

**ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA**

---

**FACOLTÀ DI INGEGNERIA**

**CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA EDILE/ARCHITETTURA**

*DIPARTIMENTO DI ARCHITETTURA E PIANIFICAZIONE TERRITORIALE*

**TESI DI LAUREA**

in

**ARCHITETTURA TECNICA**

**SOLUZIONI INNOVATIVE IN LATERIZIO PER EDIFICI AD  
ALTA EFFICIENZA ENERGETICA:**

**UN NUOVO MODELLO DI INVOLUCRO IN MURATURA  
PORTANTE**

CANDIDATO

Vignali Giovanni

RELATORE

Ing. Venturi Luca

CORRELATORE

Ing. Boiardi Luca

Anno Accademico 2011/12

Sessione III



## SOMMARIO

1. CAPITOLO I - INTRODUZIONE.....	3
<b>1.1 Edilizia e Sostenibilità .....</b>	<b>3</b>
<b>1.2 Perché costruire in muratura portante .....</b>	<b>8</b>
<b>1.3 Evoluzione storica della muratura portante in laterizio .....</b>	<b>12</b>
<b>1.4 La muratura portante e l'evento sismico .....</b>	<b>17</b>
1.4.1 Progetto ENEA-ANDIL a Sulmona (AQ) .....	23
2. CAPITOLO II – FONDAMENTI PER UNA PROGETTAZIONE SOSTENIBILE .....	27
<b>2.1 Progetto e Costruzione .....</b>	<b>27</b>
2.1.1 Energia e Architettura.....	27
2.1.2 Energia e Comfort abitativo .....	31
2.1.3 Energia e Progetto .....	33
<b>2.2 Materiali e tecniche isolanti .....</b>	<b>42</b>
2.2.1 Energia e CO <sub>2</sub> incorporata .....	42
2.2.2 Materiali isolanti.....	43
<b>2.3 Ponti termici .....</b>	<b>51</b>
2.3.1 Discontinuità del flusso termico .....	51
2.3.2 Analisi dell'incidenza .....	55
2.3.3 Software di calcolo FEM – THERM 7.0.....	59
2.3.4 Valori di riferimento.....	61
<b>2.4 Trasmittanza termica dell'involucro .....</b>	<b>62</b>
2.4.1 Flusso termico nelle strutture opache .....	62
2.4.2 Valori di riferimento.....	64
<b>2.5 Condensa e muffa superficiale .....</b>	<b>68</b>
2.5.1 Cause ed effetti.....	68
2.5.2 Valori di riferimento.....	70
<b>2.6 Condensa interstiziale .....</b>	<b>72</b>

2.6.1	Diagramma di Glaser .....	72
<b>2.7</b>	<b>Sfasamento e attenuazione .....</b>	<b>76</b>
2.7.1	Regime periodico stabilizzato .....	76
2.7.2	Valori di riferimento.....	80
<b>3.</b>	<b>CAPITOLO III – SOLUZIONI TECNICHE INNOVATIVE.....</b>	<b>82</b>
<b>3.1</b>	<b>Normativa vigente: NTC 2008 .....</b>	<b>89</b>
3.1.1	Le murature .....	90
3.1.2	Criteri di progetto e requisiti geometrici .....	91
<b>3.2</b>	<b>Materiali e tecniche isolanti .....</b>	<b>99</b>
3.2.1	Energia incorporata .....	101
<b>3.3</b>	<b>Ponti termici, condensa e muffa superficiale.....</b>	<b>108</b>
<b>3.4</b>	<b>Trasmittanza termica, sfasamento ed attenuazione dell’involucro .....</b>	<b>120</b>
<b>3.5</b>	<b>Condensa interstiziale .....</b>	<b>122</b>
<b>3.6</b>	<b>Posa in opera.....</b>	<b>126</b>
<b>4.</b>	<b>CAPITOLO IV – VERSO LE NTC 2013.....</b>	<b>132</b>
<b>5.</b>	<b>CAPITOLO V – CONCLUSIONI .....</b>	<b>136</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>139</b>

## 1. CAPITOLO I - INTRODUZIONE

### 1.1 Edilizia e Sostenibilità

I problemi che attanagliano il mondo contemporaneo, a partire da quelli ambientali, hanno una dimensione e una consistenza mai riscontrate prima. Tra gli scenari futuri si può ipotizzare che le modificazioni dei sistemi naturali, l'incremento della popolazione, l'insufficienza delle risorse in relazione ai consumi e la riduzione degli spazi vivibili, complicheranno la vita nei luoghi oggi ospitali e gradevoli e aumenteranno le tensioni sociali, prima per il mantenimento degli attuali livelli di spreco, poi per la sopravvivenza.

In uno scenario non troppo utopistico gli uomini agirebbero sulla base di quella capacità discrezionale, quell'intelligenza di cui si vantano essere gli unici possessori tra le specie animali, e attraverso di essa opererebbero ricercando il benessere individuale e comune. “Il fine, infatti, non è la sopravvivenza della specie, ma la vita di qualità per gli individui e per le comunità e, quindi, la ricerca e il mantenimento di quelle condizioni che rendono piacevole l'esistenza.”<sup>1</sup>

Il benessere di un'umanità affaticata, sofferente e attonita richiede uno sforzo di intelligenza individuale e collettiva e impone di non temere di perdere privilegi economici, di non avere paura di inventarsi un presente socialmente più equo e ambientalmente più qualificato.

Questo sforzo di intelligenza interessa anche il settore edilizio. È ben noto quanto, negli ultimi decenni, esso abbia inciso negativamente sulla qualità dell'ambiente del pianeta per la scarsa qualità dei manufatti prodotti e dei materiali usati, per gli habitat sociali e naturali distrutti, per la quantità di suolo consumato, per l'enorme produzione di emissioni derivante dall'uso di materiali e tecniche inappropriate e da tipologie edilizie energivore.

È però noto quanto, seppur siano una piccolissima parte del costruito, molte realizzazioni abbiano ricercato una qualità ambientale e sociale,

---

<sup>1</sup> PAOLELLA, *Architettura sostenibile e laterizio*, Città di Castello, Edizioni ambiente, 2009, pag. 7

ponendo in atto soluzioni tecnologiche volte a ridurre i consumi energetici e quindi le emissioni. Anche in questo settore, quindi, è stato dimostrato che si può fare meglio, che si possono raggiungere degli obiettivi ambientali indispensabili per invertire il segno negativo della presenza dell'uomo e delle sue attività negli ecosistemi.

Il termine “sostenibile”, nella sua più diffusa accezione, definisce comportamenti individuali e collettivi tesi a una attenzione nei confronti dell'ambiente e delle risorse, tale da consentirne il mantenimento nel futuro delle loro attuali potenzialità.

Tralasciando l'uso strumentale del termine “sostenibile” tendente a favorire iter approvativi di opere, a facilitare una condivisione diffusa, a promuovere merci in un mercato, se ne incontra molto frequentemente un impiego non corretto.

Ad esempio, un edificio che porti al minimo il consumo energetico è un edificio sostenibile? Sicuramente esso contribuisce positivamente alla riduzione delle emissioni e quindi al contenimento dei mutamenti climatici, e sicuramente concretizza filiere produttive e sensibilità ambientali tra gli operatori e i fruitori. Ma se l'edificio è costruito in un ecosistema ad elevata naturalità, lontano dagli insediamenti esistenti, utilizza materiali con notevole energia incorporata, necessita di continue e onerose manutenzioni, allora l'aggettivo “sostenibile” risulta inappropriato in ragione delle quantità di risorse che consuma e che rende inaccessibili alle future generazioni.

Per ridurre le emissioni del settore, oltre a limitare i consumi di energia a metro quadrato, sarebbe corretto ridurre all'indispensabile la quantità degli edifici nuovi, recuperare energicamente il patrimonio edilizio esistente, recuperare gli edifici inutilizzati o stagionalmente utilizzati, razionalizzare la distribuzione dei metri quadrati pro-capite, ridurre il consumo dei suoli anche aumentando la densità, utilizzare materiali naturali e a basso contenuto di energia incorporata, costruire edifici duraturi e a bassa manutenzione.

Queste azioni non sono tecnicamente complesse; le soluzioni tecnologiche appropriate già esistono anche nella tradizione, visto anche che gran parte delle costruzioni edificate in area mediterranea prima della metà del secolo scorso garantivano un'efficienza energetica sconosciuta a gran parte dell'edificato post-bellico, con muri spessi ad elevata inerzia termica, solai e coperture leggere, ventilazione naturale, buona esposizione, attento inserimento nel contesto. Considerando la maggiore quantità di tecniche oggi disponibili, è possibile ritenere perseguibile l'ottenimento di risultati anche migliori in termini energetici e ambientali di quelli raggiunti in passato.

Le direttive comunitarie (2002/91/CE sul rendimento energetico nell'edilizia e 2006/32/CE concernente l'efficienza degli usi finali dell'energia e i servizi energetici) fissano il punto di arrivo e non di partenza per molti Paesi della Comunità Europea nei quali le tematiche del risparmio energetico sono state affrontate già con largo anticipo rispetto all'uscita della 2009/91/CE. Tutto induce a ritenere che il nostro Paese, sulle tematiche del risparmio energetico, dell'uso efficiente delle risorse energetiche, della valorizzazione e integrazione delle fonti rinnovabili degli edifici, della limitazione delle emissioni inquinanti e climalteranti, accusi oggi, rispetto ai più avanzati Paesi europei, un gap di almeno quindici anni.

Si evidenzia specialmente una trascuratezza nel coniugare insieme, in maniera appropriata e razionale, l'organizzazione degli spazi, i sistemi impiantistici e il contesto ambientale. Una progettazione, quest'ultima, troppo spesso concentrata su formalismi ed aspetti marginali, anziché su questioni realmente di sostanza, oppure preda delle suggestioni d'architettura oltre confine che nulla hanno a che fare con i luoghi e le condizioni ambientali in cui l'edificio viene insediato.

Come già sottolineato, infatti, la limitazione dei consumi energetici attraverso l'innalzamento della qualità e il rendimento delle costruzioni, per ottenere migliori condizioni microclimatiche interne con consumi notevolmente minori degli attuali, limitando di conseguenza l'impatto del

settore edilizio sull'ambiente, può costituire un'occasione straordinaria di avanzamento per il settore edilizio e per la qualità dell'abitare.

In particolare alcuni aspetti meritano attenzione:

- L'esigenza di mutuare ed di non adottare direttamente esperienze straniere, operando con discernimento caso per caso, scegliendo le soluzioni migliori al minor costo, valutate nell'intero arco di vita dell'edificio;
- L'opportunità irrinunciabile di affrontare sempre il progetto nella sua intera complessità, costituita da: ambiente, tipologia degli spazi confinanti, impianti, materiali, tecnologie, evitando di ridurre il problema in termini esclusivamente impiantistici;
- La convenienza di adottare quelle soluzioni che nel rapporto tra impianti e tipologia dell'edificio risultino maggiormente basate su principi e soluzioni naturali;
- La condizione rappresentata dal regime climatico italiano, per la quale su larga parte del territorio nazionale esiste la necessità di limitare i consumi di energia non solo dovuti al freddo invernale ma anche, e soprattutto, a quelli richiesti dal caldo estivo.

Un primo significativo passo è rendere chiaro e palese ai fruitori l'intero costo di vita di un edificio; non esclusivamente il costo di costruzione, ma anche i costi di gestione e manutenzione. Infatti i costi dei consumi energetici, su cui siamo chiamati a lavorare, incidono soprattutto sulla gestione e manutenzione, seppur attengano anche alle fasi costruttive.

In conclusione a questa breve panoramica sulla qualità del rapporto Edilizia-Ambiente-Sostenibilità, possiamo dire che la progettazione dell'architettura non è mai stata così dipendente da un'idea di sostenibilità futura, come in questo momento. Nel settore dell'architettura è in atto infatti una rivoluzione silenziosa in grado di condizionare i modi di vita futuri e assegnare nuove finalità alla cultura del progetto. Un progetto capace di intervenire in modo concreto sulle relazioni tra le diverse modalità del vivere l'architettura, lo spazio, la forma, il benessere; in

poche parole, migliorare l'abitare dell'uomo. La sostenibilità dell'architettura può, pertanto, diventare lo strumento per ristabilire il rapporto tra progetto e costruzione, ora disperso nei complessi ragionamenti dei principi teorici del non fare o nelle parziali determinazioni tecnologiche, fisiche e materiche come fine e non come mezzo. Non è altro che la riaffermazione di un costruire semplice e che dura nel tempo, dove spazio, forma e tecnica si corrispondono, ma anche in forte contrasto con la contemporaneità di moda dove tutto è forma: la moda appaga la necessità di essere riconosciuti come membri di una comunità, di mettersi in mostra, di distinguersi, lascia ricordi, ma non può regolare il futuro dell'umanità.

Un costruire semplice, ma non banale, che è sintesi della complessità del progetto.

“Abitare con maggior benessere non è un lusso, ma un progresso per la civiltà. Risparmiare energia non è una scelta, ma una necessità per la vita.”<sup>2</sup>

---

<sup>2</sup> RINALDI, Progettazione ed efficienza energetica, Santarcangelo di Romagna, Maggioli, 2010, pag. 10

## 1.2 Perché costruire in muratura portante

Se il processo di progettazione è volto alla riduzione del “peso” ambientale, tutte le scelte anche quelle formali, sono proiettate verso tale obiettivo. Conoscere ed interpretare i caratteri dei materiali e delle tecniche è indispensabile per non screditare, fin dall’inizio, la qualità dei risultati. Se, infatti, in generale solo alcuni materiali e tecniche sono di per sé insostenibili, per molti è il loro uso inappropriato e l’incongruo obiettivo progettuale a renderli tali, e se alcuni di essi assumono valore positivo solo in determinate applicazioni, fornendo risposte specifiche valide in definiti contesti operativi, altri presentano caratteri ambientali positivi validi nella generalità delle condizioni d’uso. Ad esempio, il laterizio, possiede alcune caratteristiche ambientali e sociali che lo rendono di notevole interesse per una progettazione sostenibile. Tale condizione favorevole è determinata dalla presenza dei caratteri di seguito riassunti:

- La risorsa base, l’argilla, è largamente diffusa, facilmente accessibile, non controllata da monopoli;
- I produttori sono numerosi e distribuiti nel territorio. Ciò consente uno stretto collegamento con le comunità locali, una riduzione della mobilità delle materie prime e dei prodotti, il soddisfacimento in primo luogo dei mercati locali;
- La distribuzione territoriale della produzione e la vicinanza tra impianti e aree estrattive consente una maggiore caratterizzazione geografica dei prodotti (impasto, colore, soluzioni tecniche);
- Si riscontra un basso contenuto di energia per unità di prodotto a parità di risultato;
- La valutazione del ciclo vita (*Life Cycle Assessment*) è caratterizzata da un basso impatto ambientale;
- È sicuro per la salute e non produce emissioni tossiche in caso di incendi, ecc;

- L'unità base di produzione è solitamente di ridotte dimensioni e consente una grande duttilità di uso e la massima rispondenza alle necessità del progetto;
- I processi produttivi permettono la produzione di elementi molto diversi, variati per forma, colore, dimensioni, caratteri tecnici e consentono risposte su misura;
- Favorisce una coerenza percettiva (di materia e di colore) con i luoghi in virtù della relazione diretta con il sistema fisico locale;
- Ha un positivo bilancio in termini occupazionali, necessitando nella posa in opera di manodopera non altamente qualificata;
- È connesso ad un patrimonio di soluzioni e capacità tecniche già strettamente collegato ai luoghi;
- Si presta a conformare soluzioni tecnologiche appropriate e specifiche e a comporre un rapporto diretto con le capacità tecniche locali;
- Dispone di soluzioni tecniche di facile attuazione che aumentano l'efficienza energetica degli edifici con impegni di costi limitati;
- Ha una manutenzione ridotta e attuabile direttamente con operatori locali (non connessi ai produttori);
- Può essere utilizzato con facilità per azioni di autocostruzione progettata o diretta;
- Può essere messo in opera con processi costruttivi industrializzati, semindustriali o artigianali;
- Produce edifici duraturi nel tempo, non di consumo;
- Gli sfridi di produzione e i rifiuti di cantiere sono recuperabili;
- Lo smaltimento al termine dell'utilizzazione non è connesso a particolari problematiche.<sup>3</sup>

L'insieme di questi caratteri consente di definirlo un materiale ad elevata adattabilità a soluzioni e contesti specifici, favorendo il buon rapporto con i luoghi, la riduzione dei consumi in fase di costruzione, distribuzione, messa in opera, la buona qualità ambientale e sociale, durabilità e facilità

---

<sup>3</sup> PAOLELLA, *Architettura sostenibile e laterizio*, Città di Castello, Edizioni ambiente, 2009, pag. 14

di manutenzione, adattabilità a diverse condizioni di operatività, collegamento alla cultura locale, buone potenzialità nel miglioramento dell'efficienza energetica degli edifici, disponibilità di un repertorio di appropriate soluzioni tecnologiche.

Queste caratteristiche, tuttavia, da sole, non permettono al materiale di garantire la sostenibilità della costruzione in quanto, come detto, sono le modalità di uso e i caratteri del progetto che prioritariamente ne sono responsabili, ma sicuramente lo pongono tra i prodotti più adatti, in determinate condizioni, al raggiungimento di qualificati obiettivi di sostenibilità.

Molti dei progetti con questo obiettivo adottano soluzioni tecniche che tendono a semplificare, a rispondere misuratamente a problemi specifici, a non ricercare la visibilità. Semplicità di soluzioni che corrispondono a semplicità in fase di costruzione e di manutenzione e che si evidenziano nei nodi, negli attacchi tra pareti esterne e copertura, negli attacchi a terra, nell'inserimento delle finestre. Il dizionario del laterizio si fonda su questo e gran parte delle innovazioni recenti vanno comunque nella direzione di soluzioni coerenti con il bagaglio di soluzioni tradizionali e consolidate che sono proprie del materiale e di un suo coerente uso.

Vi è dunque anche una facilitazione per la realizzazione di edifici sostenibili data da questa semplicità propria del materiale e del bagaglio di conoscenze e soluzioni tecniche ad esso collegato.

In gran parte dei progetti, per raggiungere l'obiettivo di ridurre i consumi energetici, si pongono in atto soluzioni massive, anche nel caso in cui le pareti esterne siano composte da stratificazione di diversi materiali. Queste soluzioni sono proprie dell'uso del laterizio, che ha la possibilità di costruire con facilità ed economia la massa necessaria oltre che per un elevato isolamento, anche in ragione di una considerevole inerzia termica. La massa muraria è uno strumento sempre efficace per la riduzione dei consumi; ci possono essere soluzioni efficaci che riducono la quantità di materiali o che utilizzano materiali presenti maggiormente nei luoghi di insediamento, ma sicuramente l'uso della massa in generale favorisce il raggiungimento di ottimi livelli di efficienza energetica e di comfort abitativo degli edifici.

Il laterizio quindi si presenta come materiale che favorisce la ricerca di soluzioni sostenibili, sia per i caratteri propri, sia per la semplicità delle soluzioni tecniche, sia per la possibilità di soluzioni massive. Questo bagaglio positivo non garantisce però, come già detto, che gli edifici in laterizio siano tutti sostenibili.

A queste ragioni di attualità della muratura portante in laterizio, occorre doverosamente aggiungere l'attenzione del progettista alla necessità di operare le proprie scelte sulla base di una pluralità di elementi. Tra di essi occorre evidenziare l'esame non solo della idoneità statica ma anche delle caratteristiche termofisiche dei materiali da impiegare; la valutazione dei comportamenti igrometrico e termico, del grado di benessere abitativo, del comportamento al fuoco, dell'affidabilità, della durabilità, della manutenibilità, della lavorabilità, dell'eventuale nocività; la presa in considerazione del costo di costruzione, ma anche dei costi di esercizio e del costo globale. Se questi aspetti vengono tutti coscientemente considerati non vi è ragione di dubitare della competitività della soluzione a muratura portante, che continua ancora oggi a mostrare un'inesauribile vitalità.

### 1.3 Evoluzione storica della muratura portante in laterizio

In questo quadro si può apprezzare oggi, anche e particolarmente, la riacquistata dignità della muratura portante.

La muratura portante è una struttura continua. Il termine struttura indica l'insieme delle unità tecnologiche e degli elementi tecnici appartenenti al sistema edilizio destinati a sostenere i carichi e collegare staticamente le sue parti.

La muratura è una struttura continua, cioè costituita da elementi piani a prevalente sviluppo bidimensionale, questi, implicitamente per la loro stessa natura, concorrono a separare verticalmente gli spazi interni dell'organismo edilizio fra loro e fra loro e quelli esterni.

Con la notazione “muratura in laterizio”, si intende un “aggregato di elementi artificiali (mattoni o blocchi) ottenuti in argilla cotta (terra cotta ovvero laterizio), aventi forma più o meno regolare, sovrapposti in opera gli uni agli altri con interposizione di una sostanza legante o cementante; solo molto raramente vengono eseguite murature senza legante”.<sup>4</sup>

Come struttura continua la muratura in laterizio viene utilizzata per fini o prestazioni molto vari e soprattutto pressoché costantemente ne viene fatto un utilizzo complesso: è raro, infatti, che una muratura sia impiegata per assolvere ad un'unica funzione (per esempio essere solamente portante). Di volta in volta potrà avere una funzione prevalente ed allora, finché possa rispondere correttamente allo scopo, verrà dimensionata in progetto con le caratteristiche necessarie e verrà eseguita con gli elementi in laterizio dalle forme e prestazioni più adatte.

In Italia, in Europa, nel bacino mediterraneo da secoli la muratura in laterizio ha svolto insieme funzioni di struttura, di chiusura e di partizione. Non è necessario ricordare che con la tecnica della muratura continua sono state realizzate le architetture più importanti delle città italiane; tra gli altri aspetti ciò sta anche a significare che le murature continue non ponevano all'estro dei progettisti limitazioni tali da togliere a questi la possibilità di esprimersi in termini di elevata qualità architettonica.

---

<sup>4</sup> TUBI, *La realizzazione di murature in laterizio*, Roma, Laterconsult, 1981, pag.14

L'introduzione delle strutture puntiformi a telaio ha portato lentamente in crisi questo modo di operare. Non in crisi di quantità, forse, ma certamente in crisi di qualità, attirando, per le nuove possibilità offerte, l'attenzione di progettisti migliori.

Le possibilità rivoluzionarie per il tempo, offerte da questo principio alla libertà organizzativa degli spazi, non ingombrati da murature portanti ma solo da esili sostegni verticali, hanno fatto facile presa tra i progettisti, perché davano via libera alla loro inventiva, e tra i costruttori, perché consentivano di giungere rapidamente alla copertura degli edifici e, quindi di lavorare in uno stato di dipendenza più relativa dai fattori climatici. Alla libertà derivante dalla separazione tra funzioni strutturali e funzioni di chiusura e partizione interna, si aggiungevano le libertà compositive derivanti dalla possibilità di realizzare aggetti e/o rientranze, in una parola di movimentare la volumetria dell'edificio ricorrendo ad elementi strutturali specifici di semplice realizzazione.

Il Movimento Moderno fa propri i cinque punti della teoria progettuale di Le Corbusier: struttura autonoma; piano libero; *pilotis*; finestre a nastro; tetto terrazza. A parte l'ultimo, questi punti sono state altrettante sentenze di condanna a morte per la muratura continua. Adottarla nei propri progetti, per vari decenni, ha significato retroguardia, arretratezza professionale, scarso impegno culturale. Questo perché si riteneva che sulla muratura continua non si potesse dire altro che non fosse già stato detto; non presentava, quindi, alcun interesse per lo strutturista sotto il profilo della dimostrazione della propria abilità del calcolo.

Successivamente, il problema della flessibilità viene riesaminato e si scopre per esempio, che una buona progettazione di partenza circoscrive a pochissime zone dell'alloggio la necessità di interventi successivi per modificarne l'assetto. La natura di tali interventi non è poi misteriosa né globalizzante; per lo più si tratta dell'apertura o della chiusura di una o più porte e della realizzazione di nuovi collegamenti alle reti impiantistiche idro-sanitaria e di climatizzazione. A questo punto la possibilità di soddisfare il requisito di flessibilità non è più legata al principio strutturale (pareti portanti sono e pareti portanti restano), ma si sposta al materiale con cui è fatta la parete: per essere espliciti, continuando l'esempio

dell'alloggio, non è la concezione della struttura continua che limita la flessibilità, ma il materiale con cui tale struttura è realizzata.

A differenza di quanto si è verificato in Italia, in altri Paesi l'impiego della muratura portante in laterizio non ha subito un ridimensionamento così netto e prolungato nel tempo. Dopo le alterne vicende della prima metà del secolo, messo a dura prova dalle tendenze razionaliste del Movimento Moderno prima, e dall'industrializzazione dopo, a partire dal secondo dopoguerra la muratura portante ha saputo adattarsi alle nuove esigenze tecnologiche ed espressive dell'architettura contemporanea sia in Europa che in altri continenti, riguadagnando una posizione di mercato di tutto rispetto.

Fra l'altro, singolarmente, l'impiego di murature in laterizio si è sviluppato anche in regioni dove storicamente non se ne era fatto un uso particolare, mentre viene impiegata con sempre maggiore interesse anche nei Paesi esposti al rischio sismico, come muratura armata.

Le tecniche murarie sono diverse da un Paese all'altro e prevedono l'impiego di materiali di varia natura, anche se, a parte situazioni specifiche, la sperimentazione e il trasferimento del *know-how* tecnologico su scala internazionale degli ultimi anni mostrano una certa tendenza a rendere i vari mercati sempre più omogenei e indifferenziati. È vero infatti che in molti casi la muratura portante deriva da consuetudine e tradizioni regionali ed è quindi legata a scelte tecnologiche indigene, con caratteri peculiari, cui fa fronte la produzione industriale locale; ma è anche vero che l'internalizzazione del linguaggio architettonico, soprattutto in questi ultimi anni, ha posto nuove basi per l'interscambio produttivo, per cui non è infrequente registrare fenomeni di importazione ed esportazione anche in un settore ritenuto "tradizionalista" come quello dei laterizi.

Nel campo delle murature in mattoni faccia a vista, per fare un esempio, le particolari caratteristiche prestazionali degli elementi prodotti da alcuni Paesi ne consentono l'esportazione all'estero, come nel caso di mattoni italiani "fatti a mano" richiesti in altri Paesi europei, dei mattoni della Redland Brick esportati dall'Inghilterra fin dal remoto Giappone o degli

elementi clinkerizzati prodotti in Germania, largamente richiesti nel resto del mondo.

Oltre a motivazioni di natura regionale, è evidente che nel campo degli elementi per murature il trasferimento della produzione da un Paese all'altro deve fare i conti con la sensibile incidenza dei costi di trasporto. Anche per questo l'interscambio si è sviluppato soprattutto nel campo del trasferimento delle tecnologie produttive e quindi nel perfezionamento dei brevetti, posto che la materia prima impiegata sia disponibile. Come è stato nel caso del laterizio alleggerito in pasta, prodotto in molti Paesi europei, con procedure assimilabili, su licenza.

La tecnica costruttiva si basa in genere su due tipi di muratura: semplice e armata.

Le soluzioni adottate per queste due tecniche in vari paesi sono comuni nel primo caso, mentre differiscono nel secondo.

La muratura semplice è sempre costituita da pareti formate esclusivamente da corsi di mattoni o blocchi solidarizzati da malta di allettamento, prive di orditure metalliche con funzioni strutturali primarie. La presenza di legature (barre metalliche, staffe, ancoraggi) costituisce una misura di rinforzo opzionale, e solo in qualche caso è prescritta a livello normativo, soprattutto per quanto riguarda l'ancoraggio dei solai alle pareti, in forma di cordolatura.

La muratura armata, invece, assume caratteristiche diverse da un Paese all'altro.

La muratura semplice viene impiegata per edifici di altezza contenuta e, nei Paesi soggetti a rischio sismico, per costruzioni morfologicamente molto regolari.

Nelle zone ad elevata sismicità, e soprattutto per edifici più alti, viene generalmente impiegata la muratura armata.

Dal punto di vista del dimensionamento strutturale una distinzione che viene fatta dalle normative di molti Paesi, in base alle caratteristiche generali dell'edificio, prevede due livelli di complessità, cui corrispondono metodologie di calcolo diversificate, che possono essere assimilati ai concetti di un "edificio semplice" e un "edificio generico".

Ciò che caratterizza maggiormente l'impiego della muratura portante in molti Paesi stranieri, è l'evoluzione delle tecnologie costruttive basate sul laterizio che, oltre alla già citata muratura armata, ha permesso di perfezionare tecniche costruttive innovative di grande interesse, come le murature nervate o a diaframma in Inghilterra, i *fin walls* e i *cavity walls* negli Stati Uniti, ecc.

Un ultimo aspetto da considerare nell'esperienza straniera, con notevoli implicazioni sul piano progettuale e architettonico, è la possibilità di utilizzare la muratura portante in edifici a struttura mista. In molti Paesi l'uso della muratura è limitato, per le sue specifiche caratteristiche prestazionali solo ad alcune parti dell'edificio (in genere pareti perimetrali, pareti di controventamento o nuclei interni irrigidenti) ed è associato ad altri sistemi costruttivi, tipicamente strutture intelaiate metalliche o in calcestruzzo armato, per la realizzazione di altre parti della costruzione. Tale possibilità è consentita principalmente dall'aver sviluppato idonee norme tecniche che forniscono i criteri per il calcolo strutturale di edifici a struttura mista.

## 1.4 La muratura portante e l'evento sismico

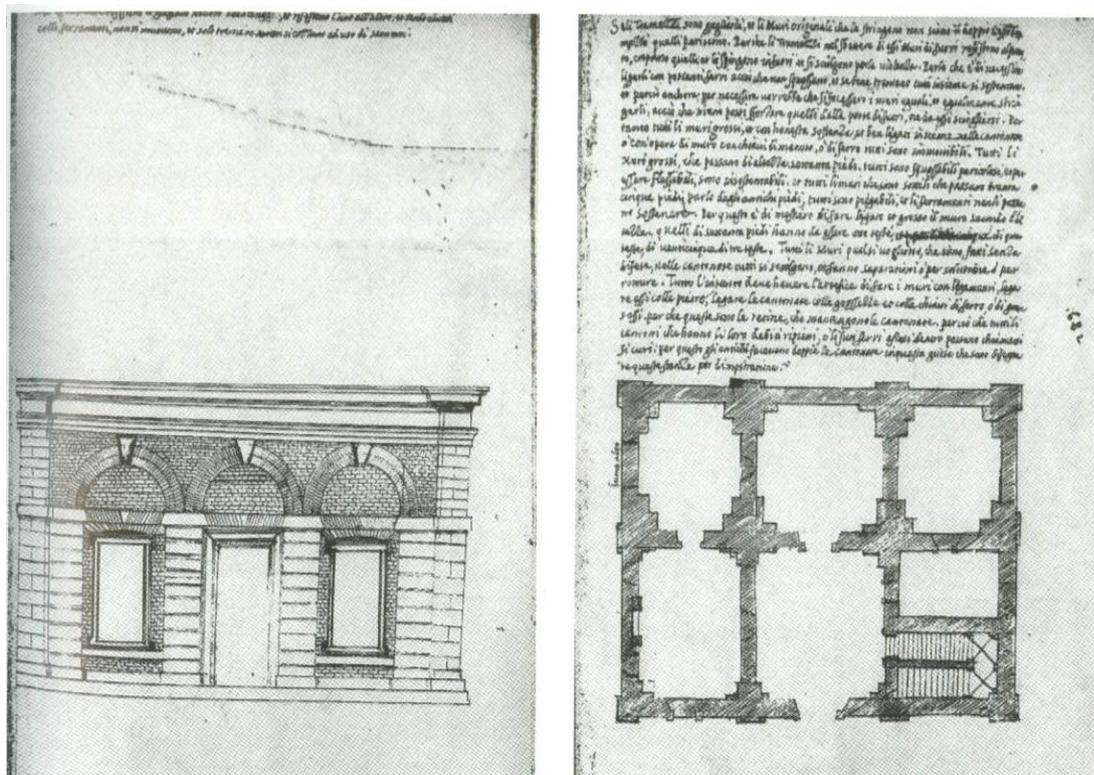


Figura 1.4\_1

*Alzato e pianta della casa anti-sismica proposta da Pirro Ligorio nel manoscritto "Delli rimedi contra terremoti per la sicurezza degli edifici" (XVI sec.)*

Gli effetti dei terremoti sulle costruzioni, come sappiamo oggi, dopo secoli di emancipazione tecnica e scientifica, dipendono da fattori la cui natura è varia e spesso di difficile interpretazione. I danni possono essere attribuiti, oltre che all'intensità e alle caratteristiche dinamiche del sisma, alla collocazione degli edifici e a particolari condizioni geologiche del sito, all'articolazione strutturale e non strutturale della costruzione, alla sua morfologia, al tipo di fondazioni, alle modalità costruttive originarie, alle modifiche subite nel tempo, allo stato di manutenzione, al non rispetto di norme anti-sismiche, come anche, più in generale, ad una sottovalutazione del rischio sismico.

Un complesso di fattori estremamente diversi e aleatori, fra cui sussistono correlazioni ed interdipendenze che nella pratica si traducono in fenomeni di amplificazione o attenuazione degli effetti sismici sulle costruzioni, anche fra zone molto prossime alla stessa area colpita, in gran parte incontrollabili e di difficile quantificazione. Questo è il motivo per cui, quando si studia in dettaglio una zona terremotata, si può scoprire che accanto ad edifici completamente rasi al suolo se ne possono osservare degli altri, pur realizzati con le stesse tecniche costruttive e gli stessi materiali, poco o niente affatto danneggiati.



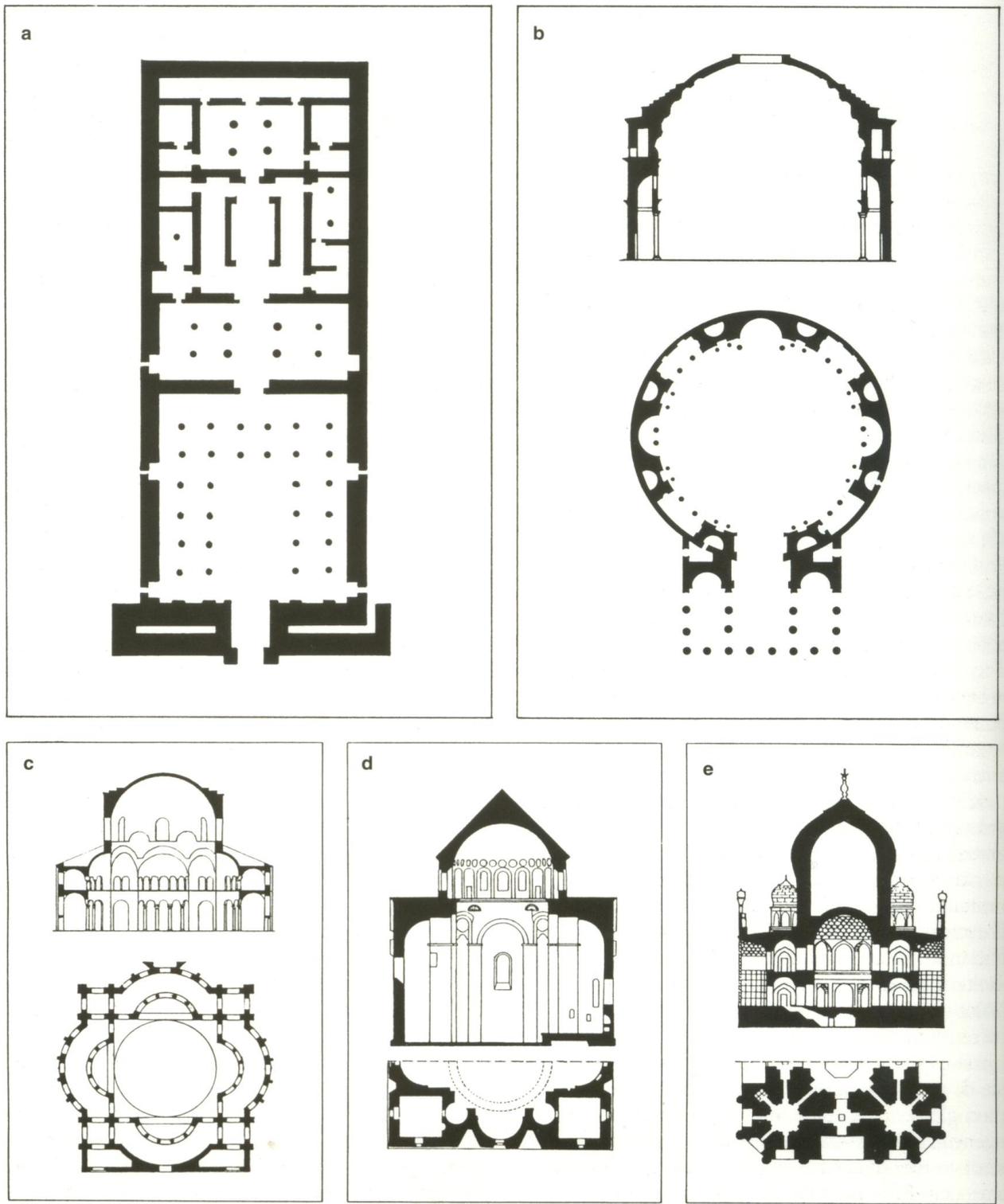
**Figura 1.4\_2**

*Un edificio in muratura portante rimasto indenne dopo il terremoto, accanto alle macerie di modeste costruzioni in pietrame*

Motivi del genere dovrebbero essere sufficienti ad indurre una maggiore cautela nel formulare i giudizi sommari e i luoghi comuni espressi in materia di tecniche costruttive ritenute più idonee per resistere ai terremoti, che fino a qualche decennio fa hanno “demonizzato” l’uso della

muratura portante in zone sismiche. Il più delle volte le cause principali dei danni prodotti da un terremoto sono da ricercare nella povertà dei materiali impiegati, nella cattiva esecuzione degli elementi e dei dettagli costruttivi, nell'assenza di opportune legature fra le varie parti della struttura, in una irregolare configurazione dell'edificio, nella presenza di alterazioni strutturali errate, ecc. Ebbene, alla prova dei fatti, quello che emerge dall'analisi degli effetti dei terremoti più recenti è che questi fattori di rischio sono comuni a tutte le tecniche costruttive e non sono affatto prerogativa degli edifici in muratura portante.

Il pregiudizio sismico nei confronti della muratura portante si è consolidato – non del tutto casualmente – all'inizio del XX secolo, quando la concorrenza dei sistemi costruttivi a telaio metallico e in conglomerato cementizio armato trovò facile presa nell'osservazione empirica e indiscriminata dei danni prodotti dai terremoti dell'epoca: San Francisco, 1906; Messina, 1908; Tokyo, 1923. A sfavore degli edifici in muratura portante, in quegli anni, giocava la povertà strutturale e la vetustà di gran parte di essi, le cui prestazioni strutturali non erano in condizioni di reggere il confronto con quelle dei pochi edifici intelaiati di più recente realizzazione. Senza nulla togliere all'importanza storica, alla validità e all'attualità di questi procedimenti costruttivi, è singolare notare come la loro affermazione, soprattutto per costruzioni in zone sismiche, si sia avvantaggiata del clima di generale impreparazione e di grossolana generalizzazione che ha caratterizzato la progettazione anti-sismica fino a pochi decenni fa, che aveva le sue radici nel presupposto che una struttura “deformabile, elastica e leggera” fosse ideale per costruire in zona sismica, mentre la muratura portante - non importa quale - era da bandire per definizione.



**Figura 1.4\_3**

*Alcuni esempi di stabilità di antiche strutture murarie determinata da un'ideale disposizione di masse equilibranti, alla base o alla sommità degli edifici e da configurazioni regolari*

L'assunto semplicistico che impose le strutture intelaiate in zona sismica, inoltre, fece passare in secondo piano l'evidenza dei molti edifici in

muratura portante (di più recente realizzazione e/o di miglior fattura) che avevano superato la prova del terremoto senza danni rilevanti.<sup>5</sup>

È alla sommarietà e al rudimentale livello di scientificità che hanno caratterizzato fino a poco tempo fa la ricerca in campo sismico, pertanto, che si può in parte attribuire il pregiudizio storico sull'impiego della muratura portante in zone sismiche. La conseguenza più diretta di tale atteggiamento pregiudiziale, di cui ancora oggi si avvertono le conseguenze, è stata una drastica limitazione della muratura portante a partire dalle prime normative per costruzioni in zone sismiche emanate in quegli anni.

Due sono le caratteristiche principali che hanno garantito la sopravvivenza alle azioni sismiche di molti edifici in muratura del passato:

- La regolarità morfologica e costruttiva dell'edificio, con la presenza di percorsi strutturali omogenei e ininterrotti, capaci di canalizzare e convogliare opportunamente le azioni indotte dal sisma;
- Il corretto impiego di materiali collaboranti, atti a fornire ai muri modalità di resistenza adeguate alle sollecitazioni prodotte dalle azioni orizzontali sull'edificio.

Questi due fattori costruttivi, singolarmente presentati o mutuamente concorrenti, sono la principale spiegazione della sopravvivenza di molti edifici in muratura ai terremoti del passato, remoto e prossimo, e restano tuttora due principi fondamentali per una buona progettazione e realizzazione di edifici in muratura portante in zona sismica. Il primo di questi principi, ben noto già dall'antichità, è stato il solo criterio adottato per molti secoli, prima dell'introduzione nelle murature di "armature" integrative realizzate con materiali diversi. Per quanto riguarda le costruzioni in mattoni esso è stato applicato secondo criteri solo apparentemente distinti:

---

<sup>5</sup> Un'importante testimonianza sul vasto numero di edifici in muratura portante di laterizio che superarono senza gravi danni la prova di alcuni terremoti di inizio secolo si trova su: Clay Products Institute of California 'Costruzioni antisismiche'

- L'assorbimento delle spinte laterali entro i limiti della sola compressione, sfruttando forti comportamenti di carico verticale prodotte dal peso proprio di grandi masse murarie;
- L'annullamento e l'equilibrio delle azioni laterali mediante sistemi simmetrizzati di archi spingenti, contrafforti, masse stabilizzanti localizzate;

In relazione al secondo principio, la strada seguita per incrementare la risposta sismica degli edifici in muratura portante, oltre a perfezionare la forma e la distribuzione delle masse strutturali, si è basata sul miglioramento del comportamento resistente dei muri, con una interpretazione empirica della collaborazione fra paramento murario ed elementi di rinforzo. Gli innumerevoli espedienti realizzati storicamente per migliorare la resistenza degli edifici in muratura si possono ricondurre sostanzialmente alle seguenti tecniche:

- Miglioramento delle qualità della malta di allettamento e/o del conglomerato di riempimento (nella realizzazione di murature a sacco a doppia parete);
- Impiego di graffaggi e ancoraggi metallici, con effetto prevalentemente localizzato;
- Uso di una intelaiatura completa, generalmente lignea, di ingabbiamento degli elementi murari;
- Inserimento di barre e orditure metalliche, come vera e propria armatura o con funzione di tirantature.

Le moderne normative, da ultima la NTC-DM 14/01/2008, seppur limitando l'uso della muratura portante in funzione della sismicità dell'area di costruzione, dispongono determinate prescrizioni da adottare permettendo la progettazione e realizzazione di edifici di una certa entità.

Nei capitoli successivi saranno trattati più dettagliatamente tali prescrizioni normative.

Riportiamo nel paragrafo seguente un esempio delle potenzialità della muratura portante in luoghi purtroppo pesantemente toccati dai recenti eventi sismici.

#### **1.4.1 Progetto ENEA-ANDIL a Sulmona (AQ)**

Si tratta di un progetto pilota congiuntamente redatto da ENEA e ANDIL (Associazione Nazionale Degli Industriali dei Laterizi) per la costruzione di un edificio in muratura portante di laterizio, isolato sismicamente alla base, destinato ad ospitare il Centro Servizi Comunali di Sulmona.

Il progetto è frutto della collaborazione dell'Amministrazione del Comune di Sulmona, dell'Arch. Paolo Luccioni e dell'Ing. Leopoldo Rossini, rispettivamente per gli aspetti architettonici e strutturali, dell'ENEA che ha fornito la propria consulenza tecnico-scientifica sia per la progettazione delle strutture (Ing. Paolo Clemente), sia per l'efficienza energetica (Arch. Gaetano Fasano), e dell'ANDIL che metterà a disposizione gratuitamente i materiali prodotti dai propri associati.

Da un punto di vista dimensionale, la struttura si sviluppa su tre livelli fuori terra, più un piano interrato. Le superfici utili calpestabili dei tre livelli fuori terra si aggirano sui 220 mq per piano, cui va aggiunto il vano di distribuzione, dove è collocato anche il corpo scala/ascensore, che ha una superficie utile calpestabile di circa 50 mq con ampia parete a vetro. Il piano interrato, adibito ad autorimessa, sporge di 1,5 m su tutti i lati rispetto all'ingombro in pianta dell'edificio, sviluppando una superficie di circa 480 mq. In corrispondenza, invece, dell'accesso al piano terra del Centro Servizi, si prevede la realizzazione di una piazza pedonale con attigua un'area di parcheggio pubblico.

L'edificio avrà, per i tre piani fuori terra, struttura portante in muratura in laterizio "alleggerito in pasta" monoblocco.

Gli elementi resistenti saranno del tipo rettificato con giunti orizzontali sottili (1 mm) e giunti verticali ad incastro con tasca riempita di malta. I muri perimetrali avranno spessore pari a 45 cm con rivestimento esterno in

listelli di laterizio a vista da 6 cm; quelli interni avranno spessore di 30 cm.

La sovrastruttura sopra descritta appoggerà su dispositivi di isolamento sismico, a loro volta poggianti su pilastri in c.a. spiccanti dalla fondazione anch'essa in c.a.



**Figura 1.4.1\_1**

*Progetto ENEA-ANDIL del Centro Servizi Comunali di Sulmona: Render*

Dal punto di vista energetico, va evidenziato che l'edificio è stato verificato tenendo presente il quadro normativo vigente (D.Lgs. 192/05 e smi e UNI EN 11300 parte 1, 2 e 3). Su questa base di riferimento, si sono valutati quegli interventi in grado di classificare l'edificio, alla luce della nuova Direttiva 31/2010/CE recast, a livello di edificio ad energia quasi zero (NEZB). Inoltre, per dare una connotazione anche eco-sostenibile all'edificio ci si è indirizzati sull'utilizzo di materiali e sistemi, per l'involucro edilizio, a bassissimo impatto ambientale. L'involucro opaco è, infatti, realizzato in laterizio ad alta prestazione termoisolante, con faccia vista all'esterno e internamente un intonaco coibente, in modo da raggiungere valori medi di trasmittanza inferiori di circa il 30% a quelli definiti dalla attuale legge.

Inoltre, vengono adottati sistemi di schermatura in laterizio, appositamente studiati, sulle aperture vetrate del corpo di collegamento verticale. Sul piano del comfort abitativo, la significativa inerzia termica dell'involucro consentirà valori di attenuazione e sfasamento che permetteranno, nel



**Figura 1.4.1\_2**

*Progetto ENEA-ANDIL del Centro Servizi Comunali di Sulmona: Pinta piano terra*

periodo estivo, di ottenere idonee condizioni ambientali senza dover ricorrere a costosi e energivori impianti di raffrescamento.

L'iniziativa vuole promuovere e valorizzare un materiale strutturalmente affidabile, quale il laterizio, e le nuove tecnologie di prevenzione antisismiche in via di diffusione sul territorio nazionale, perseguendo risultati di eccellenza sia dal punto di vista dell'efficienza energetica che della sostenibilità ambientale.

Il laterizio, che ha dimostrato di non temere il passare dei secoli evolvendo continuamente nelle prestazioni e nei sistemi costruttivi offerti, fornisce ottime garanzie per assicurare risparmio energetico, comfort abitativo e

sicurezza sismica e, con l'isolamento sismico alla base, può inoltre garantire (grazie alla caratteristica di "rigidezza" della muratura) soluzioni costruttive, multipiano e con importanti volumetrie, che non subiscono danni anche per l'azione di terremoti di elevata intensità.<sup>6</sup>



**Figura 1.4.1\_3**

*Progetto ENEA-ANDIL del Centro Servizi Comunali di Sulmona: Sezione dell'edificio su isolatori sismici*

<sup>6</sup> La gazzetta dei solai, Maggio 2012 – numero 86

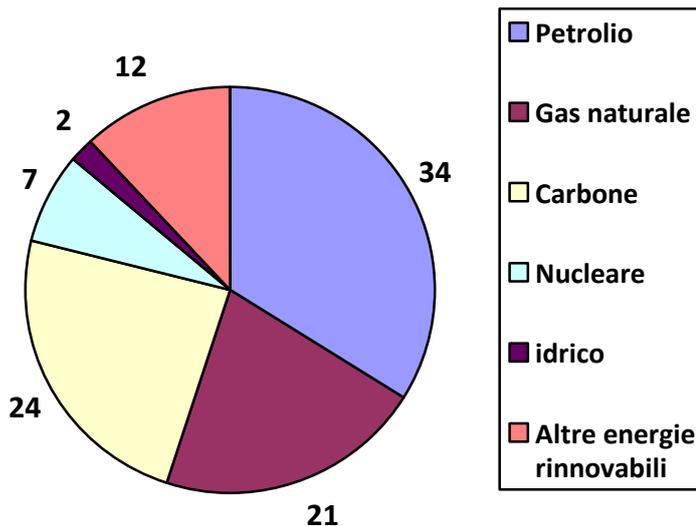
## **2. CAPITOLO II – FONDAMENTI PER UNA PROGETTAZIONE SOSTENIBILE**

### **2.1 Progetto e Costruzione**

#### **2.1.1 Energia e Architettura**

Architettura sostenibile, bioarchitettura, architettura bioclimatica, architettura solare sono termini spesso utilizzati come sinonimi, ma nessuno di essi ha un significato condiviso. Li utilizziamo per definire edifici o luoghi urbani progettati e costruiti secondo principi che spaziano dall'attenzione alla salute e al benessere, all'ambiente e all'energia. I primi due fattori sono strettamente dipendenti dal terzo, l'energia. Non saremo in grado di garantire salute e benessere senza energia e non possiamo pensare di conservare l'equilibrio dell'ambiente senza l'utilizzo appropriato dell'energia, a meno di non tornare a sistemi di vita di qualche miliardo di persone in meno. Ogni prodotto che utilizziamo, dalla penna al grande impianto produttivo, contiene in sé un carico energetico invisibile.

La sostituzione delle fonti energetiche fossili con le altre alternative è pertanto inevitabile, ma è una condizione a lungo periodo: nel breve e medio periodo continueremo ad utilizzare le fonti fossili. Le fonti rinnovabili sono già diffuse, ma la tecnologia non è ancora sufficientemente sviluppata per garantire da un lato una produzione economicamente sostenibile, dall'altro una distribuzione capillare in grado di sostituire carbone, petrolio e gas. Nucleare e fonti rinnovabili in ogni caso non riusciranno nel breve e medio periodo a coprire gli attuali fabbisogni energetici e sostituire per intero le fonti fossili.



**Figura 2.1.1\_1**

*Consumi in percentuale di energia sul pianeta terra in relazione alla fonte energetica*

L'errore sta nel fatto che non necessariamente in futuro i consumi di energia dovranno essere i medesimi. Premesso che sarà necessario almeno conservare l'alto livello di benessere raggiunto dai Paesi definiti "occidentali", bisogna scardinare il principio dell'economia classica secondo cui esiste una diretta correlazione tra il crescente fabbisogno energetico e il miglioramento della qualità della vita.

Anche lo spropositato utilizzo di energie rinnovabili impone riflessioni, per questo bisogna ricordare che minor energia vuol dire minori centri di produzione della stessa, di qualsiasi genere.

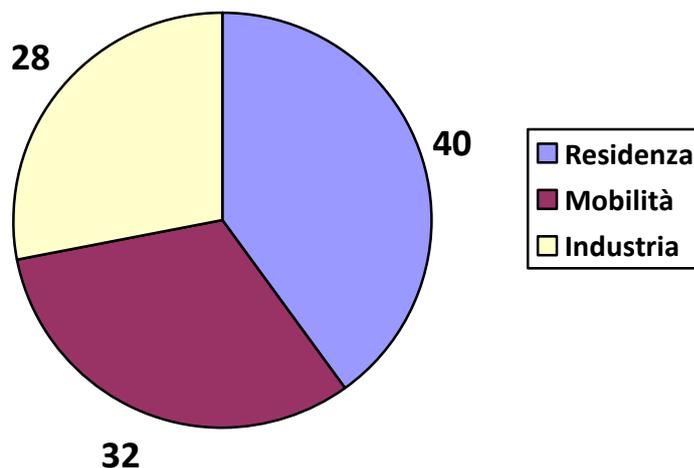
Entro il 2020 l'Unione Europea ha deciso di ridurre del 20% il totale dei consumi energetici. Nel breve e medio periodo è necessario considerare l'efficienza energetica come la sesta fonte energetica: tecnologicamente non esauribile, stupefacente in termini di conservazione dell'ambiente, eccezionale in termini di salute e benessere dell'uomo, rapida nel conseguire risultati.

“Se energie e architettura sono ambedue tecnologie, la correlazione tra architettura ed energia è molto stretta: possiamo tranquillamente dire che l'energia è anche architettura, e l'architettura è anche energia.”<sup>7</sup>

<sup>7</sup> RINALDI, Progettazione ed efficienza energetica, Santarcangelo di Romagna, Maggioli, 2010, pag. 14

Infatti con l'architettura possiamo controllare l'energia. In passato, in assenza di conoscenze tecnologiche per sfruttare l'energia, l'architettura aveva il primato in questo campo, in quanto era l'unico strumento in grado di garantire un certo grado di comfort per l'uomo. Risultati che oggi possiamo verificare e controllare attraverso formule scientifiche, erano già ben noti ai nostri antenati, che li raggiungevano attraverso il progetto dell'architettura. La recente evoluzione scientifica, invece che migliorare il processo di integrazione tra architettura ed energia, li ha separati in due binari paralleli, separazione che ha di fatto peggiorato la qualità della progettazione e costruzione architettonica.

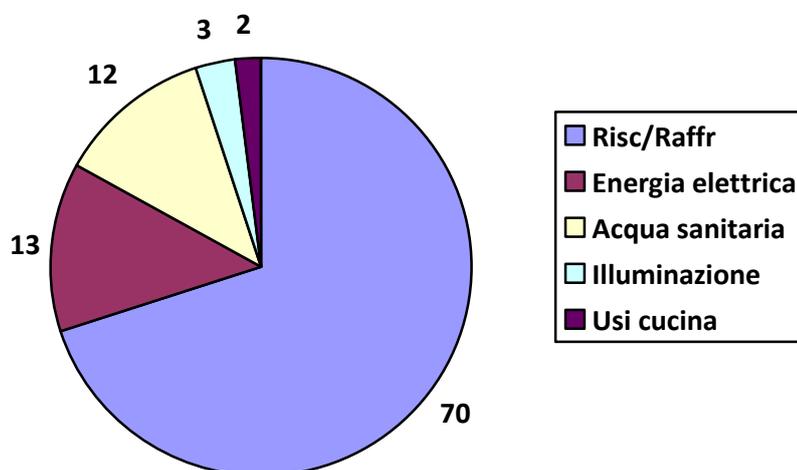
E' necessario quindi ristabilire il giusto legame interdipendente tra architettura ed energia, facendo entrare l'efficienza energetica direttamente nel progetto e costruzione dell'architettura. Il settore dell'edilizia residenziale e del terziario, che in Europa è responsabile del 40% dei consumi totali di energia, deve essere oggetto di un deciso riassetto strutturale mirato alla sostenibilità.



**Figura 2.1.1\_2**  
*Consumi di energia in Europa*

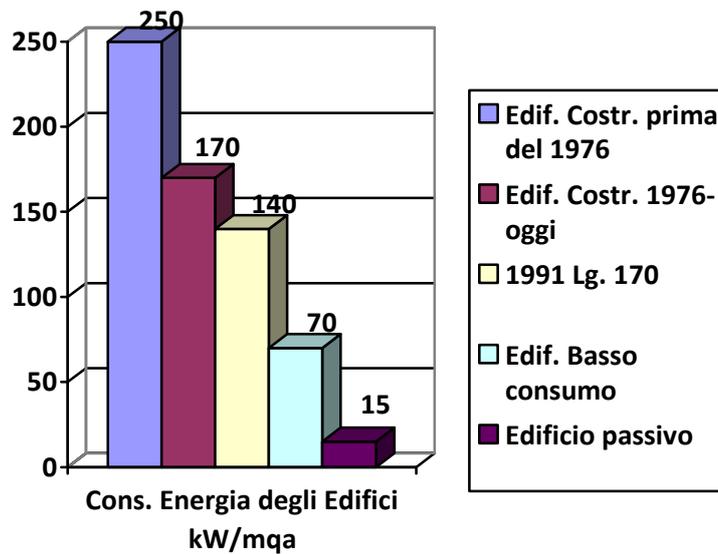
La responsabilità del progetto non può quindi essere sottovalutata. In quanto, mentre altri prodotti vengono sostituiti nel breve termine, l'architettura rimane immutata per un lungo periodo, anche 40 anni, e comunque la sostituzione e/o risanamento richiede elevate spese, anche energetiche.

I margini di miglioramento sono ancora enormi, e in questa direzione l'idea di "consumo zero" non è poi così futuristica. Il 71% dei consumi di un abitazione è rappresentato dall'energia necessaria al riscaldamento e raffrescamento della stessa, è chiaro quindi che questo sia il primo parametro su cui bisogna agire per ottenere miglior efficienza energetica.



**Figura 2.1.1\_3**  
*Consumi di energia negli edifici residenziali*

Ridurre i consumi è diventato l'imperativo per una nuova architettura ad alta efficienza. Se poi la riduzione è ottenuta applicando il miglioramento tecnologico alle componenti proprie dell'architettura, si ristabilisce anche quel giusto rapporto tra energia ed architettura, progetto-costruzione.



**Figura 2.1.1\_4**  
*Consumi di energia degli edifici*

### 2.1.2 Energia e Comfort abitativo

Un edificio ad alta efficienza energetica consente di alzare anche il livello di qualità di vita dello spazio stesso, migliora la percezione di ciò che ci sta intorno e permette un considerevole risparmio economico per l'utente rispetto ad un edificio tradizionale.

Infatti sono diverse le cause che possono modificare il benessere ambientale all'interno di un edificio, tuttavia queste sono direttamente connesse a tre principali fattori progettuali su cui bisogna agire:

luce, aria, temperatura.

La **luce** è il parametro di eccellenza per la definizione dello spazio. La sua qualità valorizza lo spazio architettonico, mentre la sua quantità consente un risparmio economico dovuto alla mancata necessità della luce

artificiale. È opportuno quindi “progettarla” in modo adeguato lavorando sulla forma, orientamento, schermatura e posizione delle aperture, per garantire l’utilizzo della luce naturale per il maggior tempo possibile.

L’**aria**, la sua purezza, **temperatura** e umidità.

Spesso la qualità dell’aria all’interno degli ambienti è inferiore rispetto a quella dell’esterno. Infatti, in un ambiente in cui vivono delle persone, la qualità dell’aria tende a diminuire velocemente. La ventilazione degli ambienti consente pertanto di controllarne la qualità. In un edificio ad alta efficienza la ventilazione è realizzata meccanicamente o affidata a particolari accorgimenti progettuali per una Ventilazione Naturale Controllata (VCN) . Questi accorgimenti consentono di mantenere elevata e costante la qualità dell’aria, riducendo le dispersioni termiche dovute ad una ventilazione manuale.

Ciò che però influenza maggiormente il comfort climatico all’interno dell’edificio è l’umidità e la temperatura, più precisamente non quella effettiva dell’aria, ma quella delle superfici interne che delimitano lo spazio. Questo dipende dalla differenza di temperatura percettibile tra la temperatura dell’aria e la temperatura media delle superfici circostanti.

Essendo il corpo umano a temperatura costante di circa 37°C, esso scambia per irraggiamento calore con altri corpi esistenti che possono essere: una parete esterna o la superficie di una finestra fredda, suscitando sensazione di freddo anche nel caso di una temperatura dell’aria elevata. In un edificio ad alta efficienza d’inverno la temperatura interna delle chiusure trasparenti è molto più elevata che in un edificio tradizionale.

Una omogeneità delle temperature di aria e superfici ( $\Delta T$  inferiore di 3°C) garantisce pertanto benessere anche a basse temperature dell’aria d’inverno. Si può considerare che ogni grado di temperatura in meno corrisponda ad un risparmio energetico di circa il 6%.

### 2.1.3 Energia e Progetto

L'obiettivo del progetto di un edificio ad elevata efficienza energetica è sostanzialmente quello di garantire il microclima interno con il minor consumo di energia. Una corretta progettazione parte dal principio che il clima interno è controllato principalmente mediante l'idea progettuale e costruttiva dell'edificio riguardo al clima esterno.

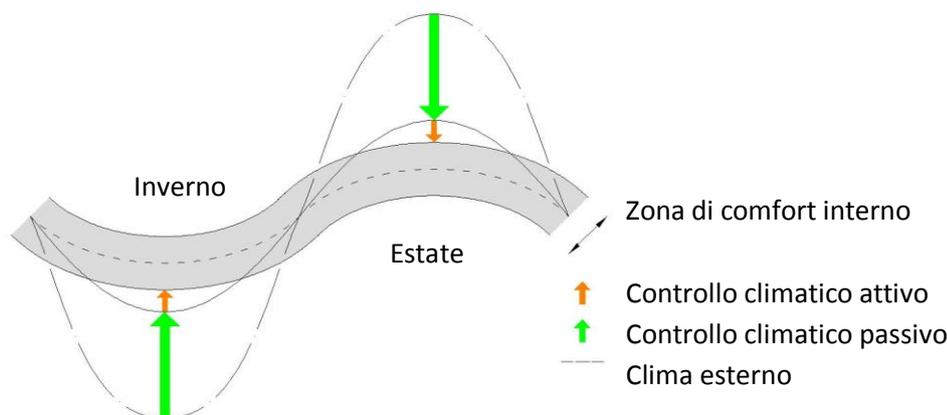


Figura 2.1.3\_1

*Il progetto dell'architettura deve garantire la massima riduzione dei consumi energetici (controllo passivo) e solamente per le rimanenti quantità di fabbisogno termico si agisce sul sistema impiantistico (controllo attivo)*

Questo concetto è in realtà l'esatto contrario di quello che ha guidato le costruzioni degli ultimi decenni, dove i sistemi impiantistici hanno condizionato in modo considerevole il clima interno. Possiamo allora definire "passiva" quell'architettura in cui le condizioni di comfort sono raggiunte grazie alla forma dell'architettura, alle caratteristiche dell'involucro edilizio e a sistemi di trasporto di calore da o verso l'ambiente circostante.

Il fabbisogno termico di un edificio è descritto dalla semplice equazione:

$$Q_h = Q_t + Q_v - A_s - A_i$$

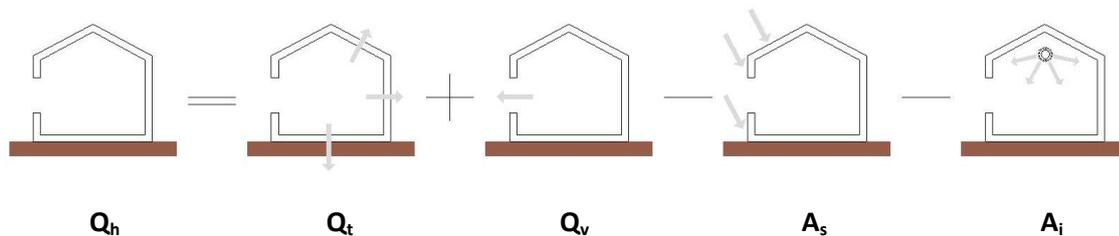
$Q_h$  = Fabbisogno termico dell'involucro edilizio

$Q_t$  = Dispersioni per trasmissione attraverso tutti i componenti dell'involucro

$Q_v$  = Dispersioni per la ventilazione degli spazi dell'edificio

$A_s$  = Apporti solari passivi ottenuti dai componenti trasparenti dell'involucro

$A_i$  = Apporti interni dati dalla presenza delle persone e dalle emissioni di calore dei componenti elettrici dell'edificio



**Figura 2.1.3\_2**

*Bilancio energetico di un edificio*

In inverno quindi è necessario conservare l'energia interna e accumulare la radiazione solare, mentre in estate è necessario proteggersi dalla radiazione solare e dal surriscaldamento.

