

TERZO CAPITOLO

STRATEGIE TECNOLOGICHE

VI. VERIFICHE ARCHITETTONICHE

Le prime esigenze che un edificio debba rispettare sono sicurezza e accessibilità per gli utenti. In questa parte, valutiamo la conformità del progetto con la norma antincendio francese e la norma per il superramento delle barriere architettoniche.

| | |
|--|------------|
| A. ANTINCENDIO | 279 |
| 1. INTRODUZIONE..... | 279 |
| 2. STRATEGIA DI PREVENZIONE ANTINCENDIO..... | 279 |
| a. <i>Isolamento rispetto agli edifici al contorno</i> | 279 |
| b. <i>Funzionamento per compartimentazione</i> | 279 |
| 3. PROTEZIONE PASSIVA..... | 279 |
| a. <i>Vie di fuga : disimpegno e scale</i> | 279 |
| b. <i>Conformità della larghezza delle scale</i> | 281 |
| c. <i>Spazi di attesa</i> | 281 |
| 4. ACCESSIBILITÀ PER I VIGILI DEL FUOCO..... | 281 |
| a. <i>Facciata accessibile</i> | 281 |
| b. <i>Accesso alla zona</i> | 281 |
| 5. PROTEZIONE ATTIVA..... | 281 |
| a. <i>Estintore portatile</i> | 281 |
| b. <i>Impianti fissi di spegnimento manuale</i> | 281 |
| 6. PIANTE ANTINCENDIO..... | 283 |
| B. ACCESSIBILITÀ | 289 |
| 1. PREMESSA..... | 289 |
| 2. REQUISITI NORMATIVI..... | 289 |

A. ANTINCENDIO

1. INTRODUZIONE

Il nostro progetto segue la normativa antincendio francese per gli edifici pubblici (arrêté du 25 juin 1980 pour les ERP - édifices recevant du public).

Il nostro edificio risulta, in base alla normativa suddetta, di tipo R (edificio d'insegnamento) di seconda categoria (capacità di accoglienza tra 701 e 1500 persone). I diversi requisiti antincendio dipendono da questa classificazione.

La verifica della conformità ai requisiti antincendio sarà effettuata esclusivamente sulla parte Scuola e CIO de progetto. La progettazione degli alloggi non consente una verifica precisa della sua conformità antincendio.

2. STRATEGIA DI PREVENZIONE ANTINCENDIO

a. Isolamento rispetto agli edifici al contorno

Tutti gli edifici del progetto sono isolati dalle costruzioni vicine sia con una distanza di almeno 8 m sia con delle pareti esterne REI60.

b. Funzionamento per compartimentazione

Il progetto è organizzato in compartimenti. Queste zone

devono rispettare le seguenti condizioni:

- presenza di almeno due compartimenti per piano
- superficie massima di un compartimento: 600 m²
- chiusura di ciascun compartimento con delle porte tagliafuoco REI 60 a chiusura automatica
- comportamento al fuoco della struttura principale: R 60
- comportamento al fuoco dei solai : REI 60
- non si richiede un particolare comportamento al fuoco per le pareti interne

Questo funzionamento ci permette di sviluppare con grande libertà la distribuzione degli spazi all'interno dei compartimenti. Le pareti interne sono prive di requisiti di resistenza al fuoco.

Il parcheggio e i locali tecnici presentano un livello di rischio medio: si richiede ai loro compartimenti un comportamento REI 120.

3. PROTEZIONE PASSIVA

a. Vie di fuga : disimpegno e scale

La distanza massima da percorrere fino a una scala protetta risulta, secondo la normativa concernente una scuola, di 30 m. La larghezza delle diverse vie di fuga dipende dall'affollamento massimo del compartimento. I requisiti ed i valori di progetto sono riportati nella tabella seguente.

| Numero | Denominazione del compartimento | Piano | Superficie del compartimento [m ²] | Affollamento superficiale [pers/m ²] | Affollamento [persone] | Categorie della ricettività |
|--------|---------------------------------|-------------|--|--|------------------------|-----------------------------|
| C1 | Principale Ovest_0 | Piano terra | 223,0 m ² | 0,32 pers/m ² | 71 | 51-100 |
| C2 | Principale Ovest_1 | 1° piano | 252,0 m ² | 0,32 pers/m ² | 81 | 100-500 |
| C3 | Principale Ovest_2 | 2° piano | 252,0 m ² | 0,32 pers/m ² | 81 | 100-500 |
| C4 | Principale Centrale_0 | Piano terra | 272,0 m ² | 0,32 pers/m ² | 87 | 51-100 |
| C5 | Principale Centrale_1 | 1° piano | 369,4 m ² | 0,32 pers/m ² | 118 | 100-500 |
| C6 | Principale Centrale_2 | 2° piano | 369,4 m ² | 0,32 pers/m ² | 118 | 100-500 |
| C7 | Principale Est_0 | Piano terra | 214,9 m ² | 0,32 pers/m ² | 69 | 51-100 |
| C8 | Principale Est_1 | 1° piano | 479,8 m ² | 0,32 pers/m ² | 154 | 100-500 |
| C9 | Principale Est_2 | 2° piano | 259,5 m ² | 0,32 pers/m ² | 83 | 51-100 |
| C10 | Pilotis Ovest_1 | 1° piano | 287,3 m ² | 0,32 pers/m ² | 92 | 51-100 |
| C11 | Pilotis Ovest-2 | 2° piano | 164,0 m ² | 0,32 pers/m ² | 52 | 51-100 |
| C12 | Pilotis Est_1 | 1° piano | 368,4 m ² | 0,32 pers/m ² | 118 | 100-500 |
| C13 | Pilotis Est_2 | 2° piano | 210,4 m ² | 0,32 pers/m ² | 67 | 51-100 |
| C14 | CDI_0 | Piano terra | 207,4 m ² | 0,32 pers/m ² | 66 | 51-100 |
| C15 | Segpa_PI_0 | Piano terra | 365,6 m ² | 0,32 pers/m ² | 117 | 100-500 |
| C16 | Segpa_HAS_0 | Piano terra | 354,4 m ² | 0,32 pers/m ² | 113 | 100-500 |
| C17 | Spogliatoi_0 | Piano terra | 283,0 m ² | 0,32 pers/m ² | 91 | 51-100 |
| C18 | Palestra_0 | Piano terra | 408,3 m ² | 0,32 pers/m ² | 131 | 100-500 |
| C19 | Ammin_0 | Piano terra | 202,0 m ² | 0,20 pers/m ² | 40 | 20-50 |
| C20 | Ammin_A_1 | 1° piano | 309,0 m ² | 0,20 pers/m ² | 62 | 51-100 |
| C21 | Ammin_B_1 | 1° piano | 429,0 m ² | 0,20 pers/m ² | 86 | 51-100 |
| C22 | Collège Ouvert_0 | Piano terra | 397,4 m ² | 0,32 pers/m ² | 127 | 100-500 |
| C23 | Mensa_aula_0 | Piano terra | 411,0 m ² | 1,00 pers/m ² | 411 | 100-500 |
| C24 | Mensa_cucina_0 | Piano terra | 261,0 m ² | 0,20 pers/m ² | 52 | 51-100 |
| C25 | Manutenzione_0 | Piano terra | 291,6 m ² | 0,10 pers/m ² | 29 | 20-50 |
| C26 | Medico-Sociale_0 | Piano terra | 162,2 m ² | 0,12 pers/m ² | 19 | 1-19 |
| C27 | CIO_0 | Piano terra | 555,0 m ² | 0,30 pers/m ² | 167 | 100-500 |
| C28 | Alloggi_0 | Piano terra | 146,1 m ² | 0,10 pers/m ² | 15 | 1-19 |
| C29 | AlloggiA_1 | 1° piano | 212,0 m ² | 0,10 pers/m ² | 21 | 1-19 |
| C30 | AlloggiB_1 | 1° piano | 119,0 m ² | 0,10 pers/m ² | 12 | 1-19 |
| C31 | Alloggi_2 | 2° piano | 121,0 m ² | 0,10 pers/m ² | 12 | 1-19 |

Tab. VII-1 Affollamento

| Numero | Denominazione del compartimento | Piano | Vie di fuga richieste dalla regolamentazione antincendio francese | Numero di vie di fuga effettive | Distanza massima fino ad una via fuga |
|--------|---------------------------------|-------------|---|-----------------------------------|---------------------------------------|
| C1 | Principale Ovest_0 | Piano terra | [2 vie di 0,9 m] o [1 via di 1,4 m + 1 via accessoria] | 3 vie di 0,9m | 10,00 m |
| C2 | Principale Ovest_1 | 1° piano | 2 vie di 1,4 m | 2 vie di 1,7m | 22,00 m |
| C3 | Principale Ovest_2 | 2° piano | 2 vie di 1,4 m | 2 vie di 1,7m | 22,00 m |
| C4 | Principale Centrale_0 | Piano terra | "[2 vie di 0,9 m] o [1 via di 1,4 m + 1 via accessoria] | 5 vie di 0,9m | 9,00 m |
| C5 | Principale Centrale_1 | 1° piano | 2 vie di 1,4 m | 2 vie di 1,7m | 27,00 m |
| C6 | Principale Centrale_2 | 2° piano | 2 vie di 1,4 m | 2 vie di 1,7m | 27,00 m |
| C7 | Principale Est_0 | Piano terra | [2 vie di 0,9 m] o [1 via di 1,4 m + 1 via accessoria] | 3 vie di 1,1m | 13,00 m |
| C8 | Principale Est_1 | 1° piano | 2 vie di 1,4 m | 2 vie di 1,7m | 27,00 m |
| C9 | Principale Est_2 | 2° piano | [2 vie di 0,9 m] o [1 via di 1,4 m + 1 via accessoria] | 1 via di 1,7m + una terrazza | 30,00 m |
| C10 | Pilotis Ovest_1 | 1° piano | [2 vie di 0,9 m] o [1 via di 1,4 m + 1 via accessoria] | 2 vie di 1,7m | 23,00 m |
| C11 | Pilotis Ovest-2 | 2° piano | [2 vie di 0,9 m] o [1 via di 1,4 m + 1 via accessoria] | 1 via di 1,7m | 23,00 m |
| C12 | Pilotis Est_1 | 1° piano | 2 vie di 1,4 m | 2 vie di 1,7m | 27,00 m |
| C13 | Pilotis Est_2 | 2° piano | [2 vie di 0,9 m] o [1 via di 1,4 m + 1 via accessoria] | 1 via di 1,7 m + una terrazza | 27,00 m |
| C14 | CDI_0 | Piano terra | [2 vie di 0,9 m] o [1 via di 1,4 m + 1 via accessoria] | 2 vie di 1,5m | 17,00 m |
| C15 | Segpa_PI_0 | Piano terra | 2 vie di 1,4 m | 2 via di 1,5 m | 16,00 m |
| C16 | Segpa_HAS_0 | Piano terra | 2 vie di 1,4 m | 1 via di 1,5 m + 1 via di 1,4m | 23,00 m |
| C17 | Spogliatoi_0 | Piano terra | [2 vie di 0,9 m] o [1 via di 1,4 m + 1 via accessoria] | 1 via 1,5m + 1 via di 1,7m | 18,00 m |
| C18 | Palestra_0 | Piano terra | 2 vie di 1,4 m | | 26,00 m |
| C19 | Ammin_0 | Piano terra | [2 vie di 0,9 m] o [1 via di 1,4 m + 1 via accessoria] | 2 vie di 1,5m | 21,00 m |
| C20 | Ammin_A_1 | 1° piano | [2 vie di 0,9 m] o [1 via di 1,4 m + 1 via accessoria] | 1 via di 1,8m + 1 via di 1,4m | 20,00 m |
| C21 | Ammin_B_1 | 1° piano | [2 vie di 0,9 m] o [1 via di 1,4 m + 1 via accessoria] | 1 via di 1,8m + 1 via di 1,4m | 34,00 m |
| C22 | Collège Ouvert_0 | Piano terra | 2 vie di 1,4 m | 2 vie di 1,5m | 29,00 m |
| C23 | Mensa_aula_0 | Piano terra | 2 vie di 1,4 m | 2 vie di 1,5m | 28,00 m |
| C24 | Mensa_cucina_0 | Piano terra | [2 vie di 0,9 m] o [1 via di 1,4 m + 1 via accessoria] | 2 vie di 1,5m | 17,00 m |
| C25 | Manutenzione_0 | Piano terra | [2 vie di 0,9 m] o [1 via di 1,4 m + 1 via accessoria] | 3 vie di 1,5m | 14,00 m |
| C26 | Medico-Sociale_0 | Piano terra | 1 via di 0,9 m | 1 via di 0,9m | 17,00 m |
| C27 | CIO_0 | Piano terra | 2 vie di 1,4 m | 2 vie di 1,5m | 28,00 m |
| C28 | Alloggi_0 | Piano terra | 1 via di 0,9 m | non progettato | non progettato |
| C29 | AlloggiA_1 | 1° piano | 1 via di 0,9 m | non progettato | non progettato |
| C30 | AlloggiB_1 | 1° piano | 1 via di 0,9 m | non progettato | non progettato |
| C31 | Alloggi_2 | 2° piano | 1 via di 0,9 m | non progettato | non progettato |

Tab. VII-2 Vie di fuga

■ b. Conformità della larghezza delle scale

Le diverse scale protette sono sia all'aperto, sia collocate all'interno di un compartimento REI60. La loro larghezza si basa sul numero di persone che usano questa via per l'evacuazione. La tabella Tab. VII-3 riassume questi requisiti.

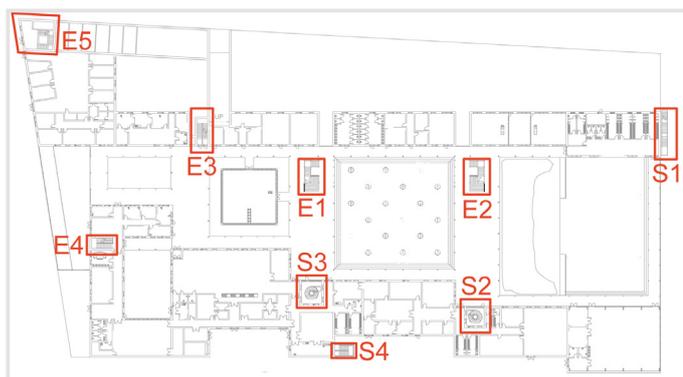


Fig. VII-1 Denominazione delle scale

| Denominazione del compartimento | Affollamento usando il vano scala | larghezza richiesta | larghezza effettiva |
|---------------------------------|-----------------------------------|---------------------|---------------------|
| E1 | 251 | 1,8 m | 1,8 m |
| E2 | 264 | 1,8 m | 1,8 m |
| E3 | 142 | 1,4 m | 1,4 m |
| E4 | 86 | 0,9 m | 1,4 m |
| E5 | - | - | - |
| S1 | 158 | 1,4 m | 1,5 m |
| S2 | 118 | 1,4 m | 1,4 m |
| S3 | 92 | 0,9 m | 1,4 m |
| S4 | - | 1,4 m | 1,4 m |

Tab. VII-3 Conformità della larghezza delle scale

■ c. Spazi di attesa

Gli spazi di attesa protetti permettono di accogliere i soggetti diversamente abili per consentire l'arrivo di aiuti esterni. Si prevedono sei spazi di attesa: quattro sulle piattaforme delle scale all'aperto E1 ed E2, uno sulla piattaforma della scala di sicurezza S1 e uno sulla terrazza relax dell'amministrazione. Gli spazi di attesa possono accogliere fino a 20 sedie.

Questi spazi rispettano i requisiti della normativa antincendio, che consistono di:

- almeno due spazi di attesa protetti per piano
- collocazione di una via di fuga nelle immediate vicinanze
- distanza massima da percorrere fino ad uno spazio di attesa uguale a 30m
- capacità di accoglienza di 14 sedie
- questi spazi non devono ingombrare le vie di fuga

Il compartimento C20 non possiede un spazio di attesa protetto: l'ascensore ivi collocato permette un'evacuazione semplice da parte dei soggetti diversamente abili.

4. ACCESSIBILITÀ PER I VIGILI DEL FUOCO

■ a. Facciata accessibile

Si richiede una facciata accessibile per ogni compartimento per consentire un eventuale intervento di soccorso da parte dei vigili del fuoco. Si prevedono, su tali facciate, delle finestre accessibili apribili sia dall'interno che dall'esterno. Le loro dimensioni (1,3m x 0,9 m) e la loro messa in evidenza implicano un'irregolarità nella griglia della facciata. L'apertura è consentita

automaticamente allo scattare dell'allarme antincendio. Le aperture sono distribuite regolarmente (distanza media mutua uguale a 15m). Ciascuna facciata accessibile è corredata da una zona di spiegamento del materiale di soccorso da parte dei vigili del fuoco.

■ b. Accesso alla zona

L'accesso alla zona di progetto è reso possibile grazie a due vie appositamente dimensionate per i veicoli antincendio (larghezza di 8m) e collocate a Sud e a Nord dell'area di progetto. Tali passaggi permettono l'accesso alle diverse zone di spiegamento del materiale di soccorso.

Si prevede, al fine di raggiungere il polo sportivo, un ulteriore accesso a est del sito.

5. PROTEZIONE ATTIVA

■ a. Estintore portatile

Occorre prevedere l'installazione di estintori portatili per consentire al personale di estinguere i principi di incendio. Tali dispositivi sono distribuiti lungo le vie di fuga in modo da avere al minimo un apparecchio ogni 200m². La distanza massima per raggiungere un estintore è uguale a 30m.

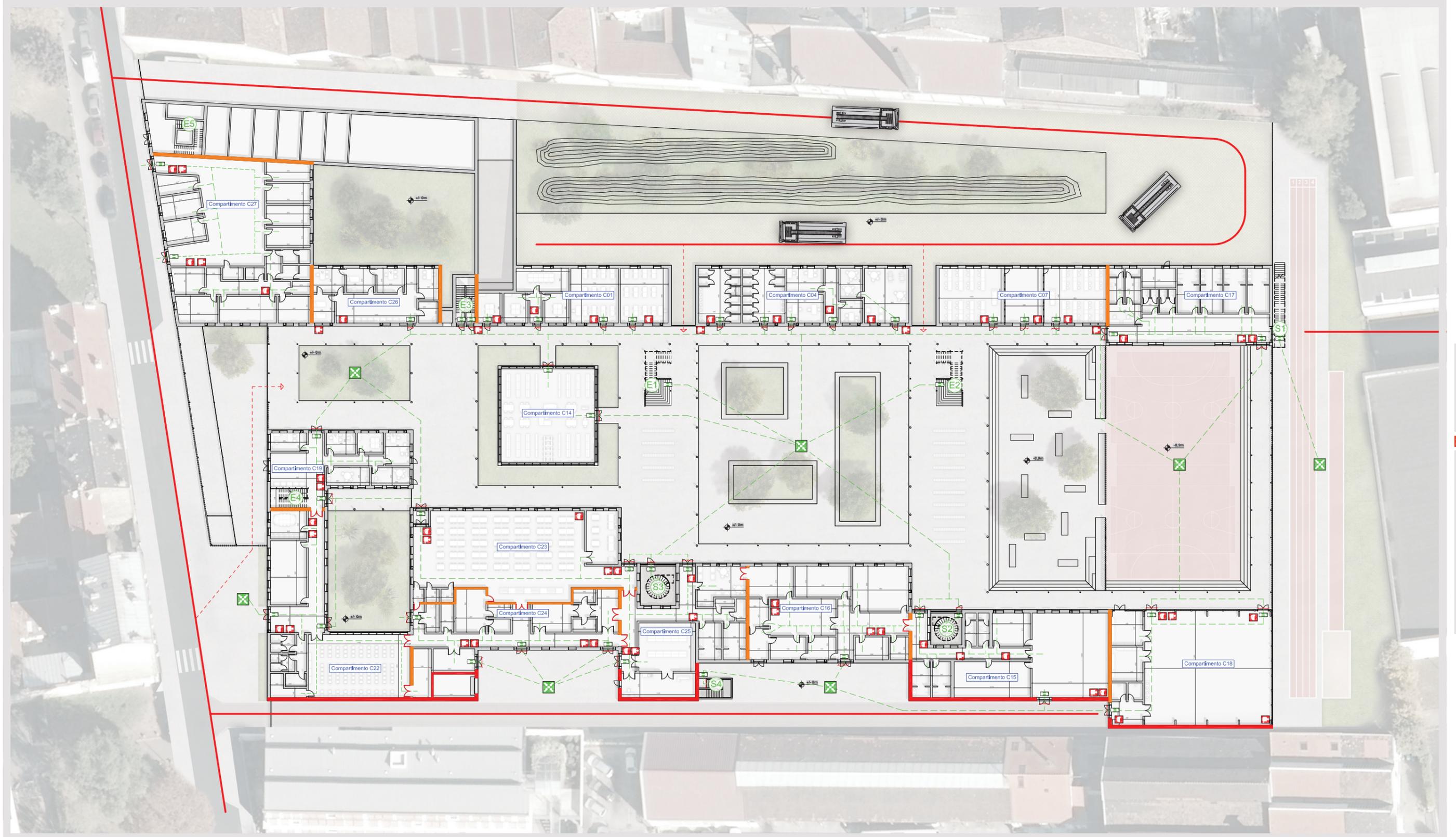
■ b. Impianti fissi di spegnimento manuale

Il numero e la disposizione degli idranti sono da determinare in base alle normative dei vigili del fuoco del comune. Si ipotizza una prima disposizione per ogni piano che consenta di raggiungere, con un getto di lancia, ogni punto della superficie protetta.

6. PIANTE ANTINCENDIO

TAVOLA VII-1

Pianta del piano terra con verifiche antincendio.

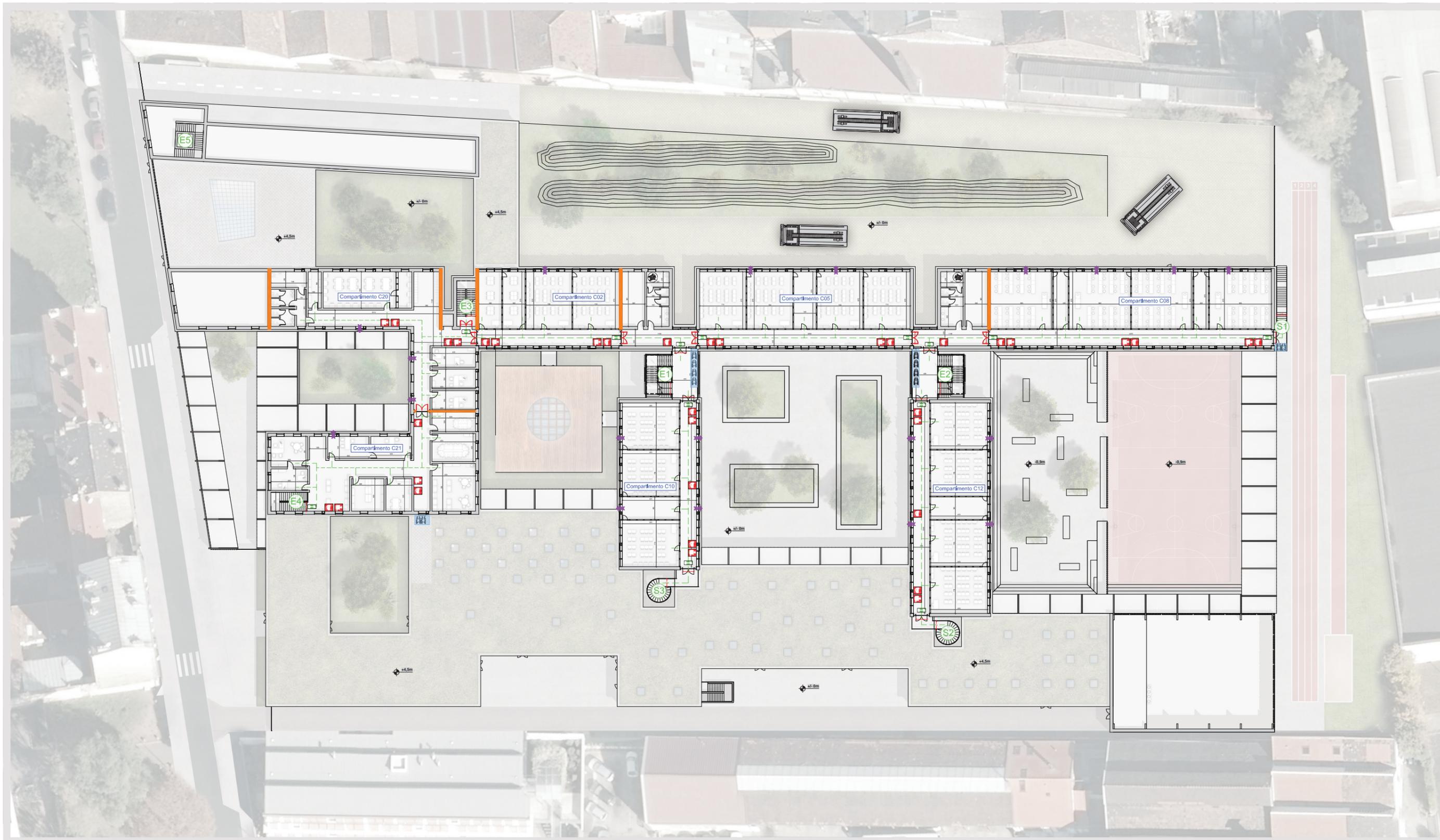


SCALA 10m **NORD** **LEGENDA**

| | | | | | | | | | | | |
|--|---------------------------------------|---------|-----------|--|-------------------------|-------------------|-------------------|--------------------|---|-------------|--|
| Accesso dei cortili per i vigili del fuoco | Via di accesso per i vigili del fuoco | Idrante | Estintore | Finestra accessibile apribile dall'esterno | Zona di attesa protetta | Punto di raccolta | Percorso di esodo | Uscita d'emergenza | Porta taglia-fuoco REI 60 con chiusura automatica | Parete R 60 | Scala protetta (E: ad uso pubblico; S: di sicurezza) |
|--|---------------------------------------|---------|-----------|--|-------------------------|-------------------|-------------------|--------------------|---|-------------|--|

Compartimento C17 Denominazione del compartimento Parete REI 60 per isolamento rispetto agli edifici d'intorni (REI 120 per l'autorimesse del servizio di manutenzione)

PIANO TERRA (+/- 0m)



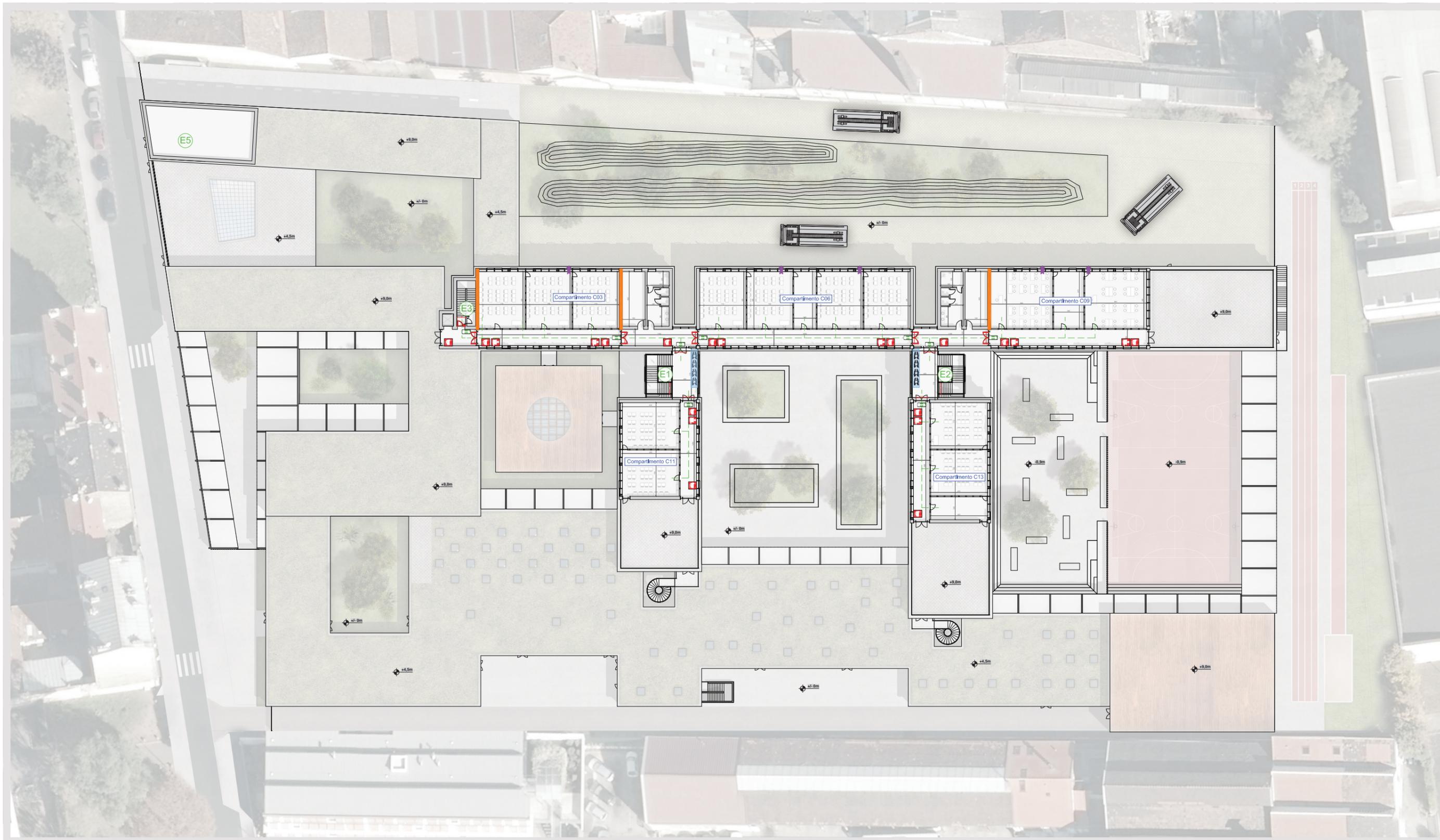
10m SCALA NORD

LEGENDA

- Accesso dei cortili per i vigili del fuoco
- Via di accesso per i vigili del fuoco
- Idrante
- Estintore
- Finestra accessibile apribile dall'esterno
- Zona di attesa protetta
- Punto di raccolta
- Percorso di esodo
- Uscita d'emergenza
- Porta taglia-fuoco REI 60 con chiusura automatica
- Parete R 60
- Scala protetta (E: ad uso pubblico; S: di sicurezza)

PRIMO PIANO (+ 4,5m)

Compartimento C17 Denominazione del compartimento
 Parete REI 60 per isolamento rispetto agli edifici d'intorni (REI 120 per l'autorimesse del servizio di manutenzione)



10m SCALA NORD

LEGENDA

- Accesso dei cortili per i vigili del fuoco
- Via di accesso per i vigili del fuoco
- Idrante
- Estintore
- Finestra accessibile apribile dall'esterno
- Zona di attesa protetta
- Punto di raccolta
- Percorso di esodo
- Uscita d'emergenza
- Porta taglia-fuoco REI 60 con chiusura automatica
- Parete R 60
- Scala protetta (E: ad uso pubblico; S: di sicurezza)

SECONDO PIANO (+ 9m)

Compartmento C17 Denominazione del compartimento
 Parete REI 60 per isolamento rispetto agli edifici d'intorni (REI 120 per l'autorimesse del servizio di manutenzione)

B. ACCESSIBILITÀ

1. PREMESSA

L'accesso all'edificio da parte di ciascun utente, requisito essenziale, deve essere garantito attraverso l'eliminazione delle barriere architettoniche.

Tutti gli utenti della scuola potrebbero incorrere, in qualsiasi momento della loro vita, in difficoltà di movimento, dovute ad esempio ad ingessature temporanee oppure a disturbi senili del personale.

La possibile convivenza, da parte degli studenti, con soggetti diversamente abili costituisce un'esperienza essenziale per il loro percorso di vita.

2. REQUISITI NORMATIVI

La normativa relativa all'eliminazione delle barriere architettoniche presa in considerazione è quella italiana (Decreto Ministeriale n. 236 del 14 giugno 1989), riassunta nella tabella seguente:

| Requisiti normativi | Conformità del progetto |
|---|---|
| 8.1.1. Porte | |
| <ul style="list-style-type: none">• La luce netta minima delle porte d'accesso all'edificio è di 80cm.• La luce netta delle altre porte deve essere di almeno 75 cm.• L'altezza delle maniglie deve essere compresa tra 85 e 95 cm (consigliata 90 cm). | <ul style="list-style-type: none">• Le dimensioni delle porte sono di 0,9m x 2,0m. |
| 8.1.6. Servizi igienici | |
| <ul style="list-style-type: none">• Devono essere rispettati i seguenti minimi dimensionali:<ul style="list-style-type: none">- 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 frontale della sedia a ruote al lavabo deve essere minimo di 80 cm misurati dal bordo anteriore del lavabo. | <ul style="list-style-type: none">• Dei bagni accessibili sono distribuiti ad ogni piano :<ul style="list-style-type: none">- al piano terra : un bagno nel servizio spazio medico-sociale (3m x 3,25m) ed un bagno nella zona collège aperto (2m x 3,5m).- Al primo piano : due bagni nel polo d'insegnamento generale (2,35m x 3,45m) ed un bagno nella zona amministrativa (2,4m x 5,5m)- Al secondo piano : due bagni nel polo d'insegnamento generale (2,35m x 3,45m)• La larghezza dei corridoi di accesso ai bagni è di 1,5m. |
| 8.1.9. Corridoi | |
| <ul style="list-style-type: none">• La larghezza minima è di 100cm. Prevedere un allargamento ogni 10m per l'inversione di marcia della sedia a ruote. | <ul style="list-style-type: none">• I corridoi principali al primo e secondo piano hanno una larghezza di 2,5m.• Gli altri corridoi hanno una larghezza minima di 1,8 m. |
| 8.1.10. Scale | |
| <ul style="list-style-type: none">• Le scale ad uso pubblico devono avere una larghezza minima di 120cm (pedata 30cm). In altri casi, la larghezza minima è di 80cm (pedata 25cm). | <ul style="list-style-type: none">• Larghezza delle scale ad uso pubblico :<ul style="list-style-type: none">- E1 : 1,8 m- E2 : 1,4 m- E3 : 1,4 m- E4 : 1,4 m• Larghezza delle scale di sicurezza :<ul style="list-style-type: none">- S1 : 1,5 m- S2 : 1,4 m- S3 : 1,4 m- S4 : 1,4 m |
| 8.1.11. Rampe | |
| <ul style="list-style-type: none">• La larghezza minima di una rampa deve essere di 1.50 m per consentire l'incrocio di due persone.• Ogni 10 metri di lunghezza ed in presenza di interruzioni mediante porte, la rampa deve prevedere un ripiano orizzontale di dimensioni minime pari a 1.50x1.50 m, ovvero 1.40x1.70 m in senso trasversale e 1.70 m in senso longitudinale al verso di marcia, oltre l'ingombro di apertura di eventuali porte.• La pendenza delle rampe non deve superare l'8%. | <ul style="list-style-type: none">• Delle rampe sono previste negli diversi cortili per accedere alla zona sport o al cortile con le gradinate.• La pendenza di 8% è rispettata, con una lunghezza di 10m. |

8.1.12. Ascensore

- Negli edifici di nuova edificazione, non residenziali, l'ascensore deve avere le seguenti caratteristiche:
 - cabina di dimensioni minime di 1,40 m di profondità e 1,10 m di larghezza;
 - porta con luce minima di 0,80 m posta sul lato corto;
 - piattaforma minima di distribuzione anteriormente alla porta della cabina di 1,50 x 1,50 m.

