

**CAPITOLO III**  
**PROGETTO TECNOLOGICO**



# VIII. VERIFICHE ARCHITETTONICHE

<b>A. ANTINCENDIO</b> .....	283
1. Generalità.....	283
2. Protezione passiva.....	284
a) Piano Seminterrato.....	284
b) Piano Terra.....	285
c) Primo Piano.....	286
d) Secondo Piano.....	286
e) Vie di uscite.....	287
3. Protezione attiva.....	287
a) Rete idranti.....	287
b) Estintori.....	287
4. Piante antincendio.....	289
a) Piano Seminterrato.....	289
b) Piano Terra.....	291
c) Primo Piano.....	293
d) Secondo Piano.....	295
<b>B. ACCESSIBILITÀ</b> .....	297
1. Norme.....	297
a) Scale.....	297
b) Rampe.....	297
c) Parcheggi.....	297
d) Arredi.....	297
e) Balconi e terrazze.....	298
f) Corridoi e percorsi.....	298
g) Ascensore.....	298
h) Servizi igienici.....	298
2. Progettazione.....	299
a) Scale.....	299
b) Rampe.....	299
c) Parcheggi.....	299
d) Arredi.....	299
e) Balconi e terrazze.....	299
f) Corridoi e percorsi.....	299
g) Ascensore.....	299
h) Servizi igienici.....	299



# A. ANTINCENDIO

## 1. GENERALITÀ

Il progetto antincendio si riferisce alla norme di prevenzione antincendi per l'edilizia scolastica del D.M. 26 agosto 1992.

Le presenti norme si applicano agli edifici di nuova costruzione o agli edifici in ristrutturazione nei casi seguenti:

- Rifacimento di oltre il 50% dei solai;
- Rifacimento strutturale delle scale;
- L'aumento di altezza.

Le scuole sono divise in diversi tipi a secondo della presenza contemporanea di persone.

Tipo	Numero di presenze contemporanee
0	fino a 100 persone
1	da 101 a 300 persone
2	da 301 a 500 persone
3	da 501 a 800 persone
4	da 801 a 1200 persone
5	oltre le 1200 persone

figura VIII.346: Tabella dei diversi tipi di scuole

Per consentire l'accesso dei Vigile del Fuoco bisogna avere un accesso che verifica le caratteristiche seguenti:

- Larghezza: 3,50 m;
- Altezza libera: 4 m;
- Raggio di volta: 13 m;
- Pendenza: non superiore al 10%;
- Resistenza al carico: almeno 20 tonnellate (8 sull'asse anteriore e 12 sull'asse posteriore: passo 4 m).

Comportamento al fuoco delle strutture:

A secondo della circolare del Ministero dell'interno n.91 del 14 settembre 1961, le strutture devono avere una resistenza al fuoco determinata nella tabella seguente:

Altezza	Struttura portante	Struttura separente
< 24 m	R 60	REI 60
> 24 m	R 90	REI 90

figura VIII.347: Tabella delle resistenze al fuoco a secondo dell'altezza

Per assicurare la sicurezza, gli edifici devono essere

suddivisi in compartimenti, potendo essere costituiti di più piani. La superficie dei compartimenti non deve superare quella definita nella tabella seguente:

Altezza antincendi	Massima superficie del compartimento (m <sup>2</sup> )
fino a 12 m	6000
da 12 m a 24 m	6000
da oltre 24 m a 32 m	4000
da oltre 32 m a 54 m	2000

figura VIII.348: Tabella della superficie dei compartimenti a secondo dell'altezza dell'edificio

La larghezza minima delle scale deve essere di 1.2 m.

Le rampe devono essere rettilinee, senza restringimenti, tra 3 e 15 gradini. I gradini devono essere rettangolari, di altezza inferiore a 17 cm e con una pedata costante superiore a 30 cm. Sono ammesse rampe non rettilinee a condizione che vi siano pianerottoli di riposo e che la pedata del gradino sia almeno 30 cm, misurata a 40 cm dal montante centrale o dal parapetto interno.

La resistenza al fuoco dei vani ascensori devono seguire ciò previsto dalla "figura VIII.347: Tabella delle resistenze al fuoco a secondo dell'altezza".

Gli ascensori e monta carichi di nuova installazione devono seguire il punto 2.5 del decreto del Ministro dell'interno del 16 maggio 1987, n. 246.

Ogni scuola deve avere almeno due uscite verso un luogo sicuro.

Per ogni piano frequentati dagli alunni o dal personale si deve prevedere almeno di una scala di sicurezza esterna o scala a prova di fumo (interno a esterno).

Esiste una derogazione:

"Edifici a tre piani fuori terra: limitatamente agli edifici a tre piani fuori terra è ammesso che, in luogo della scala esterna o a prova di fumo, sia realizzata una scala protetta a condizione che tutte le scale siano protette e che adducano, attraverso percorsi di esodo, all'esterno."

Si definisce come piano fuori terra il piano di un edificio il cui pavimento si trovi in ogni suo punto perimetrale a una quota uguale o superiore a quella del terreno circostante così come risulta modificato anche in seguito alle opere di sistemazione.

Si definisce come via di esodo un percorso senza ostacoli al deflusso che consente alle persone che occupano un edificio o un locale di raggiungere un luogo sicuro.

Il progetto entra nella categoria della derogazione, superiore a 60m. quindi le due scale interne sono delle scale protette.

Dimensionamento delle vie di uscita:

Ad ogni piano si deve calcolare l'affollamento ipotizzabile definito come segue:

- Aule, Uffici, laboratori: numero di persone con un massimo di 26 persone
- Sala da pranzo: 0.4 persone / m<sup>2</sup>,
- Servizi, spogliatoi o corridoi: (numero di persone totale del piano)\*0.2.

Si divide l'affollamento ipotizzabile per 60 per avere l'unità di passaggio per le vie di uscita.

La larghezza delle vie di uscita deve essere di 0.6m\*unità di passaggio con un minimo di 1.2m.

La lunghezza delle vie di uscita non deve essere su-

Il piano superiore del progetto è collocato 10.20 m di altezza quindi non bisogna prevedere un accesso ad ogni piano per l'accostamento delle autoscale dei vigili del fuoco.

In più si deve verificare:

- Per le mense, spazi per esercitazione, per l'informazione e attività parascolastica: una porta di accesso e una uscita di larghezza superiore a 1.2 m che adduca in luogo sicuro (non vale per laboratorio di informatica o di lingua)
- Per le aule didattiche: una porta superiore a 1.2 m di larghezza per ogni 50 persone. La porta si apre verso l'esterno se la capacità dell'aula è superiore a 25 persone. Non devono ridurre la larghezza utile dei corridoi

Per gli edifici con locali siti a più di 12m di altezza, si deve prevedere l'accostamento delle autoscale dei Vigili del fuoco almeno ad una finestra o balcone di ogni piano.

## 2. PROTEZIONE PASSIVA

### a) Piano Seminterrato

Aula	Piano	Superficie	Affollamento	Via di uscita	Distanza massima
Aula 1	Piano Seminterrato	67 m <sup>2</sup>	26 persone	E1	
Aula 2	Piano Seminterrato	67 m <sup>2</sup>	26 persone	E1	
Aula 3	Piano Seminterrato	55 m <sup>2</sup>	26 persone	S1	
Aula 4	Piano Seminterrato	59 m <sup>2</sup>	26 persone	S1	
Aula 5	Piano Seminterrato	47 m <sup>2</sup>	26 persone	S1	
Ufficio 10	Piano Seminterrato	m <sup>2</sup>	1 persona	E1	
Laboratorio di cucina	Piano Seminterrato	124 m <sup>2</sup>	26 persone	S1	
Portineria	Piano Seminterrato	20 m <sup>2</sup>	1 persona	S1	
Corridoi, Spogliatoi, servizi	Piano Seminterrato	-	32 persone	S1, E1	

figura VIII.349: Affollamento e vie di fuga per ogni aula del piano seminterrato

## b) Piano Terra

Aula	Piano	Superficie	Affollamento	Via di uscita	Distanza massima
Aula 6	Piano Terra	56 m <sup>2</sup>	26 persone	E1	
Aula 7	Piano Terra	59 m <sup>2</sup>	26 persone	E2	
Aula 8	Piano Terra	47 m <sup>2</sup>	24 persone	E2	
Laboratorio acconciatura	Piano Terra	75 m <sup>2</sup>	26 persone	E1	
Laboratorio bar	Piano Terra	70 m <sup>2</sup>	26 persone	E1	
Sala Multimediale	Piano Terra	195 m <sup>2</sup>	78 persone	S2	
Sala da pranzo	Piano Terra	268 m <sup>2</sup>	107 persone	E4	
Aula Informatica	Piano Terra	85m <sup>2</sup>	26 persone	E1	
Ufficio Direttore	Piano Terra	28 m <sup>2</sup>	1 persona	E4	
Ufficio 1	Piano Terra	14 m <sup>2</sup>	1 persona	E4	
Ufficio 2	Piano Terra	14 m <sup>2</sup>	1 persona	E4	
Ufficio 3	Piano Terra	14 m <sup>2</sup>	1 persona	E4	
Ufficio 4	Piano Terra	14 m <sup>2</sup>	1 persona	E4	
Ufficio 5	Piano Terra	12 m <sup>2</sup>	1 persona	E4	
Ufficio 6	Piano Terra	12 m <sup>2</sup>	1 persona	E4	
Ufficio 7	Piano Terra	12 m <sup>2</sup>	1 persona	E4	
Ufficio 8	Piano Terra	12 m <sup>2</sup>	1 persona	E4	
Ufficio 9	Piano Terra	14 m <sup>2</sup>	1 persona	E4	
Sala riunioni	Piano Terra	26 m <sup>2</sup>	1 persona	E4	
Corridoi, Spogliatoi, servizi	Piano Terra	-	70 persone	S2, E1, E2, E4	

figura VIII.350: Affollamento e vie di fuga per ogni aula del piano terra

### c) Primo Piano

Aula	Piano	Superficie	Affollamento	Via di uscita	Distanza massima
Aula 9	Primo Piano	40 m <sup>2</sup>	20 persone	E1	
Aula 10	Primo Piano	59 m <sup>2</sup>	26 persone	E1	
Aula 11	Primo Piano	41 m <sup>2</sup>	20 persone	E1	
Aula 12	Primo Piano	35 m <sup>2</sup>	17 persone	E1	
Aula 13	Primo Piano	60 m <sup>2</sup>	26 persone	E1	
Aula 14	Primo Piano	60 m <sup>2</sup>	26 persone	E2	
Aula 15	Primo Piano	38 m <sup>2</sup>	19 persone	E2	
Aula 16	Primo Piano	55 m <sup>2</sup>	26 persone	S3	
Aula 17	Primo Piano	59 m <sup>2</sup>	26 persone	S3	
Aula 18	Primo Piano	47 m <sup>2</sup>	23 persone	S3	
Laboratorio estetica	Primo Piano	75 m <sup>2</sup>	26 persone	S3	
Corridoi, Spogliatoi, servizi	Piano Terra	-	51 persone	S3, E1, E2	

figura VIII.351: Affollamento e vie di fuga per ogni aula del primo piano

### d) Secondo Piano

Aula	Piano	Superficie	Affollamento	Via di uscita	Distanza massima
Aula 19	Secondo Piano	65 m <sup>2</sup>	26 persone	E1	
Aula 20	Secondo Piano	65 m <sup>2</sup>	26 persone	E1	
Aula 21	Secondo Piano	29 m <sup>2</sup>	15 persone	E1	
Aula 22	Secondo Piano	29 m <sup>2</sup>	15 persone	E1	
Corridoi, Spogliatoi, servizi	Piano Terra	-	17 persone	E1	

figura VIII.352: Affollamento e vie di fuga per ogni aula del secondo piano

## e) Vie di uscite

Via di uscita	Piano	Affollamento ipotizzabile	Larghezza richiesta	Larghezza effettiva
S1	Piano Seminterrato	137 (105+32) persone	1.8 m	4.8 m
S2	Piano Terra	120 (78+42) persone	1.2 m	1.2 m
S3	Primo Piano	120 (101+19) persone	1.2 m	1.2 m
E1	Piano Seminterrato	53 persone	2.4 m	2.4 m
	Piano Terra	120 (78+12) persone		
	Primo Piano	120 (109+11) persone		
	Secondo Piano	99 persone		
E2	Piano Terra	60 (50+10) persone	1.2 m	1.2 m
	Primo Piano	60 (45+15) persone		
E4	Piano Terra	120 (118+2) persone	1.2 m	1.2 m

figura VIII.353: Dimensionamento delle vie di uscite

### 3. PROTEZIONE ATTIVA

#### a) Rete idranti

Scuole di tipo 1-2-3-4-5 devono essere dotate di una rete di idranti con una colonna montante in ciascun vano scala. Ad ogni piano almeno un idrante con attacco UNI 45 o attacco per napso. la lunghezza della tubazione deve permettere di proteggere ogni punto dell'edificio. Se napso: Tubazione semirigida con diametro minimo di 25mm.

1 attacco per autopompa per tutto l'impianto.

dimensionare l'impianto per avere almeno 360l/min

Le colonne montanti possono correre, a giorno a incassate, nei vani scale oppure in appositi alloggiamenti resistente al fuoco REI 60.

#### b) Estintori

Capacità non inferiore a 13A, 89B, C di tipo approvato dal ministero dell'interno

almeno un estintore per 200m<sup>2</sup> con un minimo di 200 estintori per ogni piano

13A è associato al potere di spegnimento di un estintore relativo a una catasta di legno delle dimensioni di 50 cm in larghezza e altezza, e 130 cm in lunghezza.

89B è associato al potere di spegnimento di un estintore relativo ad un liquido infiammabile composto per 2/3 (59,33 litri) di benzina e per 1/3 (29,67 litri) di acqua, contenuto in una vasca di diametro variabile; la

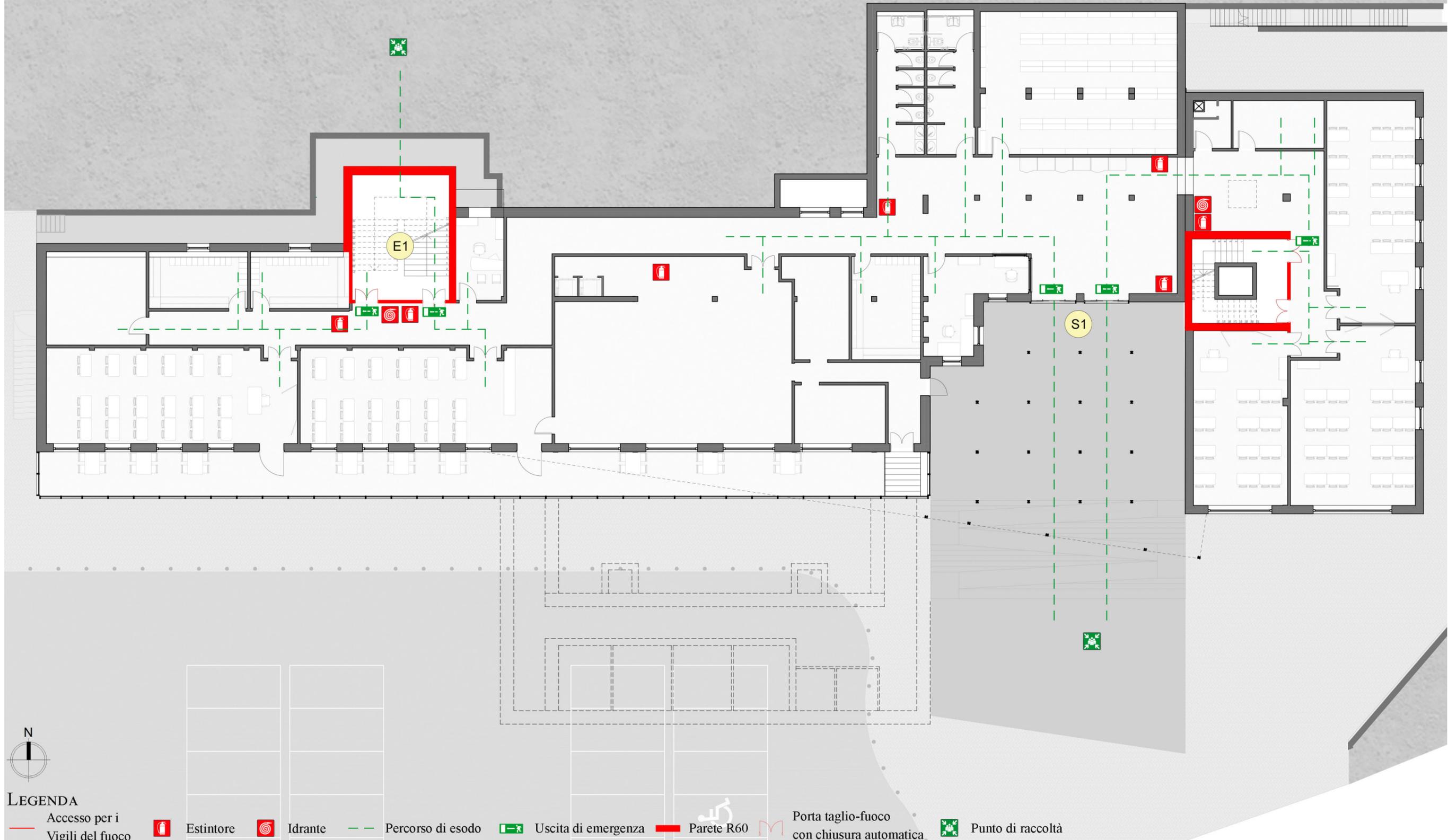
quantità di liquido totale è 89 litri, da cui il codice.

C Indica che tale estintore è adatto allo spegnimento degli incendi derivati da gas infiammabili.



# 4. PIANTE ANTINCENDIO

## a) Piano Seminterrato



### LEGENDA

- Accesso per i Vigili del fuoco
- 🔥 Estintore
- 🚒 Idrante
- Percorso di esodo
- 🚪 Uscita di emergenza
- 🚫 Parete R60
- 🚪 Porta taglia-fuoco con chiusura automatica
- 👤 Punto di raccolta



b) Piano Terra



LEGENDA

- Accesso per i Vigili del fuoco
- Estintore
- Idrante
- Percorso di esodo
- Uscita di emergenza
- Parete R60
- Porta taglia-fuoco con chiusura automatica
- Punto di raccolta



c) Primo Piano

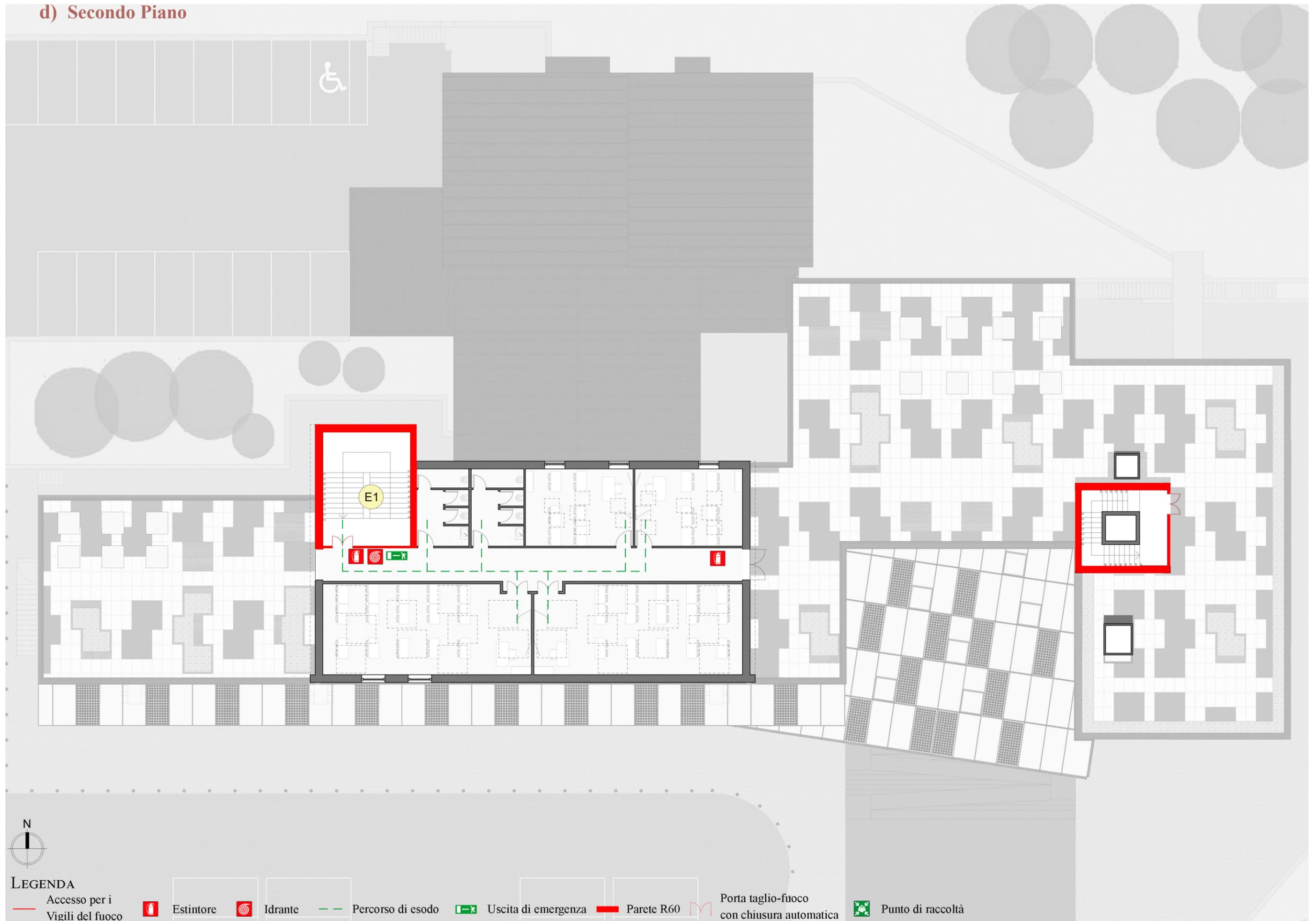


LEGENDA

- Accesso per i Vigili del fuoco
-  Estintore
-  Idrante
- Percorso di esodo
-  Uscita di emergenza
-  Parete R60
-  Porta taglia-fuoco con chiusura automatica
-  Punto di raccolta



d) Secondo Piano



LEGENDA

- Accesso per i Vigili del fuoco
-  Estintore
-  Idrante
- Percorso di esodo
-  Uscita di emergenza
-  Parete R60
-  Porta taglia-fuoco con chiusura automatica
-  Punto di raccolta



# B. ACCESSIBILITÀ

## 1. NORME

Per la verifiche delle barriere architettoniche, ci siamo basati sul decreto del Presidente della Repubblica 24 luglio 1996, n. 503: "Regolamento recante norme per l'eliminazione delle barriere architettoniche negli edifici, spazi e servizi pubblici.", e più particolarmente sull'articolo 23 che corrisponde agli edifici scolastici:

"Art. 23.

Edifici scolastici

1. Gli edifici delle istituzioni prescolastiche, scolastiche, comprese le università e delle altre istituzioni di interesse sociale nel settore della scuola devono assicurare la loro utilizzazione anche da parte di studenti non deambulanti o con difficoltà di deambulazione.

2. Le strutture interne devono avere le caratteristiche di cui agli articoli 7, 15, e 17, le strutture esterne quelle di cui all'art. 10.

3. L'arredamento, i sussidi didattici e le attrezzature necessarie per assicurare lo svolgimento delle attività didattiche devono avere caratteristiche particolari per ogni caso di invalidità (banchi, sedie, macchine da scrivere, materiale Braille, spogliatoi, ecc.).

4. Nel caso di edifici scolastici a più piani senza ascensore, la classe frequentata da un alunno non deambulante deve essere situata in un'aula al pianterreno raggiungibile mediante un percorso continuo orizzontale o raccordato con rampe."

Gli articoli summenzionati rinviano per una grande parte al decreto del Ministro dei lavori pubblici 14 giugno 1989, n. 236. Abbiamo riassunto questi articoli nelle parti seguenti.

### a) Scale

L'andamento delle scale deve essere regolare ed omogeneo cioè con la stessa altezza e pedata del gradino per ogni rampa di scale. La pedata non deve essere inferiore a 30 cm e due altezza più la pedata devono essere comprese fra 62 e 64 cm.

Tutte le scale devono avere una larghezza minima di 1.20 m con una pendenza limitata e costante per l'intero sviluppo della scala.

E' necessario prevedere un parapetto che costituisca la difesa verso il vuoto ad un'altezza minima di 1 m. Deve essere inattraversabile da una sfera di 10 cm di diametro.

Il corrimano deve essere ad un'altezza compresa fra 0.9 e 1 m ed essere prolungato da 30 cm oltre il primo e l'ultimo grado.

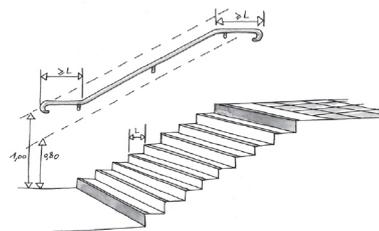


figura VIII.354: Immagine la circolare francese del 30 dicembre 2007 per l'accessibilità negli edificio aperti al pubblico

### b) Rampe

Una rampa di 0.9 m di larghezza può consentire il transito di una persona su sedia a ruote. Una rampe di 1.5 m di larghezza può consentire l'incrocio di due sedie a ruote.

Ogni 10 m di lunghezza si deve prevedere un ripiano orizzontale di dimensione 1.5m x 1.5m.

La pendenza della rampa non deve superare 8%.

### c) Parcheggi

Si deve prevedere un posto riservato ai veicoli al servizio di persone disabili per ogni frazione di 50 posti auto. Questi posti devono avere una larghezza minima di 3.2 m ed essere collocati in vicinanza dell'accesso dell'edificio.

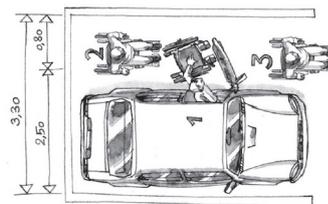
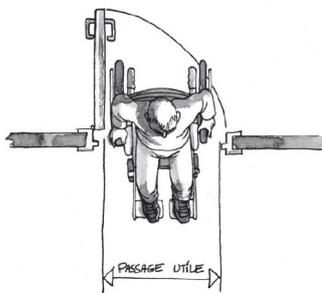


figura VIII.355: Immagine la circolare francese del 30 dicembre 2007 per l'accessibilità negli edificio aperti al pubblico

### d) Arredi

Le porte di accessi di ogni edificio devono avere una larghezza minima di 80 cm. Tutte le altre porte dell'edificio devono avere una larghezza minima di 75 cm. L'altezza delle maniglie deve essere compresa fra 85 e 95 cm.



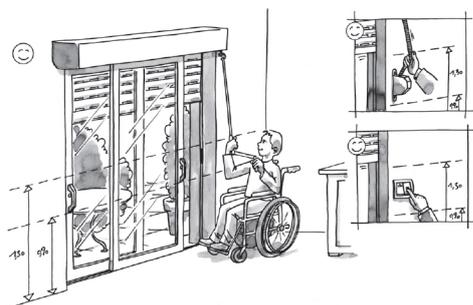
**figura VIII.356:** Immagine la circolare francese del 30 dicembre 2007 per l'accessibilità negli edificio aperti al pubblico

L'anta mobile deve poter essere usata esercitando una pressione non superiore a 8 Kg.



**figura VIII.357:** Immagine la circolare francese del 30 dicembre 2007 per l'accessibilità negli edificio aperti al pubblico

Per gli infissi esterni, le maniglie e dispositivi di comando devono essere ad un'altezza compresa fra 100 e 130 cm.

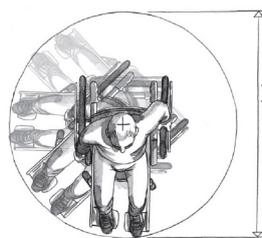


**figura VIII.358:** Immagine la circolare francese del 30 dicembre 2007 per l'accessibilità negli edificio aperti al pubblico

### e) Balconi e terrazze

Si deve prevedere uno spazio libero per permettere il cambiamento di direzione di una sedia a ruote (al minimo una circonferenza di diametro 140 cm). Il parapetto deve essere ad un'altezza minima di 100 cm ed essere inattraversabile da una sfera di 10 cm di

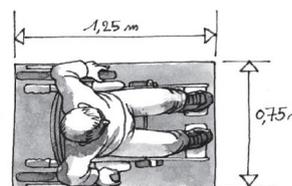
diametro.



**figura VIII.359:** Immagine la circolare francese del 30 dicembre 2007 per l'accessibilità negli edificio aperti al pubblico

### f) Corridoi e percorsi

La larghezza minima dei corridoi e percorsi deve essere di 100 cm. Si deve prevedere ogni 10 m di lunghezza uno spazio per permettere il cambiamento di direzione di una sedia a ruote.



**figura VIII.360:** Immagine la circolare francese del 30 dicembre 2007 per l'accessibilità negli edificio aperti al pubblico

### g) Ascensore

L'ascensore deve avere una profondità minima di 1.4 m ed una larghezza minima di 1.1 m con una luce minima dell'accesso di 80 cm. Davanti all'ascensore si deve prevedere uno spazio di dimensione minime 1.5m x 1.5m.

### h) Servizi igienici

Le dimensioni minimi per i bagni:

Lo spazio necessario all'accostamento e al trasferimento laterale dalla sedia a ruote alla tazza w.c. e al bidet, ove previsto, deve essere minimo 100 cm misurati dall'asse dell'apparecchio sanitario;

Lo spazio necessario all'accostamento laterale della sedia a ruote alla vasca deve essere minimo di 140 cm lungo la vasca con profondità minima di 80 cm;

Lo spazio necessario all'accostamento frontale della sedia a ruote al lavabo deve essere minimo di 80 cm misurati dal bordo anteriore del lavabo.

## 2. PROGETTAZIONE

### a) Scale

Nel progetto, ci sono due scale:

Prima scale:

- Larghezza: 2.4 m
- Pedata del grado: 30 cm
- Altezza del grado: 18 cm

Seconda scale:

- Larghezza: 1.28 m
- Pedata del grado: 30 cm
- Altezza del grado: 18 cm

### b) Rampe

Nel progetto c'è una rampa che permette di accedere all'ingresso principale della scuola:

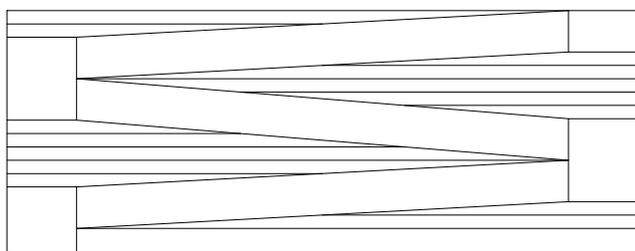


figura VIII.361: Rampa di accesso alla scuola

Questa rampa è divisa in tre rampe di 10m con dei ripiano di dimensione 1.5m x 1.5m .

La rampa misura 30 m per scendere di 1.55 m. Quindi la pendenza della rampa è di 5.2 %.

### c) Parcheggi

Sul parcheggio ci sono 48 posti auto tra cui due posti riservati ai veicoli al servizio di persone disabili. Questi posti misurano 3.3 m di larghezza, uno è collocato in vicinanza dell'ingresso principale della scuola e l'altro è collocato in vicinanza dell'ingresso della sala multimediale.

### d) Arredi

Le due porte d'ingresso sono delle porte scorrevoli con una larghezza utile di 2.35 m.

Nella scuola, ci sono quattro tipi di porte:

- Porte con un'anta per le aule piccole o per i servizi: 86 cm di larghezza utile.
- Porte con due ante per le aule grandi: 117 cm di larghezza utile
- Porte con un'anta grande fra le aule e la serra: 129 cm di larghezza utile.
- Porta di sicurezza: 120 cm di larghezza utile

### e) Balconi e terrazze

La terrazza è abbastanza larga per permettere il cambiamento di direzione per tutti.

E' evidentemente dotata di un parapetto a norma su tutta la sua periferia.

### f) Corridoi e percorsi

Il corridoio il meno largo è quello dell'amministrazione e misura 1.55 m di larghezza. Questa larghezza è sufficiente per permettere il cambiamento di direzione di una sedia a ruote.

### g) Ascensore

Lo spazio disponibile per l'ascensore misura 1.8m di profondità su 1.52m di larghezza. Lo spazio di attesa davanti all'ascensore ha una profondità di 1.6 m e una larghezza di 1.94 m.

### h) Servizi igienici

Abbiamo previsto 2 bagni attrezzati per disabili ad ogni piano (uno per i femmine ed uno per i maschi).



# IX. PROGETTO TECNOLOGICO

<b>A. PREMESSA</b> .....	303
1. Costruzione a secco.....	303
2. Prefabbricazione.....	303
3. Impatto ambientale.....	303
<b>B. VALUTAZIONE DELLE PRESTAZIONI</b> .....	304
1. Antincendio.....	304
a) REI.....	304
b) Reazione al fuoco dei materiali.....	304
2. Acustica.....	304
a) Definizione dei requisiti acustici.....	304
b) Valutazione delle prestazioni.....	305
c) Tempo di riverberazione.....	307
3. Igrotermiche.....	309
4. Termiche.....	309
<b>C. STRATIGRAFIE E PRESTAZIONI</b> .....	311
1. Scelta dei materiali.....	311
2. Chiusure verticali.....	315
a) CV1: Chiusura perimetrale.....	315
b) CV2: Chiusura perimetrale portante.....	317
c) CV3: Chiusura perimetrale autoportante del modulo.....	319
d) CV4: Chiusura perimetrale contro terra.....	321
3. Chiusure orizzontali.....	323
a) CO1: Tetto piano calpestabile.....	323
b) CO2: tetto verde non calpestabile.....	325
c) CO4: Solaio contro terra.....	327
d) CO5: Tetto del modulo.....	329
e) CO6: Solaio delle serre.....	331
4. Partizioni verticali.....	333
5. Partizione orizzontali.....	335
a) PO1: Partizione orizzontale.....	335
b) PO2: Solaio tra serra e mensa.....	337
c) PO3: Solaio sopraelevato.....	339
<b>D. PIANTE E SEZIONI TECNOLOGICHE</b> .....	341
1. Sezione AA'.....	341
2. Sezione BB'.....	343
3. Pianta tipa aula.....	345
<b>E. DETTAGLI TECNOLOGICI</b> .....	347
<b>F. BUDGET</b> .....	375



# A. PREMESSA

## 1. COSTRUZIONE A SECCO

Secondo i requisiti del committente, i lavori sulla scuola non dovrebbero impedire la tenuta delle lezioni. Il periodo in cui è possibile di effettuare gli interventi rumorosi, e di impermeabilizzazione all'aria e all'acqua è quindi di meno di tre mesi.

La soluzione di stratificazione verso la quale ci siamo orientati è quindi naturalmente una stratificazione a secco.

La struttura esistente, in calcestruzzo armato, sarà conservata, quando il non aumento dei carichi lo permetterà. Le nuove strutture saranno invece realizzate in acciaio, per quanto riguarda le serre a sud, ed in una struttura leggera in legno. (La struttura è stata studiata nella parte "X. Progetto strutturale".

Inoltre, abbiamo deciso di togliere i tamponamenti in mattoni e di sostituirli da chiusure orizzontali con una sotto-struttura leggera in legno. Questo ci permetterà di diminuire lo spessore e il peso delle pareti, pur aumentando l'isolamento termico. La diminuzione di spessore - associato con loro spostamento verso l'esterno - ci permette di aumentare il volume delle aule, mentre la diminuzione del peso ci ha permesso di conservare la struttura esistente, benché i carichi di servizi aumentino.

La sotto-struttura delle chiusure - orizzontali e verticali - del volume aggiunto sarà ugualmente realizzata in legno.

Per quanto riguarda le partizioni orizzontali esistenti, conserveremo il solaio in travetti a traliccio e pignatte esistente, che ricopriremo con un sistema di pavimento radiante a secco. Un sotto-soffitto per permettere il passaggio impiantistico sarà aggiunto.

Le nuove partizioni e chiusure orizzontali, tranne quella del modulo, avranno un solaio in Xlam, ciò che permette un montaggio molto veloce, e di ridurre il peso e la trasmittanza termica.

Le pareti divisorie saranno montati su una sotto-struttura metallica per aumentare la velocità di posa.

## 2. PREFABBRICAZIONE

Un altro elemento che permette la velocità di posa è la prefabbricazione delle chiusure. Infatti, dove non è presente un muro in calcestruzzo armato, la chiusura, verticale o orizzontale sarà prefabbricata. Questa prefabbricazione permette di impermeabilizzare l'edificio all'aria e al vento molto velocemente e di ridurre il tempo di cantiere. E quindi di diminuire i costi.

## 3. IMPATTO AMBIENTALE

Abbiamo attribuito particolare attenzione all'impatto ambientale dei materiali usati. In effetti, non possiamo avere un edificio a basso consumo, con un impatto ambientale alto durante la loro produzione e la loro fine di vita.

La maggior parte dei materiali che useremo sarà quindi riciclabile, e, quando possibile, derivata da prodotti riciclati.

# B. VALUTAZIONE DELLE PRESTAZIONI

## 1. ANTINCENDIO

Le caratteristiche di resistenza al fuoco si dividono in due categorie di requisiti normativi: la reazione al fuoco dei materiali, e la resistenza al fuoco delle strutture portanti.

### a) REI

Quell'ultimo è quantificato dal tempo durante il quale un elemento costruttivo mantiene le sue caratteristiche strutturali e termiche. Queste caratteristiche sono:

- la stabilità (R): capacità di un elemento da costruzione a conservare la propria resistenza meccanica sotto l'azione dell'incendio,
- la tenuta (E): capacità di un elemento da costruzione di non lasciar passare (né tantomeno produrre) fiamme, vapori o gas caldi dal lato esposto a quello non esposto,
- e l'isolamento (I): l'attitudine di un elemento costruttivo a ridurre, entro determinati limiti, la trasmissione del calore.

Il valore REI è espresso in minuti. Da un punto di vista normativo, il Decreto Ministeriale del 26 agosto 1992: Norme di prevenzione antincendi per l'edilizia scolastica prevede, per degli edifici di cui l'altezza antincendi è inferiore a 24 m un REI 60, per le strutture separanti.

### b) Reazione al fuoco dei materiali

Questo parametro, si fa riferimento al Decreto Ministeriale del 26 giugno 1984. Riportiamo nella figura IX.362 le esigenze in termini di classe dei materiali di rivestimento.

Atrii, corridoi, disimpegno, scale, rampe, passaggi	Classe 0 Classe 1: fino a 50% della superficie (pavimento, pareti, soffitto, proiezione orizzontale delle scale)
Altri ambienti	Classe 2: Pavimentazione Classe 1: altri rivestimenti
Materiali suscettibili di prendere fuoco su entrambe le facce (tendaggi, ecc.)	Classe 1

figura IX.362: Requisiti di reazione al fuoco dei materiali in funzione del loro uso

Il decreto ministeriale definisce l'equivalenza tra la norma italiana e la norma europea. Infatti, la maggior parte dei produttori forniscono la reazione al fuoco dei materiali secondo la norma europea.

	Classe italiana	Classe europea
I	Classe 1	(A <sub>2FL-s1</sub> ), (A <sub>2FL-s2</sub> ), (B <sub>FL-s1</sub> ), (B <sub>FL-s2</sub> )
II	Classe 2	(C <sub>FL-s1</sub> ), (C <sub>FL-s2</sub> )
III	Classe 3	(D <sub>FL-s1</sub> ), (D <sub>FL-s2</sub> )

figura IX.363: Corrispondenza normativa per la reazione al fuoco dei rivestimenti di pavimento

	Classe italiana	Classe europea
I	Classe 1	(A <sub>2-s1,d0</sub> ), (A <sub>2-s2,d0</sub> ), (A <sub>2-s3,d0</sub> ), (A <sub>2-s1,d1</sub> ), (A <sub>2-s2,d1</sub> ), (A <sub>2-s3,d1</sub> ), (B-s1,d0), (B-s2,d0), (B-s1,d1), (B-s2,d1)
II	Classe 2	(A <sub>2-s1,d2</sub> ), (A <sub>2-s2,d2</sub> ), (A <sub>2-s3,d2</sub> ), (B-s3,d0), (B-s3,d1), (B-s1,d2), (B-s2,d2), (B-s3,d2), (C-s1,d0), (C-s2,d0), (C-s1,d1), (C-s2,d1)
III	Classe 3	(C-s3,d0), (C-s3,d1), (C-s1,d2), (C-s2,d2), (C-s3,d2), (D-s1,d0), (D-s2,d0), (D-s1,d1), (D-s2,d1)

figura IX.364: Corrispondenza normativa per la reazione al fuoco dei rivestimenti di parete

	Classe italiana	Classe europea
I	Classe 1	(A <sub>2-s1,d0</sub> ), (A <sub>2-s2,d0</sub> ), (A <sub>2-s3,d0</sub> ), (A <sub>2-s1,d1</sub> ), (A <sub>2-s2,d1</sub> ), (A <sub>2-s3,d1</sub> ), (B-s1,d0), (B-s2,d0)
II	Classe 2	(B-s3,d0), (B-s1,d1), (B-s2,d1), (B-s3,d1), (C-s1,d0), (C-s2,d0)
III	Classe 3	(C-s3,d0), (C-s1,d1), (C-s2,d1), (C-s3,d1), (D-s1,d0), (D-s2,d0)

figura IX.365: Corrispondenza normativa per la reazione al fuoco dei rivestimenti di parete

I materiali di rivestimento saranno quindi scelti in modo tale di rispettare questi criteri.

## 2. ACUSTICA

Le prestazioni acustiche di un edificio, in particolare per una scuola, non può essere trascurata. In effetti, a trasmissione delle parole deve essere di molto buona qualità, ciò che si traduce da:

- una buona diffusione del suono,
- l'assenza di risonanza o di eco,
- l'assenza di disturbo dovuto ai rumori proveniente dall'esterno delle aule.

### a) Definizione dei requisiti acustici

La normativa definisce i valori delle frequenze nominale da utilizzare per le verifiche acustiche: 125Hz, 250Hz, 500Hz, 1000Kz, 2000Hz, e 4000Hz.

Secondo l'articolo 5.1 *Condizioni acustiche* del decreto ministeriale del 18/12/1975 per l'edilizia scolastica, i requisiti di accettabilità sono da determinare sia in laboratorio che in opera.

I requisiti di accettabilità da determinare con misure di laboratorio sono:

- potere fono-isolante delle strutture divisorie interne verticali ed orizzontali 40dB
- potere fono-isolante di infissi verso l'esterno: 25dB
- potere fono-isolante di chiusure esterne opache: 35dB
- livello di rumore di calpestio normalizzato di solai: 68dB

I requisiti di accettabilità da determinare con misure in opera sono invece:

- Isolamento acustico fra due aule adiacenti sullo stesso piano: 40dB
- Isolamento acustico fra due aule sovrapposte: 42dB
- livello di rumore di calpestio normalizzato di solai: 68dB

Per questo studio, non faremo ne misure in laboratorio, ne ovviamente in opera, per mancanza di mezzi. Per supplirci, ci baseremo su metodi numerici o su paragoni con altri stratigrafie già realizzate e studiate.

I valori minimali del potere fono-isolante R sono riportati sul grafico seguente (figura IX.366), “con la seguente tolleranza: la somma delle differenze di livello tra la curva di riferimento ed i punti del diagramma sperimentale, che stanno al disotto di essa, non deve superare i 12 dB (in ogni banda di ottava lo scarto non deve superare 5 dB)”.

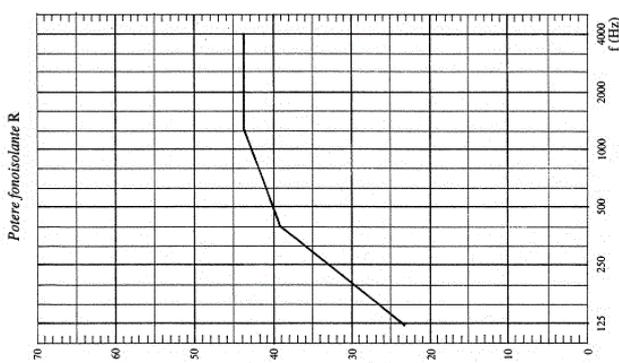


figura IX.366: Potere fono-isolante minimo delle pareti divisorie

Il livello massimo di rumore di calpestio è invece definito dalla curva della figura IX.367, “con la seguente tolleranza: la somma delle differenze di livello tra la curva riferimento ed i punti del diagramma sperimentale che stanno al disopra di essa non superi i 12 dB (in ogni banda di ottava lo scarto non deve superare i 7 dB)”.

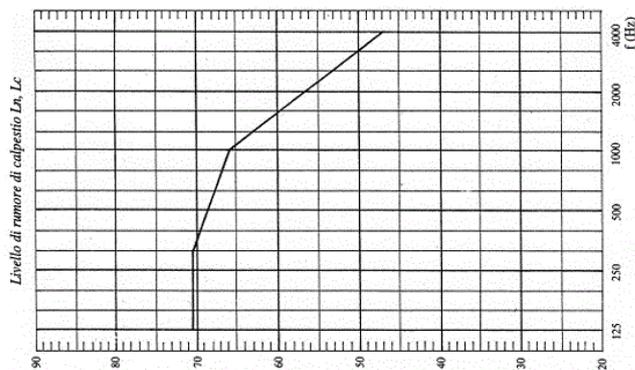


figura IX.367: Livello massimo di rumore anticalpestio

Questa norma è stata aggiornata dal DPCM del 5 dicembre 1997. Quest'ultimo fornisce i valori limiti della figura IX.368, senza precisione su un eventuale tolleranza com'era stata definita nel DM 18/12/1975.

Categorie di cui alla Tab. A	R <sub>u</sub> (*)	Parametri			
		D <sub>2m,nT,w</sub>	L <sub>n,w</sub>	L <sub>ASmax</sub>	L <sub>Aeq</sub>
1. D	55	45	58	35	25
2. A, C	50	40	63	35	35
3. E	50	48	58	35	25
4. B, F, G	50	42	55	35	35

figura IX.368: requisiti acustici passivi degli edifici

- R<sub>u</sub> è il potere fono-isolante apparente delle partizioni fra ambienti.
- D<sub>2m,nT,w</sub> è il potere fono-isolante di facciata
- L<sub>n,w</sub> è il livello di rumore di calpestio normalizzato

Notiamo che non verificheremo gli ultimi due valori che riguardano il livello di rumore degli impianti.

La categoria della nostra scuola, come “edificio adibito ad attività scolastiche a tutti i livelli”, appartiene alla categoria E.

## b) Valutazione delle prestazioni

### 1) Isolamento rispetto al rumore aereo interno

Il potere fono-isolante apparente, alla differenza del potere fono-isolante, prende in considerazioni la diffusione del suono attraverso le strutture che delimitano la stratigrafia. Questo valore non verrà calcolato, perché il suo calcolo necessita l'accesso alla norma EN-ISO 12354-1, accesso che non siamo riusciti ad ottenere.

Invece, il potere fono-isolante delle pareti divisorie della stratigrafia che useremo è stato calcolato dalla *Knauf*, e vale 56 dB. Questo valore è sufficientemente elevato, riguardo alle norme di cui sopra, per considerare che con una cura delle trasmissioni indirette, evitando la continuità di materiali rigidi e usando delle guarnizioni acustici, il valore di R<sub>w</sub>' sarà coretto.

## 2) Isolamento rispetto al rumore aereo esterno

Per quanto riguarda invece il potere fono-isolante delle chiusure esterne opache, e trasparenti, ci siamo affidati a dei livelli di prestazioni acustiche di chiusure esistenti: i muri perimetrali in struttura leggera in legno sono stati paragonati con la stratigrafia seguente:

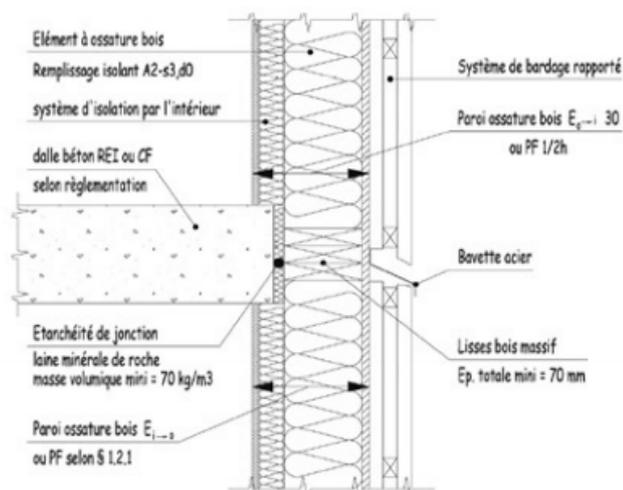


figura IX.369: Esempio di stratigrafia leggera simile a quella che useremo

Le caratteristiche di questa stratigrafia sono molto simili a quella che useremo in quanto:

- il principio stratificativo è lo stesso (telaio leg-

gero in legno)

- i rivestimenti sono i stessi (legno su listelli fissati su una lastra in OSB a l'esterno e doppia lastra di cartongesso a l'interno)
- stesso materiale isolante (lana di roccia)
- strato isolante interno (rispetto alla struttura in legno)

La differenza principale sono gli spessori, però, sempre a beneficio della nostra stratigrafia. In effetti, ci sono 245 mm di isolante in totale per questa stratigrafia, e 300 mm per la nostra.

Il potere fono-isolante indicato per l'insieme della facciata - serramenti compresi - è di 49-52 dB. La percentuale di serramenti essendo paragonabile, nella misura in cui hanno una comune destinazione d'uso, e i serramenti essendo a doppio o triplo vetro in funzione della posizione, possiamo quindi supporre che la prestazione acustica della nostra chiusura sarà sufficiente. Benché questo valore sia appena superiore al valore normativo, la posizione dell'edificio, relativamente allontanata dalla città, e della strada - comunque poco frequentata - ci lascia pensare che il rispetto della norma sarà largamente sufficiente. Tanto più che la presenza della serra su una parte della facciata permetterà di attenuare ancora di più il rumore che viene dall'esterno.

Inoltre, dato l'alto potere fono-isolante del calcestruzzo armato, possiamo anche supporre che la chiusura verticale PV2, che ha quasi i stessi strati con in più 20 cm di calcestruzzo armato avrà, anche lei, un potere fono-isolante sufficiente.

Massa per unità di area dell'elemento divisorio (pavimento)	Massa media per unità di area degli elementi laterali omogenei non ricoperti con rivestimenti supplementari (kg/m <sup>2</sup> )								
	100	150	200	250	300	350	400	450	500
100	1	0	0	0	0	0	0	0	0
150	1	1	0	0	0	0	0	0	0
200	2	1	1	0	0	0	0	0	0
250	2	1	1	1	0	0	0	0	0
300	3	2	1	1	1	0	0	0	0
350	3	2	1	1	1	1	0	0	0
400	4	2	2	1	1	1	1	0	0
450	4	3	2	2	1	1	1	1	1
500	4	3	2	2	1	1	1	1	1
600	5	4	3	2	2	1	1	1	1
700	5	4	3	3	2	2	1	1	1
800	6	4	4	3	2	2	2	1	1
900	6	5	4	3	3	2	2	2	2

figura IX.370: Coefficiente di correzione in funzione delle masse superficiali

### 3) Isolamento anticalpestio

Il livello di rumore di calpestio è valutato tra aule sovrapposte. E' valutato secondo la norma UNI EN 12354-2 che indica

$$L'_{nw} = L_{n,w,eq} - \Delta L_w + K, \text{ in dB}$$

dove:

- K la correzione per la trasmissione dei rumori di calpestio attraverso le costruzioni laterali omogenee [dB]
- $\Delta L_w$  l'indice di valutazione del livello di pressione sonora di calpestio [dB]
- $L_{n,w,eq}$  l'indice di valutazione del livello equivalente di pressione sonora di calpestio normalizzato del pavimento [dB]

Per solai in laterocemento,  $L_{n,w,eq}$  è calcolato secondo la formula:

$$L_{n,w,eq} = 164 - 35 \log(M_s), \text{ in dB}$$

dove  $M_s$  la massa superficiale del solaio.

Abbiamo quindi  $L_{n,w,eq} = 66.33 \text{ dB}$ .

Il valore di correzione K viene determinato grazie alla figura IX.370, fornita dalla normativa.

Questa tabella ci da un valore di  $K=5$ .

Abbiamo quindi un valore minimo per  $\Delta L_w$  di:

$$\Delta L_w = L_{n,w,eq} - L'_{nw} + K = 13,33 \text{ dB}$$

Il materiale di rivestimento del pavimento interno dovrà quindi avere un indice di valutazione del livello di pressione sonora di calpestio superiore a 14 dB.

### c) Tempo di riverberazione

Il tempo di riverberazione permette di misurare la durata della "coda sonora" che prolungano i suoni dopo la loro emissione, a causa della riverberazione. In caso di tempo di riverberazione troppo lungo, l'ambiente sarà "rimbombante", diminuendo così la comprensibilità del parlato (e aumentando la fatica dei professori). Nel caso in cui fosse troppo corto, il suono sembra sordo, è può diventare anche difficile da capire.

Il tempo di riverbero è definito come "il tempo in cui il livello sonoro di una sorgente stazionaria e continua scende di 60 dB"

Questo fattore si calcola con la formula di Sabine, in funzione del volume V dell'aula, e dell'assorbimento  $\alpha$  delle varie superficie i.

$$T_R = 0,16 * \frac{V}{\sum_i \alpha_i S_i}$$

dove:

- V è il volume del locale [ $m^3$ ]
- $\alpha_i$  è l'assorbimento della superficie i [-]
- $S_i$  è l'aria della superficie i [ $m^2$ ]

Per quanto lo riguarda, il tempo di riverberazione ottimale, deve essere definito in funzione del volume dell'aula e della frequenza del rumore, secondo le due curve allegate che si trova qui di seguito, sempre secondo il decreto ministeriale del 18/12/1975:

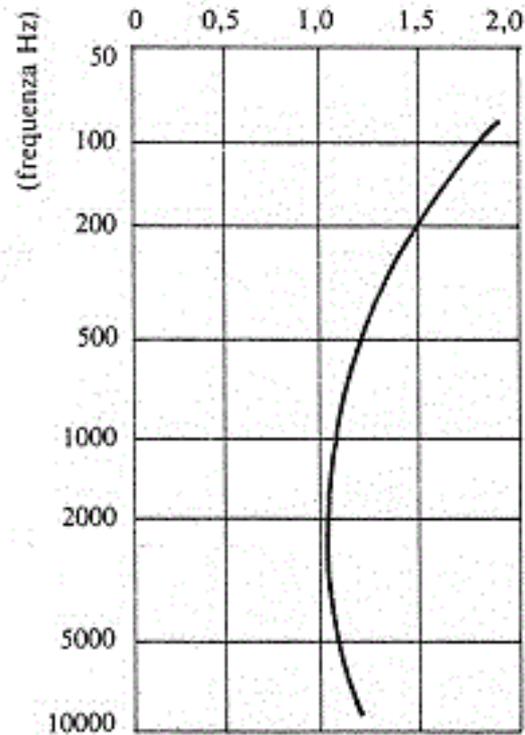


figura IX.371: "Dipendenza dalla frequenza del tempo ottimo di riverberazione"

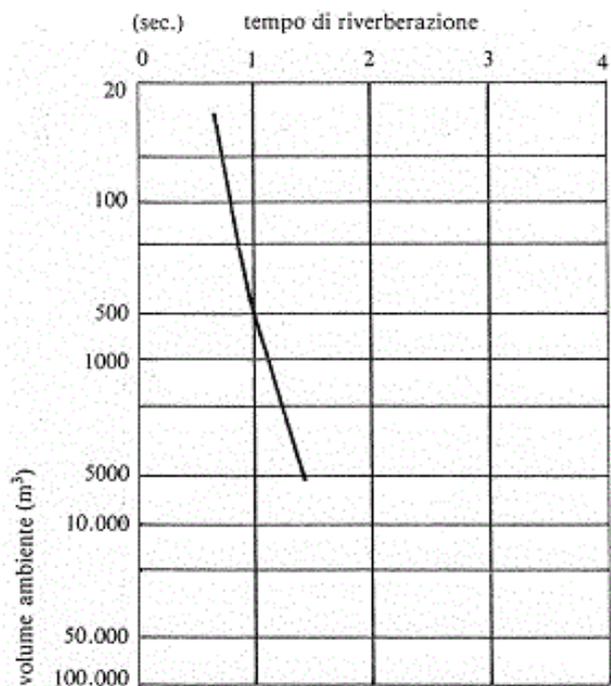


figura IX.372: "Valori ottimi di riverberazione"

Non essendo stato precisato per quale volume dell'aula la prima curva è valida, né per quale frequenza la seconda curva è valida, né come possiamo usare entrambe le curve, questo decreto viene difficile da usare per determinare i requisiti acustici, in termini di

tempo di riverberazione ottimale.

Il DPCM del 5 dicembre 1997, “*Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici*”, da parte sua, rinvia alla circolare del Ministero dei lavori pubblici n°3150 del 22 maggio 1967 per il calcolo dei valori limiti di tempo di riverberazione negli edifici scolastici.

Quest’ultima circolare, “*criteri di valutazione e collaudo dei requisiti acustici negli edifici scolastici*” da il valore massimo di tempo di riverberazione: “*La media dei tempi di riverberazione misurati alle frequenze 250 - 500 - 1000 - 2000 Hz, non deve superare 1,2 sec. ad aula arredata, con la presenza di due persone al massimo.*”

Nel nostro caso di studio, di un aula “standard” di 60m<sup>2</sup> (o 180m<sup>3</sup>), secondo la figura precedente, il tempo di riverberazione ottimo sarebbe di più o meno 0,8 secondi. Però, non sappiamo per quale frequenza vale questo valore.

Inoltre, questo valore sembra molto elevato, rispetto a quello dell’Organizzazione Mondiale della Sanità (0,6s) o della norma francese (tre 0,4s e 0,8s)

Abbiamo scelto di basarci di non superare il tempo di riverbero di 0,8 secondi, è di provare di raggiungere tempi ancora più bassi, quando possibile.

### ► Calcolo del tempo di riverberazione

La riverberazione acustica nelle aule viene attenuata, la maggior parte del tempo, dal materiale del soffitto, poiché è colui che può avere, il più facilmente, dei valori di assorbimento alto. E quindi la sua caratteristica sulla quale giocheremo per migliorare il comfort acustico.

Per favorire la trasmissione del suono tra professore e allievi, ed attenuare il rumore di fondo legato all’attività degli allievi, abbiamo deciso di usare due tipi di rivestimento per il contro-soffitto, come illustrato di seguito.

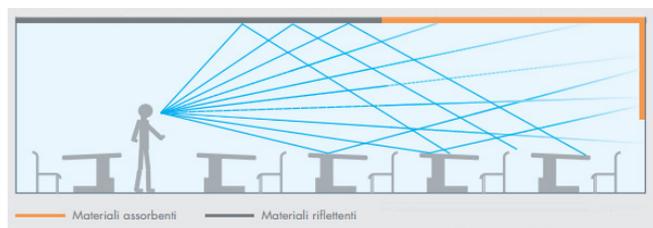


figura IX.373: Strategia di trattamento della riverberazione (Fonte: knauf.it, *Sistema Comfort Acustico Il controllo assoluto del suono*)

La percentuale del soffitto coperto con pannelli assorbenti e riverberanti è stata definita in modo tale di ottenere un tempo di attenuazione  $T_{60}$  vicino a 0.6 secondi, per qualunque frequenza.

L’esempio che studiamo in questa relazione vale per un aula tipa di 60 m<sup>2</sup> (l’aula 13). La risoluzione del problema è stata effettuata con il solver di excel.

I valori di attenuazione dei vari materiali, alle frequenze della norma, anziché il tempo di riverberazione calcolati sono dati nella tabella seguente.

frequenza (Hz)	125	250	500	1 kHz	2 kHz	4 kHz
soffitto assorbente	0.55	0.75	0.75	0.85	0.95	0.95
soffitto riverberante	0.35	0.2	0.1	0.05	0.05	0.05
linoleum	0.02	0.02	0.05	0.05	0.05	0.07
cartongesso + lana di roccia	0.25	0.3	0.2	0.15	0.05	0.05
serramenti	0.05	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01
sedie occupate	0.3	0.41	0.49	0.84	0.87	0.84
$T_{60}$ (s)	0.55	0.47	0.54	0.55	0.60	0.59

figura IX.374: Coefficienti di assorbimento e tempo di riverberazione

La percentuale di pannelli assorbenti è di 67%. Nel caso in cui il tempo di riverberazione nell’aula sia troppo breve, questa percentuale potrebbe essere diminuita.

In quel modo, siamo riusciti ad avere dei tempi di riverberazioni abbastanza bassi (attorno a 0,6).

Non riporteremo qui i calcoli per ognuna aula, nella misura in cui il metodo e i risultati sono assolutamente simili.

Un’altra zona può rivelarsi particolarmente critica per quanto riguarda la risonanza a causa del rumore e delle sue dimensioni: la mensa. La norma consiglia dei valori tra 0,6 s e 1,2 s. Una rapida verifica dei tempi di riverberazione con l’uno o l’altro dei rivestimenti di soffitto utilizzati per l’aula didattica ci mostra che ne l’uno, ne l’altro fornisce un risultato soddisfacente: il materiale riverberante l’è troppo, mentre l’altro è troppo assorbente.

Abbiamo quindi calcolato i valori massimali e minimali di assorbimento del materiale del soffitto, per raggiungere i requisiti normativi. Il sotto-soffitto dovrà quindi avere dei valori di assorbimento compresi in questi intervalli.

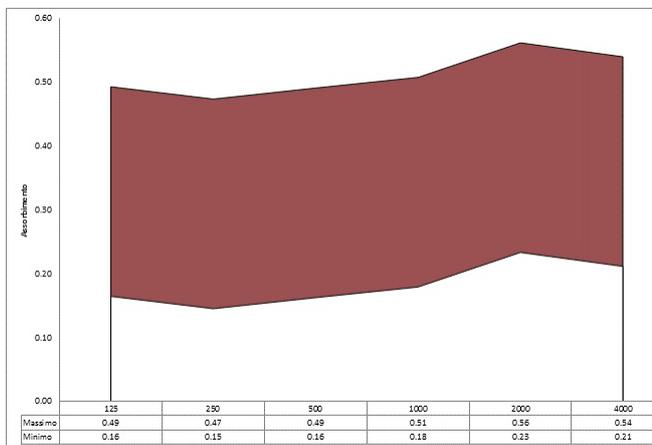


figura IX.375: Valori limiti di assorbimento del rivestimento del soffitto della mensa

### 3. IGROTERMICHE

La verifica delle caratteristiche igrometriche delle pareti ci permette di assicurarci che non ci sarà condensazione nei muri.

In effetti, una cattiva gestione di questo fenomeno può produrre, per il nostro edificio:

- la presenza di acqua di condensazione sulle su-

perfici interne delle pareti,

- l'impugnatura delle parti in legno,
- la riduzione della capacità isolante,
- la crescita di muffa.

La presenza di condensazione sarà calcolata, mese per mese, grazie al software VAP, che applica il metodo di calcolo della norma UNI 10350, basata sul metodo di Glaser. Le tappe di questo metodo sono:

- il calcolo delle temperature interstiziale,
- il calcolo della pressione di saturazione all'interno della parete,
- il calcolo della pressione parziale di acqua all'interno della parete,
- il confronto tra la pressione di saturazione e la pressione di vapore.

Se la pressione di vapore diventa superiore alla pressione di saturazione, occorre la condensazione di acqua.

Però, a seconda delle proprietà dei materiali della parete, una presenza di condensa massima sarà accettabile. Questi valori sono riassunti nella tabella seguente:

Materiale	Massa volumica (kg/m <sup>3</sup> )	Q <sub>amm</sub> (g/m <sup>2</sup> )
Laterizi	600-2000	500
Calcestruzzi	400-2500	500
Legnami e derivati	500-800	30pd
Intonaci e malte	600-2000	30pd
Fibra di natura organica con collanti resistenti all'acqua	300-700	20pd
Fibra di natura organica con collanti non resistenti all'acqua	300-700	5pd
Fibre minerali	10-150	5000pd(λ/(1-1,7λ))
Materie plastiche cellulari	10-80	5000pd(λ/(1-1,7λ))

d è espresso in m, ρ in kg/m<sup>3</sup> e λ in W/m<sup>2</sup>K

figura IX.376: Massima quantità di umidità per materiale

La norma precisa che in ogni modo, la quantità di umidità non può essere superiore a 500 g/m<sup>2</sup>, e che tutta la condensa formata all'interno di un elemento dovrà evaporare prima dell'inizio della successiva stagione di riscaldamento.

### 4. TERMICHE

La qualità energetica di un edificio viene, in gran parte, determinata dalle prestazioni delle sue pareti, come l'abbiamo già visto nelle parti "V. La serra" e "III. Studio energetico". La trasmissione di calore attraverso gli elementi costruttivi è caratterizzata dalla resistenza termica.

Questo valore è stato determinato secondo la norma UNI 6946, a partire

- della resistenza di ogni materiale che compone la stratigrafia,
- delle resistenze termiche superficiali, di cui i valori sono stati presi dalla norma di cui sopra, ed elencati nella figura IX.377,
- e della resistenza degli intercapedini di aria, determinata secondo il metodo definito nella norma.

Surface resistance m <sup>2</sup> ·K/W	Direction of heat flow		
	Upwards	Horizontal	Downwards
$R_{si}$	0,10	0,13	0,17
$R_{se}$	0,04	0,04	0,04

NOTE 1 The values given are design values. For the purposes of declaration of the thermal transmittance of components and other cases where values independent of heat flow direction are required, or when the heat flow direction is liable to vary, it is advisable that the values for horizontal heat flow be used.

NOTE 2 The surface resistances apply to surfaces in contact with air. No surface resistance applies to surfaces in contact with another material.

figura IX.377: Resistenza termica superficiale

Sottolineiamo che nel caso in cui la parete fosse in contatto con un materiale solido (tipicamente contro terra), la resistenza superficiale è nulla. In effetti, questa resistenza è dovuta alla trasmissione per convezione che occorre nei fluidi.

Thickness of air layer mm	Thermal resistance m <sup>2</sup> ·K/W		
	Direction of heat flow		
	Upwards	Horizontal	Downwards
0	0,00	0,00	0,00
5	0,11	0,11	0,11
7	0,13	0,13	0,13
10	0,15	0,15	0,15
15	0,16	0,17	0,17
25	0,16	0,18	0,19
50	0,16	0,18	0,21
100	0,16	0,18	0,22
300	0,16	0,18	0,23

NOTE Intermediate values may be obtained by linear interpolation.

figura IX.378: Resistenza termica delle intercapedini di aria non ventilate

In caso di intercapedini di aria ben ventilate considereremo che la resistenza termica della stratigrafia si calcola prendendo in considerazione solamente le strati fino all'intercapedine di aria.

Il decreto legislativo del 19 agosto 2005 definisce le trasmittanza termica massima delle chiusure opache e trasparenti, in funzione della zona termica del edificio. (Sondrio appartiene alla zona climatica E.)

Zona climatica	Dall'1 gennaio 2006 U (W/m <sup>2</sup> K)	Dall'1 gennaio 2009 U (W/m <sup>2</sup> K)
A	0.85	0.72
B	0.64	0.54
C	0.57	0.46
D	0.5	0.40
E	0.46	0.37
F	0.44	0.35

figura IX.379: Valori limite della trasmittanza termica U delle strutture verticali opache espresso in W/m<sup>2</sup>K

Zona climatica	Dall'1 gennaio 2006 U (W/m <sup>2</sup> K)	Dall'1 gennaio 2009 U (W/m <sup>2</sup> K)
A	0.80	0.68
B	0.60	0.51
C	0.55	0.44
D	0.46	0.37
E	0.43	0.34
F	0.41	0.33

figura IX.380: Valori limite della trasmittanza termica U delle strutture orizzontali opache espresso in W/m<sup>2</sup>K

Ricordiamo che la resistenza termica delle chiusure non sarà determinata in funzione di criteri normativi, o di esigenze da soddisfare per essere classificato in una classe energetica, ma è stata determinata secondo il metodo descritto nelle parti sullo studio della serra e su quello del modulo.

Verificheremo invece a posteriori, che la resistenza termica ottenuta è infatti superiore a queste esigenze.

La resistenza termica periodica, lo sfasamento e l'attenuazione permettono di descrivere il comportamento termico estivo delle parete approssimando un regime dinamico. Il metodo di calcolo si trova nella norma ISO 13786. Però, dato il funzionamento estivo termico che abbiamo già descritto, ci limiteremo a dare i valori di sfasamento e di attenuazione delle diverse chiusure.

# C. STRATIGRAFIE E PRESTAZIONI

## 1. SCELTA DEI MATERIALI

Tutte le analisi di ottimizzazione del consumo energetico e di minimizzazione dei costi che sono state effettuate precedentemente avevano come presupposto che i materiali che usavamo esistevano. Ci siamo infatti costretti a lavorare con dei valori (di trasmittanza termica degli isolanti, di caratteristiche di serramenti, di protezione solare delle schermature...) comuni. Però questo studio non avrebbe senso, se non fossimo stati capaci di trovare dei prodotti che hanno effettivamente le caratteristiche studiate e che corrispondono ai requisiti estetici, antincendi o acustici definiti da i diversi attori del progetto.

Per confermare, o infirmare, la fattibilità tecnica del progetto, abbiamo cercato di definire più precisamente i materiali che useremo.

Non essendo professionisti, non abbiamo chiesto alle varie aziende nessun preventivo per conoscere il prezzo dei materiali che abbiamo scelto. Ci siamo quindi limitati a materiali convenzionali, che non sembrano aver caratteristiche eccezionali.

### ► Tipo di isolante

Esistono molti tipi di isolante differenti, che possiamo classificare per tipo di materiale: isolante naturale, minerale o sintetico.

Per la scelta dei tipi di isolamento del nostro progetto, non prenderemo in considerazione gli isolanti innovativi, come i pannelli isolanti sottovuoti, o gli aerogel.

I fattori che hanno più importanza per questo progetto, per il quale abbiamo scelto delle stratigrafie con una struttura leggera in legno e di prestare poco attenzione alla capacità di sfasamento e di attenuazione delle parete, sono i seguenti:

- la forma fisica: la maggior parte dell'isolamento si farà sia fra telaio in legno, sia contro terra sia per pavimenti calpestabili. Saranno quindi materassini
- la resistenza acustica: in effetti, le parete essendo leggere, la resistenza acustica sarà soprattutto dovuta all'isolante termico
- l'energia grigia contenuta nel materiale
- il prezzo
- la resistenza termica, che permette di raggiungere degli spessori di parete più bassi. Inoltre, avendo un telaio in legno, un spessore ridotto permette di avere delle parete più leggere
- la longevità (resistenza all'umidità, e la compattazione)
- l'infiammabilità
- la resistenza a compressione per alcuni impieghi

- il potenziale di effetto serra, che rappresenta l'emissione di CO<sub>2</sub> necessaria per la sua intera vita
- la tossicità (in caso di incendio per esempio)

Un requisito, che potrebbe essere essenziale per un altro progetto, la capacità termica volumica, non sarà considerato, dato che non sfrutteremo particolarmente lo sfasamento e l'attenuazione delle parete.

Questa decisione ci permette di semplificare significativamente la scelta: in effetti, per più materiali isolanti, la capacità termica aumenta sia con la conduttività termica, sia con il prezzo.

Le caratteristiche degli isolanti che corrispondono ai criteri definiti dall'impiego (forma, assenza di compattezza, resistenza all'umidità, non tossicità) e che sono stati studiati sono:

	conduttività termica W/m.K	resistenza acustica -	energia grigia MJ/kg	prezzo (10 cm) €/m <sup>2</sup>
lana di vetro	0.035	Ottimo	52	55
lana di roccia	0.036	Ottimo	24	75
EPS	0.035	Media	107	100
XPS	0.032	Media	101	175
poliuretano	0.03	Media	102	200
fibra di canapa	0.04	Media	32	150
fibra di coco	0.05	Ottima	*	275
fibra di lino	0.04	Buona	35	150
fibra di legno	0.04	Buona	200**	175
lana di pecora	0.04	Buona	15	175

\* L'energia grigia contenuta nella fibra di cocco rimane molto bassa, finché non prendiamo in considerazione il trasporto. Non valuteremo più la possibilità di usarlo.

\*\* L'energia grigia necessaria alla fabbricazione di pannelli in fibra di legno è abbastanza alta rispetto alla produzione di fibra di legno alla rinfusa (50 volte più basso)

figura IX.381: Caratteristiche dei materiali isolanti comuni

Va osservato che quasi tutti i materiali isolanti sono riciclabili. Però, per motivi di rendimento, gli unici iso-

lanti che hanno una filiera di riciclaggio effettiva sono i materiali di origine organica (XPS, EPS).

I valori di resistenza termica di tutti questi isolanti sono abbastanza simili. Gli altri criteri saranno invece determinanti. Possiamo subito notare i vantaggi della lana di vetro e della lana di roccia. La loro bassa protezione termica durante l'estate non è per questo progetto un punto rilevante.

La lana di vetro ha un prezzo 25% più basso della lana di roccia, ma un consumo di energia grigia 50% più alto. Sceglieremo quindi di usare la lana di roccia per l'isolamento delle pareti.

Invece, la resistenza alla compressione del polistirene espanso è più alta rispetto agli altri isolanti che hanno un prezzo simile. L'EPS sarà utilizzato per l'isolamento dei solai calpestabili (sulla terrazza o per i pavimenti radianti), o per i muri contro terra.

La resistenza termica molto alta del poliuretano, sarà sfruttata sotto forma di schiuma per i piccoli volumi (riempimento di tubolare metallico, o di montanti di serramento).

### ► Rivestimenti interni

I rivestimenti interni sono un strato molto critico delle stratigrafie. In effetti, devono rispondere a criteri estetici, acustici, di resistenza meccanica, luminosi, e di manutenzione ed eventualmente termici, oltre che a delle norme antincendi.

Abbiamo visto nello studio acustico che l'indice di valutazione del livello di pressione sonora di calpestio doveva essere superiore a 14 dB, al fine di raggiungere il requisito di isolamento anticalpestio. Inoltre, visto che abbiamo deciso di ricorrere ad un pavimento radiante, la resistenza termica del rivestimento di pavimento non deve essere troppo alta. Per altro, il rivestimento esistente, che è un linoleum, sembra essere l'unica aspetto estetico della scuola che piaccia agli utenti.

Ci siamo quindi orientati verso un linoleum, che ha anche il vantaggio di avere una manutenzione relativamente facile, della *Gerflor*, concepito per un uso scolastico. Il suo indice di valutazione del livello di pressione sonora di calpestio, calcolato secondo la norma EN-ISO 712-2 vale 18 dB, e soddisfa quindi ai requisiti. Peraltro, l'attenuazione acustica di questo materiale è relativamente alta, rispetto a altri materiali di pavimento. La sua classe di esistenza al fuoco,  $B_{fl}-s1$ , è anche adattata.

Per quanto riguarda il soffitto, abbiamo scelto di avere un sotto-soffitto per farci passare l'impiantistico. Questa scelta ci permette anche di gestire più facilmente la risonanza acustica nelle aule. I pannelli saranno *Thermatex laguna* (poco assorbenti), *Thermatex Alpha*

(ottimo assorbimento), e *Thermatex Feinfrescko Saturn* (buono assorbimento) della *Knauf*. Per tutti questi materiali, la classe di resistenza al fuoco A2, s1-d0 è sufficiente. Sceglieremo dei colori chiari per avere una luminosità di qualità migliore, ed abbassare il consumo energetico di illuminamento.

Siccome ci sono tre materiali differenti per il controsoffitti in funzione della loro posizione, prenderemo le caratteristiche termiche, di riverberazione della luce e di peso i più vincolanti, per semplificare lo studio.

Il rivestimento delle pareti orizzontali è stato scelto principalmente secondo criteri acustici e per resistere agli urti. Abbiamo scelto di avere due lastre di cartongesso accoppiate: una lastra *Vidiwall* della *Knauf* che ha un potere fono-isolante elevato, e caratteristiche meccaniche di ottimo livello, e una lastra *GKB (A)* con o senza barriera al vapore (in funzione del fabbisogno).

Questo doppio rivestimento permette di avere per esempio delle pareti divisorie di 10 cm di isolante che rispettano la norma in termini di potere fono-isolante, e di avere una resistenza a flessione sufficiente per una scuola.

### ► Serramenti

I vetri sono stati descritti nella parte *ottimizzazione dei costi e del consumo del modulo*. Corrispondono ai vetri *cool lite xtrem* e *planitherm lux* dell'azienda *Saint Gobain*.

Il tipo di telaio, in legno e alluminio è stato scelto secondo criteri architettonici, di resistenza termica e meccanica, e di durevolezza.

I serramenti della serra hanno un telaio in alluminio, e sono a doppio vetro, con un'elevata trasmissione luminosa e un fattore solare g alto.

### ► Pavimento radiante

La scelta di un pavimento radiante a come obiettivo di permettere un riscaldamento veloce delle aule, e di permetterci di riscaldare l'acqua a temperatura ragionevolmente bassa. Però, da un punto di vista costruttivo, può avere dei vincoli importanti:

- spessore
- tempo di messa in opera quando non è a secco
- massa

Per rimediare a queste difficoltà, abbiamo scelto un pavimento a secco di spessore ridotto (4,5 cm) della *Floortech, dry 45*. La bassa inerzia termica del sistema permette un riscaldamento degli ambienti più veloce.

### ► Altri materiali

Il sistema *Xlam* richiede un strato di ripartizione del carico, formato di due lastre (per i carichi di servizi legati ad una scuola) di gessofibra. Le caratteristiche

delle lastre di gessofibra della Fermacell , in termini di resistenza meccanica, acustica, e di durabilità in presenza di acqua sono adeguate alle esigenze del loro uso.