Lo scopo del progetto, quindi, una volta definito l'utilizzo dell'edificio che determinerà  $A_i$ , è quello di limitare al minimo le parti  $Q_t$  e  $Q_v$  e massimizzare la quota  $A_s$  in regime invernale e minimizzarla in regime estivo. In un edificio tradizionale le dispersioni per trasmissione rappresentano circa il 22% delle dispersioni di un edificio, mentre quelle per ventilazione rappresentano circa il 29%. Gli apporti solari di un edificio tradizionale rappresentano circa il 12% dell'energia termica necessaria per il funzionamento: i margini di miglioramento in questa percentuale sono quindi enormi.

La possibilità di agire sui fattori che interessano il progetto architettonico dell'edificio rappresentano la vera sfida:

- **Compattezza**
- **Alto isolamento**
- **Utilizzo passivo dell'energia solare**
- **Impermeabilità all'aria**
- **Comfort termico estivo**

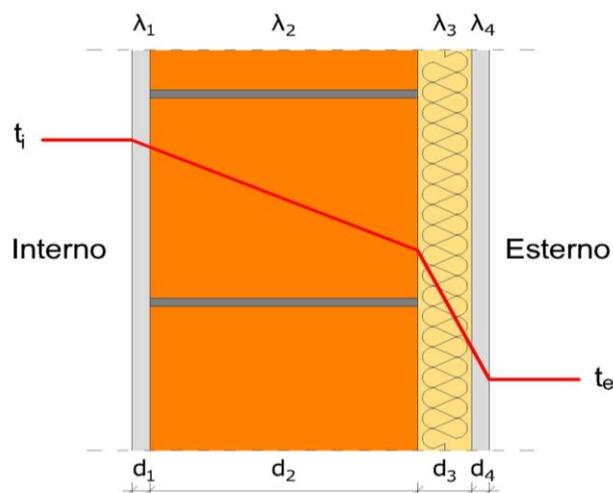
## Compattezza

La compattezza del volume dell'edificio è il parametro progettuale decisivo per garantire l'efficienza energetica.

È determinata dall'indice  $s/v$ , ovvero il rapporto tra la superficie disperdente (copertura, chiusure verticali esterne, pareti adiacenti a locali non riscaldati, aperture, solaio contro-terra) e il volume riscaldato: tanto più è elevata la superficie che racchiude il volume, tanto più è elevato lo scambio termico.

## Alto isolamento

L'involucro edilizio protegge gli interni dell'edificio dalle intemperie, dai rumori, dall'umidità e attenua gli scambi energetici tra l'ambiente interno e quello esterno. Il principio della conservazione dell'energia, generata all'interno degli spazi di un edificio, rappresenta il principio di base per ridurre i consumi energetici. L'isolamento termico rallenta la diffusione del calore attraverso l'involucro dell'edificio e riduce quindi la quantità d'energia necessaria per il riscaldamento invernale e per il raffrescamento estivo. Rappresenta inoltre la misura più efficace ed economica, in funzione dei ridotti costi d'investimento e della lunga vita dei materiali termoisolanti rispetto alle parti impiantistiche.



**Figura 2.1.3\_3**  
*Isolamento termico "a cappotto"*

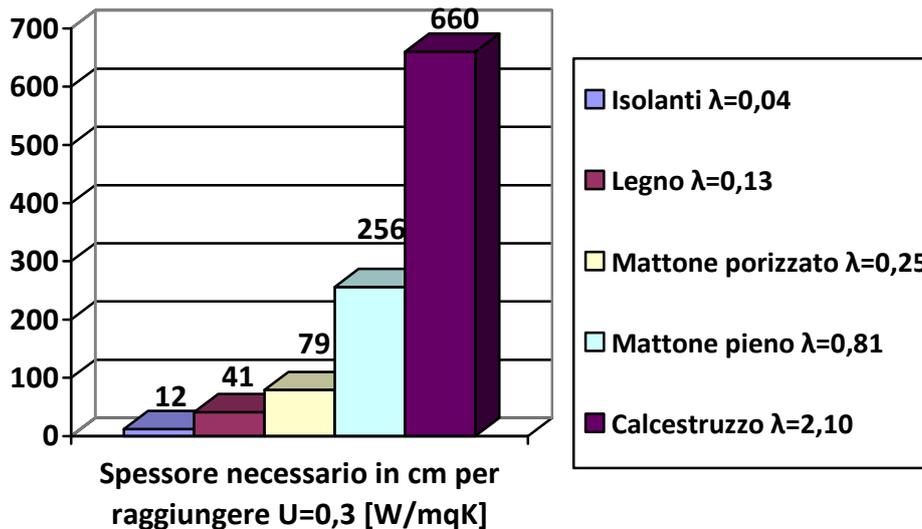


Figura 2.1.3\_4  
Conduttività dei materiali da costruzione

L'efficienza dell'isolamento è indicata dalla trasmittanza termica  $U$ . Un basso valore di  $U$  indica alta efficienza, mentre un valore alto indica bassa efficienza. La trasmittanza  $U$  dipende dalla conducibilità termica  $\lambda$  e dallo spessore dei materiali che costituiscono i singoli strati di un elemento costruttivo. Si parla di singoli strati perché il futuro degli edifici ad alta efficienza non sarà delle pareti monostrato, che richiederebbero spessori enormi ed antieconomici per garantire l'efficienza richiesta, ma delle pareti pluristrato composte da più o meno ampi spessori di materiale termoisolante.

L'isolamento termico può essere applicato all'esterno o all'interno dell'involucro dell'edificio. Dal punto di vista energetico, il più efficace è quello esterno detto anche "a cappotto", perché come un cappotto sul corpo umano avvolge per intero l'involucro esterno. Un isolamento esterno limita inoltre sicuramente la possibilità di formazione di condensa interstiziale, dovuta all'umidità relativa presente all'interno degli spazi abitativi, perché non genera superfici fredde all'interno della stratigrafia dell'involucro. L'isolamento interno, pur essendo più vantaggioso economicamente, non garantisce un completo isolamento, perché genera ponti termici cui va

posta particolare attenzione per ridurre l'impatto che hanno sull'efficienza e il comfort abitativo.

Per ponti termici si intende una via preferenziale per il flusso di calore, che genera punti freddi in inverno e caldi in estate. I ponti termici, soprattutto in edifici a bassissimo consumo, possono causare dispersioni per trasmissione consistenti ed essere causa di condense superficiali.

Non esistono materiali "buoni" o "cattivi" per l'isolamento, tutti i materiali isolanti più comuni hanno una loro giustificazione per campi di applicazione specifici e per la loro destinazione: la loro scelta è compito del progettista in funzione dell'uso, della collocazione e dell'insieme dei vincoli progettuali.

### **Utilizzo passivo dell'energia solare**

Il sole è una fonte di energia rinnovabile capace di fornire una quantità di energia circa 15.000 volte superiore a quanto i 6,7 miliardi di abitanti del pianeta sono in grado di consumare. Si tratta di energia discontinua e disponibile non in forma concentrata ma utilizzabile in modo passivo, in altre parole attraverso i concetti progettuali e le soluzioni costruttive dell'edificio. Un'architettura solare ad uso passivo si basa sull'interazione di quattro importanti parti:

- Isolamento termico passivo
- Superficie assorbente
- Accumulo
- Protezione dal surriscaldamento

La progettazione di un edificio capace di utilizzare in modo passivo l'energia solare può essere pertanto ricondotta a quattro parametri compositivi: orientamento e caratteri distributivi interni, utilizzo di finestre ad alta efficienza, conservazione dell'energia, schermature.

Edifici che ripropongono la stessa composizione di facciata su ogni lato, sono edifici privi di ogni ragionamento progettuale, perché ogni direzione cardinale richiede un suo particolare trattamento riguardo al clima.

L'orientamento più vantaggioso è quello verso Sud, questi fronti infatti possono ricevere sole durante tutto il giorno. In inverno, sfruttando la posizione bassa del sole all'orizzonte la radiazione incide quasi perpendicolare sulla facciata e quindi è alla massima intensità, mentre in estate, con la posizione del sole alta, la facciata riceve apporti solari meno intensi. Sfruttando le due posizioni del sole a Sud le finestre sono più facilmente ombreggiabili tramite schermature orizzontali fisse (balconi, sporti, ecc.), prevenendo così il surriscaldamento degli ambienti ed evitando così energivori impianti di raffrescamento.

I fronti esposti a Est e Ovest pongono maggiori problemi perché sono investiti dalla radiazione solare quando la posizione del sole è bassa (mattina e pomeriggio). Le finestre orientate verso Est e Ovest sono pertanto meno facilmente ombreggiabili e specie nel fronte Ovest sono spesso la causa di surriscaldamenti.

Correlati all'orientamento dell'edificio sono i caratteri distributivi dell'edificio: i locali di vita quali soggiorno, pranzo, cucina sarebbe opportuno orientarli a Sud per consentire in inverno il maggior guadagno solare; tutti i vani di servizio quali bagni, ripostigli, angoli cottura nei quali la permanenza è ridotta durante il corso delle giornate sarebbe opportuno orientarli a Nord.

Va posta inoltre particolare attenzione alle prestazioni termiche delle finestre che dovrebbero garantire un bilancio vicino allo zero o positivo. Bisogna infatti ribaltare il concetto secondo cui la finestra rappresenta il "buco nero" dell'edificio, e considerarla invece un piccolo generatore di calore con bilancio termico positivo.

È evidente che una volta scelto l'elemento ritenuto migliore, decisivo è il sistema di montaggio all'interno dello spessore della chiusura esterna, per ridurre le dispersioni lungo il perimetro della finestra.

È corretta norma montare la finestra in corrispondenza dello strato isolante in modo da minimizzare il ponte termico.

### **Impermeabilità dell'aria**

Una scadente impermeabilità dell'aria può condizionare i consumi energetici di un edificio. Ciò dipende dal fatto che gli edifici non sono per natura perfettamente stagni ma permeabili ad aria e vento.

Il passaggio libero di aria non è da confondere con la diffusione del vapore che invece è un effetto positivo. Il passaggio di aria o di vento comporta problemi di tipo termico con conseguente perdita di potere isolante e l'entrata di aria calda in estate e di aria fredda in inverno, oltre che problemi di tipo acustico. Ma soprattutto l'ermeticità dell'involucro protegge in modo duraturo gli elementi costruttivi da possibili degradi dovuti alla formazione di condensa interstiziale.

Ottimi risultati di impermeabilità si ottengono con una parete intonacata, mentre sono più sensibili sotto questo punto di vista le costruzioni a secco. L'importanza di una corretta tenuta dell'aria è decisiva anche per il corretto bilanciamento dell'impianto di ventilazione.

### **Comfort termico estivo**

Le considerazioni espresse fino ad ora sono valutazioni costruite principalmente sul comportamento dell'edificio in regime invernale. Nelle regioni dell'Europa centrale, dove questi principi sono stati conati e sperimentati, il regime invernale è la condizione più preponderante e più sfavorevole. Nei climi più temperati dell'Italia settentrionale, dove il regime invernale è pur sempre importante, la componente estiva acquista un peso decisivo. Se poi passiamo ad analizzare i climi mediterranei dell'Italia centrale e meridionale il rapporto si ribalta e la componente di raffrescamento estivo supera abbondantemente quella del riscaldamento invernale.

L'idea di un architettura passiva è pertanto ancora più coerente in un clima mediterraneo, dove la necessità di immettere calore all'interno dell'edificio lascia spazio all'idea di mantenere il calore al di fuori dell'edificio. In

linea di principio una casa ben isolata, pensata per il suo comportamento in regime invernale è capace di buone prestazioni anche in regime estivo, tuttavia la sola trasmittanza termica non ci offre garanzie sul comportamento termico dell'edificio anche in estate.

La principale peculiarità di un edificio ad alta efficienza in regime estivo, contrariamente al regime invernale, è di pensare l'organismo in regime dinamico. Cioè nella capacità dell'involucro di isolare adeguatamente l'interno e l'esterno durante le ore diurne e in una capacità dell'edificio di smaltire durante la notte il calore diurno accumulato. I principi di base, capaci di agire in modo passivo sull'edificio sono:

- **Creazione di spazi a differente temperatura**

Facilita la ventilazione naturale tra gli ambienti. Spazi ombreggiati, quali porticati, "pozzi" naturali di aria più fresca che per gli effetti convettivi rimuovono il calore accumulato all'interno.

- **Riduzione della captazione solare**

La radiazione solare durante l'estate può diventare il più grande carico termico all'interno di una costruzione.

- **Schermatura delle chiusure trasparenti**

Capaci di evitare in estate il facile surriscaldamento interno. Le schermature hanno pertanto il compito di regolare gli apporti luminosi. In estate devono consentire l'esclusione della luce diretta mentre in inverno non devono ostacolare la captazione degli apporti solari e, nel corso di tutto l'anno, dovrebbero garantire un'ottimale illuminazione naturale senza fastidiosi abbagliamenti.

- **Inerzia termica degli ambienti**

Involucro interni ad elevata inerzia termica hanno la funzione di regolatore termico che di giorno assorbe il calore prodotto dalla radiazione e di notte lo restituisce livellando le escursioni di temperatura all'interno della costruzione. Involucro di questa qualità si riscaldano e si raffreddano lentamente e in questo modo sono in grado di compensare le elevate temperature diurne, mantenendo un costante livello di comfort termico, soprattutto nei climi caldi secchi.

- **Sfasamento e attenuazione delle chiusure opache esterne**

per ottenere una notevole attenuazione dei picchi di richiesta di raffrescamento. Nei climi caldi, con stagioni invernali relativamente miti, è culturalmente trascurato l'isolamento termico dell'involucro, in realtà esso gioca un ruolo significativo per il comfort estivo. Mentre la capacità termica di un materiale è direttamente proporzionale alle sfasamento dell'onda termica, la capacità isolante del materiale è direttamente proporzionale all'attenuazione, ovvero alla riduzione della temperatura. Pertanto l'integrazione di massa e isolante è la soluzione più idonea per il controllo delle temperature in regime estivo. In particolare il controllo è sicuramente più efficace se la massa è collocata all'interno della sezione dell'involucro e l'isolamento all'esterno (soluzione "a cappotto").

## 2.2 Materiali e tecniche isolanti

### 2.2.1 Energia e CO<sub>2</sub> incorporata

Quanta energia occorre per costruire un edificio?

E quanta CO<sub>2</sub> viene emessa?

La realizzazione di edifici a ridotto consumo energetico in fase d'uso, mette in evidenza l'importanza di operare anche una verifica del bilancio energetico globale, considerando pertanto l'energia necessaria alla produzione dei materiali e alla costruzione degli edifici.

La fase d'uso degli edifici è la più energivora, quella determinante rispetto alle emissioni di CO<sub>2</sub>, ed è dunque su questa che si sono focalizzate le attenzioni da parte delle normative internazionali e nazionali e delle iniziative di incentivo delle Pubbliche Amministrazioni, per far leva sull'interesse degli utenti finali a ridurre i costi di gestione.

I progettisti sono sollecitati a puntare l'attenzione sulla scelta di materiali e prodotti ad alta efficienza termica per la realizzazione dell'involucro edilizio e sulla scelta di impianti ad alto rendimento, possibilmente basati sullo sfruttamento di risorse rinnovabili, oltre alla corretta progettazione di forma e orientamento, come descritto nei paragrafi precedenti.

Occorre altresì osservare come la spinta verso la realizzazione di edifici a bassissimo consumo energetico in fase d'uso, stia portando il mercato ad una rincorsa a livelli prestazionali ben oltre quelli indicati dagli apparati normativi.

La drastica riduzione dei consumi durante l'esercizio, porta tuttavia alla ribalta il ruolo significativo dei "pesi" energetici di altrettanto importanti fasi del ciclo di vita di un edificio (LCA), in particolare della fase di pre-produzione e produzione dei materiali e componenti edilizi. Occorre infatti tenere in considerazione che se negli edifici costruiti prima dell'entrata in vigore della normativa sull'efficienza energetica l'energia consumata per abitare era, in un periodo di 50 anni, dieci volte superiore all'energia assorbita per costruirli. Negli edifici ad alta efficienza energetica tali consumi tendono ad equipararsi e, in alcuni casi, è richiesta una quantità di energia per costruire addirittura doppia rispetto a quella che viene

consumata nella fase d'uso. Non è quindi più possibile omettere una valutazione complessiva dell'intero ciclo di vita di un edificio.

Un'analisi ambientale corretta e completa, relativamente ad una costruzione, dovrebbe basarsi dunque sul metodo LCA (*Life Cycle Assessment*) andando a considerare tutte le fasi del ciclo di vita e tutte le sostanze/materiali coinvolte. Ma la valutazione LCA è molto complessa, e per cominciare ad estendere lo sguardo oltre la sola valutazione energetica dalla fase d'uso, può essere pertanto utile fare riferimento agli indicatori utilizzati nelle procedure di certificazione energetica correnti (energia primaria PEI, espressa in MJ o kWh, ed emissioni di CO<sub>2</sub>) valutando i consumi e le emissioni anche delle fasi a monte dell'uso di un edificio.

### 2.2.2 Materiali isolanti

Per lo sviluppo di sistemi costruttivi a basso consumo energetico, è necessaria la comprensione dei materiali edilizi, legandoli alle richieste di comfort estivo ed invernale.

Le caratteristiche prestazionali fisiche possono essere riassunte in:

- Igroscopicità, capacità di assorbire vapore acqueo dell'aria e di cederlo;
- Traspirabilità, capacità di scambio igrometrico con l'ambiente;
- Diffusività, capacità di consentire il passaggio non convettivo di fluidi e gas;
- Accumulazione, capacità di accumulare calore (legata alla massa);
- Assorbimento, capacità di un materiale di trattenere e di depurare le sostanze volatili (legata alla diffusività e all'igroscopia);
- Coibenza, capacità di non disperdere il calore accumulato;
- Temperatura superficiale, capacità di possedere una temperatura superficiale costante (legata alla densità e all'umidità relativa);
- Protezione acustica, capacità fono-isolanti e fono-assorbenti;
- Salubrità, emissione di composti volatili e di tossicità in fase di produzione, posa, esercizio e dismissione.

La scelta delle tecniche associate ai materiali più idonei consente all'edificio-impianto di giungere ad aver bisogno di integrazioni energetiche da impianti tecnologici quasi trascurabili.

Ma è essenziale anche puntare su modelli e sistemi che siano sostenibili dal punto di vista delle risorse ambientali che sono utilizzate per la formazione dei materiali per l'edilizia, e quindi nel momento di scegliere i materiali per la coibentazione, chiedersi quanta energia è occorsa per produrli.

I materiali di sintesi petrolchimica apporteranno un consumo energetico e quindi emissione di CO<sub>2</sub> molto alta già nella produzione, quindi emetteremo tanta CO<sub>2</sub> per poi risparmiarla nella gestione. I materiali di derivazione naturale invece richiedono un consumo energetico molto inferiore a parità di peso.

Ma se il confronto viene fatto in funzione di una delle finalità ultime del progetto, quali per esempio la trasmittanza ottenuta dall'involucro studiato, vedremo che i consumi di queste due categorie di isolanti hanno stesso ordine di grandezza, se non addirittura inverso.

L'isolamento e la progettazione raffinata dell'involucro, considerati come un investimento economico prima ancora che ecologico, determinano la presa di coscienza che la progettazione del bilancio energetico architettonico è uno degli investimenti più economici ed interessanti e fonte di reddito futuro.

La verifica dei materiali per il loro utilizzo in relazione alle fasce climatiche, quindi, non solo è corretto, ma tecnicamente indispensabile.

L'Italia è caratterizzata da varietà notevoli, anche localmente vicine, di microclima. Il D.Lgs 311/2006 ha predisposto una suddivisione in cinque fasce climatiche secondo una sintesi in regime invernale, in base al numero di gradi giorno. Per cui l'isolamento termico degli edifici risente sempre dell'impostazione del benessere invernale tralasciando le condizioni estive. Ma se si progetta un ottimo pacchetto opaco con coibentazione adeguata per isolarsi dal freddo, non sempre questa soluzione risulta adeguata per il caldo. In quanto i materiali che concorrono all'isolamento, per le loro

caratteristiche fisiche, non sempre sono adeguati ad una risposta equilibrata ad entrambe le richieste tecniche.

Per cui, dato il ruolo fondamentale dell'involucro per raggiungere gli obiettivi del benessere, è necessario valutare attentamente la tipologia del materiale, scegliendo oculatamente quelli che meglio rispondono agli specifici equilibri di tipo ambientale, umidità, diffusività, temperatura superficiale, pelle. Una scelta specifica a seconda del microclima è la metodica a cui riferirsi per una buona coibentazione esterna.

I materiali isolanti possono essere classificati in relazione alle proprie caratteristiche e alla loro origine o alla loro struttura, alla loro composizione di tipo organico od inorganico, ed alle caratteristiche legate all'impatto sull'ambiente, alla qualità di energia, e quindi emissione di CO<sub>2</sub> emessa in atmosfera necessaria per la loro produzione.

Classificazione dei materiali:

- di origine vegetale
- di origine animale
- di origine minerale
- di origine sintetica

### **Materiali isolanti di origine vegetale**

- **Il sughero**

I materiali a base di sughero sono composti prodotti dalla corteccia della quercia da sughero. La corteccia, una volta asportata, si riproduce nell'arco di 7 anni senza danneggiare l'albero, per cui è un prodotto limitato. Il sughero in pannelli non deve essere legato con colle sintetiche ma dalle capacità autocollanti della suberina, la parte resinosa del materiale, che sottoposta a calore si scioglie legando naturalmente i granuli a raffreddamento avvenuto. Il sughero è un ottimo materiale coibente solo se proviene da pura polpa di corteccia di sughera priva di ogni elemento estraneo, ventilata ed

eventualmente aggregata in pannelli per effetto combinato di solo calore e compressione.

- I pannelli di legno mineralizzato

Il processo produttivo si basa sull'utilizzo di cemento Portland o di magnesite, che legano e mineralizzano le fibre del legno. L'impasto di fibre di legno viene sottoposto ad alta temperatura e compressione e quindi formato in pannelli. In questo modo il legno perde le parti organiche deperibili e si mineralizza assumendo, oltre alle sue già note proprietà di coibentazione termica e acustica, di traspirabilità, di igroscopia e di inattaccabilità da insetti e roditori, un'ottima resistenza al fuoco. I pannelli legati con cemento assorbono maggiormente l'acqua e hanno la proprietà di buon accumulo termico.

- I pannelli di fibre di legno

Dagli scarti delle segherie proviene la fibra di legno, materia prima per la produzione di pannelli coibenti. Le fibre di legno vengono sminuzzate e impastate con acqua ed essiccate, aggregate senza compressione, per effetto del potere collante della lignina, una resina naturale presente nella fibra stessa. Questo materiale è completamente biodegradabile, igroscopico, aperto alla diffusione del vapore e con buon accumulo termico. Riciclabile, si presta ottimamente a diversi impieghi nella coibentazione termica e acustica di pavimenti, pareti e coperture.

- Fibra cellulosa

Ottenuta mediante una speciale tecnica di trasformazione della carta usata, grazie all'utilizzo di componenti minerali naturali. Essa diventa non infiammabile, inattaccabile dalle muffe, dai roditori e dagli insetti. Il materiale viene insufflato nelle intercapedini di pareti e coperture, o in pannelli montati su superfici verticali.

- Fibra di juta, di cotone, di lino e fibra di cocco

Interessanti caratteristiche ecologiche e di coibentazione. Sono materiali derivanti da altre fibre vegetali come il cocco, la juta, il cotone, il lino, stratificati e incollati da amido di patata oppure con il

sostegno di poliestere. Naturalmente questi materiali, dopo l'aggiunta di Sali di boro devono essere accompagnati da adeguate garanzie e certificazioni che attestino che non si sia fatto uso di prodotti chimici. Sono adoperati per l'isolamento da rumore di calpestio e per la coibentazione.

### **Materiali isolanti di origine animale a struttura fibrosa**

- Lana di pecora

Generalmente proveniente dall'Europa centrale, viene lavata con soda e trattata ai Sali di boro, che servono come protezione anti-incendio. La lana di pecora è un'ottima alternativa alle fibre minerali per l'isolamento termico ed acustico. Buone doti di coibenza e traspirabilità. E' igroscopica, in grado di assorbire acqua fino al 33% del suo peso e di cedere lentamente l'acqua assorbita svolgendo quindi, in modo ottimale, il compito di equilibrare l'umidità relativa dell'aria. La lana è un materiale rinnovabile e riciclabile con un bassissimo bilancio energetico.

### **Materiali isolanti di origini minerale a struttura cellulare**

- Calcio silicato

Il silicato calcico è un materiale poroso, prodotto partendo da sabbia quarzatica, silicee, calce idraulica e una piccola percentuale di fibre con funzione di fissatore. Con questo materiale si realizzano pannelli leggeri, molto resistenti a compressione e permeabili, in grado di regolare l'umidità in eccesso nell'aria.

- Perlite e vermiculite

Si ottengono attraverso la frantumazione e la successiva espansione per effetto di alte temperature di circa 1.000 °C di minerali micacei (per la vermiculite) e di una roccia vulcanica (per la perlite), che si possono espandere anche venti volte il volume originario. Si possono

usare a secco come riempimenti in intercapedini, ma soprattutto come inerte per intonaci leggeri con buone prestazioni di coibentazione termoacustica. Possono essere radioattivi, per cui va garantita l'assenza di radioattività.

- Argilla

In Europa le costruzioni in argilla hanno una lunga tradizione come utilizzo per tamponamento e per intonaco. Contiene prevalentemente silicati di alluminio con cristalli idrati di caolinite, ossidi di metallo, manganese, ecc... La terra cruda è composta di argilla, sabbia e limo ed elementi organici; l'argilla funge da legante. Proprietà interessante è quella di accumulare umidità estraendola dall'aria per poi rilasciarla in microclima secco.

- Fibre minerali, lana di roccia, lana di vetro

La pericolosità delle microfibre, dopo decenni di uso indiscriminato, è oggi ormai purtroppo chiara a tutti per quanto riguarda l'amianto per la sua provata pericolosità.

Grande attenzione va comunque anche all'uso di altri prodotti minerali fibrosi che possono liberare nell'aria dell'ambiente microfibre particolarmente irritanti per le mucose dell'apparato respiratorio. Nella produzione e nel confezionamento di questi materiali sono per altro utilizzati prodotti collanti di origine petrolchimica.

## Materiali di sintesi petrolchimica

- Polistirene espanso estruso (XPS)

È un materiale di origine sintetica, organico-sintetica a classe di infiammabilità 1, con alto impatto ecologico. Ha una buona conducibilità termica per il regime invernale, bassa massa volumica e bassa resistenza alla diffusione del vapore.

- Poliuretano espanso

Isolante di origine sintetica, con buona conducibilità termica e bassa massa volumica. Alto impatto ecologico.

- Fibra di poliestere

Materiale di origine sintetica, organico-sintetica a medio impatto ecologico. La bassa massa volumica non lo rende adatto ai climi caldi, in quelle situazioni in cui si necessita anche di un buon sfasamento.

**Soluzioni innovative in laterizio per edifici ad alta efficienza energetica:  
un nuovo modello di involucro in muratura portante**

Materiali Isolanti	Isolamento dal freddo				Difesa dal caldo				Protezione rumore			Res. inc.	Energia primaria										
	Peso specifico Kg / mc	λ	Cond. termica W / m K	μ	Capacità termica J / kg K	Coeff. Accum. calore	Coeff. Cond. termica	Sfissamento h x 10 cm	Rigidità dinamica MN / mq	Resistenza al flusso d'aria KN s / m4	Resistenza incendio REI		classe	MJ / kg	PEI								
																p	α	s	φ	Rd	Ra	REI	PEI
Vetro cellulare	120	0,05	1000	1000	830	100	1,81E-03	3	3	1000	0	0	67	8040									
Lana di vetro	20	0,04	1,2	840	16,8	8,60E-03	1,5	20	>5	0,1	0	0	34,6	692									
Lana di roccia	30	0,04	1,2	840	25,2	5,70E-03	1,8	15	40 60	0	0	0	22,12	663									
Silicato di calcio	250	0,06	6	1000	250	8,60E-04	7,1	1000	1000	1000	1000	1000	52	12960									
Isolante minerale	115	0,045	3,15	998	248	8,50E-04	6,1	998	998	998	998	998	18,57	2315									
Argilla espansa	350	0,09	1	940	329	9,85E-04	4,4	940	940	940	940	940	3,48	1218									
Perlite espansa	90	0,05	1,4	1000	90	2,00E-03	3,1	1000	1000	1000	1000	1000	13,6	1224									
Vermiculite espansa	90	0,07	3,10	1000	90	2,80E-03	2,6	1000	1000	1000	1000	1000	17	1530									
Pomice	700	0,09	3	990	370	9,55E-04	5,5	990	990	990	990	990	1,48	1035									
Polistirolo espanso	20	0,04	20 100	1480	29,6	4,86E-03	2	20	20	20	20	20	99,2	1984									
Polistirolo estruso	35	0,035	80 300	1500	52,5	2,40E-03	2,8	770	770	770	770	770	110,2	3857									
Poliuretano	30	0,03	30 100	1200	36	3,00E-03	2,5	1200	1200	1200	1200	1200	126,2	3780									
Poliuretano espanso	30	0,04	2000	1200	36	3,00E-03	2,5	1200	1200	1200	1200	1200	107,2	3210									
Sughero in pannelli	110	0,045	10 15	1800	198	8,20E-03	4,8	>24	>24	>24	>24	>24	7,1	781									
Sughero granulare	100	0,05	1,2	1600	160	1,10E-03	4,1	524,4	524,4	524,4	524,4	524,4	2,16	216									
Fibra di cocco	70	0,045	1	1300	91	1,78E-03	3,3	15	>5	2	2	2	4,9	342									
Cellulosa in pannelli	85	0,045	1,2	1940	164,9	8,73E-04	4,7	42	42	42	42	42	4,24	250									
Cellulosa in fiocchi	50	0,04	1,2	1900	95	1,52E-03	3,5	31	31	31	31	31	2,94	212									
Canapa	25	0,045	1,2	1550	39	4,18E-03	2,4	375	375	375	375	375	15	375									
Lino	30	0,04	1,5	1550	46,5	3,10E-03	2,5	4	4	4	4	4	33,12	994									
Cotone	20	0,04	1,2	840	16,8	8,57E-03	1,5	>5,5	>5,5	>5,5	>5,5	>5,5	18,1	362									
Gammicciato	190	0,055	2 4	1300	247	8,02E-04	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	0,54	103									
Paglia	340	0,09	2 4	1900	190	9,47E-04	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	1,38	469									
Trucchioli di legno	100	0,05	1	1900	190	9,47E-04	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	0,54	54									
Pannelli in fibra di legno	130	0,045	5 10	2500	325	4,98E-04	6,2	<40	<40	55	1 2	1	17	2210									
Trucchioli di legno mineralizzato	400	0,093	2 5	2100	840	4,00E-04	6,9	230	230	35	35	35	12,6	315									
Lana di pecora	25	0,04	1 5	1300	32,5	4,43E-03	2,1	>5	>5	>5	>5	>5	12,6	315									

**Figura 2.2.2\_1**

*Materiali isolanti – Caratteristiche fisico-chimiche, utilizzi consigliati, valori di trasmittanza, peso specifico, ecc...*

## 2.3 Ponti termici

### 2.3.1 Discontinuità del flusso termico

La differenza di temperatura che, nelle diverse stagioni dell'anno viene mantenuta tra l'interno e l'esterno di un locale abitato, genera un flusso termico attraverso l'involucro che li separa. In zone particolari dell'involucro, si possono riscontrare valori della densità di flusso termico più elevati rispetto al valore medio, per la presenza di discontinuità geometriche o disomogeneità dei materiali costituenti la struttura edilizia esterna.

Queste zone sono denominate ponti termici.

Grande attenzione è stata rivolta alla presenza di ponti termici nella stagione invernale, in quanto favoriscono un aumento della dispersione termica verso l'ambiente esterno, determinando una maggiore richiesta di energia all'impianto di riscaldamento. Spesso, in prossimità degli stessi ponti termici, agli effetti negativi in termini energetici si sommano disagi dovuti al raggiungimento di valori di temperatura superficiale più bassi rispetto a quelli delle sezioni correnti. Se poi la temperatura superficiale raggiunge la temperatura di rugiada, si assiste alla formazione di muffe e al conseguente deterioramento dell'intonaco interno.

La presenza di ponti termici determina quindi diversi effetti negativi:

- Incremento delle dispersioni termiche;
- Condensazione superficiale ( $T_{\text{superficiale}} < T_{\text{rugiada}}$ );
- Danni alle superfici

Le variazioni cicliche della temperatura superficiale, con relative formazioni di muffe deteriorano l'intonaco;

- Diminuzione del benessere abitativo

Quando la temperatura superficiale interna è decisamente inferiore rispetto alla temperatura dell'ambiente, si avverte una sensazione di disagio in prossimità di tale superficie;

- Differenze tra l'area della superficie disperdente sul lato interno e quella sul lato esterno.

È possibile quindi definire il ponte termico come: quella configurazione strutturale o geometrica che produce una deviazione del flusso termico, rispetto alla condizione di flusso monodimensionale, tra le superfici interna ed esterna di una parete.

Ci possiamo trovare di fronte a due macro-tipologie di ponte termico:

- **Ponte termico lineare / di struttura**

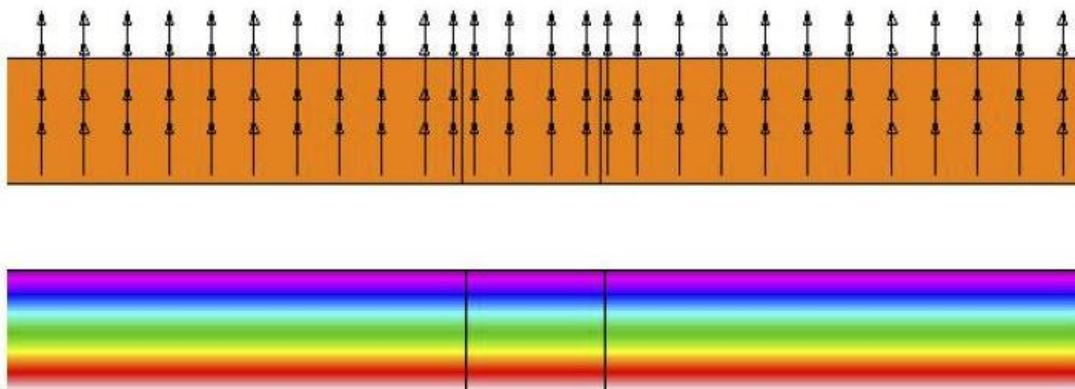
In presenza di una sezione trasversale uniforme in una direzione;

- **Ponte termico puntuale / di forma**

In assenza di sezioni trasversali uniformi in nessuna direzione (intersezione di due ponti termici lineari).

### **Ponte termico lineare**

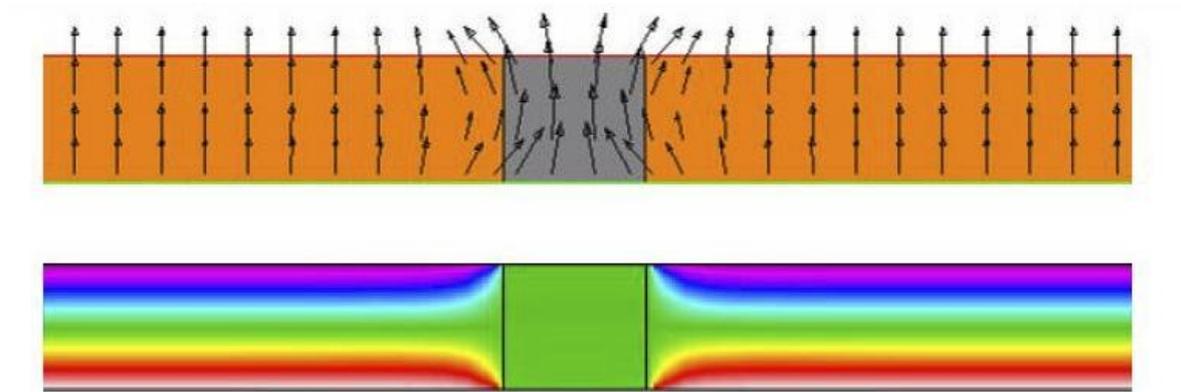
In una parete esterna piana ed estesa e dalla stratigrafia uniforme, che separi due ambienti a diversa temperatura, si instaura un flusso termico con buona approssimazione monodimensionale e perpendicolare alle superfici della parete. Questo significa che nello spessore della parete si incontra una successione di superfici isoterme piane e parallele a temperatura crescente o decrescente dall'interno verso l'esterno.



**Figura 2.3.1\_1**

*Analisi dei flussi termici con calcolatore FEM su parete multistrato in assenza di Ponte Termico lineare*

Nel caso in cui si presenti una compenetrazione totale o parziale di strutture costituite da materiale con più elevata conduttività termica rispetto al resto della superficie, si determina un'alterazione della distribuzione di temperatura con zone preferenziali di flusso termico.

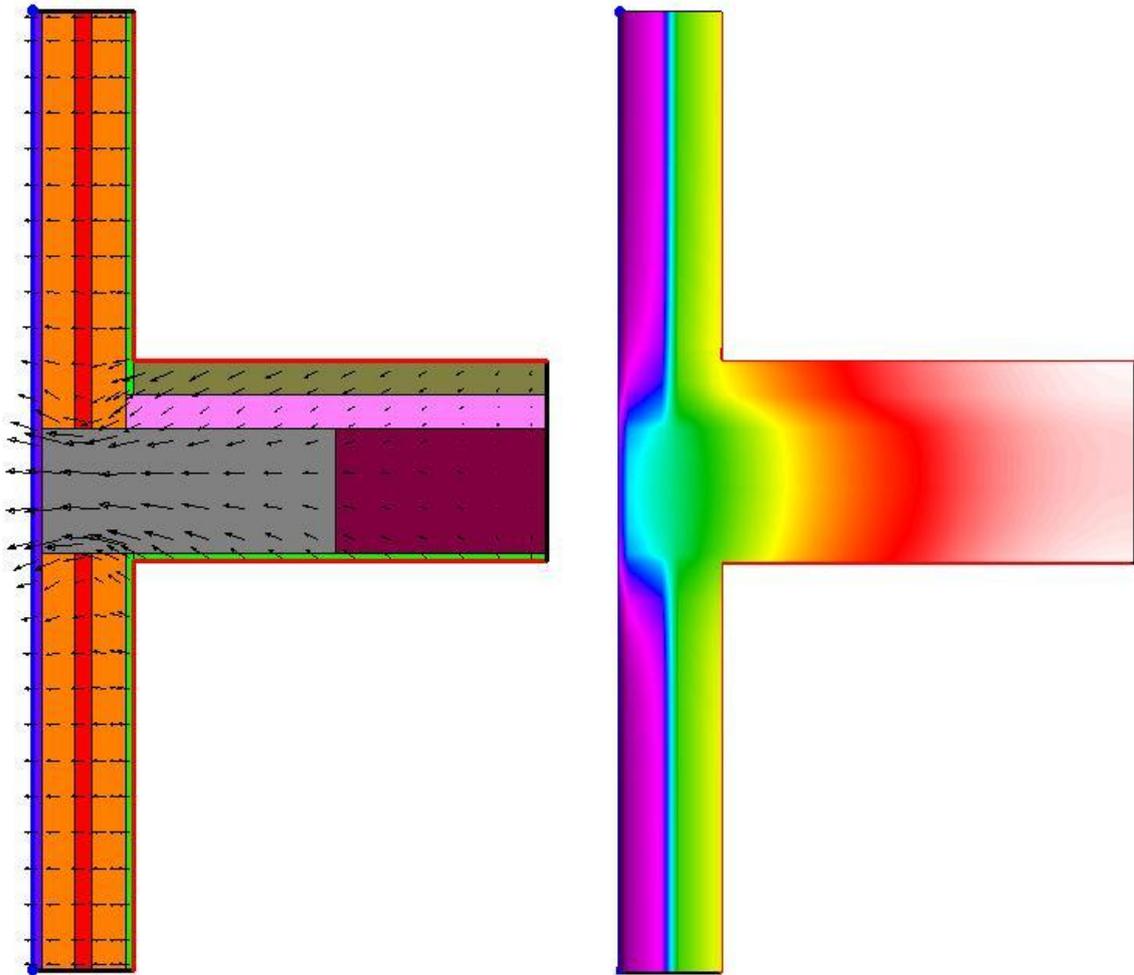


**Figura 2.3.1\_2**

*Analisi dei flussi termici con calcolatore FEM su parete multistrato in presenza di Ponte Termico lineare*

### Ponte termico puntuale

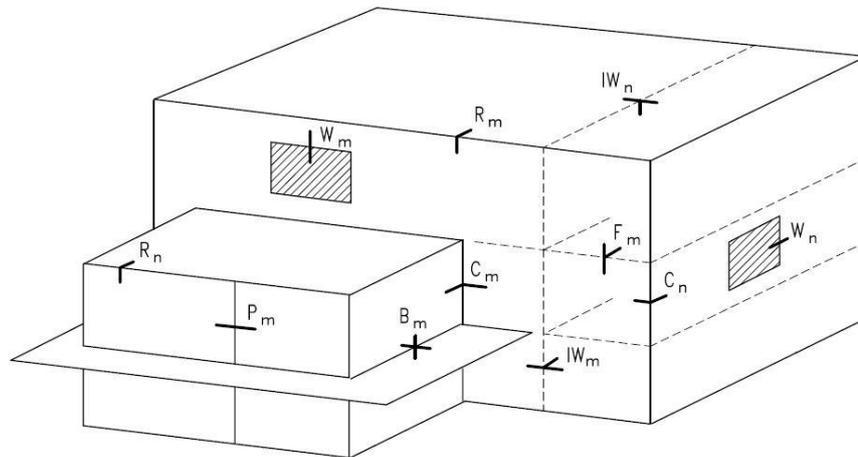
Quando invece si riscontra una discontinuità geometrica, si determina un incurvamento delle superfici isoterme che provoca ancora una direzione preferenziale di flusso termico. Questa situazione si presenta per esempio nella giunzione tra le pareti esterne e il solaio.



**Figura 2.3.1\_3**

*Analisi dei flussi termici con calcolatore FEM su una discontinuità geometrica in presenza di Ponte Termico puntuale*

Le diverse zone dell'involucro di un edificio dove sono presenti normalmente i ponti termici sono indicate dalla schematizzazione esemplificativa riportata dalla normativa UNI EN ISO 14683.



**Figura 2.3.1\_4**

*Schematizzazione della normativa UNI EN ISO 14683 che mostra la posizione e le tipologie di ponti termici che si verificano di frequente in un edificio*

### 2.3.2 Analisi dell'incidenza

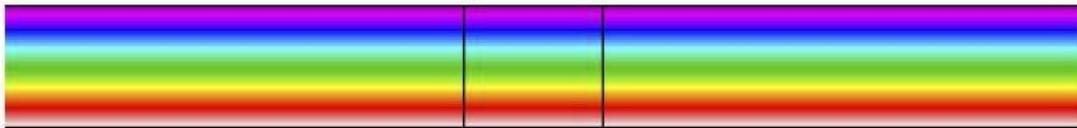
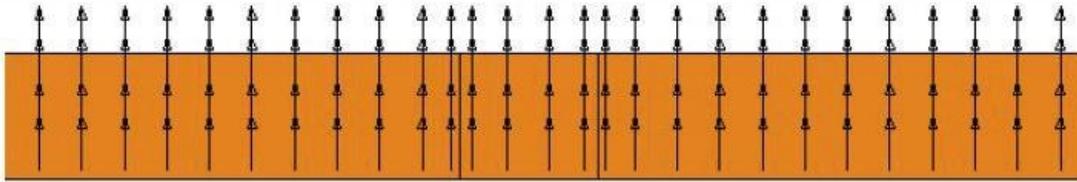
Il calcolo dei flussi termici e delle temperature superficiali può essere effettuato con precisione utilizzando metodi numerici di calcolo dettagliati, in accordo con la norma UNI EN ISO 10211-1 (flusso termico tridimensionale) o con la norma UNI EN ISO 10211-2 (flusso termico bidimensionale).

Le norme includono i limiti del modello geometrico e le sue suddivisioni, le condizioni limite ed i valori termici che sono ad esse collegate.

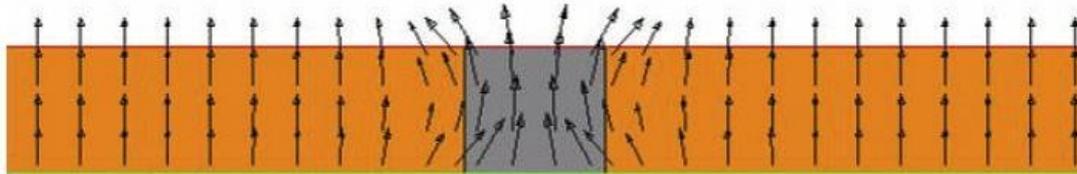
Generalmente la presenza di ponti termici determina flussi termici tridimensionali o bidimensionali, che possono essere determinati con precisione utilizzando metodi numerici di calcolo dettagliati.

Tuttavia, per ponti termici lineari, possono essere usati metodi di calcolo semplificati.

Prendiamo il caso più semplice dell'eterogeneità di materiale in una parete piana, come la seguente:



$$\Phi_{nopt}$$



$$\Phi_{pt}$$

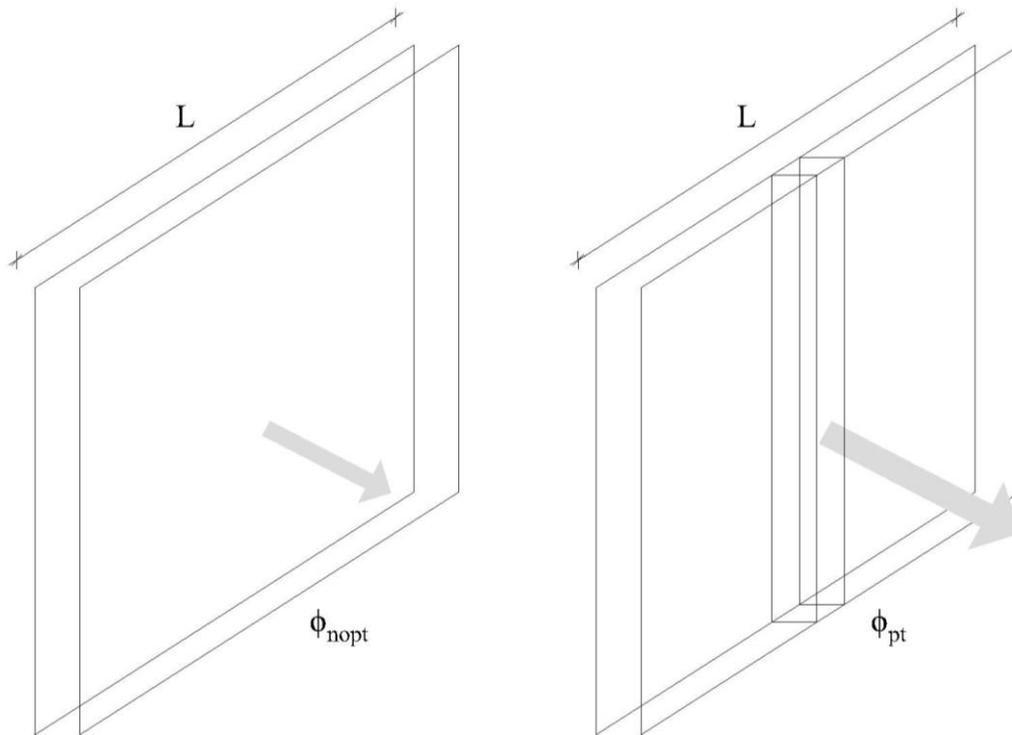
Figura 2.3.2\_1

Analisi dei flussi termici con calcolatore FEM su parete multistrato

Confrontiamo il flusso calcolato trascurando il ponte termico  $\Phi_{nopt}$  con quello calcolato correttamente  $\Phi_{pt}$

Se la disomogeneità si sviluppa uniformemente in sezione, posso correlare la differenza di flusso alla lunghezza del ponte termico.

Confrontiamo le due quantità ( $\phi_{nopt} - \phi_{pt}$ )



**Figura 2.3.2\_2**

*Schematizzazione dei flussi termici nei due casi presi in esame*

con

$$\phi_{nopt} = U \times L \times \Delta T$$

Si definisce trasmittanza termica lineica il coefficiente di correzione:

$$\psi = \frac{(\phi_{pt} - \phi_{nopt})}{\Delta T} \text{ oppure } \psi = L^{2D} - \sum U_i \times L_i$$

Dove:

$L^{2D} = U_{pt} \times L_{tot}$  è il coefficiente di accoppiamento termico lineico ottenuto con un calcolo bidimensionale del componente che separa i due ambienti considerati.

In quanto, se lo conosco, posso calcolare il flusso attraverso la parete con ponte termico come:

$$\phi_{pt} = \phi_{nopt} + \psi \times L \times \Delta T$$

La normativa UNI EN ISO 14863 presenta i valori di progetto di  $\psi$  per un intervallo di tipologie di ponti termici bidimensionali comunemente ricorrenti.

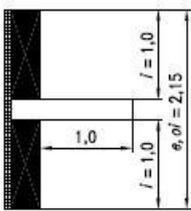
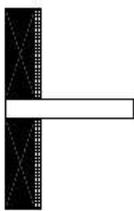
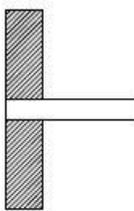
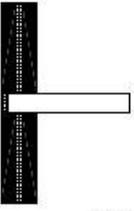
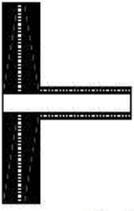
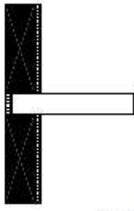
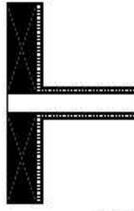
Pavimenti				
continua dalla pagina precedente				
 <p>F1</p> <p><math>L^{2D} = 0,74</math></p> <p><math>\psi_{se} = 0,00</math> <math>\psi_{si} = 0,00</math> <math>\psi_l = 0,05</math></p>	 <p>F2</p> <p><math>L^{2D} = 1,56</math></p> <p><math>\psi_{se} = 0,80</math> <math>\psi_{si} = 0,80</math> <math>\psi_l = 0,80</math></p>	 <p>F3</p> <p><math>L^{2D} = 1,50</math></p> <p><math>\psi_{se} = 0,75</math> <math>\psi_{si} = 0,75</math> <math>\psi_l = 0,80</math></p>	 <p>F4</p> <p><math>L^{2D} = 1,36</math></p> <p><math>\psi_{se} = 0,55</math> <math>\psi_{si} = 0,55</math> <math>\psi_l = 0,60</math></p>	
 <p>F5</p> <p><math>L^{2D} = 1,33</math></p> <p><math>\psi_{se} = 0,80</math> <math>\psi_{si} = 0,80</math> <math>\psi_l = 0,65</math></p>	 <p>F6</p> <p><math>L^{2D} = 1,40</math></p> <p><math>\psi_{se} = 0,85</math> <math>\psi_{si} = 0,85</math> <math>\psi_l = 0,70</math></p>	 <p>F7</p> <p><math>L^{2D} = 1,41</math></p> <p><math>\psi_{se} = 0,85</math> <math>\psi_{si} = 0,85</math> <math>\psi_l = 0,70</math></p>	 <p>F8</p> <p><math>L^{2D} = 0,99</math></p> <p><math>\psi_{se} = 0,20</math> <math>\psi_{si} = 0,20</math> <math>\psi_l = 0,30</math></p>	
 Parete	 Parete leggera (comprese muratura leggera e parete intelaiata in legno)	 Strato isolante	 Soletta/Pilastro	 Telaio
Nota - Le linee con le notazioni $i, o$ ed $e$ indicano il sistema di dimensioni - interne, interne globali, esterne. Le dimensioni sono date in metri.				
segue nella pagina successiva				

Figura 2.3.2\_3

Alcuni valori di progetto della trasmittanza termica lineica riportati nella normativa UNI EN ISO 14683

### 2.3.3 Software di calcolo FEM – THERM 7.0

Qualora si voglia invece determinare l'incidenza di determinati ponti termici, derivanti da dettagli tecnici costruttivi non riportati in normativa, ci si può avvalere di software di calcolo FEM (Finite Element Method).

In questo caso sarà possibile attraverso il software, una volta creato il modello secondo le prescrizioni normative ed impostato correttamente le condizioni al contorno, determinare il flusso termico considerando l'esatto ponte termico preso in esame.

$$\phi_{pt} = U_{FEM} \times L \times \Delta T$$

Da cui si potrà quindi calcolare la relativa trasmittanza termica lineica:

$$\psi = \frac{(\phi_{pt} - \phi_{nopt})}{\Delta T}$$

In particolare, per lo svolgimento della presente tesi, si utilizzerà il *software freeware* Therm 7.0.

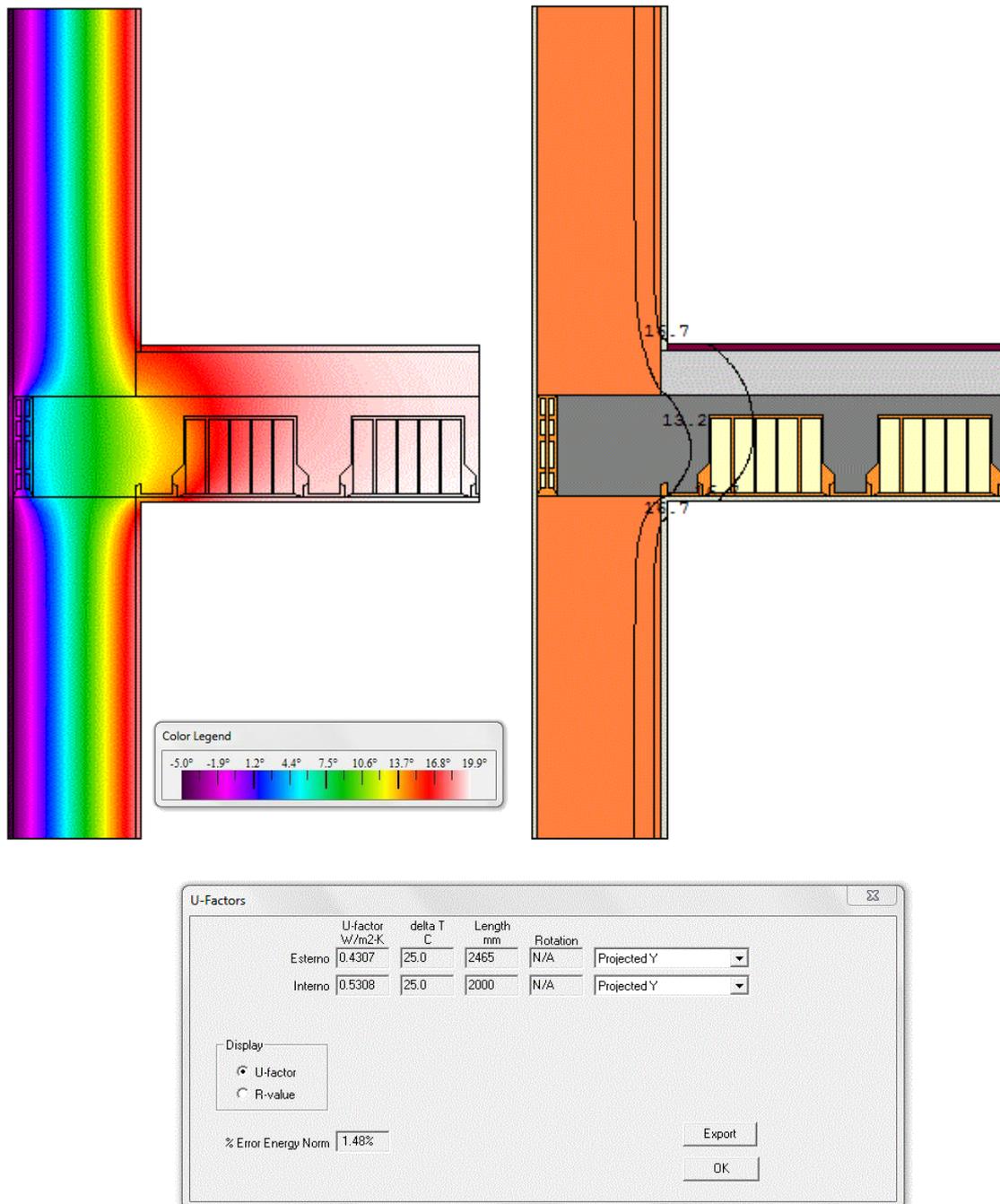
Therm 7.0 è un programma sviluppato dal *Lawrence Berkeley National Laboratory* (LBNL) usato per analizzare i flussi di calore bi-dimensionali attraverso differenti componenti edilizi (finestre, pareti, fondazioni, tetti) in cui è rilevante la concentrazione dei flussi di calore a causa della presenza di ponti termici.

Il programma permette di individuare le modifiche locali della trasmittanza dovute alla variazione dei flussi termici, oltre a mostrare ed identificare le distribuzioni di temperatura nella sezione corrente, permettendo di valutare eventuali problemi di condensazione interstiziale e/o superficiale.

Therm 7.0 dispone di una interfaccia grafica che permette di disegnare agevolmente la sezione corrente del componente di cui si vuole calcolare la prestazione termica.

Definita la geometria del modello, i materiali e le condizioni al contorno, la sezione viene processata da un generatore automatico di Mesh (che

richiede la discretizzazione in modelli ed elementi non sovrapposti tra loro) e da un solutore.



**Figura 2.3.3.\_1**

*Esempio di analisi di isoterme e flusso termico con il software THERM 7.0*

### 2.3.4 Valori di riferimento

Nel caso di sistemi fortemente isolati ( $U < 0,40$  [W/m<sup>2</sup>K]) possiamo così classificare le eterogeneità dell'involucro:

- Ponti termici “non controllati”:  $\psi = 0,50 \div 1,20$  [W/mK]
- Ponti termici “scarsamente controllati”:  $\psi = 0,20 \div 0,50$  [W/mK]
- Ponti termici “controllati”:  $\psi < 0,2$  [W/mK]
- Isolamento concentrato e continuo:  $\psi = \pm 0,20$  [W/mK]

## 2.4 Trasmittanza termica dell'involucro

### 2.4.1 Flusso termico nelle strutture opache

L'involucro edilizio costituisce la superficie che delimita il sistema "edificio" e ha la funzione di controllare i flussi di energia e massa al fine di garantire le condizioni di benessere negli ambienti confinanti, contenendo i consumi energetici. La differenza di temperatura tra i due ambienti separati dall'involucro fa sì infatti che si instauri un flusso di calore, l'entità di tale flusso caratterizza la struttura opaca presa in esame ed è rappresentata dalla **Trasmittanza Termica**.

Per l'analisi della trasmissione del calore attraverso le superfici opache dell'involucro edilizio, consideriamo per semplicità un caso particolare di parete multistrato in cui siano valide le seguenti ipotesi:

- Regime stazionario;
- Parete piana di estensione infinita;
- Materiali omogenei e isotropi;
- Superfici interna ed esterna isoterme;
- $Q_n$  = calore scambiato dall'n-esimo materiale;
- $d_n$  = spessore dello strato n-esimo di materiale nel componente;
- $\lambda_n$  = conduttività termica dello strato n-esimo;
- $h_i, h_e$  = coefficienti di adduzione della parete interna ed esterna, che tengono conto dei fenomeni di convezione ed irraggiamento.

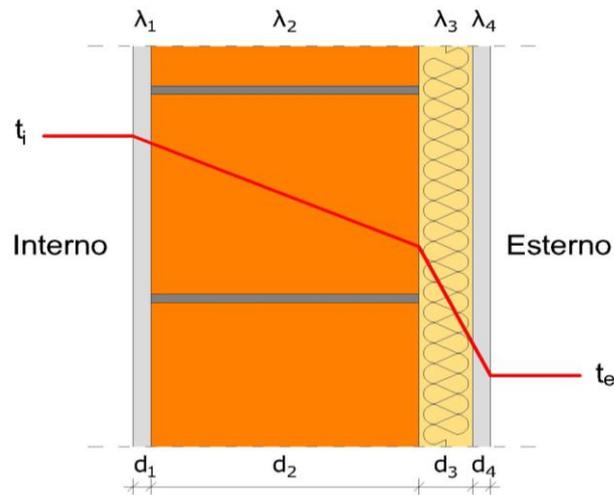


Figura 2.4.1\_1  
Isolamento termico "a cappotto"

$$Q_i = A \cdot h_i \cdot (T_i - T_1)$$

$$Q_1 = A \cdot \frac{\lambda_1}{d_1} \cdot (T_1 - T_2)$$

$$Q_n = A \cdot \frac{\lambda_n}{d_n} \cdot (T_n - T_{n+1})$$

$$Q_e = A \cdot h_e \cdot (T_4 - T_e)$$

dato che in regime deve essere:

$$Q_i = Q_1 = Q_n = Q_e$$

allora

$$\frac{Q}{A} \left( \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_n} + \dots + \frac{1}{h_e} \right) = (T_i - T_e)$$

Il calore scambiato tra l'ambiente interno e quello esterno può essere riscritto come:

$$Q = A \cdot U (T_i - T_e)$$

Si ottiene quindi il parametro **Trasmittanza termica** U [W/mqK] pari a:

$$U = \frac{1}{\left( \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_n} + \dots + \frac{1}{h_e} \right)}$$

Tale parametro se moltiplicato per la differenza di temperatura tra i fluidi e per l'area della superficie della parete considerata, permette di calcolare la quantità di calore scambiata grazie ai diversi meccanismi di scambio

termico contemporaneamente presenti, quali convezione, irraggiamento e conduzione.

Maggiore sarà il valore di trasmittanza termica, maggiore è la quantità di calore che attraversa l'unità di superficie a parità di differenza di temperatura.

Per una parete complessa, la **Resistenza termica** globale  $R$  [mqK/W] viene definita come:

$$R_T = \frac{\Delta T}{Q}$$

Prendendo in considerazione una superficie unitaria ( $A=1$  mq), la resistenza termica è data da:

$$R_n = \frac{d_n}{\lambda_n}$$

Le resistenze termiche superficiali interna ed esterna della parete complessa sono definite rispettivamente:

$$R_{si} = \frac{1}{h_i}, R_{se} = \frac{1}{h_e}$$

La resistenza termica globale di una parete complessa corrisponde alla somma delle resistenze che competono ai singoli strati costituenti:

$$R_T = \sum_i R_{Ti} = R_{si} + R_1 + \dots + R_n + R_{se}$$

## 2.4.2 Valori di riferimento

La normativa UNI EN ISO 6946 prescrive un metodo per il calcolo della resistenza termica dei componenti e degli elementi per l'edilizia, escluse porte, finestre, parti vetrate e componenti che scambiano calore con il terreno.