- Un ascensore permette di raggiungere ogni livello dell'edificio. Il suo uso è riservato ai professori e agli studenti diversamente abili. L'ascensore risulta facilmente accessibile dal piano terra attraverso il corridoio all'aperto e dal primo e secondo piano attraverso la zona amministrativa, vicino alla zona d'insegnamento generale.
- Le dimensioni dello spazio previsto per l'inserimento dell'ascensore sono di 1,5m x 1,9m.
- La luce della porta ad apertura laterale è di 1,5m.
- Una piattaforma di distribuzione di 1,5m X 2,5m è prevista davanti alle porte.

8.1.14. Autorimesse

- Le autorimesse singole e collettive [...] devono essere servite da ascensori o altri mezzi di sollevamento, che arrivino alla stessa quota di stazionamento delle auto
- Negli edifici aperti al pubblico devono essere previsti, nella misura minima di 1 ogni 50 o frazione di 50, posti auto di larghezza non inferiore a 3.20 m, da riservarsi gratuitamente agli eventuali veicoli al servizio di persone disabili.
- Detti posti auto opportunamente segnalati sono ubicati in prossimità del mezzo di sollevamento ed in posizione tale da cui sia possibile in caso di emergenza raggiungere in breve tempo un "luogo sicuro-statico", o una via di esodo accessibile.

- L'ascensore serve il piano interrato con il parcheggio e i locali tecnici. Il suo accesso è consentito attraverso un atrio di protezione antincendio.
- Si prevedono 55 posti auto, comprendenti due posti riservati collocati vicino all'ascensore.

8.2.1, Percorsi spazi esterni

- Il percorso pedonale deve avere una larghezza minima di 90 cm ed avere, per consentire l'inversione di marcia da parte di una persona su sedia a ruote, allargamenti del percorso, da realizzare almeno in piano, ogni 10 m di sviluppo lineare.
- La pendenza longitudinale non deve superare di norma il 5%; ove ciò non sia possibile, sono ammesse pendenze superiori, purché realizzate in conformità a quanto previsto al punto 8.1.11.

- vedere 8.1.11

Tab. VII-4 Conformità del nostro progetto con i requisiti normativi

VII. PROGETTO COSTRUTTIVO

Senza un accurata progettazione dei suoi elementi costruttivi, un edificio rimarrebbe soltanto un'idea. In questa parte è presentata la strategia tecnologica in termini costruttivi. Per le diverse stratigrafie sono presentate le loro prestazioni sotto la forma di schede descrittive. La loro integrazione nell'intero progetto è stata studiata nello specifico al livello di nodi particolarmente complessi che sono stati risolti e che sono presentati attraverso delle sezioni al 1:20. La parete smontabile, risultato del nostro approccio innovativo, viene presentata con il suo schema di montaggio e i suoi dettagli specifici.

| | |
|---|------------|
| A. PREMESSA | 293 |
| 1. TIPOLOGIA STRUTTURALE | 293 |
| 2. COSTRUZIONE STRATIFICATA A SECCO (S/R) | 293 |
| 3. PARTICOLARI COSTRUTTIVI | 293 |
| B. STRATIGRAFIE E VALUTAZIONI DELLE CAPACITÀ TERMOIGROMETRICHE E ACUSTICHE | 295 |
| 1. INSIEME DELLE STRATIGRAFIE DEL PROGETTO | 295 |
| 2. PROCEDURE DI VALUTAZIONE DELLE PRESTAZIONI DELLE STRATIGRAFIE | 297 |
| a. Prestazioni termiche | 297 |
| b. Prestazioni antincendio | 297 |
| c. Prestazioni igrotermiche | 297 |
| d. Prestazioni acustiche | 297 |
| 3. CHIUSURE VERTICALI | 299 |
| 4. INFISSO ESTERNO VERTICALE | 307 |
| 5. PARTIZIONE VERTICALE INTERNE | 309 |
| 6. CHIUSURE ORIZZONTALE | 311 |
| 7. PARTIZIONE ORIZZONTALE INTERNE | 319 |
| C. SEZIONI E PIANTE TECNOLOGICHE | 321 |
| 1. SEZIONE TECNOLOGICA AA | 321 |
| 2. SEZIONE TECNOLOGICA BB | 323 |
| 3. SEZIONE TECNOLOGICA CC | 325 |
| 4. PIANTA TECNOLOGICA TIPO DI UN AULA | 327 |
| D. DETTAGLI TECNOLOGICI | 329 |
| E. LA PARETE SMONTABILE | 341 |
| 1. SCHEMA DI MONTAGGIO | 341 |
| 2. DETTAGLI TECNOLOGICI | 345 |

1. TIPOLOGIA STRUTTURALE

La tipologia strutturale ritenuta per tutto l'edificio, nonostante la biblioteca e la palestra, è stata quella di un telaio di calcestruzzo armato con soltanto pilastri di bordo, con una luce per le travi non superiore a 6 m. Ma i solai sono costituiti da elementi prefabbricati di calcestruzzo armato precompresso alveolare con una luce di 11,40 m. Questa tipologia strutturale ci consente di avere ad ogni piano delle grandi platee totalmente libere da ogni vincolo strutturale e quindi molto flessibili. La tecnologia del calcestruzzo armato è stata anche ritenuta per la sua grande diffusione nella regione dove si colloca il progetto.

2. COSTRUZIONE STRATIFICATA A SECCO (S/R)

Gli involucri sono di più tipi.

Tutti quelli del piano terra, nonostante la biblioteca e la palestra, sono realizzati su una sotto-struttura lignea o di calcestruzzo armato e con un rivestimento di mattoni pieni.

Mentre per la biblioteca e la palestra sono stati ritenuti degli involucri più particolari perché i requisiti, sia funzionali che architettonici, erano diversi. Ad esempio la biblioteca avrà una struttura indipendente di legno lamellare e una facciata continua lungo i quattro lati con vetri bassa emissività ad alta efficienza energetica.

Mentre per quanto riguarda la palestra, si tratterà anche lì di una struttura di legno lamellare ma con stavolta l'uso di lastre prefabbricate composte da uno strato di fibre di vetro rinforzato traslucido, da uno strato di isolante trasparente in aerogel idrofobico (o "frozen smoke") e finalmente da uno strato in fibre di vetro rinforzato traslucido.

Ai livelli superiori, o è stata mantenuta la stessa tipologia costruttiva che per il piano terra oppure si è fatto uso di una facciata continua con degli tamponamenti sia opachi che trasparenti. Lo spessore dei vari elementi trasparenti è stato valutato a livello acustico affinché si possa mantenere in tutti gli ambienti scolastici un ottimo comfort acustico.

Per quanto riguarda le pareti divisorie interne verticali, tutti gli elementi permanenti sono realizzati con una sotto struttura lignea o di calcestruzzo armato. Siamo stati molto attenti alla durabilità dei materiali in un ambito scolastico con dei bambini da 11 fino a 16 anni. Durante le nostre visite sul campo, ci siamo anche interessati ai fenomeni di degrado che possono esistere all'interno di tale strutture. Graffiti, controsoffitti appesi che hanno ricevuto dei pugni, lastre di cartongesso forate con le forbici, muri con un intonaco interno forati con le chiavi di casa...

Di solito oggi si fa uso per i rivestimenti interni della ceramica perché è durevole e facilmente lavabile. Abbiamo scelto una sotto-struttura lignea con sopra delle lastre di OSB di 25 mm di spessore per la loro durezza ma anche per la facile e veloce manutenzione in caso di necessità. Sopra viene avvitato uno strato di finitura composto da un pannello di fibre di cemento assai duro, resistente alle perforazioni come quelle delle chiavi o delle forbici e sopra una lastra d'acciaio smaltato per facilitare l'affissione di materiale didattico, avvisi, ecc... soltanto con l'uso di magneti (così i chiodi un po' pericolosi sono evitati), la proiezione di materiale visivo e finalmente estendere la superficie di lavagna alla totalità delle pareti.

3. PARTICOLARI COSTRUTTIVI

Al livello delle pareti e delle chiusure orizzontali, al di là della struttura sempre uguale di solette di calcestruzzo armato precompresso alveolare, abbiamo dovuto integrare in uno controsoffitto molto spesso le attrezzature degli impianti. Infatti, il progetto impiantistico e quello tecnologico sono stati svolti alla volta per poter rispondere a tutti i vincoli causati dalla massima flessibilità desiderata per i nostri ambienti interni. Infine è stata ritenuta un controsoffitto con una struttura molto rigida composta da un intelaiatura di travi di legno appeso a un traliccio d'acciaio. Così con le pareti spostabili il controsoffitto nel quale sono fissate è sempre resistente ai sforzi dovuti a degli urti nelle pareti.

Le pareti spostabili sono composte di elementi totalmente riciclabili e riutilizzabili. La parete si smonta, si sposta e si rimonta esattamente con gli stessi elementi. Un'attenzione particolare ci ha permesso di concepire un sistema con vari elementi in un numero minimo che permettono di creare tutte le configurazioni di aule possibili ai nostri vari piani. Un passo per la flessibilità delle pareti di 1,20 metri è stato ritenuto perché coincide con un quadro di circa 1,50 m² che coincide con la superficie dedicata per un posto seduto in un aula.premessa

B. STRATIGRAFIE E VALUTAZIONI DELLE CAPACITÀ TERMOIGROMETRICHE E ACUSTICHE

1. INSIEME DELLE STRATIGRAFIE DEL PROGETTO

| Codice | Denominazione | Scheda |
|---------------------------------------|--|----------------|
| Chiusure verticali | | |
| CV 01 | Facciata con mattoni a vista non portante | Tavola VIII-1 |
| CV 02 | Facciata con mattoni a vista portante | Tavola VIII-2 |
| CV 03 | Facciata con mattoni a vista portante resistente al fuoco | - |
| CV 04 | Facciata continua con profili di legno - parte opaca larga | Tavola VIII-3 |
| CV 04 - VIP | Facciata continua con profili di legno - parte opaca sottile | Tavola VIII-4 |
| CV 06 | Muro contro terra | - |
| CV 07 | Parete esterna della palestra | - |
| Infissi esterni verticali | | |
| IE 01 | Facciata continua con profili di legno - parte vetrata | Tavola VIII-5 |
| Partizioni verticali interne | | |
| PVI 01 | Parete interna portante tra spazio riscaldato e non riscaldato | - |
| PVI 02 | Parete interna resistente al fuoco tra l'ascensore e il vano scala | - |
| PVI 03 | Parete interna verticale intorno i nuclei permanenti | - |
| PVI 04.1 | Parete permanente interna | - |
| PVI 04.2 | Parete permanente interna con struttura a taglio-acustico | - |
| PVI 05 | Parete interna verticale tra due zone funzionali | - |
| PVI 06 | Parete interna verticale tra due zone funzionali e di contraventazione | - |
| PVI 07 | Parete interna verticale spostabile | Tavola VIII-6 |
| Chiusure orizzontali | | |
| CO 01 | Solaio controterra isolato | Tavola VIII-7 |
| CO 02 | Solaio controterra per il garage | - |
| CO 03 | Solaio su spazi aperti | Tavola VIII-8 |
| CO 04 | Copertura praticabile | Tavola VIII-9 |
| CO 05 | Copertura verde estensiva leggera | Tavola VIII-10 |
| CO 06 | Copertura della palestra | - |
| CO 07.1 | Copertura praticabile verde | - |
| CO 07.2 | Copertura praticabile del parcheggio | - |
| CO 07.3 | Copertura carrabile del parcheggio | - |
| CO 08 | Copertura del Centro di Documentazione | - |
| CO 09 | Copertura verde della rampa del garage | - |
| Partizioni orizzontali interne | | |
| POI 01 | Solaio interno | Tavola VIII-11 |
| POI 02 | Solaio interno tra 2 spazi riscaldati | - |
| POI 03 | Solaio interno tra 1 spazio riscaldato e il garage | - |
| Partizioni orizzontali esterne | | |
| POE 01 | Pavimentazione praticabile esterna | - |
| PO3 02 | Passerella tra i blocchi | - |
| PO3 03 | Tettoia sopra i vani scala | - |
| | | |
| | | |
| | | |

Tab. VIII-1 Denominazione delle stratigrafie

2. PROCEDURE DI VALUTAZIONE DELLE PRESTAZIONI DELLE STRATIGRAFIE

a. Prestazioni termiche

► Trasmittanza termica (U)

La trasmissione di calore attraverso l'involucro dell'edificio dovuta al fenomeno di conduzione in regime stazionario è caratterizzata dalla trasmittanza termica (U), o dal suo reciproco la resistenza termica ($R=1/U$). Il valore di U indica la quantità di energia che viene dispersa in un secondo su $1m^2$ di superficie della parete o del solaio con una differenza di 1 grado Kelvin.

Questa caratteristica è stata calcolata per ogni elemento di chiusura secondo la norma UNI 6946 (Resistenza termica e trasmittanza termica - metodo di calcolo).

Il committente indica dei livelli massimi per le trasmittanze dei

| Elemento tecnologico | CO contro terra | CV verso l'esterno | CO verso l'esterno | Chiusure trasparenti |
|--|-----------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| Trasmittanza massima richiesta dal committente ($W/m^2.K$) | 0,14 | 0,18 | 0,14 | 1,1 |

Tab. VIII-2 Requisiti del committente

diversi elementi dell'involucro.

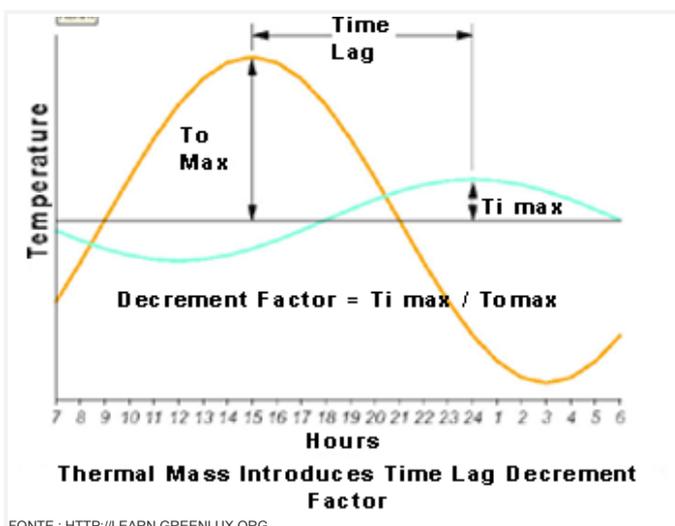
► Guadagno solare

Il comportamento termico degli elementi di chiusura trasparenti sono caratterizzati dalla loro trasmittanza termica (già esplicitata) e dal loro fattore di guadagno solare. Questo fattore esprime il rapporto tra l'energia solare totale irradiata su un elemento e la parte di questa energia che viene trasmessa, attraverso l'elemento, all'interno dell'edificio.

Questo valore è indicato dai produttori dei vari materiali usati all'interno del nostro progetto

► Fattore di attenuazione e sfasamento

Il comportamento termo-dinamico di una parete o di un solaio



Fonte: <http://learn.greenlux.org>

Fig. VIII-1 Fattore di attenuazione e sfasamento

è caratterizzato dalla sua capacità di attenuare le oscillazioni della temperatura ambiente dovuta ai carichi termici interni ed esterni variabili nell'arco del giorno e dalla sua capacità di accumulare il calore e rilasciarlo dopo un certo numero di ore nel tempo. Questo comportamento può essere valutato tramite 2 parametri: il fattore di attenuazione e lo sfasamento.

Il fattore di attenuazione (decrement factor) è il rapporto tra l'ampiezza del flusso termico uscente e quello entrante in un componente edilizio. Un corretto comportamento estivo richiede un fattore di attenuazione inferiore a 0,15.

Lo sfasamento o ritardo (time lag) rappresenta il tempo in cui il picco massimo della temperatura esterna impiega ad attraversare completamente un componente edilizio. Un corretto comportamento estivo richiede uno sfasamento compreso tra 8 e 12 ore.

Questi valori per sono stati calcolati ogni elemento di chiusura secondo la norma ISO 13786 (Thermal performance of building components - Dynamic thermal characteristics - Calculation methods).

b. Prestazioni antincendio

La resistenza al fuoco indica il tempo durante il quale un elemento costruttivo mantiene le sue proprietà fisiche e meccaniche. Le caratteristiche di un elemento si dividono in tre categorie:

- la stabilità meccanica (R)
- la tenuta al fumo (E)
- la tenuta al calore (I)

La regolamentazione antincendio impone un comportamento R60 per la struttura principale e REI 60 per i solai.

Il comportamento è valutato secondo i dati costruttivi indicati dai produttori nelle schede tecniche dei loro prodotti.

c. Prestazioni igrotermiche

Il fenomeno di condensazione all'interno di una parete composta di uno o più strati viene valutato con la metodologia grafica del diagramma di Glaser. Se la valutazione così condotta indica un potenziale fenomeno di condensazione, l'uso di una barriera al vapore annulla questo rischio.

I diversi valori di resistenza al vapore al livello di ogni strato provengono dalla norma UNI 10341 (Materiali da costruzione - Conduttività termica e permeabilità al vapore).

| Condizioni interne | | Condizioni esterne | |
|------------------------------|------|------------------------------|------|
| T interna [°C] | 19°C | T esterna [°C] | -4°C |
| Umidità relativa interna [%] | 50% | Umidità relativa esterna [%] | 90% |

Tab. VIII-3 Condizioni igrotermiche per il mese di gennaio

Le condizioni igrotermiche esterne considerate per i calcoli sono quelle del mese di gennaio.

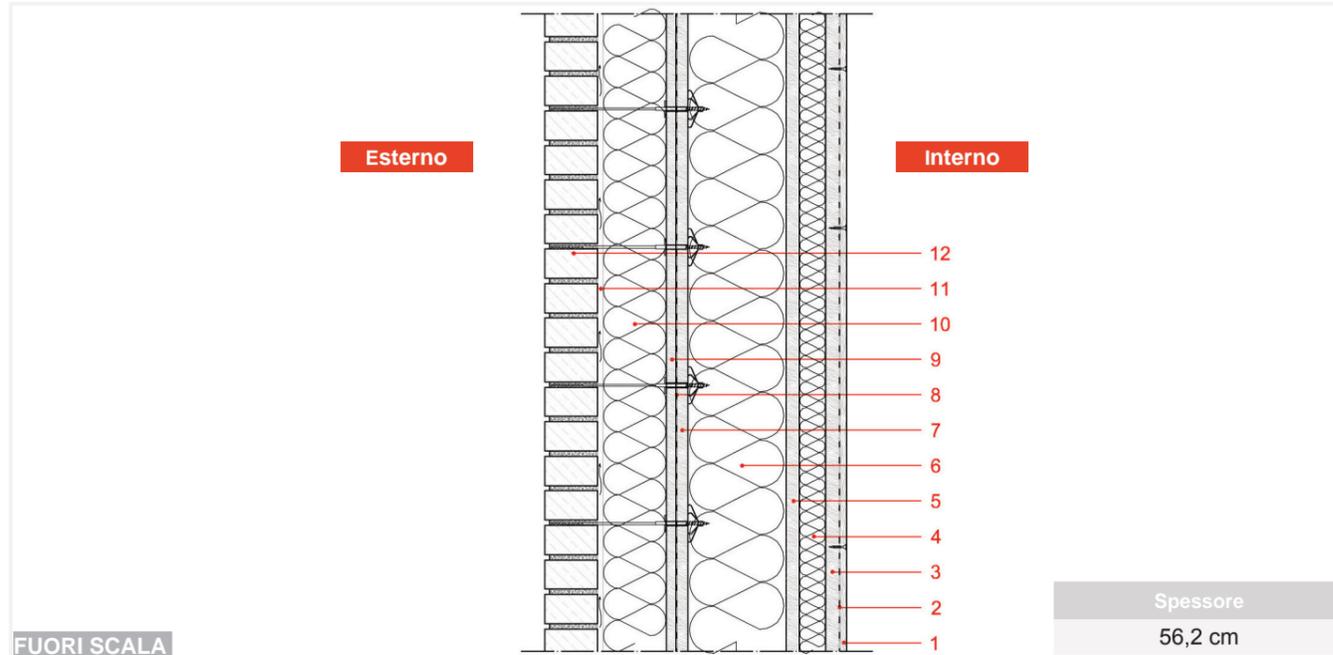
d. Prestazioni acustiche

Abbiamo usato il software Echo 4.0 che permette di stimare le "prestazioni acustiche", quali indice di potere fonoisolante (R_w) e indice di isolamento al calpestio (L_{nw}), di singoli elementi basandosi su algoritmi matematici.

3. CHIUSURE VERTICALI

TAVOLA VIII-1

Chiusura Verticale 01 : Facciata non portante con mattoni a vista e rivestimento interno d'acciaio smaltato.



SEZIONE



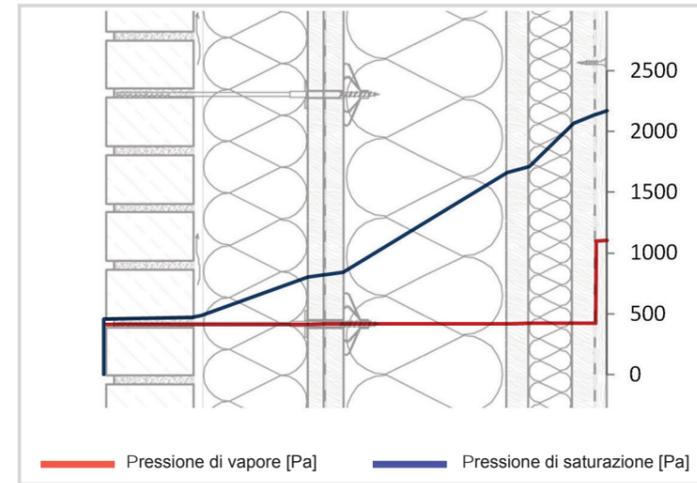
PIANTA

| [cm] | Descrizione degli strati | [cm] | Descrizione degli strati |
|------|--|------|---------------------------------|
| 1 | 1,25 Pannello di particelle legato con cemento rivestito con una lastra di acciaio smaltato (0,5 mm) | 11 | 1,0 Camera d'aria non ventilata |
| 2 | 0,2 Membrana Autoadesiva Barriera Totale a Vapore | 12 | 10,0 Laterizio pieno |
| 3 | 2,5 Pannello di scaglie di legno orientate tipo OSB | | |
| 4 | 5,0 Isolante termico semirigido di fibre di legno | | |
| 5 | 2,5 Pannello di scaglie di legno orientate tipo OSB | | |
| 6 | 18,5 Isolante termico semirigido di fibre di legno | | |
| 7 | 2,0 Pannello di scaglie di legno orientate tipo OSB | | |
| 8 | 0,03 Membrana traspirante impermeabile in poliestere | | |
| 9 | 2,0 Pannello di scaglie di legno orientate tipo OSB | | |
| 10 | 12,0 Isolante termo-acustico morbido di lana li roccia | | |

STRATIFICAZIONE

| Descrizione degli strati | Spessore [cm] | Conduttività termica [W/mK] | Calore specifico [J/kgK] | Densità [kg/m3] | resistenza termica [m2k/w] | Resistenza al vapore μ |
|---|----------------|-----------------------------|--------------------------|-----------------|-------------------------------|----------------------------|
| Strato laminare interno | 2 | - | - | - | 0,13 | - |
| panello di legno compensato di finitura interna | 1,25 | 0,13 | 2100 | 500 | 0,10 | 200 |
| Barriera al vapore : foglio di alluminio rivestito e protetto a sua volta da un foglio di polietilene | 0,031 | 0,33 | 2200 | 403 | 0,00 | 1000000 |
| Lastre in calciosilicato - REI 120 | 2,5 | 0,09 | 2100 | 700 | 0,28 | 5 |
| Isolante termico semirigido di di sughero | 5 | 0,035 | 2000 | 110 | 1,43 | 10 |
| Pannello di scaglie di legno orientate tipo OSB | 2,5 | 0,12 | 1700 | 640 | 0,21 | 40 |
| Isolante termico semirigido leggero di fibre di legno pressate | 18,5 | 0,038 | 2100 | 50 | 4,87 | 5 |
| Pannello di scaglie di legno orientate tipo OSB | 2 | 0,12 | 1700 | 640 | 0,17 | 40 |
| Membrana traspirante impermeabile per facciate | 0,03 | 0,17 | 1300 | 700 | 0,00 | 67 |
| Pannello di scaglie di legno orientate tipo OSB | 2 | 0,12 | 1700 | 640 | 0,17 | 40 |
| Isolante termo-acustico morbido di lana li roccia | 12 | 0,036 | 1480 | 35 | 3,33 | 1,5 |
| camera d'aria | 1 | | | | 0,15 | 1 |
| Mattoni forate | 10 | 0,5 | 840 | 1450 | 0,20 | 10 |
| Strato laminare esterno | 2 | - | - | - | 0,04 | - |
| TOTALE | 56,2 cm | | | | 11,07 m²K/W | |

CARATTERISTICHE



Barriera al vapore necessaria ? **SI**

CONDENSAZIONE : DIAGRAMMA DI GLASER

| Nome | Valore |
|--------------------------------------|--------------------------|
| Resistenza termica totale | 11,07 m ² K/W |
| Trasmittanza | 0,09 W/m ² K |
| Fattore di decremento (attenuazione) | 0,01 |
| Ritardo (sfasamento) | 0,35 h |

CARATTERISTICHE TERMICHE

| Nome | Valore |
|------------------------|--------|
| Comportamento al fuoco | R 60 |

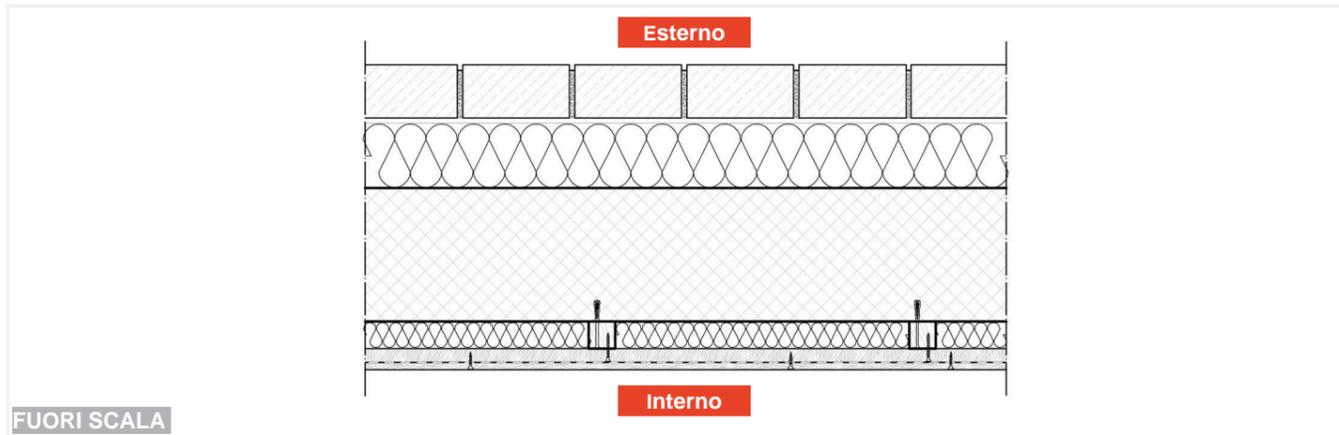
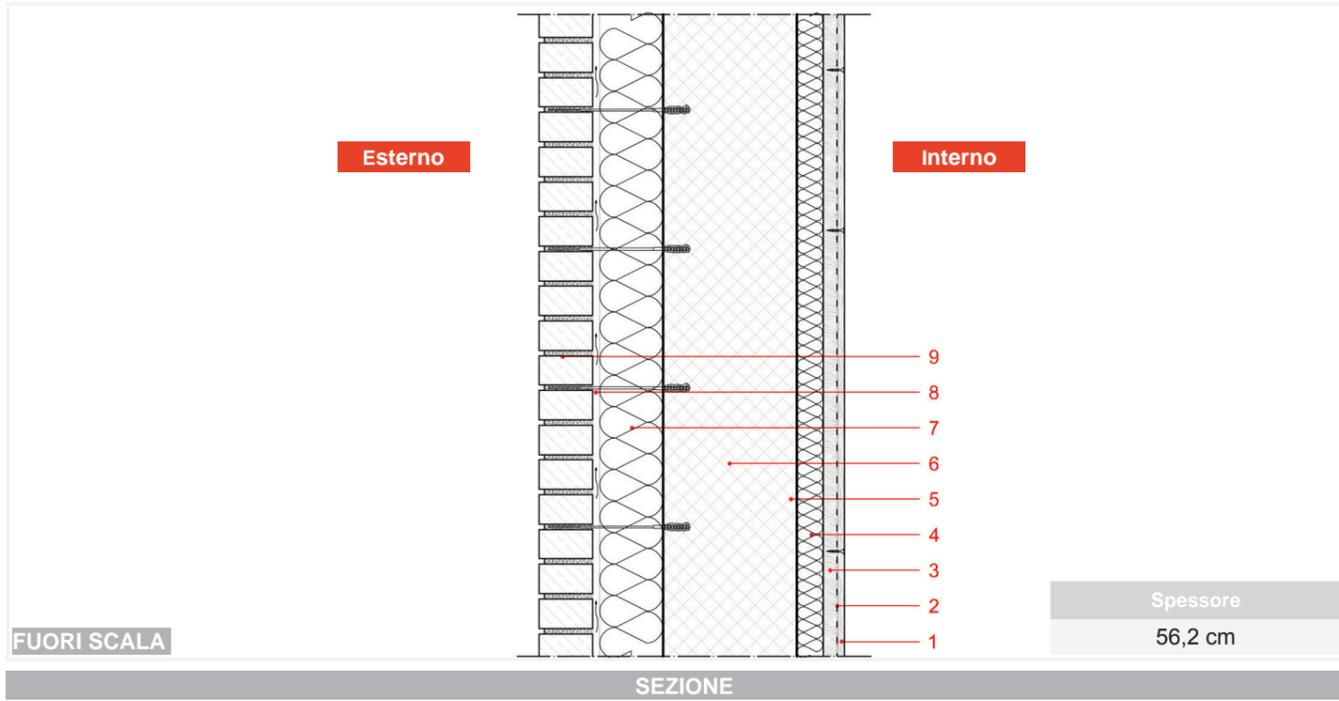
CARATTERISTICHE ANTINCENDIO

| Nome | Valore |
|-------------------------|--------|
| R _w [dB] | 89,88 |
| L _{nw,eq} [dB] | 73,22 |

CARATTERISTICHE ACUSTICHE

TAVOLA VIII-2

Chiusura Verticale 02 : Facciata portante con mattoni a vista e rivestimento interno d'acciaio smaltato.

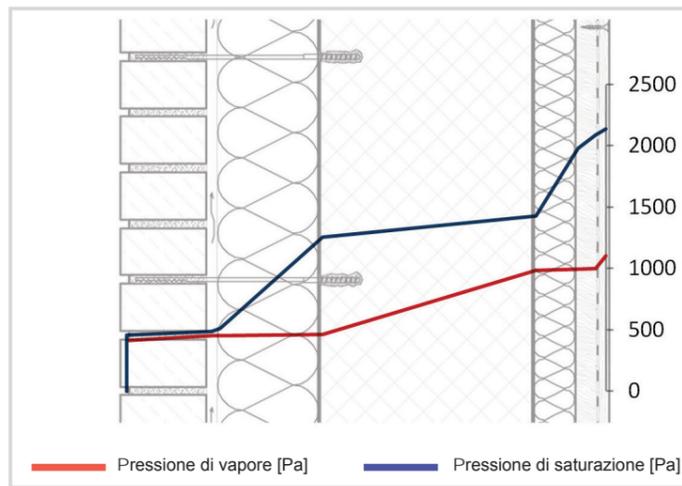


| [cm] | Descrizione degli strati | [cm] | Descrizione degli strati |
|------|--|------|--------------------------|
| 1 | 1,25 Pannello di particelle legato con cemento rivestito con una lastra di acciaio smaltato (0,5 mm) | | |
| 2 | 0,2 Membrana Autoadesiva Barriera Totale a Vapore | | |
| 3 | 2,5 Pannello di scaglie di legno orientate tipo OSB | | |
| 4 | 5, Isolante termico semirigido di fibre di legno | | |
| 5 | 25,0 Calcestruzzo armato strutturale | | |
| 6 | 0,2 Membrana traspirante permeabile in poliestere | | |
| 7 | 12,0 Isolante termico rigido di polistirene estruso | | |
| 8 | 1,0 Camera d'aria non ventilata | | |
| 9 | 10,0 Laterizio pieno | | |

STRATIFICAZIONE

| Descrizione degli strati | Spessore [cm] | Conduktività termica [W/mK] | Calore specifico [J/kgK] | Densità [kg/m3] | resistenza termica [m2k/w] | Resistenza al vapore μ |
|--|----------------|-----------------------------|--------------------------|-----------------|------------------------------|----------------------------|
| Strato laminare interno | 2 | - | - | - | 0,13 | - |
| panello di legno compensato di finitura interna | 1,25 | 0,13 | 2100 | 500 | 0,10 | 200 |
| Lastre in calciosilicato - REI 120 | 2 | 0,09 | 2100 | 700 | 0,22 | 5 |
| Isolante termico semirigido leggero di fibre di legno pressate | 5 | 0,038 | 2100 | 50 | 1,32 | 5 |
| Calcestruzzo armato strutturale con proprietà isolante | 25 | 0,5 | 1000 | 1200 | 0,50 | 50 |
| Isolante termo-acustico morbido di lana li roccia | 0,12 | 0,036 | 1480 | 35 | 3,33 | 1,5 |
| camera d'aria | 1 | - | - | - | 0,15 | 1 |
| Mattone forate | 10 | 0,5 | 840 | 1450 | 0,20 | 10 |
| Strato laminare esterno | 2 | - | - | - | 0,04 | - |
| TOTALE | 56,2 cm | | | | 5,99 m²K/W | |

CARATTERISTICHE



Barriera al vapore necessaria ? NO

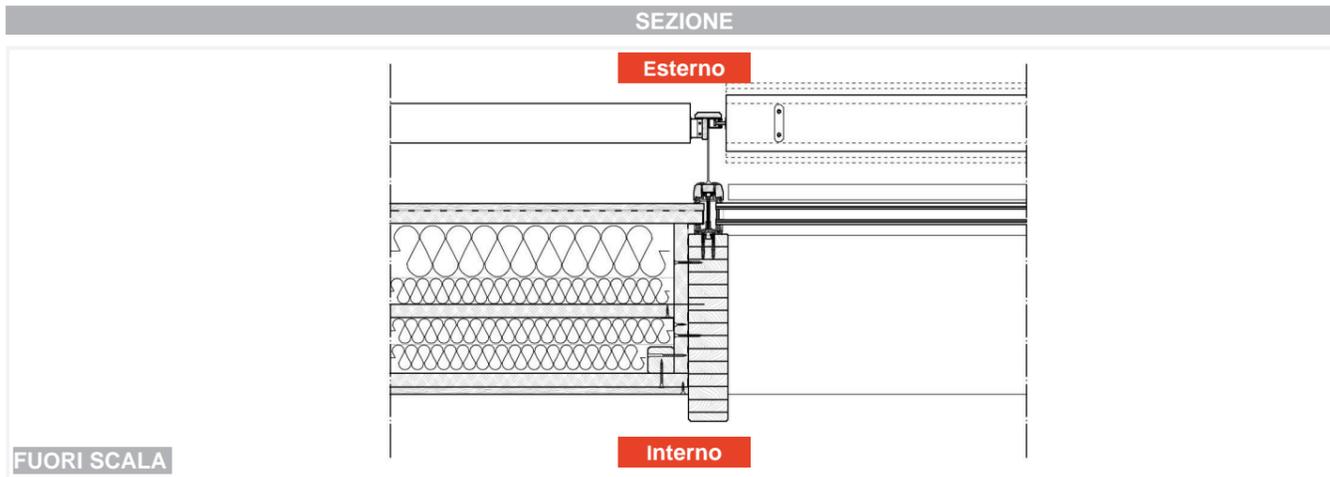
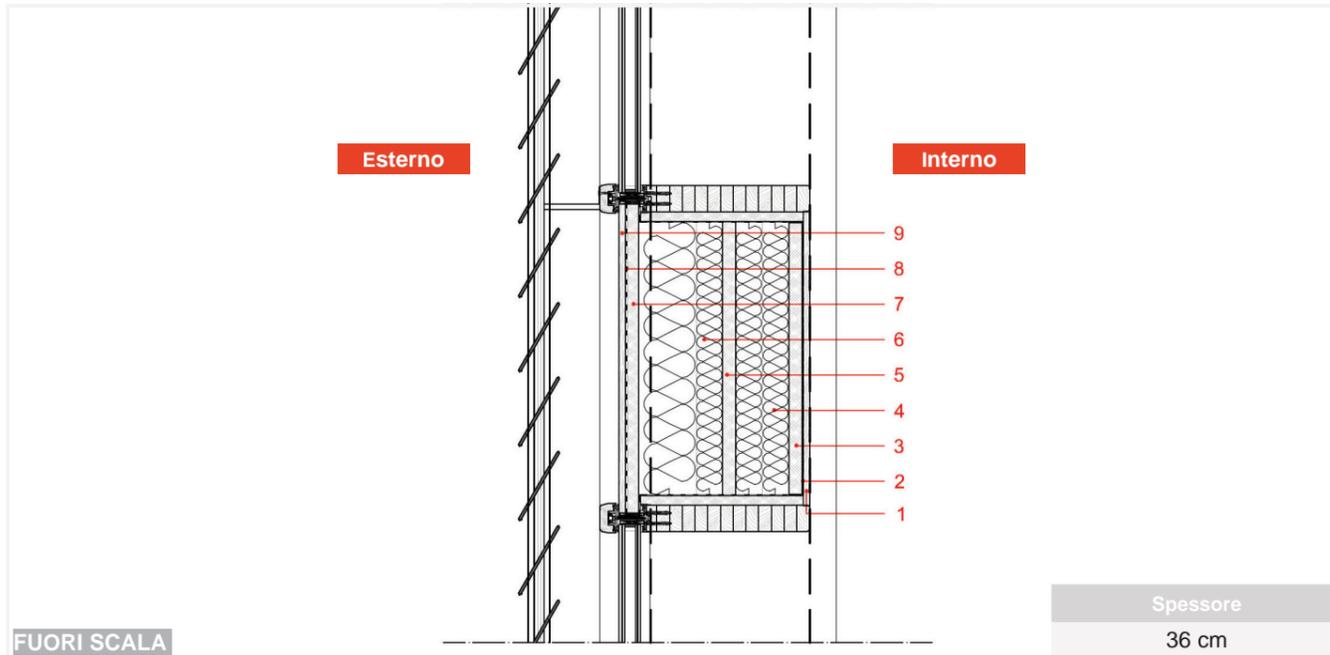
CONDENSAZIONE : DIAGRAMMA DI GLASER

| Nome | Valore |
|--------------------------------------|-------------------------|
| Resistenza termica totale | 5,99 m ² K/W |
| Trasmittanza | 0,17 W/m ² K |
| Fattore di decremento (attenuazione) | 0,014 |
| Ritardo (sfasamento) | 19,6 h |
| CARATTERISTICHE TERMICHE | |
| Nome | Valore |
| Comportamento al fuoco | R 60 |
| CARATTERISTICHE ANTINCENDIO | |
| Nome | Valore |
| R _w [dB] | 65,63 |
| L _{nw,eq} [dB] | 61,68 |

CARATTERISTICHE ACUSTICHE

TAVOLA VIII-3

Chiusura Verticale 04 : Tamponamento opaco spesso per la facciata continua.

