

## ***1. La tecnologia stratificata a secco***

### **1.1. Aspetti generali**

Costruire “a secco” significa allontanarsi dalla tradizione costruttiva prettamente italiana, da sempre sviluppatasi attorno al mattone e calcestruzzo. Ci si allontana quindi da una concezione “a umido”, latero-cementizie, avvicinandosi a una concezione architettonica e strutturale già radicata in altre culture. Si pensi alla tradizione nord europea con edifici a traliccio, al sistema balloon frame americano per case in legno o addirittura all’opus craticium<sup>1</sup> romano.

Lo slancio, anche nostrano, verso una tecnologia di questo tipo, va ricercato nelle sempre più elevate richieste in termini di prestazioni, sia in termini energetici che di impatto ambientale, ma anche in termini economici.

Con l’avvento dei sistemi a secco, ci si è trovati di fronte a un vero e proprio cambiamento di approccio. Il tipo “a umido” si fonda sulla tecnica della giustapposizione dei conci – lapidei o laterizi – oppure del cassero – riempimento, entrambe dotate di connessioni perenni con posa in umido e giunzione per essiccamento del legante: la realizzazione finale dipende dalla maturazione in situ dei materiali umidi impiegati o come giunto o come riempimento della cassaforma.

Contrariamente, i sistemi “a secco” si basano su un processo di assemblaggio di tipo meccanico ove gli elementi costitutivi nascono in una fase precedente rispetto al cantiere, essendo prodotti industrialmente, e vengono connessi fra loro in opera mediante viti, bulloni e punzonature.

Si hanno quindi vari componenti, strati, ognuno con le sue caratteristiche e compatibile con gli altri, andando a formare il prodotto finale con la sua globale prestazione data dall’unione di quella dei singoli pezzi.

Il cantiere diventa pertanto un luogo in cui operano operai specializzati che compiono azioni meccaniche e previste.

Si favorisce quindi la gestione dell’edificio, sia durante la posa in opera che lungo tutta la vita utile.

Nonostante questo però i problemi in Italia sono ancora molti, vista la poca esperienza, la complessità della disciplina e la scarsità di letteratura tecnica.

I processi innovativi trovano maggiore possibilità di sviluppo quando procedono gradualmente attraverso soluzioni ibride transitorie. Per questo motivo, in Italia al giorno d’oggi viene adottata una combinazione mista delle due tecnologie, a secco e a umido, utilizzando la tecnologia stratificata a secco

---

<sup>1</sup> Tipo di tramezzo molto economico realizzato con listelli di legno, canne o simili, intrecciati tra loro e con gli interspazi riempiti di creta mescolata a pietrame.

entro sistemi a telaio tradizionali. Quindi è di uso frequente la soluzione mista accoppiando la soluzione a secco con manufatti in laterocemento o acciaio.

La modalità costruttiva qui trattata, che si può chiamare “stratificazione a secco”, è legata alla tradizione *Trockenbau* tedesca oppure *Structure-Envelope* francese e inglese degli ultimi decenni.

In Italia Vanoncini e Imperadori coniano il termine “Struttura/Rivestimento”, abbreviata S/R, per identificare la tecnologia a secco.

Il concetto costruttivo si esprime attraverso l’impiego di telai leggeri – in acciaio o in legno – spesso assemblati in opera, opportunamente controventati e in seguito issati a formare lo scheletro portante della costruzione, coperture leggere con orditura in legno o in metallo, tamponamenti di chiusura verticale e orizzontale realizzati con strati di elementi leggeri, compositi, elastici e di grandi dimensioni. Nella procedura di assemblaggio a secco, le parti soggette a progettazione sono identificate, in ordine dall’esterno verso l’interno, nell’involucro esterno, nella stratificazione di intercapedine isolata esterna, nella struttura portante, nella stratificazione di intercapedine isolata interna, nell’involucro interno. Servono proprio queste entità differenti per evitare coazioni, ponti termici o acustici; ogni parte ha le sue funzioni e prestazioni.

Gli involucri interno ed esterno sono costituiti da materiali e componenti scelti in maniera appropriata alle funzioni specifiche definite dal progettista in base alle sollecitazioni fisiche. Nelle intercapedini, che si creano tra queste entità, scorrono le reti impiantistiche che possono essere facilmente ispezionate in caso di guasti e sostituite con minore dispendio energetico ed economico.

Le potenzialità di questa modalità costruttiva sono molteplici: si va dagli aspetti ambientali – la non invasività del disassemblaggio; la facilità del controllo sullo “stato di salute” di ogni singolo strato; la varietà di elementi ecocompatibili che il mercato mette a disposizione – a quelli progettuali in senso ampio – in particolare la vastissima possibilità di scelta di elementi bidimensionali, esterni o interclusi (materassini, guaine, pannelli), rispondenti a precisi requisiti, che permette di individuare soluzioni mirate in funzione delle singole prestazioni richieste sia dell’azione sinergica che l’intero pacchetto può raggiungere.

Si possono riassumere alcuni punti chiave che esprimono i vantaggi della tecnologia S/R:

1. verificabilità prestazionale;
2. differenziazione e miglioramento prestazionale;
3. costituzione di pacchetti tecnologici;
4. indipendenza funzionale;
5. ottimizzazione delle procedure di cantiere, assemblabilità e smontabilità;
6. implementabilità tecnologica e ciclicità di funzionamento;
7. ottimizzazione e risparmio di materiali e di risorse energetiche.

1. Per quanto riguarda il primo punto, trattandosi di elementi realizzati in fabbrica, essi sono certificati. Inoltre vengono assemblati in opera da manodopera specializzata. Si garantisce quindi una maggiore qualità prestazionale.
2. Vengono concepiti pacchetti compositi, formati da elementi indipendenti, ognuno dei quali assolve a una specifica funzione (acustica, termica...), diversamente da quanto accadeva per la struttura monolitica della costruzione tradizionale.
3. la costituzione di pacchetti tecnologici permette di ottenere risposte ulteriori oltre alle prestazioni dei singoli strati.
4. L'indipendenza funzionale è definita dall'assenza dei collegamenti. Questi avvengono generalmente mediante viti semplici e svincolano la struttura principale dalle strutture secondarie che servono per supportare diversi strati. In questo modo non vi sono interazioni statiche, termiche, ecc., fra le diverse porzioni costruttive.
5. Grazie alla connessione meccanica a secco dei vari elementi e all'alta specializzazione delle manovre di assemblaggio, si ha una gestione più ottimizzata, veloce e controllata di tutte le fasi di cantiere. Questa miglioria costruttiva inserisce l'edificio in una più attuale concezione di industrializzazione e ciclicità del costruire, dove il cantiere è luogo di montaggio e non di creazione del manufatto. L'ottimizzazione delle fasi di cantiere incide inoltre notevolmente sull'economia del progetto.
6. La logica di fondo consta nel trattare l'edificio come un meccanismo, in cui le parti danneggiate possono essere sostituite e inoltre si possono inserire unità tecnologiche migliorative, permettendo una gestione ottimizzata ma anche un facile reimpiego dell'edificio. È possibile determinare a priori i tempi di vita di ogni singolo componente, per poter progettare ottimamente cicli di manutenzione ed eventuale sostituzione dei dispositivi (durabilità dinamica).
7. Infine, per l'ultimo punto, va detto che, costruendo a secco si può effettuare una progettazione sostenibile a livello ambientale (anche visto il minor peso dei materiali, circa 1/10 rispetto alle soluzioni tradizionali), privilegiando il risparmio energetico o la riciclabilità dei materiali utilizzati, grazie anche alla quasi totale smontabilità degli elementi tecnici. Vi è inoltre la possibilità di individuare i materiali più appropriati per dimensioni e pesi. Riguardo il risparmio dei consumi energetici, essi si possono raggiungere sia potenziando le coibentazioni nell'involucro ma si ha anche un utilizzo di energia più contenuto nella fase di messa in opera, rispetto a un cantiere tradizionale.

## **1.2. Vantaggi prestazionali**

I principali vantaggi prestazionali offerti dal sistema nel suo complesso, sono:

- miglioramento del comportamento termo igrometrico della struttura esterna;
- miglioramento del comfort interno;
- riduzione delle spese di manutenzione e di gestione.

Il miglioramento delle condizioni termo-igrometriche ha permesso: l'eliminazione dei ponti termici, della possibilità di condensazione superficiale ed interstiziale, e la protezione dagli agenti atmosferici. Grazie alle facciate continue, tipiche della tecnica a secco, si può sovrapporre uno strato di isolamento su tutte le discontinuità strutturali che generano ponti termici (travi, pilastri, solai, connessioni tra elementi differenti).

Se le facciate non sono continue possono essere utilizzate fasce marcapiano o giunzioni tra elementi discontinui, per garantire le prestazioni termo-igrometriche desiderate.

Sia in un caso che nell'altro, la riduzione delle dispersioni termiche in inverno e dei guadagni d'estate, è ottenuta mediante un opportuno strato di materiale isolante, leggero e poroso, oltre che per mezzo delle caratteristiche del rivestimento esterno e della conformazione dell'intercapedine d'aria tra loro compresa.