In particolare i valori di resistenza termica superficiale riportati sono:

Resistenza termica superficiale UNI EN ISO 6946			
	Direzione del flusso termico		
	Ascendente	Orizzontale	Discendente
R <sub>si</sub>	0,10	0,13	0,17
R <sub>se</sub>	0,04	0,04	0,04

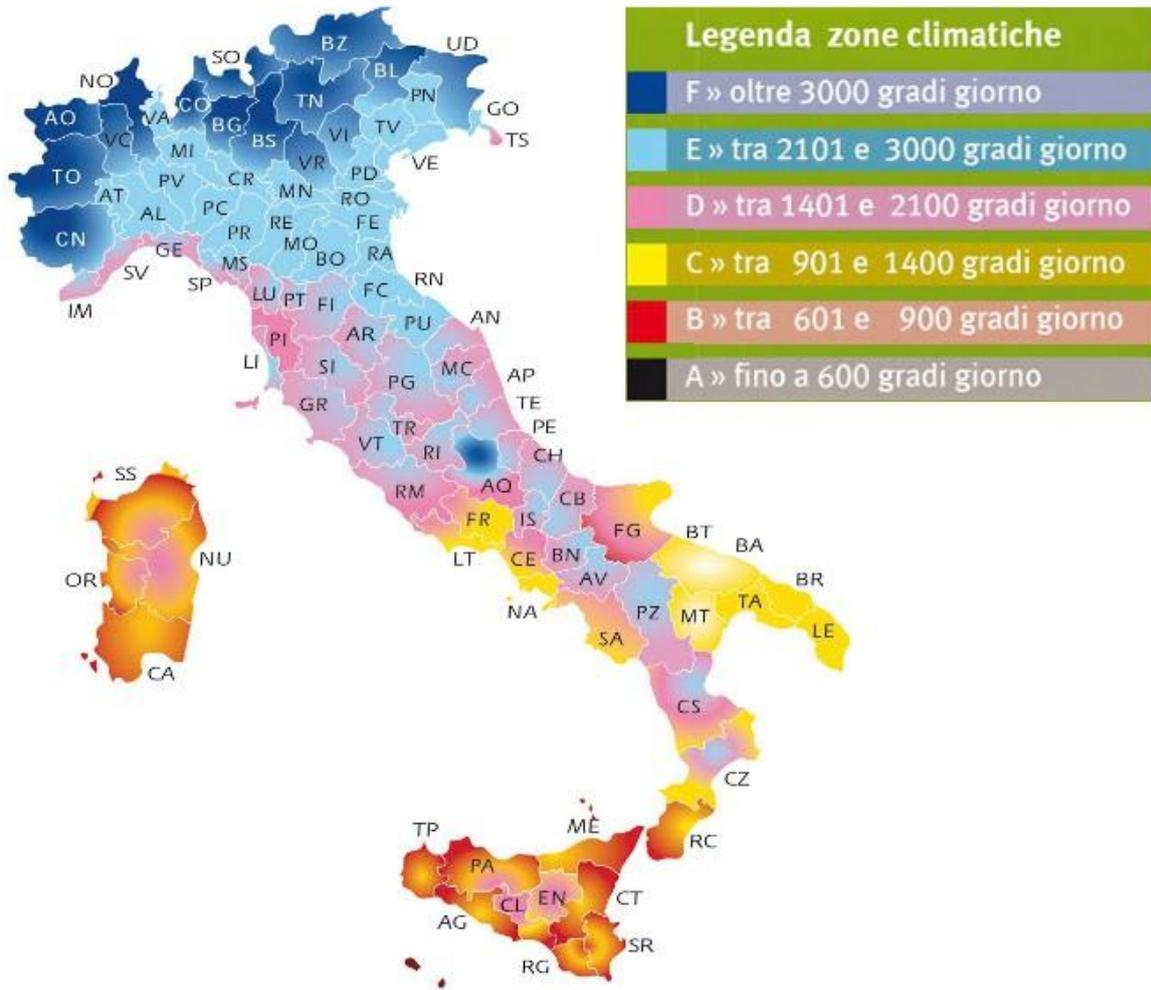
Prima il DL 192/2005 e poi il DL 311/2006 impongono precisi limiti ai valori di trasmittanza termica delle strutture opache, nel caso di edifici di nuova costruzione e ristrutturazione o manutenzione straordinaria, secondo la rispettive zone climatiche.

Valori limite della Trasmittanza termica U DL 311/2006			
Zona climatica	Strutture opache verticali (Muri e strutture verticali)		
	Dal 01/01/2006 U[W/mqK]	Dal 01/01/2008 U[W/mqK]	Dal 01/01/2010 U[W/mqK]
A	0,85	0,72	0,62
B	0,64	0,54	0,48
C	0,57	0,46	0,40
D	0,50	0,40	0,36
E	0,46	0,37	0,34
F	0,44	0,35	0,33

Valori limite della Trasmittanza termica U			
DL 311/2006			
Zona climatica	Strutture opache orizzontali di copertura (Coperture piane, inclinate e terrazze)		
	Dal 01/01/2006 U[W/mqK]	Dal 01/01/2008 U[W/mqK]	Dal 01/01/2010 U[W/mqK]
A	0,80	0,42	0,38
B	0,60	0,42	0,38
C	0,55	0,42	0,38
D	0,46	0,35	0,32
E	0,43	0,32	0,30
F	0,41	0,31	0,29

Valori limite della Trasmittanza termica U			
DL 311/2006			
Zona climatica	Strutture opache orizzontali (Pavimenti controterra, pavimenti su locali non riscaldati e di locali interrati riscaldati)		
	Dal 01/01/2006 U[W/mqK]	Dal 01/01/2008 U[W/mqK]	Dal 01/01/2010 U[W/mqK]
A	0,80	0,74	0,65
B	0,60	0,55	0,49
C	0,55	0,49	0,42
D	0,46	0,41	0,36
E	0,43	0,38	0,33
F	0,41	0,36	0,32

Valori limite della Trasmittanza termica U	
DL 311/2006	
Zona climatica	Divisori orizzontali e verticali tra unità abitative U[W/mqK]
Tutte	0,8



**Figura 2.4.2\_1**

*Suddivisione del territorio italiano in zone climatiche, in funzione dei valori di gradi-giorno (GG)*

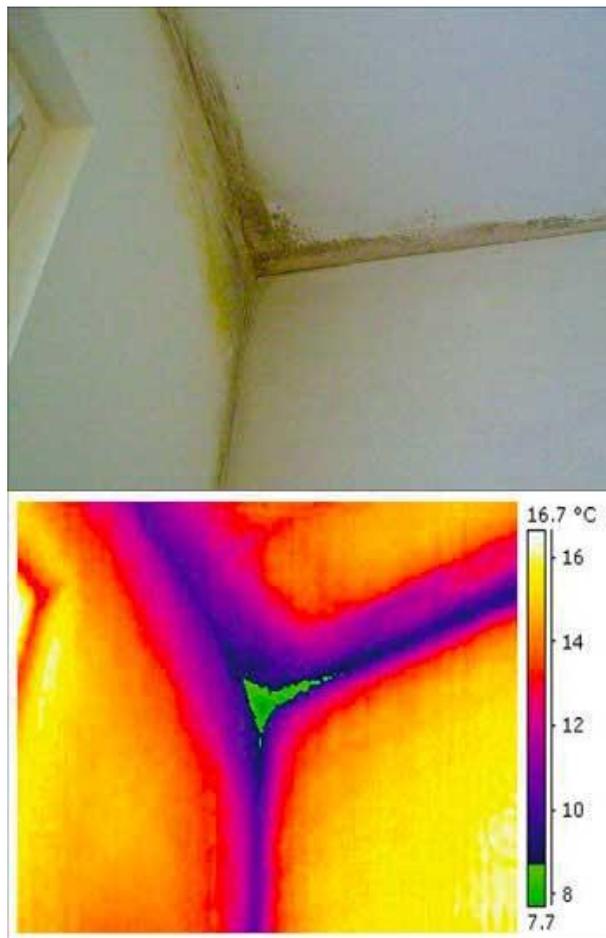
## 2.5 Condensa e muffa superficiale

### 2.5.1 Cause ed effetti

Nella stagione invernale accade di poter vedere negli angoli dei muri o dietro gli armadi la formazione di muffa che oltre ad essere antiestetica, può causare attacchi di asma e allergie, particolarmente nei bambini.

Vi possono essere varie cause che portano ad avere umidità e muffa nei muri di casa, anche in case di nuova costruzione, queste vanno ricercate:

- in fenomeni di infiltrazioni d'acqua,
- umidità per risalita capillare,
- fenomeni di condensazione dell'umidità dell'aria nei punti freddi delle pareti.



**Figura 2.5.1\_1**

*Formazione di muffa in corrispondenza di un ponte termico geometrico. La Termografia rende ancora più evidente le differenze di temperature sulle pareti, generate dal ponte termico.*

La quantità d'acqua presente nell'aria dipende dalla temperatura e dalla pressione; ad ogni valore di temperatura e pressione infatti corrisponde un certo quantitativo massimo di acqua che può restare allo stato di vapore, in un dato volume di aria.

Più elevata è la temperatura dell'aria, maggiore sarà il quantitativo di acqua in forma di vapore che potrà rimanere nell'ambiente, senza dare luogo a fenomeni di condensazione.

Se una massa d'aria calda e umida entra in contatto con una superficie fredda, in quel punto può accadere che si raggiunga la così detta temperatura di rugiada, ovvero che l'acqua, presente nell'aria, diminuendo repentinamente di temperatura superi la concentrazione massima possibile a causa della nuova temperatura e che quindi inizi a condensarsi depositandosi proprio sulla superficie più fredda.

Nella stagione invernale il fenomeno sopra descritto può manifestarsi anche sulle superfici degli edifici facendo accumulare umidità nelle pareti che nel giro di poco tempo portano ad evidenti segni di degrado, quali la formazione di muffe, deterioramenti della tinteggiatura, sino alla disgregazione di intonaci e muri.

Queste manifestazioni sono più frequentemente visibili in bagni, lavanderie, cucine e in tutti quegli ambienti di piccole dimensioni nei quali, per ragioni legate all'uso, l'umidità è più elevata.

Negli edifici più recenti il fenomeno è paradossalmente accentuato dall'isolamento termico posato nei muri. Infatti la parte interna delle pareti risulta, per via dell'isolamento posto nel muro, molto più calda di un tempo e se l'isolamento non è stato posato con molta cura e continuità si vengono a formare i cosiddetti ponti termici, già trattati nei paragrafi precedenti. Questi ponti termici oltre a disperdere calore verso l'esterno, sono dunque la vera causa della formazione di umidità e muffa.

Il fenomeno più significativo è quello legato alla condensa dovuta alla presenza di abbassamenti di temperatura all'interno dei locali e dalla presenza di una elevata umidità relativa.

Per eliminare la muffa non sono efficaci fungicidi o pitture, ma occorre eliminare le cause che la determinano; la più importante delle quali è l'acqua.

Nell'aria a pressione atmosferica, può miscelarsi vapore acqueo in una quantità che varia con la temperatura, ad esempio:

- a 15 °C, un Kg di aria può contenere al massimo 11 gr di acqua,
- a 22 °C tale quantità aumentata a 17 gr,

riducendo quindi la temperatura da 22 °C a 15 °C, condensano 6 gr di acqua.

Tali condizioni si creano all'interno di abitazioni non correttamente progettate, ma una buona parte di responsabilità, a volte ricade anche nella pessima conduzione degli ambienti da parte di chi vi abita. Una scarsa ventilazione produce forti carichi di umidità all'interno dei locali, come la cucina, elevata presenza di piante o animali, i vapori della doccia ecc.

### 2.5.2 Valori di riferimento

Un buon isolamento e la risoluzione dei problemi dei ponti termici, difficilmente potranno portare al verificarsi di fenomeni di condensa interna in un'abitazione.

Le normative DL 311/06 e UNI EN ISO 13788 riportano determinati valori limite da rispettare, e forniscono procedure di calcolo per determinare la temperatura interna di componenti o elementi edilizi al di sotto del quale è probabile la formazione di condensa superficiale e muffa.

La normativa prevede che con una temperatura interna dell'aria di 20° e un'umidità relativa del 65% non si debba formare **condensa** superficiale sulle pareti interne all'abitazione.

Considerando una temperatura di 20°C, il massimo contenuto di umidità è 17,33 g/mc, corrispondente al 100% di umidità relativa. Il 65% di umidità relativa a tale temperatura sono quindi 11,26 g/mc, ai quali corrispondono una T di rugiada di circa 13,2°C.

Perciò, per evitare la formazione di condensa superficiale, alla temperatura interna di 20 °C, ogni superficie interna deve avere una temperatura non inferiore a 13,2 °C.

La normativa prevede inoltre che con una temperatura interna dell'aria di 20° e un'umidità relativa del 80% non si debba formare **muffa** superficiale sulle pareti interne all'abitazione.

Considerando una temperatura di 20°C, il massimo contenuto di umidità è 17,33 g/mc, corrispondente al 100% di umidità relativa. L'80% di umidità relativa a tale temperatura , fa corrispondere una temperatura di rugiada di circa 16,7°C.

Perciò, per evitare la formazione di **muffa** superficiale, alla temperatura interna di 20 °C, ogni superficie interna deve avere una temperatura non inferiore a 16,7 °C.

## 2.6 Condensa interstiziale

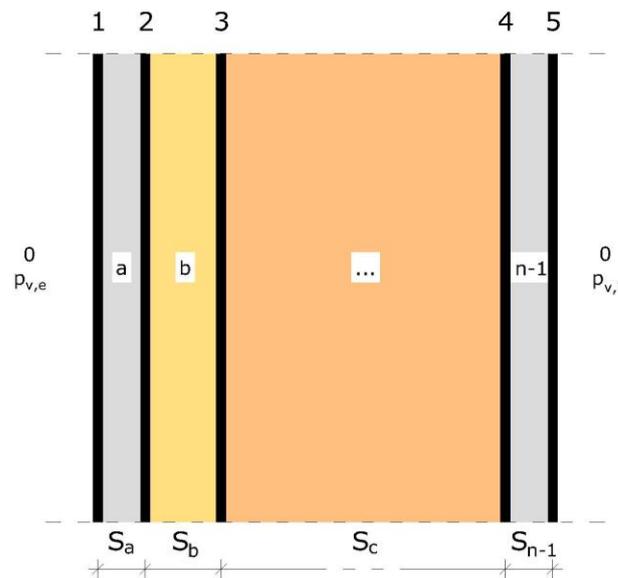
### 2.6.1 Diagramma di Glaser

La differenza di pressione parziale del vapore d'acqua tra ambienti interno ed esterno nel periodo invernale è generalmente dell'ordine di grandezza di 1.000 Pa, tale differenza di pressione crea una migrazione di vapore d'acqua attraverso le pareti. Se si verifica l'incontro del flusso di vapore con superfici o zone interne alla parete a temperatura inferiore a quella di condensazione, ha luogo il fenomeno che prende il nome di condensa interstiziale.

Secondo il modello di calcolo più diffuso (il diagramma di Glaser), la formazione di condensa interstiziale è determinata dalla concorrenza di due fattori. Il primo fattore è la distribuzione della temperatura nella parete, che determina una distribuzione della pressione di saturazione del vapore d'acqua; il secondo fattore è legato alla permeabilità al flusso di vapore delle pareti, che determina una caduta della pressione parziale del vapore a causa della resistenza al flusso.

La pressione di saturazione del vapore d'acqua dovrà essere sempre più elevata della pressione parziale del vapore d'acqua. Infatti laddove la pressione parziale del vapore d'acqua superi la sua pressione di saturazione, il vapore d'acqua condenserà.

È evidente quindi che ciò si verifica dove le distribuzioni di pressione di saturazione del vapore d'acqua e di pressione parziale del vapore si intersecano.



**Figura 2.6.1\_1**  
*Schematizzazione di una parete multistrato*

Lo schema di calcolo di riferimento per la verifica alla condensa interstiziale di una parete, fa riferimento ad una parete a strato piano multiplo. Si faccia pertanto riferimento alla situazione rappresentata in figura, ove sono presi in considerazione due ambienti (0 e n) separati tra loro da una parete multistrato costituita da (n-1) strati piani, individuati con le lettere a,b,...,n-1.

Siano inoltre definite le seguenti grandezze:

- $s_a, s_b, \dots, s_{n-1}$  gli spessori degli strati;
- $g$  la portata in massa di vapore per unità di superficie
- $p_{v,e}$  e  $p_{v,i}$  le pressioni parziali del vapore d'acqua rispettivamente negli ambienti esterno ed interno
- $\delta_{p,a}, \delta_{p,b}, \dots, \delta_{p,n-1}$  la permeabilità al vapore nei materiali che compongono i vari strati
- $p_{v,1}, p_{v,2}, \dots, p_{v,n}$  i valori del vapore d'acqua in corrispondenza delle superfici di contatto tra gli strati

La resistenza specifica alla diffusione del vapore dello strato i-esimo è data da:

$$Z_{p,i} = \frac{S_i}{\delta_{p,i}}$$

In normativa viene talvolta fornito il fattore di resistenza al vapore dei materiali di interesse edilizio. Indicando con  $\delta_0$  la permeabilità al vapore dell'aria, pari a  $\delta_0=2*10^{-10}$  il fattore di resistenza al vapore del materiale che compone lo strato i-esimo è definito:

$$\mu = \frac{\delta_0}{\delta_i}$$

La resistenza specifica alla diffusione del vapore dello strato i-esimo, può dunque essere calcolata come:

$$Z_{p,i} = \mu_i \frac{S_i}{\delta_0}$$

In completa analogia formale con il problema della conduzione del calore in una parete piana pluristrato, la resistenza all'avanzamento del vapore della parete multistrato sarà:

$$Z_{p,tot} = \sum_{i=a}^{n-1} Z_{p,i}$$

Nota dunque la pressione parziale del vapore d'acqua nell'ambiente interno e in quello esterno, la portata di vapore  $g$  che attraversa la parete è:

$$g = \frac{P_{v,n} - P_{v,1}}{Z_{p,tot}}$$

Determinata quindi la portata di vapore  $g$  e i valori  $p_{v,n}$  e  $p_{v,1}$ , si ottengono i valori della pressione del vapore in corrispondenza di ogni interfaccia:

$$p_{v,n} = \frac{g}{Z_{p,n-1}} + p_{v,n-1}$$

In ciascuno strato infine, si prevede un andamento lineare della pressione del vapore.

Il Diagramma di Glaser è uno strumento che utilizza questa formulazione matematica per la valutazione della formazione di condensa interstiziale all'interno di una parete multistrato.

Il metodo di verifica è articolato nei seguenti passi:

- viene calcolata la distribuzione di temperatura all'interno della parete multistrato
- a partire dalla distribuzione della temperatura viene calcolata la distribuzione della pressione di saturazione del vapore d'acqua per mezzo della seguente relazione, ove la pressione è espressa in pascal e la temperatura in gradi Celsius (UNI EN ISO 13788:2003)

La funzione della pressione di saturazione

$$P_s \begin{cases} = 610,5 \exp \left[ \frac{21,875T}{265,5 + T} \right], T < 0^\circ C \\ = 610,5 \exp \left[ \frac{17,269T}{237,3 + T} \right], T \geq 0^\circ C \end{cases}$$

è una funzione non lineare della temperatura, la UNI EN ISO 13788:2003 prescrive di suddividere gli strati ad elevata resistenza termica in un numero di sotto strati caratterizzati da una resistenza termica non maggiore di 0,25 mqK/W; nei calcoli ciascuno di questi dovrà dunque essere considerato come un singolo strato di materiale.

- Viene calcolata la distribuzione della pressione del vapore all'interno di ogni singolo strato attraverso le equazioni precedentemente illustrate
- Vengono confrontate le distribuzioni della pressione di saturazione e della pressione parziale del vapore d'acqua. Se la curva di saturazione resta tutta al di sopra della distribuzione della pressione parziale non vi è possibilità di condensazione, altrimenti si ha la formazione di condensa interstiziale.<sup>8</sup>

---

<sup>8</sup> RINALDI, Progettazione ed efficienza energetica, Santarcangelo di Romagna, Maggioli, 2010, pag. 58

## 2.7 Sfasamento e attenuazione

### 2.7.1 Regime periodico stabilizzato

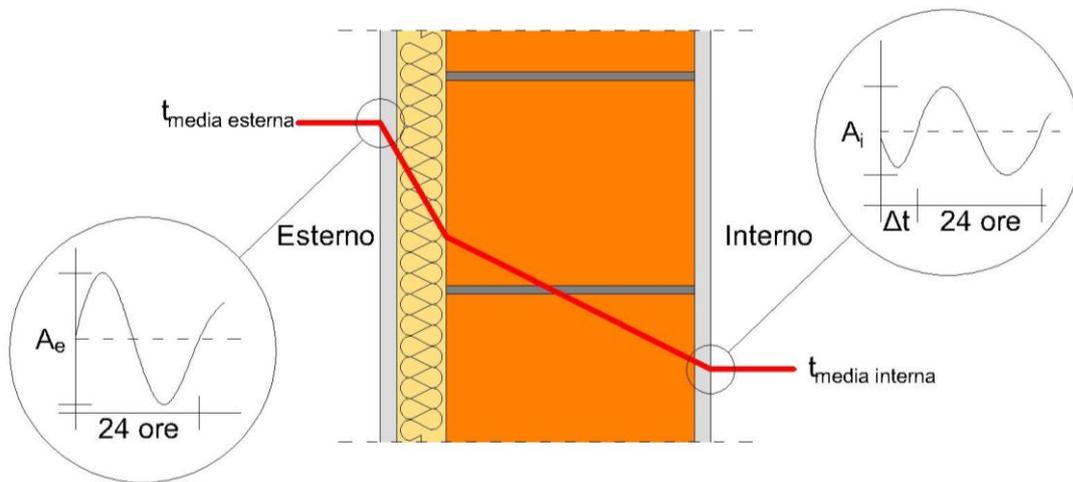
È esperienza comune l'aver riscontrato nella stagione estiva, all'interno di edifici privi di impianto di condizionamento ma costruiti con murature spesse e pesanti, valori di temperatura gradevoli.

Questo fenomeno è dovuto alla capacità delle pareti di accumulare calore durante le ore più calde della giornata per poi cederlo all'interno degli ambienti solo molto tempo dopo, quando ormai la temperatura esterna si è abbassata ed è quindi sufficiente ventilare i locali aprendo le finestre per raffrescare l'aria e l'involucro.

Il fenomeno è sicuramente significativo quando le pareti hanno massa elevata e più in generale viene attribuito a una proprietà delle strutture detta "capacità termica" o "inerzia termica".

- Nella gestione invernale una bassa capacità termica dell'edificio comporta un più rapido abbassamento della temperatura interna durante le ore di spegnimento dell'impianto di riscaldamento. Un buon grado di isolamento termico posto sull'esterno delle pareti rallenta tale raffreddamento, mentre lo stesso isolamento posto sul lato interno può avere un effetto solo più limitato, in quanto il calore immagazzinato nella struttura durante la giornata è minore e deve attraversare l'isolamento termico per essere sfruttato.
- Nella stagione estiva, in edifici non climatizzati, i cambiamenti della temperatura esterna vengono sentiti di meno all'interno se l'involucro ha una elevata capacità termica. La temperatura interna inizia a cambiare in ritardo rispetto a quella esterna. Un ritardo significativo (8-10 ore) del flusso di calore entrante attraverso le pareti opache favorisce l'attenuazione delle escursioni termiche giorno-notte all'interno, se accoppiato alla contemporanea ventilazione degli ambienti con aria notturna più fresca.

L'andamento variabile nel tempo della temperatura riscontrato sulla faccia esterna viene trasferito sulla faccia interna con ampiezza ridotta ( $A_e \neq A_i$ ) e con un ritardo temporale  $\Delta t$ .



**Figura 2.7.1\_1**

*Rappresentazione grafica di sfasamento e riduzione d'ampiezza per una parete verticale*

Riduzione d'ampiezza e ritardo di fase sono dunque i parametri che caratterizzano il comportamento dinamico delle strutture.

Sfruttare la risposta alle variazioni di temperatura e di flusso termico dei componenti edilizi è dunque importante per controllare l'andamento delle richieste di energia all'impianto di riscaldamento nei mesi invernali o quello della temperatura interna in assenza di impianto di climatizzazione nei mesi estivi.

In molte situazioni climatiche tipiche italiane, un appropriato sfruttamento dell'inerzia termica delle pareti consente di mantenere condizioni adeguate di benessere, riducendo sia carichi termici invernali sia quelli di condizionamento estivo.

È evidente quanto risulti importante saper valutare tali caratteristiche dell'involucro prescelto, per poterlo modificare e caratterizzare per quanto possibile e renderlo più efficiente anche sotto questo importante aspetto.

Il parametro più semplice è la **Massa superficiale**, espressa in Kg/mq, ovvero la massa per unità di superficie frontale di una parete. Per

determinare la massa superficiale è sufficiente moltiplicare la densità del materiale per lo spessore di ogni singolo strato di una parete e sommare tutti i contributi:

$$M_s = \sum_j^N \rho_j \times s_j$$

con

$\rho_j$  = densità dello strato j-esimo

$s_j$  = spessore dello strato j-esimo

La norma di riferimento per un'analisi più dettagliata delle caratteristiche termiche dinamiche di una struttura è la UNI EN ISO 13786/2008, che introduce alcune ipotesi semplificative per rendere più semplice, seppur valida, l'analisi delle caratteristiche termiche dinamiche di una struttura opaca. La norma indica di imporre sulla superficie esterna di una parete valori di temperatura variabili nel tempo con andamento sinusoidale, ottenendo sulla superficie opposta una distribuzione di temperatura ancora sinusoidale ma caratterizzata da uno sfasamento temporale e da un'ampiezza ridotta. Proprio l'entità di queste due caratteristiche della curva sinusoidale della temperatura, lo sfasamento e l'attenuazione, dipenderanno dalle qualità termofisiche complessive dei diversi strati di materiali che compongono la struttura opaca in esame. Il periodo di tempo significativo da considerare nell'analisi dei componenti edilizi è di 24 ore.

La normativa prevede un dettagliato calcolo matriciale, che nella presente tesi svilupperemo avvalendoci di un foglio di calcolo *excel*, in cui si determinano attraverso specifici passaggi questi principali valori:

$$\text{Matrice di scambio termico} \begin{pmatrix} \hat{\theta}_i \\ \hat{q}_i \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \hat{\theta}_e \\ \hat{q}_e \end{pmatrix}$$

con

$\hat{\theta}$  e  $\hat{q}$  = ampiezze complesse di temperatura e flusso termico per unità di superficie sui due lati del componente edilizio

Per un componente multistrato è possibile calcolare la matrice di scambio termico combinando le matrici dei singoli strati:

$$Z = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{bmatrix} = Z_N Z_{N-1} \dots Z_2 Z_1$$

Si definisce **Trasmittanza termica** periodica  $Y_{12}$  [W/mqK] il parametro che esprime la capacità di un componente edilizio di attenuare nel tempo il flusso termico proveniente dall'esterno che lo attraversa nell'arco di una giornata. Lo si calcola ponendo costante la temperatura dell'ambiente interno:

$$\left( \hat{\theta}_i = 0 \right) \quad Y_{12} = -\frac{\hat{q}_i}{\hat{\theta}_e} = \frac{1}{Z_{12}}$$

Si definisce **Fattore di attenuazione** o **fattore di decremento**, il rapporto tra il modulo della trasmittanza termica periodica e la trasmittanza termica in condizioni stazionarie:

$$f = \frac{|Y_{12}|}{U_o} = \frac{\left| \frac{\hat{q}_i}{\hat{\theta}_e} \right|}{U_o} = \frac{1}{|Z_{12}| \cdot U_o}$$

Si definisce **Sfasamento**, il periodo di tempo che intercorre fra l'ampiezza massima di una causa e la massima ampiezza del suo effetto.

Nel nostro caso quindi, il ritardo temporale fra il massimo del flusso termico entrante in un ambiente interno e il massimo della temperatura dell'ambiente esterno:

$$\Delta t_f = \frac{T}{2\pi} \arg(Z_{12})$$

con

$T$  = periodo della sollecitazione termica (24 ore)

$\text{Arg}(Z_{12})$  = argomento del numero complesso  $Z_{12}$

## 2.7.2 Valori di riferimento

Attualmente a livello legislativo non vi è ancora univocità nella scelta del parametro cui assegnare il ruolo di indicatore, per la valutazione del comportamento delle strutture in regime dinamico.

Comune a tutte le normative che si preoccupano di prendere in considerazione anche il contenimento dei consumi in regime estivo, è la verifica della massa superficiale  $M_s$  [kg/mq] delle strutture opache. Il limite imposto affinché una struttura si possa considerare idonea dal punto di vista del comportamento estivo è di 230 [kg/mq].

Per quanto riguarda invece altri fattori, esistono differenze tra un provvedimento e l'altro. In alternativa alla verifica della massa superficiale  $M_s$ , alcune norme fanno riferimento ai valori di sfasamento e attenuazione dell'onda termica, altre fanno riferimento ai valori assunti dalla trasmittanza termica periodica.

Ad esempio il DPR 59/2009 concernente l'attuazione della direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico in edilizia, che vige in tutte le regioni che non hanno ancora provveduto ad emanare proprie leggi in materia, e la DGR 8/8745 della Regione Lombardia impongono:

per le pareti verticali opache con l'eccezione di quelle comprese nel quadrante Nord-Ovest/Nord/Nord-Est, in alternativa alla verifica della massa superficiale, il valore del modulo della trasmittanza termica periodica  $Y$  sia inferiore a 0,20 [W/mqK].

La DAL 156/2008 della Regione Emilia Romagna ed il DM 26/6/2009, propongono una classificazione qualitativa del comportamento delle strutture nel periodo estivo basata sui valori assunti da sfasamento  $\Delta t_f$  e fattore di attenuazione  $f$  dell'onda termica, laddove non venga soddisfatto il requisito sulla massa superficiale.

<b>Classi prestazionali della struttura edilizia di contenimento proposte da: Regione Emilia Romagna DAL 156/2008 e DM 26/6/2009</b>			
<b>SFASAMENTO</b>	<b>FATTORE DI ATTENUAZIONE</b>	<b>PRESTAZIONE</b>	<b>CLASSE PRESTAZIONALE</b>
$\Delta t > 12$ ore	$f \leq 0,15$	Ottima	I
$12 > \Delta t > 10$ ore	$0,15 < f \leq 0,30$	Buona	II
$10 > \Delta t > 8$ ore	$0,30 < f \leq 0,40$	Sufficiente	III
$8 > \Delta t > 6$ ore	$0,40 < f \leq 0,60$	Mediocre	IV
$\Delta t \leq 6$ ore	$f > 0,60$	Cattiva	V

L'introduzione di blocchi di elevato spessore e massa frontale, pone però il problema di avere elevati valori di sfasamento termico, che arrivano anche a superare le 16 ore. Questo significa che la parete "rilascia" il calore accumulato dopo 16 ore, quando è stato superato il periodo notturno. Per ottenere condizioni ottimali di inerzia termica, la parete dovrebbe avere uno sfasamento tale da rilasciare calore nelle ore notturne che vanno da mezzanotte alle 6 del mattino, le ore più fredde della giornata.

### 3. CAPITOLO III – SOLUZIONI TECNICHE INNOVATIVE

L'evoluzione normativa nel settore dell'efficienza energetica ha modificato negli ultimi anni gli standard minimi per gli elementi dell'involucro, imponendo valori di trasmittanza e inerzia termica sempre più stringenti.

Il laterizio, nella cultura costruttiva italiana, ha sempre avuto un ruolo fondamentale come componente dell'involucro, evolvendo nel tempo per soddisfare le esigenze di isolamento, con soluzioni avanzate come blocchi termici "alleggeriti in pasta". Grazie a questa rivoluzionaria tecnologia produttiva e allo studio geometrico e dimensionale degli elementi, è stato possibile fino ad ora assolvere contemporaneamente la funzione strutturale, termica ed acustica con pareti monostrato costituite da blocchi.

Con la seguente tesi si vuole proseguire questa evoluzione del laterizio. Ci si pone quindi l'obiettivo di studiare una "soluzione innovativa" che risponda alle nuove stringenti normative in termini di risparmio energetico invernale, in fase d'uso, ma anche alle numerose altre esigenze che le normative ancora non prevedono, ma che una matura e cosciente ricerca della sostenibilità non può tralasciare.

Si è seguita quindi una ricerca in funzione di tutte quelle caratteristiche fisiche già introdotte nel precedente capitolo, congiuntamente ad altre di carattere più "pratico", che riportino lo studio ad un più realistico sviluppo ed utilizzo futuro.

In particolare, ci si è concentrati sull'obiettivo di creare una soluzione di muratura portante che, con una soluzione "unica" e quindi con minori costi in cantiere, possa portare maggiori benefici anche nei punti critici della struttura, quali i ponti termici.

Lo studio della soluzione tecnica innovativa, parte dal confronto con “pacchetti” murari già esistenti e performanti.

In particolare siamo partiti dalle prestazioni/caratteristiche di una muratura portante monoblocco realizzata con laterizio Porotherm PLANA PLUS (rettificato riempito con perlite) WIENERBERGER, di spessore 36,5 cm.

Per lo sviluppo della soluzione tecnica oggetto di studio, è stata invece utilizzato il laterizio Porotherm BIO PLAN (rettificato) WIENERBERGER, poi integrato con isolante EPS.





Pth **PLAN PLUS**  
36,5 - 0,11



Pth **BIO PLAN**  
30-25/24,9

Prodotto		36811097	18203010
Codice		36811097	18203010
Stabilimento		Zeilam	Feltre
Tipologia di blocco		rettificato riempito perlite <sup>(2)</sup>	rettificato
Tipologia di muro	<i>Portante sismico</i>	● <sup>(3)</sup>	●
	<i>Tamponamento</i>	●	
Dimensioni, peso e lavorazione			
spessore	cm	36,5	30
lunghezza	cm	24,8	25
altezza	cm	24,9	24,9
Peso del blocco	kg	19,4	16,8
Foratura	%	45	45
Peso specifico e resistenza meccanica			
Densità media	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	900	920
Resistenza meccanica <i>muro blocco</i>	base	$f_{bk}$ N/mm <sup>2</sup>	8
	testa	$f_{tk}$ N/mm <sup>2</sup>	1,5
	a compressione	$f_k$ N/mm <sup>2</sup>	6
	a taglio	$f_{v0k}$ N/mm <sup>2</sup>	0,55
Caratteristiche termiche e prestazionali			
Conducibilità termica <sup>(1)</sup> secondo la Uni En 1745 valore senza maggiorazione	malta speciale	$\lambda_{mK}$ W/mK	0,11 <sup>(2)</sup>
	malta tradizionale	$\lambda_{equ}$ W/mK	-
	malta termica	$\lambda_{mK}$ W/mK	-
Trasmittanza termica <sup>(1)</sup> secondo la Uni En 1745 con intonaco $\lambda = 0,54$ (15+15 mm)	malta speciale	U W/m <sup>2</sup> K	0,28 <sup>(2)</sup>
	malta tradizionale	U W/m <sup>2</sup> K	-
	malta termica	U W/m <sup>2</sup> K	-
Trasmittanza termica periodica <sup>(3)</sup>	$Y_{IE}$ W/m <sup>2</sup> K	0,006	0,041
Sfasamento <sup>(3)</sup>	S ore	23,20	16,61
Attenuazione <sup>(3)</sup>	$f_a$ -	0,02	0,09
Resistenza al fuoco in conformità alla circ. VVF 15/02/08 e D.M. 16/02/07 all. D	REI/EI -	EI 240	REI 180
Potere Fonoisolante secondo la formula $19,9 \log(M)$ compresi gli intonaci	R <sup>'</sup> w dB	50	50

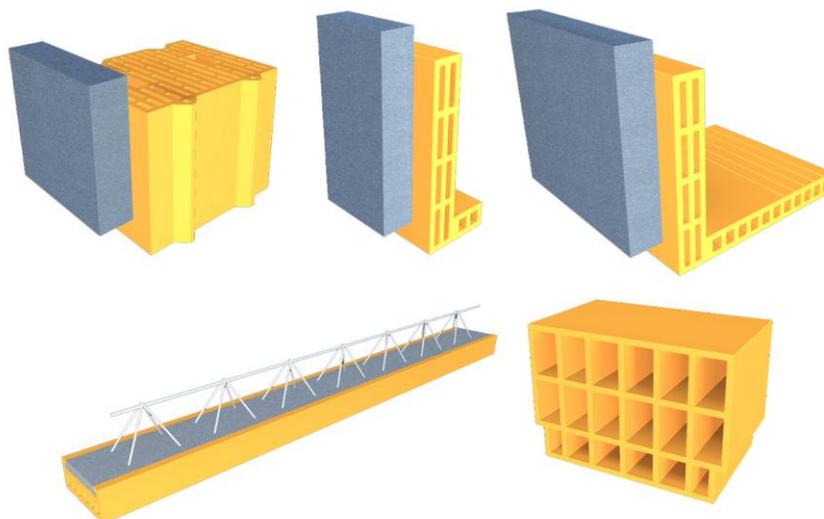
**Figura 3\_1**  
Caratteristiche tecniche di: Pth PLAN PLUS e Pth BIO PLAN

Riassumendo, si è studiata una soluzione innovativa attraverso:

- NTC 2008 – Costruzioni in muratura portante
- Requisiti normativi di Trasmittanza termica dell'involucro
- Analisi dell'incidenza dei Ponti termici
- Analisi dell'energia incorporata nei materiali utilizzati
- Condensa e Muffa superficiale
- Condensa interstiziale
- Massa superficiale, Sfasamento e Attenuazione
- Posa in opera

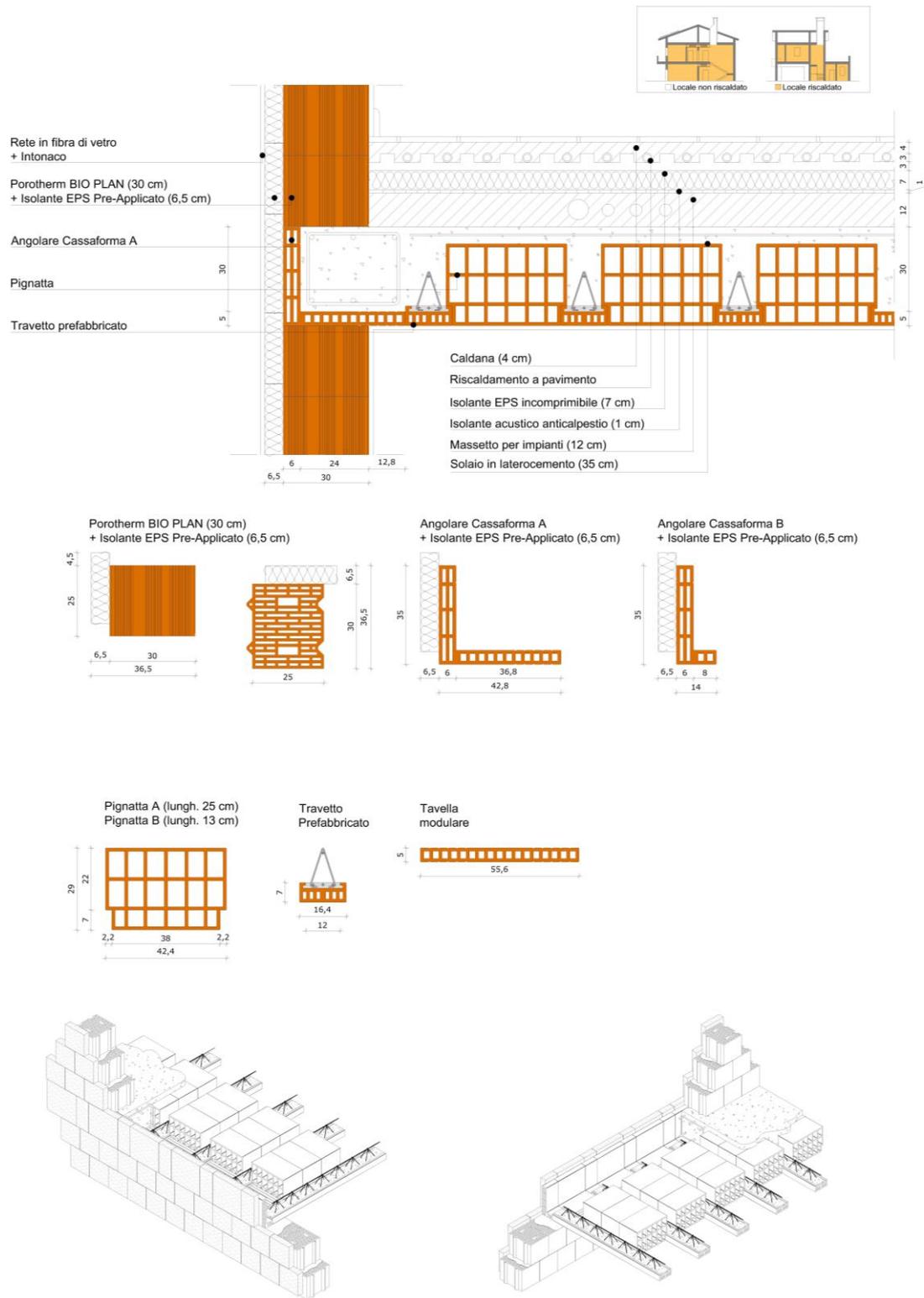
Lo sviluppo e il risultato delle analisi, illustrate nei seguenti paragrafi, hanno portato necessariamente alla ri-progettazione di diversi elementi: alcuni che costituiscono più strettamente l'involucro esterno, altri le ripartizioni interne.

Non ci si è quindi concentrati esclusivamente sul singolo prodotto in laterizio, costituente la muratura portante ad alte prestazioni, ma, ragionando più ampiamente sull'intera struttura, si sono progettati "parallelamente" un insieme di innovazioni che ben dialoghino tra loro, e portino ad un miglior raggiungimento degli obiettivi di sostenibilità ed efficienza dell'intero involucro edilizio.



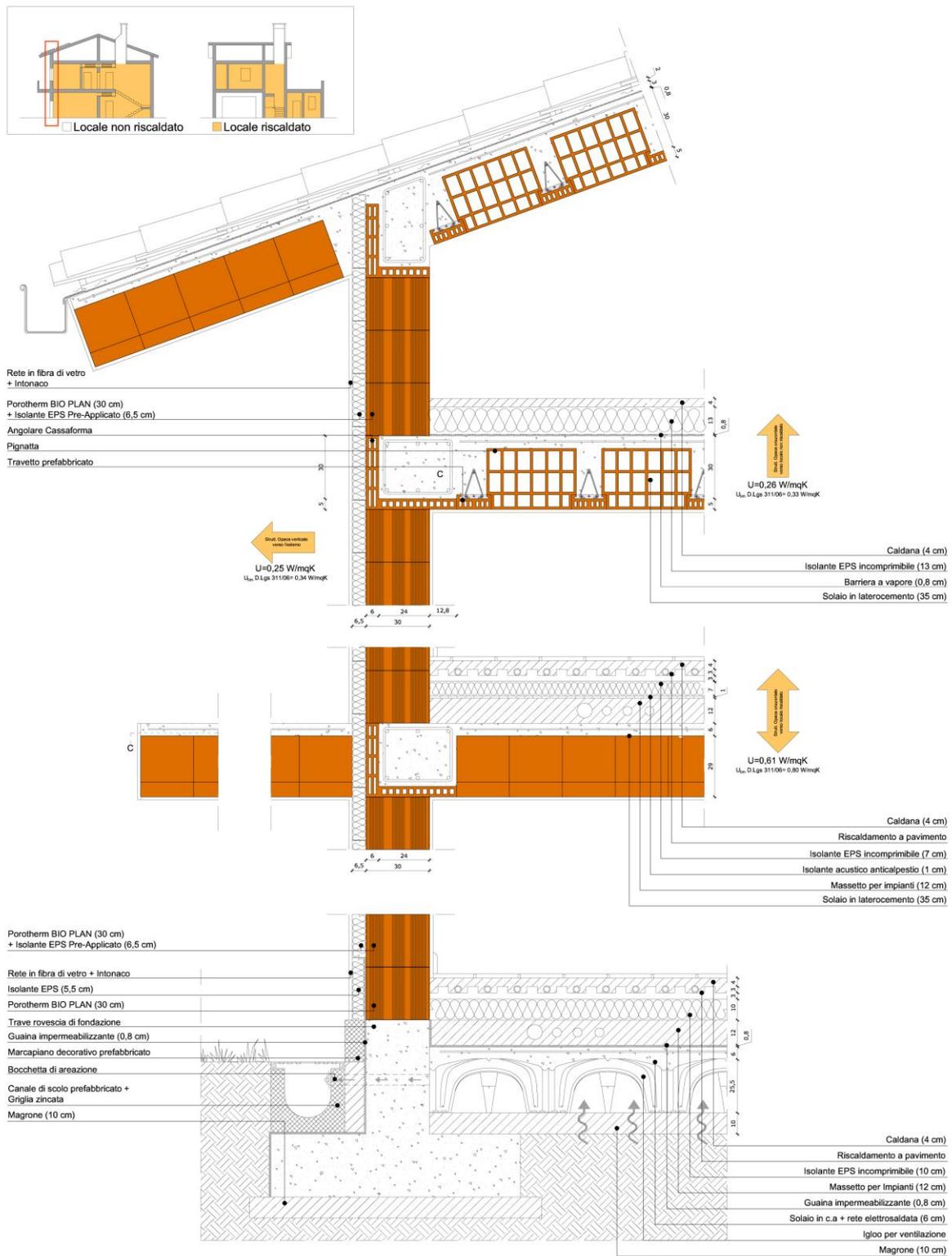
**Figura 3\_2**  
*Elementi innovativi oggetto di studio*

**Soluzioni innovative in laterizio per edifici ad alta efficienza energetica:  
un nuovo modello di involucro in muratura portante**



**Figura 3\_3**  
*Elementi innovativi oggetto di studio e dettagli tecnici del loro utilizzo*

**Soluzioni innovative in laterizio per edifici ad alta efficienza energetica:  
un nuovo modello di involucro in muratura portante**



**Figura 3\_4**  
 Elementi innovativi oggetto di studio e dettagli tecnici del loro utilizzo

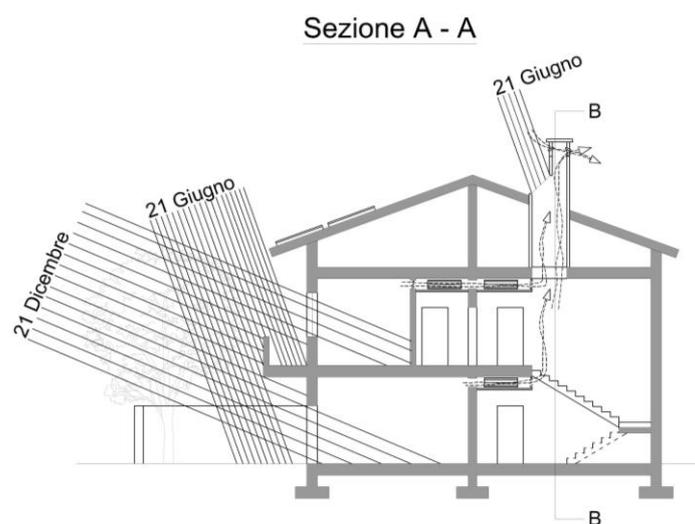
Allo scopo di rendere più completa la ricerca, si è sviluppato inoltre il progetto architettonico di una villetta unifamiliare, a cui poter applicare gli elementi innovativi oggetto di studio.

Il progetto persegue tutte quelle indicazioni ampiamente descritte nel capitolo 2.1 per la progettazione di un Edilizia Sostenibile, rispettando le normative vigenti nel campo del risparmio energetico ma anche necessariamente le NTC 2008 riguardo le costruzioni in muratura portante in zona sismica.

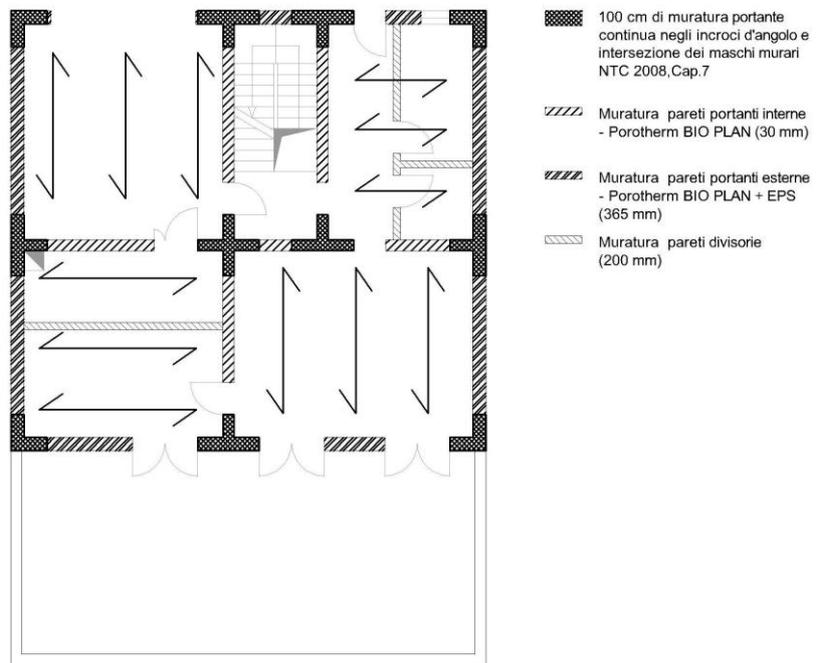
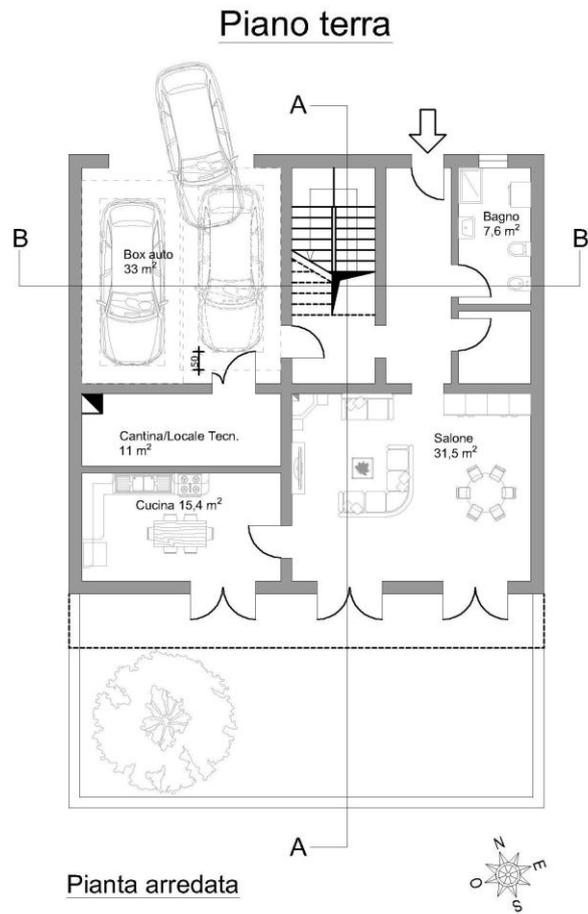
Si è ipotizzato per la progettazione l'area del Bolognese, corrispondente alla zona sismica 3 (secondo PCM 3519 28/04/2006) e alla zona climatica E.

Le principali linee guida seguite sono state:

- Buon orientamento dell'edificio e degli ambienti interni
- Compattezza dell'edificio
- Alta efficienza dell'involucro in regime dinamico
- Utilizzo attivo e passivo dell'energia solare
- Progettazione di un sistema di ventilazione naturale controllato (VNC)
- Edificio regolare e simmetrico in pianta ed elevazione, secondo le NTC 2008



**Figura 3\_5**  
*Sezione significativa*



Pianta strutturale

**Figura 3\_6**

*Pianta arredata e strutturale - Piano terra*

### 3.1 Normativa vigente: NTC 2008

A partire dal 1° Luglio 2009 è definitivamente entrato in vigore il D.M. 14/01/2008 recante “Approvazione delle norme tecniche per le costruzioni”, di seguito definite come NTC.

Esso contiene anche i nuovi riferimenti normativi ai fini della qualificazione ed accettazione dei materiali e prodotti per uso strutturale, andando a sostituire in tutti i casi e per tutte le tipologie costruttive le previgenti norme.

Alcune indicazioni integrative sono state poi riportate all'interno della Circolare 02/02/2009, n.617 recante “Istruzioni per l'applicazione delle “Nuove norme tecniche per le costruzioni” di cui al decreto ministeriale 14 Gennaio 2008”.

Per quanto attiene gli elementi per muratura portante, i requisiti richiesti sono contenuti a vario titolo nei seguenti punti delle NTC:

- **Capitolo 4 – Costruzioni civili ed industriali – Punto 4.5 “Costruzioni in muratura”, §4.5.2 “Materiali e caratteristiche tipologiche”:** contiene tutti i riferimenti in merito alle caratteristiche dei materiali da impiegare per la realizzazione di murature portanti in zona 4 (zona a sismicità molto bassa);
- **Capitolo 7 – Progettazione per azioni sismiche – Punto 7.2 “Criteri generali di progettazione e modellazione”:** contiene i requisiti generali di progettazione delle costruzioni;
- **Capitolo 7 – Progettazione per azioni sismiche – Punto 7.8 “Costruzioni in muratura”, §7.8.1.2 “Materiali”:** contiene i requisiti aggiuntivi da considerare per i materiali da impiegarsi per la realizzazione di murature portanti nelle zone 3, 2, 1;
- **Capitolo 11 – Materiali e prodotti per uso strutturale – Punto 11.10 “Muratura portante”:** contiene tutte le specifiche per i controlli di accettazione e la determinazione delle caratteristiche meccaniche degli elementi per la muratura portante.

### 3.1.1 Le murature

La geometria delle pareti resistenti al sisma, al netto dell'intonaco, deve rispettare i requisiti indicati nella seguente tabella:

Geometria delle pareti resistenti dalle NTC 2008 - 4.5			
Tipologia di Muratura	$t_{\min}$	$(h_0/t)_{\max}$	$(l/h)_{\min}$
Muratura ordinaria, realizzata con elementi in pietra squadrata	300 mm	10	0,5
Muratura ordinaria, realizzata con elementi artificiali	240 mm	12	0,4
Muratura armata, realizzata con elementi artificiali	240 mm	15	qualsiasi
Muratura ordinaria, realizzata con elementi in pietra squadrata, in zona 3 e 4	240 mm	12	0,3
Muratura realizzata con elementi artificiali semipieni, in zona 4	200 mm	20	0.3
Muratura realizzata con elementi artificiali pieni, in zona 4	150 mm	20	0,3

Per quanto riguarda gli elementi in laterizio, le NTC (§ 4.5.2.2) confermano la classificazione già introdotta dal D.M. 20/11/1987, e sintetizzata nella seguente tabella.

Classificazione elementi in laterizio		
Elementi	Percentuale di foratura $\varphi$	Area $f$ della sezione normale del foro
Pieni	$\varphi \leq 15\%$	$f \leq 9 \text{ cm}^2$
Semipieni	$15\% < \varphi \leq 45\%$	$f \leq 12 \text{ cm}^2$
Forati	$45\% < \varphi \leq 55\%$	$f \leq 15 \text{ cm}^2$

Per quanto riguarda i materiali, in zona sismica è prescritto quanto segue:

- la percentuale volumetrica degli eventuali vuoti non sia superiore al 45% del volume totale del blocco;
- la resistenza caratteristica a rottura nella direzione portante  $f_{blo}$  non sia inferiore a 5 MPa, calcolata sull'area al lordo delle forature;
- la resistenza caratteristica a rottura nella direzione perpendicolare a quella portante, nel piano di sviluppo della parete  $f_{bk}$ , calcolata nello stesso modo, non sia inferiore a 5 MPa;
- la malta di allettamento dovrà avere resistenza non inferiore a 5 MPa e i giunti verticali ed orizzontali dovranno essere riempiti con malta.

L'utilizzo di materiali o tipologie murarie diverse rispetto a quanto sopra specificato deve essere supportato da adeguate prove sperimentali che ne giustifichino l'impiego. Sono ammesse murature realizzate con elementi artificiali o elementi in pietra squadrata. È invece esclusa la possibilità di utilizzare la muratura listata nelle zone 1, 2 e 3.

### **3.1.2 Criteri di progetto e requisiti geometrici**

Le piante degli edifici dovranno essere quanto più possibile compatte e simmetriche rispetto ai due assi ortogonali. Le pareti strutturali dovranno avere continuità in elevazione fino alla fondazione, evitando pareti in falso.

Le strutture costituenti orizzontamenti e coperture non devono essere spingenti. Eventuali spinte orizzontali, valutate tenendo in conto l'azione sismica, devono essere assorbite per mezzo di idonei elementi strutturali.

I solai devono assolvere funzione di ripartizione delle azioni orizzontali tra le pareti strutturali, pertanto devono essere ben collegati ai muri e garantire un adeguato funzionamento a diaframma.

La distanza massima tra due solai successivi non deve essere superiore a 5 m.

La normativa definisce una determinata categoria di “Costruzioni semplici” per i quali non è obbligatorio effettuare alcuna analisi e verifica di sicurezza.

Sono classificati come “Costruzioni semplici” quegli edifici che rispettano le caratteristiche descritte in seguito, oltre a quelle di regolarità in piano ed elevazione:

- Le pareti portanti dell’edificio devono essere continue dalle fondazioni alla sommità dell’edificio;
- In ciascuna delle due direzioni, si devono prevedere almeno due sistemi di parete di lunghezza complessiva, al netto delle aperture, ciascuno non inferiore al 50% della dimensione dell’edificio nella corrispondente direzione. La distanza tra questi due sistemi di parete in direzione ortogonale al loro sviluppo longitudinale in pianta deve essere non inferiore al 75% della lunghezza dell’edificio nella stessa direzione;
- In ciascuna delle due direzioni devono essere presenti pareti resistenti alle azioni orizzontali con interasse  $\leq 7,00$  ml per muratura ordinaria,  $\leq 9,00$  ml per muratura armata;
- Le altezze interpiano devono essere non superiori a 3,5 ml.

Gli edifici devono avere quanto più possibile caratteristiche di semplicità, simmetria, iperstaticità e regolarità; quest’ultima definita in base ai criteri di seguito indicati.

Si definisce Regolare un edificio che rispetti sia i criteri di regolarità in pianta, sia i criteri di regolarità in altezza. Assicurando una distribuzione bilanciata ed adeguata degli elementi strutturali in pianta e in altezza, inducendo la struttura ad avere una risposta globale uniforme e quindi riducendo i rischi legati alla presenza di eccentricità.

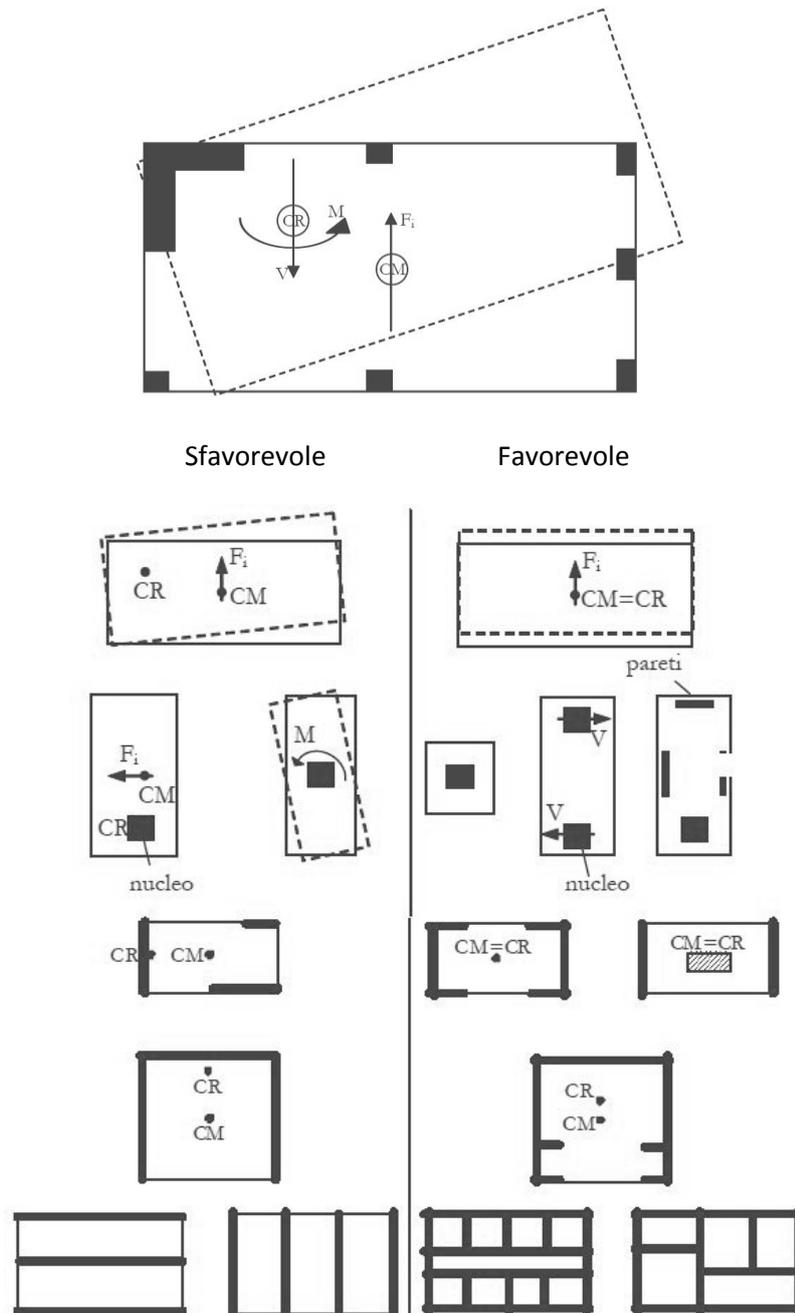
Definiamo :

- (CM) il centro di massa
- (CR) il centro di rigidezza

Se CM e CR non coincidono, la forza agente (F) e la forza resistente (V) non possono equilibrarsi senza che nasca anche un momento (M) e quindi

venga indotta una rotazione relativa del piano. Ciò comporta sia un aumento della forza di taglio su alcuni elementi resistenti, sia ulteriori spostamenti di interpiano che possono diventare eccessivi.

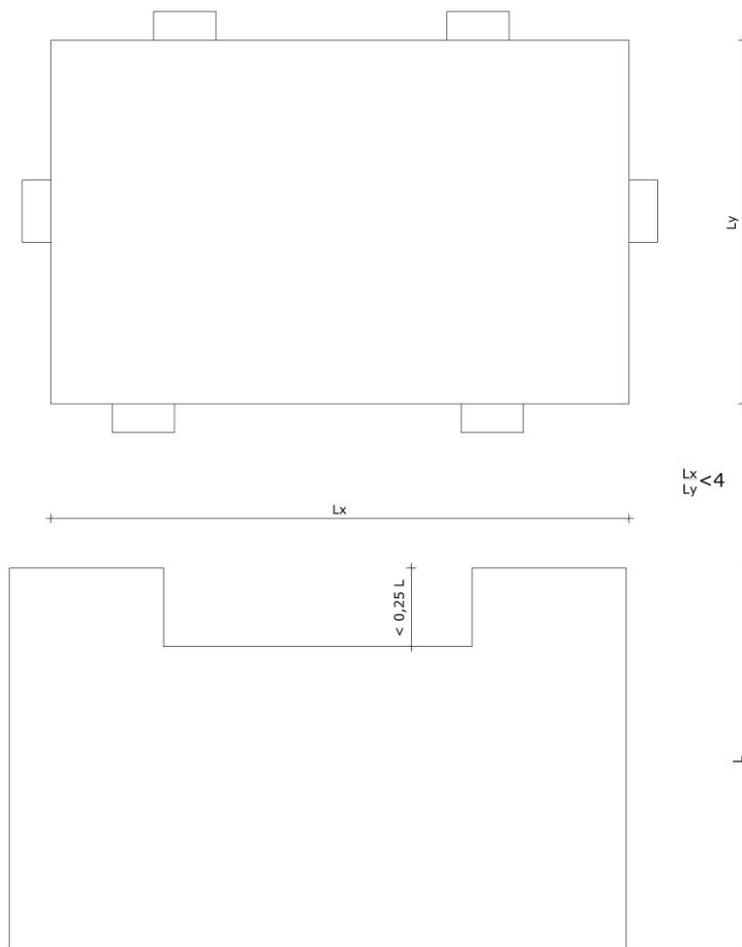
Minimizzare questa eccentricità risulta quindi essere un aspetto fondamentale per evitare effetti torsionali sfavorevoli e quindi eccessive deformazioni degli elementi più lontani dal centro di rigidezza con conseguente richiesta non uniforme di deformazione.



**Figura 3.1.2\_1**  
 Eccentricità nella distribuzione di masse e rigidzze

Un edificio è **regolare in pianta** se tutte le seguenti condizioni sono rispettate:

- La configurazione in pianta è compatta e approssimativamente simmetrica rispetto a due direzioni ortogonali, in relazione alla distribuzione delle masse e rigidzze;
- Il rapporto tra i lati di un rettangolo in cui l'edificio risulta inscritto è inferiore a 4;
- Almeno due dimensioni di eventuali rientri o sporgenze non supera il 25% delle dimensione totali dell'edificio nella corrispondente direzione;
- I solai possono essere considerati infinitamente rigidi nel loro piano, rispetto agli elementi verticali e sufficientemente resistenti.