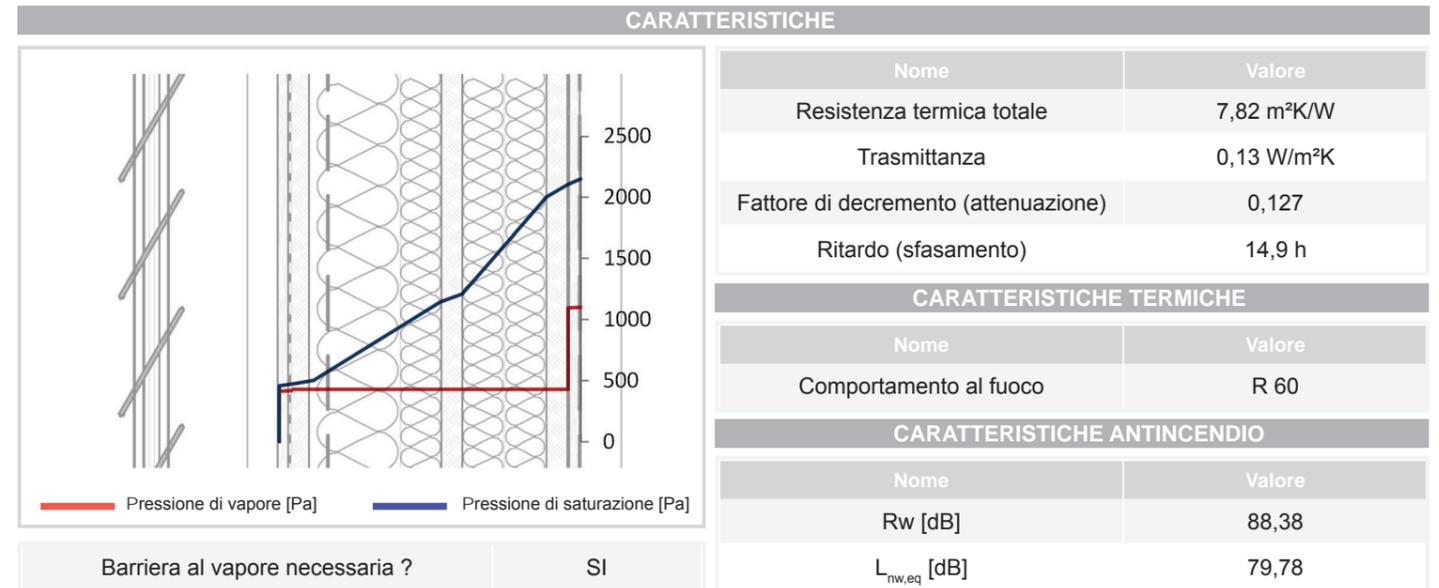


PIANTA

| [cm] | Descrizione degli strati |
|------|--|
| 1 | 1,5 Pannello di legno compensato rivestito con una lastra di acciaio smaltato (0,5 mm) |
| 2 | 0,03 Barriera al vapore : foglio di alluminio |
| 3 | 2,5 Pannello di legnomagnesite |
| 4 | 10 Isolante termico semirigido di fibre di legno presate |
| 5 | 2,5 pannelo di legnomagnesite |
| 6 | 15 Isolante termico semirigido di fibre di legno pressate |
| 7 | 2,5 Pannello di legnomagnesite |
| 8 | 0,03 Membrana traspirante permeabile in poliestere |
| 9 | 1,5 Pannello di legno compensato |

STRATIFICAZIONE

| Descrizione degli strati | Spessore [cm] | Conduttività termica [W/mK] | Calore specifico [J/kgK] | Densità [kg/m3] | resistenza termica [m2k/w] | Resistenza al vapore μ |
|---|---------------|-----------------------------|--------------------------|-----------------|----------------------------|------------------------|
| Strato laminare interno | 2 | - | - | - | 0,13 | - |
| panello di legno compensato di finitura interna | 1,5 | 0,13 | 2100 | 500 | 0,12 | 200 |
| Barriera al vapore : foglio di alluminio rivestito e protetto a sua volta da un foglio di polietilene | 0,03 | 0,33 | 2200 | 403,2 | 0,00 | 1000000 |
| Pannello di legnomagnesite | 2,5 | 0,09 | 2100 | 450 | 0,28 | 5 |
| Isolante termico semirigido leggero di fibre di legno pressate | 10 | 0,038 | 2100 | 50 | 2,63 | 5 |
| Pannello di legnomagnesite | 2,5 | 0,09 | 2100 | 450 | 0,28 | 5 |
| Isolante termico semirigido leggero di fibre di legno pressate | 15 | 0,038 | 2100 | 50 | 3,95 | 5 |
| Pannello di legnomagnesite | 2,5 | 0,09 | 2100 | 450 | 0,28 | 5 |
| Membrana impermeabile all'acqua e al vapore in feltro poliestere laminato | 0,03 | 0,2 | 1300 | 933 | 0,00 | 13000 |
| panello di legno compensato di finitura esterna | 1,5 | 0,13 | 2100 | 500 | 0,12 | 200 |
| Strato laminare esterno | 2 | - | - | - | 0,04 | - |
| TOTALE | 36 cm | | | | 7,82 m²K/W | |

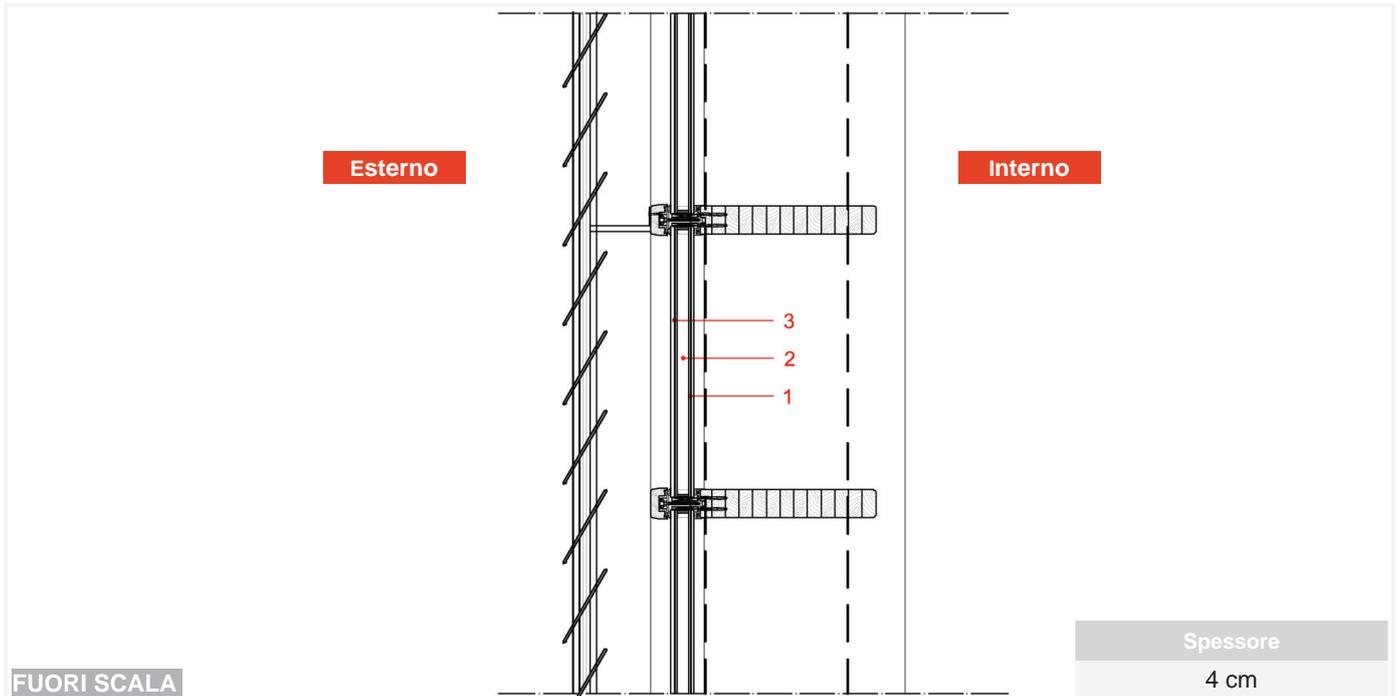


CONDENSAZIONE : DIAGRAMMA DI GLASER

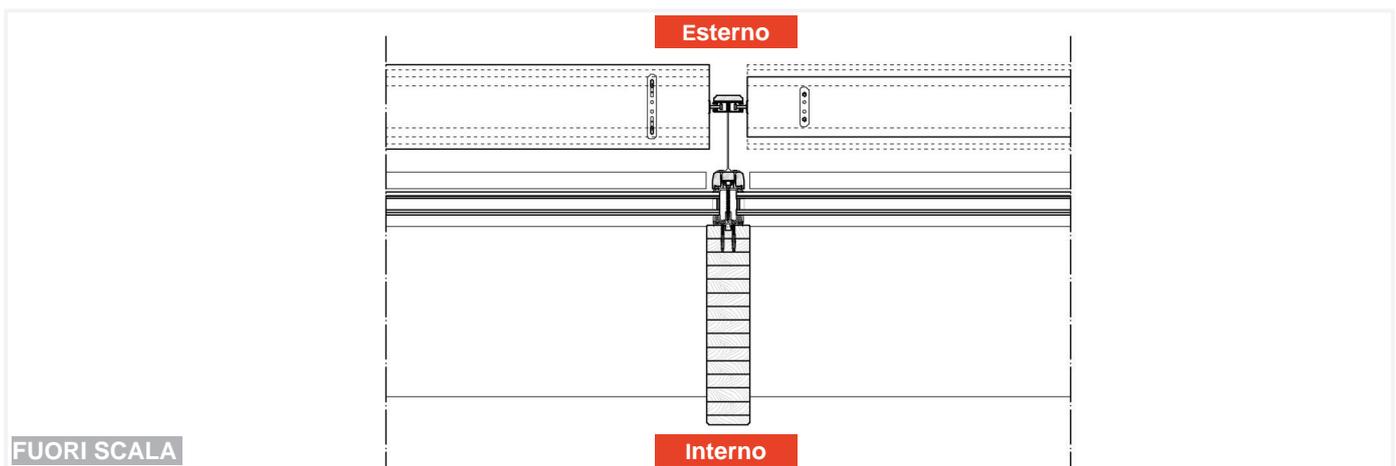
4. INFISSO ESTERNO VERTICALE

TAVOLA VIII-5

Infisso Esterno Verticale 01 : Tamponamento trasparente per la facciata continua.



SEZIONE



PIANTA

| | [cm] | Descrizione degli strati |
|---|------|---|
| 1 | 0,9 | Lastra di vetro stratificato con un film di PVB acustico (0,76 mm) e un trattamento termico superficiale (ossidi metallici) |
| 2 | 2 | Argon (80%) |
| 3 | 1,1 | Lastra di vetro stratificato con un film di PVB acustico (0,76 mm) e un trattamento termico superficiale (ossidi metallici) |

STRATIFICAZIONE

| Nome | Valore |
|-----------------------|--------|
| Guadagni solari (g) | 0,44 |
| Trasmissione luminosa | 67 % |

FATTORI DI TRASMISSIONE

| Nome | Valore |
|--|-------------------------|
| Trasmittanza termica dell'elemento trasparente | 1,1 W/m ² K |
| Trasmittanza termica del telaio | 1,1 W/m ² K |
| Trasmittanza del serramento singolo | 1,26 W/m ² K |

CARATTERISTICHE TERMICHE

| Nome | Valore |
|------------------------|--------|
| Comportamento al fuoco | R 60 |

CARATTERISTICHE ANTINCENDIO

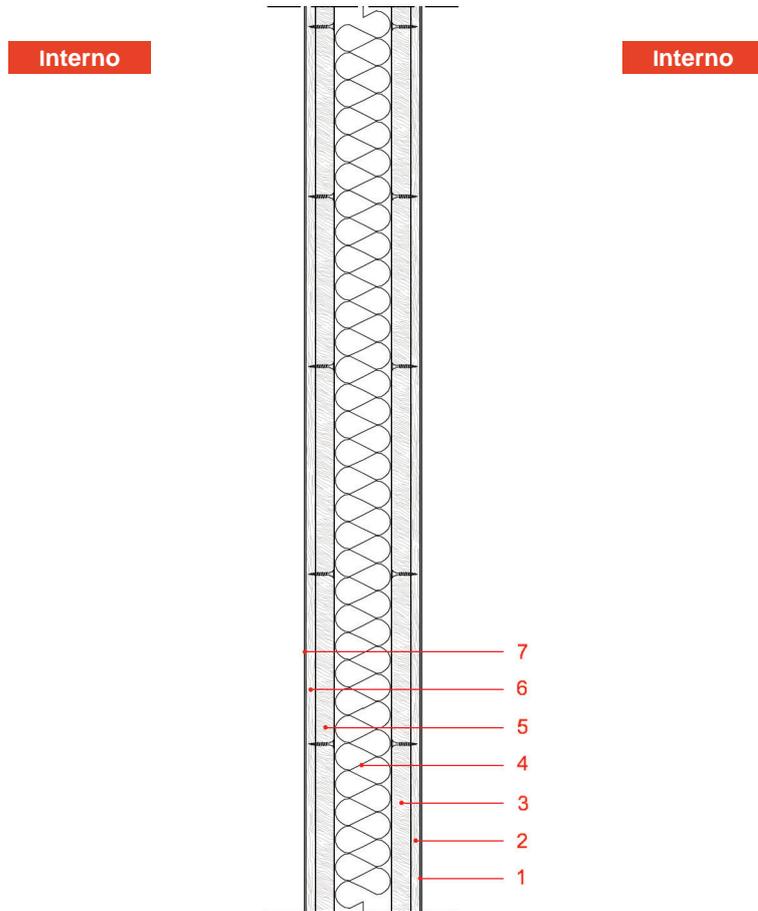
| Nome | Valore |
|-------------------------|--------|
| R _w [dB] | 42 |
| L _{nw,eq} [dB] | - |

CARATTERISTICHE ACUSTICHE

5. PARTIZIONE VERTICALE INTERNE

TAVOLA VIII-6

Partizione Verticale Interna 07 : Parete interna verticale spostabile rivestita su entrambi i lati d'acciaio smaltato



FUORI SCALA

Spessore

15 cm

SEZIONE

| | [cm] | Descrizione degli strati |
|---|------|--|
| 1 | 0,05 | Lastra di acciaio smaltato |
| 2 | 1,25 | "Pannello di particelle legato con cemento |
| 3 | 2,5 | "Pannello di scaglie di legno orientate tipo OSB |
| 4 | 7,5 | "Isolante termico semirigido di fibre di legno |
| 5 | 2,5 | "Pannello di scaglie di legno orientate tipo OSB |
| 6 | 1,25 | "Pannello di particelle legato con cemento |
| 7 | 0,05 | Lastra di acciaio smaltato |

| Nome | Valore |
|--|--------|
| Trasmittanza termica dell'elemento trasparente | - |
| Trasmittanza termica del telaio | - |
| Trasmittanza del serramento singolo | - |

CARATTERISTICHE TERMICHE

| Nome | Valore |
|------------------------|--------|
| Comportamento al fuoco | |

CARATTERISTICHE ANTINCENDIO

| Nome | Valore |
|------------------|--------|
| R_w [dB] | 66,03 |
| $L_{nw,eq}$ [dB] | 94,38 |

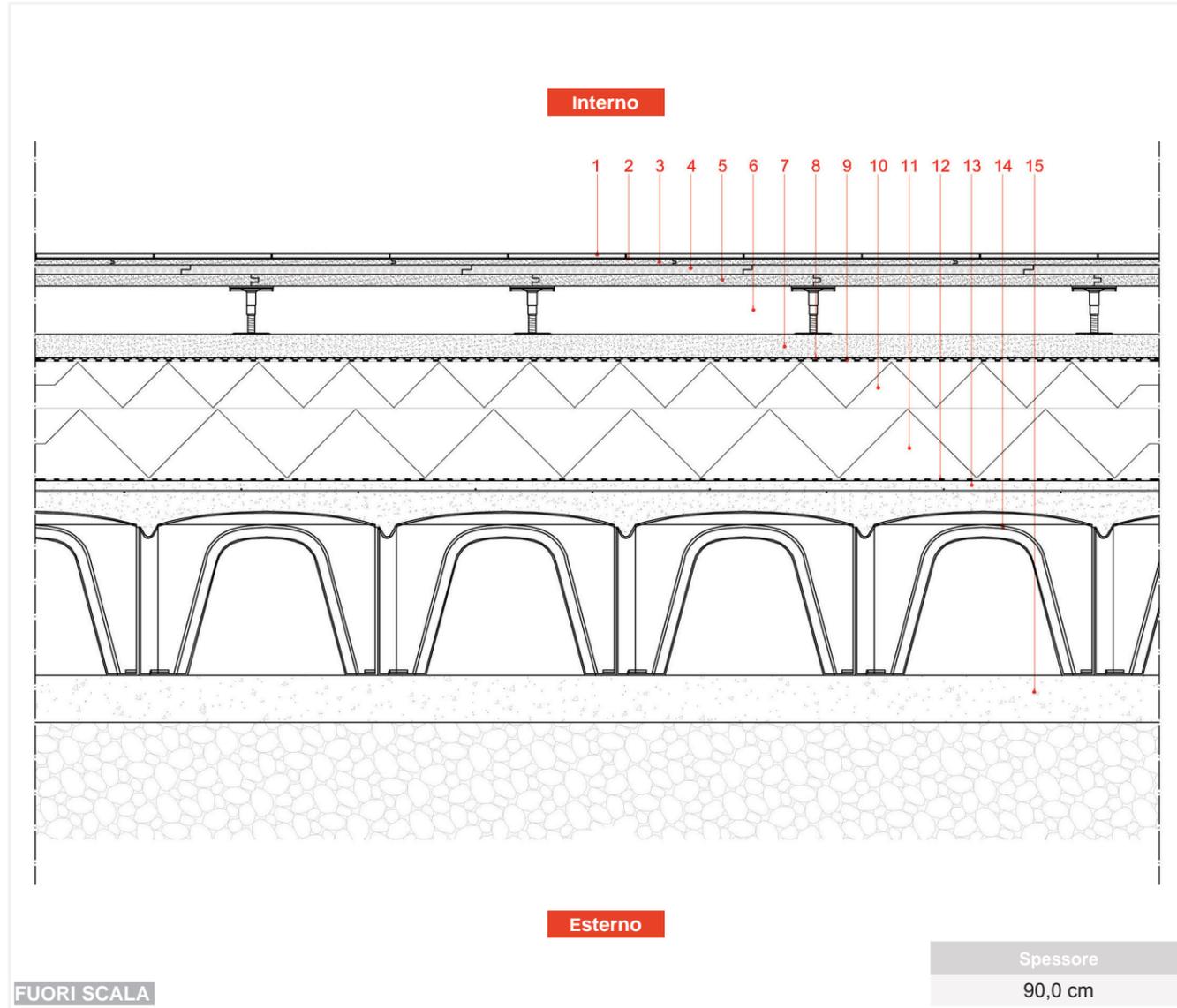
STRATIFICAZIONE

CARATTERISTICHE ACUSTICHE

PARTIZIONE VERTICALE INTERNE - PVI07

6. CHIUSURE ORIZZONTALE
TAVOLA VIII-7

Chiusura Orizzontale 01 : Solaio controterra isolato

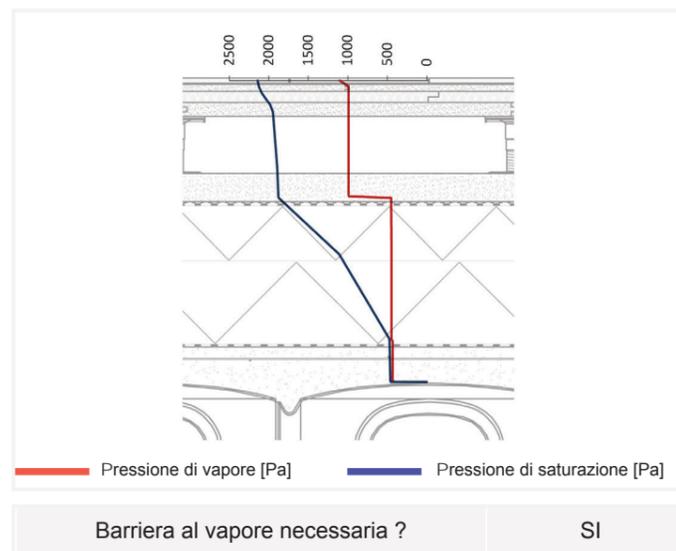


| SEZIONE | |
|---------|---|
| [cm] | Descrizione degli strati |
| 1 | 1,0 Pavimento in PVC flessibile, eterogeneo, rinforzato da una doppia griglia di fibra di vetro |
| 2 | 0,2 Colla |
| 3 | 1,25 Lastra di gesso armato sagomata calpestabile |
| 4 | 2,0 Isolante anticalpestio per pavimenti in fibre di legno |
| 5 | 2,5 Lastra di gesso armato sagomata calpestabile |
| 6 | 9,8 Piedino regolabile |
| 7 | 5,0 Malta di livellamento |
| 8 | 0,4 Feltro in polipropilene per il rinforzo e la protezione |
| 9 | 0,4 Membrana Bituminosa Autoadesiva Barriera Totale a Vapore, Radon e Metano |
| 10 | 10,0 Isolante termico rigido di polistirene estruso |
| 11 | 15,0 Isolante termico rigido di polistirene estruso |
| 12 | 15,0 Membrana Bituminosa Autoadesiva Rinforzata con Tessuto Non Tessuto in Poliestere per solai |
| 13 | 7,0 Getto in calcestruzzo con rete elettrosaldata |
| 14 | 35,0 Cassero da perdere |
| 15 | 10,0 Magrone di calcestruzzo |

STRATIFICAZIONE

| Descrizione degli strati | Spessore [cm] | Conductività termica [W/mK] | Calore specifico [J/kgK] | Densità [kg/m3] | resistenza termica [m2k/w] | Resistenza al vapore μ |
|---|---------------|-----------------------------|--------------------------|-----------------|----------------------------|----------------------------|
| Strato laminare interno | 2 | - | - | - | 0,17 | - |
| Pavimento in PVC flessibile, eterogeneo, rinforzato da una doppia griglia di fibra di vetro | 1 | 0,25 | 1000 | 1680 | 0,04 | 50000 |
| Lastra di gesso armato sagomata calpestabile | 1,25 | 0,12 | 2700 | 420 | 0,10 | 7 |
| Isolante anticalpestio per pavimenti in fibre di legno | 2 | 0,07 | 2100 | 250 | 0,29 | 5 |
| Lastra di gesso armato sagomata calpestabile | 1,25 | 0,12 | 2700 | 420 | 0,10 | 7 |
| camera d'aria | 10 | | | | 0,16 | 1 |
| Malta di livellamento | 10 | 1,4 | 1000 | 375 | 0,07 | 50 |
| Membrana impermeabile all'acqua e al vapore in feltro poliestere laminato | 0,2 | 0,2 | 1300 | 933 | 0,01 | 13000 |
| Membrana Bituminosa Autoadesiva Barriera Totale a Vapore, Radon e Metano | 0,24 | 0,23 | 1000 | 1100 | 0,01 | 1000000 |
| Isolante termico rigido di polistirene estruso (XPS) | 10 | 0,035 | 1680 | 35 | 2,86 | 100 |
| Isolante termico rigido di polistirene estruso (XPS) | 15 | 0,035 | 1680 | 35 | 4,29 | 100 |
| Membrana impermeabile all'acqua e al vapore in feltro poliestere laminato | 0,4 | 0,2 | 1300 | 933 | 0,02 | 13000 |
| Getto in calcestruzzo con rete elettrosaldata | 5 | 0,9 | 1000 | 1200 | 0,06 | 20 |
| Cassero da perdere in PVC | 0,2 | 0,17 | 900 | 1390 | 0,01 | 50000 |
| Strato laminare esterno | 2 | - | - | - | 0,04 | - |
| TOTALE | 90,0cm | | | | 8,23 m²K/W | |

CARATTERISTICHE



Barriera al vapore necessaria ? SI

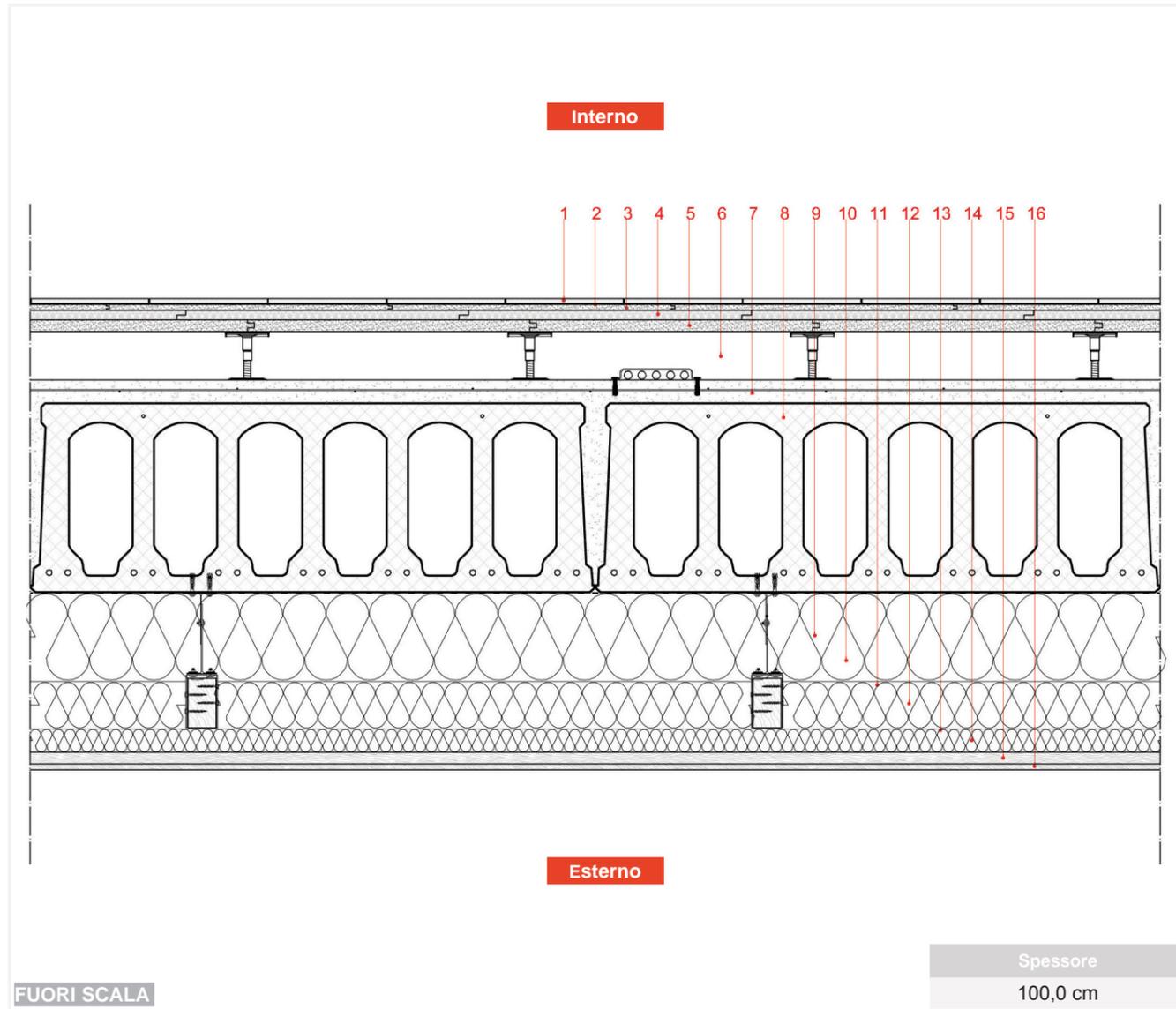
CONDENSAZIONE : DIAGRAMMA DI GLASER

| Nome | Valore |
|--------------------------------------|------------|
| Resistenza termica totale | 8,23 m²K/W |
| Trasmittanza | 0,12 W/m²K |
| Fattore di decremento (attenuazione) | 0,179 |
| Ritardo (sfasamento) | 7,3 h |
| CARATTERISTICHE TERMICHE | |
| Nome | Valore |
| Comportamento al fuoco | R 60 |
| CARATTERISTICHE ANTINCENDIO | |
| Nome | Valore |
| R _w [dB] | - |
| L _{nw,eq} [dB] | - |

CARATTERISTICHE ACUSTICHE

TAVOLA VIII-8

Chiusura Orizzontale 03 : Solaio su spazi aperti.



