

## 6. ANALISI DELLE PRESTAZIONI DEGLI INVOLUCRI: CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Dopo aver analizzato gli aspetti architettonici e tecnologici dei 40 casi studio presentati, e dopo aver calcolato le prestazioni degli involucri, in questo capitolo si confronteranno i risultati prestazionali ottenuti cercando di definire le caratteristiche più determinanti per il raggiungimento di tali livelli prestazionali.

Attraverso l'analisi delle caratteristiche dei diversi materiali e delle diverse tecnologie costruttive reversibili utilizzate, si determineranno quindi quali sono i componenti e i materiali che influenzano maggiormente le prestazioni degli involucri edilizi; gli indici prestazionali sui quali si basa questo lavoro di confronto e analisi, e che hanno regolato tutto questo lavoro di tesi sono:

- la trasmittanza termica;
- l'inerzia termica;
- l'isolamento acustico;
- il controllo della condensa interstiziale;
- l'energia incorporata e la CO<sub>2</sub> emessa.

Per rendere più efficace e comprensivo questo confronto tra prestazioni degli involucri, si sono elaborati vari grafici nei quali sono riportati i risultati ottenuti dalle valutazioni precedenti e che serviranno come punto di partenza per la determinazione degli aspetti più importanti connessi ai vari indici prestazionali presi in considerazione.

### 6.1. LA TRASMITTANZA TERMICA

Come già ribadito nei capitoli precedenti, la trasmittanza termica rappresenta uno degli indici prestazionali più importanti dell'involucro edilizio poiché determina la capacità di isolare gli ambienti interni dell'edificio da quelli esterni, mediandone gli scambi di calore.

Nel primo grafico e nella relativa tabella sono riportati tutti i valori di trasmittanza calcolati per i diversi involucri oggetto di valutazione.

Da una prima analisi del grafico si nota immediatamente come le prestazioni degli involucri valutati siano molto diverse tra loro; ciò indica la possibilità di raggiungere qualsiasi valore di trasmittanza termica indipendentemente dalle tecnologie costruttive reversibili impiegate.

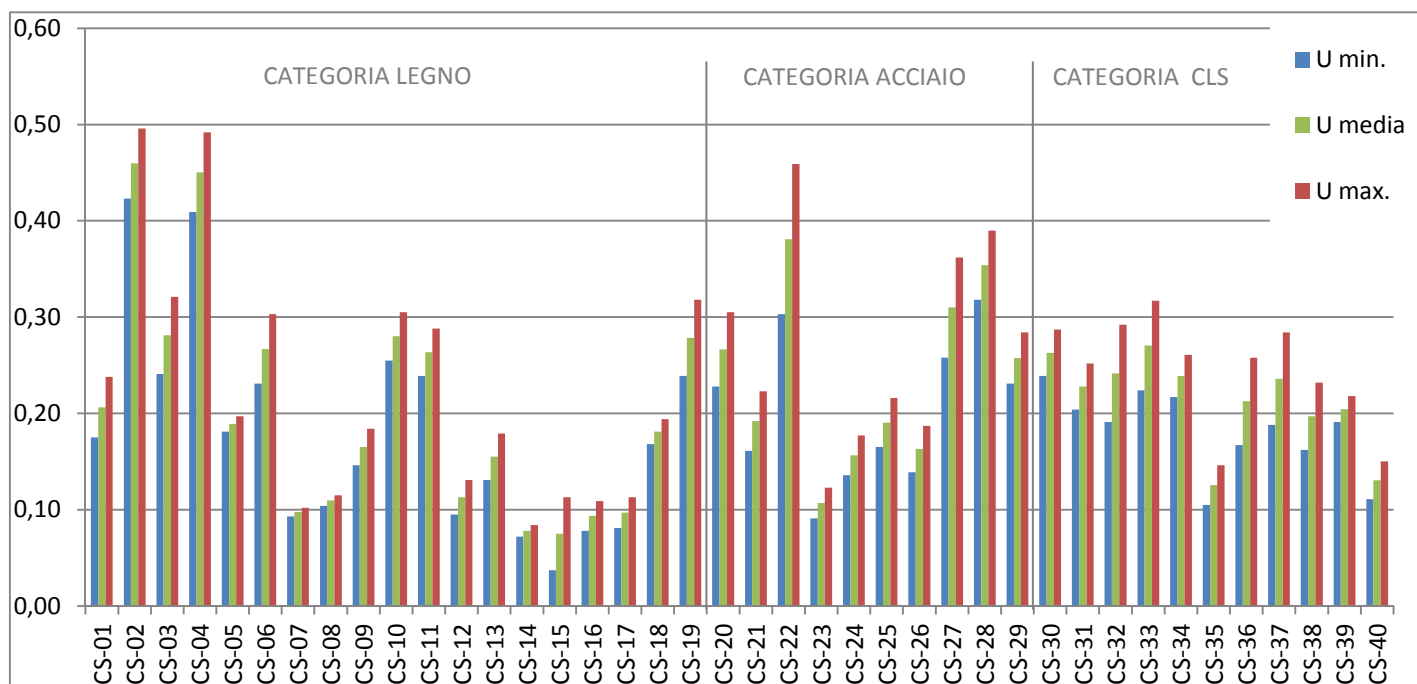
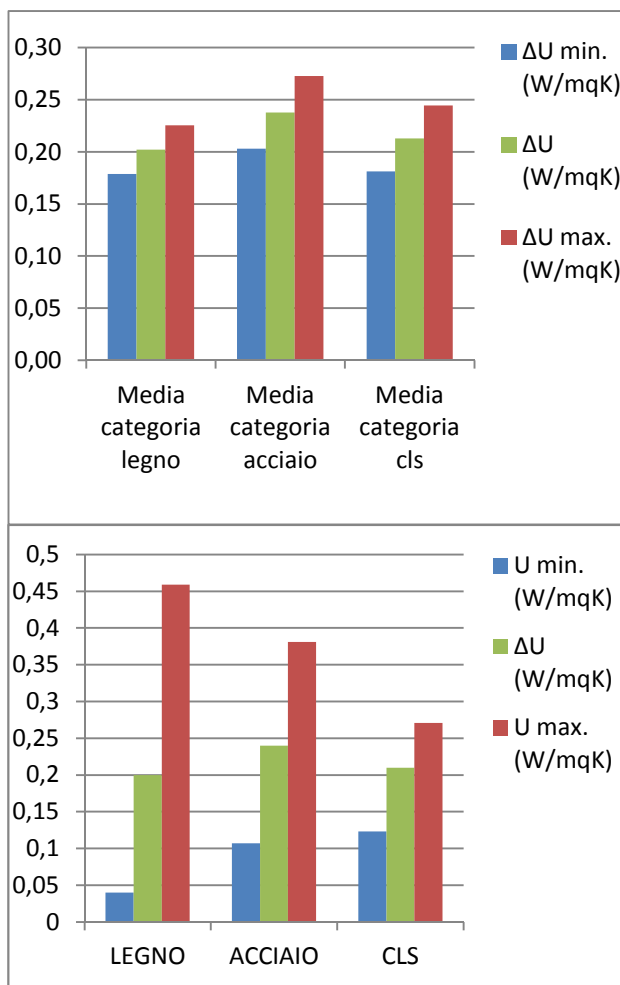


Grafico 1: Trasmittanze dei 40 casi studio

Ovviamente le diverse prestazioni sono determinate dalle scelte dei materiali di involucro e in particolar modo dalla scelta dei materiali isolanti che, per quanto riguarda questo indice prestazionale, svolgono un ruolo fondamentale; è importante quindi capire quale relazioni intercorrono tra i materiali isolanti utilizzati e le prestazioni raggiunte rapportandosi anche alle tecnologie costruttive impiegate. È opportuno quindi analizzare le stratigrafie dei singoli involucri per capire quali sono gli elementi che più influenzano le prestazioni dell'involucro in termini di trasmittanza termica. Prima di concentrarci però sui singoli casi e sui singoli materiali confronteremo le prestazioni medie delle singole categorie tecnologiche (categoria legno, categoria acciaio e categoria calcestruzzo), per valutare se esistono delle relazioni tra le tecnologie costruttive utilizzate e le prestazioni ottenute.

Nei due grafici seguenti troviamo il confronto prestazionale tra le categorie individuate; nel primo grafico si mettono a confronto le prestazioni medie delle varie categorie calcolate utilizzando i valori di trasmittanza degli involucri appartenenti alla categoria di riferimento ottenendo i valori medi minimi, i valori medi massimi e il valore medio assoluto per ogni categoria tecnologica. Nel secondo grafico, per ogni categoria, si riportano il valore minimo assoluto e il valore massimo assoluto confrontati con il valore medio della categoria. Dal primo grafico notiamo come le tre diverse categorie tecnologiche raggiungano livelli prestazionali molto simili tra loro; infatti i valori medi delle tre categorie rientrano tutti all'interno di uno stesso intervallo prestazionale (0,2-0,25 W/m<sup>2</sup>K) confermando il mancato legame tra tecnologia costruttiva e trasmittanza termica. Non sono quindi le diverse tecnologie a influenzare in maniera determinante questo indice prestazionale, e questa tesi viene confermata anche dall'andamento del secondo grafico nel quale notiamo un ampio divario tra le prestazioni minime assolute e le prestazioni massime assolute delle varie categorie, a conferma del fatto che per ogni soluzione tecnologica possiamo arrivare a qualsiasi livello di trasmittanza termica. Nel

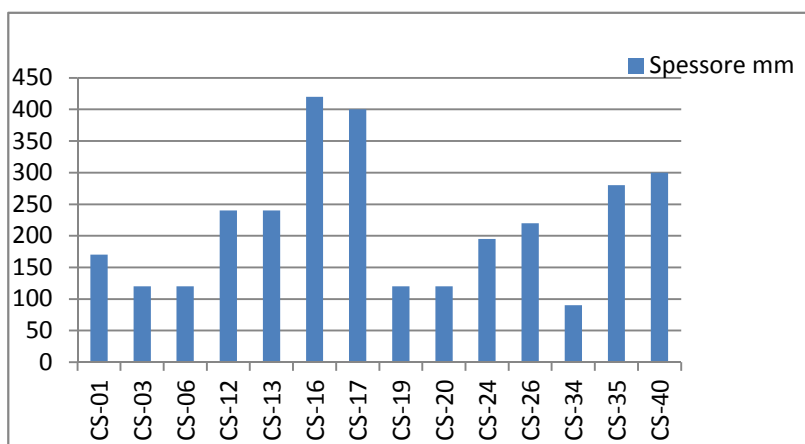
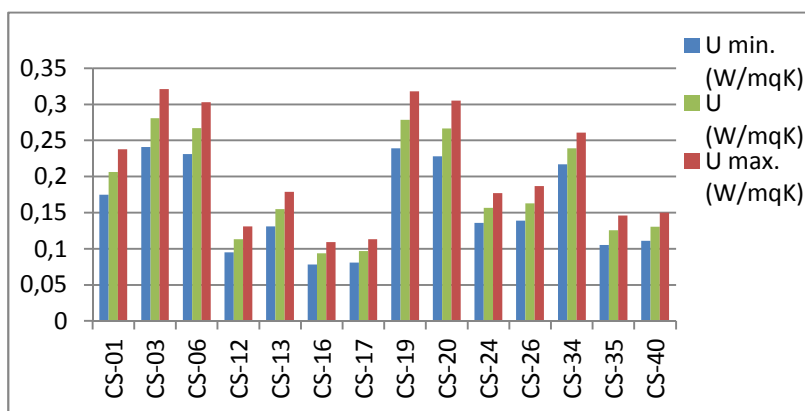
raggiungimento di valori prestazionali opportuni diventa quindi fondamentale il ruolo dei materiali isolanti, i quali grazie alle loro caratteristiche e alla possibilità di creare stratificazioni con materiali diversi e con svariate caratteristiche permettendo di elaborare soluzioni di involucro che possano rispondere alle esigenze di progetto. Focalizzando l'attenzione sui materiali isolanti impiegati nelle 40 soluzioni di involucro valutate, analizziamo i tre grafici seguenti, nei quali troviamo raggruppati i casi studio a seconda del materiale isolante utilizzato, rispettivamente abbiamo i casi studio che utilizzano lana di roccia nel primo grafico, quelli che impiegano EPS nel secondo, e cellulosa nel terzo grafico; utilizziamo questi tre materiali di riferimento essendo quelli più utilizzati nei casi studio analizzati. Anche da questi grafici si evincono risultati non omogenei, e infatti notiamo diversi livelli prestazionali anche tra involucri composti dallo stesso materiale; questa disomogeneità prestazionale scaturisce da tre importanti variabili, densità, spessore e conducibilità dei materiali isolanti. Certamente confrontando involucri con i medesimi spessori le caratteristiche prestazionali dei materiali (conducibilità



termica) diventano di primaria importanza, ma dovendo confrontare involucri diversi, occorre prestare particolare attenzione anche agli spessori dei vari strati di involucro.

L'influenza degli spessori degli strati di isolante è evidente se consideriamo per esempio il grafico dei casi studio che utilizzano la lana di roccia dove notiamo alcune soluzioni molto più

performanti rispetto ad altre: per esempio, il caso studio CS-03 raggiunge un valore medio di trasmittanza di 0,281 W/m<sup>2</sup>K utilizzando uno strato di lana di roccia di 120mm, mentre la soluzione di involucro impiegata nel CS-16 raggiunge il valore medio di trasmittanza di 0,094 W/m<sup>2</sup>K utilizzando 420mm di lana di roccia. Paragonando i grafici relativi alla trasmittanza e agli spessori degli involucri che impiegano lana di roccia si capisce la relazione tra lo spessore dello strato e la capacità di isolamento; inoltre se paragoniamo gli spessori e le relative trasmittanze di questi casi studio (involucri reversibili con lana di roccia) con una soluzione in muratura tradizionale composta da 300mm di blocchi in laterizio con cappotto esterno in lana di

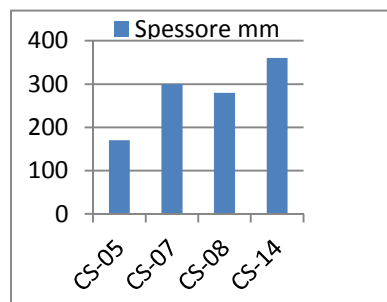
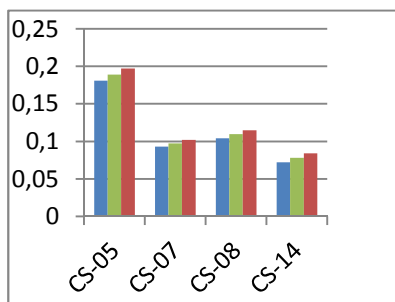


roccia da 60mm (spessore totale 360mm, trasmittanza termica 0,33 W/m<sup>2</sup>K) notiamo la capacità delle soluzioni costruttive di ottenere trasmittanze più basse impiegando strati isolanti meno spessi rispetto alle soluzioni tradizionali. Infatti dai grafici possiamo osservare come tutti gli involucri con uno spessore inferiore ai 300mm raggiungano trasmittanze non superiori a 0,30 W/m<sup>2</sup>K. La composizione di involucri meno ingombranti e più performanti è sicuramente la caratteristica principale dei sistemi costruttivi reversibili leggeri ed è uno dei punti di forza più evidenti di queste tecnologie nel confronto con le tecniche tradizionali in muratura.

Per ottenere un involucro molto isolante, quindi, è sufficiente utilizzare un buon materiale isolante conferendogli uno spessore adeguato all'interno della stratigrafia, confrontandosi con i requisiti del progetto che potrebbero limitare la libertà dimensionale dell'involucro.