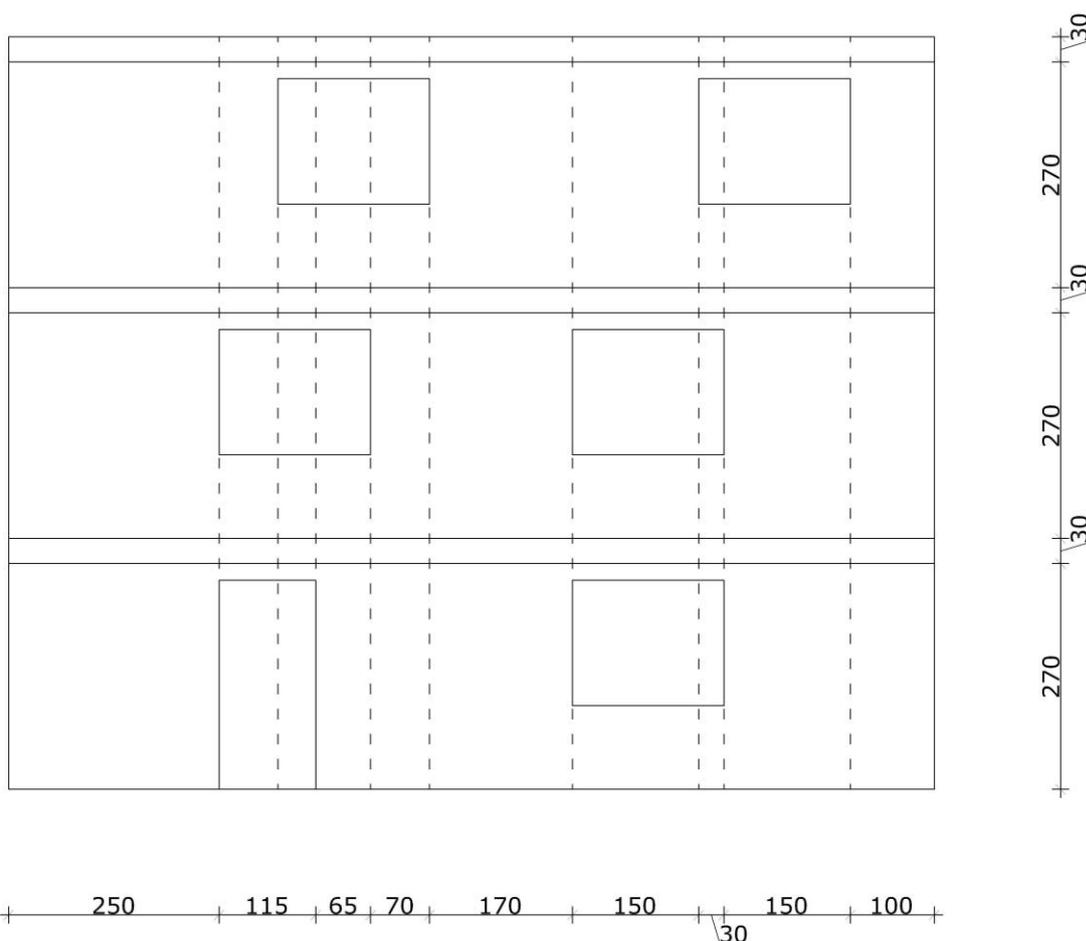
**Figura 3.1.2\_2**  
*Regolarità in pianta*

Un edificio è **regolare in altezza** se tutte le seguenti condizioni sono rispettate:

- Tutti i sistemi resistenti verticali dell'edificio si estendono per tutta l'altezza dell'edificio;
- Massa e rigidità rimangono costanti o variano gradualmente, senza bruschi cambiamenti, dalla base alla cima dell'edificio;
- Eventuali restringimenti della sezione orizzontale dell'edificio avvengono in modo graduale, da un piano al successivo, rispettando i seguenti limiti: ad ogni piano il rientro non supera il 30% della dimensione corrispondente al piano immediatamente sottostante. Fa eccezione l'ultimo piano di edifici di almeno quattro piani fuori terra per il quale non sono previste limitazioni di restringimento.

Gli edifici in muratura ordinaria devono rispettare i criteri di progetto precedenti, ma anche le regole specifiche riportate in seguito.

Si richiede che le aperture praticate nei muri siano di regola verticalmente allineate. Quando questo requisito non è soddisfatto, il modello strutturale deve essere particolarmente accurato per tener conto della discontinuità e delle irregolarità nella trasmissione delle azioni interne dovute al disallineamento delle aperture. Analoga attenzione deve essere riservata alle verifiche, sempre per la stessa ragione. In assenza di modelli particolarmente accurati, si devono prendere in considerazione nel modello strutturale e nelle verifiche, esclusivamente le porzioni di muro che siano continue verticalmente dal piano oggetto di verifica fino alle fondazioni.



**Figura 3.1.2\_3**  
*Criteria di progetto*

La normativa pone delle limitazioni all'altezza degli edifici in funzione del sistema costruttivo e dell'azione sismica.

Nella successiva tabella vengono presentate le limitazioni in altezza relative agli edifici con struttura in muratura. Le altezze massime di tabella sono incrementate del 50% per edifici isolati alla base.

Altezze massime consentite				
Zona sismica	4	3	2	1
Sistema costruttivo	Altezza massima in ml			
Edifici con struttura in muratura ordinaria	Nessuna limitazione	16	11	7.5
Edifici con struttura in muratura armata	Nessuna limitazione	25	19	13

Agli effetti delle limitazioni sopradette, l'altezza dei nuovi edifici, nelle strade e nei terreni in piano, è rappresentata dalla massima differenza di livello tra il piano di copertura più elevato ed il terreno. Sono esclusi dal computo dell'altezza, eventuali volumi tecnici come torrini delle scale e ascensori.

Nel caso di copertura a falda, detta altezza va misurata dalla quota di imposta della falda.

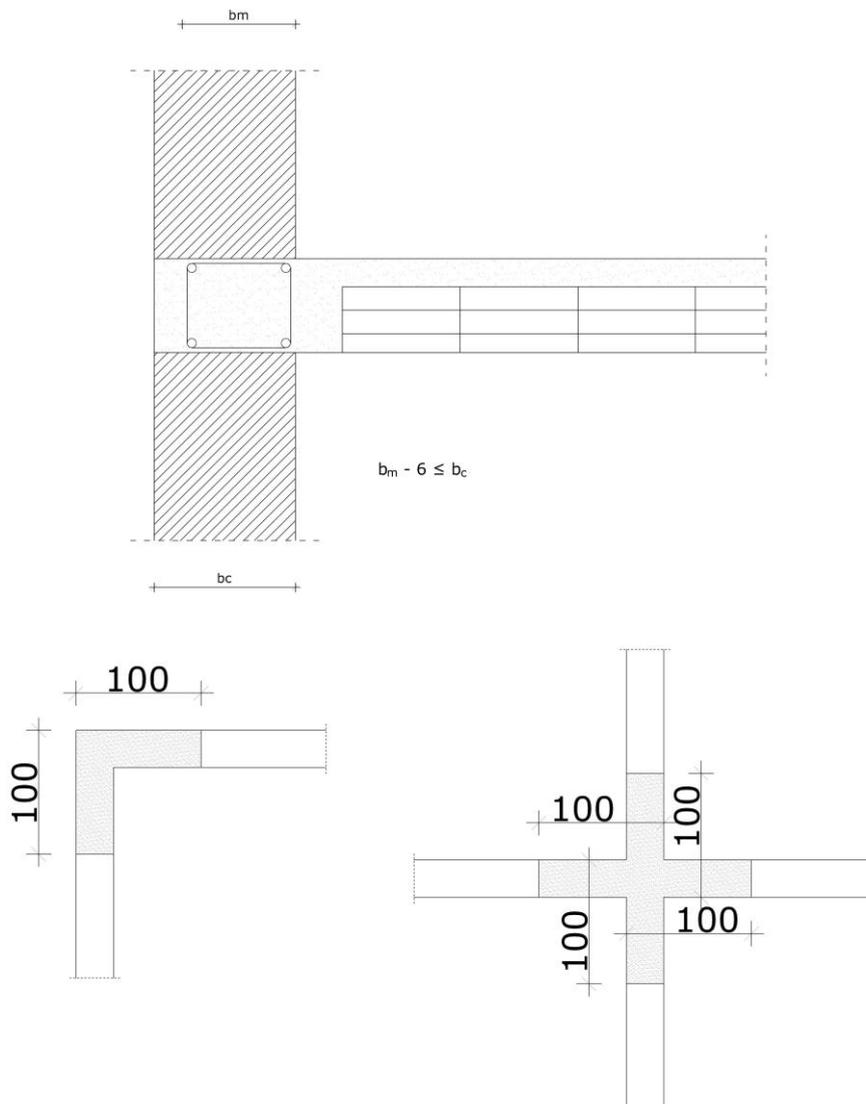
Due edifici possono essere costruiti a contatto solo nel caso in cui sia realizzata una completa solidarietà strutturale. La distanza tra edifici contigui non può essere inferiore alla somma degli spostamenti massimi determinati per lo SLU, calcolati per ciascuno degli edifici, secondo le modalità indicate. In ogni caso la distanza tra due punti degli edifici posti alla medesima altezza non potrà essere inferiore ad  $1/100$  della quota dei punti considerati, misurati dallo spiccato delle strutture in elevazione, moltiplicata per  $a_g/0,35$  g.

I particolari costruttivi a cui non è ammesso derogare sono quelli illustrati di seguito:

- Ad ogni piano deve essere realizzato un cordolo continuo all'intersezione tra solai e pareti;
- La larghezza dei cordoli sarà come minimo pari alla larghezza del muro, con un arretramento massimo consentito di 6 cm dal filo esterno;
- L'altezza minima dei cordoli dovrà essere pari all'altezza dei solai;
- L'armatura corrente dei cordoli sarà come minimo di  $8 \text{ cm}^2$ , le staffe di diametro  $\phi 6$  e passo non superiore a 25 cm;
- Travi metalliche o prefabbricate di solaio dovranno essere inserite nel cordolo per almeno la metà della sua larghezza e comunque per non meno di 12 cm, ed adeguatamente ancorate ad esso;
- In corrispondenza di incroci d'angolo tra due pareti perimetrali, sono prescritte, sulle due pareti, zone di parete muraria di lunghezza non

inferiore a 1 ml, compreso lo spessore del muro trasversale. Anche se non espressamente richiesto dalla normativa, è buona regola costruttiva seguire tale prescrizione anche in altri tipi di incroci;

- Al di sopra di ogni apertura deve essere realizzato un architrave resistente a flessione efficacemente ammortato alla muratura.



**Figura 3.1.2\_4**  
*Incroci d'angolo*

### 3.2 Materiali e tecniche isolanti

Si è scelto di studiare una soluzione che aspiri all'efficienza dell'isolamento a cappotto (la miglior soluzione sia in termini di costi che di prestazioni, soprattutto per quanto riguarda i ponti termici), ma che risulti pre-composta, per acquistare benefici nella fase di cantiere (velocità e semplicità di posa in opera e quindi minori costi di manodopera).

Se l'isolamento termico viene collocato all'esterno, infatti, a parità di trasmittanza termica complessiva, la chiusura costituisce massa di accumulo, l'inerzia termica aumenta e dunque anche la risposta alle variazioni di temperatura interna è più lenta. Tale soluzione è inoltre maggiormente adatta agli edifici residenziali dove la vivibilità è continua durante tutto il giorno. Posizionando invece l'isolamento sul lato interno, la massa della chiusura viene estromessa come massa di accumulo e dunque la risposta alle variazioni di temperatura interna è più rapida.

L'isolante sarà incollato preventivamente ed in modo automatico in fase di produzione con leganti adesivi, questo renderà più stabile e duraturo l'incollaggio perché più uniforme e regolare di quello effettuato in corso d'opera (tale soluzione di pre-applicazione industriale è già stata sperimentata su analoghi prodotti edilizi, avvalorandone le qualità). Inoltre la stabilità e la tenuta dell'isolante sarà facilitata dalle ridotte dimensioni dei singoli pannelli (25x25 cm) pari alla faccia esterna del laterizio.

Questa soluzione è da preferirsi al fissaggio a tasselli meccanici che prevedendo un gioco di qualche millimetro, consentono la formazione di una seppur minima intercapedine d'aria tra la faccia interna dell'isolante e la parete.

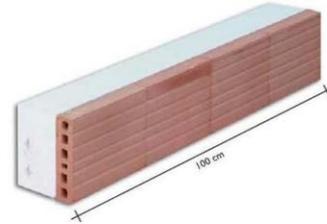
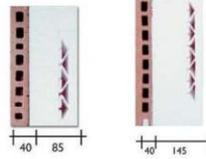
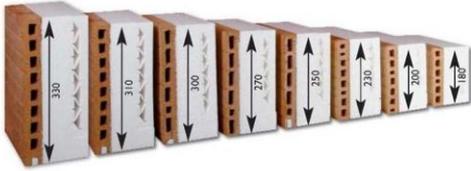
La rete di armatura in fibra di vetro, successivamente posata in opera, normalmente assicurata con malta alle lastre isolanti, fornirà un supporto uniforme all'intonaco di finitura assorbendo le deformazioni dovute ad eventuali movimenti di assestamento o alla dilatazione termica.

## PANNELLI ISOLANTI PER PONTI TERMICI

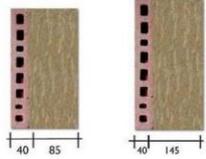
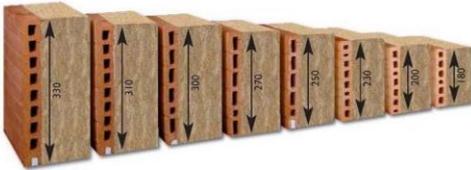
TAVELLE DI LATERIZIO ACCOPPIATE CON ISOLANTE TERMICO

CON POLISTIRENE EPS 250 WLG 035

spessore isolante 85 mm o 145mm



CON LANA MINERALE IDROFOBIZZATA WLG 035 spessore isolante 85 mm o 145mm



**ZWA** Ziegelwerk  
Arnach

**DECORUS**<sup>®</sup>  
Idee e Soluzioni per Risparmio Energetico

**Figura 3.2\_1**

*Esempio in commercio di pre-applicazione industrializzata dell'isolante al laterizio*

### 3.2.1 Energia incorporata

Per quanto riguarda il laterizio, alcune indicazioni possono essere attinte da uno studio condotto sulla base di dati primari, rilevati presso uno stabilimento produttivo italiano (G.Beccali, M.Cellura, M.Fontana, S.Longo, M.Mistretta, 2009). Dall'analisi dei risultati, si evince che la produzione di 1 Kg di laterizio porizzato comporta complessivamente un consumo di energia primaria pari a circa 4,552 [MJ/Kg], così ripartita:

- L'estrazione dell'argilla incide per l'1% (0,045 [MJ/Kg]), essenzialmente per le operazioni di scavo;
- Le fasi di trasporto delle materie prime, dei combustili e del prodotto finito implicano un consumo complessivo di energia pari a circa al 12% del consumo energetico totale (0,550 [MJ/Kg]), essenzialmente dovuto all'impiego di gasolio come combustibile per autotrazione;
- Il processo di elaborazione incide per il 23% (1,064 [MJ/Kg]) di cui il 48% è dovuto all'energia elettrica impiegata per l'alimentazione dei macchinari e il 52% alla produzione/approvvisionamento degli input di processo (acqua, gasolio, polistirene);
- Il contributo della fase di imballaggio, pari all'1% del consumo energetico totale, è dovuto principalmente all'energia di feedstock dei materiali impiegati;
- Il consumo più rilevante si verifica nei processi di cottura e di essiccazione (circa 2,85 [MJ/Kg]), di cui il 49% è dovuto all'impiego di olio combustibile BTZ (1,396 [MJ/Kg]) per l'alimentazione del forno, il 38% è dovuto all'impiego di gas metano per il processo di essiccazione (1,083 [MJ/Kg]) e il rimanente 13% è rappresentato dal consumo di energia elettrica (0,37 [MJ/Kg]).

Per quanto riguarda la scelta del materiale isolante alcune indicazioni possono essere attinte da uno studio condotto dall'Unità di ricerca SPACE (*Sperimentazione e Processi nel progetto di Architettura e nel Ciclo di vita dei prodotti in Edilizia*) del Dipartimento BEST (*Building Environment*

*Science & Technology*) del Politecnico di Milano (A.Ciampoli, M.Lavagna, V.Giurdanella, C.Monticelli, M.Paleari, A.Maspero, D.Mondini, V.Panella). Lo studio “Energia per costruire, energia per abitare. Ottimizzazione energetica e ambientale di soluzioni tecniche di involucro in laterizio” ha previsto un’indagine sulle due tecniche costruttive a maggiore diffusione sul territorio nazionale, entrambe realizzate assemblando laterizi e materiali isolanti:

- la parete monoblocco con isolamento a cappotto esterno;
- la doppia parete con intercapedine isolata.

Nell’ambito delle due famiglie, sono stati composti diversi “pacchetti” esemplificativi, in relazione a diversi spessori e tipologie di elementi in laterizio: nel caso della soluzione tecnica a cappotto, sono state selezionate 4 varianti di supporto murario in laterizio, nelle quali ai blocchi , tradizionali e porizzati, impiegati negli spessori di 25 e 30 cm, sono stati affiancati 15 tipi di isolanti diversi.

Al fine di condurre le analisi, è stato imposto un limite di trasmittanza coerente con quanto prescritto dalla normativa per la zona climatica “E” ed il più possibile simile per tutte le stratigrafie composte; a tale scopo, sono stati, di volta in volta, modificati gli spessori degli isolanti in relazione alle necessità.

Prendiamo in considerazione il primo gruppo di stratigrafie, risultanti dall’accoppiamento di un blocco in laterizio porizzato dello spessore di 25 cm con 15 materiali isolanti diversi (fibra di legno, lana di roccia o di vetro, polistirene espanso sinterizzato o estruso, sughero espanso autocollato, vetro cellulare, silicato di calcio idrato, schiuma polyiso espansa rigida)

Tutte le soluzioni esaminate hanno un valore di trasmittanza di 0,32-0,33 [W/mqK] raggiunta con la variazione degli spessori dei pannelli coibenti in relazione alla conduttività termica propria di ogni materiale, variabile tra 0,028 e 0,049 [W/mK], cosicché la chiusura verticale abbia uno spessore compreso tra 32 e 35 cm.

Il valore di massa superficiale dei singoli “pacchetti” mostra un’oscillazione contenuta tra 198 e 218 [Kg/mq].

In merito alla sfasamento dell'onda termica entrante si sono ottenuti valori di 12-14 ore per tutti i materiali isolanti.

Il valore del fattore di attenuazione si colloca tra 0,10 e 0,12 per qualsiasi tipo di materiale isolante impiegato, ben al di sotto del limite minimo di 0,16 individuato dalla normativa di riferimento.

Anche le oscillazioni della trasmittanza termica periodica sono assolutamente insignificanti, con valori di 0,03-0,04 W/mqK a fronte di un livello massimo consigliato di 0,16 [W/mqK].

Le 15 stratigrafie sono quindi caratterizzate tutte dallo stesso livello di efficienza, abbastanza elevato sia in regime estivo che invernale.

Questo consente perciò una più "lineare" comparazione, a parità di prestazioni, delle caratteristiche che invece contraddistinguono ogni soluzione, quali:

- Energia incorporata [MJ/mq]
- CO<sub>2</sub> incorporata [Kg di Co<sub>2</sub> eq./mq]

DESCRIZIONE MATERIALI ISOLANTI			DATI TECNICI ISOLANTI			PRESTAZIONI PARETE						EE	EC	Rw	COSTO
N°	Comparto materico	Prodotti isolanti	ρ (kg/m <sup>3</sup> )	s <sub>0</sub> (m)	λ (W/mK)	M <sub>s</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	R (m <sup>2</sup> K/W)	U (W/m <sup>2</sup> K)	ψ (h)	f <sub>a</sub>	Y <sub>ie</sub> (W/m <sup>2</sup> K)	(MJ/m <sup>2</sup> )	(kgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup> )	(dB f: 500 Hz)	(€/m <sup>2</sup> )
1	FIBRA DI LEGNO (WF)	Pannelli in fibre di legno pressate	100+250	0,08	0,045 0,049	211,50	3,03	0,33	14,64	0,10	0,033	1004,49	74,38	55,49	164,30
		Pannelli in fibre di legno pressate	250	0,08	0,049	217,50	2,95	0,34	15,59	0,09	0,031	1124,49	80,26	55,73	167,86
2	LANA DI ROCCIA (RW)	Pannelli rigidi in lana di roccia	90	0,06	0,036	202,90	2,99	0,33	12,56	0,12	0,040	787,59	66,36	55,13	137,61
		Pannelli rigidi in lana di roccia	135	0,07	0,039	206,95	3,11	0,32	13,04	0,11	0,035	840,24	71,06	55,30	145,28
		Pannelli rigidi in lana di roccia	150	0,07	0,040	208,00	3,07	0,33	13,11	0,11	0,036	893,79	71,85	55,34	136,25
3	LANA DI VETRO (GW)	Pannelli in lana di vetro ad alta densità	75	0,06	0,037	202,00	2,94	0,34	12,45	0,12	0,041	852,84	68,06	55,09	125,70
4	POLISTIRENE ESPANSO SINTERIZZATO (EPS)	Lastre in polistirene espanso sinterizzato	35	0,06	0,032	199,60	3,20	0,31	12,38	0,12	0,037	903,45	67,00	54,98	129,35
		Lastre in polistirene espanso sinterizzato	18	0,06	0,036	198,58	2,99	0,33	12,14	0,12	0,040	839,01	64,95	54,94	121,69
5	POLISTIRENE ESPANSO SINTERIZZATO PIU' GRAFITE (EPS)	Lastre in EPS più grafite	19	0,06	0,035	198,64	3,03	0,33	12,19	0,12	0,040	867,18	66,59	54,94	125,59
		Lastre in EPS più grafite	19	0,05	0,031	198,45	2,93	0,34	12,13	0,12	0,041	842,22	65,51	54,93	123,19
6	POLISTIRENE ESPANSO ESTRUSO (XPS)	Lastre in polistirene espanso estruso	30	0,06	0,034	199,30	3,08	0,32	12,30	0,12	0,038	913,95	68,00	54,97	132,61
7	SUGHERO ESPANSO AUTOCOLLATO	Pannelli in sughero espanso autocollato	120	0,08	0,040	207,10	3,32	0,30	14,05	0,10	0,030	755,79	61,92	55,30	160,29
8	VETRO CELLULARE (CG)	Lastre in vetro cellulare	115	0,07	0,041	205,55	3,03	0,33	12,69	0,12	0,040	914,37	68,87	55,24	142,30
9	SILICATO DI CALCIO IDRATO	Pannelli in silicato di calcio idrato	115	0,08	0,045	206,70	3,10	0,32	13,25	0,11	0,035	845,96	70,30	55,29	141,85
10	SCHIUMA POLYISO ESPANSA RIGIDA (PIR)	Pannelli in schiuma polyiso espansa rigida	35	0,05	0,028	199,25	3,11	0,32	12,30	0,12	0,038	894,14	66,74	54,97	126,38
			Valore minimo	0,05	0,028	198	2,93	0,30	12	0,09	0,03	756	62	55	122
			Valore massimo	0,08	0,049	218	3,32	0,34	16	0,12	0,04	1124	80	56	168
			Valore medio	0,07	0,037	204	3,06	0,33	13	0,11	0,04	885	69	55	139

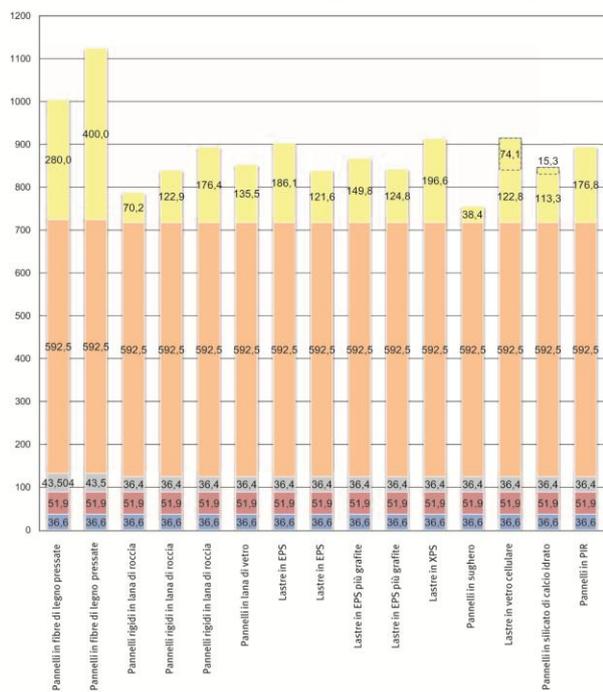
Figura 3.2.1\_1

Valutazioni delle soluzioni a cappotto realizzate con blocchi porizzati in pasta da 25 cm di spessore (ricerca "Energia per costruire, energia per abitare" Politecnico di Milano)

**Soluzioni innovative in laterizio per edifici ad alta efficienza energetica:  
un nuovo modello di involucro in muratura portante**

**SISTEMA A CAPPOTTO**  
Blocchi porizzati, spessore 25 cm

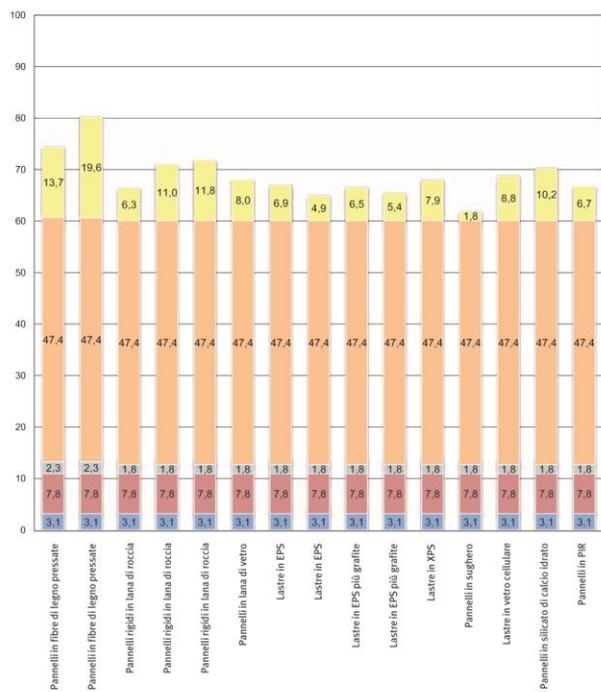
Energia incorporata MJ/m<sup>2</sup>



4. Grafico relativo al contenuto di energia incorporata delle soluzioni a cappotto realizzate con blocchi porizzati in pasta da 25 cm di spessore.

**SISTEMA A CAPPOTTO**  
Blocchi porizzati, spessore 25 cm

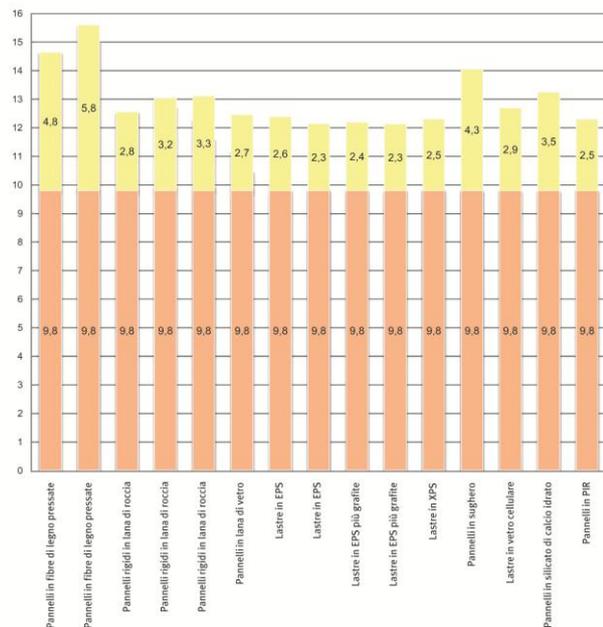
CO<sub>2</sub> incorporata (kg CO<sub>2</sub>eq./m<sup>2</sup>)



5. Grafico relativo al contenuto di CO<sub>2</sub> equivalente incorporata delle soluzioni a cappotto realizzate con blocchi porizzati in pasta da 25 cm di spessore.

**SISTEMA A CAPPOTTO**  
Blocchi porizzati, spessore 25 cm

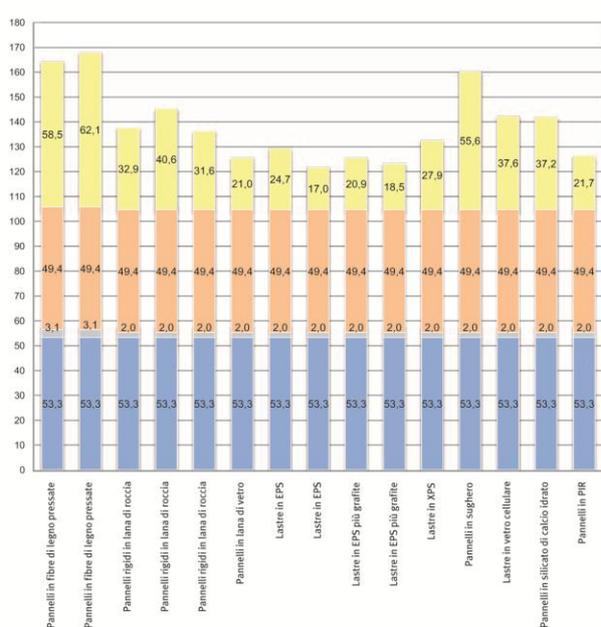
Sfasamento (ore)



6. Grafico relativo allo sfasamento termico delle soluzioni a cappotto realizzate con blocchi porizzati in pasta da 25 cm di spessore.

**SISTEMA A CAPPOTTO**  
Blocchi porizzati, spessore 25 cm

Costo (€/m<sup>2</sup>)



7. Grafico relativo al costo di costruzione delle soluzioni a cappotto realizzate con blocchi porizzati in pasta da 25 cm di spessore.

**Figura 3.2.1\_2**

*Grafici comparativi delle 15 soluzioni analizzate (ricerca "Energia per costruire, energia per abitare" Politecnico di Milano)*

La valutazione del profilo ambientale delle 15 soluzioni di chiusura verticale opaca prese in considerazione, evidenzia la predominanza degli impieghi energetici e delle emissioni di gas serra imputabili all'elemento in laterizio rispetto alla quota parte relativa ai coibenti.

In termini di energia incorporata, il valore minimo di 756 [MJ/mq] appartiene alla soluzione costruttiva che vede l'impiego del sughero autocollato, responsabile per il 15% del consumo energetico totale; al contrario, il "pacchetto" composto da cappotto in fibra di legno segna il valore massimo di 1124 [MJ/mq], di cui oltre il 35% a carico dell'isolante. Nel complesso, il contenuto di energia incorporata medio si attesta intorno a 885 [MJ/mq].

I risultati di gas serra emessi vedono un simile andamento, con la soluzione in sughero che si attesta a 62 [Kg di Co<sub>2</sub> eq./mq] (3% dovuto all'isolante) e quella in fibra di legno a 80 [Kg di Co<sub>2</sub> eq./mq] (25% dovuto all'isolante), con un livello medio di 69 [Kg di Co<sub>2</sub> eq./mq].

L'ampia analisi quindi, fa chiarezza su alcune indicazioni semplicistiche che attribuiscono fin troppo facilmente caratteristiche di "alta sostenibilità" a tutti i materiali isolanti di origine naturale. Si sottolinea invece, come già precedentemente enunciato, che la ricerca della sostenibilità non può risolversi se non attraverso lo scrupoloso e attento studio di tutti i parametri interessati, nel particolare caso specifico preso in esame.

Nella nostra specifica ricerca del materiale isolante, partiamo tenendo conto delle caratteristiche che dovrà avere la soluzione complessiva:

- Trasmittanza inferiore al limite di normativa in zona climatica "E" (0,34 [W/mqK])
- Spessore complessivo pari alla soluzione comparativa esistente (laterizio monoblocco con inserimento di isolante nelle intercapedini 36,5 cm)

Un'attenta analisi tra le prestazioni, i vincoli e l'energia incorporata, ci ha portato alla scelta dei pannelli in Polistirene Espanso Sinterizzato (EPS), a discapito di pannelli in Fibra di Legno.

Infatti:

#### **Energia primaria/Kg**

- Fibra di legno = 17 [MJ/Kg]
- EPS = 100 [MJ/Kg]

I valori sull'energia incorporata dei materiali sono unitari, ossia espressi in relazione alla massa. In prima battuta si potrebbe essere tentati di avvalersi direttamente di questi dati, ma l'analisi non può non tener conto della quantità necessaria a soddisfare le prestazioni, soprattutto considerando che le caratteristiche di densità e conducibilità differiscono sensibilmente.

#### **Densità**

- Fibra di legno = 200 [Kg/mc]
- EPS = 35 [Kg/mc]

Considerando 1 mc di materiale, le energie primarie dei due isolanti risultano equiparabili:

#### **Energia primaria/mc**

- Fibra di legno =  $17 \times 200 = 3.400$  [MJ/mc]
- EPS =  $100 \times 35 = 3.500$  [MJ/mc]

Utilizzando pannelli di spessore 6,5 cm, avremo:

#### **Energia primaria/mq**

- Fibra di legno = 221 [MJ/mq]
- EPS = 227 [MJ/mq]

Giunti ad una pressoché equiparabile energia incorporata nei due materiali, in relazione ai mq utilizzati [MJ/mq] nel nostro specifico caso di applicazione, i criteri di scelta si sono quindi concentrati sulle prestazioni che i due isolanti potevano attribuire al “pacchetto” (Trasmittanza, Sfasamento, Attenuazione).

Il confronto prestazionale delle due soluzioni, ha decretato la scelta dell'isolante in pannelli EPS, come si evince dalle schede allegate.

**Soluzioni innovative in laterizio per edifici ad alta efficienza energetica:  
un nuovo modello di involucro in muratura portante**

Calcolo Proprietà Termiche Componenti Edilizi - Versione 2.2 - <http://www.mygreenbuildings.org>

1) Scegliere il tipo di componente edilizio			2) Scegliere il periodo delle variazioni termiche (<= 24 ore)						24		
<b>Chiusura verticale</b>			Periodo delle variazioni termiche T						[sec]	86400	
			Resistenza termica sup interna Rsi						[m2K/W]	0,13	
			Resistenza termica sup esterna Rse						[m2K/W]	0,04	
Descrizione degli strati	Spessore (s) [m]	Conduttività termica (λ) [W/mK]	Resistenza termica [mqK/W]	Calore specifico (c) [J/kgK]	Densità (ρ) [kg/m3]	Resistenza termica aria [m2K/W]	Profondità di penetrazione al periodo T (δ) [m]	ξ = s/d [-]	Resistenza termica [m2k/w]		
Rsi	Aria	Strato laminare interno							0,130		
1	<input checked="" type="checkbox"/>	Intonaco calce e gesso	0,015	0,540	1000	1500	0,100	0,151	0,028		
2	<input type="checkbox"/>	Fibra di legno	0,065	0,044	2100	400	0,038	1,713	1,477		
3	<input type="checkbox"/>	Pth BIO PLANA	0,300	0,140	840	920	0,071	4,250	2,143		
4	<input checked="" type="checkbox"/>	Intonaco calce e gesso	0,015	0,540	1000	1500	0,100	0,151	0,028		
5	<input type="checkbox"/>						-	-	-		
6	<input type="checkbox"/>						-	-	-		
7	<input type="checkbox"/>						-	-	-		
8	<input type="checkbox"/>						-	-	-		
9	<input type="checkbox"/>						-	-	-		
10	<input type="checkbox"/>						-	-	-		
11	<input type="checkbox"/>						-	-	-		
12	<input type="checkbox"/>						-	-	-		
13	<input type="checkbox"/>						-	-	-		
14	<input type="checkbox"/>						-	-	-		
15	<input type="checkbox"/>						-	-	-		
Rse	Aria	Strato laminare esterno							0,040		
Spessore totale componente [cm]			39,50						Resistenza termica totale [m2K/W]		3,846
RISULTATI											
Regime periodico stabilizzato					Regime stazionario						
T = 24 ore											
Fattore di decremento (attenuazione)	fd	[-]	0,028		Massa superficiale	Ms	[kg/m2]	347			
Ritardo fattore di decremento (sfasamento)	φ	[h]	21,83		Resistenza termica totale	Rt	[m2K/W]	3,846			
Trasmittanza termica periodica	Yie	[W/m2K]	0,007		Trasmittanza	U	[W/m2K]	0,260			
Ammettenza termica lato interno	Yii	[W/m2K] , [h]	2,42 3,27		Conduttanza	C	[W/m2K]	0,272			
Ammettenza termica lato esterno	Yee	[W/m2K] , [h]	3,59 3,40		Capacità termica areica	Cta	[kJ/m2K]	331			
Capacità termica periodica lato interno	k1	[kJ/m2K]	33,2 40,0		Costante di tempo	τ	[h]	354			
Capacità termica periodica lato esterno	k2	[kJ/m2K]	49,2 53,7								
Fattore di smorzamento superficiale interno											
	Parete disperdente	fsd	[-]	0,686	0,534						
	Parete interna	fsi	[-]	0,687	0,534						

Calcolo Proprietà Termiche Componenti Edilizi - Versione 2.2 - <http://www.mygreenbuildings.org>

1) Scegliere il tipo di componente edilizio			2) Scegliere il periodo delle variazioni termiche (<= 24 ore)						24		
<b>Chiusura verticale</b>			Periodo delle variazioni termiche T						[sec]	86400	
			Resistenza termica sup interna Rsi						[m2K/W]	0,13	
			Resistenza termica sup esterna Rse						[m2K/W]	0,04	
Descrizione degli strati	Spessore (s) [m]	Conduttività termica (λ) [W/mK]	Resistenza termica [mqK/W]	Calore specifico (c) [J/kgK]	Densità (ρ) [kg/m3]	Resistenza termica aria [m2K/W]	Profondità di penetrazione al periodo T (δ) [m]	ξ = s/d [-]	Resistenza termica [m2k/w]		
Rsi	Aria	Strato laminare interno							0,130		
1	<input checked="" type="checkbox"/>	Intonaco calce e gesso	0,015	0,540	1000	1500	0,100	0,151	0,028		
2	<input type="checkbox"/>	EPS	0,065	0,040	1670	40	0,128	0,507	1,625		
3	<input type="checkbox"/>	Pth BIO PLANA	0,300	0,140	840	920	0,071	4,250	2,143		
4	<input checked="" type="checkbox"/>	Intonaco calce e gesso	0,015	0,540	1000	1500	0,100	0,151	0,028		
5	<input type="checkbox"/>						-	-	-		
6	<input type="checkbox"/>						-	-	-		
7	<input type="checkbox"/>						-	-	-		
8	<input type="checkbox"/>						-	-	-		
9	<input type="checkbox"/>						-	-	-		
10	<input type="checkbox"/>						-	-	-		
11	<input type="checkbox"/>						-	-	-		
12	<input type="checkbox"/>						-	-	-		
13	<input type="checkbox"/>						-	-	-		
14	<input type="checkbox"/>						-	-	-		
15	<input type="checkbox"/>						-	-	-		
Rse	Aria	Strato laminare esterno							0,040		
Spessore totale componente [cm]			39,50						Resistenza termica totale [m2K/W]		3,993
RISULTATI											
Regime periodico stabilizzato					Regime stazionario						
T = 24 ore											
Fattore di decremento (attenuazione)	fd	[-]	0,046		Massa superficiale	Ms	[kg/m2]	324			
Ritardo fattore di decremento (sfasamento)	φ	[h]	17,82		Resistenza termica totale	Rt	[m2K/W]	3,993			
Trasmittanza termica periodica	Yie	[W/m2K]	0,011		Trasmittanza	U	[W/m2K]	0,250			
Ammettenza termica lato interno	Yii	[W/m2K] , [h]	1,71 4,01		Conduttanza	C	[W/m2K]	0,262			
Ammettenza termica lato esterno	Yee	[W/m2K] , [h]	3,59 3,40		Capacità termica areica	Cta	[kJ/m2K]	281			
Capacità termica periodica lato interno	k1	[kJ/m2K]	23,4 25,8		Costante di tempo	τ	[h]	312			
Capacità termica periodica lato esterno	k2	[kJ/m2K]	49,2 53,7								
Fattore di smorzamento superficiale interno											
	Parete disperdente	fsd	[-]	0,777	0,533						
	Parete interna	fsi	[-]	0,778	0,535						

**Figura 3.2.1\_3**

*Confronto prestazionale tra la soluzione a cappotto con isolante in Fibra di legno ed isolante in EPS*

### **3.3 Ponti termici, condensa e muffa superficiale**

Ci si è concentrati sullo studio dei ponti termici strutturali che per rigorosi vincoli della normativa tecnica, risultano spesso le maggiori fonti di dispersione all'interno dell'involucro edilizio.

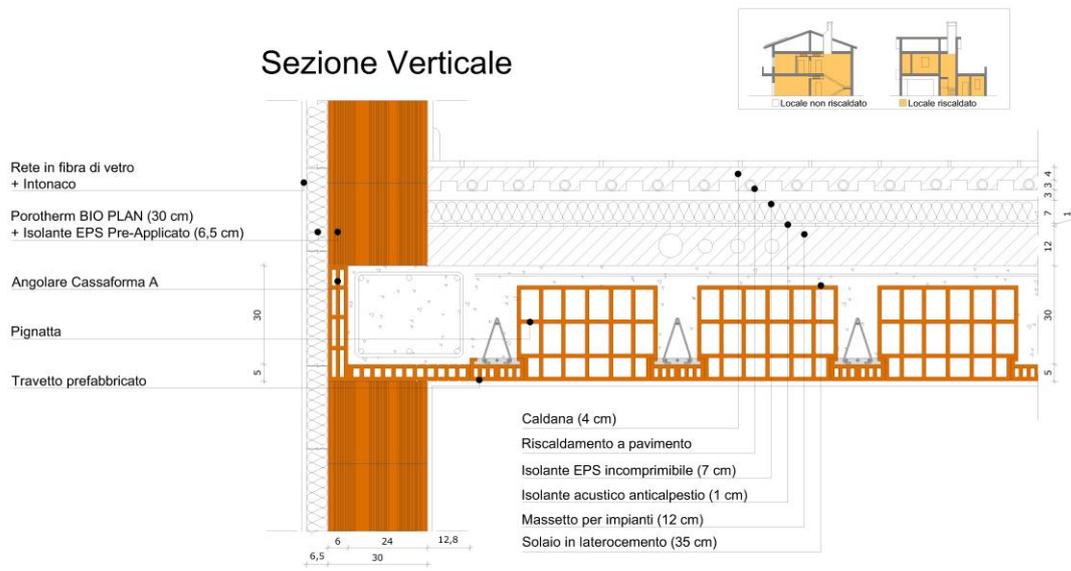
In particolare sono state studiate soluzioni per:

- il ponte termico in presenza del cordolo di piano;
- il ponte termico in presenza di un solaio a sbalzo che interrompa la continuità dell'isolamento a cappotto.

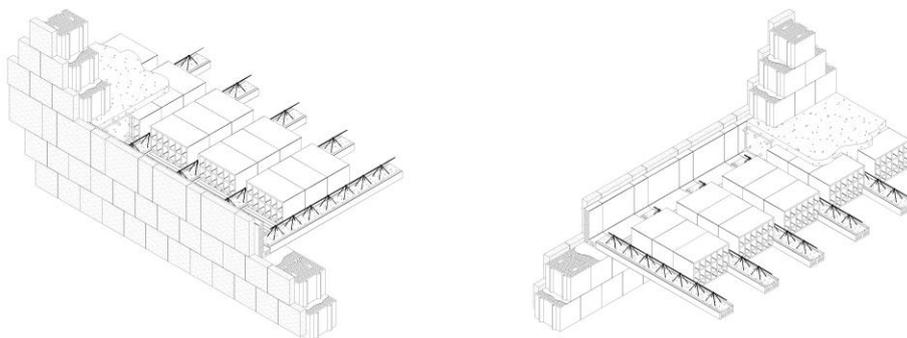
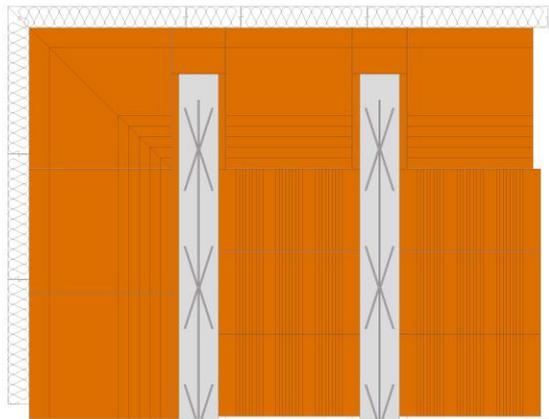
In entrambe le soluzioni sono stati utilizzati gli elementi precedentemente presentati, mantenendo come obiettivi:

- il miglioramento del ponte termico in esame (trasmissione termica lineica, temperatura superficiale);
- velocità e praticità della messa in opera;
- conformità alle norme tecniche.

Parallelamente, come descritto nel paragrafo 2.3.3, si è utilizzato il Software di calcolo FEM - THERM 7.0 per creare un modello del particolare oggetto di studio, e determinarne analiticamente le prestazioni.

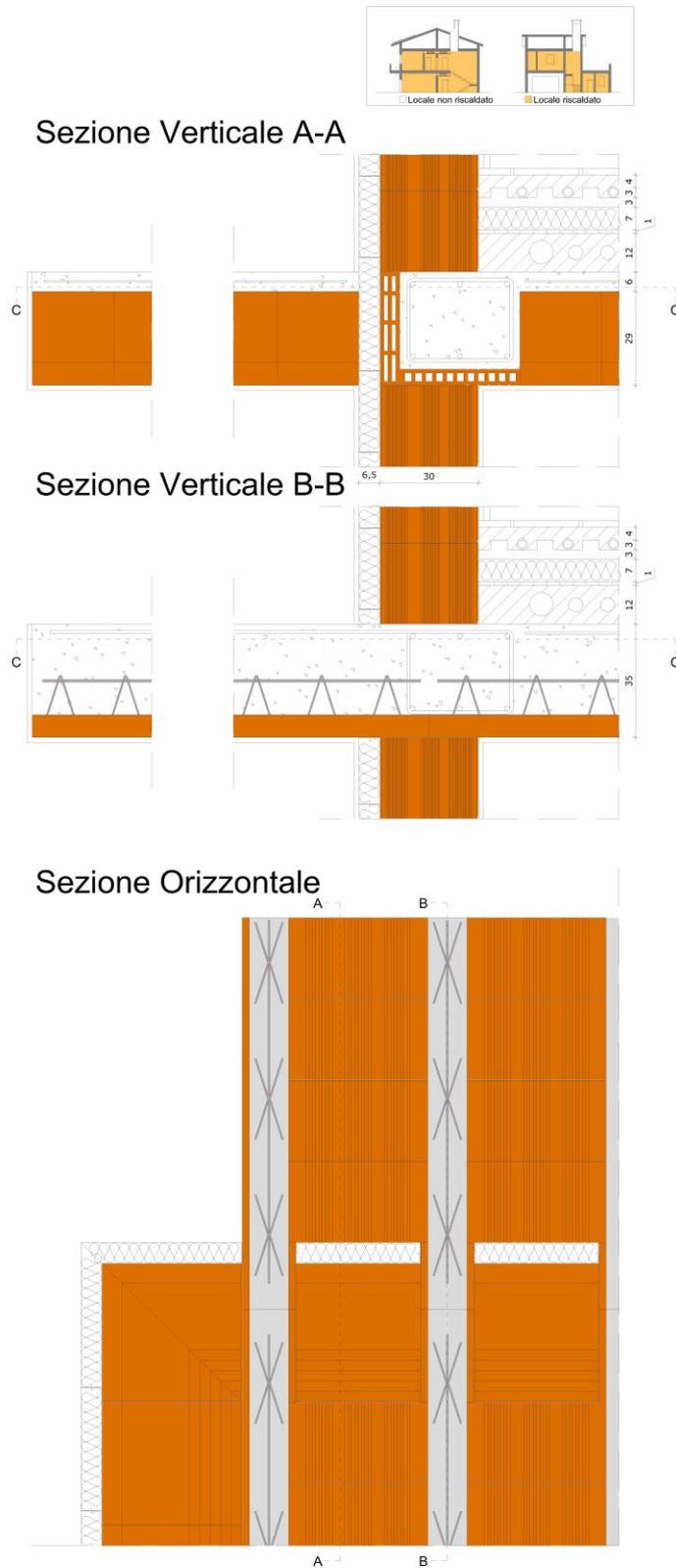


### Sezione Orizzontale



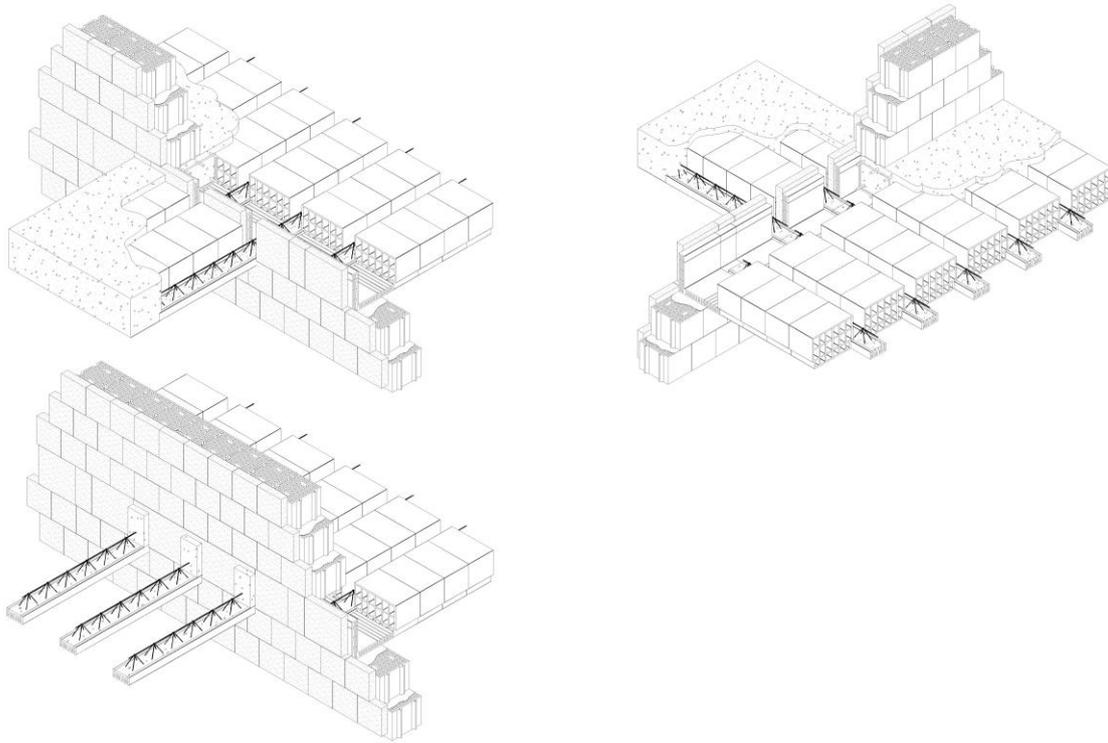
**Figura 3.3\_1**

*Dettaglio tecnico del ponte termico in presenza del cordolo di piano*



**Figura 3.3\_2**

*Dettaglio tecnico del ponte termico in presenza del solaio a sbalzo*



**Figura 3.3\_3**

*Dettaglio tecnico del ponte termico in presenza del solaio a sbalzo*

Nel seguente paragrafo riporteremo l'analisi dell'incidenza del ponte termico dei diversi "pacchetti studiati":

- a) Muratura monoblocco – PT "corretto" con tavella;
- b) Muratura monoblocco – PT "corretto" con isolante;
- c) Tecnologia innovativa oggetto di studio.

La modellazione prevede dapprima la creazione della sezione trasversale del nodo, successivamente l'applicazione ad ogni elemento delle proprietà dei materiali da simulare. (Il software dispone di un generatore automatico di Mesh, assicurando la correzione di eventuali errori di modellazione). L'ultima impostazione prima della simulazione sarà la determinazione delle condizioni al contorno, specifiche a seconda dell'analisi che si vuole determinare e delle caratteristiche stesse del nodo.

In questa prima parte di analisi, in cui si vuole determinare il flusso termico transitante nel particolare nodo studiato, le condizioni al contorno applicate saranno, secondo normativa:

- Temperatura esterna =  $-5^{\circ}\text{C}$ ;
- Resistenza termica superficiale esterna (RSE) =  $0,04 \text{ [mqK/W]}$ ;
- Temperatura interna =  $20^{\circ}\text{C}$ ;
- Resistenza termica superficiale interna (RSI) =  $0,13 \text{ [mqK/W]}$

Si calcola quindi il flusso termico passante per il ponte termico:

$$\phi_{pt} = U_{FEM} \times L \times \Delta T$$

Da cui si potrà quindi calcolare la relativa trasmittanza termica lineica:

$$\psi = \frac{(\phi_{pt} - \phi_{nopt})}{\Delta T}$$

Successivamente, per la determinazione delle temperature superficiali attraverso le isoterme, verrà modificata, a favore di sicurezza, la resistenza termica interna (RSI) =  $0,25 \text{ [mqK/W]}$ . Si evidenzieranno quindi le superfici in cui si verifica il rischio di formazione di muffa.

a) Muratura monoblocco – PT “corretto” con tavola

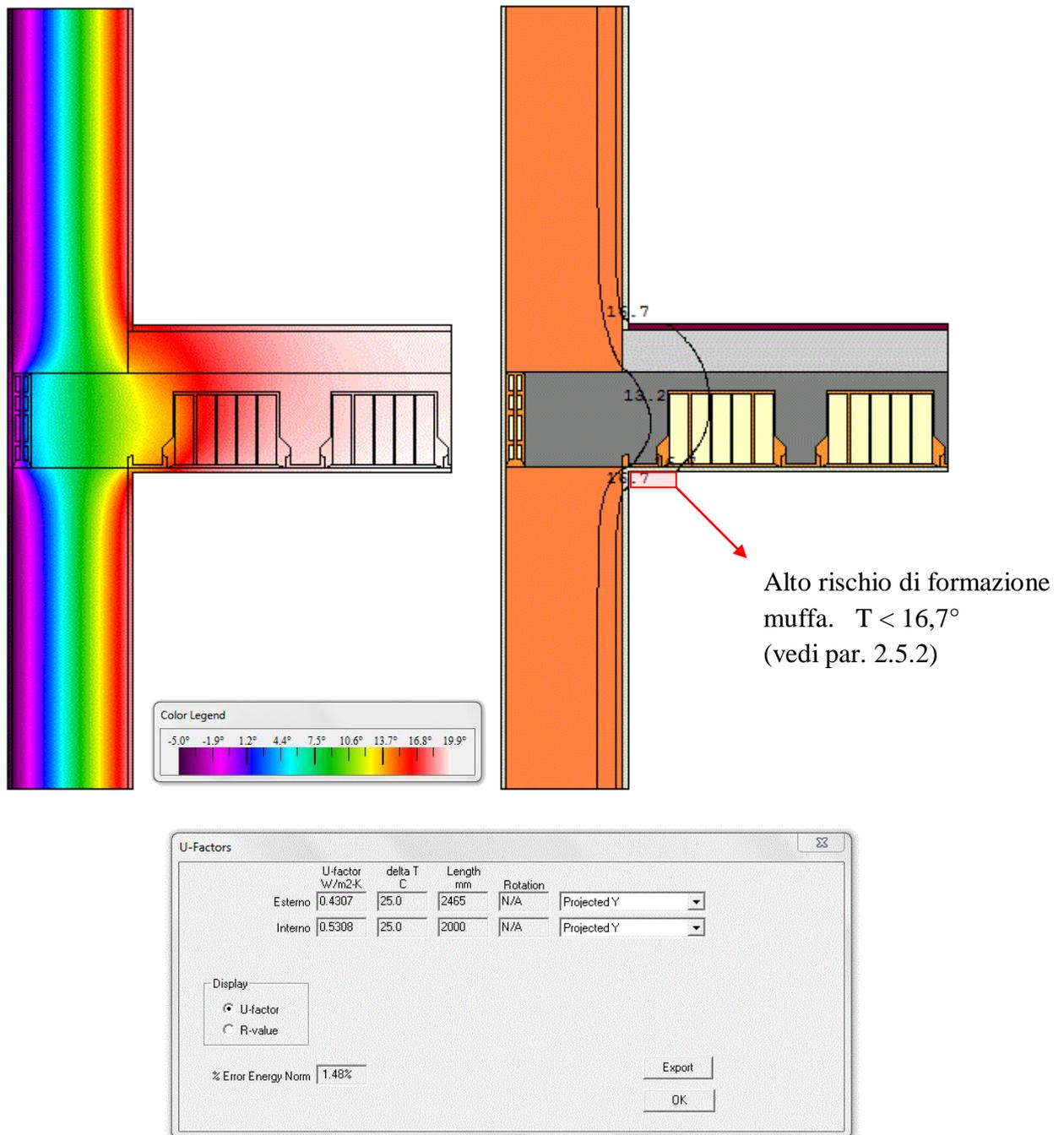


Figura 3.3\_4

Analisi di isoterme e flusso termico con il software THERM 7.0, particolare “a”

$$\phi_{nopt} = U \times L \times \Delta T = 0,28 \times 2,465 \times 25 = 17,255 [W]$$

$$\phi_{pt} = U_{FEM} \times L \times \Delta T = 0,45307 \times 2,465 \times 25 = 27,92 [W]$$

$$\psi_a = \frac{(\phi_{pt} - \phi_{nopt})}{\Delta T} = 0,43 [W / mK] > 0,2 [W / mK] \text{ (vedi par. 2.3.4)}$$

b) Muratura monoblocco – PT “corretto” con isolante

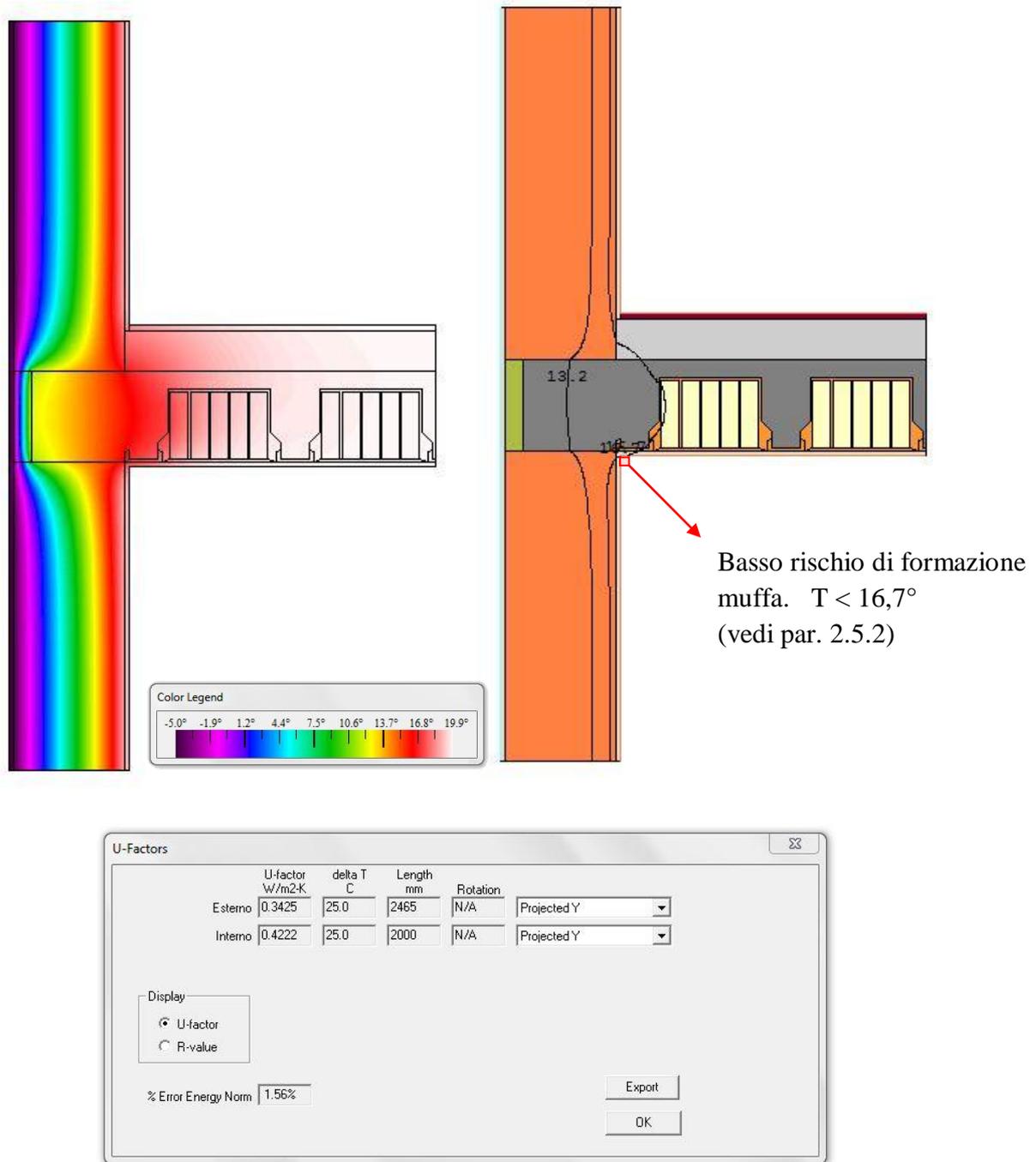


Figura 3.3\_5

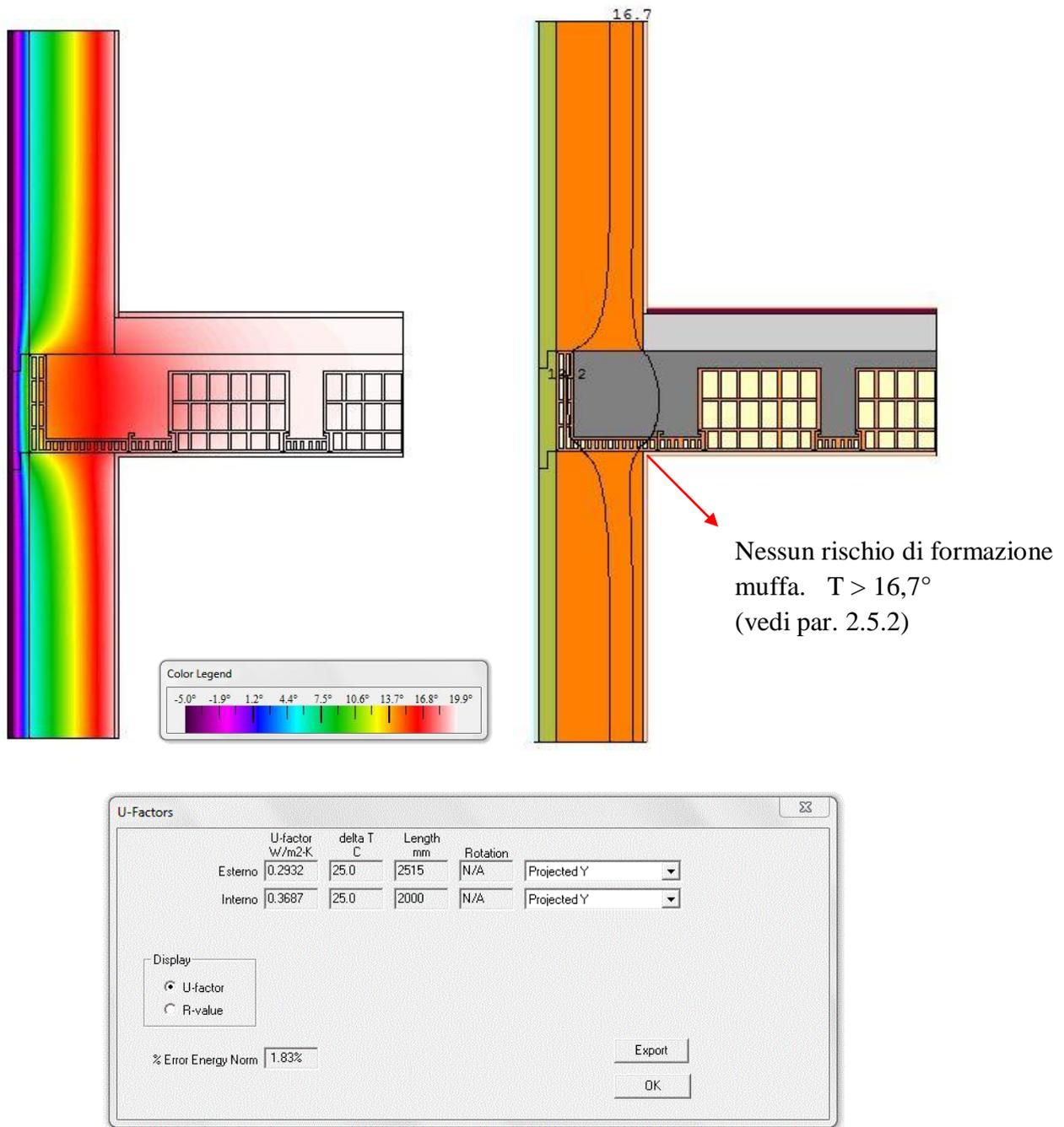
Analisi di isoterme e flusso termico con il software THERM 7.0, particolare “b”

$$\phi_{nopt} = U \times L \times \Delta T = 0,28 \times 2,465 \times 25 = 17,255 [W]$$