<b>CODICE</b>	<b>DESCRIZIONE</b>	<b>TAVOLA</b>
<b>CHIUSURE VERTICALI</b>		
CV1	Muro perimetrale prefabbricato con rivestimento in legno	Tavola 1.26
CV2	Muro perimetrale con struttura in calcestruzzo armato e rivestimento in legno	Tavola 1.27
CV2'	Muro perimetrale con struttura in calcestruzzo armato e rivestimento in alluminio	
CV3	Muro perimetrale del modulo prefabbricato con rivestimento in alluminio	Tavola 1.28
CV3'	Muro perimetrale del modulo (sud) prefabbricato con rivestimento in alluminio	
CV4	Muro contro terra	Tavola 1.29
<b>CHIUSURE ORIZZONTALI</b>		
CO1	Tetto calpestabile	Tavola 1.30
CO2	Tetto giardino	Tavola 1.31
CO4	Solaio contro terra	Tavola 1.32
CO5	Tetto del modulo con rivestimento in alluminio	Tavola 1.33
CO6	Solaio delle serre	Tavola 1.34
<b>PARTIZIONI VERTICALE</b>		
PV1	Partizione interne	Tavola 1.35
PV1'	Partizione interne con sotto struttura in legno	
PV2	Partizione interne resistente al fuoco	
PV3	Partizione interne attorno a spazi umidi	
<b>PARTIZIONI ORIZZONTALI</b>		
PO1	Solaio interno	Tavola 1.36
PO1'	Solaio degli ambienti umidi	
PO2	Solaio tra serra e mensa	Tavola 1.37
PO3	Solaio sopraelevato del modulo	Tavola 1.38

figura IX.382: Stratigrafie



## 2. CHIUSURE VERTICALI

### a) CV1: Chiusura perimetrale

#### CARATTERISTICHE TERMICHE

Massa superficiale totale	69.3	kg/m <sup>2</sup>
Resistenza termica totale	8.45	m <sup>2</sup> K/W
Attenuazione	0.71	-
Sfasamento	6.09	h

#### CARATTERISTICHE ACUSTICHE

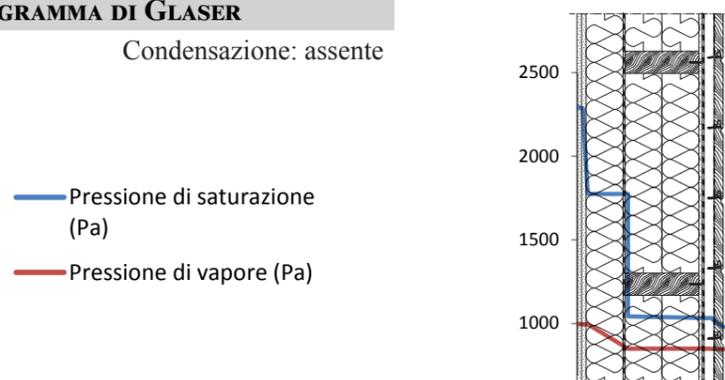
R <sub>w</sub>	89.7	dB
L <sub>nw,eq</sub>	-	dB

#### CARATTERISTICHE ANTINCENDIO

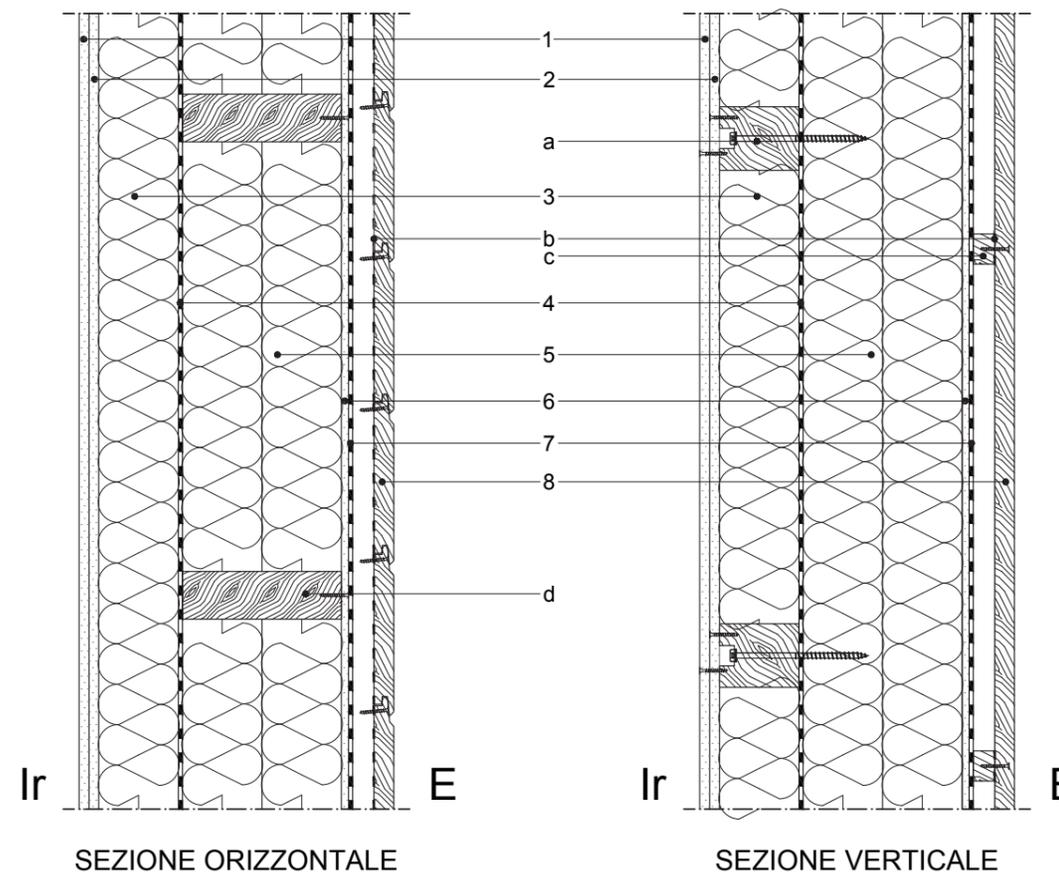
Comportamento al fuoco	REI 60
Classe di resistenza al fuoco del rivestimento interno (strato 1)	classe 1 (A2 s1, d0)

#### DIAGRAMMA DI GLASER

Condensazione: assente



DESCRIZIONE	DIMENSIONI INTERASSE (MM)	MASSA SUPERFICIALE (KG/M <sup>2</sup> )
a Montanti orizzontali in legno	80x100	650
b Mastice	-	-
c Listelli in legno	27x38	650
d Montanti verticali in legno	60x200	600



DESCRIZIONE	SPESSORE (MM)	MASSA VOLUMICA (KG/M <sup>3</sup> )	MASSA SUPERFICIALE (KG/M <sup>2</sup> )	CONDUTTIVITÀ TERMICA (W/MK)	RESISTENZA TERMICA (M <sup>2</sup> K/W)	CALORE SPECIFICO (J/KKG)	FATTORE DI RESISTENZA AL VAPORE (-)
Strato laminare interno					0.13		
1 Lastra di cartongesso	12.5	1250	15.6	0.3	0.04	1100	21
2 Lastra di cartongesso	12.5	760	9.5	0.2	0.06	1100	10
3 Isolante in lana di roccia	100	40	4.0	0.037	2.70	1030	1
4 Barriera al vapore in alluminio	0.025	7200	0.2	0.17	0.00	897	600000
5 Isolante in lana di roccia	200	40	8.0	0.037	5.41	1030	1
6 Pannello di controventamento in OSB	9	600	5.4	0.13	0.07	2500	50
7 Tessuto non tessuto di poliestere	0.3		0.3	0.170	0.00	-	67
Strato laminare in intercapedine	27	-	-	-	0.04	-	-
8 Rivestimento in lastre di legno	25	421	10.5	-	-	-	-
<b>TOTALE</b>	<b>386</b>				<b>8.45</b>		



## b) CV2: Chiusura perimetrale portante

### CARATTERISTICHE TERMICHE

Massa superficiale totale	536.7	kg/m <sup>2</sup>
Resistenza termica totale	7.94	m <sup>2</sup> K/W
Attenuazione	0.014	-
Sfasamento	11.64	h

### CARATTERISTICHE ACUSTICHE

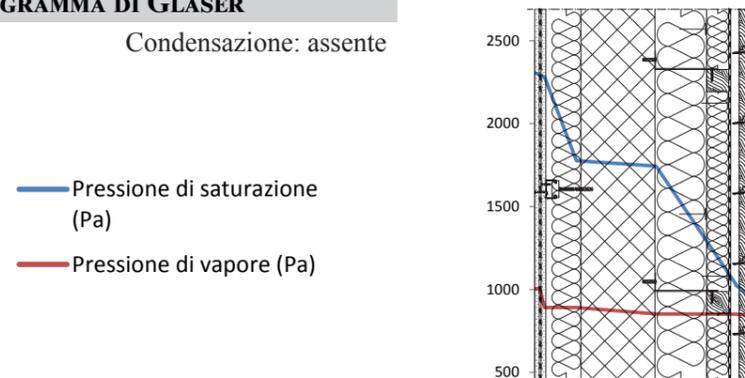
R <sub>w</sub>	>70	dB
L <sub>nw,eq</sub>	-	dB

### CARATTERISTICHE ANTINCENDIO

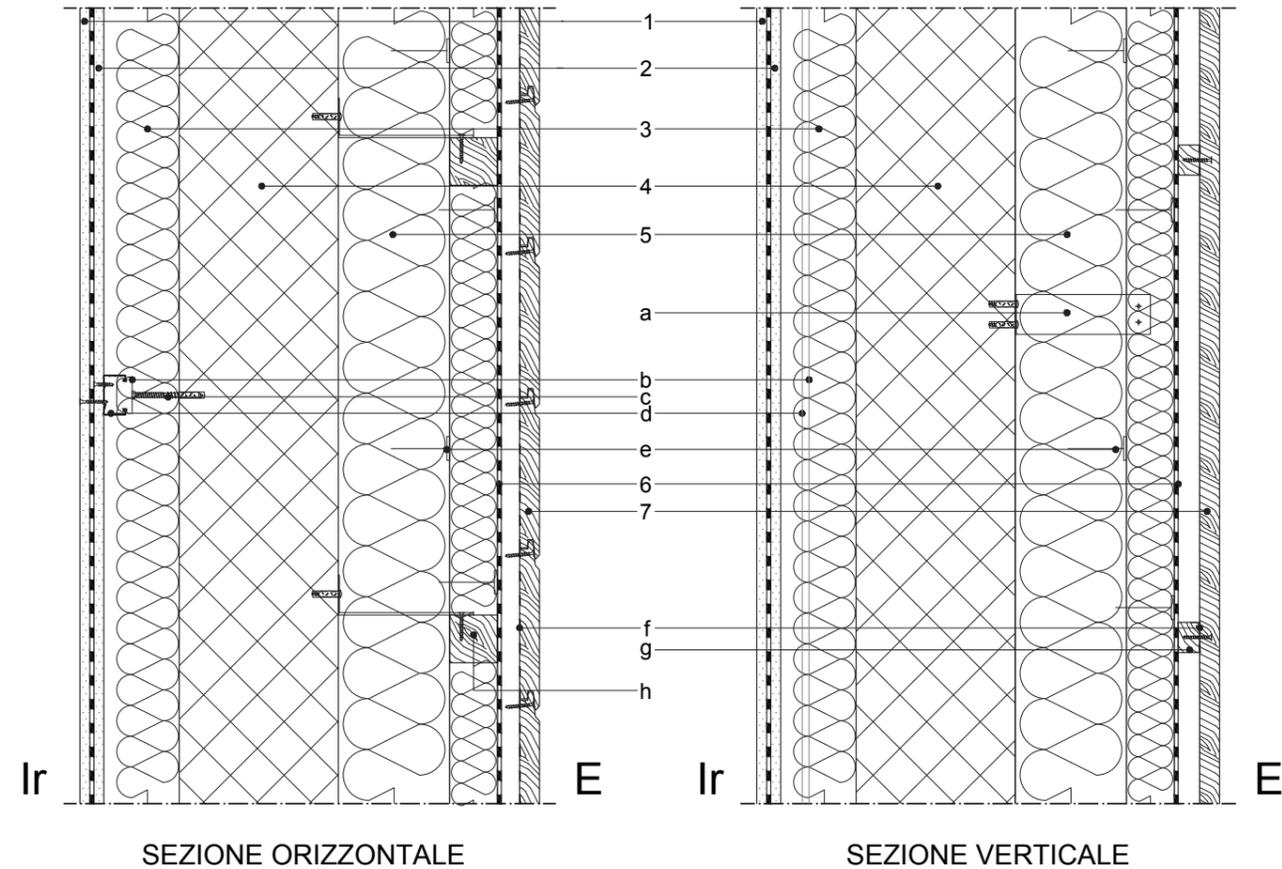
Comportamento al fuoco	REI 60
Classe di resistenza al fuoco del rivestimento interno (strato 1)	classe 1 (A2 s1, d0)

### DIAGRAMMA DI GLASER

Condensazione: assente



DESCRIZIONE	DIMENSIONI INTERASSE		MASSA SUPERFICIALE (KG/M <sup>2</sup> )	
	(MM)	(MM)		
a	Profilo metallico a L	170	1350/600	
b	Gancio semplice	-	-	-
c	Vite di congiunzione e tassello	-	-	-
d	Profilo metallico a C	50x27x0.6	650	5.8
e	Tassello di plastica	-	-	-
f	Mastice	-	-	-
g	Listelli in legno	27x38	650	0.8
h	Montanti verticali in legno	60x60	600	3.0



DESCRIZIONE	SPESORE (MM)	MASSA VOLUMICA (KG/M <sup>3</sup> )	MASSA SU-PERFICIALE (KG/M <sup>2</sup> )	CONDUTTIVITÀ TERMICA (W/K)	RESISTENZA TERMICA (M <sup>2</sup> K/W)	CALORE SPECIFICO (J/KKG)	FATTORE DI RESISTENZA AL VAPORE (-)	
Strato laminare interno					0.13			
1	Lastra di cartongesso	12.5	1250	15.6	0.3	0.04	1100	21
2	Lastra di cartongesso con barriera al vapore	12.5	760	9.5	0.2	0.06	1100	3200
3	Isolante in lana di roccia	80	40	3.2	0.037	2.16	1030	1
4	Calcestruzzo armato	200	2400	480.0	2.1	0.10	1000	90
5	Isolante in lana di roccia	200	40	8.0	0.037	5.41	1030	1
6	Tessuto non tessuto in poliestere	0.3		0.3	0.170	0.00	-	67
	Strato laminare in intercapedine	27	-	-	-	0.04	-	-
7	Rivestimento in lastre di legno	25	421	10.5	-	-	-	-
<b>TOTALE</b>		<b>557</b>			<b>7.94</b>			



### c) CV3: Chiusura perimetrale autoportante del modulo

#### CARATTERISTICHE TERMICHE

Massa superficiale totale	60.5	kg/m <sup>2</sup>
Resistenza termica totale	8.45	m <sup>2</sup> K/W
Attenuazione	0.447	-
Sfasamento	8.27	h

#### Caratteristiche acustiche

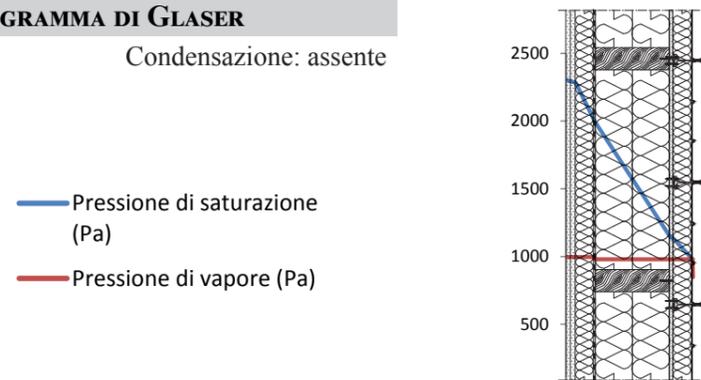
R <sub>w</sub>	89.7	dB
L <sub>nw,eq</sub>	-	dB

#### Caratteristiche antincendio

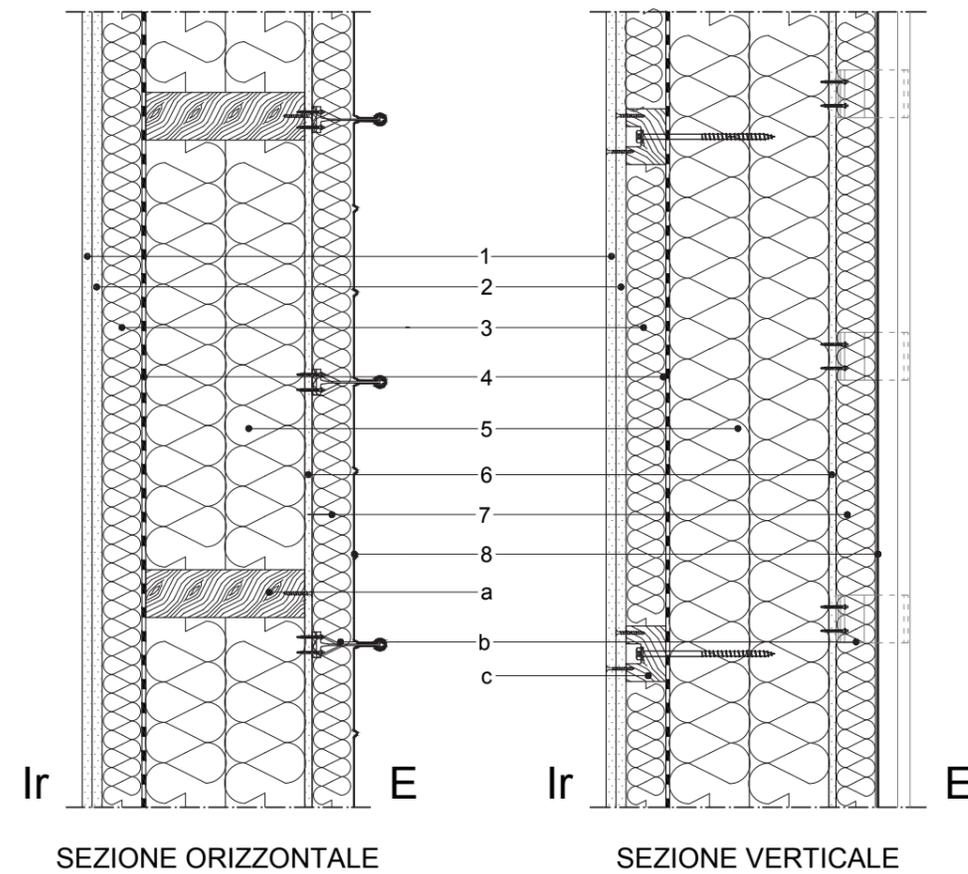
Comportamento al fuoco	REI 60
Classe di resistenza al fuoco del rivestimento interno (strato 1)	classe 1 (A2 s1, d0)

#### DIAGRAMMA DI GLASER

Condensazione: assente



DESCRIZIONE	DIMENSIONI INTERASSE (MM)	MASSA SUPERFICIALE (KG/M <sup>2</sup> )
a Montanti verticali in legno	60x200	600
Clip in alluminio con cappa termica	altezza 90	333/
c Montanti orizzontali in legno	70x100	650



DESCRIZIONE	SPESSORE (MM)	MASSA VOLUMICA (KG/M <sup>3</sup> )	MASSA SUPERFICIALE (KG/M <sup>2</sup> )	CONDUTTIVITÀ TERMICA (W/MK)	RESISTENZA TERMICA (M <sup>2</sup> K/W)	CALORE SPECIFICO (J/KKG)	FATTORE DI RESISTENZA AL VAPORE (-)
Strato laminare interno					0.13		
1 Lastra di cartongesso	12.5	1250	15.625	0.3	0.04	1100	21
2 Lastra di cartongesso	12.5	760	9.5	0.2	0.06	1100	10
3 Isolante in lana di roccia	50	40	2	0.037	1.35	1030	1
4 Barriera al vapore in alluminio	0.025	7200	0.18	0.17	0.00	897	6000000
5 Isolante in lana di roccia	200	40	8	0.037	5.41	1030	1
6 Pannello di controventamento in OSB	9	600	5.4	0.13	0.07	2500	50
7 Isolante in lana di roccia	50	40	2	0.037	1.35	1030	1
8 Profilo in alluminio grecato con graffatura	1	2700	2.7	200	0.00	800	
Strato laminare esterno					0.04		
<b>TOTALE</b>	<b>335</b>				<b>8.45</b>		



## d) CV4: Chiusura perimetrale contro terra

### CARATTERISTICHE TERMICHE

Massa superficiale totale	757.3	kg/m <sup>2</sup>
Resistenza termica totale	5.57	m <sup>2</sup> K/W
Attenuazione	0.01	-
Sfasamento	12.4	h

### Caratteristiche acustiche

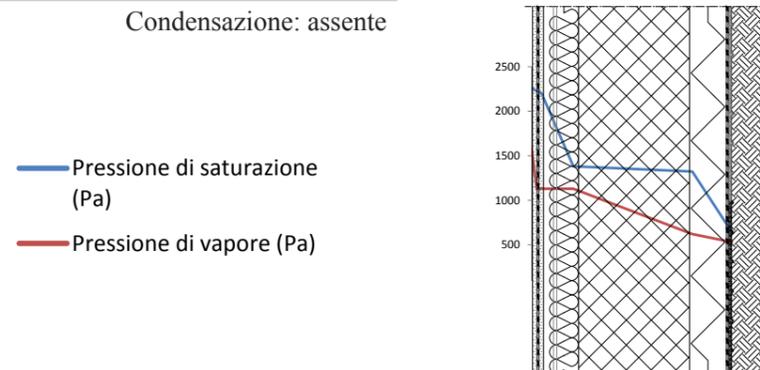
R <sub>w</sub>	-	dB
L <sub>nw,eq</sub>	-	dB

### Caratteristiche antincendio

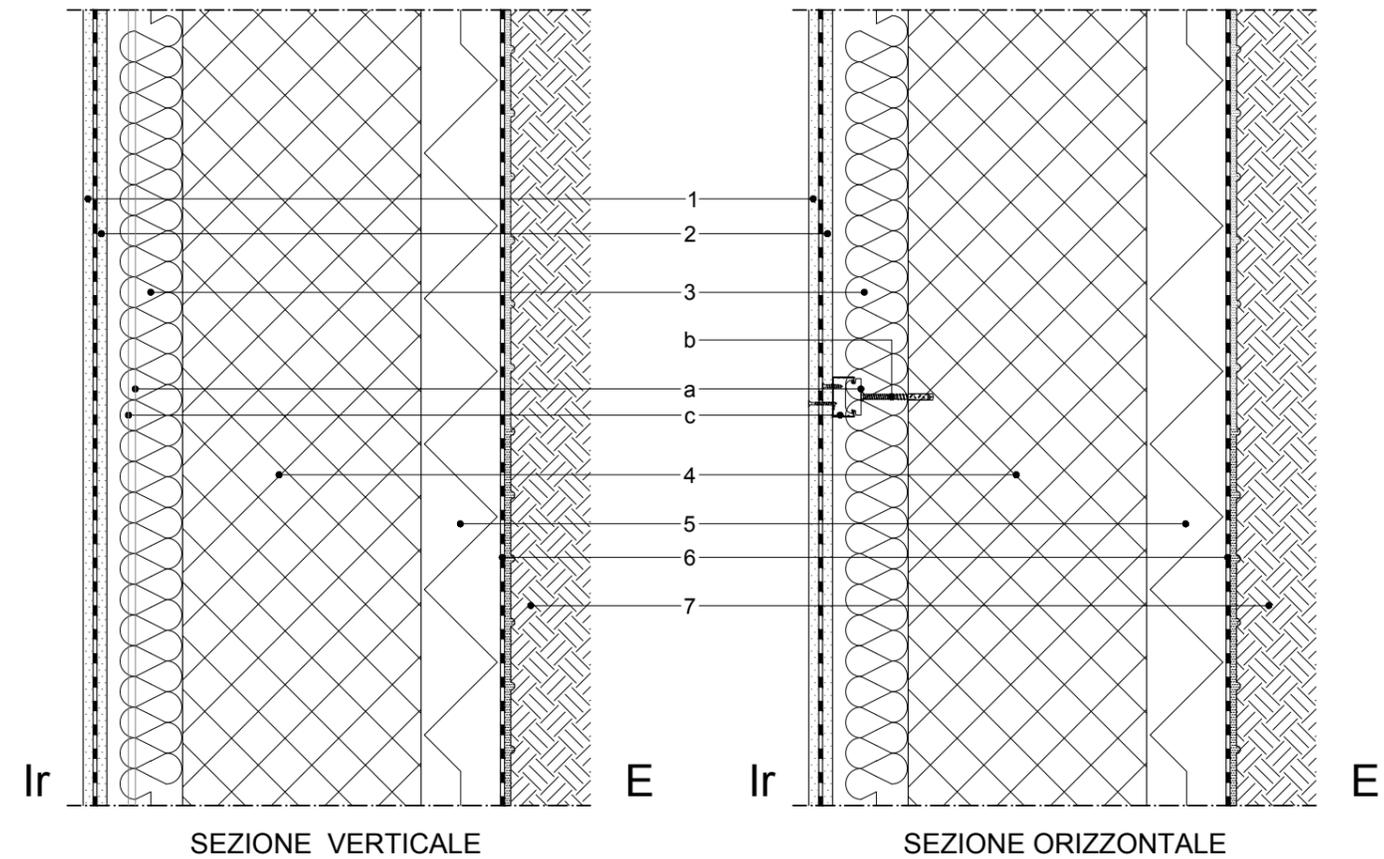
Comportamento al fuoco	REI 60
Classe di resistenza al fuoco del rivestimento interno (strato 1)	classe 1 (A2 s1, d0)

### DIAGRAMMA DI GLASER

Condensazione: assente



DESCRIZIONE	DIMENSIONI INTERASSE (MM)	DIMENSIONI INTERASSE (MM)	MASSA SUPERFICIALE (KG/M <sup>2</sup> )
a Gancio semplice	-	-	-
b Vite di congiunzione e tassello	-	-	-
c Profilo metallico a C	50x27x0.6	650	5.8



DESCRIZIONE	SPESORE (MM)	MASSA VOLUMICA (KG/M <sup>3</sup> )	MASSA SU-PERFICIALE (KG/M <sup>2</sup> )	CONDUTTIVITÀ TERMICA (W/MK)	RESISTENZA TERMICA (M <sup>2</sup> K/W)	CALORE SPECIFICO (J/KKG)	FATTORE DI RESISTENZA AL VAPORE (-)
Strato laminare interno					0.13		
1 Lastra di cartongesso	12.5	1250	15.6	0.3	0.04	1100	21
2 Lastra di cartongesso con barriera al vapore	12.5	760	9.5	0.2	0.06	1100	3200
3 Isolante in lana di roccia	80	40	3.2	0.037	2.16	1030	1
4 Calcestruzzo armato	300	2400	720.0	2.1	0.14	1000	90
5 Lastra in EPS	100	26	2.6	0.033	3.03	1404	60
6 Membrana bugnata in polietilene di impermeabilizzazione e di protezione	10	-	0.58	-	-	-	-
7 Terreno							
<b>TOTALE</b>	<b>515</b>				<b>5.57</b>		



### 3. CHIUSURE ORIZZONTALI

#### a) CO1: Tetto piano calpestabile

##### CARATTERISTICHE TERMICHE

Massa superficiale totale	653.2	kg/m <sup>2</sup>
Resistenza termica totale	10.0	m <sup>2</sup> K/W
Attenuazione	0.003	-
Sfasamento	19.5	h

##### CARATTERISTICHE ACUSTICHE

R <sub>w</sub>	53.82	dB
L <sub>nw,eq</sub>	67.38	dB

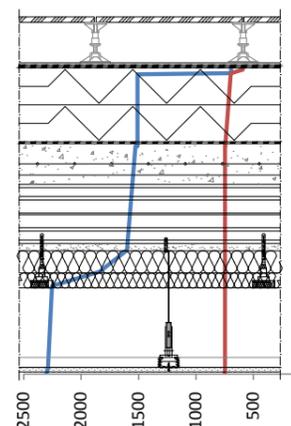
##### CARATTERISTICHE ANTINCENDIO

Comportamento al fuoco	REI 90
Classe di resistenza al fuoco del rivestimento interno (strato 1)	classe 1 (A2 s1, d0)

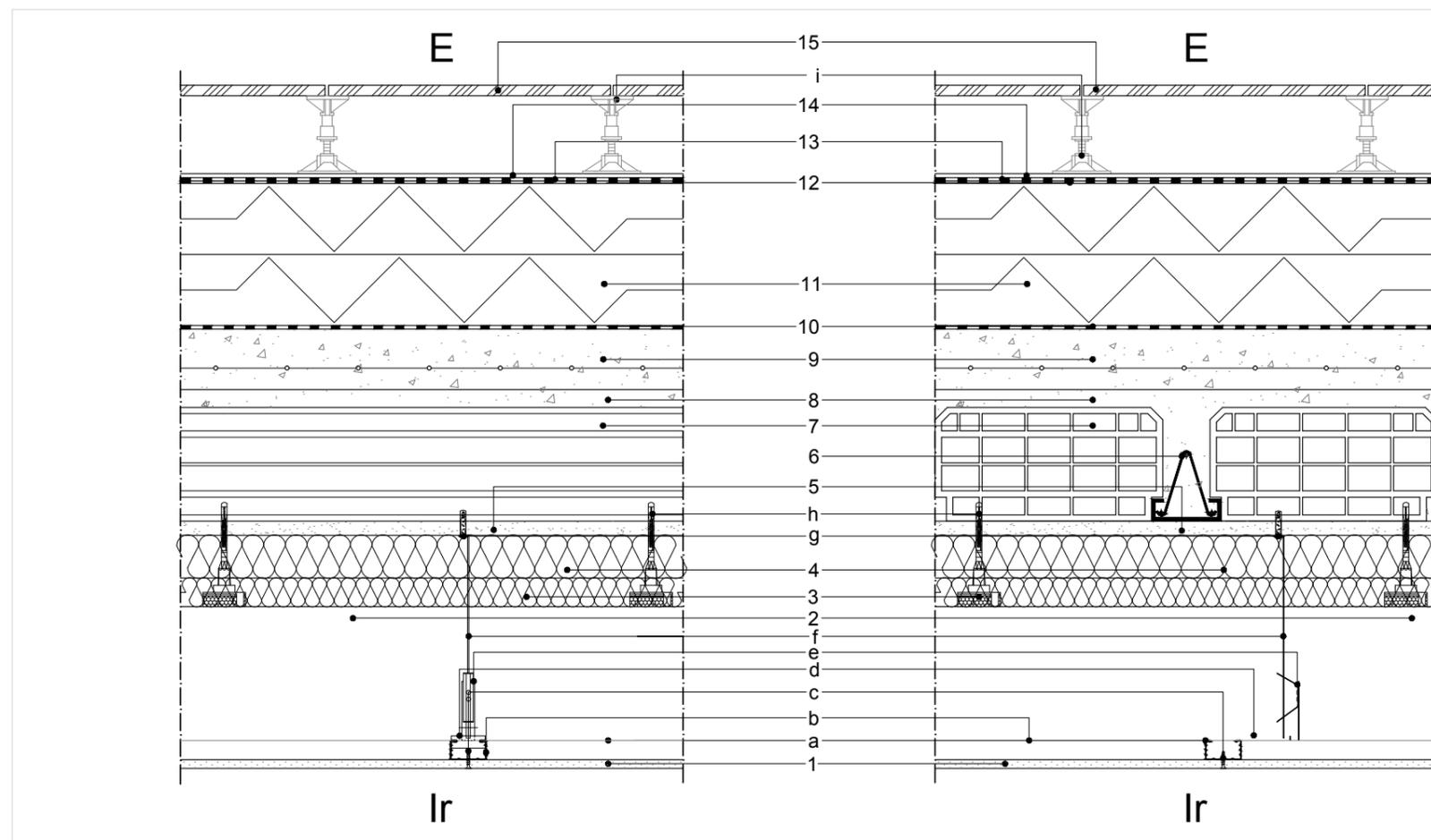
##### DIAGRAMMA DI GLASER

Condensazione: assente

— Pressione di saturazione (Pa)  
— Pressione di vapore (Pa)



DESCRIZIONE	DIMENSIONI INTERASSE (MM)	MASSA SUPERFICIALE (KG/M <sup>2</sup> )
a	Profilo metallico a C 50x27x0.6	500
b	Profilo metallico a C 50x27x0.6	1200
c	Vite auto-perforante	-
d	Gancio ortogonale	-
e	Gancio con molla	-
f	Pendino diam 4	650
g	Vite da gesso e tassello	-
h	Tassello di ancoraggio	-
i	Piedini in plastica	-



DESCRIZIONE	SPESORE (MM)	MASSA VOLUMICA (KG/M <sup>3</sup> )	MASSA SU-PERFICIALE (KG/M <sup>2</sup> )	CONDUTTIVITÀ TERMICA (W/MK)	RESISTENZA TERMICA (M <sup>2</sup> K/W)	CALORE SPECIFICO (J/KKG)	FATTORE DI RESISTENZA AL VAPORE (-)
1	Strato laminare interno	-	-	-	0.1	-	-
2	Lastra di cartongesso	12.5	600	7.5	0.25	1100	10
3	Passaggio impiantistico	230	-	-	-	-	1
4	Isolante in lana di roccia	40	40	1.6	0.037	1030	1
5	Isolante in lana di roccia	60	40	2.4	0.037	1030	1
6	Intonaco preesistente	20	1900	38	0.65	1000	12
7	Travetto prefabbricato in laterizio	-	-	-	-	-	-
8	Pignata in laterizio	160	1870	346	-	880	15
9	Massetto di calcestruzzo	25	-	-	-	-	-
10	Getto in calcestruzzo armato	85	2400	204.0	2.1	1000	90
11	Barriera al vapore in alluminio	0.025	7200	0.2	0.17	897	6000000
12	Doppia lastra in EPS con pendenza (1,5 %)	200	26	5.2	0.033	1404	60
13	Strato inferiore di impermeabilizzazione	3.5	1171	4.1	0.17	960	51429
14	Strato superiore di impermeabilizzazione	4.2	1095	4.6	0.17	960	47619
15	Strato di drenaggio, isolamento anticalpestio e protezione	6	120	0.7	0.23	1675	-
	Strato laminare esterno	100	-	-	-	0.04	-
	Rivestimento in lastre in pietra	15	2795	41.9	-	-	-
<b>TOTALE</b>		<b>964</b>			<b>10.02</b>		



## b) CO2: tetto verde non calpestabile

### CARATTERISTICHE TERMICHE

Massa superficiale totale	724.6	kg/m <sup>2</sup>
Resistenza termica totale	11.3	m <sup>2</sup> K/W
Attenuazione	0.002	-
Sfasamento	23.92	h

### CARATTERISTICHE ACUSTICHE

R <sub>w</sub>	> 53	dB
L <sub>nw,eq</sub>	-	dB

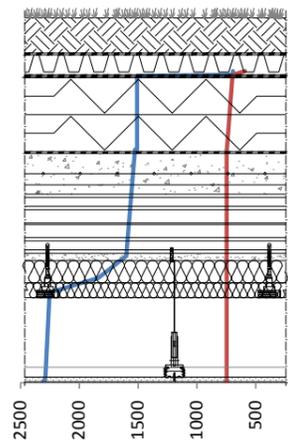
### CARATTERISTICHE ANTINCENDIO

Comportamento al fuoco	REI 90
Classe di resistenza al fuoco del rivestimento interno (strato 1)	classe 1 (A2 s1, d0)

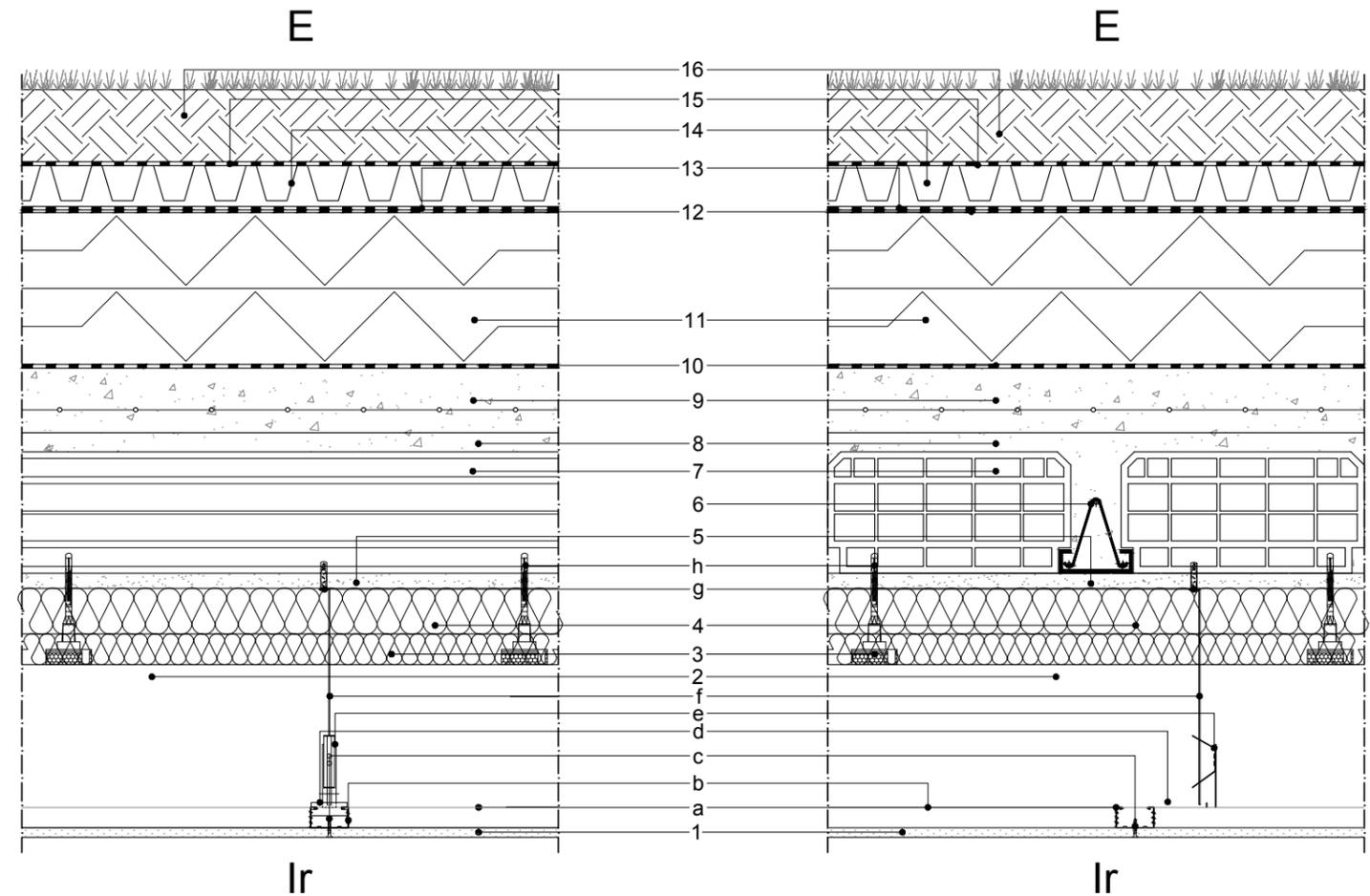
### DIAGRAMMA DI GLASER

Condensazione: assente

— Pressione di saturazione (Pa)  
— Pressione di vapore (Pa)



DESCRIZIONE	DIMENSIONI INTERASSE (MM)	MASSA SUPERFICIALE (KG/M <sup>2</sup> )
a	Profilo metallico a C 50x27x0.6	500
b	Profilo metallico a C 50x27x0.6	1200
c	Vite auto-perforante	-
d	Gancio ortogonale	-
e	Gancio con molla	-
f	Pendino diam 4	650
g	Vite da gesso e tassello	-
h	Tassello di ancoraggio	-



DESCRIZIONE	SPESORE (MM)	MASSA VOLUMICA (KG/M <sup>3</sup> )	MASSA SU-PERFICIALE (KG/M <sup>2</sup> )	CONDUTTIVITÀ TERMICA (W/mK)	RESISTENZA TERMICA (M <sup>2</sup> K/W)	CALORE SPECIFICO (J/KKG)	FATTORE DI RESISTENZA AL VAPORE (-)
Strato laminare interno	-	-	-	-	0.1	-	-
1	Lastra di cartongesso	12.5	600	7.5	0.25	1100	10
2	Passaggio impiantistico	230	-	-	-	0.16	1
3	Isolante in lana di roccia	40	40	1.6	0.037	1030	1
4	Isolante in lana di roccia	60	40	2.4	0.037	1030	1
5	Intonaco preesistente	20	1900	38	0.65	1000	12
6	Travetto prefabbricato in laterizio	-	-	-	-	-	-
7	Pignatta in laterizio	160	1870	346	-	0.54	15
8	Massetto di calcestruzzo	25	-	-	-	-	-
9	Getto in calcestruzzo armato	85	2400	204.0	2.1	0.10	90
10	Barriera al vapore in alluminio	0.025	7200	0.2	0.17	0.00	600000
11	Doppia lastra in EPS con pendenza (1,5 %)	200	26	5.2	0.033	1404	60
12	Strato inferiore di impermeabilizzazione	3.5	1171	4.1	0.17	0.00	51429
13	Strato superiore di impermeabilizzazione	4.2	1095	4.6	0.17	0.00	47619
14	Strato di ritenzione d'acqua in EPS	54	260	14.0	0.033	1.39	2073
15	Feltro di filtraggio in polipropilene	0.75	-	-	-	-	-
16	Inverdimento estensivo	100	1000	100.0	-	-	-
<b>TOTALE</b>		<b>997</b>			<b>11.34</b>		



### c) CO4: Solaio contro terra

#### CARATTERISTICHE TERMICHE

Massa superficiale totale	-	kg/m <sup>2</sup>
Resistenza termica totale	4.26	m <sup>2</sup> K/W
Attenuazione	-	-
Sfasamento	-	h

#### CARATTERISTICHE ACUSTICHE

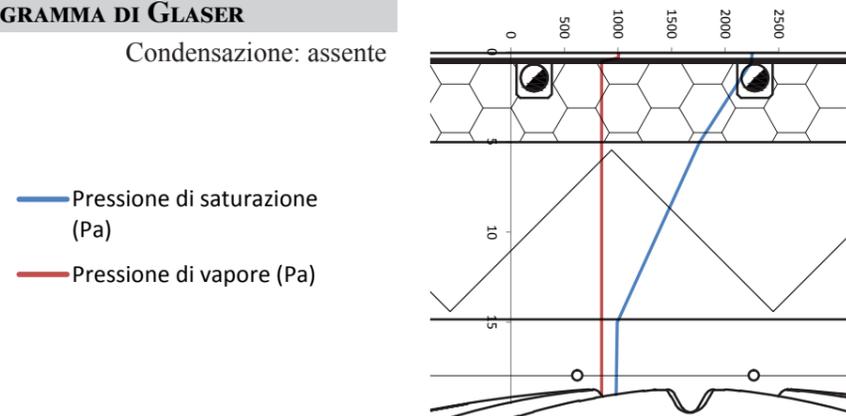
R <sub>w</sub>	-	dB
L <sub>nw,eq</sub>	-	dB

#### CARATTERISTICHE ANTINCENDIO

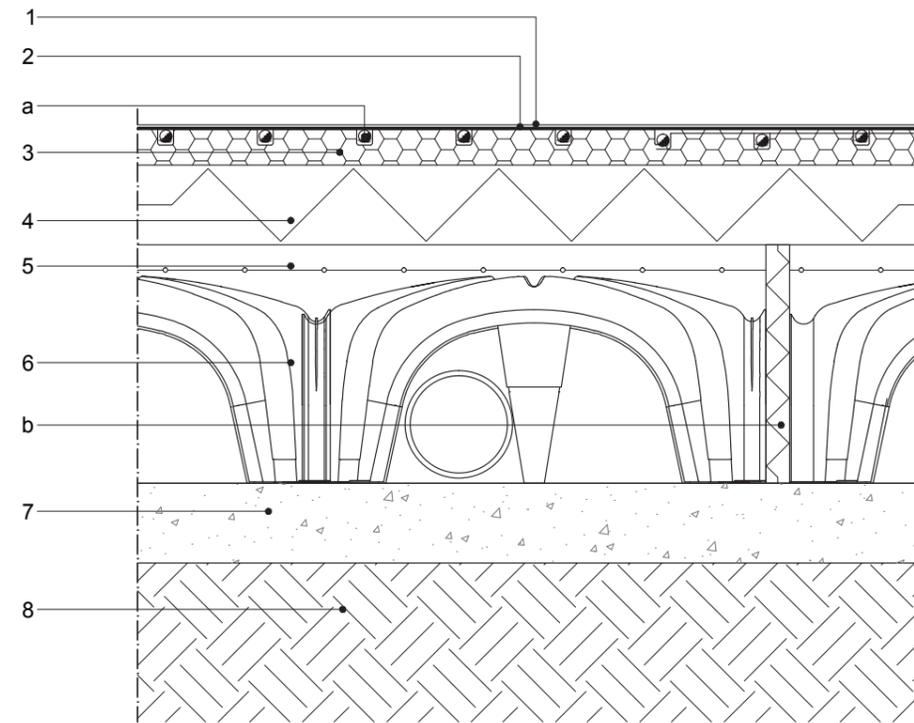
Comportamento al fuoco	REI 60
Classe di resistenza al fuoco del rivestimento interno (strato 1)	classe 1 (Bfl - s1)

#### DIAGRAMMA DI GLASER

Condensazione: assente



DESCRIZIONE	DIMENSIONI INTERASSE (MM)	MASSA SUPERFICIALE (KG/M <sup>2</sup> )
a Tubo scambiatore di calore	diam 16	125
b Giunto di dilatazione in polistirolo	30	30 m



DESCRIZIONE	SPESSORE (MM)	MASSA VOLUMICA (KG/M <sup>3</sup> )	MASSA SUPERFICIALE (KG/M <sup>2</sup> )	CONDUTTIVITÀ TERMICA (W/MK)	RESISTENZA TERMICA (M <sup>2</sup> K/W)	CALORE SPECIFICO (J/KKG)	FATTORE DI RESISTENZA AL VAPORE (-)
1 Linoleum	3.2	917	2.9	0.25	0.01	1100	1800
2 Doppia lastra di acciaio	2	7800	15.6	50	0.00	450	200000
3 Pannello in polistirene espanso con diffusori di calore in alluminio	45	35	1.6	0.032	0.91	1480	60
4 Isolante in EPS	100	40	4.0	0.032	3.13	1480	60
5 Getto in calcestruzzo armato	40	2400	96.0	2.100	0.02	1000	90
6 Strato laminare in intercapedine	-	-	-	-	-	-	-
7 Igloo	260	-	-	-	-	-	-
8 Sottofondazione in conglomerato cementizio	100	-	-	-	-	-	-
8 terreno	-	-	-	-	-	-	-
<b>TOTALE</b>	<b>550</b>				<b>4.26</b>		



## d) CO5: Tetto del modulo

### CARATTERISTICHE TERMICHE

Massa superficiale totale	40.0	kg/m <sup>2</sup>
Resistenza termica totale	8.81	m <sup>2</sup> K/W
Attenuazione	0.286	-
Sfasamento	9.81	h

### Caratteristiche acustiche

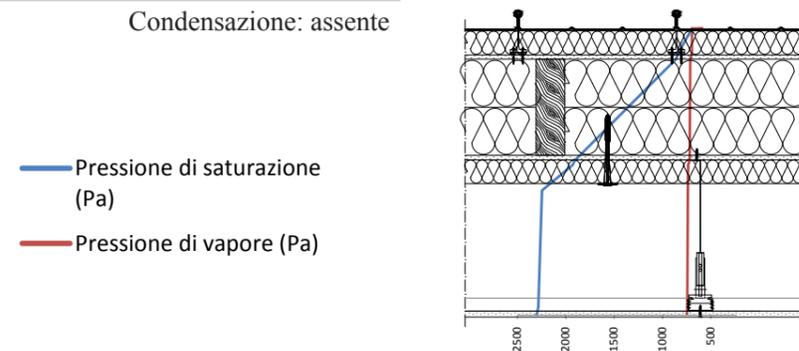
R <sub>w</sub>	>85	dB
L <sub>nw,eq</sub>	-	dB

### CARATTERISTICHE ANTINCENDIO

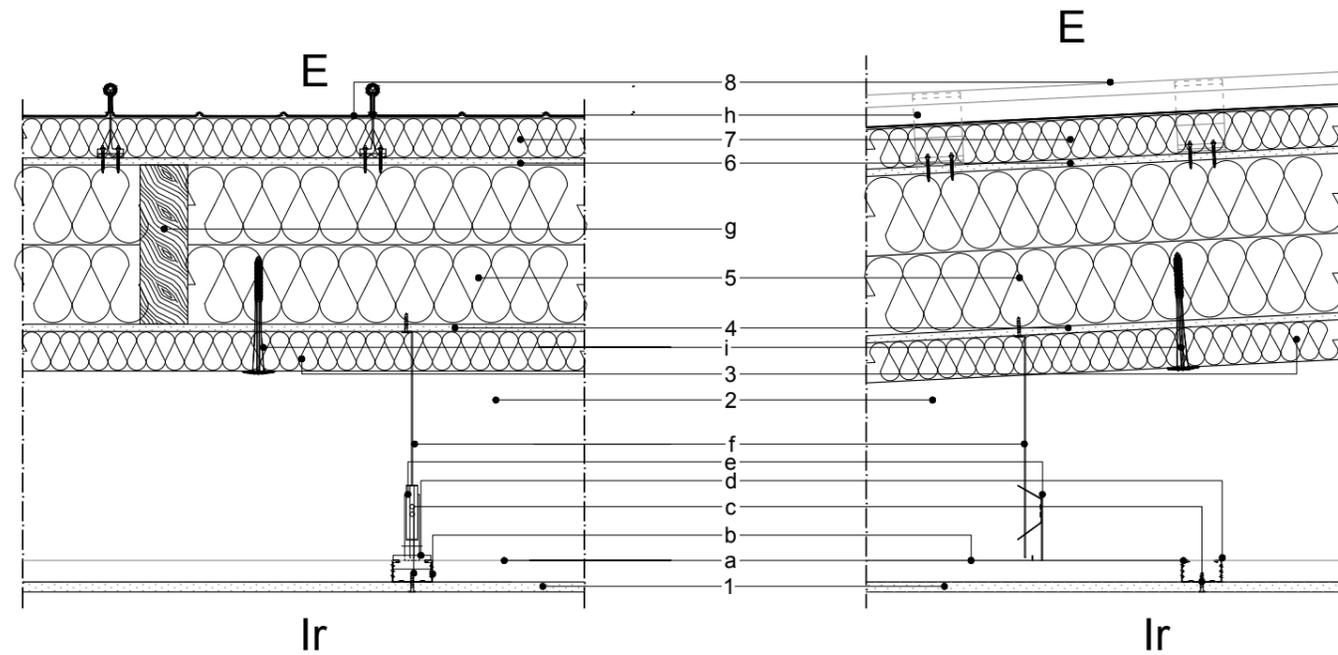
Comportamento al fuoco	REI 60
Classe di resistenza al fuoco del rivestimento interno (strato 1)	classe 1 (A2 s1, d0)

### DIAGRAMMA DI GLASER

Condensazione: assente



DESCRIZIONE	DIMENSIONI INTERASSE (MM)	MASSA SUPERFICIALE (KG/M <sup>2</sup> )
a	Profilo metallico a C 50x27x0.6	500
b	Profilo metallico a C 50x27x0.6	1200
c	Vite auto-perforante	-
d	Gancio ortogonale	-
e	Gancio con molla	-
f	Pendino diam 4	650
g	Montanti orizzontali in legno 60x200	650
h	Clip in alluminio con cappa termica altezza 90	333/
i	Vite	-



DESCRIZIONE	SPESSORE (MM)	MASSA VOLUMICA (KG/M <sup>3</sup> )	MASSA SUPERFICIALE (KG/M <sup>2</sup> )	CONDUTTIVITÀ TERMICA (W/MK)	RESISTENZA TERMICA (M <sup>2</sup> K/W)	CALORE SPECIFICO (J/KKG)	FATTORE DI RESISTENZA AL VAPORE (-)
Strato laminare interno	-	-	-	-	0.10	-	-
1	Lastra di cartongesso	12.5	600	7.5	0.25	1100	10
2	Passaggio impiantistico	230	-	-	0.16	-	1
3	Isolante in lana di roccia	50	40	2	0.037	1030	1
4	Lastra in OSB	9	600	5.4	0.13	2500	50
5	Isolante in lana di roccia	200	40	8	0.037	1030	1
6	Lastra in OSB	9	600	5.4	0.13	2500	50
7	Isolante in lana di roccia	50	40	2	0.037	1030	1
8	Profilo in alluminio grecato con graffatura	1	2700	2.7	200	0.00	800
Strato laminare esterno	-	-	-	-	0.04	-	-
<b>TOTALE</b>		<b>564</b>			<b>8.81</b>		



## e) CO6: Solaio delle serre

### CARATTERISTICHE TERMICHE

Massa superficiale totale	95.7	kg/m <sup>2</sup>
Resistenza termica totale	4.50	m <sup>2</sup> K/W
Attenuazione	0.258	-
Sfasamento	9.02	h

### CARATTERISTICHE ACUSTICHE

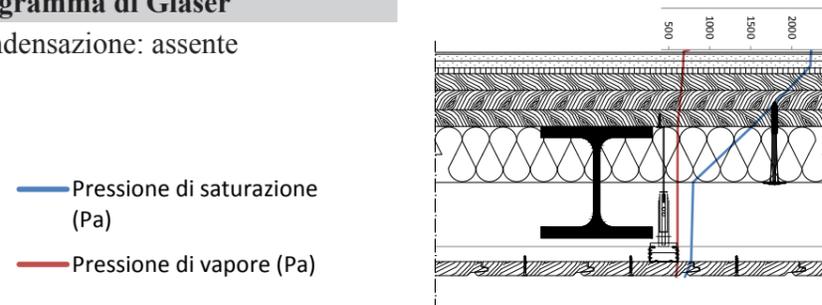
R <sub>w</sub>	-	dB
L <sub>nw,eq</sub>		dB

### CARATTERISTICHE ANTINCENDIO

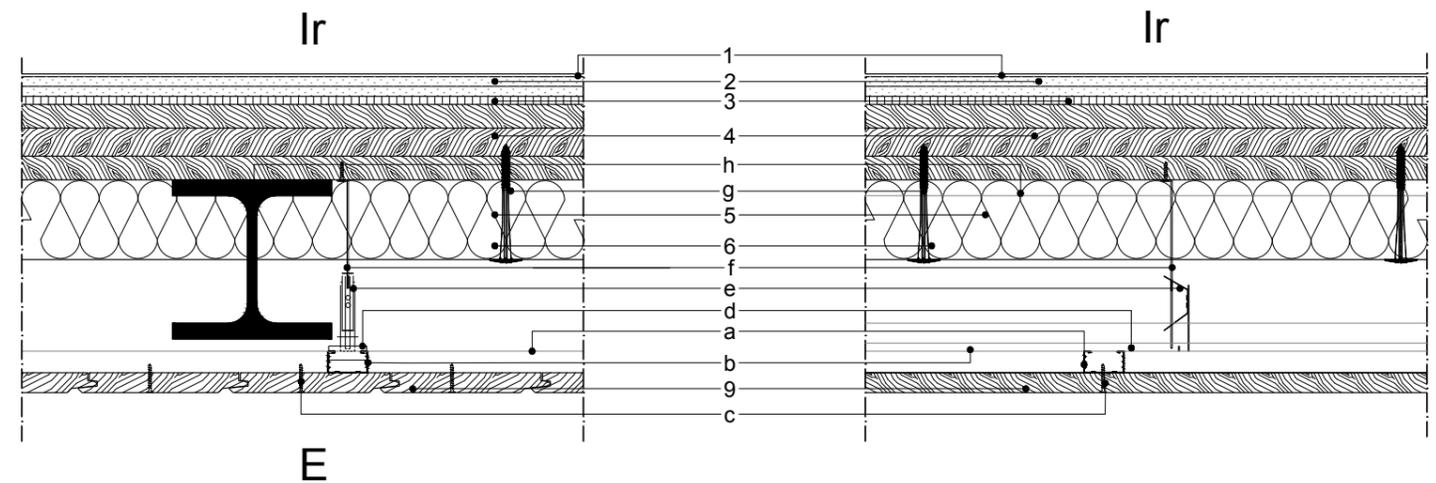
Comportamento al fuoco	REI 60
Classe di resistenza al fuoco del rivestimento interno (strato 1)	classe 1 (Bfl - s1)

### Diagramma di Glaser

Condensazione: assente



DESCRIZIONE	DIMENSIONI INTERASSE (MM)	MASSA SUPERFICIALE (KG/M <sup>2</sup> )
a	Mastice	-
b	Listelli in legno 27x38	650
c	Profilo metallico a C 50x27x0.6	500
d	Profilo metallico a C 50x27x0.6	1200
e	Vite autoperforante	-
f	Gancio ortogonale	-
g	Gancio con molla	-
h	Pendino diam 4	650
i	Vite	-
j	Tassello di ancoraggio	-
k	Trave in acciaio IPE 270	



DESCRIZIONE	SPESSORE (MM)	MASSA VOLUMICA (KG/M <sup>3</sup> )	MASSA SUPERFICIALE (KG/M <sup>2</sup> )	CONDUTTIVITÀ TERMICA (W/MK)	RESISTENZA TERMICA (M <sup>2</sup> K/W)	CALORE SPECIFICO (J/KKG)	FATTORE DI RESISTENZA AL VAPORE (-)
							0.17
1	Strato laminare interno						
2	Rivestimento in linoleum	3.2	917	2.9	0.25	0.01	1100
3	Doppia lastra di gessofibra	25	1150	28.75	0.23	0.11	1100
4	Isolante calpestio in fibra di legno	10	200	2	0.044	0.23	2100
5	X-lam	95	500	47.5	0.130	0.73	1600
6	Isolante in lana di roccia	100	40	4	0.037	2.70	1030
7	Passaggio impiantistico	142	-	-	-	0.23	-
8	Rivestimento in lastre di legno	25	421	10.5	0.09	0.28	2500
	Strato laminare esterno						0.04
<b>TOTALE</b>		<b>400</b>			<b>4.50</b>		



## 4. PARTIZIONI VERTICALI

### CARATTERISTICHE TERMICHE

Massa superficiale totale	33.3	kg/m <sup>2</sup>
Resistenza termica totale	1.56	m <sup>2</sup> K/W
Attenuazione	-	-
Sfasamento	-	h

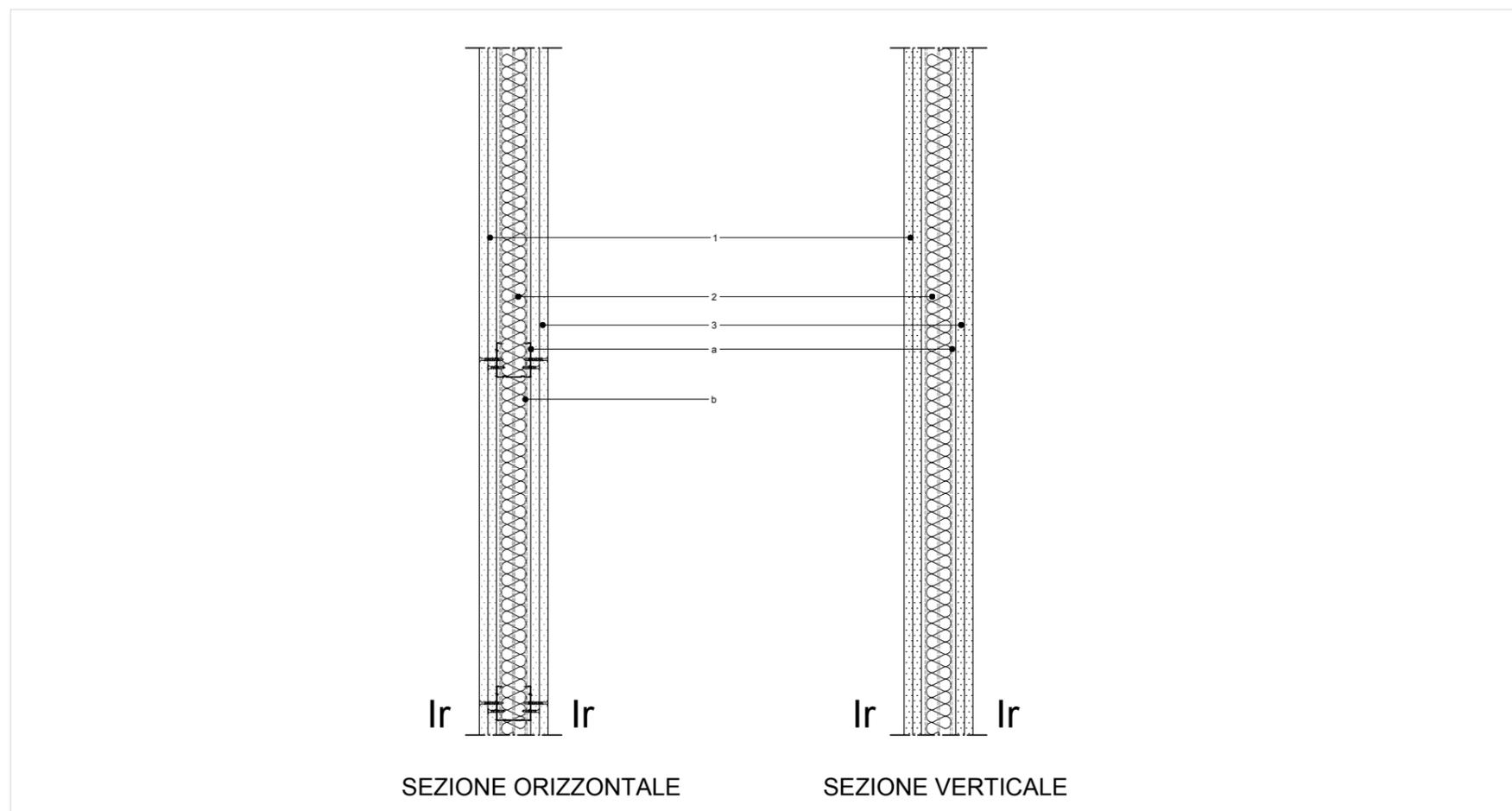
### CARATTERISTICHE ACUSTICHE

R <sub>w</sub>	56	dB
L <sub>nw,eq</sub>	-	dB

### CARATTERISTICHE ANTINCENDIO

Comportamento al fuoco	REI 60
Classe di resistenza al fuoco del rivestimento interno (strati 1 e 3)	classe 1 (A2 s1, d0)

DESCRIZIONE	DIMENSIONI INTERASSE (MM)	MASSA SUPERFICIALE (KG/M <sup>2</sup> )
a Profilo metallico a C	50x27x0.6	500
b Profilo metallico di guida a U	50x40x0.6	-



DESCRIZIONE	SPESSORE (MM)	MASSA VOLUMICA (KG/M <sup>3</sup> )	MASSA SUPERFICIALE (KG/M <sup>2</sup> )	CONDUTTIVITÀ TERMICA (W/MK)	RESISTENZA TERMICA (M <sup>2</sup> K/W)	CALORE SPECIFICO (J/KKG)	FATTORE DI RESISTENZA AL VAPORE (-)
Strato laminare interno					0.13		
1 Doppia lastra di cartongesso	25	1250	15.625	0.3	0.08	1100	21
2 Isolante in fibre di poliestere	40	50	2	0.033	1.21	1200	1
3 Doppia lastra di cartongesso	25	1250	15.625	0.3	0.13	1100	21
Strato laminare interno							
<b>TOTALE</b>	<b>90</b>				<b>1.56</b>		



## 5. PARTIZIONE ORIZZONTALI

### a) PO1: Partizione orizzontale

#### Caratteristiche termiche

Massa superficiale totale	617.2	kg/m <sup>2</sup>
Resistenza termica totale	2.73	m <sup>2</sup> K/W
Attenuazione	-	-
Sfasamento	-	h

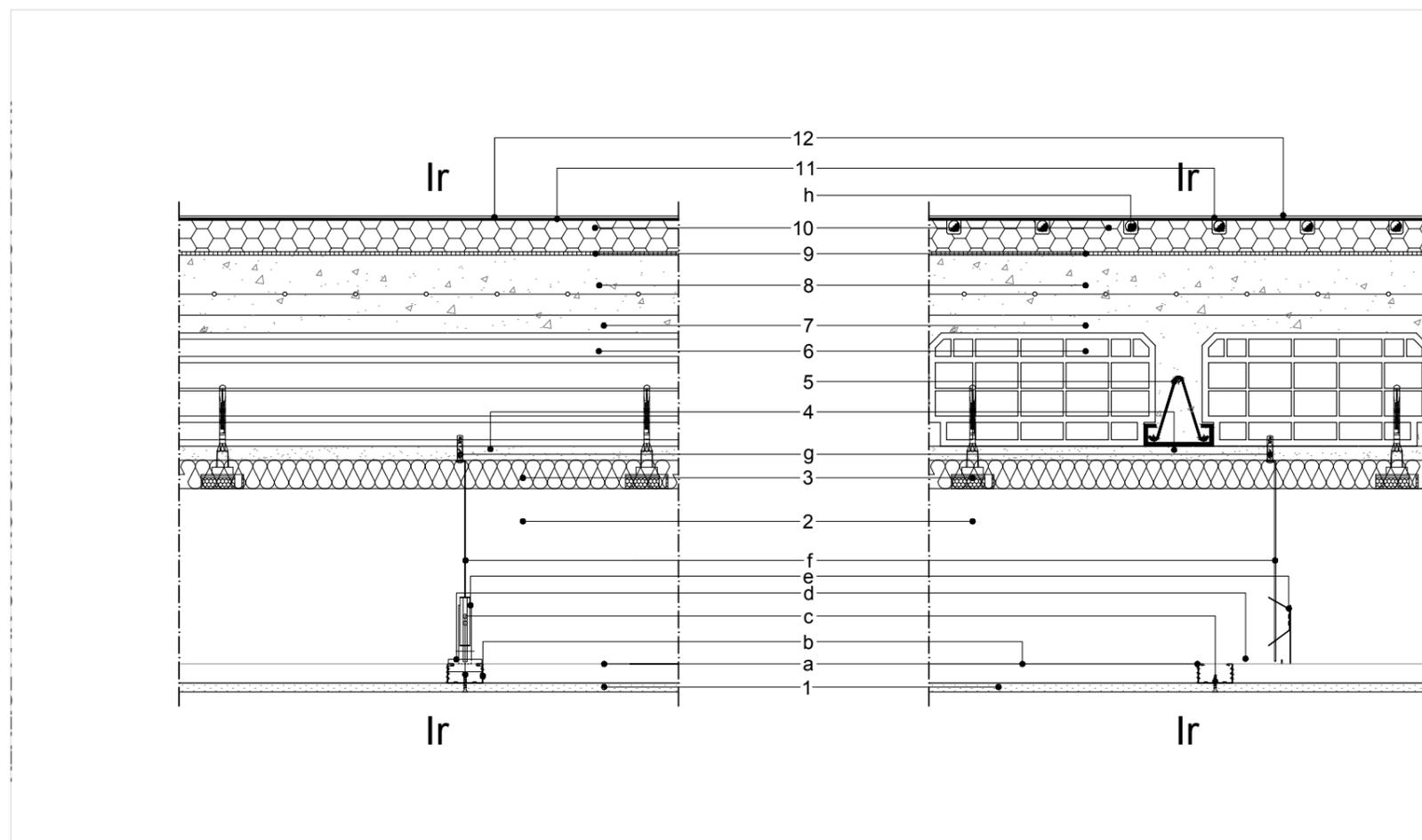
#### Caratteristiche acustiche

R' <sub>w</sub>	>59	dB
L <sub>nw,eq</sub>	66.4	dB

#### Caratteristiche antincendio

Comportamento al fuoco	REI 90
Classe di resistenza al fuoco del rivestimento soffitto (strato 1)	classe 1 (A2 s1, d0)
Classe di resistenza al fuoco del rivestimento del pavimento (strato 1)	classe 1 (Bfl - s1)

Descrizione	Dimensioni Interasse (mm)	Massa superficiale (kg/m <sup>2</sup> )
a Profilo metallico a C	50x27x0.6	500
b Profilo metallico a C	50x27x0.6	1200
c vite autoperforante	-	-
d Gancio ortogonale	-	-
e Gancio con molla	-	-
f Pendino	diam 4	650
g Vite da gesso e tassello	-	-
h Tubo scambiatore di calore	diam 16	125



Descrizione	Spessore (mm)	Massa volumica (kg/m <sup>3</sup> )	Massa superficiale (kg/m <sup>2</sup> )	Conducibilità termica (W/mK)	Resistenza termica (m <sup>2</sup> K/W)	Calore specifico (J/Kkg)	Fattore di resistenza al vapore (-)
Strato laminare interno					0.1		
1 Lastra di cartongesso	12.5	600	7.5	0.25	0.05	1100	10
2 Passaggio impiantistico	230	-	-	-	0.16	-	1
3 Isolante in lana di roccia	40	40	1.6	0.037	1.08	1030	1
4 Intonaco preesistente	20	1900	38	0.65	0.03	1000	12
5 Travetto prefabbricato in laterizio	-						
6 Pignatta in laterizio	160	1870	346	-	0.54	880	15
7 Massetto di calcestruzzo	25						
8 Getto in calcestruzzo armato	85	2400	204.0	2.1	0.02	1000	90
9 Materassino anticalpestio	1.1						
Pannello in polistirene espanso con diffusori di calore in alluminio					0.91	1480	60
10	45	35	1.6	0.032	-	450	10
11 Doppia lastra di acciaio	2	7800	15.6	-	-	1100	1800
12 Rivestimento in linoleum	3.2	917	2.9	-	-		
<b>Totale</b>	<b>624</b>				<b>2.73</b>		



## b) PO2: Solaio tra serra e mensa

### CARATTERISTICHE TERMICHE

Massa superficiale totale	89.9	kg/m <sup>2</sup>
Resistenza termica totale	2.87	m <sup>2</sup> K/W
Attenuazione	-	-
Sfasamento	-	h

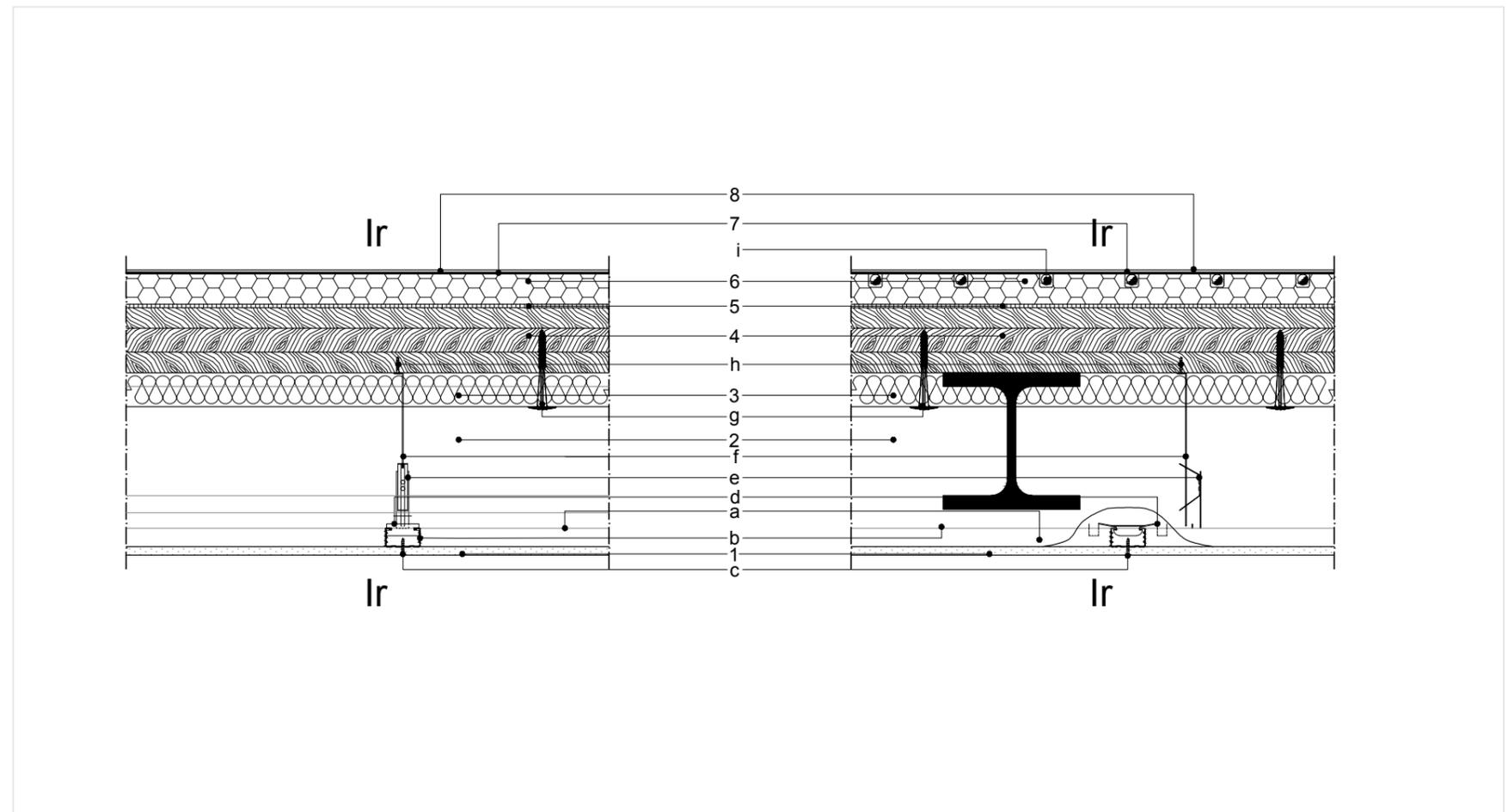
### CARATTERISTICHE ACUSTICHE

R <sub>w</sub>	-	dB
L <sub>nw,eq</sub>	-	dB

### CARATTERISTICHE ANTINCENDIO

Comportamento al fuoco	REI 90
Classe di resistenza al fuoco del rivestimento soffitto (strato 1)	classe 1 (A2 s1, d0)
Classe di resistenza al fuoco del rivestimento del pavimento (strato 8)	classe 1 (Bfl - s1)

DESCRIZIONE	DIMENSIONI INTERASSE (MM)	MASSA SUPERFICIALE (KG/M <sup>2</sup> )
a	Profilo metallico a C 50x27x0.6	500
b	Profilo metallico a C 50x27x0.6	1200
c	Vite auto-perforante	-
d	Gancio ortogonale	-
e	Gancio con molla	-
f	Pendino diam 4	650
g	Vite	-
h	Trave in acciaio IPE 270	-



DESCRIZIONE	SPESSORE (MM)	MASSA VOLUMICA (KG/M <sup>3</sup> )	MASSA SU-PERFICIALE (KG/M <sup>2</sup> )	CONDUTTIVITÀ TERMICA (W/MK)	RESISTENZA TERMICA (M <sup>2</sup> K/W)	CALORE SPECIFICO (J/KKG)	FATTORE DI RESISTENZA AL VAPORE (-)
						0.1	
1	Lastra di cartongesso	12.5	600	7.5	0.25	0.05	1100
2	Isolante in lana di roccia	40	40	1.6	0.037	1.08	1030
3	Passaggio impiantistico	230	-	-	-	-	-
4	X-lam	95	500	47.5	0.130	0.73	1600
5	Materassino anticalpestio	1.1					
6	Pannello in polistirene espanso con diffusori di calore in alluminio	45	35	1.6	0.032	0.91	1480
7	Doppia lastra di gessofibra	25	1150	28.75	-	-	1100
8	Rivestimento in linoleum	3.2	917	2.9	-	-	1100
<b>TOTALE</b>		<b>452</b>			<b>2.87</b>		



### c) PO3: Solaio sopraelevato

#### CARATTERISTICHE TERMICHE

Massa superficiale totale	89.9	kg/m <sup>2</sup>
Resistenza termica totale	2.87	m <sup>2</sup> K/W
Attenuazione	-	-
Sfasamento	-	h

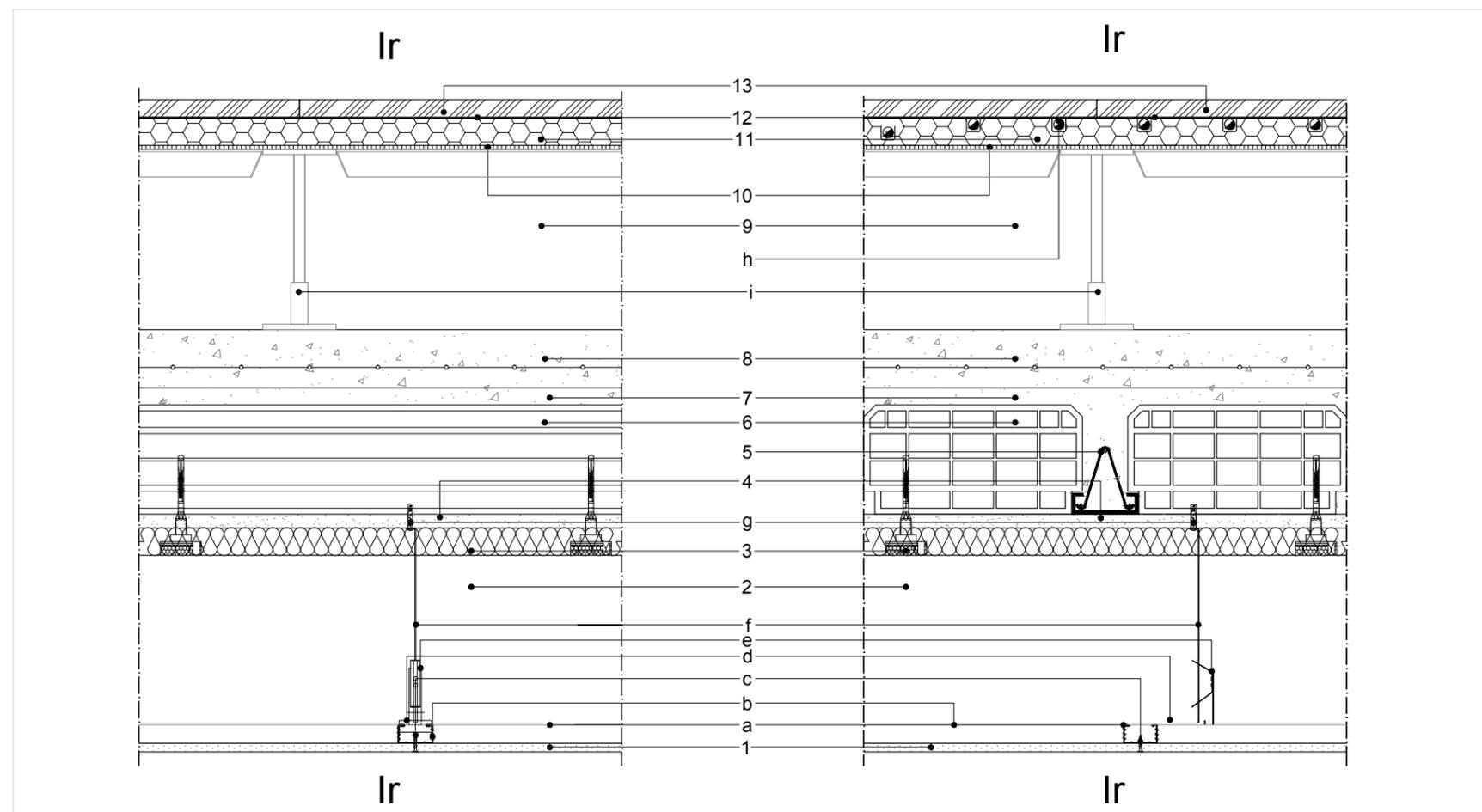
#### CARATTERISTICHE ACUSTICHE

R' <sub>w</sub>	59	dB
L <sub>nw,eq</sub>	66.7	dB

#### CARATTERISTICHE ANTINCENDIO

Comportamento al fuoco	REI 90
Classe di resistenza al fuoco del rivestimento soffitto (strato 1)	classe 1 (A2 s1, d0)
Classe di resistenza al fuoco del rivestimento del pavimento (strato 8)	classe 1 (Bfl - s1)

DESCRIZIONE	DIMENSIONI INTERASSE (MM)	MASSA SUPERFICIALE (KG/M <sup>2</sup> )
a	Profilo metallico a C 50x27x0.6	500
b	Profilo metallico a C 50x27x0.6	1200
c	Vite auto-perforante	-
d	Gancio ortogonale	-
e	Gancio con molla	-
f	Pendino diam 4	650
g	Vite da gesso e tassello	-
h	Tubo scambiatore di calore diam 16	125
i	Piedino a doppio testa alt. 270	600

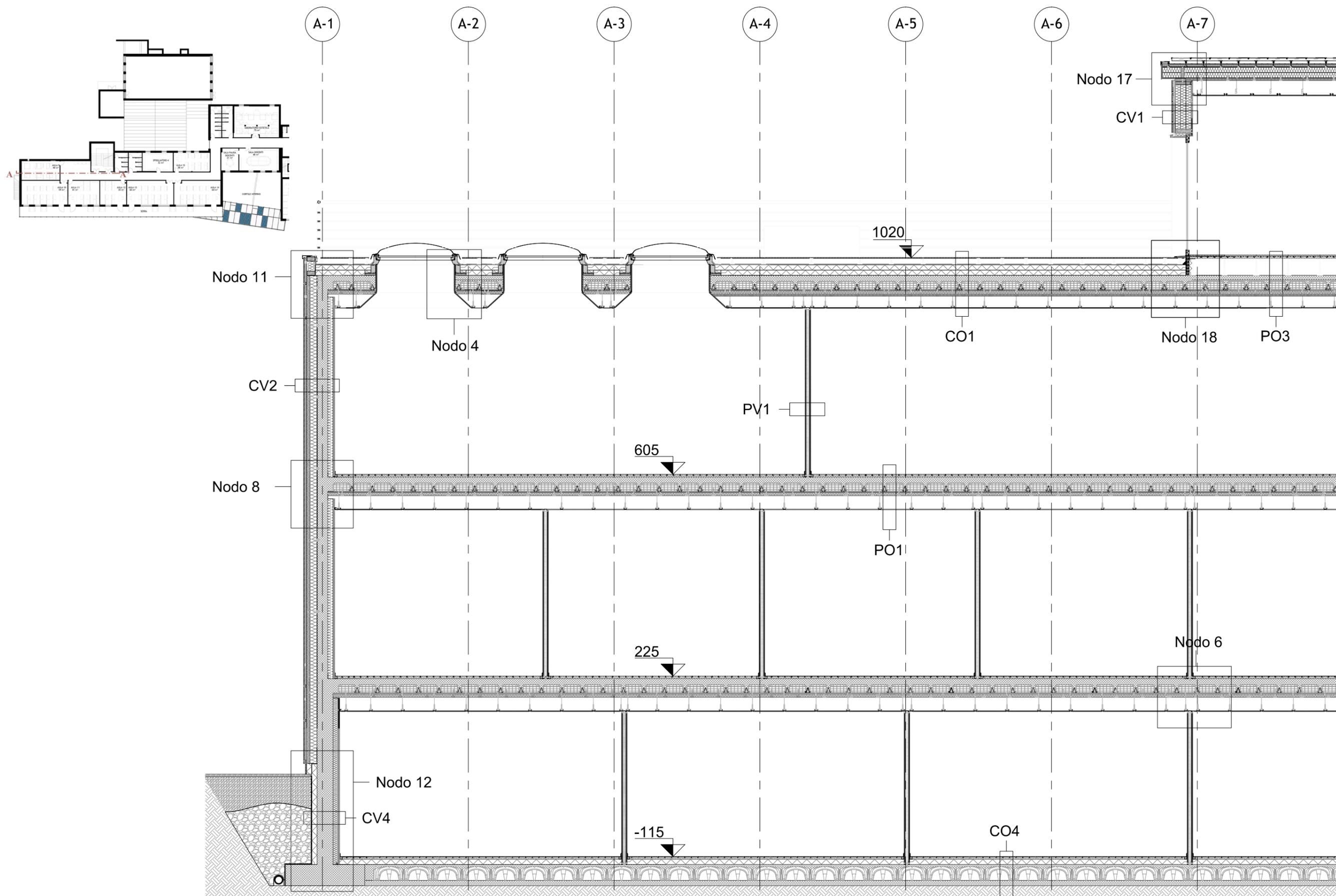


DESCRIZIONE	SPESORE (MM)	MASSA VOLUMICA (KG/M <sup>3</sup> )	MASSA SU-PERFICIALE (KG/M <sup>2</sup> )	CONDUTTIVITÀ TERMICA (W/MK)	RESISTENZA TERMICA (M <sup>2</sup> K/W)	CALORE SPECIFICO (J/KKG)	FATTORE DI RESISTENZA AL VAPORE (-)
Strato laminare interno						0.1	
1	Lastra di cartongesso	15	300	4.5	0.057	0.26	1100
2	Passaggio impiantistico	230	-	-	-	0.16	-
3	Isolante in lana di roccia	40	40	1.6	0.037	1.08	1030
4	Intonaco preesistente	20	1900	38	0.65	0.03	1000
5	Travetto prefabbricato in laterizio	-	1870	346	-	0.54	880
6	Pignata in laterizio	160					
7	Massetto di calcestruzzo	25					
8	Getto in calcestruzzo armato	85	2400	204.0	2.1	0.00	1000
9	intercapedine d'aria	260	-	-	-	0.16	-
10	Materassino anticalpestio	1.1	135	0.1	0.038	0.03	2000
11	Pannello in polistirene espanso con diffusori di calore in alluminio	40	35	1.4	0.032	0.75	1480
12	Lamina di alluminio	0.5	7200	3.6	-	-	897
13	Pannelli rimovibili in ceramica	26	7650	2.9	-	-	700
	Strato laminare interno					0.1	
<b>TOTALE</b>	<b>903</b>				<b>3.21</b>		