Questo concetto seppur banale e ovvio è di primaria importanza soprattutto quando si impiegano

materiali che possono avere diversi spessori (pannelli di lana di roccia, fibra di legno, EPS ecc.); un discorso leggermente diverso può essere fatto per i materiali isolanti che vengono usati sempre con spessori importanti (cellulosa a fiocchi, balle di fieno ecc.) e che quindi



determinano degli indici prestazionali più simili tra diverse soluzioni che impiegano lo stesso materiale isolante, come appunto si nota dal grafico che raggruppa gli involucri che impiegano la

Grafico 4: Trasmittanze casi studio che impiegano lana di roccia

Grafico 5: Spessori di lana di roccia negli involucri presentati

Grafico 6: Trasmittanze casi studio che impiegano cellulosa a fiocchi e relativi spessori

cellulosa a fiocchi come strato isolante; da questo grafico si nota come le soluzioni con cellulosa raggiungano valori di trasmittanza molto buoni, ma se paragoniamo questi dati con il grafico sotto che riporta gli spessori dello strato isolante capiamo il legame tra queste prestazioni e lo spessore dello strato di cellulosa, che per le sue caratteristiche viene sempre usato in grandi spessori. Le caratteristiche dei materiali isolanti (densità, conducibilità termica) e i relativi spessori sono dunque i fattori più incidenti per quello che riguarda la trasmittanza termica dell'involucro, rendendo fondamentale la scelta dei materiali e la corretta progettazione della stratigrafia di involucro.

Osservando più attentamente i singoli casi studio analizziamo quelli che ottengono i risultati peggiori e migliori cercando poi di stabilire quali fattori determinano tali risultati.

Tra gli involucri meno performanti in assoluto troviamo:

- **CS-02** (Parigi), involucro con struttura lignea composto da 60mm di EPS e da un rivestimento esterno in legno. Spessore 191mm, Trasmittanza 0,459 W/m<sup>2</sup>K;
- **CS-04** (Amsterdam), involucro con struttura lignea composto da 70mm di EPS e da un rivestimento esterno in lamiera di titanio. Spessore 170mm, Trasmittanza 0,459 W/m<sup>2</sup>K;
- **CS-22** (Barcellona), involucro con struttura lignea composto da 80mm di xPS e da un rivestimento esterno in lamiera di alluminio. Spessore 115mm, Trasmittanza 0,381 W/m<sup>2</sup>K.

In tutti e tre gli esempi il fattore penalizzante è sicuramente lo spessore degli strati isolanti, non sufficienti a raggiungere prestazioni di isolamento adeguato, nonostante i materiali isolanti utilizzati siano molto performanti.

Tra le soluzioni più perforanti tra quelle valutate citiamo le 3 soluzioni che hanno ottenuto indici di trasmittanza termica migliori con esplicitati gli strati isolanti e i relativi spessori :

- **CS-14** (Bennau,CH), involucro con struttura lignea composto da 120mm lana di roccia + 360mm cellulosa in fiocchi, il rivestimento è composto da un vetro fotovoltaico. Spessore 604mm, Trasmittanza 0,078 W/m<sup>2</sup>K.
- **CS-15** (Rosheneim,D), involucro con struttura lignea composto un pannello VIP (sottovuoto) 46mm+140mm di lana di canapa, il rivestimento è composto da profili a Z in alluminio. Spessore 218mm, Trasmittanza 0,075 W/m<sup>2</sup>K.
- **CS-16** (Horsholm,DK), involucro con struttura lignea composto da tre pannelli di lana di roccia 170mm+170mm+80mm, il rivestimento è composto pannelli di legno. Spessore 514mm, Trasmittanza 0,094 W/m<sup>2</sup>K.

Nel primo esempio CS-14 abbiamo uno strato isolante complessivo di 480mm, per uno spessore di involucro totale di 604mm, che di conseguenza permette di raggiungere trasmittanze molto basse a discapito dell'ingombro dell'involucro che sottrae agli spazi interni una superficie notevole. Il medesimo discorso si può fare anche per il terzo esempio, CS-16, nel quale l'involucro composto da 320mm di lana di roccia raggiunge ottimi valori di trasmittanza.

Il caso studio CS-15 è di fatto quello che presenta l'involucro con la trasmittanza termica più bassa tra quelli valutati, raggiungendo 0,075 W/m<sup>2</sup>K; inoltre utilizzando per l'isolamento i

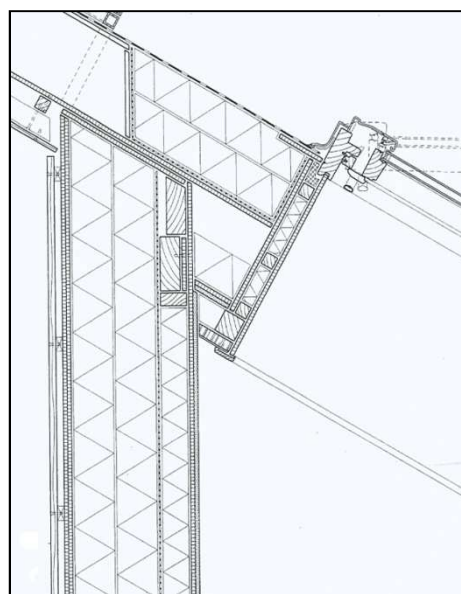
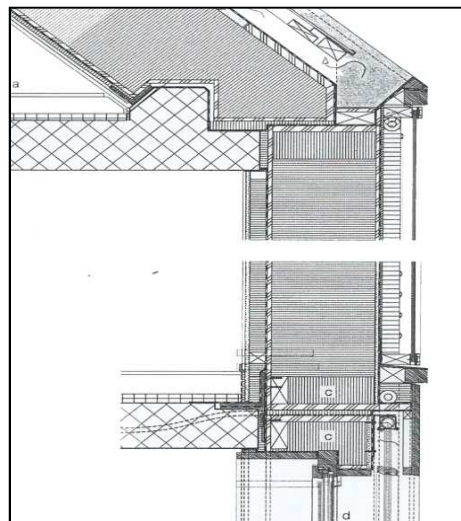
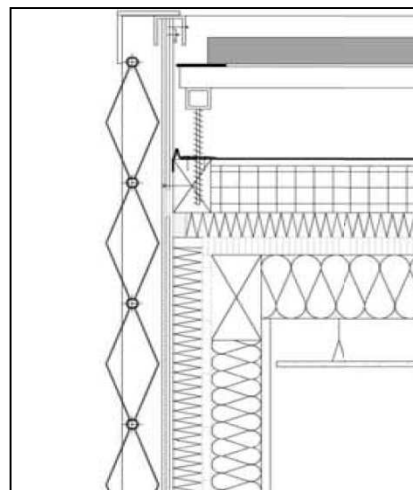


Immagine 31: Dettaglio dell'involucro del caso studio CS-14  
Immagine 32: Dettaglio dell'involucro del caso studio CS-16

pannelli sottovuoto ( $\lambda=0,002-0,008W/mK$ ), che raggiungono elevatissime prestazioni di isolamento termico con strati di spessore ridotto, unito ad uno strato di lana di canapa, questa soluzione di involucro raggiunge le trasmittanze più basse mantenendo minimo lo spessore (218mm). Abbiamo quindi un involucro con uno spessore minimo rispetto ad altre soluzioni leggere e sicuramente molto più ridotto rispetto alle murature tradizionali ma che raggiunge prestazioni di isolamento quasi esagerate.

Questa soluzione è sicuramente la migliore tra quelle analizzate se si considera l'indice prestazionale della trasmittanza ed il suo successo è dovuto all'impiego dei pannelli sottovuoto che sono tra i materiali isolanti più performanti tra quelli in commercio attualmente.



## 6.2. L'INERZIA TERMICA

L'inerzia termica è la capacità di un involucro di assorbire l'onda termica e che permette di ritardare il passaggio di quest'onda attraverso le chiusure di un edificio. Questa caratteristica consente di migliorare il comfort indoor sia nel periodo estivo, nel qual si ostacola il surriscaldamento degli ambienti interni, sia nel periodo invernale, durante il quale l'involucro può immagazzinare calore, proveniente dagli ambienti interni riscaldati, che verrà poi rimesso gradualmente durante i periodi nei quali il riscaldamento non è in funzione stabilizzando le temperature interne.

Analizzando le valutazioni prestazionali dei 40 casi studio per quanto riguarda lo sfasamento termico e l'attenuazione (indici prestazionali dell'inerzia termica) si possono fare diverse considerazioni.

In primo luogo, come per la trasmittanza, non si ottengono risultati prestazionali omogenei se si confrontano tutte le 40 soluzioni, confermando anche in questo caso la capacità delle tecnologie costruttive reversibili di raggiungere qualsiasi livello prestazionale richiesto per quanto riguarda l'isolamento termico.

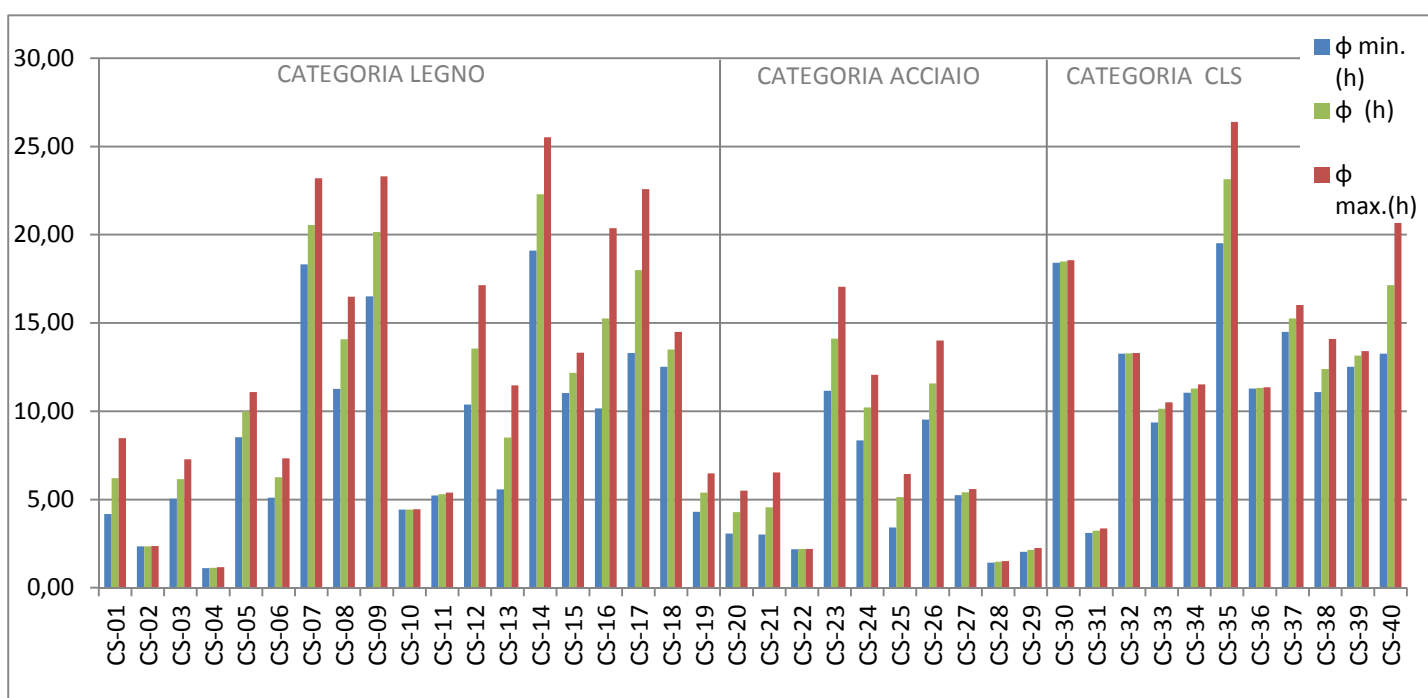


Immagine 33: Dettaglio dell'involucro del caso studio CS-15

Grafico 7: Sfasamento termico delle 40 soluzioni di involucro valutate



Nel primo grafico sono riportati gli indici di sfasamento termico di tutte le soluzioni di involucro valutate; se per quanto riguarda la trasmittanza, nonostante avessimo anche in quel caso prestazioni tutte diverse tra le diverse soluzioni di involucro, sono emersi indici prestazionali che nella quasi totalità dei casi potevano soddisfare i limiti normativi di molti paesi del centro Europa, per quanto riguarda l'inerzia termica notiamo molti indici prestazionali al di sotto degli standard prestazionali associabili ad una corretta progettazione degli involucri edilizi; questi esempi negativi ( CS-02, CS-04, CS-21, CS-22, CS-28, ecc.) si contrappongono a soluzioni estremamente performanti (CS-07, CS-09, CS-14, CS-30 ecc.).

Come già argomentato nei capitoli precedenti, molto spesso si tende ad identificare le tecnologie costruttive reversibili con le tecnologie di involucro leggere, che utilizzano solo strati di materiale isolante di bassa densità per la composizione delle chiusure verticali opache. La scarsa massa degli involucri leggeri comportano delle criticità per quanto riguarda la difesa dal surriscaldamento degli ambienti interni dei periodi caldi, ma fortunatamente come abbiamo già visto esistono sistemi di involucro reversibili che impiegano componenti massivi che garantiscono una buona inerzia termica.

L'analisi dei risultati prestazionali delle tre diverse categorie tecnologiche (legno, acciaio, calcestruzzo), fa emergere una serie di ulteriori considerazioni; in primo luogo occorre ricordare che le prime due categorie rappresentano le tecnologie costruttive leggere mentre la terza categoria rappresenta le tecnologie costruttive massive, definendo di fatti due scenari differenti. Questa differenza emerge dal confronto riportato dal grafico qui a fianco, nel quale si confrontano le medie prestazionali delle tre diverse categorie.

Da questo confronto emerge chiaramente una netta differenza di prestazioni tra le soluzioni leggere e le soluzioni massive; infatti la terza categoria, tecnologie in calcestruzzo, raggiunge valori prestazionali medi molto elevati, grazie alla densità dei materiali impiegati per comporre l'involucro. Da notare la differenza, forse eccessiva, tra le tecnologie in legno e le tecnologie in acciaio; sebbene possa essere solo una casualità dovuta alla scelta dei casi studio, è evidente il deficit prestazionale delle tecnologie in acciaio rispetto a quelle in legno, entrambi rappresentanti tecnologie costruttive leggere.

Questo divario è causa delle scelte dei materiali isolanti impiegati; è probabile che l'esaltazione dell'involucro leggero favorita dalle tecnologie in acciaio comporti delle scelte maggiormente rivolte a materiali isolanti a bassa densità (economici e facili da trasportare e da assemblare), riducendo gli spessori degli involucri ma non soddisfacendo gli standard prestazionali di inerzia termica.

Analizzando da vicino le stratigrafie valutate troviamo esempi di involucri reversibili poco performanti per quanto riguarda l'inerzia termica a sostegno di questa tesi:

- **CS-22** (Barcellona): involucro con struttura in acciaio composto da un elemento sandwich in lamiera di alluminio con 80mm di XPS all'interno e con una lastra di fibrocemento 14mm. Spessore 115mm, Sfasamento 2h20'
- **CS-29** (Milano): involucro composto da un rivestimento in vetro e da pannello sandwich in alluminio con 140mm di EPS. Spessore 169mm, Sfasamento 2h14'

In tutti e due i casi abbiamo dei valori medi di sfasamento orario prossimi alle due ore, totalmente insufficienti alle condizioni climatiche a cui devono far fronte, ma grazie alla leggerezza e alla facilità di montaggio degli elementi di involucro queste soluzioni garantiscono un notevole risparmio economico e necessitano di pochissimo tempo per la costruzione. Da

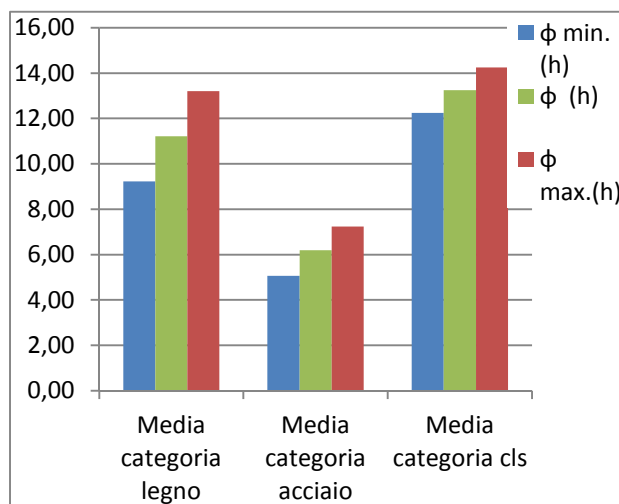


Grafico 8: Valori medi di sfasamento termico delle tre diverse categorie tecnologiche

notar inoltre che nella seconda soluzione abbiamo uno strato di EPS quasi due volte maggiore rispetto al caso precedente, ma nonostante questo raggiunge valori di sfasamento inferiori; questo perché nell'involucro CS-22 è presente una lastra di fibrocemento di 14mm che apporta inerzia termica alla stratigrafia.