Dal punto di vista prettamente igrometrico, vi sono varie possibilità per ridurre eventuali condensazioni superficiali o interstiziali (cioè all'interno della parete stessa).

Bisogna evitare che la temperatura della superficie in esame scenda sotto la temperatura di rugiada dell'aria a contatto con essa. È necessario quindi impedire che la temperatura delle superfici scenda troppo.

La formazione di acqua in fase liquida all'interno della struttura comporta l'alterazione delle sue proprietà termo fisiche e ne accelera o ne causa il degrado.

La parte sicuramente più colpita da questi fenomeni è la parte esterna della parete, che risulta meno riscaldata dall'interno, a causa dello strato di isolante.

Per prevenire la formazione di condensazione interstiziale, senza dover inserire una barriera al vapore, si può utilizzare un metodo che consiste nell'uso di materiali sufficientemente porosi. Si dota il pacchetto di un rivestimento esterno impermeabile che impedisce l'infiltrazione di acqua piovana, mentre la parete ventilata, unita alla struttura porosa della parete, assicura una sufficiente traspirazione con conseguente evacuazione dell'umidità proveniente dall'interno.

Per quanto riguarda la protezione dagli agenti atmosferici, è necessario che lo strato di isolamento termico sia realizzato in materiale impermeabile, oltre che sufficientemente traspirante.

Negli ultimi anni è diventato sempre più importante limitare al massimo i consumi energetici degli edifici, in quanto essi emettono grandi quantità di CO<sub>2</sub>, favorendo l'inquinamento atmosferico.

L'analisi energetica degli edifici è quindi divenuta sempre più importante, specialmente per quanto riguarda l'ambito del riscaldamento invernale.

Per riuscire a limitare al massimo le dispersioni termiche e quindi le emissioni, è necessario aumentare al massimo gli spessori degli strati di isolamento, anche fino a 35-40 cm. Il sistema S/R permette di assolvere a questo scopo, senza togliere spazio per l'inserimento degli impianti. Inoltre con il sistema a secco si abbattano anche i costi energetici per la realizzazione dell'edificio.

Si noti infine che il miglioramento delle prestazioni termiche delle pareti perimetrali consiste non solo in un'ottimizzazione riguardo ai consumi energetici, ma anche al comfort per gli abitanti. Si avranno infatti temperature superficiali più elevate di inverno e più basse d'estate.

### **1.3. Stratigrafia tipo**

La soluzione della costruzione stratificata a secco prevede tre stadi funzionali:

- L'involucro esterno: formato da materiali industriali in grado di garantire le prestazioni richieste dal progettista, è costituito da: un rivestimento, realizzato da lastre in cemento alleggerito fibrorinforzate, in parte intonacate o rivestite, formanti un'intercapedine di ventilazione delle facciate, con spessore variabile in funzione dell'esposizione cardinale; quindi andando verso l'interno, una serie di stratificazioni con funzioni meccaniche ed ambientali specifiche come la resistenza alla spinta del vento e all'intrusione, impermeabilizzazione e termoriflessione, isolamento termico con diverse caratteristiche di attenuazione, sfasamento o inerzia termica, isolamento acustico, il tutto supportato da orditure metalliche costituite da guide, montanti e profilati;
- La struttura: ciò che ci distingue è la possibilità di scegliere la soluzione più adeguata alle esigenze del progetto: calcestruzzo armato, legno, acciaio. Di norma, la struttura è costituita da telai realizzati in opera con elementi precostituiti che possono essere rappresentati, nel caso di edifici di modeste dimensioni e altezza, da strutture a scheletro in legno massiccio o lamellare, opportunamente controventate, con ovvi vantaggi in termini di annullamento dei ponti termici, riduzione degli spessori dell'involucro edilizio, grazie alle modeste dimensioni degli elementi portanti; mentre per edifici di dimensioni maggiori in strutture a scheletro in ferro, che offrono, leggerezza e velocità di montaggio, oppure da strutture a telaio in calcestruzzo armato;
- L'involucro interno, è costituito da un'ulteriore stratificazione di materiali di coibentazione, da barriera al vapore e da lastre di rivestimento in gesso rivestito o in gesso fibra, con caratteristiche di resistenza meccanica e di idrorepellenza diversa a seconda degli ambienti interni con cui devono interagire, sempre supportate da un'orditura metallica, all'interno del quale trovano posto, in una programmata sequenza meccanica, gli impianti tecnologici.

Più precisamente si può definire una frequente specializzazione funzionale degli strati che compongono l'involucro:

- Strato di sacrificio esterno che solitamente delimita un'intercapedine d'aria ventilata (funzione: durabilità, schermatura, isolamento acustico);
- Protezione verso l'esterno con uno strato di tenuta all'acqua/vento (funzione: protezione dagli agenti atmosferici);
- Isolamento termo-acustico, ad estradosso o interposto alla struttura portante (funzione: isolamento termico e acustico);
- Struttura portante costituita da elementi a setti o a telaio, con isolante interposto o a estradosso (funzione: portante, isolamento termico e acustico);
- Freno o barriera al vapore (funzione: modulazione del passaggio del vapor d'acqua);
- Intercapedine impiantistica con eventuale riempimento di isolante (funzione: attrezzabilità della parete ed eventuale isolamento termico);
- Strato di rivestimento interno (funzione: finitura interna).

Si ricorda che può essere presente anche un'intercapedine d'aria (da pochi mm a svariati cm) che è aperta verso l'ambiente esterno e si trova fra il rivestimento esterno e la parete retrostante. Essa costituisce la cosiddetta facciata ventilata. Il flusso d'aria che si instaura garantisce una maggiore durabilità dei materiali (gli isolanti e tutta la struttura interna della parete) rispetto alle soluzioni tradizionali a cappotto. Essa viene spesso utilizzata in zone di montagna o costiere, dove il problema della protezione dalle piogge è di primaria importanza. Vi è inoltre un maggiore controllo degli shock termici sul rivestimento esterno. Infatti il rivestimento non è costituito da un singolo elemento continuo di grandi dimensioni, ma da molte lastre discontinue, ciascuna vincolata singolarmente ad una sovrastruttura. Questo permette un maggiore assorbimento delle dilatazioni termiche, evitando la nascita di tensioni che possono degradare i materiali e invalidarne le prestazioni.

A seconda della tipologia strutturale si adottano differenti pacchetti; alcuni di questi sono elencati di seguito:

- struttura a telaio in c.a.;
- struttura a telaio in acciaio;
- scheletro in legno.

Nella pagina seguente è mostrato un modello 3D di un pacchetto murario a secco tipo, eseguito con Autodesk Revit.



*Figura 1.3-1: Stratigrafia 3D eseguita con il software Autodesk Revit, di un pacchetto a secco tipo, con i relativi montanti. Si tratta del pacchetto a secco utilizzato nel corso della tesi (soluzione ibrida con presente anche la facciata in laterizio).*

## **1.4. Esempio: Knauf Aquapanel**

### **1.4.1. Cenni generali**

La lastra Knauf Aquapanel è un esempio di soluzione multistrato: S/R (sistemi stratificati Struttura/Rivestimento).

La lastra *Aquapanel*, dotata di spessore standard di 12.5 mm, è formata da nucleo resistente in cemento Portland, rinforzata sulle due facce da tessuto in fibra di vetro e rivestita di uno strato di cemento. I vantaggi sono la rapidità di montaggio, visto che le lastre si possono tagliare e poi fissare con viti.

La struttura può essere singola o doppia (doppio guscio). Nel secondo caso si ha rivestimento interno in gesso ed esterno ad esempio in legno.

Le lastre sono resistenti meccanicamente e stabili ai cicli termici e presentano trascurabili rigonfiamenti per umidità.

Le lastre Aquapanel costituiscono una superficie continua resistente sulla quale poi andrà fissato lo strato esterno di finitura, come un sistema a cappotto o una parete ventilata.



