

POLITECNICO DI MILANO
Scuola di Architettura e Società
Corso di Laurea Magistrale in Architettura



GLI INVOLUCRI REVERSIBILI
Storia, applicazioni e valutazioni di tecnologie costruttive reversibili

Relatore: **Prof.ssa Monica Lavagna**

Tesi di Laurea Magistrale di:
Federico Gazzea mat.° 770155

Anno accademico 2012/2013

INDICE

<u>INTRODUZIONE AL LAVORO DI TESI</u>	1
• OBIETTIVI E SCOPI DELLA TESI	2
1. <u>L'INVOLUCRO REVERSIBILE: STORIA E TEORIA DELLE TECNOLOGIE PREFABBRICATE</u>	3
1.1. L'INVOLUCRO E L'ARCHITETTURA: L'EVOLUZIONE DEL XX SECOLO	4
1.1.1. LA RIVOLUZIONE DEL MOVIMENTO MODERNO	5
1.1.2. DALLA RICOSTRUZIONE AL XXI SECOLO	7
1.2. L'INNOVAZIONE TECNOLOGICA: INDUSTRIALIZZAZIONE E PREFABBRICAZIONE	8
1.2.1. LO SVILUPPO INDUSTRIALE E LO SVILUPPO TECNOLOGICO	
1.2.2. LA PREFABBRICAZIONE DEGLI ELEMENTI EDILIZI	9
1.3. L'EVOLUZIONE DELLE STRUTTURE IN LEGNO	11
1.3.1. LE TECNOLOGIE DEL LEGNO: LO SCENARIO EUROPEO	12
1.3.2. LE TECNOLOGIE DEL LEGNO: LO SCENARIO NORD AMERICANO	13
1.4. L'ACCIAIO E IL CURTAINWALL	15
1.4.1. L'ASCESA DEL CURTAINWALL	16
1.5. LA PREFABBRICAZIONE IN CEMENTO ARMATO	18
1.5.1. IL CALCESTRUZZO ARMATO	
1.5.2. LA PREFABBRICAZIONE DEL CALCESTRUZZO	19
1.6. LE TECNOLOGIE STRATIFICATE A SECCO	20
1.6.1. SPERIMENTAZIONI REVERSIBILI	21
1.6.2. LA DIFFUSIONE DELLE TECNOLOGIE REVERSIBILI	24
2. <u>L'INVOLUCRO VERTICALE REVERSIBILE: TIPOLOGIE E COMPONENTI</u>	25
2.1. INVOLUCRO MASSIVO E INVOLUCRO LEGGERO	
2.2. TECNOLOGIE REVERSIBILI: LE SOTTOSTRUTTURE E I RIVESTIMENTI	27
2.2.1. SOTTOSTRUTTURE E RIVESTIMENTI IN LEGNO	
2.2.1.1. SOTTOSTRUTTURE DIFFUSE	28
2.2.1.2. PANNELLI PREFABBRICATI PORTANTI	29
2.2.1.3. PANNELLI PREFABBRICATI NON PORTANTI	30
2.2.1.4. CELLULE TRIDIMENSIONALI	
2.2.2. SOTTOSTRUTTURE E RIVESTIMENTI IN ACCIAIO	31
2.2.2.1. STRUTTURA DIFFUSA	
2.2.2.2. STRUTTURA PUNTIFORME	32
2.2.2.3. CELLULE TRIDIMENSIONALI	33
2.2.3. SOTTOSTRUTTURE E RIVESTIMENTI IN CEMENTO	33
2.2.3.1. PANNELLI PREFABBRICATI NON ISOLATI	34
2.2.3.2. PANNELLI SANDWICH CON ISOLAMENTO	35
2.2.3.3. LASTRE SOTTILI PER STRATIFICAZIONI COMPLESSE	36
2.3. I MATERIALI ISOLANTI	37
2.4. I LAYER PROTETTIVI E LE INTERCAPEDINI	39
2.4.1. LE BARRIERE AL VAPORE	
2.4.2. I MATERIALI IMPERMEABILIZZANTI	40
2.4.3. L'INTERCAPEDINE D'ARIA	41
2.4.4. I RIVESTIMENTI	

3. <u>LE PRSTAZIONE DELL'INVOLUCRO EDILIZIO</u>	41
3.1. LA RESISTENZA MECCANICA	
3.2. L'ISOLAMENTO TERMICO	42
3.2.1. LA TRASMITTANZA TERMICA	
3.2.2. L'INERZIA TERMICA	43
3.3. IL CONTROLLO DELLA CONDENSA INTERSTIZIALE	44
3.4. IL BENESSERE ACUSTICO	45
3.5. LA RESISTENZA AL FUOCO	
4. <u>INVOLUCRI REVERSIBILI: 40 CASI STUDIO</u>	47
4.1. DEFINIZIONE CRITERI DI SELEZIONE DEI CASI STUDIO	
4.2. GUIDA ALLE SCHEDE DI ANALISI ARCHITETTONICA DEI CASI STUDIO	49
4.3. SCHEDE DI ANALISI ARCHITETTONICA DEI CASI STUDIO	50
5. <u>VALUTAZIONI DELLE PRESTAZIONI DELLE CHIUSURE VERTICALE DEI 40 CASI STUDIO</u>	130
5.1. PROCEDIMENTO DI CALCOLO DEI PARAMETRI PRESTAZIONALI	
5.1.1. CALCOLO DELLE PRESTAZIONI TERMO-ACUSTICHE	131
5.1.2. CALCOLO ENERGIA INCORPORATA E CO ₂ INCORPORATA	
5.2. GUIDA ALLE SHEDE DI VALUTAZIONE DEGLI INVOLUCRI REVERSIBILI	132
5.3. SCHEDE DI VALUTAZIONE DEGLI INVOLUCRI	133
6. <u>ANALISI DELLE PRESTAZIONI DEGLI INVOLUCRI: CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE</u>	214
6.1. LA TRASMITTANZA TRASMITTANZA TERMICA	
6.2. L'INERZIA TERMICA	218
6.3. L'ISOLAMENTO ACUSTICO	223
6.4. IL CONTROLLO DELLA CONDENSA INTERSTIZIALE	225
6.5. ENERGIA INCORPORATA E CO ₂ EMESSA	227
6.6. CONFRONTI CONCLUSIVI	229
7. <u>CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE SUGLI INVOLUCRI REVERSIBILI</u>	232
7.1. LA PROGETTAZIONE TECNOLOGICA DELL'INVOLUCRO	
7.2. LA SCELTA DEI MATERIALI	234
7.3. LA SCELTA TECNOLOGICA: SOLUZIONI MASSIVE E SOLUZIONI LEGGERE	236
7.4. I VANTAGGI E LE CRITICITA' DELLE TECNOLOGIE COSTRUTTIVE REVERSIBILI	239
7.4.1. LE CRITICITA'	
7.4.2. I VANTAGGI	240
<u>CONCLUSIONE</u>	242

INTRODUZIONE AL LAVORO DI TESI

Fin dai tempi antichi le esigenze dettate dallo stile di vita nomade hanno fatto nascere le prime tecniche costruttive reversibili per poter spostare gli insediamenti in aree con maggiori risorse; queste tecnologie sopravvivono nelle società nomadi del Caucaso e del nord Africa che ancora oggi vivono in tende provvisorie facili da montare e da smontare.

Parallelamente nel corso dei secoli per migliorare gli aspetti legati alla velocità e alla economicità della produzione edilizia sono state elaborate nuove soluzioni tecnologiche reversibili per risolvere queste esigenze.

La possibilità di produrre elementi prefabbricati industrialmente da poter assemblare facilmente e velocemente in cantiere, riducendo i costi e i tempi di costruzione, ha contribuito ad aumentare l'interesse e la diffusione di queste tecnologie; dalle strutture portanti agli involucri, ogni elemento può essere prodotto in uno stabilimento che ne certifica la qualità e poi trasportato e montato in cantiere eliminando le variabili connessi alla produzione dei materiali direttamente in cantiere. Queste condizioni hanno favorito la ricerca e lo sviluppo di tecnologie e materiali che possano far fronte a queste esigenze; proprio questa evoluzione tecnologica ha permesso la diffusione delle tecnologie costruttive reversibili.

Le crisi finanziarie ed energetiche, che le società contemporanee hanno dovuto affrontare negli ultimi decenni, hanno incrementato l'attenzione verso le tematiche di sostenibilità economica e ambientale, coinvolgendo tutti gli aspetti connessi alla vita delle persone, dall'approvvigionamento energetico alla produzione dei beni di consumo.

Anche nel mondo dell'edilizia e dell'architettura, negli ultimi anni, si tende sempre più verso la progettazione di edifici "sostenibili"; il risparmio energetico, il riciclaggio dei materiali, il risparmio economico e gli standard qualitativi e funzionali sono tutte esigenze fondamentali a cui occorre trovare una soluzione adeguata.

Le tecnologie costruttive reversibili trovano una maggior applicazione nella costruzione degli involucri verticali opachi, componente di grande importanza per l'organismo edilizio dovendo garantire la sicurezza e il comfort degli ambienti interni; la necessità di elaborare soluzioni di involucro che rispondano a molteplici requisiti prestazionali (isolamento termico e acustico, sostenibilità ambientale ed economica, sicurezza, comfort ecc.) viene soddisfatta da queste soluzioni costruttive che sfruttano la possibilità di comporre stratigrafie assemblando strati di diversi materiali alla ricerca della soluzione più idonea, garantendo la reversibilità degli elementi.

La diffusione di queste tecnologie reversibili è strettamente connessa al mondo della produzione industriale che consente di immettere negli scenari architettonici contemporanei nuovi materiali e nuove soluzioni tecniche; conseguentemente, la conoscenza di questa grande varietà di tecnologie, è fondamentale per il progettista.

Da questa necessità conoscitiva, nasce la volontà di svolgere una ricerca mirata sulle tecnologie reversibili per la realizzazione di involucri edilizi con l'obiettivo della verifica dell'efficienza di tali soluzioni.

La mia attività di tesi nel campo delle tecnologie reversibili per la realizzazione di involucri esterni è stata regolata dalla ricerca e dallo studio di applicazioni pratiche di tecnologie reversibili, sostenute dalle conoscenze storiche e dalle teorie tecniche connesse, con lo scopo di ottenere conoscenze tecniche approfondite che possano migliorare l'attività di progettazione futura e per comprendere a fondo le potenzialità o i limiti di queste tecnologie costruttive.

OBIETTIVI DELLA TESI

L'obiettivo di questa tesi è quello di definire gli scenari relativi alle tecnologie reversibili, in termini di prestazioni e di sostenibilità ambientale; nello specifico si vuole verificare quanti e quali requisiti prestazionali riescano a soddisfare queste tecnologie reversibili.

Lo scopo è quello di definire concretamente le caratteristiche e le conseguenti potenzialità prestazionali delle tecnologie reversibili focalizzando l'attenzione sull'isolamento termico ed acustico e sulla sostenibilità ambientale delle soluzioni reversibili di involucro.

Per poter giungere tale obiettivo è stato necessario svolgere un lavoro di ricerca, di analisi e di valutazione suddivisibili in quattro fasi principali:

- L'indagine storica e teorica relativa all'evoluzione delle tecnologie reversibili, agli scenari nelle quali si sono sviluppate e ai protagonisti di queste evoluzioni tecnologiche al fine di indagare le motivazioni del loro sviluppo;
- La ricerca e la catalogazione di applicazioni reali di queste soluzioni tecnologiche reversibili, identificando diversi casi studio da poter valutare e confrontare;
- La valutazione degli involucri dei casi studio individuati, sulla base di vari indici prestazionali;
- L'analisi dei risultati prestazionali ottenuti con conseguenti considerazioni e conclusioni.

Per giungere all'obiettivo finale, occorre, quindi, unire la conoscenza storica e la conoscenza tecnica allo studio e alla valutazione di applicazioni pratiche provenienti da contesti storico-culturali differenti; il risultato è la conoscenza dei sistemi che regolano e caratterizzano il mondo delle tecnologie reversibili, valutandone le criticità o le potenzialità, cercando di dare una risposta a tutti quei dubbi e a tutte quelle domande che sorgono, più o meno spontaneamente, quando ci si avvicina a queste tecnologie.

1. L'INVOLUCRO REVERSIBILE: STORIA DELLE TECNOLOGIE PREFABBRICATE

In questo primo capitolo, ripercorreremo l'evoluzione delle tecnologie costruttive e dell'architettura, focalizzando l'attenzione a quegli aspetti che interessano lo sviluppo del costruire reversibile, e che ci aiuteranno a capire meglio la storia delle tecnologie costruttive reversibili e a definire gli scenari attuali ad esse correlati.

Lo sviluppo industriale, la prefabbricazione ed i materiali da costruzione saranno i protagonisti di questi percorsi storici che coinvolgeranno tutti gli attori legati all'evoluzione tecnica e teorica delle tecnologie reversibili.

Il tema del costruire reversibile affonda le proprie radici nel passato remoto della storia dell'uomo e della storia dell'architettura.

Come scriveva Paolo Portoghesi, *“Costruire a secco (reversibile) è una esperienza che ci riconduce a un rapporto primordiale con la materia costruttiva, l'assemblaggio di elementi presi dal luogo in cui si costruisce; ma nello stesso tempo ci fa ricordare esempi di connessione perfetta tra elementi, siano esse pietre adagiate in corsi paralleli o legni tenuti insieme da cavicchi o profilati metallici avvitati o imbullonati. Viene in mente l'estrema spontaneità che nella architettura delle capanne, secondo l'ipotesi vitruviana, prende esempio dai nidi degli uccelli e la estrema raffinatezza degli architetti egizi e greci che misero insieme le pietre dopo aver fatto di ogni concio un solido geometrico”*.

Gli uomini, agli inizi della loro storia hanno condotto una vita nomade, spostandosi da un luogo all'altro, riparandosi in edifici provvisori, costituiti da rami, frasche, pelli di animali, ossa. Tali ripari dovevano essere smontabili e rimontabili facilmente e soprattutto leggeri, perché dovevano essere trasportati da un luogo all'altro. Quando l'uomo divenne stanziale, con lo sviluppo dell'agricoltura e dell'allevamento, incominciò a poter costruire abitazioni stabili.

Ancora oggi, alcuni popoli fanno ricorso ad un'architettura reversibile primordiale; si pensi infatti ai popoli nomadi della Mongolia o del Caucaso che ancor oggi utilizzano come loro dimora la tradizionale Yurta, realizzata da una struttura in legno curvato e ricoperta in pellame, o ancora ai popoli nomadi beduini con le loro tende temporanee composte da grandi teli e da corde usate come tiranti, entrambi grandi esempi di tecnologia costruttiva reversibile.

La vita sedentaria dell'uomo, ha portato però all'impiego di nuovi materiali da costruzione: mattone, pietra, legno, materiali più duraturi per edifici che non necessitavano di essere spostati o modificati frequentemente.

Con l'avvento delle tecniche costruttive che impiegavano grandi blocchi di argilla, come ad esempio le Ziggurat, e con la comparsa del mattone in argilla avvenuta verso il 3500 a.C., vi fu un progressivo abbandono delle tecniche costruttive reversibili, che non furono, però, mai totalmente abbandonate.

L'impiego della pietra ha permesso all'uomo di realizzare semilavorati di dimensione maggiore rispetto all'argilla potendo lavorare, così, blocchi di grandi dimensioni.

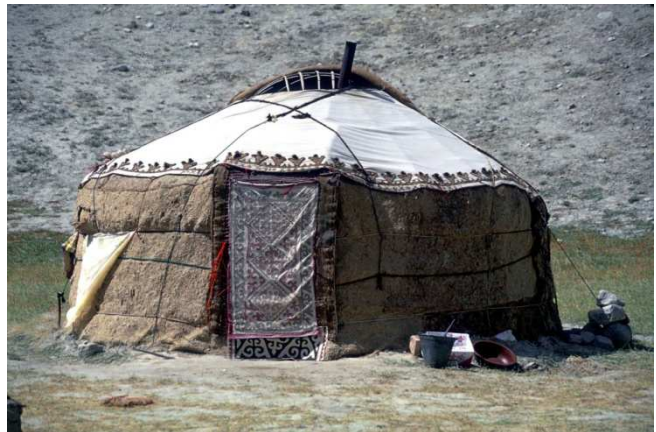


Figura 01: Esempio di Yurta mongola moderna.

Figura 02: Esempio tenda beduina tunisina

I templi Greci, rappresentano un esempio eloquente, della precisione raggiunta dalle maestranze del tempo, nel realizzare concii di forma e dimensione molto raffinata e precisa, tale da poterne effettuare un assemblaggio a secco.

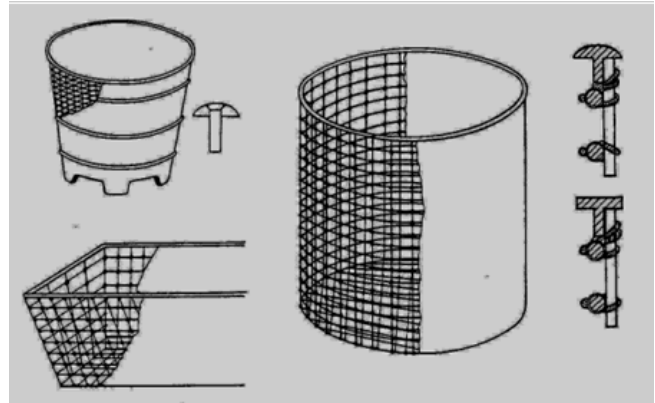
Nel Medioevo, con la costruzione delle cattedrali gotiche, l'uomo ha raggiunto uno dei massimi vertici dell'architettura a secco.

Esempi di grande rilievo nell'architettura reversibile in legno sono le Chiese norvegesi, le costruzioni a telaio (Ballon Frame, Platforme), e i sistemi a Blockbau, ancora oggi impiegati, sono stati per secoli fondamentali in molte parti del mondo.

Con l'avvento del ferro, poi della ghisa e ancor dopo dell'acciaio, il processo di evoluzione costruttiva e tecnologica ha conosciuto un impulso quasi inarrestabile, dettando le basi della prefabbricazione e favorendo lo sviluppo di soluzioni tecnologiche reversibili, grazie ai nuovi materiali che permettono fissaggi meccanici di grande affidabilità.

Grazie agli sviluppi dei sistemi di produzione, nella seconda metà dell'800, nasce l'era dell'industrializzazione in edilizia e con la scoperta del calcestruzzo armato, invenzione del giardiniere Joseph Monier del 1849, che intuì la possibilità di aumentare la resistenza dei vasi di fiori inserendo all'interno dello stampo alcuni fili di metallo, il mondo dell'edilizia conobbe una svolta decisiva.

Nuovi materiali e nuovi processi produttivi industriali permettono di applicare soluzioni tecnologiche reversibili utilizzando elementi prefabbricati uniti da fissaggi meccanici che consentano sia un facile assemblaggio, sia la possibilità di separare tutti i componenti una volta che l'edificio debba essere rimosso.



1.1 L'INVOLUCRO E L'ARCHITETTURA: L'EVOLUZIONE DEL XX SECOLO

Sebbene ,come visto in precedenza la storia dell'involucro, e dell'architettura in generale, ha un fondamento storico molto antico, i grandi cambiamenti avvenuti nel secolo scorso hanno cambiato il modo di costruire e di concepire l'involucro in maniera radicale, determinando scenari del tutto nuovi che hanno aperto la porta a soluzioni innovative di ogni genere. L'impiego dell'acciaio e del cemento armato sono sicuramente gli esempi più eloquenti di queste trasformazioni e di queste evoluzioni che ha condizionato l'architettura del XX secolo.

Il rapporto tra industria e l'architettura, tra prefabbricazione e progettazione, il tentativo di razionalizzazione dell'architettura e delle sue tecniche costruttive, sono alcune delle grandi rivoluzioni che hanno coinvolto l'architettura dai primi anni del Novecento e che hanno fatto evolvere le tecnologie costruttive reversibili.

Di seguito cercheremo di descrivere, in maniera più esaustiva possibile, il percorso dell'architettura dai primi del Novecento fino ad oggi, cercando di evidenziare i passaggi fondamentali che hanno condizionato lo sviluppo e l'evoluzione dell'involucro edilizio reversibile.

1.1.1 La Rivoluzione del Momento Moderno

Dopo la rivoluzione industriale, con l'avvento delle nuove tecniche di produzione, crebbe notevolmente il divario tra le tecniche costruttive di un arretrato settore edilizio e tra le innovative tecniche di produzione industriale che avevano rivoluzionato il settore.

Infatti, l'industria sfruttava già metodi di produzione industriale disponibili per la realizzazione di edifici residenziali molto semplici, che venivano messi sul mercato come un normale bene di

consumo, ancor prima che gli architetti del Movimento Moderno si interessassero alle questioni della standardizzazione e della prefabbricazione della residenza con le conseguenti primizie sperimentali di tecnologie costruttive reversibili.

Già nel XIX secolo, nelle principali nazioni industrializzate, fecero la loro comparsa i primi esempi di residenze prefabbricate in serie, come immediata risposta alle problematiche sociali derivanti dalle condizioni di vita inaccettabili che si riscontravano nelle città dopo il boom della rivoluzione industriale ed il conseguente sviluppo demografico.

Iniziano ad essere disponibili sul mercato, già in quegli anni, delle abitazioni completamente prefabbricate, realizzate in acciaio o in calcestruzzo, i cui unici limiti erano di ordine dimensionale, ma che essendo composti da elementi prefabbricati assemblabili garantivano velocità di posa in opera ed economicità.

Fino ad allora, la tecnologia costruttiva reversibile più diffusa per gli edifici in legno, risalente al 1830, era quella del Balloon-frame, che utilizzava dei montanti in legno di dimensioni standard, e che diede l'origine a un settore industriale rivolto alla prefabbricazione di componenti lignei per abitazioni.

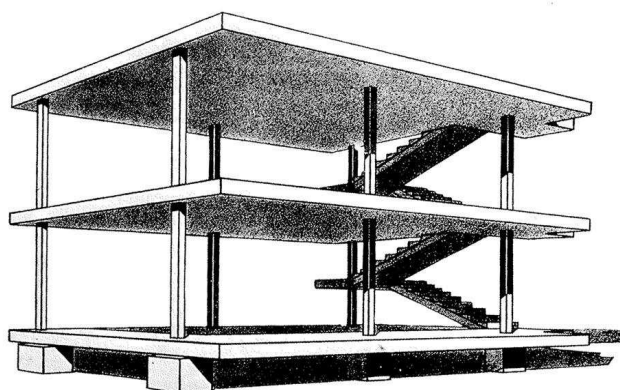
Il Movimento Moderno, allacciandosi alle tematiche di riscatto sociale sviluppatesi nei primi anni del Novecento, a partire dagli anni '10, sposò molto presto la causa dell'industrializzazione della residenza; alla base di questo interesse c'era il convincimento che la tecnica avrebbe potuto fornire un'abitazione dignitosa a tutti attraverso la produzione di massa.