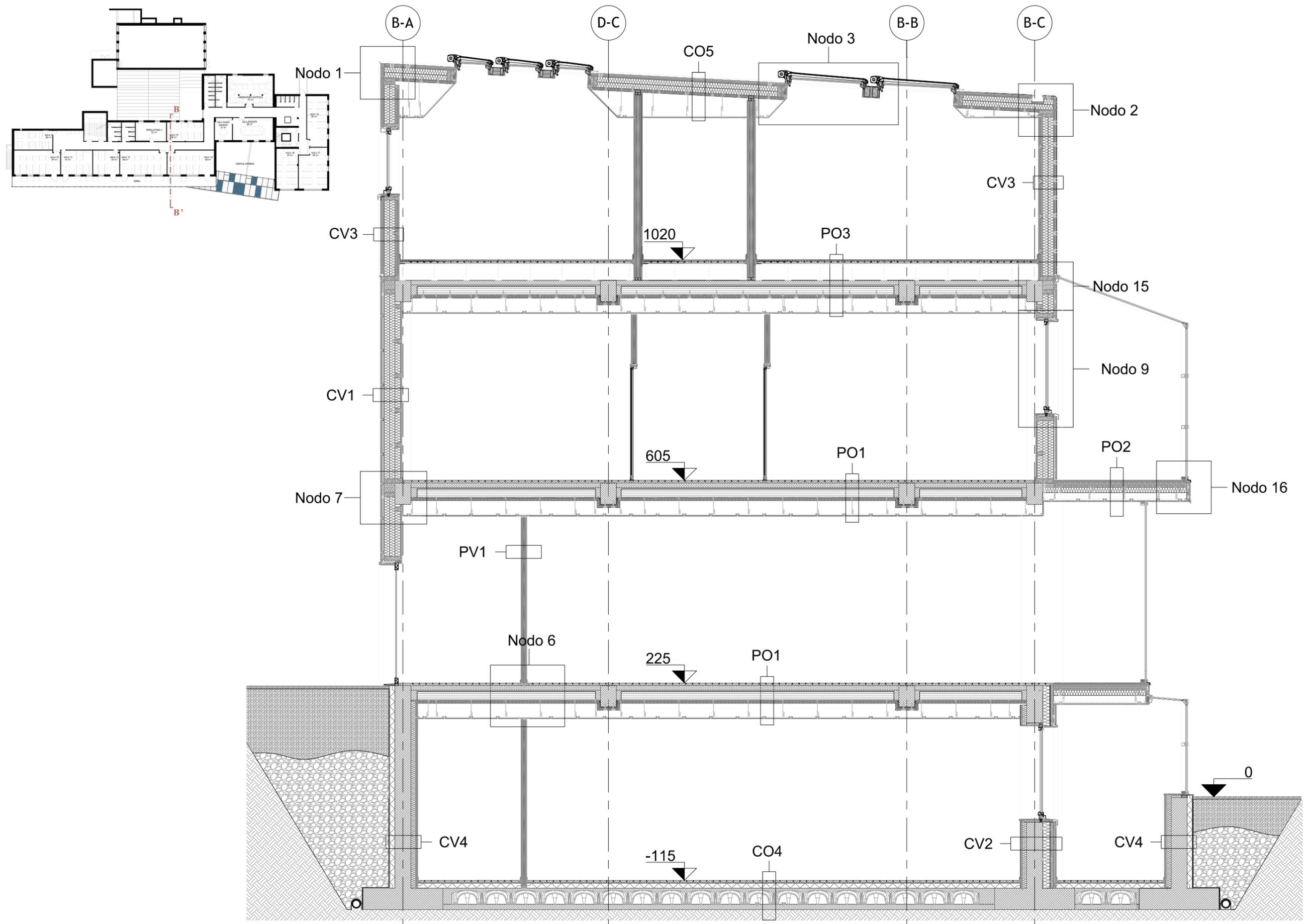
# D. PIANTE E SEZIONI TECNOLOGICHE

## 1. SEZIONE AA'



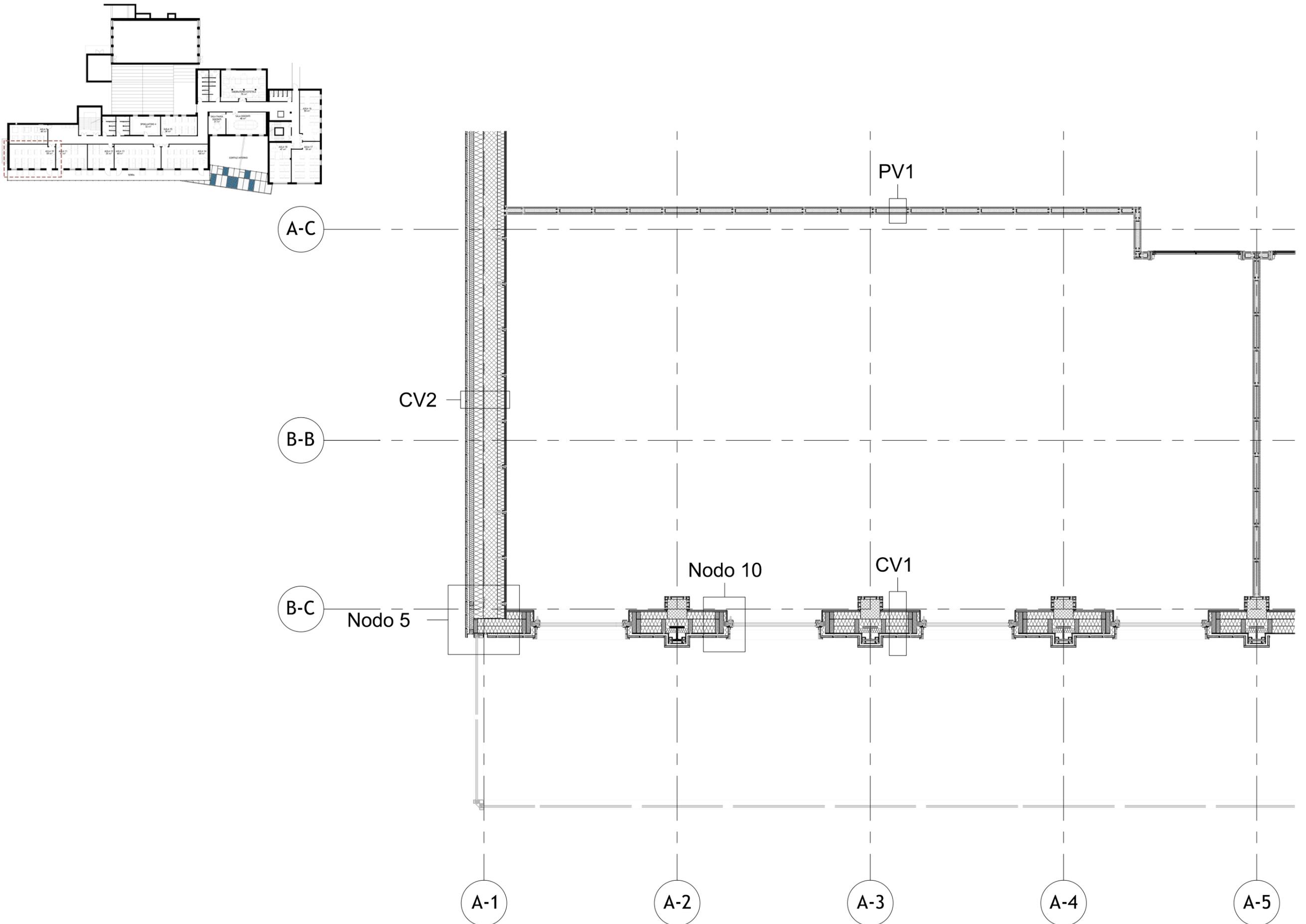


2. SEZIONE BB'



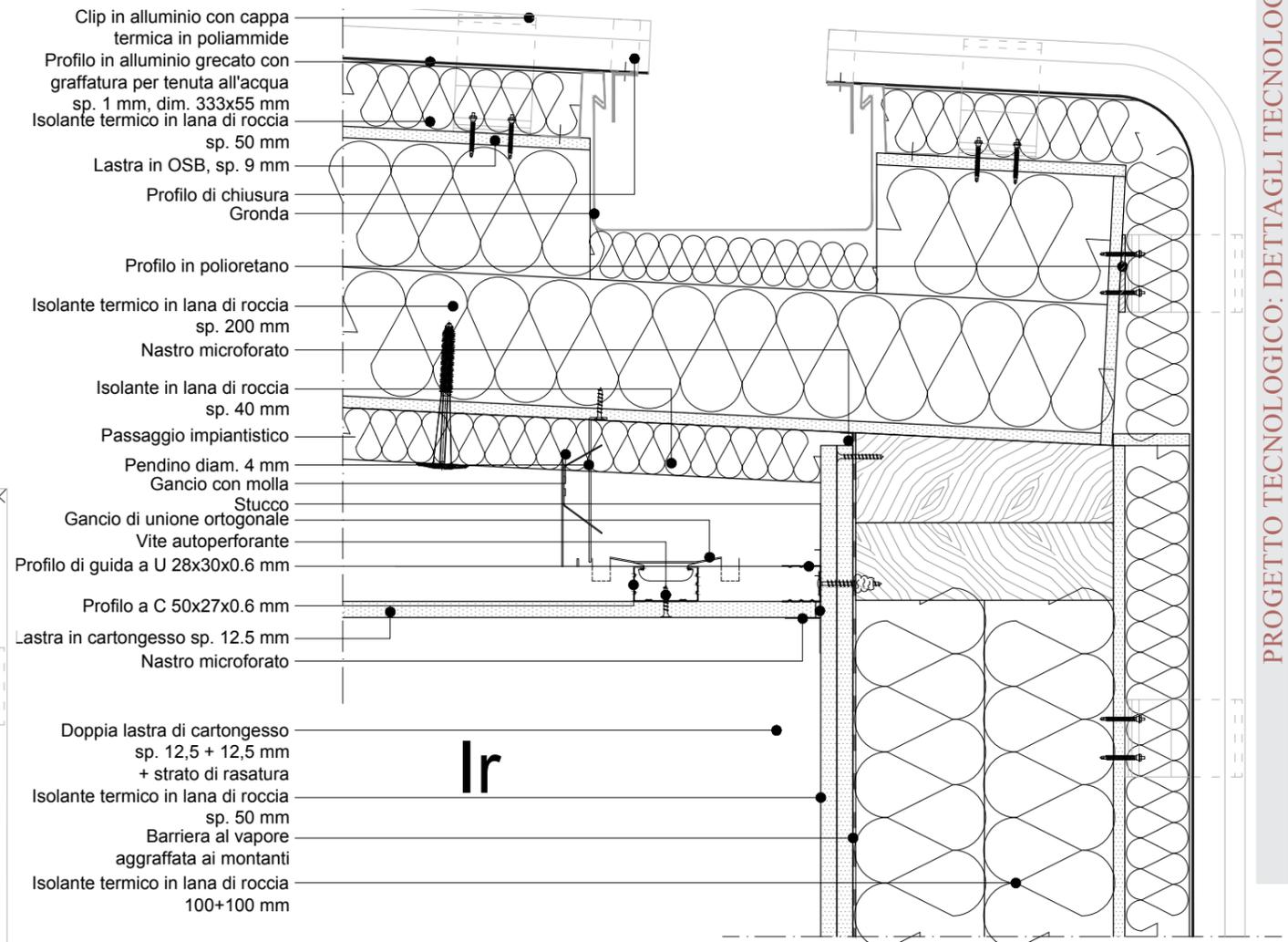
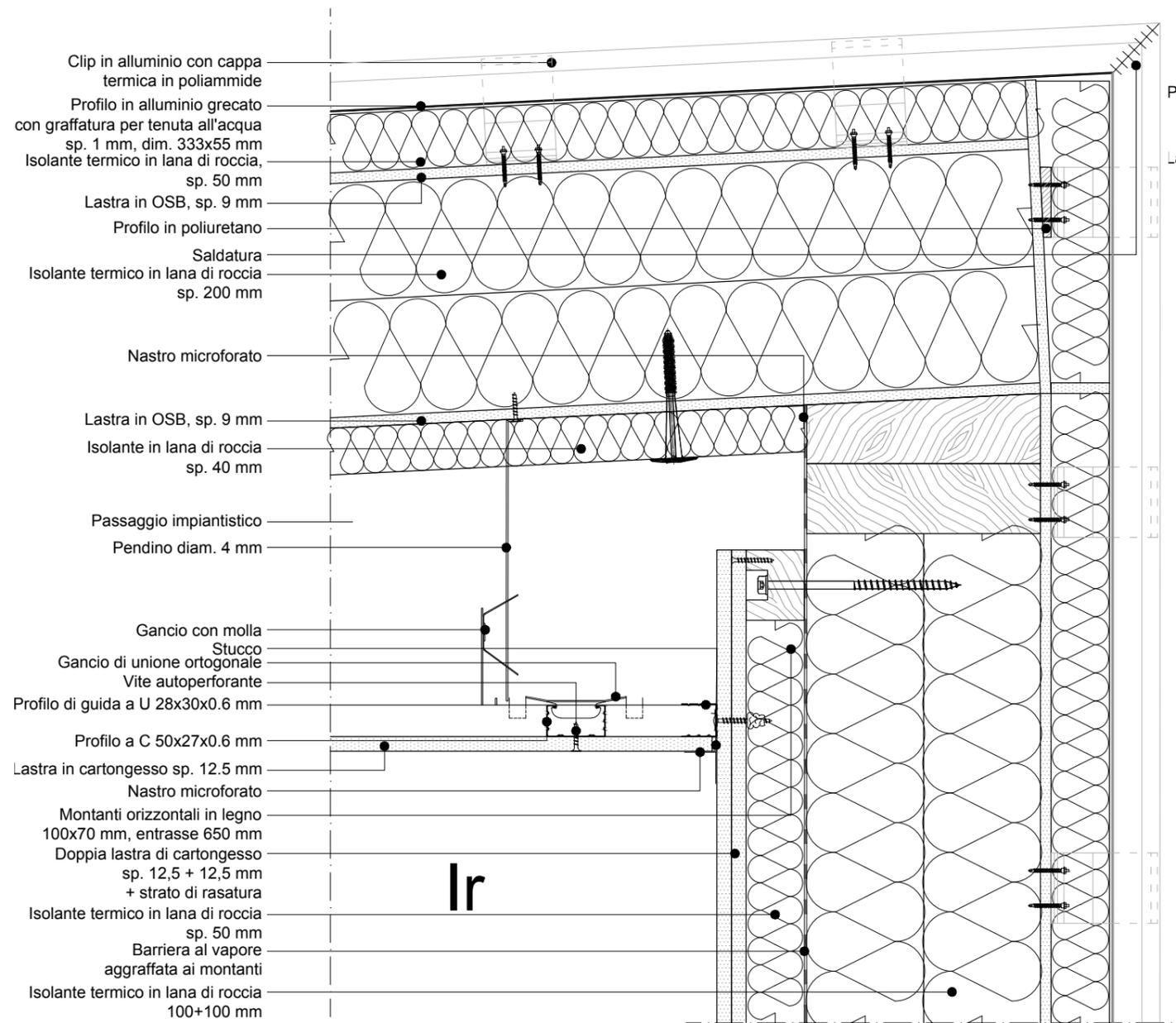


### 3. PIANTA TIPICA AULA



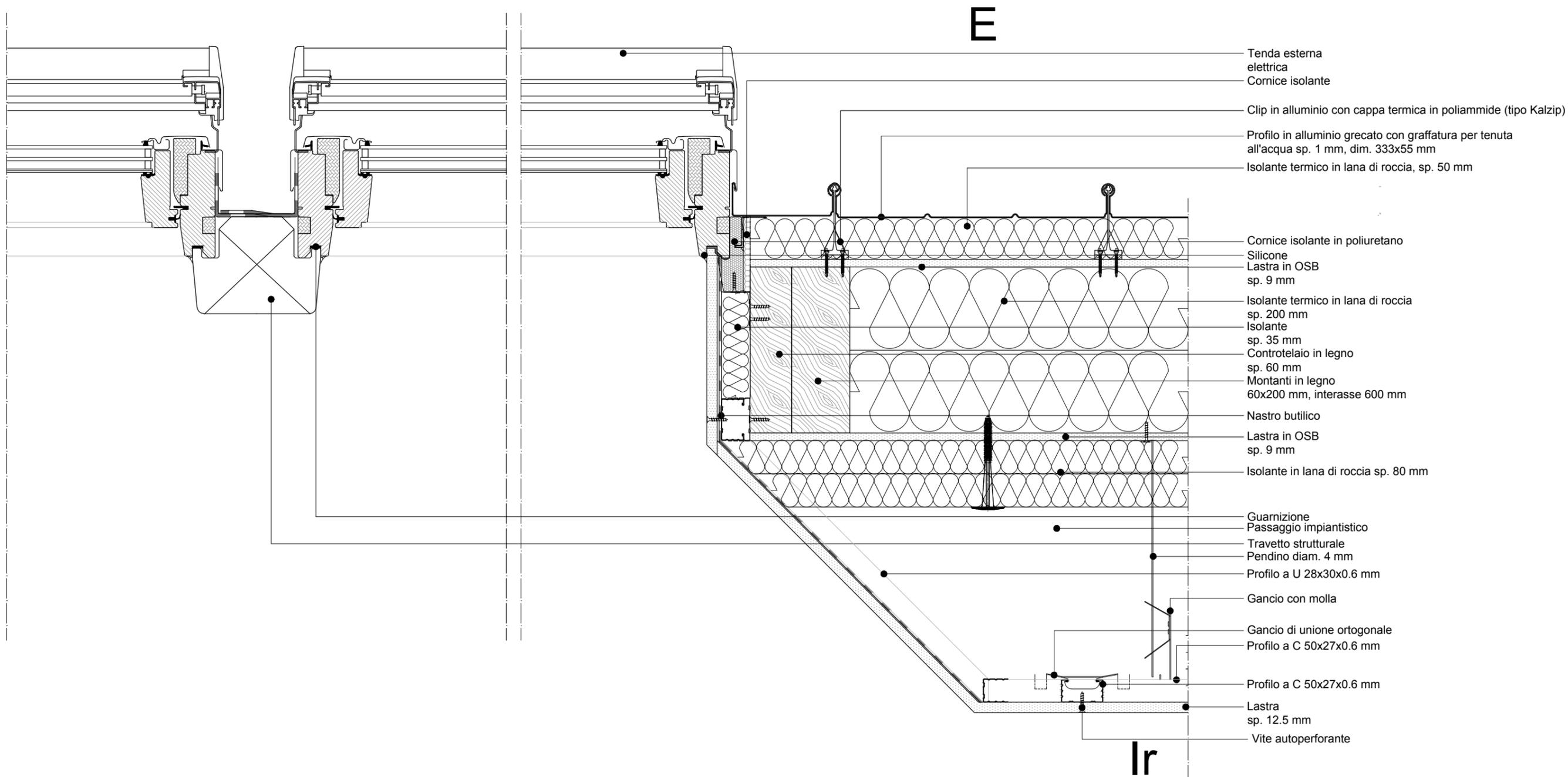


## NODO 1



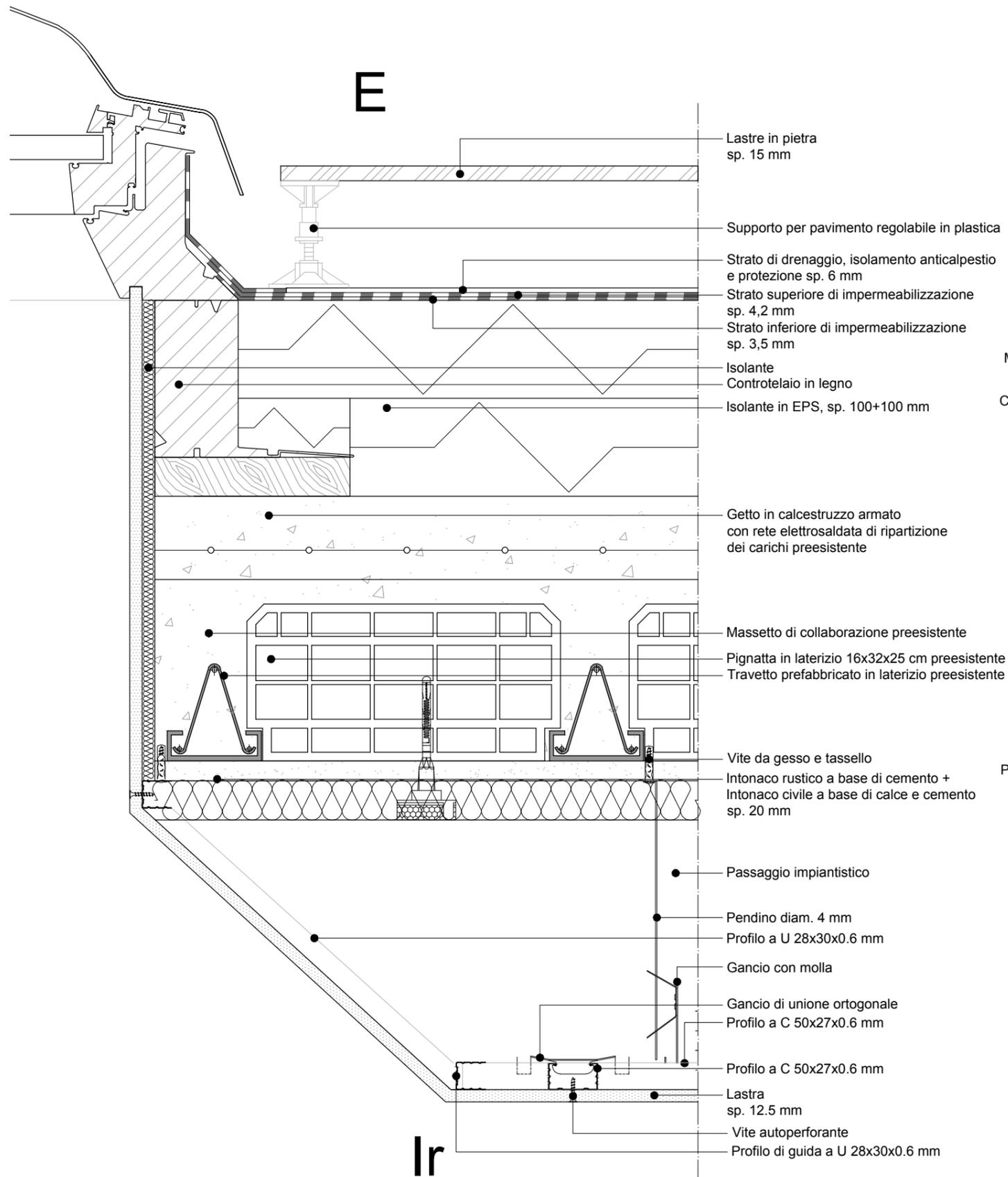
## NODO 2



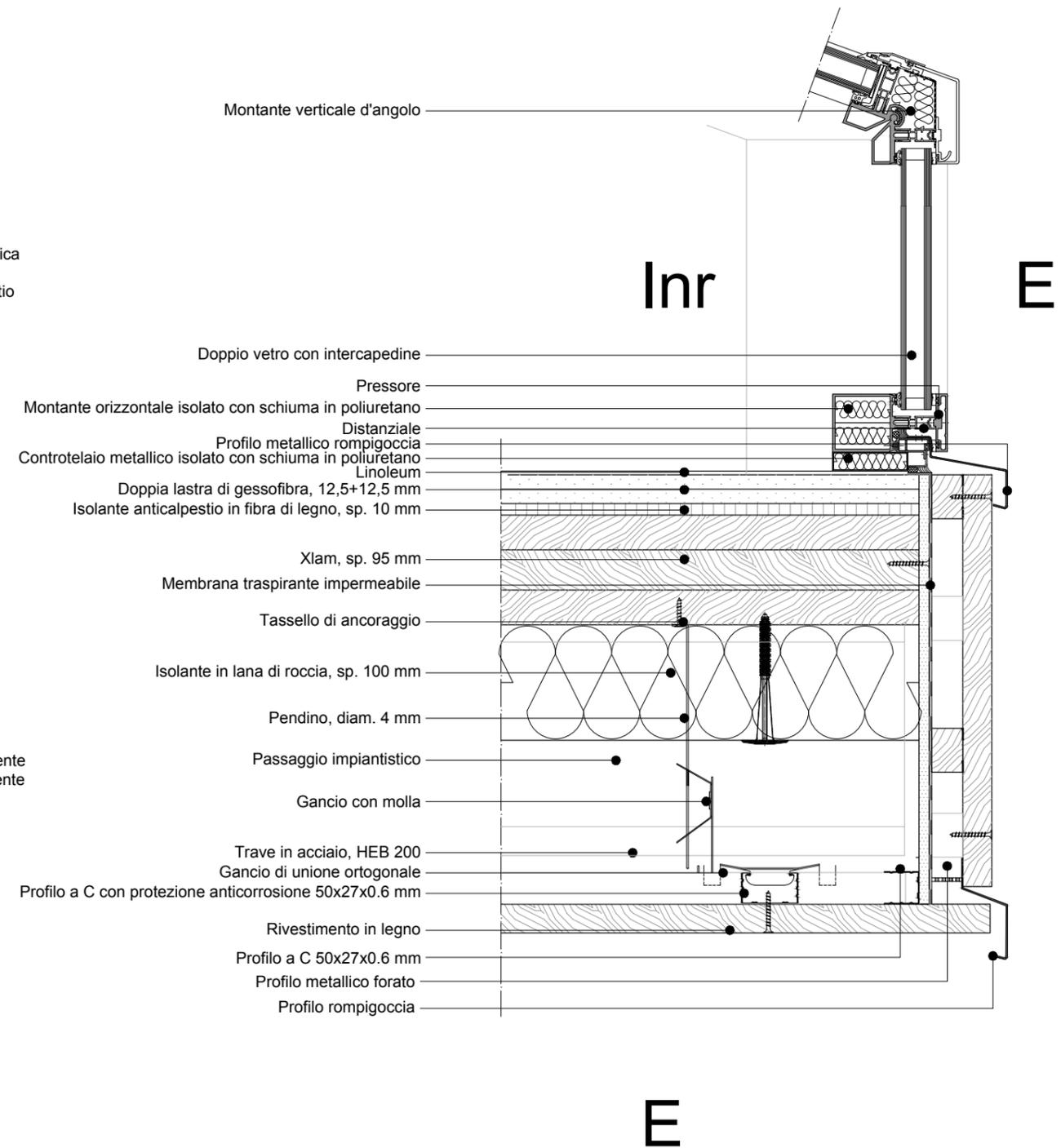




# NODO 4

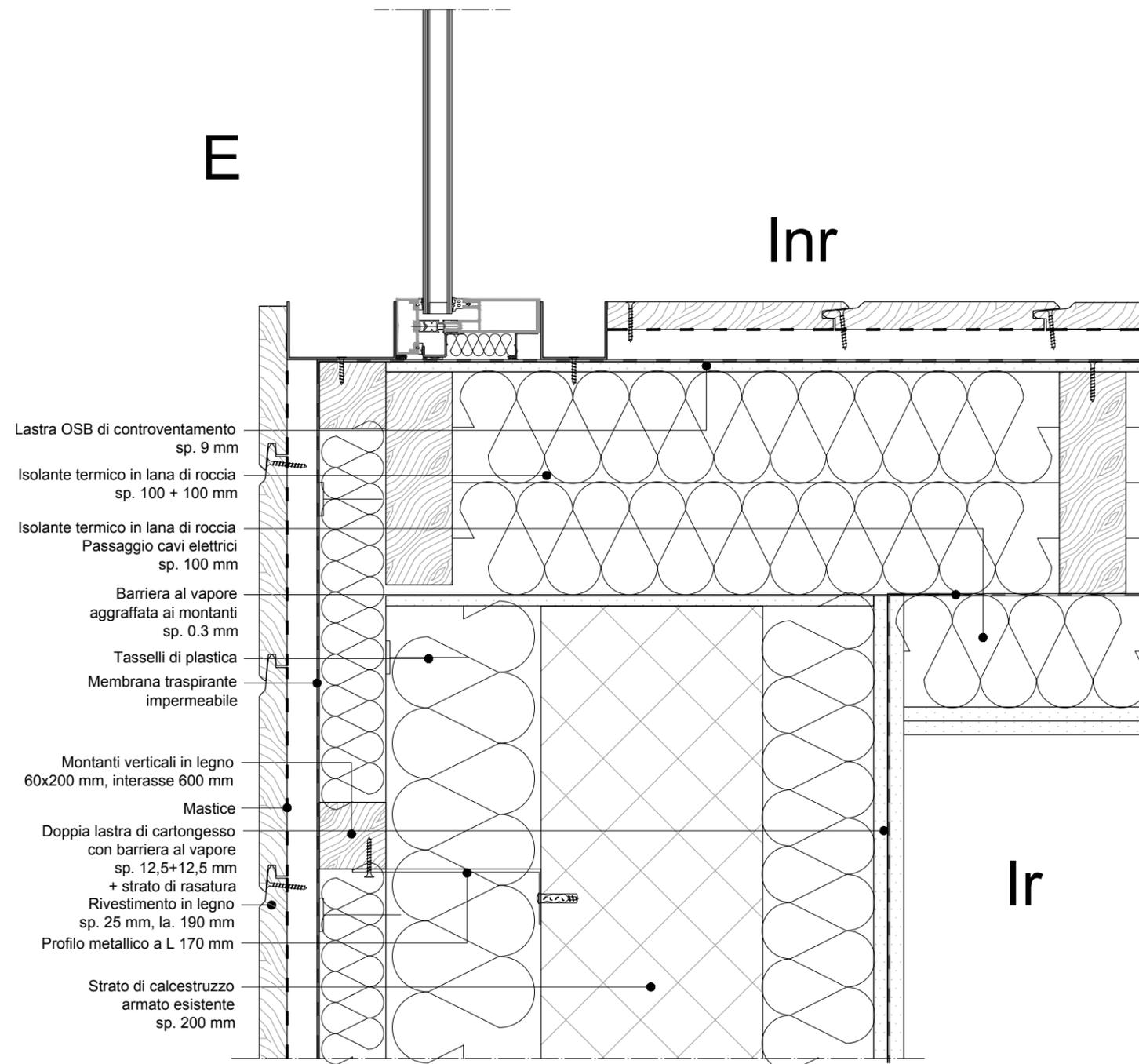


# NODO 16

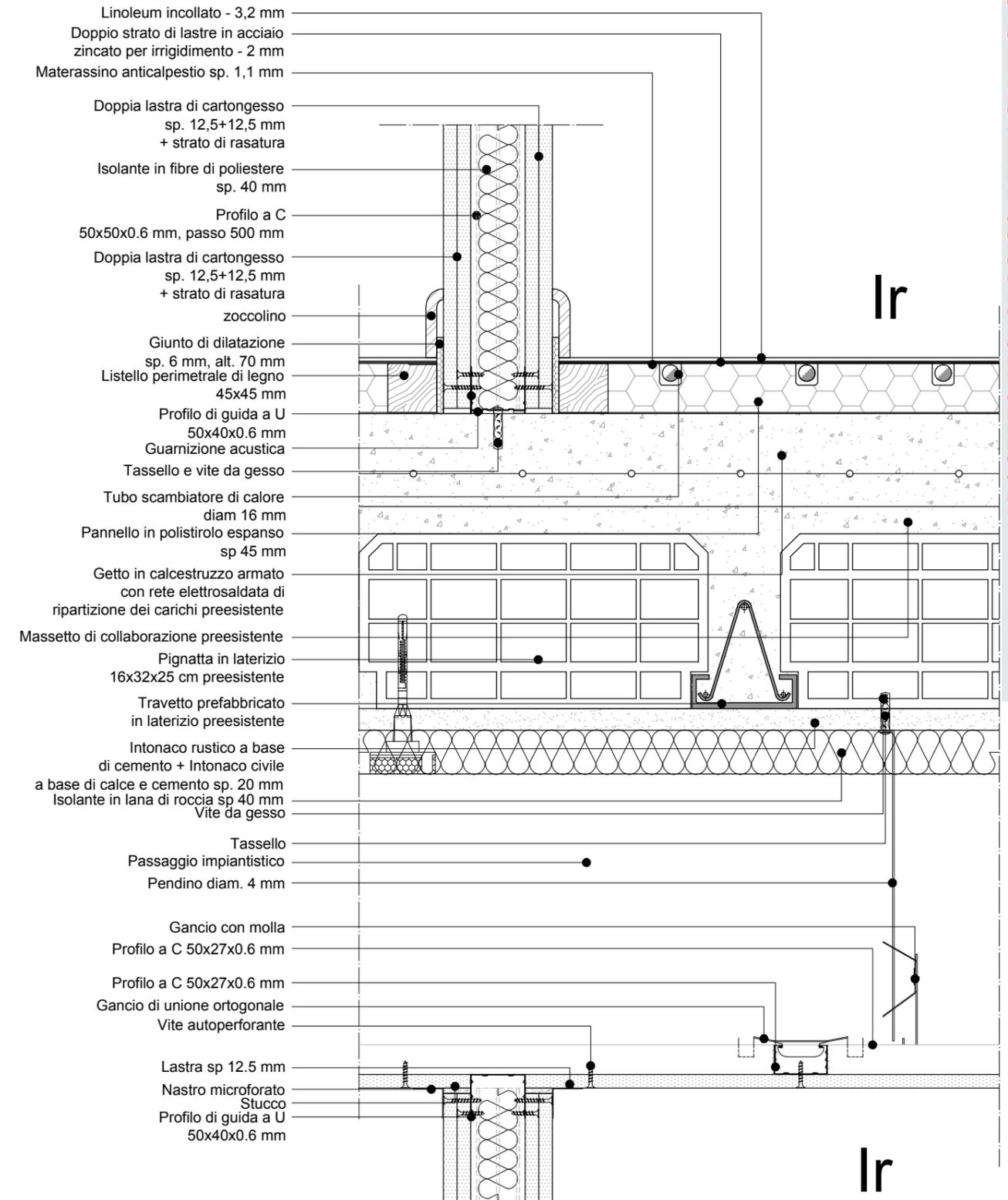




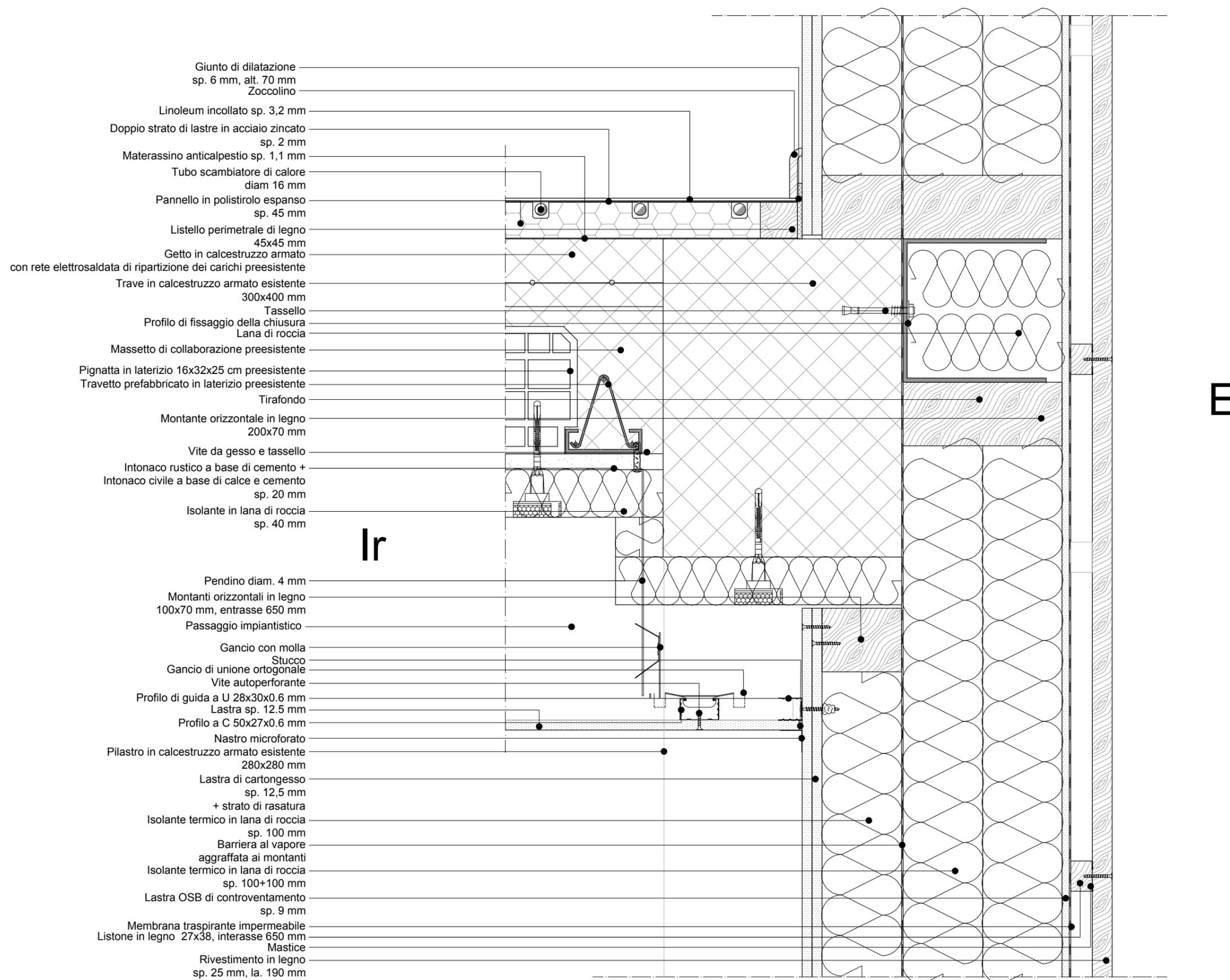
# NODO 5



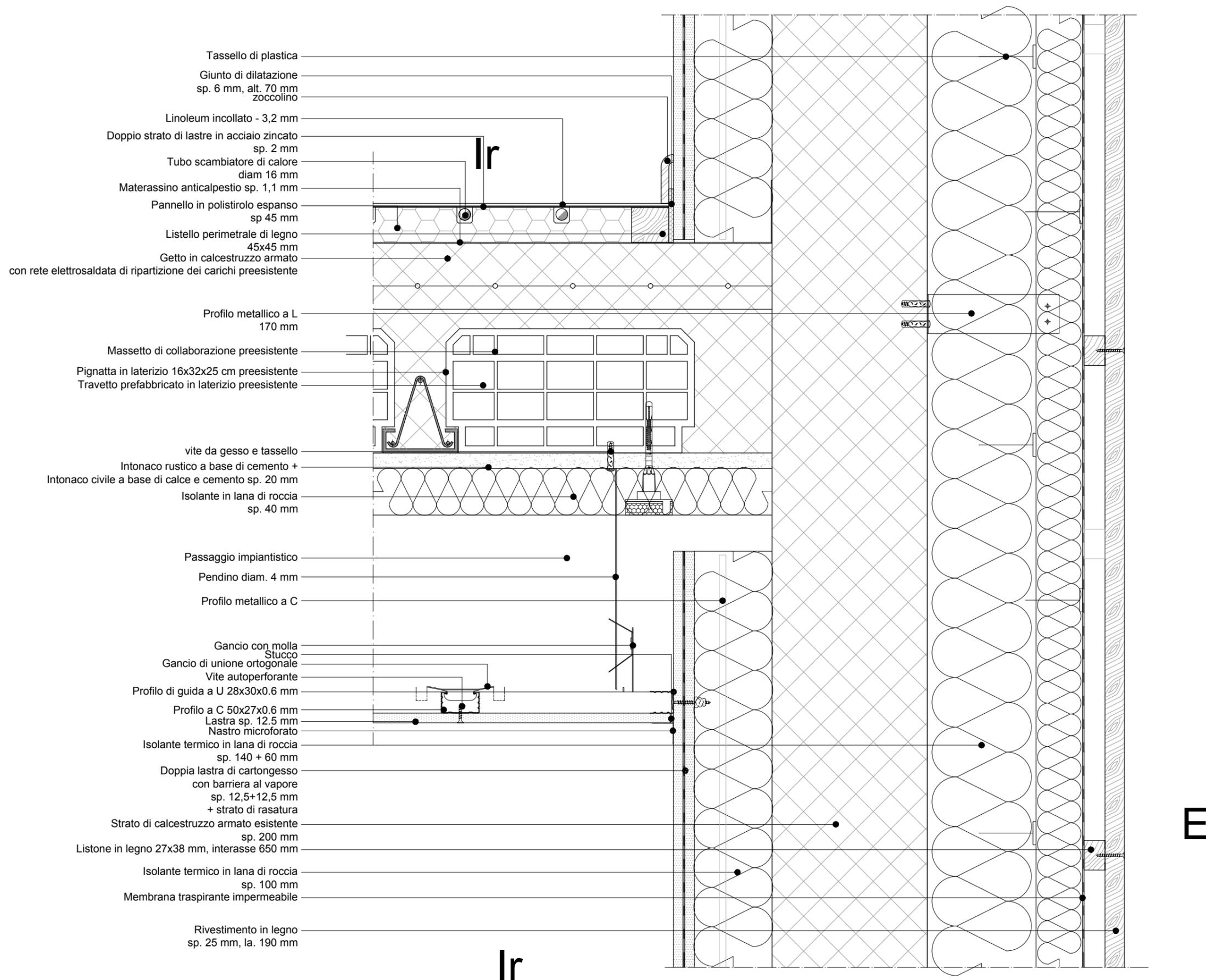
# NODO 6





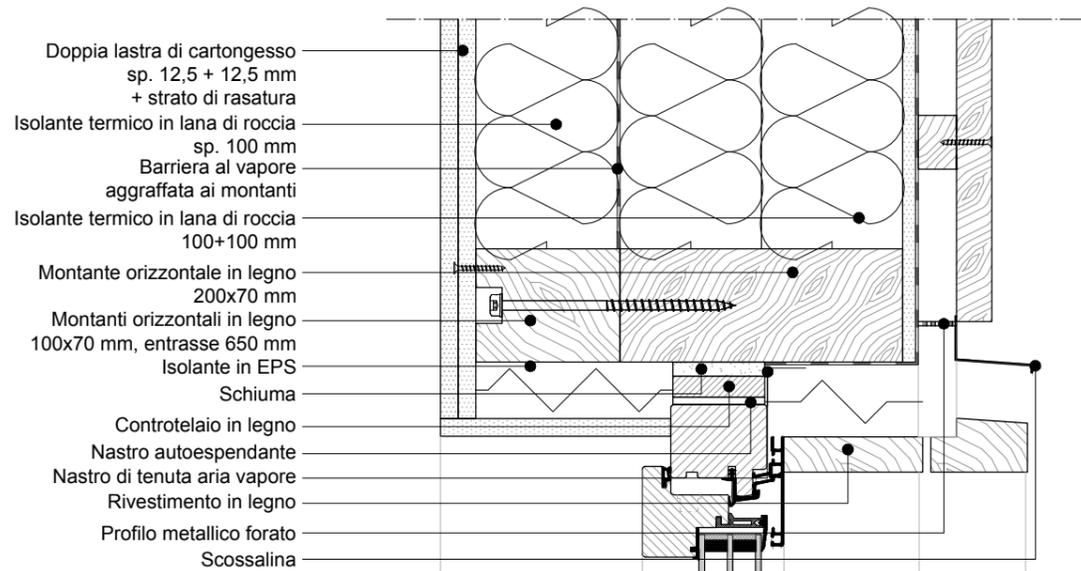




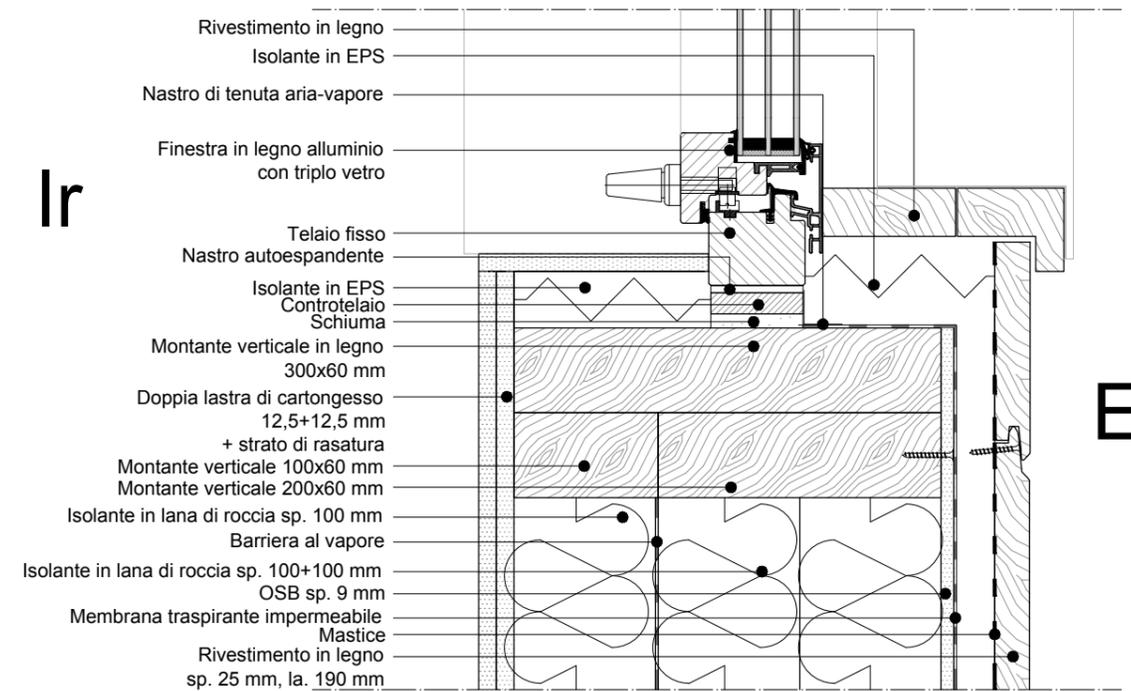




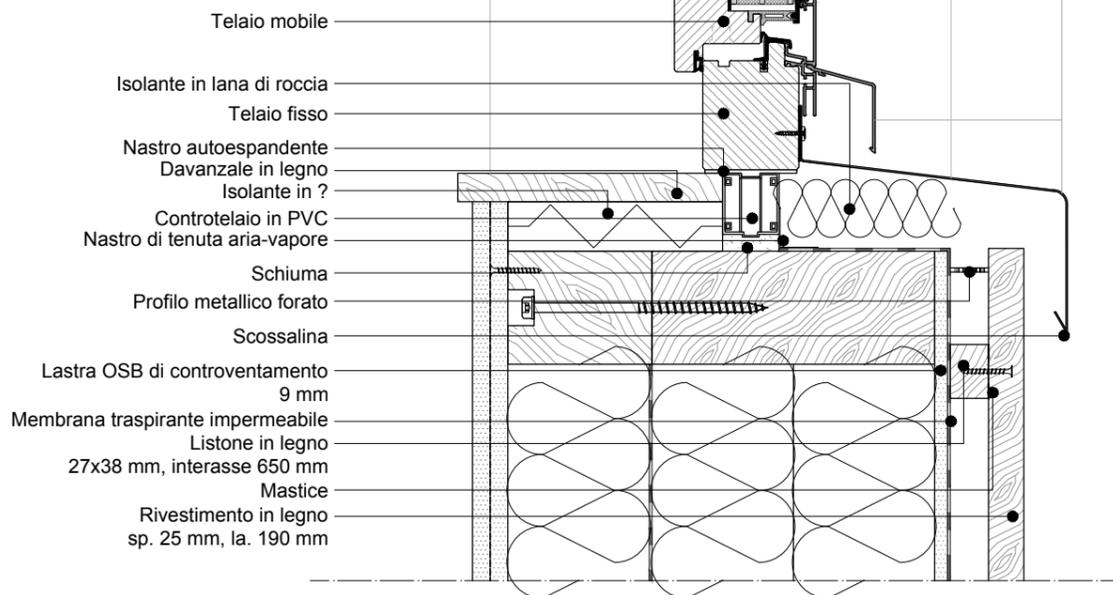
# NODO 9



# NODO 10



Ir

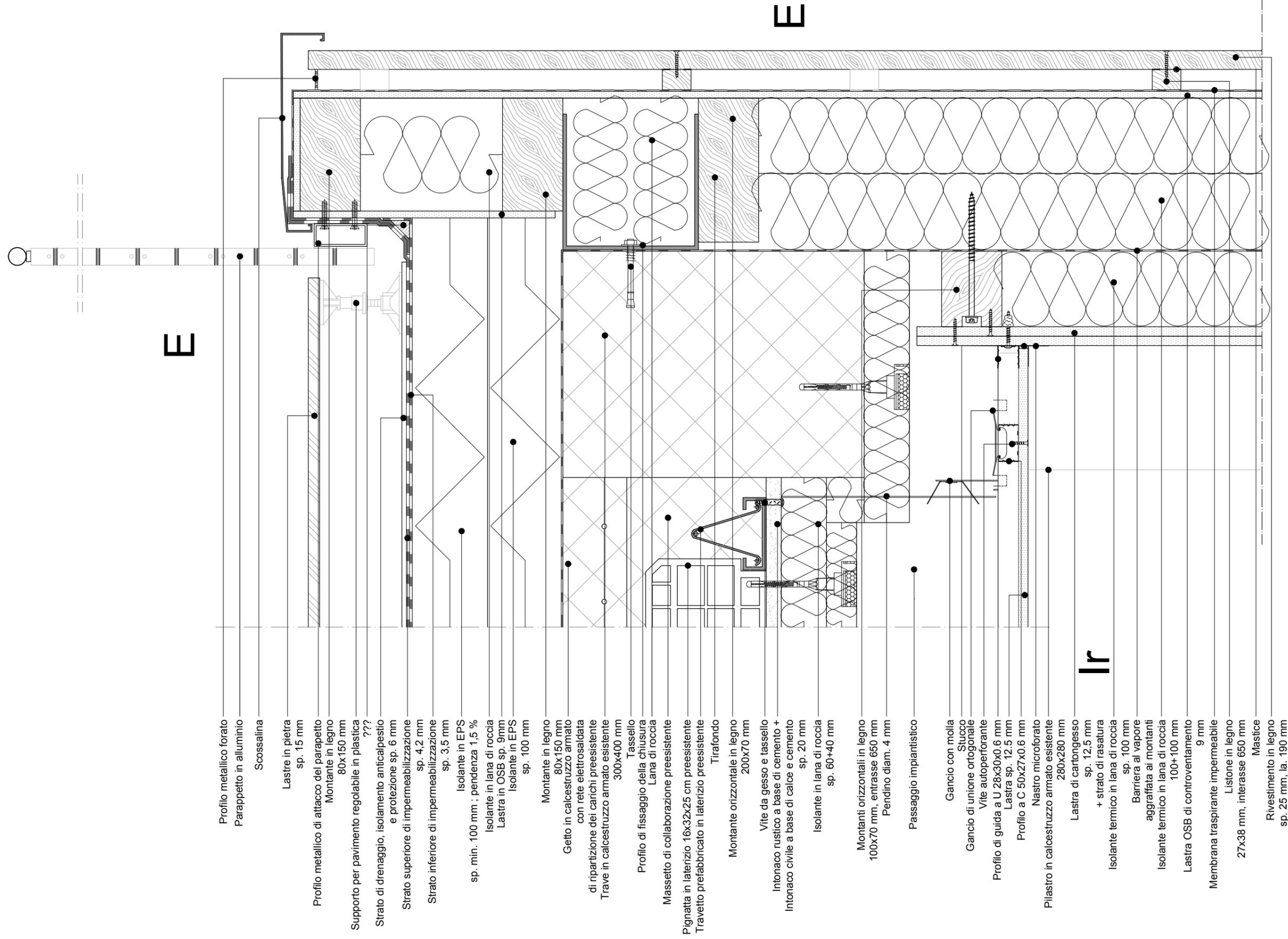


E

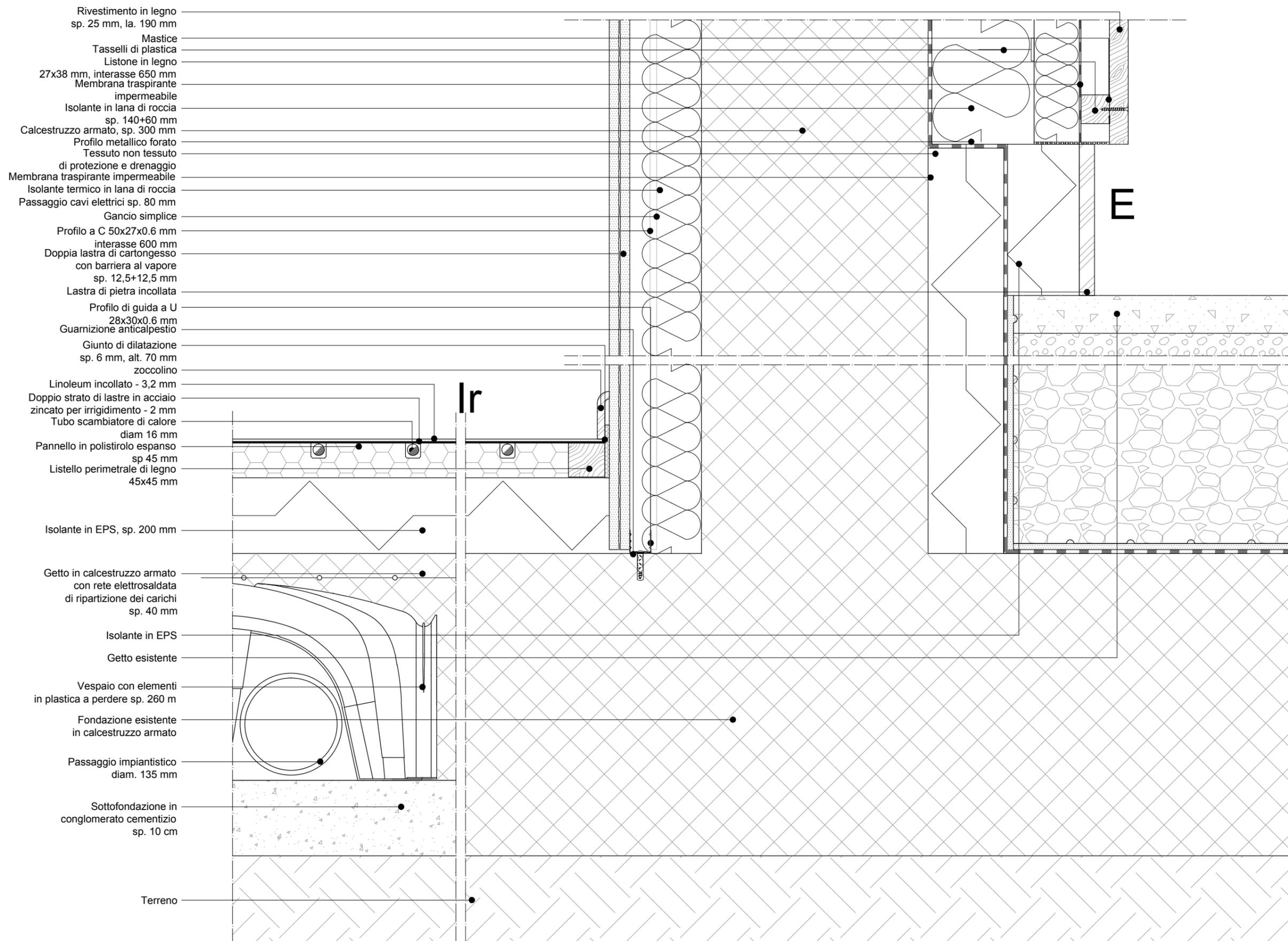
Ir

E

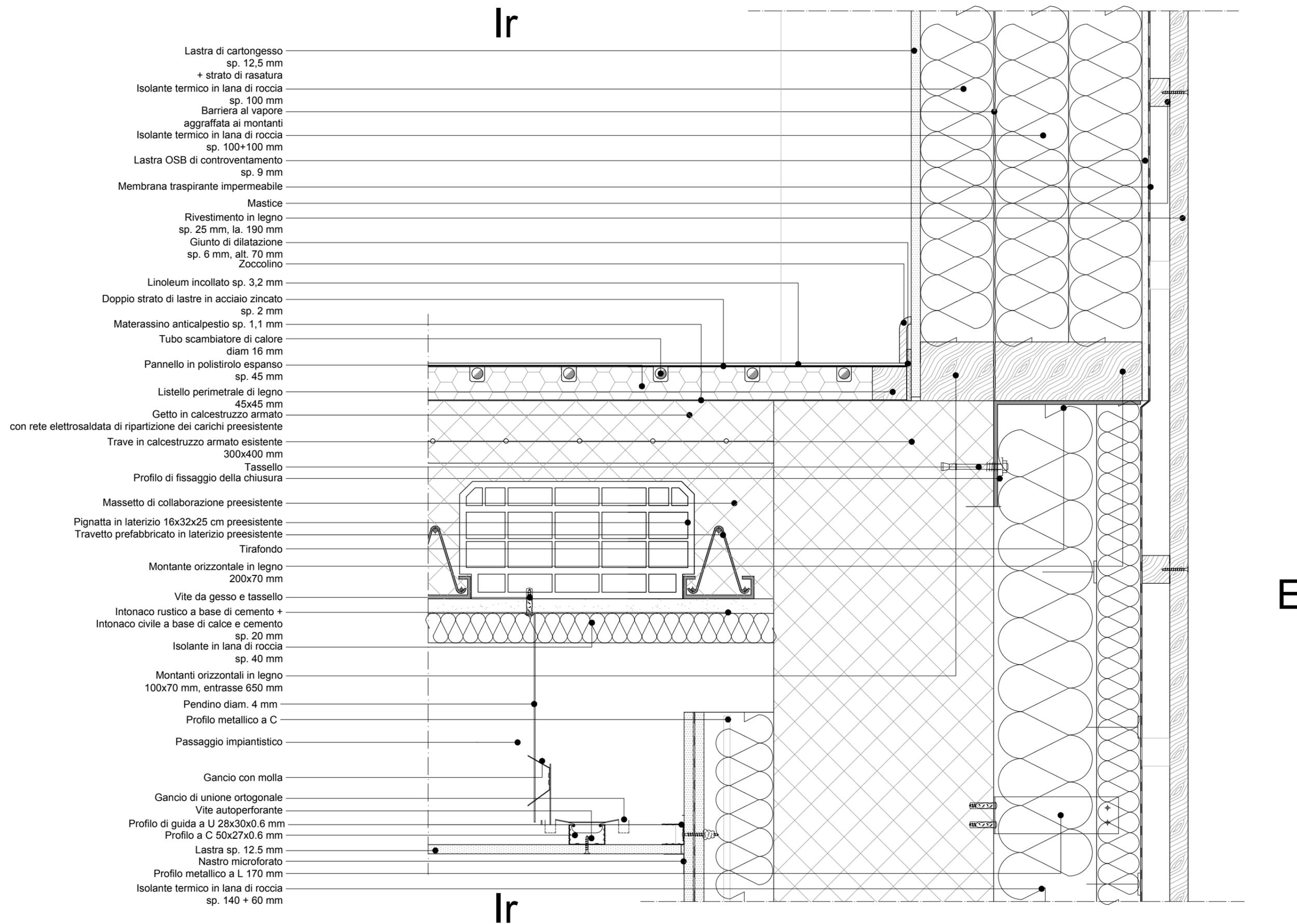




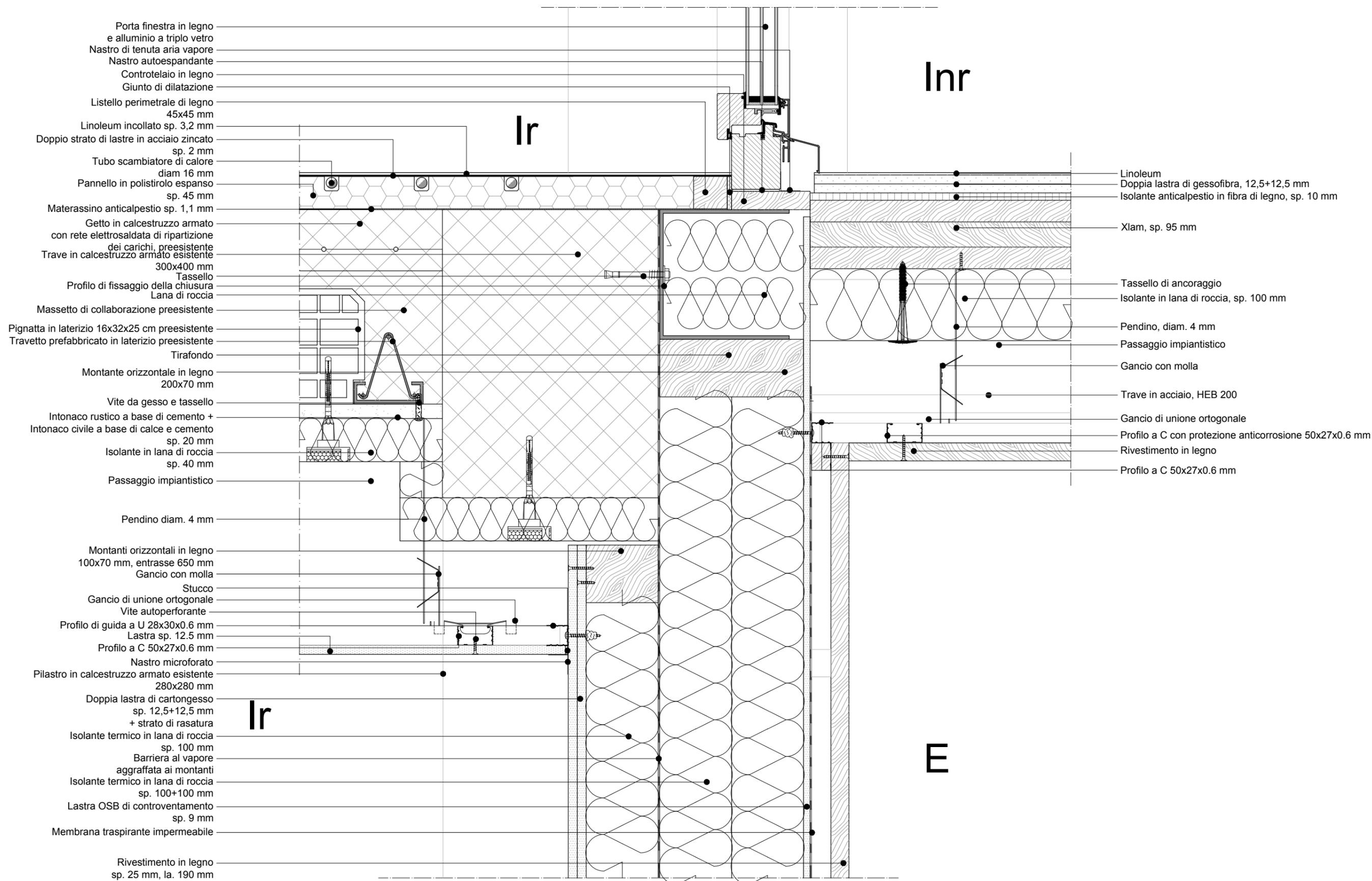




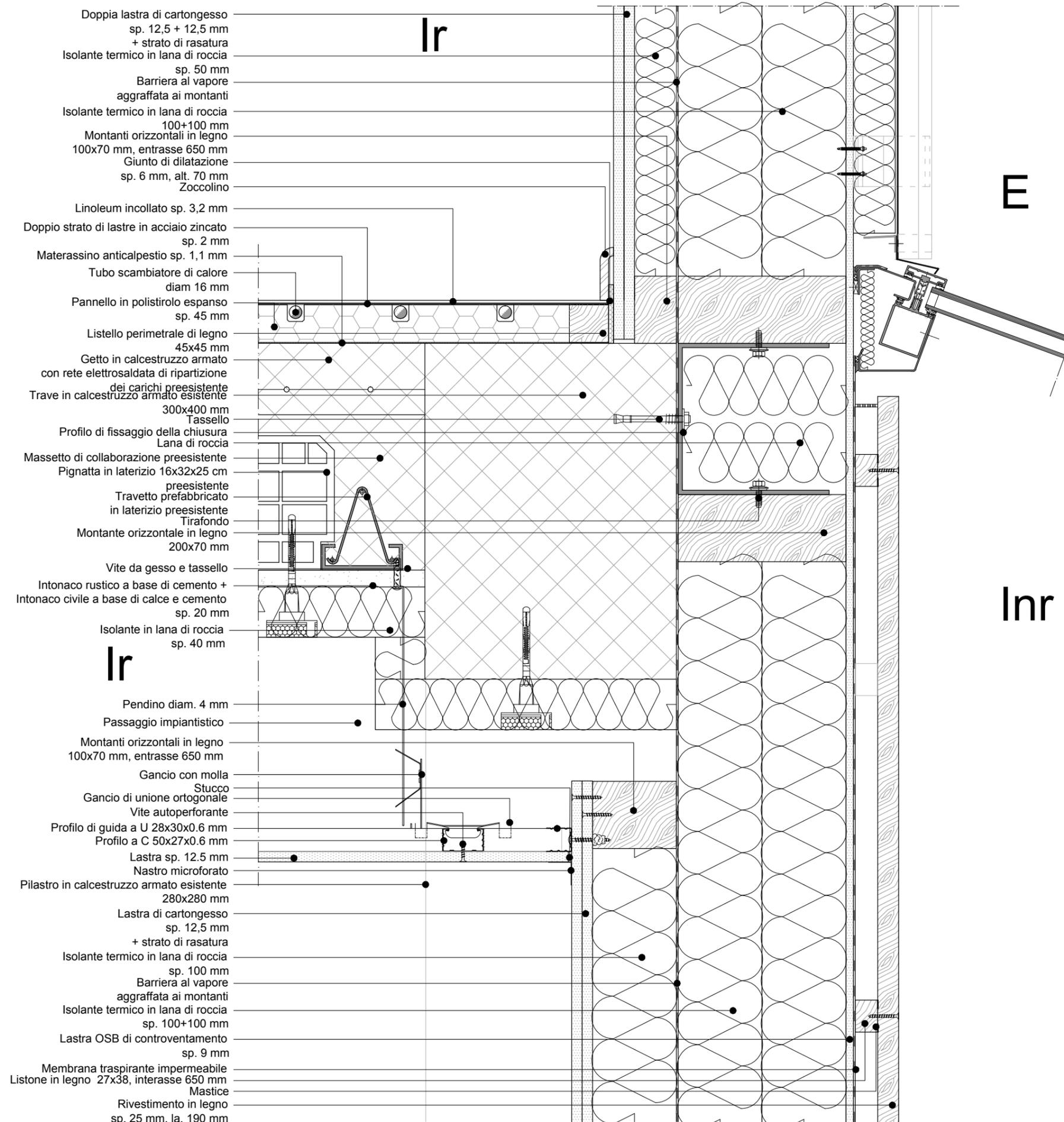




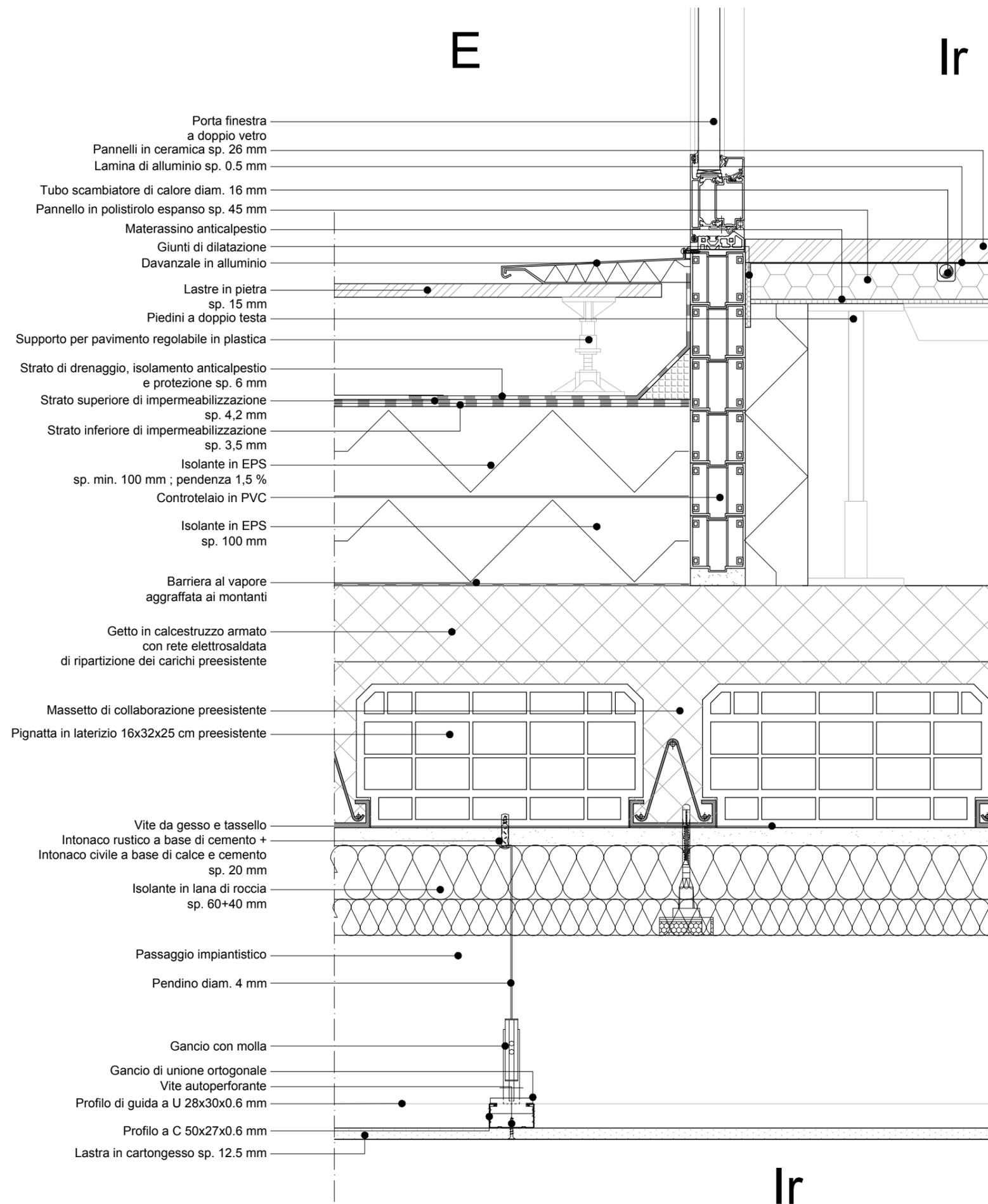




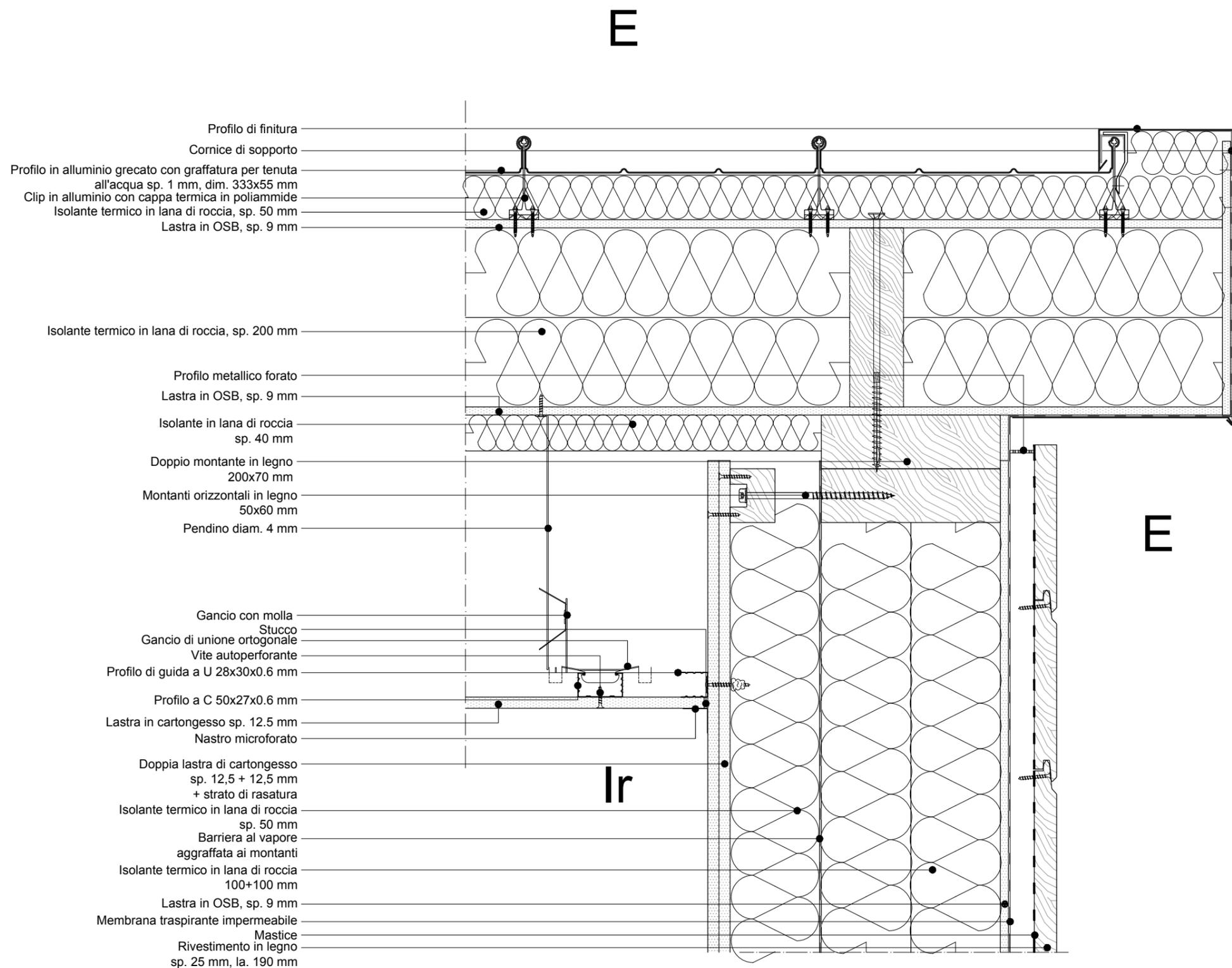














## F. BUDGET

Il budget del progetto è stato elaborato grazie ai valori di costo dei sistemi costruttivi che ci ha fornito un imprenditore del settore della costruzione.

Abbiamo realizzato una ripartizione dei costi secondo gli obiettivi dell'intervento:

- La messa in conformità ai requisiti antincendio
- L'involucro (isolamento, impermeabilizzazione, ventilazione ed i rivestimenti)

- La distribuzione degli spazi interni
- Il modulo
- Le serre
- La terrazza del tetto
- L'impianto (che comprende il riscaldamento, la ventilazione, i servizi igienici, l'elettricità, la produzione locale di energia)

TIPOLOGIA	DESCRIZIONE	PREZZO UNITARIO	UNITA	QUANTITÀ	TOTALE
<b>ANTINCENDIO</b>					
Opere in calcestruzzo armato	pianerottolo	150	€/m <sup>2</sup>	37	5 616 €
Opere in calcestruzzo armato	rampa	3000	€/u	6	18 000 €
Serramenti	Porta interna REI 120	800	€/u	12	9 600 €
Serramenti	Porta interna 120 cm	800	€/u	26	20 800 €
Serramenti	Porta di sicurezza	1000	€/u	2	2 000 €
Demolizioni	Taglio calcestruzzo armato	150	€/ml	43	6 435 €
Demolizioni	Evacuazione scala	2000	€/u	8	16 000 €
<b>TOTALE</b>					<b>78 451 €</b>

<b>INVOLUCRO</b>					
Demolizioni	Chiusura verticale non portante	20	€/m <sup>2</sup>	1192	23 841 €
Demolizioni	Solaio contro terra	50	€/m <sup>2</sup>	970	48 500 €
Movimenti terra	scavo e riempimento	10	€/m <sup>3</sup>	619	6 192 €
Opere in calcestruzzo armato	cassaforma (muri)	50	€/m <sup>2</sup>	185	9 250 €
Opere in calcestruzzo armato	cassaforma (solai)	20	€/m <sup>2</sup>	970	19 400 €
Parete	Zoccolino	10	€/ml	1882	18 824 €
Parete	Acroterio	150	€/m <sup>2</sup>	25	3 709 €
Parete	Isolamento + drenaggio	70	€/m <sup>2</sup>	817	57 173 €
Parete	Isolamento + rivestimento interno	23	€/m <sup>2</sup>	2209	50 800 €
Parete	Isolamento + rivestimento esterno in legno	120	€/m <sup>2</sup>	1297	155 596 €
Parete	Isolamento + sotto struttura in legno	85	€/m <sup>2</sup>	1192	101 323 €
Parete	Isolamento + rivestimento in legno con sotto struttura per fissaggio su CA	160	€/m <sup>2</sup>	200	31 984 €
Profili metallici	Scossalina tetto	35	€/ml	164	5 890 €
Profili metallici	Scossalina serramenti	150	€/m <sup>2</sup>	25	3 754 €
Serramenti	doppio vetro	350	€/m <sup>2</sup>	1409	493 186 €
Serramenti	Finestra tetto	500	€/m <sup>2</sup>	23	11 520 €
Serramenti	Porta ingresso	2500	€/u	7	17 500 €
Serramenti	Porta finestra		€/u	7	2 450 €

Serramenti	Triplo vetro	500	€/m <sup>2</sup>	195	97 440 €
Serramenti	Tende	80	€/m <sup>2</sup>	76	6 080 €
Solaio	Contro terra: Isolamento + calcestruzzo di ripartizione dei carichi	120	€/m <sup>2</sup>	970	116 400 €
Solaio	Isolamento + sotto soffitto	25	€/m <sup>2</sup>	2995	74 883 €
Solaio	Igloo	50	€/m <sup>2</sup>	970	48 500 €
Solaio	Linoleum	25	€/m <sup>2</sup>	3331	83 268 €

**TOTALE 1 072 289 €**

#### DISTRIBUZIONE DEGLI SPAZI INTERNI

Demolizioni	Parete verticale non portante	80	€/m <sup>2</sup>	2974	237 920 €
Parete	Partizioni interni	80	€/m <sup>2</sup>	1695	135 583 €
Serramenti	Porta interna 90 cm	400	€/u	89	35 600 €

**TOTALE 409 103 €**

#### MODULO

Parete	Isolamento + rivestimento interno	23	€/m <sup>2</sup>	179	4 107 €
Parete	Isolamento + rivestimento esterno in legno	120	€/m <sup>2</sup>	95	11 436 €
Parete	Isolamento + rivestimento esterno metallico	80	€/m <sup>2</sup>	379	30 314 €
Parete	Isolamento + sotto struttura in legno	85	€/m <sup>2</sup>	475	40 338 €
Profili metallici	Scossalina tetto	35	€/ml	192	6 709 €
Profili metallici	Scossalina serramenti	150	€/m <sup>2</sup>	9	1 315 €
Serramenti	Finestra tetto	500	€/m <sup>2</sup>	76	37 825 €
Serramenti	Tende	80	€/m <sup>2</sup>	76	6 080 €
Solaio	Isolamento + sotto soffitto	25	€/m <sup>2</sup>	200	5 000 €
Solaio	Linoleum	25	€/m <sup>2</sup>	276	6 900 €

**TOTALE 150 024 €**

#### SERRE

Movimenti terra	di cui evacuazione	80	€/m <sup>3</sup>	747	59 728 €
Opere in calcestruzzo armato	acciaio per fondazioni	2.5	€/kg	10141	25 354 €
Opere in calcestruzzo armato	calcestruzzo per fondazioni	100	€/m <sup>3</sup>	169	16 902 €
Serramenti	doppio vetro	350	€/m <sup>2</sup>	1332	466 200 €
Serramenti	Tende	80	€/m <sup>2</sup>	1243	99 480 €
Profili metallici	Scossalina serramenti	150	€/m <sup>2</sup>	18	2 698 €
Solaio	X-Lam	100	€/m <sup>2</sup>	333	33 270 €
Struttura	acciaio	2	€/kg	37589	93 972 €
Struttura	Acciaio in vista	2.5	€/kg	1550	4 845 €

**TOTALE 802 449 €**

#### TERRAZZA TETTO

Demolizioni	Tetto	50	€/m <sup>2</sup>	426	21 313 €
Ferramenta	Parapetto	250	€/ml	118	29 485 €
Solaio	Rivestimento sopraelevato tetto	50	€/m <sup>2</sup>	383	19 161 €

Solaio	Ritenzione d'acqua + filtraggio + inverdimento intensivo	50	€/m <sup>2</sup>	43	2 153 €
<b>TOTALE</b>					<b>72 111 €</b>
<b>PICCOLE OPERE VARI</b>					<b>50 000 €</b>
<b>TOTALE</b>	<b>3 652 248 €</b>				<b>1 146 €/m<sup>2</sup></b>



# X. PROGETTO STRUTTURALE

<b>A. PREMESSA</b> .....	381
<b>B. STRUTTURA ESISTENTE</b> .....	382
1. Analisi dei carichi esistenti.....	382
a) Carichi permanenti.....	382
b) Carichi variabili.....	382
2. Analisi dei carichi nuovi.....	387
a) Carichi permanenti.....	387
b) Carichi variabili.....	387
3. Paragone ai diversi piani.....	388
<b>C. DIMENSIONAMENTO XLAM</b> .....	389
<b>D. STRUTTURA IN ACCIAIO</b> .....	390
1. Generalità.....	390
2. Dimensionamento delle trave.....	390
a) Formulario delle sollecitazioni presente nel progetto.....	390
b) Trave $T_1$ , Elemento inflesso.....	392
c) Trave $T_2$ , Elemento inflesso.....	394
d) Trave $T_3$ , Elemento inflesso.....	396
e) Trave $T_4$ , Elemento inflesso.....	398
f) TRAVE $T_5$ a C.....	400
g) Trave di collegamento $T_6$ .....	404
3. Dimensionamento dei pilastri.....	408
a) Fattore d'imperfezione in funzione della geometria della trave.....	408
b) PILASTRO $P_1$ , Elemento inflesso e compresso.....	409
c) PILASTRO $P_{2A}$ , Elemento inflesso e compresso.....	410
d) Pilastro $P_{2B}$ , Elemento compresso.....	411
e) PILASTRO $P_3$ , Elemento compresso.....	412
f) PILASTRO $P_4$ , Elemento compresso.....	413
<b>E. STRUTTURA IN LEGNO</b> .....	414
1. Caratteristiche del legno.....	414
2. Dimensionamento delle trave.....	416
a) Formulario delle sollecitazioni presente nel progetto.....	416
b) Trave $T_{L1}$ .....	417
c) Trave $T_{L2}$ .....	419
d) Trave $T_{L3}$ .....	422
e) Trave $T_{L4}$ .....	424
3. Dimensionamento del pilastro.....	426
a) Pilastro $P_{L1}$ .....	426
<b>F. PIANTA STRUTTURALE</b> .....	427
1. Fondazioni.....	427
2. Piano interrato.....	429
3. Piano Terra.....	431

4. Primo piano.....	433
5. Secondo piano.....	435
<b>G. SEZIONI STRUTTURALE.....</b>	<b>437</b>
1. Sezioni AA' e BB'.....	437
<b>H. 3D STRUTTURALE.....</b>	<b>439</b>
<b>I. PIANTA STRUTTURALE G/R.....</b>	<b>441</b>
1. Fondazioni.....	441
2. Piano interrato.....	443
3. Piano Terra.....	445
4. Primo piano.....	447
5. Secondo piano.....	449
<b>J. SEZIONI STRUTTURALE G/R.....</b>	<b>451</b>
1. Sezioni AA' e BB'.....	451
<b>K. 3D STRUTTURALE G/R.....</b>	<b>453</b>

## A. PREMESSA

La scelta strutturale principale era quella di toccare il meno possibile la struttura esistente in calcestruzzo armato. Quest'ultima essendo poco conosciuta, sarebbe diventato necessario di studiare prima come fosse stata calcolata la struttura usando le norme in vigore quando l'edificio è stato costruito e poi ridimensionare il nostro progetto con le norme attuale.

Per poter schivare questo lavoro fastidioso, abbiamo scelto di verificare che il nuovi carichi che aggiungiamo sulla struttura esistente in CA non sono superiore a quelli che sono. Poi abbiamo deciso di usare una struttura in acciaio per sopportare i spazi che aggiungiamo sulla facciata sud e anche per sopportare una trave, a cui abbiamo tolto il pilastro. Finalmente il modulo che aggiungiamo sul tetto del edificio esistente sarà in legno per essere il più leggero possibile.

## B. STRUTTURA ESISTENTE

### 1. ANALISI DEI CARICHI ESISTENTI

#### a) Carichi permanenti

Il peso proprio della struttura portante e tutti i carichi non strutturali che sono sempre presenti (rivestimento, isolante...) sono presi in conto per il calcolo dei carichi permanenti.

Numero	Nome	Spessore (mm)	Peso lineare (kN/m)
CV1	Facciata del corpo centrale in mattoni	440	17.97
CV2	Facciata del corpo centrale in pietra	520	41.42
CV3	Facciata del corpo est in mattoni	360	13.19
CV4	Facciata del corpo est in pietra	440	36.63
CV5	Muro contro terra del corpo est	520	25.95
CV6	Muro contro terra del corpo centrale	720	36.83
CV7	Muro dellr scale	340	31.388
PV1	Parete interna	100	4.54

figura X.383: Chiusure e Partizione Verticali

Numero	Nome	Spessore (mm)	Carichi Permanenti Strutturali (kN/m <sup>2</sup> )	Carichi Permanenti Non Strutturali (kN/m <sup>2</sup> )	Carichi Permanenti Totali (kN/m <sup>2</sup> )
CO1	Solaio contro-terra	220	5	0.4	5.4
CO2	Copertura con tegole	335	5.58	2.45	8.03
PO1	Solaio interno	310	5.59	0.77	6.36

figura X.384: Chiusure e Partizione Orizzontali

#### b) Carichi variabili

##### 1) Carichi di esercizio

I carichi di esercizio sono distribuiti in tre categorie diverse secondo il tipo di esercizio:

- classe 1: abitazione, uffici, negozi;
- classe 2: tetto;
- classe 3: area di produzione.

In funzione del loro uso, le superficie degli edifici della classe 1 si dividono in 5 categorie, secondo l'eurocodice 1-2 [4.4] :

Categoria	Ambienti	$q_k$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$Q_k$ [kN]
	<b>Ambienti ad uso residenziale</b>		
A	Sono compresi in questa categoria i locali di abitazione e relativi servizi, gli alberghi (ad esclusione delle aree suscettibili di affollamento)	2.0	2.0
	<b>Uffici</b>		
B	Cat. B1 Uffici non aperti al pubblico	2.0	2.0
	Cat. B2 Uffici aperti al pubblico	3.0	2.0
	<b>Ambienti suscettibili di affollamento</b>		
	Cat. C Ospedali, ristorante, caffè, banche, scuole	3.0	4.0
	Cat. C2 Balconi, ballatoi e scale comuni, sale convegni, cinema, teatri, chiese, tribune con posti fissi	4.0	4.0
C	Cat. C3 Ambienti privi di ostacoli per il libero movimento delle persone, quali musei, sale per esposizioni, stazioni ferroviarie	5.0	4.0
	Cat. C4 Ambienti per attività fisiche: sale da ballo, palestre	5.0	7.0
	Cat. C5 Ambienti suscettibili di essere sovrappopolato: tribune libere, edifici per eventi pubblici, sale da concerto, palazzetti per lo sport e relative tribune	5.0	4.0
D	<b>Ambiente ad uso commerciale</b>	5.0	4.0
E	<b>Biblioteche, archivi, magazzini e ambienti ad uso industriale</b>	6.0	7.0

figura X.385: Carichi di esercizio, secondo l'Eurocodice 1-2 [4.4]

L'edificio del progetto è dedicato alle attività scolastiche, si trova quindi nella classe C1 per i carichi di esercizio. I carichi di esercizio sono:

$$q_k = 3 \text{ kN/m}^2$$

Per i tetti non praticabili ma accessibili per manutenzione (Categoria H):

Tipo di tettoia	$q_k$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$Q_k$ [kN]
Tetto con una falda inferiore a 15% essendo impermeabile	0.8	1.5
Altre tettoie	0	1.5

figura X.386: Tabella dei carichi di esercizio per i tetti di categoria H

Tutti i tetti hanno una pendenza quindi l'accessibilità si fa solo per la manutenzione. Di conseguenza i carichi di esercizio della copertura sono di classe H e il loro valore è:

$$q_k = 0 \text{ kN/m}^2$$

## 2) Carichi della neve

Il calcolo deve prendere in conto il fatto che la neve può essere distribuita in diverse maniere sul tetto. I fattori che influiscono su le diverse distribuzioni sono:

- la forma del tetto;
- le sue proprietà termiche;
- la rugosità della superficie;
- la quantità di calore fornita da sotto;
- la prossimità di altri edifici attorno;
- il terreno attorno al progetto;
- il clima.

Si deve calcolare i carichi di neve per due disposizioni diverse:

- i carichi di neve senza accumulazione;
- i carichi di neve accumulati sul tetto.

I carichi di neve sui tetti sono determinati come segue:

- per i progetti permanenti e transitori:

$$S_1 = \mu_1 C_e C_t S_k$$

- per i progetti accidentali dove l'azione accidentale è l'accumulazione di neve straordinaria:

$$S_2 = \mu_1 C_e C_t S_{Ad}$$

$S_k$  è il valore caratteristico del carico di neve sul suolo.

$S_{Ad}$  è il valore di calcolo del carico straordinario di neve sul suolo per un sito dato.

$C_e$  è il coefficiente di esposizione.

$C_t$  è il coefficiente termico.

COEFFICIENTE DI ESPOSIZIONE  $C_e$

Il valore di questo coefficiente dipende della topografia della regione del progetto:

Topographie	Ce
Site balayé par les vents : zone plate, sans obstacles et exposée de tous côtés, pas ou peu protégée par le terrain, par des constructions plus élevées ou par des arbres	0.8
Site normal : zone où il n'y a pas de balayage important de la neige par le vent, à cause de la configuration du terrain, de la présence d'autres constructions ou d'arbres	1.0
Site protégé : zone où la construction considérée est beaucoup plus basse que le terrain environnant, ou entourée de grands arbres ou encore de constructions plus élevées	1.2

figura X.387: Valori consigliate per  $C_e$  in funzione della topografia, secondo l'Eurocodice 1-3 [5.2]

Il progetto è collocato su un sito detto normale, il valore del coefficiente di esposizione è:

$$C_e = 1.0$$

COEFFICIENTE TERMICO  $C_t$

Il coefficiente termico  $C_t$  può essere inferiore a 1 nei casi dove c'è una riduzione dei carichi di neve dovuta a una trasmittanza termica elevata che causa lo scioglimento della neve. Nei tutti altri casi:

$$C_t = 1.0$$

CARICO CARATTERISTICO SUL SUOLO  $S_k$

Per conoscere il valore  $S_k$  bisogna sapere la regione climatica della zone in cui si colloca il progetto:

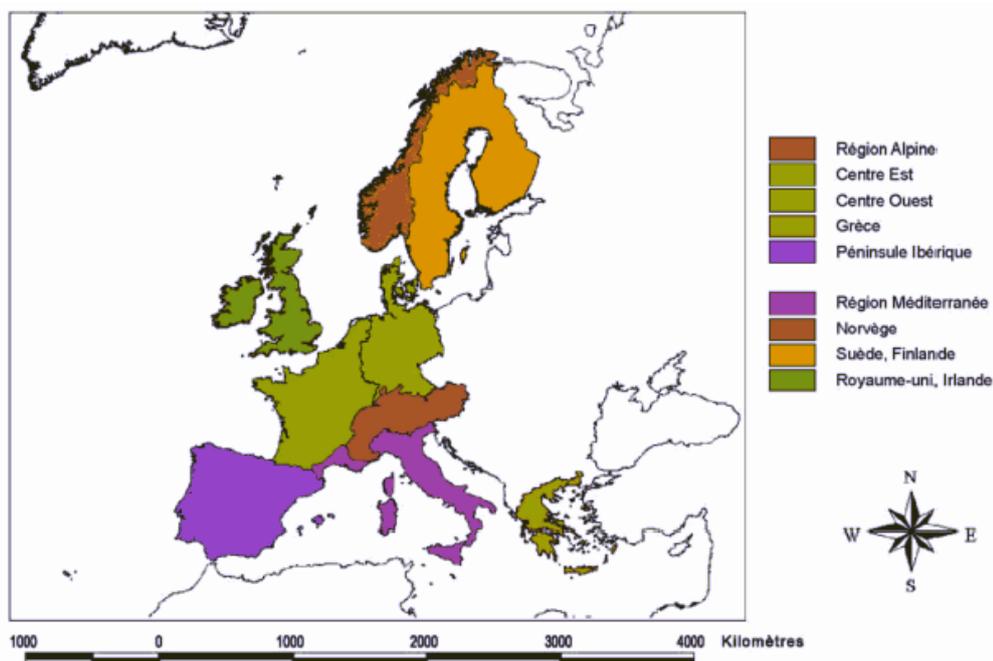


figura X.388: Regione Climatiche dell'Europa, secondo l'eurocodice 1-3 [Allegato C.1]

Il nostro progetto è collocato nella regione Alpine.