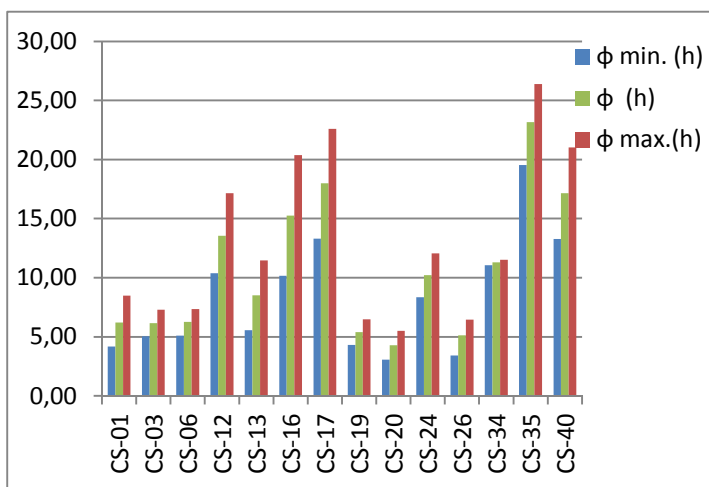
Nonostante i valori medi di sfasamento delle tre categorie evidenziano come maggiormente penalizzate le soluzioni tecnologiche in acciaio, la soluzione tecnologica reversibile che ottiene il valore di sfasamento minore in assoluto appartiene alle soluzioni tecnologiche in legno:

- **CS-04 (Amsterdam):** involucro con struttura lignea composto da 70mm diEPS con rivestimento esterno in lamiera di zinco titanio. Spessore 170mm, Sfasamento 1h13'

In questo caso le scarse prestazioni sono dovute all'impiego di un materiale isolante a bassa densità con uno spessore esiguo.

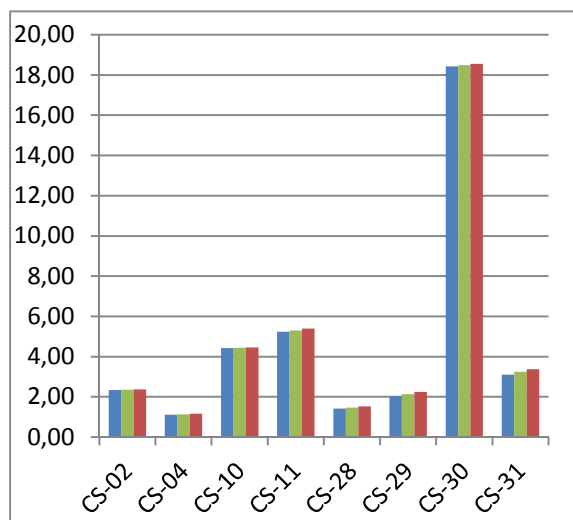
Come per la trasmittanza quindi, le caratteristiche degli strati isolanti e i relativi spessori diventano fondamentali.

La differenza di densità tra i materiali determina variazioni prestazionali che a volte possono essere di una certa rilevanza; è quindi importante non solo la scelta del tipo di materiale isolante ma anche la sua densità che può variare da prodotto a prodotto. Come abbiamo già visto quando abbiamo parlato delle caratteristiche dei materiali isolanti, questi possono avere densità che variano anche del 1000% ( esempio lana di vetro 20-200 kg/m<sup>3</sup>, fibra di legno 45-300 kg/m<sup>3</sup>,ecc.).



La variazione delle densità dei materiali isolanti e le variazioni prestazionali che determinano sono apprezzabili nei grafici qui a fianco che confrontano i casi studio raggruppati a seconda del materiale isolante che utilizzano, rispettivamente le soluzioni con lana di roccia e le soluzioni con EPS.

Oltre che alle differenze di prestazione tra i due raggruppamenti va notato il diverso grado di variabilità della densità dei due diversi materiali: se per le soluzioni con lana di roccia si evidenziano dei notevoli intervalli prestazionali tra soluzioni a minima densità e soluzioni a massima densità (CS-17 13h-22h), per le soluzioni che utilizzano EPS abbiamo degli intervalli prestazionali ininfluenti. Questo è determinato appunto dalla differente variabilità della densità dei due materiali isolanti.



Per quanto riguarda le soluzioni che utilizzano tecnologie in calcestruzzo, invece, l'influenza della densità degli strati isolanti, anche se determina comunque un intervallo prestazionale, potrebbe non essere così determinante, essendo gli elementi massivi di rivestimento e di tamponamento a conferire inerzia termica all'involucro,.

Occorre anche evidenziare che tra le 5 soluzioni più performanti tra quelle analizzate 3 appartengono alla categoria delle tecnologie leggere in legno:

- **CS-07(Bizau,A):** involucro con struttura lignea composto da 300mm di cellulosa in fiocchi con rivestimento in assi di legno. Spessore 528mm, Sfasamento 20h55';

- **CS-09**(Trento): involucro con struttura lignea composto da 140mm di fibra di legno e 50mm di lana di roccia con rivestimenti in legno di larice. Spessore 423mm, Sfasamento 20h15’;
- **CS-14** Bannau,CH), involucro con struttura lignea composto da 120mm lana di roccia + 360mm cellulosa in fiocchi, il rivestimento è composto da un vetro fotovoltaico. Spessore 604mm, Sfasamento 19h10’;

Sebbene queste siano soluzioni che impiegano per i tamponamenti quasi esclusivamente materiali isolanti raggiungo valori di sfasamento e attenuazione molto importanti, grazie agli elevati spessori e alle caratteristiche dei materiali, come appunto la densità, ma anche il calore specifico che ha anch’esso un ruolo nel determinare le prestazioni relative all’inerzia termica dell’involucro.

Se confrontiamo i grafici relativi ai valori di sfasamento delle soluzioni migliori e peggiori con i grafici dei relativi spessori di involucro si ritrova il legame tra prestazione e spessore.

Paragonando questi dati per quanto riguarda i tre esempi più performanti occorre fare alcune importanti osservazioni. Il primo e il terzo esempio (CS-07,CS-14) impiegano come isolante i

fiocchi di cellulosa costituendo uno spesso strato isolante rispettivamente di 300mm e di 480mm(di cui 120mm di lana di roccia), ma ottengono delle prestazioni molto vicine a quelle dell’involucro della soluzione CS-09 che utilizza uno strato isolante di soli 190mm (140mm fibra di legno+50mm lana di roccia). Questa disparità è conseguenza di due fattori: la densità della fibra di legno ( $45-300 \text{ kg/m}^3$ ) è maggiore rispetto a quella della cellulosa ( $25-65 \text{ kg/m}^3$ ) e anche il calore specifico della fibra di legno ( $2100 \text{ J/kgK}$ ) supera anche se di poco quello della cellulosa ( $1900 \text{ J/kgK}$ ).

Ciò ribadisce l’importanza della densità dei materiali isolanti impiegati permettendo un risparmio in termini di superfici, diminuendo l’ingombro dell’involucro.

Ovviamente le soluzioni massive utilizzando elementi ad alta densità possono impiegare minori quantità di materiale isolante per soddisfare le esigenze di inerzia termica, e per questo motivo come abbiamo già osservato ottengono prestazioni migliori. A conferma di questo la soluzione che ha ottenuti i valori di sfasamento più elevati appartiene alle tecnologie massive in calcestruzzo:

- **CS-35** (Marburgo,D), involucro composto da un guscio esterno di calcestruzzo di 120mm con 310mm di lana di roccia e uno strato di 300mm in calcestruzzo (setto portante) Spessore 749 mm, Sfasamento 23h15’.

In questa soluzione troviamo tutte le caratteristiche utili per garantire alte prestazioni di inerzia termica: materiali di rivestimento massivi con alte densità, materiali isolanti di alta densità, e spessori elevati degli strati.

È interessante anche mettere a confronto gli indici prestazionali e gli spessori delle soluzioni reversibili leggere più performanti (CS-07,CS-09,CS14) con quelli delle soluzioni reversibili massive (CS-30,CS-35,CS37) e massive tradizionali; per la muratura tradizionale consideriamo

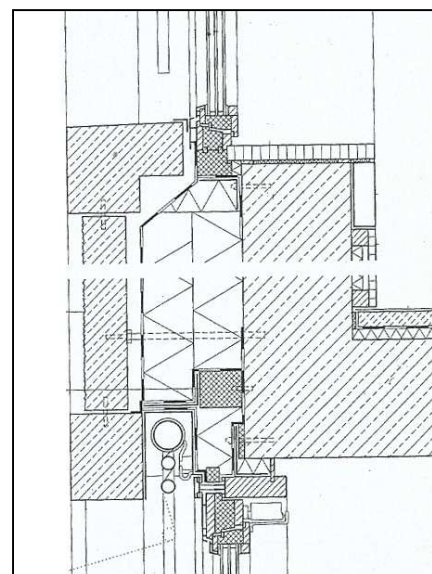
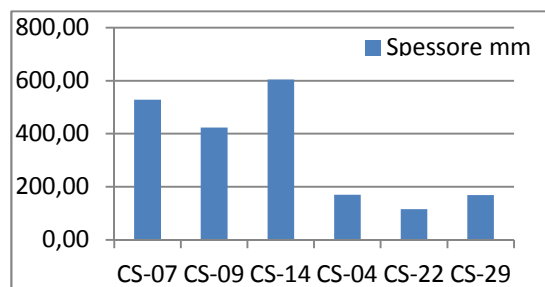
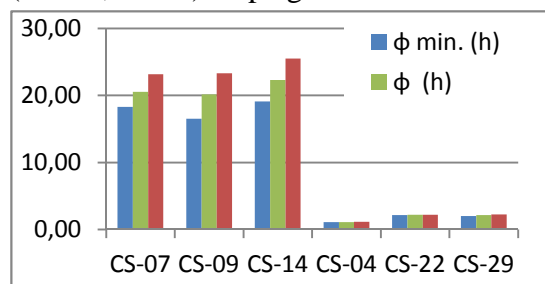


Grafico 11 Valori di sfasamento termico delle soluzioni migliori e peggiori

Grafico 12 Spessori degli involucri delle soluzioni migliori e peggiori

Immagine 34: Dettaglio dell’involucro del caso studio CS-35



una stratigrafia (MT1) composta da 300mm di blocchi in laterizio intonacati all'interno con un cappotto esterno in fibra di legno da 80mm (spessore totale 400mm, sfasamento 16h39'), e un'altra soluzione (MT2) sempre in blocchi laterizi da 300mm con cappotto esterno in lana di roccia da 60mm (spessore totale 380mm, sfasamento 13h56'). Possiamo notare come le soluzioni leggere reversibili raggiungano prestazioni equivalenti a quelle ottenute dalle soluzioni reversibili massive nonostante gli involucri abbiano spessori minori. In particolare la soluzione CS-09 impiegando la fibra di legno ottiene valori molto interessanti. Le murature tradizionali raggiungono valori di sfasamento buoni utilizzando spessori di involucro non eccessivamente elevati e comunque minori rispetto alle soluzioni massive reversibili che impiegano elementi in calcestruzzo; questo pone a favore delle tecnologie tradizionali che in termini di inerzia termica sono certamente vantaggiose.

I valori di sfasamento degli involucri reversibili massivi non giustificano gli elevati spessori e non rendono queste soluzioni tecnologiche particolarmente vantaggiose rispetto alle soluzioni leggere presentate. Occorre tener presente che la capacità dell'involucro di isolare gli ambienti esterni è determinata sia dalla inerzia termica ma anche dalla trasmittanza e pertanto occorre capire quali sono le relazioni tra i due indici prestazionali; essendo entrambi dipendenti dalle densità del materiale, generalmente, all'aumentare o al diminuire della densità di un materiale, variano anche gli indici di trasmittanza e di sfasamento e attenuazione. Aumentando la densità aumenta lo sfasamento ma aumenta anche la trasmittanza e viceversa. Occorre trovare quindi l'equilibrio tra densità, trasmittanza e inerzia termica. Se paragoniamo i casi studio migliori per ogni indice prestazionale, cioè quelli che hanno raggiunto valori di trasmittanza bassi e le soluzioni che hanno raggiunto i migliori indici di inerzia termica, notiamo che non in tutti i casi coincidono. Dove abbiamo trasmittanze minori abbiamo anche valori di sfasamento più bassi; una soluzione intermedia è rappresentata dal caso studio CS-14 che ottiene valori maggiori per entrambi gli indici prestazionali. L'unione di uno strato in lana di roccia di 60mm ad uno strato di cellulosa di 360mm consente a questo involucro di raggiungere tali

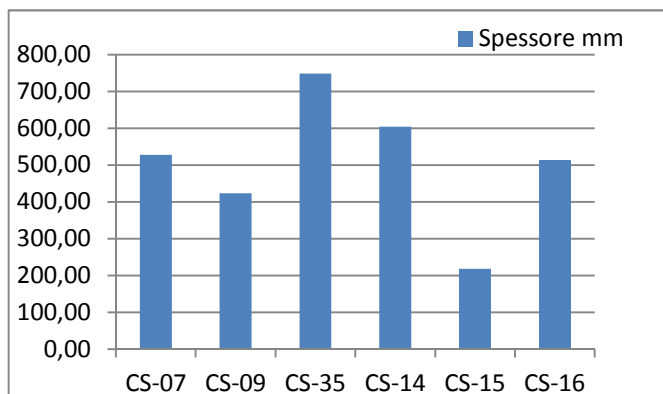
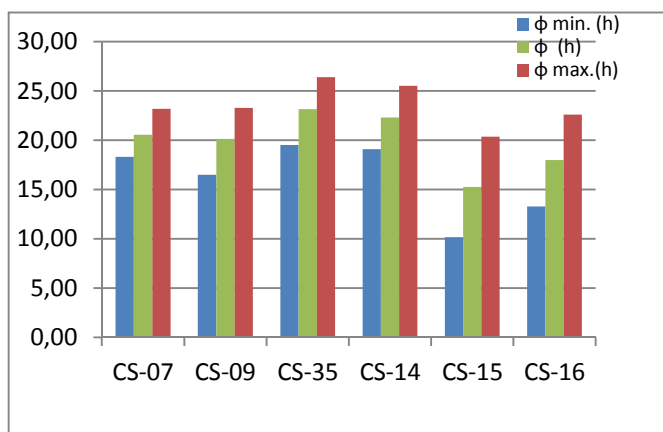
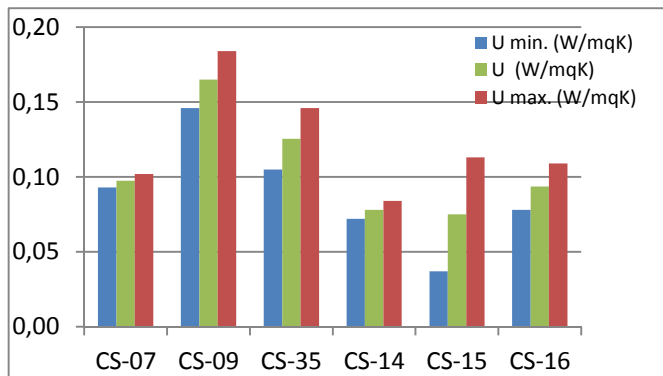
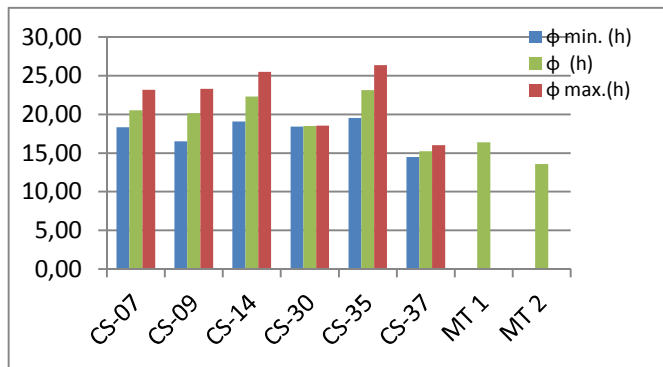