Il contemporaneo cambiamento nella visione dell'architettura e della concezione dei canoni estetici, che portarono alla drastica rottura con gli stili architettonici del passato, forgiarono nuove icone estetiche di riferimento identificate con i beni di produzione industriale in voga in quell'epoca, quali automobili, aerei e le grandi navi.

Durante questa rivoluzione culturale, il Movimento Moderno rielaborò l'idea di parete dell'edificio, che nella concezione classica unifica strutture e rivestimento, alla diversificazione di un sistema composto da un impianto strutturale di supporto e da un involucro di rivestimento e di tamponamento, indipendente ed esterno al nucleo strutturale; ci si inizia ad affacciare concretamente ai sistemi tecnologici reversibili che soddisfacevano le esigenze estetiche-funzionali dell'epoca.

Questa grande innovazione tecnologica e culturale, che mosse i primi passi già sul finire dell'Ottocento tramite gli sviluppi dei primi sistemi in cemento armato per edifici industriali elaborati da Francois Hennebique e grazie all'opera di Tony Garnier e della sua Cité Industrielle, trovò in Le Corbusier il suo più grande esponente.

Le opere sperimentali dell'architetto svizzero naturalizzato francese, che furono poi riassunte nei famosi "cinque punti di una nuova architettura nel 1926", diedero inizio ad una nuova epoca compositiva delineata da nuove concezioni e da nuove teorie architettoniche; la pianta libera dai vincoli imposti dai muri portanti, la facciata libera costituita da una membrana leggera grazie all'arretramento delle strutture portanti e la finestra a nastro, sono alcune di queste innovazioni introdotte dagli edifici e dalle teorie di Le Corbusier. È da riconoscere a Le Corbusier il primo esempio di standardizzazione del processo costruttivo, sviluppato dalle teorie della casa "Domino", in cui una struttura indipendente di cemento armato si combinava con altrettanti elementi prefabbricati assemblabili facilmente e rapidamente come se fossero appunto tessere del gioco domino, totalmente libere da vincoli, ponendo le basi per lo sviluppo del costruire *reversibile e stratificato*.



Nel 1925 a Parigi, in occasione dell'esposizione delle Arti Decorative, Le Corbusier elabora il prototipo dell'alloggio tipo, una cellula ripetibile con una struttura di 37 pilastri 25×30 cm racchiusa da un involucro di elementi prefabbricati in paglia e cemento, che sarà il fondamento del suo successivo progetto di "Immeuble Villas".

Un ulteriore protagonista, di fondamentale importanza, nell'evoluzione dell'architettura e soprattutto delle tecnologie reversibili e prefabbricate, fu Walter Gropius, padre della Bauhaus, che si occupava già dal 1910 di produzione in serie e della standardizzazione degli elementi costruttivi per case prefabbricate.

Come tappa intermedia nel percorso verso la "macchina per abitare", risultato finale delle teorie dell'architetto tedesco, Gropius si prefissò di realizzare una casa costruita con elementi prefabbricati standard e componibili ispirandosi a quelli di un gioco di costruzione per bambini, che effettivamente fece sviluppare nel 1922 per la sua Bauhaus.

Gropius sviluppò, inoltre, procedimenti di montaggio a secco delle componenti attraverso l'impiego di materiali adeguati come ferro laminato, cementi speciali e legno trattato, ma anche, attraverso la standardizzazione delle componenti sia di finitura, sia strutturali.

Le sue teorie pionieristiche portarono Walter Gropius a realizzare uno dei più innovativi edifici dell'architettura moderna: le officine Fagus realizzate tra il 1911 e il 1925. Gropius trasforma le facciate introducendo sul fronte del corpo uffici un'innovazione geniale, destinata ad assicurargli un posto nella storia dell'architettura., eliminata la facciata in mattoni, egli evita i tamponamenti, per realizzare pilastri in muratura leggermente rastremati, tra i quali sono appese le strutture libere in ferro delle vetrate, altre tre piani.

Verso sud est, questo primo curtainwall d'Europa gira attorno allo spigolo, rendendo visibile in modo ingegnoso il nuovo sistema costruttivo, che si avvale della struttura portante in cemento armato dei solai e dei pilastri interni per eliminare liberamente le pareti delimitanti gli spazi.

Inizia quindi a farsi sempre più centrale il tema dell'assemblaggio di componenti industriali prefabbricate, contribuendo così alla maturazione delle tecnologie costruttive reversibili.

Va sicuramente citata, nell'ambito della prefabbricazione e della reversibilità architettonica, anche l'opera del maestro tedesco Mies van der Rohe; nel suo padiglione espositivo tedesco, per l'esposizione universale di Barcellona del 1929, vengono espressi i concetti fondamentali della sua architettura come la pianta libera, le immense vetrate e gli esiti pilastri e la sua composizione dello spazio e dei volumi. Questi concetti fondamentali marcheranno l'opera dell'architetto tedesco e troveranno il loro culmine nella purezza della galleria nazionale di Berlino del 1967.

Proprio gli inizi degli anni 20 che, in Germania, prese avvio l'esperienza delle Siedlungen, quartieri operai realizzati sulla base di un preciso programma di rinnovamento sociale e messe in atto dal governo tedesco.

Fu in questa occasione che ci fu una forte sperimentazione di nuovi procedimenti tecnici costruttivi orientati verso la prefabbricazione dei componenti o di interi moduli abitativi, favorendo la diffusione delle soluzioni costruttive che impiegavano un telaio di supporto a tamponamenti leggeri, derivanti tra l'altro da tecniche costruttive tradizionali locali come quella del Fachwerk (strutture in legno con riempimento di mattoni o incannicciato).

Questa esperienza delle Siedlungen tedesche vide la partecipazione di una serie di grandi architetti, tra i quali Gropius, Mies van der Rohe, Hans Sharoun, Bruno Taut e lo stesso Le Corbusier.

Contemporaneamente nel resto d'Europa, dove si affrontava la ricostruzione dopo la prima guerra mondiale, si svilupparono studi approfonditi sulla prefabbricazione di componenti da assemblare in



cantiere provando così anche la ricollocazione all'industria bellica ormai obsoleta, ciò avvenne soprattutto in Gran Bretagna.

Svariate concause fecero ritardare l'approccio dell'Italia riguardo il dibattito sull'uso di sistemi costruttivi reversibili legati alla prefabbricazione industriale per la costruzione delle abitazioni; da una parte, le differenti condizioni del paese, rispetto ad altri Stati europei, che non rendevano necessari lo sviluppo di programmi di edilizia a basso costo, dove poter sperimentare l'impiego di nuovi sistemi costruttivi, dall'altra, uno scarso interesse e forse una scarsa preparazione tecnica dei progettisti, che non erano attratti dalla sperimentazione innovativa.

Le uniche applicazioni pratiche si concentrarono tra il 1933 e il 1935, quando si tentò la riproposizione di modelli provenienti da altri paesi, sovrapponendo temporalmente le esperienze di prefabbricazione pesante e leggera, che però, portò, a un sostanziale fallimento dovuto all'assenza di un reale programma politico e sociale, necessario a sostenerne la prosecuzione.

All'inizio degli anni 30, comunque, l'interesse per l'industrializzazione e per la reversibilità delle abitazioni in Europa andò scemando, in parte per una certa delusione dovuta alla ripetitività degli edifici così realizzati, in parte a causa delle mutate condizioni politiche sociali, con l'affermazione dei regimi totalitari e l'approssimarsi della seconda guerra mondiale; lo sviluppo e la ricerca delle tecnologie costruttive reversibili conobbero una battuta d'arresto e la loro diffusione su larga scala fu rimandata.

1.1.2 Dalla ricostruzione al XXI secolo

La seconda guerra mondiale, con la sua devastazione e i suoi bombardamenti, aveva lasciato molte persone senza una casa, e con la fine della guerra la ricostruzione divenne il primo problema a cui far fronte. La costruzione di numerosi nuclei abitativi nel minor tempo possibile, rendeva necessario se non indispensabile il ricorso alla prefabbricazione industriale degli elementi costruttivi, incontrando, inoltre, la criticità della riconversione dell'industria bellica dopo la conclusione del conflitto. Non avendo riscontrato grande successo, negli anni precedenti, le vecchie tecniche costruttive che impiegavano la prefabbricazione industriale dovevano essere riviste e rielaborate.

A questo riguardo si svilupparono due strade parallele ma differenti; una si occupava della produzione di residenza di piccola scala, abitazioni singole o case a schiera, l'altra focalizzata alla produzione di grandi complessi residenziali, che troveranno vigore nell'edilizia popolare.

Gli studi relativi alle abitazioni singole, o comunque di piccola dimensione, furono la prosecuzione delle ricerche degli anni precedenti la guerra.

Il bisogno di ricollocare il personale militare e l'industria bellica, e la necessità di ricostruire una grande quantità di abitazione, fecero nascere in Gran Bretagna il Temporary Housing Programme, che si poneva come obiettivo la produzione di case in breve tempo impiegando la forza lavoro di ritorno dalla guerra. A questo si affiancò la prefabbricazione delle strutture delle industrie ricollocate e le attività di standardizzazione dei componenti al fine di garantire la flessibilità e la facile manutenzione degli alloggi. Anche se trovarono un'applicazione pratica in diversi interventi, neppure i sistemi di maggior successo ottennero un reale successo commerciale, a causa dell'aspetto non accattivante degli edifici, causa delle economie dei materiali, che non incontrava l'approvazione degli abitanti.

Oltre oceano, negli Stati Uniti, iniziò una vasta campagna di diffusione dell'acciaio come materiale da costruzione per la residenza subito dopo la fine della guerra, andando ad implementare il campionario di tecniche costruttive reversibili che vedeva come leader di maggior successo il sistema del Balloon-frame.

Di rilevante interesse fu l'iniziativa Case Study Houses, sempre relativa alla prefabbricazione e alla reversibilità in edilizia, promossa dalla rivista californiana Arts&Architecture, che mirava a ridare un'immagine nuova e innovativa della casa moderna, riportando esempi reali di residenze reversibili costruite con tecnologie di assemblaggio tramite componenti prefabbricati, con tempi di costruzione rapidi e in totale economia, in totale sintonia con il boom costruttivo del dopoguerra.

Il risultato di questa iniziativa si concretizzò in 36 residenze monofamiliari, sorte nei dintorni di Los Angeles tra il 1945 e il 1966, in cui era dominante l'uso dell'acciaio che donava leggerezza e permetteva facilità di messa in opera. Anche in questo caso, come per l'iniziativa tedesca delle Siedlungen, parteciparono architetti di grande fama, tra i quali Richard Neutra, Pierre Koenig, Eero Saarinen e gli Eames.

Nel resto d'Europa, nel frattempo, si faceva fronte alla necessità della ricostruzione delle città devastate dai bombardamenti, e si scelse di intraprendere la via dei grandi complessi residenziali statali, composti da elementi costruttivi industrializzati che riducessero al minimo i tempi di realizzazione e i costi economici. Purtroppo, già all'inizio degli anni Sessanta, nonostante la coscienza architettonica preferiva sistemi flessibili e modulari, si ricorse esclusivamente alla prefabbricazione pesante, con la conseguente monotonia estetica e lo scarso apprezzamento del pubblico.

Più avanti, ai sistemi di fabbricazione chiusa del dopoguerra si sono cercati di sostituire i sistemi aperti, basati sulla intercambiabilità e sulla variabilità dei componenti, che dovevano essere realizzati sulla base di regole comuni condivise dai produttori e che avrebbero stimolato maggiormente lo sviluppo delle tecnologie reversibili..

La progettazione di questi nuovi sistemi prefabbricati aveva lo scopo di eliminare le ridondanze, le inefficienze e le aleatorietà di messa in opera dei procedimenti costruttivi tradizionali, concentrando l'attenzione progettuale sulle interfacce e sui rapporti fra i componenti, piuttosto che sugli elementi in sé.

Neppure questi sistemi, tuttavia, superarono la fase embrionale, per le consuete resistenze culturali e per la sostanziale indifferenza dei produttori edili. Nell'ultimo periodo, come si vedrà, l'innovazione nel settore edilizio seguirà modalità differenti, in un certo senso più spontanee, spinta anche da fattori nuovi, quali la necessità di individuare modelli di sviluppo sostenibili per l'ambiente in cui la reversibilità delle componenti ha un ruolo principale.

1.2 L'INNOVAZIONE TECNOLOGICA: INDUSTRIALIZZAZIONE E PREFABBRICAZIONE

Da quando la rivoluzione industriale ha dato avvio all'evoluzione progressiva della produzione che ha coinvolto molti altri settori, anche l'architettura e l'edilizia hanno instaurato, via via sempre più saldamente, un rapporto con il mondo industriale e con i suoi procedimenti produttivi.

È ovvio, come lo sviluppo industriale e l'avvento di nuove tecnologie, apportino cambiamenti anche all'architettura, dando via a una relazione biunivoca di domanda e offerta che porta a uno sviluppo costante di entrambe le parti; il cammino dell'architettura e quello dello sviluppo tecnologico industriale è quindi parallelo e interconnesso, pertanto, è logico pensare, che il mondo dell'edilizia e dell'architettura come oggi lo conosciamo non sarebbero potuto essere gli stessi senza l'apporto fondamentale del progresso industriale.

Questo rapporto è ancor più decisivo e centrale se si considerano le tecnologie costruttive reversibili, nelle quali la prefabbricazione industriale dei singoli componenti ha un ruolo principale, non solo per ragioni legate ai vantaggi costruttivi derivanti da queste tecniche, ma anche in ottica economica, riducendo gli sprechi di tempo e di materiale.

Il progresso industriale è dunque anche un progresso della società che coinvolge tutti i settori e che, se interpretato e sviluppato in maniera corretta e sostenibile, può migliorare notevolmente la qualità della vita e il comfort degli ambienti.

1.2.1 Lo sviluppo industriale e lo sviluppo tecnologico

La storia delle relazioni tra produzione industriale e progettazione architettonica, sin dalle sue prime formulazioni derivate dal Movimento Moderno, attraversa oggi una fase particolare nella quale straordinari e a volte spettacolari processi innovativi si contrappongono a qualche tratto di involuzione, forse propria dell'industria stessa.

Se pensiamo alla sua fase iniziale, precedente alla seconda guerra mondiale, alcuni architetti attratti dall'industria, che elaborarono alcune soluzioni di scarso successo, non percepirono a fondo le vere potenzialità del binomio industria-architettura e non riuscirono a declinare soluzioni efficaci, se non che per alcune eccezioni, limitando così lo sviluppo delle tecnologie costruttive reversibili.

Successivamente, nel dopoguerra, ci fu una fase di industrializzazione massiccia che portò progressivamente a una tendenza verso l'economicità degli edifici e delle metodologie industriali che non valorizzavano, anzi annullavano, il progetto di architettura, tenendo conto esclusivamente del profitto e alla soddisfazione delle esigenze legate alla crescita urbana e demografica e che, tra l'altro, impiegando elementi prefabbricati di grandi dimensioni non favoriva la reversibilità totale delle componenti edilizie.

Con l'ascesa di un'industrializzazione edilizia più accorta alla qualità che non alla quantità, successivamente, scaturita da ragioni di mercato che favorivano concetti legati all'autonomia funzionale e formale dell'architettura, si svilupparono progressivamente soluzioni costruttive meno legate ai vincoli della standardizzazione e dell'uniformità che potevano raggiungere anche ammirevoli risultati estetici lasciando una certa libertà formale al progettista. Proprio in questa fase si nota il contributo di alcuni progettisti (Nouvel, Fuller, Dubosc e Landowski) all'evoluzione della produzione industriale, sia per quanto riguarda gli aspetti formali e la libertà di scelta dei componenti, sia contribuendo al miglioramento della qualità operativa di messa in opera, dando avvio ai primi principi su cui si svilupperà la cultura della sostenibilità.

Lo sviluppo delle tecnologie costruttive reversibili va di pari passo con lo sviluppo tecnologico ed industriale, dai quali può acquisire nuovi materiali e nuovi processi produttivi; grazie all'innovazione tecnologica le tecnologie costruttive in generale, ma in particolar modo quelle reversibili, che fanno uso di elementi prefabbricati industrialmente, possono progredire ed evolversi cercando di soddisfare gli standard di efficienza di sostenibilità.

Al giorno d'oggi l'innovazione tecnologica può essere definita attraverso due ramificazioni principali: da una parte quello che si sviluppa appunto nel segno della sostenibilità, l'altro invece proiettato verso il raggiungimento estremo del progresso tecnologico.

Sebbene molto spesso siano considerati concetti opposti, con volontà differenti, in realtà, molto spesso accade che, l'uno e l'altro convivano e condividano gli stessi scopi sotto la guida di progettista attento e consapevole.

La ricerca industriale è affiancata quindi da un'intensa ricerca del progettista, quest'ultimo chiamato a connettere l'attività di produzione architettonica con quella di ricerca pertinente all'innovazione tecnologica; un chiaro esempio di questa figura di progettista proiettato alla ricerca e all'innovazione è sicuramente quello di Thomas Herzog, il quale sia attraverso la sua opera architettonica, che attraverso le sue ricerche e i suoi scritti tecnico-teorici, ha apportato nuovi stimoli e nuove responsabilità alla figura professionale dell'architetto costretto sempre più ad una costante ricerca tecnica e tecnologica.

Nell'ambito delle tecnologie costruttive reversibili diviene ancor più fondamentale la ricerca e la conoscenza tecnica per poter elaborare soluzioni tecnologiche adeguate all'esigenze; la conoscenza dei materiali e dei processi produttivi, che deve essere costantemente aggiornata seguendo gli sviluppi dell'innovazione tecnologica, consente al progettista di elaborare con maggior facilità la soluzione più idonea, che soddisfi i requisiti prestazionali e che garantisca il più possibile la reversibilità delle componenti edilizie, incrementando la sostenibilità ambientale del progetto.

1.2.2 La prefabbricazione degli elementi edilizi

Per delineare correttamente lo scenario complessivo, per ciò che concerne le tecnologie costruttive reversibili che si basano sull'utilizzo di componenti prefabbricate, occorre anzitutto precisare cosa si intendeva e si intende tuttora per "prefabbricazione".

Sebbene esistano molte definizioni a riguardo, probabilmente la più antica è la più idonea, e definisce la prefabbricazione come la realizzazione fuori opera di elementi o componenti edilizi e i sottosistemi di edifici. Essendo elementi realizzati fuori opera è ovvia la necessità di prevedere operazioni successive di messa in opera degli elementi. Per alcuni elementi edilizi basati su materiali quali metalli, legni o resine, la prefabbricazione è scontata poiché, essendo prodotti di origine industriale non esistono altri metodi di produzione se non quello effettuato nello stabilimento di produzione.



Ciò distingue tali tecnologie costruttive da altre tecniche che prevedano realizzazioni in opera, sostanzialmente, le tecnologie del calcestruzzo e dei suoi derivati, ma anche quelle delle murature in blocchi laterizi.

La prefabbricazione degli elementi edilizi conduce quindi alle tecnologie costruttive cosiddette a secco, ovvero quelle che prevedono l'assemblaggio di elementi prefabbricati tramite fissaggi meccanici reversibili, senza l'utilizzo di leganti idraulici o di calcestruzzi.

Come accennato nei capitoli precedenti le esperienze di prefabbricazione in Italia, che venivano dall'estero, furono accolte quasi essenzialmente per l'intrinseca promessa di rapidità nell'esecuzione di interventi di grande dimensione, i quali si rendevano necessari per la soluzione dei problemi legati alla necessità di abitazioni nel periodo della ricostruzione durante il quale ci fu anche una considerevole migrazione interna. Con i grandi programmi per le case popolari degli anni '60, ci fu una diffusione dei sistemi prefabbricati tanto rapida quanto breve, appoggiata da imprese di costruzioni italiane che avevano adottato e sviluppato sistemi di prefabbricazione importati dall'estero, specialmente dalla Francia; questi sistemi francesi, in effetti, ebbero tanto successo, tanto è vero che riuscirono anche a invadere un mercato edilizio diverso e complicato come quello inglese, trovando spazio nella realizzazione di un quartiere satellite di Londra chiamato Thamesmed.

Si affermò così, a cavallo tra gli anni '80 e gli anni '70, quella che fu chiamata prefabbricazione aperta, più flessibile, più efficiente e proiettata verso la varietà compositiva per una migliore riuscita estetica. Queste innovazioni tecnologiche furono passaggi fondamentali per il processo evolutivo delle tecnologie costruttive reversibili, che iniziarono in quegli anni a suscitare maggior interesse da parte dei progettisti.

Nella sua complessa storia, la prefabbricazione ha visto varie fasi e vari cicli, passando attraverso realtà imprenditoriali diverse, affrontando necessità e problematiche nuove e sempre più correlate tra loro. Il progresso tecnologico ha assecondato il settore industriale legato all'edilizia supportandolo nelle difficoltà, affrontando per esempio le problematiche relative alla diminuzione della manodopera qualificata e all'aumento del costo della stessa, fornendo una soluzione più pratica ed economica, quale appunto la prefabbricazione negli stabilimenti produttivi garantendo migliori qualità dell'ambiente di lavoro e maggiore precisione degli elementi prodotti, andando incontro alle esigenze relative agli standard e ai controlli di qualità. L'industrializzazione corrispondente alla prefabbricazione aperta ebbe un ruolo importantissimo nell'aumento della conoscenza della qualità, del controllo e della certificazione di essa, come avviene in tutti i settori della produzione industriale.

Le crescenti esigenze, a cui il progetto edilizio deve rispondere, crescono nel tempo sia di numero che di importanza, come ad esempio i vincoli ambientali ed energetici, costringendo i progettisti, e più in generale, tutti i protagonisti del mondo delle costruzioni, ad un adeguamento costante e ad una risposta alla domanda presente. Diventa quindi fondamentale il ruolo della prefabbricazione

industriale dei componenti edilizi, sia per il raggiungimento di una più alta qualità sia in termini economici.