$$\phi_{pt} = U_{FEM} \times L \times \Delta T = 0,3425 \times 2,465 \times 25 = 21,11 [W]$$

$$\psi_b = \frac{(\phi_{pt} - \phi_{nopt})}{\Delta T} = 0,16 [W / mK] \leq 0,2 [W / mK] \text{ (vedi par. 2.3.4)}$$

c) Tecnologia innovativa oggetto di studio



**Figura 3.3\_6**  
Analisi di isoterme e flusso termico con il software THERM 7.0, particolare "c"

$$\phi_{nopt} = U \times L \times \Delta T = 0,26 \times 2,515 \times 25 = 16,34 [W]$$

$$\phi_{pt} = U_{FEM} \times L \times \Delta T = 0,2932 \times 2,515 \times 25 = 18,43 [W]$$

$$\psi_c = \frac{(\phi_{pt} - \phi_{nopt})}{\Delta T} = 0,08 [W / mK] \leq 0,2 [W / mK] \text{ (vedi par. 2.3.4)}$$

c) Tecnologia innovativa oggetto di studio - Sez. AA Balcone

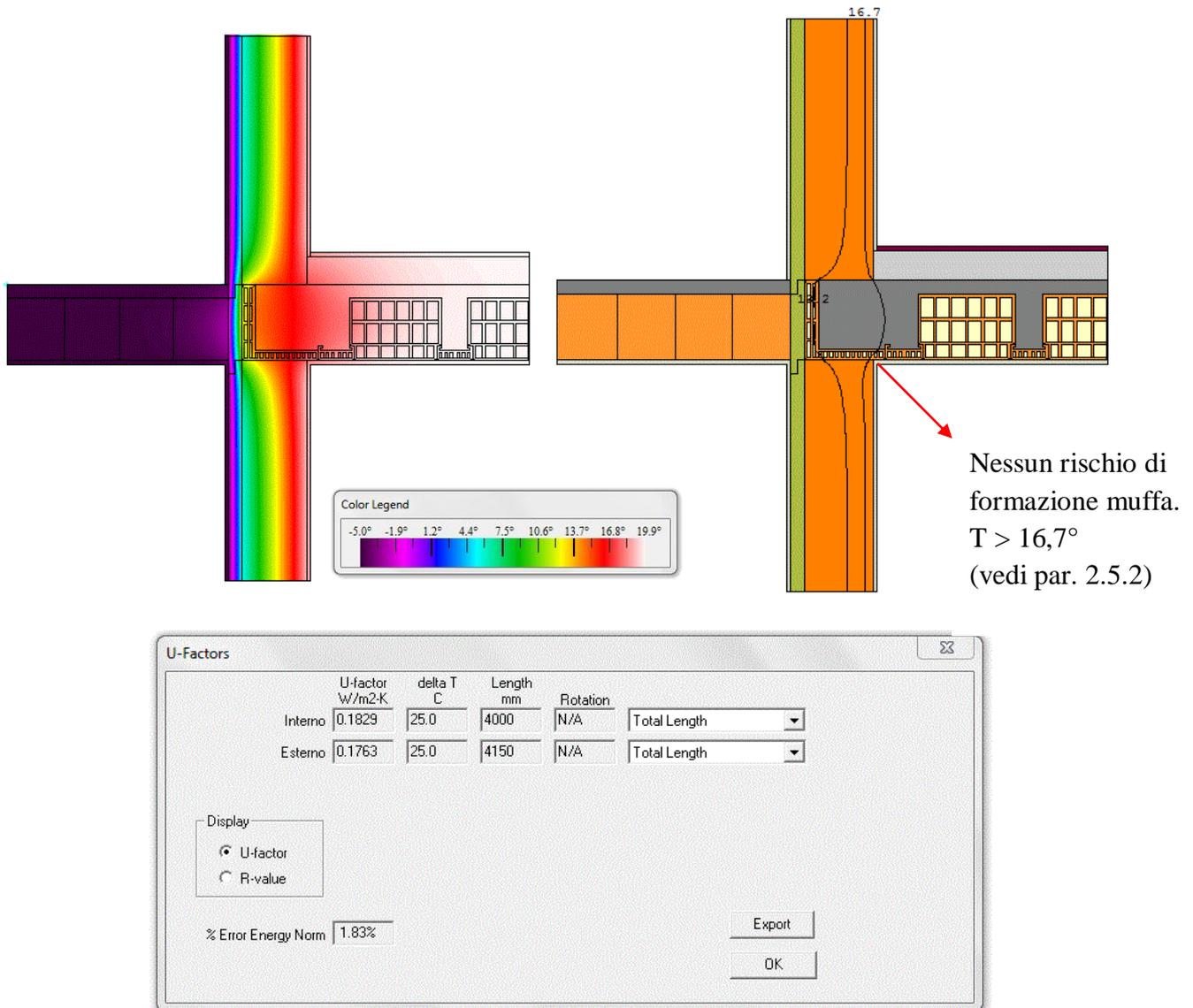


Figura 3.3\_7

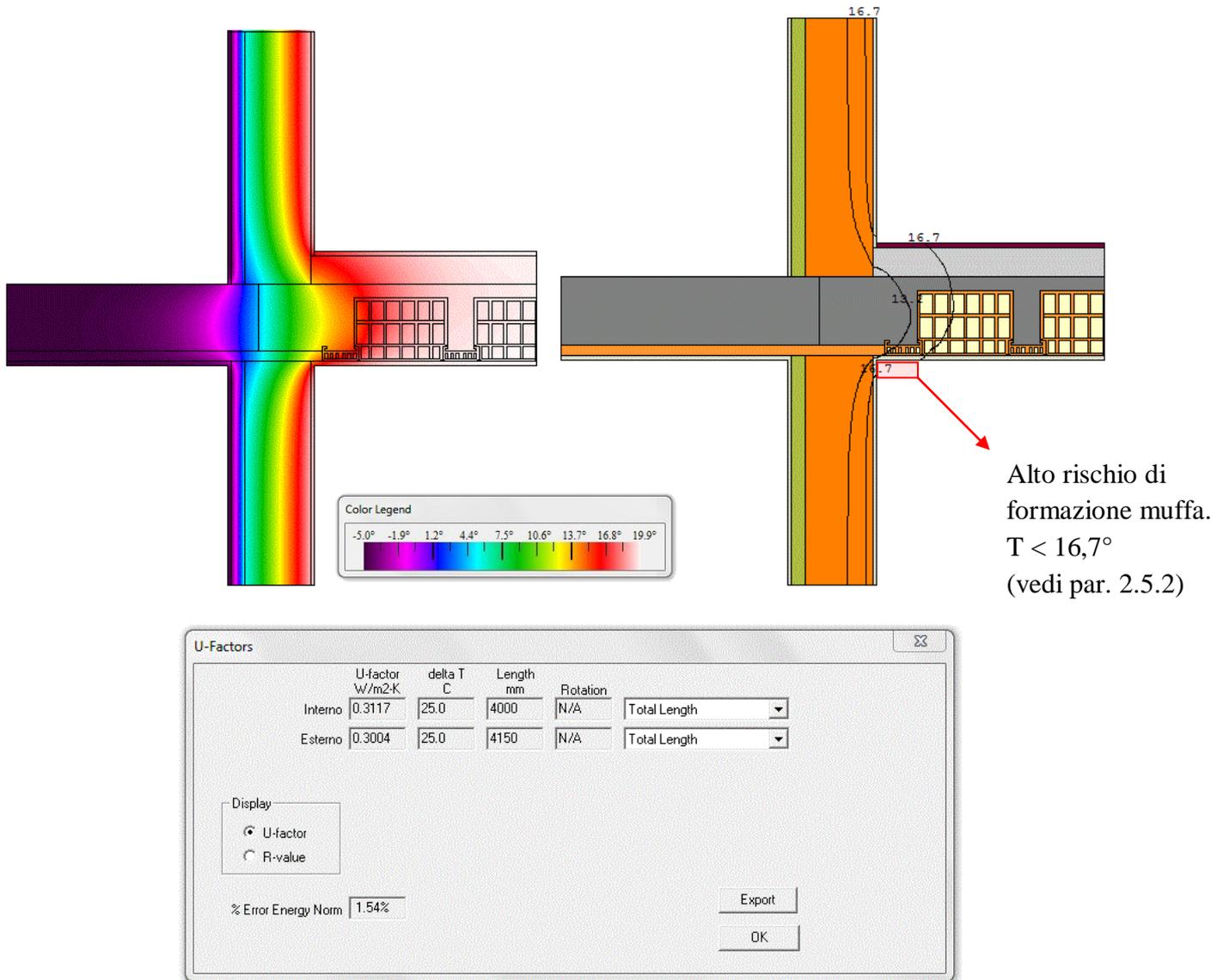
Analisi di isoterme e flusso termico con il software THERM 7.0, particolare "c-Sez. AA Balcone"

$$\phi_{nopt} = U \times L \times \Delta T = 0,26 \times 2,515 \times 25 = 16,34 [W]$$

$$\phi_{pt} = U_{FEM} \times L \times \Delta T = 0,1763 \times 4,150 \times 25 = 18,29 [W]$$

$$\psi_{c-AA} = \frac{(\phi_{pt} - \phi_{nopt})}{\Delta T} = 0,07 [W / mK]$$

c) Tecnologia innovativa oggetto di studio - Sez.BB Balcone



**Figura 3.3\_8**

Analisi di isoterme e flusso termico con il software THERM 7.0, particolare “c-Sez.BB Balcone”

$$\phi_{nopt} = U \times L \times \Delta T = 0,26 \times 2,515 \times 25 = 16,34 [W]$$

$$\phi_{pt} = U_{FEM} \times L \times \Delta T = 0,300 \times 4,150 \times 25 = 31,1 [W]$$

$$\psi_{c\_BB} = \frac{(\phi_{pt} - \phi_{nopt})}{\Delta T} = 0,51 [W / mK]$$

Le trasmittanze termiche lineiche  $\psi_{c\_AA}$  e  $\psi_{c\_BB}$  non rappresentano interamente le caratteristiche dell'involucro, ma solo puntualmente, in riferimento alle diverse sezioni a cui si riferiscono.

Determineremo quindi la trasmittanza termica lineica media, in funzione delle reali dimensioni che caratterizzano tale nodo.

In particolare:

- la sezione AA si riferisce alle caratteristiche dell'involucro in corrispondenza dell'alloggiamento delle pignatte, e quindi, esternamente, dell'isolante (38 cm  $\approx$  67% ogni metro lineare);
- la sezione BB si riferisce alle caratteristiche dell'involucro in corrispondenza dei travetti prefabbricati (16,4 cm  $\approx$  33% ogni metro lineare).

Risulterà quindi una trasmittanza termica lineica media, in corrispondenza dei balconi, pari a:

$$\psi_{c\_AB\_Media} = (\psi_{c\_AA} \cdot 0,67) + (\psi_{c\_BB} \cdot 0,33) = (0,07 \cdot 0,67) + (0,59 \cdot 0,33) = 0,24 [W / mK] \\ > 0,2 [W / mK] \text{ (vedi par. 2.3.4)}$$

Un valore che seppur superi il limite consigliato, si discosta da esso solo limitatamente, soprattutto considerando la natura disperdente del nodo preso in esame.

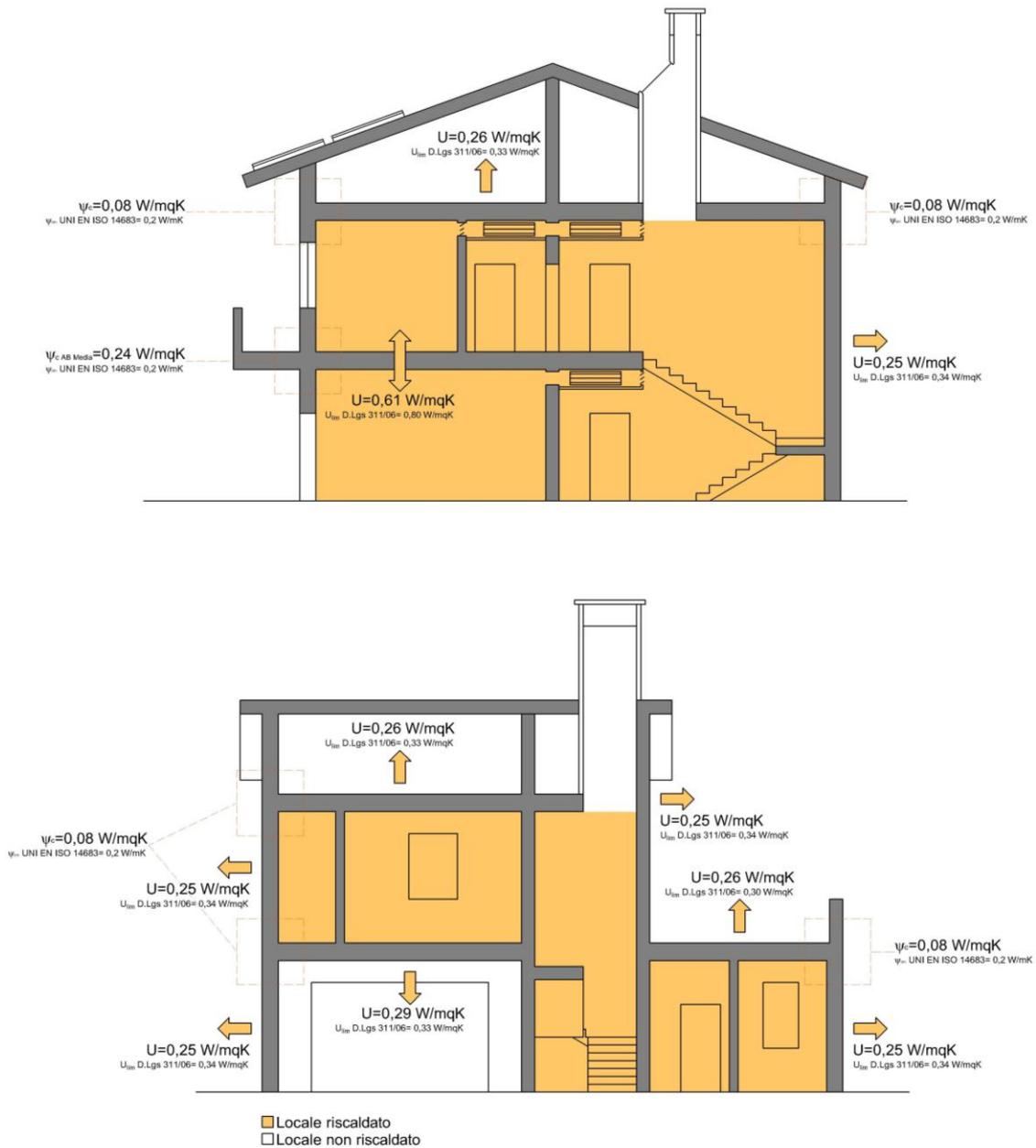


Figura 3.3\_9

Valori di Trasmittanza termica e Trasmittanza termica lineica nei nodi più significativi dell'edificio

### 3.4 Trasmittanza termica, sfasamento ed attenuazione dell'involucro

Calcolo Proprietà Termiche Componenti Edilizi - Versione 2.2 - <http://www.mygreenbuildings.org>

1) Scegliere il tipo di componente edilizio		2) Scegliere il periodo delle variazioni termiche (<= 24 ore)							24	
<b>Chiusura verticale</b>		Periodo delle variazioni termiche T [sec]							86400	
		Resistenza termica sup interna Rsi [m2K/W]							0,13	
		Resistenza termica sup esterna Rse [m2K/W]							0,04	
Descrizione degli strati	Spessore (s) [m]	Conduttività termica (λ) [W/mK]	Resistenza termica [mqK/W]	Calore specifico (c) [J/kgK]	Densità (ρ) [kg/m3]	Resistenza termica aria [m2K/W]	Profondità di penetrazione al periodo T (δ) [m]	ξ = s/d [-]	Resistenza termica [m2k/w]	
Rsi	Aria	Strato laminare interno							0,130	
1		Intonaco calce e gesso	0,015	0,540	1000	1500	0,100	0,151	0,028	
2		EPS	0,065	0,040	1670	40	0,128	0,507	1,625	
3		Pth BIO PLANA	0,300	0,140	840	920	0,071	4,250	2,143	
4		Intonaco calce e gesso	0,015	0,540	1000	1500	0,100	0,151	0,028	
5										
6										
7										
8										
9										
10										
11										
12										
13										
14										
15										
Rse	Aria	Strato laminare esterno							0,040	
Spessore totale componente [cm]		39,50							Resistenza termica totale [m2K/W]	3,993
<b>RISULTATI</b>										
Regime periodico stabilizzato T = 24 ore					Regime stazionario					
Fattore di decremento (attenuazione)		fd [-]	0,046		Massa superficiale		Ms [kg/m2]	324		
Ritardo fattore di decremento (sfasamento)		φ [h]	17,82		Resistenza termica totale		Rt [m2K/W]	3,993		
Trasmittanza termica periodica		Yie  [W/m2K]	0,011		Trasmittanza		U [W/m2K]	0,250		
Ammetenza termica lato interno		Yil [W/m2K] , [h]	1,71 4,01		Conduttanza		C [W/m2K]	0,262		
Ammetenza termica lato esterno		Yee [W/m2K] , [h]	3,59 3,40		Capacità termica areica		Cta [kJ/m2K]	281		
Capacità termica periodica lato interno		k1 [kJ/m2K]	23,4 25,8		Costante di tempo		τ [h]	312		
Capacità termica periodica lato esterno		k2 [kJ/m2K]	49,2 53,7							
Fattore di smorzamento superficiale interno										
Parete disperdente		fsd [-]	0,777 0,533							
Parete interna		fsi [-]	0,778 0,535							
Dati acustici					Stratigrafia del componente edilizio					
Indice potere fonoisolante		Rw (dB) [dB]	48,20							
<b>Rapporto tecnico UNI</b>										
<input checked="" type="radio"/> Laboratori italiani <input type="radio"/> Formula CEN										
<b>Altre formule</b>										
<b>Pareti monostrato</b>										
<input type="radio"/> In laterizio alleggerito <input type="radio"/> In laterizio <input type="radio"/> In blocchi di argilla espansa										
<b>Pareti doppie</b>										
<input type="radio"/> In laterizio, interc. > 5 cm con materiale fibroso <input type="radio"/> In blocchi di argilla espansa, interc. senza materiale fibroso										
<b>Solai</b>										
<input type="radio"/> Solai in laterocemento										
Indice livello rumore da calpestio equivalente		Lnw,eq [dB]	-							
<b>Prestazione Energetica Estiva - Metodo dei parametri qualitativi secondo Linee Guida Nazionali sulla Certificazione Energetica degli Edifici</b>										
Sfasamento (ore)	Attenuazione	Prestazioni	Qualità Prestazionale	Attenuazione	Controllo attenuazione	Controllo Sfasamento	Sfasamento (h)			
S > 12	Fd < 0,15	ottime	I	fa < 0,15	1	1	S > 12			
12 >= S > 10	0,15 <= fd < 0,30	buone	II	0,15 <= fa < 0,30	0	0	12 >= S > 10			
10 >= S > 8	0,30 <= fd < 0,40	medie	III	0,30 <= fa < 0,40	0	0	10 >= S > 8			
8 >= S > 6	0,40 <= fd < 0,60	sufficienti	IV	0,40 <= fa < 0,60	0	0	8 >= S > 6			
6 >= S	0,60 <= fd	mediocri	V	0,60 <= fa	0	0	6 >= S			
<b>Prestazioni</b>				<b>Ottime</b>						
<b>Qualità prestazionale</b>				<b>I</b>						

Figura 3.4\_1

Trasmittanza termica, Sfasamento, Attenuazione, Isolamento acustico "pacchetto" – BIO PLAN (30

Lo studio dell'involucro, svolto secondo quanto riportato nei capitoli 2.4 e 2.7, ha determinato caratteristiche di alta efficienza energetica, come riportato in tabella:

- Trasmittanza termica:  $U=0,25 \text{ [W/mqK]} < 0,34 \text{ [W/mqK]}$  (vedi par. 2.4.2)
- Massa superficiale:  $M_s= 324 \text{ [Kg/mq]} > 230 \text{ [Kg/mq]}$  (vedi par. 2.7.2)
- Fattore di attenuazione:  $f=0,046 < 0,15$  (vedi par. 2.7.2)
- Sfasamento:  $\Delta t_f=17,82 \text{ [h]} > 12 \text{ [h]}$  (vedi par. 2.7.2)
- Trasmittanza termica periodica:  $Y_{ie}=0,011 \text{ [W/mqK]} < 0,20 \text{ [W/mqK]}$  (vedi par. 2.7.2)

### 3.5 Condensa interstiziale

	Cat.	Descrizione Materiale	Spessore (m)	Res. term. (m <sup>2</sup> K/W)	Fatt. Res.	Sp. Eq. aria (m)
		Superficie esterna		0,04		
	INT	Intonaco di calce e gesso	0,015	0,0214	10,00	0,15
	EPS	EPS	0,065	1,8056	30,00	1,95
	MUR	Blocchi arg.esp.forati 30 cm.rif.1.2.14	0,30	0,56	20,00	6,00
	INT	Intonaco di calce e gesso	0,015	0,0214	10,00	0,15
		Superficie interna		0,13		

Tabella 1 - Composizione strati della struttura

#### Proprietà principali della struttura

Nome struttura	TESI
Localizzazione	BOLOGNA (BO)
Tipo struttura	Pareti
Numero strati	4
Spessore totale	0,395 m
Resistenza termica totale	2,5784 m <sup>2</sup> K/W
Trasmittanza termica totale	0,3878 W/(m <sup>2</sup> K)
Trasmittanza max DLgs 311 - 2008	0,37 W/(m <sup>2</sup> K)
Trasmittanza max DLgs 311 - 2010	0,34 W/(m <sup>2</sup> K)

Tabella 2 - Proprietà struttura

#### Disegno struttura

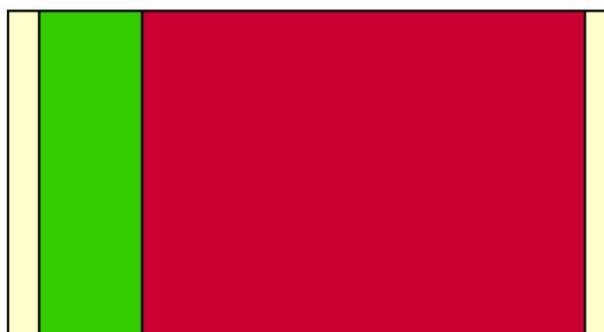


Figura 1 - Disegno struttura

#### Figura 3.5\_1

Composizione "pacchetto" – BIO PLAN (30 cm)+EPS (6,5 cm)

#### Tabella risultati

	T. esterna (°C)	Press. est. (Pa)	T. interna (°C)	Var. (Pa)	P. Interna (Pa)	Press. Sat. (Pa)	T. Sup. min (°C)	Fatt. Temp.
Ottobre	14,90	1261,00	20,00	206,55	1488,21	1860,26	16,37	0,2875
Novembre	8,70	956,00	20,00	457,65	1459,41	1824,27	16,06	0,6513
Dicembre	4,00	700,00	20,00	648,00	1412,80	1766,00	15,55	0,722
Gennaio	2,10	636,00	20,00	724,95	1433,45	1791,81	15,78	0,7642
Febbraio	4,60	736,00	20,00	623,70	1422,07	1777,59	15,65	0,7178
Marzo	9,40	847,00	20,00	429,30	1319,23	1649,04	14,49	0,48
Aprile	14,20	1084,00	20,00	234,90	1342,39	1677,99	14,76	0,0961

Tabella 1 - Calcolo dei fattori di temperatura.

#### Conclusioni

**Mese critico:** Gennaio, con fattore di temperatura 0,7642

**Resistenza termica minima acc ettabile:** 1,0602 m<sup>2</sup>K/W

**Resistenza termica totale dell'elemento:** 2,5784 m<sup>2</sup>K/W

#### Figura 3.5\_2

Condensa superficiale "pacchetto" – BIO PLAN (30 cm)+EPS (6,5 cm)

## Tabella risultati

Mese	Press. Esterna	Interf. 1	Interf. 2	Interf. 3	Press. Interna
Ottobre	1702,12	1722,35	2159,99	2314,16	2320,24
	1261,00	1277,88	1328,51	1484,31	1488,21
Novembre	1137,82	1169,52	1960,73	2286,71	2300,08
	956,00	993,40	1105,59	1450,79	1459,41
Dicembre	827,16	861,24	1820,60	2266,10	2284,89
	700,00	752,95	911,80	1400,58	1412,80
Gennaio	724,58	758,59	1766,49	2257,81	2278,77
	636,00	695,24	872,96	1419,77	1433,45
Febbraio	862,11	896,10	1837,98	2268,72	2286,82
	736,00	786,97	939,86	1410,31	1422,07
Marzo	1191,95	1222,89	1982,39	2289,80	2302,35
	847,00	882,08	987,32	1311,13	1319,23
Aprile	1628,04	1650,19	2136,64	2311,05	2317,96
	1084,00	1103,19	1160,78	1337,96	1342,39
Maggio	2088,91	2088,91	2088,91	2088,91	2088,91
	1418,00	1423,96	1441,83	1496,82	1498,19
Giugno	2790,87	2790,87	2790,87	2790,87	2790,87
	1806,00	1806,00	1806,00	1806,00	1806,00
Luglio	3242,14	3242,14	3242,14	3242,14	3242,14
	1835,00	1835,00	1835,00	1835,00	1835,00
Agosto	3147,11	3147,11	3147,11	3147,11	3147,11
	1904,00	1904,00	1904,00	1904,00	1904,00
Settembre	2516,28	2516,28	2516,28	2516,28	2516,28
	1611,00	1611,00	1611,00	1611,00	1611,00

Tabella 1 - Profilo delle pressioni all'interno della struttura.

	Press. Saturazione (Pa)
	Pressione (Pa)
	Condensazione
	Evaporazione
	Condensa residua

Legenda.

INT — Sup. esterna  
 INT — interf. 1  
 EPS — interf. 2  
 MUR — interf. 3  
 INT — Sup. interna

Composizione interfacce

### Figura 3.5\_3

Profilo delle pressioni "pacchetto" – BIO PLAN (30 cm)+EPS (6,5 cm)

## Tabella risultati

Mese
Ottobre
Novembre
Dicembre
Gennaio
Febbraio
Marzo
Aprile
Maggio
Giugno
Luglio
Agosto
Settembre

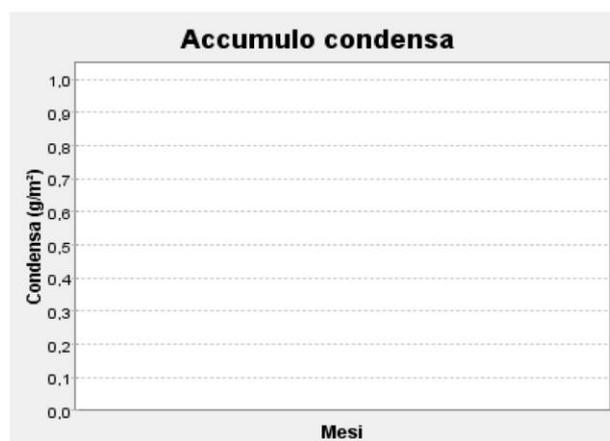
Tabella 1 - Accumulo di condensa all'interno della struttura.

	Condensazione
	Evaporazione
	Condensa residua o superiore al limite

Legenda

	INT	—Sup. esterna
	EPS	—interf. 1
	MUR	—interf. 2
	MUR	—interf. 3
	INT	—Sup. interna

Composizione interfacce



## Note

**Condensa non presente**

Figura 3.5\_4

Accumulo condensa interstiziale "pacchetto" – BIO PLAN (30 cm)+EPS (6,5 cm)

Lo studio dell'involucro, svolto secondo quanto riportato nel capitolo 2.6, ha determinato caratteristiche tali per cui durante l'intero ciclo annuale non si verifica la presenza di condensa interstiziale, come riportato dai grafici.

Soluzioni innovative in laterizio per edifici ad alta efficienza energetica:  
un nuovo modello di involucro in muratura portante

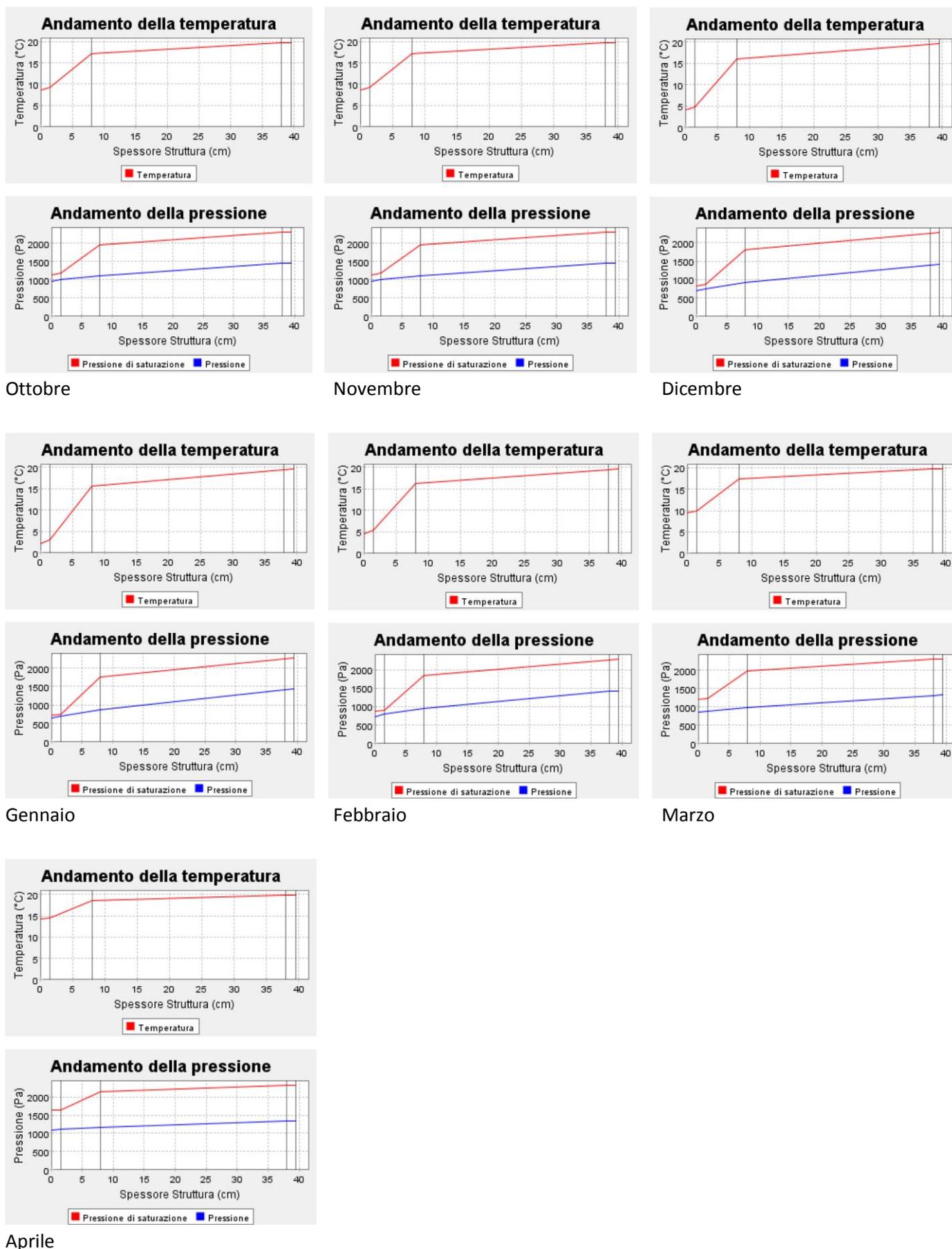


Figura 3.5\_6 Andamento temperatura e pressione "pacchetto" – BIO PLAN (30 cm)+EPS (6,5 cm)

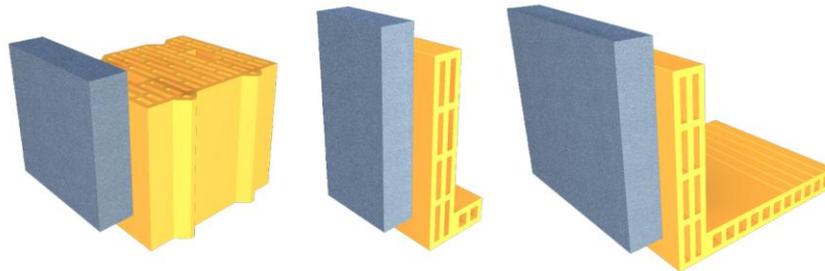
### 3.6 Posa in opera

Si è scelto di studiare una soluzione che, oltre ad avere elevate caratteristiche di efficienza energetica, risulti anche agevole e semplice nella fase di posa in opera.

Questa scelta ha portato ad alcuni principali accorgimenti:

- ISOLANTE PRE-INCOLLATO

L'isolante sarà incollato preventivamente ed in modo automatico in fase di produzione con leganti adesivi, per una maggiore qualità prestazionale globale e un notevole risparmio in termini di lavoro e tempo in fase di posa;



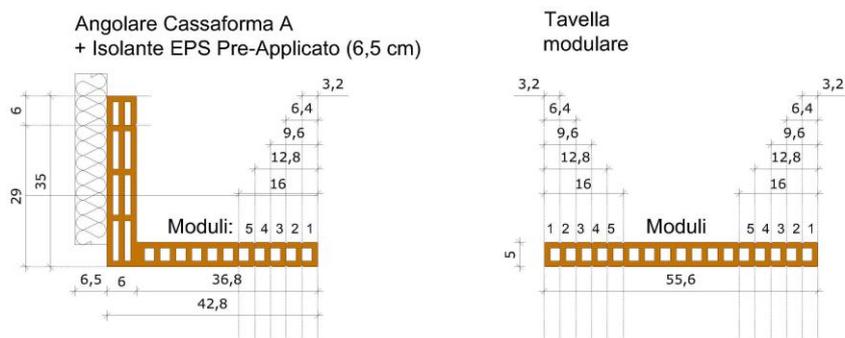
**Figura 3.6\_1**

*Elementi innovativi oggetto di studio – Isolante preincollato agli elementi*

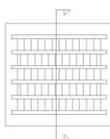
- MODULARITA'

Per garantire versatilità e semplicità di impiego, gli elementi sono stati progettati in modo da poter adattarsi facilmente alle dimensioni mai “standardizzate” che il progetto e quindi il cantiere possono prevedere (garantendo sempre una disposizione “ermetica” per il getto del cls). Per questo motivo è stato studiato un sistema di compensazione che prevede congiuntamente:

- l'accorciamento degli elementi lungo linee di rottura predisposte;
- l'utilizzo di ulteriori travetti prefabbricati o pignatte (a seconda della direzione in cui si sta operando).

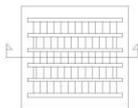


## - Sezione ortogonale all'orditura del Solaio



Scarto = x	Moduli eliminati	Spazio recuperato per aggiunta travetto	min	max
1+3 cm	5	$(16 + x) =$	17	19
4+6 cm	4	$(12,8 + x) =$	16,8	18,8
7+9 cm	3	$(9,6 + x) =$	16,6	18,6
10+12 cm	2	$(6,4 + x) =$	16,4	18,4
13+15 cm	1	$(3,2 + x) =$	16,2	18,2
16,4 cm	0			

## - Sezione parallela all'orditura del Solaio

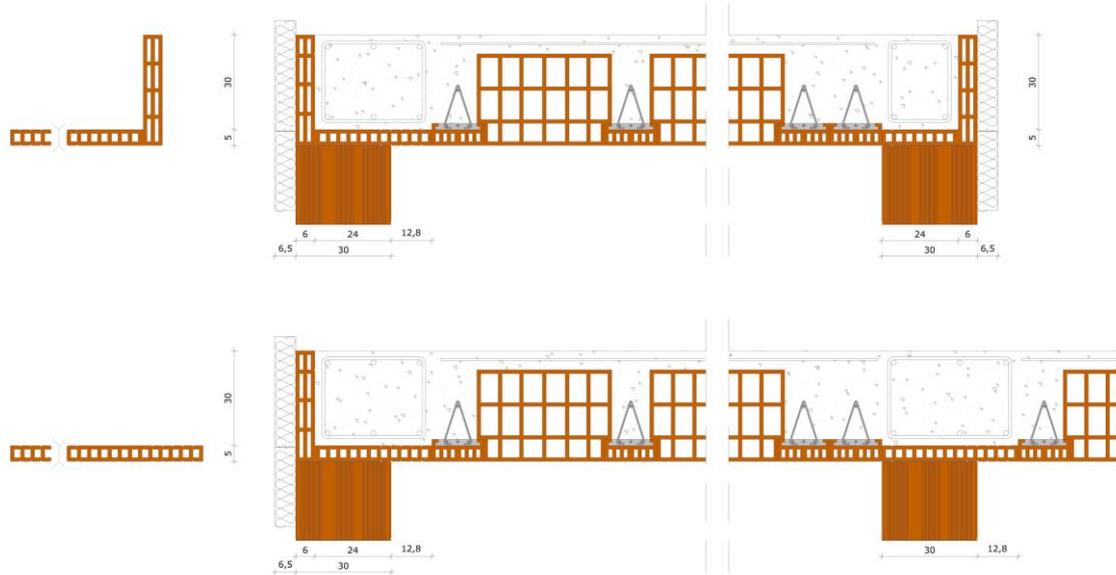


Scarto = x	Moduli eliminati	Spazio recuperato per aggiunta Pignatta B	min	max
1+3 cm	4	$(12,8 + x) =$	13,8	15,8
4+6 cm	3	$(9,8 + x) =$	13,6	15,6
7+9 cm	2	$(6,4 + x) =$	13,4	15,4
10+12 cm	1	$(3,2 + x) =$	13,2	15,2
12,5 cm	0			

**Figura 3.6\_2**  
Sistema di compensazione - Modularità

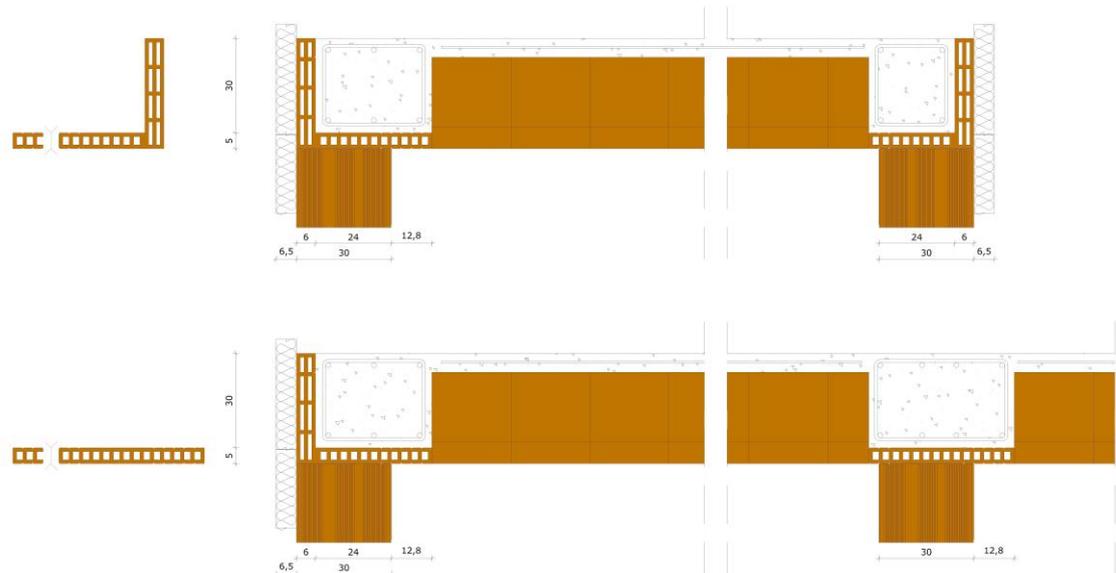
## Dettaglio costruttivo

- Lunghezza Solaio - Sezione ortogonale all'orditura del Solaio  
Scarto =  $4+6$  cm  $\Rightarrow$  n°4 Moduli Eliminati



## Dettaglio costruttivo

- Lunghezza Solaio - Sezione parallela all'orditura del Solaio  
Scarto =  $4+6$  cm  $\Rightarrow$  n°3 Moduli Eliminati

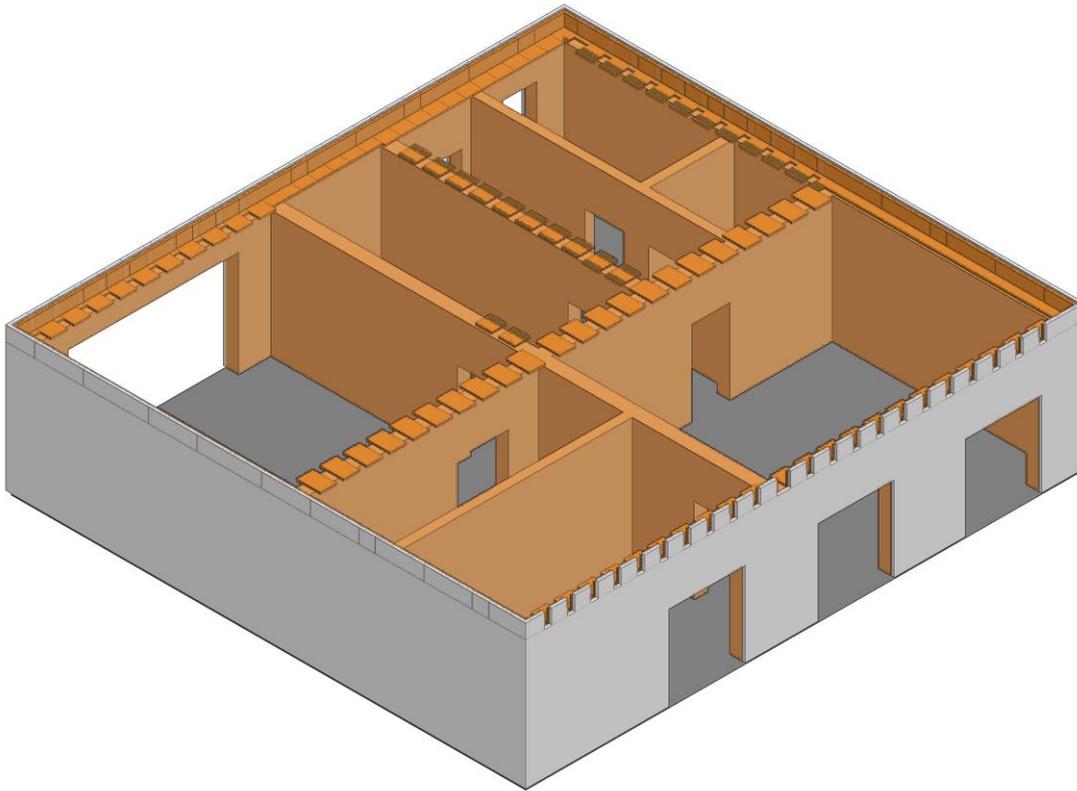


**Figura 3.6\_3**

*Esempi del sistema di compensazione, nella direzione ortogonale e parallela all'orditura del solaio in studio*

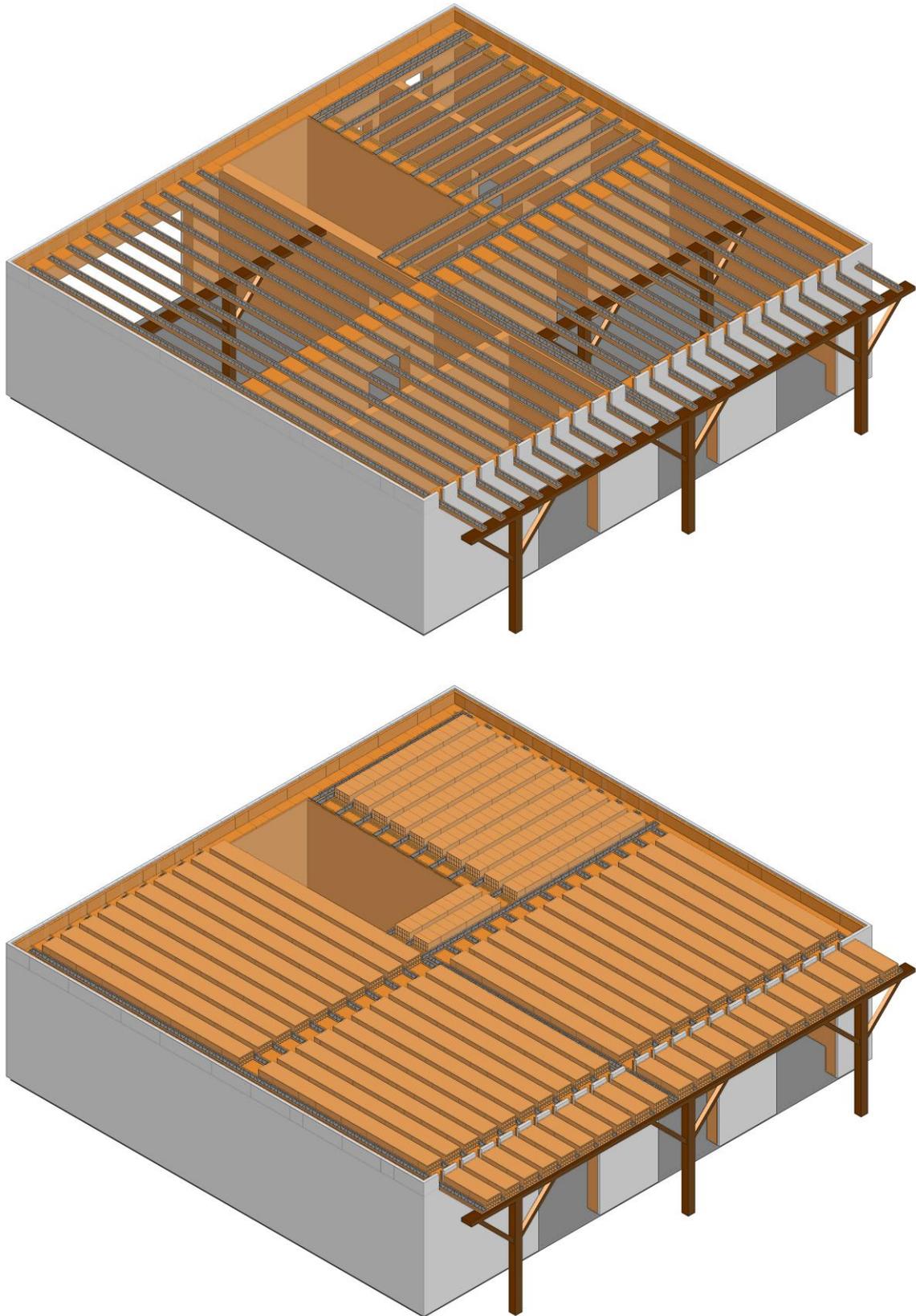
- **CASSAFORME A PERDERE**

Tutti gli elementi facenti parte il solaio, sono stati riprogettati in modo tale che una volta posati, risultino autoportanti e garantiscano autonomamente con la loro disposizione, un involucro chiuso per il getto del cls. In questo modo l'ausilio della carpenteria sarà reso necessario solo per limitate e particolari aree, con un notevole risparmio in termini di lavoro e tempo;

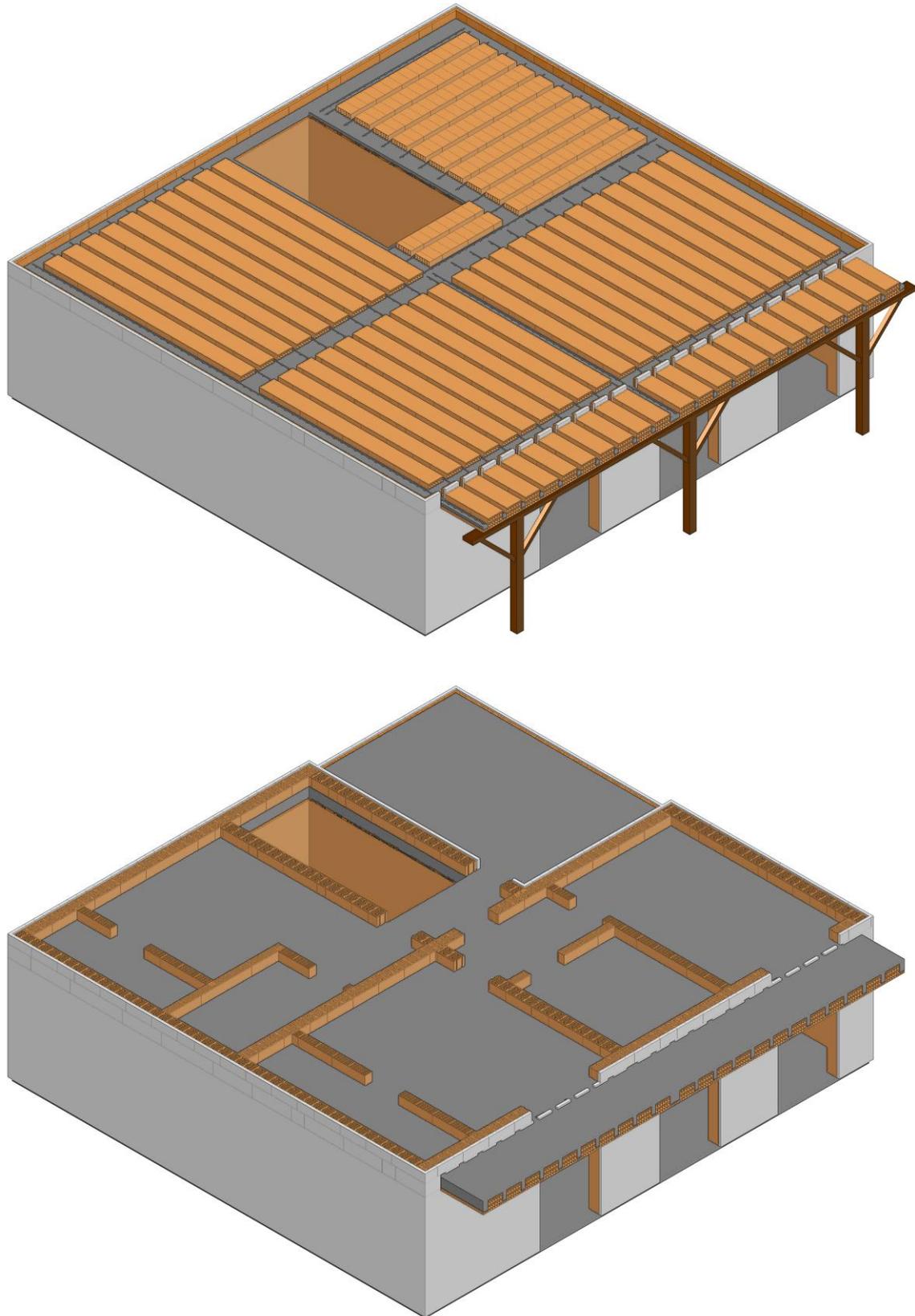


**Figura 3.6\_4**

*Fasi di realizzazione del solaio in latero-cemento –Casseforme a perdere*



**Figura 3.6\_5**  
*Fasi di realizzazione del solaio in latero-cemento –Casseforme a perdere*



**Figura 3.6\_5**  
*Fasi di realizzazione del solaio in latero-cemento –Casseforme a perdere*

#### **4. CAPITOLO IV – VERSO LE NTC 2013**

Le Norme Tecniche per le Costruzioni, approvate con il DM 14 gennaio 2008, forniscono le indicazioni da eseguire per il progetto, l'esecuzione e il collaudo delle costruzioni, come abbiamo precedentemente illustrato. Da tempo però si parla della possibile approvazione delle nuove Norme Tecniche per le Costruzioni: NTC 2013.

Il gruppo di lavoro del CNI per la revisione delle NTC 2008, formato dagli esperti segnalati dagli ordini e dal CNI, si è riunito più volte nei mesi di Luglio e Settembre ed ha terminato il proprio lavoro il 23/09/2011 elaborando un documento contenente tutte le puntualizzazioni e le proposte di modifica della normativa attualmente in vigore. Tale documento è quindi stato consegnato formalmente al Presidente dell'I.S.LL.PP. il 30/09/2011. Successivamente, nel Luglio 2012, è stata elaborata una bozza di normativa da parte dei gruppi di lavoro e presentata al Consiglio Superiore LL.PP. per eventuali modifiche e presentazione per l'approvazione.

L'iter approvativo e la successiva stesura completa delle nuove NTC 2013 non sono purtroppo prevedibili con certezza, ma sono auspicabili alcune modifiche che interesserebbero proprio l'oggetto della seguente tesi.

In particolare, secondo la Bozza circolante, si prevede l'arretramento del cordolo dal filo esterno, non più in termini assoluti, ma più ragionevolmente in funzione dello spessore  $t$  della muratura portante:

##### **“7.8.6.1 COSTRUZIONI DI MURATURA ORDINARIA**

Ad ogni piano deve essere realizzato un cordolo continuo all' intersezione tra solai e pareti. I cordoli devono avere altezza minima pari all' altezza del solaio e larghezza almeno pari a quella del muro; è consentito un arretramento massimo non superiore a 60 mm e a  $0,25*t$  dal filo esterno per

murature di spessore  $t$  fino a 300 mm. Per murature di spessore  $t$  superiore, l'arretramento può essere maggiore di 60 mm, ma non superiore a  $0,2*t$ ." <sup>9</sup>

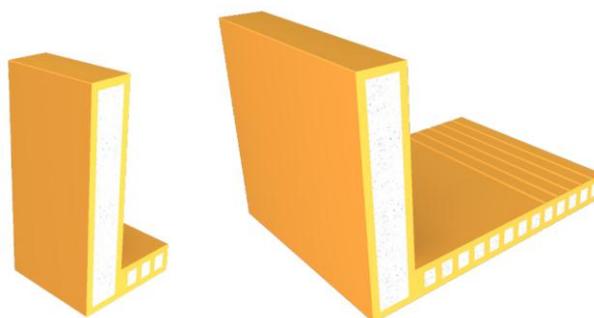
A conclusione della ricerca svolta attraverso la seguente tesi, prendiamo quindi in considerazione questa plausibile ed auspicabile modifica della normativa per analizzare possibili sviluppi futuri.

La possibilità di un maggiore arretramento del cordolo dal filo esterno permette un maggior controllo del flusso termico nella criticità del nodo "solaio-parete" (il principale oggetto di studio della ricerca). Per questo motivo, anziché adeguare l'intero nuovo impianto fin qui studiato, si è scelto di applicare alcune modifiche al solo "Angolare cassaforma" in modo da poterlo utilizzare con la già esistente muratura monostrato, realizzata con laterizio Porotherm PLANA PLUS (rettificato riempito con perlite) WIENERBERGER, di spessore 36,5 cm. Si è mantenuto invece inalterata l'integrazione e quindi l'utilizzo degli elementi innovativi facenti parte il solaio, ed i conseguenti benefici.

L'angolare è stato modificato in modo da poter sfruttare a pieno i 7,2 cm ( $36,5*0,2$ ) di arretramento del cordolo concessi. In particolare, in corrispondenza di tale arretramento, la riprogettazione dell'angolare è stata fatta determinando una sezione cava, con un'unica grande foratura, riempita con perlite. La scelta di questo materiale isolante nasce sia per una maggiore uniformità, in relazione ai blocchi PLANA PLUS utilizzati nella sottostante parete portante, sia per le caratteristiche del materiale che garantiscono maggiore durata nel tempo e che permettono di essere smaltiti (nella fase di fine vita) assieme al laterizio come possibile aggregato inerte per calcestruzzo oppure come riempimento per i sottofondi stradali.

---

<sup>9</sup> Bozza\_NTC\_2012, [www.acca.it](http://www.acca.it)



## Dettaglio costruttivo "NTC 2013"

- Nodo 1 - Sezione verticale - Scala 1:10

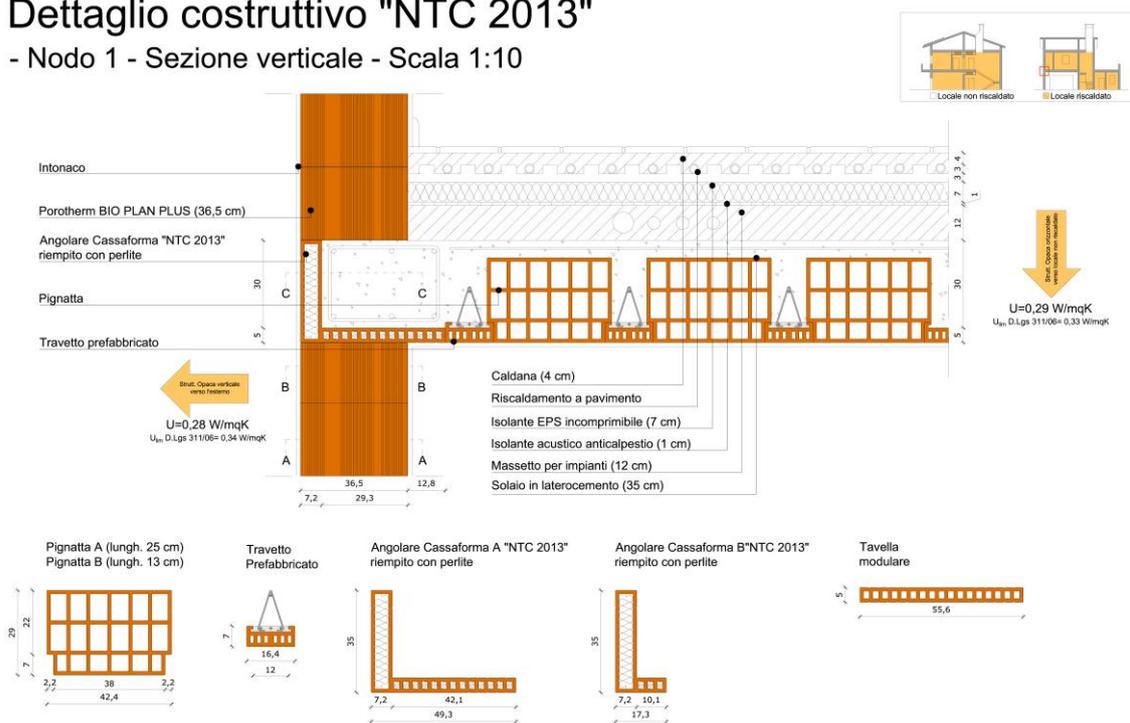


Figura 4\_1

Elementi innovativi oggetto di studio e dettagli tecnici del loro utilizzo

L'analisi attraverso il software FEM sull'incidenza del ponte termico ha portato a risultati, non paragonabili a quelli dei primi oggetti di studio, ma comunque interessanti e competitivi rispetto alle attuali soluzioni tecniche. Soprattutto in ragione dei notevoli benefici che tale soluzione apporterebbe in termini di tempo ed uniformità di materiale in superficie.

a) Muratura monoblocco con “Angolare cassaforma” NTC 2013

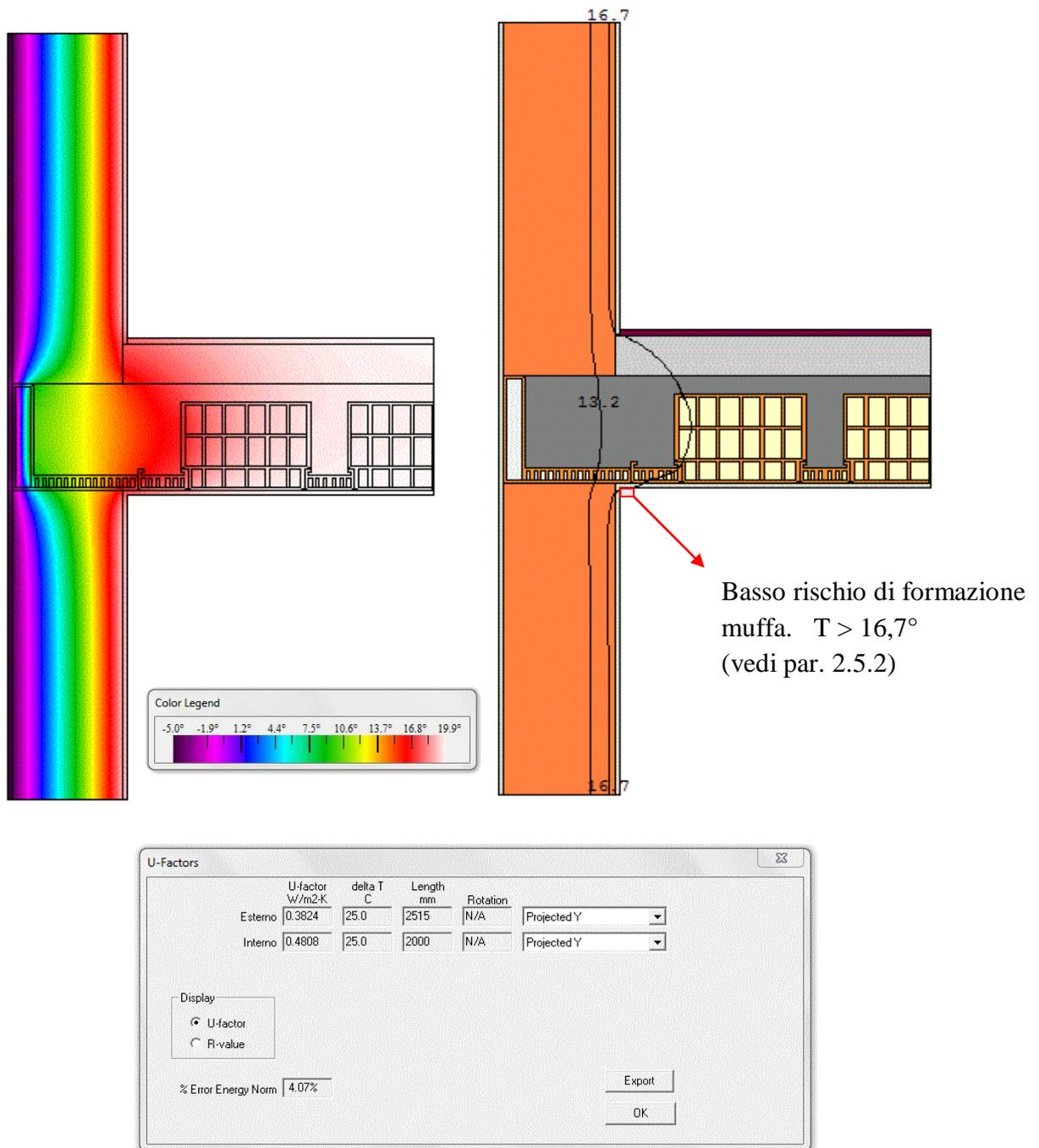


Figura 4\_2

Analisi di isoterme e flusso termico con il software THERM 7.0, particolare “a”

$$\phi_{nopt} = U \times L \times \Delta T = 0,28 \times 2,465 \times 25 = 17,255 [W]$$

$$\phi_{pt} = U_{FEM} \times L \times \Delta T = 0,3824 \times 2,515 \times 25 = 24,04 [W]$$

$$\psi_a = \frac{(\phi_{pt} - \phi_{nopt})}{\Delta T} = 0,27 [W / mK] > 0,2 [W / mK] \text{ (vedi par. 2.3.4)}$$

## 5. CAPITOLO V – CONCLUSIONI

L'analisi svolta nella seguente tesi si contestualizza all'interno di uno scenario, quello dell'edilizia, sempre più messo in discussione dai problemi che attanagliano il mondo contemporaneo, primo fra tutti quello ambientale. Affrontare queste problematiche è possibile, ed è ben noto come una parte del costruito negli ultimi anni abbia ricercato proprio quella qualità ambientale e sociale necessaria. Tali azioni non sono tecnicamente complesse, e con questo elaborato si è voluto dimostrare, con risultati interessanti, quanto sia ancora ampio ed efficace il campo di evoluzione.

L'utilizzo della muratura portante ha permesso di sottolineare quanto tale tecnica sia ancora attuale e sia, anche più di altre, un'ottima base di partenza per la progettazione di elementi innovativi, volti alla realizzazione di involucri per edifici ad alta efficienza energetica. In particolare ristabilendo il giusto rapporto tra progetto e costruzione, in cui il clima interno e quindi il comfort abitativo è controllato principalmente mediante l'idea progettuale, a partire da ogni dettaglio tecnico costruttivo, e solo limitatamente dal sistema impiantistico.

Gli elementi innovativi, che con l'avanzare della tesi non si sono più limitati al solo involucro ma hanno coinvolto l'intero sistema strutturale, hanno portato a significativi ed interessanti risultati sotto diversi aspetti.