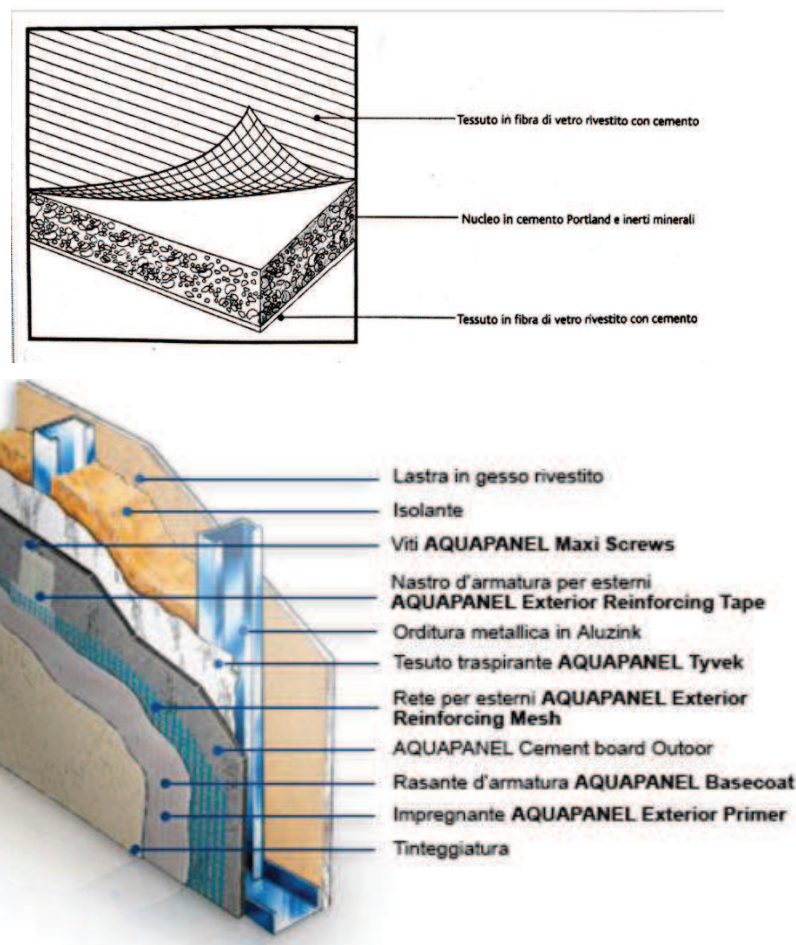
Si predilige la disposizione di uno strato continuo di isolamento poiché i montanti sono una discontinuità che fa decadere le prestazioni di isolamento termico. Si tratta di ponti termici che abbassano la temperatura interna della parete soprattutto in corrispondenza delle viti, rendendo più facile il raggiungimento della temperatura di condensazione interna. Si consiglia pertanto la soluzione a doppio guscio che disaccoppia la parte interna ed esterna dell'involucro, aumentando l'efficienza termica. In questo caso, anche in corrispondenza della sottostruttura di sostegno, vi sono livelli di isolamento termico molto elevati.

Aquapanel è utilizzato negli interni umidi (per esempio lavanderie), grazie alla sua grande capacità di resistenza all'acqua.

Il pacchetto Aquapanel comprende:

- Orditure metalliche di acciaio zincato.
- Tessuto protettivo delle orditure, contro l'umidità.
- Viti specifiche per ambiente umido.
- Accessori per stuccatura, rasatura, finitura delle lastre.

Si riportano in seguito alcune immagini ed esempi che mostrano nel dettaglio le caratteristiche di Knauf Aquapanel.





Esempio di composizione di una parete esterna

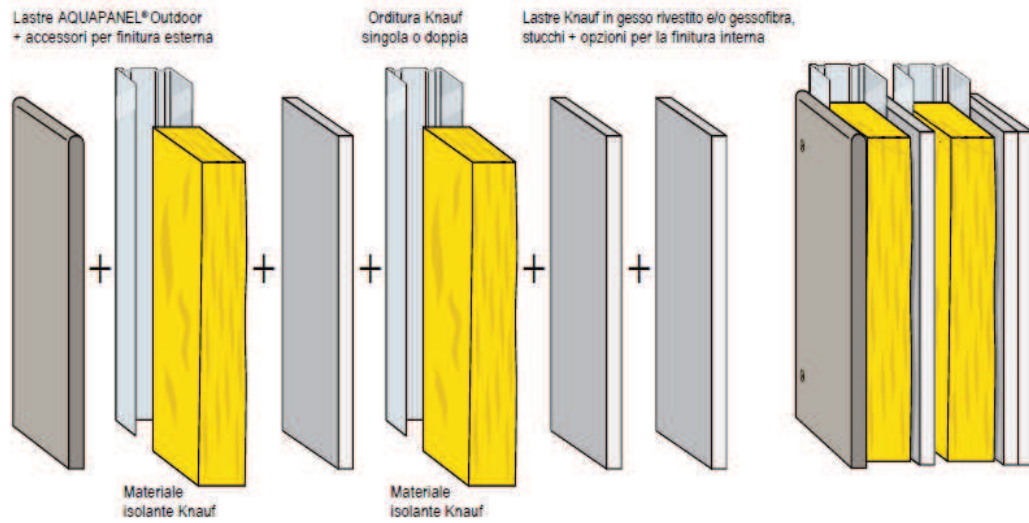
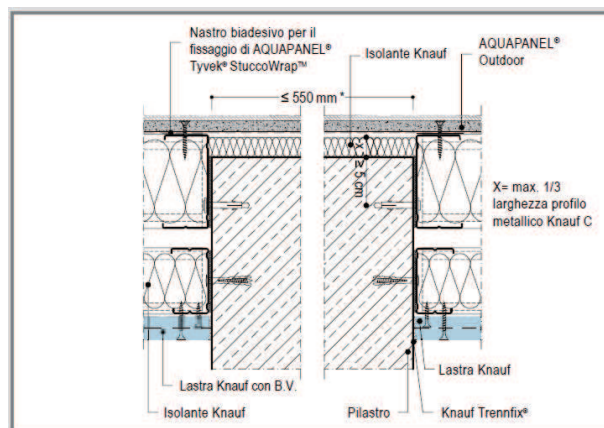
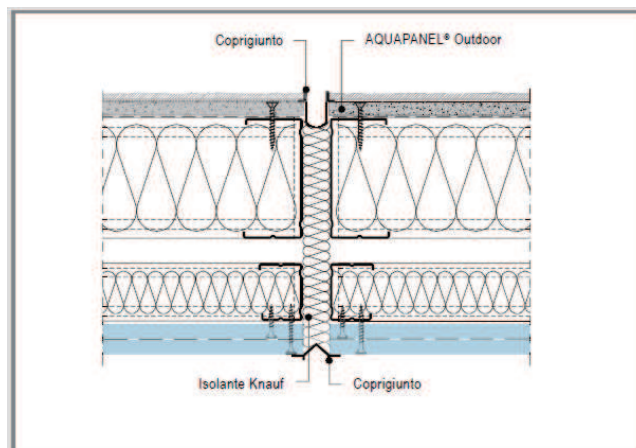


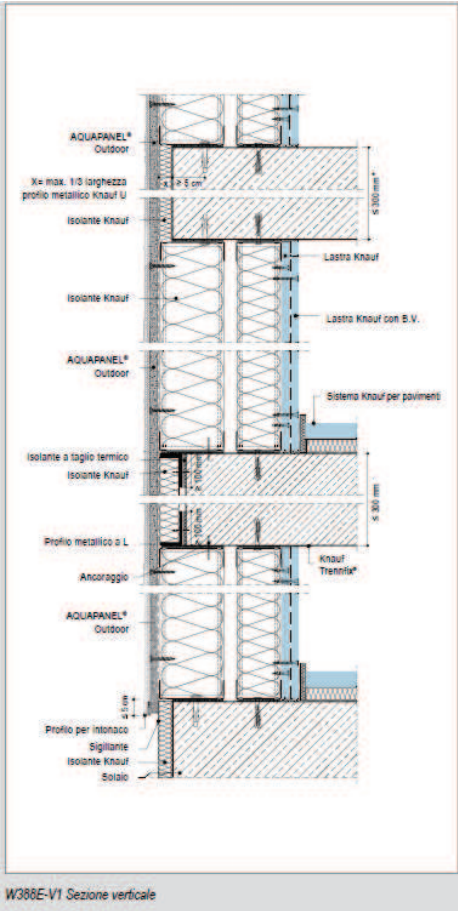
Figura 1.4-1A: Composizione, stratigrafia tipo e sistema di montaggio per lastre Aquapanel.



W388E-HS1 Collegamento al pilastro



W388E-BFU1 Giunto strutturale di dilatazione



*Figura 1.4-2: Dettagli costruttivi (fissaggi, guide e montanti, stratigrafia)*

**Tabella 8.1 - CARATTERISTICHE TECNICHE DELLE LASTRE**

	UNITÀ MISURA	AQUAPANEL INDOOR	AQUAPANEL OUTDOOR- PREFORATA	AQUAPANEL OUTDOOR
Larghezza	mm	875	875	900
Lunghezza	mm	1.200	1.200	2.400
Spessore	mm	12,5	12,5	12,5
Tolleranze in larghezza	mm	+1 -1	+1 -1	+5 -0
Tolleranze in lunghezza	mm	+1 -1	+1 -1	+2 -4,5
Tolleranze in spessore	mm	+0,5 -0,5	+0,5 -0,5	+0,5 -0,5
Peso	Kg/m <sup>2</sup>	ca. 15	ca. 17	Ca. 17
Densità a secco	Kg/m <sup>3</sup>	ca. 1050	ca. 1150	Ca. 1150
Resistenza alla flessione	N/mm <sup>2</sup>	6,2	6,9	6,9
Resistenza alla compressione	N/mm <sup>2</sup>	15	20	20
Modulo elastico E	N/mm <sup>2</sup>	2.500÷5.000	≤5.000	≤5.000
Valore alcalino PH		12	12	12
Conduttività termica	W/mK	0,27	0,32	0,32
Coefficiente di dilatazione lineare	m/°C	7x10 <sup>-6</sup>	7x10 <sup>-6</sup>	7x10 <sup>-6</sup>
Assorbimento acqua (24 ore)	%	16	15	15
Contenuto di umidità in atmosfera secca	%	10	10	10
Contenuto di umidità in atmosfera umida	%	17	16	16
Differenza dimensionale da essiccata all'aria a umida	%	0,11	0,10	0,10

*Tabella 1.4-2: Caratteristiche tecniche delle lastre Aquapanel.*

### 1.4.2. Messa in opera

Le modalità di messa in opera sono analoghe a quelle di applicazione delle lastre in gesso. Esse presentano notevoli vantaggi per la ripartizione delle squadre operative e la fluidità delle operazioni.