Il panorama che oggi si delinea, quindi, presenta, da un lato la nascita di nuovi sistemi costruttivi con la promessa di sicuri e interessanti sviluppi, dall'altra l'industrializzazione e l'ammodernamento dei processi costruttivi apportati dalla prefabbricazione, sostituendo alle tecnologie tradizionali anti economiche e ormai obsolete, nuovi processi produttivi e nuovi sistemi tecnologici aggiornati e più adatti ad affrontare e risolvere le problematiche attuali.

1.3 L'EVOLUZIONE DELLE STRUTTURE IN LEGNO

Per delineare un quadro storico complessivo che esprima correttamente lo sviluppo delle tecnologie costruttive reversibili, descriveremo, nei paragrafi successivi, le tappe fondamentali dell'evoluzione di queste tecnologie; saranno quindi enunciati tre diversi processi storici relativi ai tre principali materiali da costruzione:

- Il legno;
- L'acciaio
- Il calcestruzzo

Ognuno di questi materiali trova diverse applicazioni nel capo delle tecnologie costruttive reversibili e ha seguito un'evoluzione tecnologica nel tempo; pertanto verranno descritte tre diversi percorsi storici, che sono comunque strettamente connessi tra loro e che denotano molte più analogie che differenze.

Questa suddivisione in tre categorie sarà mantenuta anche per la classificazione e l'analisi dei casi studio come vedremo in seguito.

La prima evoluzione storica che analizzeremo sarà relativa al materiale da costruzione più utilizzato dall'uomo nei secoli passati: il legno.

Il legno è sicuramente il materiale che più si presta alla realizzazione di componenti da assemblare in cantiere, grazie alla sua leggerezza e alla sua resistenza nonché alla facilità di lavorazione.

La storia della tecnologia del legno ha origine nella tradizione antica dell'edilizia.

Ogni civiltà, nel corso della storia, ha conosciuto almeno un uso di questo materiale nella costruzione di edifici e di infrastrutture: dall'oriente fino all'Europa, dall'Africa al nuovo mondo, il legno intercorre nella storia e nella evoluzione di quelle culture, esplicitandone i linguaggi e i progressi tecnici. In tutte le aree colonizzate dall'uomo fin dai secoli antichi, esistono molti di questi esempi di costruzioni tramite l'impiego del legno.

Tralasciando le testimonianze più datate gli appartenenti al passato molto più remoto, nella storia dell'evoluzione delle strutture in legno ricordiamo i casi del *Fachwerk* tedesco, il *Timber frame* inglese, il *Colombage* francese e le *Stav* norvegesi, rappresentano la testimonianza storica delle conoscenze tecniche diffuse nell'aria europea, che però non è paragonabile alla più vasta innovazione vista dalle tecnologie in legno nel continente nordamericano, nella quale questi sistemi trovano ampio spazio anche al giorno d'oggi.

Il tema della flessibilità e della riproducibilità, strettamente connesso alla reversibilità e alla standardizzazione degli elementi edilizi è particolarmente evidente nelle declinazioni moderne, derivate dal primo novecento, dell'abitazione realizzata con la tecnologia *Platform frame* che vedremo nel dettaglio nei capitoli successivi insieme a tutte le altre soluzioni costruttive che impiegano il legno come materiale base, per la costruzione di edifici reversibili.

1.3.1 Le tecnologie del legno: lo scenario europeo

In questo capitolo verranno descritte le tecnologie costruttive in legno che ebbero maggior seguito nella storia costruttiva europea. Nel periodo compreso tra il XIV e il XVIII secolo, nell'area dell'Europa centro-settentrionale, trovò grande diffusione il sistema Blockbau, conosciuto anche come sistema a blocchi pieni. Noto per essere uno dei più antichi esempi di sistema costruttivo in legno massiccio, si caratterizza per l'impiego di una struttura portante in pareti continue massicce di legno. Questi edifici composti perlopiù da tronchi massicci, presentano una struttura muraria continua in cui l'involucro verticale è costituito da tronchi d'albero interi, che potevano essere lavorati in vario modo, disposti l'uno sull'altro seguendo una maglia orizzontale.

L'impiego di questo sistema costruttivo trovava diffusione quasi esclusivamente per edifici di dimensioni ridotte, essendo questo un sistema tecnologico che utilizza una grande quantità di legna, e per lo più in aree geografiche nelle quali era più abbondante il materiale, o laddove ne fosse facilitato il trasporto al sito.

Le criticità legate a questa tipologia costruttiva, erano legate soprattutto alla composizione del materiale ligneo che, non avendo un comportamento meccanico medesimo in tutte le direzioni, non offre una buona risposta alle sollecitazioni che una



struttura portante di un edificio è chiamata a sopportare. Questa tecnologia si modificò nel tempo apportando alcune migliorie come ad esempio le fondazioni in muratura a sostegno della struttura in elevazione, o come la realizzazione di incastri angolari di maggiore precisione che permisero una più ampia varietà distributiva degli spazi interni.

Attualmente, le evoluzioni di questa tecnica costruttiva impiegano una struttura che poggia su una platea in cemento armato, come fondazione, alla quale connettere gli elementi lignei sovrapposti; certamente nelle versioni più evolute, posizionato internamente od esternamente, compare sulle pareti uno stato di isolamento termico che consente di raggiungere standard di comfort interno maggiori.

Oltre a sistemi di questo tipo, ovvero la disposizione di tronchi d'albero orizzontalmente l'uno sull'altro, una delle più antiche modalità costruttive consisteva nell'interrare i pali verticalmente collegandoli l'uno all'altro mediante traversi, come accadeva nella realizzazione delle palafitte.

Questi sistemi lignei detti a graticcio, più conosciuti in Germania come *Fackwerk* e in Francia come *Pain de bois*, si diffusero maggiormente rispetto ai sistemi massivi, ed in prevalenza in quelle aree geografiche in cui la disponibilità di legno non era sufficiente per quei tipi di costruzioni.

Presenti negli scenari edilizi europei ancora oggi, questi sistemi a graticcio, si sviluppano soprattutto dove la configurazione morfologica dell'abitazione tipo era quella di un edificio su due o tre piani con copertura a due falde, diffusa maggiormente nell'est Europa, in Inghilterra e in Germania settentrionale e nei Paesi Bassi.

In queste tecniche a graticcio, si ha un uso del legno ottimale, sfruttandone al meglio le sue caratteristiche fisiche e meccaniche. La struttura assorbiva le sollecitazioni meccaniche



e statiche mentre le funzioni di tamponamento e di protezione erano indipendenti da queste sollecitazioni; questa emancipazione dell'involucro segnò una tappa fondamentale nell'evoluzione

Figura 07: Edificio in corso di realizzazione mediante tecnica
Figura 08: Esempio di casa a graticcio in costruzione

tecnologica e costruttiva che anticipava le costruzioni in calcestruzzo armato e in acciaio, che divennero indispensabili per sviluppare edifici di dimensione maggiore.

Questa tecnica, che tra l'altro, trae origine da un'antica tecnica costruttiva romana, può essere brevemente sintetizzata, come una tecnica che utilizza un sistema a graticcio ligneo senza connessioni metalliche ma con connessioni ad incastro tra gli elementi, e un sistema di tamponamento con mattoni od altri materiali tradizionali, che consente di realizzare edifici con più piani fuori terra, mediante una costruzione costante piano per piano con tempistiche relativamente brevi e con facilità di elevazione.

La struttura portante, in legno ovviamente, è composta da elementi verticali squadrati o a sezione rettangolare che venivano fissati direttamente nel terreno, mentre tramite un'incannicciatura di vimini si tamponano i vuoti creati tra gli elementi della struttura. Su questi involucro poteva essere esteso uno strato di finitura in argilla e paglia o di malta di calce.

Un'altra tecnica costruttiva reversibile che utilizzava il legno, sempre per quanto riguarda gli scenari europei, è lo *Stav* norvegese, diffuso in Europa occidentale fino al XVI secolo, che utilizzava una struttura intelaiata a montanti continui.

Le chiusure verticali esterne erano costituiti da elementi verticali, alti anche più di un piano fuori terra, che venivano collocati su uno zoccolo in pietra sostenuto da una muratura o su di un corrente orizzontale di fondazione. Questa tecnica, totalmente abbandonata già nel XV secolo e sostituita dalla struttura intelaiata a piani, definita tecnica dello *Stockwerbau*, che utilizzava pareti perimetrali erette a partire da pilastri e compresi tra il corrente inferiore e il corrente superiore. Con un metodo che verrà riutilizzato anche nei secoli successivi, si poteva utilizzare il piano appena costruito come piattaforma



per la posa del livello successivo, e nello stesso tempo, le pareti verticali che erano irrigidite da elementi diagonali, andavano a formare una gabbia solidale che portava l'edificio. Accennando ad una antica prefabbricazione, questa tecnica prevedeva che, una volta costruiti, gli elementi edilizi venivano montati a terra e successivamente posti in opera. Queste cellule ormai assemblate a piè d'opera venivano quindi sollevate, posti uno affianco all'altra, e connessi tra loro con giunti meccanici. Gli esempi ancora esistenti di queste tecniche sono riscontrabili nelle cosiddette *Starvkirke* (Cattedrali) norvegesi.

1.3.2. Le tecnologie del legno: lo scenario nord americano

L'impiego delle tecnologie a graticcio fu sempre più desueto a partire dalla metà del XVII secolo, contrastato da problematiche di origine economica e sociale. La necessità di maestranza esperta per la realizzazione di questi edifici che necessitavano di connessioni tra le componenti che avvenivano per mezzo di incastri a tutto legno alimentavano le problematiche economiche legate al costo della mano d'opera ; inoltre questa tipologia di incastro riduceva la sezione resistente dell'elemento, rendendo obbligatoria una compensazione in termini di sovradimensionamento dell'elemento stesso con grande spreco di materiale e con conseguente dispendio economico.

Conseguente a questa situazione, iniziarono a diffondersi delle tecniche costruttive alternative a quella graticcio: le costruzioni intelaiate.

Le principali differenze tra le due tecniche stavano nella diversità degli elementi di base che, mentre nelle costruzioni graticcio vedevano i carichi assorbiti da elementi di tipo lineari, nella costruzione intelaiata il sistema costruttivo era costituito da aste, in cui gli elementi portanti non erano separati da quelli di irrigidimento e tamponamento. Un primo esempio di questa tecnologia costruttiva intelaiata è riconducibile alla tecnica del *Timber frame* inglese, nella quale l'ossatura portante composta da montanti disposti a distanza piuttosto ravvicinata, veniva rivestita con pannelli con connessioni mediante utilizzo di chiodi e bulloni. Per facilitare la messa in opera, il reticolo e la disposizione dei pilastri era determinato dalla dimensione dei pannelli di rivestimento, consentendo così la messa in opera in cantiere di elementi già assemblati in fase di produzione, e inoltre questo sistema permetteva alle pareti di svolgere anche la funzione di irrigidimento per l'intero organismo edilizio. L'ascesa delle tecniche costruttive che utilizzava le connessioni chiodate, ad esempio il *Balloon Frame* e *Platform frame*, fu anche favorita dal contemporaneo sviluppo dell'industria siderurgica, che garantì una produzione in serie e a basso costo di questi elementi metallici.

Una svolta decisiva per la diffusione di queste tecnologie, fu lo sviluppo di una nuova tecnica industriale per la realizzazione dei chiodi, che ne ridusse notevolmente il prezzo, grazie anche all'introduzione di macchinari più efficienti, e divennero materiali di largo consumo modificando al contempo la pratica costruttiva delle case in legno. Anche le segherie, per far fronte all'esponentiale richiesta di materiale da tutto il Nord-Ovest del paese, migliorarono i loro sistemi di produzione, conoscendo grande

repentino sviluppo sul piano tecnologico tanto da avviarsi verso il processo di standardizzazione.

È evidente come il sistema costruttivo del *Balloon frame* fosse strettamente connesso alla disponibilità di materiale in loco e alla disponibilità di manodopera; efficienza, basso costo, adattabilità e flessibilità, così come standardizzazione degli elementi e dei sistemi di giunzione erano qualità fondamentali alla base del processo di rivoluzione industriale che investì gli Stati Uniti.

Gli edifici con una struttura intelaiata venivano realizzati con elementi montanti alti un piano così da poter elevare l'edificio per piani costantemente; le chiusure esterne erano realizzate da pannelli che collegavano l'ossatura portata articolata in montanti e traversi. Gli elementi verticali interni assorbivano le funzioni statiche portando solai e copertura, mentre traversi disposti all'interno dell'involucro, assorbivano i carichi orizzontali dovuti all'azione del vento.



Figura 10-11: Esempi di abitazioni realizzate con sistema *Balloon frame*

Fu dunque il *Balloon Frame* il primo sistema costruttivo industrializzato a entrare a far parte del panorama edilizio americano.

In concomitanza alla grande ondata migratoria verso i terreni agricoli dell'ovest, aumentò la popolarità di questa tecnica costruttiva che si pensa fosse stata inventata a Chicago nei primi anni del 1830, e che ebbe grande diffusione grazie ai notevoli vantaggi che questa tecnica comportava, convincendo gli utenti e gli operatori del settore della validità di questo sistema. Si stima che all'inizio del secolo scorso nei territori agricoli del Nord-Ovest americano, fino al 90% delle case rurali fosse stato realizzato mediante la tecnica del *Balloon Frame*.

Questa tecnica costruttiva in grande sviluppo, diventò parte integrante della storia americana, e andò di pari passo con il graduale sviluppo economico e con la meccanizzazione dell'agricoltura.

I vantaggi reali che questa tecnica apportava erano molteplici e innovativi per quell'epoca; l'economicità della fase in opera e della fase di manutenzione, nella quale si potevano sostituire i singoli elementi danneggiati, e un risparmio dei costi di costruzione pari al 40% rispetto a qualsiasi tipo di telaio utilizzato fino a quel momento rendevano il *Balloon Frame* una tecnica molto in voga in quegli anni, sebbene furono sollevate le prime perplessità riguardanti la tenuta all'acqua di questi involucri. Per questo attorno al 1880 ci fu una prima diffusione dei teli isolanti impermeabili con i quali poter rivestire tutto l'edificio. Sempre in quegli anni, questa tecnica costruttiva raggiunse un ulteriore livello di standardizzazione, in tutte le sue fasi di costruzione e di assemblaggio, avvicinandosi sempre più a un vero e proprio sistema versatile in pronta consegna, personalizzabile secondo i gusti dei futuri utenti. Fu così che il *Balloon Frame* divenne un vero e proprio genere di consumo su larga scala con un mercato al ribasso accessibile a chiunque.

1.4. L'ACCIAIO E IL CURTAINWALL

L'avvento dell'acciaio nel mondo dell'edilizia ha apportato nuove soluzioni e nuove prospettive, in particolar modo per quello che riguarda le tecnologie costruttive reversibili; le caratteristiche del materiale consentono la prefabbricazione e l'assemblaggio meccanico delle componenti edilizie, favorendo quindi la reversibilità, e al contempo conferiscono alla struttura stabilità e leggerezza.

L'evoluzione delle tecnologie costruttive che impiegano l'acciaio è relativamente recente se paragonata a quella del legno, ma ha radicalmente mutato la concezione dell'involucro e della struttura portante in rapporto all'intero organismo edilizio.

Verso la metà del XIX secolo, l'architetto tedesco Gottfried Semper, attraverso la sua opera "*Der Stil*", esplicita le comuni origini del rivestimento edilizio e dell'architettura degli ambienti interni, scomponendo l'architettura in struttura e abito; ancora oggi questa teoria suscita un influsso sul movimento architettonico, così come condizionò gli sviluppi tecnici e teorici del Movimento Moderno.

Se ripensiamo alle tende dei popoli nomadi che da secoli sopravvivono nelle grandi pianure del Caucaso, nelle quali è evidente la distinzione tra la struttura portante, ovvero un reticolato di legno ripiegabile, e tra il rivestimento esterno reversibile, capiamo come questa separazione è insita da tempo nella cultura architettonica mondiale. L'involucro esterno, che caratterizza la facciata, viene declinato fin dall'antichità come fronte utile per soddisfare la funzione rappresentativa dell'edificio nello spazio urbano. La finalità ultima è quella di creare un involucro funzionale ed esteticamente gradevole.

Quando la rivoluzione industriale cambiò il mondo dell'architettura, comparvero sul mercato edilizio nuovi materiali, quali ferro e vetro, che

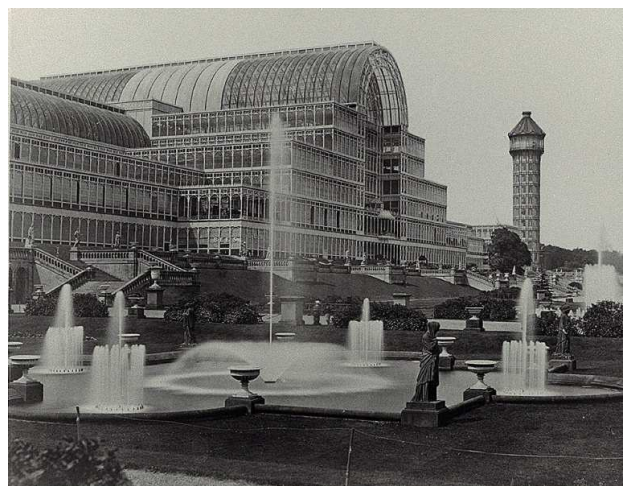


Figura 12: Immagine del Crystal Palace di Joseph Paxton, 1851

generarono variabili compositive nuove e stimolanti. Nel grande sviluppo dell'impiego dell'acciaio e del vetro, trova un ruolo fondamentale l'architettura rivolta alla costruzione delle grandi serre europee, nelle quali la necessità di captazione solare favoriva l'impiego di strutture solide ringhiere in ferro connessi ad un sistema di involucro trasparente.

Un edificio esemplare costruito utilizzando queste innovazioni, fu il Crystal Palace di Joseph Paxton, nel quale è esplicitata la struttura leggera metallica contrapposta all'involucro trasparente in vetro. Questo palazzo di cristallo presentato all'esposizione mondiale del 1851 a Londra, rappresentava il massimo esempio di architettura reversibile del XIX secolo, e affascinò tutta l'Europa esportando in altre città il suo modello per la costruzione di altri edifici espositivi in vetro. L'evoluzione dell'industria siderurgica e la rivoluzione portata da questo edificio comportò lo sviluppo e l'impiego di tecnologie in ferro per altre tipologie costruttive come ad esempio la copertura di stazioni o di grandi gallerie pedonali, frutto dei più visionari progetti architettonici ed ingegneristici.

1.4.2. L'ascesa del curtainwall

Con la progressiva diffusione e con il progressivo sviluppo del settore terziario, che avrebbe cambiato le esigenze funzionali relative alla luminosità e alla bellezza degli edifici, la facciata dell'edificio iniziò a essere sempre più trasparente ed aperta. In America, già verso la metà del 1800, vennero sviluppate le prime strutture portanti in ferro abbinate alla realizzazione di ampie superfici vetrate, consentendo di soddisfare la richiesta di spazi interni aperti e dinamici.



Gli incendi che devastarono Chicago nei primi anni del 1870, diedero il via a un vero e proprio boom edilizio sostenuto da un'eccezionale crescita economica, che portò alla costruzione dei primi grattacieli. Le tecniche tradizionali per la costruzione dei tamponamenti esterni risultavano antieconomiche e impedivano la massimizzazione degli apporti solari; fu ovvio dunque rivolgersi alle tecniche costruttive che impiegavano sostegni in ferro per rivestimenti trasparenti in vetro. Dalla prima metà del 1900, iniziò la grande diffusione dei sistemi impiantistici negli edifici conseguenza dell'avvento e della diffusione dell'energia elettrica in tutti i territori nazionali, sebbene l'integrazione tra il sistema edilizio e il sistema impiantistico non era ancora di alta qualità.

Il progressivo svincolarsi dell'involucro esterno dalle funzioni strutturali lasciate ormai esclusivamente allo scheletro portante, portò alla conseguente scissione tra involucro e struttura, trovando le prime applicazioni negli edifici industriali, privi però di qualità estetiche e formali.

Come già accennato il primo esempio di curtainwall fu proposto da Walter Gropius nelle officine Fagus, descritte in precedenza.

In realtà, il più antico esempio di curtainwall è riscontrabile nella facciata orientale della fabbrica Margarete Steiff GMBH a Gingen nel sud della Germania realizzata circa intorno al 1903. In questo edificio lo strato più esterno della facciata, composta da due gusci di pannelli in vetro traslucido, era appeso senza soluzione di continuità su tutta la struttura portante, racchiudendo anche gli angoli e conferendo un'immagine omogenea al volume della fabbrica. Il guscio interno invece era situato fra i pilastri.

Figura 13: Fabbrica Margarete Steiff GMBH a Gingen, vista della facciata orientale

Per aumentare il comfort interno e, contemporaneamente, per diminuire i costi di gestione, dalla metà degli anni '40, ci si affacciò verso l'impiego di impianti di climatizzazione e di illuminazione, che facessero fronte alle nuove esigenze. Le nuove tecniche costruttive e i nuovi dettami progettuali dovevano far fronte all'esposizione e al ridimensionamento di locali urbani predisposti alla collocazione degli impianti, garantendo flessibilità e sicurezza in tutto l'edificio.

Nel 1951, venne realizzata la prima torre residenziale dell'architetto tedesco Mies van der Rohe, nella Lake Shore Drive a Chicago, nella quale l'involucro fu interpretato in maniera completamente nuova, inserendo profili costruttivi senza funzione strutturale, per riportare ai canoni estetici la facciata dell'edificio che, a causa dei trattamenti alle strutture portanti in acciaio, li aveva visti dissolvere.

Con la diffusione dell'industria e con lo sviluppo dell'ossessione per le tecnologie meccaniche, *la macchina* assunse un ruolo importante sia nel contesto sociale che in quello individuale.

Comparvero quindi i primi sistemi di automazione, i primi centralini con programmazione a comando a distanza e il monitoraggio separato di ciascun apparecchio.

Più tardi, negli anni 70, con lo sviluppo delle tecnologie elettroniche ed informatiche, si arrivò a concepire processi automatizzati sempre più complessi e al collegamento in rete dei diversi sistemi. Il sistema degli involucri completamente vetrati e trasparenti venne però messo in crisi dalle perplessità sollevata dalla crisi petrolifera e dalla progressiva coscienza e consapevolezza energetica in diffusione tra la popolazione.