A è l'altitudine sopra il livello del mare del progetto

Secondo l'allegato C.1 dell'Eurocodice 1-3 abbiamo il valore  $S_k$ :

Z è un fattore di zona che dipende dalla localizzazione

Per la regione Alpine: carico di neve sopra il livello del mare:

$$S_k = (0.642Z + 0.009)(1+(A/728)^2)$$

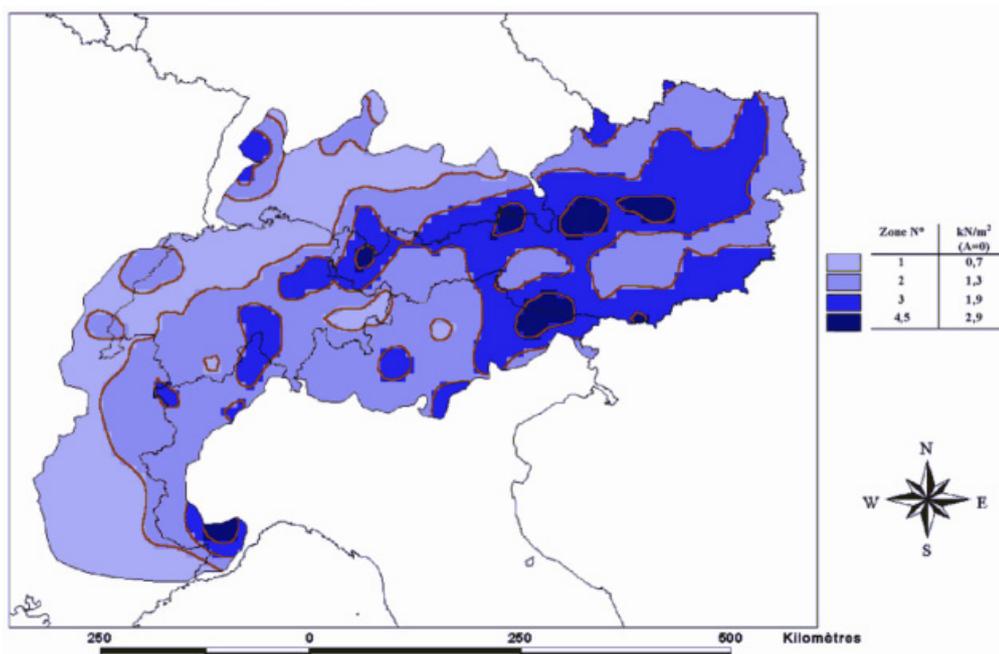


figura X.389: Fattore di zona, secondo l'Eurocodice 1-3 [Allegato C.2]

Sondrio si colloca nella zona 2 di conseguenze abbiamo il valore di Z:

Questi coefficienti dipendono della forma della copertura e permettono di determinare le disposizioni del carico della neve senza e con accumulo.

$$Z = 1.3 \text{ kN/m}^2$$

L'altitudine di Sondrio sopra il livello del mare è di 400m.

$$S_k = 0.642 \times 1.3 + 0.009 \times (1 + (400/728)^2)$$

$$S_k = 1.1$$

I COEFFICIENTI DI FORMA  $\mu_1$

I valori dei coefficienti  $\mu_1$  e  $\mu_2$  sono dati in funzione dell'angolo  $\alpha$  del tetto con l'orizzontale.

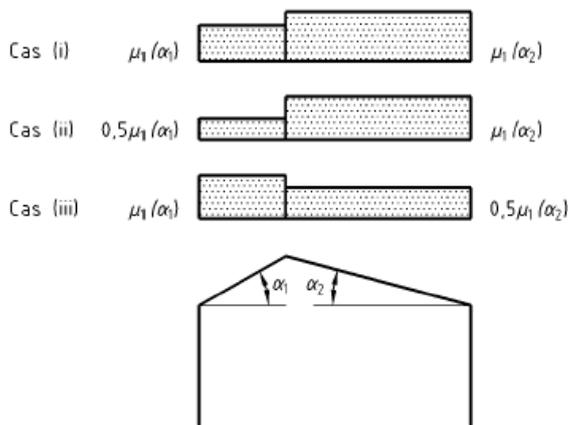


figura X.390: Coefficienti di forma per un tetto a due falde  
 Caso (i) Disposizione dei carichi senza accumulazione  
 Caso (ii) e (iii) Disposizione dei carichi con accumulazione

$\alpha$ (angolo del tetto con l'orizzontale)	$0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$	$30^\circ < \alpha < 60^\circ$	$\alpha \leq 60^\circ$
$\mu_1$	0.8	$0.8(60-\alpha)/30$	0.0
$\mu_2$	$0.8+0.8 \alpha/30$	1.6	-

figura X.391: Tabella dei coefficienti di forma, secondo l'Eurocodice 1-3 [5.3.2]

Il tetto esistente è a due falde di  $20^\circ$  quindi il coefficiente di forma è:

$$\mu_1 = 0.8$$

VALORE DI CALCOLO DEL CARICO STRAORDINARIO DI NEVE SUL SUOLO PER UN SITO DATO  $S_{Ad}$

Per i sito dove ci possono essere dei carichi straordinari di neve sul suolo:

$$S_{Ad} = C_{est} S_k$$

$C_{est}$  è il coefficiente per i carichi straordinari di neve

$S_k$  è il valore caratteristico del carico di neve sul suolo

Il valore consigliato è:

$$C_{est} = 2.0$$

Siccome abbiamo un tetto a due falde, i carichi di neve senza accumulazione sono uguali ai carichi di neve con accumulazione:

$$S_1 = 0.8 \times 1 \times 1 \times 1.1$$

$$S_1 = 0.88 \text{ kN/m}^2$$

I carichi di neve per i progetti accidentali sono:

$$S_2 = 2S_1$$

$$S_2 = 1.76 \text{ kN/m}^2$$

## 2. ANALISI DEI CARICHI NUOVI

### a) Carichi permanenti

Numero	Nome	Spessore (mm)	Peso lineare (kN/m)
CV1	Facciata con lastra di legno a vista autoportante	386	2.63
CV2	Facciata con lastra di legno a vista portante	557	20.39
CV3	Facciata con rivestimento in alluminio	335	2.30
CV4	Muro contro terra	515	28.8
CV5	Facciata continua in vetro	-	8
PV1	Parete interna	90	1.27

figura X.392: Chiusure e Partizione Verticali

Numero	Nome	Spessore (mm)	Carichi Permanenti Strutturali (kN/m <sup>2</sup> )	Carichi Permanenti Non Strutturali (kN/m <sup>2</sup> )	Carichi Permanenti Totali (kN/m <sup>2</sup> )
CO1	Copertura praticabile rivestimento in pietra	964	5.5	1.032	6.53
CO2	Copertura verde	997	5.5	1.746	7.25
CO3	Chiusura sotto tetto	835	5.5	0.519	6.02
CO4	Solaio contro terra	550	-	-	-
CO5	Copertura non praticabile in alluminio	564	0.1	0.3	0.40
CO6	Chiusura serra	513	0.475	0.482	0.96
PO1	Solaio interno	626	5.5	0.642	6.14
PO2	Solaio serra	464	0.475	0.398	0.87

figura X.393: Chiusure e Partizioni Orizzontali

### b) Carichi variabili

$$S_2 = 1.76 \text{ kN/m}^2$$

#### 1) Carichi di esercizio

L'edificio dopo intervento rimarrà un edificio scolastico. I carichi di servizio rimangono di 3kN/m<sup>2</sup>.

Per i tetti la falda del tetto del modulo è inferiore al 15%. Avremo quindi  $q_k = 0.8 \text{ kN/m}^2$ . Per le terrazze, usiamo i carichi di servizio di 3kN/m<sup>2</sup>.

#### 2) Carichi della neve

Prendiamo in conto i carichi di servizio per le terrazze e per il tetto del modulo. Nei due casi abbiamo i stessi carichi di neve che quelli calcolati per l'edificio esistente.

Siccome abbiamo un tetto a due falde, i carichi di neve senza accumulazione sono uguali ai carichi di neve con accumulazione:

$$S_1 = 0.88 \text{ kN/m}^2$$

I carichi di neve per i progetti accidentali sono:

$$S_2 = 2S_1$$

### 3. PARAGONE AI DIVERSI PIANI

	ESISTENTE			NUOVO		
	Tipo	Valore	Unità	Tipo	Valore	Unità
<b>FINESTRE</b>						
2° Piano	-	-	m <sup>2</sup>	Triplo Vetro	94,8	m <sup>2</sup>
1° Piano	Vetro Singolo	162,0	m <sup>2</sup>	Triplo Vetro	99,5	m <sup>2</sup>
Piano Terra	Vetro Singolo	194,5	m <sup>2</sup>	Triplo Vetro	69,4	m <sup>2</sup>
<b>COPERTURA</b>						
2° Piano	-	-	m <sup>2</sup>	CO2	350,0	m <sup>2</sup>
1° Piano	CO1	980,5	m <sup>2</sup>	CO3	490,0	m <sup>2</sup>
<b>SOLAI</b>						
2° Piano	PO1	777,0	m <sup>2</sup>	PO1	350,0	m <sup>2</sup>
1° Piano	PO1	840,0	m <sup>2</sup>	PO1	840,0	m <sup>2</sup>
Piano Terra	PO1	840,0	m <sup>2</sup>	PO1	840,0	m <sup>2</sup>
<b>PARTIZIONE VERTICALE</b>						
2° Piano	-	-	ml	-	70,6	ml
1° Piano	PV1	197,9	ml	PV1	111,3	ml
Piano Terra	PV1	180,2	ml	PV1	157,9	ml
<b>CHIUSURE VERTICALE</b>						
2° Piano	-	-	-	CV3	78	ml
1° Piano	CV1	164	ml	CV1	164	ml
Piano Terra	CV1	164	ml	CV1	164	ml

figura X.394: Tabella dei carichi dell'edificio esistente e dell'edificio nuovo

	ESISTENTE			NUOVO		
	Tipo	Valore	Unità	Tipo	Valore	Unità
<b>TOTALE CARICHI PERMANENTI</b>						
2° Piano	G1+G2	12817	kN	G1+G2	7754	kN
1° Piano	G1+G2	7542	kN	G1+G2	5552	kN
Piano Terra	G1+G2	7392	kN	G1+G2	5564	kN
<b>TOTALE CARICHI VARIABILI</b>						
2° Piano	Q1+Q2	862	kN	Q1+Q2	3696	kN
1° Piano	Q1+Q2	3419	kN	Q1+Q2	2631	kN
Piano Terra	Q1+Q2	3338	kN	Q1+Q2	2678	kN
<b>TOTALE CARICHI</b>						
2° Piano	Q1+Q2	13679	kN	Q1+Q2	11450	kN
1° Piano	Q1+Q2	10961	kN	Q1+Q2	8183	kN
Piano Terra	Q1+Q2	10730	kN	Q1+Q2	8242	kN

figura X.395: Tabella di confronto dei carichi fra esistente e nuovo

# C. DIMENSIONAMENTO XLAM

Per il dimensionamento del solai in Xlam delle serre abbiamo seguito le schede tecniche del produttore:

Il produttore propone di far riposare il Xlam su due, tre o quattro campate. Il vantaggio di avere più campate è di diminuire lo spessore necessario di Xlam però a un certo punto diventa svantaggioso di avere delle dimensioni troppo importanti. Nel nostro caso la distanza massima tra gli appoggi è di 4.25 m.

L'unico carico che agisce sul solai è il carico di servizio di 3 kN/m<sup>2</sup> per una scuola.

Guardiamo i risultati in funzione del numero di campate:

	Tipo di Xlam	Lunghezza del pannello
1) Sopra una campata	5 Strati 125	4.25 m
2) Sopra due campate	3 Strati 95	8.5 m
3) Sopra tre campate	3 Strati 95	12.75 m

figura X.399: Tipo di Xlam e lunghezza del pannello in funzione del numero di campate

La soluzione 2 è la più idonea per avere uno spessore di solaio sottile e un lunghezza del pannello comoda da gestire.

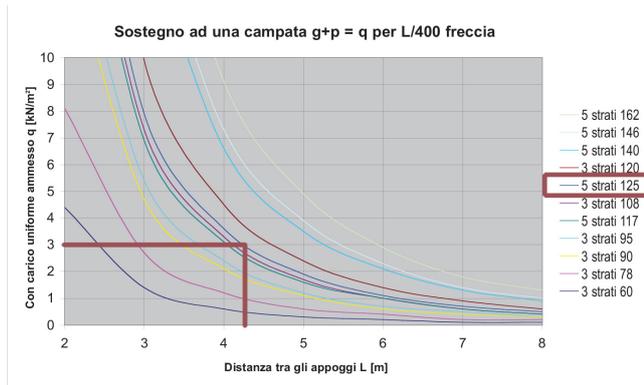


figura X.396: Dimensionamento dello Xlam per un pannello sopra una campata

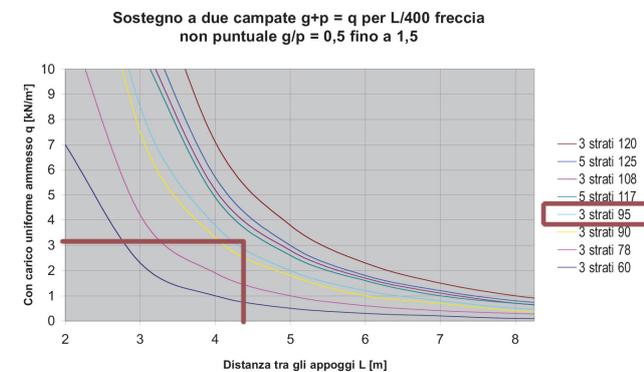


figura X.397: Dimensionamento dello Xlam per un pannello sopra due campate

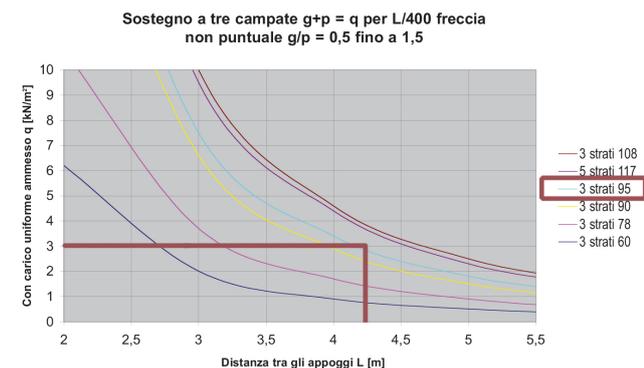


figura X.398: Dimensionamento dello Xlam per un pannello sopra tre campate

# D. STRUTTURA IN ACCIAIO

## 1. GENERALITÀ

L'attacco fra trave e pilastro si può fare di diverse maniere. Ne abbiamo scelto due diverse, la prima è per la trave a sbalzo che sarà saldata al pilastro quindi il collegamento fra loro sarà di tipo incastro. La seconda maniera di attaccare una trave a un pilastro è di imbullonare l'una sull'altro. Questa soluzione permette di avere un collegamento con semplice appoggio autorizza ancora una rotazione secondo l'asse della trave.

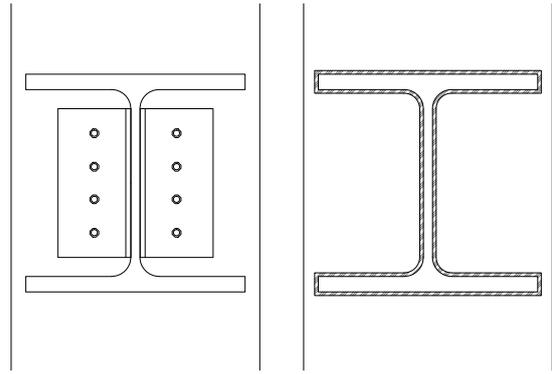


figura X.400: Tipologie di ancoraggio trave/pilastro

## 2. DIMENSIONAMENTO DELLE TRAVE

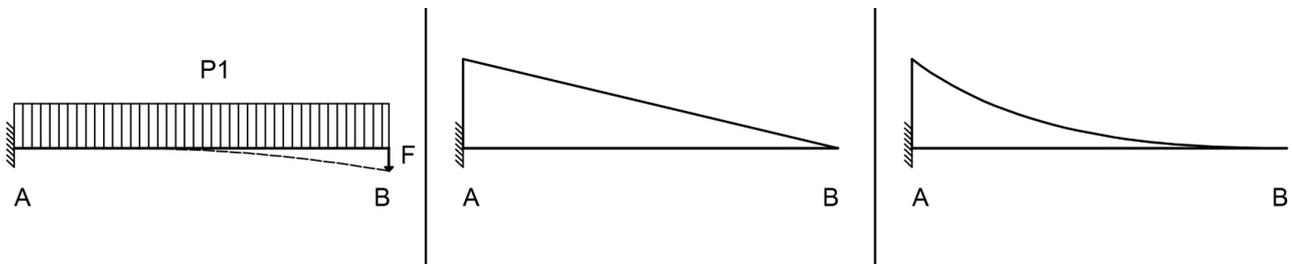
### a) Formulario delle sollecitazioni presente nel progetto

#### 1) Trave con un incastro e un carico lineare

SOLLECITAZIONE

TAGLIO

MOMENTO



$$F = pL^4/8EI$$

$$V_A = p_1L; V_B = 0$$

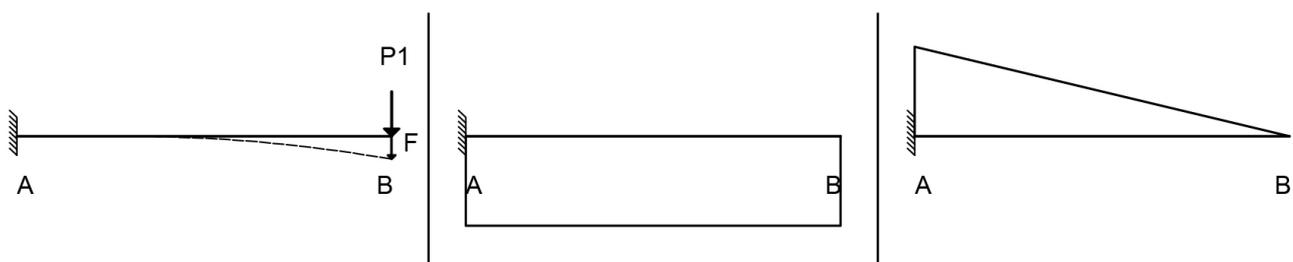
$$M_A = p_1L^2/2; M_B = 0$$

#### 2) Trave con un incastro e un carico puntuale al bordo

SOLLECITAZIONE

TAGLIO

MOMENTO



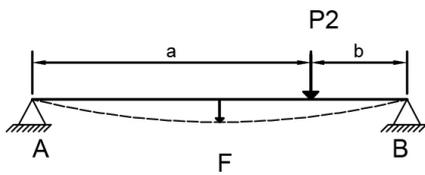
$$F = pL^3/3EI$$

$$V_A = P_1L; V_B = 0$$

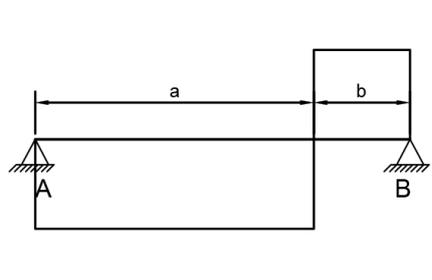
$$M_A = P_1L^2; M_B = 0$$

### 3) Trave con due appoggi semplici e un carico puntuale decentrato

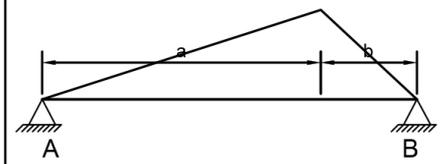
SOLLECITAZIONE



TAGLIO



MOMENTO



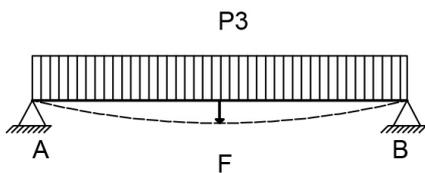
$$F = P_2 b (L^2 - b^2)^{3/2} / (EIL \sqrt{243})$$

$$V_A = P_2 b / L ; V_B = P_2 a / L$$

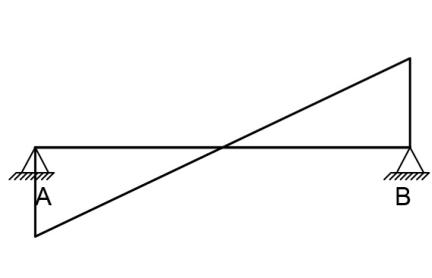
$$M_A = 0 ; M_B = 0 ; M_{\max} = P_2 ab / L$$

### 4) Trave con due appoggi semplici e un carico lineare

SOLLECITAZIONE



TAGLIO



MOMENTO



$$F = 5P_3 L^4 / 384EI$$

$$V_A = P_3 L / 2 ; V_B = P_3 L / 2$$

$$M_A = 0 ; M_B = 0 ; M_{\max} = P_3 L^2 / 8$$

Per i calcoli delle travi, abbiamo prima trascurato il peso della trave dimensionata e poi abbiamo rifatto i calcoli per verificare i risultati. Ciò che presentiamo sono le verifiche avendo già fatto i calcoli di predimensionamento.

## b) Trave T<sub>1</sub>, Elemento inflesso

### 1) Generalità

La trave T<sub>1</sub> misura 2,34 m e la sua larghezza d'influenza massima è di 4,25 m.

La facciata continua misura 5,5m di altezza includendo la parte inclinata e ipotizzando che la trave T<sub>1</sub> riprendesse tutto il peso della facciata continua.

Abbiamo scelto un Xlam per il solai con un spessore di 9,5 cm secondo una tabella del produttore (cf ??).

Vorremmo avere una trave piccola per avere un solaio sottile, per questo abbiamo scelto di dimensionare questa trave con delle HEB.

Per i calcoli abbiamo ipotizzato una trave HEB 200.

La trave T<sub>1</sub> riceve un carico lineare e un carico puntuale:

	Nome	Carichi	Unità	Carichi
<b>CARICHI LINEARI</b>				
G <sub>1</sub>	Peso Proprio	65.2	kg/m	0.63 kN/m
	Xlam	5	kN/m <sup>3</sup>	2.02 kN/m
G <sub>2a</sub>	Xlam	5	kN/m <sup>3</sup>	2.02 kN/m
Q <sub>1</sub>	Carichi in esercizio	3	kN/m <sup>2</sup>	12.75 kN/m
<b>CARICHI PUNTUALI</b>				
G <sub>2b</sub>	Facciata Continua	80	kg/m <sup>2</sup>	18.70 kN

figura X.401: Carichi sulla Trave T<sub>1</sub>

### 2) Stato Limite Esercizio

Per dimensionare secondo lo stato limite di esercizio usiamo le diverse configurazioni per il calcolo dei carichi che agiscono sulla trave T1:

1) Configurazione rara [Equ. 6.14b in NF EN 1990:2000]

$$P_1 = G_1 + G_2 + Q_1 + \psi_{0,2} Q_2$$

con  $\psi_{0,2} = 0.7$

2) Configurazione frequente [Equ. 6.15b in NF EN 1990:2000]

$$P_2 = G_1 + G_2 + \psi_{1,1} Q_1 + \psi_{2,2} Q_2$$

con  $\psi_{1,1} = 0.7$  e  $\psi_{2,2} = 0.6$

3) Configurazione permanente [Equ. 6.16b in NF EN 1990:2000]

$$P_3 = G_1 + G_2 + \psi_{2,1} Q_1 + \psi_{2,2} Q_2$$

con  $\psi_{2,1} = 0.6$  e  $\psi_{2,2} = 0.6$

4) Configurazione variabili

$$P_4 = \psi_{2,1} Q_1 + \psi_{2,2} Q_2$$

con  $\psi_{2,1} = 1.0$  e  $\psi_{2,2} = 0$

$$P_5 = \psi_{2,1} Q_1 + \psi_{2,2} Q_2$$

con  $\psi_{2,1} = 0.2$  e  $\psi_{2,2} = 0$

Carichi lineare	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>
Valore (kN/m)	15.39	11.57	10.29	12.75	2.55
Carichi puntuali	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>
Valore (kN)	17.80	17.80	17.80	0	0

figura X.402: Valore dei carichi sulla trave T<sub>1</sub>

### ► Lo stato limite di deformità

Predimensionamento della trave con abbassamento massimo consentito:

Conditions	W <sub>max</sub>
Toitures en général	L/200
Toitures supportant fréquemment du personnel autre que le personnel d'entretien	L/200
Planchers en général	L/200
Planchers et toitures supportant des cloisons en plâtre ou en autres matériaux fragiles ou rigides	L/250
Planchers supportant des poteaux (à moins que la flèche ait été incluse dans l'analyse globale de l'état limite ultime)	L/400
Cas où W <sub>max</sub> peut nuire à l'aspect du bâtiment	L/250

figura X.403: Valori limiti massimi consigliati per l'abbassamento verticale, secondo la norma [clausola 7.2.1(1)B in NF EN 1993-1-1/NA:2007]

Siccome il vetro è sostenuto da la trave siamo nel caso di un solaio in generale:

$$F_{max} = L/250$$

Per una trave incastrata e un carico p uniforme (cf. "a) Formulario delle sollecitazioni presente nel progetto" on page 390) abbiamo:

$$F = pL^4/8EI$$

Per una trave incastrata e un carico P puntuale (cf. "a) Formulario delle sollecitazioni presente nel progetto" on page 390) abbiamo:

$$F = PL^3/3EI$$

dove:

- p è il carico uniforme sulla trave T<sub>1</sub> [kN/m]
- P è il carico puntuale all'estremità trave T<sub>1</sub> [kN]
- L è la lunghezza della trave T<sub>1</sub> [m]
- E è il modulo di elasticità dell'acciaio [kN/m<sup>2</sup>]
- I è il momento d'inerzia della trave T<sub>1</sub> [cm<sup>4</sup>]

Quindi,

$$J_{min} = 250(PL^2/3 + pL^3/8)/E$$

Per i calcoli prendiamo  $P = P_{max} = P_1$ ,  $p = p_{max} = p_1$  e troviamo:

$$J_{\min} = 69.98 \text{ cm}^4$$

Secondo le caratteristiche delle travi IPE, per avere un momento d'inerzia superiore a  $J_{\min}$ , si deve scegliere una trave HEB 100:

$$J_{\text{HEB100}} = 450 \text{ cm}^4$$

### 3) Stato Limite Ultimo

Secondo l'Eurocodice 0 (Allegato A1.2):

$$P_u = 1.35 (G_1 + G_2) + 1.5 (Q_1 + Q_2)$$

Per i carichi puntuali:

$$P_u = 25.245 \text{ kN}$$

Per i carichi lineari:

$$p_u = 21.18 \text{ kN/m}$$

#### ► Resistenza in flessione

Si deve verificare l'inequazione seguente:

$$M_{\text{ed}} \leq M_{\text{c,rd}}$$

$$M_{\text{c,rd}} = W_{\text{pl}} f_{\text{yk}} / \gamma_{\text{M0}}$$

dove:

- $M_{\text{ed}}$  il momento flettente di calcolo [kNm]
- $M_{\text{c,rd}}$  la resistenza di calcolo a flessione retta della sezione [kNm]
- $W_{\text{pl}}$  è il modulo di resistenza plastico [ $\text{cm}^3$ ]
- $f_{\text{yk}}$  è la resistenza caratteristica a snervamento dell'acciaio ( $f_{\text{yk}} = 275 \text{ N/mm}^2$ )
- $\gamma_{\text{M0}}$  è il coefficiente di sicurezza per la resistenza delle membrature e la stabilità ( $\gamma_{\text{M0}} = 1,0$ )

$$M_{\text{ed}} = p_u L^2 / 2 + P_u L = 117.05 \text{ kNm}$$

$$W_{\text{plmin}} = M_{\text{ed}} \gamma_{\text{M0}} / f_{\text{yk}} = 446.9 \text{ cm}^3$$

Per avere  $W_{\text{pl}} > 472 \text{ cm}^3$  scegliamo una trave IPE 200:

$$W_{\text{pl\_HEB200}} = 570 \text{ cm}^3$$

	Valore	Unità
$W_{\text{pl}}$	570	$\text{cm}^3$
$f_{\text{yk}}$	275	$\text{N/mm}^2$
$\gamma_{\text{M0}}$	1.05	-
$M_{\text{c,rd}}$	149.29	kNm

figura X.404: Predimensionamento della trave  $T_1$

Si verifica che:

$$M_{\text{ed}} = 117.05 \text{ kNm} < M_{\text{c,rd}} = 149.29 \text{ kNm}$$

#### ► Resistenza al taglio

Verifichiamo:

$$N_{\text{Ed}} \leq N_{\text{c,rd}}$$

$$N_{\text{c,rd}} = \frac{A_v f_{\text{yk}}}{\sqrt{3} \gamma_{\text{M0}}}$$

$$A_v = A - 2bt_f + (t_w + 2r)t_f$$

$$A_{\text{vmin}} = \frac{N_{\text{Ed}} \sqrt{3} \gamma_{\text{M0}}}{f_{\text{yk}}}$$

dove:

- $N_{\text{Ed}}$  è il taglio di calcolo [kN]
- $N_{\text{c,rd}}$  è la resistenza di calcolo al taglio della sezione [kN]
- $A_v$  è l'area resistente a taglio [ $\text{m}^2$ ]
- $b$  è la larghezza delle ali per i profilati [m]
- $t_f$  è lo spessore delle ali [m]
- $t_w$  è lo spessore dell'anima [m]
- $r$  è il raggio di curvatura [m]

$$N_{\text{Ed}} = p_u L + P_u = 74.8 \text{ kN}$$

$$A_{\text{vmin}} = 4.95 \text{ cm}^2$$

Per avere  $N_{\text{Ed}} \leq N_{\text{c,rd}}$  si deve scegliere una trave HEB 100:

$$A_{\text{v\_HEB100}} = 9.0 \text{ cm}^2$$

Ricapitoliamo i risultati:

- Verifica dello SLE per l'abbassamento massimo consentito: Trave HEB 100;
- Verifica dello SLU per la resistenza in flessione: Trave HEB 200;
- Verifica dello SLU per la resistenza al taglio: Trave HEB 100.

La resistenza in flessione è la più critica. Per soddisfare tutte le verifiche si deve scegliere una trave HEB 200.

## c) Trave T<sub>2</sub>, Elemento inflesso

### 1) Generalità

La trave T<sub>2</sub> misura 4 m e la sua larghezza d'influenza massima è di 4,25 m.

La trave T<sub>2</sub> è una trave di rinforzo per il solaio esistente. La trave T<sub>2</sub> sostiene una trave in cemento armato esistente. Di conseguenza la trave T<sub>2</sub> sopporta i carichi della trave in calcestruzzo armato, il peso della trave in calcestruzzo armato e il suo peso proprio.

Per i calcoli abbiamo ipotizzato una trave HEB 260.

	Nome	Carichi	Unità	Carichi puntuali (kN)
G <sub>1</sub>	Peso	94.8	kg/m	7.46
	Proprio			
G <sub>2a</sub>	Trave in CA	2500	kg/m <sup>3</sup>	1.275
G <sub>2b</sub>	Solaio	6.17	kN/m <sup>2</sup>	104.89
Q <sub>1a</sub>	Carichi in esercizio	3	kN/m <sup>2</sup>	51
Q <sub>1b</sub>	Parete verticali	0.33	kN/m <sup>2</sup>	3.19

figura X.405: Carichi sulla Trave T<sub>2</sub>

### 2) Stato Limite Esercizio

Per dimensionare secondo lo stato limite di esercizio usiamo le diverse configurazioni per il calcolo dei carichi che agiscono sulla trave T<sub>2</sub>:

1) Configurazione rara [Equ. 6.14b in NF EN 1990:2000]

$$P_1 = G_1 + G_2 + Q_1 + \psi_{0,2} Q_2$$

$$\text{con } \psi_{0,2} = 0.7$$

2) Configurazione frequente [Equ. 6.15b in NF EN 1990:2000]

$$P_2 = G_1 + G_2 + \psi_{1,1} Q_1 + \psi_{2,2} Q_2$$

$$\text{con } \psi_{1,1} = 0.7 \text{ e } \psi_{2,2} = 0.6$$

3) Configurazione permanente [Equ. 6.16b in NF EN 1990:2000]

$$P_3 = G_1 + G_2 + \psi_{2,1} Q_1 + \psi_{2,2} Q_2$$

$$\text{con } \psi_{2,1} = 0.6 \text{ e } \psi_{2,2} = 0.6$$

4) Configurazione variabili

$$P_4 = \psi_{2,1} Q_1 + \psi_{2,2} Q_2$$

$$\text{con } \psi_{2,1} = 1.0 \text{ e } \psi_{2,2} = 0$$

$$P_5 = \psi_{2,1} Q_1 + \psi_{2,2} Q_2$$

$$\text{con } \psi_{2,1} = 0.2 \text{ e } \psi_{2,2} = 0$$

P <sub>i</sub>	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>
Valore (kN)	167.45	151.59	146.18	54.19	10.84

figura X.406: Valore dei carichi sulla trave T<sub>2</sub>

### ► Lo stato limite di deformità

Predimensionamento della trave con abbassamento massimo consentito:

Conditions	W <sub>max</sub>
Toitures en général	L/200
Toitures supportant fréquemment du personnel autre que le personnel d'entretien	L/200
Planchers en général	L/200
Planchers et toitures supportant des cloisons en plâtre ou en autres matériaux fragiles ou rigides	L/250
Planchers supportant des poteaux (à moins que la flèche ait été incluse dans l'analyse globale de l'état limite ultime)	L/400
Cas où W <sub>max</sub> peut nuire à l'aspect du bâtiment	L/250

figura X.407: Valori limiti massimi consigliati per l'abbassamento verticale, secondo la norma [clausola 7.2.1(1)B in NF EN 1993-1-1/NA:2007]

Siamo nel caso di un solaio in generale:

$$F_{max} = L/200$$

Per una trave collegata con due rotule e sopportando un carico puntuale decentrato (cf. "a) Formulario delle sollecitazioni presente nel progetto" on page 390) abbiamo:

$$F = Pb(L^2 - b^2)^{3/2} / (243)^{1/2} EIL$$

dove:

- P è il carico puntuale all'estremità trave T<sub>2</sub> [kN]
- b è la distanza minima dal pilastro
- L è la lunghezza della trave T<sub>2</sub> [m]
- E è il modulo di elasticità dell'acciaio [kN/m<sup>2</sup>]
- I è il momento d'inerzia della trave T<sub>2</sub> [cm<sup>4</sup>]

$$J_{min} = 2Pb(L^2 - b^2)^{3/2} / (243)^{1/2} EL^2$$

Per i calcoli prendiamo  $P = P_{max} = P_1$  e troviamo:

$$J_{min} = 176.44 \text{ cm}^4$$

Secondo le caratteristiche delle travi IPE, per avere un momento d'inerzia superiore a J<sub>min</sub>, si deve scegliere una trave HEB 100:

$$J_{HEB100} = 450 \text{ cm}^4$$

### 3) Stato Limite Ultimo

Secondo l'Eurocodice 0 (Allegato A1.2):

$$P_u = 1.35 (G_1 + G_2) + 1.5 (Q_1 + Q_2) = 243.65 \text{ kN/m}$$

## ► Resistenza in flessione

Si deve verificare l'inequazione seguente:

$$M_{ed} \leq M_{c,rd}$$

$$M_{c,rd} = W_{pl} f_{yk} / \gamma_{M0}$$

dove:

- $M_{ed}$  il momento flettente di calcolo [kNm]
- $M_{c,rd}$  la resistenza di calcolo a flessione retta della sezione [kNm]
- $W_{pl}$  è il modulo di resistenza plastico [cm<sup>3</sup>]
- $f_{yk}$  è la resistenza caratteristica a snervamento dell'acciaio ( $f_{yk} = 275$  N/mm<sup>2</sup>)
- $\gamma_{M0}$  è il coefficiente di sicurezza per la resistenza delle membrature e la stabilità ( $\gamma_{M0} = 1,0$ )

$$M_{ed} = Pab/L = 292.24 \text{ kNm}$$

$$W_{plmin} = M_{ed} \gamma_{M0} / f_{yk} = 1115.82 \text{ cm}^3$$

Per avere  $W_{pl} > 1115.82 \text{ cm}^3$  scegliamo una trave HEB 260:

$$W_{pl\_HEB260} = 1150 \text{ cm}^3$$

	Valore	Unità
$W_{pl}$	1150	cm <sup>3</sup>
$f_{yk}$	275	N/mm <sup>2</sup>
$\gamma_{M0}$	1.05	-
$M_{c,rd}$	301.19	kNm

figura X.408: Predimensionamento della trave T<sub>2</sub>

Si verifica che:

$$M_{ed} = 292.24 \text{ kNm} < M_{c,rd} = 301.19 \text{ kNm}$$

## ► Resistenza al taglio

Verifichiamo:

$$N_{Ed} \leq N_{c,rd}$$

$$N_{c,rd} = \frac{A_v f_{yk}}{\sqrt{3} \gamma_{M0}}$$

$$A_v = A - 2bt_f + (t_w + 2r)t_f$$

$$A_{vmin} = \frac{N_{Ed} \sqrt{3} \gamma_{M0}}{f_{yk}}$$

dove:

- $N_{Ed}$  è il taglio di calcolo [kN]
- $N_{c,rd}$  è la resistenza di calcolo al taglio della sezione [kN]
- $A_v$  è l'area resistente a taglio [m<sup>2</sup>]
- $b$  è la larghezza delle ali per i profilati [m]
- $t_f$  è lo spessore delle ali [m]
- $t_w$  è lo spessore dell'anima [m]

- $r$  è il raggio di curvatura [m]

$$N_{ed} = P_u a/L = 163.16 \text{ kN}$$

$$A_{vmin} = 10.79 \text{ cm}^2$$

Per avere  $N_{ed} < N_{c,rd}$  si deve scegliere una trave HEB 120:

$$A_{v\_HEB120} = 11 \text{ cm}^2$$

Ricapitoliamo i risultati:

- Verifica dello SLE per l'abbassamento massimo consentito: Trave HEB 100;
- Verifica dello SLU per la resistenza in flessione: Trave HEB 260;
- Verifica dello SLU per la resistenza al taglio: Trave HEB 120.

La resistenza in flessione è la più critica. Per soddisfare tutte le verifiche si deve scegliere una trave HEB 260.

## d) Trave T<sub>3</sub>, Elemento inflesso

### 1) Generalità

La trave T<sub>3</sub> è quella per il cortile interno.

Per aver delle travi con dimensioni non eccessivi abbiamo scelto il passo fra due pilastro. Alla fine ci siamo accorti che 3 m fra due pilastri nell'asse Sud-Nord e 2.75 m nell'asse Est-Ovest ci da dei risultati soddisfacenti.

La trave T<sub>3</sub> misura 3 m e la sua larghezza d'influenza massima è di 2.75 m.

La trave T<sub>3</sub> sostiene una facciata continua in vetro.

Per i calcoli abbiamo scelto una trave HEB 160.

	Nome	Carichi	Unità	Carichi lineare (kN/m)
G <sub>1</sub>	Peso Proprio	43.5	kg/m	0.435
G <sub>2a</sub>	Solaio	1.02	kN/m <sup>2</sup>	2.81
Q <sub>1a</sub>	Carichi in esercizio	3	kN/m <sup>2</sup>	8.25

figura X.409: Carichi sulla Trave T<sub>3</sub>

### 2) Stato Limite Esercizio

Per dimensionare secondo lo stato limite di esercizio usiamo le diverse configurazioni per il calcolo dei carichi che agiscono sulla trave T<sub>3</sub>:

1) Configurazione rara [Equ. 6.14b in NF EN 1990:2000]

$$P_1 = G_1 + G_2 + Q_1 + \psi_{0,2} Q_2$$

con  $\psi_{0,2} = 0.7$

2) Configurazione frequente [Equ. 6.15b in NF EN 1990:2000]

$$P_2 = G_1 + G_2 + \psi_{1,1} Q_1 + \psi_{2,2} Q_2$$

con  $\psi_{1,1} = 0.7$  e  $\psi_{2,2} = 0.6$

3) Configurazione permanente [Equ. 6.16b in NF EN 1990:2000]

$$P_3 = G_1 + G_2 + \psi_{2,1} Q_1 + \psi_{2,2} Q_2$$

con  $\psi_{2,1} = 0.6$  e  $\psi_{2,2} = 0.6$

4) Configurazione variabili

$$P_4 = \psi_{2,1} Q_1 + \psi_{2,2} Q_2$$

con  $\psi_{2,1} = 1.0$  e  $\psi_{2,2} = 0$

$$P_5 = \psi_{2,1} Q_1 + \psi_{2,2} Q_2$$

con  $\psi_{2,1} = 0.2$  e  $\psi_{2,2} = 0$

P <sub>i</sub>	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>
Valore (kN/m)	11.49	9.02	8.19	8.25	1.65

figura X.410: Valore dei carichi sulla trave T<sub>3</sub>

LO STATO LIMITE DI DEFORMITÀ

Predimensionamento della trave con abbassamento massimo consentito:

Conditions	W <sub>max</sub>
Toitures en général	L/200
Toitures supportant fréquemment du personnel autre que le personnel d'entretien	L/200
Planchers en général	L/200
Planchers et toitures supportant des cloisons en plâtre ou en autres matériaux fragiles ou rigides	L/250
Planchers supportant des poteaux (à moins que la flèche ait été incluse dans l'analyse globale de l'état limite ultime)	L/400
Cas où W <sub>max</sub> peut nuire à l'aspect du bâtiment	L/250

figura X.411: Valori limiti massimi consigliati per l'abbassamento verticale, secondo la norma [clausola 7.2.1(1)B in NF EN 1993-1-1/NA:2007]

Siamo nel caso di un solaio in generale:

$$F_{max} = L/200$$

Per una trave collegata con due rotule e sopportando un carico lineare (cf. "a) Formulario delle sollecitazioni presente nel progetto" on page 390) abbiamo:

$$F = 5PL^4/384EI$$

dove:

- P è il carico puntuale all'estremità trave T<sub>3</sub> [kN]
- L è la lunghezza della trave T<sub>3</sub> [m]
- E è il modulo di elasticità dell'acciaio [kN/m<sup>2</sup>]
- I è il momento d'inerzia della trave T<sub>3</sub> [cm<sup>4</sup>]

$$J_{min} = 5PL^3/192E$$

Per i calcoli prendiamo  $P = P_{max} = P_1$  e troviamo:

$$J_{min} = 3.81 \text{ cm}^4$$

Secondo le caratteristiche delle travi HEB, per avere un momento d'inerzia superiore a Jmin, si deve scegliere una trave HEB 100:

$$J_{HEB100} = 450 \text{ cm}^4$$

### 3) Stato Limite Ultimo

Secondo l'Eurocodice 0 (Allegato A1.2):

$$P_u = 1.35 (G_1 + G_2) + 1.5 (Q_1 + Q_2) = 16 \text{ kN/m}$$

#### ► Resistenza in flessione

Si deve verificare l'inequazione seguente:

$$M_{ed} \leq M_{c,rd}$$

$$M_{c,rd} = W_{pl} f_{yk} / \gamma_{M0}$$

dove:

- M<sub>ed</sub> il momento flettente di calcolo [kNm]
- M<sub>c,rd</sub> la resistenza di calcolo a flessione retta della sezione [kNm]
- W<sub>pl</sub> è il modulo di resistenza plastico [cm<sup>3</sup>]

- $f_{yk}$  è la resistenza caratteristica a snervamento dell'acciaio ( $f_{yk} = 275 \text{ N/mm}^2$ )
- $\gamma_{M0}$  è il coefficiente di sicurezza per la resistenza delle membrature e la stabilità ( $\gamma_{M0} = 1,0$ )

$$M_{ed} = P_u L^2 / 4 = 71.99 \text{ kNm}$$

$$W_{plmin} = M_{ed} \gamma_{M0} / f_{yk} = 274.87 \text{ cm}^3$$

Per avere  $W_{pl} > 271.72 \text{ cm}^3$  scegliamo una trave HEB 160:

$$W_{pl\_HEB160} = 311 \text{ cm}^3$$

	Valore	Unità
$W_{pl}$	311	$\text{cm}^3$
$f_{yk}$	275	$\text{N/mm}^2$
$\gamma_{M0}$	1.05	-
$M_{c,rd}$	81.45	$\text{kNm}$

figura X.412: Predimensionamento della trave  $T_3$

Si verifica che:

$$M_{ed} = 71.99 \text{ kNm} < M_{c,rd} = 81.45 \text{ kNm}$$

### ► Resistenza al taglio

Verifichiamo:

$$N_{Ed} \leq N_{c,rd}$$

$$N_{c,rd} = \frac{A_v f_{yk}}{\sqrt{3} \gamma_{M0}}$$

$$A_v = A - 2bt_f + (t_w + 2r)t_f$$

$$A_{vmin} = \frac{N_{Ed} \sqrt{3} \gamma_{M0}}{f_{yk}}$$

dove:

- $N_{Ed}$  è il taglio di calcolo [kN]
- $N_{c,rd}$  è la resistenza di calcolo al taglio della sezione [kN]
- $A_v$  è l'area resistente a taglio [ $\text{m}^2$ ]
- $b$  è la larghezza delle ali per i profilati [m]
- $t_f$  è lo spessore delle ali [m]
- $t_w$  è lo spessore dell'anima [m]
- $r$  è il raggio di curvatura [m]

$$N_{ed} = P_u L / 2 = 24 \text{ kN}$$

$$A_{vmin} = 1.59 \text{ cm}^2$$

Per avere  $N_{ed} < N_{c,rd}$  si deve scegliere una trave HEB 100:

$$A_{v\_HEB100} = 9 \text{ cm}^2$$

Ricapitoliamo i risultati:

- Verifica dello SLE per l'abbassamento massimo consentito: Trave HEB 100;

- Verifica dello SLU per la resistenza in flessione: Trave HEB 160;

- Verifica dello SLU per la resistenza al taglio: Trave HEB 100.

La resistenza in flessione è la più critica. Per soddisfare tutte le verifiche si deve scegliere una trave HEB 160.

## e) Trave T<sub>4</sub>, Elemento inflesso

### 1) Generalità

La trave T<sub>4</sub> misura 4,15 m e la sua larghezza d'influenza media è di 0,4 m.

La trave T<sub>4</sub> sopporta due travi T<sub>3</sub> e il peso della facciata continua in vetro. Ci sono due carichi puntuali uguali e un carico lineare.

Per i calcoli abbiamo ipotizzato una trave HEB 180.

I carichi puntuali sono i risultati sulla trave T<sub>3</sub> con un coefficiente L/2.

I carichi lineari sono:

Nome	Carichi	Unità	Carichi
<b>CARICHI LINEARI</b>			
G <sub>1a</sub>	Peso Proprio	52.2 kg/m	0.522 kN/m
G <sub>2a</sub>	Facciata continua	80 kg/m <sup>2</sup>	13.92 kN/m
<b>CARICHI PUNTUALI DOVUTI A T3A</b>			
G <sub>2b</sub>	Solaio	1.02 kN/m <sup>2</sup>	1.85 kN
Q <sub>1a</sub>	Carichi in esercizio	3 kN/m <sup>2</sup>	5.45 kN
G <sub>1b</sub>	Peso proprio	0.435 kN/m	0.29 kN
<b>CARICHI PUNTUALI DOVUTI A T3B</b>			
G <sub>2b</sub>	Solaio	1.02 kN/m <sup>2</sup>	2.45 kN
Q <sub>1a</sub>	Carichi in esercizio	3 kN/m <sup>2</sup>	7.22 kN
G <sub>1b</sub>	Peso proprio	0.435 kN/m	0.38 kN

figura X.413: Carichi lineari sulla Trave T<sub>4</sub>

### 2) Stato Limite Esercizio

Per dimensionare secondo lo stato limite di esercizio usiamo le diverse configurazioni per il calcolo dei carichi che agiscono sulla trave T<sub>2</sub>:

1) Configurazione rara [Equ. 6.14b in NF EN 1990:2000]

$$P_1 = G_1 + G_2 + Q_1 + \psi_{0,2} Q_2$$

con  $\psi_{0,2} = 0.7$

2) Configurazione frequente [Equ. 6.15b in NF EN 1990:2000]

$$P_2 = G_1 + G_2 + \psi_{1,1} Q_1 + \psi_{2,2} Q_2$$

con  $\psi_{1,1} = 0.7$  e  $\psi_{2,2} = 0.6$

3) Configurazione permanente [Equ. 6.16b in NF EN 1990:2000]

$$P_3 = G_1 + G_2 + \psi_{2,1} Q_1 + \psi_{2,2} Q_2$$

con  $\psi_{2,1} = 0.6$  e  $\psi_{2,2} = 0.6$

4) Configurazione variabili

$$P_4 = \psi_{2,1} Q_1 + \psi_{2,2} Q_2$$

con  $\psi_{2,1} = 1.0$  e  $\psi_{2,2} = 0$

$$P_5 = \psi_{2,1} Q_1 + \psi_{2,2} Q_2$$

con  $\psi_{2,1} = 0.2$  e  $\psi_{2,2} = 0$

Carichi lineari:

P <sub>i</sub>	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>
Valore (kN/m)	14.44	14.44	14.44	0	0

figura X.414: Valore dei carichi lineari sulla trave T<sub>4</sub>

Carichi puntuali:

	P1a	P2a	P3a	P4a	P5a
Valore (kN)	7.58	5.95	5.41	5.45	1.09
	P1b	P2b	P3b	P4b	P5b
Valore (kN)	10.05	7.89	7.17	7.22	1.44

figura X.415: Valore dei carichi puntuali sulla trave T<sub>4</sub>

### LO STATO LIMITE DI DEFORMITÀ

Predimensionamento della trave con abbassamento massimo consentito:

Conditions	W <sub>max</sub>
Toitures en général	L/200
Toitures supportant fréquemment du personnel autre que le personnel d'entretien	L/200
Planchers en général	L/200
Planchers et toitures supportant des cloisons en plâtre ou en autres matériaux fragiles ou rigides	L/250
Planchers supportant des poteaux (à moins que la flèche ait été incluse dans l'analyse globale de l'état limite ultime)	L/400
Cas où W <sub>max</sub> peut nuire à l'aspect du bâtiment	L/250

figura X.416: Valori limiti massimi consigliati per l'abbassamento verticale, secondo la norma [clausola 7.2.1(1)B in NF EN 1993-1-1/NA:2007]

Siccome il vetro è sostenuto da la trave siamo nel caso di un solaio in generale:

$$F_{\max} = L/250$$

Per una trave collegata con due rotule e sopportando un carico puntuale decentrato (cf. "a) Formulario delle sollecitazioni presente nel progetto" on page 390):

$$F_{T3b} = P_{1b} b (L_{\text{tot}}^2 - b^2)^{3/2} / (243)^{1/2} E I L_{\text{tot}}$$

$$F_{T3a} = P_{1a} a (L_{\text{tot}}^2 - a^2)^{3/2} / (243)^{1/2} E I L_{\text{tot}}$$

Per una trave con due rotule e sopportando una carico lineare (cf. "a) Formulario delle sollecitazioni presente nel progetto" on page 390) abbiamo:

$$F = 5p_1 L^4 / 384EI$$

Maggioriamo l'abbassamento della trave  $T_4$  con la somma dei abbassamenti delle tre configurazioni:

$$F < P_{lb} b (L_{tot}^2 - b^2)^{3/2} / (243)^{1/2} E I L_{tot} + P_{la} a (L_{tot}^2 - a^2)^{3/2} / (243)^{1/2} E I L_{tot} + 5 p_1 L^4 / 384 E I$$

$$J_{min} = 250/E [P_{lb} b (L_{tot}^2 - b^2)^{3/2} / (243)^{1/2} L_{tot}^2 + P_{la} a (L_{tot}^2 - a^2)^{3/2} / (243)^{1/2} L_{tot}^2 + 5 p_1 L^3 / 384]$$

dove:

- $P_{la}$  è il carico puntuale dovuta alla trave  $T_{3a}$  [kN]
- $a$  è la distanza minima dalla trave  $T_{3a}$  al pilastro
- $P_{lb}$  è il carico puntuale dovuta alla trave  $T_{3b}$  [kN]
- $b$  è la distanza minima dalla trave  $T_{3b}$  al pilastro
- $L_{tot}$  è la lunghezza della trave  $T_4$  [m]
- $E$  è il modulo di elasticità dell'acciaio [kN/m<sup>2</sup>]
- $I$  è il momento d'inerzia della trave  $T_4$  [cm<sup>4</sup>]

Calcoliamo:

$$J_{min} = 19.77 \text{ cm}^4$$

Secondo le caratteristiche delle travi IPE, per avere un momento d'inerzia superiore a  $J_{min}$ , si deve scegliere una trave HEB 100:

$$J_{HEB100} = 450 \text{ cm}^4$$

### 3) Stato Limite Ultimo

Secondo l'Eurocodice 0 (Allegato A1.2):

$$P_u = 1.35 (G_1 + G_2) + 1.5 (Q_1 + Q_2)$$

$$p_u = 19.49 \text{ kN/m}$$

$$P_{ua} = 11.05 \text{ kN}$$

$$P_{ub} = 14.66 \text{ kN}$$

#### ► Resistenza in flessione

Si deve verificare l'inequazione seguente:

$$M_{ed} \leq M_{c,rd}$$

$$M_{c,rd} = W_{pl} f_{yk} / \gamma_{M0}$$

dove:

- $M_{ed}$  il momento flettente di calcolo [kNm]
- $M_{c,rd}$  la resistenza di calcolo a flessione retta della sezione [kNm]
- $W_{pl}$  è il modulo di resistenza plastico [cm<sup>3</sup>]
- $f_{yk}$  è la resistenza caratteristica a snervamento dell'acciaio ( $f_{yk} = 275 \text{ N/mm}^2$ )
- $\gamma_{M0}$  è il coefficiente di sicurezza per la resistenza delle membrature e la stabilità ( $\gamma_{M0} = 1,0$ )

$$M_{ed} = p_u L^2 / 4 + [P_{ua} (b+L) + P_{ub} b] a / L_{tot} = 92.78 \text{ kNm}$$

$$W_{plmin} = M_{ed} \gamma_{M0} / f_{yk} = 354.25 \text{ cm}^3$$

Per avere  $W_{pl} > 236.31 \text{ cm}^3$  scegliamo una trave HEB 180:

$$W_{pl_{HEB180}} = 426 \text{ cm}^3$$

	Valore	Unità
$W_{pl}$	426	cm <sup>3</sup>
$f_{yk}$	275	N/mm <sup>2</sup>
$\gamma_{M0}$	1.05	-
$M_{c,rd}$	111.57	kNm

figura X.417: Predimensionamento della trave  $T_4$

Si verifica che:

$$M_{ed} = 92.78 \text{ kNm} < M_{c,rd} = 111.57 \text{ kNm}$$

#### ► Resistenza al taglio

Verifichiamo:

$$N_{Ed} \leq N_{c,rd}$$

$$N_{c,rd} = \frac{A_v f_{yk}}{\sqrt{3} \gamma_{M0}}$$

$$A_v = A - 2bt_f + (t_w + 2r)t_f$$

$$A_{vmin} = \frac{N_{Ed} \sqrt{3} \gamma_{M0}}{f_{yk}} = 10,67 \text{ cm}^2$$

dove:

- $N_{Ed}$  è il taglio di calcolo [kN]
- $N_{c,rd}$  è la resistenza di calcolo al taglio della sezione [kN]
- $A_v$  è l'area resistente a taglio [m<sup>2</sup>]
- $b$  è la larghezza delle ali per i profilati [m]
- $t_f$  è lo spessore delle ali [m]
- $t_w$  è lo spessore dell'anima [m]
- $r$  è il raggio di curvatura [m]

$$N_{ed} = p_u L_{tot} / 2 + P_{ua} a / L_{tot} + P_{ub} (a+L) / L_{tot} = 55.12 \text{ kN}$$

$$A_{vmin} = 3.65 \text{ cm}^2$$

Per avere  $N_{ed} < N_{c,rd}$  si deve scegliere una trave HEB 100:

$$A_{v_{HEB100}} = 9 \text{ cm}^2$$

Ricapitoliamo i risultati:

- Verifica dello SLE per l'abbassamento massimo consentito: Trave IPE 80;
- Verifica dello SLU per la resistenza in flessione: Trave HEB 180;
- Verifica dello SLU per la resistenza al taglio: Trave HEB 100.

La resistenza in flessione è la più critica. Per soddisfare tutte le verifiche si deve scegliere una trave HEB 180.

## f) TRAVE T<sub>5</sub> a C

La trave T<sub>5</sub> è una trave a C che sopporta il solai della grande serra e si attacca alla struttura esistente al livello dei pilastri. La larghezza d'influenza della trave T<sub>5</sub> è di 1.375 m.

I carichi della trave T<sub>5</sub> sono:

	Nome	Carichi	Unità	Carichi
G <sub>1</sub>	Peso Proprio	8.9	kg/m	0.089 kN/m
G <sub>2</sub>	Solai CO6	95.7	kg/m <sup>2</sup>	1.316 kN/m
Q <sub>1</sub>	Servizio	3	kN/m <sup>2</sup>	4.125 kN/m

figura X.418: Carichi sulla Trave T<sub>5</sub>

Si deve quindi risolvere questo sistema:

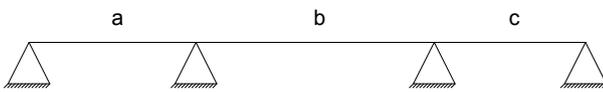


figura X.419: Schema strutturale della trave T<sub>5</sub>

Per risolvere questo sistema introduciamo 2 parametri supplementari: X<sub>2</sub> e X<sub>3</sub>:

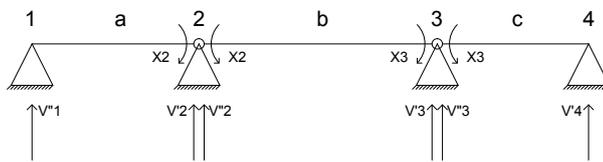


figura X.420: Sistema strutturale da risolvere

Per essere equivalente al sistema reale dobbiamo verificare:

$$\begin{bmatrix} \varphi_{22} & \varphi_{23} \\ \varphi_{32} & \varphi_{33} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varphi_{20} \\ \varphi_{30} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \varphi_{20} \\ \varphi_{30} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \varphi_{22} & \varphi_{23} \\ \varphi_{32} & \varphi_{33} \end{bmatrix}^{-1}$$

dove:

- $\varphi_{22}$  e  $\varphi_{32}$  sono i valori per  $X_2 = 1$
- $\varphi_{33}$  e  $\varphi_{23}$  sono i valori per  $X_3 = 1$
- $\varphi_{20}$  e  $\varphi_{30}$  sono i valori per i carichi

Per  $X_2 = 1$ :

$$\varphi_{22} = (L_a + L_b)/3$$

$$\varphi_{32} = L_b/6$$

Per  $X_3 = 1$ :

$$\varphi_{33} = (L_b + L_c)/3$$

$$\varphi_{23} = L_c/6$$

Caso 0:

$$\varphi_{20} = (Q_a L_a^3 + Q_b L_b^3)/24$$

$$\varphi_{30} = (Q_b L_b^3 + Q_c L_c^3)/24$$

Quindi:

$$X_1 = 0$$

$$X_2 = -4.62$$

$$X_3 = -7.61$$

$$X_4 = 0$$

$$V_i'' = (X_i - X_{i+1})/L_j + Q_j L_j/2$$

$$V_{i+1}' = (X_i - X_{i+1})/L_j - Q_j L_j/2$$

$$M_j = 0.5 \times Q_j \times x^2 - V_i'' x + X_i$$

La resistenza al taglio e alla flessione si verificano Stato Limite Ultimo:

Secondo l'Eurocodice 0 (Allegato A1.2):

$$P_u = 1.35 (G_1 + G_2) + 1.5 (Q_1 + Q_2)$$

$$P_u = 1.90 + 6.18 = 8.08 \text{ kN/m}$$

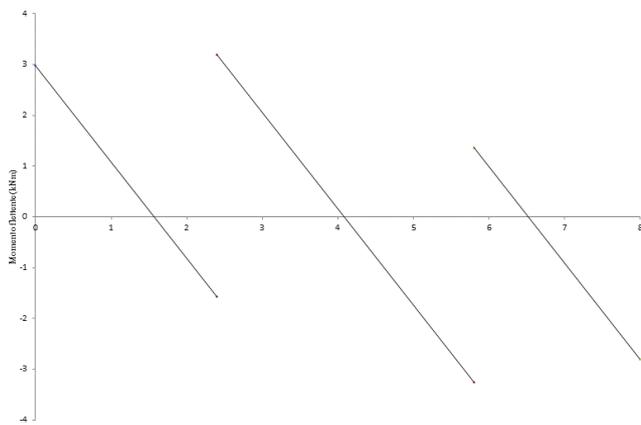


figura X.421: Taglio nel caso 0-0-0

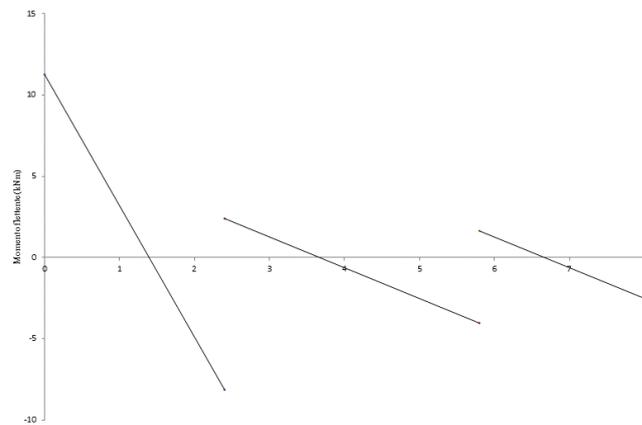


figura X.425: Taglio nel caso 1-0-0

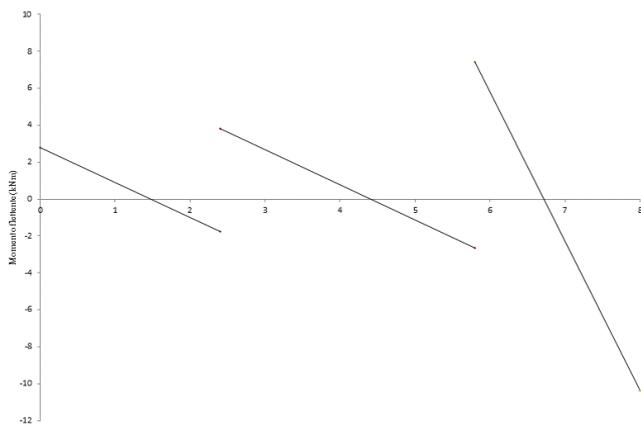


figura X.422: Taglio nel caso 0-0-1

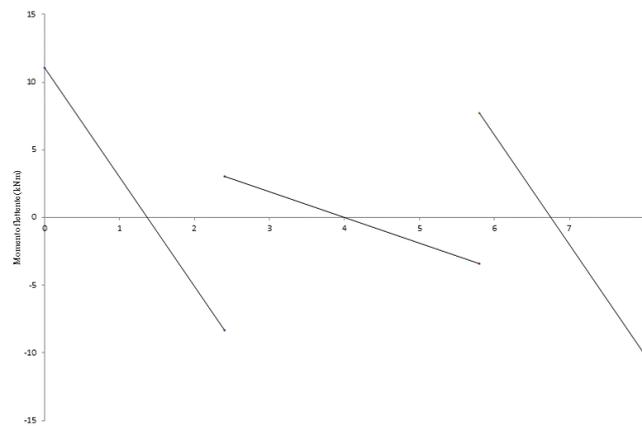


figura X.426: Taglio nel caso 1-0-1

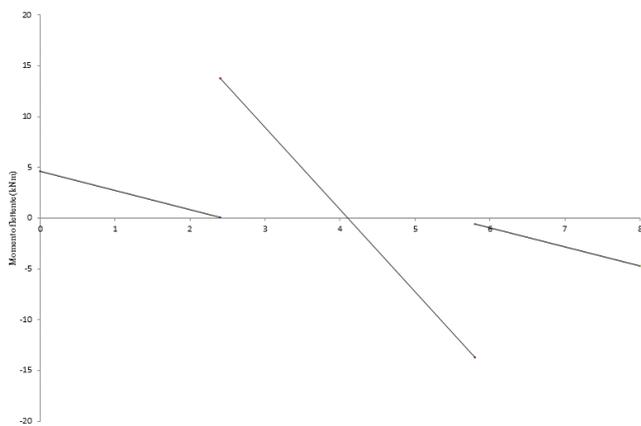


figura X.423: Taglio nel caso 0-1-0

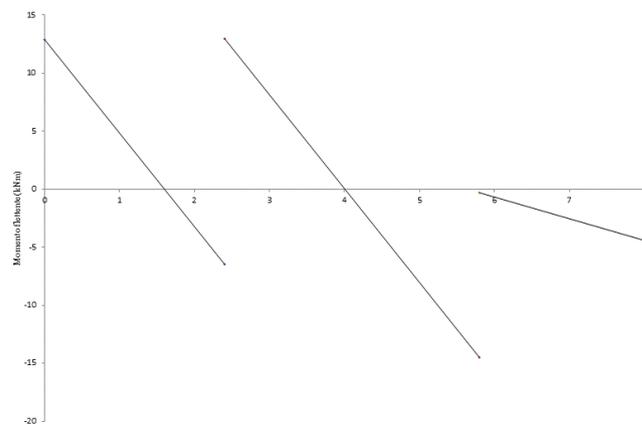


figura X.427: Taglio nel caso 1-1-0

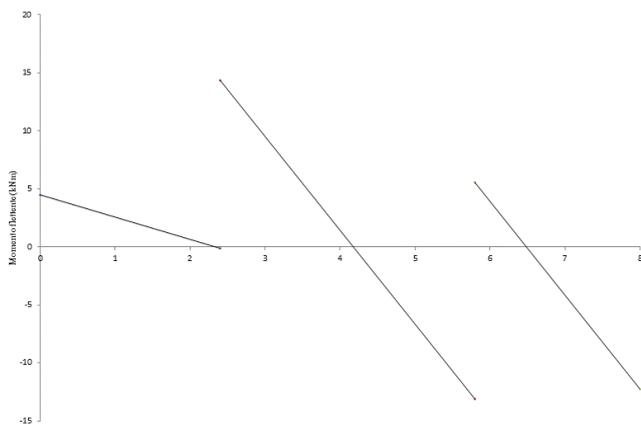


figura X.424: Taglio nel caso 0-1-1

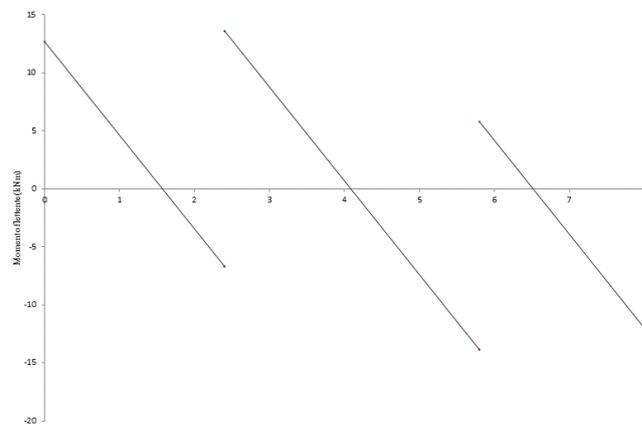


figura X.428: Taglio nel caso 1-1-1

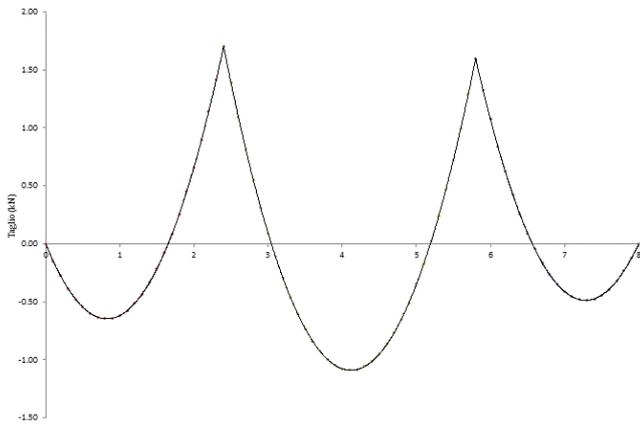


figura X.429: Momento nel caso 0-0-0

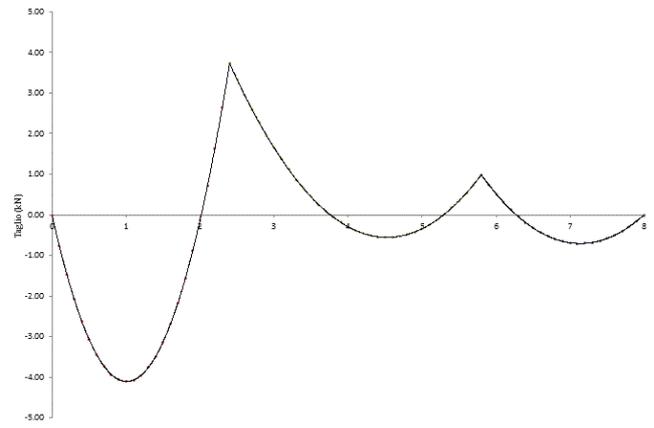


figura X.433: Momento nel caso 1-0-0

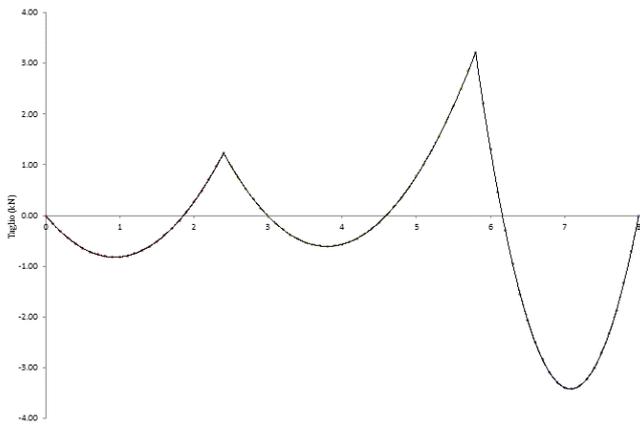


figura X.430: Momento nel caso 0-0-1

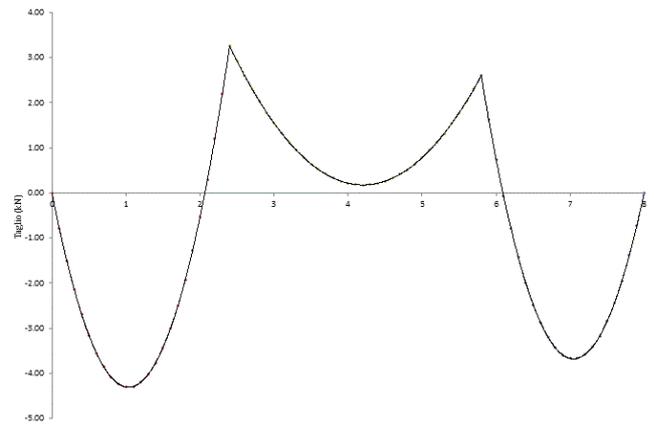


figura X.434: Momento nel caso 1-0-1

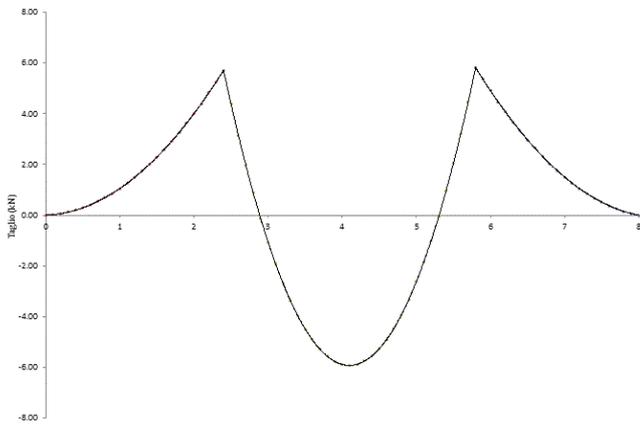


figura X.431: Momento nel caso 0-1-0

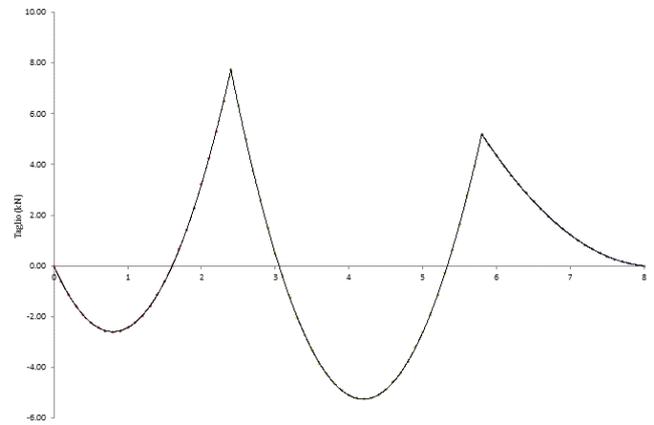


figura X.435: Momento nel caso 1-1-0

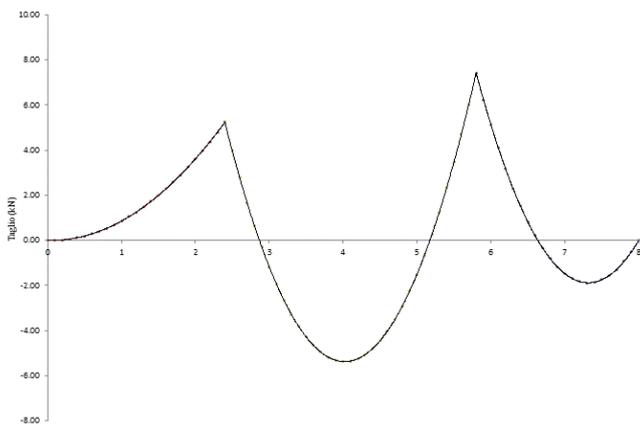


figura X.432: Momento nel caso 0-1-1

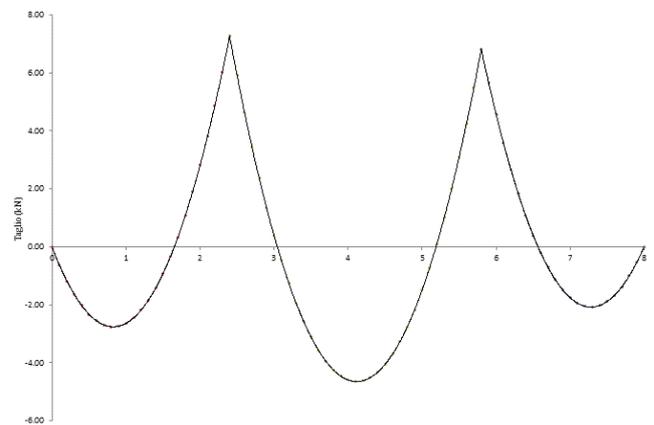


figura X.436: Momento nel caso 1-1-1

Il taglio massimo è nel caso del carico massimo per le parte a e b e del carico minimo per la parte c della trave.

Il momento flettente massimo è nel caso del carico massimo su tutta la lunghezza della trave.

$$V_{max} = 14.67 \text{ kN}$$

$$M_{max} = 18.71 \text{ kNm}$$

### ► Resistenza in flessione

si deve verificare l'inequazione seguente:

$$M_{ed} \leq M_{c,rd}$$

$$M_{c,rd} = W_{pl} f_{yk} / \gamma_{M0}$$

dove:

- $M_{ed}$  il momento flettente di calcolo [kNm]
- $M_{c,rd}$  la resistenza di calcolo a flessione retta della sezione [kNm]
- $W_{pl}$  è il modulo di resistenza plastico [cm<sup>3</sup>]
- $f_{yk}$  è la resistenza caratteristica a snervamento dell'acciaio ( $f_{yk} = 275 \text{ N/mm}^2$ )
- $\gamma_{M0}$  è il coefficiente di sicurezza per la resistenza delle membrature e la stabilità ( $\gamma_{M0} = 1,0$ )

$$M_{ed} = 18.71 \text{ kNm}$$

$$W_{plmin} = M_{ed} \gamma_{M0} / f_{yk} = 71.46 \text{ cm}^3$$

Per avere  $W_{pl} > 71.46 \text{ cm}^3$  scegliamo una trave UPN 140:

$$W_{pl\_UPN\ 140} = 86.4 \text{ cm}^3$$

	Valore	Unità
$W_{pl}$	86.4	cm <sup>3</sup>
$f_{yk}$	275	N/mm <sup>2</sup>
$\gamma_{M0}$	1.05	-
$M_{c,rd}$	22.63	kNm

figura X.437: Predimensionamento della trave T<sub>4</sub>

Si verifica che:

$$M_{ed} = 18.71 \text{ kNm} < M_{cd} = 22.63 \text{ kNm}$$

### ► Resistenza al taglio

Verifichiamo:

$$N_{Ed} \leq N_{c,rd}$$

$$N_{c,rd} = \frac{A_v f_{yk}}{\sqrt{3} \gamma_{M0}}$$

$$A_v = A - 2bt_f + (t_w + 2r)t_f$$

$$A_{vmin} = \frac{N_{Ed} \sqrt{3} \gamma_{M0}}{f_{yk}} = 10,67 \text{ cm}^2$$

dove:

- $N_{Ed}$  è il taglio di calcolo [kN]

- $N_{c,rd}$  è la resistenza di calcolo al taglio della sezione [kN]
- $A_v$  è l'area resistente a taglio [m<sup>2</sup>]
- $b$  è la larghezza delle ali per i profilati [m]
- $t_f$  è lo spessore delle ali [m]
- $t_w$  è lo spessore dell'anima [m]
- $r$  è il raggio di curvatura [m]

$$N_{ed} = 14.67 \text{ kN}$$

$$A_{vmin} = 0.01 \text{ cm}^2$$

Per avere  $N_{ed} < N_{c,rd}$  si deve scegliere una trave UPN 80:

$$A_{v\_UPN\ 80} = 6.6 \text{ cm}^2$$

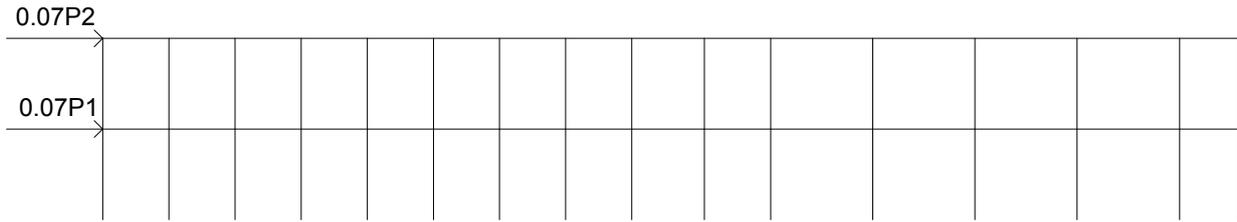
Ricapitoliamo i risultati:

- Verifica dello SLU per la resistenza in flessione: Trave UPN 140;
- Verifica dello SLU per la resistenza al taglio: Trave UPN 80.

La resistenza in flessione è la più critica. Per soddisfare tutte le verifiche si deve scegliere una trave UPN 140.

### g) Trave di collegamento T<sub>6</sub>

Per dimensionare le trave di collegamento del portico della serra, si deve risolvere questo portico affinché conosciamo gli carichi sulla trave T<sub>6</sub>:



Con P<sub>1</sub> e P<sub>2</sub>, i carichi sulla struttura in acciaio sui due piani:

	Nome	Carichi	Unità	Carichi
G <sub>1</sub>	Peso trave T <sub>1</sub>	62.5	kg/m	0.625 kN/m
G <sub>2</sub>	XLAM	5	kg/m <sup>3</sup>	0.475 kN/m <sup>2</sup>
G <sub>3</sub>	Facciata continua	80	kg/m <sup>2</sup>	0.8 kN/m <sup>2</sup>
Q <sub>1</sub>	Servizio	3	kN/m <sup>2</sup>	3 kN/m <sup>2</sup>

figura X.438: Carichi sulla Trave T<sub>6</sub>

Secondo l'Eurocodice 0 (Allegato A1.2):

$$P_u = 1.35 G_{tot} + 1.5 Q_{tot}$$

Secondo la geometria del piano, abbiamo:

$$G_{tot1} = G_1 * L_{T1} + (G_2 * e * A_1 + G_3 * h * L_1)$$

$$Q_{tot1} = Q_1 * A_1$$

$$G_{tot2} = G_1 * L'_{T1} + (G_2 * e * A_2 + G_3 * h' * L_2)$$

$$Q_{tot2} = Q_1 * A_2$$

dove:

- L<sub>T1</sub> è la lunghezza cumulata delle trave T1 per il piano terra [m]
- L'<sub>T1</sub> è la lunghezza cumulata delle trave T1 per il primo piano [m]
- e è lo spessore del solai in Xlam [m]
- A<sub>1</sub> è l'area al piano terra sostenuta della struttura in acciaio [m<sup>2</sup>]
- A<sub>2</sub> è l'area al primo piano sostenuta della struttura in acciaio [m<sup>2</sup>]
- h è l'altezza della facciata continua al piano terra [m]
- h' è l'altezza della facciata continua al primo piano [m]
- L<sub>1</sub> è la lunghezza della facciata continua al piano terra [m]
- L<sub>2</sub> è la lunghezza della facciata continua al primo piano [m]

$$P_{u1} = 324.47 \text{ kN}$$

$$P_{u2} = 1049.3 \text{ kN}$$

$$0.07P_{u1} = 22.71 \text{ kN}$$

$$0.07P_{u2} = 73.45 \text{ kN}$$

Per risolvere questo portico, abbiamo usato il software RDM LeMans. Questo software permette di studiare di maniera statica una struttura. L'uso è molto semplice, come segue:

- Definire la posizione dei nodi della struttura

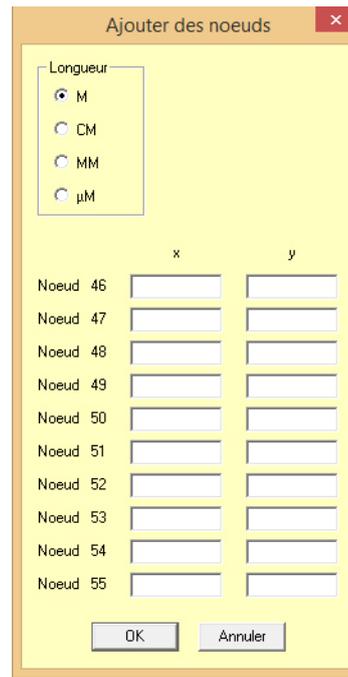


figura X.439: Definizione dei nodi della struttura

- Definire i collegamenti fra le trave e i pilastri: collegamento rigido-rigido, rotula-rotula, rigido-rotula.



figura X.440: Scelta dei collegamenti fra i diversi elementi della struttura

- Definir i collegamenti con la terra: incastro,

rotula, appoggio, elastico...