FUORI SCALA

Spessore
100,0 cm

SEZIONE

| [cm] | Descrizione degli strati |
|------|---|
| 1 | Pavimento in PVC flessibile, eterogeneo, rinforzato da una doppia griglia di fibra di vetro |
| 2 | Colla |
| 3 | Lastra di gesso armato sagomata calpestabile |
| 4 | Isolante anticalpestio per pavimenti in fibre di legno |
| 5 | Lastra di gesso armato sagomata calpestabile |
| 6 | Piedino regolabile |
| 7 | Getto in calcestruzzo con rete elettrosaldata |
| 8 | Solaio alveolare di calcestruzzo armato precompresso prefabbricato - tipo ECHO SCF 20 |
| 9 | Isolante termo-acustico morbido di lana li roccia con barriera al vapore integrata |

| [cm] | Descrizione degli strati |
|------|--|
| 10 | 28 Pendino di altezza regolabile |
| 11 | 10 Travetto di legno |
| 12 | 10 Isolante termo-acustico morbido di lana li roccia |
| 13 | 5 Travetto di legno |
| 14 | 5 Isolante termo-acustico morbido di lana li roccia |
| 15 | 2,5 Pannello di scaglie di legno orientate tipo OSB |
| 16 | 1,25 Pannello di particelle legato con cemento |

STRATIFICAZIONE

| Descrizione degli strati | Spessore [cm] | Conduktività termica [W/mK] | Calore specifico [J/kgK] | Densità [kg/m3] | resistenza termica [m2k/w] | Resistenza al vapore μ |
|---|----------------|-----------------------------|--------------------------|-----------------|----------------------------|----------------------------|
| Strato laminare interno | 2 | - | - | - | 0,17 | - |
| Pavimento in PVC flessibile, eterogeneo, rinforzato da una doppia griglia di fibra di vetro | 1 | 0,25 | 1000 | 1680 | 0,04 | 50000 |
| Lastra di gesso armato sagomata calpestabile | 1,25 | 0,12 | 2700 | 420 | 0,10 | 7 |
| Isolante anticalpestio per pavimenti in fibre di legno | 2 | 0,07 | 2100 | 250 | 0,29 | 5 |
| Lastra di gesso armato sagomata calpestabile | 2,5 | 0,12 | 2700 | 420 | 0,21 | 7 |
| camera d'aria | 10 | | | | 0,16 | 1 |
| Getto in calcestruzzo con rete elettrosaldata | 6 | 0,9 | 1000 | 1200 | 0,07 | 20 |
| Solaio alveolare di calcestruzzo armato precompresso prefabbricato | 40 | 1,73 | 200 | 1195 | 0,23 | 6,5 |
| Isolante termico semirigido leggero di fibre di legno pressate | 20 | 0,038 | 2100 | 50 | 5,26 | 5 |
| Isolante termico semirigido leggero di fibre di legno pressate | 0 | 0,038 | 2100 | 50 | 0,00 | 5 |
| Isolante termico semirigido leggero di fibre di legno pressate | 5 | 0,038 | 2100 | 50 | 1,32 | 5 |
| Pannello di scaglie di legno orientate tipo OSB | 2,5 | 0,12 | 1700 | 640 | 0,21 | 40 |
| Pannello di particelle legate con cemento | 1,5 | 0,2 | 2000 | 1280 | 0,08 | 40 |
| Strato laminare esterno | 2 | - | - | - | 0,04 | - |
| TOTALE | 100,0cm | | | | 8,17 m²K/W | |

CARATTERISTICHE

| Nome | Valore |
|--------------------------------------|------------|
| Resistenza termica totale | 8,17 m²K/W |
| Trasmittanza | 0,12 W/m²K |
| Fattore di decremento (attenuazione) | 0,028 |
| Ritardo (sfasamento) | 20,6 h |

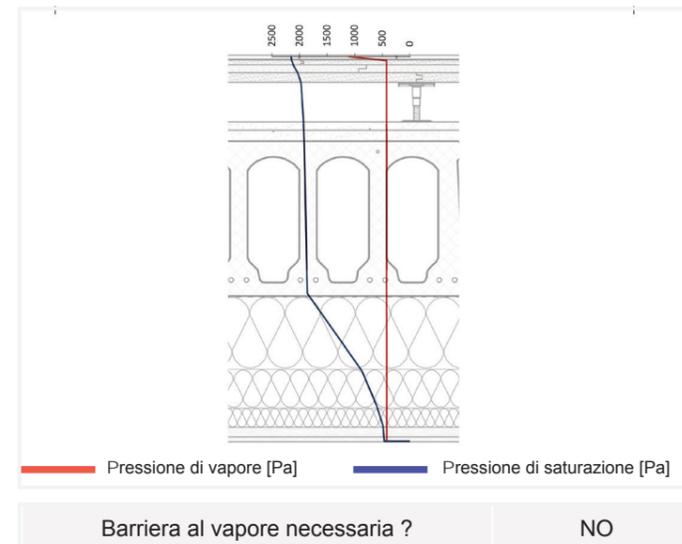
CARATTERISTICHE TERMICHE

| Nome | Valore |
|------------------------|--------|
| Comportamento al fuoco | REI 60 |

CARATTERISTICHE ANTINCENDIO

| Nome | Valore |
|-------------------------|--------|
| Rw [dB] | 69,37 |
| L _{rw,eq} [dB] | 64,48 |

CARATTERISTICHE ACUSTICHE

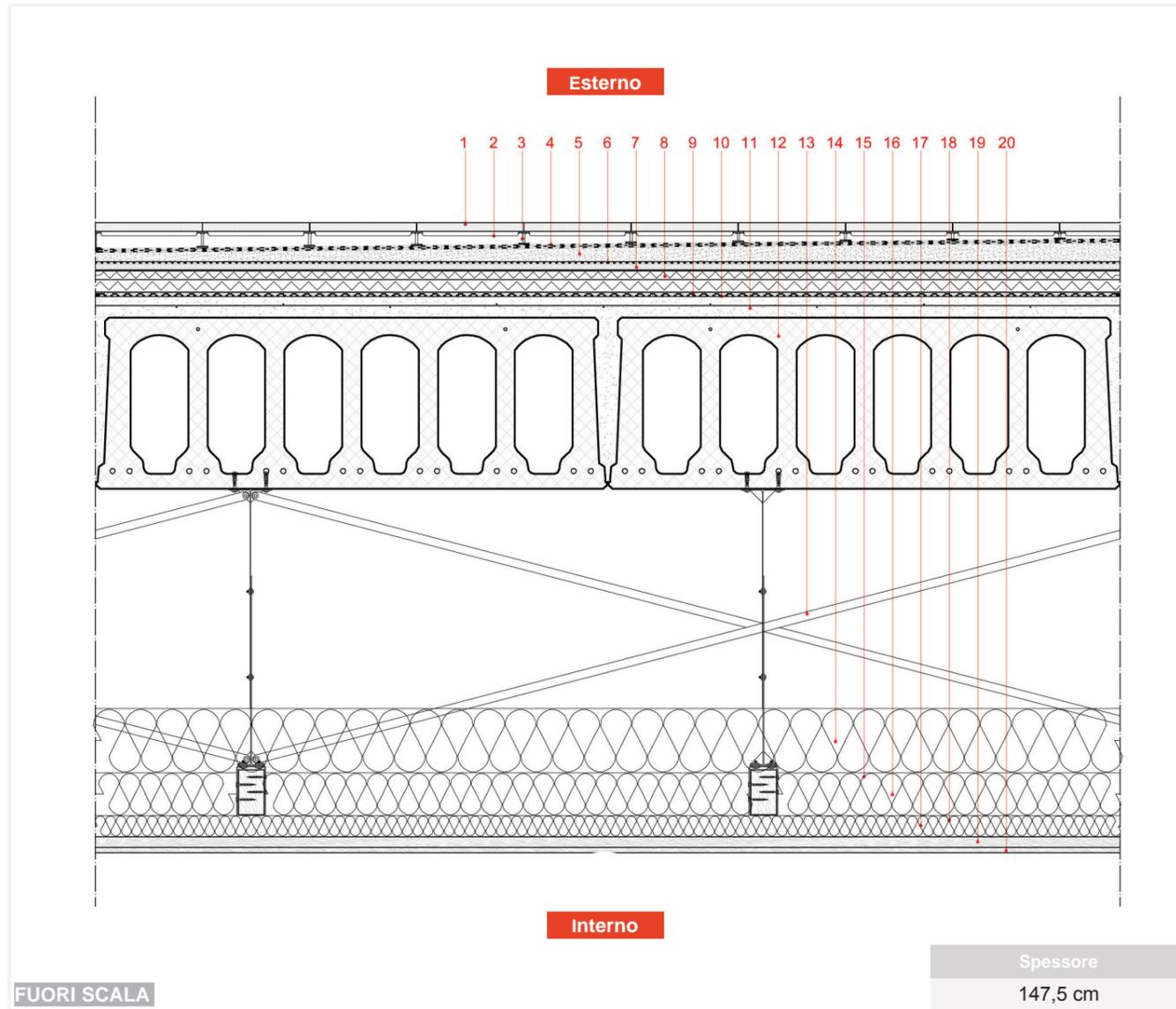


Barriera al vapore necessaria ? NO

CONDENSAZIONE : DIAGRAMMA DI GLASER

TAVOLA VIII-9

Chiusura Orizzontale 04 : Copertura praticabile



FUORI SCALA

Spessore
147,5 cm

SEZIONE

| [cm] | Descrizione degli strati |
|------|---|
| 1 | Pannello con anima costituita da cemento fibrorinforzato e finitura tipo gres |
| 2 | Piedino regolabile e sovrastante struttura |
| 3 | Camera d'aria |
| 4 | Membrana Bituminosa Autoadesiva Rinforzata con Tessuto Non Tessuto in Poliestere per sottotetti |
| 5 | Malta di livellamento con pendenza di 1% |
| 6 | Feltro in polipropilene per il rinforzo e la protezione |
| 7 | Matrassino fonoisolante di polietilene |
| 8 | Isolante termico rigido sotto vuoto (Vacuum) con strato di protezione esterna in sughero |
| 9 | Membrana Bituminosa Autoadesiva Barriera Totale a Vapore, Radon e Metano |
| 10 | Feltro in polipropilene per il rinforzo e la protezione |

| [cm] | Descrizione degli strati |
|------|---|
| 11 | Getto in calcestruzzo con rete elettrosaldata |
| 12 | Solaio alveolare di calcestruzzo armato precompresso prefabbricato - tipo ECHO SCF 40 |
| 13 | Pendino di altezza regolabile |
| 14 | Isolante termo-acustico morbido di lana li roccia |
| 15 | Travetto di legno |
| 16 | Isolante termo-acustico morbido di lana li roccia |
| 17 | Isolante termo-acustico morbido di lana li roccia |
| 18 | Travetto di legno |
| 19 | Pannello di scaglie di legno orientate tipo OSB |
| 20 | Pannello di particelle legato con cemento |

STRATIFICAZIONE

| Descrizione degli strati | Spessore [cm] | Conduktività termica [W/mK] | Calore specifico [J/kgK] | Densità [kg/m3] | resistenza termica [m2k/w] | Resistenza al vapore μ |
|--|----------------|-----------------------------|--------------------------|-----------------|----------------------------|----------------------------|
| Strato laminare interno | 2 | - | - | - | 0,10 | - |
| Solaio alveolare di calcestruzzo armato precompresso prefabbricato | 40 | 1,74 | 200 | 1195 | 0,23 | 6,5 |
| Getto in calcestruzzo con rete elettrosaldata | 5 | 0,9 | 1000 | 1200 | 0,06 | 20 |
| Feltro in polipropilene per il rinforzo e la protezione | 0,4 | 0,22 | 1800 | 910 | 0,02 | 15000 |
| Membrana Bituminosa Autoadesiva Barriera Totale a Vapore, Radon e Metano | 0,4 | 0,23 | 1000 | 1100 | 0,02 | 1000000 |
| Gomma di protezione intorno i Vacuum panel | 0,2 | 0,17 | 1400 | 1200 | 0,01 | 900 |
| Pannello sotto vuoto :Vacuum Insulation Panel | 5 | 0,007 | 1 | 200 | 7,14 | 1 |
| Gomma di protezione intorno i Vacuum panel | 0,2 | 0,17 | 1400 | 1200 | 0,01 | 900 |
| Matrassino fonoisolante di polietilene | 1,5 | 0,5 | 1800 | 930 | 0,03 | 5 |
| Feltro in polipropilene per il rinforzo e la protezione | 0,2 | 0,22 | 1800 | 910 | 0,01 | 15000 |
| Malta di livellamento con pendenza di 1% | 5 | 1,4 | 1000 | 375 | 0,04 | 50 |
| Membrana Bituminosa Autoadesiva Rinforzata con Tessuto Non Tessuto in Poliestere per solai | 0,9 | 0,23 | 1000 | 1100 | 0,04 | 6000 |
| Membrana Bituminosa Autoadesiva Rinforzata con Tessuto Non Tessuto in Poliestere per solai | 0,9 | 0,23 | 1000 | 1100 | 0,04 | 6000 |
| Strato laminare esterno | 2 | - | - | - | 0,04 | - |
| TOTALE | 59,7 cm | | | | 7,78 m²K/W | |

CARATTERISTICHE

| Nome | Valore |
|--------------------------------------|------------|
| Resistenza termica totale | 7,78 m²K/W |
| Trasmittanza | 0,13 W/m²K |
| Fattore di decremento (attenuazione) | 0,272 |
| Ritardo (sfasamento) | 8,9 h |

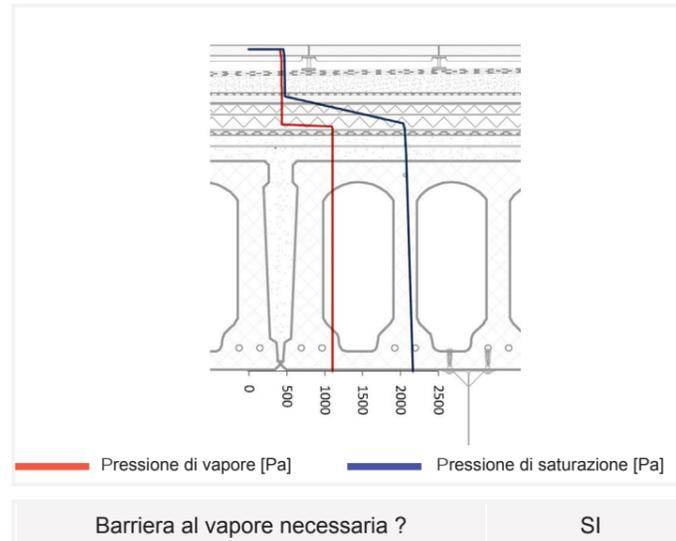
CARATTERISTICHE TERMICHE

| Nome | Valore |
|------------------------|--------|
| Comportamento al fuoco | REI 60 |

CARATTERISTICHE ANTINCENDIO

| Nome | Valore |
|-------------------------|--------|
| Rw [dB] | 71,93 |
| L _{rw,eq} [dB] | 64,37 |

CARATTERISTICHE ACUSTICHE

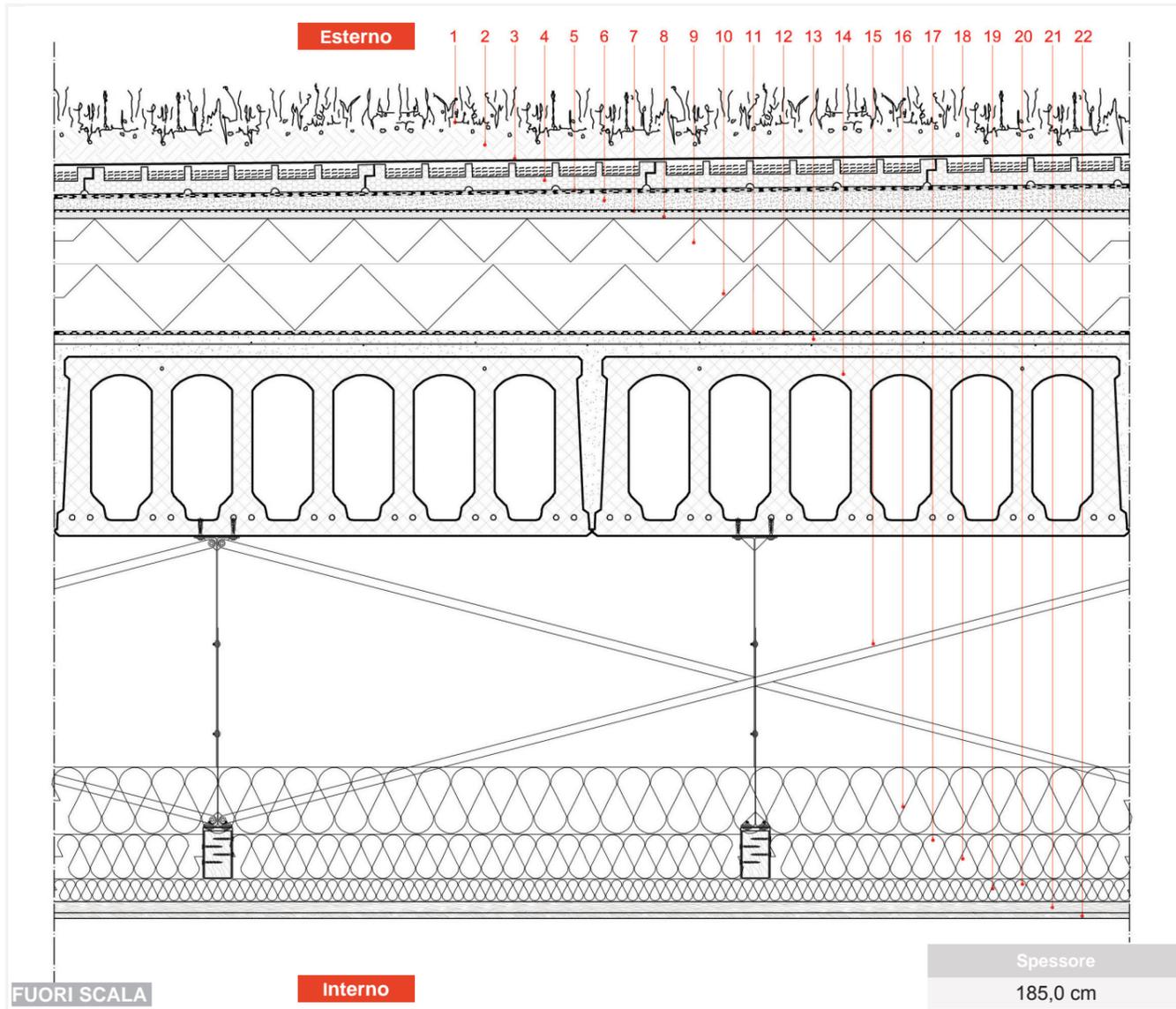


Barriera al vapore necessaria ? SI

CONDENSAZIONE : DIAGRAMMA DI GLASER

TAVOLA VIII-10

Chiusura Orizzontale 05 : Tetto verde leggero estensivo



Spessore 185,0 cm

SEZIONE

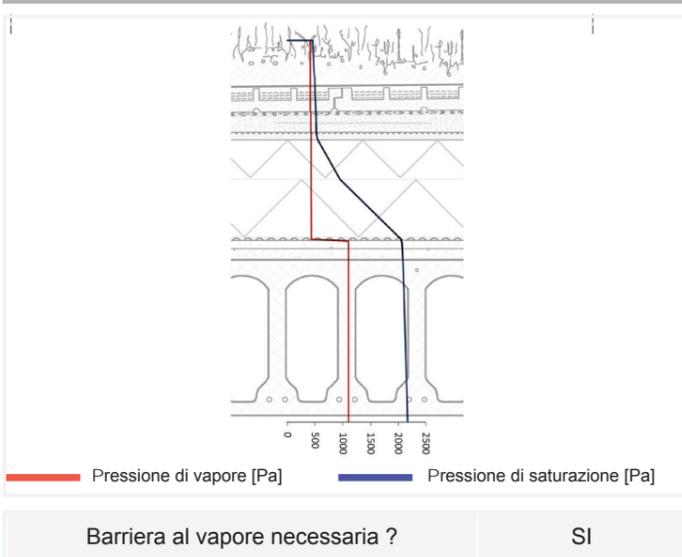
| [cm] | Descrizione degli strati |
|------|---|
| 1 | 5,0 vegetazione estensiva |
| 2 | 8,0 Sustrato |
| 3 | 1,3 Filltro |
| 4 | 8,0 Materasso di polistirene sagomato per il drenagio |
| 5 | 0,9 Membrana Bituminosa Autoadesiva Rinforzata con Tessuto Non Tessuto in Poliestere per sottotetti |
| 6 | 5,0 Malta di livellamento con pendenza di 1% |
| 7 | 0,2 Feltro in polipropilene per il rinforzo e la protezione |
| 8 | 1,5 Materrassino fonoisolante di polietilene |
| 9 | 10,0 Isolante termico rigido di polistirene estruso |
| 10 | 15,0 Isolante termico rigido di polistirene estruso |
| 11 | 0,4 Membrana Bituminosa Autoadesiva Barriera Totale a Vapore, Radon e Metano |

| [cm] | Descrizione degli strati |
|------|--|
| 12 | 0,4 Feltro in polipropilene per il rinforzo e la protezione |
| 13 | 5,0 Getto in calcestruzzo con rete elettrosaldata |
| 14 | 40,0 Solaio alveolare di calcestruzzo armato precompresso prefabbricato - tipo ECHO SCF 40 |
| 15 | 77,0 Pendino di altezza regolabile |
| 16 | 15,0 Isolante termo-acustico morbido di lana li roccia |
| 17 | 10,0 Travetto di legno |
| 18 | 10,0 Isolante termo-acustico morbido di lana li roccia |
| 19 | 5,0 Isolante termo-acustico morbido di lana li roccia |
| 20 | 5,0 Travetto di legno |
| 21 | 2,5 Pannello di scaglie di legno orientate tipo OSB |
| 22 | 1,25 Pannello di particelle legato con cemento |

STRATIFICAZIONE

| Descrizione degli strati | Spessore [cm] | Conduttività termica [W/mK] | Calore specifico [J/kgK] | Densità [kg/m3] | resistenza termica [m2k/w] | Resistenza al vapore μ |
|---|----------------|-----------------------------|--------------------------|-----------------|----------------------------|----------------------------|
| Strato laminare interno | 2 | - | - | - | 0,10 | - |
| Solaio alveolare di calcestruzzo armato precompresso prefabbricato | 40 | 1,73 | 200 | 1195 | 0,23 | 6,5 |
| Getto in calcestruzzo con rete elettrosaldata | 5 | 0,9 | 1000 | 1200 | 0,06 | 20 |
| Feltro in polipropilene per il rinforzo e la protezione | 0,4 | 0,22 | 1800 | 910 | 0,02 | 15000 |
| Membrana Bituminosa Autoadesiva Barriera Totale a Vapore, Radon e Metano | 0,4 | 0,23 | 1000 | 1100 | 0,02 | 1000000 |
| Barriera al vapore : foglio di alluminio rivestito e protetto a sua volta da un foglio di polietilene | 0,03 | 0,33 | 2200 | 403,2 | 0,00 | 1000000 |
| Isolante termico rigido di polistirene estruso (XPS) | 15 | 0,035 | 1680 | 35 | 4,29 | 100 |
| Isolante termico rigido di polistirene estruso (XPS) | 10 | 0,035 | 1680 | 35 | 2,86 | 100 |
| Isolante anticalpestio per pavimenti in fibre di legno | 1,5 | 0,07 | 2100 | 250 | 0,21 | 5 |
| Feltro in polipropilene per il rinforzo e la protezione | 0,2 | 0,22 | 1800 | 910 | 0,01 | 15000 |
| Malta di livellamento con pendenza di 1% | 5 | 1,4 | 1000 | 375 | 0,04 | 50 |
| Membrana Bituminosa Autoadesiva Rinforzata con Tessuto Non Tessuto in Poliestere per solai | 0,9 | 0,23 | 1000 | 1100 | 0,04 | 6000 |
| Materasso di polistirene sagomato per il drenagio | 8 | 0,34 | 1670 | 30 | 0,24 | 100 |
| Filltro in con fibre di polipropilene | 1,3 | 0,22 | 1800 | 179,3 | 0,06 | 0 |
| Sustrato | 8 | 0,33 | 2080 | 878 | 0,24 | 50 |
| Strato laminare esterno | 2 | - | - | - | 0,04 | - |
| TOTALE | 95,8 cm | | | | 8,44 m²K/W | |

CARATTERISTICHE



CONDENSAZIONE : DIAGRAMMA DI GLASER

| Nome | Valore |
|--------------------------------------|------------|
| Resistenza termica totale | 8,44 m²K/W |
| Trasmittanza | 0,12 W/m²K |
| Fattore di decremento (attenuazione) | 0,066 |
| Ritardo (sfasamento) | 19,4 h |

CARATTERISTICHE TERMICHE

| Nome | Valore |
|------------------------|--------|
| Comportamento al fuoco | R 60 |

CARATTERISTICHE ANTINCENDIO

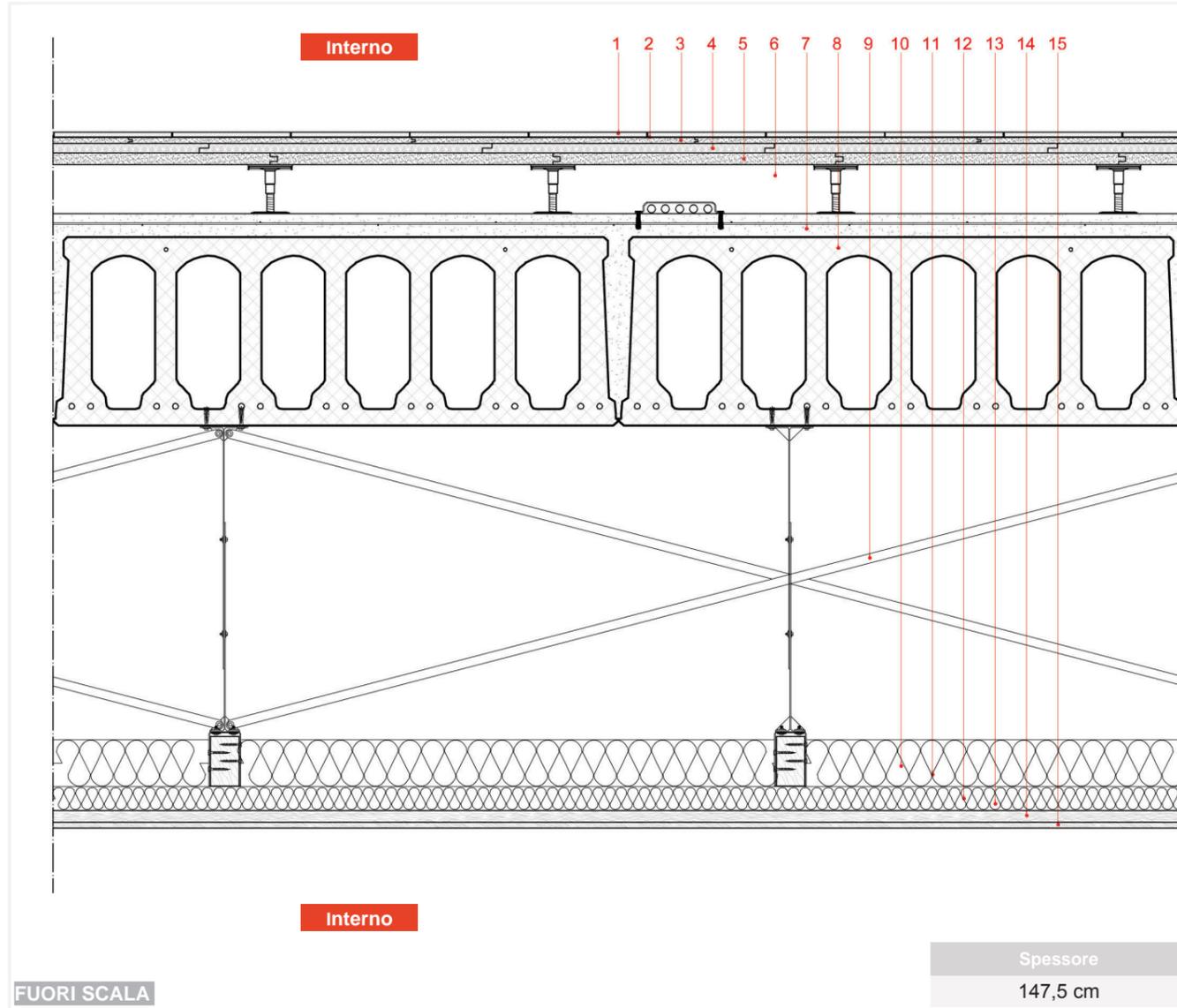
| Nome | Valore |
|-------------------------|--------|
| Rw [dB] | 72,12 |
| L _{nw,eq} [dB] | 64,05 |

CARATTERISTICHE ACUSTICHE

7. PARTIZIONE ORIZZONTALE INTERNE

TAVOLA VIII-11

Partizione Orizzontale Interna 01 : Solaio interno tra due ambienti riscaldati



FUORI SCALA

Spessore
147,5 cm

SEZIONE

| [cm] | Descrizione degli strati | [cm] | Descrizione degli strati |
|------|---|------|--|
| 1 | 1,0 Pavimento in PVC flessibile, eterogeneo, rinforzato da una doppia griglia di fibra di vetro | 11 | 10,0 Isolante termo-acustico morbido di lana li roccia |
| 2 | 0,2 Colla | 12 | 5,0 Travetto di legno |
| 3 | 1,25 Lastra di gesso armato sagomata calpestabile | 13 | 5,0 Isolante termo-acustico morbido di lana li roccia |
| 4 | 2,0 Isolante anticalpestio per pavimenti in fibre di legno | 14 | 2,5 Pannello di scaglie di legno orientate tipo OSB |
| 5 | 2,5 Lastra di gesso armato sagomata calpestabile | 15 | 1,25 Pannello di particelle legato con cemento |
| 6 | 9,8 Piedino regolabile | | |
| 7 | 5,0 Getto in calcestruzzo con rete elettrosaldata | | |
| 8 | 40,0 Solaio alveolare di calcestruzzo armato precompresso prefabbricato - tipo ECHO SCF 40 | | |
| 9 | 66,5 Pendino di altezza regolabile | | |
| 10 | 10,0 Travetto di legno | | |

STRATIFICAZIONE

| Descrizione degli strati | Spessore [cm] | Conduttività termica [W/mK] | Calore specifico [J/kgK] | Densità [kg/m3] | resistenza termica [m2k/w] | Resistenza al vapore μ |
|---|---------------|-----------------------------|--------------------------|-----------------|----------------------------|----------------------------|
| Strato laminare interno | 2 | - | - | - | 0,17 | - |
| Pavimento in PVC flessibile, eterogeneo, rinforzato da una doppia griglia di fibra di vetro | 1 | 0,25 | 1000 | 1680 | 0,04 | 50000 |
| Lastra di gesso armato sagomata calpestabile | 1,25 | 0,12 | 2700 | 420 | 0,10 | 7 |
| Isolante anticalpestio per pavimenti in fibre di legno | 2 | 0,07 | 2100 | 250 | 0,29 | 5 |
| Lastra di gesso armato sagomata calpestabile | 2,5 | 0,12 | 2700 | 420 | 0,21 | 7 |
| camera d'aria | 10 | | | | 0,16 | 1 |
| Getto in calcestruzzo con rete elettrosaldata | 6 | 0,9 | 1000 | 1200 | 0,07 | 20 |
| Solaio alveolare di calcestruzzo armato precompresso prefabbricato | 40 | 1,73 | 200 | 1195 | 0,23 | 6,5 |
| Strato laminare esterno | 2 | - | - | - | 0,17 | - |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| TOTALE | 62,3cm | | | | 1,44 m²K/W | |

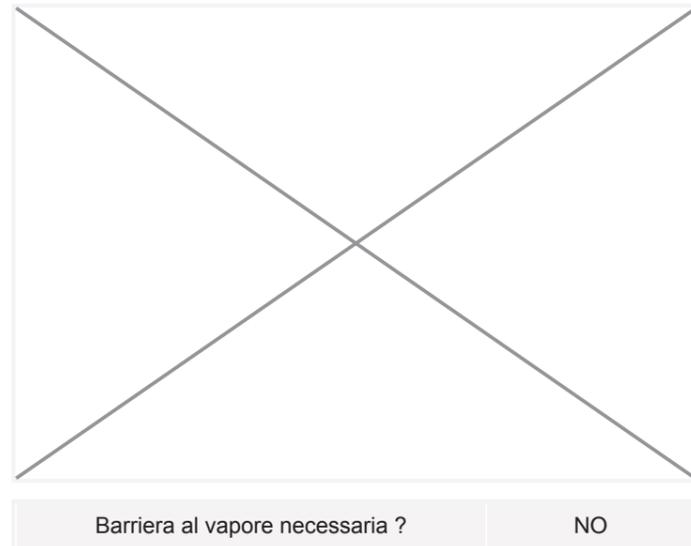
CARATTERISTICHE

| Nome | Valore |
|--------------------------------------|------------|
| Resistenza termica totale | 1,44 m²K/W |
| Trasmittanza | 0,7 W/m²K |
| Fattore di decremento (attenuazione) | - |
| Ritardo (sfasamento) | - |

| CARATTERISTICHE TERMICHE | |
|--------------------------|--------|
| Nome | Valore |
| Comportamento al fuoco | REI 60 |

| CARATTERISTICHE ANTINCENDIO | |
|-----------------------------|--------|
| Nome | Valore |
| Rw [dB] | 76,87 |
| L _{nw,eq} [dB] | 64,47 |

CONDENSAZIONE : DIAGRAMMA DI GLASER

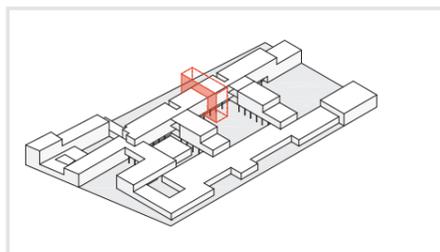
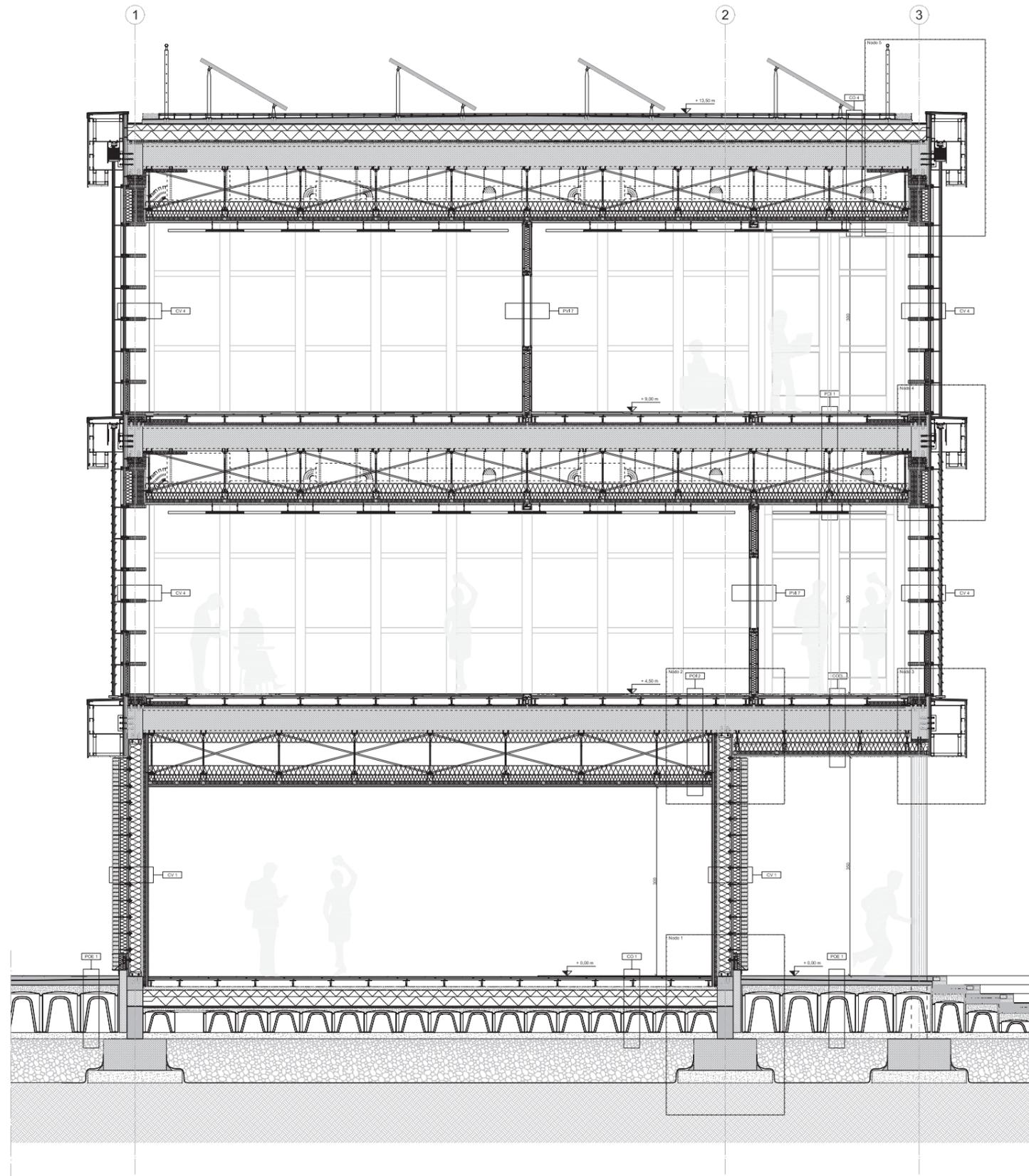