Dagli anni 90 ad oggi la progressiva innovazione tecnologica apporta modifiche e miglioramenti alla pelle dell'edificio, consentendone la regolazione e il monitoraggio costante nel tempo, permettendo dunque la realizzazione di involucri sempre più efficienti e sostenibili.

La garanzia di precisione ed efficienza e la velocità produttiva ed esecutiva, avvicina i progettisti a queste soluzioni tecnologiche, incrementando gli interessi e le ricerche, sviluppando soluzioni sempre più adeguate.

La ricerca nei materiali e nelle tecniche costruttive, finalizzate alla massimizzazione prestazionale e alla sostenibilità ambientale ed economica, ha finalmente favorito l'ascesa delle tecnologie costruttive reversibili supportate dallo sviluppo industriale e dalla prefabbricazione e ha riaperto la strada all'acciaio come materiale da costruzione con diversi impieghi possibili.

L'uso di elementi in acciaio, infatti, non riguarda solo le strutture portanti degli edifici, ma anche gli elementi che costituiscono l'involucro esterno ed interno: strutture di supporto ai tamponamenti, rivestimenti e fissaggi sono alcune delle applicazioni dell'acciaio nell'edilizia. Inoltre la possibilità di prefabbricare gli elementi e di elaborare soluzioni di fissaggio meccanico permettono un facile assemblaggio ed un facile smontaggio delle componenti.



1.5. LA PREFABBRICAZIONE DEL CEMENTO ARMATO

Continuando la descrizione dei processi storici dei materiali legati alle tecnologie costruttive reversibili, giungiamo al calcestruzzo armato; protagonista indiscusso del secolo scorso, questo materiale consente di elevare strutture solide e durature, realizzate in opera direttamente in cantiere, oppure, mediante tecniche di prefabbricazione industriale, implementando così la varietà tecnologica in edilizia anche per quanto riguarda le soluzioni tecniche reversibili.

Il calcestruzzo è un materiale da costruzione capace di rispondere alle molteplici esigenze della progettazione architettonica e ingegneristica: estrema versatilità formale, stabilità meccanica, tenuta al fuoco, inerzia termica, isolamento acustico e durabilità, sono alcune delle prestazioni che questo materiale offre alla soluzione dei problemi costruttivi. La possibilità di creare elementi in calcestruzzo prefabbricato rende questo materiale molto interessante nell'ambito della progettazione mediante tecnologie costruttive reversibili.

1.5.1. Il Calcestruzzo armato

Brevettando il suo "cemento armato", nel 1892, il belga Hennebeique avvia la stagione della struttura in conglomerato armato che Morsh, a cavallo del secolo, definirà come *materiali in cui ai due componenti(il calcestruzzo e l'acciaio) vengono affidate solidalmente le funzioni meccaniche più appropriate alla loro natura in calcestruzzo assorbe essenzialmente gli sforzi di compressione, l'acciaio quelli di trazione e taglio, secondo concezioni tecnologiche e schemi per la posizione delle barre longitudinali e delle staffe nel calcestruzzo, differenti nei diversi brevetti.*

L'architettura moderna ha offerto al calcestruzzo armato molteplici occasioni per presentarsi in forma d'arte. Gli esempi sono innumerevoli e, nel tempo, la forza espressiva di questo materiale composito ha concorso significativamente a costruire quell'affascinante percorso dell'architettura che della pietra, del mattone, dell'acciaio e del calcestruzzo armato, appunto, ha fatto le sue pietre miliari.

È indiscutibile che il calcestruzzo abbia avuto un ruolo centrale nella definizione dell'eternità architettonica a partire da August Perret che nel 1903, in un edificio residenziale, sfruttò per primo i vantaggi funzionali ed estetici della struttura a scheletro in calcestruzzo armato.

Con il calcestruzzo, soprattutto nella Francia degli anni '20, emerge un vero e proprio dibattito sul materiale, riguardante la nudità e la plasmabilità. La prima, agli esordi, è affermazione di modernismo e razionalismo, la seconda, appena più avanti, è superamento della prigione cubica verso una libertà compositiva e formale totale.

L'espressione estetica del calcestruzzo, dunque, è contenuta nelle sue potenzialità materiche che si esprimono attraverso la forma, i rilievi, i colori, le caratteristiche della finitura e della tessitura delle superfici.

Com'è noto, la consistenza fluida del calcestruzzo fresco rimanda la concretizzazione nella forma finale del singolo elemento costruttivo alle sagome degli apparati provvisori, le cassetture, le quali, in relazione al numero dei pezzi da realizzare e dalle caratteristiche di complessità e finezza delle superfici contro cassero, possono essere costruite con i materiali più diversi: acciaio, legno, materie plastiche, polistirene espanso, caucciù.

La possibilità di concepire e realizzare qualsiasi forma, dimensione o dettaglio costruttivo nonché la disponibilità di una gamma praticamente illimitata di finiture superficiali, sono le valenze specifiche che, nel momento in cui un'opera architettonica viene formalmente concepita, premiano la scelta di questo materiale.

Stabilità meccanica, resistenza al fuoco e durabilità sono invece le caratteristiche tecnologiche che rendono il calcestruzzo armato un materiale strutturale capace di rispondere compiutamente alle numerose esigenze tecniche della costruzione civile.

1.5.2. La prefabbricazione del calcestruzzo

La prefabbricazione, nel ricercare per i suoi manufatti sempre più elevate prestazioni statiche, tecnologiche e di durabilità, promuove da sempre la ricerca nel campo dei conglomerati.

Lo sviluppo nelle tecniche di design, l'uso di additivi super fluidificanti tradizionali e acrilici, l'avvento del fumo di silice e delle fibre aramidiche o minerali e, più in generale, l'ambito dei calcestruzzi ad alte prestazioni sono capitoli di un processo tecnologico e produttivo in continuo sviluppo.

La qualità di un prodotto misura la sua capacità a soddisfare le esigenze che stanno alla base del suo utilizzo. Nel caso del calcestruzzo le molteplici esigenze possono essere riassunte nelle espressioni di resistenza caratteristica, di lavorabilità, di durabilità e di qualità estetica.

Il raggiungimento di alti livelli qualitativi nella produzione del conglomerato è direttamente proporzionale alle capacità tecnologiche della produzione.

L'organizzazione industriale della produzione di manufatti in calcestruzzo armato, in una parola la prefabbricazione, nasce con la tecnologia del conglomerato armato in risposta a un'antica e connaturata propensione dell'uomo costruttore alla ottimizzazione del processo costruttivo.

La prefabbricazione in calcestruzzo armato, è giunta a noi attraverso un percorso secolare ricco di vicissitudini e di innovazioni tecniche, e ha fatto suo questo bisogno attribuendo proprio al continuo miglioramento produttivo la capacità di esaltare le valenze formali e strutturali dell'architettura così come concepite di volta in volta dal suo principale informatore: il progetto.

Se nel 1892 Hennembique brevettò una tecnica per la realizzazione di strutture puntiformi in calcestruzzo armato è nel 1903 che August Perret costruisce, con lo stesso materiale, la residenza al 25 di Rue Franklin importante esempio di edificio residenziale di qualità architettonica prefabbricato in cemento armato.

Ad oltre un secolo dalle prime applicazioni, il miglioramento continuo del settore industriale connesso

alla prefabbricazione del calcestruzzo determina oggi una vastissima e variegata disponibilità di soluzioni e di componenti di base con la possibilità di personalizzazione della produzione rispondendo alle esigenze e alle specifiche istanze di progetto.

Scegliere la prefabbricazione come tecnologia esecutiva di una qualsivoglia idea progettuale di partenza rappresenta oggi un atto del tutto consapevole il cui fine ultimo, per committenti e progettisti, è la perfetta coincidenza del risultato con le prestazioni attese. La prefabbricazione ha dinamicamente superato i primitivi principi basati sulla produzione in grande serie di manufatti per orientare le sue attuali strategie verso lo sviluppo di sistemi costruttivi a forte specializzazione tecnologica ed elevata qualità architettonica.

Questo orientamento ha contribuito decisamente alla diffusione della prefabbricazione sul mercato delle tecnologie costruttive reversibili; essa è ormai diventata una realtà di riferimento cui i progettisti guardano con sempre crescente interesse e fiducia.

Uno degli effetti più significativi delle recenti politiche industriali è, come già accennato, la possibilità per il progettista di pensare in termini di prefabbricazione senza essere necessariamente vincolato ai criteri limitativi di ripetitività o, quanto meno, di grande serie imposti nel passato.

Pur essendo evidente che la fabbricazione ripetitiva dei pezzi abbatta il loro costo unitario, la flessibilità dei processi produttivi, soprattutto per alcuni elementi costruttivi, rende oggi possibile

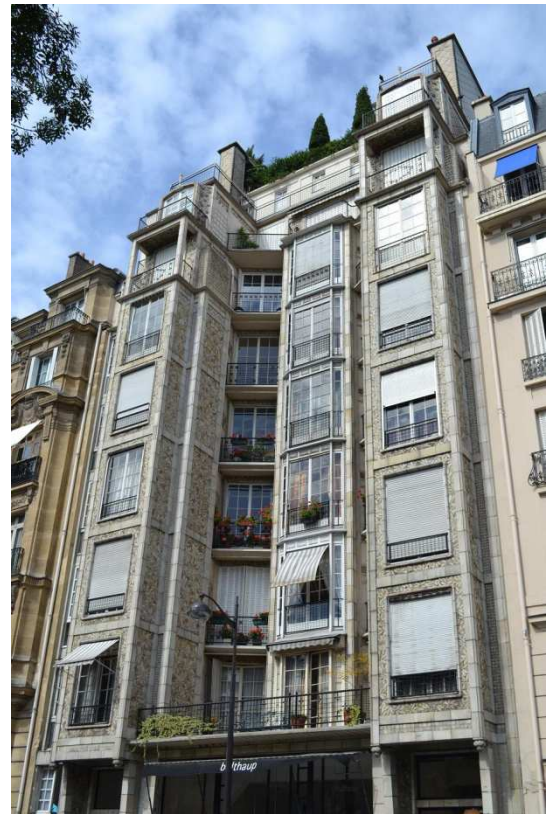


Figura 15: Abitazioni al 25 di Rue Franklin, Auguste Perret, 1903

notevoli adattamenti alle crescenti esigenze di personalizzazione espresse dalla progettazione consentendo, nella cornice di puntuali analisi economiche preventive sviluppate fra le parti interessate, anche la produzione di quantità certamente non industriali.

La prefabbricazione in calcestruzzo ammette un utilizzo combinato con sistemi e tecnologie costruttive di altra provenienza quali legno lamellare, in forma di travi, archi e portali, capriate e strutture metalliche reticolari bi e tridimensionali, pannelli in lamiera, curtainwalls, lastre sottili per facciate ventilate; una corretta progettazione degli elementi prefabbricati in calcestruzzo garantisce la facilità e la velocità di assemblaggio e favorisce lo smontaggio delle componenti e la separazione dei materiali quando l'edificio viene demolito.

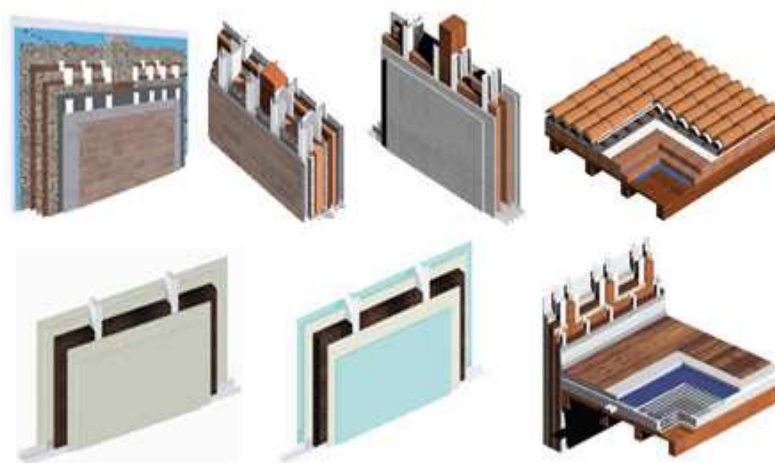
Nei capitoli successivi si analizzeranno più da vicino e le diverse tecniche costruttive reversibili riguardanti l'involucro dell'edificio, in particolar modo i sistemi maggiormente diffusi per la composizione delle chiusure verticali opache.

1.6. LE TECNOLOGIE STRATIFICATE A SECCO

Dalle evoluzioni delle tecniche di prefabbricazione e dalle continue ricerche tecnologiche relative a sistemi costruttivi reversibili, si sono sviluppate, negli ultimi decenni, varie sperimentazioni per la messa a punto di soluzioni costruttive rivolte alla stratificazione a secco degli involucri, ovvero, tecniche che utilizzano elementi prefabbricati assemblati tra loro, strato per strato, a formare un pacchetto di involucro completo che soddisfi le esigenze prestazionali e che favoriscano, in tutte le sue parti, il processo costruttivo di un edificio, grazie ai vantaggi derivanti dalle tecnologie reversibili prefabbricate.

Le tecnologie stratificate a secco, come visto in precedenza nelle analisi storiche, rappresenta un importante aspetto del costruire tradizionale che però sono andati via via scomparendo nell'arco dei secoli, soprattutto dopo l'avvento delle tecnologie dette "a umido", le quali impiegano il cemento armato gettato in opera o i sistemi da muratura portante, ormai entrati a far parte della tradizione costruttiva edilizia di molti paesi.

Generalmente, parlando di tecnologie stratificate a secco, ci si riferisce a soluzioni di tipo leggero che impiegano strati di materiali isolanti alternati a strati resistenti di modesto spessore, per lo più pannelli di legno o di gesso rivestito, componendo così un pacchetto di involucro leggero ma performante; se però allarghiamo il campo a tutte le tecnologie reversibili utilizzabili per la realizzazione di un involucro verticale, è necessario affrontare



anche il tema delle tecnologie reversibili che impiegano soluzioni massive, che però tratteremo nei capitoli successivi. In questo capitolo invece analizzeremo più da vicino la storia delle tecnologie stratificate a secco leggere, ovvero quelle che hanno introdotto concretamente il tema della reversibilità edilizia nel mondo dell'architettura.

La storia di questa tecnologia, similmente a quella dell'architettura in generale, come visto in precedenza, è fortemente correlata all'evoluzione delle tecniche produttive industriali e al loro sviluppo.

La costruzione stratificate a secco richiede infatti prodotti componenti ad hoc, che rispondano a uno o più requisiti richiesti per ogni determinato tipo di soluzione.

Questo comporta la necessità di un'attenzione particolare alla fase di progettazione, nella quale si può modulare e comporre l'involucro sulla base del modello prestazionali che si deve soddisfare. Costruire a secco, dunque reversibile, significa anche identificare il cantiere come luogo per l'assemblaggio e per la posa in opera definitiva dei prodotti e dei componenti prefabbricati, con specifiche caratteristiche già garantite dal processo di produzione in stabilimenti specializzati, riducendo i rifiuti da cantiere e favorendo lo sviluppo di manodopera specializzata e di alta qualità. Il ruolo del progettista diventa quindi sempre più determinante, poiché, tramite le sue conoscenze tecnico-scientifiche, sociali ed architettoniche, è chiamato ad elaborare una soluzione personalizzata e elaborata su misura per l'edificio in progetto.

1.6.1. Sperimentazioni reversibili

Come enunciato nei capitoli precedenti, nonostante le sperimentazioni di prefabbricazione relative alle soluzioni in cemento o alle tecniche in legno o acciaio, la prefabbricazione industriale di componenti edilizi è stata molto spesso emarginata dal mondo dell'architettura e dell'edilizia del secolo scorso.

Al contrario, oggi, grazie ai nuovi procedimenti costruttivi affermatasi nel settore industriale, dove il risparmio economico e la rapidità di esecuzione sono principi fondamentali, le tecnologie reversibili che impiegano componenti prefabbricati stanno vivendo una rapida diffusione, a partire dall'edilizia industriale per arrivare fino a quella residenziale. Superati i dogmi e i preconcetti relativi alla prefabbricazione dei componenti edilizi dei decenni precedenti, lo sviluppo del settore edilizio trova nuova linfa nella ricerca della qualità e della compatibilità ambientale dei prodotti e dei manufatti. Attualmente sul mercato sono disponibili grandi varietà di prodotti industriali, di qualità e di complessità avanzate, tra cui il progettista può scegliere le componenti più adatte ai suoi scopi.

I prodotti industriali odierni sono caratterizzati da un'intrinseca flessibilità d'uso, essendo progettati per essere adattabili alle più diverse soluzioni tecniche grazie alla facilità di modifica delle componenti in cantiere tramite il taglio o la piegatura dettata dalle moderne tecniche e dei moderni utensili di produzione. Con la separazione dell'involucro dalla struttura, la composizione di questo diviene di estrema importanza, ma deve essere pensato e progettato con attenzione elaborando soluzioni adeguate all'esigenze. Ogni elemento della stratificazione, di provenienza industriale, assolve quindi ad un ruolo specifico e viene affiancato ad altri strati, nel rispetto delle problematiche di compatibilità fisico-chimico. Il ruolo del progettista è fondamentale nella realizzazione di queste soluzioni; per questo è utile citare, anche se brevemente, alcuni pionieri di queste tecnologie reversibili.

La ricerca di Jean Prouvé (1901-1984), architetto e operaio metallurgico francese, nel campo dell'abitazione dimostrò una continua attenzione rivolta all'industrializzazione dell'edilizia residenziale, con lo scopo di garantire una casa sfruttando le possibilità produttive offerte dalle tecnologie del tempo.

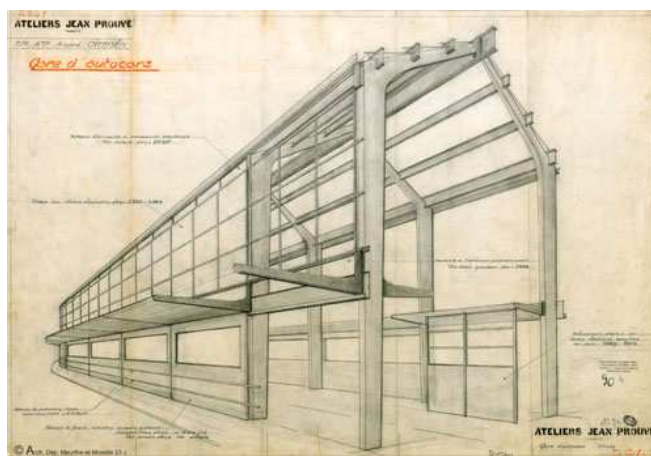
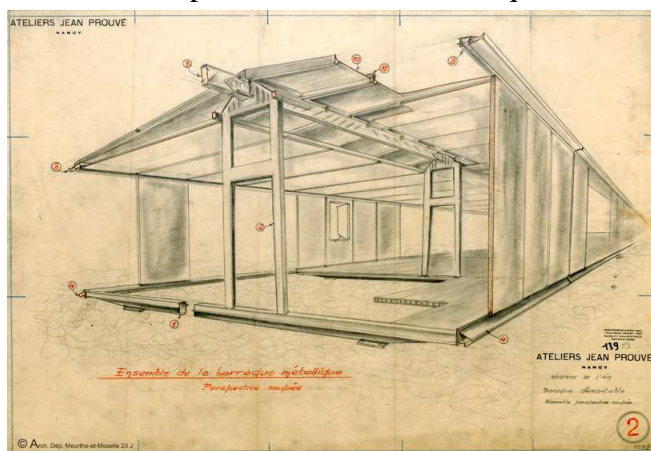


Figura 17-18: Disegni progettuali di Jean Prouvé, sul tema della residenza.

I suoi progetti sono permeati dal principio di fondo della leggerezza, indispensabile non solo per l'economia dei materiali e per facilitare il trasporto e il montaggio degli edifici, ma anche per garantire le qualità di flessibilità e di trasformabilità.

Lo scatto innovativo, rispetto alla tradizione, era tale da mettere in dubbio la tradizionale stabilità, sia formale che distributiva, della residenza, fino alla progettazione della decostruzione degli edifici.

La casa individuale doveva essere leggera e dinamica, cioè espressione della grande serie e quindi caratteristica dell'industria.

La teoria di Prouvé sulla residenza toccava punti come la standardizzazione degli elementi in relazione alla riduzione del numero dei componenti grazie alla moltiplicazione delle loro funzioni, la semplificazione della messa in opera dei componenti prefabbricati tramite imbullonatura e la reversibilità del procedimento costruttivo, ovvero la possibilità di montare e smontare le unità abitative.

Quando nell'immediato dopoguerra, il governo francese stimò che il fabbisogno della Francia si aggirasse attorno ai 240.000 alloggi all'anno, si pensò che tale enorme domanda, evidentemente, poteva essere soddisfatta solo con il ricorso a tecniche di produzione industriale.

In quegli anni, lo Stato francese esplorò diverse tecnologie costruttive, promuovendo anche concorsi per la realizzazione di procedimenti specificatamente mirati al settore residenziale.

Uno dei primi contributi di Jean Prouvé in tal senso furono le abitazioni di emergenza per gli sfollati delle regioni della Lorena e dei Vogsi, che nel 1945 il ministero ordinò, dovevano essere confortevoli, evitando, però, che gli abitanti le considerassero definitive. La proposta si basava su un portico in lamiera presso piegata, irrigidito dagli stessi pannelli di chiusura, prefabbricati e realizzati in metallo e legno. Tutti gli elementi erano leggeri, impiegabili e assimilabili nel sito per semplice imbullonatura: il montaggio era seguito da tre o quattro operai in un solo giorno.

I prototipi del dopoguerra di Prouvé non raggiunsero mai la fase di produzione in serie perché, come osservato in precedenza, di fronte alla scelta fra una prefabbricazione leggera di elementi da assemblare in sito e la meccanizzazione di un cantiere tradizionale, i governi europei optarono unanimemente per il secondo modello.

L'industrializzazione proposta e praticata da Prouvé era però ben diversa da quella pesante, diffusa in Europa fino agli anni '70.

Le macchine per il taglio e la piegatura della lamiera d'acciaio permettevano la variazione e l'adattamento degli elementi sulla base delle esigenze specifiche di ogni progetto: nelle sue realizzazioni residenziali si trova, ad esempio, il filo conduttore del sistema strutturale, declinato in una varietà di forme di elementi complementari.