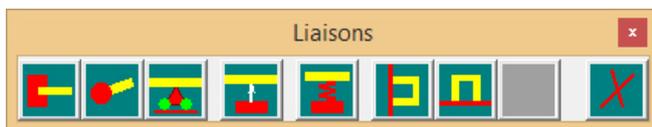


figura X.441: Scelta dei collegamenti dei pilastri con la terra

- Definire i carichi: puntuali, lineari, momento...



figura X.442: Scelta dei carichi

Nel nostro caso, abbiamo:

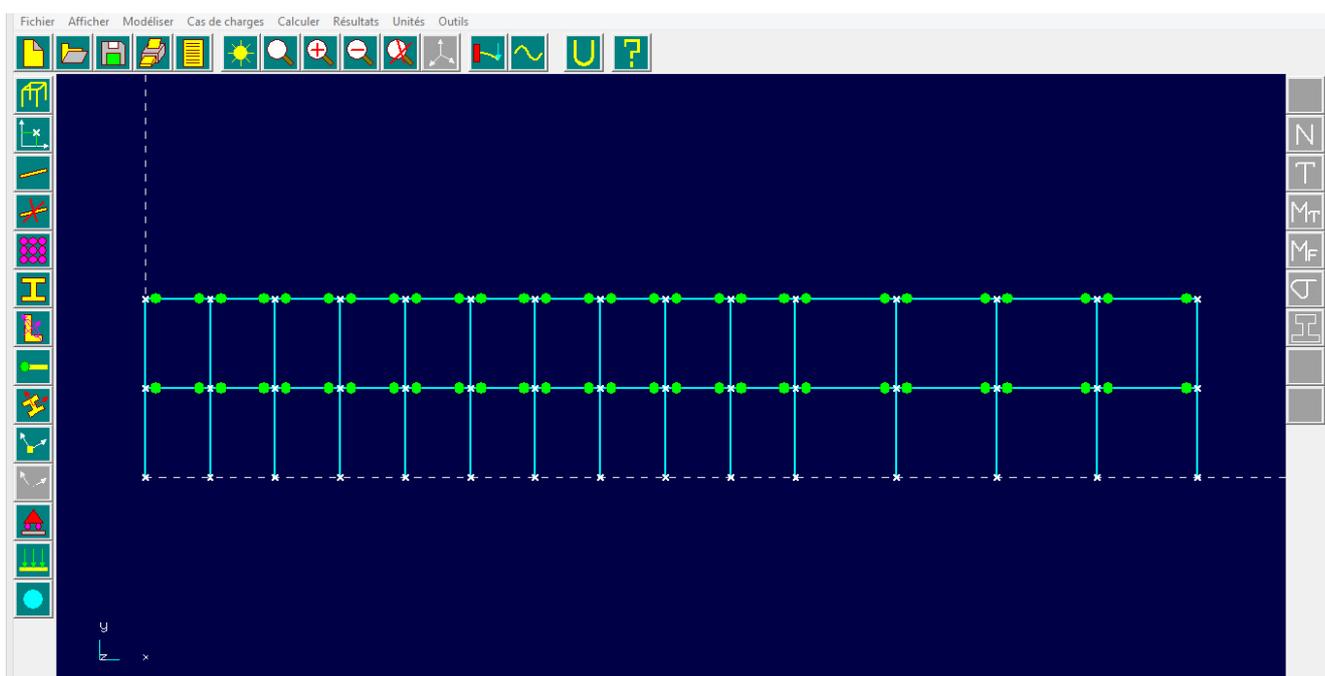


figura X.443: Modellizzazione del portico su RdM LeMans - Collegamenti fra i diversi elementi della struttura

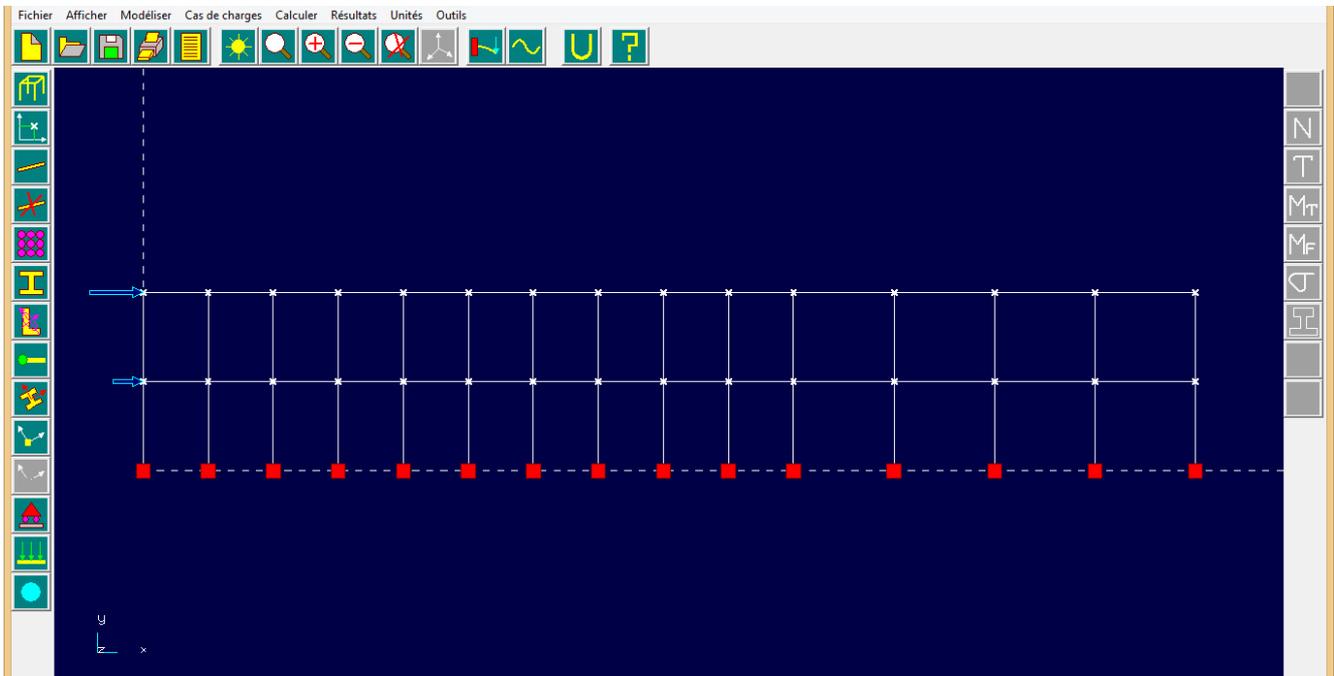


figura X.444: Modellizzazione del portico su RdM LeMans - Collegamenti sulla terra e carichi sulla struttura

I risultati sono:

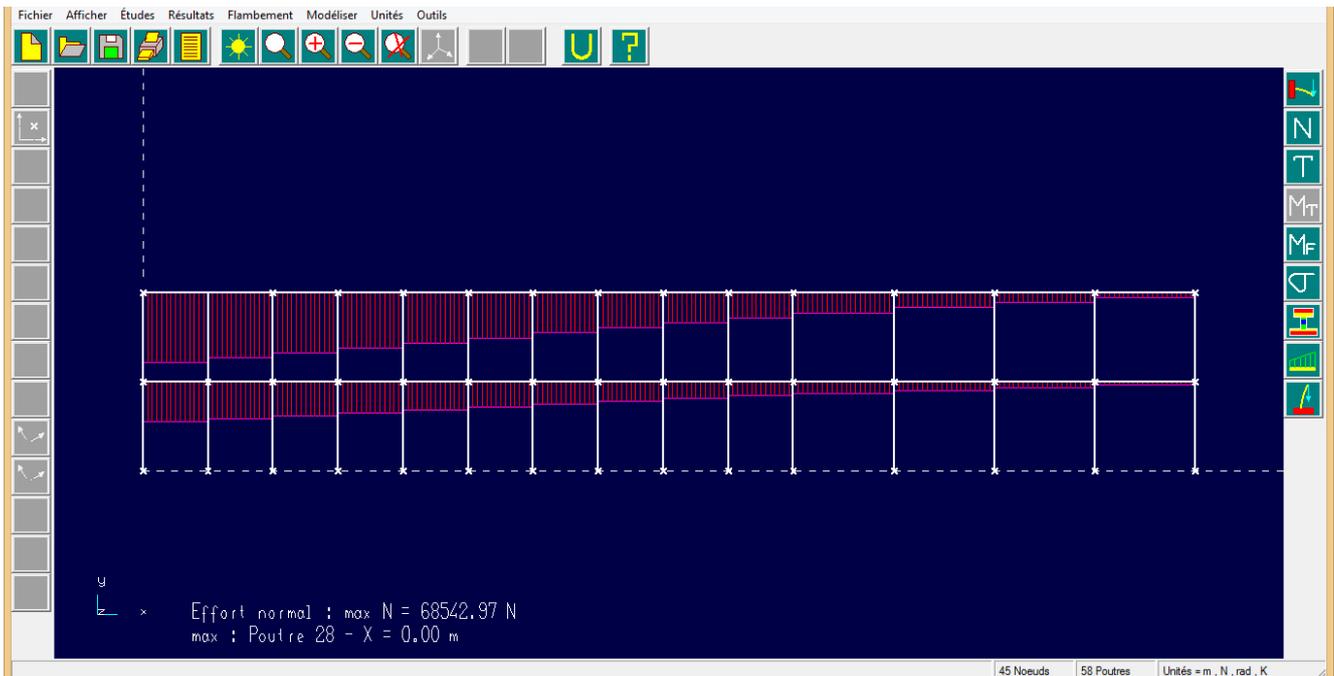


figura X.445: Risultati del portico su RdM LeMans - Taglio

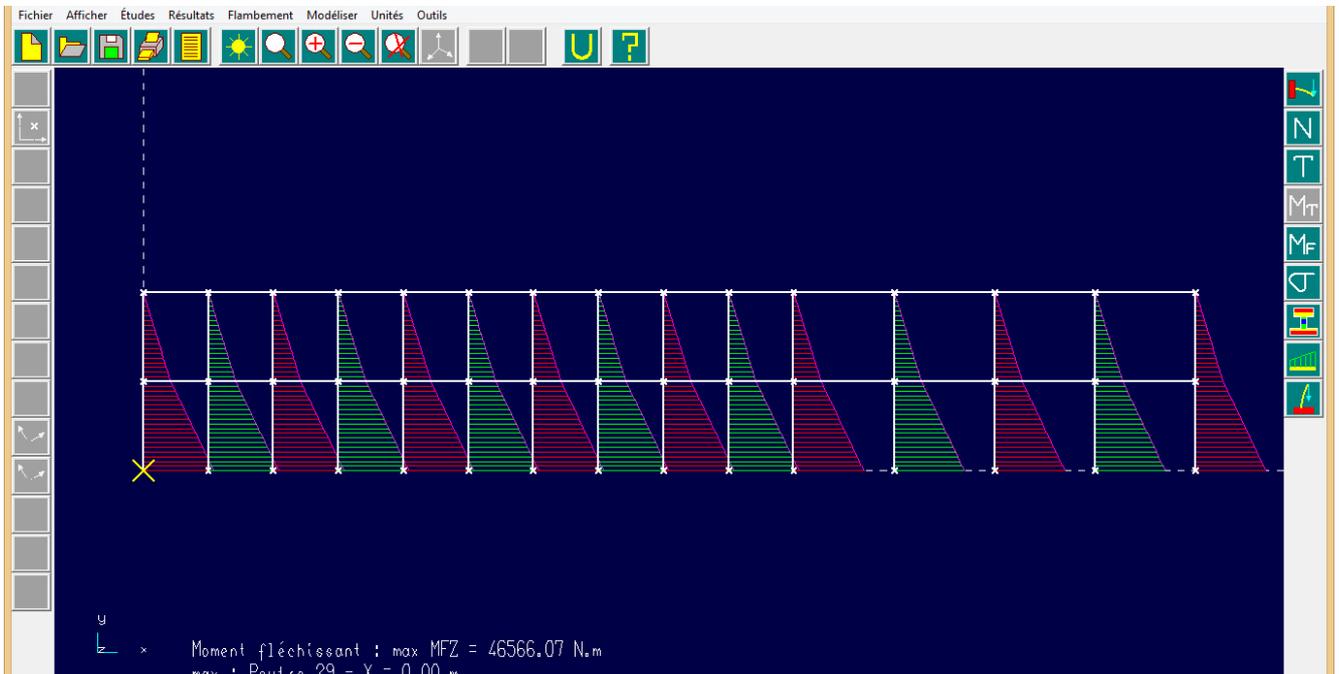


figura X.446: Risultati del portico su RdM LeMans - Momento

### ► Resistenza al taglio

Verifichiamo:

$$N_{Ed} \leq N_{c,rd}$$

$$N_{c,rd} = \frac{A_v f_{yk}}{\sqrt{3} \gamma_{M0}}$$

$$A_v = A - 2bt_f + (t_w + 2r)t_f$$

$$A_{vmin} = \frac{N_{Ed} \sqrt{3} \gamma_{M0}}{f_{yk}} = 10,67 \text{ cm}^2$$

dove:

- $N_{Ed}$  è il taglio di calcolo [kN]
- $N_{c,rd}$  è la resistenza di calcolo al taglio della sezione [kN]
- $A_v$  è l'area resistente a taglio [m<sup>2</sup>]
- $b$  è la larghezza delle ali per i profilati [m]
- $t_f$  è lo spessore delle ali [m]
- $t_w$  è lo spessore dell'anima [m]
- $r$  è il raggio di curvatura [m]

$$N_{ed} = 68.5 \text{ kN}$$

$$A_{vmin} = 4.53 \text{ cm}^2$$

Per avere  $N_{ed} < N_{c,rd}$  si deve scegliere una trave IPE 100:

$$A_{v\_IPE100} = 5.1 \text{ cm}^2$$

Per soddisfare tutte le verifiche si deve scegliere una trave IPE 100.

### 3. DIMENSIONAMENTO DEI PILASTRI

#### a) Fattore d'imperfezione in funzione della geometria della trave

La tabella seguente sarà usata per il dimensionamento dei pilastri in acciaio:

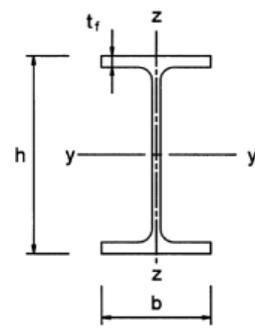
Sezione trasversale	Limite	Instabilità secondo l'asse	Curva di instabilità	
			S 235 S 275 S 355 S 420	S 460
Sezioni ad I laminate 	$h/b > 1,2$	$t_f \leq 40 \text{ mm}$ $y - y$ $z - z$	a	$a_0$
			$40 \text{ mm} < t_f \leq 100 \text{ mm}$ $y - y$ $z - z$	b
	$h/b \leq 1,2$	$t_f \leq 100 \text{ mm}$ $y - y$ $z - z$		b
			$t_f > 100 \text{ mm}$ $y - y$ $z - z$	d

Tabella 10.43. Estratto di [tableau 6.2 in NF EN 1991-1-1:2005]

Curva di instabilità	$a_0$	a	b	c	d
Fattore d'imperfezione $\alpha$	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

Tabella 10.44. Estratto di [tableau 6.1 in NF EN 1991-1-1:2005]

figura X.447: Tabella del fattore d'imperfezione in funzione della geometria della trave

## b) PILASTRO P<sub>1</sub>, Elemento inflesso e compresso

Il pilastro P<sub>1</sub> è inflesso e compresso. Non si può verificare prima la resistenza alla flessione poi la resistenza alla compressione.

Per dimensionare questo pilastro seguiamo la circolare del 2 febbraio 2009, n.617 - Istruzioni per l'applicazione delle "Nuove norme tecniche per le costruzioni" per la stabilità delle membrature inflesse e compresse [C4.2.4.1.3.3].

Nel caso di aste prismatiche soggette a compressione N<sub>Ed</sub> e a momenti flettenti M<sub>Ed</sub> si dovrà controllare che risulti:

$$Eq = (N_{Ed} \gamma_{M1}) / (\chi_{min} f_{yk} A) + (M_{eq,Ed} \gamma_{M1}) / [f_{yk} W (1 - N_{Ed} / N_{cr})]$$

$$Eq \leq 1$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \lambda^2}}$$

$$\Phi = 0,5[1 + \alpha(\lambda - 0,2)] + \lambda^2$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{A f_{yk}}{N_{cr}}}$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_0^2}$$

dove:

- $\chi_{min}$  è il minimo fattore  $\chi$  relativo all'inflessione intorno agli assi principali di inerzia [-]
- W è il modulo resistente elastico per le sezioni di classe 3 e il modulo resistente plastico per le sezioni di classe 1 e 2 [cm<sup>3</sup>]
- N<sub>cr</sub> è il carico critico euleriano relativo all'inflessione intorno agli assi principali di inerzia [kN]
- M<sub>eq,Ed</sub> è il valore equivalente del momento [kNm]
- $\lambda$  è la snellezza adimensionale [-]
- $\alpha$  è il fattore d'imperfezione [-]

Se il momento flettente varia lungo l'asta si assume, per ogni asse principale di inerzia,

$$M_{eq,Ed} = 1,3 M_{m,Ed}$$

essendo M<sub>m,Ed</sub> il valore medio del momento flettente, con la limitazione

$$0,75 M_{max,Ed} \leq M_{eq,Ed} \leq M_{max,Ed}$$

$$N_{Ed,T1} = p_{1,T1} L_{T1} + P_{1,T1} = 74,8 \text{ kN}$$

$$M_{Ed,T1} = p_{1,T1} L_{T1}^2 / 2 + P_{1,T1} L_{T1} = 117,05 \text{ kNm}$$

Il fattore d'imperfezione viene determinato usando la "figura X.447: Tabella del fattore d'imperfezione in funzione della geometria della trave" secondo la NF

EN 1993-1-1:2005. Abbiamo:

- h/b = 1, per un pilastro HEB 180
- Lo spessore delle ali inferiore a 100mm
- La curva di instabilità S275

$$N_{Ed} = N_{Ed,T1} + \text{Peso Proprio}$$

$$M_{m,Ed} = M_{Ed,T1} \cdot 2/3 = 78,04 \text{ kNm}$$

$$87,79 = 0,75 M_{max,Ed} \leq 1,3 M_{m,Ed} = 101,45 \leq M_{max,Ed} = 117,05$$

Verifichiamo per un HEB 200:

	Valore	Unità
N <sub>Ed</sub>	81.93	kN
γ <sub>M1</sub>	1.05	-
χ <sub>min</sub>	0.04	-
f <sub>yk</sub>	275	N/mm <sup>2</sup>
A	78.1	cm <sup>2</sup>
M <sub>eq,Ed</sub>	101.45	kNm
W	570	cm <sup>3</sup>
N <sub>cr</sub>	908.4	kN
λ	4.86	-
Φ	13.11	-
α	0.34	-
Eq	0.85	VERIFICATO

figura X.448: Verifica del dimensionamento del pilastro P<sub>1</sub> come HEB 200

Verifichiamo per un HEB 180:

	Valore	Unità
N <sub>Ed</sub>	80.75	kN
γ <sub>M1</sub>	1.05	-
χ <sub>min</sub>	0.03	-
f <sub>yk</sub>	275	N/mm <sup>2</sup>
A	65.3	cm <sup>2</sup>
M <sub>eq,Ed</sub>	101.45	kNm
W	426	cm <sup>3</sup>
N <sub>cr</sub>	610.97	kN
λ	5.42	-
Φ	16.08	-
α	0.34	-
Eq	1.2	NON VERIFICATO

figura X.449: Verifica del dimensionamento del pilastro P<sub>1</sub> come HEB 180

Il pilastro P<sub>1</sub> deve essere un HEB 200.

### c) PILASTRO P<sub>2a</sub>, Elemento inflesso e compresso

Il pilastro P<sub>2a</sub> è inflesso e compresso. Non si può verificare prima la resistenza alla flessione poi la resistenza alla compressione.

Per dimensionare questo pilastro seguiamo la circolare del 2 febbraio 2009, n.617 - Istruzioni per l'applicazione delle "Nuove norme tecniche per le costruzioni" per la stabilità delle membrature inflesse e compresse [C4.2.4.1.3.3].

Nel caso di aste prismatiche soggette a compressione N<sub>Ed</sub> e a momenti flettenti M<sub>Ed</sub> si dovrà controllare che risulti:

$$Eq = (N_{Ed} \gamma_{M1}) / (\chi_{min} f_{yk} A) + (M_{eq,Ed} \gamma_{M1}) / [f_{yk} W(1 - N_{Ed} / N_{cr})]$$

$$Eq \leq 1$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \lambda^2}}$$

$$\Phi = 0,5[1 + \alpha(\lambda - 0,2) + \lambda^2]$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{A f_{yk}}{N_{cr}}}$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_0^2}$$

dove:

- $\chi_{min}$  è il minimo fattore  $\chi$  relativo all'inflessione intorno agli assi principali di inerzia [-]
- W è il modulo resistente elastico per le sezioni di classe 3 e il modulo resistente plastico per le sezioni di classe 1 e 2 [cm<sup>3</sup>]
- N<sub>cr</sub> è il carico critico euleriano relativo all'inflessione intorno agli assi principali di inerzia [kN]
- M<sub>eq,Ed</sub> è il valore equivalente del momento [kNm]
- $\lambda$  è la snellezza adimensionale [-]
- $\alpha$  è il fattore d'imperfezione [-]

Se il momento flettente varia lungo l'asta si assume, per ogni asse principale di inerzia,

$$M_{eq,Ed} = 1,3 M_{m,Ed}$$

essendo M<sub>m,Ed</sub> il valore medio del momento flettente, con la limitazione

$$0,75 M_{max,Ed} \leq M_{eq,Ed} \leq M_{max,Ed}$$

$$N_{Ed,T1} = p_{1,T1} L_{T1} + P_{1,T1} = 74,8 \text{ kN}$$

$$N_{Ed,T1'} = p_{1,T1} L_{T1'} + P_{1,T1} = 91,53 \text{ kN}$$

$$N_{Ed,T2} = 163,16 \text{ kN}$$

$$M_{Ed,T1} = p_{1,T1} L_{T1}^2 / 2 + P_{1,T1} L_{T1} = 117,05 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed,T1'} = p_{1,T1} L_{T1'}^2 / 2 + P_{1,T1} L_{T1'} = 182,76 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed,T2} = 0 \text{ kNm}$$

Il fattore d'imperfezione viene determinato usando la "figura X.447: Tabella del fattore d'imperfezione in funzione della geometria della trave" secondo la NF EN 1993-1-1:2005. Abbiamo:

- h/b = 1, per un pilastro HEB 180
- Lo spessore delle ali inferiore a 100mm
- La curva di instabilità S275

$$N_{Ed} = N_{Ed,T1} + N_{Ed,T1'} + 3N_{Ed,T2} + N_{pesoP2}$$

$$M_{m,Ed} = (2M_{Ed,T1} + M_{Ed,T1'}) / 3 = 117,05 \text{ kNm}$$

$$224,86 = 0,75 M_{max,Ed} \leq 1,3 M_{m,Ed} = 180,64 \leq M_{max,Ed} = 299,81$$

Verifichiamo per un HEB 300:

	Valore	Unità
N <sub>Ed</sub>	669.41	kN
γ <sub>M1</sub>	1.05	-
χ <sub>min</sub>	0.09	-
f <sub>yk</sub>	275	N/mm <sup>2</sup>
A	149	cm <sup>2</sup>
M <sub>eq,Ed</sub>	224.86	kNm
W	1680	cm <sup>3</sup>
N <sub>cr</sub>	4013.5	kN
λ	3.2	-
Φ	6.11	-
α	0.34	-
Eq	0.81	VERIFICATO

figura X.450: Verifica del dimensionamento del pilastro P<sub>2a</sub> come HEB 300

Verifichiamo per un HEB 260:

	Valore	Unità
N <sub>Ed</sub>	666.62	kN
γ <sub>M1</sub>	1.05	-
χ <sub>min</sub>	0.07	-
f <sub>yk</sub>	275	N/mm <sup>2</sup>
A	118	cm <sup>2</sup>
M <sub>eq,Ed</sub>	224.86	kNm
W	1150	cm <sup>3</sup>
N <sub>cr</sub>	2379.3	kN
λ	3.69	-
Φ	7.91	-
α	0.34	-
Eq	1.36	NON VERIFICATO

figura X.451: Verifica del dimensionamento del pilastro P<sub>2a</sub> come HEB 260

Il pilastro P<sub>2a</sub> deve essere un HEB 300.

## d) Pilastro P<sub>2B</sub>, Elemento compresso

### 1) Verifica della resistenza

Carichi sul pilastro P<sub>2b</sub> senza prendere in conto i carichi delle travi T<sub>1</sub> e T<sub>2</sub> che abbiamo già calcolati nelle parte prima:

Nome	Carichi	Unità	Carichi lineare (kN/m)
G <sub>1a</sub>	Peso Proprio P <sub>2b</sub>	72.9 kg/m	0.73

figura X.452: Tabella dei carichi sul pilastro P2

$$P_{up2} = 1.35 (G_1 + G_2) + 1.5 (Q_1 + Q_2) = 0.98 \text{ kN/m}$$

$$N_{Ed} \leq N_{c,rd}$$

$$N_{c,rd} = \frac{A f_{yk}}{\gamma_{M0}}$$

$$A_{min} = \frac{N_{Ed} \gamma_{M0}}{f_{yk}}$$

dove:

- N<sub>Ed</sub> è il taglio di calcolo [kN]
- N<sub>c,rd</sub> è la resistenza di calcolo al taglio della sezione [kN]
- f<sub>yk</sub> è la resistenza caratteristica a snervamento dell'acciaio (f<sub>yk</sub> = 275 N/mm<sup>2</sup>)
- γ<sub>M0</sub> è il coefficiente di sicurezza per la resistenza delle membrature e la stabilità (γ<sub>M0</sub> = 1,05)

$$N_{Ed} = 3P_{ut2} b/L_{t2} + P_{up2} L_{p2} = 253.95 \text{ kN/m}$$

$$A_{min} = 9.50 \text{ cm}^2$$

Con un pilastro HEB 160 abbiamo:

$$A = 54.3 \text{ cm}^2 > A_{min}$$

VERIFICATO

### 2) Verifica della stabilità

$$N_{Ed} \leq N_{b,rd}$$

$$N_{b,rd} = \frac{\chi A f_{yk}}{\gamma_{M1}}$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \lambda^2}}$$

$$\Phi = 0,5[1 + \alpha(\lambda - 0,2)] + \lambda^2$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{A f_{yk}}{N_{cr}}}$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 E I}{L_0^2}$$

dove:

- χ<sub>min</sub> è il minimo fattore χ relativo all'inflessione intorno agli assi principali di inerzia [-]
- W è il modulo resistente elastico per le sezioni di classe 3 e il modulo resistente plastico per le sezioni di classe 1 e 2 [cm<sup>3</sup>]
- N<sub>cr</sub> è il carico critico elastico basato sulle proprietà della sezione lorda e sulla lunghezza di libera inflessione L<sub>0</sub> dell'asta [kN]
- M<sub>eq,Ed</sub> è il valore equivalente del momento [kNm]
- λ è la snellezza adimensionale [-]
- α è il fattore d'imperfessione [-]

Nome	Valore	Unità
L <sub>0</sub>	11.4	m
E	210x10 <sup>6</sup>	kN/m <sup>2</sup>
f <sub>yk</sub>	275	N/mm <sup>2</sup>
A	54.3	cm <sup>2</sup>

figura X.453: Parametri di calcolo per il dimensionamento del pilastro P<sub>2B</sub>

Nome	Valore	Unità	Nome	Valore	Unità
J <sub>x-x</sub>	8091	cm <sup>4</sup>	J <sub>z-z</sub>	2843	cm <sup>4</sup>
N <sub>cr</sub>	1290.4	kN	N <sub>cr</sub>	453.4	kN
λ	1.39	-	λ	2.35	-
α	0.34	-	α	0.49	-
Φ	1.67	-	Φ	3.79	-
χ	0.38	-	χ	0.15	-
N <sub>b,rd</sub>	917.18	kN	N <sub>b,rd</sub>	352.8	kN

figura X.454: Calcoli di resistenza all'instabilità per l'asse y-y e per l'asse z-z di un HEB 220 per il pilastro P2.

Il fattore d'imperfessione viene determinato usando la "figura X.447: Tabella del fattore d'imperfessione in funzione della geometria della trave" secondo la NF EN 1993-1-1:2005. Abbiamo:

- h/b = 1, per un pilastro HEB 240
- Lo spessore delle ali inferiore a 100mm
- La curva di instabilità S275

Sull'asse x-x:

$$N_{Ed}/N_{b,rd} = 0.28$$

Sull'asse z-z:

$$N_{Ed}/N_{b,rd} = 0.72$$

Nei due casi abbiamo N<sub>Ed</sub>/N<sub>b,rd</sub> ≤ 1

VERIFICATO

Il pilastro P<sub>2b</sub> è un HEB 220.

## e) PILASTRO P<sub>3</sub>, Elemento compresso

### 1) Verifica della resistenza

Carichi sul pilastro P<sub>3</sub> senza prendere in conto i carichi delle travi T<sub>3</sub> che abbiamo già calcolati nella parte prima:

Nome	Carichi	Unità	Carichi lineare (kN/m)
G <sub>1a</sub>	Peso Proprio P <sub>3</sub>	20.8 kg/m	0.21

figura X.455: Tabella dei carichi sul pilastro P2

$$P_{up2} = 1.35 (G_1 + G_2) + 1.5 (Q_1 + Q_2) = 0.28 \text{ kN/m}$$

$$N_{Ed} \leq N_{c,rd}$$

$$N_{c,rd} = \frac{A f_{yk}}{\gamma_{M0}}$$

$$A_{min} = \frac{N_{Ed} \gamma_{M0}}{f_{yk}}$$

dove:

- N<sub>Ed</sub> è il taglio di calcolo [kN]
- N<sub>c,rd</sub> è la resistenza di calcolo al taglio della sezione [kN]
- f<sub>yk</sub> è la resistenza caratteristica a snervamento dell'acciaio (f<sub>yk</sub> = 275 N/mm<sup>2</sup>)
- γ<sub>M0</sub> è il coefficiente di sicurezza per la resistenza delle membrature e la stabilità (γ<sub>M0</sub> = 1,05)

$$N_{ed} = P_{uT3} L_{T3} / 2 + P_{up2} = 25.07 \text{ kN}$$

$$A_{min} = 0.96 \text{ cm}^2$$

Con un pilastro HEB 100 abbiamo:

$$A = 26 \text{ cm}^2 > A_{min}$$

VERIFICATO

### 2) Verifica della stabilità

$$N_{Ed} \leq N_{b,rd}$$

$$N_{b,rd} = \frac{\chi A f_{yk}}{\gamma_{M1}}$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \lambda^2}}$$

$$\Phi = 0,5[1 + \alpha(\lambda - 0,2) + \lambda^2]$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{A f_{yk}}{N_{cr}}}$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 E I}{L_0^2}$$

dove:

• χ<sub>min</sub> è il minimo fattore χ relativo all'inflessione intorno agli assi principali di inerzia [-]

• W è il modulo resistente elastico per le sezioni di classe 3 e il modulo resistente plastico per le sezioni di classe 1 e 2 [cm<sup>3</sup>]

• N<sub>cr</sub> è il carico critico elastico basato sulle proprietà della sezione lorda e sulla lunghezza di libera inflessione L<sub>0</sub> dell'asta [kN]

• M<sub>eq,Ed</sub> è il valore equivalente del momento [kNm]

• λ è la snellezza adimensionale [-]

• α è il fattore d'imperfezione [-]

Nome	Valore	Unità
L <sub>0</sub>	3.80	m
E	210x10 <sup>6</sup>	kN/m <sup>2</sup>
f <sub>yk</sub>	275	N/mm <sup>2</sup>
A	26	cm <sup>2</sup>

figura X.456: Valori

Nome	Valore	Unità	Nome	Valore	Unità
J <sub>x-x</sub>	450	cm <sup>4</sup>	J <sub>z-z</sub>	167	cm <sup>4</sup>
N <sub>cr</sub>	645.9	kN	N <sub>cr</sub>	239.7	kN
λ	1.05	-	λ	1.73	-
α	0.34	-	α	0.49	-
Φ	1.2	-	Φ	2.37	-
χ	0.56	-	χ	0.25	-
N <sub>b,rd</sub>	384.28	kN	N <sub>b,rd</sub>	171	kN

figura X.457: Calcoli di resistenza all'instabilità per l'asse y-y e per l'asse z-z di un HEB 240 per il pilastro P2.

Il fattore d'imperfezione viene determinato usando le tabelle 6.1 e 6.2 in NF EN 1993-1-1:2005. Abbiamo:

- h/b = 1, per un pilastro HEB 240
- Lo spessore delle ali inferiore a 100mm
- La curva di instabilità S275

Sull'asse x-x:

$$N_{Ed} / N_{b,rd} = 0.07$$

Sull'asse z-z:

$$N_{Ed} / N_{b,rd} = 0.15$$

Nei due casi abbiamo N<sub>Ed</sub> / N<sub>b,rd</sub> ≤ 1

VERIFICATO

Il pilastro P<sub>3</sub> è un HEB 100.

## f) PILASTRO P<sub>4</sub>, Elemento compresso

### 1) Verifica della resistenza

Carichi sul pilastro P<sub>4</sub> senza prendere in conto i carichi delle travi T<sub>4</sub> che abbiamo già calcolati nella parte prima:

Nome	Carichi	Unità	Carichi lineare (kN/m)
G <sub>1a</sub>	Peso Proprio P <sub>4</sub>	20.8 kg/m	0.21

figura X.458: Tabella dei carichi sul pilastro P2

$$P_{up2} = 1.35 (G_1 + G_2) + 1.5 (Q_1 + Q_2) = 0.28 \text{ kN/m}$$

$$N_{Ed} \leq N_{c,rd}$$

$$N_{c,rd} = \frac{A f_{yk}}{\gamma_{M0}}$$

$$A_{min} = \frac{N_{Ed} \gamma_{M0}}{f_{yk}}$$

$$N_{ed} = P_{ua} a / L_{tot1} + P_{ub} (L+a) / L_{tot1} + P_{ud} d / L_{tot2} + P_{uc} (L+d) / L_{tot2} + p(L_{tot1} + L_{tot2}) / 2 + P_{up2}$$

dove:

- N<sub>Ed</sub> è il taglio di calcolo [kN]
- N<sub>c,rd</sub> è la resistenza di calcolo al taglio della sezione [kN]
- f<sub>yk</sub> è la resistenza caratteristica a snervamento dell'acciaio (f<sub>yk</sub> = 275 N/mm<sup>2</sup>)
- γ<sub>M0</sub> è il coefficiente di sicurezza per la resistenza delle membrature e la stabilità (γ<sub>M0</sub> = 1,05)

$$N_{ed} = 91.81 \text{ kN}$$

$$A_{min} = 3.57 \text{ cm}^2$$

Con un pilastro HEB 100 abbiamo:

$$A = 26 \text{ cm}^2 > A_{min}$$

VERIFICATO

### 2) Verifica della stabilità

$$N_{Ed} \leq N_{b,rd}$$

$$N_{b,rd} = \frac{\chi A f_{yk}}{\gamma_{M1}}$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \lambda^2}}$$

$$\Phi = 0,5[1 + \alpha(\lambda - 0,2)] + \lambda^2$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{A f_{yk}}{N_{cr}}}$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_0^2}$$

dove:

- χ<sub>min</sub> è il minimo fattore χ relativo all'inflessione intorno agli assi principali di inerzia [-]
- W è il modulo resistente elastico per le sezioni di classe 3 e il modulo resistente plastico per le sezioni di classe 1 e 2 [cm<sup>3</sup>]
- N<sub>cr</sub> è il carico critico elastico basato sulle proprietà della sezione lorda e sulla lunghezza di libera inflessione L<sub>0</sub> dell'asta [kN]
- M<sub>eq,Ed</sub> è il valore equivalente del momento [kNm]
- λ è la snellezza adimensionale [-]
- α è il fattore d'imperfektion [-]

Nome	Valore	Unità
L <sub>0</sub>	3.80	m
E	210x10 <sup>6</sup>	kN/m <sup>2</sup>
f <sub>yk</sub>	275	N/mm <sup>2</sup>
A	26	cm <sup>2</sup>

figura X.459: Valori

Nome	Valore	Unità	Nome	Valore	Unità
J <sub>x-x</sub>	450	cm <sup>4</sup>	J <sub>z-z</sub>	167	cm <sup>4</sup>
N <sub>cr</sub>	645.9	kN	N <sub>cr</sub>	239.7	kN
λ	1.05	-	λ	1.73	-
α	0.34	-	α	0.49	-
Φ	1.2	-	Φ	2.37	-
χ	0.56	-	χ	0.25	-
N <sub>b,rd</sub>	384.28	kN	N <sub>b,rd</sub>	171	kN

figura X.460: Calcoli di resistenza all'instabilità per l'asse y-y e per l'asse z-z di un HEB 240 per il pilastro P2.

Il fattore d'imperfektion viene determinato usando le tabelle 6.1 e 6.2 in NF EN 1993-1-1:2005. Abbiamo:

- h/b = 1, per un pilastro HEB 240
- Lo spessore delle ali inferiore a 100mm
- La curva di instabilità S275

Sull'asse x-x:

$$N_{Ed} / N_{b,rd} = 0.24$$

Sull'asse z-z:

$$N_{Ed} / N_{b,rd} = 0.55$$

Nei due casi abbiamo N<sub>Ed</sub> / N<sub>b,rd</sub> ≤ 1

VERIFICATO

Il pilastro P<sub>4</sub> è un HEB 100.

## E. STRUTTURA IN LEGNO

Il modulo aggiunto sull'edificio ha una struttura in legno per motivi spiegati prima nella parte progetto tecnologico. La ragione legata alla struttura è quella di alleggerire il più possibile il modulo così non bisogna rinforzare la struttura esistente in calcestruzzo.

Il modulo ha una struttura capace di sostenere tutti i Velux sono sul tetto.

### 1. CARATTERISTICHE DEL LEGNO

Scegliamo un legno massiccio: l'abete di tipo S2

Valori caratteristici di resistenza e modulo elastico		Abete (Nord)
<b>Resistenze (MPa)</b>		<b>S2</b>
flessione	$f_{m,k}$	23
trazione parallela alla fibratura	$f_{t,0,k}$	14
trazione perpendicolare alla fibratura	$f_{t,90,k}$	0.4
compressione parallela alla fibratura	$f_{c,0,k}$	20
compressione perpendicolare alla fibratura	$f_{c,90,k}$	2.9
taglio	$f_{v,k}$	2.5
<b>Modulo elastico (GPa)</b>		
modulo elastico medio parallelo alle fibre	$E_{0,mean}$	12
modulo elastico caratteristico parallelo alle fibre	$E_{0,05}$	7
modulo elastico medio perpendicolare alle fibre	$E_{90,mean}$	0.35
modulo di taglio medio	$G_{mean}$	0.66
<b>Massa volumica (kg/m<sup>3</sup>)</b>		
massa volumica caratteristica	$\rho_k$	380
massa volumica media	$\rho_m$	415

figura X.461: Classificazione dell'abete, secondo UNI 11035

Il valore  $X_d$  di una proprietà di resistenza del materiale viene calcolata mediante la relazione:

$$X_d = k_{mod} \cdot X_k / \gamma_m$$

dove:

- $\gamma_m$ , il coefficiente di sicurezza parziale per le proprietà dei materiali.
- $k_{mod}$ , il coefficiente di correzione che tiene conto dell'effetto, sui parametri di resistenza, sia della durata del carico sia dell'umidità degli elementi.
- $X_k$ , il valore caratteristico specifico da norme pertinenti o determinato sulla base di prove svolte in condizioni definite dalle medesime norme.

Materiali	$\gamma_m$
<b>Stati limite ultimi</b>	
<i>combinazioni fondamentali</i>	
legno massiccio	1.3
legno lamellare incollato	1.25
LVL, compensato, OSB	1.2
panelli di particelle o di fibre	1.3
unioni	1.3
<i>combinazioni eccezionali</i>	
<b>Stati limiti di esercizio</b>	1.0

figura X.462: Tabella dei coefficienti di sicurezza parziali per le proprietà dei materiali

Materiale	Riferimento	Classe di servizio	Classe di durata del carico				
			Permanente	Lunga	Media	Breve	Istantaneo
Legno massiccio	EN 14081-1	1	0.60	0.70	0.80	0.90	1.10
		2	0.60	0.70	0.80	0.90	1.10
		3	0.50	0.55	0.65	0.70	0.90

figura X.463: Tabella dei valori di  $k_{mod}$  per i prodotti strutturali a base di legno

CLASSE DI DURATA DEL CARICO	DURATA DEL CARICO CARATTERISTICO	ESEMPI
Permanenti	più di 10 anni	Peso Proprio
Lunga durata	da 6 mesi a 10 anni	Attrezzature fisse, stoccaggio
Media durata	da 1 settimana a 6 mesi	Carichi di servizio, neve $H > 1000m$
Breve durata	meno di 1 settimana	Neve $H < 1000m$ , carico di manutenzione
Istantaneo	-	carichi accidentali, vento, neve eccezionale

figura X.464: Classi di durata del carico

Classe di servizio 1: Struttura interna in un ambiente secca. L'umidità media è stabilizzata fra 7% e 13%.

Classe di servizio 2: Capriata coperta con variazione igrometriche, muri con sottostruttura in legno...

Classe di servizio 3: Condizione climatiche con umidità media superiore a quella della classe di servizio 2.

Se una combinazione di carico comprende azioni appartenenti a differenti classi di durata del carico si dovrà scegliere un valore di  $k_{mod}$  che corrisponde alla

azione di minor durata.

Per il progetto, l'azione di minor durata è il carico di manutenzione. La classe di servizio è la seconda.

$$k_{mod} = 0.9$$

Usiamo il legno massiccio, quindi  $\gamma_m = 1.3$

Di conseguenza si può calcolare i valori  $X_d$  delle proprietà di resistenza dell'abete S2:

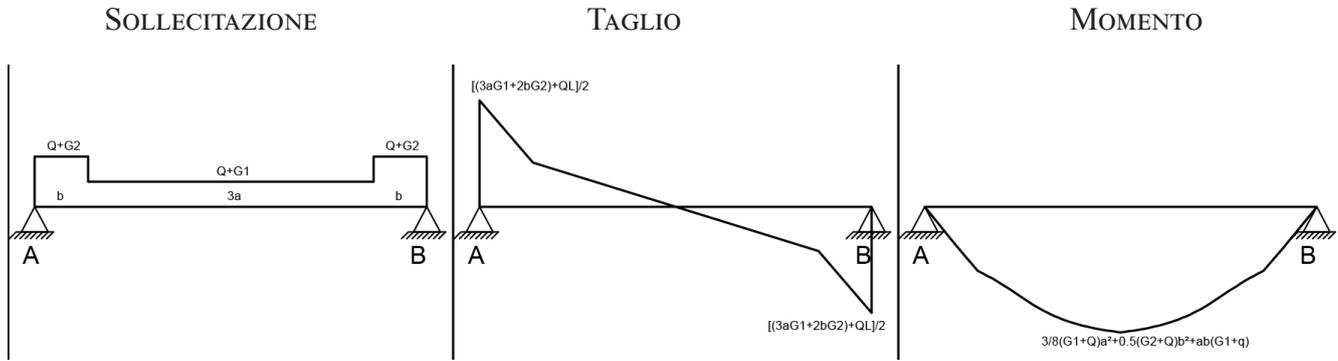
Valori caratteristici di resistenza e modulo		Abete (Nord)
Resistenze (MPa)		S2
flessione	$f_{m,d}$	15.92
trazione parallela alla fibratura	$f_{t,0,d}$	
trazione perpendicolare alla fibratura	$f_{t,90,d}$	
compressione parallela alla fibratura	$f_{c,0,d}$	13.85
compressione perpendicolare alla fibratura	$f_{c,90,d}$	2.01
taglio	$f_{v,d}$	1.73

figura X.465: Valore  $X_d$  delle proprietà di resistenza dell'abete S2

## 2. DIMENSIONAMENTO DELLE TRAVE

### a) Formulario delle sollecitazioni presente nel progetto

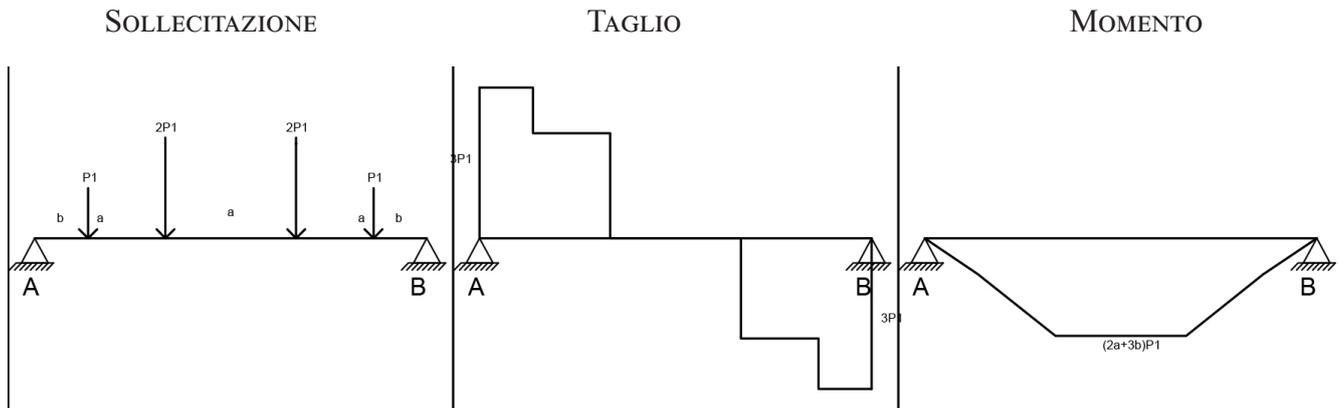
- 1) Trave con due appoggi con un carico lineare non costante



$$V_A = V_B = (3aG_1 + 2bG_2) + QL/2$$

$$M_{\max} = 3/8(G_1 + Q)a^2 + 0.5(G_2 + Q)b^2 + ab(G_1 + Q)$$

- 2) Trave con due appoggi con carichi puntuali



$$F = (69P_1L^3/648)/(E_{0,mean}J) + \chi(QL/2)/(G_{mean}A)$$

$$V_A = 3P_1 ; V_B = 3P_1$$

$$M_A = (2a+3b)P_1 ; M_B = M_A = 0$$

## b) Trave $T_{L1}$

### 1) Generalità

La trave  $T_{L1}$  misura 2.74 m e la sua larghezza d'influenza massima è di 0.82 m.

La trave  $T_{L1}$  è una trave di sostenimento del Velux e si appoggia sulla trave  $T_{L2}$ .

Per i calcoli abbiamo ipotizzato una trave in legno massiccio definita come segue:

	Dimensione	Unità
L	2.74	m
b	0.1	m
h	0.2	m
La	0.06	m
A	0.02	m <sup>2</sup>
$l_{ef}$	2.81	m

figura X.466: Caratteristiche geometriche della trave  $T_{L1}$

Nome	Carichi	Unità	Carichi lineari (kN/m)
$G_1$	Peso Proprio	380 kg/m <sup>3</sup>	0.21
$G_{2a}$	Chiusure orizzontale CO5	42.6 kg/m <sup>2</sup>	0.08
$G_{2b}$	Velux	106.5 kg	0.30
$Q_{1a}$	Carichi in esercizio	0.4 kN/m <sup>2</sup>	0.33
$Q_{1b}$	Carichi di neve	0.88 kN/m <sup>2</sup>	0.72

figura X.467: Carichi sulla Trave  $T_{L1}$

### 2) Stati limite di servizio

Per dimensionare secondo lo stato limite di esercizio usiamo le diverse configurazioni per il calcolo dei carichi che agiscono sulla trave  $T_{L1}$ :

1) Configurazione rara [Equ. 6.14b in NF EN 1990:2000]

$$P_1 = G_1 + G_2 + Q_1 + \psi_{0,2} Q_2$$

$$\text{con } \psi_{0,2} = 0.7$$

2) Configurazione frequente [Equ. 6.15b in NF EN 1990:2000]

$$P_2 = G_1 + G_2 + \psi_{1,1} Q_1 + \psi_{2,2} Q_2$$

$$\text{con } \psi_{1,1} = 0.7 \text{ e } \psi_{2,2} = 0.6$$

3) Configurazione permanente [Equ. 6.16b in NF EN 1990:2000]

$$P_3 = G_1 + G_2 + \psi_{2,1} Q_1 + \psi_{2,2} Q_2$$

$$\text{con } \psi_{2,1} = 0.6 \text{ e } \psi_{2,2} = 0.6$$

	gki (kN/m)	qki (kN/m)	Pi (kN/m)
Configurazione 1)	0.58	0.83	1.41
Configurazione 2)	0.58	0.66	1.24
Configurazione 3)	0.58	0.63	1.21

figura X.468: Valore dei carichi sulla trave  $T_{L1}$

### ► Lo stato limite di deformità

Predimensionamento della trave con abbassamento massimo consentito:

Conditions	$W_{max}$
Toitures en général	L/200
Toitures supportant fréquemment du personnel autre que le personnel d'entretien	L/200
Planchers en général	L/200
Planchers et toitures supportant des cloisons en plâtre ou en autres matériaux fragiles ou rigides	L/250
Planchers supportant des poteaux (à moins que la flèche ait été incluse dans l'analyse globale de l'état limite ultime)	L/400
Cas où $W_{max}$ peut nuire à l'aspect du bâtiment	L/250

figura X.469: Valori limiti massimi consigliati per l'abbassamento verticale, secondo la norma [clausola 7.2.1(1)B in NF EN 1993-1-1/NA:2007]

Per una trave inflessa di lunghezza  $l$ , in semplice appoggio, a sezione costante e soggetta a carico uniforme  $q$ , la freccia totale massima vale quindi:

$$f_{max} = 5ql^4 / (384E_{0,mean}J) + \chi q l^2 / (8G_{mean}A)$$

dove:

- $A$  è l'area della sezione trasversale [m<sup>2</sup>]
- $J$  è il momento d'inerzia della medesima sezione [cm<sup>4</sup>]
- $\chi$  è il cosiddetto fattore di taglio della sezione (uguale a 1.2 per le sezioni rettangolari) [-]
- $q$  è il carico lineare [kN/m]

Nel caso delle deformazioni dovute all'inflessione delle travi, la freccia totale è composta da tre contributi deformativi:

$u_0$  controfreccia;

$u_1$  freccia dovuta ai carichi permanenti;

$u_2$  freccia dovuta ai carichi variabili.

La freccia netta  $u_{net}$ , riferita alla corda congiungente i punti della trave in corrispondenza degli appoggi, è data da:

$$u_{net} = u_1 + u_2 - u_0$$

Per questo caso  $u_0$  è nullo.

La deformazione finale  $u_{net,fin}$  è:

$$u_{net,fin} = u_{1,fin} + u_{2,fin}$$

dove:

- $u_{1,fin} = u_{1,ist} (1+k_{def})$ ;
- $u_{2,fin} = u_{2,ist} (1+\psi_{2,1} k_{def})$  per una deformazione finale causata dalla azione variabile principale;
- $u_{2,fin} = u_{2,ist} (\psi_{0,1} + \psi_{2,1} k_{def})$  per una deformazione finale causata dalle altre azioni variabili.

Secondo la normativa si deve verificare:

$$u_{2,ist} \leq l/300$$

$$u_{net,fin} \leq l/200$$

dove "l" è la luce libera della trave appoggiata.

Per il legno massiccio di classe di servizio 2,

$$k_{def} = 0.8$$

$$g_k = 0.58 \text{ kN/m}$$

$$u_{1,ist} = 0.66 \text{ mm}$$

$$q_k = 0.83 \text{ kN/m}$$

$$u_{2,ist} = 0.94 \text{ mm}$$

$$u_{2,ist} \leq l/300 = 9.13 \text{ mm}$$

$$u_{net,fin} = u_{1,ist} (1+k_{def}) + u_{2,ist} (1+\psi_{2,1} k_{def}) = 2.59 \text{ mm}$$

$$u_{net,fin} \leq l/200 = 13.7 \text{ mm}$$

La condizione è stata soddisfatta.

### 3) Stato Limite Ultimo

Secondo l'Eurocodice 0 (Allegato A1.2):

$$P_u = 1.35 (G_1 + G_2) + 1.5 (Q_1 + Q_2)$$

$$P_u = 2.31 \text{ kN/m}$$

Sugli appoggi abbiamo  $V_d = P_u L/2 = 3.17 \text{ kN}$

Il momento massimo è a mezzera della trave:

$$M_{max} = P_u L^2/2 = 8.69 \text{ kNm}$$

#### ► Verifica al taglio

Deve essere soddisfatta la seguente condizione:

$$\tau_d \leq f_{v,d}$$

dove:

- $\tau_d$  è la tensione massima tangenziale di progetto
- $f_{v,d}$  è la corrispondente resistenza di progetto a taglio.

Dato uno sforzo di taglio di progetto  $V_d$ , risulta:

- per sezioni rettangolari

$$\tau_d = 3V_d/(2A)$$

con A l'area di sezione sollecitata.

$$\tau_d = 0.24 \text{ MPa}$$

$$f_{v,d} = 1.73 \text{ MPa}$$

Questa condizione è soddisfatta.

#### ► Verifica alla flessione

Il coefficiente  $k_m$  tiene conto della redistribuzione degli sforzi e degli effetti di disomogeneità del materiale nella sezione: infatti, la rottura dell'elemento in flessione deviata non avviene necessariamente per raggiungimento di un valore massimo di tensione in uno degli spigoli di una sezione rettangolare (come invece si è soliti verificare in un materiale omogeneo e isotropo come l'acciaio). I valori per  $k_m$  sono:  $k_m = 0.7$  per sezioni rettangolari;  $k_m = 1.0$  per altre sezioni trasversali.

Ricordiamo infine che gli elementi inflessi devono sempre essere sottoposti alla verifica sulla condizione di instabilità e su quella di deformabilità, risultando quest'ultima spesso determinante nel dimensionamento dell'elemento.

Si deve soddisfare la seguente condizione:

$$\sigma_d = M_d/W \leq f_{m,d}$$

$$W = bh^2/6$$

$$\sigma_d = 13.03 \text{ MPa}$$

$$f_{m,d} = 15.92 \text{ MPa}$$

La condizione è soddisfatta.

#### ► Verifica alla compressione: documento Nicole

(Norme tecniche Italiane per la progettazione, esecuzione e collaudo delle COstruzioni in LEGNO)

Nel caso di compressione ortogonale alla fibratura, secondo il documento Nicole, si deve soddisfare la seguente condizione:

$$\sigma_{c,90,d} \leq f_{c,90,d}$$

con  $\sigma_{c,90,d}$  tensione di progetto a compressione ortogonale alla fibratura e  $f_{c,90,d}$  resistenza di progetto a compressione ortogonale alla fibratura.

Quest'ultima sarà calcolata mediante l'espressione:

$$\sigma_{c,90,d} = F_{90,d} / (b \cdot l_{ef})$$

dove:

- $F_{90,d}$  forza di compressione esterna ortogonale alla fibratura;
- $b$  base dell'elemento
- $l$  lunghezza di trave sulla quale agisce  $F_{90,d}$ ;
- $l_{ef}$  lunghezza efficace pari al minimo tra  $l + h/3$  e  $2l$  nel caso di confinamento su due lati; pari al minimo tra  $l + h/6$  e  $1.5l$  nel caso di confinamento solo su un lato.

$$\sigma_{c,90,d} = 3.17 / 0.1 \times 2.81 = 11.28 \text{ kN/m}^2$$

$$f_{c,90,d} = 2010 \text{ kN/m}^2$$

Questa condizione è soddisfatta.

## c) Trave $T_{L2}$

### 1) Generalità

La trave  $T_{L2}$  misura 5.68 m e la sua larghezza d'influenza massima è di 0.6 m.

La trave  $T_{L1}$  è una trave di sostenimento del Velux e si appoggia sulla trave  $T_{L2}$ .

La Trave  $T_{L2}$  ha dei carichi puntuali dovuti alle travi  $T_{L1}$  e dei carichi lineari.

Per i calcoli abbiamo ipotizzato una trave in legno massiccio definita come segue:

	Dimensione	Unità
L	5.68	m
b	0.2	m
h	0.25	m
La	0.2	m
A	0.04	m <sup>2</sup>
$l_{ef}$	5.75	m

figura X.470: Caratteristiche geometriche della trave  $T_{L2}$

Nome	Carichi	Unità	Carichi lineari (kN/m)
$G_1$	Peso Proprio	380 kg/m <sup>3</sup>	0.86
	$T_{L2}$		
$G_{2a}$	Chiusure orizzontale CO5	42.6 kg/m <sup>2</sup>	0.13 o 0.51
$Q_{1a}$	Carichi in esercizio	0.4 kN/m <sup>2</sup>	0.12
$Q_{1b}$	Carichi di neve	0.88 kN/m <sup>2</sup>	0.26

figura X.471: Carichi lineari sulla Trave  $T_{L2}$

Nome	Carichi	Unità	Carichi lineari (kN/m)
$G_1$	Peso Proprio	380 kg/m <sup>3</sup>	0.21
$G_{2a}$	Chiusure orizzontale CO5	42.6 kg/m <sup>2</sup>	0.08
$G_{2b}$	Velux	106.5 kg	0.30
$Q_{1a}$	Carichi in esercizio	0.4 kN/m <sup>2</sup>	0.33
$Q_{1b}$	Carichi di neve	0.88 kN/m <sup>2</sup>	0.72

figura X.472: Carichi puntuali dovuti alla trave  $T_{L1}$  sulla Trave  $T_{L2}$

### 2) Stati limite di servizio

Per dimensionare secondo lo stato limite di esercizio usiamo le diverse configurazioni per il calcolo dei

carichi che agiscono sulla trave  $T_{L2}$ :

1) Configurazione rara [Equ. 6.14b in NF EN 1990:2000]

$$P_1 = G_1 + G_2 + Q_1 + \psi_{0,2} Q_2$$

$$\text{con } \psi_{0,2} = 0.7$$

2) Configurazione frequente [Equ. 6.15b in NF EN 1990:2000]

$$P_2 = G_1 + G_2 + \psi_{1,1} Q_1 + \psi_{2,2} Q_2$$

$$\text{con } \psi_{1,1} = 0.7 \text{ e } \psi_{2,2} = 0.6$$

3) Configurazione permanente [Equ. 6.16b in NF EN 1990:2000]

$$P_3 = G_1 + G_2 + \psi_{2,1} Q_1 + \psi_{2,2} Q_2$$

$$\text{con } \psi_{2,1} = 0.6 \text{ e } \psi_{2,2} = 0.6$$

	Gki (kN)	Qki (kN)	Pi (kN)
Configurazione 1)	0.80	1.14	1.94
Configurazione 2)	0.80	0.90	1.70
Configurazione 3)	0.80	0.86	1.66

figura X.473: Valore dei carichi puntuali dovuti alla trave  $T_{L1}$

	gki (kN/m)	qki (kN/m)	pi (kN/m)
Configurazione 1)	0.99	0.30	1.41
Configurazione 2)	0.99	0.28	1.24
Configurazione 3)	0.99	0.23	1.21

figura X.474: Valore dei carichi sulla trave  $T_{L1}$

### LO STATO LIMITE DI DEFORMITÀ

Predimensionamento della trave con abbassamento massimo consentito:

Conditions	$W_{max}$
Toitures en général	L/200
Toitures supportant fréquemment du personnel autre que le personnel d'entretien	L/200
Planchers en général	L/200
Planchers et toitures supportant des cloisons en plâtre ou en autres matériaux fragiles ou rigides	L/250
Planchers supportant des poteaux (à moins que la flèche ait été incluse dans l'analyse globale de l'état limite ultime)	L/400
Cas où $W_{max}$ peut nuire à l'aspect du bâtiment	L/250

figura X.475: Valori limiti massimi consigliati per l'abbassamento verticale, secondo la norma [clausola 7.2.1(1)B in NF EN 1993-1-1/NA:2007]

Per una trave inflessa di lunghezza  $l$ , in semplice appoggio, a sezione costante e soggetta a carico uniforme  $q$  e un carico puntuale  $Q$ , la freccia totale massima vale quindi:

$$f_{\max} = (5ql^4/384 + 69Ql^3/648)/(E_{0,\text{mean}}J) + \chi(Q(b+2a)+ql^2/8)/(G_{\text{mean}}A)$$

dove:

- $A$  è l'area della sezione trasversale [ $\text{m}^2$ ]
- $J$  è il momento d'inerzia della medesima sezione [ $\text{m}^4$ ]
- $\chi$  è il cosiddetto fattore di taglio della sezione (uguale a 1.2 per le sezioni rettangolari) [-]
- $q$  è il carico lineare [ $\text{kN/m}$ ]
- $Q$  è il carico puntuale [ $\text{kN}$ ]

Nel caso delle deformazioni dovute all'inflessione delle travi, la freccia totale è composta da tre contributi deformativi:

- $u_0$  contrefreccia;
- $u_1$  freccia dovuta ai carichi permanenti;
- $u_2$  freccia dovuta i carichi variabili.

La freccia netta  $u_{\text{net}}$ , riferita alla corda congiungente i punti della trave in corrispondenza degli appoggi, è data da:

$$u_{\text{net}} = u_1 + u_2 - u_0$$

Per questo caso  $u_0$  è nullo.

La deformazione finale  $u_{\text{net,fin}}$  è:

$$u_{\text{net,fin}} = u_{1,\text{fin}} + u_{2,\text{fin}}$$

dove:

- $u_{1,\text{fin}} = u_{1,\text{ist}} (1+k_{\text{def}})$ ;
- $u_{2,\text{fin}} = u_{2,\text{ist}} (1+\psi_{2,1}k_{\text{def}})$  per una deformazione finale causata dalla azione variabile principale;
- $u_{2,\text{fin}} = u_{2,\text{ist}} (\psi_{0,1}+\psi_{2,1}k_{\text{def}})$  per una deformazione finale causata dalla altre azioni variabili.

Secondo la normativa si deve verificare:

$$u_{2,\text{ist}} \leq l/300$$

$$u_{\text{net,fin}} \leq l/200$$

dove "l" è la luce libera della trave appoggiata.

Per il legno massiccio di classe di servizio 2,

$$k_{\text{def}} = 0.8$$

$$g_k = 1.21 \text{ kN/m}$$

$$G_k = 0.80 \text{ kN}$$

$$u_{1,\text{ist}} = 13.90 \text{ mm}$$

$$q_k = 0.30 \text{ kN/m}$$

$$Q_k = 1.14 \text{ kN}$$

$$u_{2,\text{inst}} = 13.49 \text{ mm}$$

$$u_{2,\text{ist}} \leq l/300 = 18.9 \text{ mm}$$

$$u_{\text{net,fin}} = u_{1,\text{ist}} (1+k_{\text{def}}) + u_{2,\text{ist}} (1+\psi_{2,1}k_{\text{def}}) = 44.99 \text{ mm}$$

$$u_{\text{net,fin}} \leq l/200 = 28.4 \text{ mm}$$

La condizione non è stata soddisfatta.

Abbiamo deciso di mantenere la trave  $T_{L1}$  dimensionata prima, però quella non sopporterà più i carichi dei Velux. I carichi dei Velux saranno ripreso dalla trave  $T_{L2}$  con un carico lineare. Questa soluzione diminuirà la freccia e permetterà di avere una trave  $T_{L2}$  più sottile.

	Nome	Carichi	Unità	Carichi lineari (kN/m)
$G_1$	Peso Proprio	380	$\text{kg/m}^3$	1.08
$G_{2a}$	Chiusure orizzontale CO5	42.6	$\text{kg/m}^2$	0.13
$G_{2b}$	Velux	106.5	kg	0.30
$Q_{1a}$	Carichi in esercizio	0.4	$\text{kN/m}^2$	0.48
$Q_{1b}$	Carichi di neve	0.88	$\text{kN/m}^2$	1.06

figura X.476: Carichi sulla Trave  $T_{L2}$

	Gki (kN)	Qki (kN)	Pi (kN)
Configurazione 1)	0.29	0	0.29
Configurazione 2)	0.29	0	0.29
Configurazione 3)	0.29	0	0.29

figura X.477: Valore dei carichi puntuali dovuti alla trave  $T_{L1}$

	gki (kN/m)	qki (kN/m)	pi (kN/m)
Configurazione 1)	1.21	1.22	2.43
Configurazione 2)	1.21	1.11	2.32
Configurazione 3)	1.21	0.92	2.13

figura X.478: Valore dei carichi lineari sulla trave  $T_{L2}$

$$g_k = 1.21 \text{ kN/m}$$

$$G_k = 0.29 \text{ kN}$$

$$u_{1,\text{ist}} = 8.42 \text{ mm}$$

$$q_k = 1.22 \text{ kN/m}$$

$$Q_k = 0 \text{ kN}$$

$$u_{2,\text{inst}} = 5.44 \text{ mm}$$

$$u_{2,\text{ist}} \leq l/300 = 18.9 \text{ mm}$$

$$u_{\text{net,fin}} = u_{1,\text{list}}(1+k_{\text{def}}) + u_{2,\text{list}}(1+\psi_{2,1}k_{\text{def}}) = 23.22 \text{ mm}$$

$$u_{\text{net,fin}} \leq l/200 = 28.4 \text{ mm}$$

La condizione è stata soddisfatta.

### 3) Stato Limite Ultimo

Secondo l'Eurocodice 0 (Allegato A1.2):

$$P_u = 1.35(G_1+G_2) + 1.5(Q_1+Q_2)$$

DOVUTO ALLE TRAVI DI TIPO  $T_{L1}$ :

Sugli appoggi abbiamo

$$V_{d1} = 3 \cdot P_{uTL1} = 1.16 \text{ kN}$$

Il momento massimo è a mezzera della trave:

$$M_{\text{max1}} = (3a+2b)P_{uTL1} = 1.62 \text{ kNm}$$

DOVUTO AI CARICHI LINEARI:

Sugli appoggi abbiamo

$$V_{d2} = [(G_1 3a + G_2 2b) + QL]/2 = 7.83 \text{ kN}$$

Il momento massimo è a mezzera della trave:

$$M_{\text{max2}} = 0.5[(G_1+Q)a^2 + (G_2+Q)b^2] + ab(G_1 + Q)$$

$$M_{\text{max2}} = 5.35 \text{ kNm}$$

Per tutti i carichi:

$$V_d = V_{d1} + V_{d2} = 8.99 \text{ kN}$$

$$M_{\text{max}} = M_{\text{max1}} + M_{\text{max2}} = 6.97 \text{ kNm}$$

#### ► Verifica al taglio

Deve essere soddisfatta la seguente condizione:

$$\tau_d \leq f_{v,d}$$

dove:

- $\tau_d$  è la tensione massima tangenziale di progetto
- $f_{v,d}$  è la corrispondente resistenza di progetto a taglio.

Dato uno sforzo di taglio di progetto  $V_d$ , risulta:

- per sezioni rettangolari

$$\tau_d = 3V_d/(2A)$$

con A l'area di sezione sollecitata.

$$\tau_d = 0.27 \text{ MPa}$$

$$f_{y,d} = 1.73 \text{ MPa}$$

Questa condizione è soddisfatta.

#### ► Verifica alla flessione

Il coefficiente  $k_m$  tiene conto della redistribuzione degli sforzi e degli effetti di disomogeneità del materiale nella sezione: infatti, la rottura dell'elemento in flessione deviata non avviene necessariamente per raggiungimento di un valore massimo di tensione in uno degli spigoli di una sezione rettangolare (come invece si è soliti verificare in un materiale omogeneo e isotropo come l'acciaio). I valori per km sono:  $k_m = 0.7$  per sezioni rettangolari;  $k_m = 1.0$  per altre sezioni trasversali.

Ricordiamo infine che gli elementi inflessi devono sempre essere sottoposti alla verifica sulla condizione di instabilità e su quella di deformabilità, risultando quest'ultima spesso determinante nel dimensionamento dell'elemento.

Si deve soddisfare la seguente condizione:

$$\sigma_d = M_d/W \leq f_{m,d}$$

$$W = bh^2/6$$

$$\sigma_d = 3.35 \text{ MPa}$$

$$f_{m,d} = 15.92 \text{ MPa}$$

La condizione è soddisfatta.

## d) Trave $T_{L3}$

### 1) Generalità

La trave  $T_{L3}$  misura 2.74 m e la sua larghezza d'influenza massima è di 0.44 m.

La trave  $T_{L3}$  è una trave di sostenimento del Velux e si appoggia sulla trave  $T_{L4}$ .

Per i calcoli abbiamo ipotizzato una trave in legno massiccio definita come segue:

	Dimensione	Unità
L	1.37	m
b	0.05	m
h	0.1	m
La	0.2	m
A	0.005	m <sup>2</sup>
$l_{ef}$	0.23	m

figura X.479: Caratteristiche geometriche della trave  $T_{L1}$

	Nome	Carichi	Unità	Carichi lineari (kN/m)
$G_1$	Peso Proprio	380	kg/m <sup>3</sup>	0.03
$G_{2a}$	Chiusure orizzontale CO5	42.6	kg/m <sup>2</sup>	0.04
$G_{2b}$	Velux	106.5	kg	0.3
$Q_{1a}$	Carichi in esercizio	0.4	kN/m <sup>2</sup>	0.18
$Q_{1b}$	Carichi di neve	0.88	kN/m <sup>2</sup>	0.39
$Q_{1c}$	Carichi di vento	-	kN/m <sup>2</sup>	

figura X.480: Carichi sulla Trave  $T_{L1}$

### 2) Stati limite di servizio

Per dimensionare secondo lo stato limite di esercizio usiamo le diverse configurazioni per il calcolo dei carichi che agiscono sulla trave  $T_{L3}$ :

1) Configurazione rara [Equ. 6.14b in NF EN 1990:2000]

$$P_1 = G_1 + G_2 + Q_1 + \psi_{0,2} Q_2$$

$$\text{con } \psi_{0,2} = 0.7$$

2) Configurazione frequente [Equ. 6.15b in NF EN 1990:2000]

$$P_2 = G_1 + G_2 + \psi_{1,1} Q_1 + \psi_{2,2} Q_2$$

$$\text{con } \psi_{1,1} = 0.7 \text{ e } \psi_{2,2} = 0.6$$

3) Configurazione permanente [Equ. 6.16b in NF EN 1990:2000]

$$P_3 = G_1 + G_2 + \psi_{2,1} Q_1 + \psi_{2,2} Q_2$$

$$\text{con } \psi_{2,1} = 0.6 \text{ e } \psi_{2,2} = 0.6$$

	gki (kN/m)	qki (kN/m)	Pi (kN/m)
Configurazione 1	0.36	0.45	0.81
Configurazione 2	0.36	0.36	0.72
Configurazione 3	0.36	0.34	0.70

figura X.481: Valore dei carichi sulla trave  $T_{L3}$

### LO STATO LIMITE DI DEFORMITÀ

Pre-dimensionamento della trave con abbassamento massimo consentito:

Conditions	$W_{max}$
Toitures en général	L/200
Toitures supportant fréquemment du personnel autre que le personnel d'entretien	L/200
Planchers en général	L/200
Planchers et toitures supportant des cloisons en plâtre ou en autres matériaux fragiles ou rigides	L/250
Planchers supportant des poteaux (à moins que la flèche ait été incluse dans l'analyse globale de l'état limite ultime)	L/400
Cas où $W_{max}$ peut nuire à l'aspect du bâtiment	L/250

figura X.482: Valori limiti massimi consigliati per l'abbassamento verticale, secondo la norma [clausola 7.2.1(1)B in NF EN 1993-1-1/NA:2007]

Per una trave inflessa di lunghezza  $l$ , in semplice appoggio, a sezione costante e soggetta a carico uniforme  $q$ , la freccia totale massima vale quindi:

$$f_{max} = 5ql^4 / (384E_{0,mean} J) + \chi ql^2 / (8G_{mean} A)$$

dove:

- $A$  è l'area della sezione trasversale [m<sup>2</sup>]
- $J$  è il momento d'inerzia della medesima sezione [m<sup>4</sup>]
- $\chi$  è il cosiddetto fattore di taglio della sezione (uguale a 1.2 per le sezioni rettangolari) [-]

Nel caso delle deformazioni dovute all'inflessione delle travi, la freccia totale è composta da tre contributi deformativi:

$u_0$  contro-freccia;

$u_1$  freccia dovuta ai carichi permanenti;

$u_2$  freccia dovuta ai carichi variabili.

La freccia netta  $u_{net}$ , riferita alla corda congiungente i punti della trave in corrispondenza degli appoggi, è data da:

$$u_{net} = u_1 + u_2 - u_0$$

Per questo caso  $u_0$  è nullo.

La deformazione finale  $u_{net,fin}$  è:

$$u_{net,fin} = u_{1,fin} + u_{2,fin}$$

dove

- $u_{1,fin} = u_{1,ist} (1+k_{def})$ ;
- $u_{2,fin} = u_{2,ist} (1+\psi_{2.1} k_{def})$  per una deformazione finale causata dalla azione variabile principale;
- $u_{2,fin} = u_{2,ist} (\psi_{0.1} + \psi_{2.1} k_{def})$  per una deformazione finale causata dalle altre azioni variabili.

Secondo la normativa si deve verificare:

$$u_{2,ist} \leq l/300$$

$$u_{net,fin} \leq l/200$$

dove “l” è la luce libera della trave appoggiata.

Per il legno massiccio di classe di servizio 2,

$$k_{def} = 0.8$$

$$g_k = 0.36 \text{ kN/m}$$

$$u_{1,ist} = 0.41 \text{ mm}$$

$$q_k = 0.45 \text{ kN/m}$$

$$u_{2,inst} = 0.64 \text{ mm}$$

$$u_{2,ist} \leq l/300 = 4.57 \text{ mm}$$

$$u_{net,fin} = u_{1,ist} (1+k_{def}) + u_{2,ist} (1+\psi_{2.1} k_{def}) = 1.45 \text{ mm}$$

$$u_{net,fin} \leq l/200 = 6.85 \text{ mm}$$

La condizione è stata soddisfatta.

### 3) Stato Limite Ultimo

Secondo l'Eurocodice 0 (Allegato A1.2):

$$P_u = 1.35 (G_1 + G_2) + 1.5 (Q_1 + Q_2)$$

$$P_u = 1.31 \text{ kN/m}$$

Sugli appoggi abbiamo  $V_d = P_u L/2 = 0.9 \text{ kN}$

Il momento massimo è a mezzera della trave:

$$M_{max} = P_u L^2/2 = 1.23 \text{ kNm}$$

#### ► Verifica al taglio

Deve essere soddisfatta le seguente condizione:

$$\tau_d \leq f_{v,d}$$

dove:

- $\tau_d$  è la tensione massima tangenziale di progetto
- $f_{v,d}$  è la corrispondente resistenza di progetto a taglio.

Dato uno sforzo di taglio di progetto  $V_d$ , risulta:

- per sezioni rettangolari

$$\tau_d = 3V_d/(2A)$$

con A l'area di sezione sollecitata.

$$\tau_d = 0.27 \text{ MPa}$$

$$f_{v,d} = 1.73 \text{ MPa}$$

Questa condizione è soddisfatta.

#### ► Verifica alla flessione

Il coefficiente  $k_m$  tiene conto della redistribuzione degli sforzi e degli effetti di disomogeneità del materiale nella sezione: infatti, la rottura dell'elemento in flessione deviata non avviene necessariamente per raggiungimento di un valore massimo di tensione in uno degli spigoli di una sezione rettangolare (come invece si è soliti verificare in un materiale omogeneo e isotropo come l'acciaio). I valori per  $k_m$  sono:  $k_m = 0.7$  per sezioni rettangolari;  $k_m = 1.0$  per altre sezioni trasversali.

Ricordiamo infine che gli elementi inflessi devono sempre essere sottoposti alla verifica sulla condizione di instabilità e su quella di deformabilità, risultando quest'ultima spesso determinante nel dimensionamento dell'elemento.

Si deve soddisfare la seguente condizione:

$$\sigma_d = M_d/W \leq f_{m,d}$$

$$W = bh^2/6$$

$$\sigma_d = 14.73 \text{ MPa}$$

$$f_{m,d} = 15.92 \text{ MPa}$$

La condizione è soddisfatta.

#### ► Verifica alla compressione documento Nicole

(Norme tecniche Italiane per la progettazione, esecuzione e collaudo delle COstruzioni in LEGNO)

Nel caso di compressione ortogonale alla fibratura, secondo il documento Nicole, si deve soddisfare la seguente condizione:

$$\sigma_{c,90,d} \leq f_{c,90,d}$$

dove:

- $\sigma_{c,90,d}$  tensione di progetto a compressione ortogonale alla fibratura
- $f_{c,90,d}$  resistenza di progetto a compressione ortogonale alla fibratura.

Quest'ultima sarà calcolata mediante l'espressione:

$$\sigma_{c,90,d} = F_{90,d} / (b \cdot l_{ef})$$

dove:

- $F_{90,d}$  forza di compressione esterna ortogonale alla fibratura;
- $b$  base dell'elemento
- $l$  lunghezza di trave sulla quale agisce  $F_{90,d}$ ;
- $l_{ef}$  lunghezza efficace pari al minimo tra  $l + h/3$  e  $2l$  nel caso di confinamento su due lati; pari al minimo tra  $l + h/6$  e  $1.5l$  nel caso di confinamento solo su un lato.

$$\sigma_{c,90,d} = 0.9 / 0.05 \cdot 1.4 = 12.85 \text{ kN/m}^2$$

$$f_{c,90,d} = 2010 \text{ kN/m}^2$$

Questa condizione è soddisfatta.

## e) Trave $T_{L4}$

### 1) Generalità

La trave  $T_{L4}$  misura 4.61 m e la sua larghezza d'influenza massima è di **0.6** m.

La trave  $T_{L4}$  è una trave di sostenimento del Velux e si appoggia sulla trave  $T_{L3}$ .

La Trave  $T_{L4}$  ha dei carichi puntuali dovuti alle travi  $T_{L3}$  e dei carichi lineari.

Per i calcoli abbiamo ipotizzato una trave in legno massiccio definita come segue:

	Dimensione	Unità
L	4.61	m
b	0.15	m
h	0.2	m
La	0.2	m
A	0.03	m <sup>2</sup>
$l_{ef}$	<b>5.75</b>	m

figura X.483: Caratteristiche geometriche della trave  $T_{L2}$

Nome	Carichi	Unità	Carichi lineari (kN/m)
$G_1$	Peso Proprio	380 kg/m <sup>3</sup>	0.53
$G_{2a}$	Chiusure orizzontale CO5	42.6 kg/m <sup>2</sup>	0.14
$G_{2b}$	Velux	106.5 kg	0.30
$Q_{1a}$	Carichi in esercizio	0.4 kN/m <sup>2</sup>	0.3
$Q_{1b}$	Carichi di neve	0.88 kN/m <sup>2</sup>	0.66

figura X.484: Carichi sulla Trave  $T_{L2}$

### 2) Stati limite di servizio

Per dimensionare secondo lo stato limite di esercizio usiamo le diverse configurazioni per il calcolo dei carichi che agiscono sulla trave  $T3$ :

1) Configurazione rara [Equ. 6.14b in NF EN 1990:2000]

$$P_1 = G_1 + G_2 + Q_1 + \psi_{0,2} Q_2$$

con  $\psi_{0,2} = 0.7$

2) Configurazione frequente [Equ. 6.15b in NF EN 1990:2000]

$$P_2 = G_1 + G_2 + \psi_{1,1} Q_1 + \psi_{2,2} Q_2$$

con  $\psi_{1,1} = 0.7$  e  $\psi_{2,2} = 0.6$

3) Configurazione permanente [Equ. 6.16b in NF EN 1990:2000]

$$P_3 = G_1 + G_2 + \psi_{2,1} Q_1 + \psi_{2,2} Q_2$$

con  $\psi_{2,1} = 0.6$  e  $\psi_{2,2} = 0.6$

	G <sub>ki</sub> (kN)	Q <sub>ki</sub> (kN)	P <sub>i</sub> (kN)
Configurazione 1)	0.02	0	0.02
Configurazione 2)	0.02	0	0.02
Configurazione 3)	0.02	0	0.02

figura X.485: Valore dei carichi puntuali dovuti alla trave  $T_{L1}$

	g <sub>ki</sub> (kN/m)	q <sub>ki</sub> (kN/m)	p <sub>i</sub> (kN/m)
Configurazione 1)	0.96	0.76	1.72
Configurazione 2)	0.96	0.70	1.66
Configurazione 3)	0.96	0.58	1.54

figura X.486: Valore dei carichi lineari sulla trave  $T_{L2}$

### LO STATO LIMITE DI DEFORMITÀ

Predimensionamento della trave con abbassamento massimo consentito:

Conditions	$W_{max}$
Toitures en général	L/200
Toitures supportant fréquemment du personnel autre que le personnel d'entretien	L/200
Planchers en général	L/200
Planchers et toitures supportant des cloisons en plâtre ou en autres matériaux fragiles ou rigides	L/250
Planchers supportant des poteaux (à moins que la flèche ait été incluse dans l'analyse globale de l'état limite ultime)	L/400
Cas où $W_{max}$ peut nuire à l'aspect du bâtiment	L/250

figura X.487: Valori limiti massimi consigliati per l'abbassamento verticale, secondo la norma [clausola 7.2.1(1)B in NF EN 1993-1-1/NA:2007]

Per una trave inflessa di lunghezza  $l$ , in semplice appoggio, a sezione costante e soggetta a carico uniforme  $q$  e un carico puntuale  $Q$ , la freccia totale massima vale quindi:

$$f_{max} = (5ql^4/384 + 69Ql^3/648)/(E_{0,mean} J) + \chi(Q(b+2a)+ql^2/8)/(G_{mean} A)$$

dove:

- $A$  è l'area della sezione trasversale [m<sup>2</sup>]
- $J$  è il momento d'inerzia della medesima sezione [m<sup>4</sup>]
- $\chi$  è il cosiddetto fattore di taglio della sezione (uguale a 1.2 per le sezioni rettangolari) [-]
- $q$  è il carico lineare [kN/m]

- Q è il carico puntuale [kN]

Nel caso delle deformazioni dovute all'inflexione delle travi, la freccia totale è composta da tre contributi deformativi:

- $u_0$  controfreccia;
- $u_1$  freccia dovuta ai carichi permanenti;
- $u_2$  freccia dovuta i carichi variabili.

La freccia netta  $u_{net}$ , riferita alla corda congiungente i punti della trave in corrispondenza degli appoggi, è data da:

$$u_{net} = u_1 + u_2 - u_0$$

Per questo caso  $u_0$  è nullo.

La deformazione finale  $u_{net,fin}$  è:

$$u_{net,fin} = u_{1,fin} + u_{2,fin}$$

dove:

- $u_{1,fin} = u_{1,ist} (1+k_{def})$ ;
- $u_{2,fin} = u_{2,ist} (1+\psi_{2.1} k_{def})$  per una deformazione finale causata dalla azione variabile principale;
- $u_{2,fin} = u_{2,ist} (\psi_{0.1} + \psi_{2.1} k_{def})$  per una deformazione finale causata dalla altre azioni variabili.

Secondo la normativa si deve verificare:

$$u_{2,ist} \leq l/300$$

$$u_{net,fin} \leq l/200$$

dove "l" è la luce libera della trave appoggiata.

Per il legno massiccio di classe di servizio 2,

$$k_{def} = 0.8$$

$$g_k = 0.96 \text{ kN/m}$$

$$G_k = 0.02 \text{ kN}$$

$$u_{1,ist} = 5.81 \text{ mm}$$

$$q_k = 0.76 \text{ kN/m}$$

$$Q_k = 0 \text{ kN}$$

$$u_{2,ist} = 4.39 \text{ mm}$$

$$u_{2,ist} \leq l/300 = 18.9 \text{ mm}$$

$$u_{net,fin} = u_{1,ist} (1+k_{def}) + u_{2,ist} (1+\psi_{2.1} k_{def}) = 16.96 \text{ mm}$$

$$u_{net,fin} \leq l/200 = 28.4 \text{ mm}$$

La condizione è stata soddisfatta.

### 3) Stato Limite Ultimo

Secondo l'Eurocodice 0 (Allegato A1.2):

$$P_u = 1.35 (G_1 + G_2) + 1.5 (Q_1 + Q_2)$$

DOVUTO ALLE TRAVI DI TIPO  $T_{L3}$ :

Sugli appoggi abbiamo

$$V_{d1} = 3 * P_{uTL3} = 2.69 \text{ kN}$$

Il momento massimo è a mezzera della trave:

$$M_{max1} = (3a+2b)P_{uTL1} = 6.95 \text{ kNm}$$

DOVUTO AI CARICHI LINEARI:

Sugli appoggi abbiamo

$$V_{d2} = [(G_1 3a + G_2 2b) + QL]/2 = 3.09 \text{ kN}$$

Il momento massimo è a mezzera della trave:

$$M_{max2} = 0.5[(G_1 + Q)a^2 + (G_2 + Q)b^2] + ab(G_1 + Q)$$

$$M_{max2} = 4.87 \text{ kNm}$$

Per tutti i carichi:

$$V_d = V_{d1} + V_{d2} = 5.78 \text{ kN}$$

$$M_{max} = M_{max1} + M_{max2} = 11.83 \text{ kNm}$$

### ► Verifica al taglio

Deve essere soddisfatta le seguente condizione:

$$\tau_d \leq f_{v,d}$$

dove:

- $\tau_d$  è la tensione massima tangenziale di progetto
- $f_{v,d}$  è la corrispondente resistenza di progetto a taglio.

Dato uno sforzo di taglio di progetto  $V_d$ , risulta:

- per sezioni rettangolari

$$\tau_d = 3V_d/(2A)$$

con A l'area di sezione sollecitata.

$$\tau_d = 0.29 \text{ MPa}$$

$$f_{v,d} = 1.73 \text{ MPa}$$

Questa condizione è soddisfatta.