L'orditura delle pareti è singola o doppia. Nel secondo caso i telai possono essere solidarizzati fra loro con connettori a taglio termoacustico. Vengono inoltre effettuati giunti di dilatazione da 15-20 cm ogni 7.2 m in lunghezza e altezza.

Le orditure metalliche (acciaio rivestito con lega alluminio-zinco) sono composte da profili a U fissati a pavimento e soffitto con profili montanti a C più resistenti meccanicamente soprattutto a torsione. Il taglio acustico è ottenuto da un nastro monoadesivo applicato come guarnizione prima della posa dei profili U. L'interasse massimo è di 100 cm. (nota: se la freccia del solaio prevista è superiore a 1 cm, bisogna inserire dei giunti scorrevoli a soffitto tra guide e montanti e comunque i montanti devono essere di almeno 1 cm più corti dell'interpiano).

I profili a C devono avere interasse non superiore a 400 mm (600 mm per interni) e hanno dimensioni 50, 75 o 100x50 mm. Essi possono essere prolungati telescopicamente a patto che la sovrapposizione sia almeno 10 volte lo spessore dell'anima.

Dopo la posa in opera delle orditure e di eventuali reti impiantistiche e degli isolamenti, si può procedere al rivestimento in lastre Aquapanel. Si noti che in caso di orditura singola i giunti fra le lastre sulle due facce della parete non devono cadere sullo stesso montante.

Per il fissaggio delle lastre all'orditura si utilizzano *viti autoperforanti* a interasse massimo di 200 mm. Esse devono essere poste a 1.5 cm dai bordi. Le lastre hanno dimensione ad esempio 900x2400 mm. Si ricorda che sulla facciata esterna bisogna posare e fissare mediante nastro biadesivo il tessuto traspirante prima del montaggio. I giunti inoltre vanno rinforzati con il nastro telato in corrispondenza di angoli e aperture.

La fase di stuccatura va effettuata solo dopo che le lastre si saranno adattate alle condizioni climatiche dell'ambiente e con temperatura dell'ambiente e del sottofondo non inferiore a +5°C.

I giunti e la rasatura vengono effettuati con un apposito stucco.

La stuccatura avrà uno spessore di circa 2-3 mm, mentre la rasatura successiva, effettuata entro 12 ore, avrà uno spessore di 5 mm. Si ricorda che i giunti devono essere sigillati per evitare le infiltrazioni di acqua in corso d'opera.

Infine le lastre ricevono i prodotti di rivestimento dopo 8 giorni dalla rasatura. Pitture sintetiche per aumentare la resistenza ad abrasione, pitture a smalto, tinte a calce, ecc...

L'alternativa è utilizzare le lastre, non rasate, come supporto per rivestimenti a cappotto o facciata ventilata.

Le lastre vanno conservate al riparo dall'umidità e la temperatura di montaggio deve sempre essere superiore a +5°C. Esse vanno sempre trasportate di costa facendo attenzione a non danneggiare spigoli o angoli. Il taglio delle lastre viene effettuato per mezzo di sega circolare con disco diamantato oppure seghetto con lama al tungsteno. Successivamente al taglio, il bordo va limato.

### 1.4.3. Esempio applicativo

Si riporta un esempio significativo di applicazione di lastre Aquapanel, allo scopo di illustrare più dettagliatamente la stratificazione del pacchetto a secco:

- Involucro interno in doppie lastre di gesso rivestito con barriera al vapore in foglio di alluminio, su montanti di acciaio zincato a loro volta assicurati a guide a U sulla base e sommità della parete.
- Intercapedine di 30 cm riempita di materassini in lana minerale utilizzata come isolamento termico. Questo permette una termo-trasmittanza inferiore a 0.1 W/m<sup>2</sup>K.
- Involucro esterno in lastre di Aquapanel su sottostruttura (profili) analoga a quella usata per il guscio interno. Si noti che il tessuto impermeabile si trova fra le lastre e la sottostruttura.
- Esternamente è stato disposto un cappotto id polistirene espanso (6 cm), fissato alle lastre per mezzo di binari di alluminio. Evitare l'incollaggio, permette la libera espansione termica evitando così la formazione di crepe dovute ai diversi coefficienti di dilatazione termica di polistirene e delle lastre in cemento.
- La finitura superficiale è realizzata con intonaco sottile autopulente.

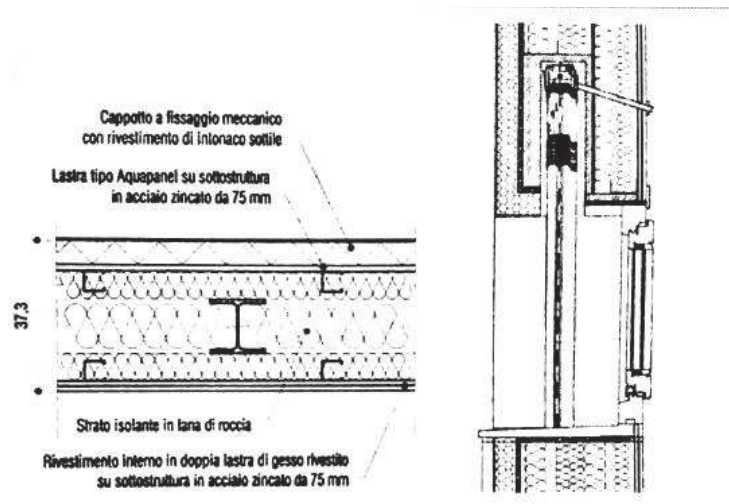


Figura 1.4-3: Esempio: Passivhaus di Chignolo d'Isola, il cui involucro è caratterizzato da elevati livelli di isolamento e da guscio interno ed esterno disaccoppiati.

## **2. Definizione del caso di studio**

### **2.1. Obiettivi della tesi**

L'obiettivo di questa tesi consiste nell'analisi del comportamento strutturale di edifici in acciaio con tamponamenti stratificati a secco, con particolare attenzione sia alle principali differenze rispetto ad una più tradizionale soluzione ad umido sia alle peculiari problematiche della tecnologia S/R e quindi agli spostamenti di tutto il comparto non strutturale costituito appunto dai vari tamponamenti. Per affrontare questo aspetto, si sono studiate le fasi di progettazione di un complesso ad uso residenziale sito in via Budellungo a Parma. Tale costruzione, allo stato di fatto, è costituita da telai in acciaio con muri perimetrali di tamponatura e muri divisorii interni realizzati con la tecnologia S/R; per evidenziare l'influenza di tale tecnologia sulla progettazione e individuare le principali differenze rispetto alle più comuni soluzioni "a umido", nel presente lavoro di tesi è stato analizzato anche un equivalente sistema di tamponamenti e divisorii interni "a blocchi e riempimento" che presentassero caratteristiche analoghe dal punto di vista delle prestazioni termiche. È stato inoltre confrontato l'utilizzo di una struttura portante in c.a. oppure in acciaio.

Gli edifici, attualmente in fase di ultimazione, sono stati progettati con riferimento ai seguenti documenti normativi:

- Legge 168/2005 articolo 14-undecies (/6/);
- Legge 05.11.71, N. 1086 (/7/);
- D.M. 09.01.1996 (/8/-/10/);
- Circolare LL.PP. n. 156 AA.GG./STC. del 4 luglio 1996 (/11/);
- Circolare LL.PP. n. 10 del 10.04.1997 (/12/);

A seguito dell'emanazione della Legge 24 giugno 2009 n.77 (/13/), che all'art. 1-bis contiene modifiche al regime transitorio per l'operatività della revisione delle "Norme Tecniche per le Costruzioni" emanate con D.M.14/01/2008 (/4/) dal Ministero delle Infrastrutture - di concerto con il Ministro dell'Interno e con il capo del Dipartimento della Protezione Civile - si è scelto di procedere al ridimensionamento degli elementi strutturali d'interesse (travi e pilastri) con riferimento a questa nuova normativa unica.

La progettazione, limitata ad una sola unità di testa del complesso A1 (le due unità sono speculari), è stata quindi condotta considerando in parallelo le due possibili soluzioni di tamponamenti e divisorii "a umido" e "a secco" e le due possibili strutture portanti in acciaio e c.a., ponendosi in due differenti zone sismiche (1 e 3), considerando tutte le strutture in CD"B"(classe di duttilità bassa).