Si sono raggiunti ottimi risultati di efficienza energetica sia in regime invernale che estivo (trasmissione, condensa interstiziale, sfasamento, attenuazione), pur limitando gli spessori della muratura, guadagnando quindi in metratura calpestabile, ma facendo comunque attenzione all'energivorità dei materiali utilizzati per raggiungere tali obiettivi.

Nello studio dettagliato dei nodi costruttivi che incidono maggiormente sull'efficienza dell'edificio, perché per loro natura generatori di ponti termici, sono state studiate soluzioni di provata efficacia che, seppur solo teoriche, risultano potenziali input per eventuali sviluppi concreti.

Tale studio non ha infatti potuto tradursi in veri e propri prototipi, che darebbero informazioni su un aspetto non affrontato, il costo di produzione, ma i benefici in termini di semplicità e velocità di posa in opera, più facilmente teorizzabili, fanno ipotizzare comunque una plausibile convenienza d'insieme rispetto ad attuali tecniche costruttive.



## BIBLIOGRAFIA

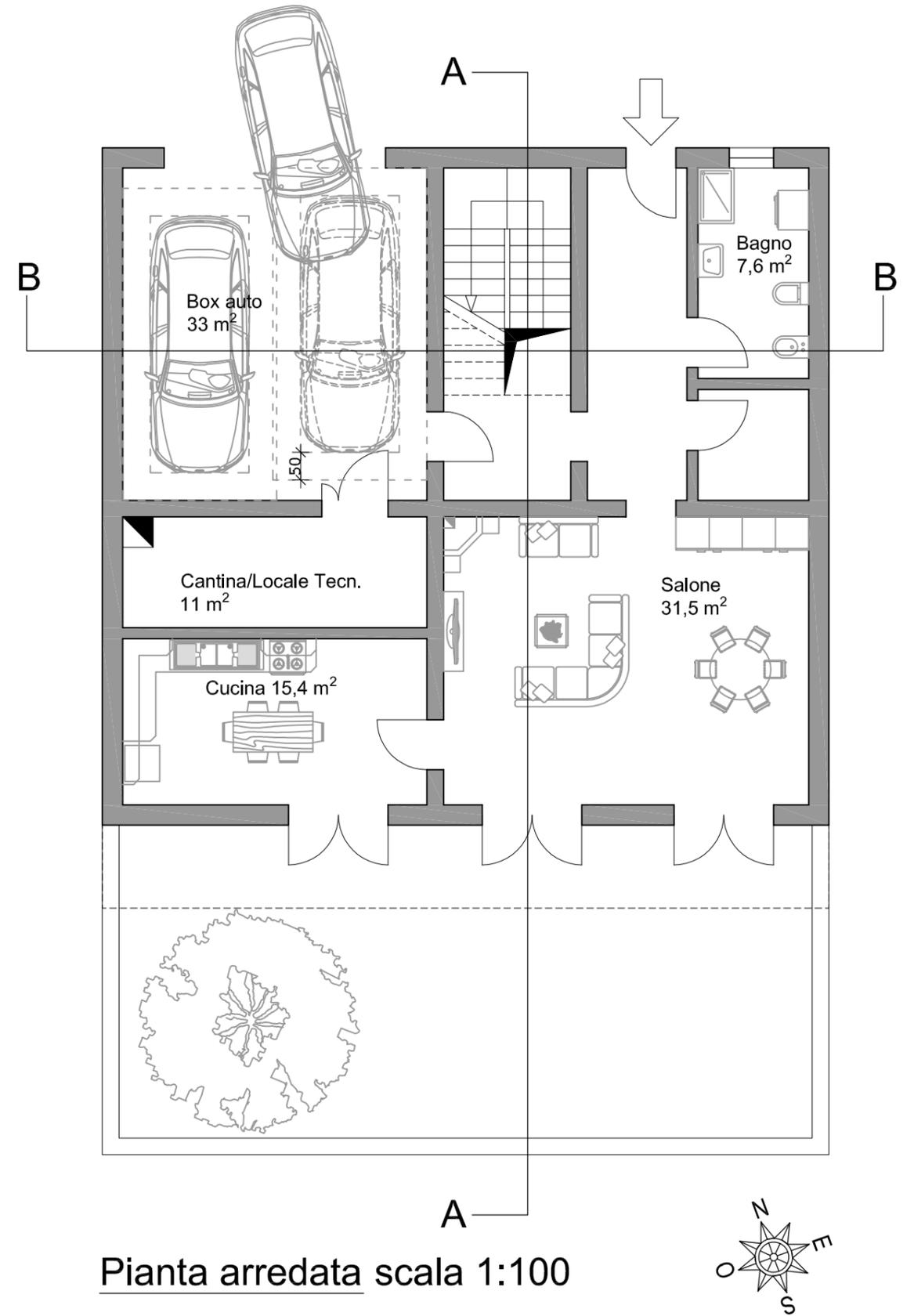
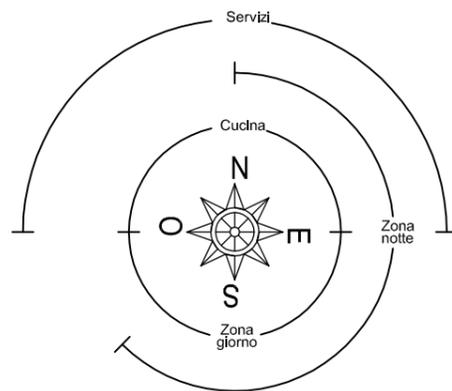
- L. ASQUINI, E. OLEOTTO, L. BASSI, *Efficienza energetica e sostenibilità*, Monfalcone, Edicom, 2008
- S.V. SZOKOLAY, *Introduzione alla progettazione sostenibile*, Milano, Hoepli, 2006
- L. CASTELLI, *Architettura sostenibile*, Torino, UTET, 2008
- *Nuovo Manuale Europeo di Bioarchitettura*, Roma, Mancuso, 2007
- M. GROSSO, *Il raffrescamento passivo degli edifici in zone a clima temperato*, San Marino, Maggioli, 2008
- A. MARGINI, D. ENA, *Tecnologie solari attive e passive*, Roma, EPC libri, 2007
- L. BOSCOTRECASE, F. PICCARRETA, *Edifici in muratura in zona sismica*, Palermo, Flaccovio, 2009
- C. LATINA, *Muratura portante in laterizio*, Roma, Laterconsult, 1994
- A. PAOLELLA, *Architettura sostenibile e laterizio*, Milano, Edizioni ambiente, 2009
- W. BELZ, *Atlante della muratura*, Torino, UTET, 1998
- A. RINALDI, *Progettazione ed efficienza energetica*, Santarcangelo di Romagna, Maggioli, 2010
- M. LAVAGNA, *Edifici a consumo energetico zero*, San Marino, Maggioli, 2012
- G. ALBANO, *Tecnologia e tecnica dei solai e dei balconi*, Santarcangelo di Romagna, Maggioli, 2011
- M. LAVAGNA, M. PALEARI, D. MONDINI, *Murature ad alte prestazioni: valutazioni termiche, acustiche, ambientali ed economiche di soluzioni di involucro in laterizio*, San Marino, Maggioli, 2011
- W. BELZ, K. GOSELE, *Atlante della muratura*, Torino, UTET, 1998



# Piano terra



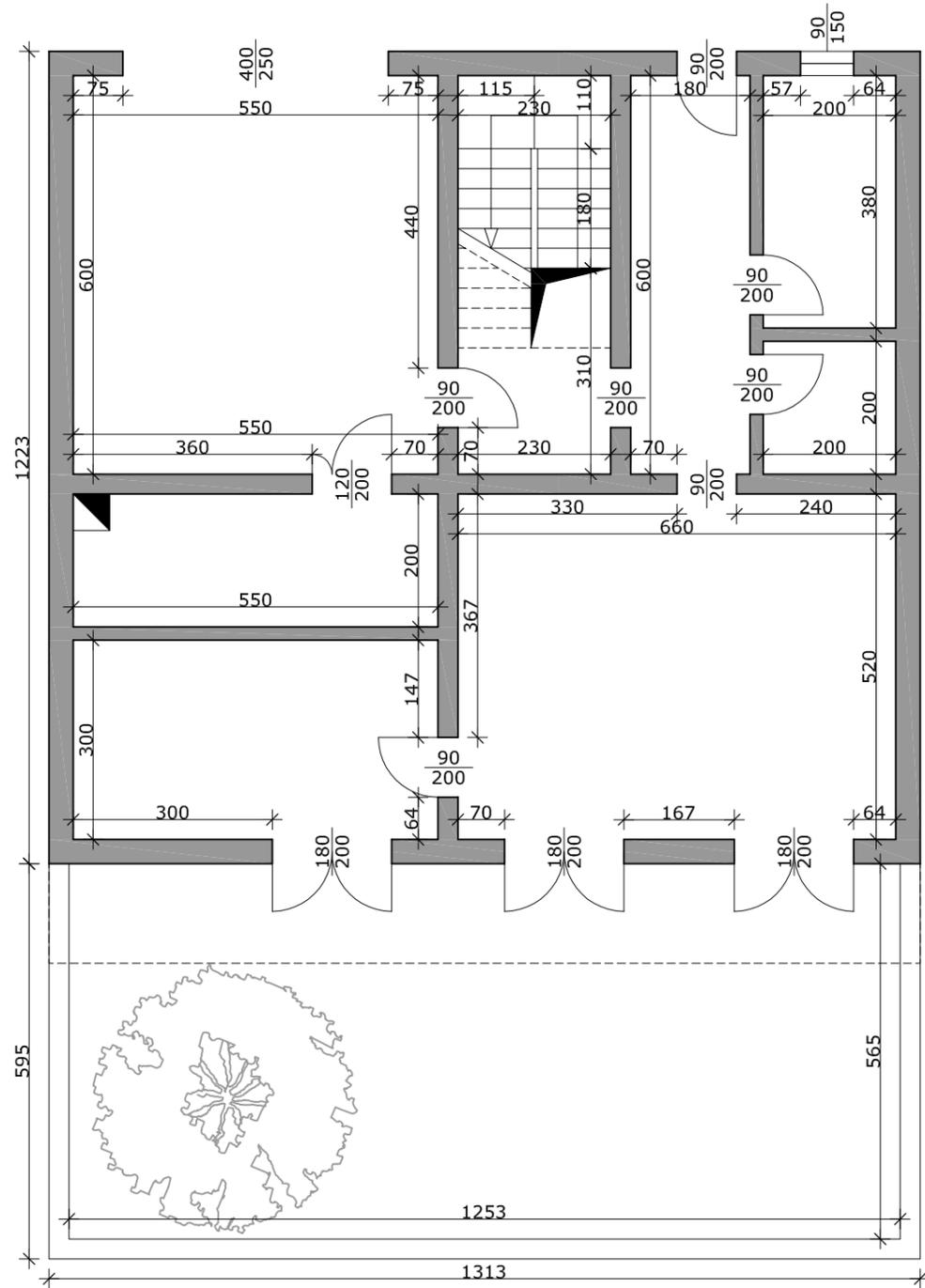
Aggregazione delle unità scala 1:200



Pianta arredata scala 1:100

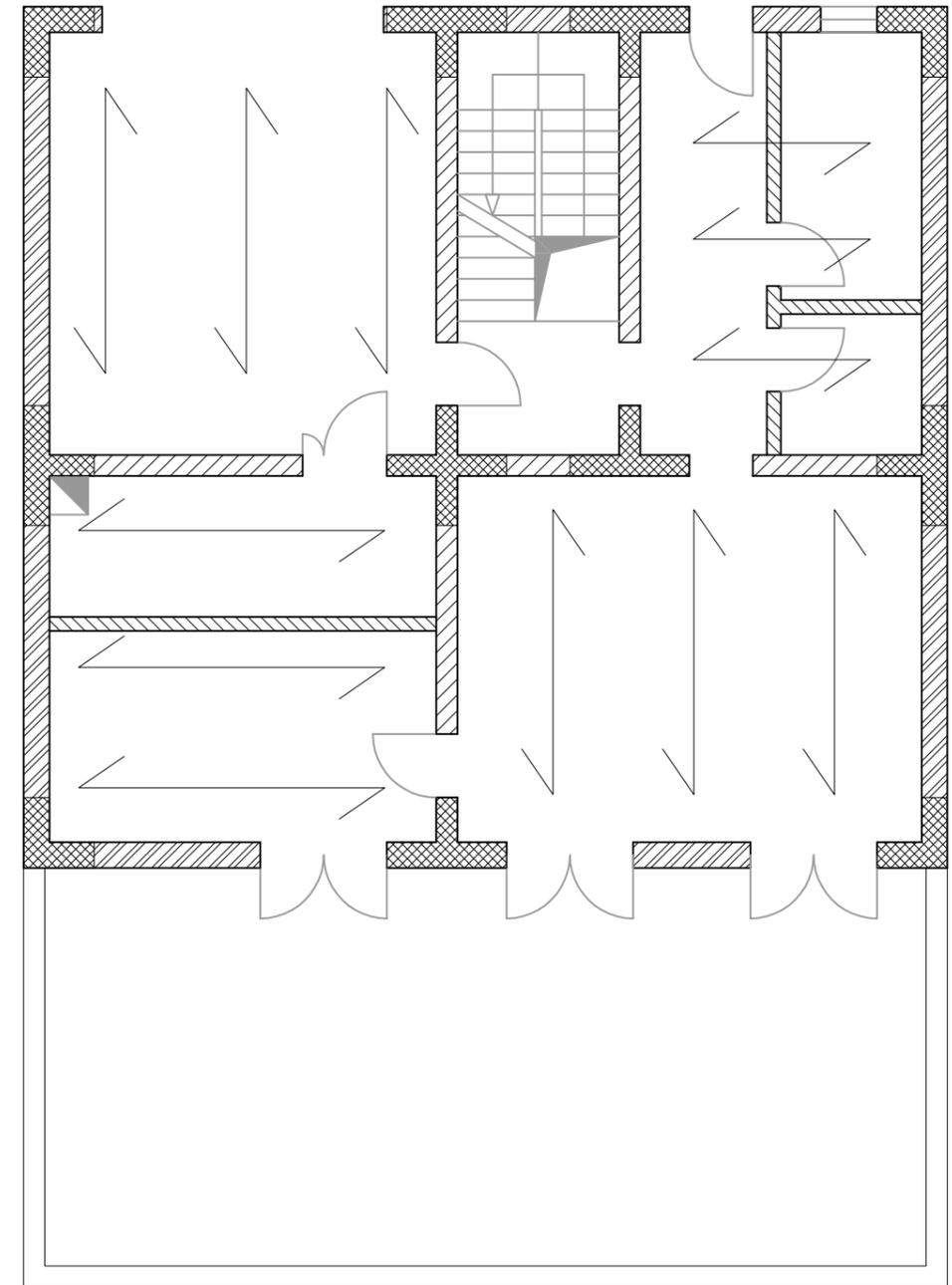


# Piano terra



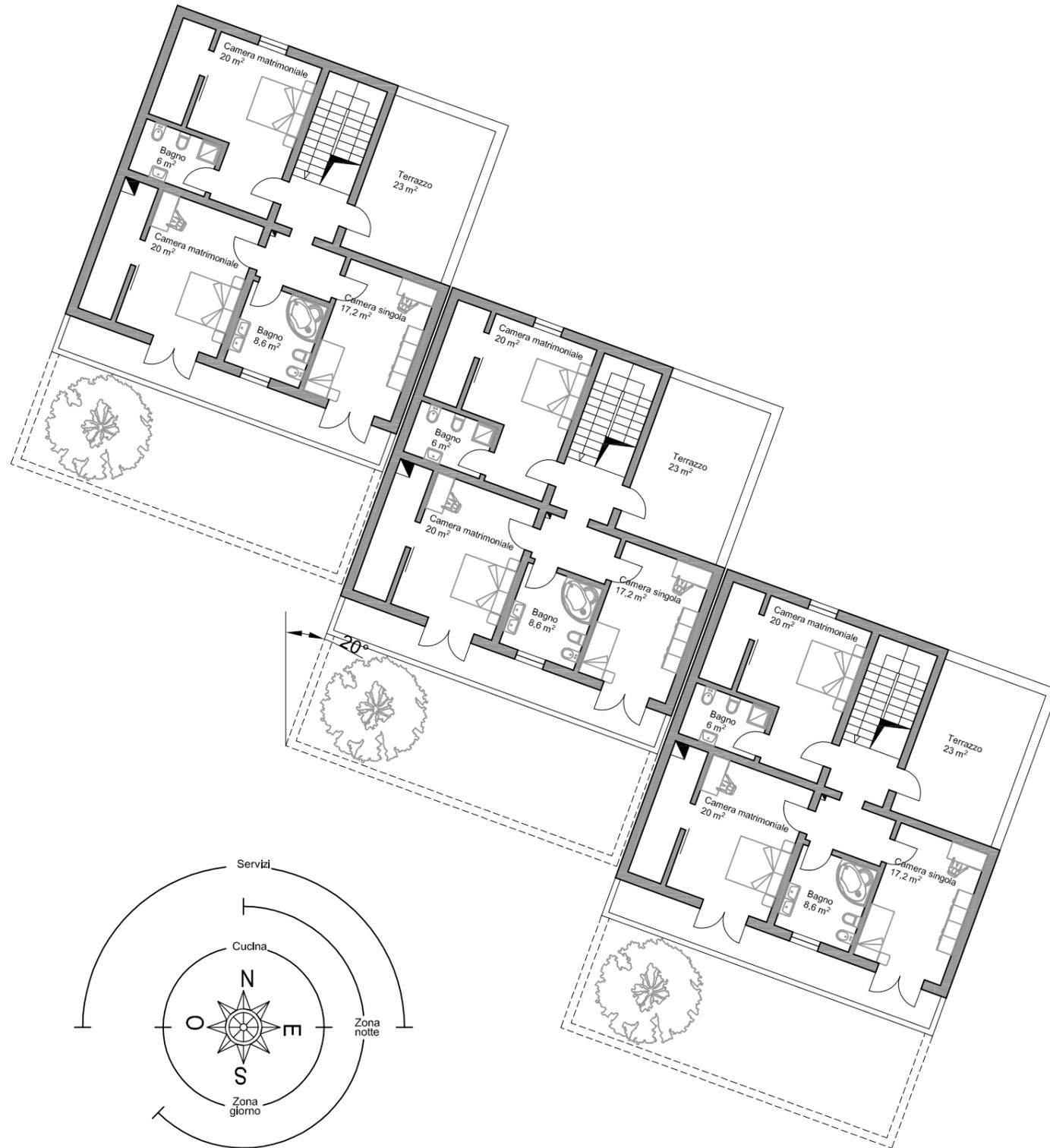
Pianta quotata scala 1:100

-  100 cm di muratura portante continua negli incroci d'angolo e intersezione dei maschi murari NTC 2008, Cap.7
-  Muratura pareti portanti interne - Porotherm BIO PLAN (300 mm)
-  Muratura pareti portanti esterne - Porotherm BIO PLAN + EPS (365 mm)
-  Muratura pareti divisorie (200 mm)

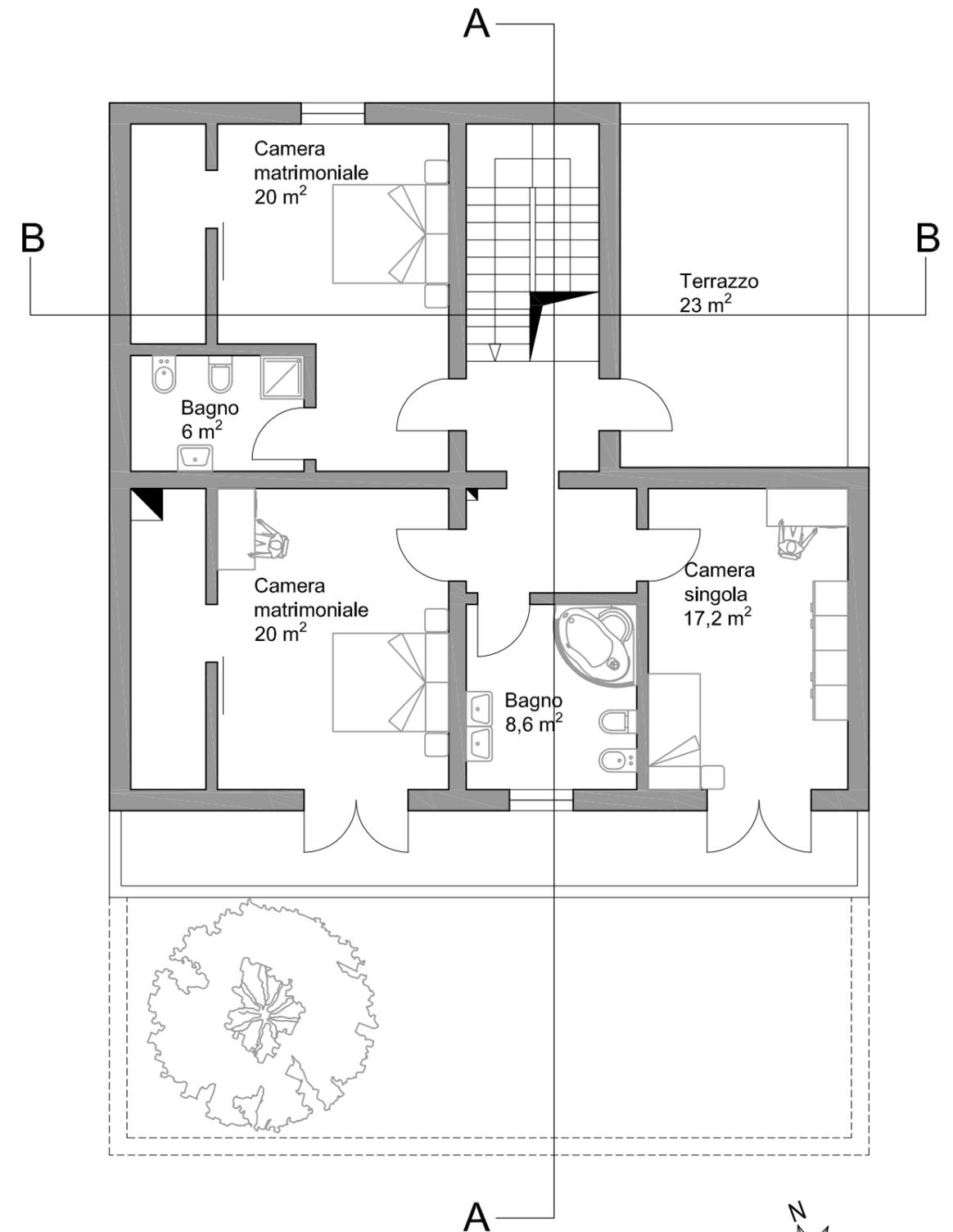


Pianta strutturale scala 1:100

# Piano primo



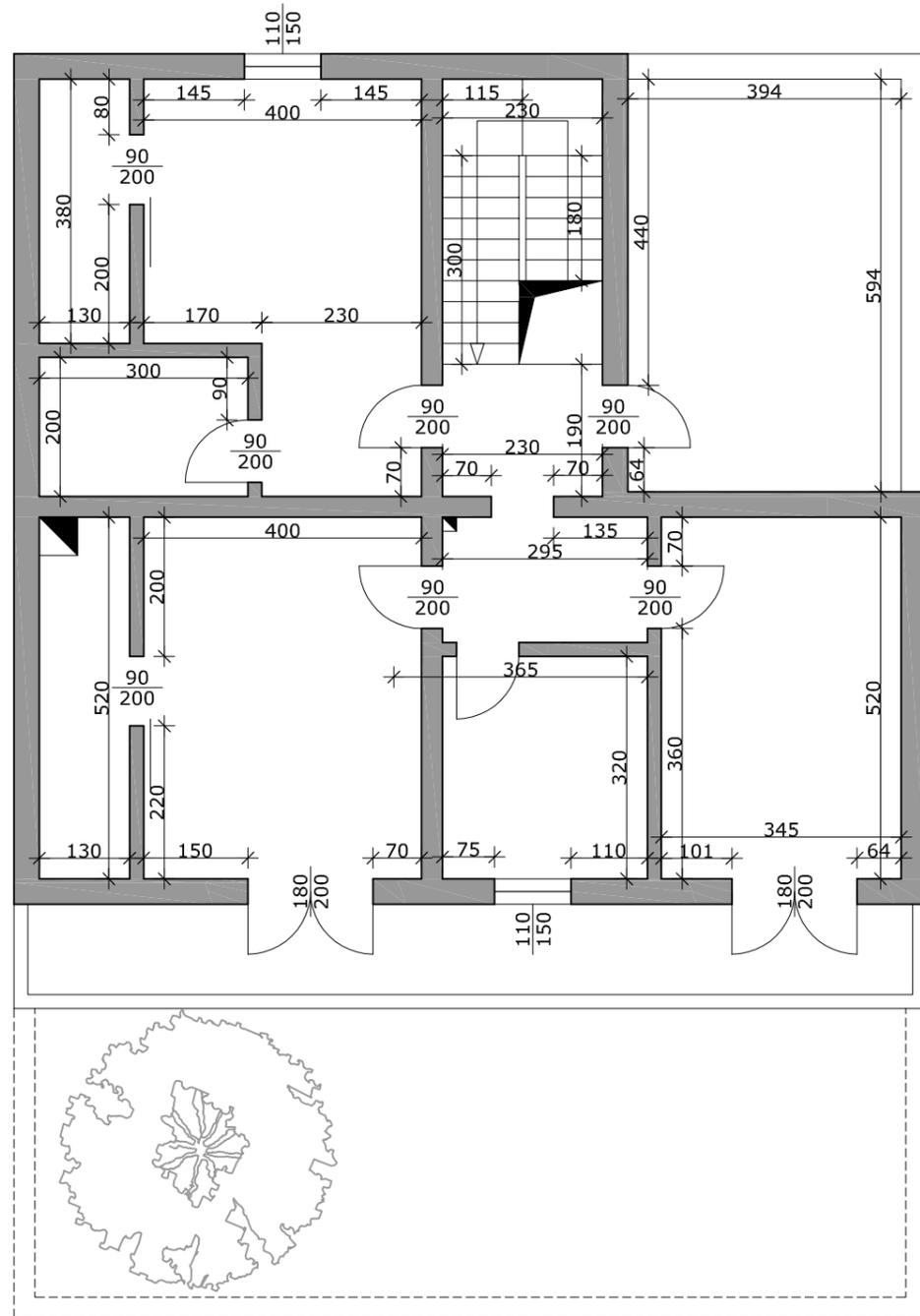
Aggregazione delle unità scala 1:200



Pianta arredata scala 1:100

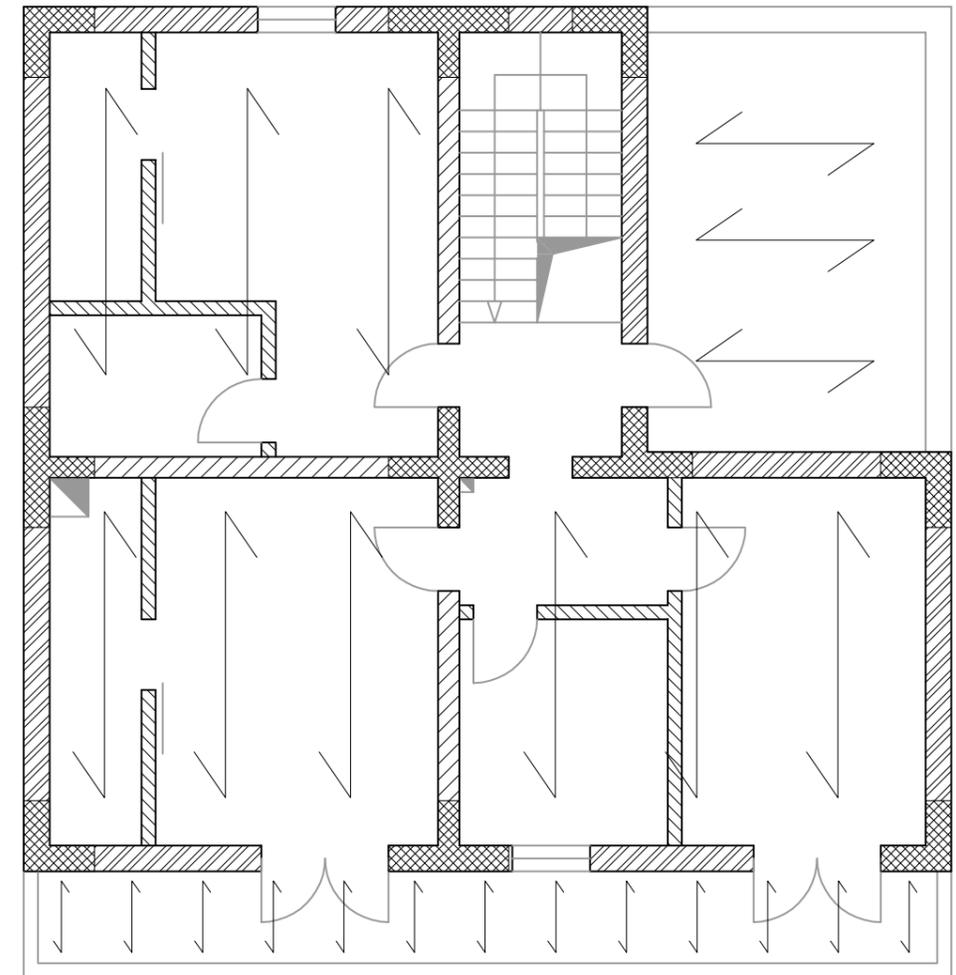
PROGETTO ARCHITETTONICO : PIANTE

# Piano primo



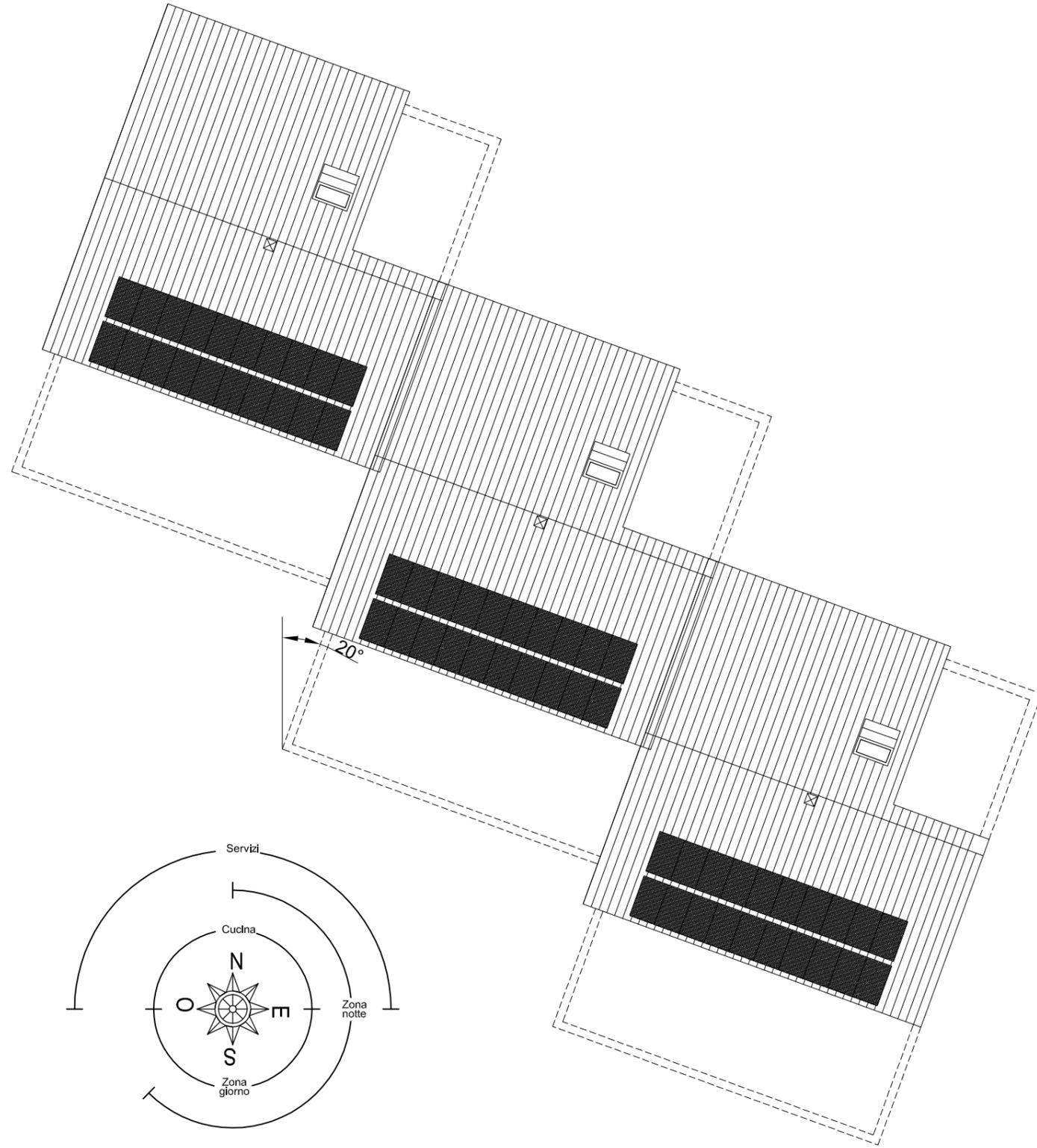
Pianta quotata scala 1:100

-  100 cm di muratura portante continua negli incroci d'angolo e intersezione dei maschi murari NTC 2008, Cap.7
-  Muratura pareti portanti interne - Porotherm BIO PLAN (300 mm)
-  Muratura pareti portanti esterne - Porotherm BIO PLAN + EPS (365 mm)
-  Muratura pareti divisorie (200 mm)

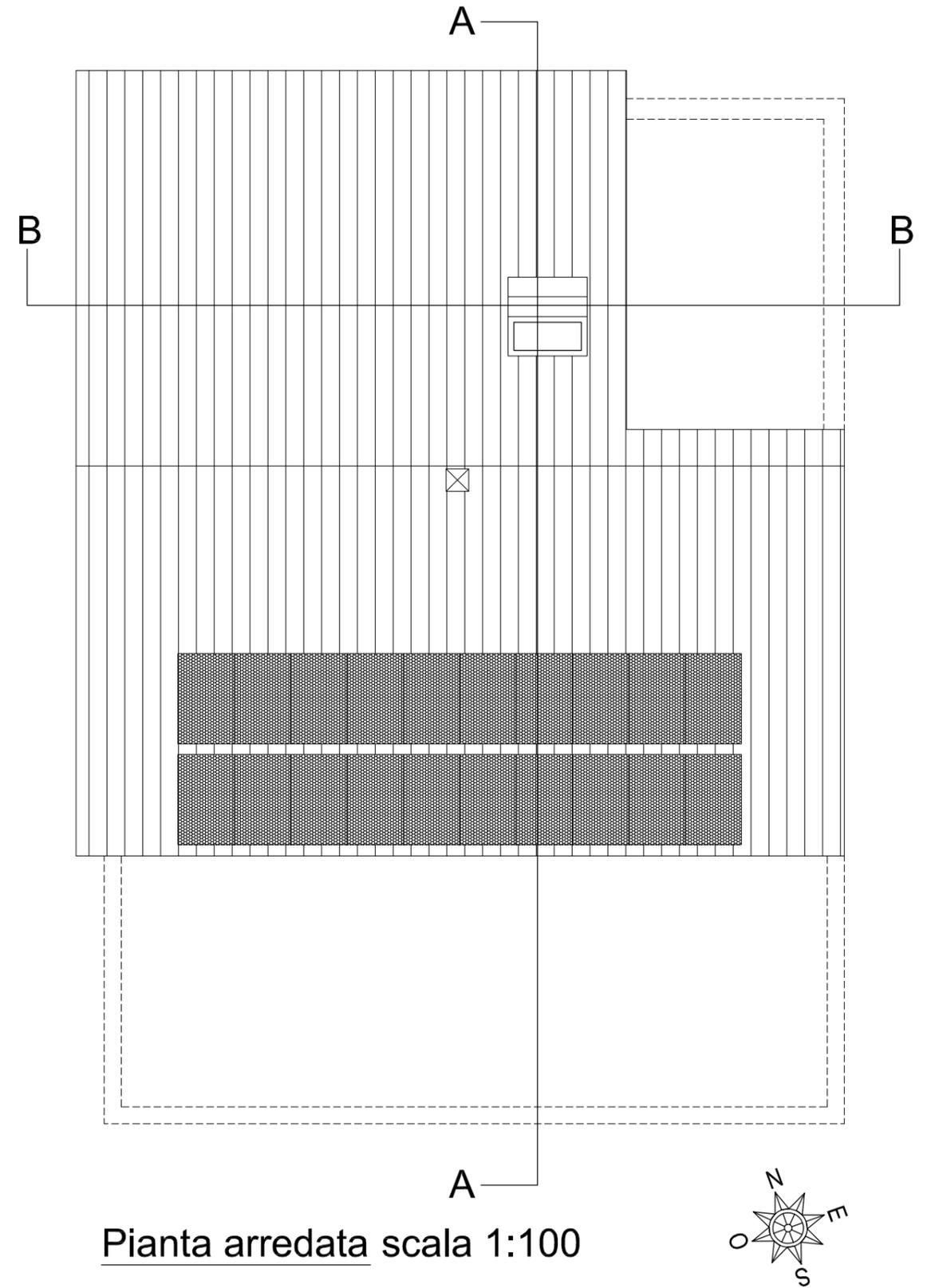


Pianta strutturale scala 1:100

# Copertura

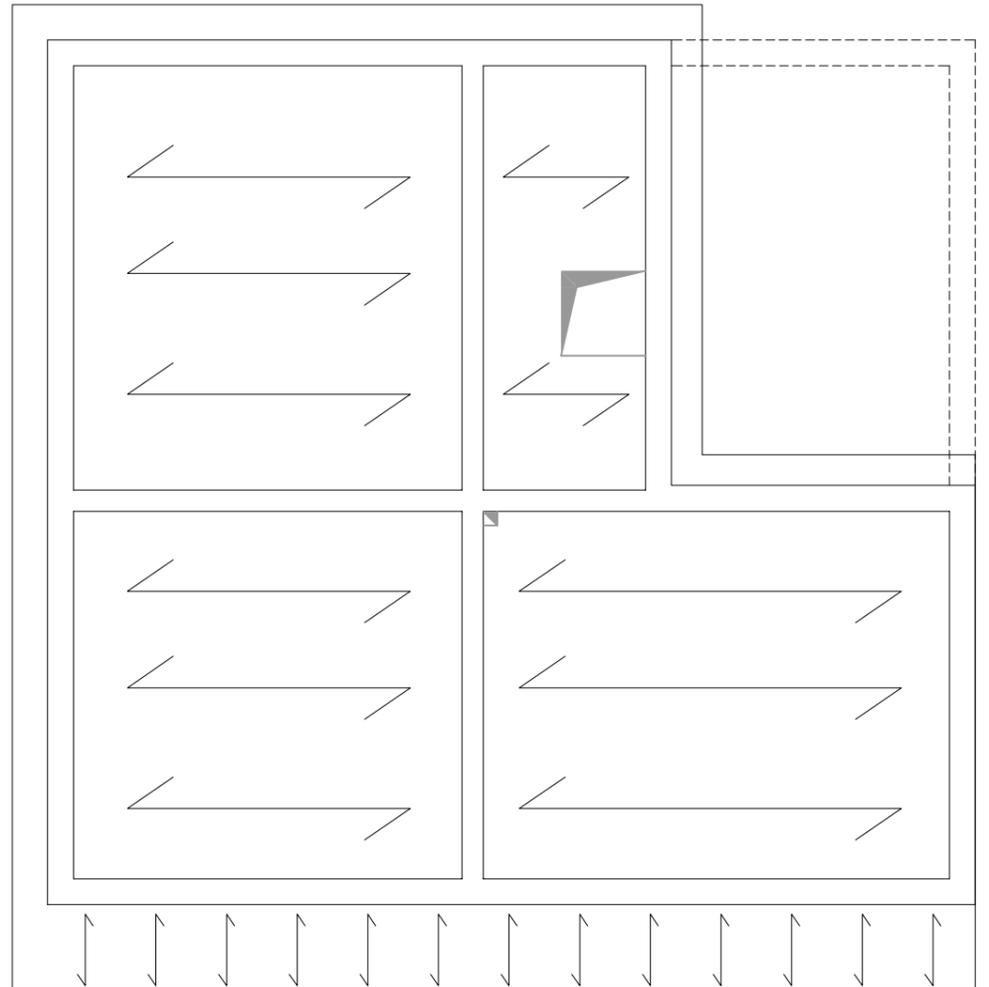
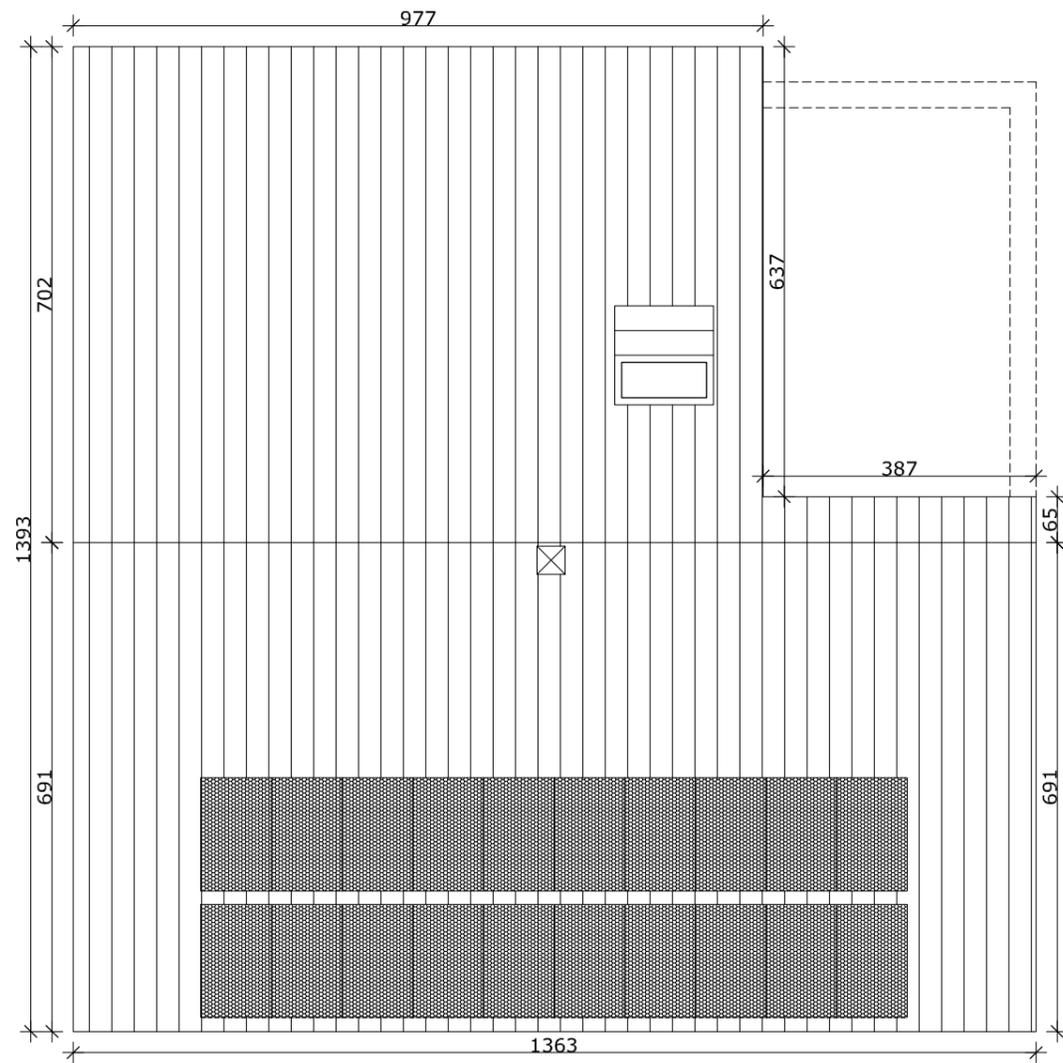


Aggregazione delle unità scala 1:200



Pianta arredata scala 1:100

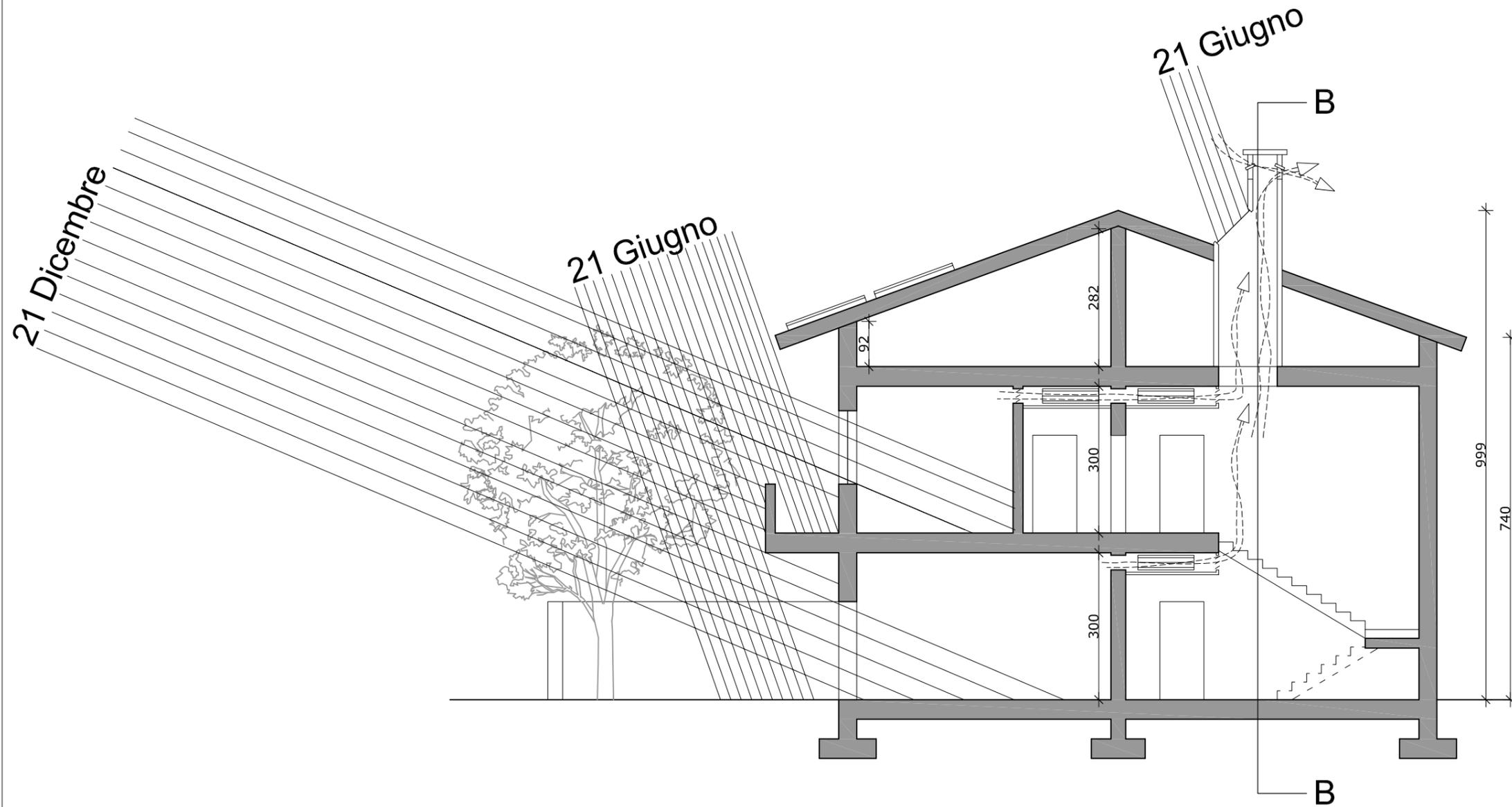
# Copertura



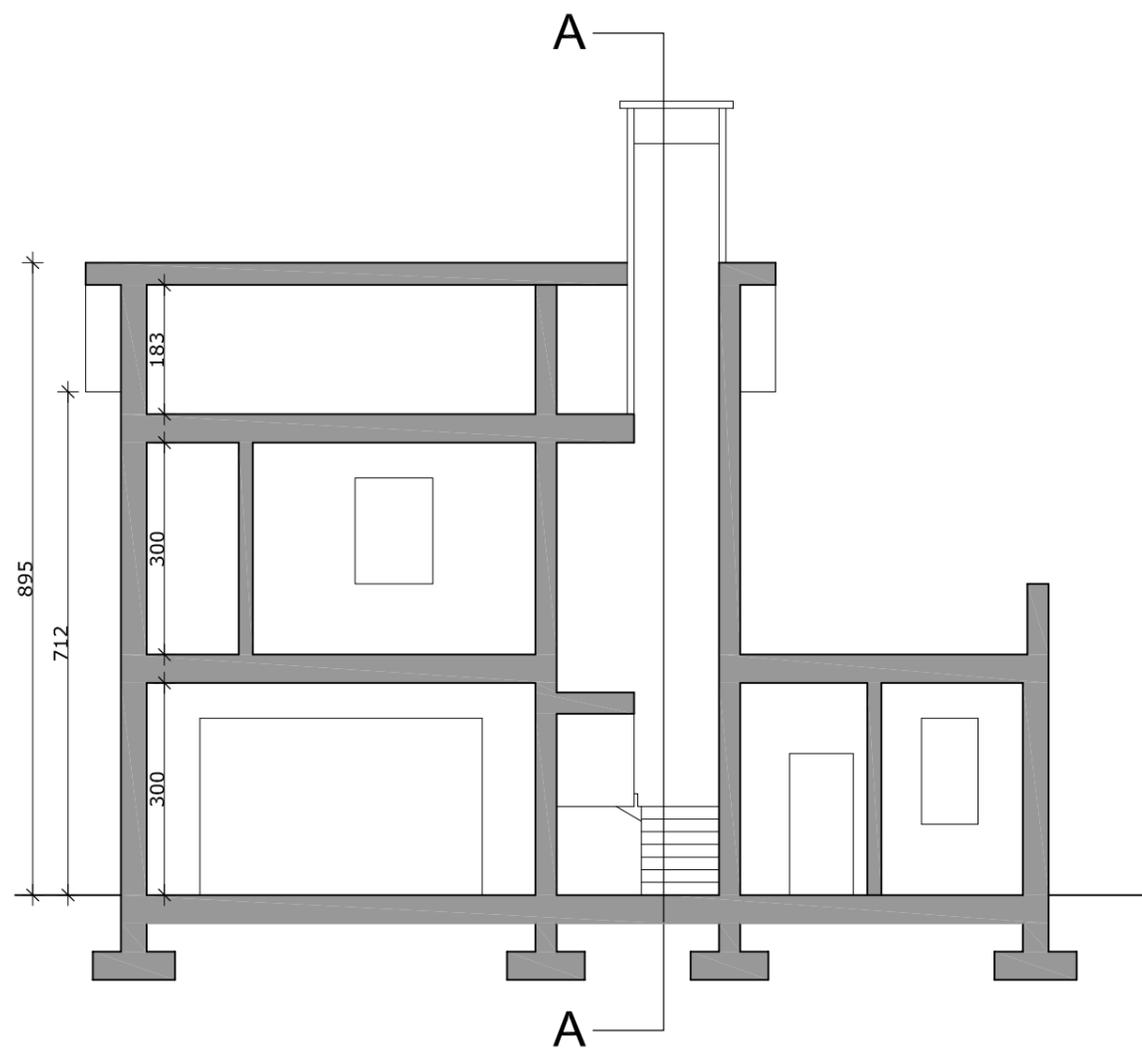
Pianta quotata scala 1:100

Pianta strutturale scala 1:100

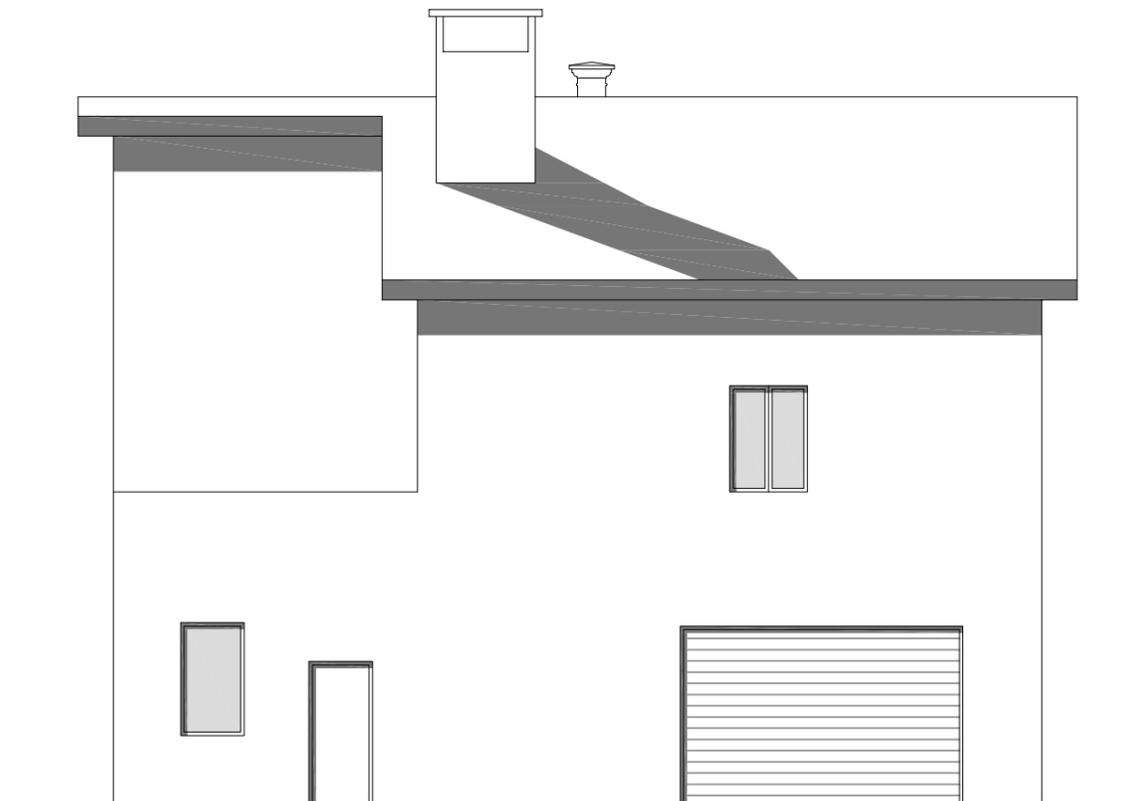
# Sezione A - A scala 1:100



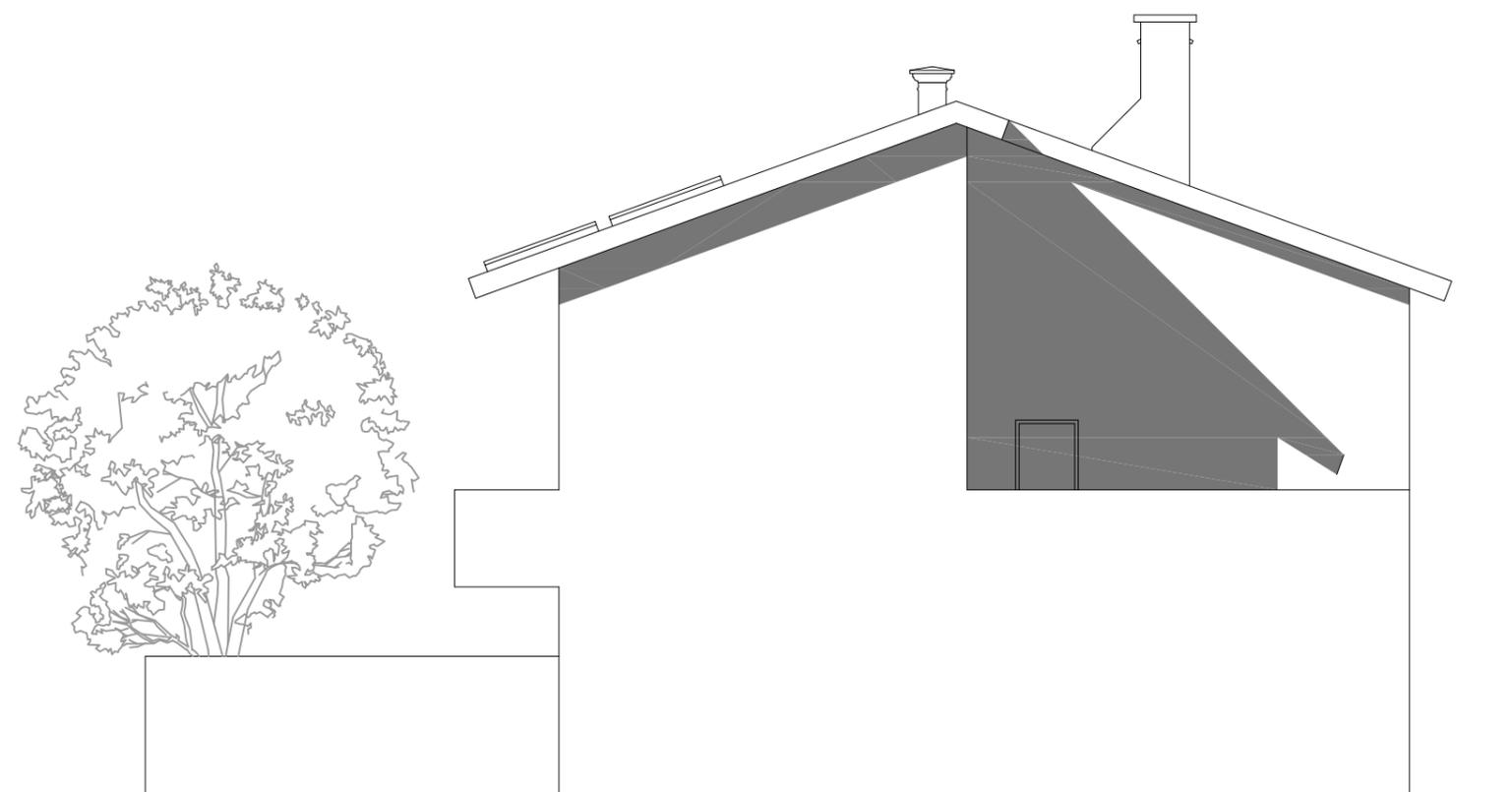
# Sezione B - B scala 1:100



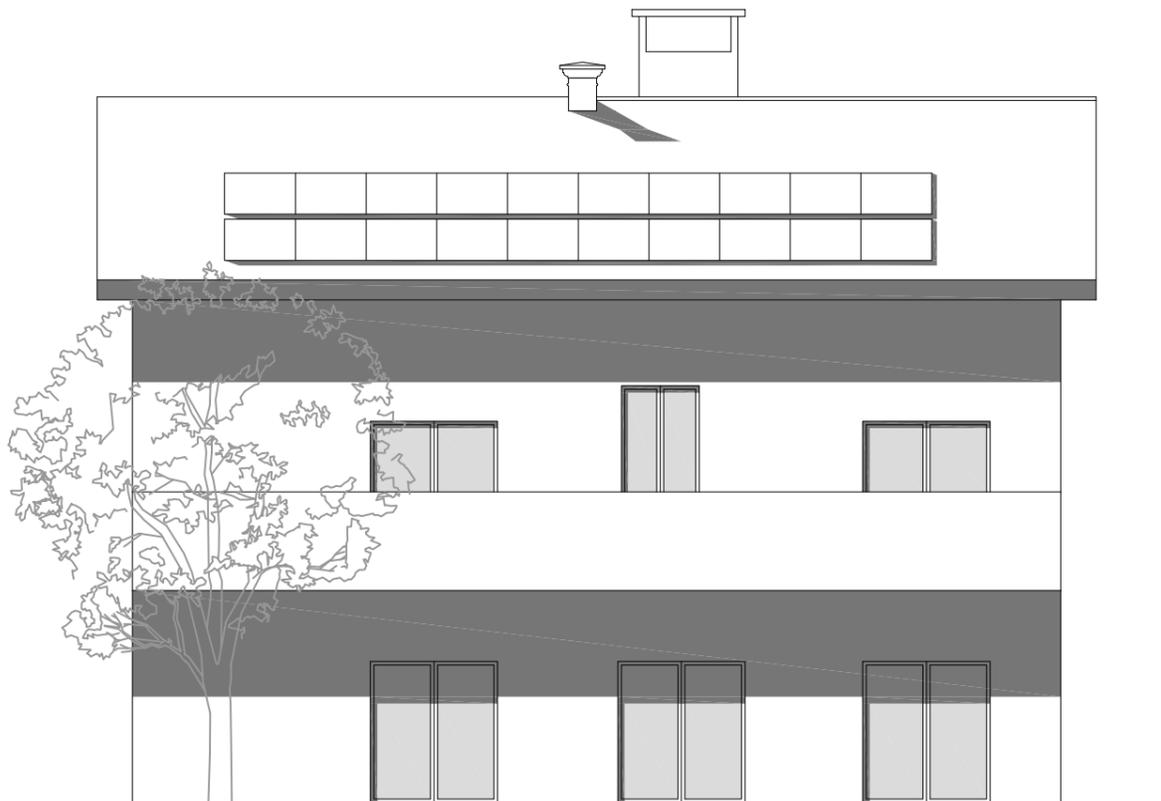
## Prospetto Nord-Est scala 1:100



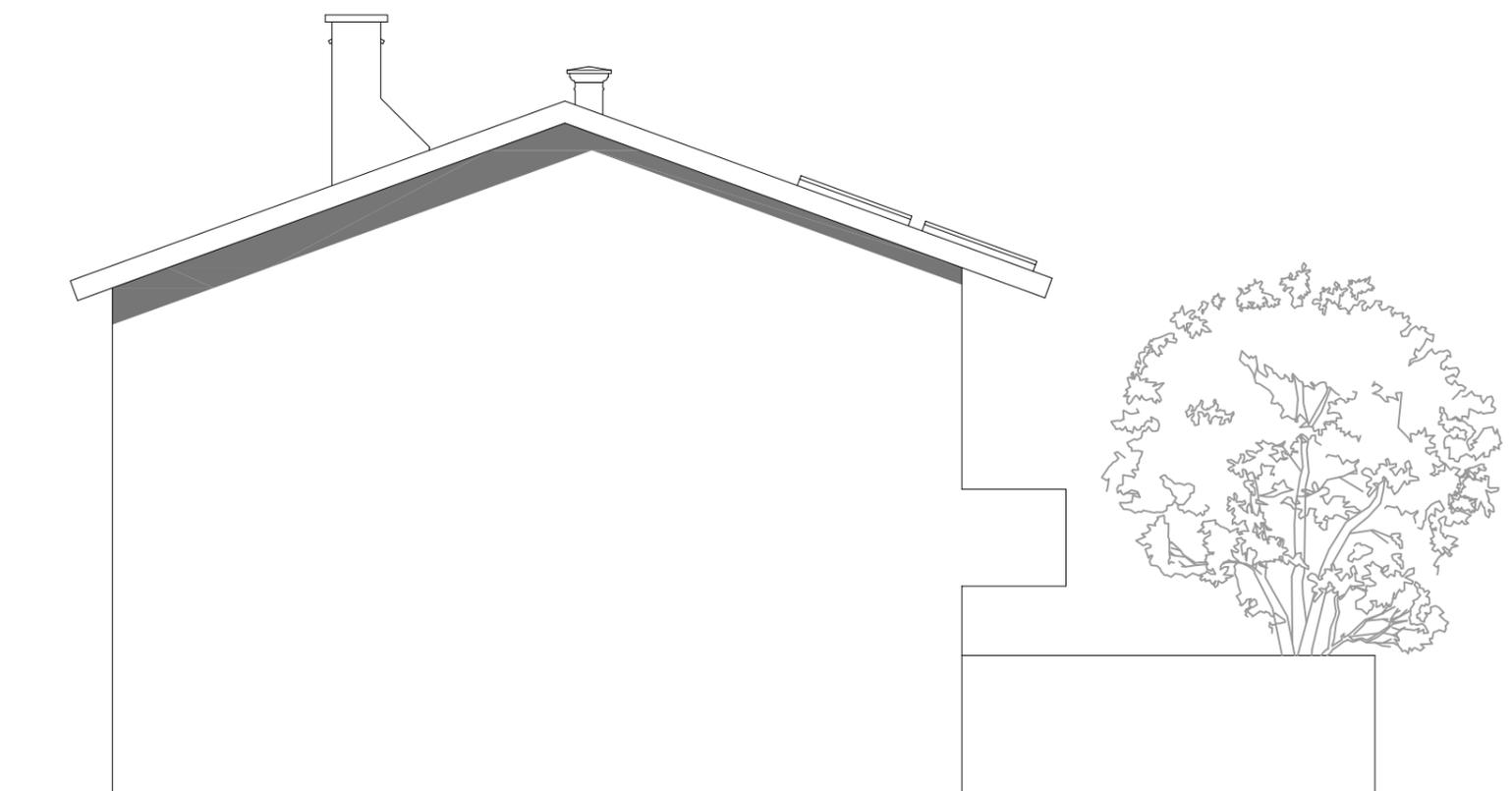
## Prospetto Sud-Est scala 1:100



## Prospetto Sud-Ovest scala 1:100

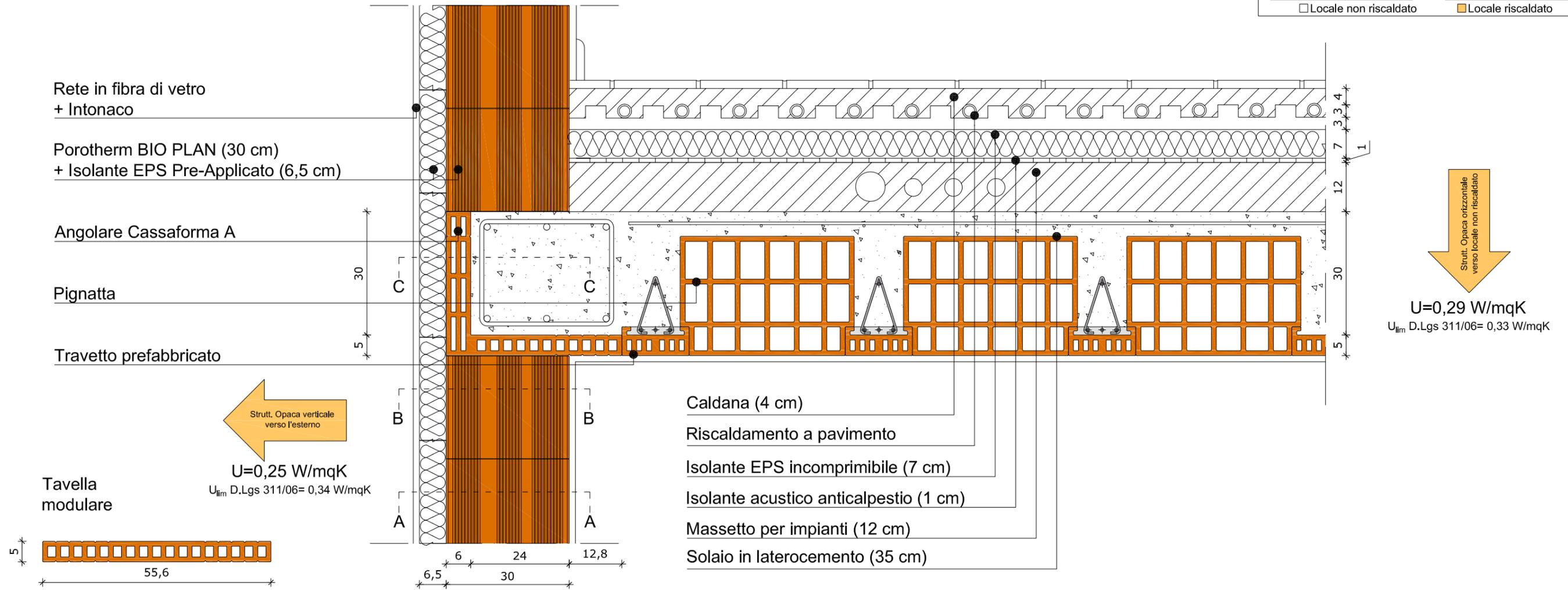
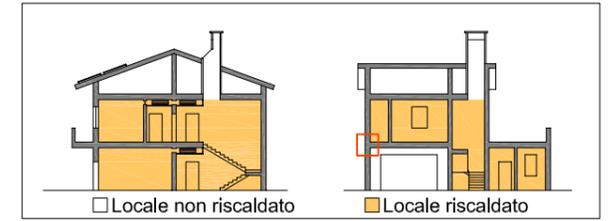