### ► Verifica alla flessione

Il coefficiente  $k_m$  tiene conto della redistribuzione degli sforzi e degli effetti di disomogeneità del materiale nella sezione: infatti, la rottura dell'elemento in flessione deviata non avviene necessariamente per raggiungimento di un valore massimo di tensione in uno degli spigoli di una sezione rettangolare (come invece si è soliti verificare in un materiale omogeneo e isotropo come l'acciaio). I valori per km sono:  $k_m = 0.7$  per sezioni rettangolari;  $k_m = 1.0$  per altre sezioni trasversali.

Ricordiamo infine che gli elementi inflessi devono sempre essere sottoposti alla verifica sulla condizione di instabilità e su quella di deformabilità, risultando quest'ultima spesso determinante nel dimensionamento dell'elemento.

Si deve soddisfare la seguente condizione:

$$\sigma_d = M_d/W \leq f_{m,d}$$

$$W = bh^2/6$$

$$\sigma_d = 11.83 \text{ MPa}$$

$$f_{m,d} = 15.92 \text{ MPa}$$

La condizione è soddisfatta.

### 3. DIMENSIONAMENTO DEL PILASTRO

#### a) Pilastro $P_{L1}$

La resistenza spesso più vincolante per un elemento compresso è quella legata non tanto ad un criterio di resistenza della sezione, ma piuttosto ad un criterio di stabilità dell'equilibrio.

L'equilibrio di un sistema elastico può essere di tipo stabile o instabile a seconda che il carico assiale agente sia, rispettivamente, minore, oppure non minore di un parametro detto carico critico. Nel caso di un equilibrio stabile ( $N < N_{cr}$ ), se al detto sistema viene imposto temporaneamente una piccola deviazione dalla posizione iniziale, il sistema tende a ritornare nella posizione iniziale; nel caso di equilibrio instabile ( $N \geq N_{cr}$ ) a seguito della perturbazione, il sistema si allontana definitivamente dalla condizione di equilibrio.

Nei problemi di stabilità il carico critico viene determinato considerando le equazioni di equilibrio di una configurazione di equilibrio in una configurazione deformata dell'elemento, configurazione che è legata alle condizioni di vincolo del sistema.

L'espressione generale euleriana del carico critico per l'asta è la seguente:

$$N_{cr} = \pi^2 EJ / l_0^2$$

dove:

- $l_0$  è la lunghezza libera di inflessione e varia in funzione delle condizioni di vincolo.

Per questo caso  $l_0 = 0.5l$

Spesso è più conveniente considerare l'espressione dello sforzo critico dividendo ambo i membri della relazione di Eulero per l'area della sezione:

$$\sigma_{cr} = N_{cr} / A = \pi^2 E / \lambda^2$$

dove:

- $i$  è il raggio giratorio di inerzia nel piano di sbandamento dell'asta e che, nel caso comune di sezione rettangolare di altezza  $h$  (nel piano di inflessione), pari a

$$i = h / \sqrt{12}$$

- $\lambda$  è la snellezza dell'asta, pari a  $\lambda = l_0 / i$

Se si rappresenta graficamente l'espressione  $\sigma_{cr} = f(\lambda)$ , si ottiene l'iperbole di Eulero, cioè una curva che rappresenta  $\sigma_{cr}$  in funzione della snellezza dell'elemento. Tale curva è valida nell'ipotesi di materiale dal comportamento indefinitamente elastico lineare, mentre considerando il comportamento reale del materiale è possibile, per determinate geometrie, che si superi la resistenza a compressione semplice del materiale prima che si instabilizzi l'asta: per questo deve essere modificata per tenere in considerazione il comportamento reale del materiale.

Vediamo  $\sigma_{cr} = f(\varepsilon)$  e  $\sigma_{cr} = f(\lambda)$ :

Si deve quindi imporre la condizione di crisi della colonna per raggiungimento delle tensioni massime  $f_{c,0}$  in una sezione

$$\sigma = f_{c,0}$$

Si ottiene il valore di snellezza critica, cioè un parametro che rappresenta il discriminante tra aste tozze e aste snelle:

$$\lambda_{cr} = \pi \sqrt{(E / f_{c,0})}$$

Per  $\lambda \leq \lambda_{cr}$  (asta tozza) risulta più stringente la verifica di resistenza, mentre per  $\lambda > \lambda_{cr}$  (asta snella) risulta più stringente la verifica di instabilità. La verifica a collasso della colonna può essere quindi riscritta nel modo seguente

$$\sigma_c \leq k_c f_{c,0,d}$$

dove

- $k_c = 1$  per  $\lambda \leq \lambda_{cr}$  o  $k_c = 1 / \lambda_{rel}^2$  per  $\lambda > \lambda_{cr}$
- $\lambda_{rel} = \lambda / \lambda_{cr}$

Nome	Simbolo	Valore	Unità
Modulo elastico	E	10.5	GPa
Momento d'inerzia	J	667	cm <sup>4</sup>
Base del pilastro	b	0.01	m
Altezza del pilastro (nel piano di inflessione)	h	0.2	m
Altezza del pilastro	L	3	m
Lunghezza libera di inflessione	$L_0$	1.5	m
Raggio giratorio	i	0.06	m

figura X.488: Tabella dei parametri relativi al pilastro  $P_1$

$$\lambda_{cr} = 86.5 > \lambda = 25.98 \text{ verificato}$$

$$P_{TL1} = 3.51 \text{ kN}$$

$$P_{\text{peso\_proprio}} = 0.02 \text{ kN}$$

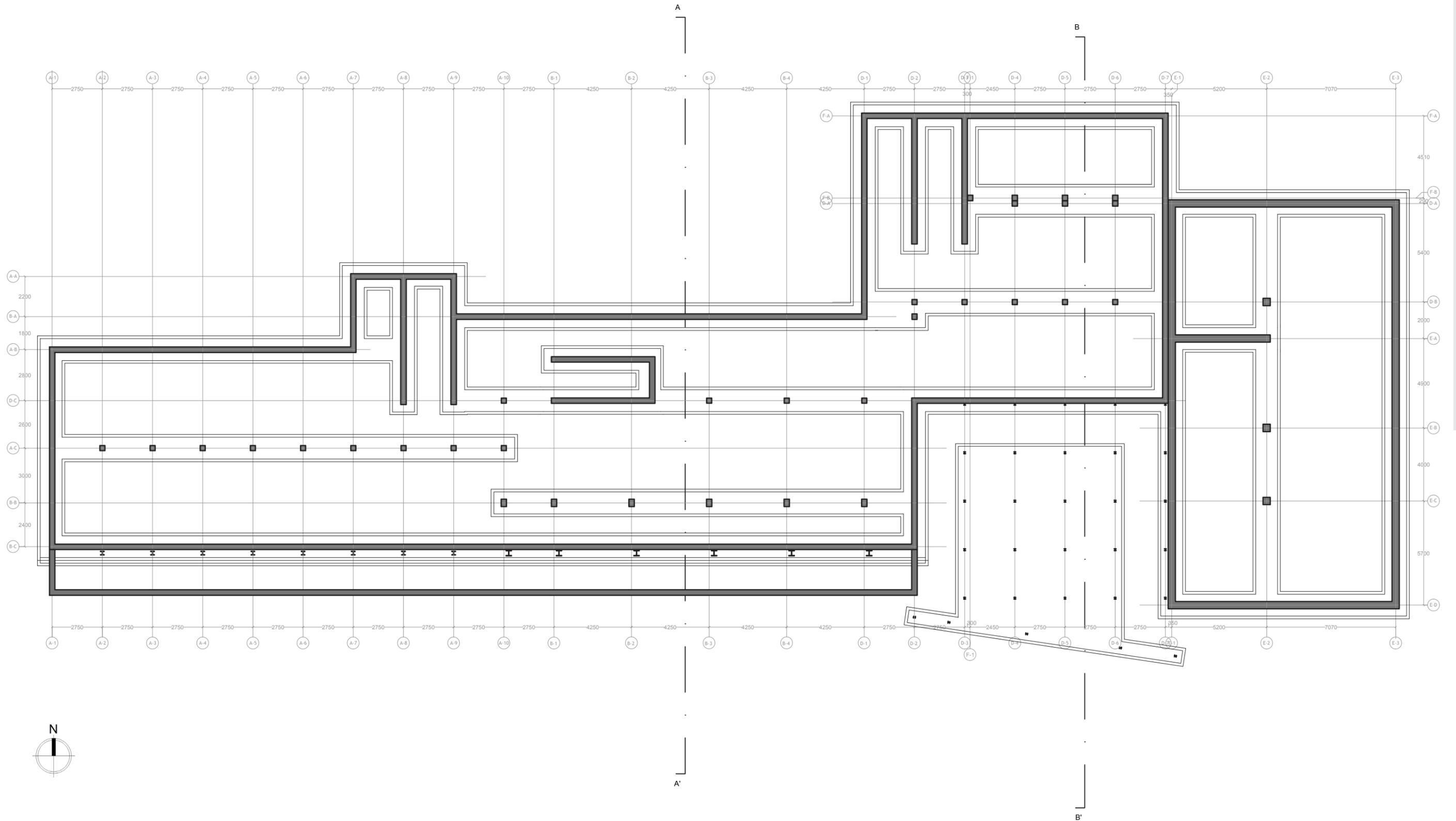
$$P_{\text{parete}} = 1.09 \text{ kN}$$

$$P_u = P_{TL1} + P_{\text{peso\_proprio}} + P_{\text{parete}} = 14.62 \text{ kN}$$

$$\sigma_c = P_u / A = 7.31 \text{ N/mm}^2 < f_{c,0,d} = 13.85 \text{ N/mm}^2$$

# F. PIANTA STRUTTURALE

## 1. FONDAZIONI





## 2. PIANO INTERRATO

Pilastrini in CA



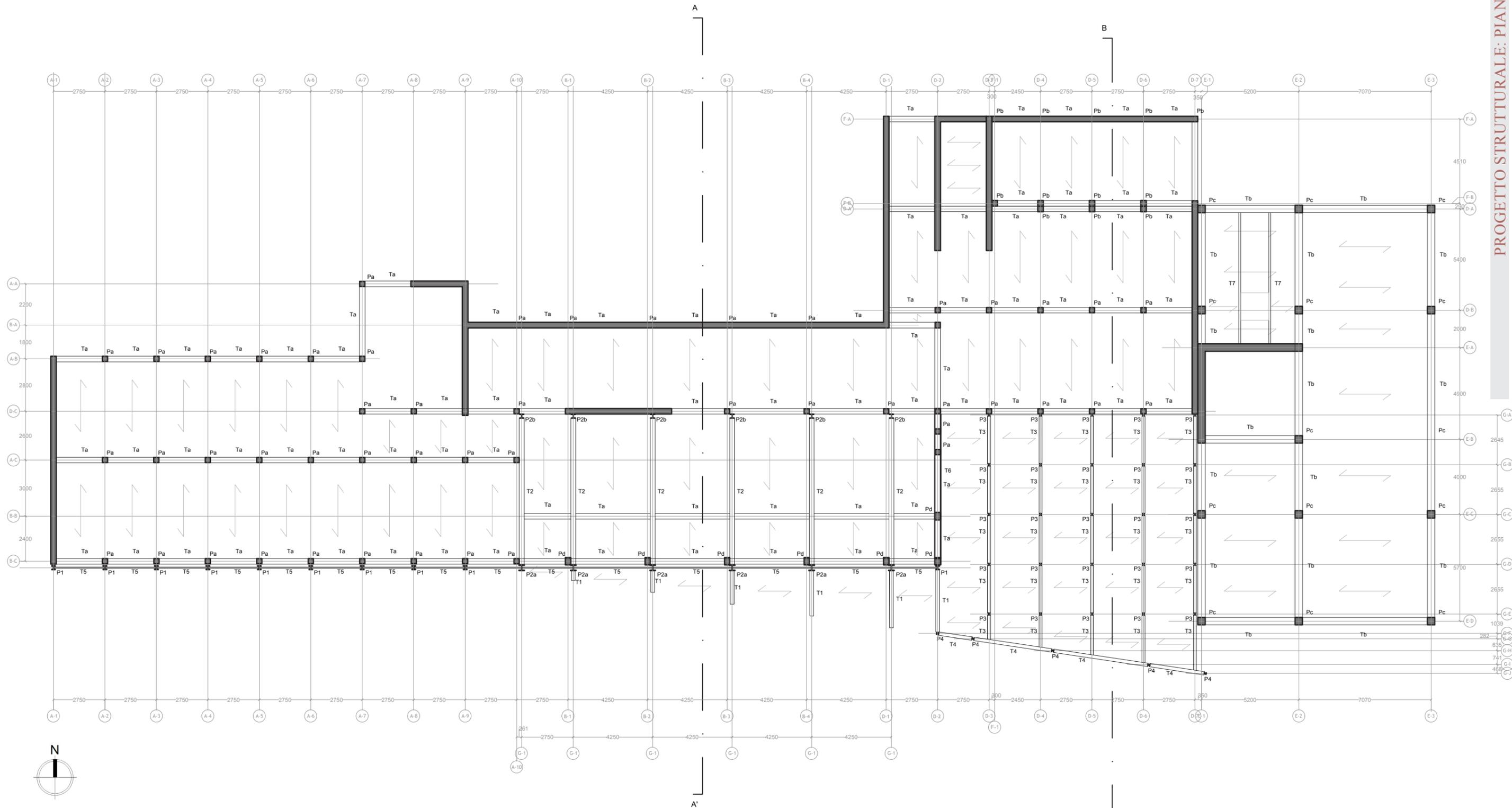
Trave in CA



Pilastrini in acciaio



Trave in acciaio





### 3. PIANO TERRA

Pilastrini in CA



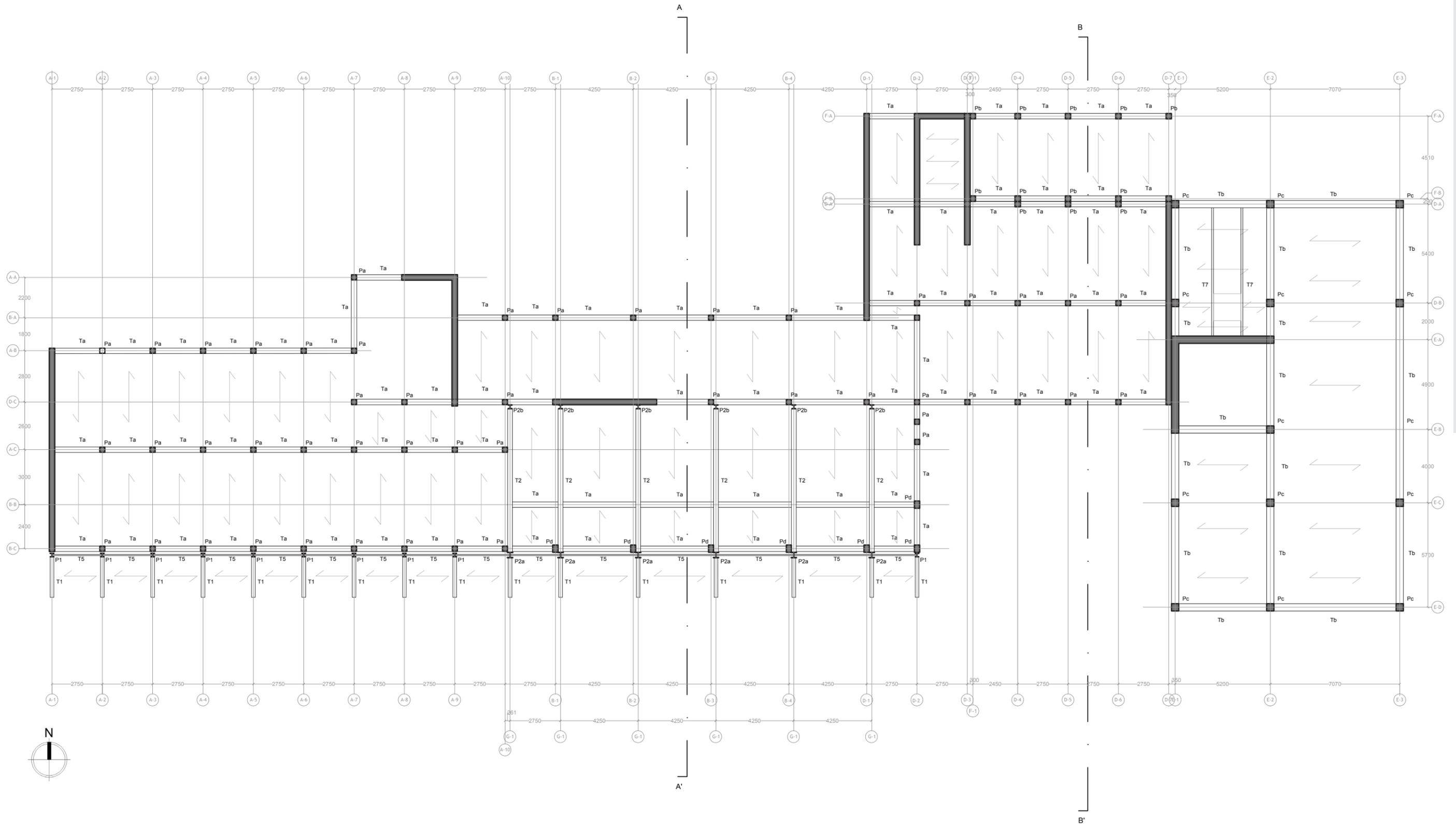
Trave in CA



Pilastrini in acciaio



Trave in acciaio



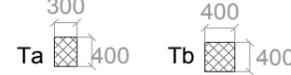


# 4. PRIMO PIANO

Pilastrini in CA



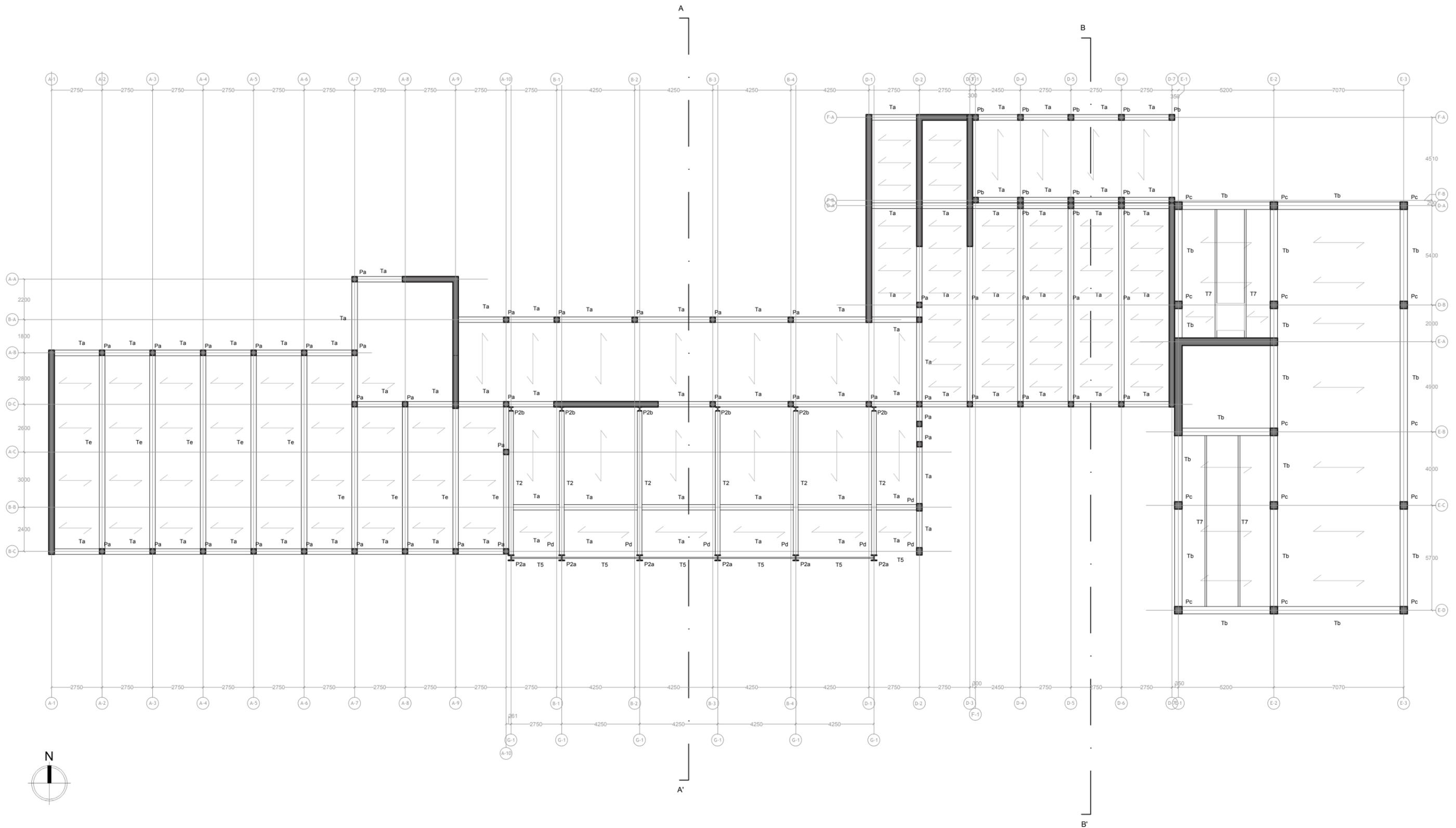
Trave in CA



Pilastrini in acciaio



Trave in acciaio





# 5. SECONDO PIANO

Pilastrini in CA



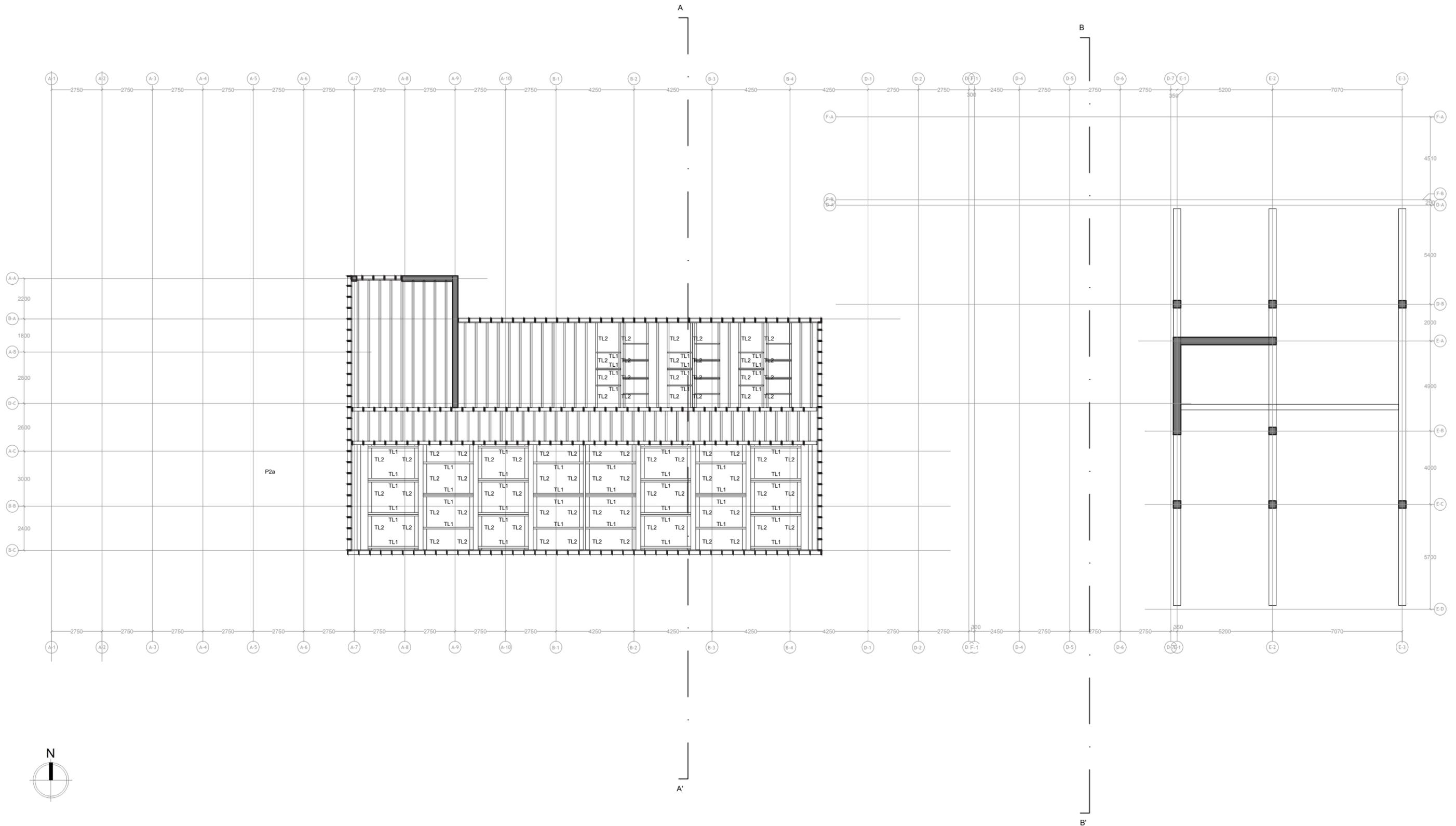
Trave in CA



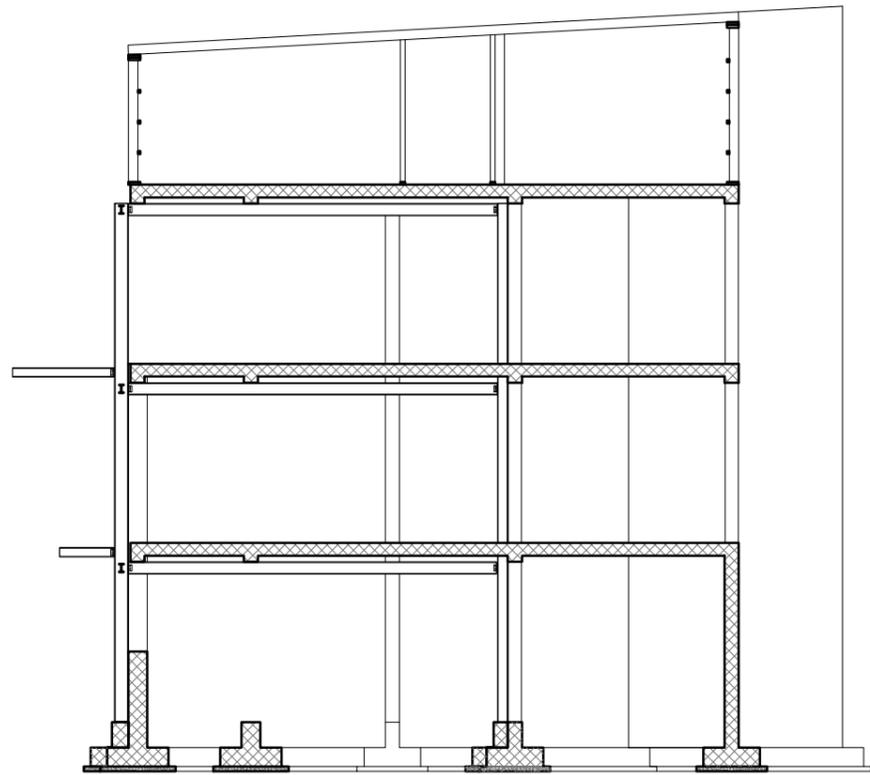
Pilastrini in acciaio



Trave in acciaio

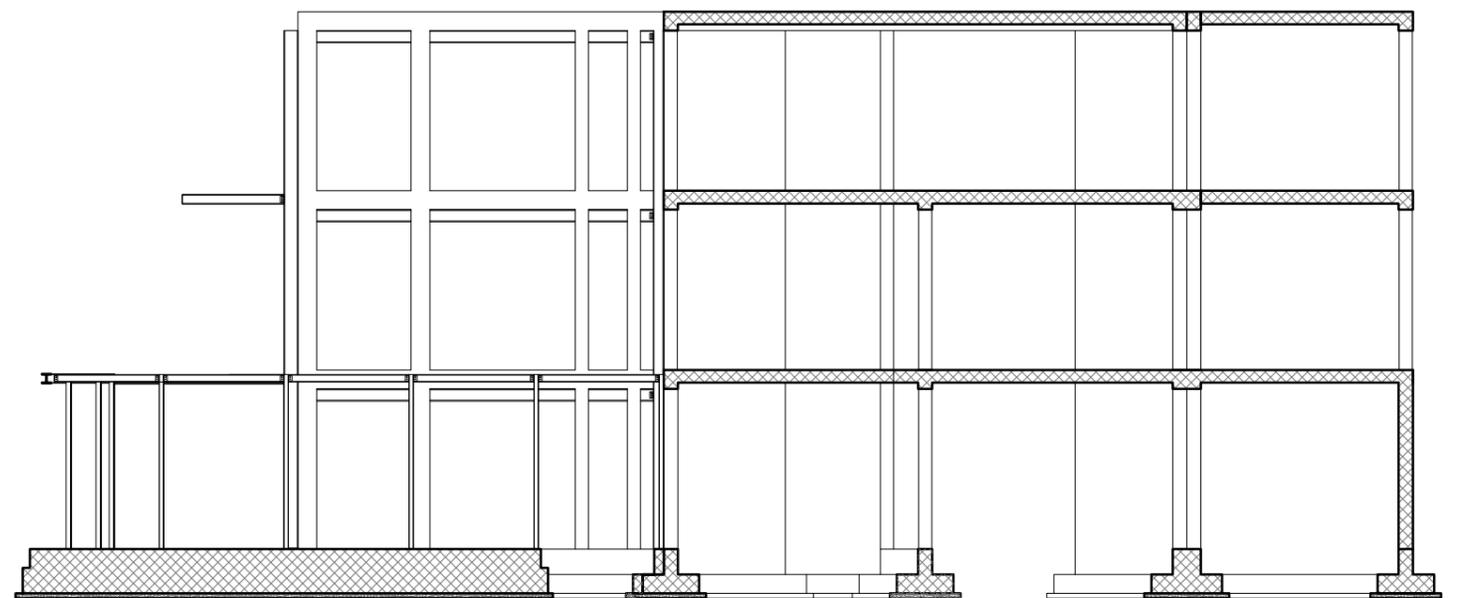




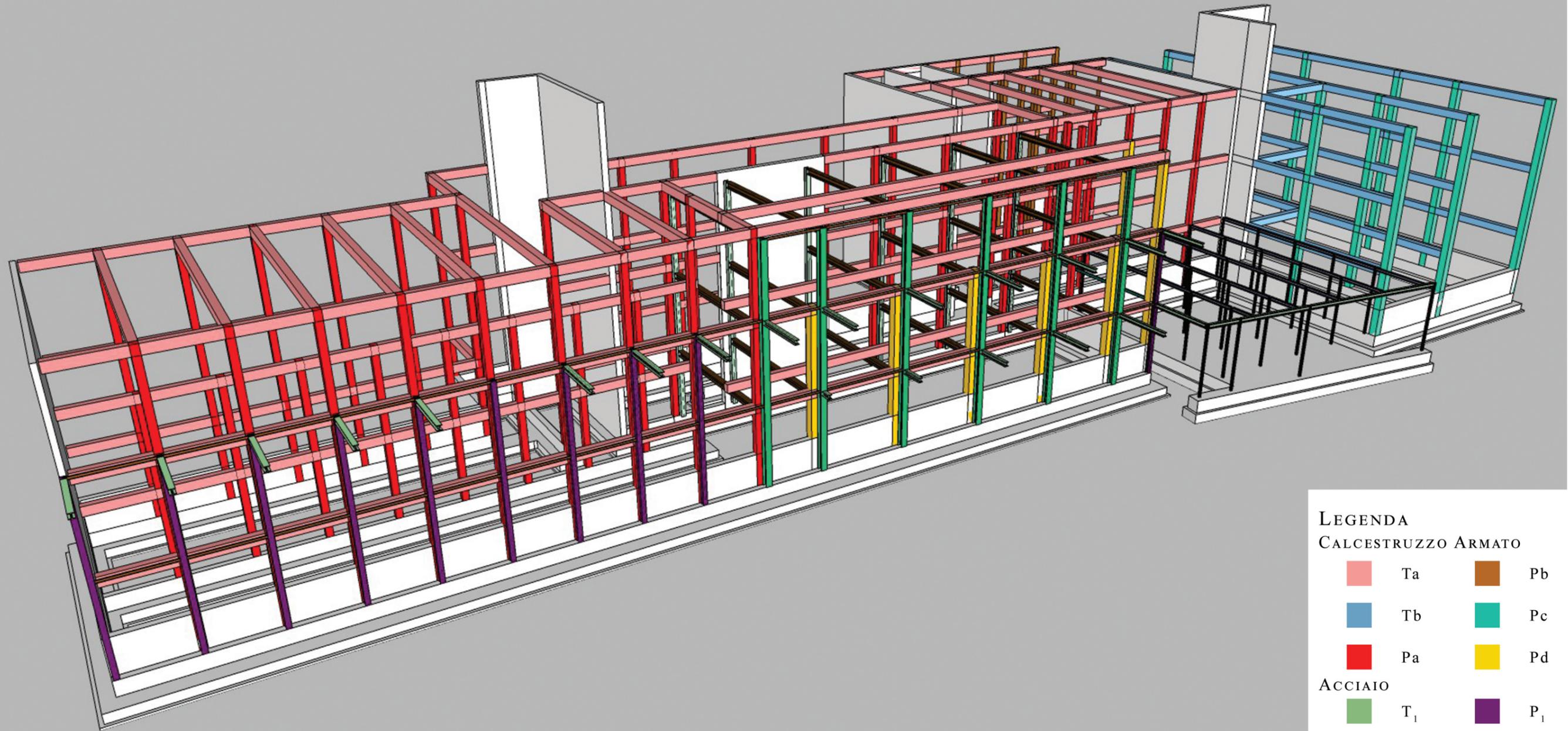


SEZIONE AA'

SEZIONE BB'







**LEGENDA**

**CALCESTRUZZO ARMATO**

<span style="color: red;">■</span> Ta	<span style="color: brown;">■</span> Pb
<span style="color: blue;">■</span> Tb	<span style="color: teal;">■</span> Pc
<span style="color: red;">■</span> Pa	<span style="color: yellow;">■</span> Pd

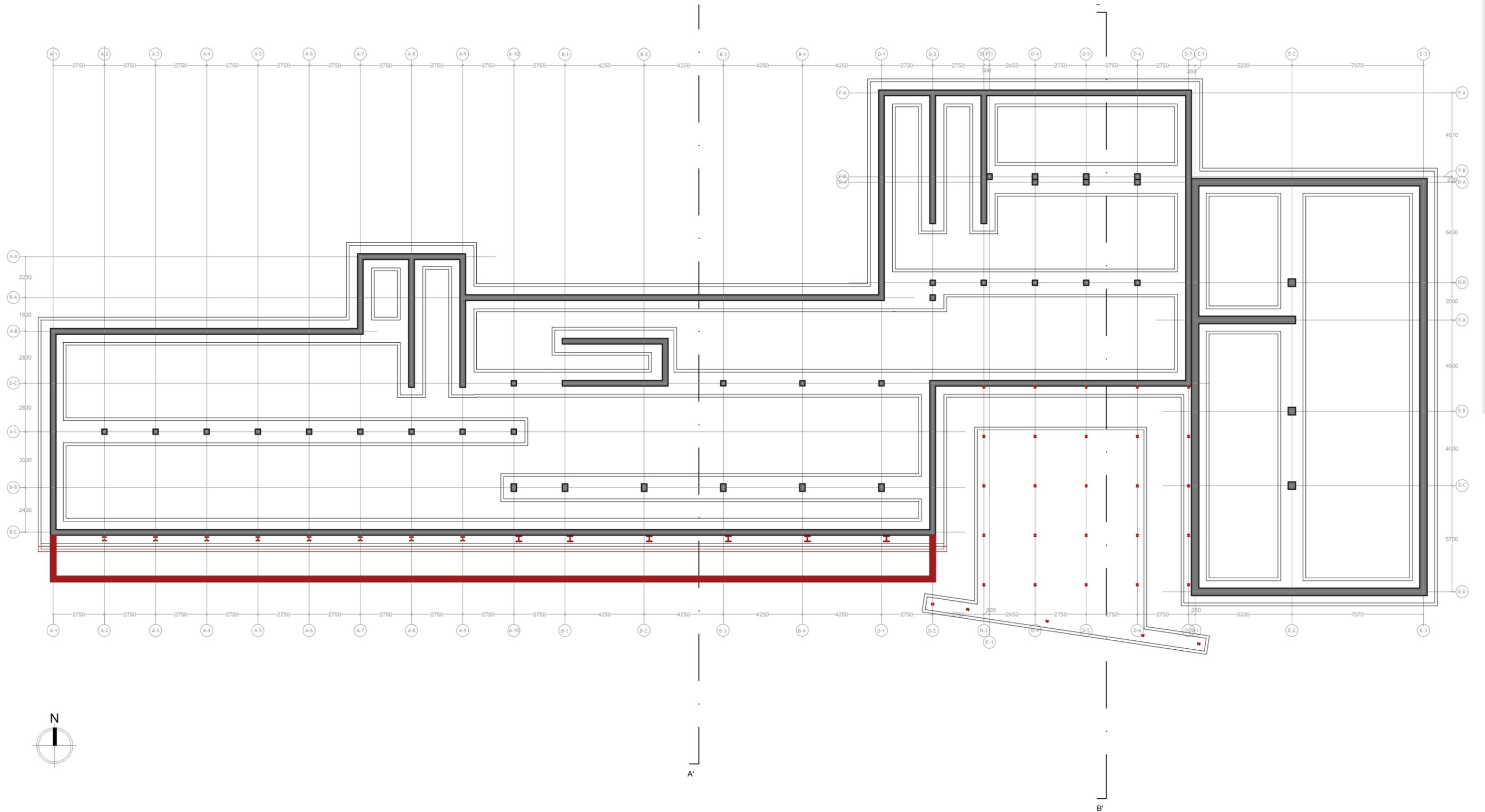
**ACCIAIO**

<span style="color: green;">■</span> T <sub>1</sub>	<span style="color: purple;">■</span> P <sub>1</sub>
<span style="color: brown;">■</span> T <sub>2</sub>	<span style="color: green;">■</span> P <sub>2a</sub>
<span style="color: lightgreen;">■</span> T <sub>3</sub>	<span style="color: lightgreen;">■</span> P <sub>2b</sub>
<span style="color: mediumgreen;">■</span> T <sub>4</sub>	<span style="color: black;">■</span> P <sub>3</sub>
<span style="color: darkbrown;">■</span> T <sub>6</sub>	<span style="color: black;">■</span> P <sub>4</sub>



# I. PIANTA STRUTTURALE G/R

## 1. FONDAZIONI





## 2. PIANO INTERRATO

Pilastrini in CA



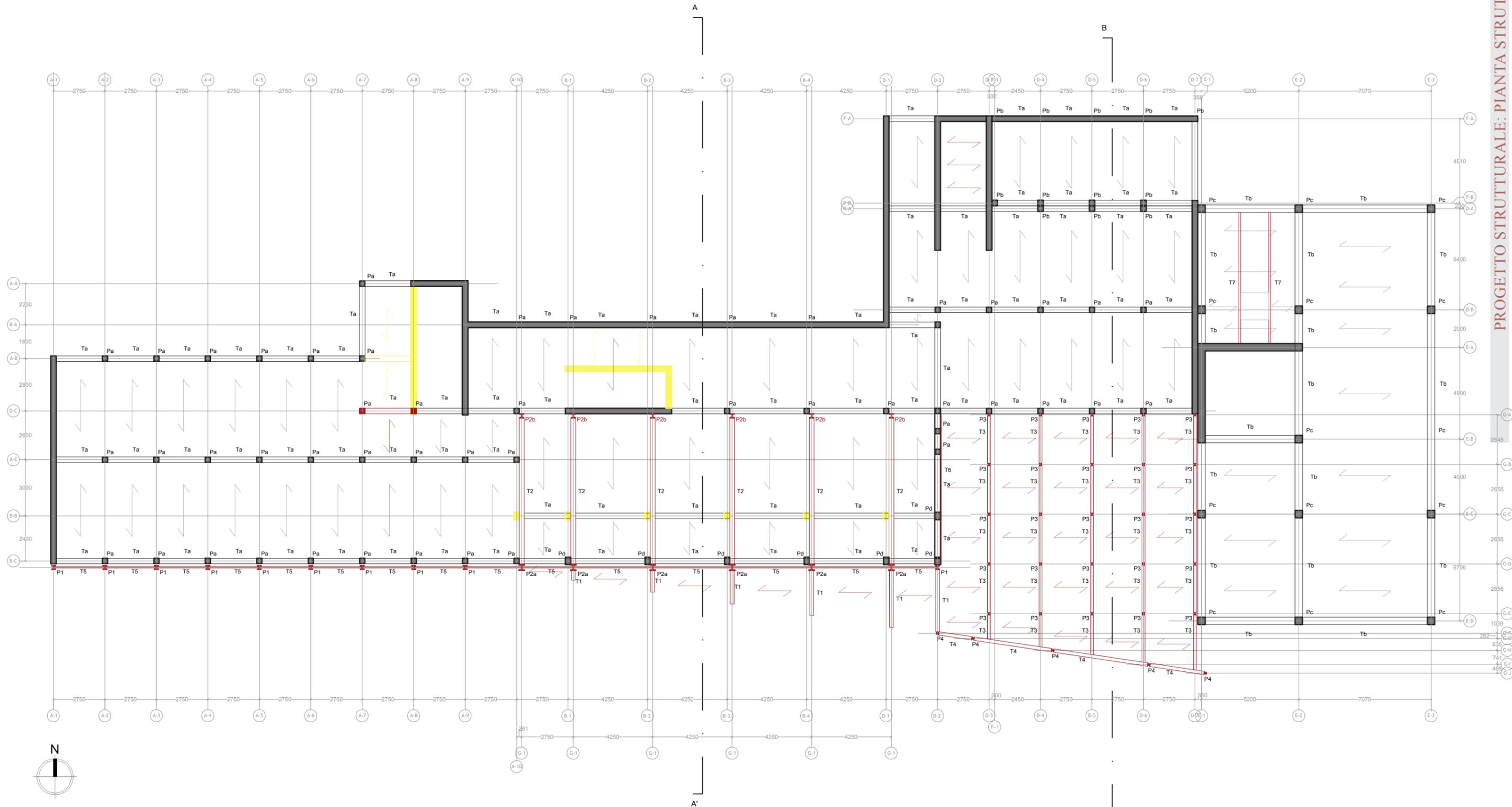
Trave in CA



Pilastrini in acciaio



Trave in acciaio





### 3. PIANO TERRA

Pilastrini in CA



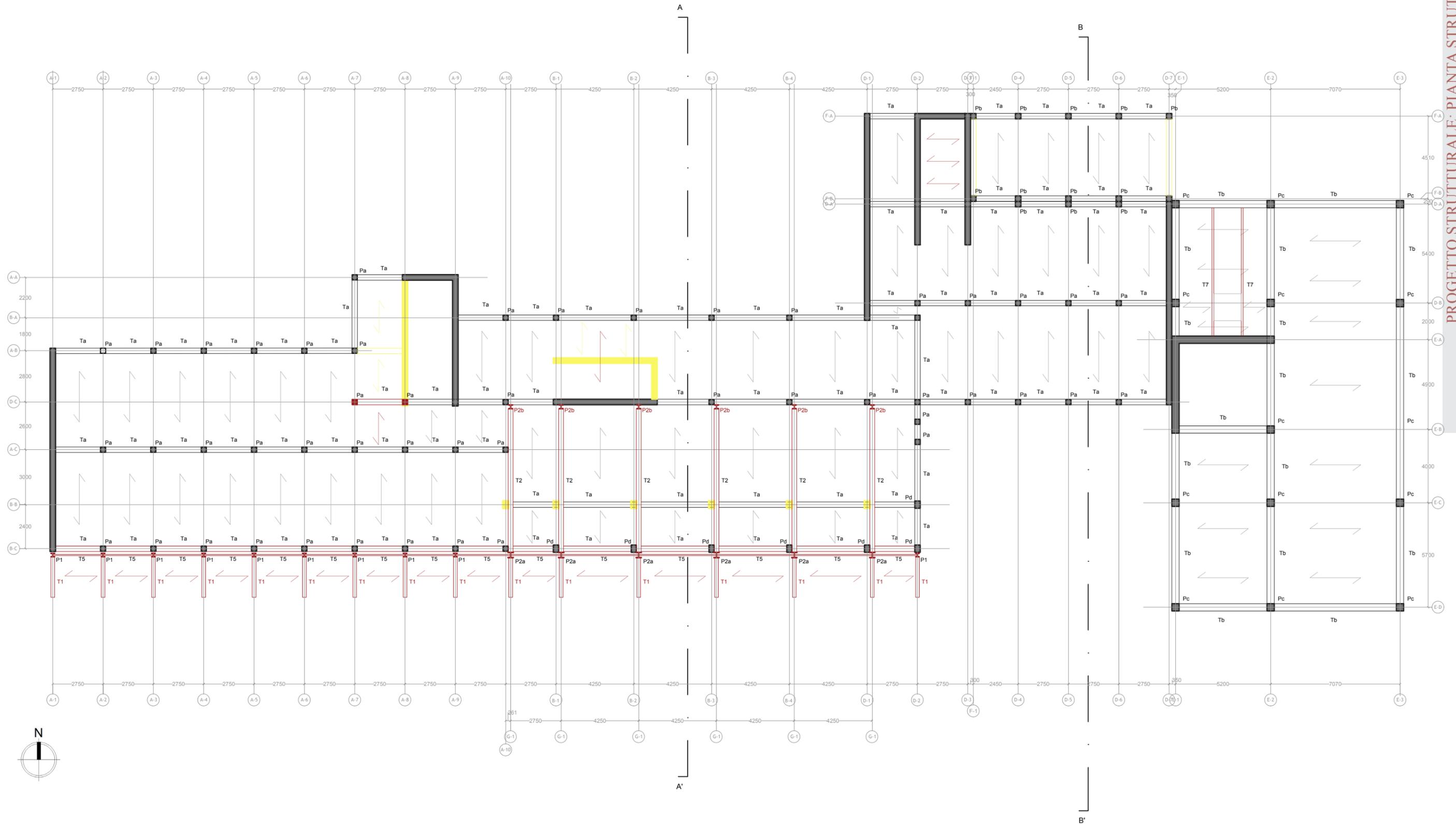
Trave in CA



Pilastrini in acciaio



Trave in acciaio





# 4. PRIMO PIANO

Pilastrini in CA



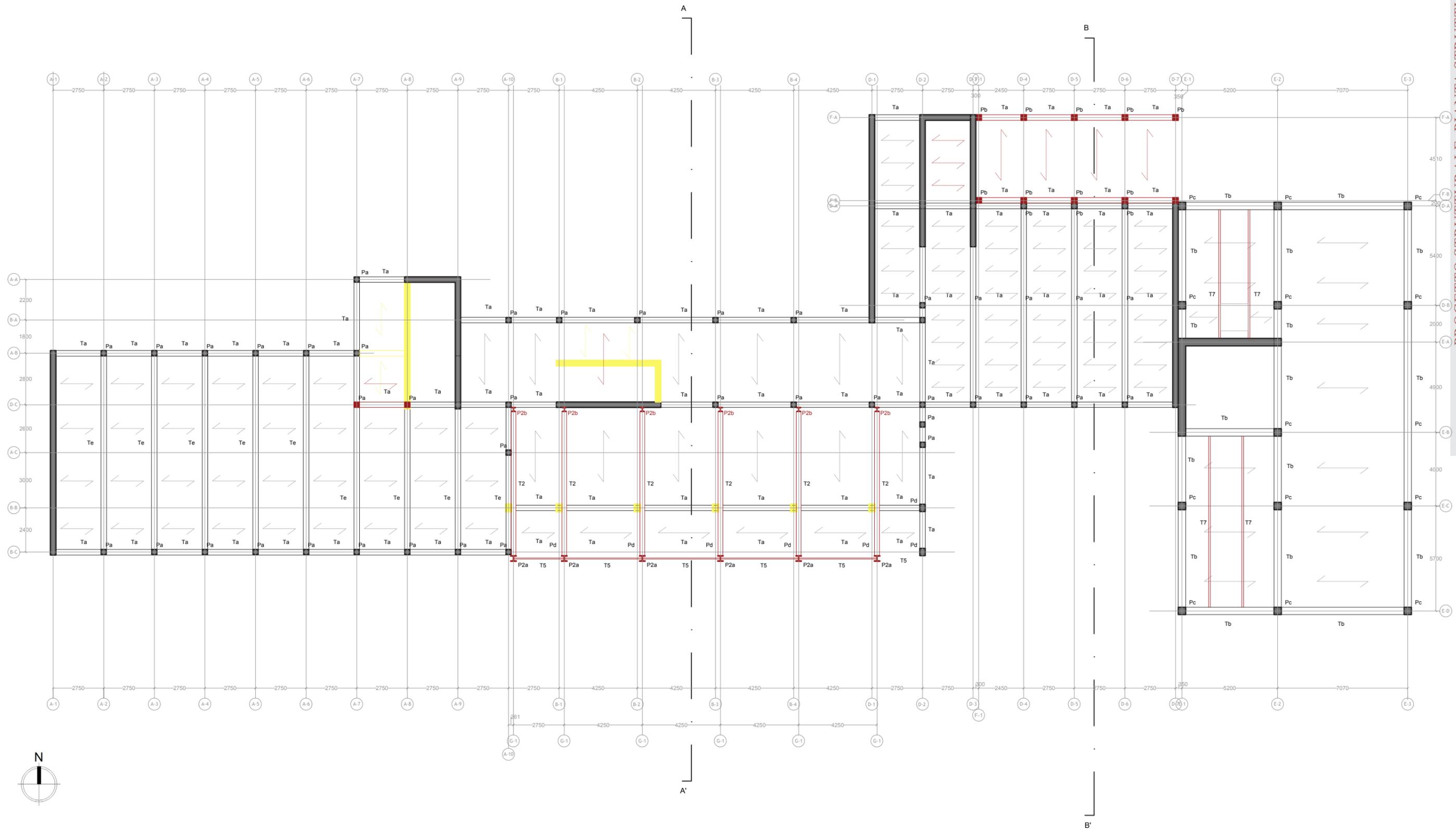
Trave in CA



Pilastrini in acciaio



Trave in acciaio



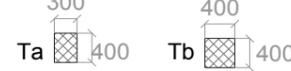


# 5. SECONDO PIANO

Pilastrini in CA



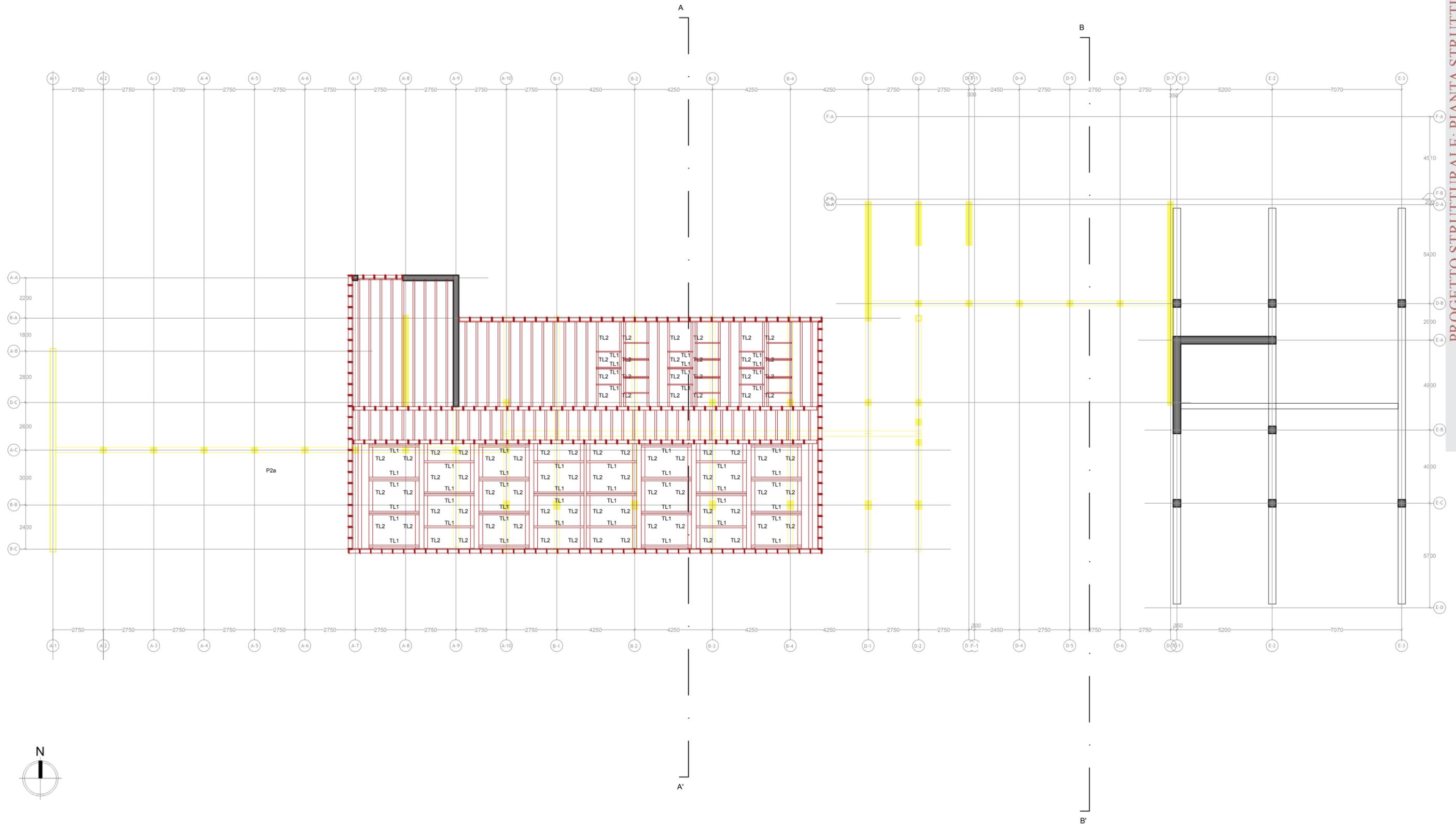
Trave in CA



Pilastrini in acciaio

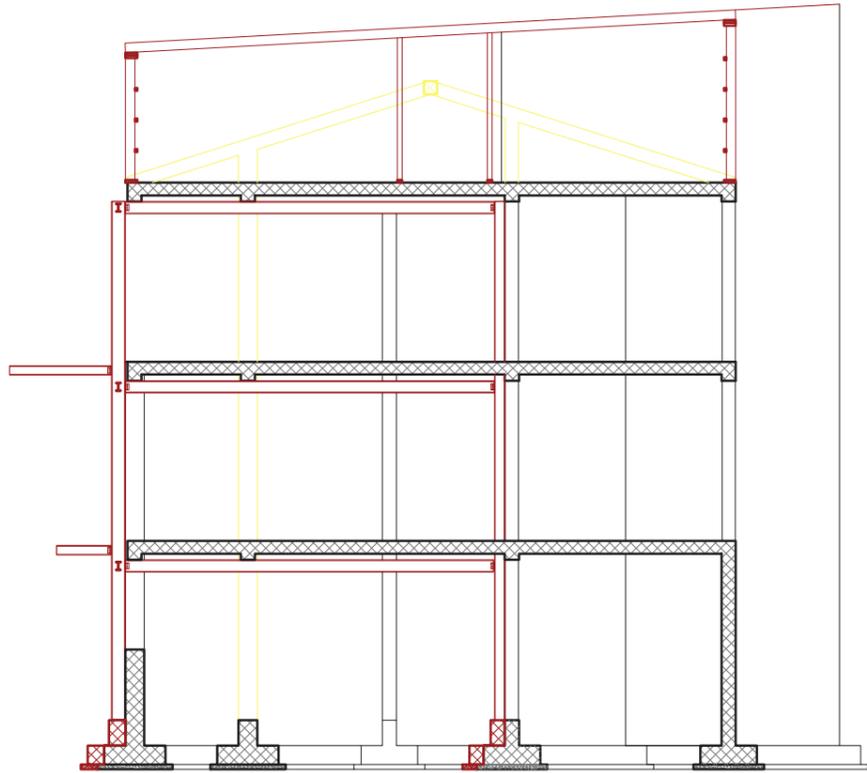


Trave in acciaio



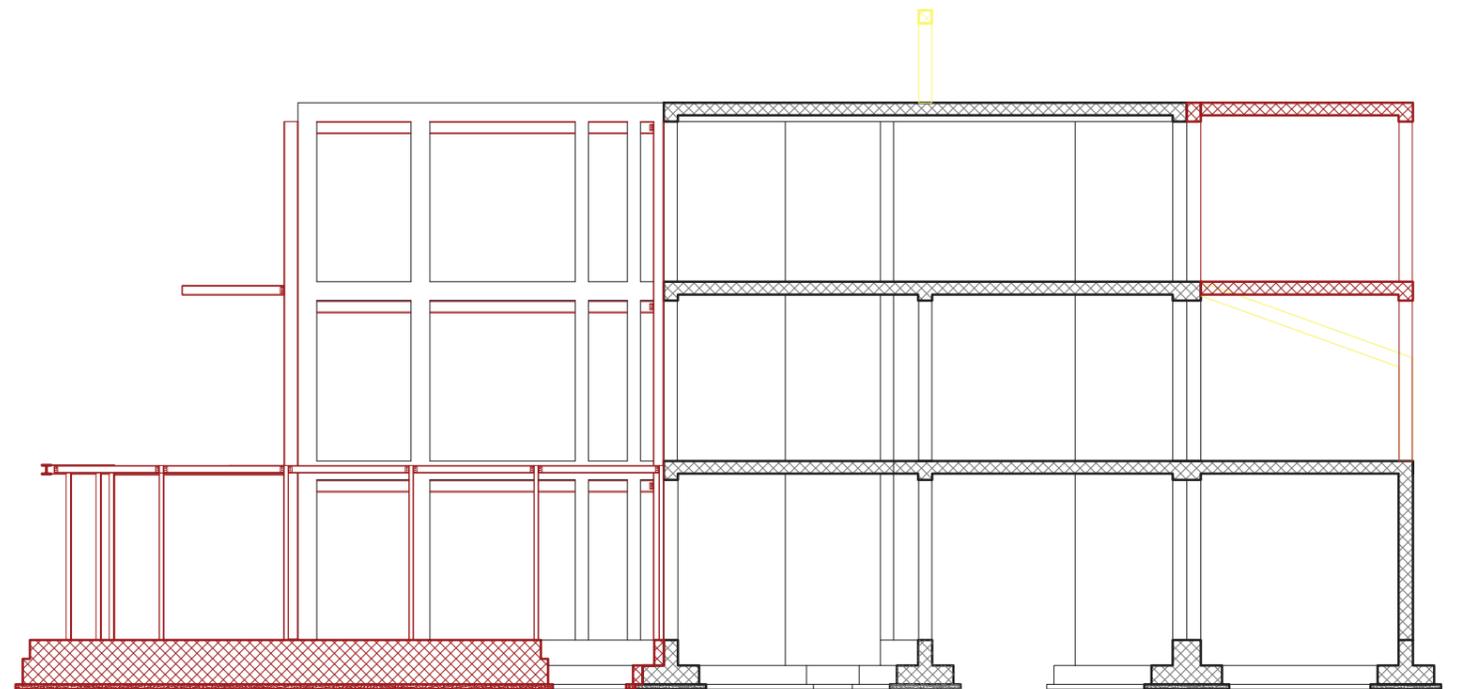
PROGETTO STRUTTURALE: PIANTE STRUTTURALE G/R



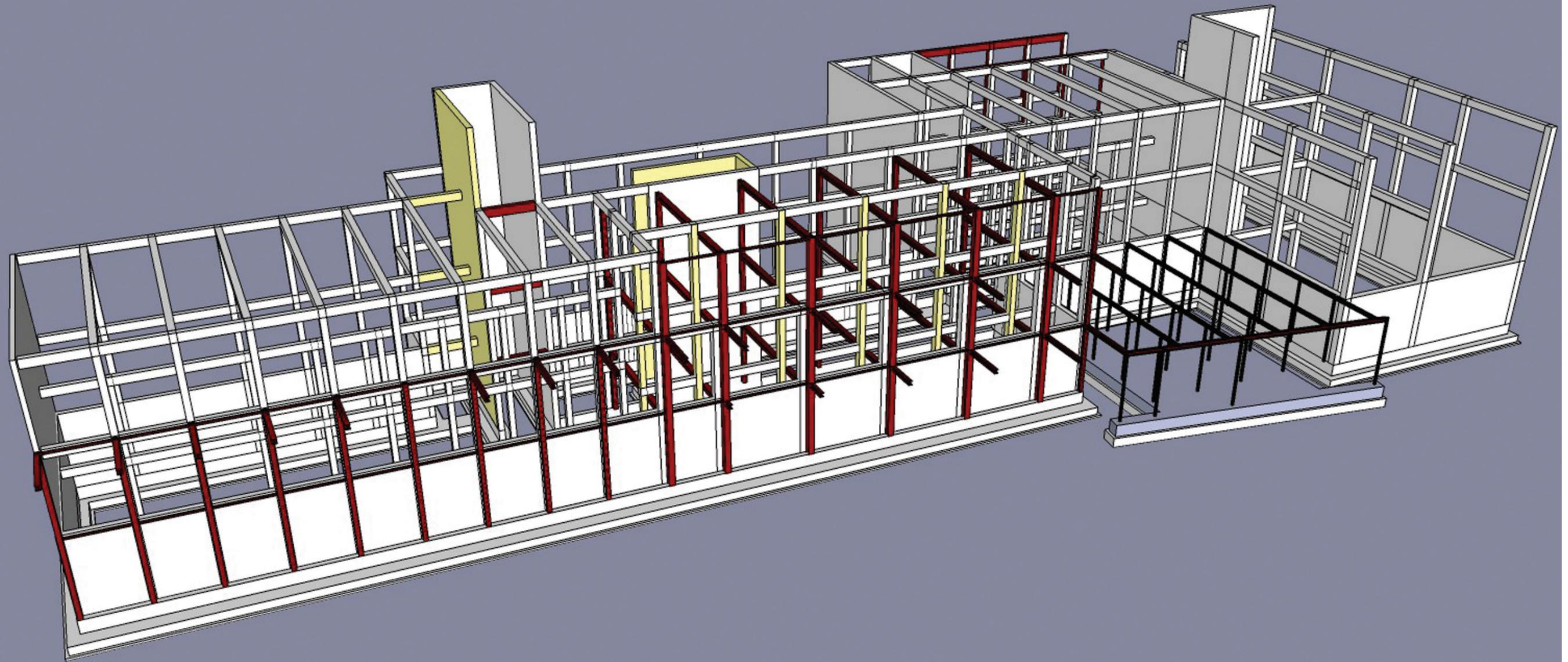


SEZIONE AA'

SEZIONE BB'









# XI. PROGETTO ILLUMINOTECNICO

<b>A. INTRODUZIONE.....</b>	<b>457</b>
1. Posizione dell'edificio.....	457
2. Qualità della luce.....	457
a) Intensità dell'illuminazione.....	457
b) Considerazioni energetici.....	457
c) Abbagliamento.....	458
d) Resa del colore.....	458
<b>B. VALUTAZIONE.....</b>	<b>459</b>
1. Fattori studiati.....	459
2. Risultati.....	459
a) Ingresso.....	463
<b>C. GESTIONE DELLE SERRE.....</b>	<b>468</b>
1. Cortile interno.....	468
2. Serre piccole.....	468



# A. INTRODUZIONE

## 1. POSIZIONE DELL'EDIFICIO

La posizione dell'edificio, sul versante nord della valle, sopra Sondrio, è l'assenza di oggetti che potrebbero ombreggiare l'edificio è un vantaggio importante per la qualità della luce.

Invece, il fatto che l'edificio sia seminterrato rende la gestione della luce nei locali seminterrati più difficile. Inoltre, la maggior parte delle aule didattiche esposte a sud hanno davanti a loro la serra. Questa doppia pelle diminuisce il numero di raggi solari che arrivano all'interno di queste aule.

## 2. QUALITÀ DELLA LUCE

La qualità della luce si misura non solamente alla sua potenza. Infatti, soprattutto in una scuola in cui la maggior parte si passa a guardare sia la lavagna, sia la carta, l'abbagliamento può facilmente diventare fastidioso e diminuire la capacità degli allievi a concentrarsi.

Inoltre, la quantità di luce naturale non ha solamente un'influenza sul comfort visivo, ma anche sul fabbisogno elettrico.

### a) Intensità dell'illuminazione

La quantità di luce che dobbiamo raggiungere, in funzione della destinazione d'uso viene definita nella norma UNI EN 12464.

Deve essere valutata anche in funzione della zona:

- zona del compito
- zona immediatamente circostante (0,5m intorno alla zona di compito)

Destinazione d'uso	lux minimi
Aule scolastiche	300
Lavagna	500
Laboratorio	500
Laboratorio di informatica	300
Ingresso	200
Aree di circolazione	100
Scale	150
Sala professori	300
Mensa	200
Cucina	500
Ufficio	500

figura XI.489: Esigenze di illuminamento medio

Il Decreto Ministeriale del 18/12/1975 consiglia un valore di illuminamento per le aule didattiche di 500 lux. Rispetteremo il criterio più vincolante, cioè 500

lux.

Inoltre, questo decreto indica un valore di 100 lux per i servizi igienici.

La normativa indica che il valore di illuminamento può essere più basso nelle zone immediatamente circostanti alla zona di compito. Però, dato per permettere agli utenti di modulare la disposizione delle scrivanie per svolgere delle attività di gruppo per esempio, ci siamo costretti ad avere un valore di illuminamento uniforme sull'intera superficie delle aule.

L'illuminamento sarà valutato a 90 cm della superficie di pavimento, ciò che corrisponde all'altezza di una scrivania standard.

### b) Considerazioni energetici

La quantità di luce presente all'interno di un locale in funzione della quantità di luce presente all'esterno si definisce grazie al Fattore di Luce Diurna. Questo parametro è uguale al rapporto fra l'illuminato misurato in un punto interno al locale studiato, e l'illuminamento all'esterno in un punto che riceve la luce dell'intera volta celesta, in condizioni di cielo coperto.

Questo valore dipende quindi della geometria del locale considerato.

Al fine di avere dei consumi ragionevoli di elettricità per l'illuminamento, la normativa definisce dei valori minimi di fattore medio di luce diurna ( $FLD_m$ ), la media essendo una media sulla superficie del locale studiata.

Destinazione d'uso	$FLD_m$ min
Aule scolastiche	3%
Laboratorio	3%
Ingresso	1%
Aree di circolazione	1%
Scale	1%
Sala professori	1%
Mensa	2%
Cucina	3%
Ufficio	1%

figura XI.490:  $FLD_m$  minimo

Facciamo notare che questi valori sono "consigliati", è non obbligatori.

Un altro parametro che permette di valutare il fabbisogno elettrico dovuto al consumo per la luce è il *Daylight Autonomy*. In funzione del fabbisogno di luce in termini di illuminamento, quantifica il tempo durante il quale la luce naturale è sufficiente per apportare un

illuminamento confortevole.

### **c) Abbagliamento**

Ci sono due tipi di abbagliamento:

- l'abbagliamento di tipo molesto, che è causato da un dislivello troppo importante di luminanza tra il piano di lavoro e lo spazio circostante. È quantificato grazie all'UGR. Però, dato la complessità della sua valutazione, lo studio dell'abbagliamento sarà qualitativo per il nostro progetto.
- l'abbagliamento debilitante: se la luminanza è troppo importante, l'occhio rischia di essere danneggiato.

### **d) Resa del colore**

Lo spettro visivo per l'occhio umano si estende in termini di lunghezza d'onda tra 390nm e 780nm. Se la distribuzione della luce nei locali è troppo diversa dalla distribuzione nel spettro della luce esterna, la resa del colore sarà considerata come scarsa, e i colori non saranno percepiti in modo adeguato.

## B. VALUTAZIONE

### 1. FATTORI STUDIATI

I fattori studiati in questo progetto sono il fattore medio di luce diurna, il *Daylight Autonomy* e la luminanza - al fine di valutare il rischio di abbagliamento debilitante - è la ripartizione della luce.

Il  $FLD_m$  ed il *Daylight Autonomy* sono stati valutati grazie al software Ecotect, mentre la luminanza e la visualizzazione del contrasto sono stati realizzati con Velux Daylight Visualizer.

### 2. RISULTATI

Il calcolo del  $FLD_m$  e del *Daylight Autonomy* sono stati effettuati per tutti gli ambienti, però riproduciamo qui sotto i risultati di locali rappresentativi

► l'aula 14 (primo piano, dietro la serra)

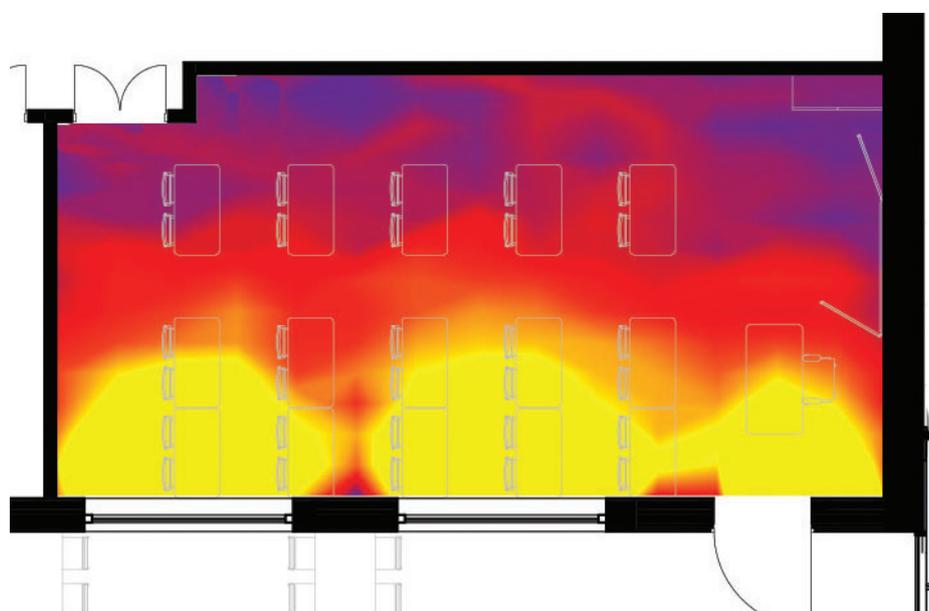


figura XI.491: Aula 14, FLD ( $FLD_m=3,37\%$ )

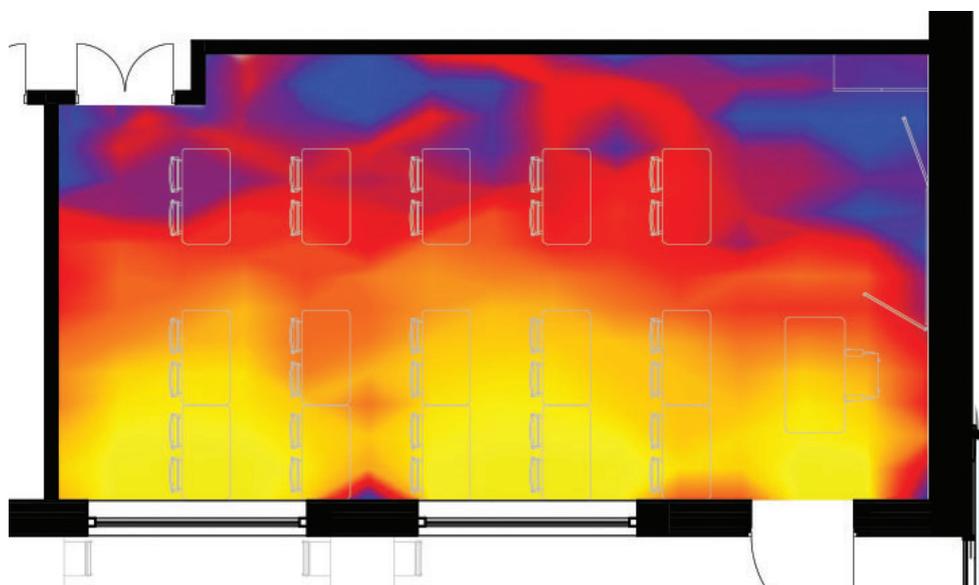


figura XI.492: Aula 14, DA (DA=56,42%)

► Ufficio 6 (piano terra, a nord)



Facciamo notare che nonostante il fattore medio di luce diurna relativamente alto - vale 2,47, mentre la norma consiglia un valore superiore ad uno - la luce naturale non permette di coprire una parte importante del fabbisogno di illuminazione: solamente 28,91%.

Se questo è legato in parte al fatto che abbiamo deciso di mettere delle finestre più piccole a nord ( il RAI scelto per gli uffici a nord è il minimo richiesto dalla normativa: un quinto) per spendere meno energia per il riscaldamento, è anche legato al fatto che abbiamo scelto di valutare il Daylight Autonomy, considerando che l'illuminamento doveva raggiungere 500 lux su tutta la superficie dell'ufficio.

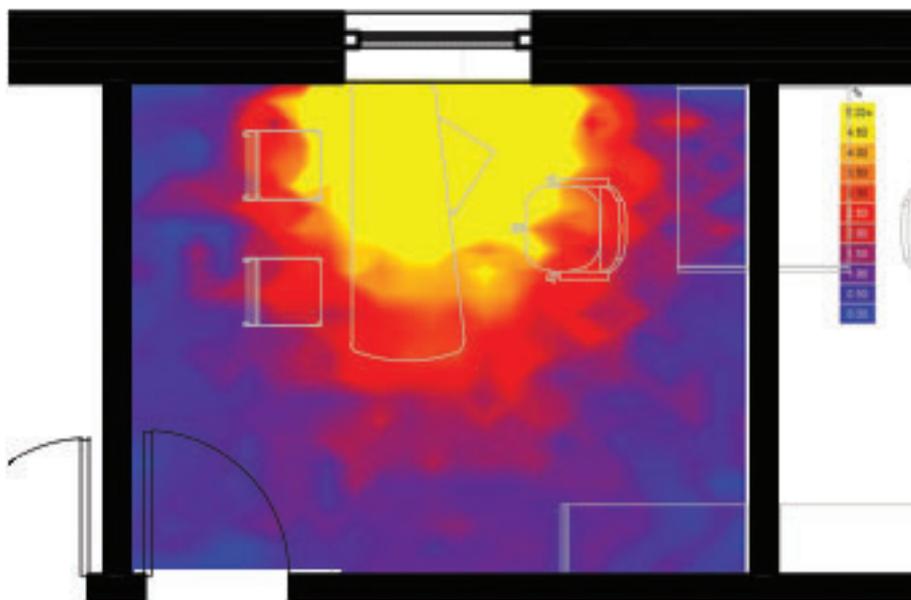


figura XI.493: Ufficio 6, FLD ( $FLD_m=2,47$ )

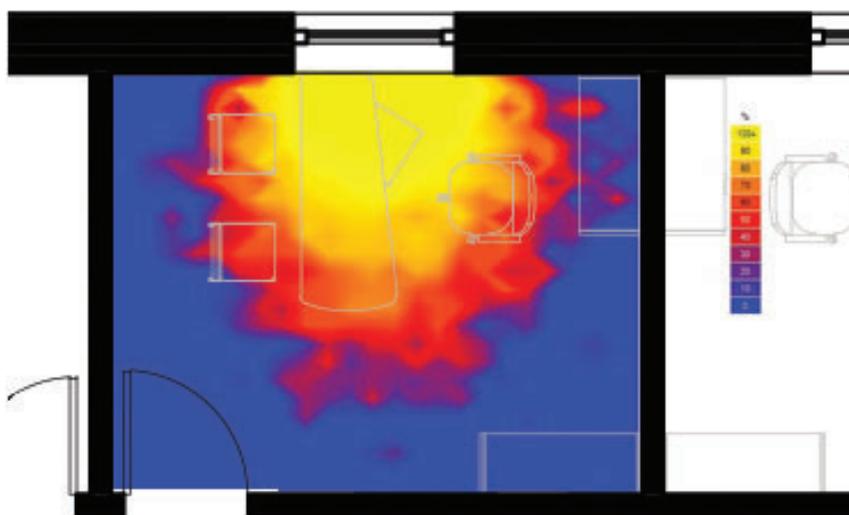


figura XI.494: Ufficio 6, DA (DA=28,91)

La figura XI.494 ci permette di valutare dove si può posizionare la scrivania per avere dei consumi per l'elettricità minimi. Vediamo infatti che la scrivania è stata posta vicina alla finestra. Però, siccome gli utenti usano dei computer negli uffici, si dovrà fare attenzione all'abbagliamento, e prevedere delle tende per conservare una luminosità relativamente bassa (circa 300 lux).

Inoltre, dato che l'ufficio è a Nord, non si rischia un abbagliamento dovuto alla luce diretta.

► Aula 18 (secondo piano, nel corpo est)



figura XI.495: Aula 18, FLD (FLD<sub>m</sub> = 5,36%)

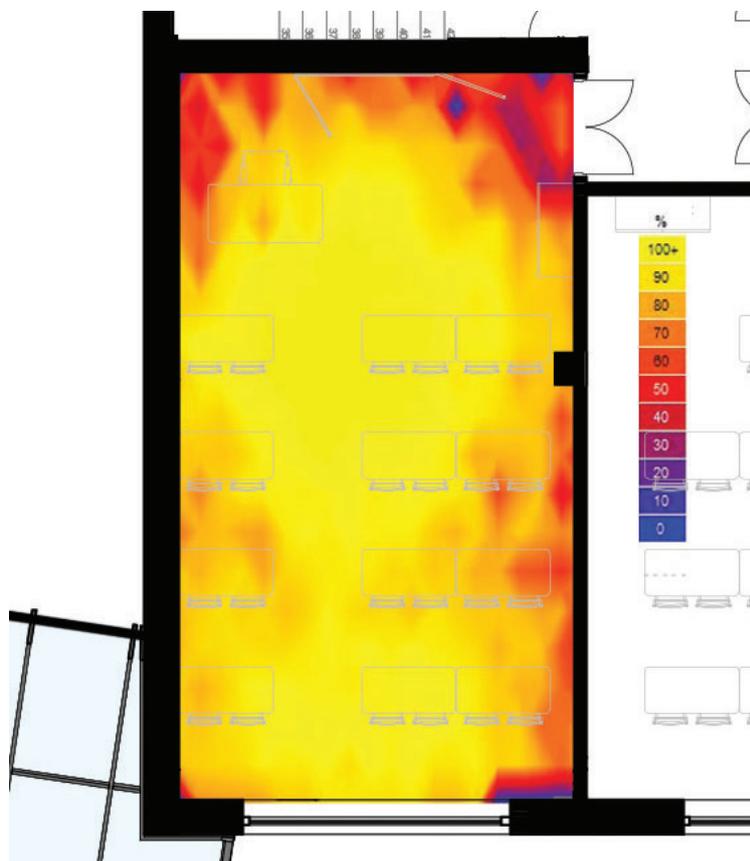


figura XI.496: Aula 18, DA (DA=81,30 %)

In tutti i casi dove la geometria lo rendeva possibile, abbiamo studiato la possibilità di aggiungere delle parti trasparenti sul tetto. Questo ci permette aumentare la quantità di energia gratuita che possiamo captare, ma anche di migliorare significativamente il comfort visivo.

La finestra è stata posizionata in modo tale di avere una buona ripartizione del fattore di luce diurna. Peraltro, non era possibile di aggiungere una finestra sul lato ovest dell'aula 18 a causa della posizione della serra. La finestra sul tetto ci permette quindi di supplire a questa carenza.

► Aula 1 (piano seminterrato, dietro la serra)

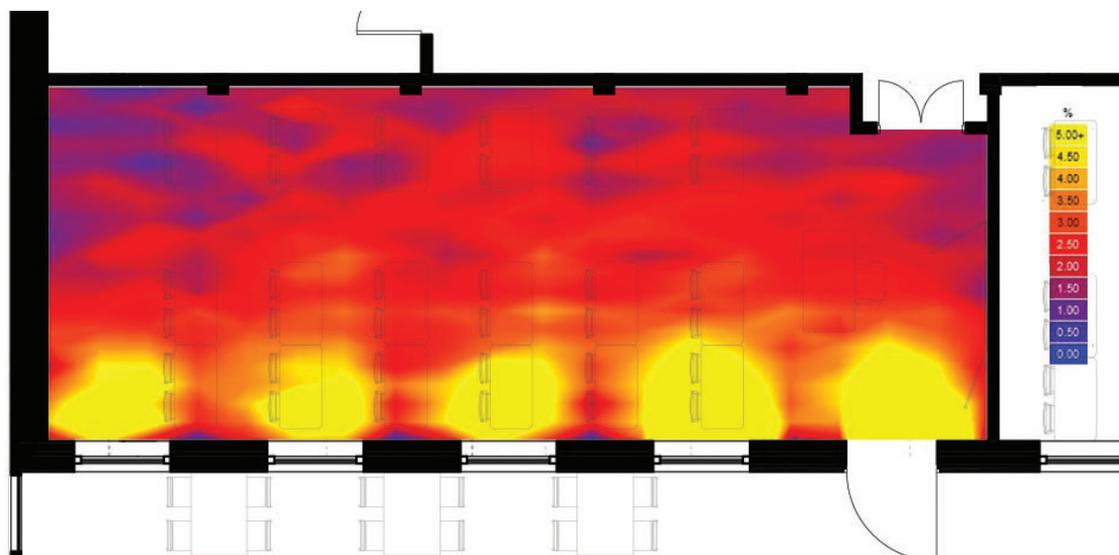
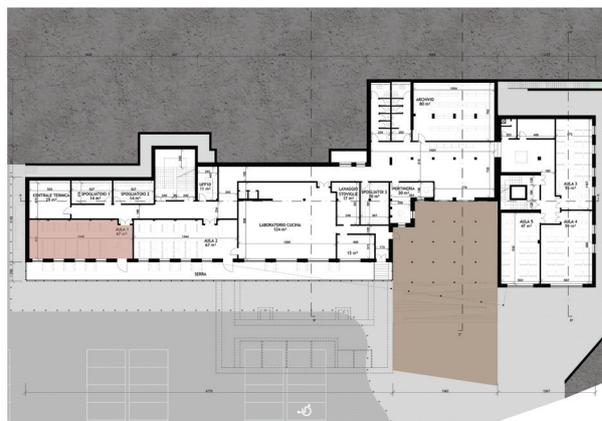


figura XI.497: Aula 1, FLD (FLD<sub>m</sub>=2,88)

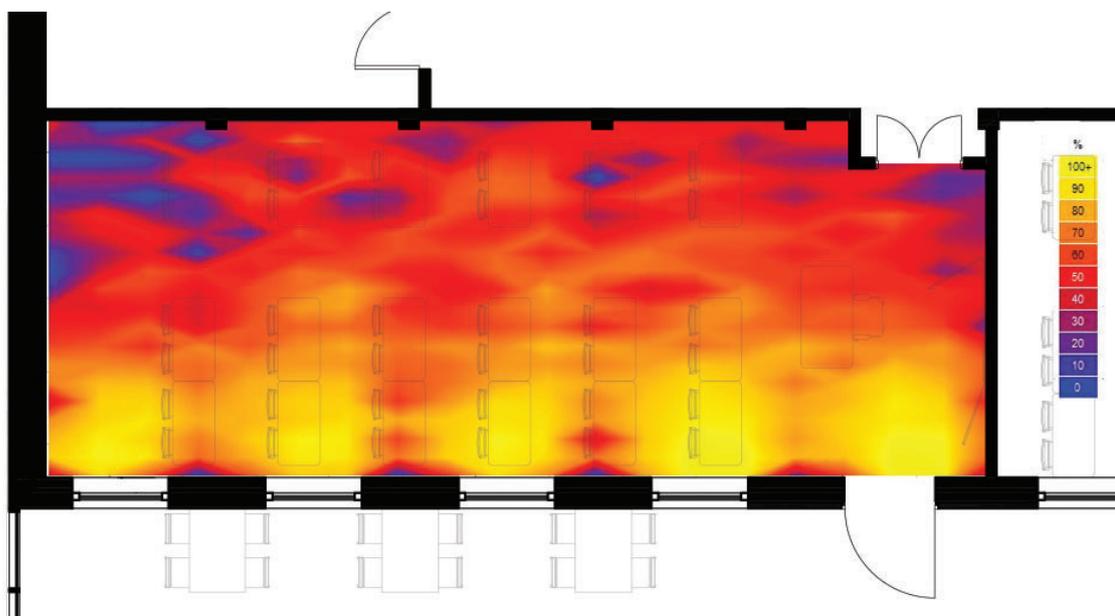


figura XI.498: Aula 1, DA (DA=58,98)

Vediamo con questi analisi che nonostante la serra che crea una doppia pelle e diminuisce la quantità di luce che raggiunge l'aula, il fattore medio di luce diurna, grazie alle superfici vetrate e pari a 2,88, cioè poco meno del valore consigliato.