Sono state quindi confrontate fra loro tutte le differenti soluzioni.



## 2.2. Descrizione generale dell'opera

### 2.2.1. Introduzione

L'intervento complessivo in oggetto di questa tesi, prevede la realizzazione di edificio trifamiliare a destinazione residenziale e si sviluppa su due livelli (piano terra e sottotetto). Annesse alle destinazioni residenziali sono inoltre presenti autorimesse con copertura non praticabile (unico livello). Le unità trifamiliari sono strutturalmente separate ed in particolar modo le due unità di testa sono speculari tra di loro. Le tre unità affiancate sono giuntate sismicamente. Il blocco autorimesse è un blocco unico e consiste in una struttura separata rispetto ai corpi residenza. L'opera è concepita con struttura portante a telaio in profili in acciaio (pilastri multipiano e travi principali con vincolo ad incastro) con fondazione a platea nervata. I solai sono previsti in lamiera gettata tipo HIBOND 75 e con struttura secondaria in profili in acciaio appoggiati sulle travi principali. Per il contenimento delle deformazioni delle strutture secondarie (e valutate le necessità di cantiere, urbanistiche e di scelta della committenza) è stata individuata in tali zone di solaio una ulteriore orditura strutturale (in legno lamellare) ortogonale alle strutture secondarie. La presente relazione prende in considerazione le unità di testa.

Si ricorda che, accanto a questa configurazione originaria, nella presente tesi verranno analizzate diverse soluzioni sia per quanto riguarda la struttura portante (c.a. e acciaio) sia i tamponamenti (secco e umido).

### 2.2.2. L'edificio caso di studio

Come già anticipato, l'attenzione verrà focalizzata su un unico corpo di fabbrica. Si tratta di uno dei due corpi di testa speculari, denominato A1.

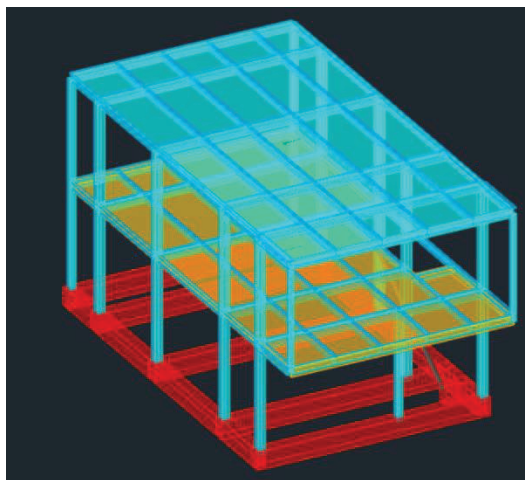
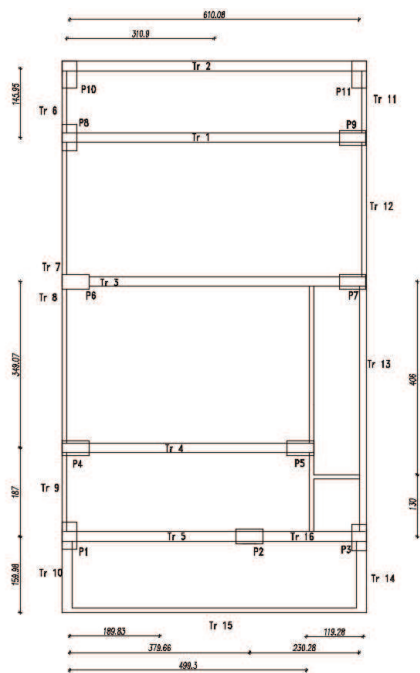


Figura 2.2-1: Modello 3D dell'edificio caso di studio.

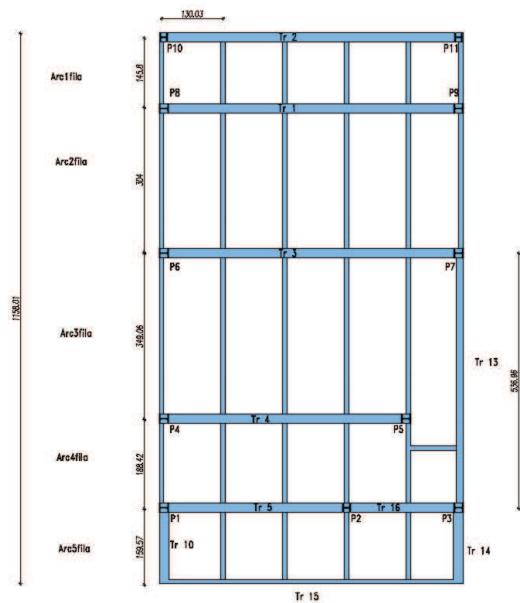


Il corpo A1 presenta una fondazione composta da 10 cm di sottofondazione in cls magro, 20 cm di platea di fondazione in calcestruzzo sulla quale poggiano i vespai aerati e gli 80 cm di nervature di fondazione. La struttura portante originale è costituita da un telaio in acciaio. Noi analizzeremo sia la soluzione in acciaio che quella con struttura portante in C.a.

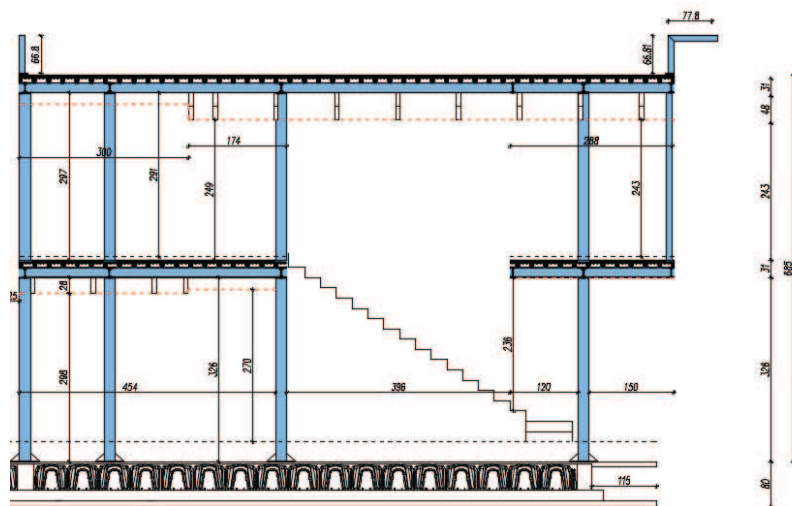
Gli elementi strutturali principali sono visualizzati nelle figure sottostanti.



STRUTTURA C.A.



STRUTTURA ACCIAIO



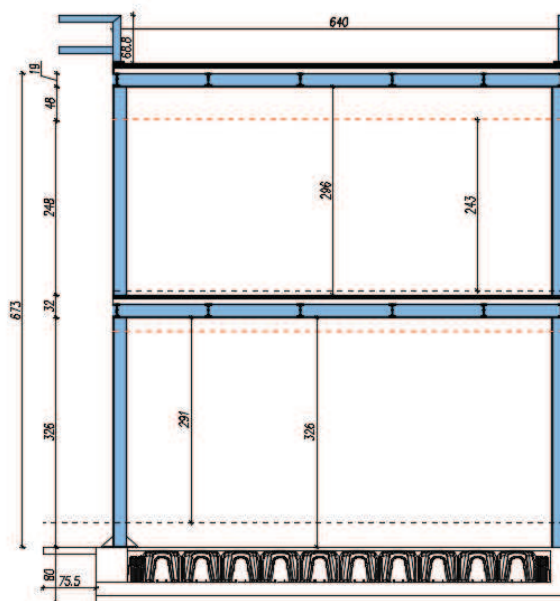


Figura 2.2-2: piante e sezioni del reale edificio oggetto di studio (acciaio)

Essendo la costruzione ad uso residenziale, essa presenta una vita nominale  $V_N$  di 50 anni (“Opere ordinarie”, tabella 2.4.II - NTC’08, /4/) e può essere considerata di classe II (“Costruzioni il cui uso preveda normali affollamenti, senza contenuti pericolosi per l’ambiente e senza funzioni pubbliche e sociali essenziali”), cui corrisponde un coefficiente d’uso  $C_U$  pari a 1.

Il periodo di riferimento per l’azione sismica è quindi pari a:

$$V_R = V_N \cdot C_U = 50 \cdot 1 = 50 \text{ anni}$$

L’edificio può essere considerato regolare in pianta, dal momento che, secondo quanto esposto al §7.2.2 delle NTC’08 (/4/), sono verificate le seguenti condizioni:

- la configurazione in pianta è compatta e approssimativamente simmetrica rispetto a due direzioni ortogonali, in relazione alla distribuzione di masse e rigidezze;
- il rapporto tra i lati di un rettangolo in cui la costruzione risulta inscritta è inferiore a 4;
- nessuna dimensione di eventuali rientri o sporgenze supera il 25 % della dimensione totale della costruzione nella corrispondente direzione;
- gli orizzontamenti possono essere considerati infinitamente rigidi nel loro piano rispetto agli elementi verticali e sufficientemente resistenti.