## Prospetto Nord-Ovest scala 1:100

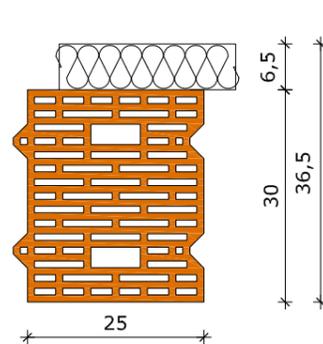
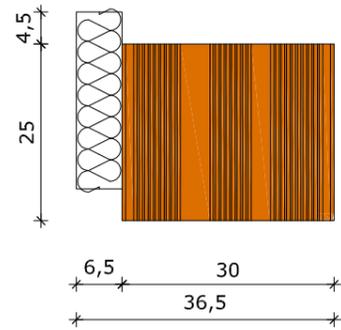


# Dettaglio costruttivo

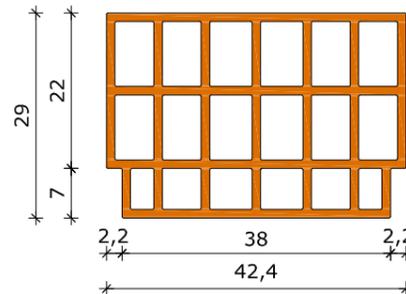
- Nodo 1 - Sezione verticale - Scala 1:10



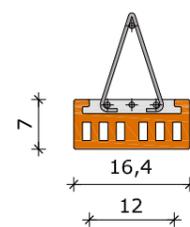
Porotherm BIO PLAN (30 cm)  
+ Isolante EPS Pre-Applicato (6,5 cm)



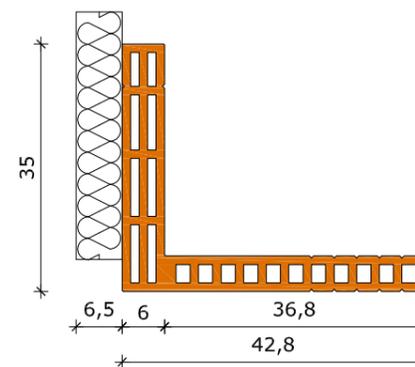
Pignatta A (lung. 25 cm)  
Pignatta B (lung. 13 cm)



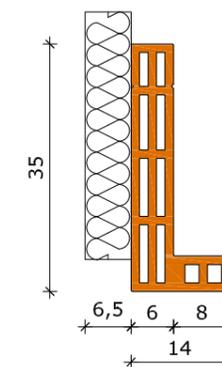
Travetto  
Prefabbricato



Angolare Cassaforma A  
+ Isolante EPS Pre-Applicato (6,5 cm)

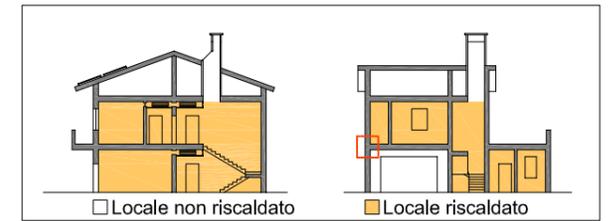


Angolare Cassaforma B  
+ Isolante EPS Pre-Applicato (6,5 cm)

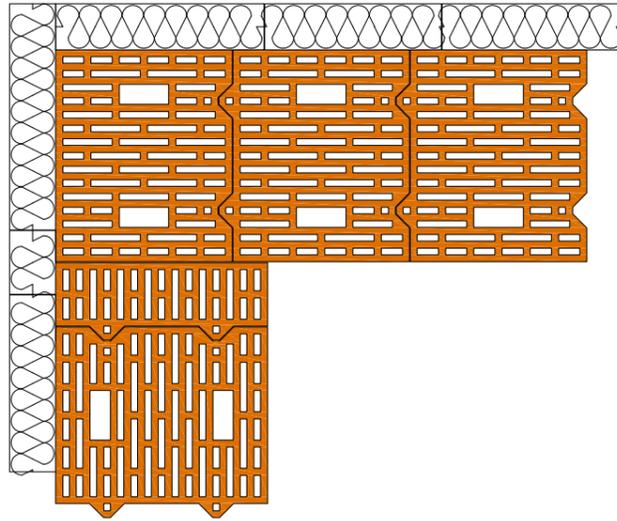


# Dettaglio costruttivo

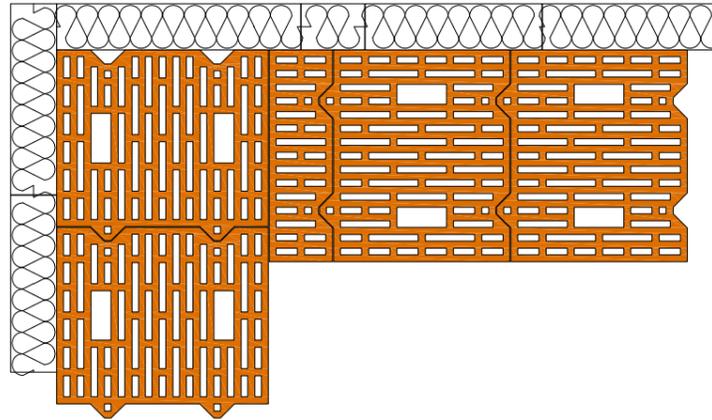
- Nodo 1 - Sezioni orizzontali - Scala 1:10



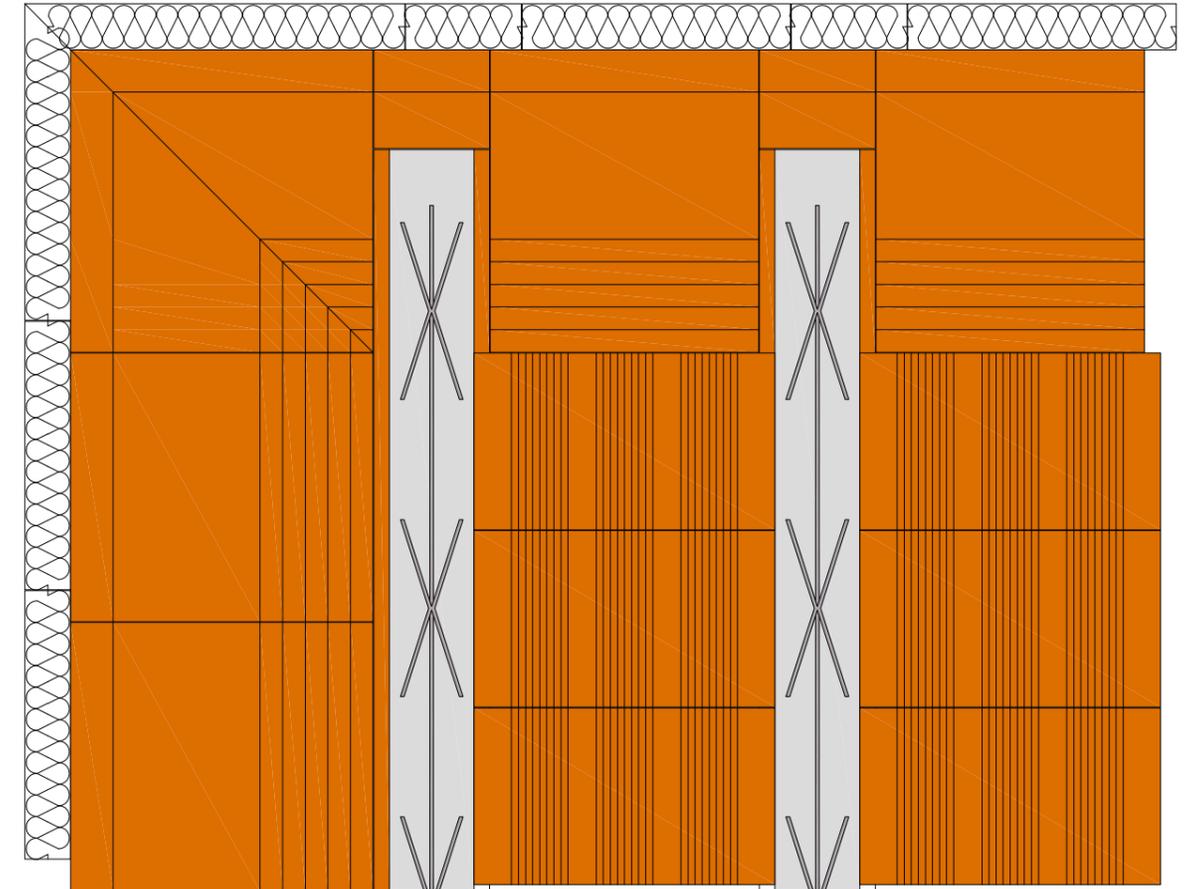
Sezione A-A



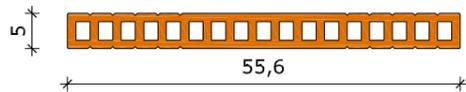
Sezione B-B



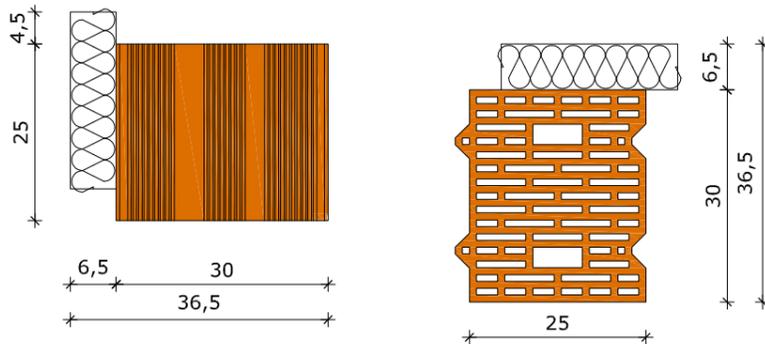
Sezione C-C



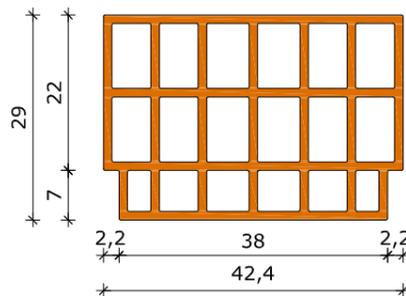
Tavella modulare



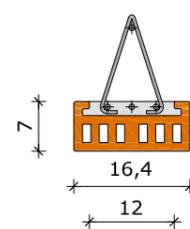
Porotherm BIO PLAN (30 cm)  
+ Isolante EPS Pre-Applicato (6,5 cm)



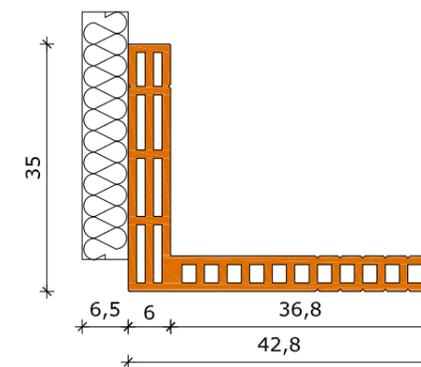
Pignatta A (lung. 25 cm)  
Pignatta B (lung. 13 cm)



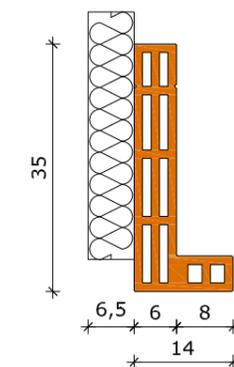
Travetto Prefabbricato



Angolare Cassaforma A  
+ Isolante EPS Pre-Applicato (6,5 cm)

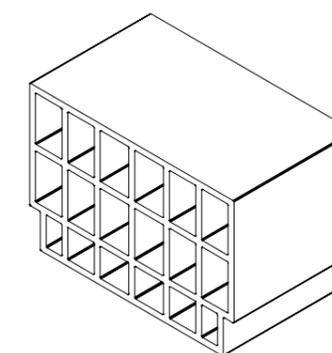
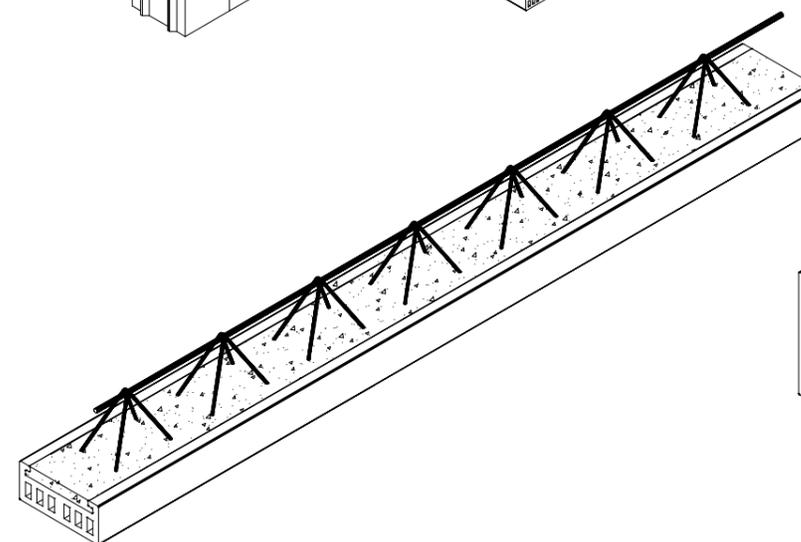
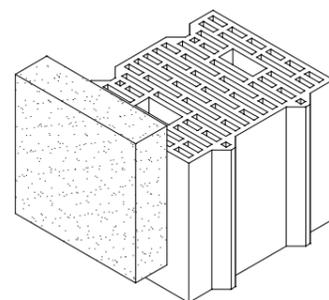
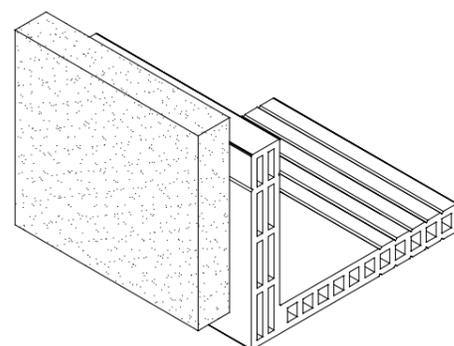
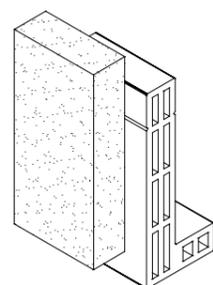
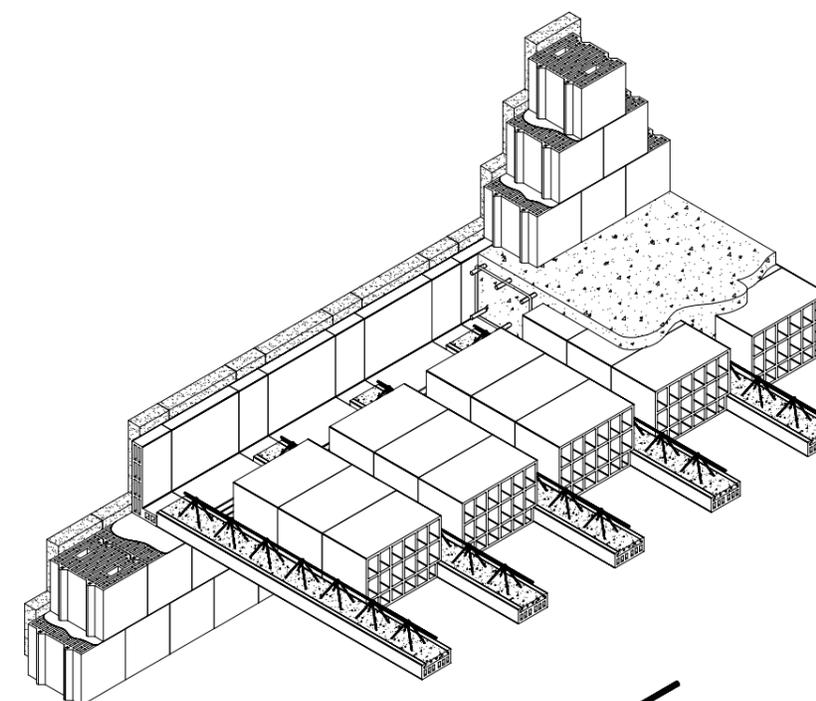
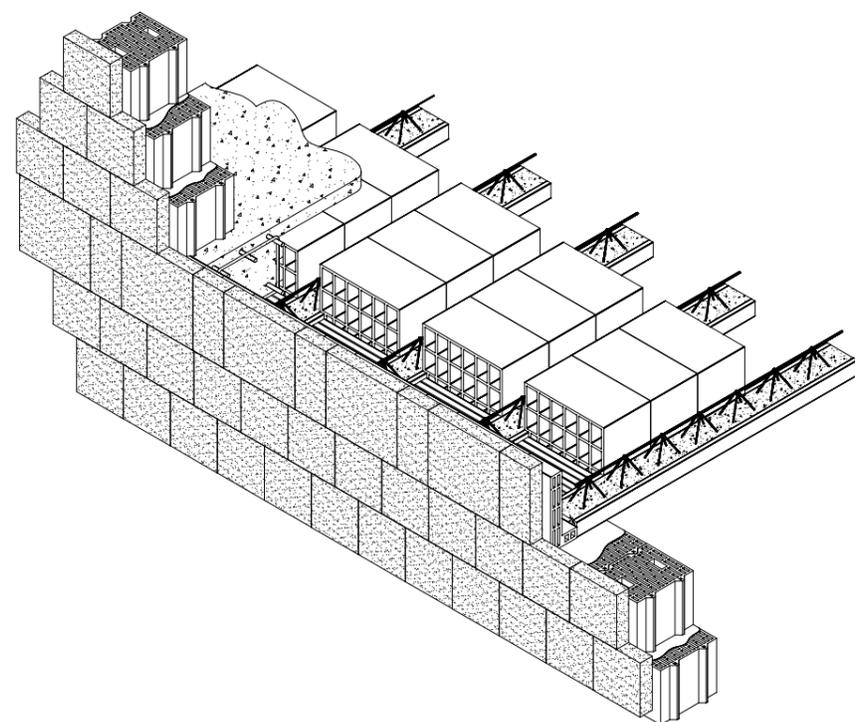
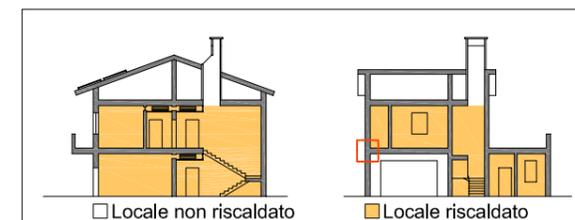


Angolare Cassaforma B  
+ Isolante EPS Pre-Applicato (6,5 cm)



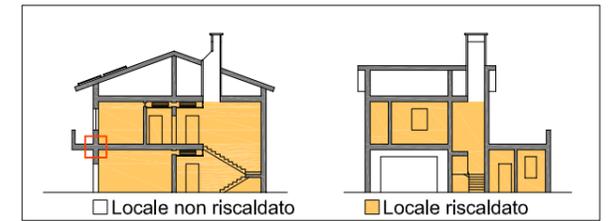
# Dettaglio costruttivo

- Nodo 1 - Spaccato assonometrico

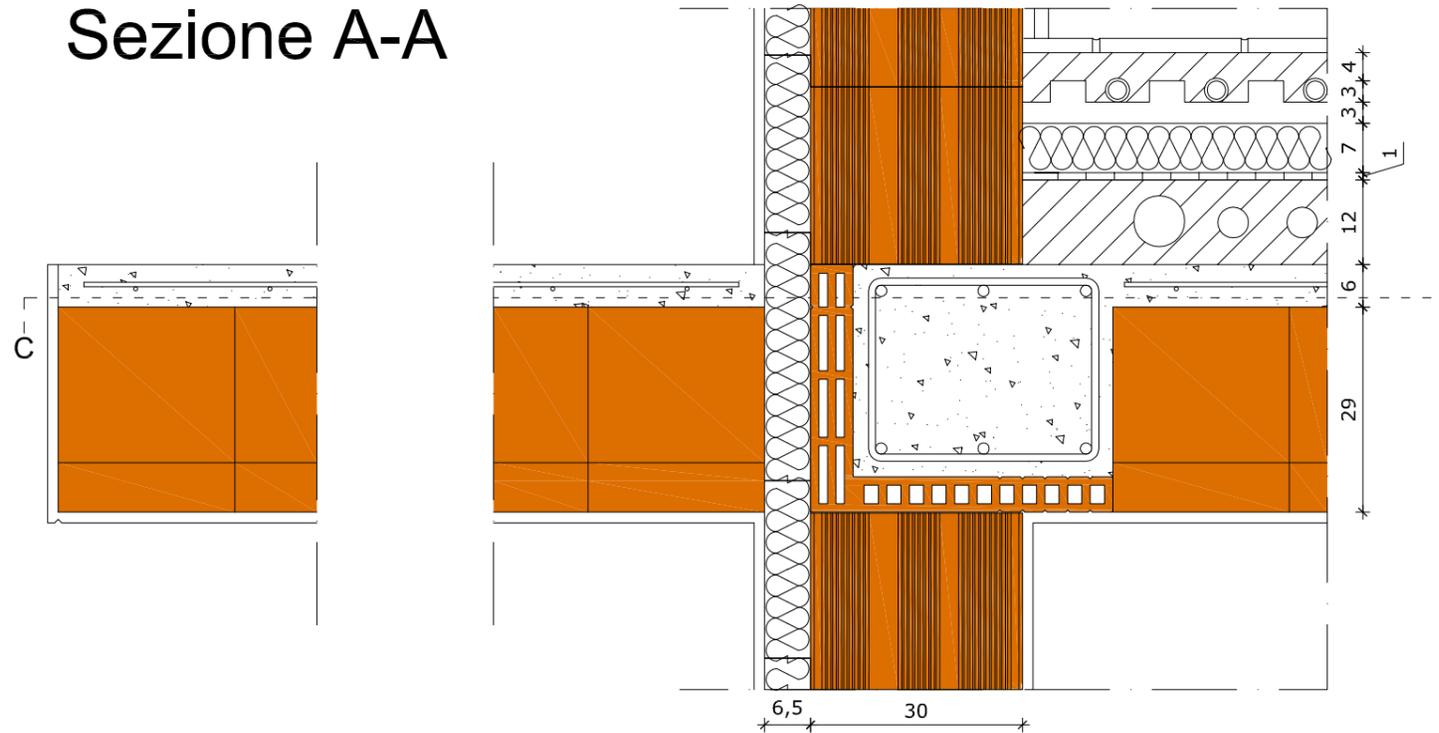


# Dettaglio costruttivo

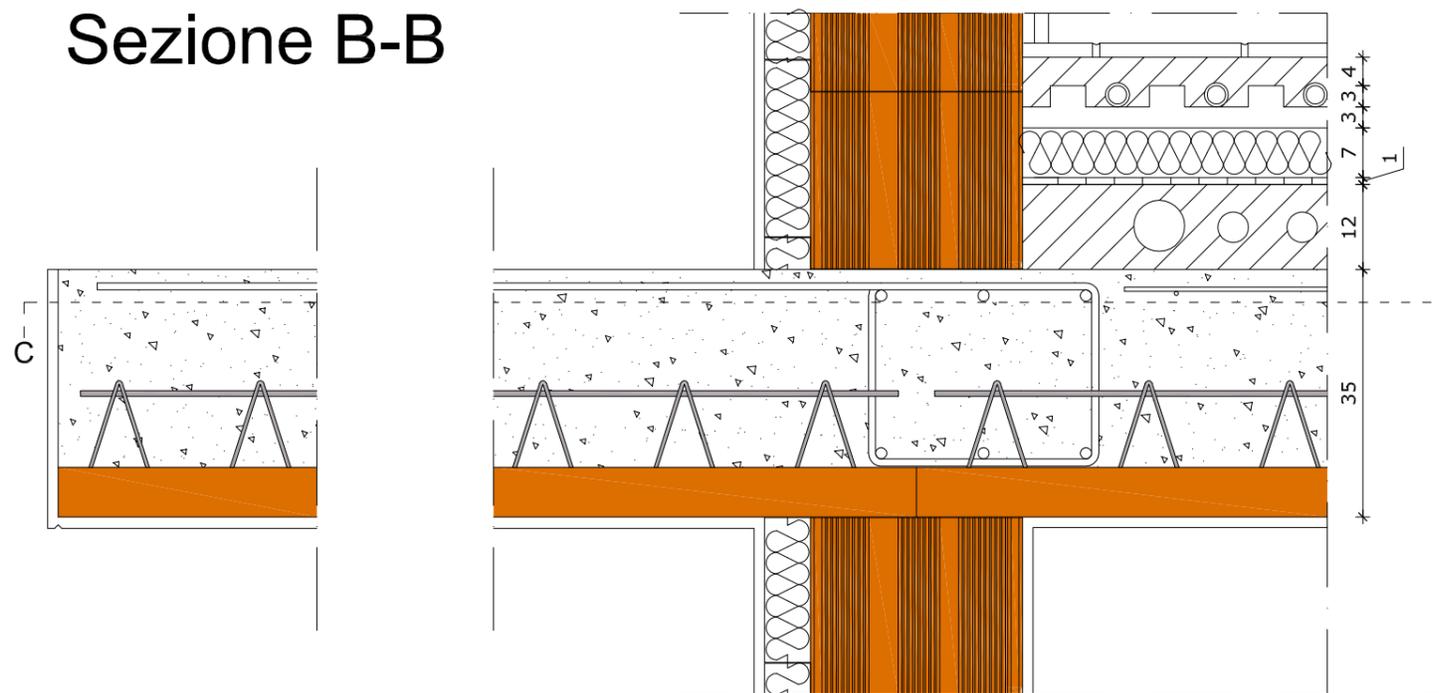
- Nodo 2 - Sezioni verticali - Scala 1:10



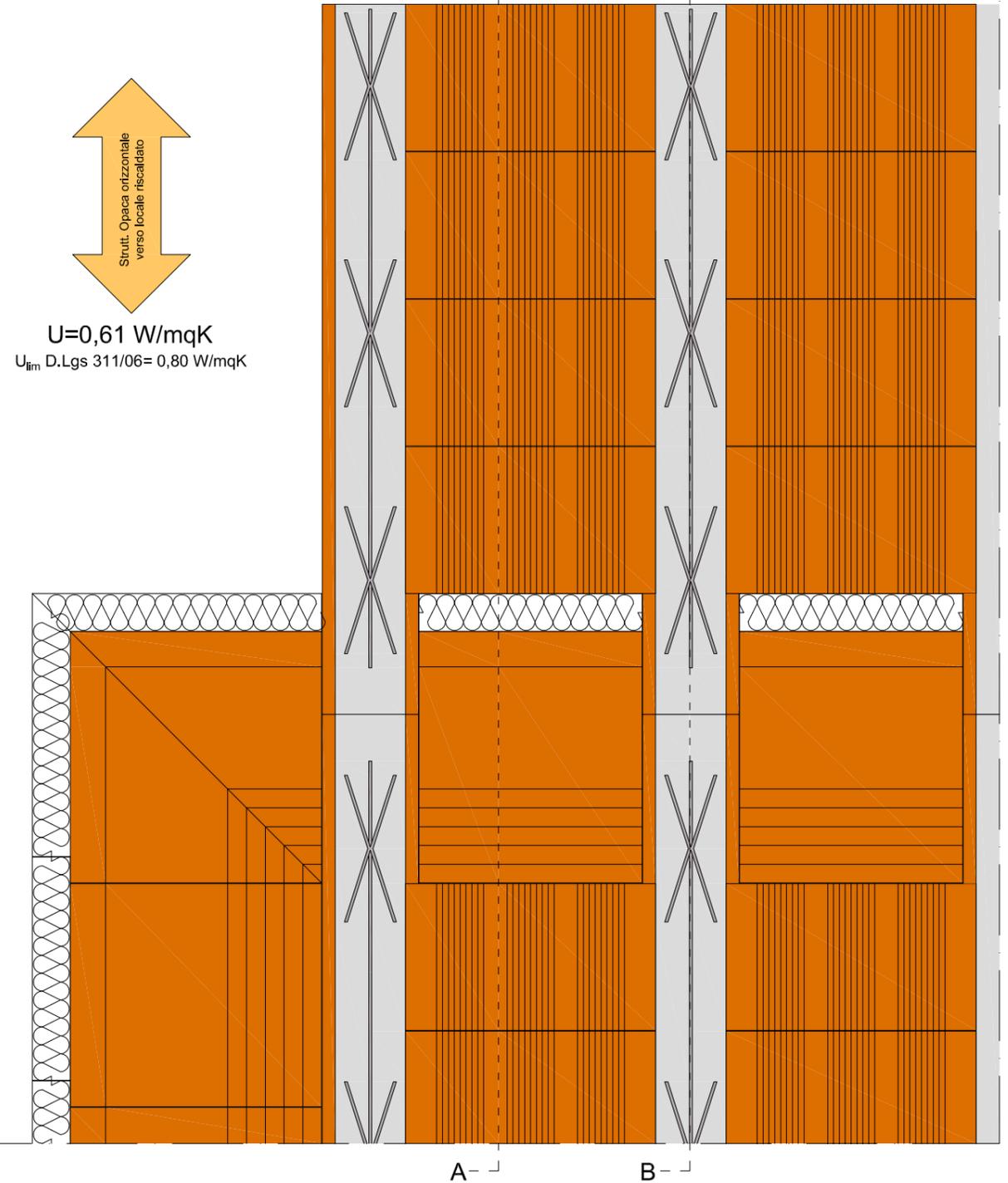
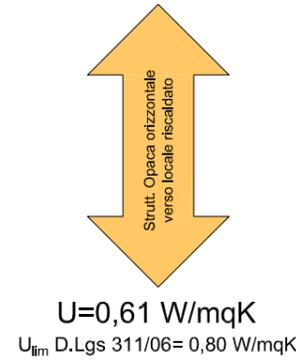
## Sezione A-A



## Sezione B-B

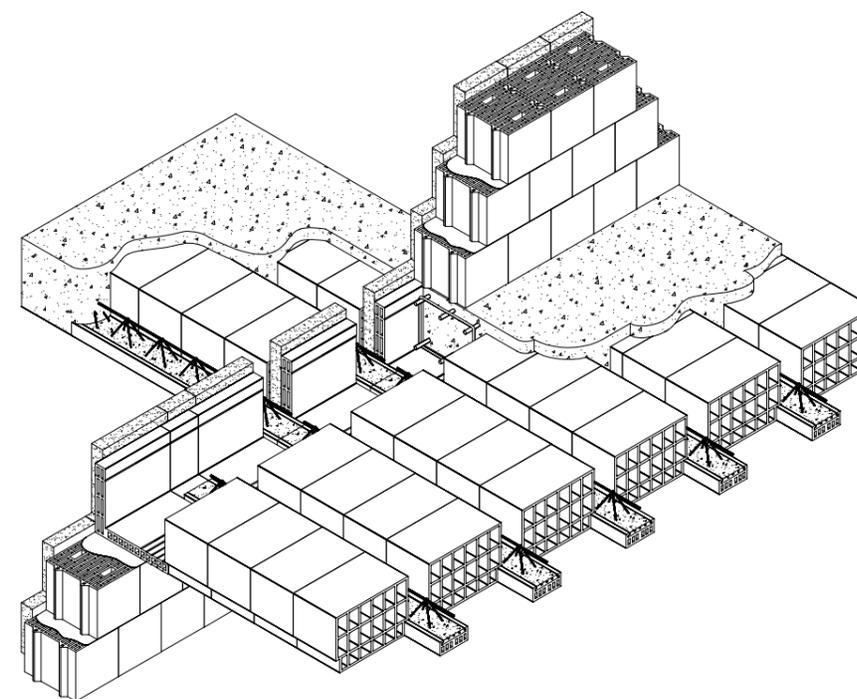
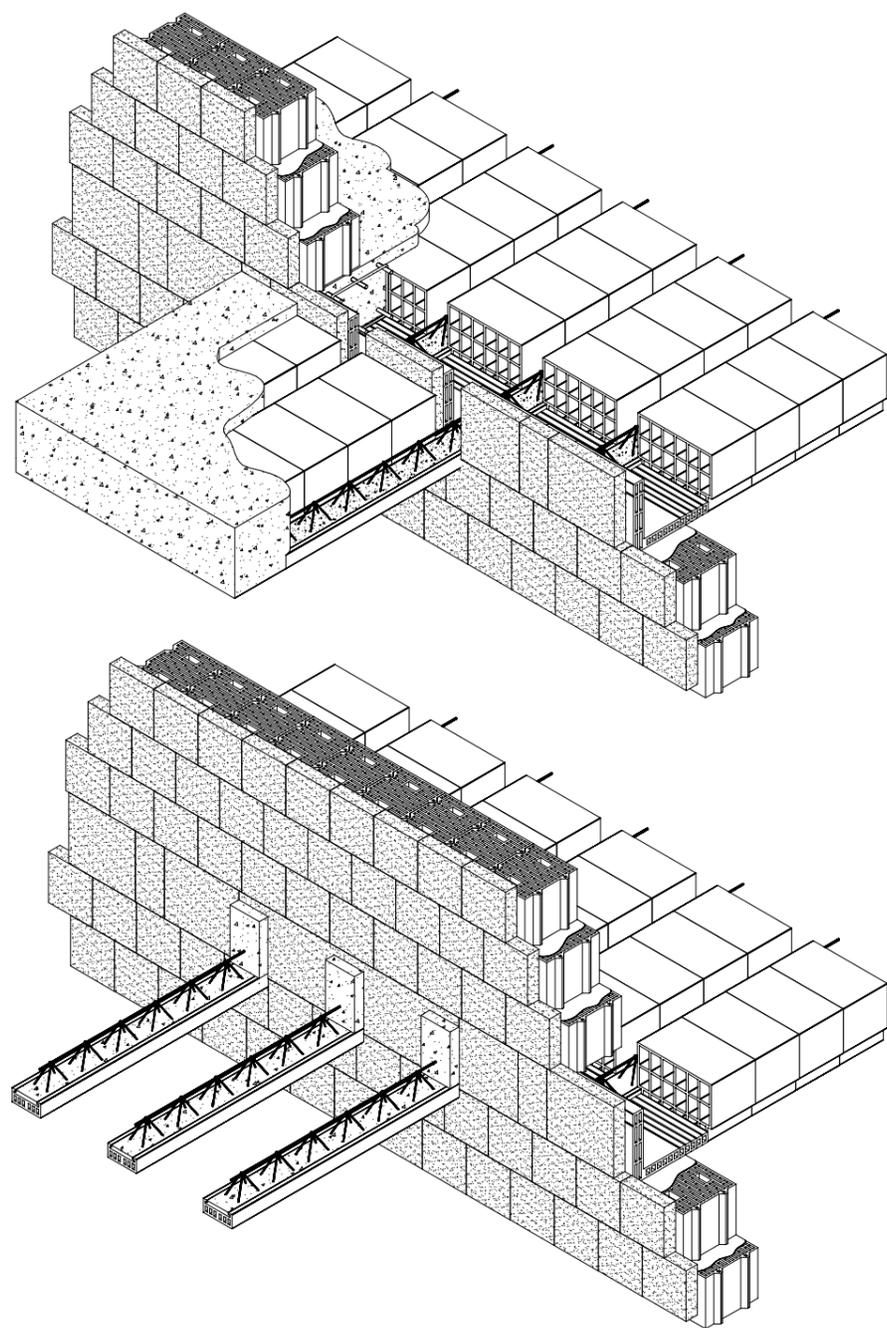
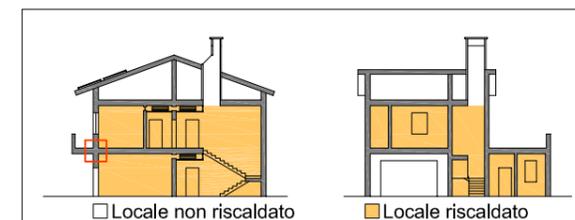


## Sezione C-C



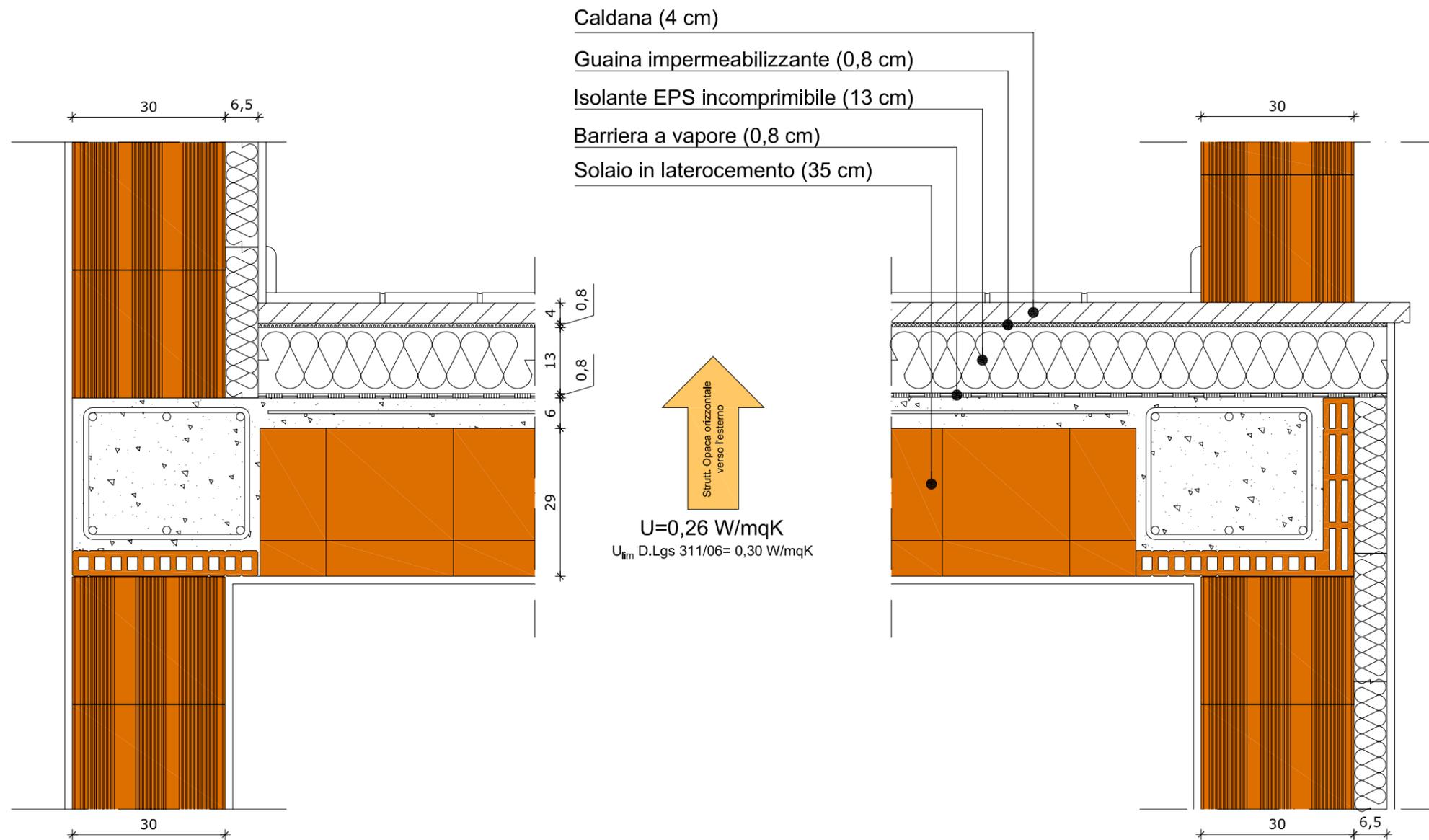
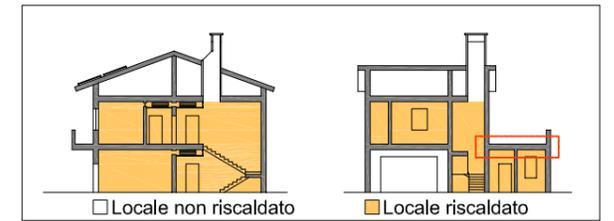
# Dettaglio costruttivo

- Nodo 2 - Spaccato assonometrico



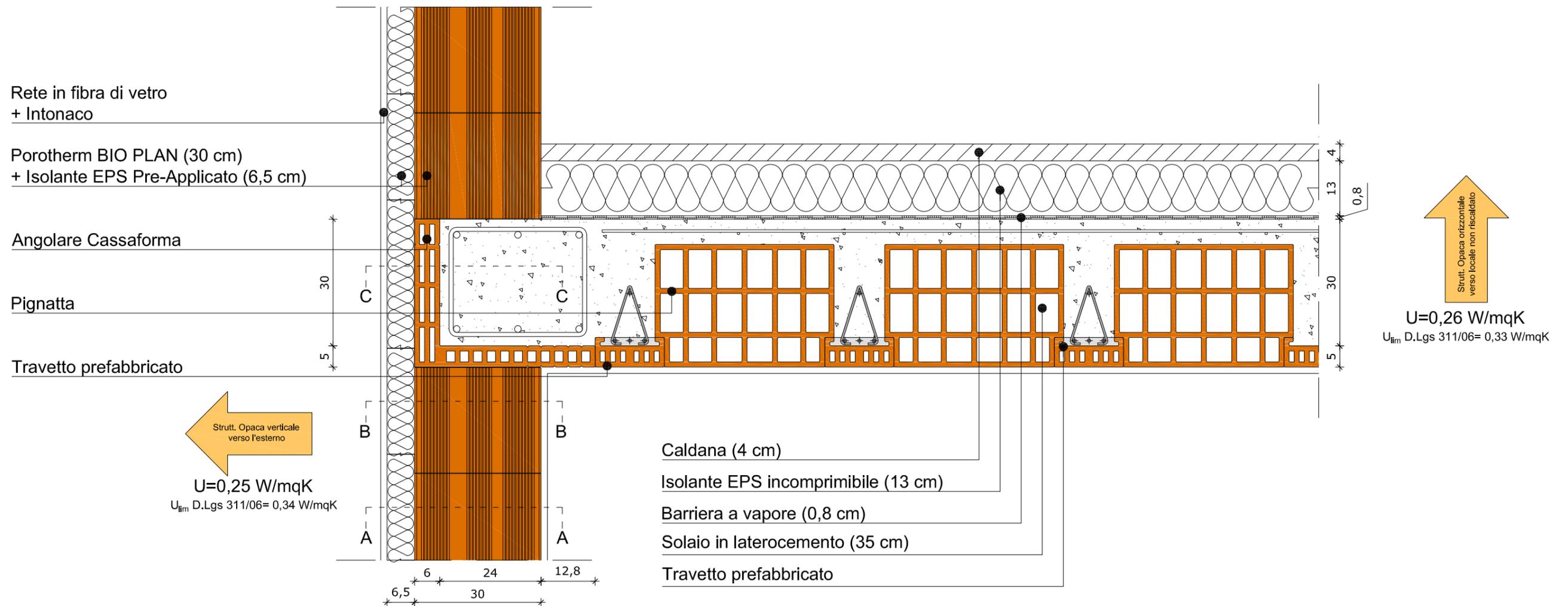
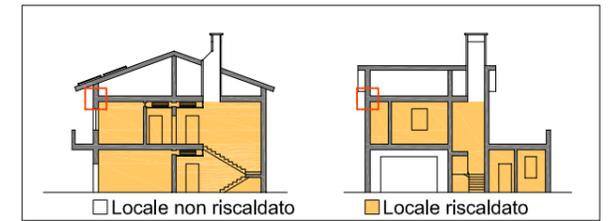
# Dettaglio costruttivo

- Nodo 3 - Sezione verticale - Scala 1:10



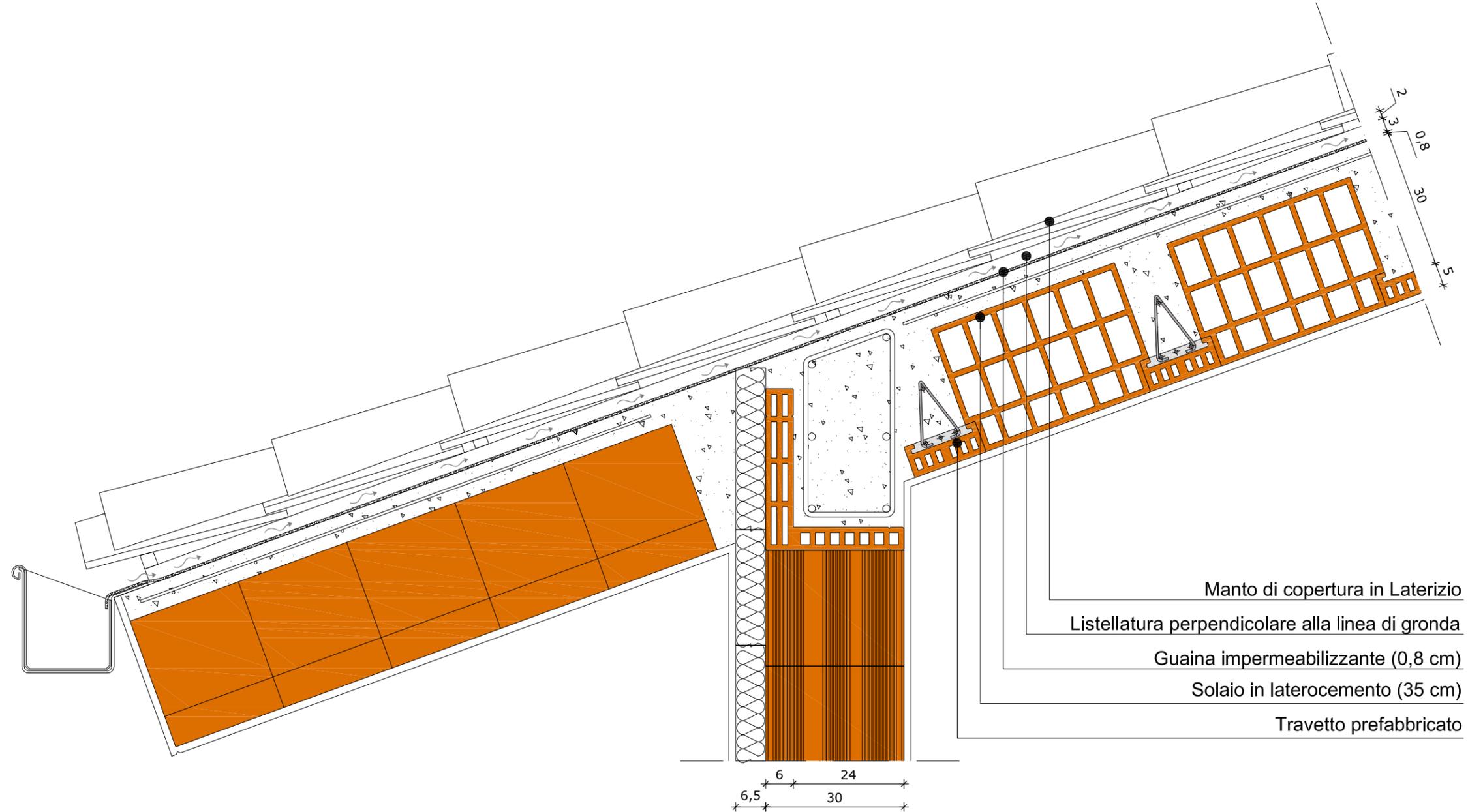
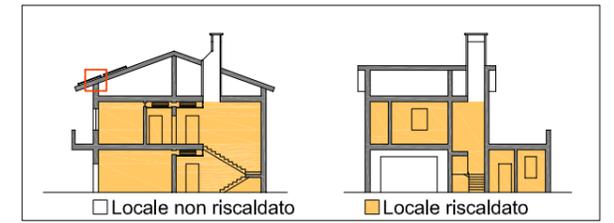
# Dettaglio costruttivo

- Nodo 4 - Sezione verticale - Scala 1:10



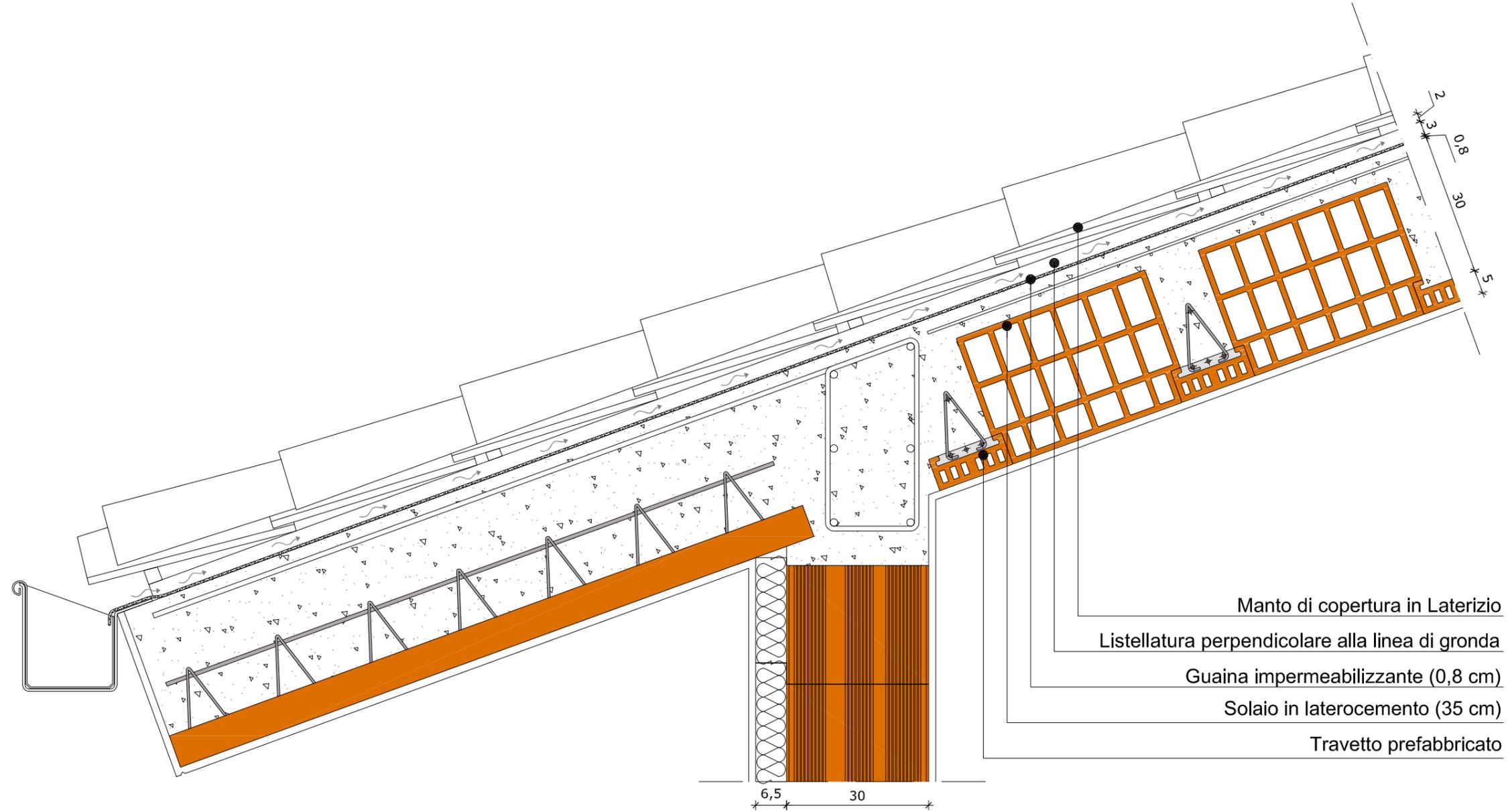
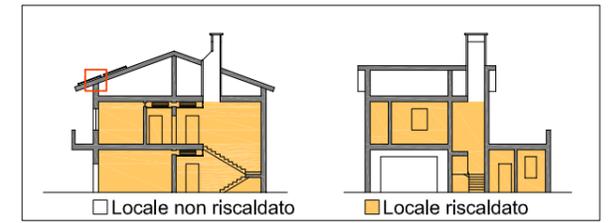
# Dettaglio costruttivo

- Nodo 5 - Sezione verticale - Scala 1:10



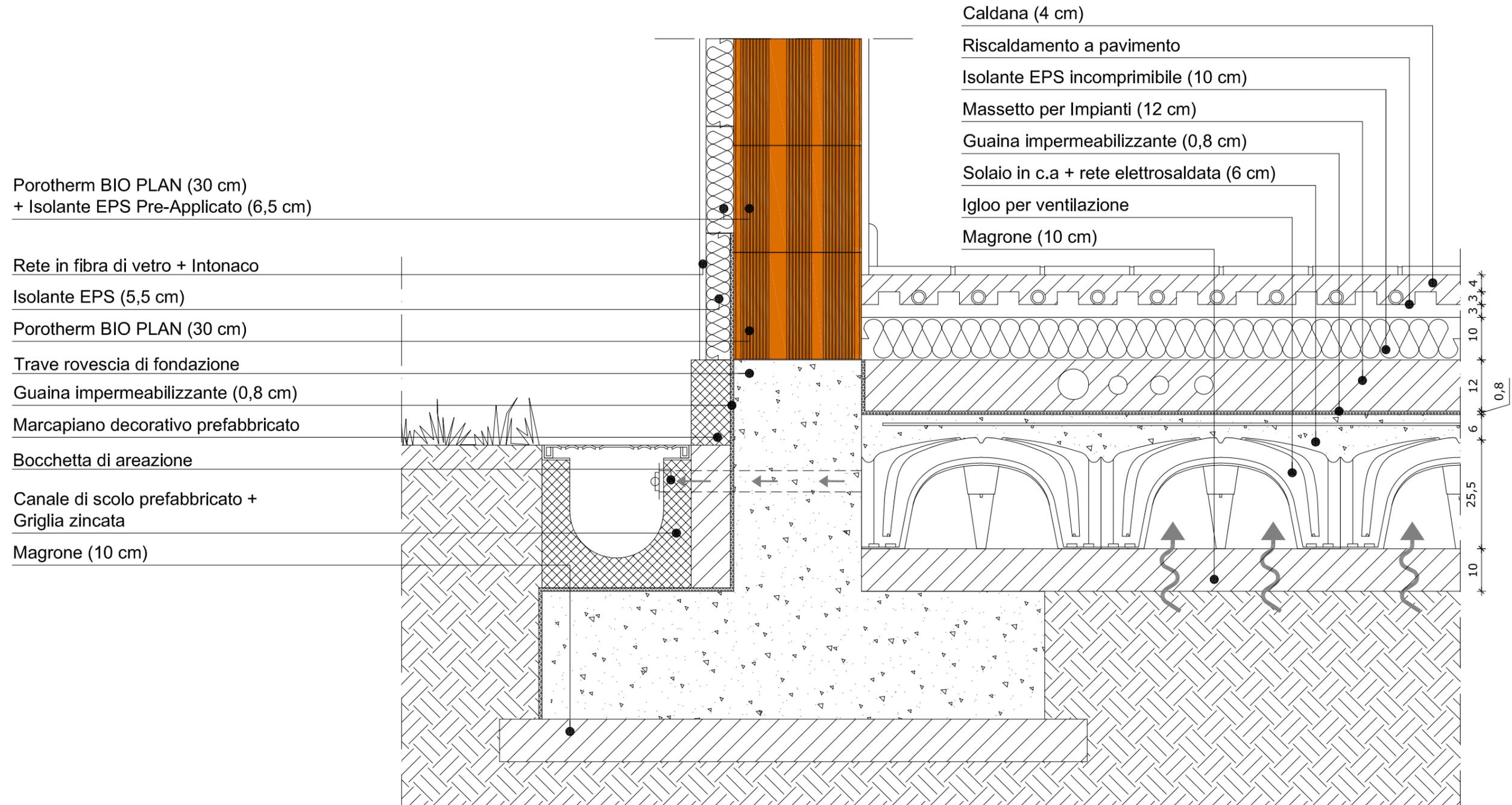
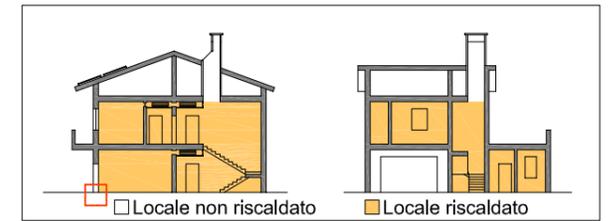
# Dettaglio costruttivo

- Nodo 5 - Sezione verticale - Scala 1:10



# Dettaglio costruttivo

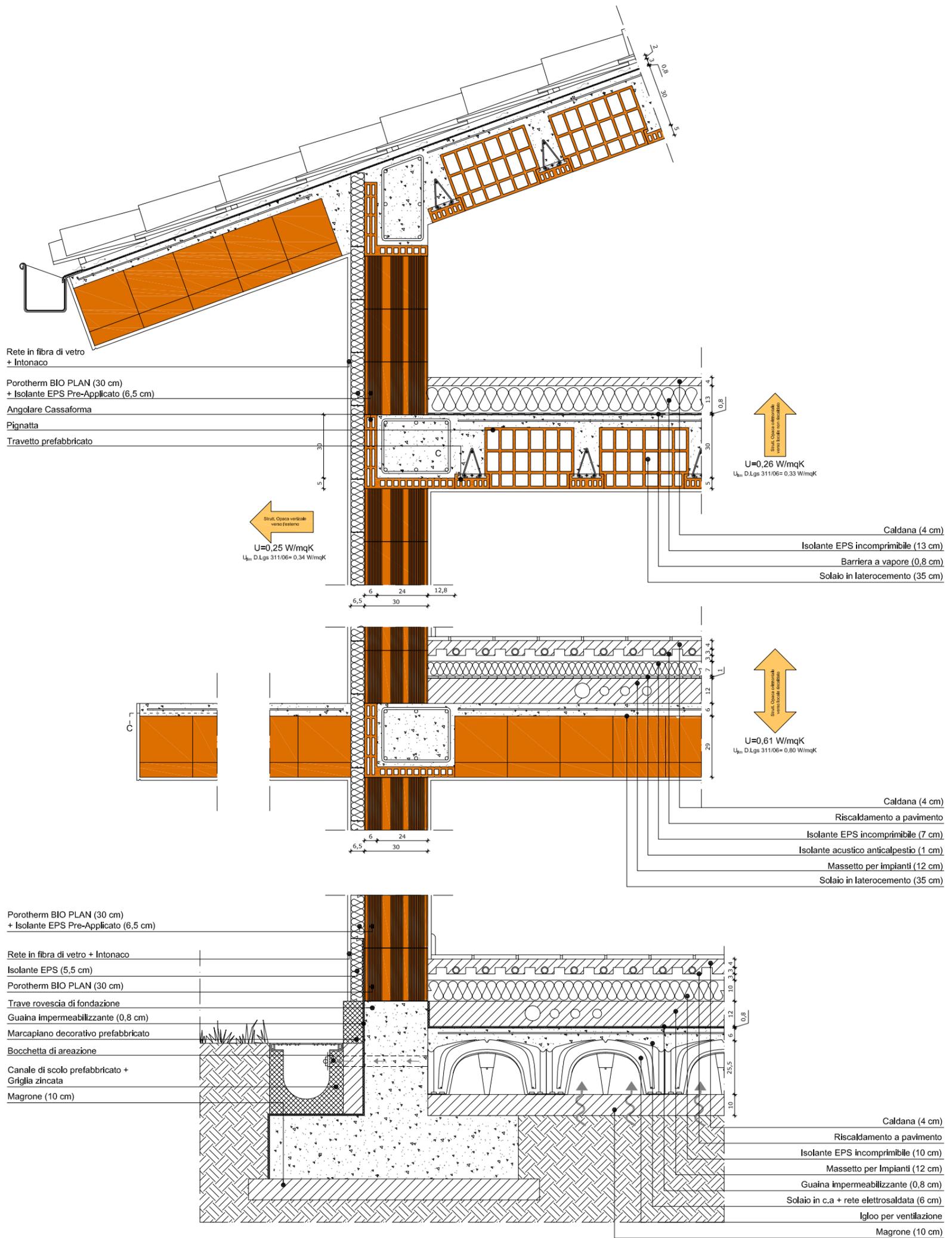
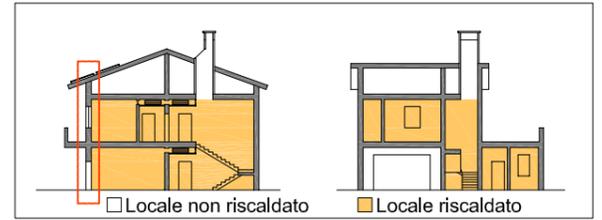
- Nodo 6 - Sezione verticale - Scala 1:10