Grazie al fabbisogno basso di illuminamento per le circolazioni, il Daylight Autonomy risulta molto alto.

### a) Ingresso

Abbiamo voluto aggiungere un altro pozzo di luce al piano interrato, vicino all'entrata. Infatti, il corridoio di questo piano è poco luminoso a causa della sua posizione. Però, è il passaggio di una maggior parte degli studenti all'inizio della loro giornata. Ci sembrava quindi importante di apportare un po' di luce, perché l'inizio di una giornata scolastica non assomiglia alla discesa agli inferi. Per valutare la dimensione che serviva, abbiamo calcolato la quantità di luce che era trasmessa grazie a questo pozzo di luce.

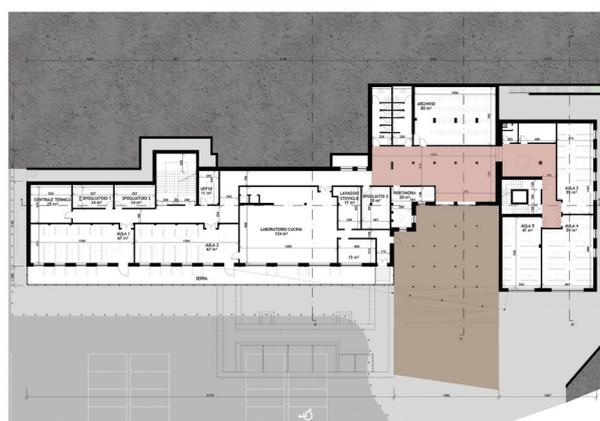


figura XI.499: Ingresso, DA

locale	superficie	Daylight autonomy	FLD <sub>m</sub> min	FLD <sub>m</sub>	lux min	RAI min	RAI
archivio	80	0	1	0	100	0	0
aula 1	67	58.22	3	2.85	500	0.2	0.204*
aula 10	59	54.1	3	3.01	500	0.2	0.192*
aula 11	41	50.02	3	2.93	500	0.2	0.217*
aula 12	35	38.46	3	2.5	500	0.2	0.186*
aula 13	60	60.22	3	3.5	500	0.2	0.229*
aula 14	60	56.42	3	3.37	500	0.2	0.229*
aula 15	38	51.81	3	3.28	500	0.2	0.189
aula 16	55	54.84	3	3.35	500	0.2	0.154
aula 17	59	64.95	3	3.7	500	0.2	0.170
aula 18	47	81.30	3	5.36	500	0.2	0.184
aula 19	65	96.03	3	21.87	500	0.2	0.476
aula 2	67	51.17	3	2.63	500	0.2	0.204*
aula 20	65	94.59	3	20.44	500	0.2	0.476
aula 21	29	96.41	3	17.63	500	0.2	0.279
aula 22	29	95	3	16.36	500	0.2	0.279
aula 3	55	56.64	3	3.35	500	0.2	0.154
aula 4	59	69.33	3	4.49	500	0.2	0.170
aula 5	47	44.57	3	2.82	500	0.2	0.169
aula 6	55	56.19	3	3.45	500	0.2	0.154
aula 7	59	65.95	3	4.1	500	0.2	0.170
aula 8	47	59.83	3	3.58	500	0.2	0.169
aula 9	40	91.94	3	7.36	500	0.2	0.422
aula informatica	85				200	0.125	0.204
bagno 0 E	18	0	1	0	100	0	0
bagno 0 N	40	0	1	0	100	0	0
bagno 1 E	18	0	1	0	100	0	0
bagno 1 N	40	0	1	0	100	0	0
bagno 2 E	13	0	1	0	100	0	0
bagno 2 N	40	0	1	0	100	0	0
bagno 2 O	28	0	1	0	100	0	0
bagno 3	29	0	1	0	100	0	0
centrale termica	25	0	1	0	200	0	0
corridoio 3	47	0	1	0	100	0	0
corridoio uffici	35	0	1	0	100	0	0
corridoio 2	215	22.59	1	0.47	100	0	0.041
corridoio 1	163	20.57	1	0.72	100	0	0.059
corridoio 0	246	32.42	1	1.26	100	0	0.029
laboratorio acconciatura	75	40.3	3	2.97	500	0.125	0.128
laboratorio bar	70	79.78	3	3.26	300	0.125	0.206*
laboratorio cucina	124	31.5	3	2.02	500	0.125	0.116*

laboratorio estetica	75	86.06	3	5.3	500	0.125	0.205
lavaggio stoviglie	17	0	0	0	200	0	0
mensa	268	96	2	6.33	200	0.125	0.257
sala pausa docenti	21	72.63	2	1.84	200	0.125	0.114
portineria	20		1		300	0.125	0.225
sala docenti	48	65	1	2.55	300	0.125	0.15
sala riunioni	26	89.52	1	3.11	200	0.125	0.307
scala est	92		0		150	0	0
scala ovest	35	0	0	0	150	0	0
spogliatoi 1	14	33.29	1	0.35	100	0	0.04
spogliatoi 2	14	35.18	1	0.37	100	0	0.04
spogliatoi 3	20	0	1	0	100	0	0
spogliatoi 4	32	70.23	1	0.91	100	0	0.075
ufficio 1	14	50.74	1	3.08	500	0.125	0.285
ufficio 10	11	21.32	1	1.55	500	0.125	0.136
ufficio 2	14	50.7	1	3.08	500	0.125	0.285
ufficio 3	14	50.47	1	3.07	500	0.125	0.285
ufficio 4	14	50.51	1	3.07	500	0.125	0.285
ufficio 5	12	47.85	1	2.41	500	0.125	0.125
ufficio 6	12	28.32	1	2.42	500	0.125	0.125
ufficio 7	12	26.98	1	2.35	500	0.125	0.125
ufficio 8	12	26.87	1	2.24	500	0.125	0.125
ufficio 9	14	50.47	1	3.07	500	0.125	0.285
ufficio direttore	28	63.23	1	3.77	500	0.125	0.285

figura XI.500: Tabella riassuntiva delle caratteristiche illuminotecniche del progetto

\* Le aule accanto alla serra non sono direttamente in contatto con l'esterno. E' quindi il RI che è valutato.

Possiamo notare che il fattore medio di luce diurna è più basso del valore consigliato dalla normativa in alcune aule seminterrate. Però, loro valore non è mai inferiore a 2,5%. Nei vani scale, ed nei corridoi, non è stato possibile di raggiungere i valori minimi, nonostante la presenza di un pozzo di luce al piano seminterrato perché è sia contro terra, sia tra le aule.

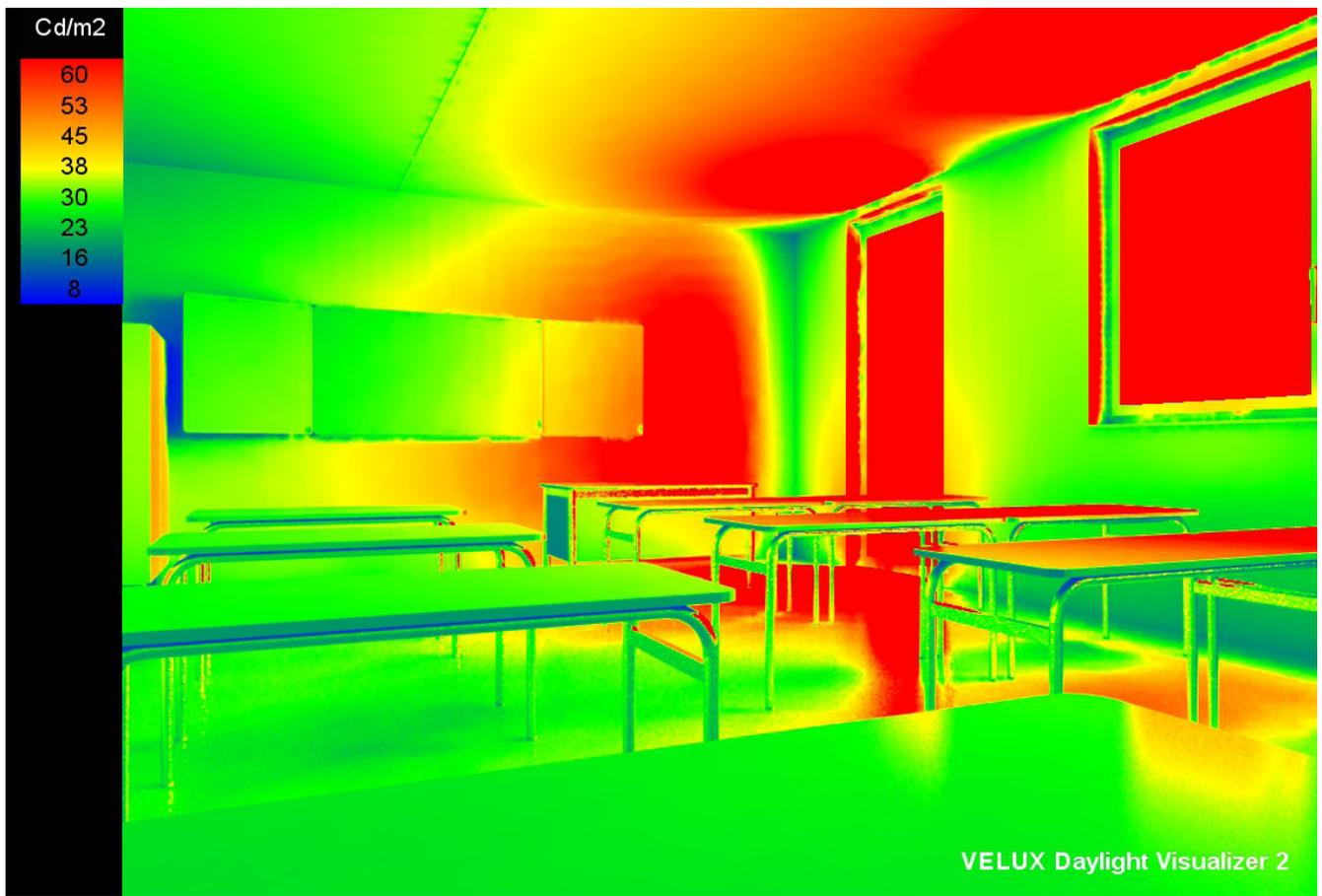


figura XI.501: Aula 14, luminanza

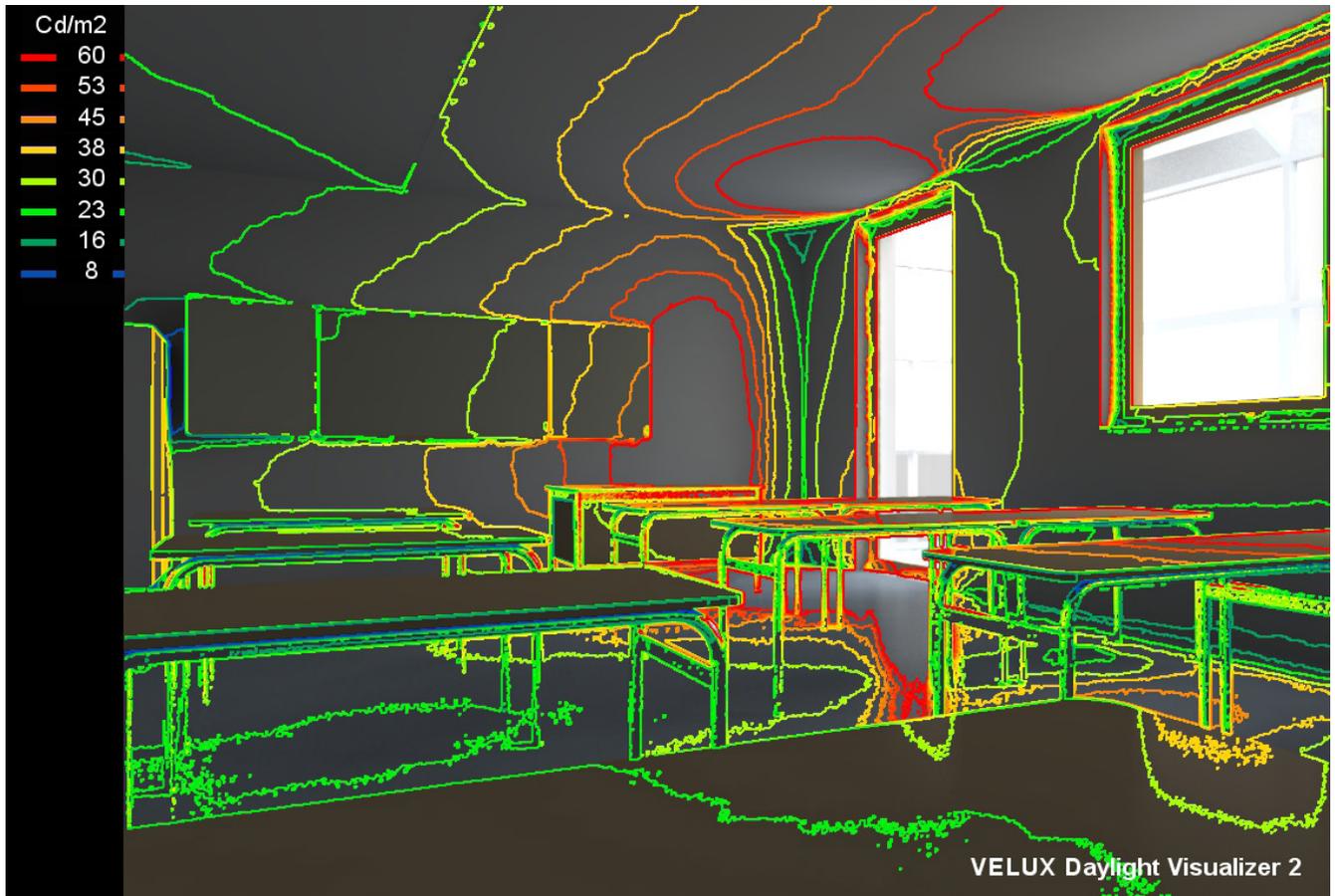


figura XI.502: Aula 14, livelli di luminanza

Vediamo che la luminanza è molto più elevata al livello dei serramenti (fino a 1060 cd/m<sup>2</sup>). Questo rischia di causare un abbagliamento di contrasto: anche se la lavagna sarà illuminata in modo corretto, il fatto di avere una sorgente luminosa più importante nel campo visivo può disturbare i studenti.

Per questo motivo, abbiamo deciso di mettere delle tende interne, per ridurre il rischio di abbagliamento, senza diminuire significativamente gli apporti gratuiti di calore.

Inoltre, il fatto che la maggior parte delle aule siano esposte a sud rende il rischio di abbagliamento basso: i raggi solari non penetrano direttamente nelle aule.

## C. GESTIONE DELLE SERRE

### 1. CORTILE INTERNO

Il cortile interno è stato progettato per creare un spazio di aggregazione per gli utenti della scuola. Le attività che si svolgeranno in questa serra sono attività che potrebbero anche svolgersi fuori: terrazza per la mensa ed il bar, cortile di aggregazione tra le lezioni.

Per questo motivo, abbiamo deciso di limitare la schermatura a quella che serve per evitare il surriscaldamento estivo.

### 2. SERRE PICCOLE

Le serre piccole sono anche principalmente dei spazi di aggregazione. Però, come tutti gli allievi hanno i loro corsi e le loro pause allo stesso tempo, è anche previsto che possa servire a piccoli gruppi di lavorare, senza essere disturbato dagli altri utenti.



figura XI.503: Illuminamento nella serra (giugno, alle 14)

Perché i professori possano utilizzare questo spazio, è importante di poter prevedere se sarà utilizzabile, cioè, se la temperatura e l'illuminamento sono confortevoli per lavorare.

Vediamo che in caso di tempo soleggiato, l'illuminamento è molto troppo elevato e impedisce gli allievi di lavorare sia su computer, sia su carta.

Abbiamo quindi previsto di installare delle tende interne, affinché l'energia captata nella serra non sia troppo influenzata da questa schermatura. Inoltre, per permettere agli utenti delle aule retrostante di sfruttare della luce naturale, e per minimizzare l'energia solare rifletta, le tende dovranno essere abbassate solamente quando sarà necessario. Si dovrà quindi sensibilizzare gli utenti a questa problematica.

# XII. PROGETTO IMPIANTISTICO

<b>A. STRATEGIA IMPIANTISTICA.....</b>	<b>439</b>
1. Strategia.....	439
a) Riscaldamento.....	439
b) Raffrescamento.....	439
c) Ventilazione.....	439
d) Produzione locale di energia.....	439
2. Strategia climatica dell'edificio.....	442
a) Funzionamento durante il periodo invernale.....	442
b) Funzionamento durante il periodo caldo.....	444
<b>B. FABBISOGNO ENERGETICO.....</b>	<b>445</b>
1. Acqua calda sanitaria (ACS).....	445
2. Fabbisogno elettrico.....	445
a) Illuminazione.....	445
b) Altri usi.....	446
c) Fabbisogno globale.....	447
<b>C. SISTEMA IMPIANTISTICO.....</b>	<b>449</b>
1. Dimensionamento della Pompa di calore.....	449
2. Sistema di ventilazione.....	451
3. Collettori solari.....	452
4. Pannelli fotovoltaici.....	452
<b>D. FABBISOGNO GLOBALE.....</b>	<b>454</b>
1. Ipotesi di calcolo.....	454
2. Produzione di energia.....	454
a) Produzione dei collettori.....	454
b) Produzione dei pannelli fotovoltaici.....	456
3. Calcolo del fabbisogno totale di energia.....	456
a) Fabbisogno di acqua calda.....	456
b) Energia finale.....	457
c) Energia primaria.....	458
<b>E. REDDITIVITÀ DELL'IMPIANTO DI PRODUZIONE.....</b>	<b>459</b>
1. Ipotesi.....	459
2. Redditività per m <sup>2</sup> .....	459
a) Calcolo della redditività economica.....	459
b) Calcolo della redditività energetica.....	460
3. Redditività dell'installazione.....	461
4. Ottimizzazione.....	461
<b>F. CONCLUSIONE.....</b>	<b>463</b>



# A. STRATEGIA IMPIANTISTICA

## 1. STRATEGIA

L'obiettivo di questa parte è di scegliere e di dimensionare gli impianti che useremo per il riscaldamento, la produzione di acqua calda, la ventilazione e l'illuminazione artificiale.

### a) Riscaldamento

Per quanto riguarda il riscaldamento, abbiamo calcolato nella parte "V. La serra" il fabbisogno per il riscaldamento. Abbiamo come terminale per il riscaldamento un sistema radiativo a pavimento. Questo sistema presenta alcuni vantaggi notevoli nel caso particolare del nostro progetto:

- la radiazione emessa dal pavimento caldo permette di ottenere un comfort termico velocemente. Infatti per una stessa temperatura dell'aria, la temperatura operativa - che rappresenta il comfort - sarà più alta grazie alla radiazione, rispetto ad un sistema ad aria.
- la temperatura dell'acqua per il riscaldamento è bassa (40°C). Ci sono meno perdite termiche per la sua produzione ed il suo stoccaggio. Inoltre, potremo usare degli impianti di produzione come una pompa di calore o dei pannelli solari termici con rendimenti più alti.
- il fabbisogno in energia utile per il riscaldamento è relativamente basso: 14,7 kWh/m<sup>2</sup>an. In effetti, in caso di un fabbisogno alto, un sistema tutta aria è raccomandato.

### b) Raffrescamento

Abbiamo peraltro determinato che non era necessario un impianto di raffrescamento: nonostante la produzione di calore dovuta alla presenza degli allievi durante le ore di uso, il clima di Sondrio e il fatto che la scuola sia chiusa durante l'inverno permettono di gestire un eventuale surriscaldamento con una climatizzazione efficiente.

### c) Ventilazione

L'alto fabbisogno di apportare aria pura nelle aule ci hanno condotto a scegliere una ventilazione meccanica. Infatti, non è possibile di garantire un purezza sufficiente dell'aria nelle condizioni di progetto: la direzione principale del vento è quello della valle (ovest/est), quindi nel senso longitudinale del edificio. Inoltre, le perdite termiche dovute al ricambio d'aria sarebbero comunque state troppo alte senza scambiatore di calore tra l'aria che esce dell'edificio e l'aria che entra. La presenza di scambiatore è ora vincolata ad una ventilazione meccanica.

### d) Produzione locale di energia

#### 1) Collettori solari termici

Abbiamo visto durante il studio del funzionamento termico dell'edificio che la serra - a sud - deve essere protetta dal sole durante il periodo più caldo.

Per non perdere durante tutto l'anno il calore di cui vogliamo proteggerci durante solamente alcune ore, è per non avere un sistema motorizzato per la protezione solare, abbiamo voluto inserire dei tubi sotto vuoto per la produzione di acqua calda. Questi collettori servono di schermature solari ed a produrre dell'energia.

Questa energia serve a pre-riscaldare l'acqua calda sanitaria, o a produrre direttamente l'energia per il riscaldamento. Ricordiamo che abbiamo scelto appunto l'impianto di distribuzione del calore per poter avere un rendimento dei collettori più alto. In effetti, la temperatura dell'acqua per un impianto di riscaldamento a pavimento è pari a circa 35 °C. Inoltre, il rendimento dei tubi sotto vuoto è più alto se la temperatura dell'acqua è più bassa.

Abbiamo studiato la possibilità di usare dei collettori integrati nel vetro. Questo ci avrebbe permesso di diminuire la quantità di vetro da produrre per la facciata, e quindi la sua energia grigia, e il suo peso. Però, abbiamo scelto un sistema più tradizionale a causa della manutenzione complessa e del rendimento più basso.

Abbiamo scelto dei tubi sotto vuoto piuttosto che dei pannelli perché ci permette di usarli sulla facciata: in effetti, la produzione di calore degli impianti solari dipende dell'orientamento: più sono ortogonali alla radiazione solare, meglio è il loro rendimento. Per i tubi sotto vuoto, la possibilità di scegliere la loro inclinazione e la sensibilità minore del rendimento all'orientamento rispetto al sole è un vantaggio considerevole. Da un punto di vista architettonico, sono anche più idonei per servire di frangisole sulla nostra serra.

#### 2) Pannelli fotovoltaici

I pannelli solari termici hanno due vantaggi principali:

- non c'è la possibilità di immagazzinare l'energia prodotta durante un tempo lungo. L'unica possibilità per non sprecare l'energia che è stata prodotta quando non serve direttamente è di essere connesso ad una rete di teleriscaldamento. Una tale rete non è presente a Sondrio (la più vicina è a Tirano),
- l'energia che producono può essere utilizzata solamente sotto forma di calore.

Benché l'elettricità prodotta da pannelli fotovoltaici sia anche difficile da immagazzinare, è sempre possi-

bile di fornire l'elettricità eccedente alla rete. Inoltre, l'energia fornita può essere trasformata facilmente in qualsiasi tipo di energia.

Siccome la scuola è chiusa durante periodi lunghi, l'installazione di pannelli fotovoltaici sarà valutata.

### 3) Pompa di calore

Il vantaggio della pompa di calore è il suo rendimen-

to: dato che "pompa" i calori esterni (nell'aria esterna, nel terreno, o in bacini o correnti di acqua), il calore prodotto è superiore all'energia elettrica che serve.

La fonte principale d'energia e quindi il calore che è presente nell'ambiente. Siccome le temperature esterne a Sondrio sono basse, e siccome l'estrazione del calore è più facile quando il gradiente di temperatura è più basso, sfrutteremo l'energia del suolo.

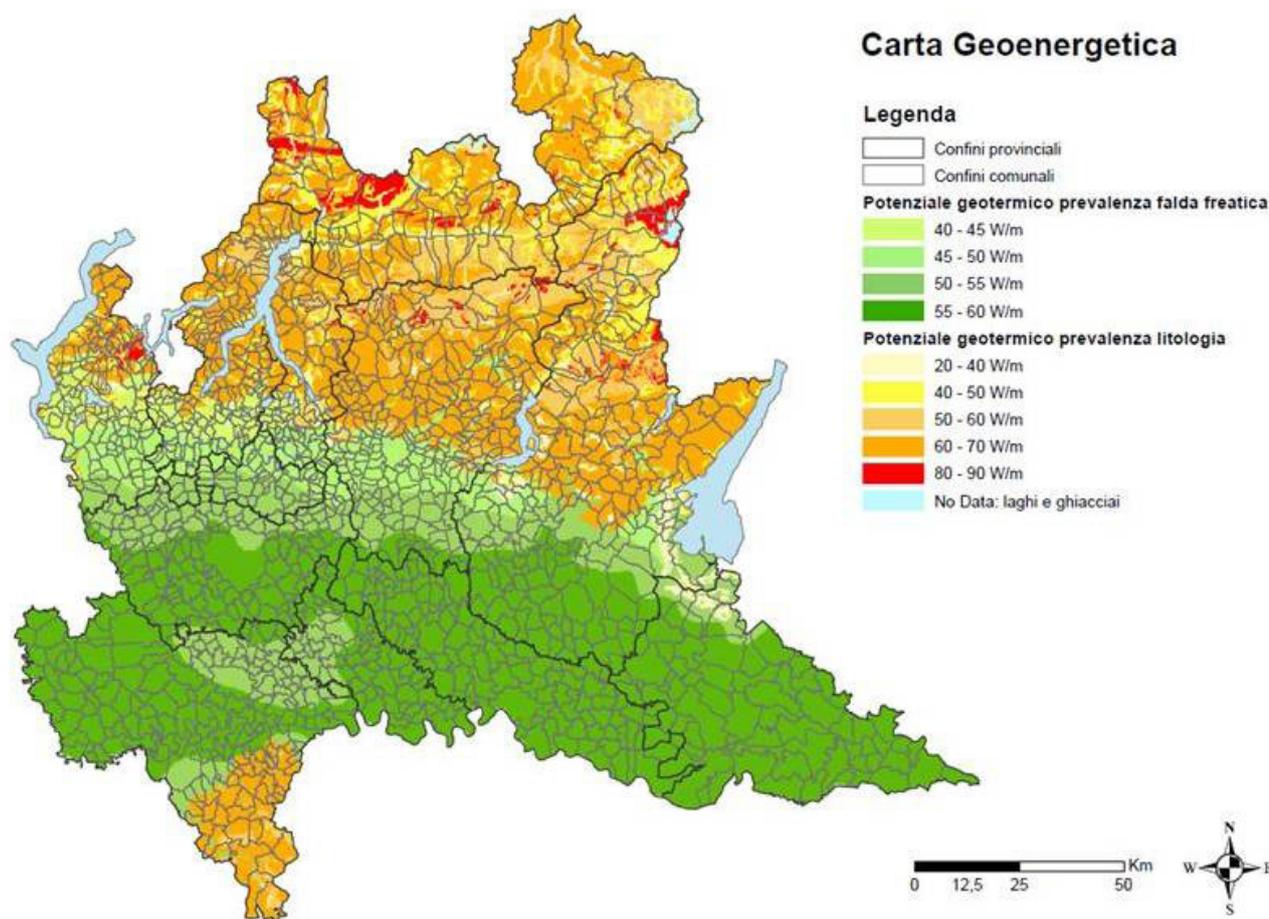


figura XII.504: Risorse geotermiche nella Lombardia [Fonte: Regione Lombardia]

Questa carta è poco precisa. Però possiamo notare che la potenza disponibile sui versanti della montagna al nord di Sondrio è importante. Quest'energia è a "prevalenza litologia", cioè direttamente nelle rocce. La pompa di calore sarà quindi probabilmente in contatto con la roccia sottoterra e con una fonte di acqua o un acquifero.

Comunque, per la potenza termica che ci serve (superiore a 50kW), la regione ci costringe a realizzare delle indagini per dimensionare in modo corretto lo scambio di calore tra il suolo e la pompa, con un "Ground Response Test".



## b) Funzionamento durante il periodo caldo

- |  |  |
|--|--|
| <p><b>a</b> Il calore prodotto dalle persone deve essere rimosso</p> <p><b>b</b> La ventilazione naturale si fa attraverso la serra. Il suo orientamento rispetto alla direzione principale del vento permette di ottenere una ventilazione naturale efficace</p> <p><b>c</b> Iper-isolamento</p> <p><b>d</b> Ridurre gli apporti di calore con schermature ad alta efficienza</p> | <p><b>e</b> Serbatoio</p> <p><b>f</b> Pompa di calore per la produzione di ACS</p> <p><b>h</b> I collettori solari schermano le serre</p> <p><b>i</b> I pannelli fotovoltaici schermano le serre</p> <p><b>j</b> La ventilazione meccanica di estrarre il calore: le temperature esterne sono quasi sempre inferiori alle temperature di comfort</p> |
|--|--|

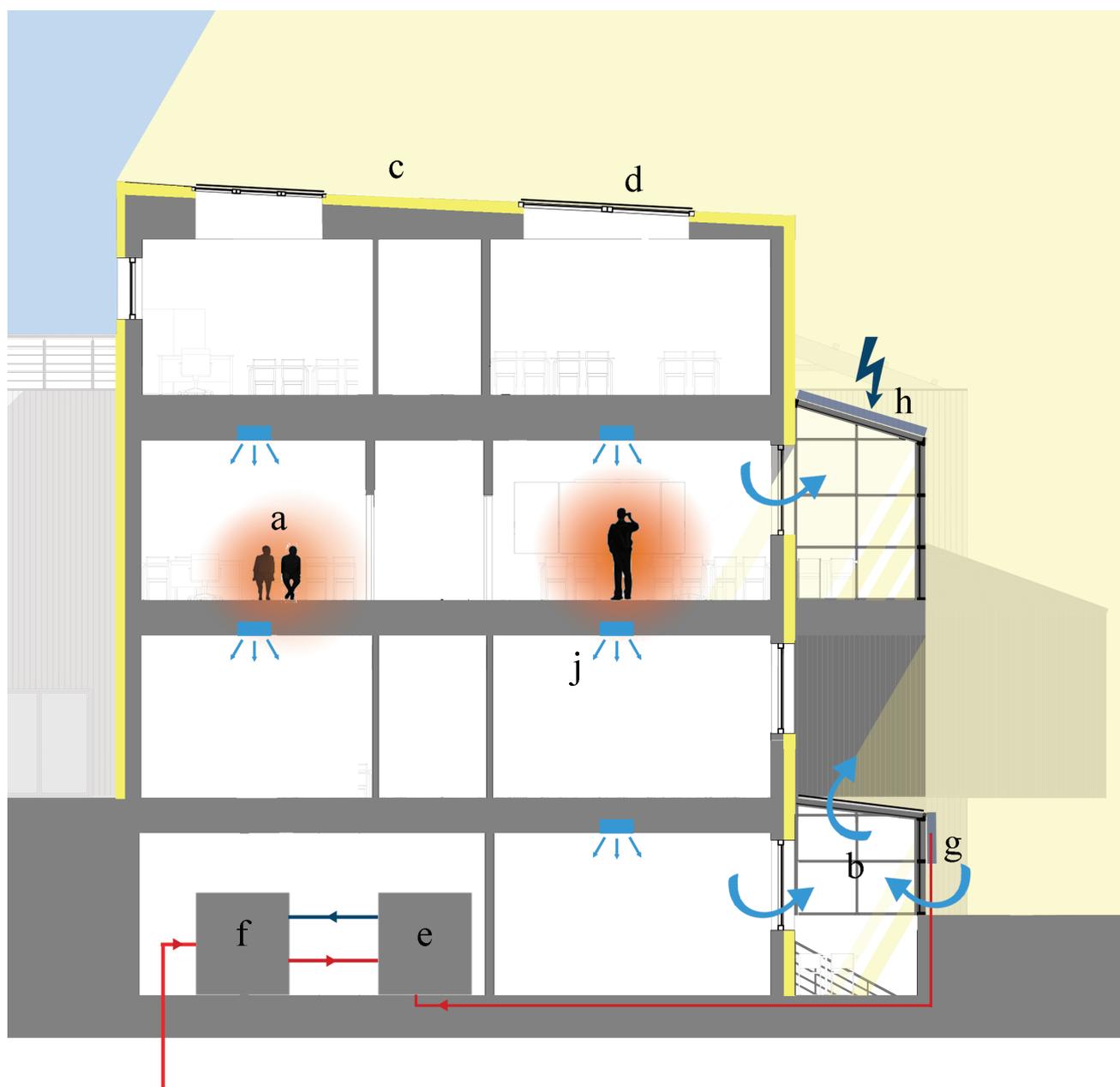


figura XII.506: Principio di funzionamento estivo

## B. FABBISOGNO ENERGETICO

### 1. ACQUA CALDA SANITARIA (ACS)

$$Q_{h,w} = \sum_i \rho * c * V_w * (\theta_{er} - \theta_o) * G$$

Il fabbisogno di acqua calda sanitaria è stato stimato secondo la procedura della norma UNI TS 11300-2. I valori in funzione della destinazione d'uso del locale sono dati per acqua a 40°C con  $\Delta T=25K$ ,  $\Delta T$  essendo la differenza di temperatura tra acqua della rete comunale e acqua calda.

Possiamo notare che il fabbisogno di ACS per la scuola è pari a 0, mentre il consumo per gli uffici vale 0,2L/m<sup>2</sup>giorno e il consumo per la cucina vale 4L/giorno per “numero di ospiti per numero di pasti”.

Il consumo in energia viene calcolato secondo la formula seguente:

dove:

- $\rho$  è la massa volumica dell'acqua [kg/m<sup>3</sup>]
- $c$  è il calore specifico dell'acqua pari a 1.162 Wh/kg°C
- $V_w$  è il volume dell'acqua richiesta durante il periodo di calcolo [m<sup>3</sup>/G]
- $\theta_{er}$  è la temperatura di erogazione [°C]
- $\theta_o$  è la temperatura di ingresso dell'acqua fredda sanitaria [°C]
- $G$  è il numero dei giorni del periodo di calcolo

	giorni di utilizzo	di cui venerdì	fabbisogno di acqua calda sanitaria a 40 °C (L)			consumo energetico per l'acqua calda sanitaria kWh
			scuola	mensa	uffici	
Gennaio	20	4	0 L	22080 L	840 L	666 kWh
Febbraio	20	4	0 L	22080 L	840 L	666 kWh
Marzo	20	4	0 L	22080 L	840 L	666 kWh
Aprile	14	2	0 L	16560 L	588 L	498 kWh
Maggio	21	5	0 L	22080 L	882 L	667 kWh
Giugno	15	3	0 L	16560 L	630 L	499 kWh
Luglio	0	0	0 L	0 L	0 L	0 kWh
Agosto	0	0	0 L	0 L	0 L	0 kWh
Settembre	18	3	0 L	20700 L	756 L	623 kWh
Ottobre	22	5	0 L	23460 L	924 L	708 kWh
Novembre	21	4	0 L	23460 L	882 L	707 kWh
Dicembre	14	3	0 L	15180 L	588 L	458 kWh
Totale						6 159 kWh

figura XII.507: Fabbisogno di energia per l'acqua calda sanitaria

## 2. FABBISOGNO ELETTRICO

### a) Illuminazione

Abbiamo calcolato il fabbisogno elettrico per l'illuminazione basandoci sul calcolo del *Daylight Autonomy*, che rappresenta la percentuale di tempo durante la quale un locale è autonomo per la sua illuminazione.

Il *Daylight Autonomy* è stato calcolato con Ecotect; il metodo di calcolo è spiegato nella parte dedicata alla valutazione del comfort visivo.

Le tecnologie attuali per l'illuminazione permettono di raggiungere dei consumi di 2W/m<sup>2</sup> per 100 lux.

Il fabbisogno elettrico viene calcolato secondo la formula seguente:

$$E_{ill} = \sum_i S_i * q * E_{min,i} * T_i * \alpha_i * (1 - DA_i)$$

Dove:

- $E_{ill}$  è l'energia elettrica consumata durante un anno per l'illuminazione [Wh]
- $S_i$  è la superficie di ogni locale [m<sup>2</sup>]
- $q$  è la potenza necessaria per apportare 1 lux a 1 m<sup>2</sup> pari a 0,02 [W/m<sup>2</sup>lux]
- $E_{min,i}$  è il valore minimo di illuminamento, determinato in funzione della destinazione d'uso, secondo l'Agenzia Sanitaria Locale della provincia di Sondrio [lux]
- $T_i$  è il numero di ore di uso del locale i [h]
- $\alpha_i$  è la percentuale di uso del locale i. Per le aule e laboratori, è stato calcolato in funzione dell'uso. Per le zone di circolazione (corridoio e scale), è stato scelto pari a 1. Per gli altri locali, è stato stimato. [-]
- $DA$  è il *Daylight Autonomy* [-]

La somma viene effettuata sui vari locali della scuola.

LOCALE	SUPERFICIE [M <sup>2</sup> ]	ORE	$\alpha$	DAYLIGHT AUTONOMY [%]	$E_{min,i}$ [LUX]	CONSUMO [KWH]	CONSUMO [KWH/M <sup>2</sup> ]
archivio	80	1184	0.00	0	100	-	-
aula 1	67	1184	0.54	58.22	500	179	2.67
aula 10	59	1184	0.54	54.1	500	173	2.93
aula 11	41	1184	0.54	50.02	500	131	3.20
aula 12	35	1184	0.54	38.46	500	138	3.93
aula 13	60	1184	0.54	60.22	500	153	2.54
aula 14	60	1184	0.54	56.42	500	167	2.79
aula 15	38	1184	0.54	51.81	500	117	3.08
aula 16	55	1184	0.54	54.84	500	159	2.89
aula 17	59	1184	0.54	64.95	500	132	2.24
aula 18	47	1184	0.54	81.31	500	367	3.54
aula 19	65	1184	0.54	96.03	500	16	0.25
aula 2	67	1184	0.58	51.17	500	225	3.35
aula 20	65	1184	0.54	94.59	500	22	0.35
aula 21	29	1184	0.54	96.41	500	7	0.23
aula 22	29	1184	0.54	95	500	9	0.32
aula 3	55	1184	0.54	56.64	500	152	2.77
aula 4	59	1184	0.54	69.33	500	116	1.96
aula 5	47	1184	0.54	44.57	500	167	3.54
aula 6	55	1184	0.54	56.19	500	154	2.80
aula 7	59	1184	0.54	65.95	500	128	2.18
aula 8	47	1184	0.54	59.83	500	121	2.57
aula 9	40	1184	0.54	91.94	500	21	0.52
aula info	85	1184	0.97	80.23	200	77	0.91
bagno 0 E	18	1184	0.40	0	100	17	0.95
bagno 0 N	40	1184	0.40	0	100	38	0.95
bagno 1 E	18	1184	0.40	0	100	17	0.95
bagno 1 N	40	1184	0.40	0	100	38	0.95

bagno 2 E	13	1184	0.40	0	100	12	0.95
bagno 2 N	40	1184	0.40	0	100	38	0.95
bagno 2 O	28	1184	0.40	0	100	26	0.95
bagno 3	29	1184	0.40	0	100	27	0.95
centrale termica	25	0	0.00	0	200	-	-
corridoio 3	47	1184	1.00	0	100	111	2.37
corridoio uff	35	1184	1.00	0	100	83	2.37
corridoio 2	215	1184	1.00	22.59	100	394	1.83
corridoio 1	163	1184	1.00	20.57	100	307	1.88
corridoio 0	246	1184	1.00	32.42	100	394	1.60
laboratorio acconciatura	75	1184	0.88	40.3	500	464	6.18
laboratorio bar	70	1184	1.00	79.78	300	101	1.44
laboratorio cucina	124	1184	0.58	31.5	500	583	4.70
laboratorio estetica	75	1184	0.69	86.06	500	85	1.14
lavaggio stoviglie	17	1184	0.20	0	200	16	0.95
mensa	268	296	0.80	96	200	10	0.04
mensa docenti	21	370	1.00	72.63	200	9	0.41
portineria	20	1184	1.00	38.31	300	88	4.38
sala docenti	48	1184	1.00	65	300	119	2.49
sala riunioni	26	1184	0.20	89.52	200	3	0.10
scala est	92	1184	1.00		150	327	3.55
scala ovest	35	1184	1.00	0	150	124	3.55
spogliatoi 1	14	1184	0.10	33.29	100	2	0.16
spogliatoi 2	14	1184	0.10	35.18	100	2	0.15
spogliatoi 3	20	1184	0.10	0	100	5	0.24
spogliatoi 4	32	1184	0.10	70.23	100	2	0.07
ufficio 1	14	1295	1.00	50.74	500	89	6.38
ufficio 10	11	1295	1.00	21.32	500	112	10.19
ufficio 2	14	1295	1.00	50.7	500	89	6.38
ufficio 3	14	1295	1.00	50.47	500	90	6.41
ufficio 4	14	1295	1.00	50.51	500	90	6.41
ufficio 5	12	1295	1.00	47.85	500	81	6.75
ufficio 6	12	1295	1.00	28.32	500	111	9.28
ufficio 7	12	1295	1.00	26.98	500	113	9.46
ufficio 8	12	1295	1.00	26.87	500	114	9.47
ufficio direttore	28	1295	1.00	63.23	500	133	4.76
Totale						7 084	kWh

figura XII.508: Consumo elettrico per l'illuminazione

Considereremo di seguito che la ripartizione del fabbisogno per l'illuminazione è ripartito uniformemente durante i giorni di apertura della scuola. In pratica, dovremmo considerare che il fabbisogno di illuminazione è più importante durante l'inverno, durante il quale i giorni sono più corti.

Possiamo peraltro far notare che il consumo per l'illuminazione è molto alto per gli uffici. Questo è in parte dovuto al fatto che l'Agenzia Sanitaria Locale della provincia di Sondrio richiede un valore di illuminamento pari a 500 lux su tutta la superficie degli uffici, mentre sarebbe sufficiente solamente sul posto di lavoro.

## b) Altri usi

### 1) Ventilazione meccanica

I valori minimi di ricambio d'aria sono definiti dal Decreto Ministeriale del 12/18/1975 e vengono ricapitolati nella tabella seguente:

DESTINAZIONE D'USO	RICAMBIO D'ARIA (h <sup>-1</sup> )
Attività didattica collettiva	5
Circolazione	1.5
Uffici	1.5
Servizi igienici	2.5
Refettori	2.5

figura XII.509: Ricambio d'aria minimo per ora [Fonte: DM del 18/12/1975]

Il volume totale viene calcolato per ogni locale. Ipotizziamo che il consumo di elettricità sia pari a 0.27W/m<sup>3</sup> (valore corrispondente ad una ventilazione a doppio flusso).

L'energia consumata per la ventilazione vale quindi:

$$E_v = \sum_i q_v * V_i * \eta_i * T_i * \alpha_i$$

dove:

- $q_v$  è la potenza volumica di ventilazione [kWh/m<sup>3</sup>]
- $V_i$  è il volume del locale  $i$  [m<sup>3</sup>]
- $\eta_i$  è il ricambio minimo d'aria necessario per il locale  $i$  [h<sup>-1</sup>]
- $T_i$  è il numero di ore di uso del locale  $i$  [h]
- $\alpha_i$  è la percentuale di uso del locale  $i$  [-]

L'energia necessaria per la ventilazione viene ricapitolata nella tabella seguente.

MESE	CONSUMO PER LA VENTILAZIONE	
	kWh/AN	kWh/m <sup>2</sup> AN
Gennaio	1373	0.35
Febbraio	1177	0.30
Marzo	1277	0.33
Aprile	1207	0.31
Maggio	1298	0.33
Giugno	773	0.20
Luglio	0	0.00
Agosto	0	0.00
Settembre	1113	0.29
Ottobre	1340	0.34
Novembre	1277	0.33
Dicembre	1242	0.32

Totale	12 075	3.10
--------	--------	------

figura XII.510: Energia elettrica per la ventilazione

Facciamo notare che non abbiamo preso in considerazione la ventilazione naturale. Il consumo reale sarà quindi necessariamente più basso.

### 2) Uso domestico

Gli altri consumi energetici della scuola sono legati alle diverse macchine nei laboratori e ai computer, nell'aula informatica e negli uffici.

Per quanto riguarda i laboratori (tranne il laboratorio di cucina), le potenze elettriche sono stati rilevati durante i nostri sopralluoghi. Il tempo di uso è stato stimato in funzione dell'uso. Per il laboratorio di cucina, poiché il numero di macchine rende il calcolo complesso e comunque poco interessante - dato che non possiamo influire per niente su questo consumo - il consumo è stato stimato considerando l'energia media necessaria per l'elaborazione di un piatto. Questo valore è stato scelto pari a 2,5kWh/piatto (fonte: www.energie-plus-lesite.be).

I consumi dei computer sono stati valutati in funzione di una potenza media per i computer di 80W, del numero di computer e del tempo durante il quale sono accesi.

IMPIANTO	CONSUMO (kWh/AN)
Computer dell'aula informatica	1838
Computer degli uffici	518
Laboratorio di acconciatura	1 487
Laboratorio di estetica	1 172
Laboratorio di abbigliamento	324
Cucina	863
Totale	6 201

figura XII.511: Consumi elettrico per l'uso domestico

## c) Fabbisogno globale

	CONSUMO ANNUALE	
	kWh	kWh/m <sup>2</sup>
illuminazione	7 084	1.82
ventilazione	12 075	3.10
uso domestico	6201	1.59
Totale	25 479	6.53

figura XII.512: Fabbisogno elettrico globale

# C. SISTEMA IMPIANTISTICO

## 1. DIMENSIONAMENTO DELLA POMPA DI CALORE

La pompa di calore e il serbatoio sono stati dimensionati insieme. Infatti, la potenza della pompa di calore, è quindi la quantità di acqua calda che produce sono dipendenti dalla quantità di acqua che possiamo immagazzinare.

Il dimensionamento della pompa di calore si farà considerando le ipotesi peggiori:

- La produzione di acqua calda da i collettori solari è nulla
- Sarà studiata per il giorno per il quale il fabbisogno energetico è il più alto

La tabella seguente contiene il fabbisogno di acqua calda per il riscaldamento durante il 29 gennaio (giorno per il quale la potenza richiesta è la più alta).

ORE	CONSUMO	CONSUMO CUMULATIVO
1	0 kWh	0 kWh
2	0 kWh	0 kWh
3	0 kWh	0 kWh
4	0 kWh	0 kWh
5	0 kWh	0 kWh
6	0 kWh	0 kWh
7	0 kWh	0 kWh
8	0 kWh	0 kWh
9	211 kWh	211 kWh
10	215 kWh	426 kWh
11	199 kWh	625 kWh
12	199 kWh	824 kWh
13	177 kWh	1001 kWh
14	99 kWh	1100 kWh
15	82 kWh	1183 kWh
16	79 kWh	1262 kWh
17	80 kWh	1342 kWh
18	88 kWh	1430 kWh
19	0 kWh	1430 kWh
20	0 kWh	1430 kWh
21	0 kWh	1430 kWh
22	0 kWh	1430 kWh
23	0 kWh	1430 kWh
24	0 kWh	1430 kWh

figura XII.513: Consumo per il riscaldamento per il 29 gennaio

Vediamo che la potenza massima necessaria vale 215 kW se non ci fosse la possibilità di immagazzinare l'acqua calda. Siccome usiamo dei collettori termici, e

per abbassare la potenza (quindi il prezzo) della pompa di calore, è necessario di avere un accumulatore.

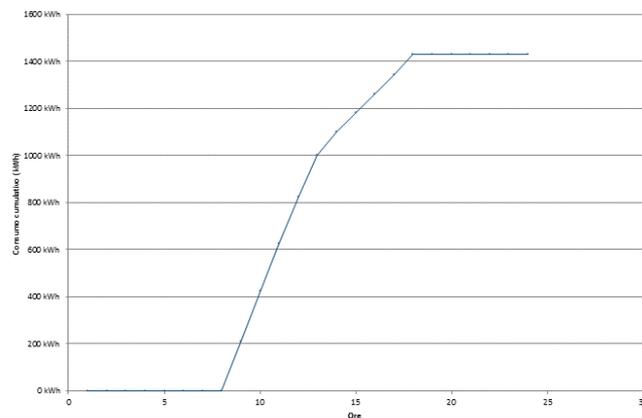


figura XII.514: Consumo cumulativo di acqua calda

Al contrario, se supponiamo che la capacità di accumulo di acqua calda è infinita, la potenza necessaria per rinnovare l'acqua usata durante la giornata vale:

$$P_p = E_{a,G} / 24 \quad [\text{kW}]$$

dove  $E_{a,G}$  è il consumo di energia per l'acqua calda durante un giorno.

In questo caso, una pompa di calore di 59 kW sarebbe sufficiente. Però la capacità di accumulo dovrebbe essere di 23,8 m<sup>3</sup>. Ciò che abbiamo risparmiato sulla pompa di calore sarà largamente compensato dal costo del accumulatore, ma anche dalle perdite termiche. Infatti, le perdite termiche di accumulo che sono legate al tempo di stoccaggio e alla superficie del contenitore saranno in questo caso molto importanti.

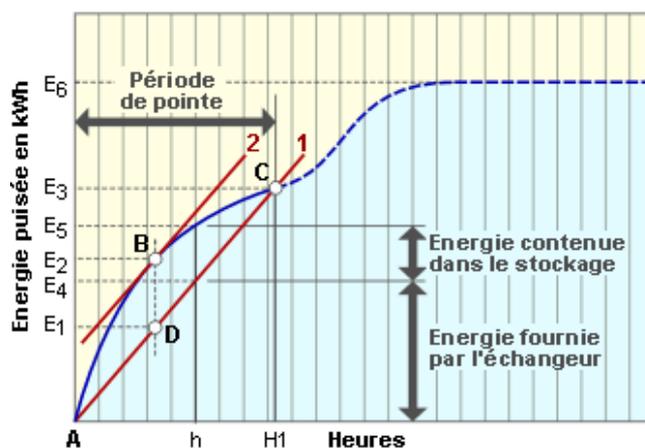


figura XII.515: Energia massima disponibile in funzione del tempo [Fonte: www.energieplus-lesite.be]

Sulla figura XII.515 che l'energia che deve essere immagazzinata dipende della potenza della pompa di calore. Questa potenza è rappresentata dalla pendenza delle linee rosse. La linea blu rappresenta il cumulo del fabbisogno in acqua calda (in kWh). In questo caso, l'energia fornita dalla pompa di calore tra l'istante 0 e l'istante H1 non è sufficiente. La differenza massima

(BD) che esista tra le due curve è l'energia che deve essere immagazzinata.

Il volume di acqua disponibile, va calcolato secondo la formula seguente:

$$V_{w,H} = V_{w,H-1} + \frac{(E_{p,H} - E_{a,H})}{c * (\theta_{er} - \theta_0)}$$

dove:

- $V_{w,H}$  è il volume di acqua calda disponibile all'ora H [ $m^3/h$ ]
- $E_{p,H}$  è l'energia prodotta dalla pompa di calore durante l'ora H [kWh]
- $E_{a,H}$  è l'energia richiesta all'ora H [kWh]
- $c$  è il calore specifico dell'acqua pari a 1.162 Wh/kg°C
- $\theta_{er}$  è la temperatura di erogazione [°C]
- $\theta_0$  è la temperatura di ingresso dell'acqua fredda sanitaria [°C]

Se prendiamo per esempio una pompa di calore di 180kW di potenza e un serbatoio di 4000 Litri, la disponibilità di acqua calda alla temperatura di 45 °C è quella rappresentata sulla figura XII.516.

Vediamo che il contenitore è sovradimensionato: se la sua capacità fosse solamente di 3000 litri, sarebbe sufficiente. Inoltre, possiamo far notare che un sovradimensionamento da una parte, aumenta i prezzi del

materiale da comprare, e dall'altra parte, diminuisce il rendimento. Vale per lo spessore di isolante, come l'abbiamo già visto, e vale lo stesso per il volume di acqua immagazzinata.

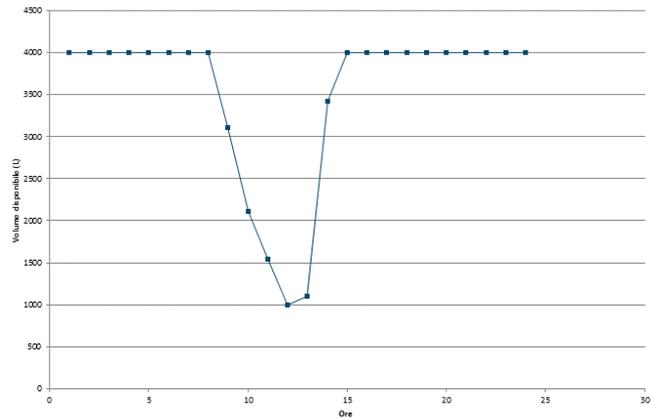


figura XII.516: Volume cumulo di acqua disponibile

Grazie a questo ragionamento, abbiamo determinato le coppie ottime “potenza della pompa di calore/volume del contenitore” per il nostro caso. Come l'abbiamo visto precedentemente, la potenza della pompa di calore non può essere inferiore a 60 kW, e non serve che sia superiore a 215 kW. Le coppie valutate prenderanno quindi il loro valore di potenza tra questi due valori.

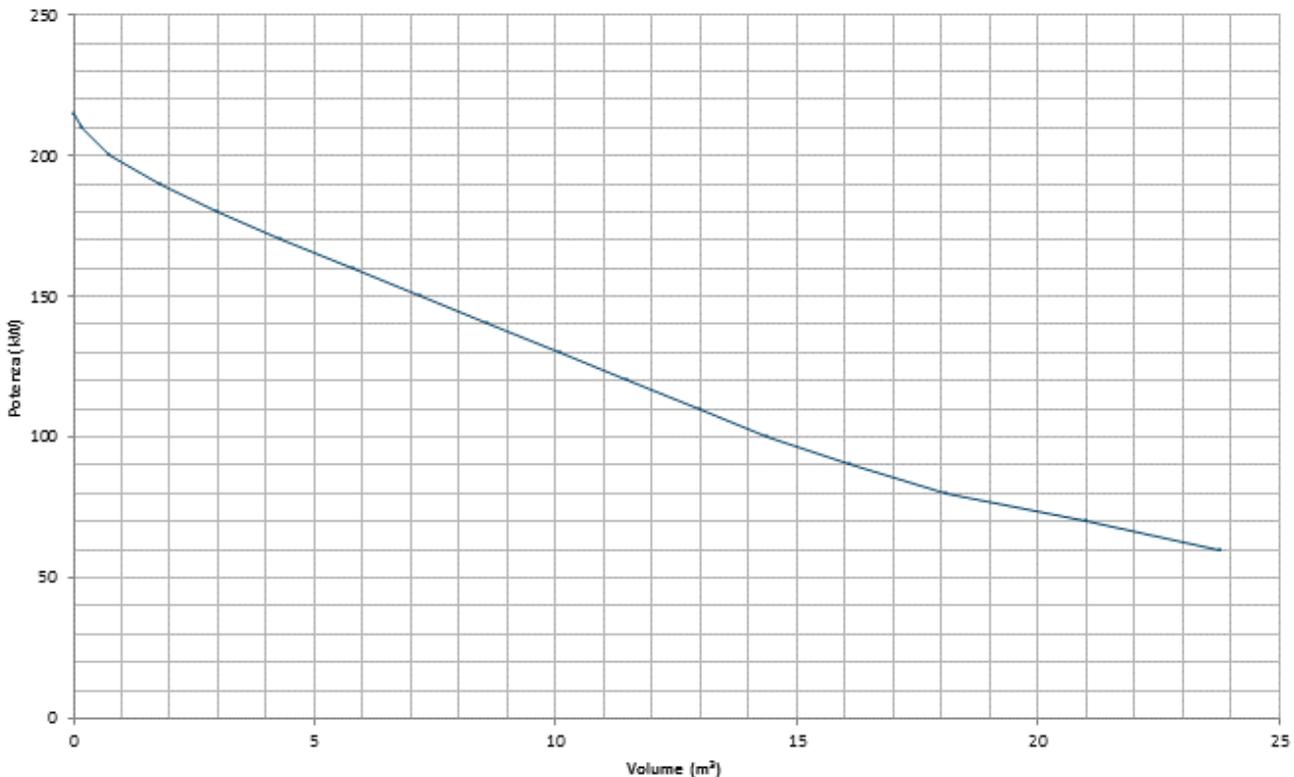


figura XII.517: Correlazione tra potenza della pompa e volume di stoccaggio

Questa curva ci permette quindi di scegliere la potenza della pompa di calore, e il volume del serbatoio.

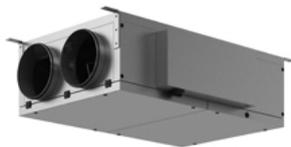
Scegliamo un volume di stoccaggio dell'acqua di 4000 litri ed una potenza di 16 kW. L'altro criterio di scelta della pompa e la sua capacità a produrre acqua calda a due temperature diverse: una relativamente bassa (40-45°C) per il riscaldamento, e l'altra (55-60°C) per l'acqua calda sanitaria.

L'azienda Climaveveneta fornisce delle pompe di calore che corrispondono a questi criteri, con un rendimento (COP) di 4,36.

## 2. SISTEMA DI VENTILAZIONE

Per la ventilazione, abbiamo scelto un sistema a doppio flusso ad alto rendimento. I sistemi di ricambio d'aria dell'azienda *Exhausto* con scambiatore di calore sembrano idonei.

VEX300C Appareils de plafond



Débits d'air 200m<sup>3</sup>/h - 1520 m<sup>3</sup>/h

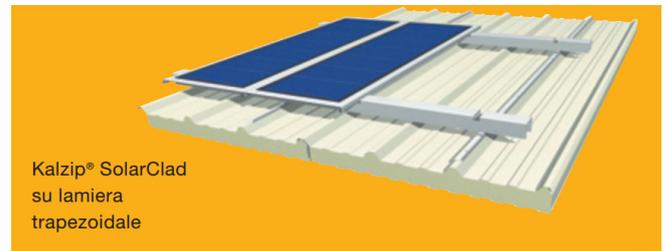
- Pour le montage sur plafond suspendu
- Très compact à puissance élevée
- Niveau acoustique faible
- EXact2, système de régulation moderne
- Portes à charnières ou portes coulissantes

figura XII.518: Esempio di sistema di ventilazione [Fonte: *Exhausto*]

Il fatto che abbia delle dimensioni - in termini di volume e di capacità di estrazione - ridotte ci permette di regolare il flusso a secondo del locale. Dato che quando le aule sono utilizzate, il volume d'aria da estrarre varia largamente in funzione della presenza nell'aula, è che la presenza varia di un'aula ad un'altra, questa caratteristica ci permetterà di risparmiare energia, attivando la ventilazione solamente quando è necessario. Inoltre, riduce le perdite di carico che aumenta con la lunghezza del percorso.

## 3. PANNELLI FOTOVOLTAICI

I pannelli fotovoltaici che servono di schermature per le serre sono in parte trasparenti, mentre gli altri si appoggiano direttamente sul rivestimento di tipo Kalzip.



Kalzip® SolarClad  
su lamiera  
trapezoidale

figura XII.519: Aggancio dei pannelli fotovoltaici su sistema Kalzip [Fonte: KalzipSolarSystems]



figura XII.520: Pannelli fotovoltaici semitrasparenti [Fonte: talev.fr]

## 4. COLLETTORI SOLARI

Per i collettori solari, abbiamo scelto dei tubi sotto vuoto per tre motivi:

- Hanno un miglior rendimento che i pannelli quando gli assorbitori non sono perpendicolari ai raggi solari

- Sono orientabili. Questo permette di avere un assorbitore non parallelo alla superficie sulla quale il collettore è attaccato.

- Lasciano passare la luce



figura XII.521: Tubi sotto vuoto [Fonte: Viessman, vitosol 200-T]

# D. FABBISOGNO GLOBALE

## 1. IPOTESI DI CALCOLO

Il fabbisogno globale di energia deve essere calcolato in termini di energia primaria. Il fabbisogno di energia primaria rappresenta l'energia bruta - cioè direttamente estratta dalla natura e non trasformata - che permette il funzionamento del progetto.

Il calcolo è stato effettuato secondo il metodo della norma UNI TS 11300.

La ripartizione dei pannelli solari termici e dei pannelli fotovoltaici è stata ipotizzata come sulla figura XII.522. Consideriamo che tutte le schermature di cui abbiamo bisogno, sono dei pannelli solari (termici o fotovoltaici).

La percentuale di schermature fisse è stata valutata nella parte "V. La serra" e vale 20% per entrambe le serre.

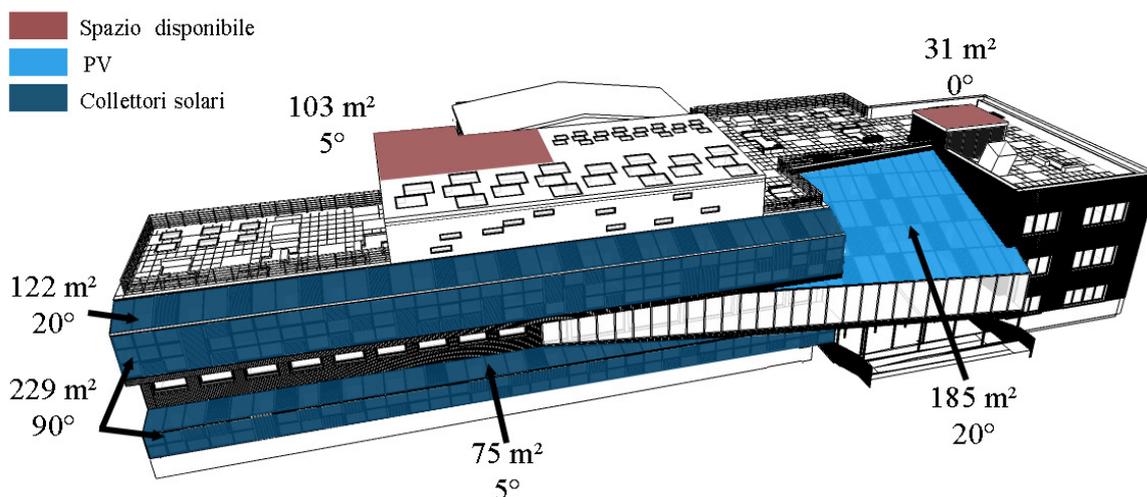


figura XII.522: Spazio disponibile per gli impianti solari di produzione di energia

La trasparenza dei collettori solari è considerata pari a 0, mentre quella dei pannelli fotovoltaici, che sono stati scelti a posto vale 15%.

Le superficie di vetrata schermata da un pannello fotovoltaico o un collettore è quindi:

$$S_{PV} = \frac{S_{g,i} + S_{g,v}}{1 - \eta_{PV}} * t$$

Dove:

- $S_{pv}$  è la superficie di pannelli fotovoltaici [m<sup>2</sup>]
- $S_{g,i}$  è la superficie della parte inclinata della serra grande [m<sup>2</sup>]
- $S_{g,v}$  è la superficie della parte verticale della serra grande [m<sup>2</sup>]
- $t$  è la percentuale di schermature utile [%]
- $\eta_{pv}$  è la trasparenza dei pannelli fotovoltaici [-]

$$S_c = (S_{p,i} + S_{p,v}) * t$$

Dove

- $S_c$  è la superficie di collettori [m<sup>2</sup>]
- $S_{p,i}$  è la superficie della parte inclinata delle serre piccole [m<sup>2</sup>]
- $S_{p,v}$  è la superficie della parte verticale delle

serre grande [m<sup>2</sup>]

- $t$  è la percentuale di schermature utile [%]

Abbiamo quindi una superficie di pannelli fotovoltaici di 75 m<sup>2</sup> sulla serra grande ed una superficie di collettori di 86 m<sup>2</sup>.

## 2. PRODUZIONE DI ENERGIA

### a) Produzione dei collettori

La produzione di calore dei collettori solari viene calcolata per vari orientamenti. Infatti, è possibile di scegliere l'orientamento dei tubi per captare un massimo di calore.

Questa produzione viene stimata grazie allo software Scenocalc.

I valori sono calcolati per:

- 1 m<sup>2</sup> di superficie captante
- un grado di rendimento ottico  $\eta_0$  pari a 0.785
- un coefficiente di dispersione termica  $k_1=1.42$
- un coefficiente di dispersione termica  $k_1=0.005$
- i dati climatici di Bergamo

- un angolo rispetto al sud di 0

Le caratteristiche dei tubi sotto vuoto sono dati dalla Viessmann.

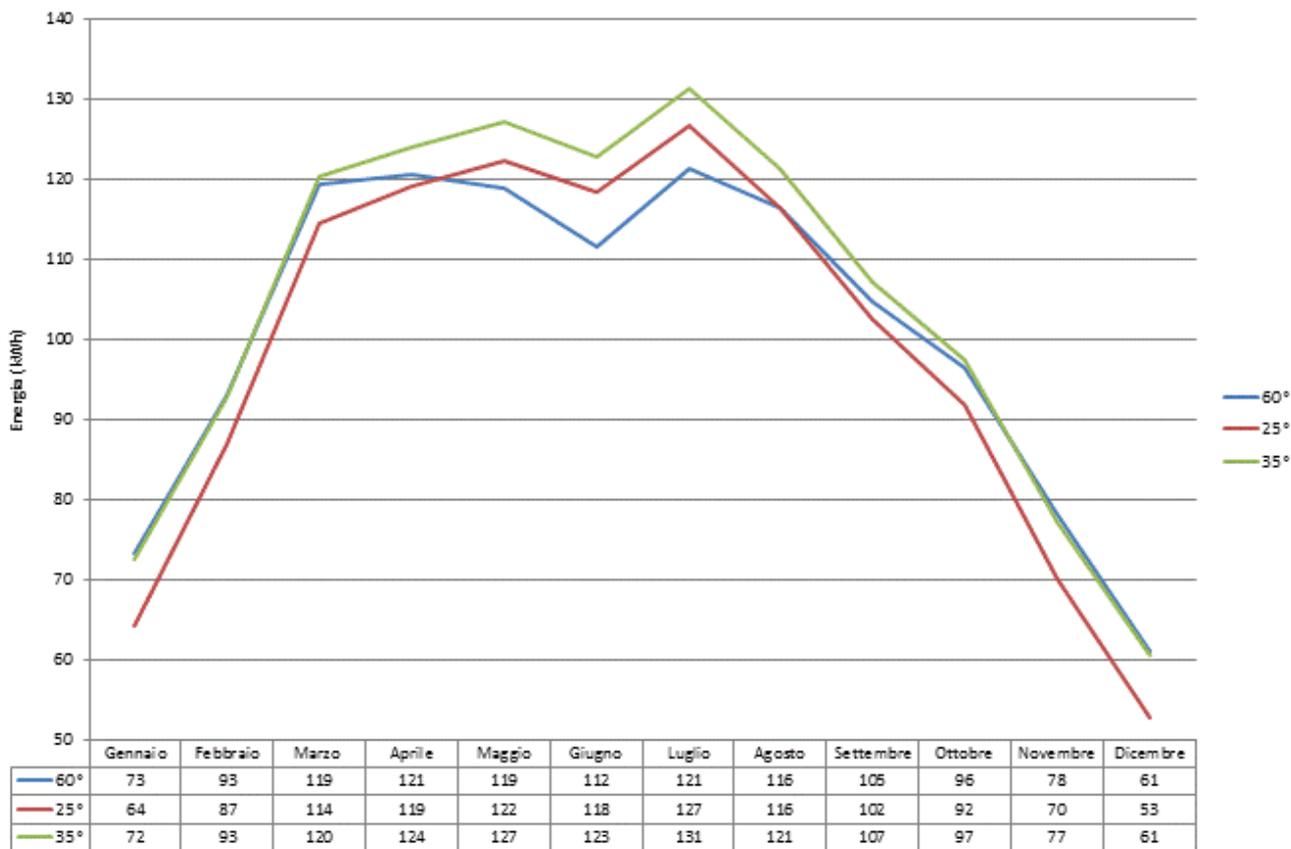


figura XII.523: Produzione dei collettori solari in kWh durante l'anno in funzione dell'inclinazione.

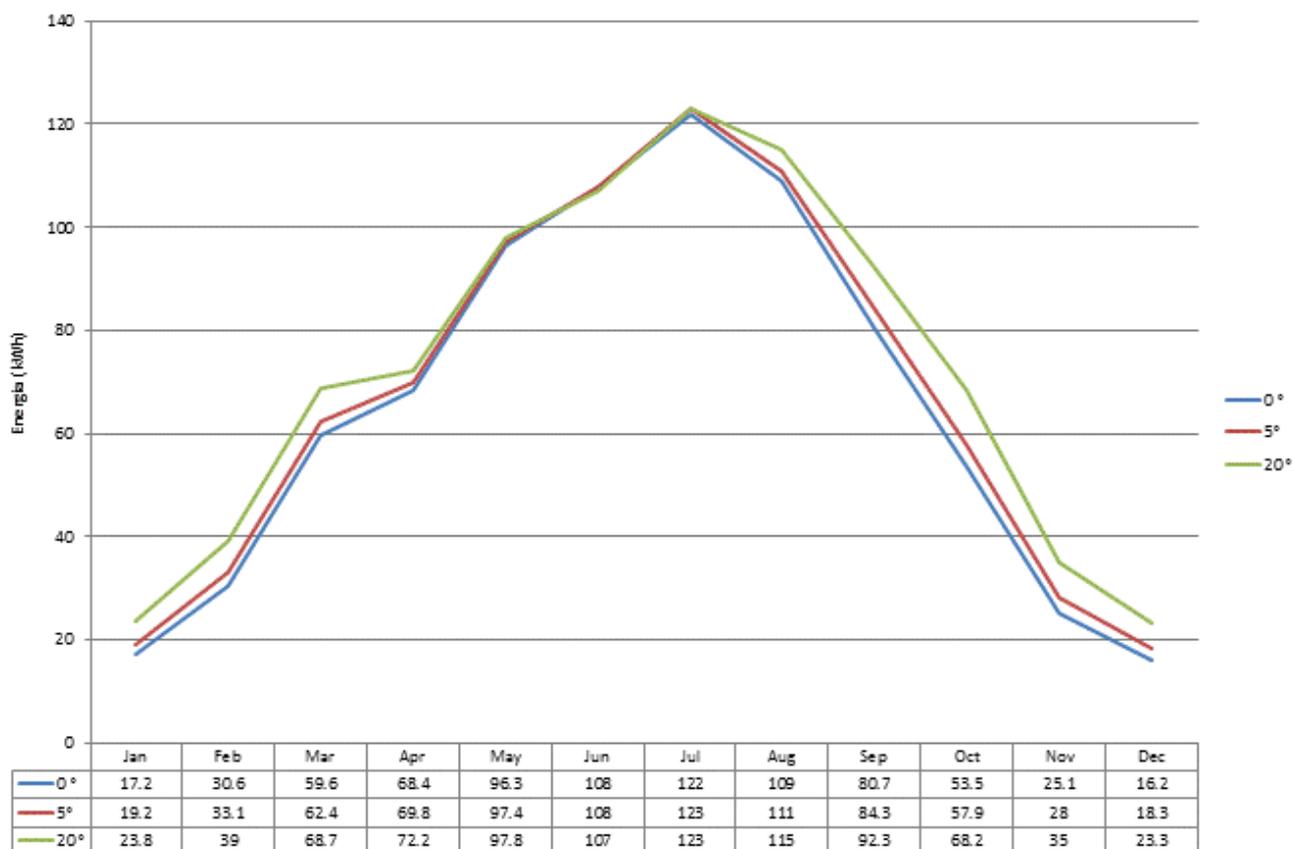


figura XII.524: Produzione dei pannelli fotovoltaici in funzione dell'orientamento

Vediamo sulla figura XII.523 che per i mesi più freddi, il consumo dei collettori solari inclinati di 25° e di 60° producono la stessa quantità di energia. Ricordiamo che il periodo di riscaldamento è tra il 15 di ottobre e il 15 di aprile.

L'azienda Viessmann propone due collettori che corrispondono alle nostre esigenze. La differenza tra le due risiede nel fatto che c'è ne uno per il quale la distanza più importante tra i tubi permette all'assorbitore di raggiungere un'inclinazione di -45° a +45° rispetto all'orientamento del pannello.

Però, il rendimento di questo pannello è più basso (0.73 anziché 0.785), e la loro percentuale di superficie captante (rispetto alla superficie del pannello) è più bassa. I tubi con il rendimento più alto raggiungono una variazione di orientamento di -25° a +25°. Date le pen-

denze delle superficie dove abbiamo previsto di inserire dei collettori solari, i pannelli con il rendimento più alto saranno più efficaci.

## b) Produzione dei pannelli fotovoltaici

Per quanto riguarda i pannelli fotovoltaici, abbiamo valutato la loro produzione di elettricità grazie allo strumento PVGIS prodotta dallo Joint Research Center della Commissione Europea. Questo strumento presenta lo stesso vantaggio: prende in considerazione precisamente i dati climatici del luogo di progetto. La produzione annuale per un kWc installato è rappresentata sul grafico precedente, in funzione della pendenza.

In questo caso, le pendenze studiate corrispondono alle possibilità che abbiamo per il nostro progetto.

## 3. CALCOLO DEL FABBISOGNO TOTALE DI ENERGIA

### a) Fabbisogno di acqua calda

Il metodo per il calcolo dell'energia utile e quindi la valutazione del rendimento sono presentati nella norma UNI TS 11300.

I rendimenti sono i ricapitolati nella tabella seguente, per il riscaldamento e la produzione di acqua calda.

<b>RISCALDAMENTO</b>	emissione	0.99
	regolazione	0.98
	distribuzione	0.99
<b>ACS</b>	erogazione	0.95
	distribuzione	0.96

figura XII.525: Rendimento del impianto di riscaldamento e di acqua calda sanitaria

Questi rendimenti ci permettono quindi di valutare la quantità di acqua calda che dobbiamo produrre. Il calcolo è dettagliato per mese nella tabella seguente.

Abbiamo quindi:  $Q_R = Q_c + Q_{rg} + Q_d$

dove:

- $Q_r$  è la quantità di energia che deve fornire la pompa di calore e i collettori solari per il riscaldamento [kWh]
- $Q_c = Q_u \times \eta_c$  è l'energia dissipata durante l'emissione [kWh]
- $Q_{rg} = Q_u \times \eta_{rg}$  è l'energia dissipata durante la regolazione [kWh]
- $Q_d = Q_u \times \eta_d$  è l'energia dissipata durante la distribuzione [kWh]

$$e Q_{ACS} = Q_{er} + Q_d$$

dove:

- $Q_{ACS}$  è la quantità di energia che deve fornire la pompa di calore e i collettori solari per l'acqua calda sanitaria [kWh]
- $Q_{er} = Q_u \times \eta_{er}$  è l'energia dissipata durante l'erogazione [kWh]
- $Q_d = Q_u \times \eta_d$  è l'energia dissipata durante la distribuzione [kWh]

	GIORNI DI CUI VENERDÌ	ENERGIA UTILE ACS	CONSUMO ACS	ENERGIA UTILE RISCALDAMENTO	CONSUMO RISCALDAMENTO	TOTALE	
Gennaio	20	4	666 kWh	730 kWh	12162 kWh	17913 kWh	13.4 MWh
Febbraio	20	4	666 kWh	730 kWh	12830 kWh	16458 kWh	14.1 MWh
Marzo	20	4	666 kWh	730 kWh	11547 kWh	12141 kWh	12. MWh
Aprile	14	2	498 kWh	546 kWh	0 kWh	0 kWh	0.5 MWh
Maggio	21	5	667 kWh	731 kWh	0 kWh	0 kWh	0.7 MWh
Giugno	15	3	499 kWh	548 kWh	0 kWh	0 kWh	0.5 MWh
Luglio	0	0	0 kWh	0 kWh	0 kWh	0 kWh	0.0 MWh
Agosto	0	0	0 kWh	0 kWh	0 kWh	0 kWh	0.0 MWh
Settembre	18	3	623 kWh	683 kWh	0 kWh	0 kWh	0.7 MWh
Ottobre	22	5	708 kWh	777 kWh	3737 kWh	3961 kWh	4.7 MWh
Novembre	21	4	707 kWh	775 kWh	8450 kWh	11576 kWh	9.6 MWh

Dicembre	14	3	458 kWh	502 kWh	8654 kWh	15197 kWh	9.5 MWh
<b>Totale</b>	<b>185</b>	<b>37</b>	<b>6.2 MWh</b>	<b>6.8 MWh</b>	<b>57.4 MWh</b>	<b>59.7 MWh</b>	<b>66.5 MWh</b>

figura XII.526: Produzione di acqua calda per il riscaldamento e l'ACS

La produzione di acqua calda dei collettori solari viene riassunta nella tabella seguente.

ORIENTAMENTO POSIZIONE	VERTICALI		INCLINATI		TOTALE
	ALTO	BASSO	ALTO	BASSO	
superficie	30.3 m <sup>2</sup>	16.9 m <sup>2</sup>	26.9 m <sup>2</sup>	10.2 m <sup>2</sup>	84.2 m <sup>2</sup>
Gennaio	2223 kWh	1242 kWh	1971 kWh	744 kWh	6179 kWh
Febbraio	2824 kWh	1578 kWh	2499 kWh	943 kWh	7844 kWh
Marzo	3635 kWh	2031 kWh	3206 kWh	1211 kWh	10082 kWh
Aprile	3726 kWh	2082 kWh	3241 kWh	1224 kWh	10272 kWh
Maggio	3781 kWh	2113 kWh	3194 kWh	1206 kWh	10294 kWh
Giugno	3617 kWh	2021 kWh	2998 kWh	1132 kWh	9769 kWh
Luglio	3888 kWh	2172 kWh	3260 kWh	1231 kWh	10551 kWh
Agosto	3634 kWh	2031 kWh	3129 kWh	1182 kWh	9975 kWh
Settembre	3220 kWh	1799 kWh	2812 kWh	1062 kWh	8894 kWh
Ottobre	2949 kWh	1648 kWh	2593 kWh	979 kWh	8169 kWh
Novembre	2364 kWh	1321 kWh	2099 kWh	793 kWh	6577 kWh
Dicembre	1856 kWh	1037 kWh	1642 kWh	620 kWh	5154 kWh
<b>totale</b>	<b>37.7 MWh</b>	<b>21.1 MWh</b>	<b>32.6 MWh</b>	<b>12.3 MWh</b>	<b>103.8 MWh</b>

figura XII.527: Produzione di acqua calda di tutti i collettori durante un anno

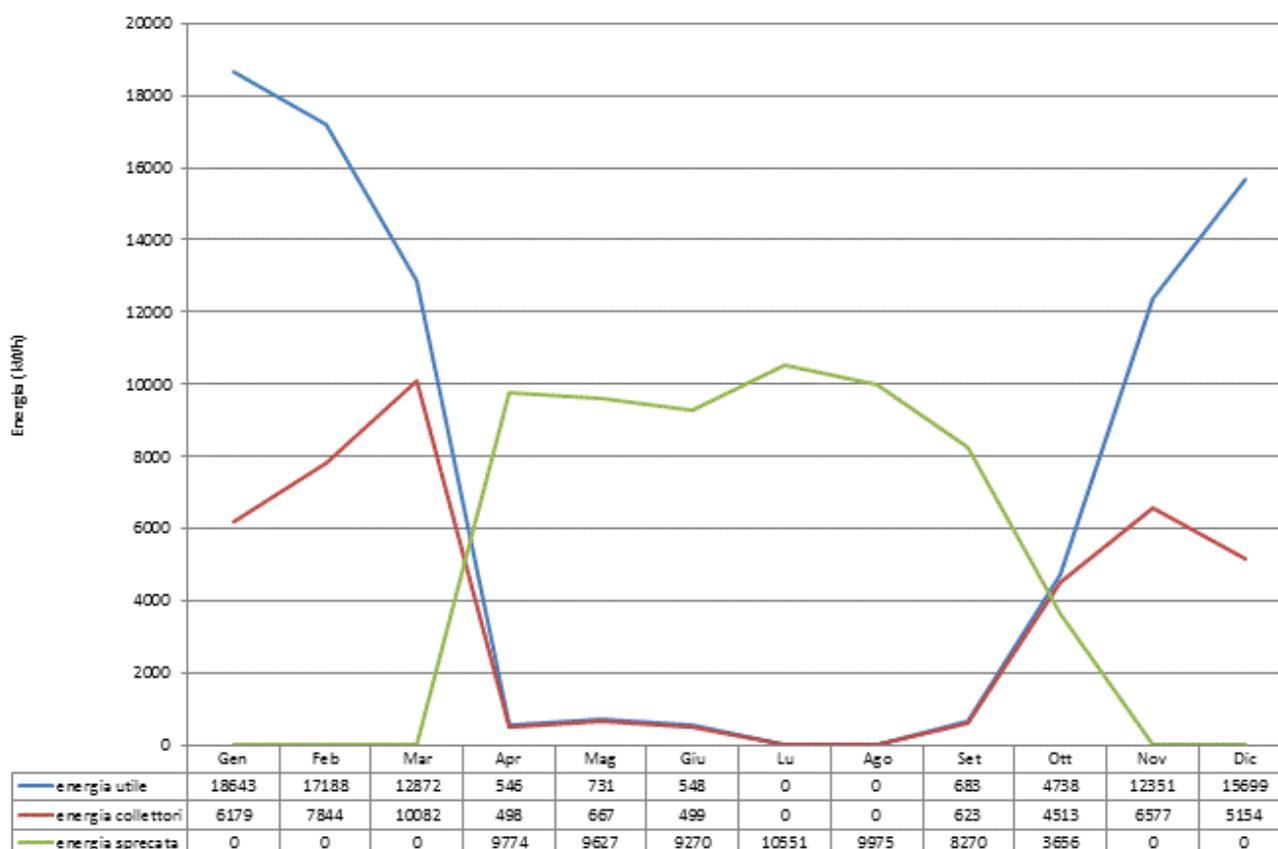


figura XII.528: Valutazione dell'energia prodotta dai tubi sotto vuoto utilizzata e dell'energia sprecata

Facciamo notare che la scuola è quasi autosufficiente durante i mesi di Marzo a Ottobre, per il riscaldamento e l'acqua calda sanitaria.

L'energia prodotta dai collettori solari, e che non è utilizzata è sprecata. Come l'abbiamo già scritto, senza una rete di teleriscaldamento, è impossibile conservare questa energia. In queste condizioni la quantità di energia sprecata è pari a 61 MWh.

Vedremo di seguito se è effettivamente idoneo di avere una tale quantità di pannelli solari termici, nonostante il fatto che una parte importante dell'energia non possa essere utilizzata.

## b) Energia finale

Al fabbisogno elettrico calcolato precedentemente, dobbiamo aggiungere l'energia necessaria al funzionamento della pompa di calore. Questa energia viene determinata a partire del coefficiente di prestazione

(COP) della pompa di calore.

$$E_f = E_{ill} + E_{ud} + (E_{acs} + E_{risc}) / COP + E_{vent} - E_{pv}$$

dove:

- $E_{ill}$  è l'energia per l'illuminamento [kWh]
- $E_{ud}$  è l'elettricità richiesta per gli usi domestici [kWh]
- $E_{risc}$  è l'energia per il riscaldamento [kWh]
- $E_{acs}$  è l'energia per l'acqua calda sanitaria [kWh]
- COP è il coefficiente prestazionale [-]
- $E_{vent}$  è l'energia per la ventilazione [kWh]
- $E_{pv}$  è l'energia prodotta da i pannelli fotovoltaici e effettivamente utilizzata dalla scuola [kWh]

I risultati sono riassunti nella tabella seguente.

	POMPA DI CALORE	LUCE	VENTILAZIONE	USO DOMESTICO	PV	ENERGIA FINALE
Gennaio	1515 kWh	835 kWh	1373 kWh	670 kWh	248 kWh	4144 kWh
Febbraio	1288 kWh	835 kWh	1177 kWh	670 kWh	403 kWh	3567 kWh
Marzo	485 kWh	835 kWh	1277 kWh	670 kWh	690 kWh	2577 kWh
Aprile	0 kWh	584 kWh	1207 kWh	469 kWh	713 kWh	1547 kWh
Maggio	0 kWh	876 kWh	1298 kWh	704 kWh	959 kWh	1919 kWh
Giugno	0 kWh	626 kWh	773 kWh	503 kWh	1044 kWh	857 kWh
Luglio	0 kWh	0 kWh	0 kWh	0 kWh	1211 kWh	0 kWh
Agosto	0 kWh	0 kWh	0 kWh	0 kWh	1138 kWh	0 kWh
Settembre	0 kWh	751 kWh	1113 kWh	603 kWh	929 kWh	1538 kWh
Ottobre	0 kWh	918 kWh	1340 kWh	737 kWh	703 kWh	2293 kWh
Novembre	588 kWh	876 kWh	1277 kWh	704 kWh	364 kWh	3080 kWh
Dicembre	902 kWh	584 kWh	1242 kWh	469 kWh	245 kWh	2952 kWh
Totale (kWh/m²an)	1.22	1.98	3.10	1.59	2.22	6.28

figura XII.529: Calcolo dell'energia finale

## c) Energia primaria

La conversione dell'energia finale in energia primaria si fa grazie al fattore di conversione in energia primaria dei vettori energetici. Quello dell'energia elettrica è pari a  $0,187 \times 10^{-3}$  tep/kWh (2.17kWh/kWh), secondo la delibera EEN 3/08 dell'Autorità per l'energia elettrica il gas e il sistema idrico.

	ENERGIA PRIMARIA	
	kWh/an	kWh/m²an
Riscaldamento	9 313	2.39
ACS	1 053	0.27
Illuminazione	9 433	2.42
Ventilazione	14 755	3.78
Usi domestici	13 456	3.45
Totale	48 009	12.31
Totale (senza usi domestici)	34 553	8.86

figura XII.530: Consumo di energia primaria

# E. REDDITIVITÀ DELL'IMPIANTO DI PRODUZIONE

## 1. IPOTESI

La redditività di pannelli fotovoltaici e dei tubi sotto vuoto è stata valutata per l'investimento economico ed energetico, come l'abbiamo fatto precedentemente.