Per quanto riguarda le prime tre condizioni, il soddisfacimento dei requisiti richiesti si evince dall’analisi delle piante riportare in Figura 2.2-2.

In particolare, l'ultima condizione risulta verificata dal momento che i solai d'interpiano presentano una soletta di 4 cm; tale condizione è la minima affinché sia garantita l'infinita rigidezza, secondo quanto espresso dalle NTC'08, /4/ (§7.2.6).

Si ha regolarità in altezza se sono rispettate le seguenti condizioni:

- tutti i sistemi resistenti verticali (quali telai e pareti) si estendono per tutta l'altezza della costruzione;
- massa e rigidezza rimangono costanti o variano gradualmente, senza bruschi cambiamenti, dalla base alla sommità della costruzione (le variazioni di massa da un orizzontamento all'altro non superano il 25 %, la rigidezza non si riduce da un orizzontamento a quello sovrastante più del 30% e non aumenta più del 10%); ai fini della rigidezza si possono considerare regolari in altezza strutture dotate di pareti o nuclei in c.a. o pareti e nuclei in muratura di sezione costante sull'altezza o di telai controventati in acciaio, ai quali sia affidato almeno il 50% dell'azione sismica alla base;
- nelle strutture intelaiate progettate in CD "B" il rapporto tra resistenza effettiva e resistenza richiesta dal calcolo non è significativamente diverso per orizzontamenti diversi (il rapporto fra la resistenza effettiva e quella richiesta, calcolata ad un generico orizzontamento, non deve differire più del 20% dall'analogo rapporto determinato per un altro orizzontamento); può fare eccezione l'ultimo orizzontamento di strutture intelaiate di almeno tre orizzontamenti;
- eventuali restringimenti della sezione orizzontale della costruzione avvengono in modo graduale da un orizzontamento al successivo, rispettando i seguenti limiti: ad ogni orizzontamento il rientro non supera il 30% della dimensione corrispondente al primo orizzontamento, né il 20% della dimensione corrispondente all'orizzontamento immediatamente sottostante. Fa eccezione l'ultimo orizzontamento di costruzioni di almeno quattro piani per il quale non sono previste limitazioni di restringimento.

Essendo presente uno sbalzo al primo piano, si è ritenuto opportuno considerare l'edificio come non regolare in altezza.

Il fattore di struttura  $q$  della costruzione in esame può essere calcolato come (§7.3.1 – NTC'08, /4/):

$$q = q_0 \cdot K_R$$

in cui:

$q_0$  è il valore massimo del fattore di struttura che dipende dal livello di duttilità attesa, dalla tipologia strutturale e dal rapporto  $\alpha_u/\alpha_1$  tra il valore dell'azione sismica per il quale si verifica la formazione di un numero di cerniere plastiche tali da rendere la struttura labile e quello per il quale il primo elemento strutturale raggiunge la plasticizzazione a flessione;

$K_R$  è un fattore riduttivo che dipende dalle caratteristiche di regolarità in altezza della costruzione, con valore pari ad 1 per costruzioni regolari in altezza e pari a 0,8 per costruzioni non regolari in altezza.

Il valore di  $q_0$  si può ricavare dalla tabella 7.4.I delle NTC'08 (/4/):

Tipologia	$q_0$	
	CD"B"	CD"A"
Strutture a telaio, a pareti accoppiate, miste	$3,0\alpha_u/\alpha_1$	$4,5\alpha_u/\alpha_1$
Strutture a pareti non accoppiate	3,0	$4,0\alpha_u/\alpha_1$
Strutture deformabili torsionalmente	2,0	3,0
Strutture a pendolo inverso	1,5	2,0

tabella 2.2-2: tabella 7.4.I delle NTC'08 (/4/)

Per strutture a telaio in CD"B" si assume un valore di  $q_0$  pari a  $3\alpha_u/\alpha_1$ ; trattandosi di una struttura a telaio con più piani e più campate che soddisfa i criteri di regolarità in pianta di cui al §7.2.2 delle NTC'08 (/4/), la normativa suggerisce di assumere un rapporto  $\alpha_u/\alpha_1$  pari a 1,3. Il coefficiente  $K_R$  è stato assunto uguale a 0,8 ritenendo che l'edificio non soddisfi i criteri di regolarità in altezza. Tale valore è stato assunto uguale per entrambe le direzioni ortogonali della pianta dell'edificio.

Quindi si avrà che:

$$q_{CD"B"} = 3,0 \frac{\alpha_u}{\alpha_1} \cdot 0,8 = 3,0 \cdot 1,3 \cdot 0,8 = 3,12$$

Per quanto riguarda la soluzione con struttura portante in acciaio, il valore di  $q_0$  si può ricavare dalla tabella 7.5.II delle NTC'08 (/4/):

**Tabella 7.5.II** – Limiti superiori dei valori di  $q_0$  per le diverse tipologie strutturali e le diverse classi di duttilità.

TIPOLOGIA STRUTTURALE	$q_0$	
	CD "B"	CD "A"
a) Strutture intelaiate	4	$5\alpha_u/\alpha_1$
c) Strutture con controventi eccentrici		
b1) Controventi concentrici a diagonale tesa attiva	4	4
b2) Controventi concentrici a V	2	2,5
d) Strutture a mensola o a pendolo inverso	2	$2\alpha_u/\alpha_1$
e) Strutture intelaiate con controventi concentrici	4	$4\alpha_u/\alpha_1$
f) Strutture intelaiate con tamponature in muratura	2	2

tabella 2.2-2: tabella 7.5.II delle NTC'08 (/4/)

Per strutture a telaio in CD"B" si assume un valore di  $q_0$  pari a 4. Il coefficiente  $K_R$  è stato assunto uguale a 0,8 ritenendo che l'edificio non soddisfi i criteri di regolarità in altezza. Tale valore è stato assunto uguale per entrambe le direzioni ortogonali della pianta dell'edificio.

Quindi si avrà che:

$$q_{CD"B"} = 4,0 \cdot 0,8 = 3,2$$

## 2.3. Descrizione dei pacchetti di tamponamento

### 2.3.1. Tecnologia a secco

#### 2.3.1.1. Pannelli esterni

I pannelli di tamponamento esterni realizzati con tecnologia S/R sono stati organizzati con la stratigrafia esposta nella figura sottostante.

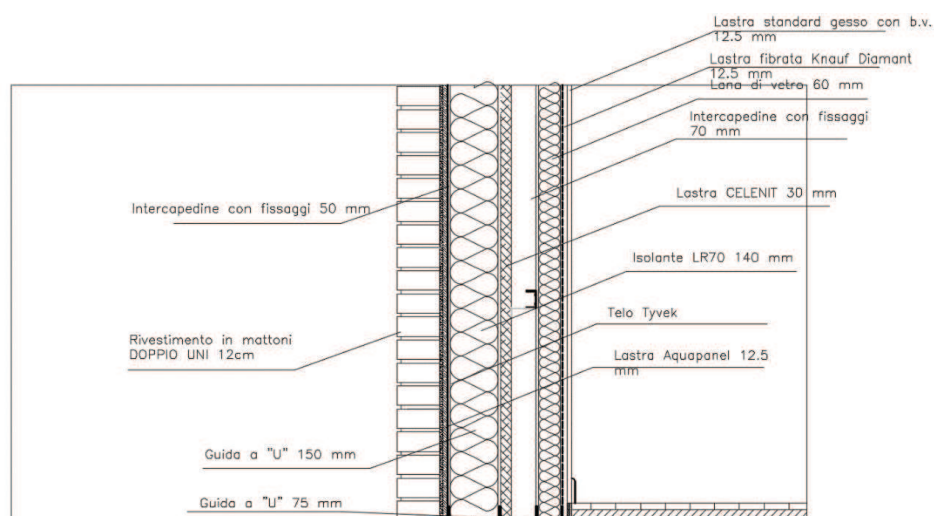


Figura 2.3-1: stratigrafia pacchetto a secco

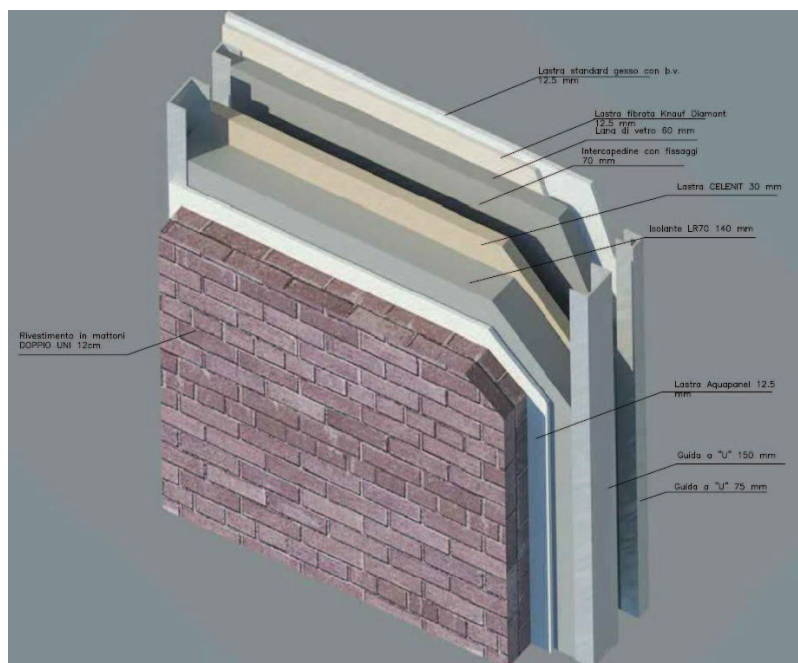


figura 2.3-1A: modello 3D del pacchetto a secco con muratura facciavista

Questa soluzione, che presenta uno spessore complessivo di 54 cm (25,5 cm senza considerare i mattoni facciavista e considerando solo gli spessori reali degli elementi, senza le intercapedini d'aria), è caratterizzata dalla presenza di strati di materiali eterogenei dal punto di vista della rigidità. La lana di roccia, formata da filamenti di silicato amorfo prodotto dalla roccia, non fornisce contributi sotto questo punto di vista. La rigidità del pacchetto è dovuta al pannello Aquapanel e alla lastra CELENIT.