Barriera al vapore necessaria ? NO

C. SEZIONI E PIANTE TECNOLOGICHE

1. SEZIONE TECNOLOGICA AA

TAVOLA VIII-12



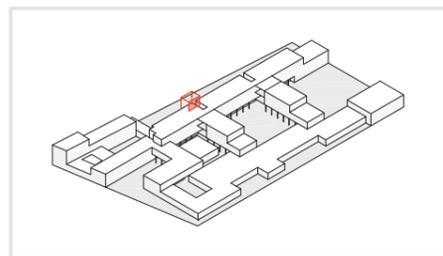
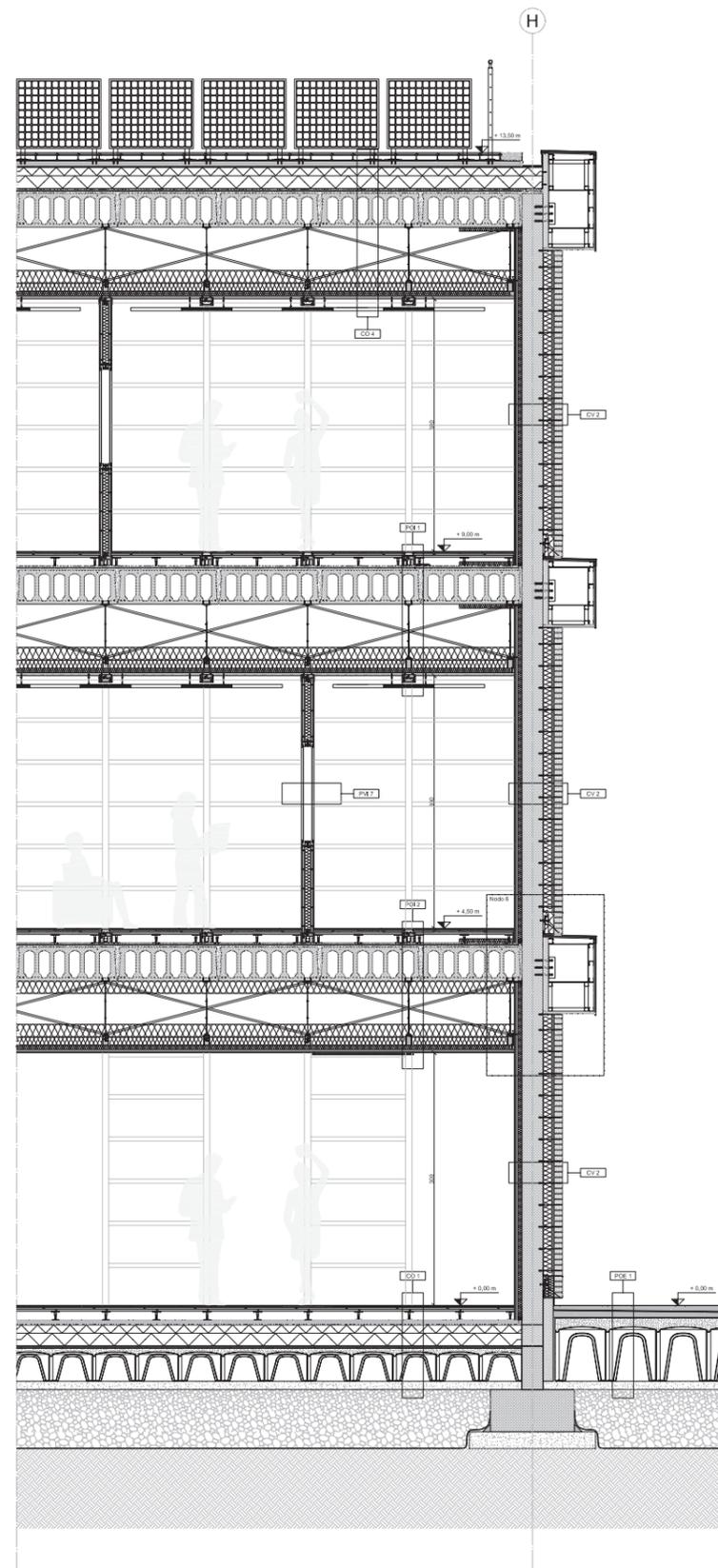
2 m

FUORI SCALA

SEZIONE TECNOLOGICA AA

2. SEZIONE TECNOLOGICA BB

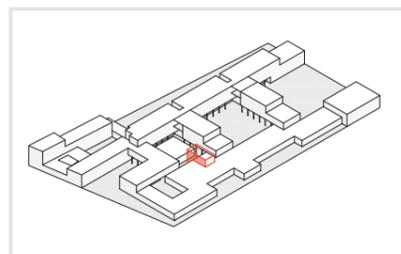
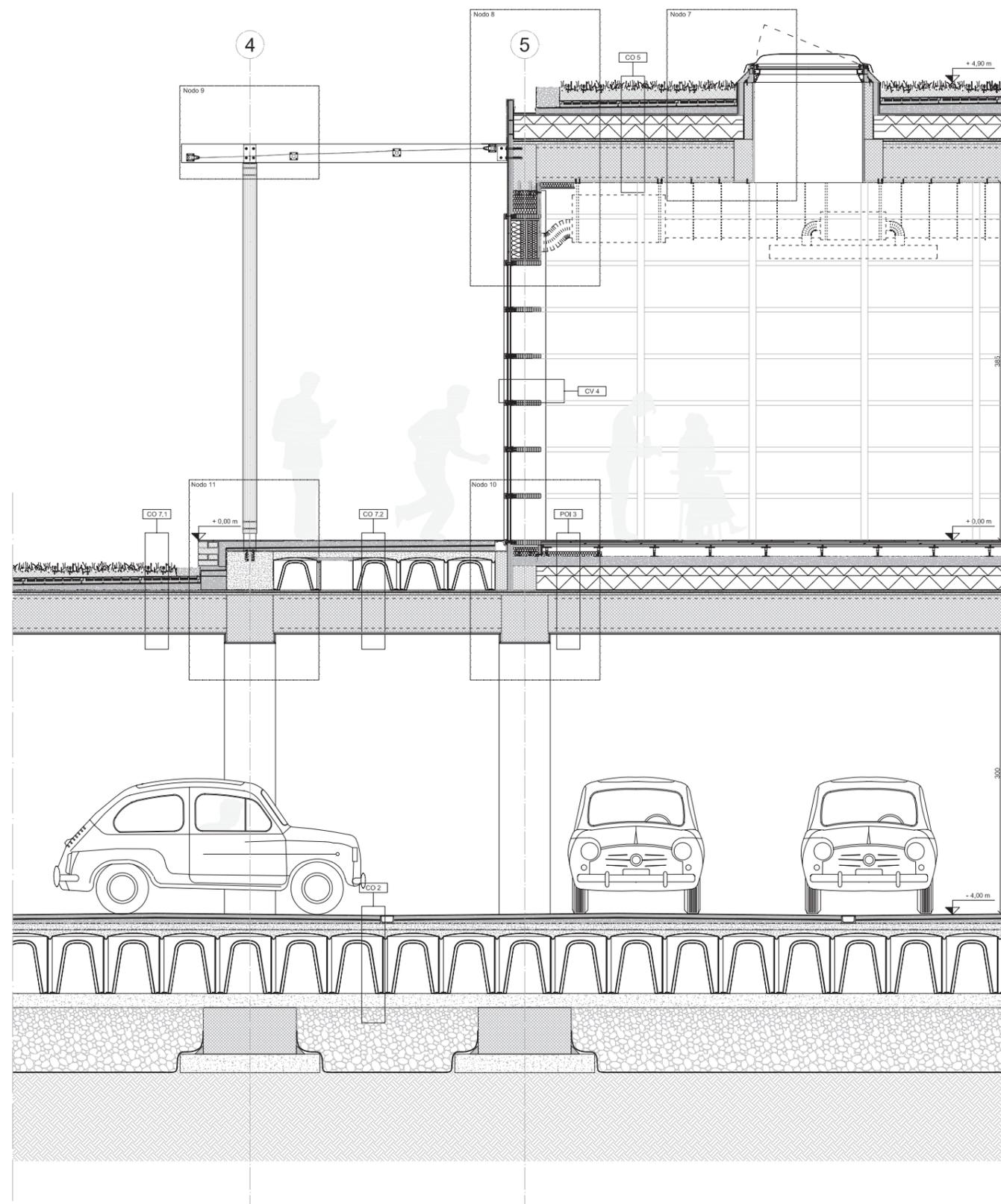
TAVOLA VIII-13



2 m

FUORI SCALA

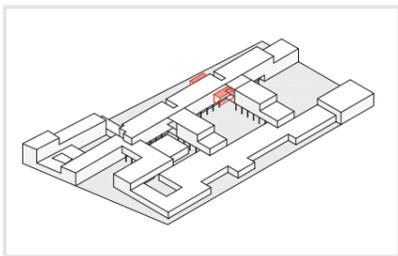
SEZIONE TECNOLOGICA BB



2 m

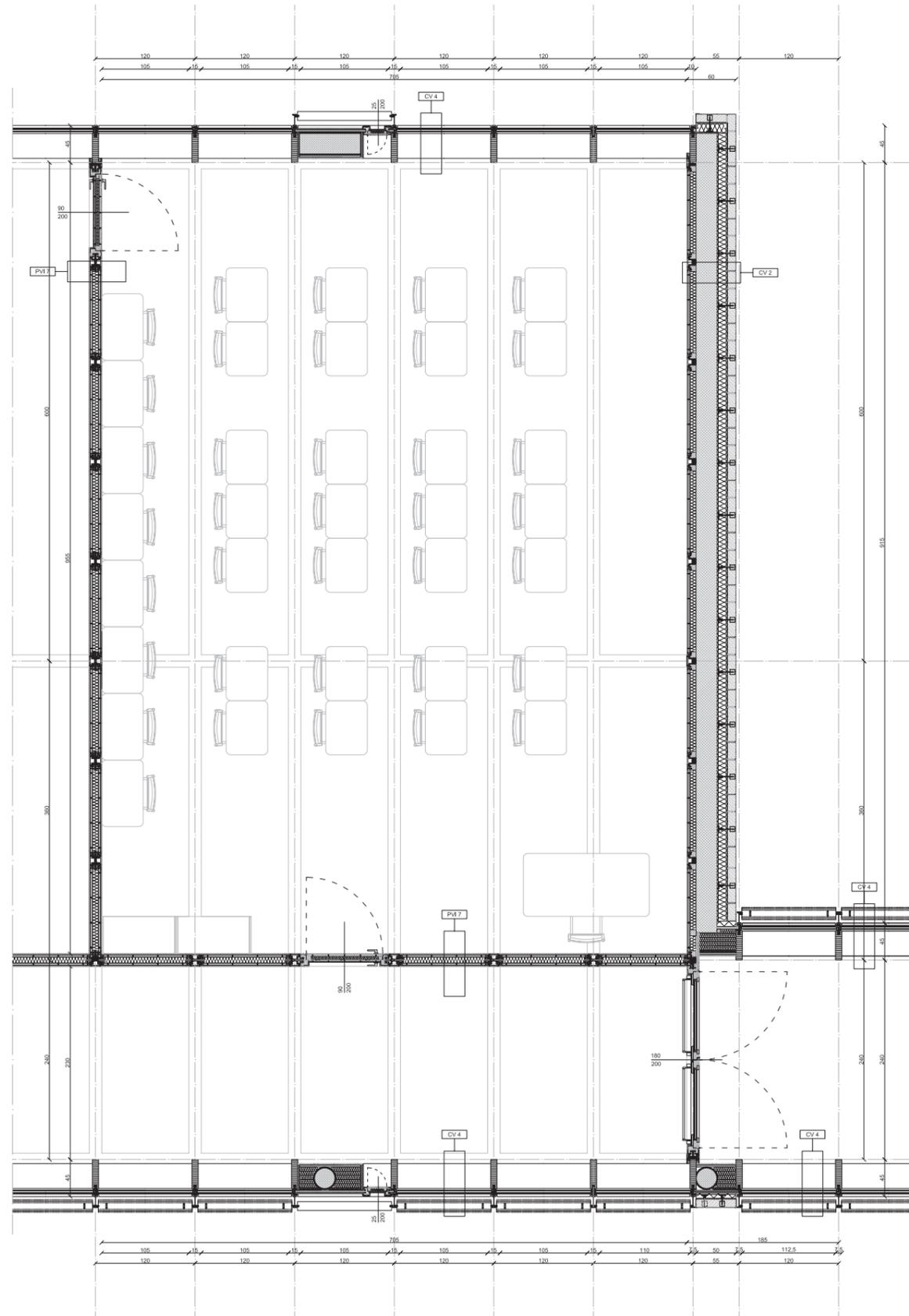
FUORI SCALA

4. PIANTE TECNOLOGICA TIPO DI UN AULA
TAVOLA VIII-15



3 m

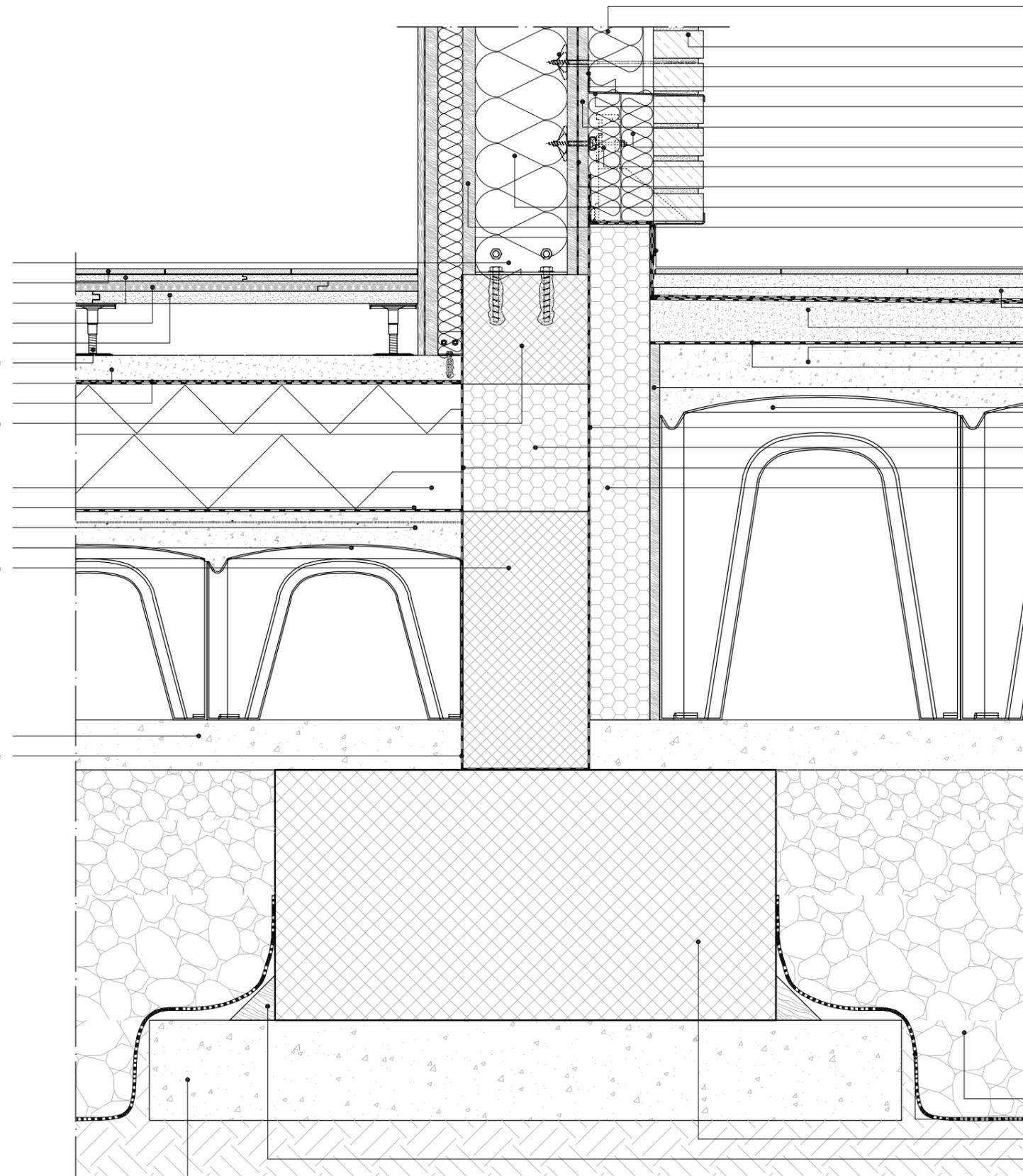
FUORI SCALA



SEZIONE TECNOLOGICA BB

N 01

- Fazzoletto d'acciaio inbullonato
- Pavimento in PVC flessibile, eterogeneo, rinforzato da una doppia griglia di fibra di vetro - sp. 1 cm
- Lastra di gesso armato sagomata calpestabile - sp. 1,25 cm
- Isolante anticalpestio per pavimenti in fibre di legno - sp. 2,00 cm
- Lastra di gesso armato sagomata calpestabile - sp. 2,50 cm
- Piedino regolabile
- Malta di livellamento - sp. 5,00 cm
- Feltro in polipropilene per la protezione e membrana bituminosa autoadesiva - sp. totale 0,4 cm
- Calcestruzzo armato
- Isolante termico rigido di polistirene estruso - sp. totale 25 cm
- Membrana bituminosa autoadesiva - sp. totale 0,4 cm
- Getto in calcestruzzo con rete elettrosaldata - sp. 7,50 cm circa
- Cassero da perdere - altezza 35 cm
- Calcestruzzo armato
- Magrone di calcestruzzo - sp. 10 cm
- Testo da inserire



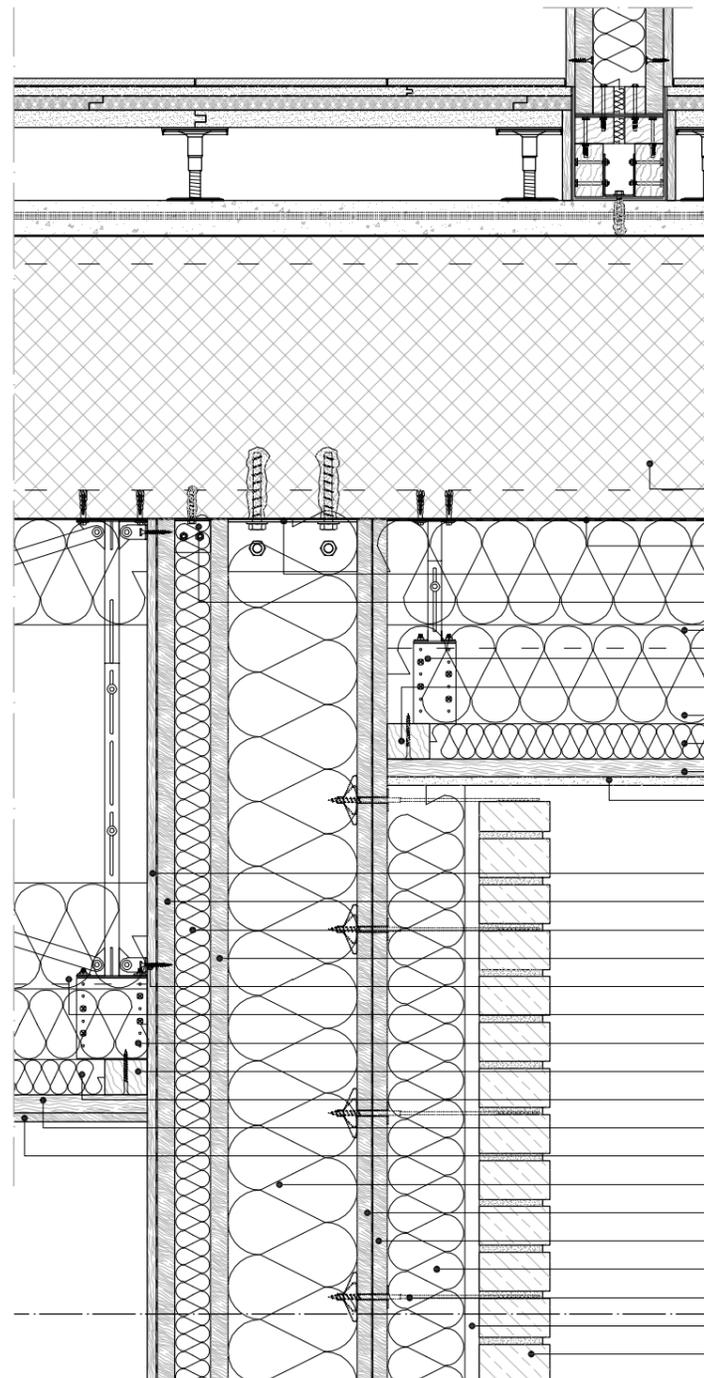
- Isolante termico semirigido di lana di roccia ad alta densità e camera d'aria non ventilata - sp. totale 13 cm
- Laterizio pieno - sp. 6 cm
- Controvento con tassello per lastre di legno
- Giunto di silicone
- Scossalino di rame per la ritenuta dell'acqua - mattoni davanti non giunti
- Pannello di scaglie di legno orientate - sp. 2 cm
- Lastre di lana di roccia ad alta densità
- Attacco Halfen per il fissaggio della parete di laterizi pieni
- Barriera al vento
- Isolante termico semirigido di fibre di legno - sp. 18,5 cm
- Pannello di scaglie di legno - sp. 2,5 cm
- Scossalina di rame incollata
- Guaina bituminosa impermeabilizzante in tre strati - sp. 0,9 cm
- Malta di livellamento - sp. min 3 cm
- Malta in pendenza di 1% - sp. min 3 cm
- Getto di calcestruzzo con rete elettrosaldata - sp. 15 cm circa
- Feltro in polipropilene per il rinforzo e la protezione
- Lastra di OSB - sp. 2 cm
- Cassero da perdere - altezza 65 cm
- Membrana impermeabilizzante contra la risalita capillare - sp. 0,25 cm
- Isolante termico resistente ad elevate compressioni - sp. 25 cm
- Membrana impermeabilizzante contra la risalita capillare - sp. 0,25 cm
- Isolante termico resistente ad elevate compressioni - sp. 10 cm
- Ghiaia drenante con granulometria crescente
- Barriera anti radici di tessuto non tessuto - sp. 0,3 cm
- Plinto di fondazione di calcestruzzo armato - sp. 50 cm
- Tassello di legno con sezione triangolare per la fissazione della barriera antiradici
- Magrone di calcestruzzo - sp. 15 cm

50 cm

SCALA 1:10

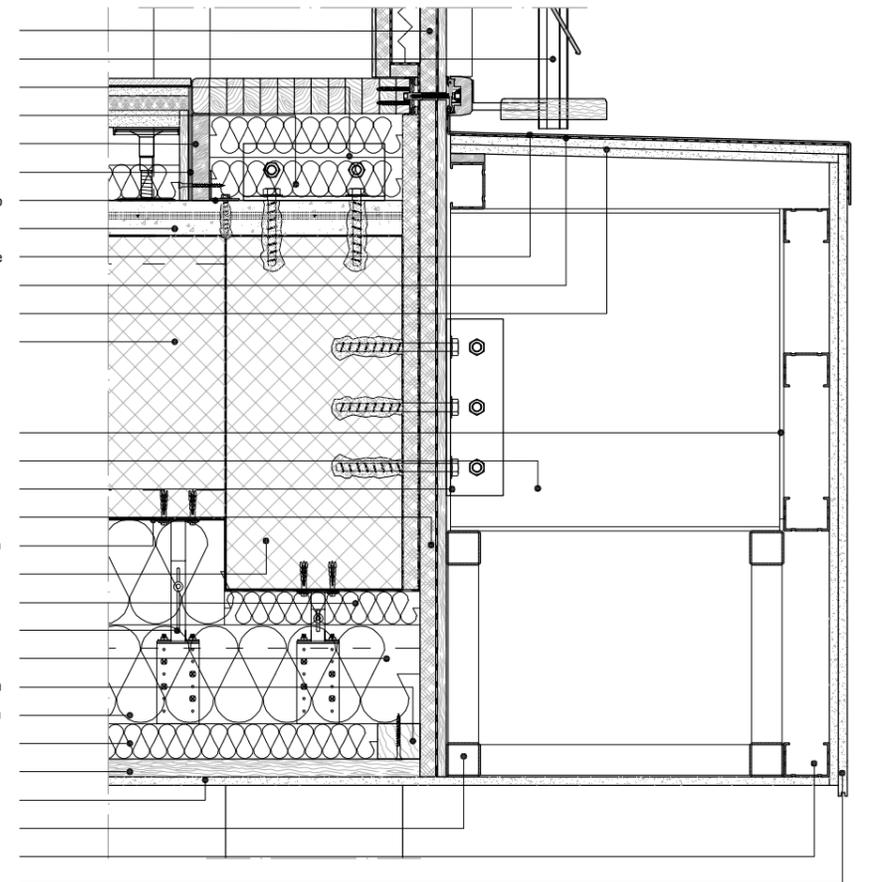
NODO 1

N 02



- Solaio alveolare di calcestruzzo amato precompresso prefabbricato - sp. 40 cm
- Barriera al vapore incollata
- Fazzoletto d'acciaio inbullonato per fissare i montanti della parete
- Fazzoletto d'acciaio inbullonato per fissare i montanti della parete
- Isolante termo-acustico morbido di lana di roccia - sp. 15 cm + 15 cm
- Pendino rigido d'acciaio - altezza regolabile
- Travetto di legno - 5x6 cm
- Travetto di legno - 10x6 cm
- Isolante termo-acustico morbido di lana di roccia - sp. 5 cm
- Pannello di scaglie di legno orientate - sp. 2,5 cm
- Lastre in cemento rinforzato per uso esterno - sp. 1,25 cm
- Pannello di particelle legato con cemento - sp. 1,25 cm
- Pannello di scaglie di legno orientate e barriera al vapore - sp. 2,5 cm
- Isolante termico semirigido di fibre di legno - sp. 5 cm
- Pannello di scaglie di legno orientate - sp. 2,5 cm
- Fazzoletto d'acciaio avvitato
- Isolante termo-acustico morbido di lana di roccia - sp. 10 cm + 15 cm
- Pendino rigido d'acciaio - altezza regolabile
- Travetto di legno - 5x6 cm
- Isolante termo-acustico morbido di lana di roccia - sp. 5 cm
- Pannello di scaglie di legno orientate - sp. 2,5 cm
- Pannello di particelle legato con cemento - sp. 1,25 cm
- Isolante termico semirigido di fibre di legno - sp. 18,5 cm
- Pannello di scaglie di legno orientate - sp. 2,5 cm
- Pannello di scaglie di legno orientate e barriera al vento - sp. 2 cm
- Isolante termico semirigido di lana di roccia ad alta densità - sp. 12 cm
- Controvento con tassello per lastre di legno
- Camera d'aria debolmente ventilata - sp. 1 cm
- Laterizio pieno - sp. 6 cm

N 03



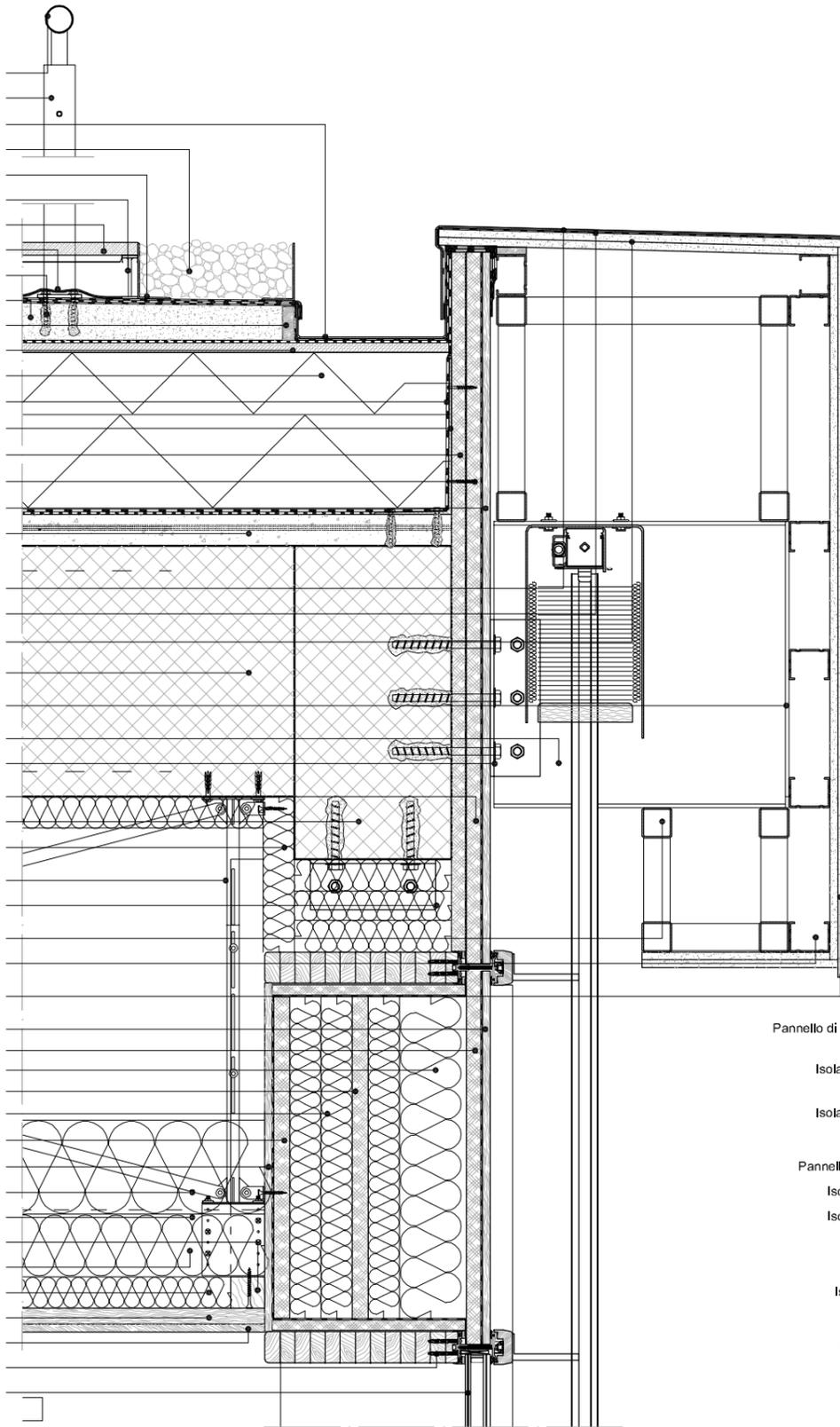
- Pannello prefabbricato VIP inserito nella struttura della facciata
- Guida per le frangisole orientabili ed impacchettabili
- Isolante termo-acustico di lana di roccia - sp. var.
- Fazzoletto d'acciaio inbullonato per fissare i montanti della parete
- Tavola di scaglie di legno orientate - sp. 2,5 cm
- Guarnizione di caucciù contro il rumore di calpestio
- Profilo a L d'acciaio
- Getto in calcestruzzo con rete elettrosaldata - sp. 5 cm
- Scossalina di rame
- Membrana impermeabile di feltro poliestere laminato - sp. 0,25 cm
- Doppia lastra di cemento rinforzato per uso esterno - sp. 1,25 cm x2
- Solaio alveolare di calcestruzzo amato precompresso prefabbricato - sp. 40 cm
- Piastra d'acciaio saldata - altezza 45 cm - sp. 0,4 cm
- Profilo d'acciaio a I asimmetrico - altezza 45 cm
- Fazzoletto d'acciaio inbullonato per fissare i montanti della parete
- Lastre Eraclit e barriere al vento - sp. 8 cm
- Barriera al vapore incollata
- Trave di calcestruzzo amato - 50x25 cm
- Isolante termo-acustico morbido di lana di roccia - sp. 5 cm
- Pendino rigido d'acciaio - altezza regolabile
- Isolante termo-acustico morbido di lana di roccia - sp. 10 cm
- Travetto di legno - 5x6 cm
- Travetto di legno - 10x6 cm
- Isolante termo-acustico morbido di lana di roccia - sp. 5 cm
- Pannello di scaglie di legno orientate - sp. 2,5 cm
- Lastre in cemento rinforzato per uso esterno - sp. 1,25 cm
- Profilo d'acciaio tubolare - 5x5 cm - sp. 0,25 cm
- Profilo d'acciaio a C saldato - 5x6,5 cm - sp. 0,25 cm
- Doppia lastra di cemento rinforzato per uso esterno - sp. 1,25 cm x2