Grafico 13: Vonfronto tra i valori di sfasamento delle migliori soluzioni reversibili con due soluzioni tradizionali

Grafico 14 : Valori di trasmittanza delle soluzioni ritenute più performanti

Grafico 15 : Valori di sfasamento delle soluzioni ritenute più performanti

Grafico 16 : Spessori degli involucri delle soluzioni ritenute più performanti

risultati. La soluzione CS-15 è sicuramente la più interessante perché mantenendo uno spessore dell'involucro minimo (218mm) raggiunge valori molto buoni per entrambi gli indici prestazionali di isolamento e inerzia termica, grazie ad una stratigrafia che unisce pannelli sottovuoto a pannelli di legno intervallati a strati di lana di canapa, che come la fibra di legno conferisce isolamento ed inerzia termica. Dal confronto tra trasmittanza e sfasamento possiamo valutare le soluzioni di involucro più performanti e che possano rispondere ai requisiti di isolamento termico; tra quelle valutate le soluzioni che soddisfano maggiormente entrambe le esigenze prestazionali sono:

- **CS-07**(Bizau,A): involucro con struttura lignea composto da 300mm di cellulosa in fiocchi con rivestimento in assi di legno. Spessore 528mm, Sfasamento 20h55' ;
- **CS-09**(Trento): involucro con struttura lignea composto da 140mm di fibra di legno e 50mm di lana di roccia con rivestimenti in legno di larice. Spessore 423mm, Sfasamento 20h15' ;
- **CS-14** (Bennau,CH), involucro con struttura lignea composto da 120mm lana di roccia + 360mm cellulosa in fiocchi, il rivestimento è composto da un vetro fotovoltaico. Spessore 604mm, Sfasamento 19h10' ;
- **CS-35** (Marburgo,D), involucro composto da un guscio esterno di calcestruzzo di 120mm con 310mm di lana di roccia e uno strato di 300mm in calcestruzzo (setto portante) Spessore 749 mm, Sfasamento 23h15' .

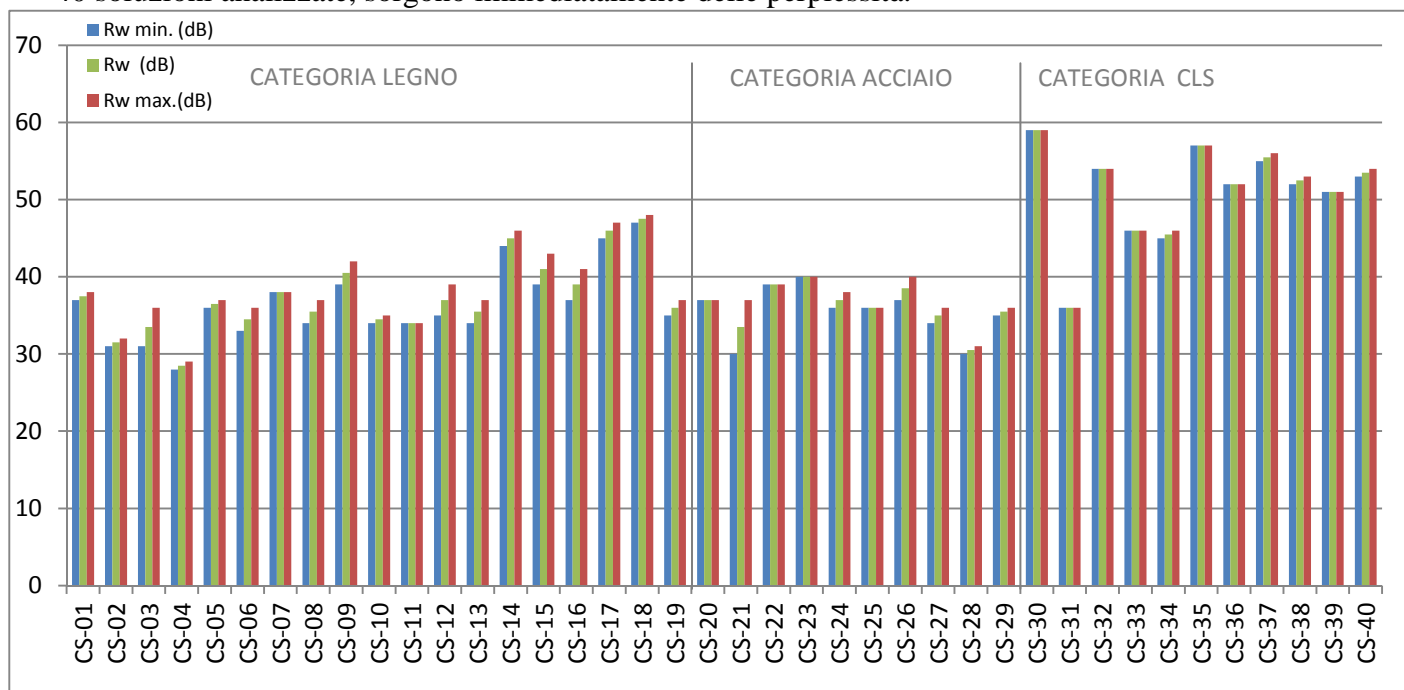
Sarà necessario valutare se queste soluzioni soddisfino anche i requisiti di isolamento acustico e sostenibilità ambientale che verranno trattati nelle parti seguenti.

### 6.3. L'ISOLAMENTO ACUSTICO

Come per l'inerzia termica, anche per l'isolamento acustico la densità dei materiali ha un ruolo fondamentale, anche se le leggi fisiche che regolano la trasmissione del suono non determinano intervalli prestazionali molto ampi al variare della densità dei vari materiali isolanti.

Inoltre l'isolamento acustico è sicuramente l'aspetto più critico delle tecnologie costruttive reversibili, in particolar modo per le soluzioni leggere che non possono contare su un elevata massa dell'involucro.

Se consideriamo come valore prestazionale limite quello definito dalle normative edilizie italiane, di 40dB, osservando il grafico seguente che riporta i valori di isolamento acustico delle 40 soluzioni analizzate, sorgono immediatamente delle perplessità.



Prendendo in considerazione i valori medi di isolamento acustico delle diverse soluzioni notiamo solo sei casi in cui si raggiungono i 40dB di fono isolamento, se si escludono le soluzioni massive che sono nettamente più performanti rispetto alle soluzioni leggere come si evidenzia oltremodo nel grafico seguente che confronta i valori prestazionali medi delle tre categorie tecnologiche.

Da questo confronto si evidenzia una differenza colossale tra le prestazioni medie delle soluzioni massive (calcestruzzo) e tra quelle delle soluzioni leggere (legno, acciaio), un “gap” di più di 10dB che equivale a una differenza di fonoisolamento del 800%. Va evidenziato che, a ciò che si era visto per la trasmittanza e l’inerzia termica, gli intervalli tra soluzioni con materiali a densità minima e soluzioni con materiali a densità massima sono quasi ininfluenti. Questo perché per le leggi della fisica ad un aumento di 3dB corrisponde un raddoppio dell’energia necessaria per produrre tale suono, e lo stesso ragionamento è valido per l’isolamento acustico; proprio per questo motivo la variabilità della densità dei materiali isolanti non incide sulle prestazioni acustiche come accadeva sulle prestazioni di inerzia termica.

Il materiale isolante perde in questo caso di importanza e di efficacia creando una evidente criticità prestazionale nelle tecnologie reversibili leggere; sebbene si possa raggiungere standard adeguati di isolamento acustico utilizzando soluzioni leggere per edifici residenziali, diventa già più complicato se non impossibile, raggiungere alti livelli di isolamento acustico senza utilizzare soluzioni massive.

Potrebbe essere necessario inserire strati di materiali massivi per raggiungere livelli di isolamento acustico adeguato se si utilizzano tecnologie costruttive reversibili leggere.

Tra le soluzioni valutate sviluppate con tecnologie leggere quelle che si distinguono positivamente sono:

- **CS-14:** involucro composto da un rivestimento in vetro fotovoltaico e da 360mm di cellulosa a fiocchi e 120mm di lana di roccia con alternanza di pannelli di legno(2) e lastre di cartongesso(2).  $R_w$  45dB
- **CS-17:** involucro composto 400mm lana di roccia con strato in legno e doppio pannello in fibrocemento con rivestimento con vetri fotovoltaici;  $R_w$  46dB
- **CS-18:** involucro composto da 140mm di cellulosa e rivestimento con pannello prefabbricato in laterizi pieni a vista.  $R_w$  47,5dB

Questi tre soluzioni di involucro reversibile utilizzano materiali isolanti per i tamponamenti ma sono presenti nelle stratigrafie alcuni elementi massivi che migliorano l’assorbimento acustico.

Nel primo esempio, CS-14, il vetro fotovoltaico e i grandi spessori degli strati isolanti alternati a pannelli in legno e lastre di cartongesso consentono di arrivare ad un valore di isolamento acustico medio di 45dB; nel CS-17 invece otteniamo un valore di 46dB grazie ai vetri fotovoltaici e ai pannelli in fibrocemento, mentre nell’ultimo esempio viene collocato un

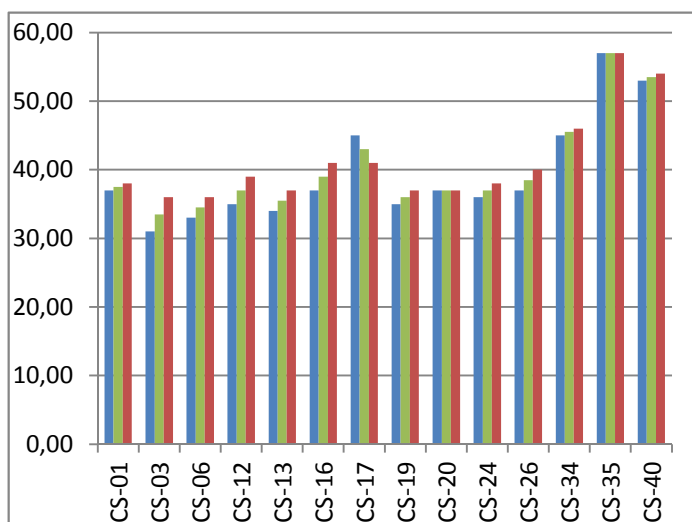
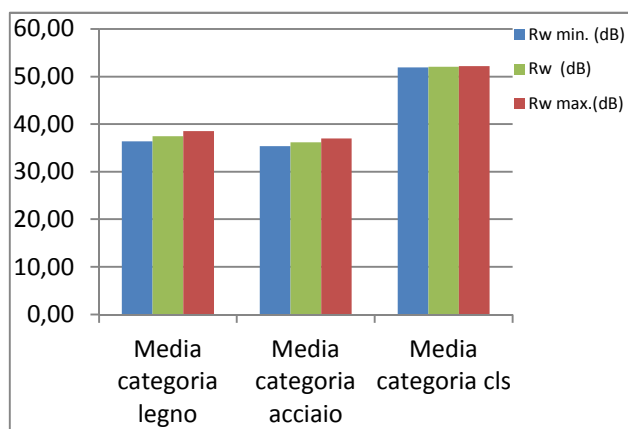


Grafico 18: Valori di isolamento acustico delle 40 soluzioni valutate

Grafico 19: Valori di isolamento acustico delle soluzioni che impiegano lana di roccia

pannello prefabbricato in laterizi spesso 90mm che permette di arrivare a un valore medio di isolamento acustico di 47,5dB.

Queste soluzioni “ibride” uniscono i vantaggi di leggerezza e isolamento termico propri delle tecnologie leggere ai vantaggi in termini di isolamento acustico delle tecnologie massive, raggiungendo così alti livelli prestazionali in entrambi i campi suggerendo una terza declinazione tecnologica “ibrida” sia leggera che massiva.

Certamente le soluzioni massive raggiungono più facilmente valori di isolamento acustico elevato come possiamo vedere nei grafici precedenti. Tra tutte quelle valutate le soluzioni che si distinguono per i più elevati valori di isolamento acustico sono:

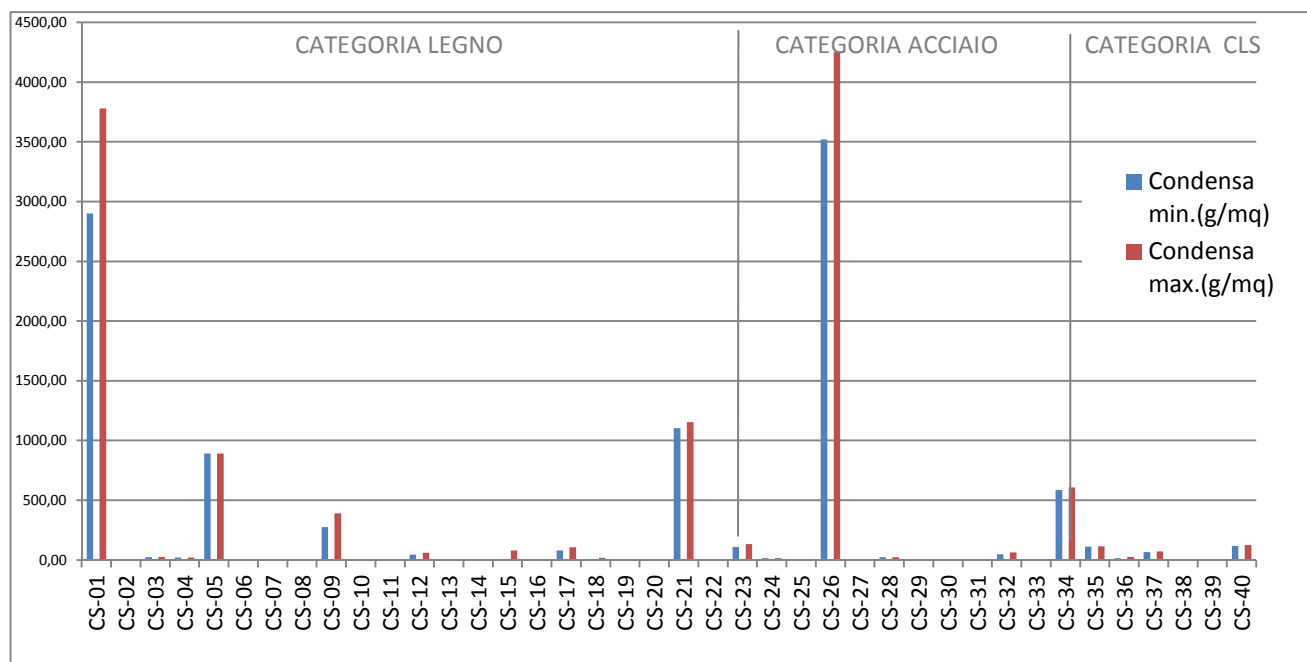
- **CS-34**(Zurigo) involucro composto da un guscio esterno in calcestruzzo con 90mm di lana di roccia e una lastra di calcio silicato 125mm.  $R_w$  45,5 dB;
- **CS-35** (Marburgo,D), involucro composto da un guscio esterno di calcestruzzo di 120mm con 310mm di lana di roccia e uno strato di 300mm in calcestruzzo (setto portante)  $R_w$  57dB
- **CS-40** (Marburgo,D), involucro composto da un guscio esterno di calcestruzzo di 80mm con 300mm di lana di roccia e uno strato di 200mm in calcestruzzo (setto portante)  $R_w$  53,5 dB.

Sfruttando gli strati di calcestruzzo queste soluzioni raggiungono livelli di isolamento acustico più che soddisfacenti assicurando gli standard di comfort interno per quel che riguarda la difesa dai rumori esterni.