Il modello di industrializzazione previsto da Prouvé procedeva per oggetti concreti, legato alle possibilità produttive dell'epoca; tuttavia, l'idea costruttiva di fondo mantiene la sua validità ancora oggi.

Un altro importante luminaire delle tecnologie reversibili e della prefabbricazione in edilizia, fu l'architetto inventore e filosofo americano Richard Buckminster Fuller (1895-1983), la cui ricerca si basò su di un atteggiamento teso al miglioramento delle condizioni di vita dell'umanità attraverso una equa distribuzione delle risorse.

Fuller credeva profondamente nella possibilità, offerta dalla tecnica, di pervenire ad una situazione in cui le risorse fossero finalmente a disposizione di tutti gli abitanti del pianeta. Per gran parte della sua vita, si dedicò al miglioramento delle condizioni abitative dell'uomo, ricercando e studiando a fondo la residenza e gli ambiti ad essa connessi.

Per ottenere questo miglioramento, la strategia indicata era, inevitabilmente, quella dell'industrializzazione edilizia, o meglio, la considerazione dell'abitazione alla stregua di un qualsiasi altro prodotto industriale, soggetto alle leggi dell'efficienza produttiva e del massimo sfruttamento dei materiali. La produzione di massa, condizione necessaria alla sopravvivenza di un'organizzazione di tipo industriale, avrebbe portato con sé anche una riduzione sensibile dei costi e garantito l'accesso ad un alloggio anche alle classi meno abbienti.

Inoltre Fuller introdusse il tema del tempo in architettura, prevedendo, per i suoi edifici residenziali, strategie di completa reversibilità, nell'ottica di un loro riutilizzo in luoghi differenti e di



modificazione nel tempo a seconda delle necessità degli abitanti. L'edilizia sarebbe diventata, nella sua visione, un evento dinamico, scatenando una rivoluzione dal punto di vista della proprietà terriera: questa sarebbe diventata superflua, e obsoleta.

Tuttavia, poche delle proposte di Fuller trovarono applicazione pratica: allo sfavorevole del clima culturale del tempo, la sua opera, infatti, viene riscoperta proprio in questi anni, in cui la necessità di trovare modelli sviluppo sostenibile si impone come fondamentale per la sopravvivenza del pianeta e dell'edilizia.

Gli ultimi due pionieri che si vogliono citare, sono gli architetti francesi Eric Dubosc (1943) e Marc Landowski (1944) il cui lavoro atto allo sviluppo di un'architettura reversibile e a basso costo ha incrementato considerevolmente il repertorio tecnico delle tecnologie reversibili per l'edilizia contemporanea. Le tecnologie di assemblaggio a secco sviluppate dai due architetti francesi, sono basate sulla cooperazione tra i diversi attori del processo edilizio e sulla verifica dei componenti e dei materiali utilizzati per la messa in opera, senza sacrificare la possibilità di personalizzare dal punto di vista formale ed estetico il manufatto edilizio.

Attivando una collaborazione con altri architetti e con i produttori del settore, Dubosc e Landowski cercarono di rispondere correttamente alle nuove esigenze degli utenti attraverso lo sviluppo dell'idea di un'edilizia collaborante con l'industria e i suoi metodi produttivi, sfruttando la possibilità di assemblare parti prefabbricate su cui vige un controllo della qualità severo mantenendo al contempo la libertà formale e compositiva che l'architettura esige.

La loro volontà è quella di inserire il settore delle costruzioni negli scenari e nei procedimenti industriali, garantendo il risultato di un manufatto di alta qualità e che risponde perfettamente alle esigenze prestazionali richieste dai progettisti e dagli utenti finali. Oltre alla definizione di tecniche e di componenti edilizi per la costituzione di un edificio reversibile e a basso costo, la loro attenzione è stata focalizzata anche agli aspetti legati all'usura e al degrado dei materiali, e quindi alle conseguenti necessità di progettare in maniera corretta anche le fasi relative alla manutenzione nel tempo dei componenti edilizi.

Gli sviluppi tecnologici inseriti nel mondo delle costruzioni da questi due architetti francesi e, i loro dettami teorici che regolano l'attività di progettazione dell'edificio e delle sue componenti, hanno fornito nuovi spunti e nuovo materiale di riflessione per tutti gli architetti che si prefiggono come risultato un edificio sostenibile e reversibile nel tempo.

Il lavoro di innovazione di questi pionieri delle tecnologie reversibili per l'architettura, sono decisive per l'evoluzione dei processi produttivi che coinvolgono la costruzione degli edifici e, cosa

ancora più importante, segnano la strada, per i futuri progettisti, verso un futuro in cui l'architettura e l'industria saranno sempre più sinergici allo scopo di sovvertire gli edifici in macchine per l'abitare che soddisfino tutte le esigenze, prestazionali ed estetiche, necessarie al suo corretto funzionamento.

1.6.2. La diffusione delle tecnologie reversibili

L'evoluzione delle tecniche tradizionali basate sull'uso del legno, come ad esempio il balloon-frame, hanno facilitato la diffusione delle tecnologie costruttive reversibili in quei paesi in cui le tecnologie costruttive erano basate sul legno, anche grazie all'abbondanza di legname presenti sul territorio.

Come è avvenuto negli Stati Uniti, o in altri paesi come in Giappone, le tecniche costruttive in legno tradizionali, hanno permesso la proliferazione dei sistemi tecnologici reversibili di involucro che utilizzano strutture leggere in profili metallici con tamponamenti composti perlopiù da materiali isolanti e da rivestimenti interni ed esterni. In America del Nord, si stima che dal 1992 al 1997 sono state costruite 95.000 edifici, in gran parte residenziali, come tecnologie reversibili di tipo *steel frame*, pari al 15% di tutte le nuove realizzazioni.

Per quanto riguarda il panorama europeo, questi sistemi si sono sviluppati più recentemente e infatti, le percentuali di edifici realizzati con queste tecnologie sono ancora basse, stimate tra il 5% e il 10% di tutti gli edifici realizzati, escludendo però i paesi del Nord Europa come Norvegia e Svezia, dove le percentuali salgono fino al 15%-20%.

È visibile un incremento della diffusione di queste tecniche, sostenute dai loro vantaggi tecnologici, economici e di sostenibilità ambientale, che, oltre ad apportare notevoli evoluzioni e miglioramenti tecnici di queste tecnologie costruttive, potrebbe in futuro favorire la sostituzione delle tecniche tradizionali con queste tecnologie innovative.

Questa progressiva diffusione, sempre più evidente, coinvolge maggiormente le tecnologie costruttive reversibili leggere, cioè quelle che ad una struttura di supporto uniscono una struttura di rivestimento ed involucro composta in gran parte da materiali leggeri ed isolanti.

Forse a causa dei cattivi risultati ottenuti dalla prefabbricazione pesante nella prima metà del secolo scorso, che non permetteva di soddisfare pienamente i requisiti estetici e compositivi, le tecnologie reversibili massive non conoscono lo stesso sviluppo la stessa diffusione delle loro "cugine" leggere. Infatti, se escludiamo alcuni esempi di edilizia industriale o alcuni ancor più rari casi di edilizia residenziale, gli edifici di nuova costruzione realizzati con tecniche costruttive reversibili massive sono ancora pochi e non sono ancora oggetto di studio approfondito come invece avviene per le tecniche costruttive leggere, ormai sdoganati da molti progettisti e da molti produttori.

È ipotizzabile che, con il progressivo miglioramento e con la costante innovazione tecnologica, il mondo della produzione industriale legato all'edilizia, consentirà di avvicinarsi sempre più a queste tecnologie reversibili, sia massive che leggere, omogeneamente in tutto il continente europeo, apportando delle diminuzioni dei costi produzione e di costruzione, che in molte aree dell'Europa è ancora alto per queste tecnologie che richiedono manodopera specializzata e una coscienza più varia rispetto a quella legata alle sole tecniche tradizionali, favorendo così la diffusione e l'impiego di queste soluzioni costruttive.

Costi di produzione, costi di costruzione e manutenzione, formazione di manodopera specializzata, efficienza e sostenibilità ambientale sono i principi che regolano la diffusione di queste tecnologie costruttive reversibili nel panorama edilizio europeo, che, a mio avviso, sostituiranno completamente le tecniche costruttive tradizionali nell'arco di 100 anni, seguendo la scia della società che mira a prodotti sempre più efficienti e sempre più standardizzati.

2. L'INVOLUCRO VERTICALE REVERSIBILE

Dopo aver ripercorso le tappe fondamentali dell'evoluzione storica che ha coinvolto le tecnologie costruttive reversibili rivolte alla composizione dell'involucro edilizio, focalizzandoci ora sul involucro verticale opaco, analizzeremo le tecniche costruttive reversibili maggiormente diffuse nel panorama edilizia europeo.

Con involucro verticale opaco intendiamo tutti quegli elementi che compongono la chiusura perimetrale opaca dell'edificio, compresi sia i rivestimenti esterni di facciata, che il rivestimento interno, e tutte le altre stratificazioni comprese tra queste, fatta eccezione per le strutture portanti dell'edificio.

L'involucro verticale ha grande importanza da un punto di vista della sostenibilità ambientale, non solo poiché media gli scambi termici ed acustici tra gli ambienti esterni e gli ambienti interni, ma anche perché, fatta eccezione per le strutture portanti, che molto spesso rappresentano la categoria che necessita maggiore energia per la produzione e la messa in opera dei materiali che le compongono, l'involucro verticale, racchiudendo tutto l'organismo edilizio, rappresenta una parte consistente del volume di materiali impiegato per la costruzione dell'edificio. Pertanto le scelte progettuali sui materiali e sulle tecnologie da applicare per la messa in opera dell'involucro verticale opaco, devono scaturire prestando particolare attenzione agli aspetti legati alla sostenibilità ambientale dell'edificio, il che si traduce nell'impiego di tecnologie reversibili e di materiali riciclabili, riciclati o parzialmente riutilizzabili.

2.1. INVOLUCRI MASSIVI ED INVOLUCRI LEGGERI

L'involucro reversibile è caratterizzato dalla totale indipendenza dalla struttura portante, ovvero, contrariamente all'edilizia tradizionale che impiegava la muratura per la definizione dell'involucro esterno, i tamponamenti esterni sono sostenuti da strutture di sostegno che permettono scelte compositive e formali molto varie, componendo così una pelle esterna indipendente che rinchiede in sé l'organismo edilizio nella sua interezza, appoggiandosi semplicemente alla struttura portante interna.

Ciò può avvenire con una qualsiasi tipologia di struttura portante moderna, che fa uso quindi di un sistema travi e pilastri e permette una totale libertà della facciata, indipendentemente dal materiale di cui è composta, sia essa di calcestruzzo armato, acciaio o legno.

Generalmente, sia in ambito accademico che in ambito professionale, erroneamente, si tende a identificare le tecnologie di costruzione a secco o reversibili, con involucri di tipo leggero, ovvero composti per lo più da materiale isolante interposto applicato ad una sottostruttura portante.

In realtà, e la storia della prefabbricazione dei componenti edilizi, soprattutto per ciò che riguarda l'edilizia industriale, lo dimostra e lo conferma, le tecnologie costruttive reversibili nascono massive, ovvero costituite da materiali di alte densità come il cemento.

Per questo motivo, nell'ambito dell'involucro verticale reversibile, occorre definire due diverse macro categorie che differiscono tra loro per l'impiego di materiali caratterizzati da densità molto diverse.

Queste due macro categorie identificano quindi due tipologie di involucro e due tecnologie costruttive: tecnologie massive e tecnologie leggere.

Le tecnologie massive, che possono comunque utilizzare tecniche costruttive simili o identiche a quelle utilizzabili per le tecnologie leggere, si caratterizzano per l'utilizzo di materiali pesanti e massicci che possono conferire all'involucro benefici per ciò che concerne l'inerzia termica e l'isolamento acustico degli ambienti interni.

Nell'edilizia più antica, molte abitazioni ed edifici, venivano costruiti posando blocchi lapidei di dimensioni variabili uno sopra l'altro, senza l'impiego di nessun legante, costituendo pareti massicce e, fondamentale, impiegando una tecnologia costruttiva a secco, quindi reversibile. Certamente

questo modo di costruire non garantiva elevate prestazioni dal punto di vista sismico delle strutture, proprio per la labilità dei legami tra i vari elementi che componevano l'involucro che svolgeva anche la funzione di struttura portante.

Successivamente l'impiego di malte e la nascita dei prodotti ceramici e laterizi, hanno trasformato questa tecnologia, in una tecnologia "umida", cioè che impiega leganti idraulici che una volta induriti non permettono la rimozione degli elementi se non che tramite demolizione.

Lo sviluppo industriale ed i legami tra esso e l'architettura/edilizia, hanno permesso di sviluppare tecniche di prefabbricazione di elementi edilizi, principalmente impiegando come materiale il cemento.

Gli elementi prefabbricati in cemento armato, che possono comporre sia le strutture portanti che gli involucri esterni, trovarono larga diffusione nel secondo dopoguerra nell'edilizia industriale e nell'edilizia popolare soprattutto nei paesi dell'est Europa, dove il centralismo statale tendeva a sostenere la standardizzazione e l'industrializzazione, sia nell'edilizia che in altri settori produttivi.

La scarsa attenzione rivolta agli aspetti estetici di queste tecnologie in cemento armato prefabbricato, e le nuove esigenze di isolamento termico, non facilitarono lo sviluppo di queste tecnologie, anzi, molto frequentemente i concetti di standardizzazione e prefabbricazione furono, e sono ancor oggi, associati a modesti risultati estetici, nonché ad una scarsa ricercatezza compositiva e formale.

Attualmente, con il grande sviluppo economico e tecnologico alle spalle, l'industria edilizia, orientata sempre più verso la sostenibilità, prima economica e poi anche ambientale, si sta riaffacciando alle soluzioni prefabbricate, conoscendone ovviamente i vantaggi; sebbene i materiali più pesanti e massicci, come i materiali lapidei e i prodotti cementizi, comportino alcune criticità nelle fasi di posa in opera degli elementi per via dei maggiori pesi in gioco, paragonandoli alle tecnologie leggere, coordinando l'attività del progettista con la produzione industriale, per una corretta prefabbricazione di elementi in cemento armato per la composizione dell'involucro esterno, è possibile ottenere un prodotto complessivo molto elaborato e personalizzato, soddisfacendo così ogni necessità ed ogni canone stilistico.

Nel panorama della produzione di elementi prefabbricati in cemento armato, troviamo varie tipologie di elementi per la composizione dell'involucro verticale esterno; strutture portanti verticali e orizzontali, pareti prefabbricate con o senza isolamento interno, pannelli modulari e lastre di piccoli spessori sono tipologie tutte diverse di elementi utili alla composizione dell'involucro esterno, e ovviamente sono tutti elementi reversibili che non utilizzano tecnologie costruttive a umido per la posa in opera.

Le tecnologie costruttive cosiddette leggere utilizzano anch'esse sottostrutture di vari materiali, che sostengono i tamponamenti opachi composti principalmente da materiali isolanti, a cui internamente ed esternamente, vengono applicate i rivestimenti. La facilità di posa in opera e di trasporto, legati al loro peso esiguo se paragonato alle tecniche costruttive tradizionali o a quelle massive, hanno favorito lo sviluppo di queste tecnologie, soprattutto nei paesi del Nord Europa e negli Stati Uniti. Le strutture che portano queste pareti leggere, possono essere composte da elementi puntiformi in legno o acciaio con sistema montanti/traversi, oppure possono essere direttamente le strutture portanti dell'edificio a sostenere interi moduli prefabbricati di involucro. Queste tecnologie, di cui abbiamo parlato in precedenza e che tratteremo più nello specifico nei prossimi capitoli, sono sempre più diffuse per le loro potenzialità in termini economici e di risparmio di tempo nella costruzione degli edifici; detto ciò, non è difficile capire perché, sebbene non sia fondamentalmente corretto, spesso le tecnologie a secco o reversibili siano associate solamente alle soluzioni costruttive leggere, che sicuramente, per la loro leggerezza, facilitano le operazioni di assemblaggio.

Sia che si tratti di involucri leggeri o di involucri massivi, se progettati per essere reversibili, le tecniche costruttive utilizzabili sono simili e in alcuni casi le medesime; infatti la prefabbricazione, riducendo l'edificio in elementi da assemblare, o da appendere, comporta il collocamento dei vari

elementi di involucro su di una struttura portante, che può essere la stessa che porta l'intero edificio, oppure una struttura apposita che sorregge il solo involucro esterno.

Se consideriamo le tecnologie costruttive che utilizzano moduli prefabbricati di intere porzioni di involucro verticale, siano esse formate da elementi in legno, acciaio o cemento, sarà la struttura portante dell'edificio, a sostenere i carichi dei moduli di involucro nei quali, essendo prefabbricati, sono già comprese le aperture per i serramenti. Questo avviene poiché, avendo a disposizione moduli di involucro delle dimensioni sufficienti per poter seguire l'orditura dei pilastri, gli ancoraggi verranno effettuati direttamente sulle travi o sui pilastri che compongono la struttura portante dell'edificio; non sarà quindi necessario disporre un'ulteriore struttura che sostenga l'involucro perimetrale.

Diversamente, nelle tecnologie costruttive in cui vengono impiegati pannelli modulari di varie dimensioni anch'essi prefabbricati, e indifferentemente dal materiale di cui sono fatti, per poter disporre correttamente questi pannelli, occorre predisporre un sottostruttura a cui ancorare saldamente gli elementi tramite connessioni di tipo meccanico; certamente se si impiegano pannelli prefabbricati in cemento armato, le strutture di supporto dovranno essere adeguate al peso, sicuramente maggiore rispetto a una soluzione che impiega materiali più leggeri.

Nei capitoli successivi vedremo nello specifico queste soluzioni tecnologiche, suddividendole in tre categorie (legno, acciaio, cemento), descrivendone le caratteristiche e le applicazioni che trovano nell'edilizia contemporanea, per poi poter passare alla fase di analisi dei casi studio, dove queste tecnologie vengono applicate per la realizzazione di edifici.

2.2. TECNOLOGIE REVERSIBILI: LE SOTTOSTRUTTURE E I RIVESTIMENTI

Scendendo più nel dettaglio, ora ci occuperemo delle singole tecnologie costruttive reversibili, raggruppate in tre categorie a seconda, o del materiale impiegato per le sottostrutture che compongono l'involucro esterno, nel caso in cui ci si occupi di sistemi che necessitano di una apposita struttura di sostegno per la collocazione degli elementi di tamponamento, o del materiale che costituisce i grandi moduli prefabbricati di involucro esterno che agganciandosi direttamente alla struttura portante dell'edificio non necessitano di nessuna struttura di supporto.

Definiamo quindi queste categorie di tecnologie costruttive reversibili:

- tecnologie in legno;
- tecnologie in acciaio;
- tecnologie in calcestruzzo.

2.2.1. Sottostrutture e rivestimenti in legno

L'utilizzo del legno come materiale da costruzione per le abitazioni, escluse le eccezioni delle culture tradizionali del Nord Europa in cui l'abbondanza di legname ne favorì l'uso, durante il secolo scorso era andato progressivamente svanendo, ma attualmente si sta nuovamente espandendo grazie ad una ritrovata sensibilità ambientale. Infatti, per la realizzazione di edifici più sostenibili, nei paesi del centro Europa, la tecnologia del legno è utilizzata sempre con maggiore frequenza, grazie anche agli sviluppi tecnologici che hanno permesso la risoluzione di alcune criticità legate alla durabilità nel tempo delle proprietà fisiche del materiale. Le tecnologie che impiegano il legno per la realizzazione di edifici residenziali non sono diffuse omogeneamente in tutto il continente europeo, infatti, realtà come quella finlandese in cui un ampio patrimonio boschivo consente l'utilizzo del legno in quasi la totalità delle realizzazioni residenziali, si contrappongono a scenari opposti come quelli dell'area mediterranea in cui il legno ha solo degli impieghi marginali nella costruzione degli edifici per via della maggior diffusione di tecniche costruttive basate sul laterizio.

Tuttavia in altri paesi sono state messe in atto politiche di sviluppo con queste tecnologie:

- nei Paesi Bassi, una strategia ha mirato a aumentare del 20% la quota di utilizzo del legno negli edifici dal 1995 e 2000; (*1)
- in Germania, si prevede che a breve il 20% delle case unifamiliari saranno costruite con ossatura in legno, anche se attualmente si stima sia il 15%;(*2)
- in Belgio, tale percentuale è salita, negli ultimi 10 anni, dal 5 al 15-20%.(*1)

Se l'obiettivo di una progettazione sostenibile utilizza tecnologie di stratificazione a secco con i vantaggi che ne derivano, al fine di migliorare le prestazioni dell'involucro edilizio limitando le dispersioni e la formazione di ponti termici, il legno rappresenta un'importante risorsa grazie alle sue caratteristiche meccaniche che, da una parte, garantiscono la facilità di montaggio e smontaggio, e dall'altra, grazie alla bassa conduttività termica, favoriscono l'eliminazione dei ponti termici nei punti critici dell'edificio. La possibilità di costruire involucri edilizi relativamente leggeri grazie all'impiego di elementi in legno, nelle cui intercapedini viene collocato del materiale isolante, aggiunge un'altra caratteristica vantaggiosa relativa all'impiego di questo materiale, che inoltre, possiede dei valori esigui per quanto riguarda l'energia incorporata per via del limitato numero di trattamenti a cui deve essere sottoposto.

La capacità di essere assemblato e smontato facilmente favorisce la demolizione selettiva degli edifici e permette un corretto riciclaggio dei materiali da costruzione, che qualora, non potesse essere completamente riciclato o riutilizzato, può divenire fonte di energia tramite processi di combustione.

Di seguito verranno descritte le principali tecnologie costruttive che utilizzano il legno per la costituzione di sottostrutture o pannelli di tamponamento per involucri esterni reversibili.

2.2.1.1. Sottostrutture diffuse

Queste tecniche costruttive impiegano una sottostruttura costituita da montanti in legno con un passo di 60 o 80 cm circa con funzioni di tamponamento o anche con funzione portante dell'edificio, evoluzioni moderne delle tecniche americane del *balloon frame* e del *platform frame*.