Nel seguito si riportano i pesi dei materiali indicati, le relative schede tecniche sono riportate nel §2.3.3.

- Mattoni facciavista: mattoni DOPPIO UNI cm 12, di peso specifico di  $1100 \text{ kg/m}^3 = 11 \text{ kN/m}^3$  (lo spessore del mattone è 12 cm quindi per trovare il peso per unità di superficie:  $11 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \cdot 0,12 \text{ m} = 1,32 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$ ). Questo involucro esterno in mattoni poggia sulla sua fondazione, è svincolato dal resto del pacchetto, quindi non viene considerato nella sommatoria dei pesi della parete esterna per un'analisi statica e quindi nel predimensionamento delle travi. Altro discorso invece per quanto riguarda l'analisi sismica.

Si noti che la muratura facciavista è ancorata orizzontalmente al resto del pacchetto (e in particolare alla lastra Aquapanel, mediante dei tralicci d'acciaio (Murfor) parzialmente annegati nella malta tra i mattoni e fissati, all'altro capo, alla lastra;

- Intercapedine d'aria di spessore 5 cm con fissaggi. Questa intercapedine viene pensata sia per predisporre una eventuale parete ventilata, sia per poter sistemare pannelli aggiuntivi di polistirene di 4 cm, ove richiesto, nei punti più deboli termicamente;
- Lastra Knauf Aquapanel mm 12,5 ( $16 \text{ kg/m}^2 = 0,16 \text{ kN/m}^2$ );
- Barriera all'acqua Tyvek (il peso è stato trascurato nel calcolo);
- Pannello in lana di roccia cm 14, di peso specifico di  $70 \text{ kg/m}^3 = 0,70 \text{ kN/m}^3$ ;
- Lastra CELENIT 30 mm ( $13 \text{ kg/m}^2 = 0,13 \text{ kN/m}^2$ );
- Intercapedine d'aria di spessore 7 cm con fissaggi;
- Pannello in lana di vetro biosolubile mm 60;
- Lastra fibrata Knauf Diamant ( $0,128 \text{ kN/m}^2$ );
- Lastra standard cartongesso con barriera al vapore ( $0,08 \text{ kN/m}^2$ );
- Profilo guida a U in acciaio 40x150x40cm sp.8/10 del peso lineare di 1,4 kg/m. Moltiplicando il peso per il numero di profili in un metro di larghezza si ottiene il peso per unità di superficie (si consideri che una guida è fissata a pavimento e l'altra a soffitto):

$$1,4 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \cdot \frac{2}{1\text{m}} = 2,8 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} = 0,028 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

- Profilo guida a U in acciaio 40x75x40cm sp.8/10 del peso lineare di 0,94 kg/m. Moltiplicando il peso per il numero di profili in un metro di larghezza si ottiene il peso per unità di superficie (si consideri che una guida è fissata a pavimento e l'altra a soffitto):



$$0,94 \frac{kg}{m} \cdot \frac{2}{1m} = 1,88 \frac{kg}{m^2} = 0,0188 \frac{kN}{m^2}$$

- Profilo montante a C in acciaio 50x150x50cm sp.8/10 del peso lineare di 1,59 kg/m e di interasse pari a 60cm; moltiplicando il peso per il numero di profili in un metro di larghezza si ottiene il peso al metro quadrato (da notare che i profili sono accoppiati schiena contro schiena):

$$1,59 \frac{kg}{m} \cdot \frac{2}{0,6m} = 5,3 \frac{kg}{m^2} = 0,053 \frac{kN}{m^2}$$

- Profilo montante a C in acciaio 50x75x50cm sp.8/10 del peso lineare di 1,13 kg/m e di interasse pari a 60cm; moltiplicando il peso per il numero di profili in un metro di larghezza si ottiene il peso al metro quadrato (da notare che i profili sono accoppiati schiena contro schiena):

$$1,13 \frac{kg}{m} \cdot \frac{2}{0,6m} = 1,89 \frac{kg}{m^2} = 0,037 \frac{kN}{m^2}$$

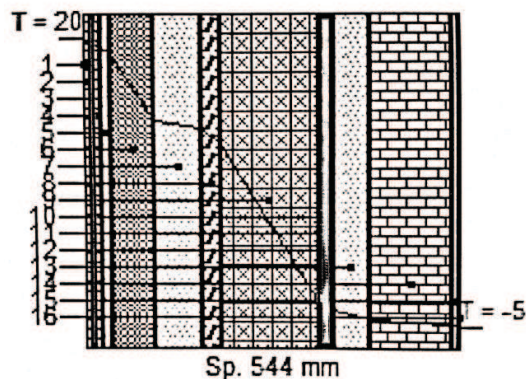
Il peso a m<sup>2</sup> della parete di tamponamento esterno risulta quindi pari a:

	SPESSORE (mm)	PESO (kN/m <sup>2</sup> )
Rivestimento mattoni facciavista	120	1,32
Lastra Aquapanel	12,5	0,16
Isolante in lana di roccia	140	0,098
Lastra CELENIT	30	0,13
Lana di vetro biosolubile	60	0,042
Lastra fibrata Knauf Diamant	12,5	0,12
Lastra standard con barriera al vapore	12,5	0,08
Profilo guida a U 40x150x40	-	0,028
Profilo guida a U 40x75x40	-	0,0188
Profilo montante a C 50x150x50	-	0,053
Profilo montante a C 50x75x50	-	0,037
	$\Sigma$	0,6
	$\Sigma$ con facciavista	1,9

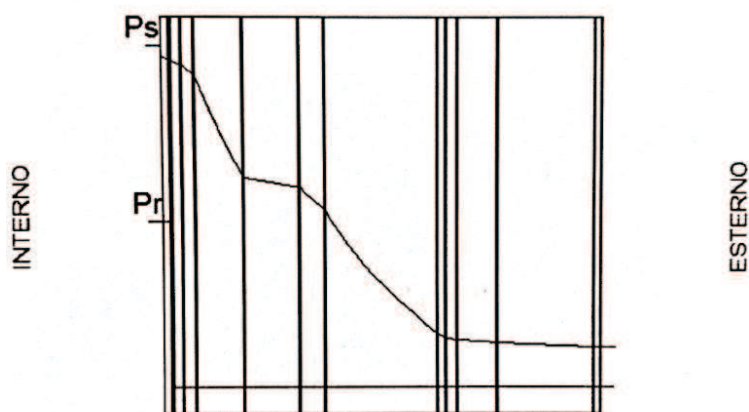
tabella 2.3-1: calcolo del peso al metro quadrato del muro di tamponamento esterno

In seguito è riportata l'analisi termica del pacchetto a secco in questione, con il relativo diagramma delle pressioni.