50 cm

SCALA 1:10

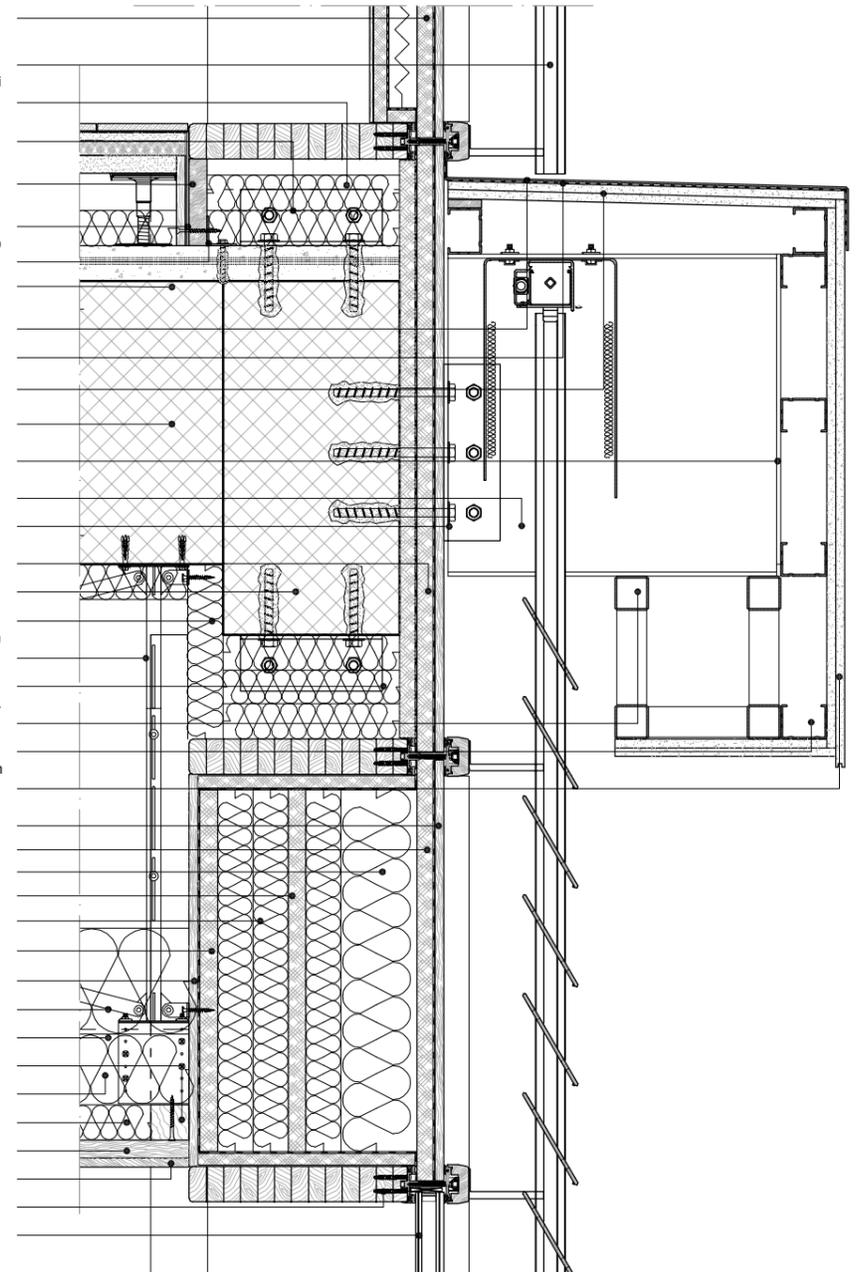
N 04

Corrimano d'alluminio estruso zincato - sp. 0,25 cm
 Montante d'alluminio e cavi d'acciaio tesi - altezza 110 cm
 Profilo d'acciaio a U - 25x5 cm - sp. 0,25 cm
 Ghiaia
 Profilo a L d'acciaio - sp. 0,25 cm
 Piedino regolabile
 Pannello di cemento fibrorinforzato e finitura tipo gres - sp. 2 cm
 Guaina impermeabilizzante - sp. 0,3 cm
 Piastra d'acciaio inbullonata - sp. 0,5 cm
 Malta di livellamento con pendenza di 1% - sp. min 5 cm
 Tavola di legno - sp. 2,5 cm
 Matressino fonoisolante di polietilene - sp. 1,5 cm
 Isolante termico rigido di polistirene estruso - sp. totale 25 cm
 Feltro in polipropilene per il rinforzo e la protezione
 Profilo a L d'acciaio - sp. 0,5 cm
 Pannello di legnomagnesite - sp. 2,5 cm
 Pannello di legnomagnesite - sp. 2,5 cm
 Pannello di legno compensato e membrana traspirante - sp. 1,5 cm
 Getto in calcestruzzo con rete elettrosaldata - sp. 5 cm
 Scossalina di rame
 Membrana impermeabile di feltro poliestere laminato - sp. 0,25 cm
 Doppia lastra di cemento rinforzato per uso esterno - sp. 1,25 cm x2
 Solaio alveolare di calcestruzzo amato precompresso prefabbricato - sp. 40 cm
 Piastra d'acciaio saldata - altezza 45 cm - sp. 0,4 cm
 Profilo d'acciaio a I asimmetrico - altezza 45 cm
 Fazzoletto d'acciaio inbullonato per fissare i montanti della parete
 Lastre di legnomagnesite e barriere al vento - sp. 8 cm
 Trave di calcestruzzo amato - 50x25 cm
 Isolante termo-acustico morbido di lana di roccia - sp. 5 cm
 Pendino rigido d'acciaio - altezza regolabile
 Isolante termo-acustico morbido di lana di roccia - sp. var.
 Profilo d'acciaio tubolare - 5x5 cm - sp. 0,25 cm
 Profilo d'acciaio a C saldato - 5x6,5 cm - sp. 0,25 cm
 Doppia lastra di cemento rinforzato per uso esterno - sp. 1,25 cm x2
 Pannello di legno compensato e membrana traspirante - sp. 1,5 cm
 Pannello di legnomagnesite - sp. 2,5 cm
 Isolante termo semirigido di fibre di legno pressate - sp. 15 cm
 Pannello di legnomagnesite - sp. 2,5 cm
 Isolante termo semirigido di fibre di legno pressate - sp. 10 cm
 Pannello di legnomagnesite - sp. 2,5 cm
 Pannello di legno compensato con barriera al vapore - sp. 1,5 cm
 Isolante termo-acustico morbido di lana di roccia - sp. 15 cm
 Isolante termo-acustico morbido di lana di roccia - sp. 10 cm
 Travetto di legno - 5x6 cm
 Travetto di legno - 10x6 cm
 Isolante termo-acustico morbido di lana di roccia - sp. 5 cm
 Pannello di scaglie di legno orientate - sp. 2,5 cm
 Lastre in cemento rinforzato per uso esterno - sp. 1,25 cm
 Traversa della facciata continua vetro di alta qualità acustica e termica - sp. 4 cm



N 05

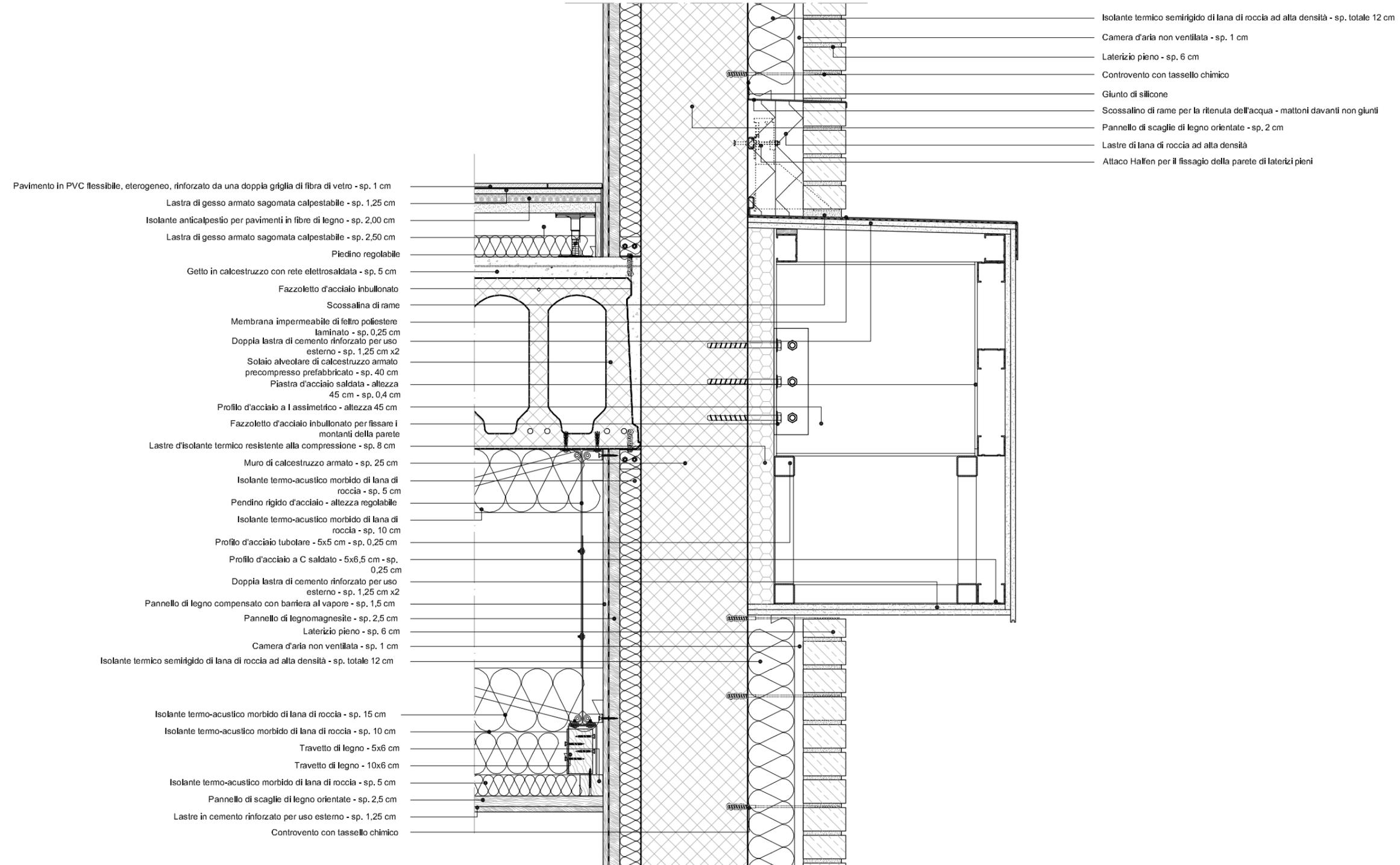
Pannello prefabbricato VIP inserito nella struttura della facciata
 Guida per le frangisole orientabili ed impacchettabili
 Isolante termo acustico di lana di roccia - sp. var.
 Fazzoletto d'acciaio inbullonato per fissare i montanti della parete
 Tavola di scaglie di legno orientate - sp. 2,5 cm
 Guarnizione di caucciù contro il rumore di calpestio
 Profilo a T d'acciaio
 Getto in calcestruzzo con rete elettrosaldata - sp. 5 cm
 Scossalina di rame
 Membrana impermeabile di feltro poliestere laminato - sp. 0,25 cm
 Doppia lastra di cemento rinforzato per uso esterno - sp. 1,25 cm x2
 Solaio alveolare di calcestruzzo amato precompresso prefabbricato - sp. 40 cm
 Piastra d'acciaio saldata - altezza 45 cm - sp. 0,4 cm
 Profilo d'acciaio a I asimmetrico - altezza 45 cm
 Fazzoletto d'acciaio inbullonato per fissare i montanti della parete
 Lastre di legnomagnesite e barriere al vento - sp. 8 cm
 Trave di calcestruzzo amato - 50x25 cm
 Isolante termo-acustico morbido di lana di roccia - sp. 5 cm
 Pendino rigido d'acciaio - altezza regolabile
 Isolante termo-acustico morbido di lana di roccia - sp. var.
 Profilo d'acciaio tubolare - 5x5 cm - sp. 0,25 cm
 Profilo d'acciaio a C saldato - 5x6,5 cm - sp. 0,25 cm
 Doppia lastra di cemento rinforzato per uso esterno - sp. 1,25 cm x2
 Pannello di legno compensato con membrana traspirante - sp. 1,5 cm
 Pannello di legnomagnesite - sp. 2,5 cm
 Isolante termo semirigido di fibre di legno pressate - sp. 15 cm
 Pannello di legnomagnesite - sp. 2,5 cm
 Isolante termo semirigido di fibre di legno pressate - sp. 10 cm
 Pannello di legnomagnesite - sp. 2,5 cm
 Pannello di legno compensato con barriera al vapore - sp. 1,5 cm
 Isolante termo-acustico morbido di lana di roccia - sp. 15 cm
 Isolante termo-acustico morbido di lana di roccia - sp. 10 cm
 Travetto di legno - 5x6 cm
 Travetto di legno - 10x6 cm
 Isolante termo-acustico morbido di lana di roccia - sp. 5 cm
 Pannello di scaglie di legno orientate - sp. 2,5 cm
 Lastre in cemento rinforzato per uso esterno - sp. 1,25 cm
 Traversa della facciata continua vetro di alta qualità acustica e termica - sp. 4 cm



50 cm

SCALA 1:10

N 06

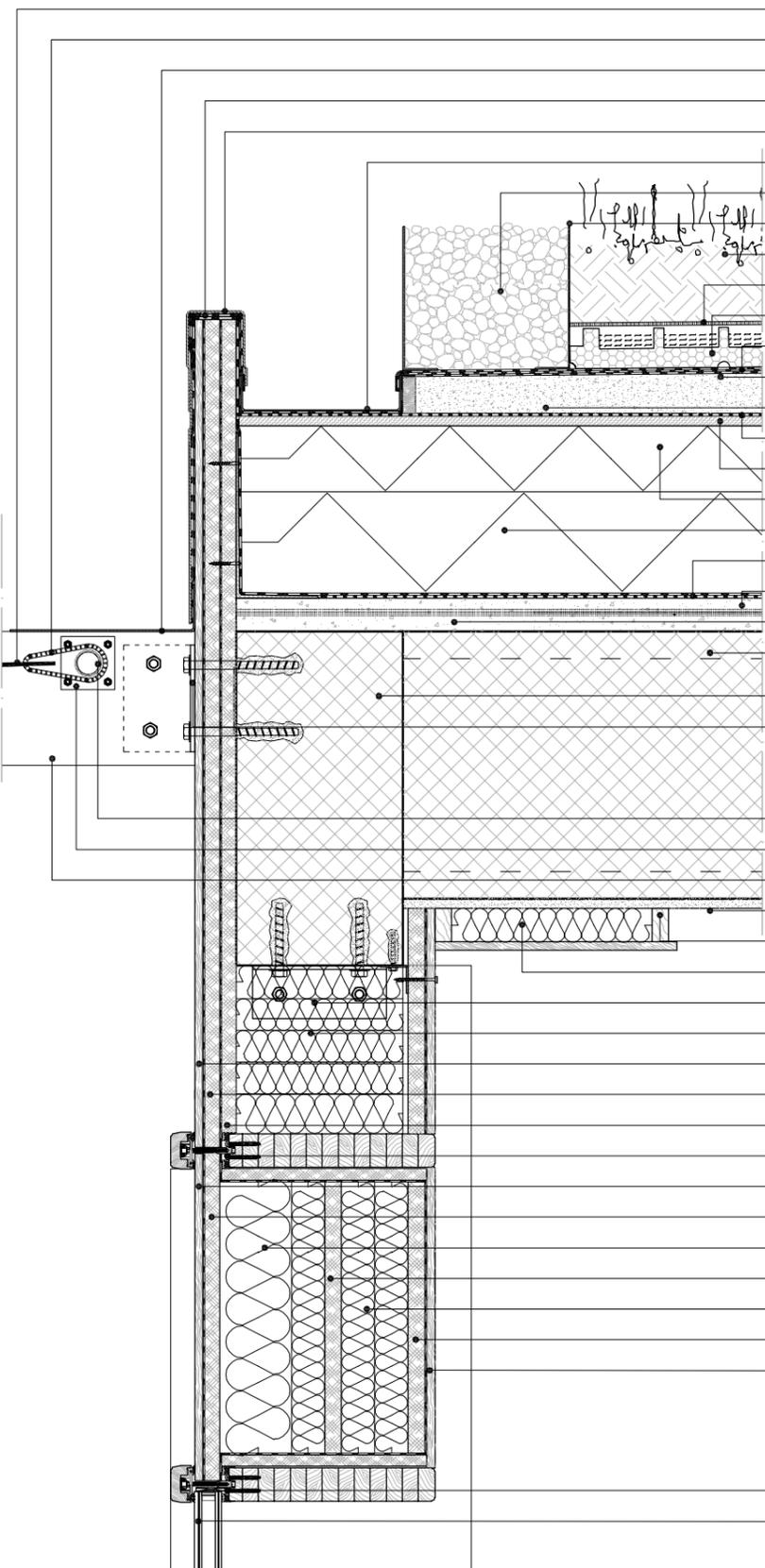


50 cm

SCALA 1:10

NODO 6

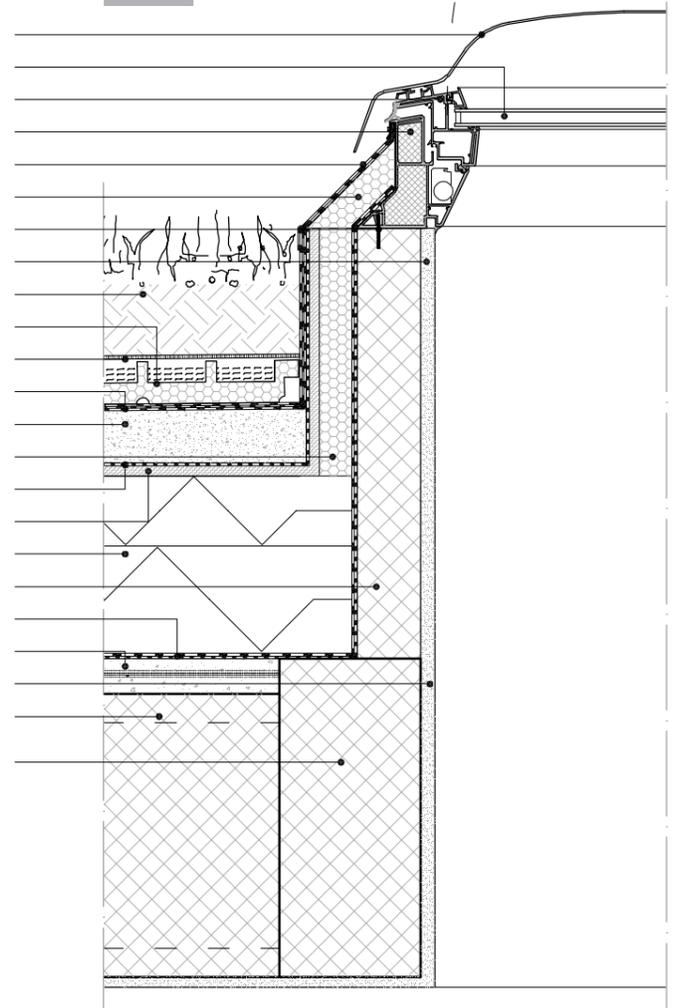
N 07



- Tello di nylon impermeabile semi trasparente - sp. 0,3 cm
- Aggancio polimerico tessile con membrane elastiche - diam. 0,75 cm
- Scossalina - sp. 0,25 cm
- Membrana impermeabile di feltro poliestere laminato - sp. 0,25 cm
- Scossalina di rame
- Profilo d'acciaio a U - 25x5 cm - sp. 0,25 cm
- Ghiaia
- Profilo a L d'acciaio - sp. 0,25 cm
- Sustrato - sp. min 8 cm
- Filltro - 1,30 cm
- Materasso di polistirene sagomato per il drenagio - sp. 6 cm
- Membrana Bituminosa Autoadesiva Rinforzata - sp. 9 mm
- Malta di livellamento con pendenza di 1% - sp. min 3 cm
- Isolante termico rigido resistente alla compressione - sp. 4,5 cm
- Feltro in polipropilene per il rinforzo e la protezione - sp. 0,2 cm
- Matrassino fonoisolante di polietilene - sp. 1,5 cm
- Isolante termico rigido di polistirene estruso - sp. 10 cm
- Isolante termico rigido di polistirene estruso - sp. 15 cm
- Barriera al vapore e feltro in propilene per il rinforzo e la protezione
- Getto in calcestruzzo con rete elettrosaldata - sp. 5 cm
- Intonaco in malta termoisolante - sp. 1,5 cm
- Solaio alveolare di calcestruzzo armato precompresso prefabbricato - sp. 40 cm
- Travetto di calcestruzzo tra 2 solai alveolari - 45x20 cm
- Fazzoletto d'acciaio inbullonato per il fissaggio della trave di legno lamellare
- Profilo d'acciaio tubolare - diametro 4 cm - sp. 0,25 cm
- Fazzoletto d'acciaio inbullonato per il fissaggio del tubolare alle travi
- Trave di legno lamellare - 20x5 cm
- Intonaco di malta termoisolante - sp. 1,5 cm
- Travetto di legno incollato - 5x2,5 cm
- Isolante termico semirigido di fibre di legno pressate incollato - sp. 5 cm
- Fazzoletto d'acciaio inbullonato per fissare i montanti della parete
- Isolante termico semirigido di fibre di legno pressate - sp. 15 cm
- Pannello di legno compensato e membrana traspirante - sp. 1,5 cm
- Pannello di legnomagnesite - sp. 2,5 cm
- Pannello di legnomagnesite con barriera al vapore - sp. 2,5 cm
- Traversa della facciata continua
- Pannello di legno compensato e membrana traspirante - sp. 1,5 cm
- Pannello di legnomagnesite - sp. 2,5 cm
- Isolante termo semirigido di fibre di legno pressate - sp. 15 cm
- Pannello di legnomagnesite - sp. 2,5 cm
- Isolante termo semirigido di fibre di legno pressate - sp. 10 cm
- Pannello di legnomagnesite - sp. 2,5 cm
- Pannello di legno compensato con barriera al vapore - sp. 1,5 cm
- Traversa della facciata continua
- vetro di alta qualità acustica e termica - sp. 4 cm

N 08

- Protezione contro i stagni d'acqua sul vetro
- Finestra ad alta prestazione acustica e termica
- Telaio mobile cupolino Velux
- Telaio fisso cupolino Velux
- Membrana Bituminosa Autoadesiva Rinforzata - sp. 3 mm
- Isolante termico rigido resistente alla compressione sagomato - sp. 6 cm
- Bulone di ancoraggio del telaio fisso del cupolino
- Intonaco di malta termoisolante - sp. 1,5 cm
- Sustrato - sp. min 8 cm
- Materasso di polistirene sagomato per il drenagio - sp. 6 cm
- Filltro - 1,30 cm
- Membrana Bituminosa Autoadesiva Rinforzata - sp. 9 mm
- Malta di livellamento con pendenza di 1% - sp. min 3 cm
- Isolante termico rigido resistente alla compressione - sp. 4,5 cm
- Feltro in polipropilene per il rinforzo e la protezione - sp. 0,2 cm
- Matrassino fonoisolante di polietilene - sp. 1,5 cm
- Isolante termico rigido di polistirene estruso - sp. 10 cm + 15 cm
- Setto di calcestruzzo armato - sp. 10 cm
- Barriera al vapore e feltro in propilene per il rinforzo e la protezione
- Getto in calcestruzzo con rete elettrosaldata - sp. 5 cm
- Intonaco di malta termoisolante - sp. 1,5 cm
- Solaio alveolare di calcestruzzo armato precompresso prefabbricato - sp. 40 cm
- Travetto di calcestruzzo tra 2 solai alveolari - 45x20 cm

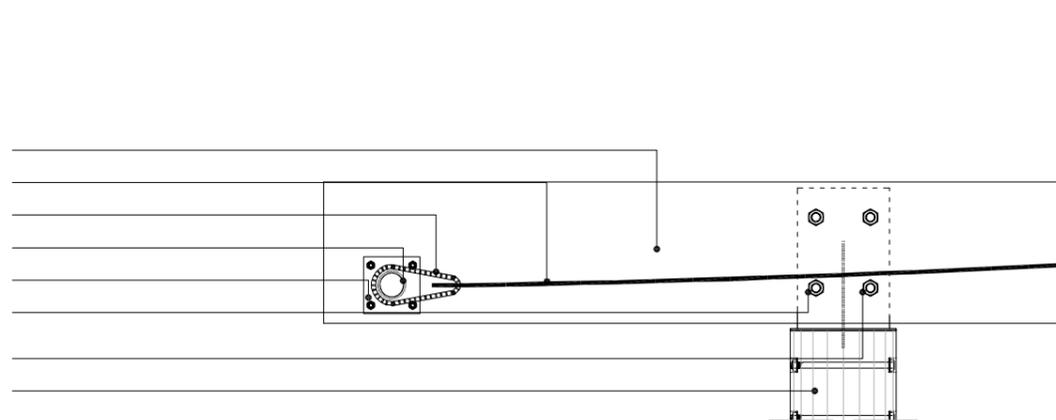


50 cm

SCALA 1:10

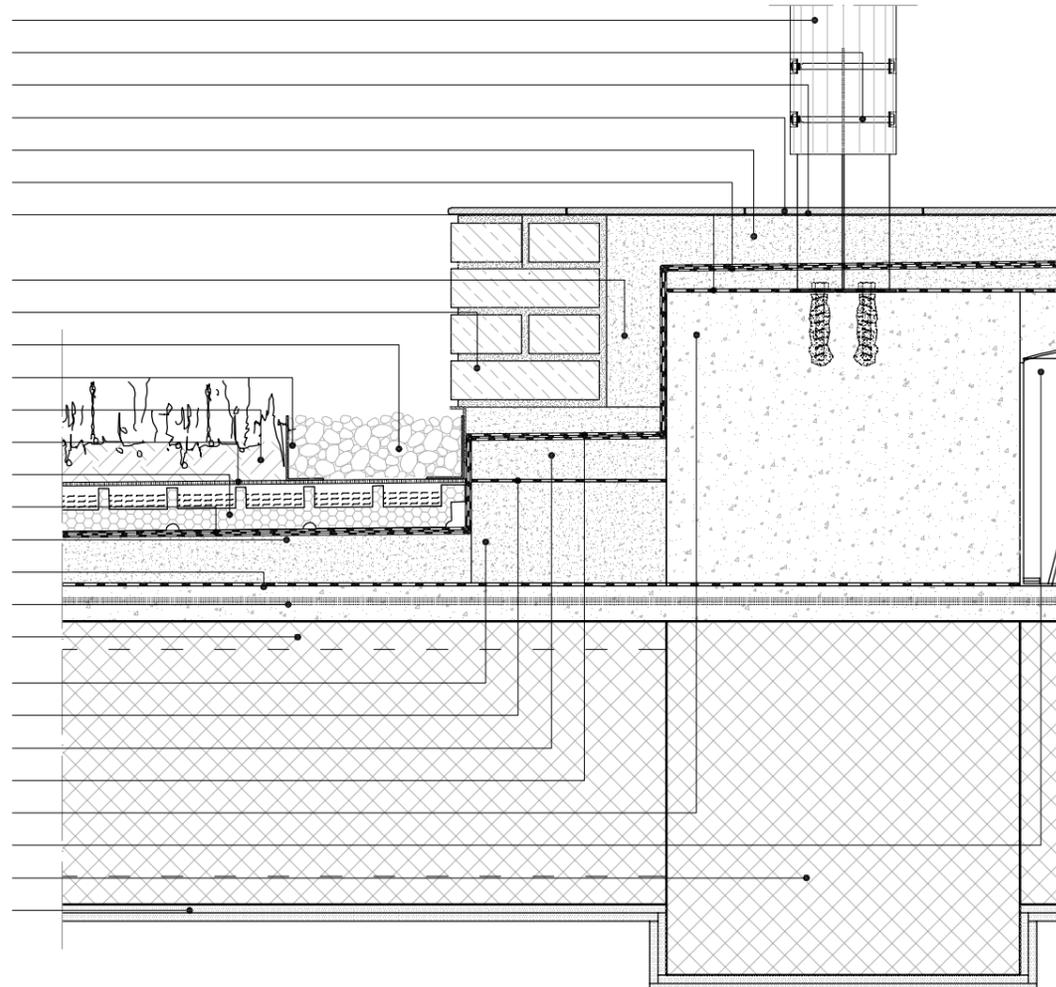
N 11

- Trave di legno lamellare - 20x5 cm
- Tello di nylon impermeabile semi trasparente - sp. 0,3 cm
- Aggancio polimerico tessile - diam. 0,75 cm
- Profilo d'acciaio tubolare - diametro 4 cm - sp. 0,25 cm
- Fazzoletto d'acciaio imbullonato per il fissaggio del tubolare alle travi
- Fazzoletto d'acciaio sagomato imbullonato per fissaggio della trave al pilastro
- Bullone di ancoraggio del pilastro di legno al fazzoletto
- Pilastro di legno - diametro 15 cm



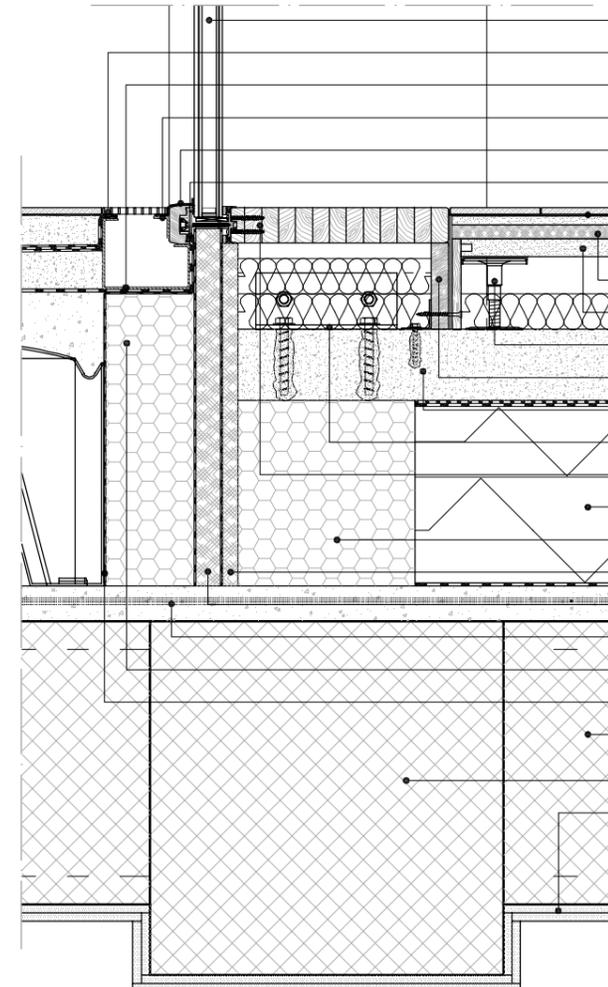
N 09

- Pilastro di legno - diametro 15 cm
- Bullone di ancoraggio del pilastro di legno al fazzoletto
- Fazzoletto d'acciaio sagomato imbullonato in un seto di cls armato
- Pavimento con finitura tipo gres incollato - sp. 1 cm
- Malta di livellamento - sp. min 3 cm
- Membrana Bituminosa Autoadesiva Rinforzata - sp. 9 mm
- Feltro in polipropilene per il rinforzo e la protezione
- Getto di calcestruzzo debole armato
- Laterizio pieno - sp. 6 cm
- Ghiaia
- Profilo a L d'acciaio - sp. 0,25 cm
- Sustrato
- Filltro - 1,30 cm
- Materasso di polistirene sagomato per il drenaggio - sp. 6 cm
- Membrana Bituminosa Autoadesiva Rinforzata - sp. 9 mm
- Malta di livellamento con pendenza di 1% - sp. min 3 cm
- Feltro in polipropilene per il rinforzo e la protezione - sp. 0,2 cm
- Getto di calcestruzzo con rete elettrosaldata - sp. 5 cm
- Solaio alveolare di calcestruzzo armato precompresso prefabbricato - sp. 40 cm
- Getto di calcestruzzo debole armato
- Feltro in polipropilene per il rinforzo e la protezione
- Getto di calcestruzzo debole armato
- Membrana Bituminosa Autoadesiva Rinforzata - sp. 9 mm
- Getto di calcestruzzo con rete elettrosaldata
- Cassero da perdere - altezza 35 cm
- Trave di calcestruzzo armato - 50x50 cm
- Doppia Lastra di calcio silicato idrato rinforzato con fibre di cellulosa ed additivi inorganici REI 120 - sp. 1,2 cm + 1,2 cm



N 10

- vetro di alta qualità acustica e termica - sp. 4 cm
- Griglia d'acciaio - sp. 1 cm
- Profilo d'acciaio piegato - sp. 0,25 cm
- Profilo d'acciaio a L - sp. 0,25 cm
- Giunto di silicone
- Coprivetro di legno
- Pavimento in PVC flessibile - sp. 1 cm
- Lastra di gesso armato sagomata calpestabile - sp. 1,25 cm
- Isolante anticalpestio per pavimenti in fibre di legno - sp. 2,00 cm
- Lastra di gesso armato sagomata calpestabile - sp. 2,50 cm
- Piedino regolabile
- Tavola di legno - sp. 2,5 cm
- Malta di livellamento - sp. 10,00 cm
- Fazzoletto d'acciaio imbullonato per fissare i montanti della parete
- Traversa della facciata continua
- Isolante termico rigido di polistirene estruso - sp. 10 cm + 15 cm
- Isolante termico rigido resistente a compressione - sp. 25 cm
- Pannello di legnomagnesite con barriera al vapore - sp. 2,5 cm
- Pannello di legnomagnesite e membrana traspirante - sp. 3,5 cm
- Getto di calcestruzzo con rete elettrosaldata - sp. 5 cm
- Isolante termico rigido resistente a compressione - sp. 10 cm
- Membrana impermeabile di feltro poliestere laminato
- Solaio alveolare di calcestruzzo armato precompresso prefabbricato - sp. 40 cm
- Trave di calcestruzzo armato - 50x50 cm
- Doppia Lastra di calcio silicato idrato rinforzato con fibre di cellulosa ed additivi inorganici REI 120 - sp. 1,2 cm + 1,2 cm



50 cm

SCALA 1:10

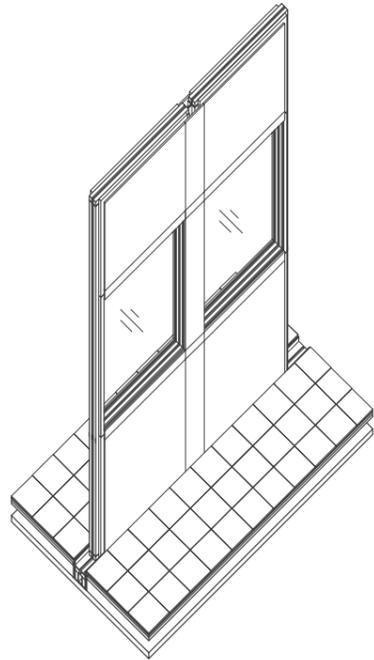
E. LA PARETE SMONTABILE

1. SCHEMA DI MONTAGGIO

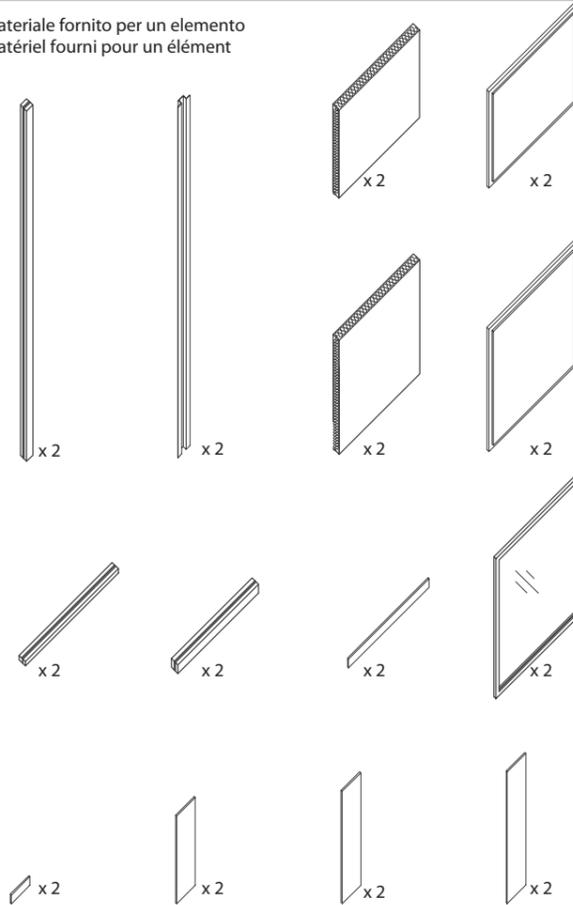
TAVOLA VIII-22

PĂRÊTE SMÖNTĂBILE

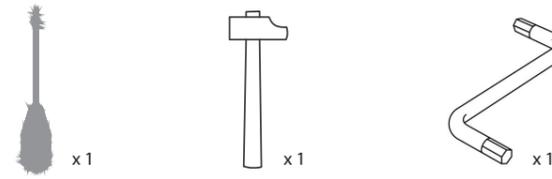
Italiano
Français



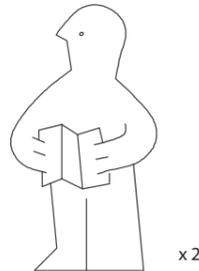
Materiale fornito per un elemento
Matériel fourni pour un élément



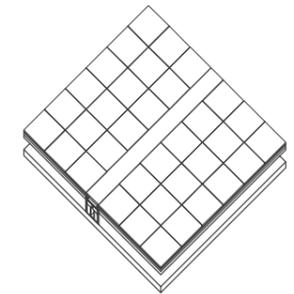
Atrezzi necessari
Outils nécessaires



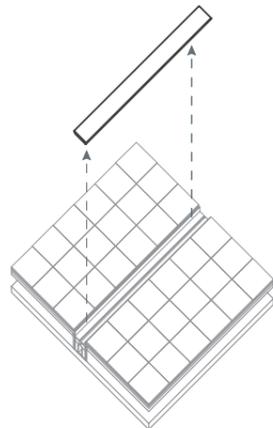
Numero di persone necessarie
Nombre de personnes nécessaires