#### 6.4 CONTROLLO DELLA CONDENZA INTERSTIZIALE

Ora andremo ad analizzare il comportamento dei 40 involucri valutati per quanto riguarda il controllo della formazione di condensa interstiziale, che nelle nostre valutazioni è espresso da un indice prestazionale che quantifica la condensa che si forma all’interno dell’involucro.

Prima però occorre fare alcune premesse importanti: in primo luogo questo indice prestazionale non può essere considerato “assoluto” come possono essere considerati invece quelli relativi



all’isolamento termico e acustico, ma è un indice che è determinato dal rapporto tra le caratteristiche dell’involucro e le condizioni climatiche in cui è inserito ed è quindi valido solo per l’area climatica in cui è stato collocato e valutato. Ciò significa che un involucro si comporta diversamente in un clima rispetto che in un altro e, pertanto, se presenta formazione di condensa

in un clima freddo e umido, non è detto che sia lo stesso in un clima caldo secco o viceversa. Di conseguenza per questo indice prestazionale non possiamo effettuare dei confronti diretti tra i diversi involucri o tra le tre categorie tecnologiche; possiamo però indagare il perché si forma la condensa o perché non si forma, individuando quali materiali possono aiutare a controllare il fenomeno. Nel grafico precedente sono riportati i valori di condensa interstiziale relativi ai 40 involucri valutati.

Si nota immediatamente che nella maggior parte dei casi non si ha formazione di condensa interstiziale, mentre per alcune soluzioni si hanno valori altissimi.

La spiegazione è molto semplice e riguarda la disposizione di strati materiali totalmente impermeabili al vapore che se collocati correttamente all'interno della stratigrafia possono fermare il passaggio del vapore all'interno dell'involucro. Nella quasi totalità dei casi presentati in cui non si ha formazione di condensa interstiziale è stata collocata una barriera al vapore sul lato interno dell'involucro a protezione degli strati isolanti; questa barriera, che può essere un foglio di alluminio o di materiali plastici impermeabili (polietilene) consente di bloccare il flusso di vapore che porta umidità all'interno dell'involucro.

In altri casi però, non si registra la formazione di condensa interstiziale nonostante l'assenza di una apposita barriera al vapore; questo accade poiché all'interno della stratigrafia sono stati collocati elementi di tamponamento composti da materiali impermeabili al vapore. Nelle soluzioni massive CS-36 e CS-37 gli elementi di involucro prefabbricati in calcestruzzo armato fermano il vapore sulla faccia interna dell'involucro proteggendo lo strato interno di isolante.

In altri casi, appartenenti alle tecnologie leggere, utilizzando pannelli sandwich composti da lamiere di acciaio e alluminio (CS-29) riempiti con materiali isolanti bloccano il vapore non permettendo la formazione di condensa interstiziale. Per la loro composizione la maggior parte dei materiali isolanti è permeabile al vapore, ma esistono anche materiali isolanti poco permeabili (fibra di legno mineralizzata, XPS) e materiali totalmente impermeabili (polietilene espanso estruso, vetro cellulare espanso) che possono contrastare il flusso di vapore acqueo.

Nelle soluzioni in cui invece abbiamo delle grandi quantità di condensa interstiziale, non troviamo alcuna barriera al vapore e pertanto le differenze di temperatura e umidità tra gli ambienti interni e quelli esterni porta alla formazione di condensa interstiziale in corrispondenza degli strati isolanti permeabili al vapore e sensibili all'umidità.

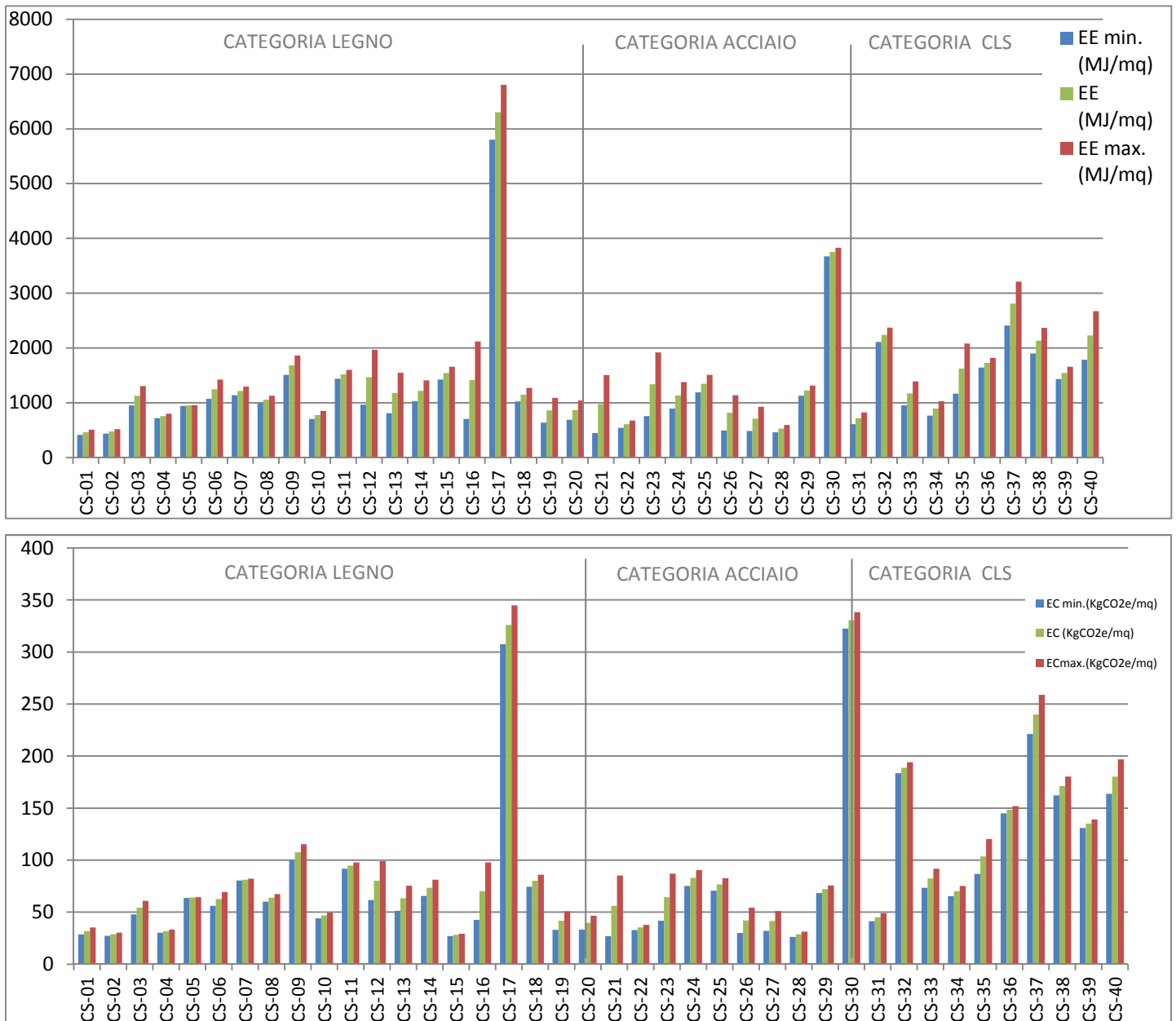
È chiaro che la barriera al vapore (o delle componenti di involucro affini) rappresenta uno strato di primaria importanza per le soluzioni di involucro reversibili, soprattutto quando si utilizzano involucri leggeri molto isolanti e in climi molto freddi; dal controllo delle condense interstiziali dipendono sia la durata che l'efficienza prestazionale dell'involucro ed è quindi necessaria un'attenta progettazione ed una scrupolosa verifica a riguardo.



## 6.5 ENERGIA INCORPORATA E CO<sub>2</sub> EMESSA

Gli ultimi indici prestazionali che andremo ad analizzare riguardano la sostenibilità ambientale e sono l'energia incorporata (EE) e la CO<sub>2</sub> incorporata (EC), ovvero la quantità di energia spesa e la quantità di anidride carbonica emessa per la produzione dei materiali che compongono gli involucri.

I primi due grafici riportano i valori prestazionali delle 40 soluzioni valutate per quanto riguarda rispettivamente l'energia incorporata e la CO<sub>2</sub> emessa.



Si nota subito che i due grafici hanno un andamento molto simile tra loro che presenta però alcune differenze di cui però tratteremo in seguito. Prima bisogna osservare, come per i primi indici prestazionali trattati, che la varietà delle prestazioni tra i diversi involucri analizzati sottolinea la possibilità di creare involucri “più (o meno)” sostenibili da un punto di vista ambientale; inoltre va ricordato che le quantità di materiale utilizzato influenzano non solo gli indici di energia incorporata e di CO<sub>2</sub> emessa ma anche gli altri indici prestazionali trattati in precedenza, e che è quindi fondamentale tener presente tutti questi 5 indici prestazionali contemporaneamente.

Grafico 21: Valori di energia incorporata delle 40 soluzioni valutate.

Grafico 22: Valori di CO<sub>2</sub> incorporata delle 40 soluzioni valutate.

Ad esclusione di qualche picco nella parte sinistra dei grafici, osserviamo valori maggiori nella parte destra nella quale sono collocate le soluzioni tecnologiche massive. Il peso maggiore degli elementi in calcestruzzo o in altri materiali massivi rispetto alle soluzioni leggere determina chiaramente la necessità di maggior energia per la loro produzione con la conseguente emissione di maggiori quantità di CO<sub>2</sub>.

Confrontando tra loro le tre categorie tecnologiche nei seguenti grafici notiamo ancor più chiaramente i più alti indici di EE della categoria tecnologica che impiega il calcestruzzo.

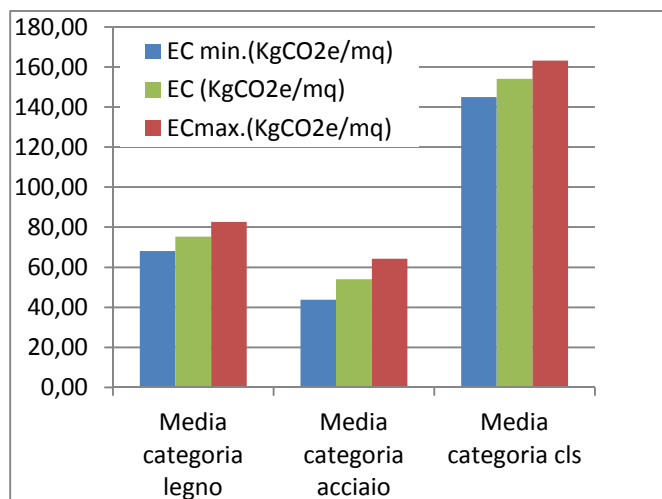
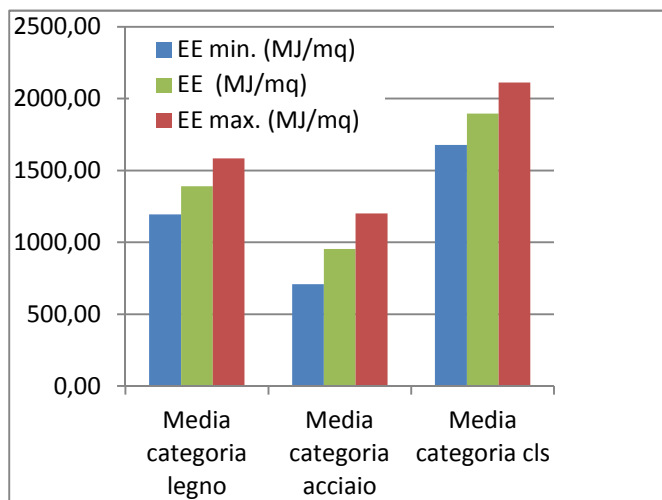
Il divario cresce maggiormente se si considera la CO<sub>2</sub> emessa, essendo il processo di produzione del calcestruzzo particolarmente impattante da questo punto di vista; infatti se la differenza tra soluzioni leggere e quelle massive in termini di energia incorporata è circa del 40% a favore delle soluzioni massive, per quanto riguarda la CO<sub>2</sub> emessa il divario sale al 100%. Inoltre l'indice di energia incorporata nelle tecnologie leggere è determinato quasi esclusivamente dai materiali isolanti che hanno densità e peso minore rispetto ad altri materiali, mentre nelle soluzioni massive l'indice di energia incorporata viene influenzato anche dai materiali di rivestimento/tamponamento massivi in calcestruzzo e non solo dai materiali isolanti. Possiamo quindi asserire che le tecnologie costruttive reversibili massive hanno mediamente indici di EE e di EC decisamente più alti rispetto alle tecnologie leggere.

Analizziamo ora i casi più interessanti tra i 40 valutati, prendendo in considerazione gli involucri che ottengono indici prestazionali di EE e di EC più alti e quelli più bassi:

- **CS-17:** involucro composto principalmente da 400mm di lana di roccia e da un rivestimento di pannelli fotovoltaici. EE=6303,71 MJ/m<sup>2</sup>, EC=326,06 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>;
- **CS-30:** involucro composto da un elemento prefabbricato in calcestruzzo da 550mm di spessore e da 120mm di EPS. EE=3752,21 MJ/kgm<sup>2</sup>, EC=330,41 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>;
- **CS-01:** involucro composto da 170mm di lana di roccia e da un rivestimento in mattonelle in cotto su montanti lignei. EE=460,59 MJ/kgm<sup>2</sup>, EC=31,87 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>;
- **CS-22:** involucro composto 80mm di XPS e da un rivestimento in lamiera di alluminio e interposta una lastra di cemento di 14mm. EE=610,39 MJ/kgm<sup>2</sup>, EC=35,3 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>.

I primi due casi denotano indici prestazionali molto alti; nel primo caso, oltre al grande spessore dell'involucro, influisce in maniera determinante il rivestimento composto da pannelli solari che da soli arrivano ad un valore di energia incorporata di 4750 MJ/m<sup>2</sup>. Nel CS-30 invece lo strato più determinante è sicuramente il guscio in calcestruzzo che da solo arriva a 3264,25 MJ/kgm<sup>2</sup>.

I casi studio CS-01 e CS-22, invece, hanno valori prestazionali molto bassi ed in entrambi la scelta dei materiali isolanti è determinante. Nel CS-01 si utilizza un materiale con una densità medio-alta ma con valori di energia incorporata non elevati (lana di roccia EE 16,8 MJ/kgm<sup>2</sup>), mentre nel CS-22 si impiega un materiale con valori di energia incorporata piuttosto elevati ma



con una densità molto bassa (XPS EE 88,6 MJ/kgm<sup>2</sup>). La combinazione tra la densità dei materiali e i valori di EE e di EC influisce in maniera determinante sulla sostenibilità ambientale degli involucri edilizi reversibili.

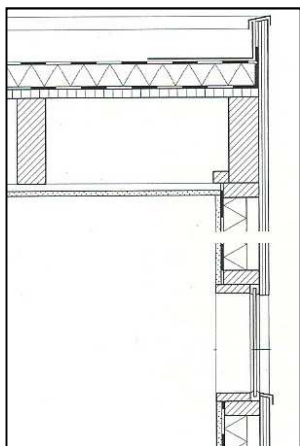
## 6.6 CONFRONTI CONCLUSIVI

Dopo aver analizzato le prestazioni degli involucri relative all'isolamento termico e acustico e alla sostenibilità ambientale, cercando per ogni indice prestazionale di definire le soluzioni migliori e peggiori e le relative cause, proveremo a indicare le soluzioni che possono essere considerate le migliori o le peggiori in assoluto tra le 40 valutate. Incrociando i risultati ottenuti per ogni singola prestazione con quelli derivanti dalle altre valutazioni prestazionali, verranno stabilite le soluzioni di involucro più esemplari e distintive sia dal punto di vista positivo sia negativo.

Le soluzioni di involucro che hanno ottenuto **le prestazioni peggiori** sono:

- **CS-02**(Parigi,1983): Sistema stratificato con struttura in legno.