Il completamento dell'involucro è raggiunto con la disposizione di vari strati di diversi materiali; esternamente verrà collocato il rivestimento a pannelli o a lastre, mentre internamente si collocheranno lastre di gesso rivestito. Interposto a questi due strati, nell'intercapedine formata dai montanti, può essere collocato il materiale

isolante e possono essere collocate le canaline degli impianti. Per garantire le migliori prestazioni di isolamento termico, e per scongiurare il pericolo della formazione di ponti termici, può essere disposto un cappotto esterno a completamento del pacchetto di involucro. L'uso di una struttura diffusa con funzione anche portante, quindi caratterizzata da un maggior numero di montanti verticali, potrebbe aumentare il rischio di disomogeneità dell'involucro, con la formazione di ponti termici, anche se il legno per le sue caratteristiche si presta maggiormente a questo tipo di impiego. Potrebbero essere quindi maggiormente vantaggiose soluzioni con sottostruttura puntiforme con un passo maggiore dei montanti, con funzione esclusivamente di tamponamento, garantendo il raggiungimento degli standard prestazionali. In questo caso potranno essere posizionati i tamponamenti, siano essi strati isolanti interni, oppure pannelli prefabbricati già completi.



(*1):In D.Gauzin-Muller, "L'architecture écologique, Editions du Moniteur, Parigi 2001

(*2):Pro Domo Legno,Geo informa, Giugno 2009

Immagine 20: Esempio di struttura diffusa portante in legno

2.2.1.2. Pannelli prefabbricati portanti

Sono presenti sul mercato dell'edilizia già da alcuni anni elementi bidimensionali in legno impiegabili per la composizione strutturale dell'edificio, sia per quanto riguarda le strutture verticali che per quelle orizzontali. Questi grandi pannelli prefabbricati in legno, con un design opportuno, possono assolvere tutte le funzioni statiche dell'edificio garantendo anche elevate prestazioni per quanto riguarda il comportamento antisismico dell'edificio, essendo il legno un materiale particolarmente adatto ad assolvere questi compiti. Utilizzare questi pannelli portanti prefabbricati significa diminuire i tempi di montaggio dell'edificio, e nel contempo garantire elevati standard qualitativi e di precisione assoluta derivante dalla prefabbricazione industriale dei componenti che inoltre permette anche la reversibilità delle componenti; questo aspetto è particolarmente vantaggioso se pensiamo che la disposizione degli elementi strutturali rappresenta uno dei processi costruttivi più complicati e onerosi. Questi pannelli garantiscono di ottenere luci compatibili con le applicazioni residenziali e non garantiscono particolari vincoli per la distribuzione interna; tuttavia l'utilizzo di questi grandi elementi portanti prefabbricati può limitare la flessibilità verticale e orizzontale degli ambienti interni per la quale potrebbe essere necessario un ridimensionamento strutturale dei setti portanti in legno.



Una tecnologia simile è rappresentata dai pannelli X-LAM, elementi costituiti da pannelli monostrato di tavole di legno, sovrapposti e incollati a strati incrociati a formare un pannello multistrato, con dimensioni massime di 2,95x16x0,4 m. Per la produzione di X-Lam può essere utilizzato legno di abete rosso o di conifere in generale; il processo di produzione inizia, successivamente al prelievo dei tronchi, con la fase di preparazione delle tavole, che avviene attraverso la rifilatura dei tronchi e con delle seghe multilame. Selezionate le tavole, si procede alla fase di essiccazione, fino al punto in cui il materiale assume le caratteristiche richieste, e al successivo processo di calibratura e incollaggio. Esse vengono unite prima di testa con giunto a pettine e poi lateralmente fino a formare un pannello monostrato di spessore variabile tra 20 e 40 millimetri, con disposizione longitudinale o trasversale delle tavole.

La sovrapposizione degli strati prevede l'alternanza di pannelli monostrato con tavole unite longitudinalmente a quelli con tavole unite trasversalmente. Il pannello monolitico così composto è successivamente sottoposto a pressatura, al fine di raggiungere il massimo indurimento della colla, alla calibratura dell'elemento, per lo spessore desiderato, e un'altra eventuale levigatura. Quando le superfici principali del pannello sono pronte, si procede alla finitura in elementi standard e allo stoccaggio, che viene stendendo le tavole in posizione orizzontale. I collegamenti tra gli elementi strutturali possono avvenire con sistemi molto diversi. I fissaggi sono studiati in numero adeguato rispetto alla necessità derivante dai risultati di calcolo strutturale di dettaglio. Il collegamento del tipo parete-solaio-parete trasmette la forza di compressione tramite pressioni di contatto tra i diversi elementi, indipendentemente dal tipo di connessione utilizzato.

La sovrapposizione degli strati prevede l'alternanza di pannelli monostrato con tavole unite longitudinalmente a quelli con tavole unite trasversalmente. Il pannello monolitico così composto è successivamente sottoposto a pressatura, al fine di raggiungere il massimo indurimento della colla, alla calibratura dell'elemento, per lo spessore desiderato, e un'altra eventuale levigatura. Quando le superfici principali del pannello sono pronte, si procede alla finitura in elementi standard e allo stoccaggio, che viene stendendo le tavole in posizione orizzontale. I collegamenti tra gli elementi strutturali possono avvenire con sistemi molto diversi. I fissaggi sono studiati in numero adeguato rispetto alla necessità derivante dai risultati di calcolo strutturale di dettaglio. Il collegamento del tipo parete-solaio-parete trasmette la forza di compressione tramite pressioni di contatto tra i diversi elementi, indipendentemente dal tipo di connessione utilizzato.

La sovrapposizione degli strati prevede l'alternanza di pannelli monostrato con tavole unite longitudinalmente a quelli con tavole unite trasversalmente. Il pannello monolitico così composto è successivamente sottoposto a pressatura, al fine di raggiungere il massimo indurimento della colla, alla calibratura dell'elemento, per lo spessore desiderato, e un'altra eventuale levigatura. Quando le superfici principali del pannello sono pronte, si procede alla finitura in elementi standard e allo stoccaggio, che viene stendendo le tavole in posizione orizzontale. I collegamenti tra gli elementi strutturali possono avvenire con sistemi molto diversi. I fissaggi sono studiati in numero adeguato rispetto alla necessità derivante dai risultati di calcolo strutturale di dettaglio. Il collegamento del tipo parete-solaio-parete trasmette la forza di compressione tramite pressioni di contatto tra i diversi elementi, indipendentemente dal tipo di connessione utilizzato.



La sovrapposizione degli strati prevede l'alternanza di pannelli monostrato con tavole unite longitudinalmente a quelli con tavole unite trasversalmente. Il pannello monolitico così composto è successivamente sottoposto a pressatura, al fine di raggiungere il massimo indurimento della colla, alla calibratura dell'elemento, per lo spessore desiderato, e un'altra eventuale levigatura. Quando le superfici principali del pannello sono pronte, si procede alla finitura in elementi standard e allo stoccaggio, che viene stendendo le tavole in posizione orizzontale. I collegamenti tra gli elementi strutturali possono avvenire con sistemi molto diversi. I fissaggi sono studiati in numero adeguato rispetto alla necessità derivante dai risultati di calcolo strutturale di dettaglio. Il collegamento del tipo parete-solaio-parete trasmette la forza di compressione tramite pressioni di contatto tra i diversi elementi, indipendentemente dal tipo di connessione utilizzato.

2.2.1.3. Pannelli prefabbricati non portanti

Un sistema intermedio tra la tecnologia a struttura diffusa e la tecnologia a pannelli portanti prefabbricati, è quella che si avvale di pannelli prefabbricati di dimensioni variabili costituenti l'involucro esterno. Questa tecnologia prevede l'utilizzo di pannelli stratificati già completi di finiture interne ed esterne e di uno strato di tamponamento isolante che, non assolvono funzioni statiche, ma solo funzioni di chiusura perimetrale; questi elementi vengono prodotti in officina assemblando i vari strati e dimensionando i moduli secondo le esigenze progettuali.



Solitamente vengono impiegati per le finiture

interne tavole di gesso rivestito, per la struttura resistente dei pannelli, invece, si impiegano tavole di legno o strutture a montanti e traversi, tra i quali viene interposto lo strato o gli strati isolanti e gli eventuali strati di protezione all'acqua e all'umidità.

Una volta creati i pannelli, questi possono essere fissati ad un sottostruttura portante ancorata alla struttura portante dell'edificio, oppure possono essere connessi tra loro a formare una porzione sufficientemente ampia da poter essere fissata direttamente alle strutture portanti.

Con questo sistema si possono avere, oltre a i classici vantaggi derivati dalla prefabbricazione, quali la riduzione dei rifiuti e facilità di posa in opera, anche risultati positivi in termini di originalità e personalizzazione compositiva e formale delle facciate e dell'involucro dell'edificio.

Diventa quindi fondamentale e necessaria una corretta collaborazione tra il progettista, il produttore e l'impresa costruttrice, affinché le scelte progettuali e la produzione dei componenti seguano un cammino parallelo che porti un risultato garantito e corretto.

2.2.1.4. Cellule tridimensionali

Grazie alla sua leggerezza e alla sue caratteristiche che lo rendono facilmente assemblabile e modificabile anche in cantiere, il legno, si presta alla prefabbricazione anche in moduli tridimensionali completi pronti per la posa in opera e per l'utilizzo.

Queste cellule tridimensionali complete del l'involucro esterno possono essere assemblati una sull'altra o lateralmente a formare un organismo più articolato di dimensioni maggiore, ma composto da moduli standard prefabbricati che giungono al sito praticamente finiti e che vengono solamente fissati tra loro.

Il vantaggio relativo al totale controllo qualitativo del manufatto che giunge dallo stabilimento produttivo, si contrappone alle criticità riguardante la fase di trasporto al sito; essendo le cellule di grande dimensione e occupando un grande volume di aria, necessitano l'impiego di mezzi di trasporto idonei e che consumano quantità di energie notevoli.

Alla luce delle nuove tecnologie costruttive che prevedono l'assemblaggio di elementi bidimensionali modulari di facile montaggio direttamente in cantiere, le cellule tridimensionali potrebbero essere considerate tecnologie obsolete e poco giustificabili, nonostante queste soluzioni siano comunque molto diffuse per via della loro economicità e la loro velocità di posa in opera.



Immagine 23: Moduli prefabbricati non portanti con isolamento interno

Immagine 24: Fasi di montaggio di cellule tridimensionali. Hotel Post a Bezan (Austria)

2.2.2. Sottostrutture e rivestimenti in acciaio

Sebbene considerato da molti operatori del settore edilizio un materiale non sostenibile da un punto di vista ambientale, l'acciaio grazie alle sue caratteristiche di riciclabilità e ai suoi altri numerosi vantaggi, è un materiale che può essere invece considerato sostenibile.

In primo luogo, grazie alle sue caratteristiche meccaniche, che consentono agli elementi in acciaio un rapporto peso resistenza molto vantaggioso, si possono ottenere risparmi sull'utilizzo dei materiali da costruzione. Sfruttando le caratteristiche meccaniche di questo materiale si sono sviluppati metodi e soluzioni per l'ancoraggio e la connessione tra i diversi elementi, e questo comporta una facilità ulteriore nelle fasi di trasporto e di manovra dei componenti da utilizzare, oltre che una totale reversibilità. Da questo poi scaturisce anche il risparmio di tempo nelle fasi di montaggio e anche nelle fasi di demolizione, che possono essere selettive permettendo quindi il riciclo di svariati componenti.

Il punto debole di questo materiale, però, risiede nell'elevata energia necessaria per la produzione e per le lavorazioni; i processi di estrazione, trasporto, e lavorazione, impiegano macchinari e processi produttivi con grandi oneri energetici, rendendo l'acciaio poco sostenibile se consideriamo solo questi indici prestazionali.

Come si era già accennato, l'acciaio può essere riciclato più e più volte senza perdite in termini di prestazioni meccaniche, e al contempo durante le demolizioni, grazie alla separazione magnetica, il materiale può essere recuperato, selezionato e destinato direttamente al sito di riciclaggio.

Nel 2000, negli Stati Uniti sono stati riciclati 70 milioni di tonnellate di acciaio, pari al 64,1% della produzione totale: dagli edifici demoliti si utilizzano attualmente il 95% degli elementi strutturali e il 47,5% delle barre di armatura; nell'unione europea la percentuale si aggira intorno al 50%. (*2)

Partendo dal materiale riciclato, si eliminano i dispendiosi processi di estrazione della materia prima e alcuni passaggi di lavorazione, procedendo subito alla nuova forgiatura dell'elemento in acciaio.

Già utilizzato nell'edilizia industriale e in quella terziaria, l'acciaio può trovare spazio anche nell'edilizia residenziale.

Ora vedremo nel dettaglio le tecniche costruttive più diffuse che utilizzano l'acciaio come materiali di riferimento.

2.2.2.1. Struttura diffusa

L'impiego di una struttura diffusa in acciaio consiste nell'utilizzo di profili metallici leggeri disposti verticalmente con un passo di 60 cm circa che definiscono un sistema che soddisfa le funzioni di struttura portante e di supporto per l'involucro esterno di chiusura.

I sistemi riconducibili a questi principi, che derivano direttamente dalle tecniche radizionali del *balloon frame*, conoscono una discreta diffusione nei paesi dove la cultura costruttiva è basata sull'uso del legno.

Negli Stati Uniti le residenze monofamiliari realizzati con profili leggeri metallici, introdotte sul mercato a partire dal 1992, nel 1997 sono state 95000, pari ad una quota di mercato del 15% delle nuove realizzazioni. (*3)



Come per la struttura diffusa in legno, il tamponamento dell'edificio avviene tramite la collocazione di pannelli di finiture esterne e pannelli di finitura interni tra i quali viene inserito lo strato di isolamento termico.

Utilizzando questa tipologia costruttiva, abbiamo un involucro costituito internamente da un'ampia serie di montanti verticali, racchiusi da due gusci, che nell'insieme definiscono una chiusura

Immagine 25: Esempio di struttura diffusa in profili metallici

(*3) Dati in B. Lemoine, *L'acier écologique pour un developpe durable*, Aubervilles, 2001

(*4) J. Anderson, *Steel instead of wood in residential buildings*, in *Nordic Steel & Mining Review*, 1996

maggiormente compatta rispetto a una soluzione tecnologica a struttura puntiforme, cioè con i montanti più distanziati che però non assolvono le funzioni strutturali.

Inoltre, è possibile la prefabbricazione, in stabilimento o direttamente in cantiere, di interi elementi di parete o di solaio, completi degli strati di isolamento e di chiusura che possono essere manovrati facilmente e minimizzando il pericolo per gli operai.

Tali sistemi presentano, tuttavia anche alcune criticità simili a quelle riscontrate per la stessa tecnologia in legno; la struttura diffusa con funzione portante, può diventare un ostacolo alla flessibilità degli spazi interni e al passaggio delle reti impiantistiche.

Le caratteristiche di queste soluzioni costruttive non permettono la costruzione di edifici alti più di quattro o cinque piani, il che però potrebbe non essere un problema se è utilizzato in contesti residenziali affini.

Un'altra problematica relativa alla struttura diffusa è connessa all'isolamento termico: come già accennato per le strutture diffuse in legno, il ripetersi di elementi verticali all'interno dell'involucro può ostacolare il corretto isolamento degli ambienti interni rendendo necessaria la collocazione di un ulteriore strato isolante all'esterno, a completamento dell'involucro originale.

2.2.2.2. Struttura puntiforme

Questa tecnica costruttiva compone una struttura con profili posti verticalmente ed orizzontalmente a una distanza maggiore rispetto alla struttura diffusa, sfruttando le prestazioni meccaniche dei profili in acciaio laminato dimensionati a dovere. Diminuisce così il numero di elementi utilizzati per la sottostruttura che andrà a sorreggere l'involucro esterno. Questa sottostruttura è svincolata dalla struttura portante vera e propria dell'edificio, e quindi, non assolve nessun compito statico se non quello riguardante il supporto alle chiusure esterne. Una volta messa in opera la struttura possono essere collocati i tamponamenti; questi possono essere realizzati con una vasta gamma di materiali e possono soddisfare le esigenze estetiche e prestazionali.

Rivestimenti di lastre leggere o di elementi massicci prefabbricati, stratificazioni più o meno complesse nelle quali trovano la loro collocazione strati di vari materiali con funzioni e prestazioni specifiche, compongono un involucro reversibile e performante.

Le caratteristiche delle strutture puntiformi vengono esaltate se si elabora una soluzione di involucro composto da due gusci separati e totalmente svincolati dalle strutture portanti; un guscio esterno e un guscio interno tra i quali inserire le intercapedini per il passaggio delle reti impiantistiche e gli strati di isolamento secondo le esigenze prestazionali di progetto.

La minore invadenza della struttura rispetto alla tecnologia con struttura diffusa, permette maggiori soluzioni in termini di flessibilità degli spazi interni ma garantisce anche maggior libertà di modifica per quanto riguarda le aperture sulle facciate degli edifici.

Il peso maggiore degli elementi impiegati potrebbero aumentare le problematiche connesse alla movimentazione e al trasporto e, inoltre, il numero maggiore di operazioni necessarie per la realizzazione dei vari strati aumenta i tempi di costruzione.

2.2.2.3. Cellule Tridimensionali

Come abbiamo visto per le tecnologie in legno, ulteriore filone costruttivo si basa sulla prefabbricazione di interi elementi tridimensionali, costituiti da una o più stanze, che vengono poi assemblati fra loro in cantiere.

Se escludiamo le differenze in termini di prestazioni meccaniche, tra il legno e l'acciaio, e i differenti comportamenti igrotermici, per quanto riguarda la prefabbricazione e l'assemblaggio dei moduli tridimensionali, queste soluzioni costruttive in acciaio presentano le stesse problematiche e gli stessi vantaggi di quelle in legno: le difficoltà legate alla movimentazione e al trasporto dei moduli



opposta alla garanzia di standard di qualità dei prodotti prefabbricati e all'abbattimento delle tempistiche connesse alla costruzione dell'edificio.

La leggerezza dell'acciaio in rapporto alle prestazioni meccaniche permettono di utilizzare modeste quantità di materiale per la realizzazione dei moduli, riducendo gli ingombri e lo spessore degli elementi di chiusura.

La scarsa flessibilità di questa tecnica costruttiva non giova a favore della sua diffusione e del suo sviluppo nel mondo dell'edilizia corrente.

2.2.3. Sottostrutture e rivestimenti in cemento e calcestruzzo

Di fronte alle nuove esigenze del mercato edilizio, ormai orientate, nei paesi più sensibili, alla minimizzazione dei consumi energetici, i produttori di materiali tradizionali, quali i blocchi laterizi o i prodotti cementizi, cercano di adeguare la loro offerta alle nuove domande di mercato.

Le tecniche costruttive massive sono in continua evoluzione per continuare a sopravvivere in un mercato edilizio sempre più esigente ed innovativo, cercando di sfruttare la loro grandissima diffusione nella pratica costruttiva tradizionale ma apportando soluzioni nuove e al passo con le nuove richieste e con le nuove esigenze

Se da un lato la grande maggioranza dei sistemi massicci, che utilizzano blocchi in laterizio o cemento cellulare, sono tecniche costruttive non reversibili, d'altro canto esistono anche possibilità di prefabbricazione di elementi massivi per la composizione degli involucri esterni.

Queste tecnologie impiegano il cemento, al quale, se necessario, vengono aggiunti determinati aggregati, lapidei, fibrosi o di altra natura, per potenziarne le prestazioni in termini di leggerezza e resistenza meccanica.

Con l'industrializzazione edilizia è possibile quindi progettare e costruire edifici con tecnologie totalmente reversibili, ma che allo stesso tempo garantiscono prestazioni adeguate in termini di inerzia termica e di isolamento acustico, grazie alla loro composizione massiva.

Sicuramente la scarsa riciclabilità del cemento e degli aggregati aggiunti di questi elementi prefabbricati, non giova alla sostenibilità ambientale di questi sistemi.

È opportuno ricordare che ogni tecnica costruttiva può trovare un habitat maggiormente conforme alle prestazioni che può offrire; non esiste quindi una tecnica migliore o una peggiore in assoluto, ma esistono sistemi più adatti a determinate situazioni ed altri sistemi adatti ad altrettante.

2.2.3.1. Pannelli prefabbricati non isolati

Questo sistema utilizza elementi prefabbricati in cemento alleggerito o fibrorinforzato, i quali possono avere dimensioni varie in relazione al loro utilizzo, possono avere un volume bidimensionale o anche tridimensionale, e fungono sostanzialmente come elementi di tamponamento e rivestimento per le chiusure verticali opache.

Si tratta di elementi o pannelli semplici massicci con pesi relativamente elevati (se confrontati con pannelli di altri materiali come acciaio o legno) sprovvisti di strati di isolamento, e quindi di per sé molto economici. È ovvio, data la crescente attenzione e la crescente regolamentazione normativa negli ambiti del risparmio energetico, che per la corretta realizzazione dell'edificio sia necessario introdurre nella stratificazione dell'involucro ulteriori strati isolanti; questi possono comunque essere posati in opera mediante tecniche a secco, quindi, reversibili, che consentano di mantenere l'approccio alle strategie per un'edilizia reversibile e sostenibile.

La possibilità di prefabbricare questi elementi, che a discrezione del progettista possono assumere anche le forme più originali e ricercate, consente di avere elementi di dimensioni precise e che possano essere connessi tra loro e ancorati alla struttura portante o addirittura fungere loro stessi da struttura portante gestendo i carichi statici dell'edificio.

Questi elementi possono conferire alla facciata dell'edificio ogni sorta di declinazione stilistica e formale, non limitando quindi l'espressività del progettista, favorendone oltremodo la creatività.

Proprio per questa varietà formale che viene richiesta agli elementi prefabbricati in cemento, l'industria edilizia, che si occupa della prefabbricazione di elementi in cemento, seguendo gli sviluppi tecnologici, fa utilizzo di altre sostanze e di altri materiali, che impastati con il cemento, aumentano l'elasticità e la resistenza meccanica dell'elemento, che così può esprimere al meglio le scelte stilistiche.

Fondamentali diventano i sistemi di ancoraggio degli elementi prefabbricati, alle strutture portanti o ad apposite strutture di sostegno; gli ancoraggi, se si vogliono rispettare i dettami della filosofia di costruire reversibile, devono avvenire mediante imbullonatura o mediante altri sistemi di ancoraggio di fissaggio meccanico.