Abbiamo considerato che il costo dei pannelli è equivalente al prezzo dei pannelli meno il prezzo di una schermatura solare. Il prezzo al metro quadro dei pannelli è pari a 1262 €/m<sup>2</sup> di assorbitore, e quello dei pannelli fotovoltaici è stata stimato a 3000/kWc installato, mentre il prezzo di schermature è di 174 €/m<sup>2</sup>.

L'energia grigia di un pannello solare è di 550kWh/m<sup>2</sup> di assorbitore, per dei tubi sotto vuoto, mentre quella dei pannelli fotovoltaici vale 2500 kWh/kWc.

## 2. REDDITIVITÀ PER M<sup>2</sup>

Abbiamo considerato un tasso di attualizzazione di 2.6 %, e un costo di manutenzione pari a 1,5% dell'investimento iniziale. Non essendo più incentivi per la vendita di elettricità alla rete italiana, abbiamo considerato che l'energia prodotta ma non utilizzata nell'edificio era persa in termini di costi.

Invece, siccome questa energia può essere fornita comunque alla rete, anche senza retribuzione, abbiamo stimato che permetteva di rimborsare il costo energetico dei pannelli fotovoltaici. Per quanto riguarda i collettori solari, l'energia che produce e che non viene utilizzata è persa.

### a) Calcolo della redditività economica

#### 1) Collettori solari

Il calcolo del costo dei pannelli solari termici dopo n anni vale quindi:

$$P_0 = (p_c - p_s) * S_c$$

$$P_n = P_{n-1} * (1 + \alpha) + P_0 * (1 + \tau) - \frac{E_{cu}}{COP} * C$$

dove:

- $P_n$  è il costo dopo n anni [€]
- $p_c$  è il prezzo dei collettori per m<sup>2</sup> di assorbitore [€/m<sup>2</sup>]
- $p_s$  è il prezzo delle schermature per m<sup>2</sup> [€/m<sup>2</sup>]
- $S_c$  è la superficie utile dei collettori [m<sup>2</sup>]
- $\alpha$  è il tasso di attualizzazione [-]
- $\tau$  è il rapporto del costo di manutenzione per anno sul costo iniziale [-]

- $E_{cu}$  è l'energia prodotta dai collettori effettivamente utilizzata [kWh]
- COP è il coefficiente di prestazione della pompa di calore [-]
- C è il costo dell'energia pari a 0.5 €/kWh

Il coefficiente prestazionale della pompa di calore viene tenuto in conto, dato che se ci fosse 1 kWh di energia in meno prodotta dai collettori, l'energia elettrica che dovremmo pagare sarebbe di 1/COP.

#### 2) Pannelli fotovoltaici

Per i pannelli fotovoltaici, il prezzo dopo n anni vale:

$$P_0 = p_{PV} * Q_{PV,i} - p_s * S_{PV}$$

$$P_n = P_{n-1} * (1 + \alpha) + P_0 * (1 + \tau) - E_{PV,u} * C$$

dove:

- $p_{pv}$  è il prezzo dei pannelli fotovoltaici [€/kWc]
- $Q_{pv,i}$  è la potenza dei pannelli fotovoltaici installati [kWc]
- $S_{pv}$  è la superficie di pannelli fotovoltaici installati
- $E_{PV,u}$  è l'energia prodotta dai pannelli fotovoltaici e effettivamente utilizzata.

Facciamo notare che il coefficiente prestazionale della pompa di calore non apparisce più.

#### 3) Redditività per 1 m<sup>2</sup>

Il prezzo in funzione del tempo è rappresentato sulla figura XII.531.

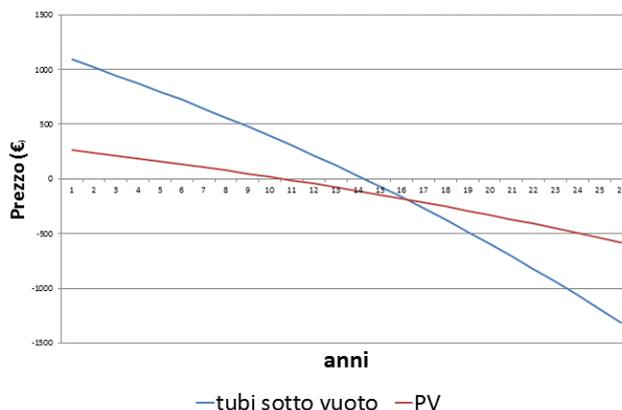


figura XII.531: Redditività economica dei pannelli fotovoltaici e dei tubi sotto vuoto

Il tempo dopo il quale l'impianto fotovoltaico (rispettivamente termico solare) diventa redditizio è di 11,2 anni (rispettivamente 14,6 anni).

Il tempo relativamente lungo dopo il quale l'impianto termico solare diventa redditizio si può spiegare dal fatto che produrre dell'energia termica per il nostro edificio, grazie alla pompa di calore è poco costoso.

Però, in entrambi i casi, l'investimento è rimborsato, prima della fine di vita media di questo tipo di impianto (che abbiamo stimato a 25 anni).

## b) Calcolo della redditività energetica

Per il calcolo dell'energia spesa durante la vita degli impianti studiati, non abbiamo considerato l'energia spesa per il riciclaggio. L'energia che è risparmiata perché non ci sono schermature solari è stata trascurata, in quanto dipende del materiale impiegato, e può essere molto ridotta.

### 1) Collettori solari

L'energia impiegata dopo n anni vale quindi:

$$E_0 = e_c * S_c$$

$$E_n = E_{n-1} - \frac{E_{c,u}}{COP} * \eta_{el}$$

dove:

- $E_0$  è l'energia grigia dei collettori solari [kWh]
- $e_c$  è la quantità di energia grigia per metro quadro di collettori solari [kWh/m<sup>2</sup>]
- $\eta_{el}$  è il fattore di conversione in energia primaria dell'elettricità

Per lo stesso motivo per il quale prendiamo in considerazione il coefficiente prestazionale della pompa di calore, dobbiamo tenere in conto il fattore di conversione in energia primaria dell'elettricità.

### 2) Pannelli fotovoltaici

L'energia impiegata dopo n anni per i pannelli fotovoltaici:

$$E_0 = e_{PV} * Q_{PV,i}$$

$$E_n = E_{n-1} - E_{PV,tot} * \eta_{el}$$

dove:

- $E_0$  è l'energia grigia dei collettori solari [kWh]
- $e_c$  è la quantità di energia grigia per kWc di potenza dell'installazione [kWh/kWc]

### 3) Redditività per 1 m<sup>2</sup>

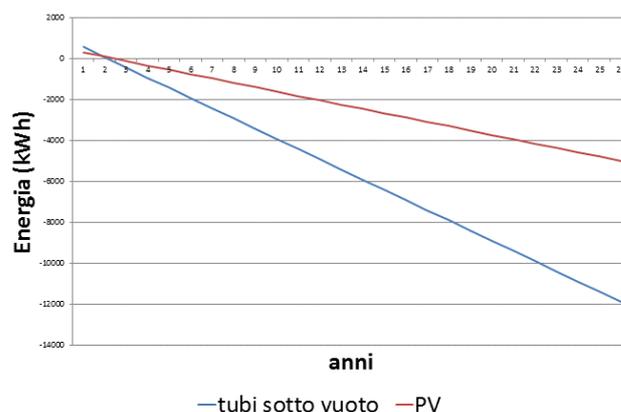


figura XII.532: Redditività energetica per 1 m<sup>2</sup> dei tubi sotto vuoto e dei pannelli fotovoltaici

La redditività economica dei sistemi di produzione di energia è molto più veloce:

- 1,1 anno per i tubi sotto vuoto
- 1,4 anni per i pannelli fotovoltaici

## 3. REDDITIVITÀ DELL'INSTALLAZIONE

Abbiamo visto nella parte "D. Fabbisogno globale" che una parte dell'energia viene sprecata a causa della chiusura della scuola durante l'estate, ma anche - per l'energia termica - a causa del basso fabbisogno durante la stagione intermedia.

La redditività del sistema globale di produzione di energia non è quindi equivalente al prodotto della redditività di 1 m<sup>2</sup> per la superficie installata.

Infatti, i primi pannelli solari termici hanno una redditività superiore perché tutta l'energia che viene prodotta durante il periodo scolastico è usata. Il periodo durante il quale i pannelli aggiunti sono utilizzabili si riduce con l'aumento della superficie installata.

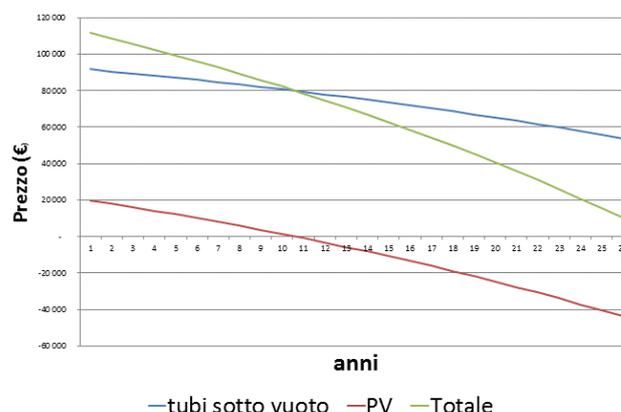


figura XII.533: Redditività economica dell'impianto globale di produzione

Vediamo che, nonostante il fatto che il tempo dopo

il quale i pannelli fotovoltaici sono redditizi, l'impianto globale non è economicamente redditizio.

Appena un terzo dell'investimento per i collettori solari viene rimborsato, ma più del 90 % dell'investimento totale per i collettori solari e fotovoltaici viene rimborsato dopo 25 anni.

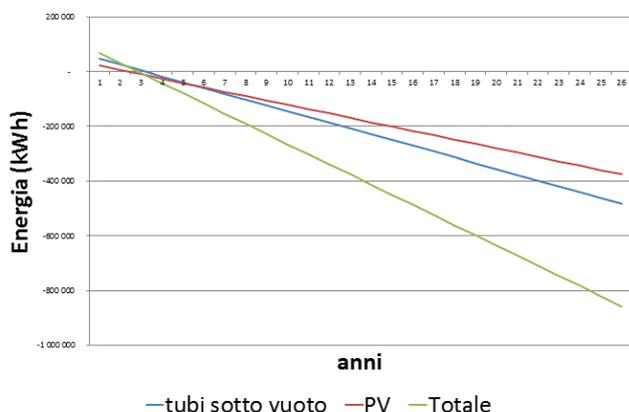


figura XII.534: Redditività energetica dell'impianto globale di produzione

## 4. OTTIMIZZAZIONE

Dati i risultati precedenti, dobbiamo valutare la posizione e la percentuale maggiore di pannelli fotovoltaici e di collettori solari che sono in grado di permetterci di raggiungere il rendimento - economico ed energetico - più alto possibile.

In questo scopo, abbiamo usato lo stesso tipo di indice che abbiamo considerato per le ottimizzazioni che abbiamo precedentemente realizzate, che tiene in conto l'energia risparmiata e del economia finanziaria.

L'ottimizzazione è stata sviluppata considerando variabile l'area occupata da i pannelli fotovoltaici e da i collettori solari sulle superfici che abbiamo considerate sulla figura XII.522.

Abbiamo ottenuto la ripartizione seguente:

- 47,2 m<sup>2</sup> (valore massimo) di collettori solari sulla facciata delle serre piccole
- 2,3 m<sup>2</sup> di collettori solari sulle superfici inclinate delle serre piccole
- 37,1 m<sup>2</sup> di pannelli fotovoltaici sulle superfici inclinate delle serre piccole
- 75 m<sup>2</sup> di pannelli fotovoltaici sulla serra grande
- 103 m<sup>2</sup> (valore massimo) di pannelli fotovoltaici sul tetto del modulo
- 0 m<sup>2</sup> sul tetto della scala est

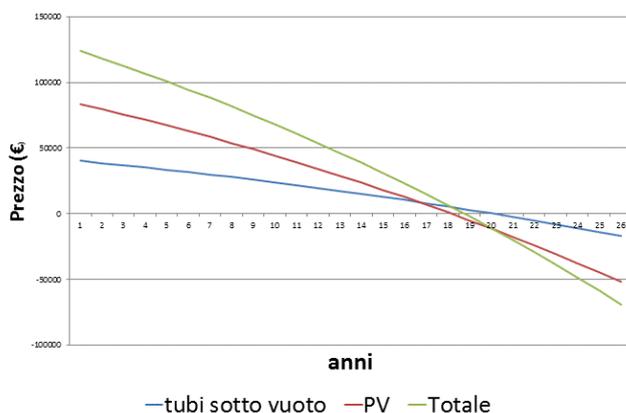


figura XII.535: Redditività economica dei pannelli fotovoltaici e dei collettori solari per il progetto

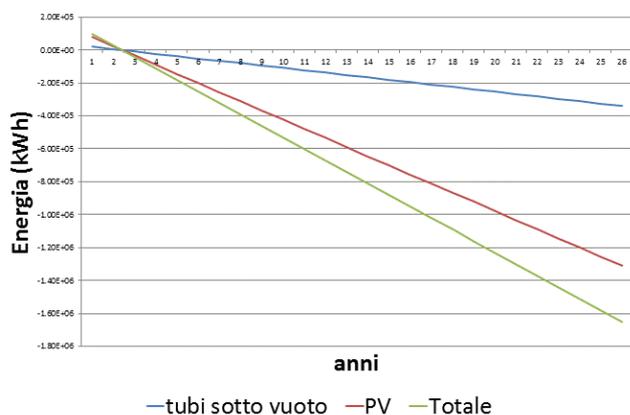


figura XII.536: Redditività energetica dei pannelli fotovoltaici e dei collettori solari per il progetto

Dopo 25 anni, la produzione locale di energia ci permette di risparmiare 69 000 € e 1,650 GWh

Con questi valori, produciamo meno acqua calda, mentre la produzione annuale di elettricità è stata alzata. In effetti, produciamo 61 MWh/an di acqua calda (104 MWh/an nel caso non ottimizzato), e 25 MWh/an di energia elettrica (8,6 MWh/an nel caso non ottimizzato).

Il consumo totale dell'edificio di energia primaria è pari a 20 MWh/an, o 5,13 kWh/m<sup>2</sup>an.

## F. CONCLUSIONE

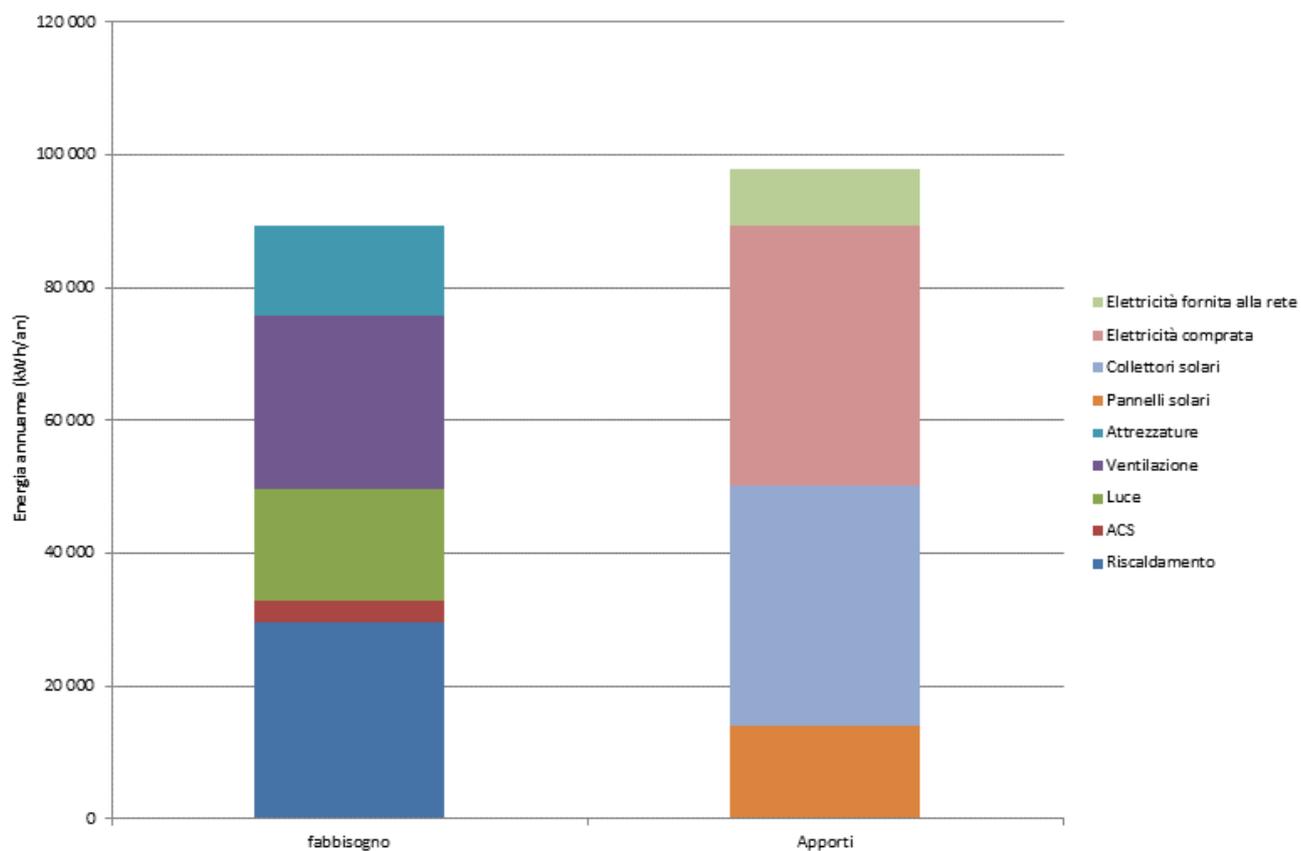


figura XII.537: Bilancio energetico dell'edificio

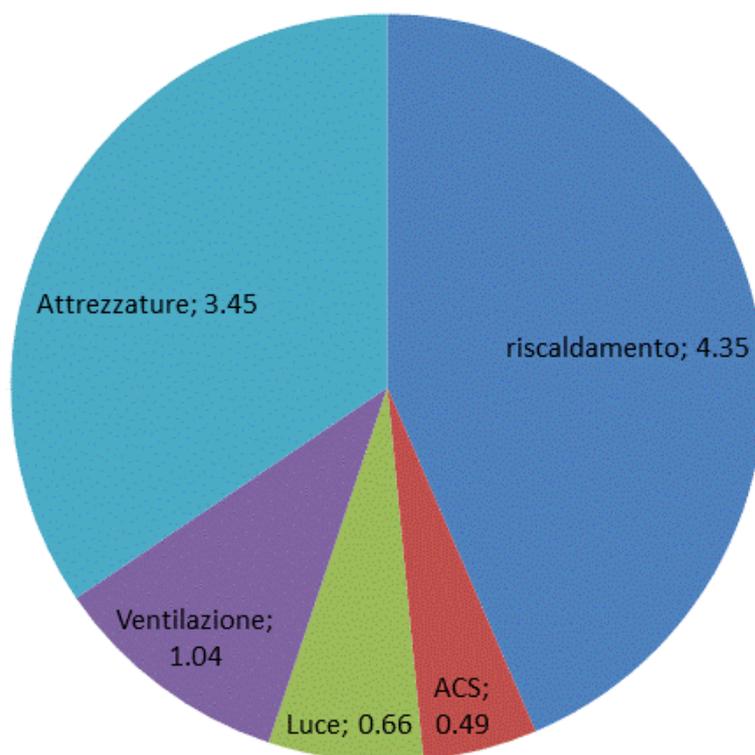


figura XII.538: Ripartizione del consumo di energia primaria (in kWh/m²an)

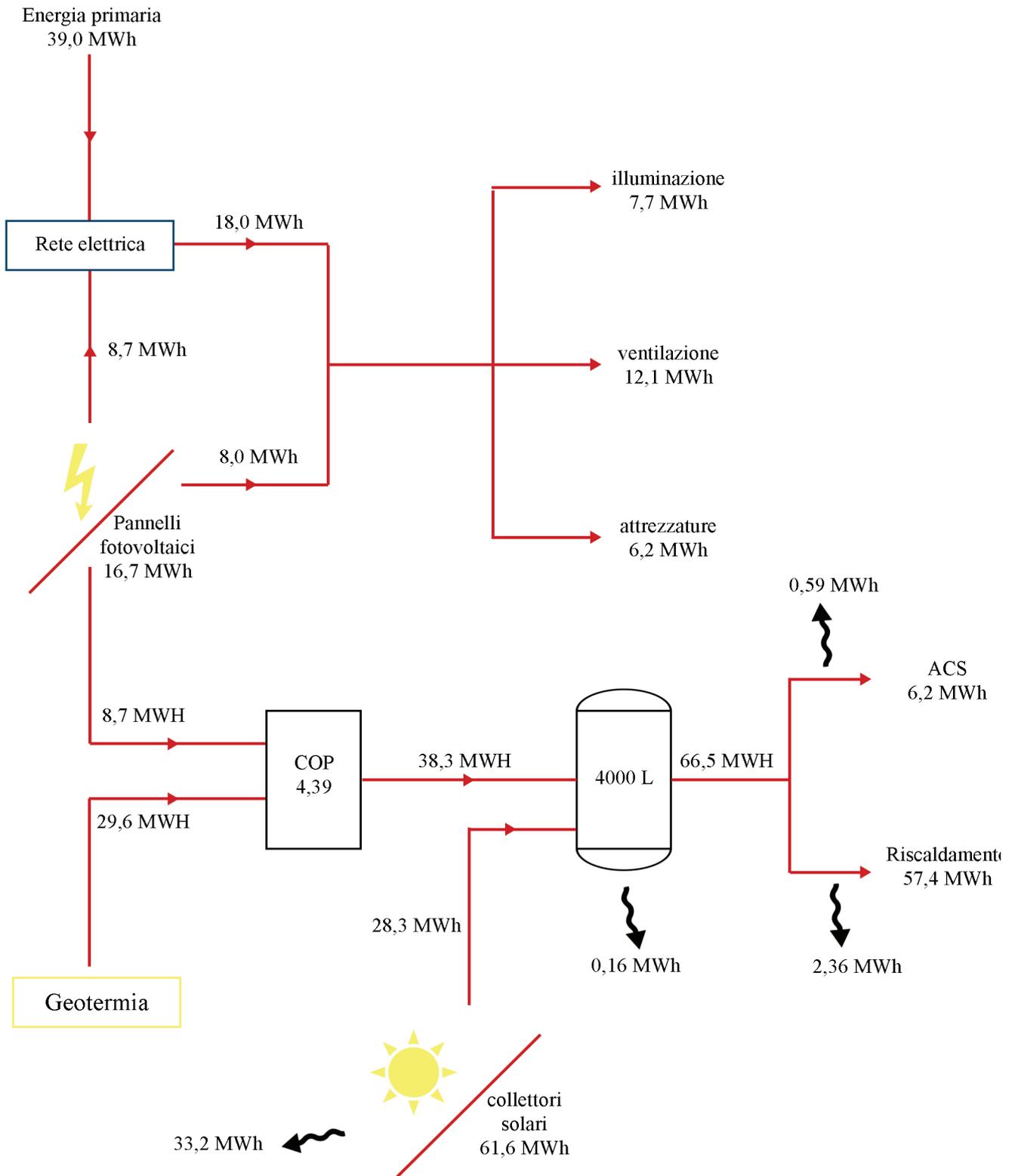


figura XII.539: Schema riassuntivo dei consumi

# APPENDICE



# INDICE DELLE FIGURE

figura 0.1: Domanda di energia primaria per fonte, anno 2011 [Fonte: ENEA, Rapporto energia e ambiente, scenari e strategie].....	11
figura 0.2: Produzione di petrolio in Europa da 1965 [Fonte: Jean Marc Jancovici, BP statistical review, 2014].....	11
figura 0.3: Produzione di petrolio nel mondo da 1965 [Fonte: Jean Marc Jancovici, BP statistical review, 2014].....	12
figura 0.4: Correlazione tra PIL e produzione di petrolio [Fonte: Jean Marc Jancovici, Banca Mondiale, BP Statistical review].....	12
figura 0.5: Ipotesi dell'evoluzione dei prezzi delle fonti fossili (in € per barile equivalente petrolio) [Fonte: Commissione Europea].....	12
figura 0.6: Emissioni di CO <sub>2</sub> e contributo dei settori alla decarbonizzazione [Fonte: ENEA].....	13
figura 0.7: Consumi finali di energia nelle proiezioni ENEA (Mtep) [Fonte: ENEA].....	13
figura 0.8: Contributo dei settori alla riduzione dei consumi finali [Fonte: ENEA].....	13
figura 0.9: Evoluzione del mix di fonti primarie nello scenario di riferimento [Fonte: ENEA].....	13
figura 0.10: Evoluzione del mix di fonti primarie nello scenario dell'ENEA [Fonte: ENEA].....	14
figura 0.11: Variazione della temperatura media mondiale da 1850 [Fonte: GIEC, fourth assessment report].....	14
figura 0.12: Confronto tra la distribuzione delle temperature attuale e future.....	15
figura 0.13: kg equivalente carbonio emesso per tonnellate equivalenti di petrolio per diversi fonti di energia [Fonte: Jean Marc Jancovici, ADEME, EDF].....	15
figura 0.14: Diversi scenari di ripartizione della variazione delle temperature [Fonte: GIEC, fourth assessment report].....	16
figura 0.15: Evoluzione regionale delle precipitazioni tra gli anni 1980-1999 e 2080-2099 [Fonte: GIEC, fourth assessment report].....	16
figura 0.16: Emissioni dirette e indirette nel settore edilizio [Fonte: IPCC; Climate change 2014: Mitigation of climate change].....	18
figura 0.17: Tendenza delle varie cause del consumo di energia per il riscaldamento e il raffrescamento per edifici abitativi [Fonte: IPCC; Climate change 2014: Mitigation of climate change].....	18
figura 0.18: Tendenza delle varie cause del consumo di energia per il riscaldamento e il raffrescamento per edifici commerciali [Fonte: IPCC; Climate change 2014: Mitigation of climate change].....	18
figura 0.19: Tendenza delle varie cause del consumo di energia per il riscaldamento e il raffrescamento per edifici residenziali in Europa occidentale [Fonte: IPCC; Climate change 2014: Mitigation of climate change].....	19
figura 0.20: Ripartizione dei consumi nel settore edilizio nell'Unione Europea.....	19
figura 0.21: Zone climatiche in Italia.....	20
figura 0.22: Stadio di calcio (1), Luigi Moretti.....	21
figura 0.23: Stadio di calcio (2), Luigi Moretti.....	21
figura 0.24: Stadio di calcio (3), Luigi Moretti.....	21
figura 0.25: Ponte sul Basento, 1969, Sergio Musmeci.....	22
figura 0.26: Pianta per il Philips Pavilion, Le Corbusier [Fonte: Philips Electronics].....	23
figura 0.27: Disegni di Xenakis, geometria e architettura [Fonte: Philips Electronics].....	23
figura 0.28: Rapporto tra musica e geometria (Iannis Xenakis).....	24
figura 0.29: Intersezione della pianta e dell'iperboloide: lo "stomaco" [© 2012 Joseph Clarke].....	24
figura 0.30: Padiglione Philips [Fonte: Wouten Hagens].....	25
figura 0.31: Diagrammi per la House II [Fonte: Diagram Diarise, Peter Eisenman].....	25
figura 0.32: Kartal Masterplan, Zaha Hadid Architects [© Zaha Hadid Architects].....	26
figura 0.33: nuovo terminale del Shenzhen Bao'an International Airport di Massimiliano e Doriana Fuksas [Fonte: theplan.it].....	26
figura 0.34: Esempio di operazione con Grasshopper.....	29
figura 0.35: Creazione con Grasshopper di una linea definita da due punti (definiti su Rhino) e visualizzazione nell'interfaccia di Rhino.....	29
figura 0.36: Operazione semplice sugli oggetti creati precedentemente.....	29
figura 0.37: Confronto tra consumo reale e previsionale della Maison Air et Lumière.....	30
figura 0.38: Costo dell'energia preservata in funzione della diminuzione del consumo [Fonte: IPCC; Climate change 2014: Mitigation of climate change].....	31

## I. ANALISI DEL CONTESTO

figura I.39: Evoluzione della popolazione a Sondrio dal 2001.....	43
figura I.40: Evoluzione della popolazione a Sondrio dal 1861.....	43
figura I.41: Numero di 15-19 anni.....	43
figura I.42: Numero di nascite.....	43
figura I.43: Fotografia - Impossibilità di parcheggiarsi sulla via Besta Carlo [Fonte: Google street view].....	47
figura I.44: Fotografia - Macchina parcheggiata vicina alla scuola [Fonte: Google street view].....	47
figura I.45: Precipitazione cumulate mensile a Sondrio (centro o no) e a Lecco.....	59

figura I.46: Radiazione media mensile a Sondrio (centro o no) e a Lecco.....	59
figura I.47: Temperature medie quotidiane a Sondrio (centro o no) e a Lecco.....	59
figura I.48: Velocità quotidiana del vento a Sondrio centro e a Lecco.....	60
figura I.49: Percentuale della direzione del vento per un anno a Sondrio centro.....	60
figura I.50: Confronto tra le temperature di Sondrio e Bergamo.....	60
figura I.51: Confronto tra le radiazioni di Sondrio e Bergamo.....	60

## II. STATO DI FATTO

figura II.52: Repertorio dell'offerta formativa regionale - Corsi attivi presso il PFP.....	63
figura II.53: Pianta - Primo corpo dell'edificio (Fase 1).....	64
figura II.54: Pianta - Primo ingrandimento dell'edificio (Fase 2).....	64
figura II.55: Pianta - Secondo ingrandimento dell'edificio (Fase 3).....	64
figura II.56: Pianta - Aggiunta del corpo Est (Fase 4).....	64
figura II.57: Pianta - Aggiunta dell'attuale seconda sala da pranzo (Fase 5).....	64
figura II.58: Pianta - Stato attuale dell'edificio con l'aggiunta della sala multimediale recentemente (Fase 6).....	64
figura II.59: Fotografia - laboratorio estetica.....	65
figura II.60: Fotografia - laboratorio acconciatura.....	65
figura II.61: Fotografia - laboratorio bar.....	65
figura II.62: Fotografia - laboratorio cucina.....	65
figura II.63: Fotografia - laboratorio abbigliamento.....	65
figura II.64: Fotografia - indicazione sulle porte delle aule.....	65
figura II.65: Fotografia - Aula piccola.....	66
figura II.66: Fotografia - Aula al livello seminterrato.....	66
figura II.67: Fotografia - Aula non utilizzata per le lezioni durante l'inverno.....	66
figura II.68: Fotografia - Scala fra il laboratorio di cucina e la sala da pranzo.....	66
figura II.69: Fotografia - Scala nel cortile dopo l'ingresso.....	66
figura II.70: Fotografia - Scala fra entrata e piano terra.....	67
figura II.71: Fotografia - Scala 3.....	67
figura II.72: Fotografia - Sala da pranzo 1.....	67
figura II.73: Fotografia - Sala da pranzo 2.....	67
figura II.74: Fotografia - Disimpegno.....	68
figura II.75: Fotografia - corridoio.....	68
figura II.76: Fotografia - cortile interno grande scoperto.....	68
figura II.77: Fotografia - cortile interno piccolo scoperto.....	68

figura II.78: Fotografia - Servizi igienici femmine.....	68
figura II.79: Fotografia - Disimpegno.....	68
figura II.80: Fotografia - Servizi igienici maschi.....	69
figura II.81: Fotografia - Scala per lo sottotetto.....	69
figura II.82: Fotografia - Aula sottotetto chiusa.....	69
figura II.83: Fotografia - Sala multimediale.....	69
figura II.84: Fotografia - Hall della sala multimediale.....	70
figura II.85: Fotografia - Parete mobile della sala multimediale.....	70
figura II.86: Fotografia - Sala multimediale.....	70
figura II.87: Fotografia - Allievi dell'indirizzo estetico.....	70
figura II.88: Fotografia - Allievi dell'indirizzo cucina.....	70
figura II.89: Fotografia - Sala usata come spogliatoi.....	71
figura II.90: Fotografia - cassette nel corridoio.....	71
figura II.91: Fotografia - Ufficio al primo piano.....	71
figura II.92: Fotografia - Sala dei professori.....	71
figura II.93: Fotografia - Sala riunioni.....	72
figura II.94: Fotografia - Uscita di sicurezza per il corpo centrale al primo piano.....	72
figura II.95: Fotografia - Uscita di sicurezza dal corpo est al primo piano.....	72
figura II.96: Fotografia - Uscita di sicurezza al piano seminterrato.....	72
figura II.97: Fotografia - Vecchia scala di sicurezza.....	73
figura II.98: Fotografia - Edificio visto dalla via Besta Carlo.....	73
figura II.99: Fotografia - Campetto di calcio della scuola.....	73
figura II.100: Fotografia - Cortile interno scoperto fra l'ingresso e il corpo centrale.....	73
figura II.101: Fotografia - Piccolo cortile interno scoperto.....	74
figura II.102: Fotografia - Rivestimento in pietra della seconda sala da pranzo.....	74
figura II.103: Fotografia - Rivestimento in intonaco delle facciate e tetti bitumosi (a destra) o in lastre di pietra (a sinistra).....	74
figura II.104: Fotografia - Rivestimento in lastre lapidee nere dell'ingresso della sala multimediale.....	75
figura II.105: Pianta della circolazione al piano seminterrato.....	76
figura II.106: Pianta dei spazi dedicati all'insegnamento al piano seminterrato.....	76
figura II.107: Pianta dei spazi amministrativi al piano seminterrato.....	76
figura II.108: Pianta dei spazi di servizi al piano seminterrato.....	76
figura II.109: Pianta della circolazione al piano terra.....	77

figura II.110: Pianta dei spazi dedicati all'insegnamento al piano terra.....	77
figura II.111: Pianta dei spazi amministrativi al piano terra .....	77
figura II.112: Pianta delle sale da pranzo e multimediale al piano terra.....	77
figura II.113: Pianta dei spazi di servizi al piano terra.....	78
figura II.114: Pianta della circolazione al primo piano....	78
figura II.115: Pianta dei spazi dedicati all'insegnamento al primo piano.....	78
figura II.116: Pianta dei spazi amministrativi al primo piano .....	78
figura II.117: Pianta dei spazi di servizi al primo piano....	78
figura II.118: Concentrazione di radon per regione [Fonte: ISS-ANPA].....	101
figura II.119: Concentrazione di radon in Lombardia [Fonte: acquambiente.net].....	101
figura II.120: Locali esistenti e progettati.....	105

### III. STUDIO ENERGETICO

figura III.121: Rifornimento in fioul della scuola PFP di Sondrio.....	111
figura III.122: Pianta della posizione delle stratigrafie usate su Trnsys.....	113
figura III.123: Grafico della temperatura media e media mobile sull'anno intero.....	118
figura III.124: Temperatura della Zona 34a in funzione della temperatura mobile giornaliera con le classi di comfort..	118
figura III.125: Footprint del comfort estivo e inverno della scuola esistente.....	119
figura III.126: Esistente - Risultati dei guadagni solari per ciascuna zona termica dell'edificio.....	120
figura III.127: Esistente - Risultati dei guadagni interni per ciascuna zona termica dell'edificio.....	121
figura III.128: Esistente - Risultati delle perdite per infiltrazioni per ciascuna zona termica dell'edificio.....	122
figura III.129: Esistente - Risultati delle perdite per trasmissione del calore fra i muri per ciascuna zona termica dell'edificio.....	123
figura III.130: Esistente - Risultati del riscaldamento per ciascuna zona termica dell'edificio.....	124
figura III.131: Ripartizione dei guadagni e delle perdite dell'edificio esistente.....	125
figura III.132: Esistente migliorato - Risultati del riscaldamento per ciascuna zona termica dell'edificio....	126
figura III.133: Esistente migliorato - Risultati dei guadagni solari per ciascuna zona termica dell'edificio.....	127
figura III.134: Guadagni e Perdite dell'edificio esistente e dell'edificio esistente migliorato.....	128
figura III.135: Doppio vetro - Risultati dei guadagni solari per ciascuna zona termica dell'edificio.....	130

figura III.136: Doppio vetro - Risultati delle perdite per infiltrazioni per ciascuna zona termica dell'edificio.....	131
figura III.137: Doppio vetro - Risultati delle perdite per trasmissione fra i muri per ciascuna zona termica dell'edificio .....	132
figura III.138: Doppio vetro - Risultati del riscaldamento per ciascuna zona termica dell'edificio.....	133
figura III.139: Guadagni e Perdite dell'edificio esistente migliorato e dell'edificio con doppio vetro.....	134
figura III.140: Schemi dei diversi tipi di ponti termici in funzione del tipo d'isolamento.....	135
figura III.141: Caso 1 - Schemi della parete su Therm, Trnsys con e senza ponti termici.....	135
figura III.142: Caso 2 - Schemi della parete su Therm, Trnsys con e senza ponti termici.....	136
figura III.167: Ponte termico PT1-CV1.....	137
figura III.168: Ponte termico PT1-CV2.....	137
figura III.169: Ponte termico PT1-CV5.....	137
figura III.170: Ponte termico PT1-CV6.....	138
figura III.172: Ponte termico PT2.....	138
figura III.171: Ponte termico PT3-CV1.....	138
figura III.173: Ponte termico PT3-CV2.....	139
figura III.174: Ponte termico PT3-CV3.....	139
figura III.175: Ponte termico PT3-CV4.....	139
figura III.177: Ponte termico PT4.....	140
figura III.176: Ponte termico PT5.....	140
figura III.178: Ponte termico PT6-CV1.....	140
figura III.180: Ponte termico PT6-CV2.....	141
figura III.181: Ponte termico PT6-CV3.....	141
figura III.179: Ponte termico PT6-CV4.....	141
figura III.182: Ponte termico PT6-CV5.....	142
figura III.183: Ponte termico PT6-CV6.....	142
figura III.143: Isolante interno - Risultati delle perdite per infiltrazioni per ciascuna zona dell'edificio.....	143
figura III.144: Isolante interno - Risultati delle perdite per trasmissione fra i muri per ciascuna zona dell'edificio..	144
figura III.145: Isolante interno - Risultati del riscaldamento per ciascuna zona dell'edificio.....	145
figura III.146: Guadagni e Perdite dell'edificio esistente migliorato e dell'edificio con isolante interno.....	146
figura III.147: Isolante esterno - Risultati delle perdite per infiltrazioni per ciascuna zona dell'edificio.....	147
figura III.148: Isolante esterno - Risultati delle perdite per trasmissione fra i muri per ciascuna zona dell'edificio..	148
figura III.149: Isolante esterno - Risultati del riscaldamento per ciascuna zona dell'edificio.....	149
figura III.150: Guadagni e Perdite dell'edificio esistente migliorato e dell'edificio con isolante esterno.....	150

figura III.151: Isolante interno e doppio vetro - Risultati delle perdite per infiltrazioni per ciascuna zona dell'edificio .....	151
figura III.152: Isolante interno e doppio vetro - Risultati delle perdite per trasmissione fra i muri per ciascuna zona dell'edificio.....	152
figura III.153: Isolante interno e doppio vetro - Risultati del riscaldamento per ciascuna zona dell'edificio.....	153
figura III.154: Isolante esterno e doppio vetro - Risultati delle perdite per infiltrazioni per ciascuna zona dell'edificio .....	154
figura III.155: Isolante esterno e doppio vetro - Risultati delle perdite per trasmissione fra i muri per ciascuna zona dell'edificio.....	155
figura III.156: Isolante esterno e doppio vetro - Risultati del riscaldamento per ciascuna zona dell'edificio.....	156
figura III.157: Guadagni e Perdite dell'edificio esistente migliorato e dell'edificio con doppio vetro e isolante, sia interno che esterno.....	158
figura III.158: Schema del funzionamento di GenOpt con Trnsys.....	159
figura III.159: Senza cambiare le finestre - Costo Totale in funzione dello spessore d'isolante per i quattro casi di studio .....	163
figura III.160: Senza cambiare le finestre - Energia Totale in funzione dello spessore d'isolante per i quattro casi di studio .....	164
figura III.161: Cambiando solo il vetro singolo - Costo Totale in funzione dello spessore d'isolante per i quattro casi di studio.....	164
figura III.162: Cambiando solo il vetro singolo - Energia Totale in funzione dello spessore d'isolante per i quattro casi di studio.....	164
figura III.163: Cambiando solo le finestre miste - Costo Totale in funzione dello spessore d'isolante per i quattro casi di studio.....	164
figura III.164: Cambiando solo le finestre miste - Energia Totale in funzione dello spessore d'isolante per i quattro casi di studio.....	164
figura III.165: Cambiando tutte le finestre - Costo Totale in funzione dello spessore d'isolante per i quattro casi di studio .....	164
figura III.166: Cambiando tutte le finestre - Energia Totale in funzione dello spessore d'isolante per i quattro casi di studio .....	165

## IV. RICERCHE BIBLIOGRAFICHE

figura IV.184: Fotografia - Parco nazionale di Mesa Verde nello stato del Colorado [Fonte: Jim Shoemaker Photography] .....	171
figura IV.185: <i>Scheme design</i> del villaggio durante l'estate (a sinistra) e durante l'inverno (a destra) [Fonte: Modulo di Cultura tecnologica della progettazione di Prof. Arch. Antonio Bosco].....	171

figura IV.186: Fotografia - Case pugliesi [Fonte: Foto Archivio Fotogramma].....	171
figura IV.187: <i>Scheme design</i> dei trulli pugliesi [Fonte: Modelli di architettura mediterranea www.progettoabitare.it] .....	171
figura IV.188: Irradiazione in funzione delle condizioni del tempo [Fonte: www.solarpraxis.com].....	174
figura IV.189: Irraggiamento di superficie con inclinazioni diverse su un anno [Fonte: Lezione del Prof. Mario Motta: Solar thermal systems].....	174
figura IV.190: Schema di funzionamento dei sistemi solari passivi a guadagno diretto (tipo 1) [Fonte: Associazione Progetto Energia Zero: I sistemi solari passivi].....	175
figura IV.191: Schema di funzionamento dei sistemi solari passivi a guadagno diretto (tipo 2) [Fonte: Associazione Progetto Energia Zero: I sistemi solari passivi].....	175
figura IV.192: Schema di funzionamento del muro Trombe-Michel [Fonte: Associazione Progetto Energia Zero: I sistemi solari passivi].....	176
figura IV.193: Schema di funzionamento del muro Trombe-Michel (variante) [Fonte: Associazione Progetto Energia Zero: I sistemi solari passivi].....	176
figura IV.194: Schema di funzionamento del muro d'acqua [Fonte: Associazione Progetto Energia Zero: I sistemi solari passivi].....	176
figura IV.195: Schema di funzionamento del Roof-pond durante i giorni invernali ed estivi [Fonte: Associazione Progetto Energia Zero: I sistemi solari passivi].....	176
figura IV.196: Schema di funzionamento del Roof-pond durante le notti invernali [Fonte: Associazione Progetto Energia Zero: I sistemi solari passivi].....	176
figura IV.197: Schema di funzionamento di una serra solare [Fonte: Associazione Progetto Energia Zero: I sistemi solari passivi].....	177

## V. LA SERRA

figura V.198: Schema di spiegazione dell'altezza delle finestre.....	182
figura V.199: Funzionamento di una serra a guadagno diretto [Fonte: La serra solare, Claudio Zappone].....	183
figura V.200: Funzionamento di una serra a scambio convettivo [Fonte: La serra solare, Claudio Zappone]....	183
figura V.201: Funzionamento di una serra a scambio radiante [Fonte: La serra solare, Claudio Zappone].....	183
figura V.202: Accumulo a parete [Fonte: La serra solare, Claudio Zappone].....	184
figura V.203: Accumulo a pavimento [Fonte: La serra solare, Claudio Zappone].....	184
figura V.204: Accumulo centrale [Fonte: La serra solare, Claudio Zappone].....	184
figura V.205: Funzionamento invernale diurno della serra [Fonte: La serra solare, Claudio Zappone].....	185
figura V.206: Funzionamento invernale notturno della serra [Fonte: La serra solare, Claudio Zappone].....	185

figura V.207: Funzionamento estivo diurno della serra [Fonte: La serra solare, Claudio Zappone].....	185
figura V.208: Funzionamento estivo notturno della serra [Fonte: La serra solare, Claudio Zappone].....	186
figura V.209: Energia incidente su superfici variamente orientate [Fonte: La serra solare, Claudio Zappone].....	187
figura V.210: Rapporto tra angolo di incidenza ed energia incidente [Fonte: La serra solare, Claudio Zappone].....	187
figura V.211: Schema del funzionamento della ventilazione in una serra [Fonte: La serra solare, Claudio Zappone]..	188
figura V.212: Schema dei diversi tipi di schermature fisse [Fonte: La serra solare, Claudio Zappone].....	188
figura V.213: 3D del modello usato per la simulazione su Trnsys.....	190
figura V.214: Zone termiche del modello usato per le simulazioni su Trnsys.....	191
figura V.215: Paragone del consumo dell'edificio nei diversi casi studiati.....	192
figura V.216: Risultati dell'ottimizzazione del consumo di riscaldamento dell'edificio.....	193
figura V.217: Risultati dell'ottimizzazione del consumo di riscaldamento e raffrescamento dell'edificio.....	194
figura V.218: Schema di spiegazione della simulazione..	194
figura V.219: Consumo dell'edificio in funzione dell'inclinazione del tetto.....	194
figura V.220: Consumo dell'edificio in funzione dell'inclinazione della facciata a sud.....	194
figura V.221: Consumo dell'edificio in funzione dell'orientamento della facciata a sud.....	195
figura V.222: Consumo dell'edificio in funzione dell'inclinazione del tetto.....	195
figura V.223: Consumo dell'edificio in funzione dell'inclinazione della facciata a sud.....	195
figura V.224: Consumo dell'edificio in funzione dell'orientamento della facciata a sud.....	195
figura V.225: Consumo di riscaldamento dell'edificio in funzione della percentuale di finestre sulla facciata sud..	196
figura V.226: Consumo di riscaldamento dell'edificio in funzione della percentuale di finestre sul tetto.....	196
figura V.227: Consumo di riscaldamento dell'edificio in funzione della variazione della superficie a sud.....	196
figura V.228: Consumo di riscaldamento dell'edificio in funzione della variazione della superficie del tetto.....	196
figura V.229: Consumo di raffrescamento dell'edificio in funzione della percentuale di finestre sulla facciata sud..	196
figura V.230: Consumo di raffrescamento dell'edificio in funzione della percentuale di finestre sul tetto.....	196
figura V.231: Consumo di raffrescamento dell'edificio in funzione della variazione della superficie a sud.....	197
figura V.232: Consumo di raffrescamento dell'edificio in funzione della variazione della superficie del tetto.....	197

figura V.233: Tabella dei serramenti.....	199
figura V.234: Tabella delle simulazioni realizzate con GenOpt.....	199
figura V.235: Risultato migliore ottenuto con GenOpt..	199
figura V.236: Consumo mensile della scuola.....	199
figura V.237: Footprint del comfort della scuola sull'anno .....	200
figura V.238: Temperature delle serre il 15 gennaio....	200
figura V.239: Temperature delle serre il 15 maggio....	200

## VI. STUDIO DEL MODULO

figura VI.240: Schermata di Athena Impact Estimator for Buildings.....	204
figura VI.241: Interfaccia di Athena Impact Estimator Building.....	205
figura VI.242: Esempio di consumo di materiale.....	205
figura VI.243: Impatto sull'ambiente della costruzione di un muro in calcestruzzo armato di 1 m <sup>2</sup> .....	205
figura VI.244: Impatto sull'ambiente della costruzione di un muro in calcestruzzo armato di 13 m <sup>2</sup> .....	206
figura VI.245: Dimensioni del modulo studiato.....	207
figura VI.246: Schermata dell'interfaccia di Archsim....	207
figura VI.247: Caratteristiche termiche del volume di studio .....	208
figura VI.248: Nomenclatura delle parete utilizzata per il calcolo dell'illuminamento.....	209
figura VI.249: Schema e caratteristiche costruttive del modulo studiato.....	210
figura VI.250: Coefficienti di Pearson per la correlazione tra parametri e consumi.....	211
figura VI.251: Sensibilità del fabbisogno di raffrescamento alla larghezza della finestra verticale.....	212
figura VI.252: Sensibilità del fabbisogno di riscaldamento allo spessore di isolante.....	212
figura VI.253: Sensibilità dell'energia trasmessa attraverso le finestre alla larghezza della finestra verticale.....	212
figura VI.254: Sensibilità dell'energia trasmessa attraverso le finestre all'orientamento.....	212
figura VI.255: Sensibilità del fabbisogno di luce artificiale alla larghezza della finestra orizzontale.....	213
figura VI.256: Sensibilità del fabbisogno di luce artificiale al rapporto S/V.....	213
figura VI.257: Sensibilità del costo all'inclinazione del tetto .....	213
figura VI.258: Coefficienti di Pearson per la correlazione tra parametri (salvo l'inclinazione del tetto) e consumi.....	213
figura VI.259: Sensibilità del costo allo spessore di isolante .....	214
figura VI.260: Coefficienti di Pearson per la correlazione tra derivata parziale dei parametri e i parametri per il consumo	

di raffrescamento .....	215	figura VI.281: Costo “totale” in funzione dell’orientamento e della dimensione della finestra.....	223
figura VI.261: Sensibilità del fabbisogno di raffrescamento alla variazione della larghezza della finestra orizzontale in funzione della larghezza della finestra verticale.....	215	figura VI.282: Raffrescamento in funzione dell’orientamento e della dimensione della finestra con una schermatura..	223
figura VI.262: Coefficienti di Pearson per la correlazione tra derivata parziale dei parametri e i parametri per il consumo di riscaldamento.....	216	figura VI.283: Riscaldamento in funzione dell’orientamento e della dimensione della finestra con una schermatura..	223
figura VI.263: Sensibilità del fabbisogno di riscaldamento alla variazione dello spessore di isolante in funzione dello spessore di isolante.....	216	figura VI.284: Energia trasmessa attraverso la finestra in funzione dell’orientamento e della dimensione della finestra con una schermatura.....	223
figura VI.264: Coefficienti di Pearson per la correlazione tra derivata parziale dei parametri e i parametri per l’energia trasmessa attraverso le finestre.....	217	figura VI.285: Energia per la luce artificiale in funzione dell’orientamento e della dimensione della finestra con una schermatura.....	224
figura VI.265: Sensibilità dell’energia trasmessa attraverso le finestre alla variazione di inclinazione del tetto in funzione dell’orientamento.....	217	figura VI.286: Confronto tra il comfort termico di un aula con impianto di raffrescamento (a sinistra) e senza impianto di raffrescamento (a destra).....	224
figura VI.266: Sensibilità dell’energia trasmessa attraverso le finestre alla variazione di larghezza della finestra verticale in funzione dell’orientamento.....	217	figura VI.287: Rapporto tra S/V e la larghezza del volume studiato.....	225
figura VI.267: Coefficienti di Pearson per la correlazione tra derivata parziale dei parametri e i parametri per l’energia totale.....	218	figura VI.288: Riscaldamento in funzione dell’orientamento e del rapporto S/V.....	225
figura VI.268: Sensibilità del fabbisogno globale alla variazione di spessore di isolante in funzione dello spessore di isolante.....	218	figura VI.289: Raffrescamento in funzione dell’orientamento e del rapporto S/V.....	225
figura VI.269: Sensibilità del fabbisogno globale alla variazione di spessore di isolante contro terra in funzione dello spessore di isolante.....	218	figura VI.290: Energia per la luce artificiale in funzione dell’orientamento e del rapporto S/V.....	226
figura VI.270: Sensibilità del fabbisogno globale alla variazione di orientamento in funzione dell’orientamento .....	219	figura VI.291: Energia totale in funzione dell’orientamento e del rapporto S/V.....	226
figura VI.271: Sensibilità del fabbisogno globale all’orientamento.....	219	figura VI.292: Costo “totale” in funzione dell’orientamento e del rapporto S/V.....	226
figura VI.272: Coefficienti di Pearson per la correlazione tra derivata parziale dei parametri e i parametri per il costo.....	220	figura VI.293: Riscaldamento in funzione dello spessore di isolante e dello spessore di isolante contro terra.....	227
figura VI.273: Riassunto dei parametri e coppie di parametri da studiare.....	220	figura VI.294: Raffrescamento in funzione dello spessore di isolante e dello spessore di isolante contro terra.....	227
figura VI.274: Raffrescamento in funzione dell’orientamento e della dimensione della finestra.....	221	figura VI.295: Energia totale in funzione dello spessore di isolante e dello spessore di isolante contro terra.....	227
figura VI.275: Riscaldamento in funzione dell’orientamento e della dimensione della finestra.....	221	figura VI.296: Costo “totale” in funzione dello spessore di isolante e dello spessore di isolante contro terra.....	227
figura VI.276: Energia per la luce artificiale in funzione dell’orientamento e della dimensione della finestra, calcolata con Daysim.....	221	figura VI.297: Riscaldamento in funzione dello spessore di isolante e della dimensione della parte trasparente del tetto .....	228
figura VI.277: Energia per la luce artificiale in funzione dell’orientamento e della dimensione della finestra, calcolata con Archsim.....	221	figura VI.298: Raffrescamento in funzione dello spessore di isolante e della dimensione della parte trasparente del tetto .....	228
figura VI.278: Energia grigia in funzione dell’orientamento e della dimensione della finestra.....	222	figura VI.299: Energia totale in funzione dello spessore di isolante e della dimensione della parte trasparente del tetto .....	228
figura VI.279: Energia totale in funzione dell’orientamento e della dimensione della finestra.....	222	figura VI.300: Costo “totale” in funzione dello spessore di isolante e della dimensione della parte trasparente del tetto .....	228
figura VI.280: Energia trasmessa attraverso la finestra in funzione dell’orientamento e della dimensione della finestra .....	222	figura VI.301: Raffrescamento in funzione delle dimensioni delle finestre verticale e orizzontale.....	229
		figura VI.302: Energia totale in funzione delle dimensioni delle finestre verticale e orizzontale.....	229
		figura VI.303: Raffrescamento in funzione dello spessore di isolante e dello spessore di isolante contro terra con	

serramenti a triplo vetro.....	230
figura VI.304: Riscaldamento in funzione dello spessore di isolante e dello spessore di isolante contro terra con serramenti a triplo vetro.....	230
figura VI.305: Rapporto tra $E_{risc\ doppio}$ - $E_{risc\ triplo}$ e $E_{risc\ doppio}$ in funzione dello spessore di isolante e dello spessore di isolante contro terra.....	230
figura VI.306: Differenza tra energia totale con serramenti a doppio vetro e energia totale con serramenti a triplo vetro in funzione dello spessore di isolante e dello spessore di isolante contro terra.....	231
figura VI.307: Differenza tra costo “totale” con serramenti a doppio vetro e costo “totale” con serramenti a triplo vetro in funzione dello spessore di isolante e dello spessore di isolante contro terra.....	231
figura VI.308: Differenza tra costo “totale” con serramenti a doppio vetro e costo “totale” con serramenti a triplo vetro in funzione delle dimensioni dei serramenti.....	231
figura VI.309: Rapporto tra $E_{risc\ mass}$ - $E_{risc\ leggero}$ e $E_{risc\ leggero}$ in funzione dello spessore di isolante sui muri e dello spessore di isolante sul tetto.....	232
figura VI.310: Rapporto tra Costo <sub>mass</sub> - Costo <sub>leggero</sub> e Costo <sub>leggero</sub> in funzione dello spessore di isolante dei muri e dello spessore di isolante sul tetto.....	232
figura VI.311: Rapporto tra $E_{Totale\ mass}$ - $E_{Totale\ leggero}$ e $E_{Totale\ leggero}$ in funzione dello spessore di isolante dei muri e dello spessore di isolante sul tetto.....	233
figura VI.312: Possibilità di inserimento del modulo.....	234
figura VI.313: Pianta del modulo (fuori scala).....	235
figura VI.314: Zone termiche del modulo.....	235
figura VI.315: Estratto della tabella riepilogativa dei risultati ottenuti per le aule a nord.....	237
figura VI.316: Diagramma di comfort per le aule a nord.....	237
figura VI.317: Estratto della tabella riepilogativa dei risultati ottenuti per le aule a nord.....	238
figura VI.318: Diagramma di comfort per le aule a sud.....	239
figura VI.319: Estratto della tabella riepilogativa dei risultati ottenuti per le aule a sud.....	239
figura VI.320: Diagramma di comfort per i servizi igienici.....	240

## VII. ARCHITETTURA

figura VII.321: Fotografia - Padiglione di Barcelona di Mies van der Rohe.....	245
figura VII.322: Fotografia - The Hans van Heeswijk's Rieteiland House [Fonte: Keller Wintergardens & Windows].....	245
figura VII.323: Fotografia - ANTHRA-ZINC® di VMZINC per il campus Ca' Foscari [Fonte: Arketipo Magazine].....	245
figura VII.324: Render del progetto: vista del tetto praticabile.....	246
figura VII.325: Render del progetto: vista della facciata sud.....	247

figura VII.326: Fotografia - Vite della comune di Sondrio.....	247
figura VII.327: Fotografia - Palestra in Sargans [Fonte: Detail inspiration].....	247
figura VII.328: Fotografia - Scuola di altmünster [Fonte: Catalogo constructive Alps].....	248
figura VII.329: Schema gialli/rossi progettuale sui volumi.....	248
figura VII.330: Schema progettuale dei tetti delle serre.....	248
figura VII.331: Schema della definizione dell'ingresso.....	249
figura VII.332: Fotografia - Piazza di Spagna a Roma.....	249
figura VII.333: Render del progetto: vista del cortile d'ingresso.....	249
figura VII.334: Schema della rotazione del volume della mensa.....	250
figura VII.335: Render del progetto: vista della mensa.....	250
figura VII.336: Fotografia - quartiere BedZED.....	251
figura VII.337: Render - Harmony tower in Seoul by Studio Daniel Libeskind [Fonte: www.libeskind.com].....	251
figura VII.338: Fotografia - Fondazione Beyeler di Renzo Piano.....	251
figura VII.339: Render del progetto: vista della piccola serra.....	252
figura VII.340: Render del progetto: vista della grande serra.....	252
figura VII.341: Fotografia - Scuola di architettura di Umea - Henning Larsen Architects.....	253
figura VII.342: Fotografia - Padiglione Canopea della Team Rhône-Alpes per il Solar Decathlon Europe 2012.....	254
figura VII.343: Urban planning - Tower Canopea della Team Rhône-Alpes per il Solar Decathlon Europe 2012.....	254
figura VII.344: Render dell'aula 14.....	277
figura VII.345: Render esteriore.....	277

## VIII. VERIFICHE ARCHITETTONICHE

figura VIII.346: Tabella dei diversi tipi di scuole.....	283
figura VIII.347: Tabella delle resistenze al fuoco a secondo dell'altezza.....	283
figura VIII.348: Tabella della superficie dei compartimenti a secondo dell'altezza dell'edificio.....	283
figura VIII.349: Affollamento e vie di fuga per ogni aula del piano seminterrato.....	284
figura VIII.350: Affollamento e vie di fuga per ogni aula del piano terra.....	285
figura VIII.351: Affollamento e vie di fuga per ogni aula del primo piano.....	286
figura VIII.352: Affollamento e vie di fuga per ogni aula del secondo piano.....	286
figura VIII.353: Dimensionamento delle vie di uscite.....	287

figura VIII.354: Immagine la circolare francese del 30 dicembre 2007 per l'accessibilità negli edificio aperti al pubblico.....	297
figura VIII.355: Immagine la circolare francese del 30 dicembre 2007 per l'accessibilità negli edificio aperti al pubblico.....	297
figura VIII.356: Immagine la circolare francese del 30 dicembre 2007 per l'accessibilità negli edificio aperti al pubblico.....	298
figura VIII.357: Immagine la circolare francese del 30 dicembre 2007 per l'accessibilità negli edificio aperti al pubblico.....	298
figura VIII.358: Immagine la circolare francese del 30 dicembre 2007 per l'accessibilità negli edificio aperti al pubblico.....	298
figura VIII.359: Immagine la circolare francese del 30 dicembre 2007 per l'accessibilità negli edificio aperti al pubblico.....	298
figura VIII.360: Immagine la circolare francese del 30 dicembre 2007 per l'accessibilità negli edificio aperti al pubblico.....	298
figura VIII.361: Rampa di accesso alla scuola.....	299

## IX. PROGETTO TECNOLOGICO

figura IX.362: Requisiti di reazione al fuoco dei materiali in funzione del loro uso.....	304
figura IX.363: Corrispondenza normativa per la reazione al fuoco dei rivestimenti di pavimento.....	304
figura IX.364: Corrispondenza normativa per la reazione al fuoco dei rivestimenti di parete.....	304
figura IX.365: Corrispondenza normativa per la reazione al fuoco dei rivestimenti di parete.....	304
figura IX.366: Potere fono-isolante minimo delle pareti divisorie.....	305
figura IX.367: Livello massimo di rumore anticalpestio.....	305
figura IX.368: requisiti acustici passivi degli edifici.....	305
figura IX.369: Esempio di stratigrafia leggera simile a quella che useremo.....	306
figura IX.370: Coefficiente di correzione in funzione delle masse superficiali.....	306
figura IX.371: "Dipendenza dalla frequenza del tempo ottimo di riverberazione".....	307
figura IX.372: "Valori ottimi di riverberazione".....	307
figura IX.373: Strategia di trattamento della riverberazione (Fonte: knauf.it, <i>Sistema Comfort Acustico Il controllo assoluto del suono</i> ).....	308
figura IX.374: Coefficienti di assorbimento e tempo di riverberazione.....	308
figura IX.375: Valori limiti di assorbimento del rivestimento del soffitto della mensa.....	309
figura IX.376: Massima quantità di umidità per materiale.....	309

figura IX.377: Resistenza termica superficiale.....	310
figura IX.378: Resistenza termica delle intercapedini di aria non ventilate.....	310
figura IX.379: Valori limite della trasmittanza termica U delle strutture verticali opache espresso in W/m <sup>2</sup> K.....	310
figura IX.380: Valori limite della trasmittanza termica U delle strutture orizzontali opache espresso in W/m <sup>2</sup> K.....	310
figura IX.381: Caratteristiche dei materiali isolanti comuni.....	311
figura IX.382: Stratigrafie.....	313

## X. PROGETTO STRUTTURALE

figura X.383: Chiusure e Partizione Verticali.....	382
figura X.384: Chiusure e Partizione Orizzontali.....	382
figura X.385: Carichi di esercizio, secondo l'Eurocodice 1-2 [4.4].....	383
figura X.386: Tabella dei carichi di esercizio per i tetti di categoria H.....	383
figura X.387: Valori consigliate per Ce in funzione della topografia, secondo l'Eurocodice 1-3 [5.2].....	384
figura X.388: Regione Climatiche dell'Europa, secondo l'eurocodice 1-3 [Allegato C.1].....	385
figura X.389: Fattore di zona, secondo l'Eurocodice 1-3 [Allegato C.2].....	385
figura X.390: Coefficienti di forma per un tetto a due falde Caso (i) Disposizione dei carichi senza accumulazione Caso (ii) e (iii) Disposizione dei carichi con accumulazione.....	386
figura X.391: Tabella dei coefficienti di forma, secondo l'Eurocodice 1-3 [5.3.2].....	386
figura X.392: Chiusure e Partizione Verticali.....	387
figura X.393: Chiusure e Partizioni Orizzontali.....	387
figura X.394: Tabella dei carichi dell'edificio esistente e dell'edificio nuovo.....	388
figura X.395: Tabella di confronto dei carichi fra esistente e nuovo.....	388
figura X.396: Dimensionamento dello Xlam per un pannello sopra una campata.....	389
figura X.397: Dimensionamento dello Xlam per un pannello sopra due campate.....	389
figura X.398: Dimensionamento dello Xlam per un pannello sopra tre campate.....	389
figura X.399: Tipo di Xlam e lunghezza del pannello in funzione del numero di campate.....	389
figura X.400: Tipologie di ancoraggio trave/pilastro.....	390
figura X.401: Carichi sulla Trave T <sub>1</sub> .....	392
figura X.402: Valore dei carichi sulla trave T <sub>1</sub> .....	392
figura X.403: Valori limiti massimi consigliati per l'abbassamento verticale, secondo la norma [clausola 7.2.1(1)B in NF EN 1993-1-1/NA:2007].....	392

figura X.404: Predimensionamento della trave $T_1$ .....	393	figura X.441: Scelta dei collegamenti dei pilastri con la terra .....	405
figura X.405: Carichi sulla Trave $T_2$ .....	394	figura X.442: Scelta dei carichi.....	405
figura X.406: Valore dei carichi sulla trave $T_2$ .....	394	figura X.443: Modellizzazione del portico su RdM LeMans - Collegamenti fra i diversi elementi della struttura.....	405
figura X.407: Valori limiti massimi consigliati per l'abbassamento verticale, secondo la norma [clausola 7.2.1(1)B in NF EN 1993-1-1/NA:2007].....	394	figura X.444: Modellizzazione del portico su RdM LeMans - Collegamenti sulla terra e carichi sulla struttura.....	406
figura X.408: Predimensionamento della trave $T_2$ .....	395	figura X.445: Risultati del portico su RdM LeMans - Taglio .....	406
figura X.409: Carichi sulla Trave $T_3$ .....	396	figura X.446: Risultati del portico su RdM LeMans - Momento.....	407
figura X.410: Valore dei carichi sulla trave $T_3$ .....	396	figura X.447: Tabella del fattore d'imperfezione in funzione della geometria della trave.....	408
figura X.411: Valori limiti massimi consigliati per l'abbassamento verticale, secondo la norma [clausola 7.2.1(1)B in NF EN 1993-1-1/NA:2007].....	396	figura X.448: Verifica del dimensionamento del pilastro $P_1$ come HEB 200.....	409
figura X.412: Predimensionamento della trave $T_3$ .....	397	figura X.449: Verifica del dimensionamento del pilastro $P_1$ come HEB 180.....	409
figura X.413: Carichi lineari sulla Trave $T_4$ .....	398	figura X.450: Verifica del dimensionamento del pilastro $P_{2A}$ come HEB 300.....	410
figura X.414: Valore dei carichi lineari sulla trave $T_4$ .....	398	figura X.451: Verifica del dimensionamento del pilastro $P_{2A}$ come HEB 260.....	410
figura X.415: Valore dei carichi puntuali sulla trave $T_4$ .....	398	figura X.452: Tabella dei carichi sul pilastro $P_2$ .....	411
figura X.416: Valori limiti massimi consigliati per l'abbassamento verticale, secondo la norma [clausola 7.2.1(1)B in NF EN 1993-1-1/NA:2007].....	398	figura X.453: Parametri di calcolo per il dimensionamento del pilastro $P_{2B}$ .....	411
figura X.417: Predimensionamento della trave $T_4$ .....	399	figura X.454: Calcoli di resistenza all'instabilità per l'asse y-y e per l'asse z-z di un HEB 220 per il pilastro $P_2$ .....	411
figura X.418: Carichi sulla Trave $T_5$ .....	400	figura X.455: Tabella dei carichi sul pilastro $P_2$ .....	412
figura X.419: Schema strutturale della trave $T_5$ .....	400	figura X.456: Valori.....	412
figura X.420: Sistema strutturale da risolvere.....	400	figura X.457: Calcoli di resistenza all'instabilità per l'asse y-y e per l'asse z-z di un HEB 240 per il pilastro $P_2$ .....	412
figura X.421: Taglio nel caso 0-0-0.....	401	figura X.458: Tabella dei carichi sul pilastro $P_2$ .....	413
figura X.422: Taglio nel caso 0-0-1.....	401	figura X.459: Valori.....	413
figura X.423: Taglio nel caso 0-1-0.....	401	figura X.460: Calcoli di resistenza all'instabilità per l'asse y-y e per l'asse z-z di un HEB 240 per il pilastro $P_2$ .....	413
figura X.424: Taglio nel caso 0-1-1.....	401	figura X.461: Classificazione dell'abete, secondo UNI 11035.....	414
figura X.425: Taglio nel caso 1-0-0.....	401	figura X.462: Tabella dei coefficienti di sicurezza parziali per le proprietà dei materiali.....	415
figura X.426: Taglio nel caso 1-0-1.....	401	figura X.463: Tabella dei valori di $k_{mod}$ per i prodotti strutturali a base di legno.....	415
figura X.427: Taglio nel caso 1-1-0.....	401	figura X.464: Classi di durata del carico.....	415
figura X.428: Taglio nel caso 1-1-1.....	401	figura X.465: Valore $X_d$ delle proprietà di resistenza dell'abete S2.....	415
figura X.429: Momento nel caso 0-0-0.....	402	figura X.466: Caratteristiche geometriche della trave $T_{L1}$ .....	417
figura X.430: Momento nel caso 0-0-1.....	402	figura X.467: Carichi sulla Trave $T_{L1}$ .....	417
figura X.431: Momento nel caso 0-1-0.....	402	figura X.468: Valore dei carichi sulla trave $T_{L1}$ .....	417
figura X.432: Momento nel caso 0-1-1.....	402	figura X.469: Valori limiti massimi consigliati per l'abbassamento verticale, secondo la norma [clausola 7.2.1(1)B in NF EN 1993-1-1/NA:2007].....	417
figura X.433: Momento nel caso 1-0-0.....	402		
figura X.434: Momento nel caso 1-0-1.....	402		
figura X.435: Momento nel caso 1-1-0.....	402		
figura X.436: Momento nel caso 1-1-1.....	402		
figura X.437: Predimensionamento della trave $T_4$ .....	403		
figura X.438: Carichi sulla Trave $T_6$ .....	404		
figura X.439: Definizione dei nodi della struttura.....	404		
figura X.440: Scelta dei collegamenti fra i diversi elementi della struttura.....	404		

figura X.470: Caratteristiche geometriche della trave $T_{L2}$ .....	419
figura X.471: Carichi lineari sulla Trave $T_{L2}$ .....	419
figura X.472: Carichi puntuali dovuti alla trave $T_{L1}$ sulla Trave $T_{L2}$ .....	419
figura X.473: Valore dei carichi puntuali dovuti alla trave $T_{L1}$ .....	419
figura X.474: Valore dei carichi sulla trave $T_{L1}$ .....	419
figura X.475: Valori limiti massimi consigliati per l'abbassamento verticale, secondo la norma [clausola 7.2.1(1)B in NF EN 1993-1-1/NA:2007].....	419
figura X.476: Carichi sulla Trave $T_{L2}$ .....	420
figura X.477: Valore dei carichi puntuali dovuti alla trave $T_{L1}$ .....	420
figura X.478: Valore dei carichi lineari sulla trave $T_{L2}$ .....	420
figura X.479: Caratteristiche geometriche della trave $T_{L1}$ .....	422
figura X.480: Carichi sulla Trave $T_{L1}$ .....	422
figura X.481: Valore dei carichi sulla trave $T_{L3}$ .....	422
figura X.482: Valori limiti massimi consigliati per l'abbassamento verticale, secondo la norma [clausola 7.2.1(1)B in NF EN 1993-1-1/NA:2007].....	422
figura X.483: Caratteristiche geometriche della trave $T_{L2}$ .....	424
figura X.484: Carichi sulla Trave $T_{L2}$ .....	424
figura X.485: Valore dei carichi puntuali dovuti alla trave $T_{L1}$ .....	424
figura X.486: Valore dei carichi lineari sulla trave $T_{L2}$ .....	424
figura X.487: Valori limiti massimi consigliati per l'abbassamento verticale, secondo la norma [clausola 7.2.1(1)B in NF EN 1993-1-1/NA:2007].....	424
figura X.488: Tabella dei parametri relativi al pilastro $P_1$ .....	426

## XI. PROGETTO ILLUMINOTECNICO

figura XI.489: Esigenze di illuminamento medio.....	457
figura XI.490: $FLD_m$ minimo.....	457
figura XI.491: Aula 14, $FLD$ ( $FLD_m=3,37\%$ ).....	459
figura XI.492: Aula 14, DA ( $DA=56,42\%$ ).....	459
figura XI.493: Ufficio 6, $FLD$ ( $FLD_m=2,47$ ).....	460
figura XI.494: Ufficio 6, DA ( $DA=28,91$ ).....	460
figura XI.495: Aula 18, $FLD$ ( $FLD_m=5,36\%$ ).....	461
figura XI.496: Aula 18, DA ( $DA=81,30\%$ ).....	462
figura XI.497: Aula 1, $FLD$ ( $FLD_m=2,88$ ).....	462
figura XI.498: Aula 1, DA ( $DA=58,98$ ).....	463
figura XI.499: Ingresso, DA.....	463
figura XI.500: Tabella riassuntiva delle caratteristiche illuminotecniche del progetto.....	465
figura XI.501: Aula 14, luminanza.....	466
figura XI.502: Aula 14, livelli di luminanza.....	466

figura XI.503: Illuminamento nella serra (giugno, alle 14).....	468
---	-----

## XII. PROGETTO IMPIANTISTICO

figura XII.504: Risorse geotermiche nella Lombardia [Fonte: Regione Lombardia].....	472
figura XII.505: Principio di funzionamento invernale.....	473
figura XII.506: Principio di funzionamento estivale.....	474
figura XII.507: Fabbisogno di energia per l'acqua calda sanitaria.....	475
figura XII.508: Consumo elettrico per l'illuminazione.....	477
figura XII.509: Ricambio d'aria minimo per ora [Fonte: DM del 18/12/1975].....	478
figura XII.510: Energia elettrica per la ventilazione.....	478
figura XII.511: Consumi elettrico per l'uso domestico.....	478
figura XII.512: Fabbisogno elettrico globale.....	478
figura XII.513: Consumo per il riscaldamento per il 29 gennaio.....	479
figura XII.514: Consumo cumulativo di acqua calda.....	479
figura XII.515: Energia massima disponibile in funzione del tempo [Fonte: www.energieplus-lesite.be].....	479
figura XII.516: Volume cumulato di acqua disponibile.....	480
figura XII.517: Correlazione tra potenza della pompa e volume di stoccaggio.....	480
figura XII.518: Esempio di sistema di ventilazione [Fonte: <i>Exhausto</i> ].....	481
figura XII.519: Aggancio dei pannelli fotovoltaici su sistema Kalzip [Fonte: KalzipSolarSystems].....	481
figura XII.520: Pannelli fotovoltaici semitrasparenti [Fonte: talev.fr].....	481
figura XII.521: Tubi sotto vuoto [Fonte: Viessman, vitosol 200-T].....	482
figura XII.522: Spazio disponibile per gli impianti solari di produzione di energia.....	483
figura XII.523: Produzione dei collettori solari in kWh durante l'anno in funzione dell'inclinazione.....	484
figura XII.524: Produzione dei pannelli fotovoltaici in funzione dell'orientamento.....	484
figura XII.525: Rendimento del impianto di riscaldamento e di acqua calda sanitaria.....	485
figura XII.526: Produzione di acqua calda per il riscaldamento e l'ACS.....	486
figura XII.527: Produzione di acqua calda di tutti i collettori durante un anno.....	486
figura XII.528: Valutazione dell'energia prodotta dai tubi sotto vuoto utilizzata e dell'energia sprecata.....	486
figura XII.529: Calcolo dell'energia finale.....	487
figura XII.530: Consumo di energia primaria.....	487

figura XII.531: Redditività economica dei pannelli fotovoltaici e dei tubi sotto vuoto.....	488
figura XII.532: Redditività energetica per 1 m <sup>2</sup> dei tubi sotto vuoto e dei pannelli fotovoltaici.....	489
figura XII.533: Redditività economica dell'impianto globale di produzione.....	489
figura XII.534: Redditività energetica dell'impianto globale di produzione.....	490
figura XII.535: Redditività economica dei pannelli fotovoltaici e dei collettori solari per il progetto.....	490
figura XII.536: Redditività energetica dei pannelli fotovoltaici e dei collettori solari per il progetto.....	490
figura XII.537: Bilancio energetico dell'edificio.....	491
figura XII.538: Ripartizione del consumo di energia primaria (in kWh/m <sup>2</sup> an).....	491
figura XII.539: Schema riassuntivo dei consumi.....	492

# INDICE DELLE TABELLE

Tavola 1	Localizzazione.....	37	Tavola 39	Chiusura orizzontale CO1.....	323
Tavola 2	Pieni Vuoti.....	39	Tavola 40	Chiusura orizzontale CO2.....	325
Tavola 3	Uso del suolo [Fonte: Provincia di Sondrio].....	41	Tavola 41	Chiusura orizzontale CO4.....	327
Tavola 4	Ripartizione delle scuole professionale.....	45	Tavola 42	Chiusura orizzontale CO5.....	329
Tavola 5	Accessibilità al livello provinciale.....	49	Tavola 43	Chiusura orizzontale CO6.....	331
Tavola 6	Accessibilità al livello comunale.....	51	Tavola 44	Partizione verticale PV1.....	333
Tavola 7	Architettura locale.....	55	Tavola 45	Partizione orizzontale PO1.....	335
Tavola 8	Ambiti estrattivi e segherie [Fonte: geoportale.provinviadisondrio.gov.net].....	57	Tavola 46	Partizione orizzontale PO2.....	337
Tavola 9	ForzE - Debolezze - Opportunità - Minacce.....	79	Tavola 47	Partizione orizzontale PO3.....	339
Tavola 10	Stato di fatto - Masterplan.....	81	Tavola 48	Sezione tecnologica AA'.....	341
Tavola 11	Stato di fatto - Pianta Piano interrato.....	83	Tavola 49	Sezione tecnologica BB'.....	343
Tavola 12	Stato di fatto - Pianta Piano terra.....	85	Tavola 50	Pianta tecnologica aula 10.....	345
Tavola 13	Stato di fatto - Pianta Primo piano.....	87	Tavola 51	Dettagli tecnologici 1 e 2.....	347
Tavola 14	Stato di fatto - Pianta Copertura.....	89	Tavola 52	Dettaglio tecnologico 3.....	349
Tavola 15	Stato di fatto - Sezioni.....	91	Tavola 53	Dettagli tecnologici 4 e 16.....	351
Tavola 16	Stato di fatto - Prospetti.....	93	Tavola 54	Dettagli tecnologici 5 e 6.....	353
Tavola 17	Stato di fatto - Struttura - Pianta Piano seminterrato.....	95	Tavola 55	Dettaglio tecnologico 7.....	355
Tavola 18	Stato di fatto - Struttura - Pianta piano Terra.....	97	Tavola 56	Dettaglio tecnologico 8.....	357
Tavola 19	Stato di fatto - Struttura - Pianta Primo piano.....	99	Tavola 57	Dettagli tecnologici 9 e 10.....	359
Tavola 20	Schema funzionale.....	107	Tavola 58	Dettaglio tecnologico 11.....	361
Tavola 21	Masterplan.....	257	Tavola 59	Dettaglio tecnologico 12.....	363
Tavola 22	Pianta Piano seminterrato.....	259	Tavola 60	Dettaglio tecnologico 13.....	365
Tavola 23	Pianta Piano terra.....	261	Tavola 61	Dettaglio tecnologico 14.....	367
Tavola 24	Pianta Primo piano.....	263	Tavola 62	Dettaglio tecnologico 15.....	369
Tavola 25	Pianta Secondo piano.....	265	Tavola 63	Dettaglio tecnologico 17.....	371
Tavola 26	Pianta copertura.....	267	Tavola 64	Dettaglio tecnologico 18.....	373
Tavola 27	Sezione AA'.....	269	Tavola 65	Pianta strutturale Fondazioni.....	427
Tavola 28	Sezione BB'.....	271	Tavola 66	Pianta strutturale piano interrato.....	429
Tavola 29	Sezione CC'.....	273	Tavola 67	Pianta strutturale piano Terra.....	431
Tavola 30	Prospetti.....	275	Tavola 68	Pianta strutturale Primo piano.....	433
Tavola 31	Pianta Antincendio del piano Seminterato.....	289	Tavola 69	Pianta strutturale Secondo piano.....	435
Tavola 32	Pianta Antincendio del piano terra.....	291	Tavola 70	Sezioni strutturali AA' e BB'.....	437
Tavola 33	Pianta Antincendio del primo Piano.....	293	Tavola 71	3D Strutturale.....	439
Tavola 34	Pianta Antincendio del Secondo Piano.....	295	Tavola 72	Pianta Gialli/rossi strutturale delle fondazioni.....	441
Tavola 35	Chiusura verticale CV1.....	315	Tavola 73	Pianta Gialli/rossi strutturale del piano seminterrato.....	443
Tavola 36	Chiusura verticale CV2.....	317	Tavola 74	Pianta Gialli/rossi strutturale del piano terra.....	445
Tavola 37	Chiusura verticale CV3.....	319	Tavola 75	Pianta Gialli/rossi strutturale del primo piano.....	447
Tavola 38	Chiusura verticale CV4.....	321	Tavola 76	Pianta Gialli/rossi strutturale del secondo piano.....	449

.....	449
Tavola 77 Sezioni Gialli/rossi strutturale AA' e BB'...	451
Tavola 78 3D Gialli/rossi strutturale.....	453

# BIBLIOGRAFIA

## ► Libri

Claudio ZAPPONE. La serra solare. Sistemi editoriali. 2005

Norbert LANTSCHNER. La Mia Casaclima. raetia. 2009

LE CORBUSIER. Vers une architecture. Flammarion. 1995

Oscar MIRA. Détails de maisons écologiques, Plans, Coupes, Elévations. Le moniteur. 2014

Zaha HADID L'intégrale. Parenthèse. 2009

Giandomenico TONIOLO, Marco DI PRISCO. Cemento armato, Calcolo agli stati limite. Zanichelli 2010

Julius NATTERER, Jean-Luc SANDOZ, Martial REY. Construction en bois, Matériaux, technologies et dimensionnement, Traité de Génie civil de l'Ecole Polytechnique de Lausanne, Volume 13. Presses Polytechniques et Universitaires Romande. 2011

Maurizio PIAZZA, Roberto TOMASI, Roberto MODENA. Strutture in legno, Materiale, calcolo e progetto secondo le nuove normative europee. Hoepli. 2005

Claudio BERNUZZI, Federico M. MAZZOLANI. Edifici in acciaio, Materiale, calcolo e progetto secondo l'Eurocodice EN-1993-1-1. Hoepli. 2007

## ► Articoli Universitari

Dario PRANDO. Global sensitivity analysis of the building energy performance and correlation assessment of the design parameters. University of Padova: faculty of engineering e KTH: department of civil and architectural engineering, 2011

P. Heiselberg, H. Brohus, A. Hesselholt, H. Rasmussen, E. Seinre, S. Thomas. Application of sensitivity analysis in design of sustainable building. AArlgorg University: department of civil engineering

Joseph CLARK, Iannis Xenakis and the Philips Pavilion, Yale University

Tiziana PROIETTI, Dal tracciato al diagramma: La rappresentazione della trasformazione, Università degli Studi di Roma La Sapienza, Dipartimento di Architettura DIAP

Nora PERARNAUD, Au-delà du formalisme, une architecture complexe et contradictoire, -Faculté D'Architecture ULB-2012/2013 Sous la direction de Jean-Didier BERGILEZ et Denis DERYCK

Cecilia ROSTAGNI, Luigi Moretti 1907 1973, Electaarchitet

## ► Rapporti

IPCC, 2014: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Unità Centrale Studi e Strategie. Rapporto energia e ambiente, Scenari e strategie. ENEA. 2013

Michael WETTER. GenOpt Generic Optimization Program User Manual, version 3.1.0. Simulation research group, building technologies Department Environmental Energy Technologies Division, Lawrence Berkeley National Laboratory. 2011

Biblioteca tecnica Knauf. L'acustica con Knauf, Soluzioni tecniche per l'edilizia civile e industriale. Knauf 2014

## ► Prezzari

Prezzi informativi opera edilizi, Dipartimento lavori pubblici, Provincia di Bolzano, 2013

Listino prezzi per l'esecuzione di opere pubbliche e manutenzioni, area territorio direzione centrale tecnica, comune di Milano, 2013

► **Website**

[www.arpalombardia.it](http://www.arpalombardia.it)

[www.enea.it](http://www.enea.it)

[geoportale.provinciasondrio.gov.it](http://geoportale.provinciasondrio.gov.it)

[www.arturotedeschi.com](http://www.arturotedeschi.com)

[www.manicore.com](http://www.manicore.com)

# RINGRAZIAMENTI

Per questa tesi, vorremmo ringraziare particolarmente il nostro relatore: il professore Graziano SALVALAI, ed i nostri correlatori: l'architetto Chiara SALVINI, il professore Gabriele MASERA ed il professore Matteo COLOMBO, e tutti i docenti che abbiamo potuto incontrare durante i nostri studi.

Vorremmo anche ringraziare tutti coloro che abbiamo incontrati nell'ambito del nostro lavoro: Jacques AUNIER, la direttrice del Polo di Formazione Professionale di Sondrio, Lorena BONETTI, i docenti e l'amministrazione della scuola, e il Politec Valtellina.

Ringraziamo Jeanne GAUTIER, Elena SCALZO e Tiziana LO BIANCO per la loro rilettura e tutte le persone che ci hanno sostenuti durante questo lavoro, i nostri amici e le nostre famiglie.