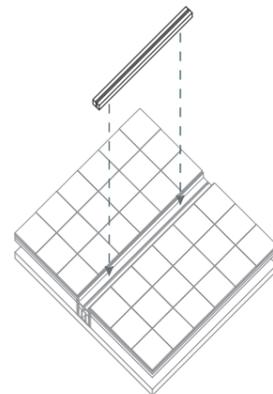
0 - Situazione iniziale
0 - Situation d'origine



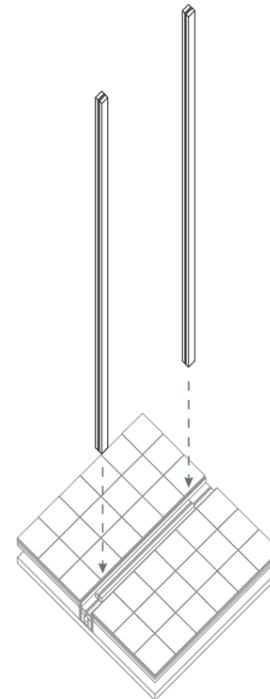
1 - Smontaggio della protezione
1 - Démontage de la protection



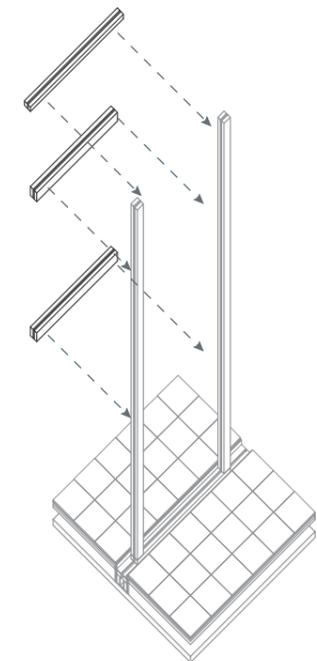
2 - Installazione della traversa di base
2 - Installation de la traverse de base



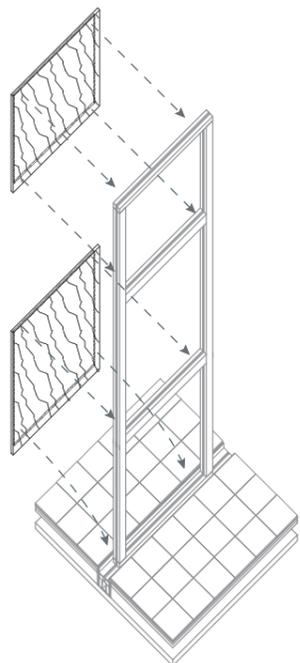
3 - Installazione dei montanti
3 - Installation des montants



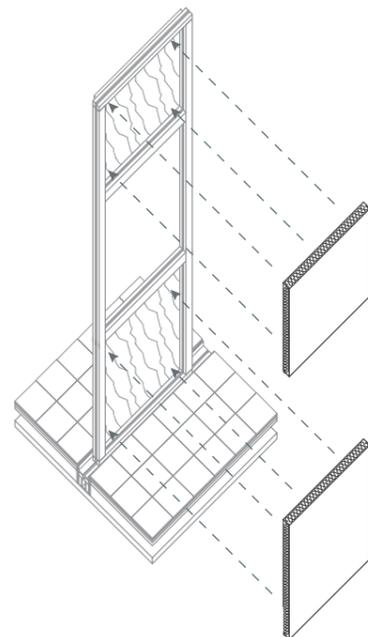
4 - Installazione delle traverse mancanti
4 - Installation des traverses manquantes



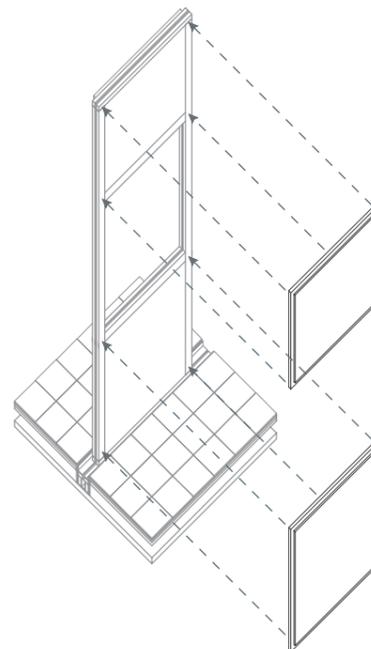
5 - Montagio dei tamponamenti opachi su un lato
5 - Montage des tamponnements opaques d'un côté



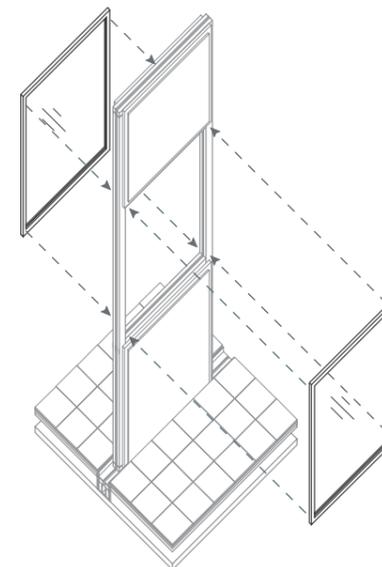
6 - Installazione dello strato d'isolante acustico
6 - Installation de la couche d'isolant acoustique



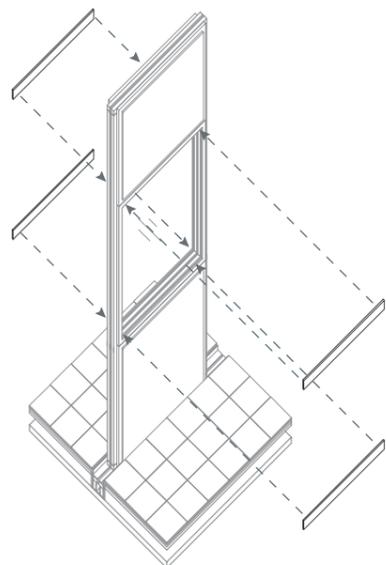
7 - Montagio dei tamponamenti opachi sull'ultimo lato
7 - Montage des tamponnements opaques sur le dernier côté



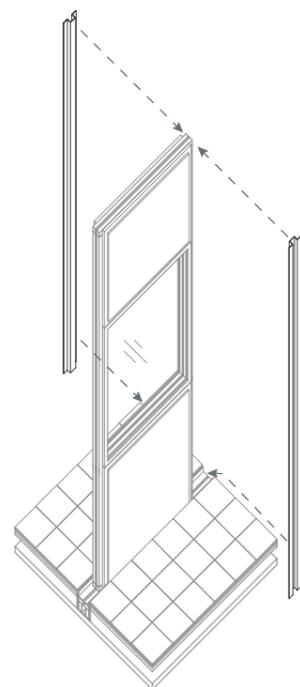
8 - Fissaggio delle parti vetrate
8 - Fixage des parties vitrées



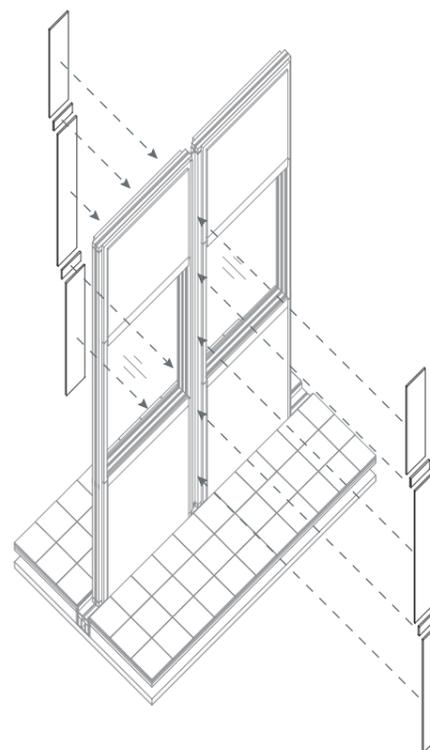
9 - Installazione delle protezioni orizzontali
9 - Installation des protections horizontales



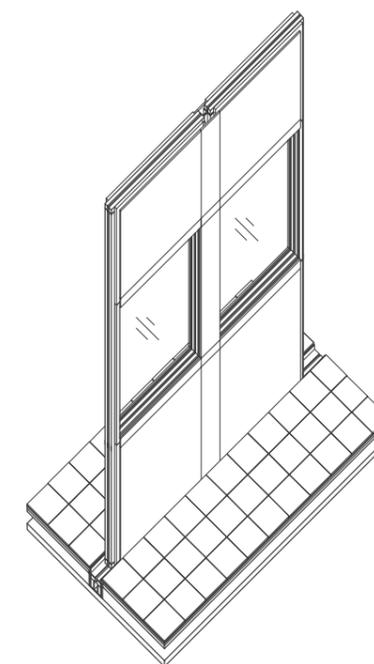
10 - Installazione dei profili guida a omega
10 - Installation des profils guides oméga



11 - Dopo montaggio di un elemento accanto - installazione protezioni verticali
11 - Après montage d'élément voisin - installation des protections verticales



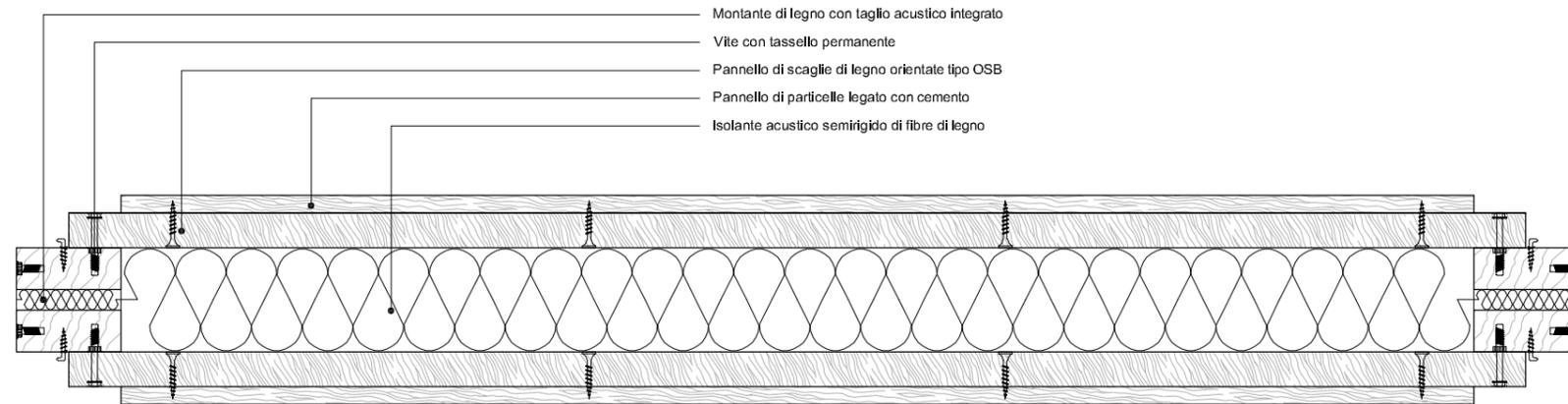
12 - Situazione finale
12 - Situation finale



2. DETTAGLI TECNOLOGICI

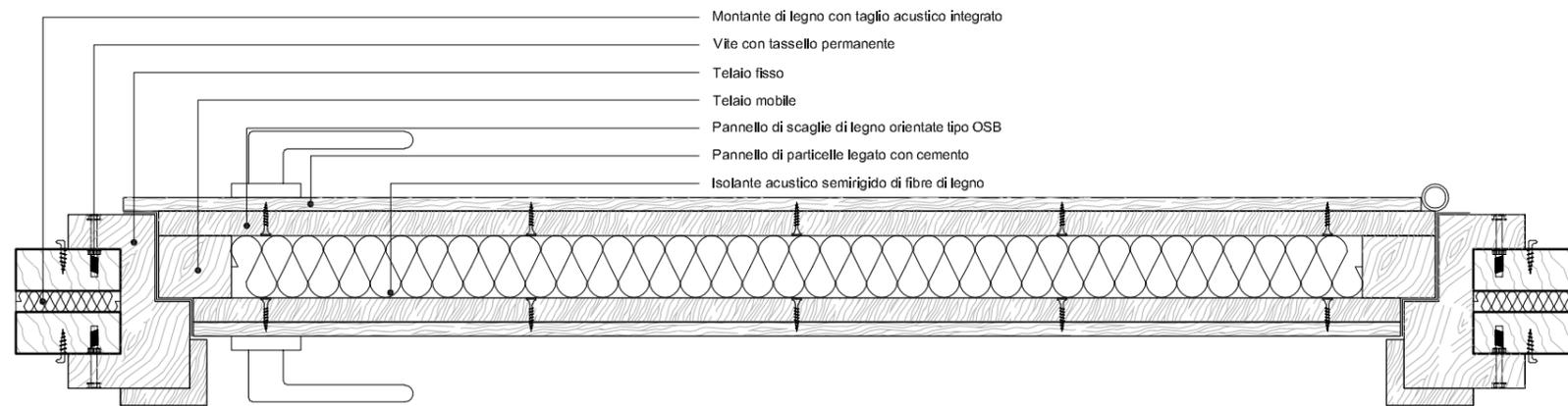
TAVOLA VIII-24

Presentazione della parete smontabile e spostabile per la flessibilità delle platee destinata allo svolgimento delle attività di studio.



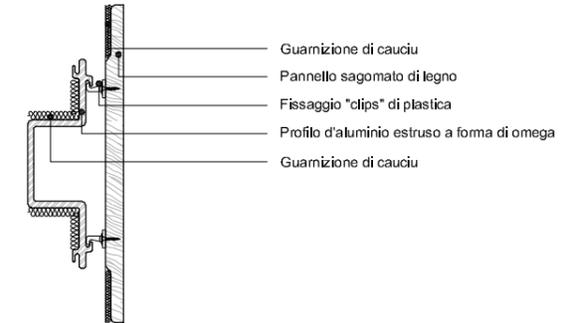
SCALA 1:5

ELEMENTO PIENO MODULARE COSTRUITO IN SITU CON ELEMENTI PRESAGOMATI VISTO IN PIANTA



SCALA 1:5

ILLUSTRAZIONE DELLA MESSA IN OPERA DI UNA PORTA VISTA IN PIANTA



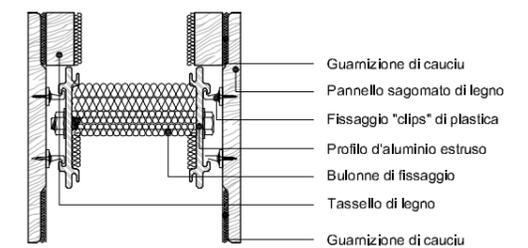
SCALA 1:5

PROTEZIONE SAGOMATA DELLE GIUNZIONE TRA DUE PARETI A 180 GRADI



SCALA 1:5

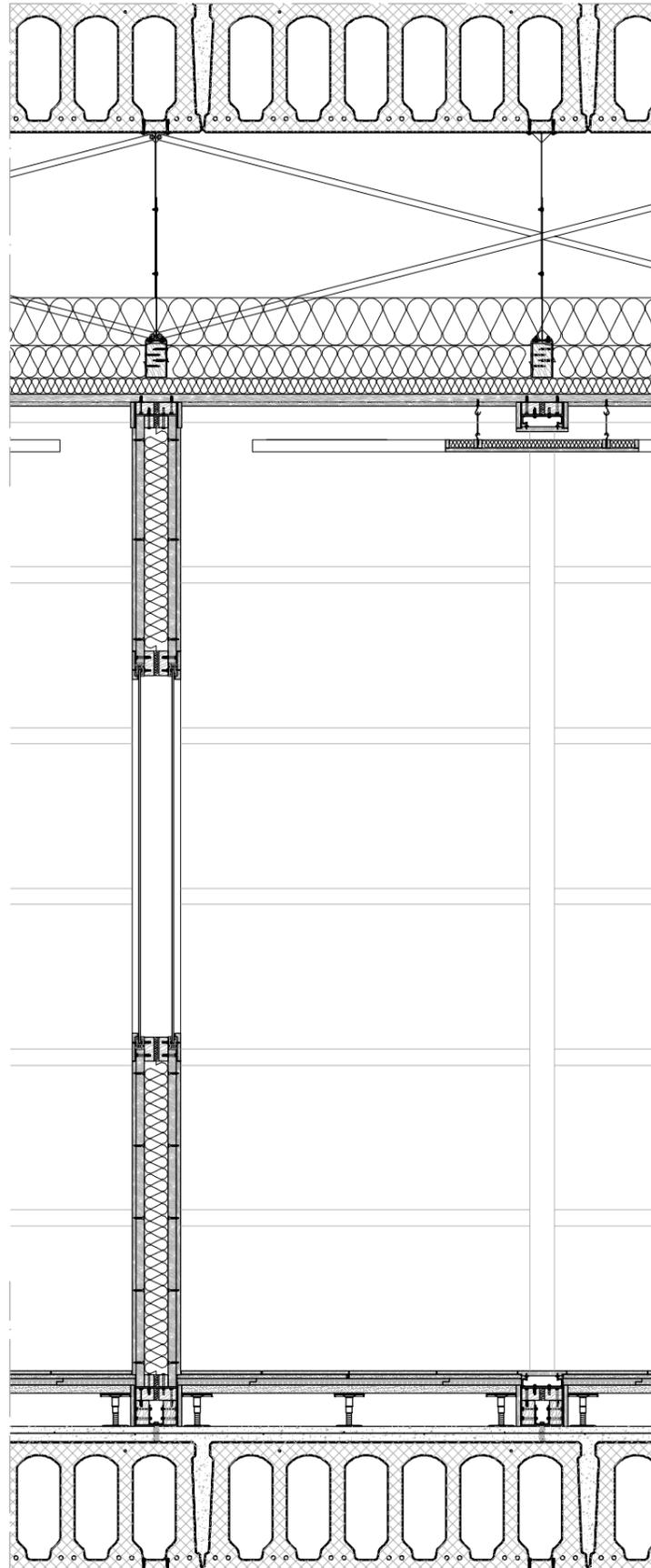
SPIGOLO PER LA PROTEZIONE DI UNA GIUNZIONE TRA 2 PARETI A 90 GRADI VISTA IN PIANTA



SCALA 1:5

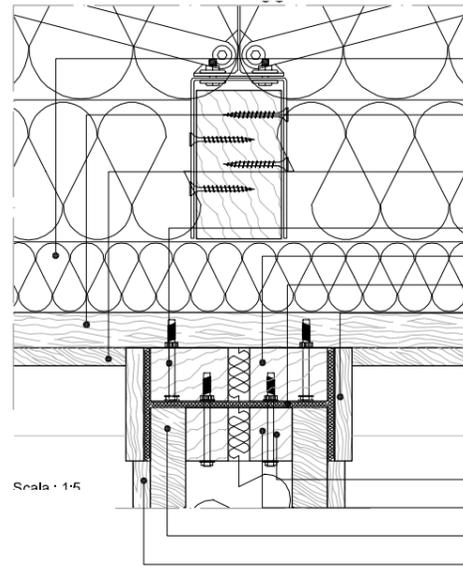
GIUNZIONE TRA QUALSIASI ELEMENTO VERTICALE DELLA PARETE E UN MONTANTE DELLA FACCIATA CONTINUA VISTA IN PIANTA

Presentazione della parete smontabile e spostabile per la flessibilità delle platee destinata allo svolgimento delle attività di studio.



SCALA 1:20

ILLUSTRAZIONE DELLA MESSA IN OPERA DI UNA PORTA

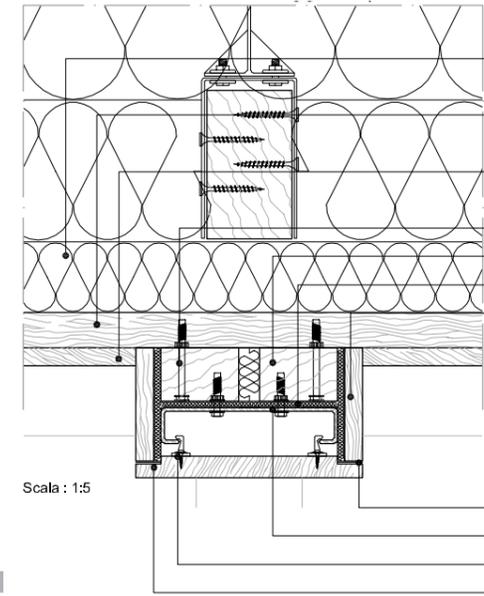


Scala : 1:5

SCALA 1:5

PARTICOLARE DELL'ANCORAGGIO CONTRO IL CONTROSOFFITTO

- Isolante acustico morbido di lana li roccia
- Pannello di scaglie di legno orientate tipo OSB
- Pannello di particelle legato con cemento
- Vite con tassello permanente
- Traversa di legno
- Guarnizione di caucciù
- Pannello sagomato di legno
- Vite con tassello permanente
- Traverso di legno con taglio acustico
- Pannello di scaglie di legno orientate tipo OSB
- Pannello di particelle legato con cemento

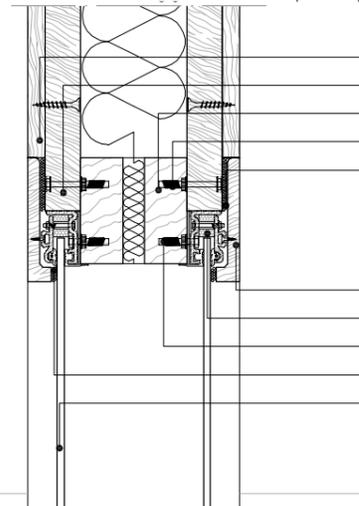


Scala : 1:5

SCALA 1:5

PERMANENZA DELL'ANCORAGGIO SUPERIORE

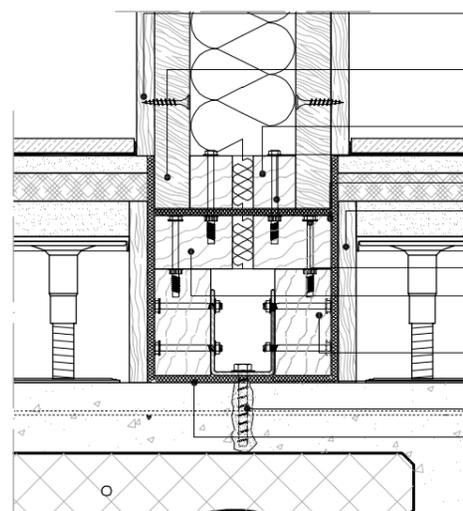
- Isolante acustico morbido di lana li roccia
- Pannello di scaglie di legno orientate tipo OSB
- Pannello di particelle legato con cemento
- Vite con tassello permanente
- Traversa di legno
- Guarnizione di caucciù
- Pannello sagomato di legno
- Guarnizione di caucciù
- Profilo a C
- Fissaggio "clips" di plastica
- Pannello sagomato di legno



SCALA 1:5

PARTICOLARE DELL'ANCORAGGIO TRA UNA PARTE PIENA E UNA VETRATA

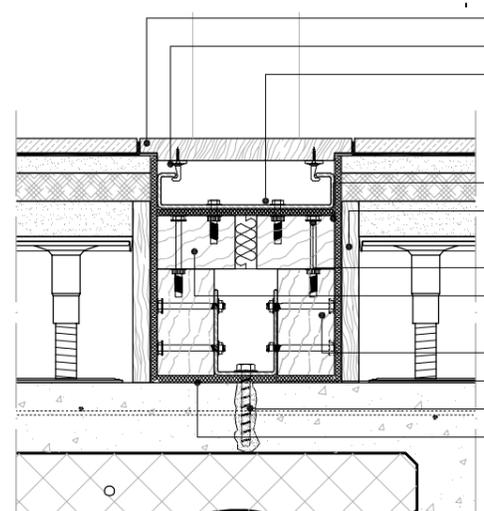
- Pannello di particelle legato con cemento
- Pannello di scaglie di legno orientate tipo OSB
- Traverso di legno con taglio acustico
- Vite con tassello permanente
- Guarnizione di caucciù
- Pannello sagomato di legno
- Telaio per il vetro in alluminio estruso
- Vite con tassello permanente
- Guarnizione di caucciù
- Vetro



SCALA 1:5

PARTICOLARE DELL'ANCORAGGIO ALLA BASE

- Pannello di particelle legato con cemento
- Pannello di scaglie di legno orientate tipo OSB
- Traverso di legno con taglio acustico
- Vite con tassello permanente
- Guarnizione di caucciù
- Pannello di legno
- Vite con tassello permanente
- Traverso di legno con taglio acustico
- Traverso di legno
- Profilo d'acciaio a U
- Vite e tassello chimico
- Guarnizione di caucciù

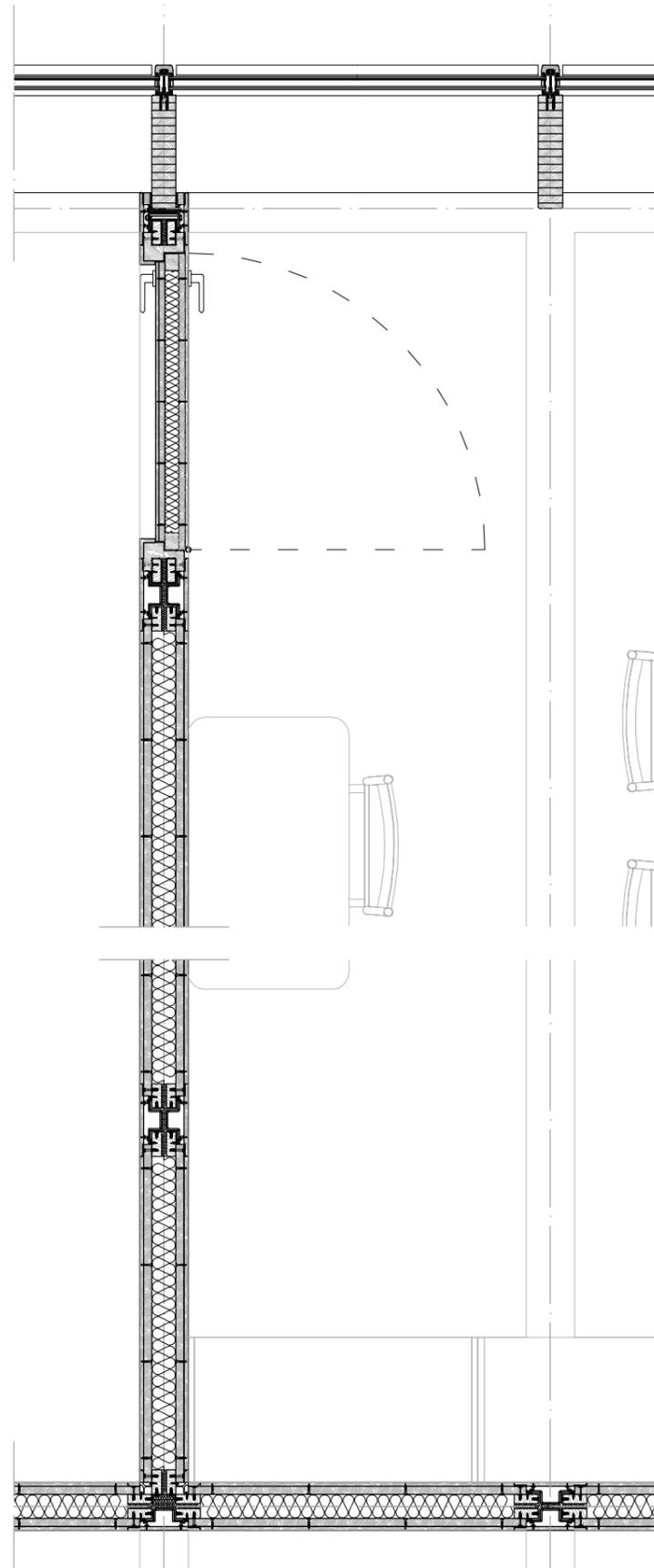


SCALA 1:5

PERMANENZA DELLA BASE IN ASSENZA DELLA PARETE

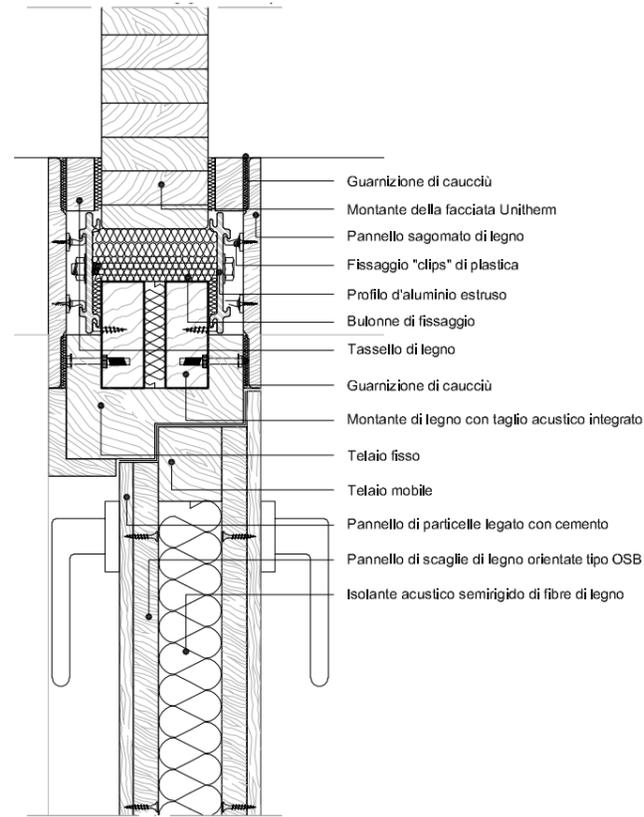
- Pannello sagomato di legno
- Fissaggio "clips" di plastica
- Profilo a C
- Guarnizione di caucciù
- Pannello di legno
- Vite con tassello permanente
- Traverso di legno con taglio acustico
- Traverso di legno
- Profilo d'acciaio a U
- Vite e tassello chimico
- Guarnizione di caucciù

Presentazione della parete smontabile e spostabile per la flessibilità delle platee destinata allo svolgimento delle attività di studio.



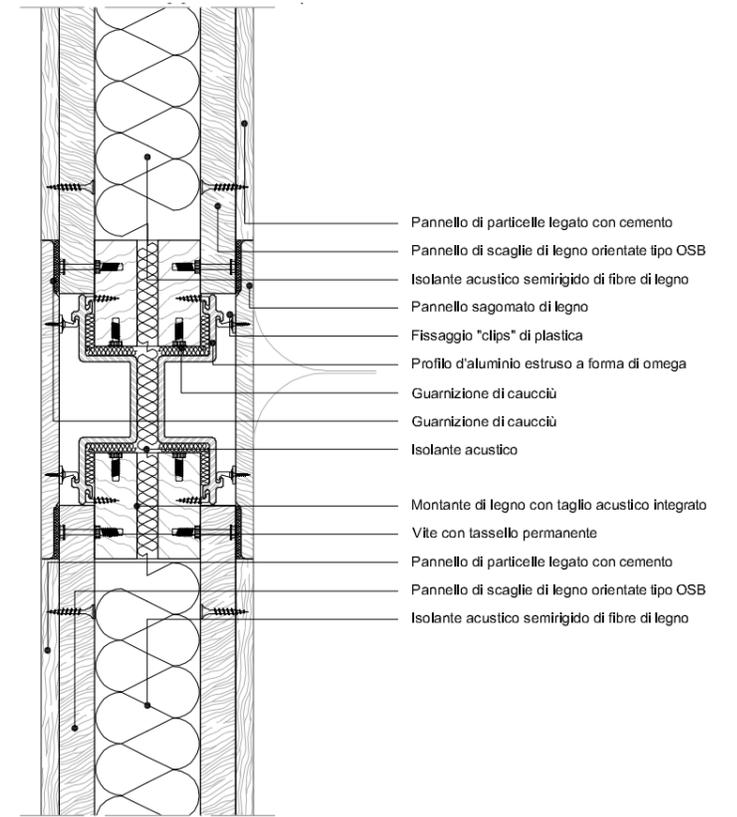
SCALA 1:20

CAMPIONE DI UNA PIANTA TIPO DI UNA PARETE



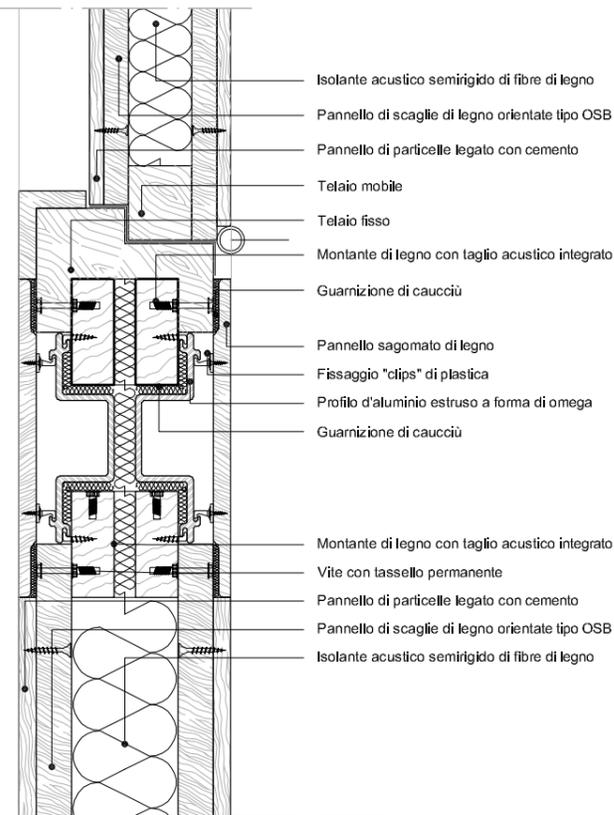
SCALA 1:5

PARTICOLARE DELL'ANCORAGGIO ALLA FACCIATA CONTINUA



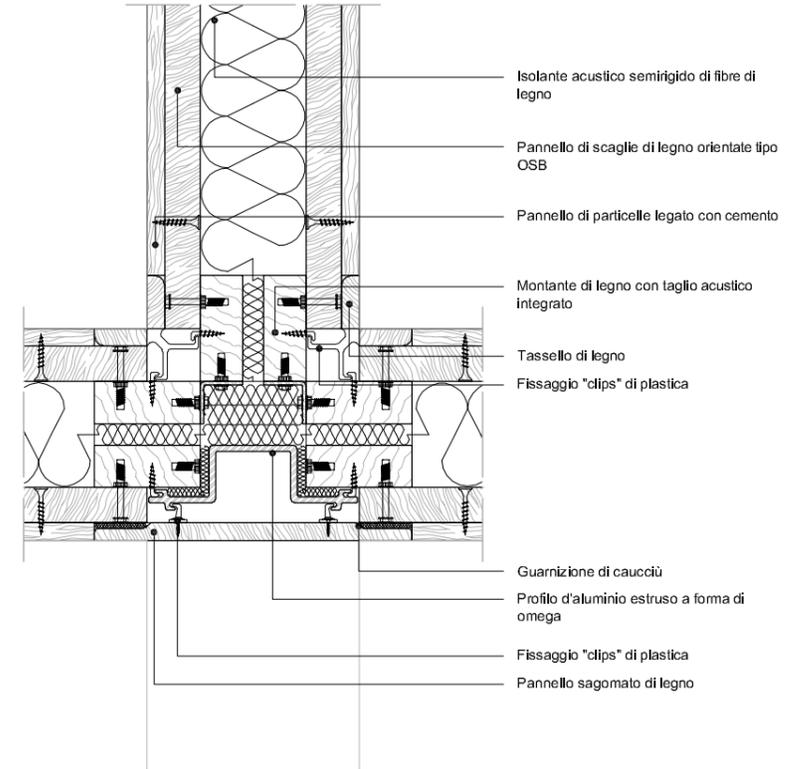
SCALA 1:5

PERMANENZA DELL'ANCORAGGIO TRA DUE PARETI STANDARD



SCALA 1:5

PARTICOLARE DELL'ANCORAGGIO TRA UNA PARETE E UNA PORTA



SCALA 1:5

PARTICOLARE DELL'ANCORAGGIO TRA 3 PARETI STANDARD

VIII. PROGETTO STRUTTURALE

Ci concentriamo per la fattibilità di un tale edificio al livello strutturale sul blocco centrale. Infatti i nostri blocchi essendo di dimensioni assai simili, e usando sempre le stesse tecnologie, lo studio qui eseguito potrà essere facilmente riapplicato alle altre parti del progetto.