# Dettaglio costruttivo

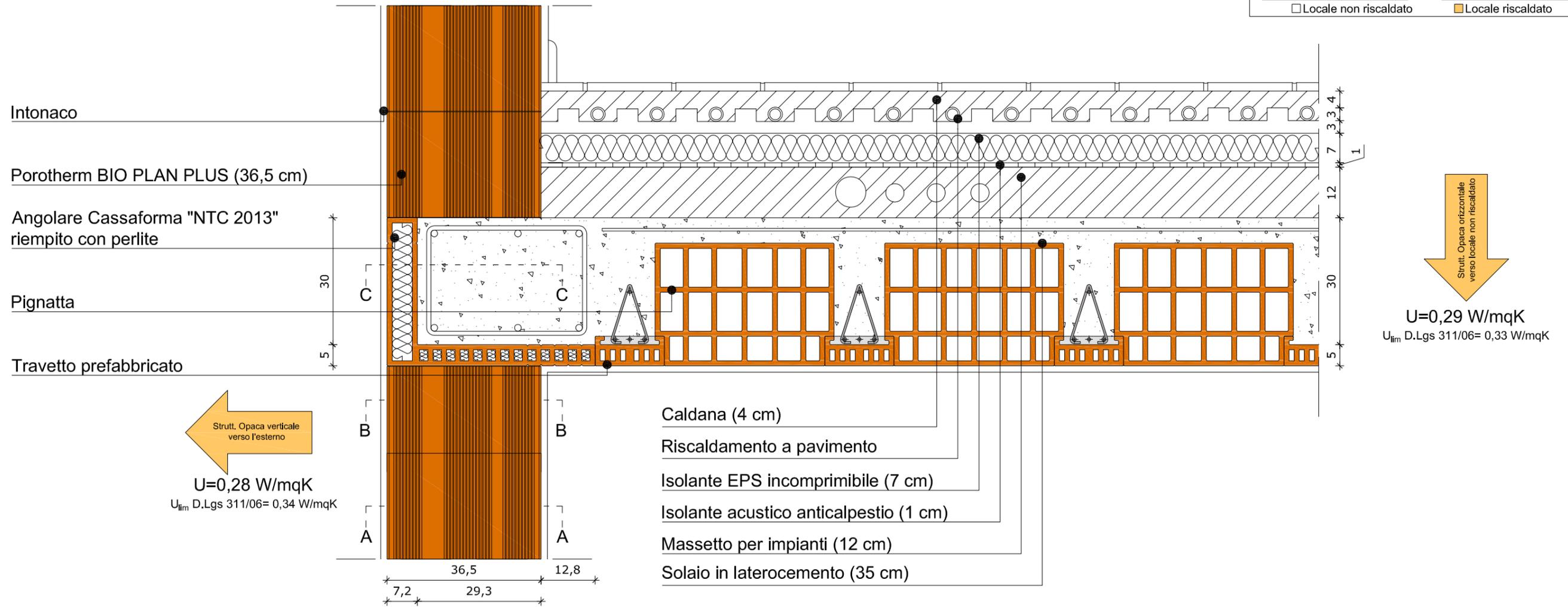
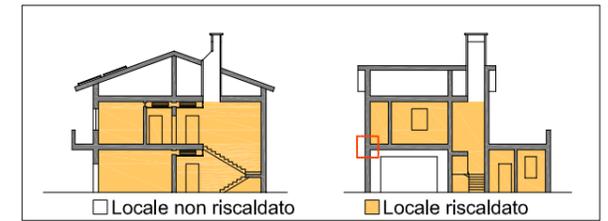
- Sezione verticale cielo-terra

- Scala 1:20

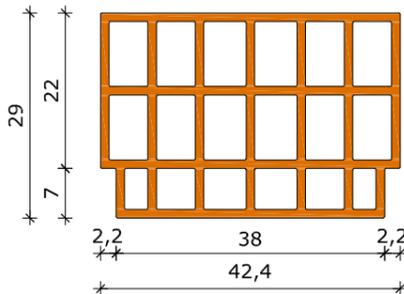


# Dettaglio costruttivo "NTC 2013"

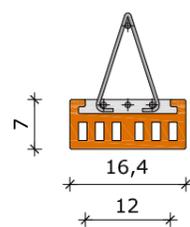
- Nodo 1 - Sezione verticale - Scala 1:10



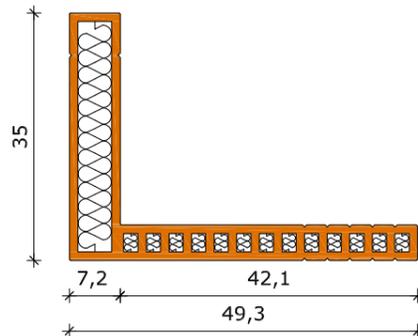
Pignatta A (lung. 25 cm)  
Pignatta B (lung. 13 cm)



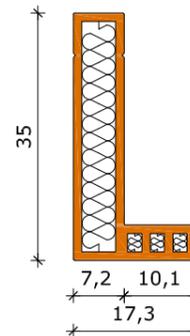
Travetto Prefabbricato



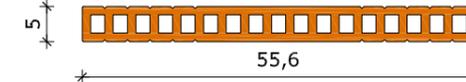
Angolare Cassaforma A "NTC 2013" riempito con perlite



Angolare Cassaforma B "NTC 2013" riempito con perlite

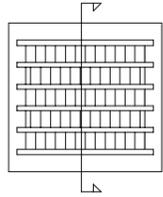


Tavella modulare



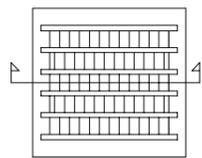
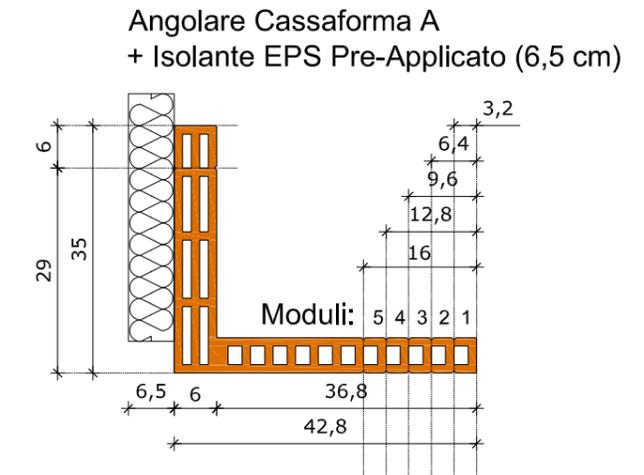
# Dettaglio costruttivo

- Sistema di compensazione in base alla lunghezza Solaio - Scala 1:10



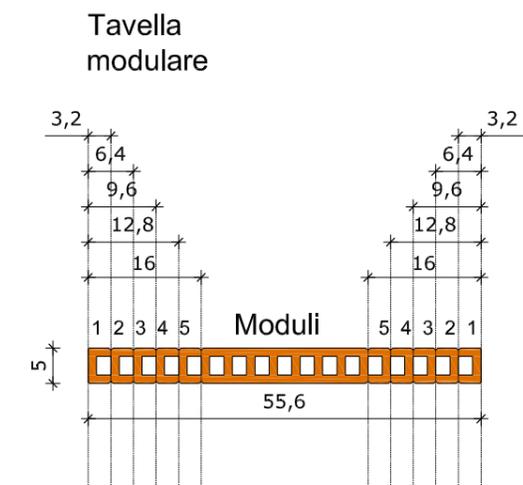
## - Sezione ortogonale all'orditura del Solaio

Scarto = x	Moduli eliminati	Spazio recuperato per aggiunta travetto	min	max
1÷3 cm	5	$(16 + x) =$	17	19
4÷6 cm	4	$(12,8 + x) =$	16,8	18,8
7÷9 cm	3	$(9,6 + x) =$	16,6	18,6
10÷12 cm	2	$(6,4 + x) =$	16,4	18,4
13÷15 cm	1	$(3,2 + x) =$	16,2	18,2
16,4 cm	0			



## - Sezione parallela all'orditura del Solaio

Scarto = x	Moduli eliminati	Spazio recuperato per aggiunta Pignatta B	min	max
1÷3 cm	4	$(12,8 + x) =$	13,8	15,8
4÷6 cm	3	$(9,8 + x) =$	13,6	15,6
7÷9 cm	2	$(6,4 + x) =$	13,4	15,4
10÷12 cm	1	$(3,2 + x) =$	13,2	15,2
12,5 cm	0			

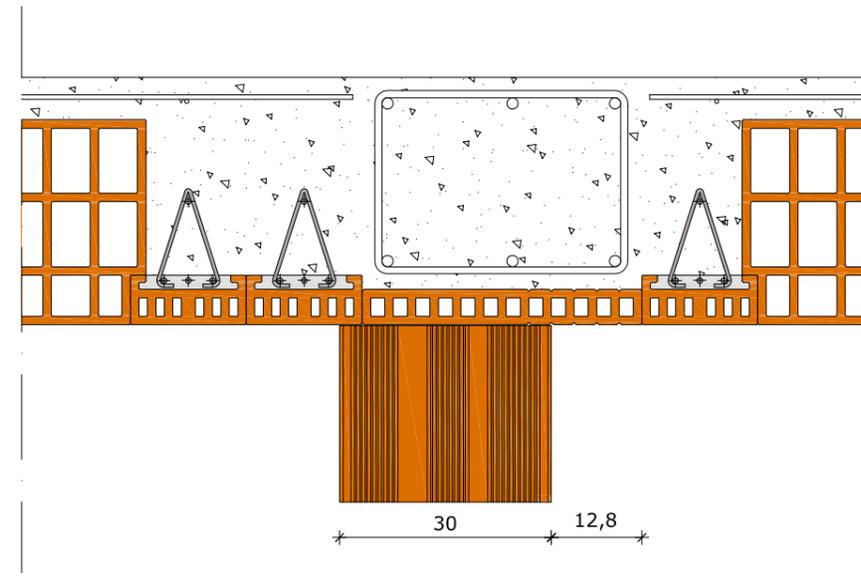
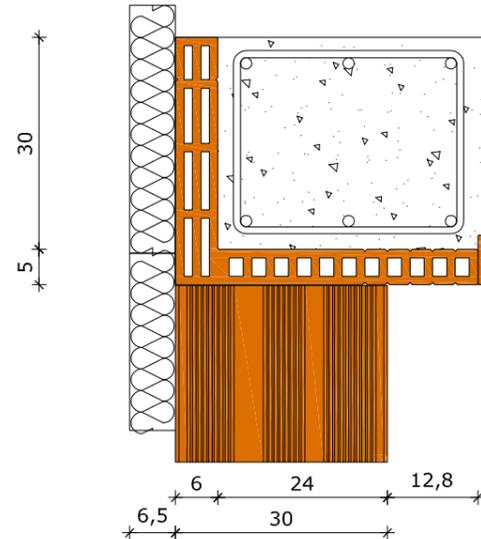
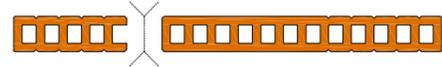
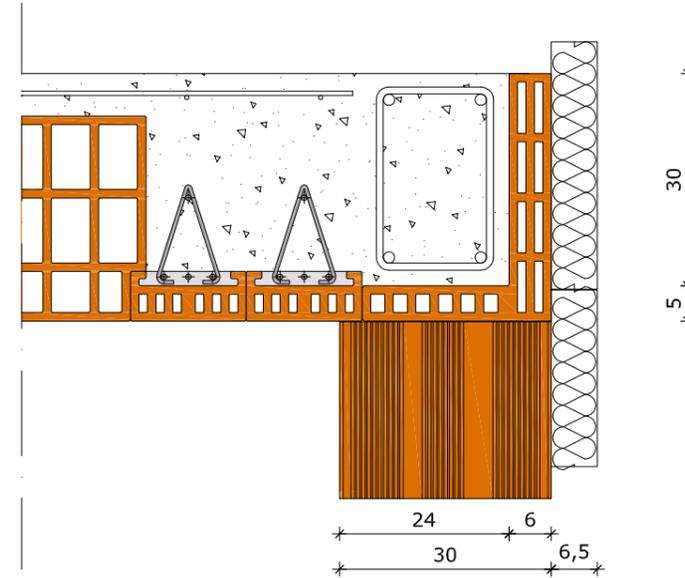
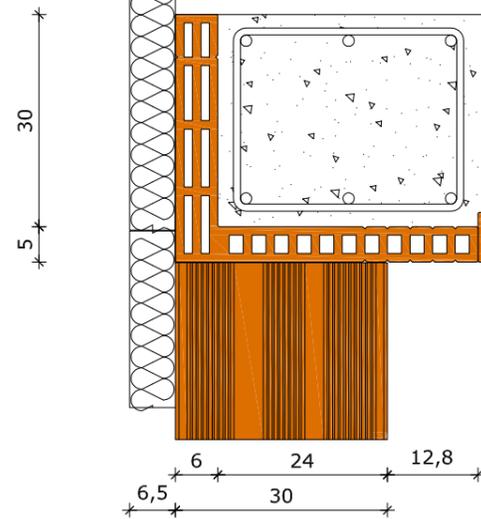
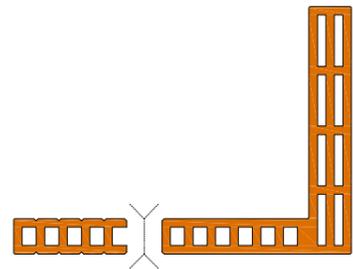
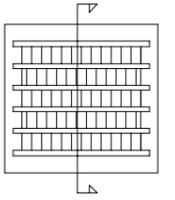




# Dettaglio costruttivo

- Sistema di compensazione - Sez. ort. all'orditura del Solaio - Scala 1:10

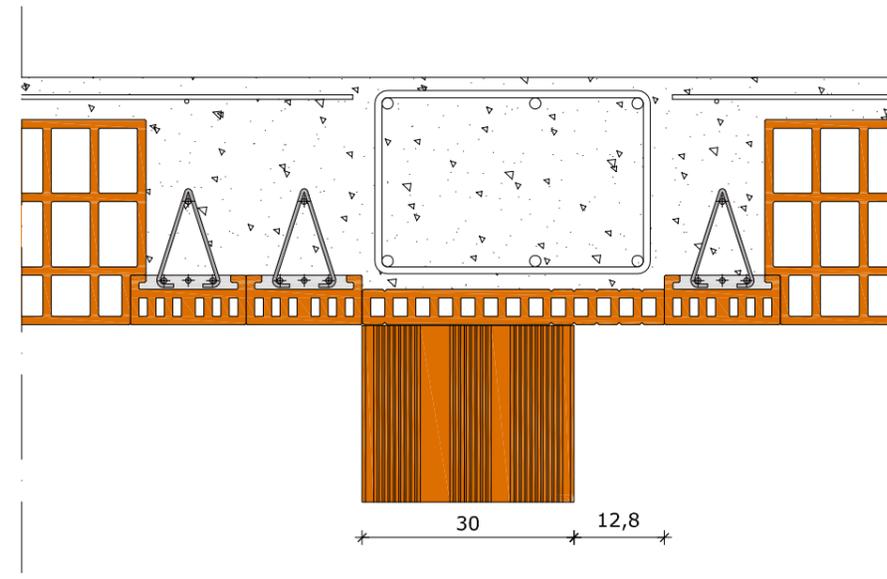
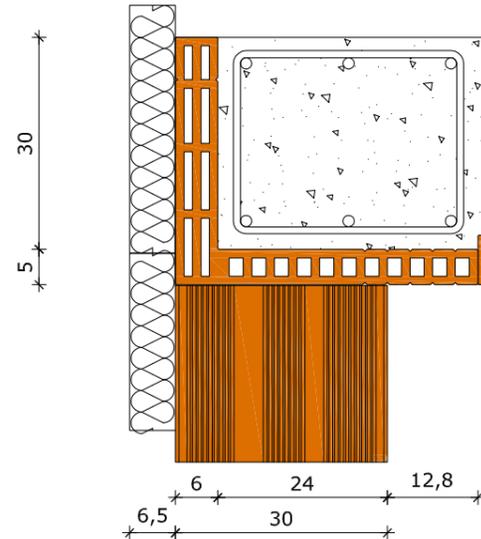
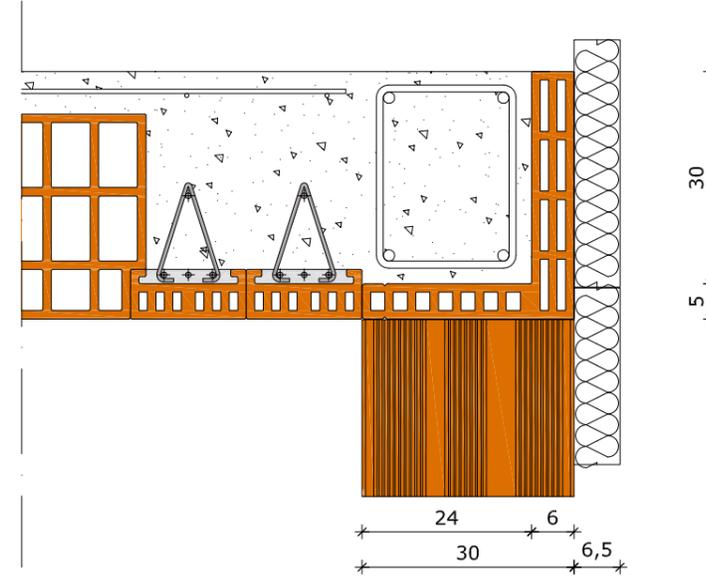
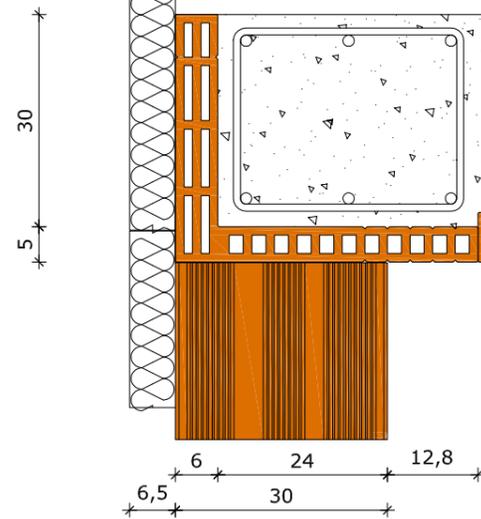
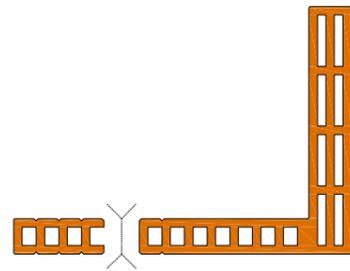
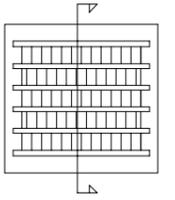
Scarto =  $1 \div 3$  cm  $\Rightarrow$  n°5 Moduli Eliminati



# Dettaglio costruttivo

- Sistema di compensazione - Sez. ort. all'orditura del Solaio - Scala 1:10

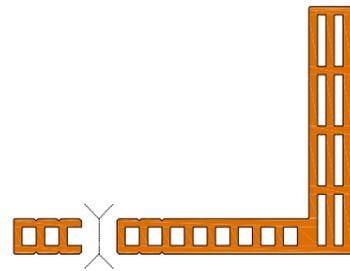
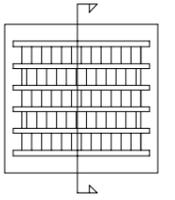
Scarto =  $4 \div 6$  cm  $\Rightarrow$  n°4 Moduli Eliminati



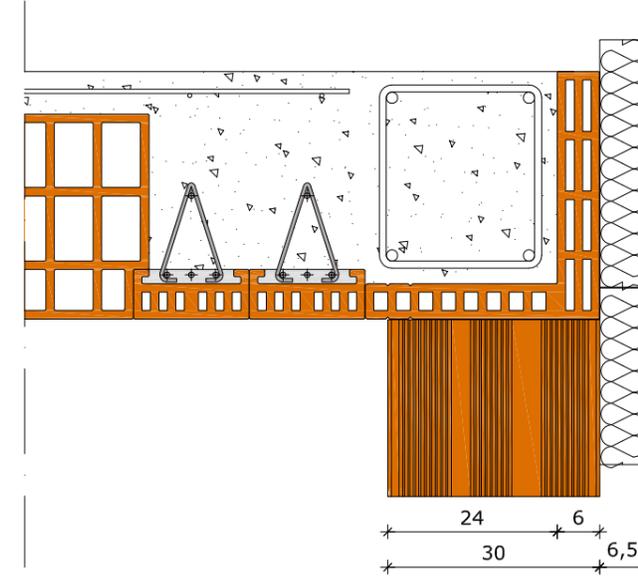
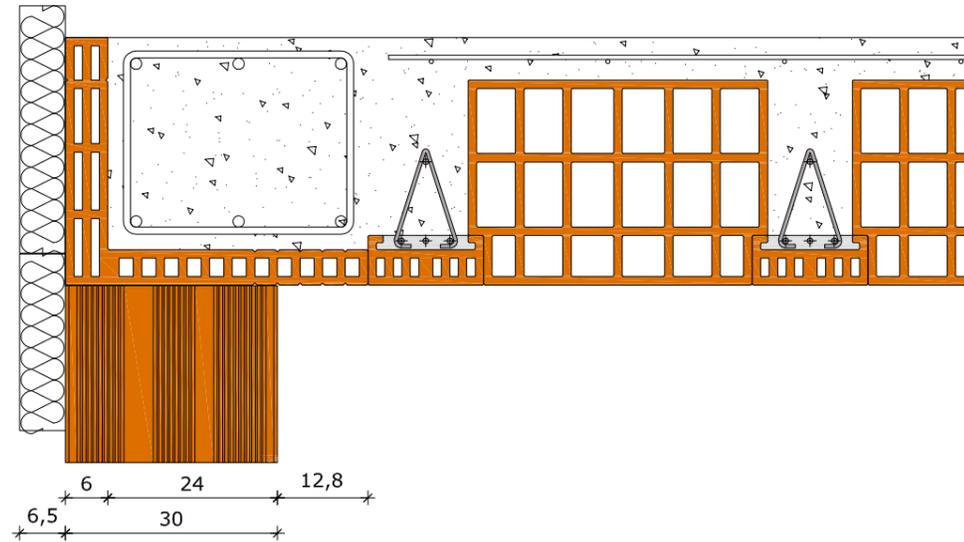
# Dettaglio costruttivo

- Sistema di compensazione - Sez. ort. all'orditura del Solaio - Scala 1:10

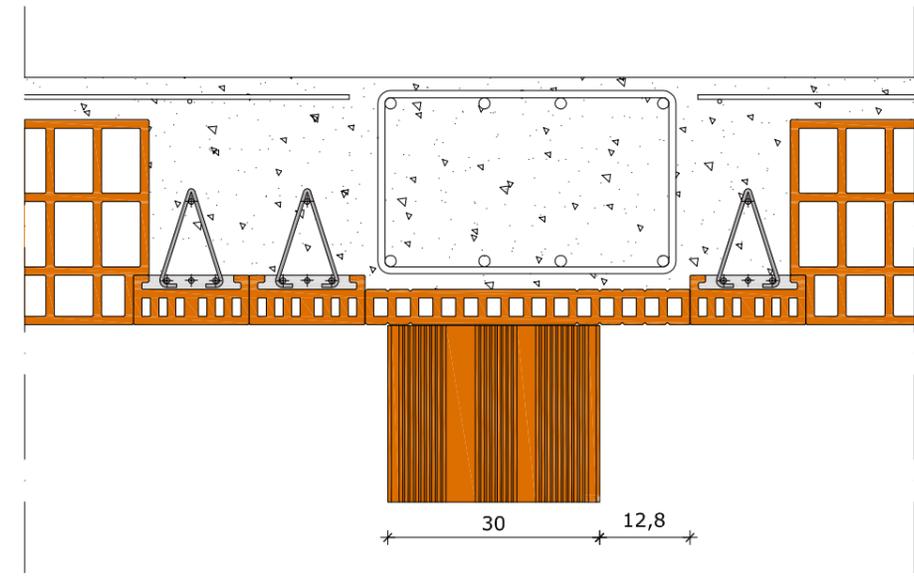
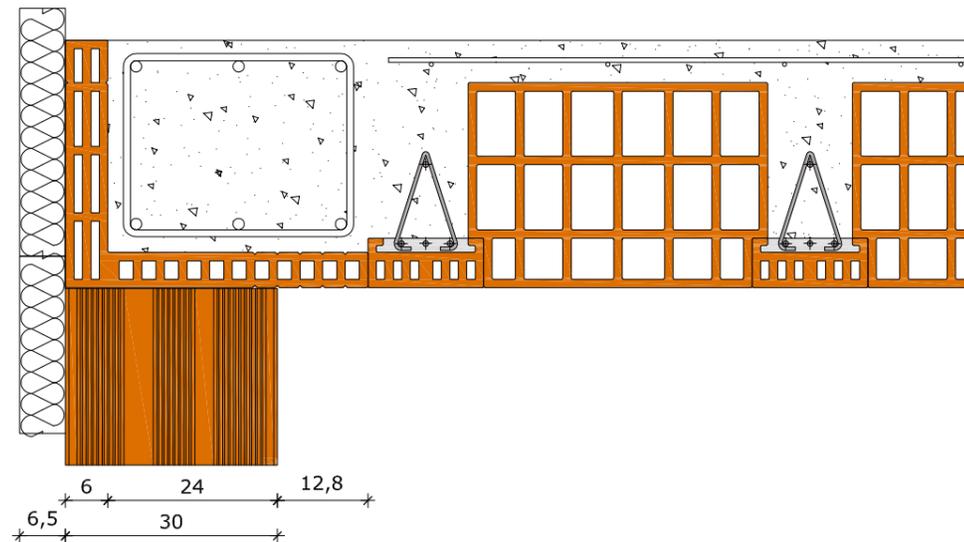
Scarto =  $7 \div 9$  cm  $\Rightarrow$  n°3 Moduli Eliminati



30  
5



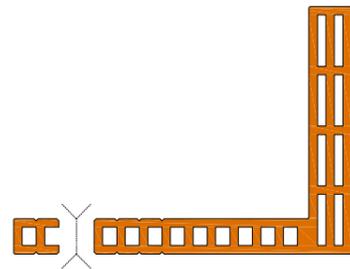
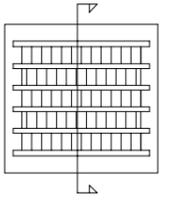
30  
5



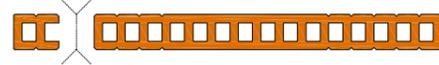
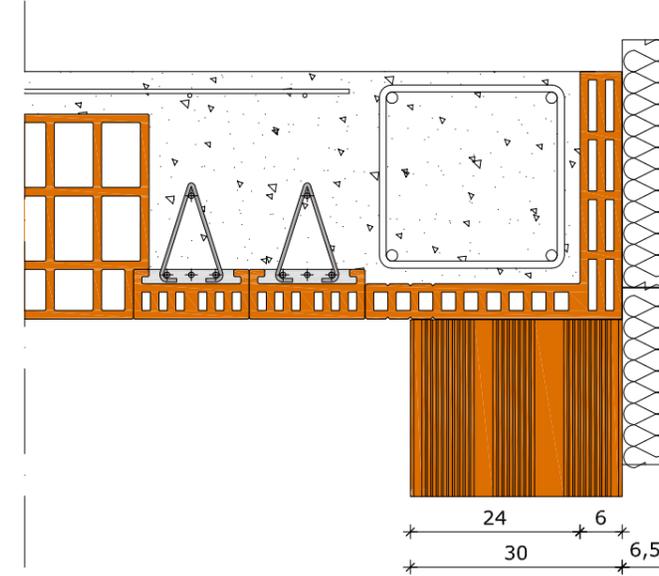
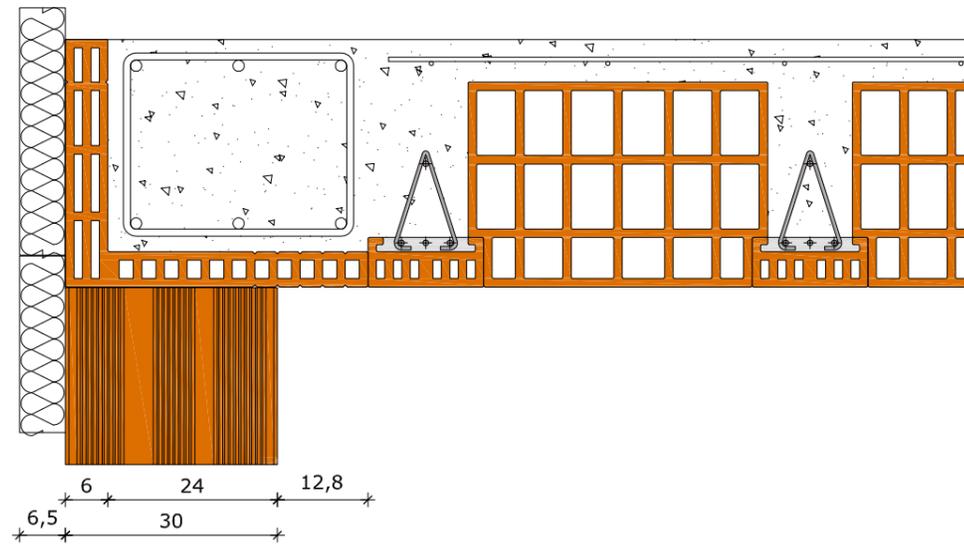
# Dettaglio costruttivo

- Sistema di compensazione - Sez. ort. all'orditura del Solaio - Scala 1:10

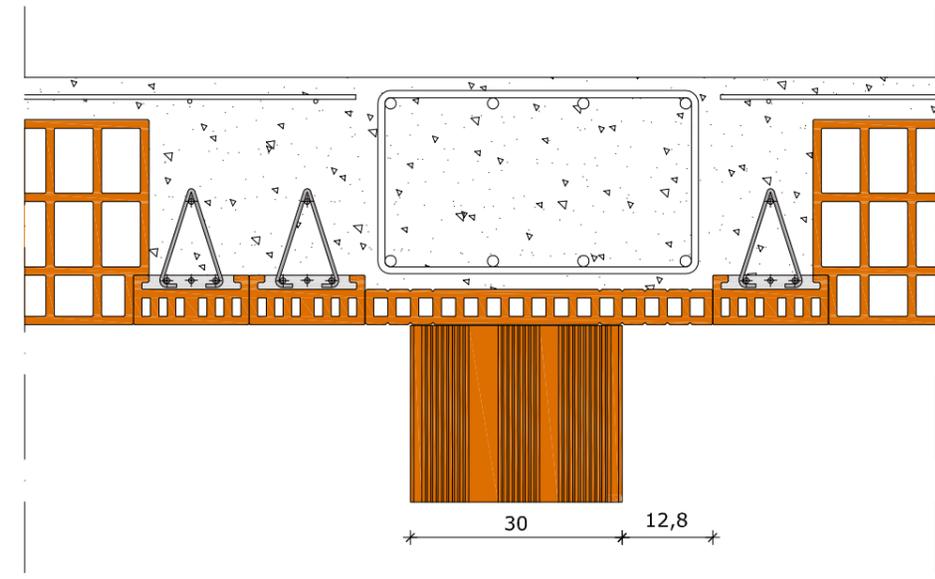
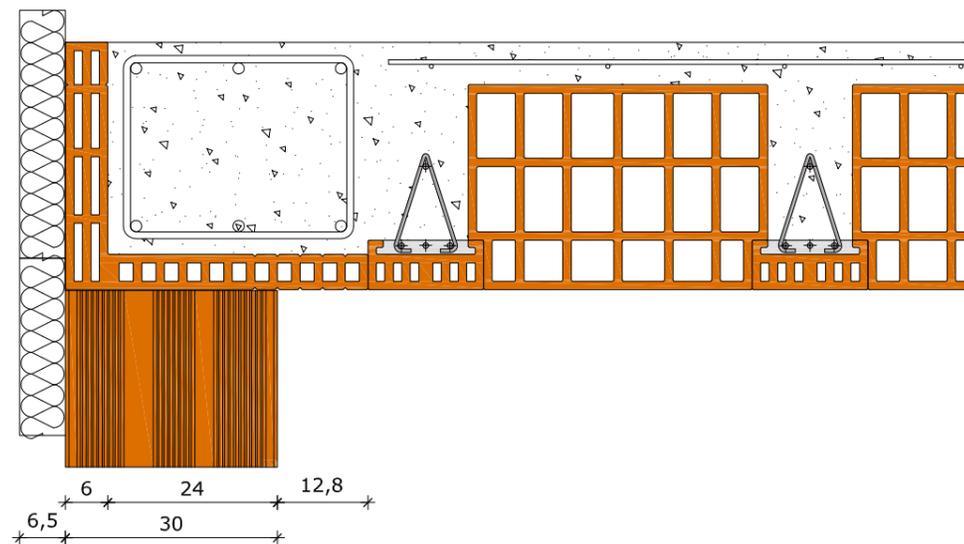
Scarto =  $10 \div 12$  cm  $\Rightarrow$  n°2 Moduli Eliminati



30  
5



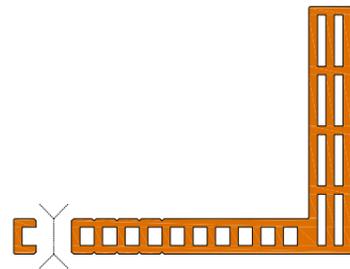
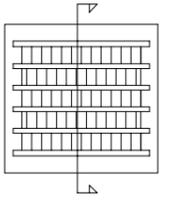
30  
5



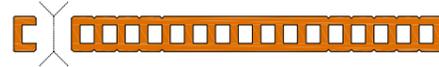
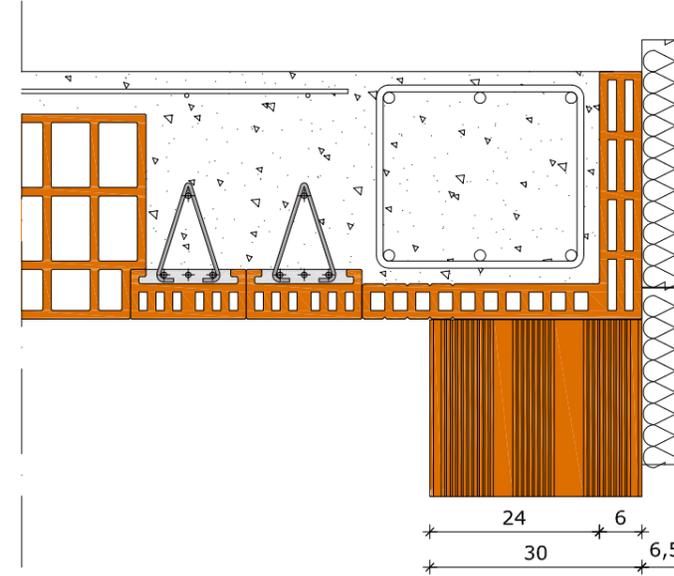
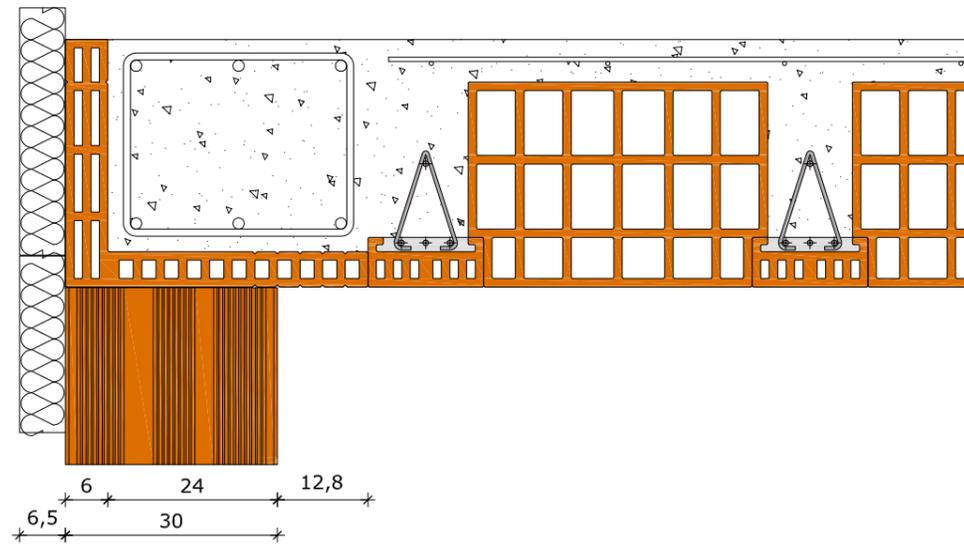
# Dettaglio costruttivo

- Sistema di compensazione - Sez. ort. all'orditura del Solaio - Scala 1:10

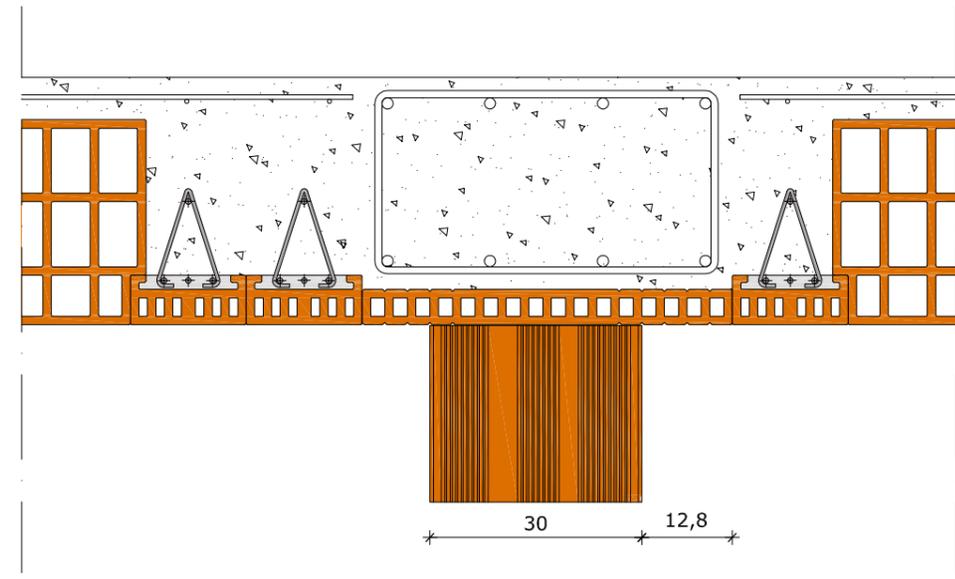
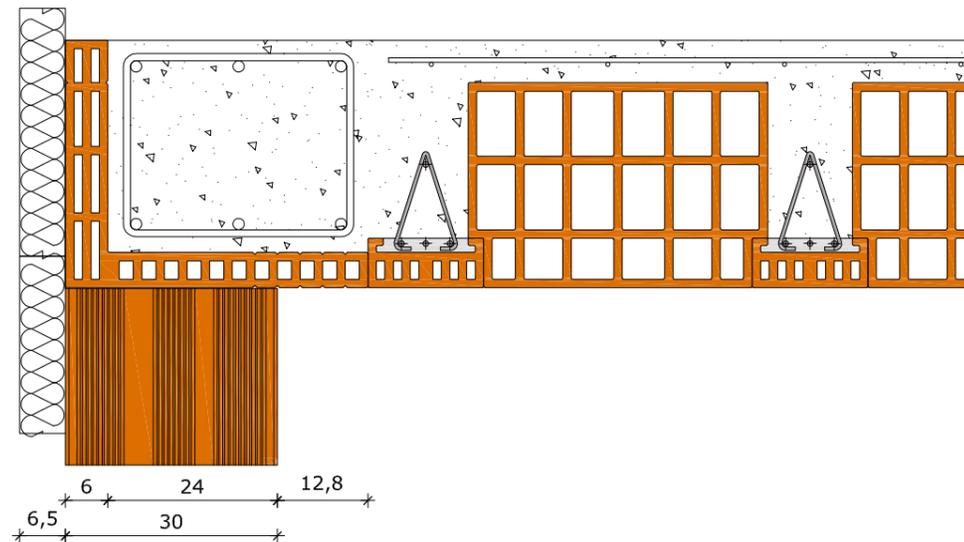
Scarto =  $13 \div 15$  cm  $\Rightarrow$  n°1 Moduli Eliminati



30  
5



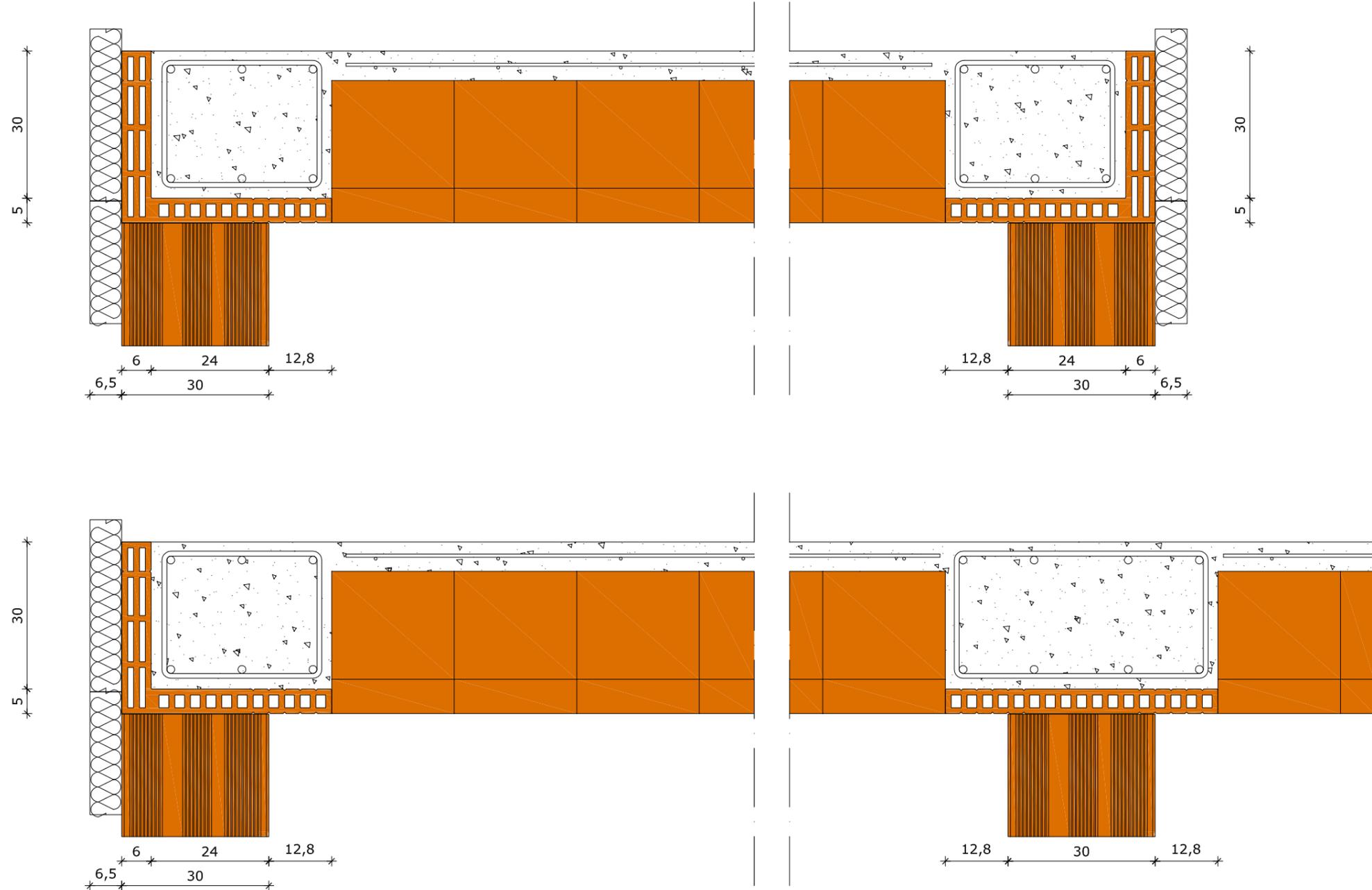
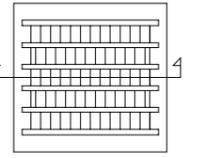
30  
5



# Dettaglio costruttivo

- Sistema di compensazione - Sez. par. all'orditura del Solaio - Scala 1:10

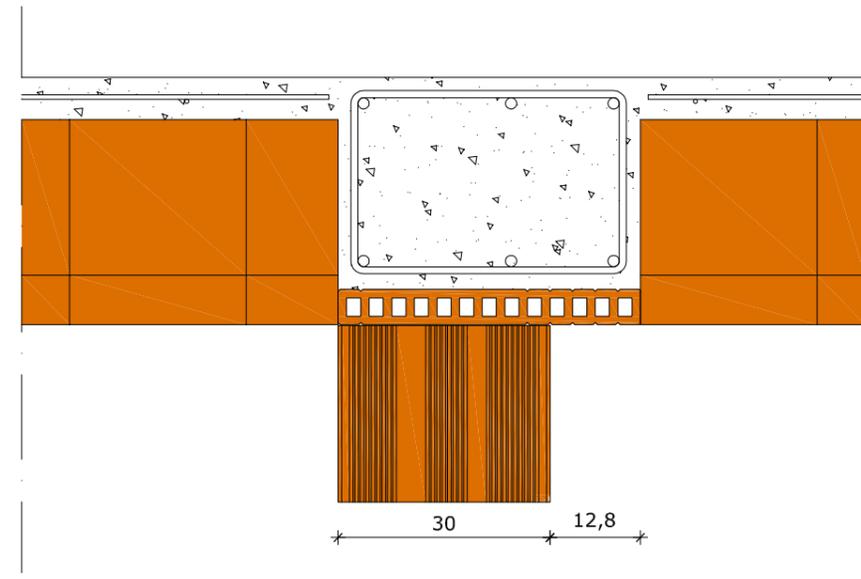
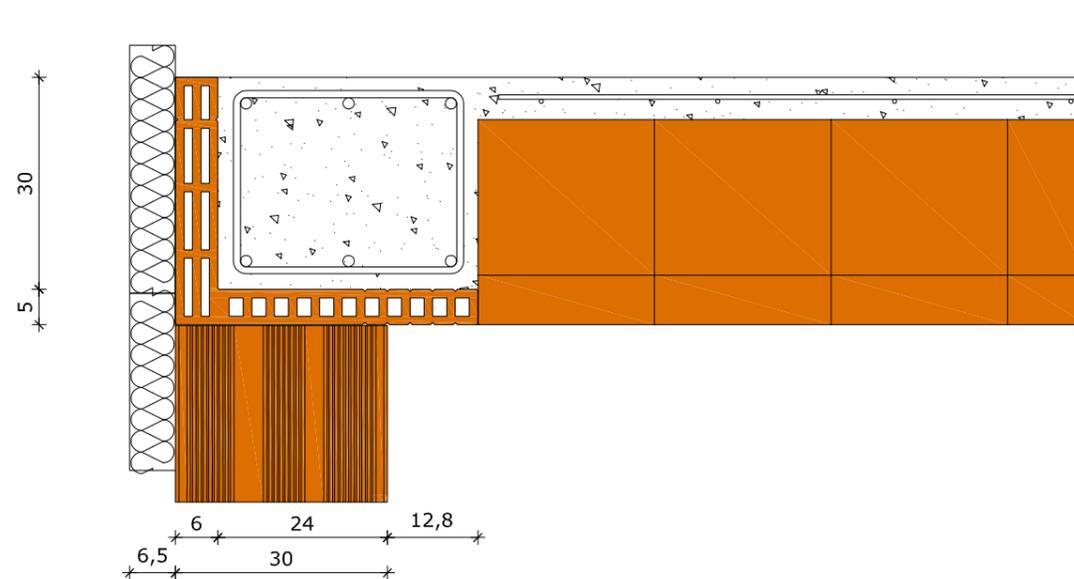
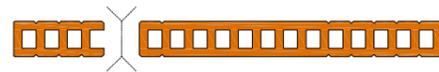
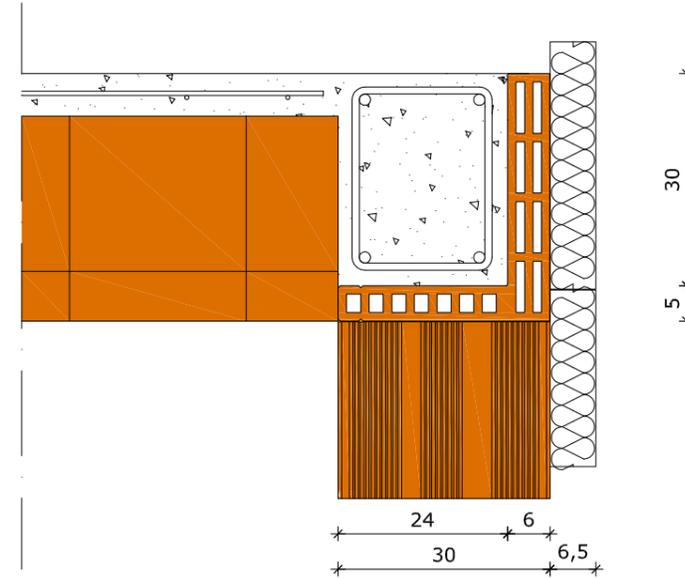
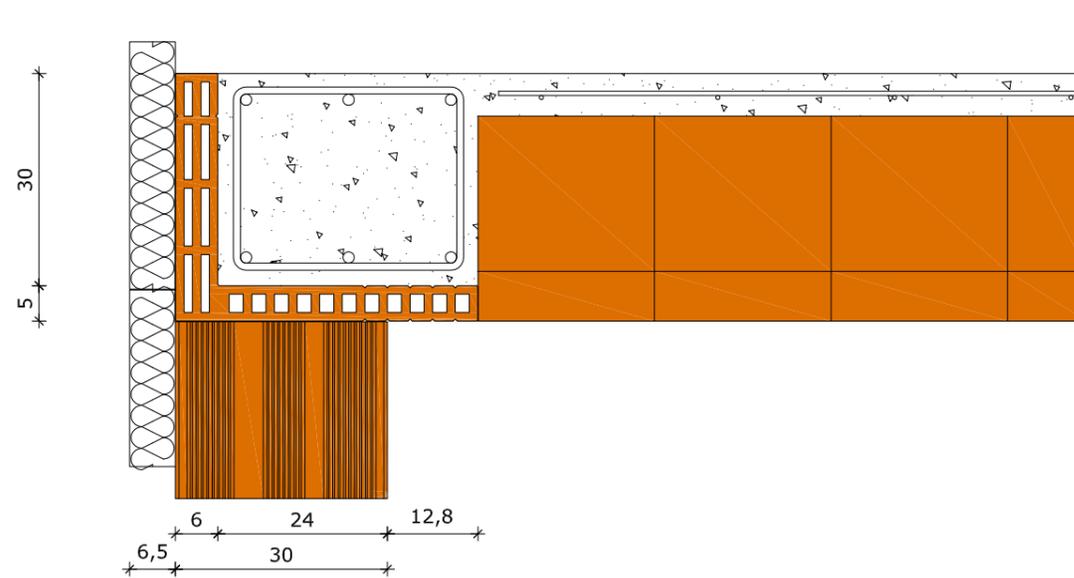
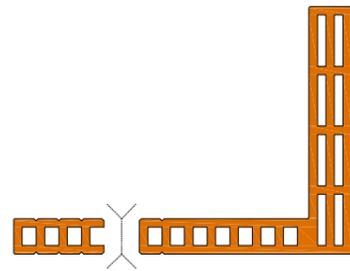
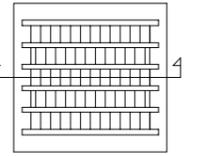
Scarto = 0 cm



# Dettaglio costruttivo

- Sistema di compensazione - Sez. par. all'orditura del Solaio - Scala 1:10

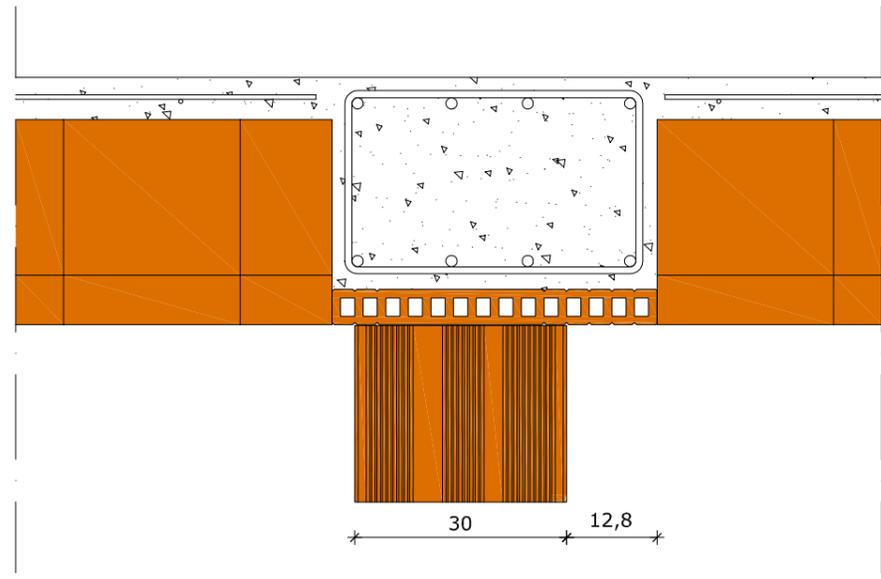
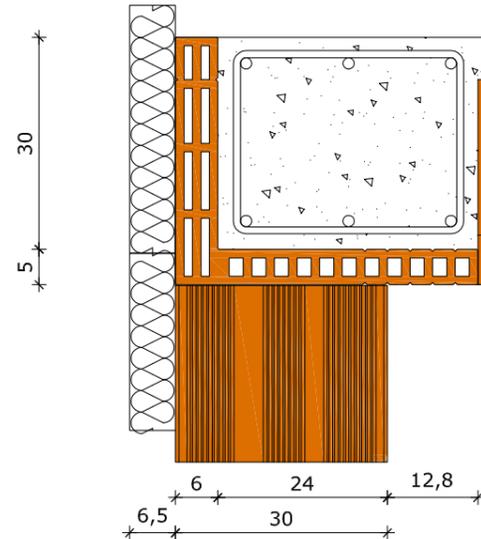
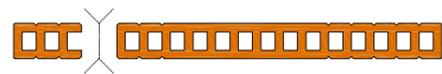
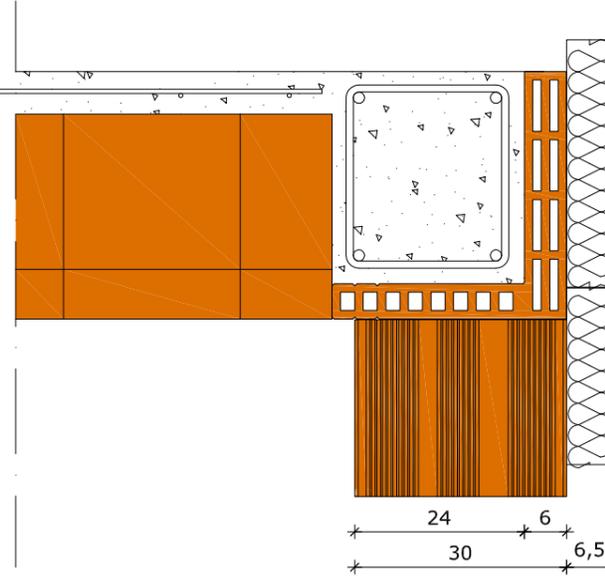
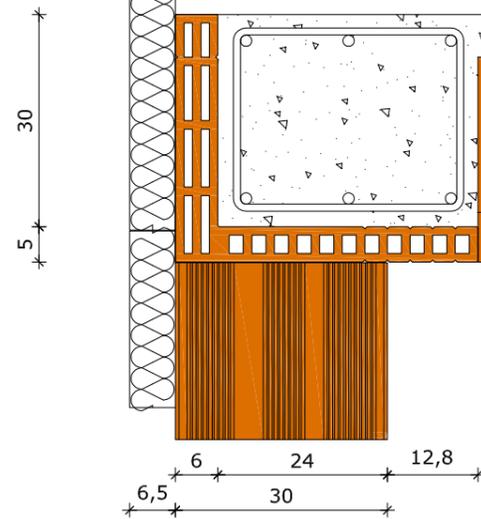
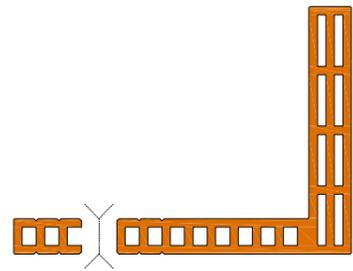
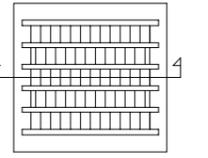
Scarto =  $1 \div 3$  cm  $\Rightarrow$  n°4 Moduli Eliminati



# Dettaglio costruttivo

- Sistema di compensazione - Sez. par. all'orditura del Solaio - Scala 1:10

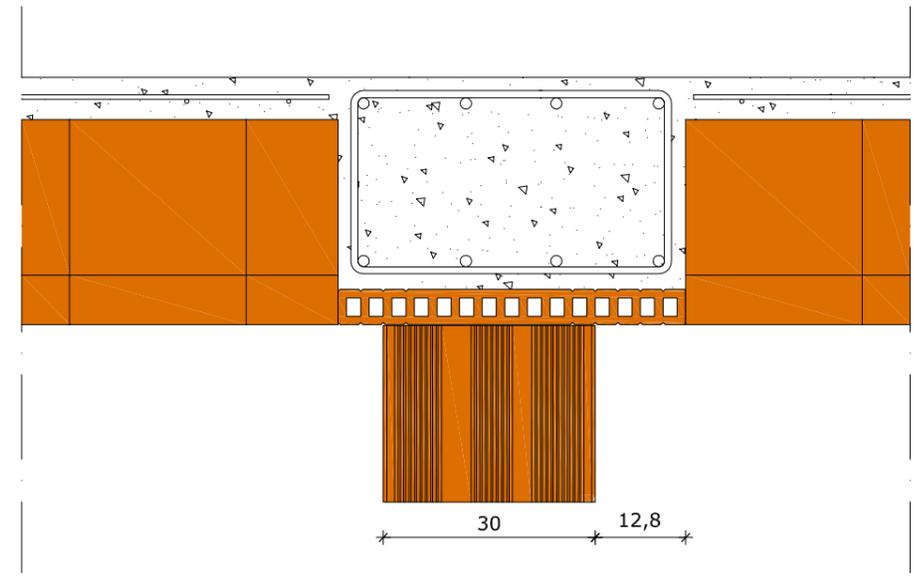
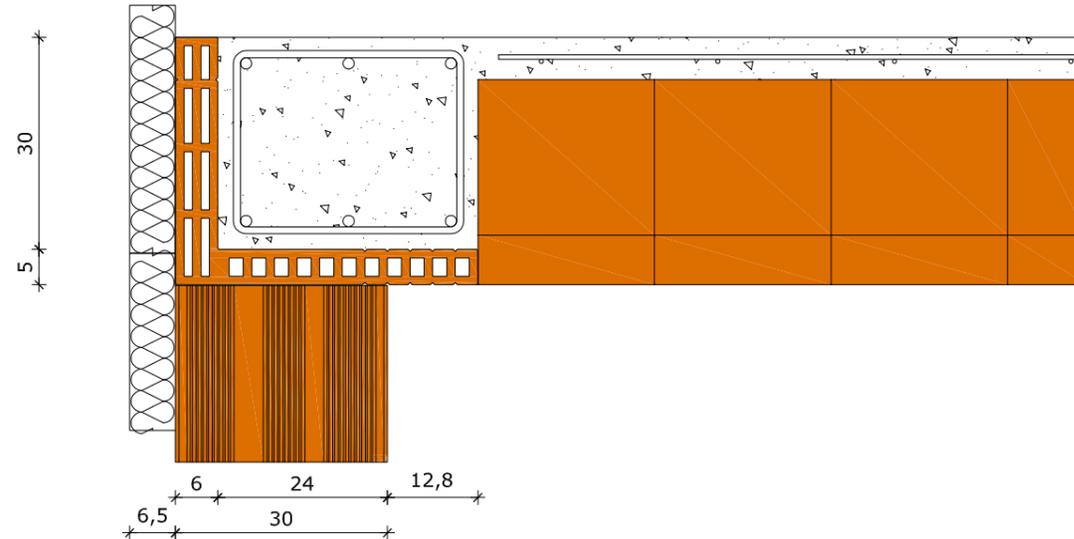
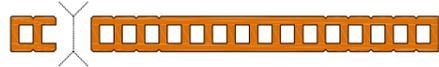
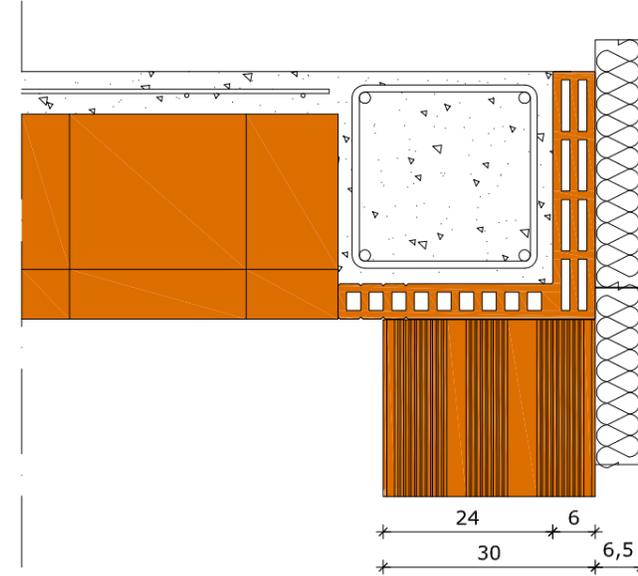
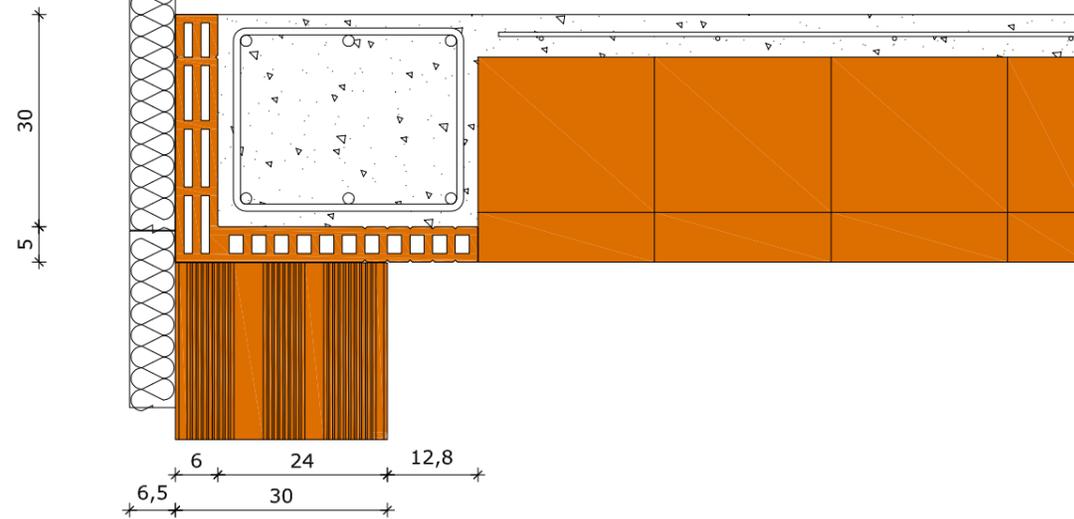
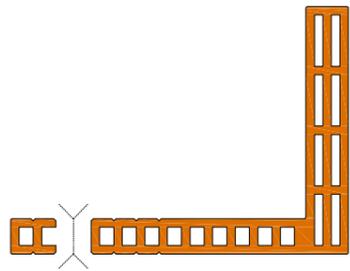
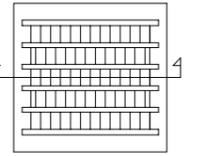
Scarto =  $4 \div 6$  cm  $\Rightarrow$  n°3 Moduli Eliminati



# Dettaglio costruttivo

- Sistema di compensazione - Sez. par. all'orditura del Solaio - Scala 1:10

Scarto =  $7 \div 9$  cm  $\Rightarrow$  n°2 Moduli Eliminati



# Dettaglio costruttivo

- Sistema di compensazione - Sez. par. all'orditura del Solaio - Scala 1:10

Scarto =  $10 \div 12$  cm  $\Rightarrow$  n°1 Moduli Eliminati

