivi. Link a enti istituzionali (ministero dell'agricoltura, dei trasporti...), a partner nazionali, a ditte.

www.nordictimber.org

Nordic Timber Council: organizzazione per la promozione del legno fondata dalle industrie produttrici del legno in Finlandia, Norvegia e Svezia. La loro strategia è fondata sullo studio delle proprietà caratteristiche del legno e sul management sostenibile delle foreste. Contenuto interessante: articoli sull'utilizzo del legno in architettura in Europa. Link alle organizzazioni partner: Cei- bois, Forestry comission...

www.innovawood.com

Organizzazione che integra quattro network europei operanti nei settori forestale, del legno e industriale con l'obiettivo di trainare le ricerche scientifiche relative all'innovazione

nei suddetti settori.

www.legnoedilizia.it

Informazioni su fiere, convegni, riviste di settore.

Informazioni generali sul legno e sui suoi utilizzi, link:

www.ahsap.com

www.timberandmore.com

Sistema costruttivo Balloon frame:

www.woodworking-online.com

www.loc.gov/rr/print/list

www.pbs.org/ktca/farmhouses

Sistema normativo e certificazioni:

www.fscus.org

sito ufficiale del *Forest Stewardship Council*, organizzazione non-profit dedicata gestione e definizione degli standard per garantire un uso sostenibile delle risorse boschive e forestali;

www.fsc-italia.it

www.certified-forest.org