Stratigrafia di involucro:



*Dettaglio costruttivo*

- Pannello di legno esterno
- 82mm Intercapedine
- 60mm EPS
- Barriera al vapore
- 15mm Cartongesso

**Trasmittanza:** 0,459 W/m<sup>2</sup>K

**Sfasamento:** 2h35'

**Isolamento acustico:** 31,5 dB

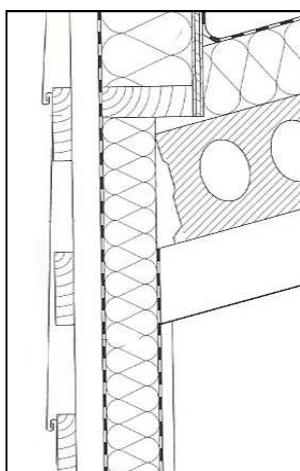
**Condensa interstiziale:** non presente

**Energia incorporata:** 476,75 MJ/kgm<sup>2</sup>

**CO<sub>2</sub> incorporata:** 28,85

- **CS-04**(Amsterdam,2000): Sistema stratificato con struttura in legno.

Stratigrafia di involucro:



*Dettaglio costruttivo*

- Lamiera zinco titanio
- 80mm Intercapedine
- Guaina bituminosa
- 70mm EPS
- Barriera al vapore
- 15mm Cartongesso

**Trasmittanza:** 0,451 W/m<sup>2</sup>K

**Sfasamento:** 1h13'

**Isolamento acustico:** 28,5 dB

**Condensa interstiziale:** 21,4 g/m<sup>2</sup> in Aprile

**Energia incorporata:** 758,07 MJ/kgm<sup>2</sup>

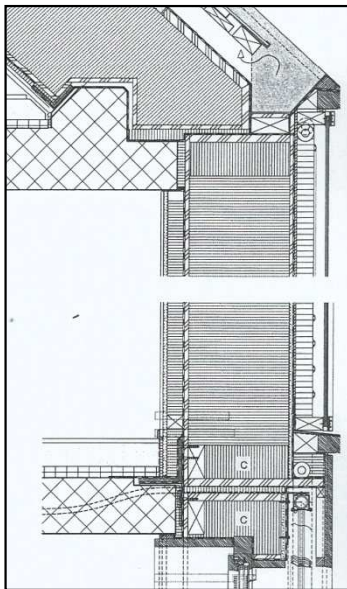
**CO<sub>2</sub> incorporata:** 31,81

In entrambi i casi le scarse prestazioni sono dovute alla scelta di utilizzare un piccolo strato di EPS per la composizione dell'involucro, che risulta del tutto inadeguato per soddisfare le esigenze prestazionali di isolamento termico ed acustico.

Le soluzioni che invece hanno ottenuto **le migliori prestazioni** assolute tra quelle valutate sono:

- **CS-14**(Bennau,CH, 2010): Sistema stratificato con struttura in legno.

Stratigrafia di involucro:



- 6mm Vetro temprato
- 42mm Intercapedine
- 60mm Lana di roccia
- 8mm Pannello OSB
- 15mm Cartongesso
- 360 Cellulosa in fiocchi
- 15mm Pannello OSB
- Barriera al vapore
- 60mm lana di roccia
- 15mm Cartongesso

**Trasmittanza:** 0,078 W/m<sup>2</sup>K

**Sfasamento:** 22h30'

**Isolamento acustico:** 45 dB

**Condensa interstiziale:** 3,0 g/m<sup>2</sup> in Aprile

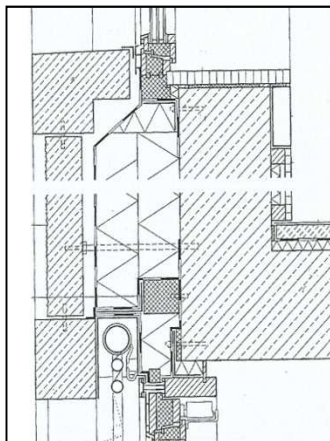
**Energia incorporata:** 1219,27 MJ/kgm<sup>2</sup>

**CO<sub>2</sub> incorporata:** 73,39

*Dettaglio costruttivo*

- **CS-35**(Marburgo,2010): Sistema stratificato con struttura in legno.

Stratigrafia di involucro:



- 120mm Elemento in calcestruzzo
- Guaina bituminosa
- 280mm Lana di roccia
- 300mm Struttura portante in calcestruzzo
- 15mm Pannello MDF

**Trasmittanza:** 0,126 W/m<sup>2</sup>K

**Sfasamento:** 23h15'

**Isolamento acustico:** 57 dB

**Condensa interstiziale:** 113 g/m<sup>2</sup> in Aprile

**Energia incorporata:** 1624,50 MJ/kgm<sup>2</sup>

**CO<sub>2</sub> incorporata:** 103,53

*Dettaglio costruttivo*

Nel primo caso (CS-14) una parete leggera in cellulosa e lana di roccia formano uno strato isolante di 480mm che consente livelli prestazionali elevati sia di isolamento termico che di inerzia; lo strato esterno in vetro aumenta ad isolare acusticamente l'involucro garantendo il comfort degli spazi interni. Inoltre gli indici di sostenibilità ambientali registrano valori non elevati a conferma della validità della soluzione.

La seconda soluzione, CS-35, invece impiega elementi in calcestruzzo per la realizzazione degli strati esterni dell'involucro conferendo grande inerzia termica all'involucro che risulta avere anche grandi qualità fono isolanti. Per raggiungere alti livelli di isolamento termico è presente un importante strato di lana di roccia consentendo di raggiungere trasmittanze molto

basse. I valori di energia incorporata e CO<sub>2</sub> incorporata sono di poco superiori a quelli del caso precedente ma non sono eccessivi.

Due soluzioni diverse che ottengono prestazioni simili a conferma delle molteplici soluzioni possibili elaborabili utilizzando le tecnologie costruttive reversibili per la realizzazione degli involucri edili.



## 7. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE SUGLI INVOLUCRI REVERSIBILI

Alla luce delle analisi e delle valutazioni del capitolo precedente riassumeremo gli aspetti principali connessi alle tecnologie costruttive reversibili, cercando di individuare i vantaggi e le criticità legate a queste tecnologie.

Oltre alla definizione dei vantaggi e delle criticità analizzeremo il ruolo del progettista e delle aziende produttrici nella progettazione degli involucri e l'importanza della scelta delle tecnologie costruttive e dei materiali da costruzione.

Lo scopo di questo capitolo è quello di fare chiarezza su questi argomenti basandosi sui risultati prestazionali scaturiti dalle nostre valutazioni e dallo studio dei singoli casi studio, e cercando di ricostruire puntualmente lo scenario delle tecnologie costruttive reversibili.

### 7.1. LA PROGETTAZIONE TECNOLOGICA DELL'INVOLUCRO

È scontato pensare che il progettista sia l'artefice delle idee e delle soluzioni tecniche presenti in un determinato edificio, occupandosi sia degli aspetti compositivi formali, che degli aspetti relativi alle tecnologie costruttive da impiegare e altri materiali di cui far uso.

Per quanto riguarda la composizione del involucro esterno, questa realtà, non sempre si concretizza. Alcune volte accade che il progettista, una volta stabiliti gli schemi compositivi e definiti i temi e le strategie progettuali da impiegare, al momento di dover elaborare i sistemi tecnologici costruttivi per un involucro reversibile, si affidi a soluzioni già esistenti ed elaborati dalle case produttrici.

Questo scenario si verifica conseguentemente ad alcune condizioni che si verificano maggiormente nei paesi europei dove le tecnologie costruttive reversibili sono meno diffuse.

In primo luogo, un progettista che si affaccia a queste nuove tecnologie, e che, quindi, non possedendo solide competenze, non si sente consapevole e sicuro nell'impiegarle per comodità è portato a utilizzare un pacchetto di involucro già elaborato da produttori esperti del settore, confidando nelle loro competenze e nella loro esperienza in merito. Queste soluzioni, che impiegano componenti prefabbricati assemblati già in stabilimenti specializzati, garantiscono prestazioni standard verificate e valutate da test condotti dagli stessi produttori. Per il neofita, sembra quindi più opportuno adottare queste soluzioni al proprio progetto, eliminando la progettazione tecnologica dell'involucro, delegata ai produttori, scongiurando *errori progettuali* che potrebbero insorgere.

Inoltre, la scarsa conoscenza, da parte del progettista, della grande varietà di materiali e tecniche costruttive presenti sul mercato, non incoraggia il progettista poco avvezzo alla ricerca e allo studio a intraprendere la progettazione di nuove soluzioni tecnologiche reversibili su misura per il proprio edificio progettato; se a questo aggiungiamo una mancanza di preparazione per quanto riguarda le metodologie di valutazione degli involucri edilizi da parte di questi progettisti, capiamo perché questi si affidino a pacchetti di involucro già esistenti.

Questa mancanza di progettazione personalizzata dell'involucro edilizio non giova al progetto architettonico per vari motivi; innanzitutto, non si sfruttano appieno i vantaggi derivanti dalle tecnologie costruttive reversibili che permettono di assemblare strati con diverse caratteristiche e con diverse funzioni specifiche a comporre un unico pacchetto di involucro che soddisfi i requisiti prestazionali richiesti. Si rinuncia quindi alla possibilità di plasmare un involucro edilizio a seconda delle proprie necessità prestazionali e estetiche, assecondando al contempo i temi progettuali e le connotazioni stilistiche volute dal progettista; per tale motivo è importante la ricerca e la conoscenza delle diverse tecniche costruttive presenti al giorno d'oggi, grazie alle quali siamo in grado di realizzare involucri edilizi di qualsiasi forma e dimensione con caratteristiche prestazionali di alto livello.

È doveroso quindi che il progettista si dedichi alla progettazione tecnologica degli involucri e di tutte le altre parti dell'edificio, in modo da controllare costantemente che tutte le strategie progettuali siano verificate, collaborando al fianco delle aziende produttrici e delle imprese.

Un'ampia conoscenza dei materiali edilizi e dei sistemi costruttivi a cui si possono associare consente al progettista di usufruire di tutti i vantaggi che le tecnologie reversibili possono portare all'attività di progettazione e di costruzione degli edifici, realizzando involucri edilizi efficienti e sostenibili progettati appositamente per ogni nuovo edificio che dovrà rispondere a requisiti ed ad esigenze ogni volta differenti a seconda degli utilizzi che se ne faranno e a seconda della sua collocazione geografica.

Dalla ricerca svolta sulle applicazioni di queste tecnologie costruttive reversibili, ovvero sui 40 casi studio analizzati, si evince che nella maggioranza dei casi la progettazione tecnologica dell'involucro è svolta dal progettista e non dalle aziende produttrici; questo è anche dovuto al metodo di ricerca dei casi studio rivolto a riviste specializzate del settore dove generalmente trovano spazio le soluzioni tecnologiche più interessanti e originali. Il risultato sono stratigrafie tutte diverse tra loro e plasmate sulle esigenze progettuali. Ciò comporta maggiori responsabilità al progettista ma gli permette di elaborare una soluzione personalizzata e che risponde maggiormente alle esigenze di progetto.

Confrontando alcuni dei nostri casi studio possiamo scorgere, comunque, diversi approcci alla progettazione dell'involucro.

Considereremo due esempi di involucro reversibile massivo:

- CS-31, Residenze a Madrid di David Chipperfield, con involucro in pannelli sandwich prefabbricati in fibrocemento e isolamento in EPS;
- CS-33, Fitness center a Milano di Sergio Festini, con involucro stratificato alternando pannelli in calcestruzzo con vario strati di materiali isolanti.

Nella prima soluzione si utilizzano pannelli standard prefabbricati di involucro già completi di finiture modulari e che non presentano una stratificazione complessa opportunamente elaborata.

La seconda soluzione presenta, invece, una stratigrafia più complessa e progettata per rispondere alle complesse esigenze prestazionali (l'edificio è situato in prossimità della ferrovia), e alterna lastre di calcestruzzo con strati di materiale termoisolante e materiale fonoassorbente, inserendo layer per il controllo della condensa interstiziale.

Questi due approcci si traducono in due diversi involucri con prestazioni differenti.

RIF.	CASO STUDIO	NAZIONE	UBICAZIONE	$\Delta U$ (W/mqK)	$\Delta \phi$ (h)	$\Delta R_w$ (dB)	$\Delta EE$ (MJ/mq)
<b>CS-31</b>	Housing Villaverde	Spagna	Madrid	0,228	3h24'	36	716,76
<b>CS-33</b>	Virgin active club	Italia	Milano	0,271	10h14'	46	1171,275

Nel primo caso abbiamo un involucro con scarse prestazioni in termini di inerzia termica ed isolamento acustico, caratteristiche molto penalizzanti se si considera che l'edificio residenziale è situato in una zona climatica con periodi dell'anno molto caldi; ciò è causa di un'insufficiente attenzione progettuale sulle prestazioni dell'involucro. D'altro canto, l'economicità del sistema costruttivo e la bassa energia incorporata del pacchetto di chiusura verticale soddisfano i requisiti progettuali riguardo la sostenibilità economica ed ambientale (solo per quanto riguardo l'energia incorporata e la CO<sub>2</sub> emessa).

La seconda soluzione soddisfa le specifiche esigenze progettuali (isolamento acustico e inerzia termica), grazie alla stratigrafia appositamente elaborata. In termini di sostenibilità ambientale, sebbene abbia un indice di energia incorporata superiore al caso precedente, non è da considerare una soluzione di involucro particolarmente dispendiosa in termini di energia e CO<sub>2</sub> emessa.

Da questo confronto emerge chiaramente come la possibilità di comporre pacchetti di involucro "su misura", consenta di raggiungere risultati prestazionali più adeguati ai requisiti di progetto; diversamente, utilizzando pacchetti standard più economici, si rischia di elaborare una soluzione di involucro non totalmente adeguata alle condizioni climatiche o alle esigenze progettuali.

## 7.2. LA SCELTA DEI MATERIALI

Prima di trattare questo tema, occorre fare un'importante premessa, che in realtà è già una risposta: non esistono soluzioni perfette, ogni situazione necessita un'apposita soluzione, di conseguenza ogni progetto necessita materiali adeguati che soddisfino precise esigenze e specifici requisiti. Se pensiamo alle varie tecnologie costruttive reversibili, di cui abbiamo parlato nei capitoli precedenti, possiamo definire due macro categorie:

- tecnologie che impiegano strutture di supporto, ancorate alla struttura portante dell'edificio, su cui si fissano i tamponamenti che andranno a comporre l'involucro esterno;
- tecnologie che impiegano grandi elementi di involucro, che una volta connessi tra loro e fissati alla struttura portante, andranno a comporre la chiusura esterna dell'edificio.

Per quanto riguarda la prima tecnologia, è fondamentale la scelta dei materiali che andranno a comporre le strutture di supporto che devono garantire stabilità e durevolezza del involucro; non vanno sottovalutate le scelte riguardanti i materiali isolanti all'interno del pacchetto di involucro e i materiali di rivestimento che, se disposti e scelti correttamente, contribuiranno al corretto funzionamento e alla lunga durata dell'involucro edilizio. Nella prima tabella sono elencati alcuni dei materiali da costruzione utilizzati nei casi studio analizzati; per ogni materiali vengono descritti i possibili impieghi, i pregi e i difetti.