## STRATIGRAFIA STRUTTURA



## DIAGRAMMI DELLE PRESSIONI



## CARATTERISTICHE TERMICHE E IGROMETRICHE DEI COMPONENTI OPACHI

Codice Struttura: T1\_Gac19  
 Descrizione Struttura: Involucro aquapanel 150\_celenit\_later

N.	DESCRIZIONE STRATO (dall'interno all'esterno)	s [mm]	lambda [W/mK]	C [W/m²K]	M.S. [kg/m²]	P<50*10¹¹ [kg/msPa]	C.S. [J/kgK]	R [m²K/W]
1	Adduttanza interna	0		7.700			0	0.130
2	Cartongesso in lastre	12	0.210	17.500	10.80	23.000	1000	0.057
3	Fogli di materiale sintetico barriera vapore.	1	0.230	230.000	1.10	0.000	900	0.004
4	gesso fibrato rivestito	12	0.210	17.500	12.00	23.000	1000	0.057
5	Strato d'aria verticale da 2 cm	15	0.114	7.620	0.02	193.000	1008	0.131
6	Pannello lana di vetro Indupan 35 - appl. interne - mv.21.	60	0.039	0.642	1.20	150.000	1000	1.558
7	Strato d'aria verticale da 7 cm	70	0.389	5.556	0.09	193.000	1008	0.180
8	Pannelli legno mineralizzato Celenit_N sp.3cm.	30	0.068	2.277	12.60	38.600	1000	0.439
9	Da rocce felsipatiche-pannelli rigidi- appl. interne - mv.125.	140	0.037	0.267	17.50	150.000	1030	3.743
10	Strato d'aria verticale da 1 cm	10	0.067	6.660	0.01	193.000	1008	0.150
11	Fogli di materiale sintetico.	1	0.230	230.000	1.10	0.010	900	0.004
12	gesso fibrato rivestito	13	0.210	16.154	13.00	23.000	1000	0.062
13	Strato d'aria verticale da 5 cm	50	0.278	5.556	0.07	193.000	1008	0.180
14	Mattoni: pieni/forati/leggeri/alta resistenza meccanica - umidità 1,5%- mv.1800.	120	0.806	6.720	216.00	20.570	840	0.149
15	Intonaco di calce e gesso.	10	0.900	90.000	18.00	12.000	1000	0.011
16	Adduttanza Esterna	0		25.000			0	0.040
RESISTENZA = 6.897 m²K/W						TRASMITTANZA = 0.145 W/m²K		
SPESSORE = 544 mm				CAPACITA' TERMICA AREICA (int) = 23.328 kJ/m²K		MASSA SUPERFICIALE = 285 kg/m²		
TRASMITTANZA TERMICA PERIODICA = 0.02 W/m²K				FATTORE DI ATTENUAZIONE = 0.17		SFASAMENTO = -8.26 h		

s = Spessore dello strato; lambda = Conduttività termica del materiale; C = Conduttanza unitaria; M.S. = Massa Superficiale; P<50\*10¹¹ = Permeabilità al vapore con umidità relativa fino al 50%; C.S. = Calore Specifico; R = Resistenza termica dei singoli strati; Resistenza - Trasmittezza = Valori di resistenza e trasmittezza reali; Massa Superficiale = Valore calcolato come disposto nell'Allegato A del D.Lgs. 192/05 e s.m.i..

figura 2.3-2: pacchetto a secco: analisi termica

Per i tamponamenti esterni della parte a sbalzo si è utilizzata una soluzione alternativa, introducendo un rivestimento a cappotto nella parte più esterna della parete, al posto dei mattoni facciavista. Questo perché i mattoni, visto lo sbalzo, non potrebbero poggiare sulla loro fondazione dedicata e quindi sarebbero parte integrante del pacchetto, aumentando notevolmente il peso del tamponamento stesso. I pannelli di tamponamento esterni a sbalzo sono stati realizzati con la stratigrafia esposta nella figura sottostante.

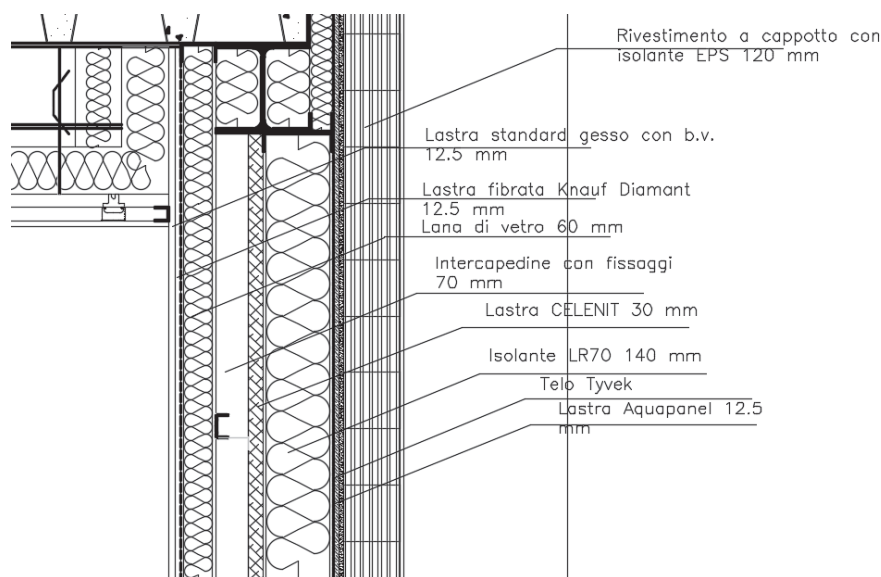


figura 2.3-3: pacchetto a secco con rivestimento a cappotto

Il peso a  $\text{m}^2$  della parete di tamponamento esterno a sbalzo risulta quindi pari a:

	SPESSORE (mm)	PESO ( $\text{kN/m}^2$ )
Rivestimento a cappotto con isolante EPS	120	0,021
Lastra Aquapanel	12,5	0,16
Isolante in lana di roccia	140	0,098
Lastra CELENIT	30	0,13
Lana di vetro biosolubile	60	0,042
Lastra standard con barriera al vapore	12,5	0,08
Lastra fibrata Knauf Diamant	12,5	0,12
Profilo guida a U 40x150x40	-	0,028
Profilo guida a U 40x75x40	-	0,0188
Profilo montante a C 50x150x50	-	0,053
Profilo montante a C 50x75x50	-	0,037
<b><math>\Sigma</math></b>		<b>0,62</b>

tabella 2.3-2: calcolo del peso al metro quadrato del muro di tamponamento esterno a sbalzo

Infine, per le pareti divisorie tra unità immobiliari si ha che dal giunto strutturale di 8 cm, procedendo verso una delle residenze (la stratigrafia è simmetrica), si incontra un blocco in laterizio tipo LecaBlocco

T8 semipieno spessore 8cm di dimensioni 8x28x55cm, uno strato di isolante e quindi una controparete in cartongesso a doppia lastra (standard+fibrata) come già viste sopra.

Questo tipo di soluzione presenta buone prestazioni anche in campo acustico, con un abbattimento di almeno 65 dB. Il che la rende idonea per essere utilizzata come divisorio fra unità abitative differenti.

La stratigrafia del pacchetto con LecaBlocco è esposta in figura.

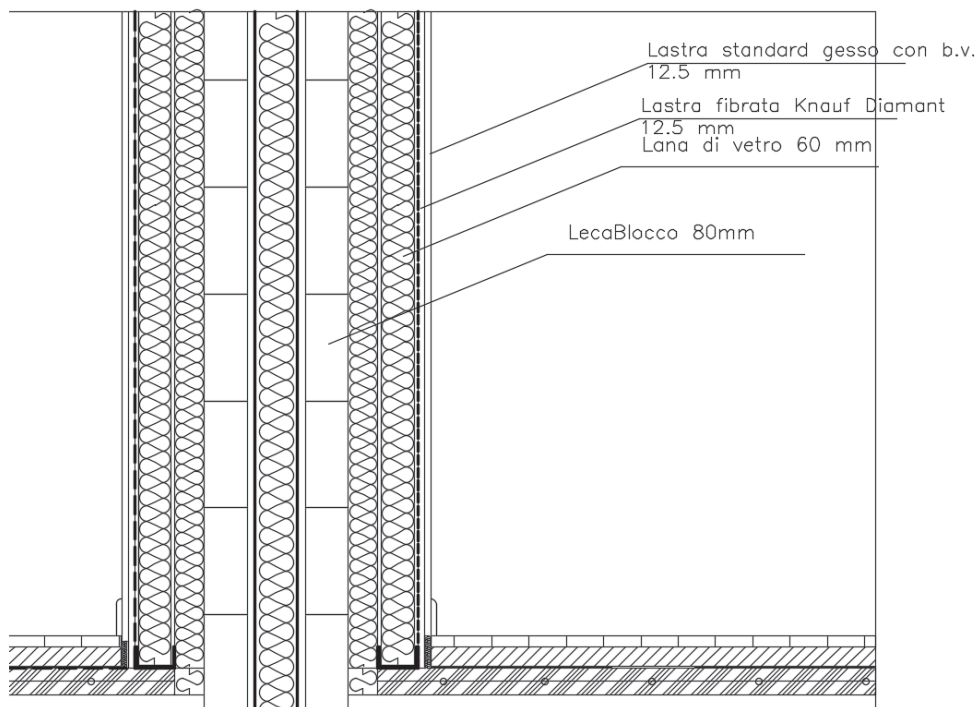


figura 2.3-4: pacchetto con LecaBlocco

Procedendo in maniera del tutto analoga a quanto riportato in precedenza si può calcolare il peso a m<sup>2</sup> del muro divisorio tra unità abitative, che risulta quindi pari a:

	SPESSORE (mm)	PESO (kN/m <sup>2</sup> )
LecaBlocco T8	80	0,48
Lana di vetro biosolubile	60	0,042
Lastra fibrata Knauf Diamant	12,5	0,12
Lastra standard con barriera al vapore	12,5	0,08
Profilo guida a U 40x75x40	-	0,0188
Profilo montante a C 50x75x50	-	0,037
<b>Σ</b>		<b>0,77</b>

tabella 2.3-3: calcolo del peso al metro quadrato del muro divisorio tra unità abitative