In alcuni paesi come ad esempio l'Olanda, molti edifici del terziario, ma altrettanti destinati alle residenze, utilizzano elementi in cemento prefabbricato come tamponamento e rivestimento esterno dell'involucro verticale opaco. Sebbene le problematiche legate al trasporto si mantengono per la maggior parte degli elementi prefabbricati in cemento, il cui peso e le cui dimensioni gravano sui mezzi di trasporto, la corretta progettazione e modulazione degli elementi prefabbricati può avvantaggiare e supportare le fasi di trasporto movimentazione e assemblaggio.



2.2.3.2. Pannelli sandwich con isolamento

Questo sistema tecnologico, simile a quello descritto in precedenza, a cui apporta delle aggiunte nella stratificazione del pacchetto di involucro, impiega elementi prefabbricati in cemento al cui interno, in una intercapedine appositamente creata, vengono collocati uno o più strati di isolamento. Sebbene sia possibile, anche per questa tecnologia, realizzare elementi bidimensionali o tridimensionali di forme varie, in questo sistema sono maggiormente impiegati elementi prefabbricati bidimensionali, pannelli o intere porzioni di involucro, che facilitano l'inserimento al loro interno degli strati di isolante.

Come per gli elementi del sistema tecnologico precedente, gli elementi in cemento, che possono essere compresi di armatura o composti da un impasto alleggerito o fibrorinforzato, vengono precostituiti in stabilimenti specializzati, demandandone al cantiere l'assemblaggio.

Questi elementi compresi di isolamento, e quindi, utilizzabili anche per edifici che necessitano di un'importante isolamento termico, possono essere particolarmente leggeri, e fabbricati in diversi modi; solitamente, i pannelli sono prodotti con sistema a spruzzo, posati in stampi di legno o di vetroresina, con una struttura



interna di profilati metallici di acciaio zincato caldo e coibentazione in lana di roccia o in isolanti di origine sintetica (EPS, XPS, Poliuretano espanso ecc.). I profili, annegati in ogni pannello, garantiscono il fissaggio ad apposite staffe predisposte in precedenza nei solai o nei pilastri, e permettono al sistema di ancorarsi saldamente alla struttura portante dell'edificio.

La libertà compositiva e formale può essere mantenuta anche utilizzando questo sistema costruttivo, così come per quello precedente, aggiungendo però nella prefabbricazione i componenti utili all'isolamento termico dell'involucro.

I bordi dei pannelli devono essere progettati e sagomati, quindi, in modo tale da garantire uno strato isolante che ricopre tutto l'involucro senza soluzione di continuità; questo passaggio è fondamentale per evitare che nell'involucro coibentante si formino dei ponti termici laddove lo strato di isolamento interno al pannello non sia continuo per tutta la superficie della chiusura verticale ed orizzontale.

Questo sistema a pannelli isolati, risolvendo nello stabilimento di produzione una fase d'opera relativa alla posa dell'isolamento, permette di risparmiare ulteriore tempo nelle fasi di costruzione dell'edificio; inoltre, riducendo le operazioni di posa in opera, si riducono anche i rifiuti prodotti in cantiere.

Trattandosi di sistemi prefabbricati, quindi anche reversibili, è possibile mantenere un controllo della qualità degli elementi, eliminando le variabili connesse alla produzione di elementi in cantiere con tutte le problematiche connesse.

Certamente si ripetono anche per questo sistema tecnologico le medesime criticità relative agli altri sistemi che impiegano elementi di cemento prefabbricato; l'elevato peso degli elementi e le grandi dimensioni causano sempre qualche problematica nel trasporto e nella movimentazione dei componenti, ma come detto in precedenza, una corretta progettazione modulare degli elementi da parte del progettista e dei produttori, potrebbe facilitare le fasi di trasporto e messa in opera.

2.2.3.3. Lastre sottili per stratificazioni complesse

Un sistema tecnologico sviluppatosi più recentemente, e più elaborato, impiega lastre di cemento rinforzato, dimensionate e sagomate secondo le necessità progettuali, e di spessori sottili nell'ordine dei 2-5 cm, per comporre, con l'impiego di altri materiali, stratificazioni di involucro pensate e progettate sulla base dei requisiti prestazionali di isolamento termico ed acustico richieste dal progetto.

Queste lastre di cemento rinforzato possono avere una superficie omogenea oppure microforata e può essere trattata in vari modi a seconda delle necessità stilistiche richieste e ai risultati estetici che si vogliono ottenere.

Questi elementi vengono impiegati per lo più per la creazione dell'involucro esterno, e svolgono due funzioni fondamentali: in primo luogo, se utilizzati esternamente, od internamente, queste lastre diventano



rivestimento, assolvendosi sia funzioni relative alla protezione dagli agenti atmosferici, sia funzioni relative alla riuscita estetica e formale dell'edificio. Diversamente, questi elementi possono essere utilizzati per comporre pacchetti di involucro complessi che, rispondano correttamente ai requisiti relativi alle prestazioni termoisolanti e fonoisolanti; alternando lastre in cemento a strati di materiale isolante, a strati di protezione all'acqua o all'umidità, oppure, se necessario, a strati di materiali ad alta capacità fonoassorbente, si possono ottenere involucri esterni molto performanti e totalmente reversibili. Le caratteristiche massive del materiale contribuiscono a migliorare l'inerzia termica e soprattutto l'isolamento acustico di stratificazioni per involucri realizzati con tecnologia di posa a secco; ciò diviene di fondamentale importanza alla luce del fatto che i sistemi di involucro stratificati molto spesso denotano problemi relativi alla scarsa inerzia termica e allo scarso isolamento acustico del pacchetto di chiusura. Inoltre il ridotto spessore e le ridotte dimensioni degli elementi, eliminano gran parte delle criticità relative al trasporto e alla movimentazione di elementi prefabbricati in cemento.

2.3. I MATERIALI ISOLANTI

In una edilizia efficiente dal punto di vista energetico, i materiali isolanti occupano un ruolo fondamentale, soprattutto se si parla di sistemi costruttivi reversibili o con tecnologia di stratificazione a secco, nelle cui tecnologie, il ruolo del materiale isolante diventa di importanza prioritaria. Grazie al loro effetto termoisolanti consentono risparmi di energia per il riscaldamento e il raffreddamento, contribuendo in questo modo alla riduzione delle emissioni di CO₂.

Negli ultimi decenni, l'importanza dei materiali isolanti è cresciuta continuamente, e con essa anche l'offerta di materiali isolanti con diverse caratteristiche e diverse possibilità di applicazione. Ogni materiale isolante possiede proprietà caratteristiche, relative alla materia prima e al processo di produzione, che talvolta non si ritrovano in altri materiali, rendendo in molti casi impossibile un confronto diretto tra prodotti diversi. La caratteristica di maggior interesse dei materiali isolanti è senza dubbio la bassa conduttività termica.

A seconda dell'applicazione, tuttavia, per la scelta di materiale isolante possono risultare determinanti anche altre caratteristiche, come ad esempio la resistenza a compressione o la reazione al fuoco. I materiali isolanti sono quelli che, per quanto possibile, limitano la trasmissione del calore e possono essere utilizzati per offrire protezione contro rilevanti perdite termiche. Tanto minore è la conduttività termica del materiale, tanto minore è la quantità di calore che lo attraversa.

La conduttività viene misurata per ogni materiale in Watt al metro quadro per Kelvin e indica la potenza termica che attraversa un cubo di materiale di 1 m, per una differenza di temperatura di 1° kelvin fra le due facce parallele.

La conduttività termica dei materiali isolanti è fortemente influenzata da vari fattori, come ad esempio la densità del materiale o la composizione micro strutturale del materiale.

Per i materiali isolanti in fibre risultano fondamentali la dimensione delle fibre e la loro direzione rispetto al flusso termico.

Nei materiali isolanti espansi la conduttività invece è determinata sia dalla micro porosità delle celle sia, e in gran misura, da il gas contenuti in tali minuscole celle. Nei materiali isolanti a base di fibre di legno o di lana di legno, la capacità isolante invece legata alla massa volumica apparente.

Materiali isolanti inorganici	
Sintetici	Lana di vetro Lana di roccia Vetro cellulare Vetro espanso Silicati di calcio espansi Fibre e schiume ceramiche Aerogel Lana di scoria Gesso espanso
Naturali	Perlite espansa Vermiculite espansa Mica espansa Argilla espansa Pomice Leterizi isolati
Materiali isolanti organici	
Sintetici	Polistirene espanso Polistirene espanso estruso Poliuretano espanso rigido Poliuretano espanso in situ Resine fenoliche espanse Resine melamminiche espanse Fibre di poliestere
Naturali	Lana di legno Fibre di legno Sughero espanso Fibre di cellulosa Fibre di canapa Lana di pecora Cotone Fibre di lino Granulato di cereali Canna palustre Fibre di cocco Zostera marina Trucioli di legno Giunco da stuoie Torba Balle di paglia
Materiali isolanti innovativi	
	Isolamenti termici trasparenti Isolamenti termici attivabili Schiume nanocellulari Pannelli sottovuoto

Se i materiali isolanti sono esposti a sollecitazioni perpendicolari, è necessario garantire l'assenza di qualsiasi rottura all'interno dello strato isolante. D'altro canto, la resistenza a flessione e la resistenza a compressione e ai fenomeni di punzonamento sono criteri significativi in particolare per le lastre di lana di legno e le lastre multistrato, quando tali lastre sono usate come supporti di altri strati o come strati interni di solai. La normativa relativa alla protezione antincendio di ogni paese stabilisce che gli edifici siano realizzati in modo da prevenire l'insorgere di un incendio e la diffusione di fiamme e fumo al fine di ridurre i pericoli per la vita e la salute persone e animali. Ne conseguono per i materiali isolanti requisiti specifici che riguardano lo sviluppo delle fiamme, la loro trasmissione, lo sviluppo di fumo e lo sgocciolio delle parti incandescenti.

Oltre alla capacità di questi materiali di isolamento termico, non sono da sottovalutare le caratteristiche prestazionali relative all'isolamento acustico, che molto spesso sono inversamente proporzionali alle caratteristiche termoisolanti dei materiali; infatti molti materiali isolanti devono le loro prestazioni termoisolanti al contenuto al loro interno di aria, che sappiamo essere un ottimo materiale termoisolante e nel contempo un pessimo materiale fonoisolante. All'aumentare della porosità di un determinato materiale isolante, si ha una diminuzione della densità ed un aumento delle capacità termoisolanti, mentre al diminuire della porosità e all'aumentare della densità si ha un incremento in termini di isolamento acustico. I materiali termoisolanti vengono classificati rispetto alla materia prima di cui sono composti, e principalmente in base alla sua origine: inorganica e organica. All'interno dei due gruppi, i materiali isolanti si articolano in funzione della lavorazione della materia prima originaria i materiali naturali e sintetici. Nei prodotti naturali, la materia prima rimane invariata. Se la materia prima originaria viene invece modificata nella sua composizione attraverso una lavorazione speciale, rendendo quindi prodotta o assemblata attraverso processi tecnologici, si parla di materiali sintetici. Nello specifico possiamo distinguere i materiali di origine minerale, appartenenti alla macrocategoria dei materiali inorganici sintetici, ottenuti da rocce feldspatiche o basaltiche o dalla lavorazioni di materiali silicei, che si presentano sottoforma di feltri compatti costituite da fibre trattate con resine e leganti sintetici. Questi materiali, ad eccezione del vetro cellulare e dell'aerogel, sono permeabili al vapore e possono avere varie densità (25-200 Kg/m³) e vari indici di conducibilità (0,035-0,050 W/m²K); tra questi materiali troviamo ad esempio la lana di roccia, la lana di vetro e la lana di scoria.

Materiali inorganici naturali, generalmente sfusi, come ad esempio l'argilla espansa o la vermiculite espansa, sono destinati all'alleggerimento dei calcestruzzi, oppure, possono essere impiegati per il riempimento di intercapedini sia nell'involucro verticale che in quello orizzontale.

I materiali organici, si distinguono anch'essi in materiali sintetici e naturali; i primi, definiti anche materiali plastici cellulari, sono caratterizzati da una bassa conducibilità termica (0,02-0,04 W/m²K) e da una bassa densità (15-80 Kg/m³), dovute alla loro struttura che comprende una materia gassosa (aria, freon o simili), dispersa in una matrice solida (poliuretano, polistirene o polietilene), conformata a celle aperte o chiuse. In questa categoria troviamo il polistirene espanso, il poliuretano espanso e le fibre di poliestere. I materiali organici naturali (lana e fibre di legno, cellulosa, lana di pecora, fibre di cocco, ecc.), sono caratterizzati da una composizione fibrosa con densità molto variabili (15-300 Kg/m³), e derivano per la maggior parte da materie prime di origine vegetale. Molti di questi prodotti, come le fibre di legno o di canapa, non subiscono trattamenti chimici o aggiunte di additivi e sono quindi totalmente riciclabili.

Alcuni materiali isolanti naturali, invece, contengono quantità relativamente elevati di additivi come i sali ignifughi, le fibre protettive o i leganti che non sono di origine naturale.

L'innovazione tecnologica ed industriale produce anche materiali isolanti innovativi e molto performanti, elaborando soluzioni stratificate cercando di massimizzare le prestazioni minimizzando l'impiego di materiale; sono prodotti dalle capacità isolanti importanti (conducibilità termica 0,002) e dagli spessori ridotti rispetto ai materiali tradizionali. In questa categoria ricordiamo i pannelli sottovuoto VIP (Vacuum Insulation Panels), gli isolanti trasparenti e le schiume nanocellulari.

2.4. I LAYER PROTETTIVI E LE INTERCAPEDINI

Nella composizione delle stratigrafie dell'involucro esterno, realizzate mediante tecnologie costruttive reversibili, hanno un ruolo fondamentale gli strati protettivi di impermeabilizzazione, le barriere al vapore e le intercapedini d'aria; questi elementi, se opportunamente progettati e correttamente disposti all'interno della stratigrafia, permettono all'involucro di mantenere le prestazioni in termini di isolamento termico ed acustico durante le fasi di utilizzo dell'edificio. Involucri sempre più isolati, e composti molto spesso da grandi strati di isolamento termico, necessitano di film protettivi che evitino l'umidità scongiurando i fenomeni di degrado o la formazione di muffe, inoltre, intercapedini più o meno ventilate, correttamente progettate, consentono di migliorare le prestazioni dell'involucro edilizio.

2.4.1. Le barriere al vapore

Il vapore acqueo è presente nell'aria e nei materiali dei componenti edilizi.

Le molecole di vapore acqueo tendono a compensare eventuali differenze di concentrazione tra gli ambienti, anche attraversando le partizioni che li separano.

I materiali edilizi che costituiscono tali partizioni contrappongono una resistenza alla diffusione del vapore al loro interno, che dipende dalla loro struttura porosa.

Solitamente i materiali isolanti a base di fibre sono molto permeabili e posseggono una resistenza alla diffusione solo minimamente più elevata dell'aria; i materiali di origine sintetica come le plastiche, o i materiali metallici come i fogli di alluminio, oppongono invece una resistenza superiore fermando il flusso trasmigrante di vapore acqueo all'interno dei materiali.

Una posizione particolare fra i materiali isolanti è occupata dal vetro cellulare che viene considerato impermeabile al vapore.

Le variazioni di temperatura e di umidità dell'aria, possono causare fenomeni di condensa.

I fenomeni di condensa possono essere classificati in due categorie:

- condensa superficiale, ovvero, una conversazione sulla superficie a temperatura inferiore alla temperatura di rugiada dell'aria. Questo fenomeno può causare crescita di muffe, deterioramento dei componenti, formazione di acqua all'interno dei locali, elevata umidità e conseguenti problemi di qualità interna dell'aria.
- condensa interstiziale: si ha quando il vapore acqueo condensa all'interno della muratura causando problemi di smaltimento dell'acqua all'interno della stratigrafia muraria con conseguente perdita delle prestazioni termiche e strutturale dei materiali oltre alla formazione di muffe.

La possibilità di condensazione interstiziale nelle pareti di involucro degli edifici è stata oggetto di studio da oltre cinquant'anni, soprattutto nei paesi con un clima molto rigido e che utilizzano tipologie costruttive con struttura in legno e involucro iper-isolato.

In presenza di condensazione, i segni di deterioramento di quelle strutture sono, dopo breve tempo così evidenti e così gravi da richiedere la verifica a priori dell'assenza del fenomeno nelle particolari condizioni al contorno in cui si verrebbe a trovare la parete.

La condensazione interstiziale è diventata però un problema generalizzato da quando, allo scopo di diminuire i consumi di energia per il riscaldamento, è stata aumentata la resistenza termica dell'involucro ed è stata migliorata la tenuta dell'aria nei serramenti: l'aumento della prima provoca una forte caduta di temperatura attraverso lo strato dei materiali isolanti; il miglioramento della seconda diminuisce i ricambi d'aria con conseguente incremento dell'umidità relativa dell'aria interna, incremento dovuto alla produzione endogena. I due effetti concomitanti rendono più probabile il manifestarsi delle condizioni di temperatura, umidità e pressione di saturazione favorevoli allo sviluppo di condensa dentro la parete con rischio di accumulo di acqua negli anni, qualora nei mesi caldi tutta l'acqua condensata non possa essere eliminata.

Ecco che, quindi, diviene necessario studiare l'andamento dinamico delle stratigrafie rispetto alla formazione di condensa interstiziale, progettando di conseguenza sistemi idonei che possano risolvere il problema.

Per evitare che il vapore acqueo attraversi la parete per poi condensare nello strato isolante, è necessario collocare una barriera al vapore, che se necessario, trattenendo il vapore acqueo all'interno dell'ambiente (che comunque deve essere smaltito con la ventilazione naturale o artificiale), scongiura il rischio di condensazione interstiziale.

La barriera al vapore, che può essere realizzata con lamine metalliche associate a materiali bituminosi o con fogli a base di polimeri, deve essere necessariamente posata sulla superficie dello strato isolante rivolta verso l'ambiente interno.

Occorre tener presente che in alcune situazioni che, pur in presenza di un involucro composto solamente da materiale isolante particolarmente permeabile al vapore, potrebbe essere opportuno sostituire la barriera al vapore con strati traspiranti che permettano il completo passaggio del vapore, durante i periodi freddi dell'anno, e che permettano l'evaporazione dell'acqua di condensa interstiziale durante il periodo caldo dell'anno. Lo studio e l'analisi delle condizioni igrotermiche e del comportamento dell'involucro in codeste condizioni, è fondamentale nelle fasi di progettazione per conseguire gli standard di qualità e di comfort degli ambienti interni.

2.4.2. Materiali impermeabilizzanti

Questi materiali hanno la funzione di impedire l'infiltrazione di acqua, per risalita capillare o per gravità, in quelle parti del sistema edilizio maggiormente a rischio, ovvero nelle fondazioni, nei solai del piano terra, nelle chiusure verticali dei piani interrati, nelle chiusure orizzontali esterne in quelle su spazi aperti.

In tecnologie con sistemi costruttivi a secco, quindi composti da una stratigrafia di vari materiali spesso isolanti e quindi porose, è fondamentale che venga garantita la protezione dall'acqua.

Oltre al principale requisito di impermeabilità, questi materiali devono avere ottime caratteristiche meccaniche, per resistere ai movimenti strutturali e ai carichi verticali, una discreta stabilità dimensionale e l'elasticità, oltre che una buona resistenza agli agenti atmosferici e all'invecchiamento; devono infine essere imputrescibili. Se esposte ai raggi solari, alle piogge acide o a rilevanti escursioni termiche, i materiali impermeabilizzanti richiedono un'adeguata protezione superficiale, realizzata con successivi strati di finitura o, nel caso delle membrane prefabbricate, con strati protettivi, scaglie di ardesia o lamine metalliche, applicati in officina; tali prodotti, liquidi o pastosi, sono i mastici di rocce asfaltiche o di asfalto sintetico, gli asfalti colati, le malte e asfaltiche, i prodotti termoplastici, le soluzioni in solvente di bitume, le emulsioni acquose di bitume e i prodotti a base di polimeri organici.

Le membrane si distinguono in base al materiale componente, al materiale di armatura integrato nella membrana, al materiale di finitura della faccia superiore, al materiale di finitura della faccia inferiore.

I materiali impermeabilizzanti possono essere di tipo naturale o sintetico: alla prima categoria appartengono i materiali bituminosi, impiegati anche nella produzione delle membrane bituminose e come sigillanti; alla seconda categoria appartengono le membrane sintetiche.

Le membrane bituminose sono membrane prefabbricate a base di bitume e di agenti modificati, che sono atti a migliorare le caratteristiche del bitume; tali membrane sono aggiunte al bitume per modificarne alcune caratteristiche e renderlo più adatto all'impiego.

Il manto bituminoso viene posato in due o più strati e, per la facilità di posa, è particolarmente adatto a superfici con rilievi e all'esecuzione di dettagli complessi.

Le membrane sintetiche sono invece membrane prefabbricate che non contengono bitume; essi si differenziano dalle precedenti perché il telo impermeabilizzante prevede l'impiego di materie plastiche o elastomeri e la posa prevede un solo strato di membrana.

2.4.3. L'intercapedine d'aria

Nei sistemi stratificati a secco un ruolo di particolare importanza è costituito dalle intercapedini d'aria, che possono essere non ventilate, debolmente ventilate o fortemente ventilate.

Ispezionabilità degli involucri, protezione della struttura portante dagli agenti atmosferici, schermatura dall'irraggiamento sono alcune delle caratteristiche vantaggiose delle intercapedini.

Le camere d'aria non ventilate sono intercapedini presenti all'interno della stratificazione di involucro, che non hanno prese di immissione e di emissione. Servono, di norma, per l'alloggiamento degli impianti e/o per compensare la differenza di spessore che si crea fra struttura portante e stratificazione di tamponamento. Tali intercapedini possono essere collocate sul lato interno, in una zona intermedia della stratificazione o anche sul lato esterno.

Le camere d'aria ventilate si trovano generalmente dietro il rivestimento esterno e svolgono una funzione protettiva dell'involucro: gli agenti atmosferici si concentrano su una superficie protettiva esterna e il flusso d'aria, che corre immediatamente all'interno di questa, contribuisce a mantenere asciutto l'involucro, quindi a proteggere gli strati più delicati.

Inoltre, in estate, la presenza di un'intercapedine ventilata costituisce uno schermo alla radiazione solare: lo scambio termico per irraggiamento diretto viene di fatto eliminato o di molto diminuito grazie alla presenza di tale elemento; i raggi del sole scaldano la superficie esterna della parete, ma la lama d'aria retrostante riesce ad espellere, grazie al moto collettivo naturale, buona parte del calore alla sommità della parete, prima che esso interagisca con il resto dell'involucro edilizio.