MATERIALE	COMPONENTE	IMPIEGO	PREGI	DIFETTI
<b>Acciaio</b>	Profili Lamiere	Strutture Rivestimenti Connessioni	Riciclabilità Durabilità Resistenza	Alti valori di EE e EC
<b>Alluminio</b>	Profili Lamiere	Strutture Rivestimenti Connessioni Barriere al vapore	Riciclabilità Durabilità Resistenza Leggerezza	Alti valori di EE e EC
<b>Calcestruzzo</b>	Pannelli	Strutture Rivestimenti Tamponamenti	Resistenza Bassi valori di EE Economicità Inerzia termica	Scarsa riciclabilità Peso elevato
<b>Fibro cemento</b>	Pannelli	Rivestimenti Tamponamenti	Resistenza Leggerezza	Scarsa riciclabilità
<b>Legno</b>	Montanti Traversi Pannelli	Strutture Rivestimenti Tamponamenti	Bassi valori di EE e EC Riciclabilità Leggerezza	Scarsa durabilità

È altrettanto importante la scelta dei materiali anche nella seconda categoria tecnologica, poiché, i grandi elementi di involucro prefabbricati dovranno essere progettati in modo da garantire alti standard qualitativi, sia in termini di efficienza che in termini di estetica, ed essendo fissati direttamente alla struttura portante dovranno anche garantire una certa resistenza meccanica e statica, oltre che soddisfare le esigenze di durabilità e reversibilità. In entrambi i casi dunque, è fondamentale, quanto necessaria, la scelta ragionata e ponderata sulla base di uno studio o di una ricerca approfondita che abbia come risultato il raggiungimento di una soluzione costruttiva che soddisfi tutti i requisiti e le esigenze preposte. Per effettuare una scelta più corretta ed adeguata possibile alla situazione che ci si pone davanti occorre tener presente, a mia opinione, cinque criteri fondamentali:

- occorre sempre conoscere e approfondire le tecnologie costruttive tradizionali locali ed i materiali che impiegano, nel rispetto della cultura e della storia, cercando dove possibile di mantenere un filo conduttore con l'anima del luogo;

- è di fondamentale importanza l'interpretazione delle caratteristiche climatiche e morfologiche del sito in cui sorgerà l'edificio, potendo così scegliere i materiali con caratteristiche più adeguate agli scenari climatici e meteorologici che si proporranno;
- sulla base del punto precedente, è importante stabilire le prestazioni che si vogliono ottenere, sia per quanto riguarda gli aspetti di isolamento termico ed acustico, sia per quanto riguarda le tematiche di sostenibilità ambientale rivolte ai materiali da costruzione, e i risultati estetici dell'edificio costruito;
- occorre valutare attentamente le risorse economiche che si possono destinare, effettuando una scelta che tenga conto delle esigenze prestazionali ma che nel contempo non comporti un onere economico eccessivo;
- è necessario inoltre, per il progettista, effettuare una vera e propria ricerca approfondita sulle caratteristiche fisiche e prestazionali dei materiali da costruzione, facilitando così la fase di progettazione e di scelta dei medesimi, sviluppando così una vasta conoscenza sulle tecnologie costruttive e sui materiali disponibili sul mercato.

In questa seconda tabella sono riportati alcuni dei materiali isolanti impiegati nei casi studio analizzati; le differenti caratteristiche comportano diversi risultati prestazionali, pertanto la scelta dei materiali deve saper valutare quali caratteristiche possono essere adeguate alla situazione di progetto.

MATERIALE ISOLANTE	DENSITA' (Kg/mc)	$\lambda$ (W/mK)	EE (MJ/Kg)	EC (KgCO2e/Kg)	PREGI	DIFETTI
<b>Calcestruzzo cellulare</b>	115	0,045	3,25	0,41	inerzia termica, valori bassi di EE	scarsa resistenza a compressione, scarso fonoisolamento.
<b>Cellulosa in fiocchi</b>	25 - 65	0,037 - 0,041	2,12	0,15	isolamento termico, riciclabilità, valori bassi di EE	scarso fonoisolamento, sensibilità all'umidità.
<b>EPS</b>	15 - 30	0,035 - 0,044	88,6	3,29	isolamento termico, riciclabilità, leggerezza.	scarsa inerzia termica, scarso fonoisolamento, alti valori di EE e EC
<b>Fibra di legno</b>	45 - 300	0,038 - 0,052	20	0,98	isolamento termico, riciclabilità, inerzia termica.	sensibilità all'umidità.
<b>Lana di canapa</b>	30 - 200	0,039 - 0,050	10,8	0,1	isolamento termico, traspirabilità, riciclabilità.	scarsa inerzia termica, scarso fonoisolamento
<b>Lana di pecora</b>	15 - 170	0,035 - 0,044	20,9	-	isolamento termico.	scarsa inerzia termica, scarso fonoisolamento
<b>Lana di roccia</b>	25 - 200	0,035 - 0,050	16,8	1,12	isolamento termico, economicità, resistenza a compressione	scarso fonoisolamento
<b>Lana di vetro</b>	20 - 200	0,035 - 0,050	28	1,54	isolamento termico, economicità.	Emissione VOC
<b>Pannelli sottovuoto</b>	150 - 220	0,002 - 0,008	999 (MJ/mq)	n.d.	isolamento termico, spessori ridotti.	costo elevato, elevata enrgia incorporata
<b>Poliuretano espanso</b>	15 - 80	0,025 - 0,040	102,1	4,84	isolamento termico, economicità, leggerezza durabilità.	valori molto alti di EE e EC scarsa inerzia termica
<b>XPS</b>	25 - 45	0,025 - 0,040	109,2	4,39	isolamento termico, riciclabilità, leggerezza impermeabile al vapore.	valori molto alti di EE e EC scarsa inerzia termica

Non possiamo parlare quindi di materiali migliori o di materiali peggiori, o di soluzioni perfette che possono essere usate come modello riproducibile in ogni situazione, ma dobbiamo solamente tener presente che la scelta ragionata, frutto di uno studio approfondito, è l'unica strada perseguibile per essere certi che le tecnologie costruttive e i materiali da costruzione impiegati siano quelli corretti e più adeguati nel soddisfare i requisiti di progetto.

### 7.3. LA SCELTA TECNOLOGICA: SOLUZIONI MASSIVE E SOLUZIONI LEGGERE

Come abbiamo visto, nei capitoli precedenti, le tecnologie costruttive reversibili si dividono in due grandi categorie, tecnologie reversibili leggere e tecnologie reversibili massive, che differiscono per le diverse caratteristiche dei materiali di involucro che vengono utilizzati.

Per avere ben chiaro lo scenario riguardante le caratteristiche delle due declinazioni tecnologiche reversibili, faremo un breve riassunto delle caratteristiche specifiche appartenenti alle due diverse categorie così che, analizzandone poi i vantaggi e gli svantaggi, potremo dare una risposta chiara e valida alla domanda qui sopra.

Le caratteristiche principali di **sistemi tecnologici reversibili leggeri** sono:

- l'impiego di materiali isolanti con densità relativamente bassa (15-200 kg/m<sup>3</sup>) e con capacità termoisolanti per la realizzazione dei tamponamenti dell'involucro esterno;
- l'utilizzo di strutture, non portanti, di supporto agli elementi di tamponamento e altri rivestimenti, definendo uno schema costruttivo “ *struttura + isolamento + rivestimento*”;
- varietà degli elementi di rivestimento, che possono anche essere prefabbricati e modulati in pannelli bidimensionali o tridimensionali da fissare alle strutture di supporto;
- creazione di illimitate soluzioni stratigrafiche attraverso l'impiego di un'ampia gamma di materiali.

Per quanto riguarda, invece, i **sistemi tecnologici reversibili massivi**, le principali caratteristiche individuate sono:

- l'impiego di materiali con densità relativamente alte (500-2500 kg/m<sup>3</sup>), generalmente materiali lapidei, cementizi o ceramici, per la realizzazione dell'involucro esterno;
- utilizzo di elementi prefabbricati, possono avere dimensioni equivalenti a grandi porzioni di involucro, già completi di isolamento e di rivestimento interno ed esterno;
- la possibilità, attraverso una corretta progettazione degli elementi edilizi, di comporre stratigrafie complesse alternando strati di materiali isolanti, o aventi funzioni igrotermiche, con strati di materiali massivi.

Dopo aver riepilogato brevemente le caratteristiche che distinguono le tecnologie reversibili leggere da quelle massive, definiamo quali vantaggi e quali criticità sono determinate da queste caratteristiche.

Per le **tecnologie costruttive leggere** definiamo:

VANTAGGI	CRITICITA'
<ul style="list-style-type: none"><li>• Alte prestazioni in termini di isolamento termico, trasmittanze termiche basse</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Scarsa inerzia termica dell'involucro, con deficit prestazionali nei mesi caldi</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Facilità di movimentazione e di trasporto dei materiali grazie alla loro leggerezza</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Prestazioni di isolamento acustico degli ambienti interni non adeguate</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Possibilità di separare i materiali in fase di demolizione per un corretto riciclo</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Sicurezza della proprietà, e protezione dalle intrusioni non autorizzate</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Ottenimento di valori relativamente bassi di energia incorporata e CO<sub>2</sub> incorporata</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Durabilità delle componenti di involucro</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Riduzione dei rischi per gli operai nei cantieri edili</li></ul>	



Per le **tecnologie costruttive massive**, invece, definiamo:

VANTAGGI	CRITICITA'
<ul style="list-style-type: none"> <li>Grande inerzia termica dell'involucro che ne migliora le prestazioni nei mesi caldi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Necessità di implementare il pacchetto di involucro con strati di materiali isolanti</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Alte prestazioni in termini di isolamento acustico degli ambienti interni</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Difficoltà di movimentazione e trasporto dei componenti a causa del peso elevato</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Sicurezza della proprietà, e protezione dalle intrusioni non autorizzate</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Flessibilità totale delle componenti se il peso è troppo elevato</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Durabilità delle componenti di involucro</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Scarsa qualità dei processi di riciclaggio dei materiali utilizzati</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Valori alti di energia incorporata e CO<sub>2</sub> incorporata nell'involucro edilizio</li> </ul>

A sostegno delle riflessioni appena condotte, per la definizione di vantaggi e criticità delle due soluzioni costruttive reversibili, riportiamo adesso alcuni paragoni relativi alle prestazioni degli involucri di alcuni casi studio presentati in precedenza; verranno paragonate le prestazioni medie calcolate degli involucri edilizi dei 40 casi studio suddivisi tra tecnologie costruttive leggere e tecnologie costruttive massive.

INVOLUCRO	$\Delta U$ (W/mqK)	$\Delta\phi$ (h)	$\Delta R_w$ (dB)	$\Delta EE$ (MJ/Kg)	$\Delta EC$ (KgCO <sub>2</sub> e/Kg)
<b>LEGGERO</b>	<b>0,20</b>	<b>11h22'</b>	<b>37,63</b>	<b>1095,54</b>	<b>63,09</b>
<b>MASSIVO</b>	<b>0,21</b>	<b>13h25'</b>	<b>52,05</b>	<b>2072,61</b>	<b>154,06</b>

Nella seguente tabella, invece, per le due categorie, vengono riportati gli esempi di involucro più performanti e quelli invece dalle prestazioni più basse, tra i 40 analizzati; in questo modo si espliciteranno le reali potenzialità prestazionali di queste tecnologie costruttive in contrasto con le criticità evidenziate dagli esempi meno virtuosi.

RIF.	CASO STUDIO	NAZIONE	UBICAZIONE	$\Delta U$ (W/mqK)	$\Delta\phi$ (h)	$\Delta R_w$ (dB)	$\Delta EE$ (MJ/mq)
<b>CS-04</b>	Edificio residenziale	Olanda	Amsterdam	0,451	1h13'	28,5	758,07
<b>CS-27</b>	Edificio università	Spagna	Valencia	0,31	5h41'	35	707,655
<b>Media categoria tecnologie costruttive reversibili LEGGERE</b>				<b>0,22</b>	<b>8h19'</b>	<b>36,82</b>	<b>1172,49</b>
<b>CS-14</b>	Residenze	Svizzera	Bennau	0,078	22h30'	45	1219,265
<b>CS-18</b>	Residenze sociali	Belgio	Bruxelles	0,181	13h50'	47,5	1147,285

RIF.	CASO STUDIO	NAZIONE	UBICAZIONE	$\Delta U$ (W/mqK)	$\Delta\phi$ (h)	$\Delta R_w$ (dB)	$\Delta EE$ (MJ/mq)
<b>CS-31</b>	Housing Villaverde	Spagna	Madrid	0,228	3h24'	36	716,76
<b>CS-33</b>	Virgin active club	Italia	Milano	0,271	10h14'	46	1171,275
<b>Media categoria tecnologie costruttive reversibili MASSIVE</b>				<b>0,21</b>	<b>13h25'</b>	<b>52,00</b>	<b>1895,42</b>
<b>CS-35</b>	Ampliamento scuola	Germania	Marburgo	0,078	22h30'	45	1219,265
<b>CS-40</b>	Archivio centrale	Francia	Bure Saudron	0,181	13h50'	47,5	1147,285

Valutando i risultati prestazionali più positivi relativi agli esempi di involucro presentati nelle tabelle, si nota come le stratificazioni più complesse e ragionate ottengano livelli prestazionali importanti, sia per quanto riguarda l'isolamento termo-acustico, sia per quanto riguarda la sostenibilità ambientale; questo è conseguenza di una corretta progettazione tecnologica e di scelte appropriate riguardo i materiali e i loro spessori.

Da queste valutazioni scaturisce l'ovvia esigenza di compensare le lacune caratteristiche di una determinata tecnologia costruttiva, inserendo elementi provenienti dalla tecnologia costruttiva che non presenta queste determinate criticità; si tratta quindi di una **ibridazione** delle due tecniche costruttive reversibili che ha come scopo quello di elaborare un sistema tecnologico che, attraverso le prestazioni determinate dai materiali utilizzati, possa soddisfare le esigenze e i requisiti.

Un chiaro esempio di questa ibridazione tecnologica è rappresentato chiaramente da alcuni dei casi studio valutati:

- **CS-17:** involucro composto da 400mm di lana di roccia tra pannelli di legno, il rivestimento esterno è composto da pannelli fotovoltaici mentre internamente è collocata una lastra di fibrocemento da 25mm con applicato il rivestimento interno in legno; Trasmittanza: 0,097 W/m<sup>2</sup>K, Sfasamento: 18h, Rw:46, EE: 6303,71 MJ/kgm<sup>2</sup>, EC: 326,06 kgCO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>;
- **CS-18:** involucro composto da 140mm di cellulosa e da 50mm di lana di roccia, il rivestimento è composto da pannelli prefabbricati in laterizi pieni di 90mm di spessore; Trasmittanza: 0,181 W/m<sup>2</sup>K, Sfasamento: 13h50', Rw:47,5, EE: 1147,29 MJ/kgm<sup>2</sup>, EC: 80,14 kgCO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>;
- **CS-33:** involucro stratificato composto da un pannello prefabbricato (lastra di calcestruzzo forata 50mm, poliuretano espanso 30mm, lastra di calcestruzzo 60mm) e da uno strato isolante in lana di roccia di 100mm. Trasmittanza: 0,271 W/m<sup>2</sup>K, Sfasamento: 10h14', Rw:46, EE: 1171,28 MJ/kgm<sup>2</sup>, EC: 82,52 kgCO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>;

I primi due esempi sono involucri che possono essere considerati “leggeri” essendo composti in gran parte da materiali isolanti, ma in entrambi i casi sono stati inseriti nella stratigrafia degli elementi con caratteristiche massive per apportare vantaggi prestazionali all'involucro edilizio.

Nel CS-17, rifugio alpino situato ad una altitudine di 3820 m, non dovendo contrastare il surriscaldamento estivo, si è inserita una lastra di fibrocemento sulla faccia interna dell'involucro, conferendogli maggior inerzia termica per regolare le temperature interne degli edifici; questo accorgimento permette di immagazzinare il calore dagli ambienti interni riscaldati, calore che poi verrà restituito gradualmente nel corso delle giornate.

Contrariamente nel CS-18, residenze in Belgio costruite anch'esse con tecnologie costruttive reversibili “leggere”, l'elemento massivo viene posto come rivestimento esterno, con la duplice funzione di regolare l'entrata del calore nei periodi freddi dell'anno e di caratterizzare l'aspetto estetico dell'edificio.

Il terzo esempio, invece, è stato catalogato come “massivo” anche se, rispetto ad altri involucri massivi, risulta tendere maggiormente verso le soluzioni leggere per via della sua stratificazione complessa che alterna strati isolanti a strati resistenti; il pannello prefabbricato concepito come rivestimento esterno, ma anche come barriera acustica alla vicina ferrovia, conferisce grande inerzia termica e anche isolamento termico all'involucro, mentre lo strato interno in lana di roccia media gli scambi di calore tra interno e esterno.

Le prestazioni di questi tre involucri, appartenenti apparentemente a categorie tecnologiche diverse, sottolineano la necessità di svincolarsi dal fondamentalismo tecnologico nel quale queste due categorie sono fortemente contrapposte, cercando di formulare soluzioni che sfruttino i vantaggi di entrambe le tecnologie costruttive, evolvendo così il mondo dei sistemi costruttivi reversibili.

La strada che si prefigura porta alla progettazione di stratigrafie complesse nelle quali vengono alternati strati di materiale isolante, riconducibile alle tecnologie costruttive leggere, con strati di materiali con caratteristiche massive, con l'obiettivo di plasmare appositamente per ogni specifica situazione un involucro edilizio reversibile altamente performante e che soddisfi pienamente gli standard qualitativi.

#### 7.4. I VANTAGGI E LE CRITICITA' DELLE TECNOLOGIE COSTRUTTIVE REVERSIBILI

Considerando le tecnologie costruttive reversibili nel loro insieme, eliminando le distinzioni tipologiche tra soluzioni leggere e soluzioni massive, metteremo in evidenza i vantaggi e le criticità proprie di queste tecnologie che utilizzano elementi e materiali prefabbricati industrialmente, iniziando dagli aspetti più critici legate a queste tecnologie.

##### 7.4.1. Le criticità

Innanzitutto, l'utilizzo di elementi prefabbricati, a volte di dimensioni equivalenti a grandi porzioni di involucro, prodotti in stabilimenti specializzati, e pronti per l'assemblaggio in cantiere, necessita di una attenta progettazione di tutti i componenti edilizi; occorre definire con estrema precisione, in fase di progettazione, tutti gli elementi che andranno a comporre l'involucro dell'edificio, prestando particolare attenzione alla scelta dei materiali da utilizzare. La definizione delle dimensioni dei moduli prefabbricati, la predisposizione delle strutture di supporto e l'organizzazione cronologica delle fasi di costruzione in relazione alla produzione industriale dei componenti sono procedure necessarie per una corretta progettazione utilizzando le tecnologie costruttive reversibili.

L'attività del progettista deve quindi svolgersi in costante comunicazione e collaborazione con le aziende produttrici e con le imprese di costruzione, per coordinare al meglio le operazioni di produzione, trasporto e messa in opera. La definizione puntuale di tutte le componenti edilizie, comporta un conseguente **aumento dei tempi e degli sforzi in fase di progettazione**; progettazione, che diviene fondamentale quasi quanto le operazioni di costruzione e di assemblaggio.

La seconda criticità dei sistemi tecnologici reversibili, relativa anch'essa alla loro indole industriale, è determinata dalla **complessità delle connessioni** tra gli elementi prefabbricati e il loro fissaggio alle strutture portanti. Per garantire gli standard qualitativi in termini di resistenza meccanica e di isolamento termoacustico, occorre progettare e realizzare involucri resistenti, durevoli, e che non conoscano soluzioni di continuità per quel che riguarda gli strati di isolamento termico e di isolamento acustico; i punti di giunzione tra i diversi strati o tra i diversi elementi di involucro, e il loro rapporto con gli altri elementi dell'organismo edilizio, sono punti critici per quanto riguarda la possibile formazione di ponti termici e ponti acustici, che possono determinare cadute prestazionali dell'involucro edilizio.

È necessario quindi progettare, fin dalle prime fasi, l'involucro nella sua interezza, prestando particolare attenzione ai punti in cui diversi elementi edilizi sono connessi.

Non vanno sottovalutate le problematiche relative alla resistenza meccanica delle connessioni tra gli elementi di involucro e i fissaggi dell'involucro alle strutture portanti; le continue sollecitazioni a cui è sottoposto l'edificio e, in particolare, l'involucro esterno, sottopongono allo sforzo continuo nel tempo le strutture di supporto, rivestimenti e i tamponamenti l'involucro, aumentando il rischio di cedimenti proprio nei punti di discontinuità, ovvero laddove, i diversi elementi vengono connessi.

Il problema può essere risolto progettando connessioni sicure e utilizzando materiali duraturi e adeguati alle funzioni che devono svolgere.

Un altro aspetto molto importante da tenere in considerazione, per evitare il sorgere di gravi problematiche relative alla durata dei materiali, è la **compatibilità chimico-fisica** tra i diversi materiali impiegati nelle stratigrafie dell'involucro edilizio. Le caratteristiche chimiche di alcuni materiali da costruzione, e il loro comportamento nei confronti delle sollecitazioni meccaniche e climatiche a cui sono sottoposti, sono attentamente da valutare, soprattutto, quando si progettano soluzioni tecnologiche nelle quali si compongono delle stratigrafie alternando diversi materiali aventi composizioni chimiche differenti.

L'errato accostamento di materiali può provocare reazioni chimiche che innescano processi di degrado nocivi al corretto funzionamento dell'involucro edilizio. I materiali più critici da questo punto di vista, sono i materiali termoplastici, metallici, lapidei e in alcuni casi quelli di origine minerale; è doveroso consultare, quindi, le tabelle comparative sulla compatibilità chimica tra diversi materiali, per verificare le scelte effettuate. L'aumento dei tempi e degli sforzi in fase di

progettazione, l'elevata complessità delle connessioni tra gli elementi edilizi e la compatibilità chimico-fisica tra i materiali, sono queste le principali criticità relative alle tecnologie costruttive reversibili.

#### 7.4.2. I vantaggi

L'assemblaggio di elementi edilizi prefabbricati, consente il **raggiungimento e il controllo degli standard qualitativi** dell'involucro edilizio; la produzione industriale, infatti, realizzando i materiali e i componenti edilizi all'interno di uno stabilimento specializzato, permette di effettuare controlli specifici e verifiche sulla qualità e sulle caratteristiche chimico-fisiche che determineranno le prestazioni dei singoli componenti e dell'involucro edilizio. Potendo seguire tutti i processi produttivi, e nel contempo, verificarne la correttezza, si garantisce la qualità di ogni elemento prefabbricato, riducendo le variabili connesse alla realizzazione degli stessi direttamente in cantiere. L'utilizzo di diversi materiali, inoltre, permette di comporre elementi che soddisfino le esigenze e i requisiti prestazionali richiesti, sia dal punto di vista energetico che da un punto di vista ambientale. Le residenze per studenti a Barcellona di H-Architects (CS-22) ne sono un esempio: la prefabbricazione dei componenti edilizi, la minuziosa progettazione tecnologica e l'attenta scelta dei materiali da costruzione hanno permesso di ottenere risultati importanti in termini di sostenibilità ambientale. Infatti, la valutazione del ciclo di vita dei materiali impiegati ha dimostrato che questo progetto permetterà di risparmiare il 50% di energia necessaria per i materiali da costruzione e diminuirà del 70% il fabbisogno energetico dell'edificio rispetto agli standard edilizi previsti dalle normative spagnole.

Ulteriore conseguenza della prefabbricazione industriale dei componenti edilizi, è la **minimizzazione dell'uso dei materiali** da costruzione; la precisa progettazione degli elementi e la corretta definizione delle quantità di materiale da utilizzare, limita gli sprechi, consentendo un risparmio di tempo e denaro. Inoltre, ogni scarto di materiale proveniente dalla produzione nello stabilimento, se possibile, può essere direttamente riciclato e re-inserito nel processo produttivo velocemente e senza ulteriori fasi di trasporto in altri stabilimenti atti al riciclaggio.

Riservando la maggior parte delle operazioni di produzione delle componenti edilizie agli stabilimenti produttivi, di conseguenza, si ha una **riduzione** anche per quanto riguarda i **rifiuti prodotti nei cantieri edilizi**. L'assemblaggio di componenti prefabbricate, con tecnologie a secco, che impiegano quindi fissaggi meccanici reversibili, limita le operazioni da eseguire in cantiere e di conseguenza minimizza la produzione di sfridi e di materiali di scarto non più utilizzabili.

Utilizzando queste tecnologie costruttive reversibili, si sviluppano organismi edilizi che si assemblano tanto facilmente, quanto velocemente, garantendo la stessa **velocità** e la stessa facilità anche durante le fasi di **smontaggio** una volta che l'edificio si avvia alla demolizione.

Qui si evidenziano una serie di vantaggi tutti connessi tra loro; la possibilità di assemblare e smontare completamente l'edificio, conseguenza della prefabbricazione, comporta la **diminuzione dei tempi di costruzione**, diminuendo i costi relativi alla mano d'opera.

Due progetti che dimostrano questi vantaggi legati alle tecnologie costruttive reversibili sono le residenze di Eric Lenoir a Chantepie (CS-21) e le residenze per studenti a Le Havre dello studio Cattani Architects (CS-28). Nel primo esempio, la prefabbricazione degli elementi di involucro e delle strutture portanti in acciaio hanno permesso di concludere la costruzione delle strutture portanti e dell'intero involucro esterno in sole 4 settimane. Nel secondo progetto, invece, l'utilizzo di cellule tridimensionali già assemblate e complete (container), ha permesso la costruzione dell'intero complesso in meno di un anno.

Tornando ai vantaggi delle tecnologie reversibili, la totale reversibilità delle componenti, inoltre, determina un grande vantaggio dal punto di vista della sostenibilità ambientale; una volta terminata la vita utile dell'edificio, lo si avvia alle fasi di demolizione, che per quel che riguarda le tecniche costruttive tradizionali, consiste in una demolizione generalizzata di tutte le parti dell'edificio, con la produzione di grandi quantità di macerie, che verranno poi trasportate e stoccate in discarica. Utilizzando le tecnologie reversibili, invece, possiamo attuare una **demolizione selettiva**

dell'edificio, nella quale separando correttamente i diversi materiali, siamo in grado di riciclare la maggior parte dei materiali da costruzione dell'edificio demolita. Per una edilizia sostenibile nel tempo, con una visione d'insieme che supera i 100 anni, è fondamentale la programmazione di strategie che favoriscano la diffusione dei processi di demolizione selettiva e di **riciclaggio dei materiali**; per questo motivo divengono fondamentali la reversibilità costruttiva e la riciclabilità dei materiali da costruzione. Se alcuni materiali come l'acciaio, l'alluminio e i materiali plastici sono facilmente e totalmente riciclabili, altri come il legno, necessitano di maggior accorgimenti:

i trattamenti a cui possono essere sottoposti i materiali lignei per migliorarne le caratteristiche di resistenza e durabilità, oppure, i fissaggi di elementi tramite collanti sintetici, influiscono negativamente sulla riciclabilità del materiale. Nel progetto di Bernard Bader per una scuola materna a Bizau (CS-07), l'attenzione ai materiali e alla tecnologia costruttiva ha permesso di realizzare un edificio interamente in legno non trattato, quindi totalmente riciclabile, e totalmente smontabile grazie alle tecnologie costruttive reversibili impiegate, ottenendo alti livelli di sostenibilità ambientale.

I vantaggi sopra descritti sono inerenti agli aspetti tecnologici e costruttivi che caratterizzano il processo produttivo edilizio, mentre, quelli che verranno descritti ora appartengono più alla sfera architettonica e funzionale del progetto.

La facilità di smontaggio e la reversibilità delle componenti edilizie determina, prima di tutto, una **flessibilità** per quel che riguarda la distribuzione degli spazi interni ed esterni connessi all'involucro edilizio. Potendo modificare facilmente la disposizione delle partizioni verticali interne o delle chiusure esterne, si lascia agli utenti futuri la possibilità di rielaborare le disposizioni interne o la composizione delle facciate o di altre componenti edilizie, a seconda delle nuove funzioni a cui dovrà assolvere. Questa flessibilità, quindi, consente di allungare la vita dell'edificio, che potrà essere modificato e ristrutturato più volte, mantenendo le strutture e gli elementi ancora funzionanti, e sostituendo invece le parti diventate obsolete. Non è da sottovalutare anche, la **libertà compositiva** e di espressione formale e architettonica che queste tecnologie costruttive permettono al progettista; sebbene sia necessaria una più attenta progettazione degli elementi edilizi, i risultati che si possono ottenere, sono equivalenti se non migliori rispetto a quelli delle tecniche costruttive tradizionali o delle tecniche costruttive non reversibili, potendo usufruire di una garantita precisione e di uno standard qualitativo dei componenti prefabbricati. È errato pensare, quindi, come alcuni addetti ai lavori fanno, che le tecnologie reversibili connesse alla prefabbricazione industriale limitino l'espressione formale e compositiva degli edifici, contrariamente infatti, mediante una progettazione consapevole e scrupolosa, è possibile ottenere risultati estetici ed architettonici di grande importanza che possiamo apprezzare in molti dei 40 casi studio analizzati tra i quali si notano differenti declinazioni formali e stilistiche.

VANTAGGI	CRITICITA'
1. GARANZIA E CONTROLLO DEGLI STANDARD QUALITATIVI	1. AUMENTO DEGLI SFORZI E DEI TEMPI IN FASE DI PROGETTO
2. ALTE PRESTAZIONI ENERGETICHE ED AMBIENTALI	2. ELEVATA COMPLESSIBILITA' DELLE CONNESSIONI
3. MINIMIZZAZIONE DELL'USO DEI MATERIALI	3. COMPATIBILITA' CHIMICO FISICA
4. RIDUZIONE DEI RIFIUTI PRODOTTI IN CANTIERE	4. NECESSITA' DI MANO D'OPERA SPECIALIZZATA
5. FACILITA' DI MONTAGGIO E SMONTAGGIO	5. DURABILITA' NEL TEMPO
6. DIMINUZIONE DEI TEMPI DI DIFFUSIONE	
7. FAVORISCE IL RICICLAGGIO DEI MATERIALI	
8. FLESSIBILITA' DEGLI SPAZI E DELLE COMPONENTI EDILIZIE	
9. LIBERTA' COMPOSITIVA E FORMALE	



## CONCLUSIONE

Attraverso questo lavoro di tesi, nel quale abbiamo affrontato la storia, le teorie e le applicazioni reali riguardanti le tecnologie costruttive reversibili per la costruzione di involucri edilizi, possiamo quindi definire, con maggior chiarezza, gli scenari e le dinamiche connesse a queste tecnologie, di cui ora conosciamo i vantaggi, le criticità, gli usi e la diffusione.

In una società sempre più improntata verso la sostenibilità ambientale ed economica, come già ampiamente argomentato, le tecnologie reversibili rappresentano il punto di partenza per la continuazione dell'evoluzione e del progresso dell'architettura e dell'edilizia, e col passare del tempo, sostituiranno progressivamente le tecniche costruttive tradizionali, come questi fecero a loro volta con le tecniche delle epoche passate.

È opportuno quindi che tutto il mondo dell'architettura si dedichi concretamente allo studio e allo sviluppo di queste tecnologie che, a mio avviso, saranno alla base dell'edilizia dei prossimi secoli.

La conclusione più importante che emerge da questo lavoro di ricerca, non deriva, però, direttamente dalle tecnologie costruttive reversibili, ma piuttosto riguarda le modalità di approccio progettuale necessarie per il loro corretto impiego; sono la conoscenza e la continua ricerca, sia nel campo dei materiali da costruzione, sia nel campo delle tecnologie costruttive che li utilizzano, che permettono al progettista di effettuare scelte congrue alle situazioni che gli si pongono davanti.

La possibilità di creare involucri stratificati, plasmati quindi sulle prestazioni e sulle esigenze che si vogliono soddisfare, rende determinante il ruolo del progettista, che è chiamato a elaborare soluzioni appropriate attraverso la scelta di materiali e tecnologie, evidenziando la reale necessità di conoscenza e di ricerca su queste tematiche.

L'approccio alla progettazione deve essere quindi orientato verso la *curiosità di conoscere e capire*, favorendo la ricerca e lo studio, incrementando la conoscenza tecnica, e facilitando così la scelta da effettuare per elaborare le soluzioni più adatte a soddisfare le esigenze che il progetto richiede.

Non esistono quindi soluzioni perfette, materiali o tecnologie costruttive “*sempreverdi*”, o soluzioni sempre idonee, esiste sempre, però, almeno una soluzione per ogni situazione; è di noi progettisti il compito di trovarla.