A sua volta, la camera ventilata può configurarsi come debolmente ventilata o fortemente ventilata a secondo della portata e alla velocità del flusso di aria all'interno dell'intercapedine.

2.4.4. I rivestimenti

L'involucro esterno viene completato da strati di finitura e di rivestimento sia internamente che sulle facce esterne; i rivestimenti interni, generalmente lastre di gesso rivestito, svolgono la funzione di finitura e determinano l'aspetto estetico degli ambienti interni e in alcuni casi garantiscono la tenuta al vapore dell'involucro.

Maggior importanza hanno invece i rivestimenti esterni per via delle molteplici funzioni che sono chiamati a svolgere: espressione estetica e formale e protezione degli strati interni dell'involucro dagli agenti atmosferici. Per soddisfare queste esigenze i materiali di rivestimento devono avere caratteristiche adeguate riguardo la resistenza meccanica e la durabilità nel tempo sia per consentire la riuscita estetica dell'edificio sia per garantire gli standard prestazionali dell'involucro.

Nell'ambito delle tecnologie costruttive reversibili si utilizzano come rivestimenti esterni i sistemi modulari a pannelli o a lastre prefabbricate, che possono essere assemblati per comporre ogni sorta di involucro; impiegando queste soluzioni tecniche per i rivestimenti esterni si possono elaborare soluzioni di involucro verticale totalmente reversibile. I materiali maggiormente impiegati per la produzione di questi rivestimenti sono il legno, le lamine metalliche, i materiali ceramici e il fibrocemento che opportunamente progettati possono definire molteplici soluzioni di involucro.

Oltre alla riuscita estetica, la scelta dei vari materiali di rivestimento è determinata dalla durabilità nel tempo che si vuole ottenere per l'involucro e, ovviamente, da fattori economici.

3. LE PRESTAZIONI DELL'INVOLUCRO EDILIZIO

L'involucro edilizio è un elemento architettonico che delimita e racchiude l'organismo costruttivo e strutturale mediando gli scambi tra gli ambienti interni e l'ambiente esterno.

La sua funzione è quella di mediare, separare e connettere l'interno con l'esterno, ma è anche un elemento ambientale che delimita e identifica gli spazi esterni circostanti.

Per la valutazione della qualità e dell'efficienza degli involucri edilizi occorre definire delle classi prestazionali comuni a tutti gli involucri:

- **Resistenza meccanica** delle componenti di involucro e dell'involucro nella sua totalità, al fine di garantire la sicurezza e la durata richiesta dell'organismo edilizio;
- Il benessere e la qualità degli ambienti interni definito dalle capacità di **isolamento e inerzia termica** degli involucri uniti alle sue prestazioni igrotermiche tra le quali il controllo della formazione di **condensa interstiziale**;
- **Isolamento acustico** dagli ambienti esterni sempre con lo scopo di salvaguardare il comfort degli ambienti interni;
- **Resistenza al fuoco** e il comportamento in caso di incendio di ogni parte dell'involucro edilizio;

Tutte queste caratteristiche prestazionali devono collaborare per il corretto funzionamento dell'involucro chiamato al contempo ad assolvere le funzioni estetiche e a soddisfare i dettami compositivi e formali richiesti dal progettista.

Di seguito verranno descritti le principali classi prestazionali che interessano il nostro lavoro di studio relativo all'involucro reversibile, e che saranno alla base delle valutazioni effettuate sui casi studio presi in considerazione.

3.1. LA RESISTENZA MECCANICA

Per garantire che l'involucro di un edificio in generale possa funzionare correttamente nell'arco di tempo per cui è stato progettato, è necessario che la durabilità e la resistenza meccanica di tutti gli elementi componenti l'involucro esterno siano adeguate ai compiti e alle funzioni a cui saranno destinati.

I continui movimenti a cui è sottoposta una struttura di involucro di un qualsiasi edificio può provocare nel tempo cedimenti e danni ai vari componenti soprattutto nei punti di aggancio e di connessione tra i vari elementi.

Essendo l'involucro esterno una chiusura che deve garantire la sicurezza e l'inaccessibilità di estranei agli ambienti esterni, è chiaro che deve poter resistere a quelle sollecitazioni meccaniche di vario genere lungo l'arco della fase di vita dell'edificio.

Le precipitazioni atmosferiche costanti nel tempo, le escursioni termiche e l'azione dei raggi ultravioletti provenienti dal sole a cui è sottoposto l'involucro potrebbero accelerare il degrado degli elementi più esposti, per questo motivo, è importante la scelta di rivestimenti duraturi che possano contrastare l'azione di questi agenti rendendo meno onerosa la manutenzione durante la fase d'uso.

Il vento è il fattore meteorologico che maggiormente sollecita la resistenza meccanica dell'involucro edilizio; fattori incidenti del comportamento dell'involucro alle sollecitazioni prodotte dal vento sono la geometria, la forma e l'orientamento dell'edificio.

Peraltro, il vento è un agente atmosferico che crea problemi progettuali non solo quando raggiunge velocità relativamente elevate o quando investe edifici molto alti o isolati.

Il vento, ovvero un flusso d'aria che si sposta a velocità variabili, quando viene deviato da un ostacolo che trova sul percorso, porta alla formazione di vortici, i quali producono, su alcune facce, uno stato di depressione.

Tipicamente, la faccia sopravvento è soggetta a pressione, mentre quella sottovento è soggetta a depressione.

Per conoscere l'azione del vento sulle componenti dell'involucro edilizio, è necessario calcolare la pressione limite alla quale l'involucro riesce a resistere senza rotture o deformazioni, e progettare gli elementi di involucro in modo da non subire deformazioni o rotture sotto l'azione del vento.

L'utilizzo di rivestimenti massicci e resistenti non è sempre necessario per soddisfare tali esigenze, piuttosto è fondamentale che gli ancoraggi e la struttura che portano il rivestimento siano progettate e messe in opera correttamente, così da scongiurare un degrado accelerato dell'involucro e dell'edificio in generale.

In alcuni casi, come ad esempio per interventi di piccola dimensione, in località ove il vento non raggiunge grandi velocità con grande frequenza, è sufficiente progettare un rivestimento duraturo e massiccio, utilizzando ad esempio rivestimenti lapidei o cemento armato a vista o intonacato; in altri casi, invece, se ad esempio si progettano edifici molto alti e quindi sottoposti frequentemente all'azione del vento, con conseguente deformazione e flessione delle strutture, occorre applicare una struttura di involucro che sia in grado di seguire le oscillazioni dell'edificio, senza subire rotture negli elementi portanti (struttura che porta il rivestimento o l'involucro) e portati (rivestimenti o involucro in generale).

3.2. L'ISOLAMENTO TERMICO

Il benessere indoor è uno dei punti particolarmente delicati nella progettazione, ed è strettamente connesso alla progettazione dell'involucro edilizio.

Le prestazioni energetiche dell'involucro edilizio indicano il comportamento durante la fase d'uso degli elementi costruttivi che costituiscono le chiusure di un edificio, rispetto a sollecitazioni indotte da azioni termiche e igrometriche.

Uno dei requisiti fondamentali dell'involucro è quello di garantire la permanenza nell'ambiente interno, di un microclima dalle condizioni quanto più stabili e appropriate possibili.

Questo è possibile da realizzare attraverso una riduzione degli scambi di calore tra ambiente esterno e interno.

Le due facce di un componente di involucro edilizio sono soggette a differenze di temperatura, e quindi, ad un flusso termico direzionato dalla superficie a temperatura superiore a quella a temperatura inferiore.

Le prestazioni di isolamento termico sono valutabili attraverso gli indici prestazionali di trasmittanza termica e sfasamento orario dell'onda termica.

3.2.1. La trasmittanza termica

Nel caso si volessero effettuare verifiche dell'isolamento termico in regime di funzionamento stazionario, il parametro da calcolare è la trasmittanza termica di un componente di involucro, che può essere calcolata a partire dai dati dei flussi di calore unitari attraverso i materiali costituenti il componente considerato.

In particolare il parametro che misura l'attitudine di un materiale ad essere attraversato da un flusso termico è la conduttività termica, che permette di misurare la quantità unitaria di calore che viene trasferito attraverso un corpo omogeneo in direzione perpendicolare a una superficie di area unitaria a causa di un gradiente unitario di temperatura.

Considerando che i materiali presenti in natura non sono mai totalmente omogenei, e considerando l'aria come un materiale isolante, tanto più un materiale risulta poroso, quindi maggiormente ricco d'aria, tanto minore sarà la sua conduttività termica.

I materiali vengono definiti isolanti termici quando la loro conduttività termica è inferiore a $0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Per ciascun strato è possibile definire la resistenza termica come il rapporto fra lo spessore dello strato e la conduttività termica dello stesso.

Nel caso di componenti pluristrato composti da strati omogenei, definiti da uno spessore e da una conduttività termica, la resistenza termica globale del componente è calcolata dalla somma delle resistenze termiche (R_{λ}) dei singoli strati.

Il coefficiente globale di trasmissione del calore (trasmittanza termica U) tiene conto delle resistenze interne ed esterne mediante la formula: $U = 1 / R_{si} + R_{\lambda} + R_{se}$ W/m²K

attraverso questa formula, quindi, definiamo la trasmittanza termica, e pertanto, otteniamo una valutazione sulle capacità di isolamento termico dell'involucro edilizio utile per definire un quadro generale sul comportamento dell'edificio durante la fase di utilizzo, in relazione anche ai consumi di energia necessari per il riscaldamento e il raffrescamento degli ambienti interni.

I valori limite stabiliti dalle norme italiane per la trasmittanza sono definiti in base alla locazione geografica dell'edificio e sono riportati nella seguente tabella.

Zona climatica	Strutture opache verticali	Strutture opache orizzontali o inclinate		Chiusure apribili e assimilabili (**)
		Coperture	Pavimenti (*)	
A	0,54	0,32	0,60	3,7
B	0,41	0,32	0,46	2,4
C	0,34	0,32	0,40	2,10
D	0,29	0,26	0,34	2,00
E	0,27	0,24	0,30	1,80
F	0,26	0,23	0,28	1,60

(*) Pavimenti verso locali non riscaldati o verso l'esterno

(**) conformemente a quanto previsto all'articolo 4, comma 4, lettera c9, del decreto del Presidente della Repubblica 2 aprile 2009, n.59 che fissa il valore massimo della trasmittanza (U) delle chiusure apribili e assimilabili, quali porte, finestre e vetrine anche s e non apribili,

3.2.2. Inerzia termica

Nella definizione delle caratteristiche termiche dinamiche degli involucri edilizi, risulta indispensabile introdurre, oltre al parametro della trasmittanza termica, anche altre caratteristiche dei materiali componenti l'involucro edilizio, quali il peso specifico e la capacità termica specifica.

I parametri di trasferimento dinamico di calore permettono di introdurre, inoltre, il concetto di inerzia termica del componente dell'involucro edilizio, che è la grandezza in grado di quantificare l'attitudine di un componente dell'involucro edile di accumulare calore e di cederlo progressivamente agli spazi circostanti nel tempo.

Un parametro utilizzato per quantificare le caratteristiche di inerzia termica di un componente edile sono il fattore di attenuazione e lo sfasamento dell'onda termica, che sono dipendenti dalle caratteristiche di trasmittanza, peso specifico e capacità termica specifica del componente.

Il fattore di riduzione rappresenta il rapporto tra la massima ampiezza dell'onda termica sulla superficie interna e la massima ampiezza dell'onda termica sulla superficie esterna.

Lo sfasamento dell'onda termica rappresenta, invece, il tempo che passa tra l'onda di temperatura di massima ampiezza esterna e l'onda di temperatura di massima ampiezza interna e definisce quindi il tempo necessario all'onda termica per attraversare il pacchetto di involucro esterno.

In funzione alla stratigrafia del componente edile sottoposto a calcolo, nonché dei materiali che lo compongono, è possibile calcolare i valori dello sfasamento e dello sfasamento dell'onda termica.

Si tratta di due parametri indispensabili per valutare con quali effetti si propaga il calore in regime dinamico all'interno dei componenti edili e, in particolare, quali effetti produce il riscaldamento estivo delle superfici esterne degli involucri edilizi. Se quindi la trasmittanza termica delinea il comportamento dell'involucro rispetto alla capacità di tenere costanti i livelli di riscaldamento degli ambienti interni durante i mesi invernali, lo sfasamento definisce la capacità dell'involucro di mantenere il calore all'esterno degli ambienti interni durante i mesi più caldi dell'anno.

3.3. IL CONTROLLO DELLA CONDENSA

L'involucro edilizio è solitamente attraversato da un flusso di vapore acqueo e da dei flussi di umidità.

Le opere necessarie per proteggere un edificio contro la formazione di condensa e di umidità all'interno dell'involucro si distinguono in:

- Isolamento dall'acqua sotterranea;
- Isolamento dell'umidità ascendente;
- Barriere al vapore;
- Isolamento dalle precipitazioni atmosferiche.

La trasformazione del vapore è un processo molto complesso in quanto strettamente correlato con le condizioni microclimatiche interne e con i materiali che costituiscono il componente edile.

I due parametri che misurano la presenza di umidità da condensazione all'interno dei componenti edili che causa fenomeni di degrado sono:

- La temperatura superficiale critica, al di sotto della quale, in funzione della temperatura e dell'umidità relativa interna, è probabile la formazione di muffe;
- Il rischio di condensazione interstiziale dovuta alla diffusione del vapore acqueo all'interno del componente edile.

Il valore di umidità relativa superficiale massima deriva da dati sperimentali che hanno evidenziato che il perdurare per diversi giorni di umidità superficiali potrebbe portare alla formazione di un ambiente idoneo alla nascita di muffe.

Molto spesso, al fine di evitare formazione di condensazione interstiziale, viene fatto largo uso di strati con funzione di barriera al vapore all'interno dell'involucro edilizio.

Come anche specificato dalla norma UNI EN ISO 13788, la barriera al vapore, in molte situazioni, potrebbe costituire un danno piuttosto che un beneficio per l'intero involucro.

Difatti, non solo causa una drastica riduzione della traspirabilità dell'involucro stesso, ma potrebbe portare conseguenze durante il periodo estivo, riducendo l'asciugamento estivo del vapore acqueo condensato. Quindi, tutte le volte in cui la quantità di vapore acqueo condensato risulta ammissibile, non è necessario porre in opera strati di barriera al vapore, quanto piuttosto è sufficiente effettuare una corretta progettazione dell'involucro edilizio che si possa regolare autonomamente.

Per valutare le prestazioni in termini di condensa interstiziale è opportuno verificare e quantificare quanta condensa si formerà all'interno dell'involucro e in qual mese: attraverso l'uso di software di calcolo può essere stabilita la quantità di vapore acqueo (Kg/m^2) che si formerà all'interno di uno strato dell'involucro esterno. Su questa valutazione è possibile sviluppare soluzioni di involucro che eliminino il problema della condensa interstiziale.

3.4. IL BENESSERE ACUSTICO

Fonoassorbimento e fonoisolamento costituiscono due parametri fondamentali per capire i fenomeni acustici nelle strutture edili, soprattutto se si parla di *sistemi a secco* o di *involucri leggeri*.

La legge italiana sull'isolamento acustico attualmente in vigore, il D.P.C.M. 5 dicembre 1997, stabilisce i requisiti per la protezione passiva acustica degli edifici.

Il decreto introduce l'isolamento acustico standardizzato di facciata $D_{2m,nt}$, una grandezza standardizzata per la verifica del potere fono isolante degli elementi costruttivi. Questo è calcolato secondo la seguente formula: $D_{2m,nt} = D_{2m} + 10 * \text{Log } T/T_0$ con: $D_{2m} = L_{1,2m} - L_2$

Dove $L_{1,2m}$ è il livello di pressione sonora esterno a 2 metri dalla facciata prodotto dal rumore proveniente dal traffico o da una sorgente esterna, mentre L_2 è il livello medio di pressione sonora all'interno dell'ambiente ricevente il rumore.

Nella formula del livello di isolamento acustico di facciata entra in gioco anche il tempo di riverberazione dell'ambiente ricevente, mediante il valore T , mentre il valore T_0 rappresenta il valore di riferimento di riverberazione acustica, pari a 0,5 s. Viene, infine, introdotta nella norma, l'indice di livello di rumore di calpestio dei solai, $L_{n,w}$, da calcolare secondo le procedure di cui alla norma UNI 8270:1987, oggi sostituita dalla UNI EN ISO 717-2:1997.

In funzione delle differenti categorie di edifici vengono definiti i relativi valori limite.

In particolare, la norma distingue le seguenti categorie di edifici:

- Categoria A : edifici adibiti a residenza o assimilabili;
- Categoria B: edifici adibiti a uffici o assimilabili;
- Categoria C: edifici adibiti ad alberghi, pensione e attività assimilabili;
- Categoria D: edifici adibiti a ospedali, cliniche, case di cura o assimilabili;
- Categoria E: edifici adibiti ad attività scolastiche a tutti i livelli o assimilabili;
- Categoria F: edifici adibiti ad attività ricreative di culto o assimilabili;
- Categoria G: edifici adibiti ad attività commerciali o assimilabili.

In funzione delle categorie di edifici sopra menzionate sono forniti livelli minimi di isolamento acustico, come evidenziato nella tabella seguente:

Categoria	$D_{2m,nT,w}$	R_w	$L_{n,w}$
D	45	55	58
A,C	40	50	63
E	48	50	58
B,F,G	42	50	55

3.5. LA RESISTENZA AL FUOCO

L'allegato A del DPR 93/246 di recepimento della Direttiva 89/106 relativa ai prodotti da costruzione, riporta i requisiti essenziali ai quali devono rispondere le opere. I requisiti di sicurezza antincendio costituiscono parte essenziale della normativa sulle opere da costruzione e sono essenzialmente relativi alla configurazione degli edifici, alle prestazioni strutturali, ai componenti e ai materiali.

Per soddisfare la sicurezza in caso di incendio l'opera deve essere concepita e costruita in modo da garantire la stabilità degli elementi portanti per un tempo utile all'evacuazione dell'edificio mentre deve essere evitata la propagazione del fuoco e dei fumi tra locali e tra edifici.

Per raggiungere tali obiettivi, ai fini della sicurezza antincendio, è importante bilanciare in modo corretto misure di prevenzione e misure protezione attiva e passiva.

Le misure di protezione attiva, quali impianti di spegnimento, impianti di rilevazione ed evacuatori di fumo e calore (EFC), consentono di contrastare l'incendio non ancora completamente sviluppato.

Per quanto riguarda il ruolo dell'involucro, che non svolge funzioni importanti, e che quindi in caso di incendio non è chiamato a sostenere l'edificio durante l'evacuazione, deve però contribuire a limitare la produzione di fuoco e fumi; la scelta corretta dei materiali ignifughi o che non producono fumi tossici e dannosi per gli utenti, è alla base della progettazione antincendio, delineata anche dalle norme nazionali ed europee.

Per questo motivo, al fine di aiutare il progettista nella scelta dei materiali consoni alle strategie di prevenzione incendi, le normative europee e quelle nazionali dei singoli paesi, hanno effettuato una classificazione dei materiali edilizi in base ai loro grado di infiammabilità e sulla base della quantità e qualità dei fumi prodotti in caso di combustione.

L'impiego di materiali che permettano la diminuzione dei rischi di incendio e che si comportino in maniera adeguata durante lo sviluppo di tale fenomeno, unita ad una progettazione che tenga conto di tutte le norme antincendio previste dai regolamenti edilizi in vigore, consente di evitare che durante lo sviluppo di un incendio la situazione sia incontrollabile e di grande pericolo per gli abitanti e per gli operatori di soccorso. La seguente tabella riporta e confronta la classificazione italiana con quella europea riguardo i materiali edilizi sulla base della loro caratteristiche di comportamento e di resistenza al fuoco.

(DM 15 marzo 2005 modificato con DM 16 febbraio 2009).

Impiego a pavimento		
Classe italiana	Classe europea	
I	Classe 1	(A2FL-s1), (A2FL-s2), (BFL-s1), (BFL-s2), (CFL-s1)
II	Classe 2	(CFL-s2) (DFL-s1)
III	Classe 3	(DFL-s2)
Impiego a parete		
Classe italiana	Classe europea	
I	Classe 1	(A2-s1,d0), (A2-s2,d0), (A2-s3,d0), (A2-s1,d1), (A2-s2,d1), (A2-s3,d1), (B-s1,d0), (B-s2,d0), (B-s1,d1), (B-s2,d1)
II	Classe 2	(A2-s1,d2), (A2-s2,d2), (A2-s3,d2), (B-s3,d0), (B-s3,d1), (B-s1,d2), (B-s2,d2), (B-s3,d2), (C-s1,d0), (C-s2,d0), (C-s1,d1), (C-s2,d1)
III	Classe 3	(C-s3,d0), (C-s3,d1), (C-s1,d2), (C-s2,d2), (C-s3,d2), (D-s1,d0), (D-s2,d0), (D-s1,d1), (D-s2,d1)
Impiego a soffitto		
Classe italiana	Classe europea	
I	Classe 1	(A2-s1,d0), (A2-s2,d0), (A2-s3,d0), (A2-s1,d1), (A2-s2,d1), (A2-s3,d1), (B-s1,d0), (B-s2,d0), (B-s3,d0)
II	Classe 2	(B-s1,d1), (B-s2,d1), (B-s3,d1), (C-s1,d0), (C-s2,d0), (C-s3,d0)
III	Classe 3	(C-s1,d1) (C-s2,d1), (C-s3,d1), (D-s1,d0), (D-s2,d0)

RIFERIMENTI NORMATIVI:

Efficienza energetica: D.Lgs 192/2005, D.Lgs 311/2006, D.P.R. 59/2009 e D.M. 26.06.2009.

Norme di riferimento: UNI TS 11300 - 1/2/3/4; UNI EN ISO 6946; UNI EN ISO 13788.

Acustica in edilizia: Legge quadro n.447; D.P.C.M. 5.12.1997; Leggi comunitarie 2008 e 2009.

Norme di riferimento: UNI 11367; serie UNI EN 12354 ; Rapporto tecnico: UNI TR 11175; serie UNI EN ISO 140.

Marcatura CE: Resistenza meccanica

Antincendio e resistenza al fuoco: ENISO 1716, EN ISO 1182, EN ISO 9239-1, ENISO 11925-2, EN 1382,

DM 10 marzo2005, DM16 febbraio 2009