L'edificio presenta una struttura mista in calcestruzzo gettato in opera e in calcestruzzo precompresso preteso.

La controventatura nord-sud viene garantita dai due enormi setti di calcestruzzo armato collocati ai due lati est e ovest dell'edificio. La controventatura est-ovest è più complicata da gestire perché l'architettonico del progetto non consente l'inserimento di un muro di controventatura. Per risolvere tale problema, abbiamo deciso di inserire dei pilastri più larghi e di effettuare le necessarie verifiche alla flessione per tali pilastri.

L'edificio collocandosi nella zona dell'agglomerazione parigina, nessun fenomeno sismico tale da richiedere delle verifiche ed una progettazione apposite esiste.

A. DESCRIZIONE DELLA STRUTTURA STUDIATA

353

B. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI

355

1. MATERIALI IMPIEGATI PER GLI ELEMENTI GETTATI IN OPERA

355

a. Per i pilastri a sezione rettangolare, i setti portanti ed i plinti di fondazione

355

b. Per i pilastri cerchiati e le travi longitudinali orientate est - ovest

356

2. MATERIALI IMPIEGATI PER GLI ELEMENTI PRECOMPRESSI PRETESI

357

C. ANALISI DEI CARICHI

359

1. CARICHI PERMANENTI

359

a. Esempio di calcolo per una chiusura verticale

359

b. Esempio di calcolo per una partizione verticale

361

c. Esempio di calcolo per una chiusura orizzontale

362

d. Esempio di calcolo per una partizione orizzontale

364

e. Riepilogo dei carichi permanenti per tutte le stratigrafie

365

f. Carichi finali perimetrali e interni permanenti

366

2. CARICHI VARIABILI E DI ESERCIZIO

366

a. Carichi di esercizio

366

b. Azione del Vento

366

c. Azione della neve

367

d. Valore finali usati nei calcoli massimizzando le possibilità di carico

367

D. DIMENSIONAMENTO DEI SOLAI

368

1. PREMESSA

368

2. VERIFICA DELL'ELEMENTO IN OPERA CON LA SOLETTA COLLABORANTE

370

a. Analisi delle sollecitazioni

370

b. Carichi

370

c. Sezione di progetto (ascisse x dall'incastro)

371

d. Calcolo delle componenti agenti

371

e. Caratteristiche dei materiali

371

f. Verifica delle tensioni

372

g. Verifica di resistenza

377

3. VERIFICA DELL'ELEMENTO PREFABBRICATO NON IN

OPERA 381

a. Analisi delle sollecitazioni 381

b. Verifica delle tensioni 382

E. DIMENSIONAMENTO E VERIFICA DELLE TRAVI LONGITUDINALI

387

1. PREMESSA

387

2. ANALISI DEL TELAIO

387

a. Premessa

387

b. Calcolo del telaio su semplice appoggio

388

c. Calcolo dei tagli massimi V_1 e V_8

393

d. Calcolo dei momenti massimi $X1$ e $X8$

396

e. Risultati finali dei momenti agenti e dei tagli agenti di calcolo

396

f. Predimensionamento dei ferri longitudinali

397

g. Predimensionamento dei ferri trasversali

398

3. VERIFICA DEL COMPORTAMENTO DELLA TRAVE IN ESERCIZIO

399

a. Verifica del comportamento in esercizio della trave sottomessa alle sollecitazioni flessionali

399

b. Verifica del comportamento in esercizio della trave sottomessa alle sollecitazioni di taglio

400

4. VERIFICA DEL COMPORTAMENTO A ROTTURA

401

a. Verifica della resistenza al momento flettente

401

b. Verifica della resistenza al taglio

401

F. DIMENSIONAMENTO E VERIFICA DEI PILASTRI SUD

403

1. PREMESSA

403

2. VERIFICA A COMPRESSIONE CENTRATA

403

3. VERIFICA DEI PILASTRI DI BORDO ALLA PRESSOFLESSIONE

405

a. Analisi delle sollecitazioni per il pilastro 1

405

b. Analisi del telaio semplificato

407

c. Risultati degli sforzi normali e dei momenti agenti a rottura ed in esercizio

408

d. Verifiche di esercizio

412

e. Verifiche a rottura

416

G. DIMENSIONAMENTO E VERIFICA DEI PILASTRI NORD

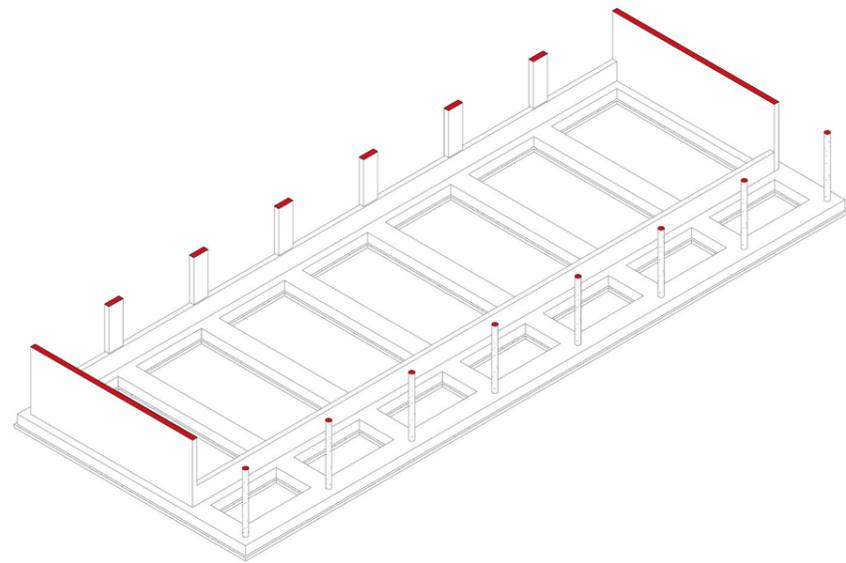
419

| | |
|---|------------|
| 1. PREMESSA | 419 |
| 2. VERIFICA ALLA COMPRESSIONE CENTRATA | 420 |
| a. <i>Analisi dei carichi</i> | 420 |
| b. <i>Verifica della resistenza a rottura per compressione centrata</i> | 421 |
| c. <i>Verifica del buon rispetto dei criteri costruttivi</i> | 422 |
| 3. VERIFICA A FLESSIONE DOVUTA ALL'AZIONE DEL VENTO | 422 |
| a. <i>Premessa</i> | 422 |
| b. <i>Analisi del telaio</i> | 424 |
| c. <i>Determinazione dei momenti agenti e dei tagli agenti massimi a rottura</i> | 426 |
| d. <i>Determinazione del braccio interno equivalente dei ferri tesi e compressi all'interno di ciascun sezione del pilastro</i> | 428 |
| e. <i>Verifiche di resistenza</i> | 430 |
| f. <i>Resistenza al momento flettente</i> | 430 |
| g. <i>Resistenza al taglio</i> | 431 |
| H. SCHEMI ESECUTIVI | 433 |
| 1. SOLAIO | 433 |
| 2. TRAVE | 435 |
| 3. PILASTRI | 437 |
| 4. SEZIONE TRASVERSALE E ELEMENTI SPECIFICI | 439 |
| 5. PIANTE STRUTTURALE | 441 |

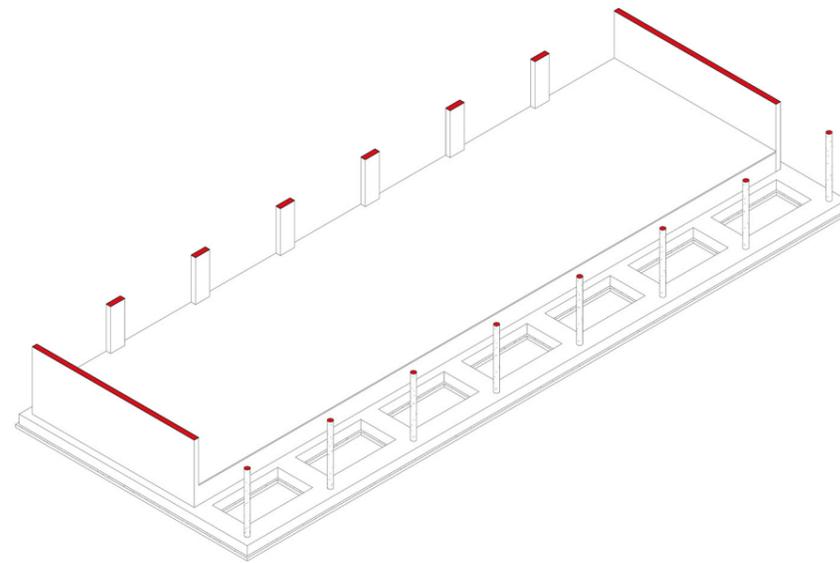
A. DESCRIZIONE DELLA STRUTTURA STUDIATA

TAVOLA IX-1

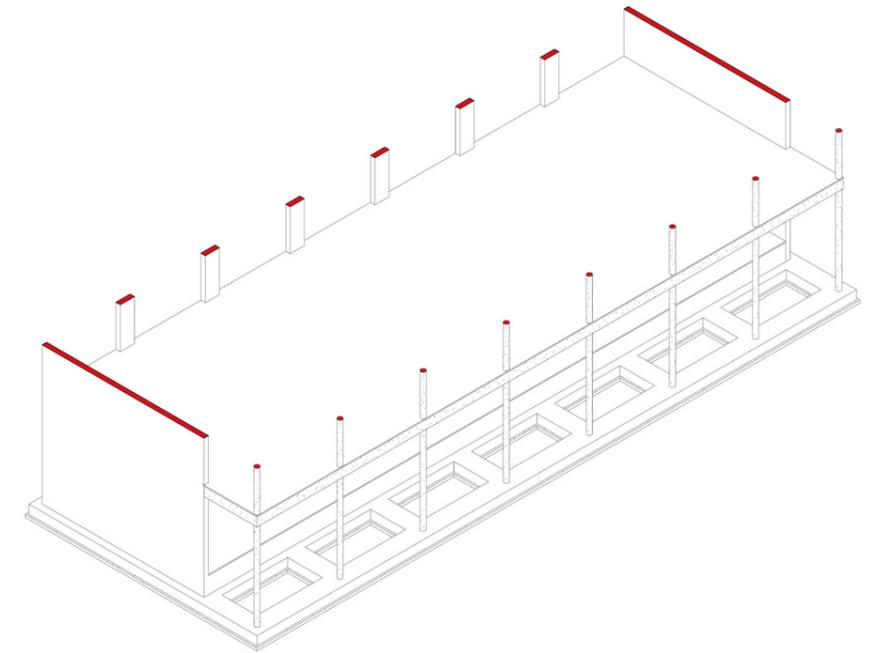
I cinque spaccati strutturali seguenti permettono di capire la struttura in studio che si limita alla zona centrale del polo insegnamento che si sviluppa su un'altezza di tre piani



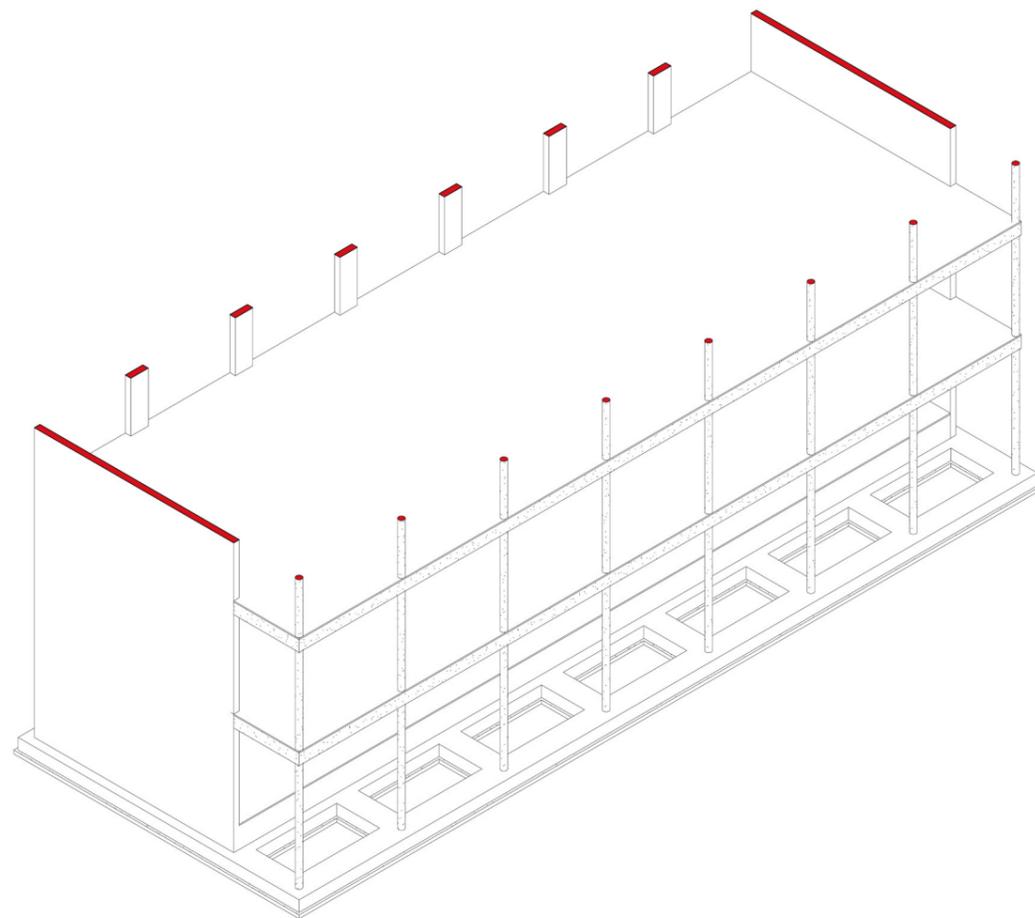
FONDAZIONI



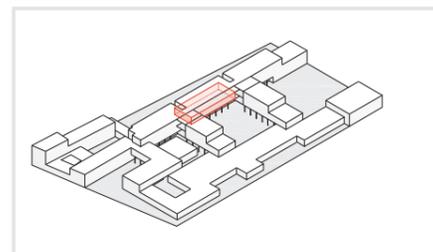
PIANO TERRA



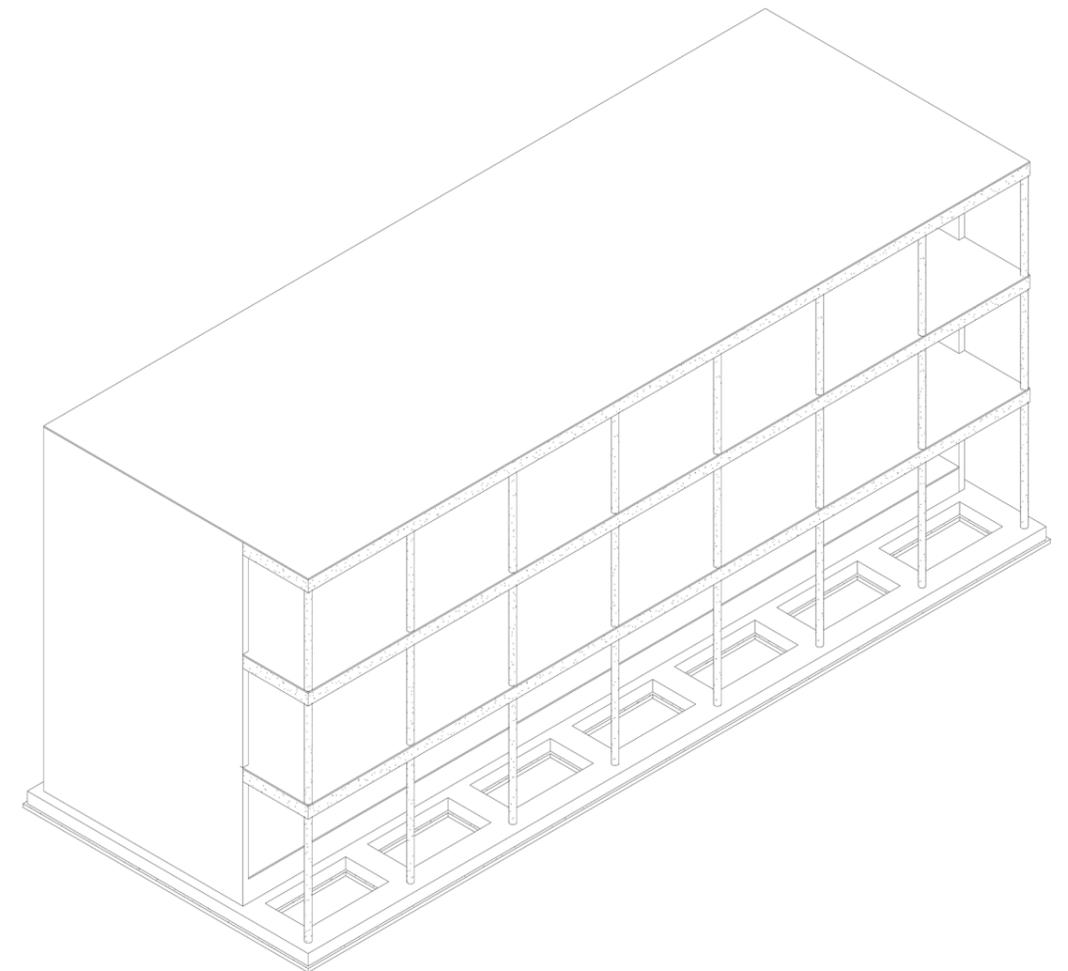
PRIMO PIANO



SECONDO PIANO



NAVIGATORE



COPERTURA

B. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI

1. MATERIALI IMPIEGATI PER GLI ELEMENTI GETTATI IN OPERA

a. Per i pilastri a sezione rettangolare, i setti portanti ed i plinti di fondazione

| Nome | Notazione | Valore | Unità |
|--|-------------------------|----------|-------------------|
| Resistenza cubica media a compressione | R_{cm} | 51,80 | N/mm ² |
| Resistenza a compressione | f_c | 43,00 | N/mm ² |
| Resistenza caratteristica | f_{ck} | 35,00 | N/mm ² |
| Resistenza di calcolo a compressione | f_{cd} | 19,83 | N/mm ² |
| Resistenza indefinita | f_{cl} | 16,86 | N/mm ² |
| Resistenza di calcolo ridotta | f_{c2} | 9,92 | N/mm ² |
| Resistenza per compressione centrata | f'_{cl} | 13,49 | N/mm ² |
| Resistenza ammissibile in esercizio | $\underline{\sigma}_c$ | 15,75 | N/mm ² |
| Resistenza per compressione centrata | $\underline{\sigma}'_c$ | 11,03 | N/mm ² |
| Valore medio della resistenza a trazione | f_{ctm} | 3,07 | N/mm ² |
| Resistenza caratteristica a trazione | f_{ctk} | 2,15 | N/mm ² |
| Modulo Elastico | E_{cm} | 28300,00 | N/mm ² |
| Modulo Elastico | E_c | 33300,00 | N/mm ² |
| Contrazione ultima del calcestruzzo | ϵ_{cu} | -0,00314 | |

Tab. IX-1 Calcestruzzo standard (inerte da <20mm) - Classe C35o di produzione ordinaria

| Nome | Notazione | Valore | Unità |
|---|------------------------|-------------|--------------------|
| Resistenza caratteristica | f_{tk} | 540,00 | N/mm ² |
| Tensione di snervamento | f_{yk} | 450,00 | N/mm ² |
| Resistenza di calcolo | f_{sd} | 391,30 | N/mm ² |
| Tensione ammissibile in esercizio | $\underline{\sigma}_s$ | 360,00 | N/mm ² |
| Coefficienti di omogeneizzazione | f_{c2} | 9,92 | N/mm ² |
| - per calcoli in esercizio m | | 15,00 | |
| - per calcoli a rottura | | 35,30 | |
| Modulo di Young | E_s | 205,00 | kN/mm ² |
| Coefficiente parziale | γ_s | 1,15 | |
| Tensione di snervamento di calcolo | f_{yd} | 391,30 | kN/mm ² |
| Limite di calcolo per le trazioni dove si ammette la fessurazione del cls | ϵ_{sd} | 0,01 | |
| Limite della dilatazione di snervamento | ϵ_{yd} | 0,001908802 | |
| Contrazione ultima del calcestruzzo | ϵ_{cu} | -0,00314 | |

Tab. IX-2 Acciaio (barre nervate R ad aderenza migliorata) - Tipo B450C ad alta duttilità

b. Per i pilastri cerchiati e le travi longitudinali orientate est - ovest

| Nome | Notazione | Valore | Unità |
|--|-----------------|----------|-------------------|
| Resistenza cubica media a compressione | R_{cm} | 69,90 | N/mm ² |
| Resistenza a compressione | f_c | 58,00 | N/mm ² |
| Resistenza caratteristica | f_{ck} | 50,00 | N/mm ² |
| Resistenza di calcolo a compressione | f_{cd} | 28,33 | N/mm ² |
| Resistenza indefinita | f_{cl} | 28,33 | N/mm ² |
| Resistenza di calcolo ridotta | f_{c2} | 14,17 | N/mm ² |
| Per compressione centrata | f'_{cl} | 22,67 | N/mm ² |
| Ammissibile in esercizio | σ_c | 22,50 | N/mm ² |
| Per compressione centrata | σ'_c | 15,75 | N/mm ² |
| Valore medio della resistenza a trazione | f_{ctm} | 3,75 | N/mm ² |
| Resistenza caratteristica a trazione | f_{ctk} | 2,62 | N/mm ² |
| Modulo Elastico | E_{cm} | 31357,16 | N/mm ² |
| Modulo Elastico | E_c | 36700,00 | N/mm ² |
| Contrazione ultima del calcestruzzo | ϵ_{cu} | -0,00284 | |

Tab. IX-3 Calcestruzzo standard (inerte da <20mm) - Classe C35o di produzione ordinaria

CARATTERISTICHE DEI MATERIALI

356

PROGETTO STRUTTURALE

| Nome | Notazione | Valore | Unità |
|---|-----------------|-------------|--------------------|
| Resistenza caratteristica | f_{tk} | 575,00 | N/mm ² |
| Tensione di snervamento | f_{yk} | 500,00 | N/mm ² |
| Resistenza di calcolo | f_{sd} | 434,78 | N/mm ² |
| Ammissibile in esercizio | σ_s | 400,00 | N/mm ² |
| Coefficienti di omogeneizzazione | f_{cl} | 28,33 | N/mm ² |
| - per calcoli in esercizio m | | 15,00 | |
| - per calcoli a rottura | | 35,30 | |
| Modulo di Young | E_s | 205,00 | kN/mm ² |
| Limite di calcolo per le trazioni dove si ammette la fessurazione del cls | ϵ_{sd} | 0,01 | |
| Limite della dilatazione di snervamento | ϵ_{yd} | 0,002120891 | |

Tab. IX-4 Calcestruzzo standard (inerte da <20mm) - Classe C35o di produzione ordinaria

2. MATERIALI IMPIEGATI PER GLI ELEMENTI PRECOMPRESI PRETESI

| Nome | Notazione | Valore | Unità |
|---|-----------------------|----------|-------------------|
| Dimensione massima degli inerti | d_a | 20,00 | mm |
| Resistenza cubica media a compressione | R_{cm} | 69,90 | N/mm ² |
| Resistenza cilindrica a compressione | f_c | 58,00 | N/mm ² |
| Resistenza media a compressione | f_{cm} | 63,00 | N/mm ² |
| Valore medio della resistenza a trazione | f_{ctm} | 3,75 | N/mm ² |
| Resistenza caratteristica | f_{ck} | 60,00 | N/mm ² |
| A 1 giorno di maturazione | f_{ckj} | 39,00 | N/mm ² |
| Resistenza caratteristica a trazione | f_{ctk} | 3,06 | N/mm ² |
| A 1 giorno di maturazione | f_{ctkj} | 1,99 | N/mm ² |
| Resistenza di calcolo a compressione | f_{cd} | 34,00 | N/mm ² |
| A 1 giorno di maturazione | f_{cdj} | 22,10 | N/mm ² |
| Resistenza indefinita | f_{cl} | 34,00 | N/mm ² |
| Resistenza di calcolo ridotta | f_{c2} | 17,00 | N/mm ² |
| A 1 giorno di maturazione | f_{c2j} | 11,05 | N/mm ² |
| Per compressione centrata | f'_{cl} | 27,20 | N/mm ² |
| Ammissibile in esercizio | σ_c | 27,00 | N/mm ² |
| A 1 giorno di maturazione | σ_{ci} | 33,15 | N/mm ² |
| Per compressione centrata | σ'_{ct} | 3,98 | N/mm ² |
| A 1 giorno di maturazione | σ'_{ctj} | 2,98 | N/mm ² |
| Modulo Elastico Medio | E_{cm} | 31357,16 | N/mm ² |
| Modulo Elastico | E_c | 36700,00 | N/mm ² |
| Contrazione ultima del calcestruzzo | ϵ_{cu} | -0,00284 | |
| Ritiro finale | $\epsilon_{cs\infty}$ | -0,00035 | |
| | ϕ_{∞} | 2,70 | |
| | γ_c | 1,60 | |
| Rapporto tra la resistenza a 1 giorno di maturazione e quella a 28 giorni | f_{cj}/f_c | 0,65 | |
| | β_b | 3,00 | |

Tab. IX-5 Calcestruzzo per solette precomprese (inerte da <20mm) - Classe C55 di produzione controllata

| Nome | Notazione | Valore | Unità |
|--|-----------------|---------|---------------------------------|
| diametro dei trefoli | φ | 15,20 | mm |
| resistenza caratteristica | f_{ptk} | 2060,00 | N/mm ² |
| | $f_{p0,1k}$ | 1750,00 | N/mm ² |
| tensione di snervamento | f_{yk} | 500,00 | N/mm ² |
| resistenza di calcolo | f_{pd} | 1456,00 | N/mm ² |
| Modulo di Young | E_p | 195,00 | N/mm ² |
| Limite della dilatazione di snervamento caratteristico | ϵ_{uk} | 0,01 | |
| Limite della dilatazione di snervamento di calcolo | ϵ_{yd} | 0,75 | % |
| ammissibile in esercizio | σ_p | 1400,00 | N/mm ² |
| ammissibile in esercizio | σ_{pi} | 1575,00 | N/mm ² |
| rilassamento (classe 2 - stabilizzati) | ρ_{1000} | 2,50 | % a $\sigma_{pi} = 0,7 f_{ptk}$ |
| | γ_s | 1,15 | |

Tab. IX-6 Acciaio da precompressione – Trefoli 7W

C. ANALISI DEI CARICHI

1. CARICHI PERMANENTI

Presentiamo solo un esempio di calcolo per ciascun tipo di parete, sia verticale che orizzontale, per indicare il metodo eseguito.

a. Esempio di calcolo per una chiusura verticale

► CV 4 - Facciata Continua

La stratigrafia è composta da montanti e traversi di legno lamellare e contiene dei tamponamenti sia opachi che trasparenti. Quindi, effettuiamo il calcolo tenendo conto delle caratteristiche geometriche di ciascun tipo di tamponamento. Dopo prendiamo il valore massimo, così da sovrastimare il valore del peso lineare della facciata per sicurezza.

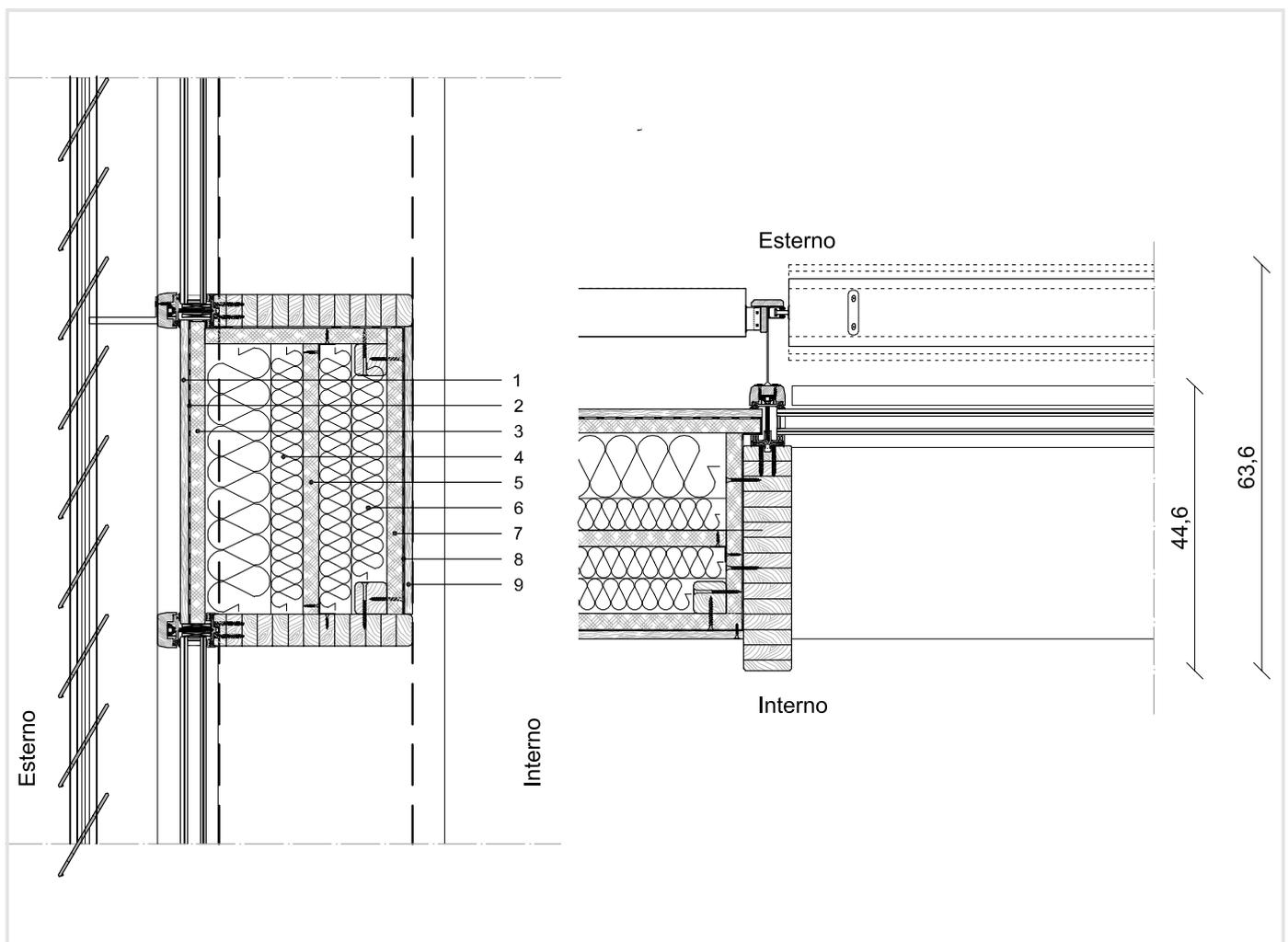


Fig. IX-1 Stratigrafia

| Numero strato | Spessore [cm] | Materiale [nome xls] | Densità [kg/m ³] | Massa superficiale [kg/m ²] |
|---------------|---------------|----------------------|------------------------------|---|
| 1 | 0,80 | Vetro | 2530 | 20,24 |
| 2 | 2,00 | Camera d'aria | 0 | 0,00 |
| 3 | 1,20 | Vetro | 2530 | 30,36 |

Tab. IX-7 Tamponamento trasparente Saint Gobain

| Numero strato | Spessore [cm] | Materiale [nome xls] | Densità [kg/m ³] | Massa superficiale [kg/m ²] |
|---------------------------|---------------|---|------------------------------|---|
| 1 | 1,25 | Pannello di particelle legate con cemento | 1280 | 16,00 |
| 2 | 0,20 | Membrana impermeabile di feltro poliestere laminato | 500 | 1,00 |
| 3 | 2,50 | Pannello di scaglie di legno orientate tipo OSB | 640 | 16,00 |
| 4 | 6,00 | Isolante termico semi-rigido di fibre di legno | 50 | 3,00 |
| 5 | 2,50 | Pannello di scaglie di legno orientate tipo OSB | 640 | 16,00 |
| 6 | 6,00 | Isolante termico semi-rigido di fibre di legno | 50 | 3,00 |
| 7 | 2,50 | Pannello di scaglie di legno orientate tipo OSB | 640 | 16,00 |
| 8 | 0,20 | Membrana Autoadesiva Barriera Totale a Vapore, Radon e Metano | 500 | 1,00 |
| 9 | 1,25 | Pannello di particelle legate con cemento | 1280 | 16,00 |
| Massa superficiale totale | | | | 88,00 |

Tab. IX-8 Tamponamento opaco con rivestimento di legno

| Larghezza [cm] | Profondità [cm] | Materiale | Densità | Massa lineare [kg/m] | Massa di un montante [kg] |
|----------------|-----------------|-----------------|---------|----------------------|---------------------------|
| 7,50 | 37,00 | Legno lamellare | 600 | 16,65 | 58,275 |

Tab. IX-9 Profilo Verticale di legno lamellare

| Larghezza [cm] | Profondità [cm] | Materiale | Densità | Massa lineare [kg/m] | Massa di un montante [kg] |
|----------------|-----------------|-----------------|---------|----------------------|---------------------------|
| 7,50 | 37,00 | Legno lamellare | 600 | 16,65 | 58,275 |

Tab. IX-10 Profilo orizzontale di legno lamellare

| | |
|------------------------------------|---|
| Numero di tamponamenti opachi | 3 |
| Numero di tamponamenti trasparenti | 4 |
| Numero di profili per modulo | 8 |
| Numero di montanti per modulo | 1 |

Tab. IX-11 Profilo orizzontale di legno lamellare

| Elemento | Larghezza [cm] | Altezza [cm] |
|---------------|----------------|--------------|
| Modulo totale | 120,00 | 350,00 |
| Tamponamento | 112,50 | 43,71 |

Tab. IX-12 Caratteristiche geometriche

| | |
|--------------------------------|--------|
| Massa totale di un modulo [kg] | 564,84 |
| Massa lineare totale [kg/m] | 470,70 |
| Peso lineare totale [kN/m] | 4,71 |

Tab. IX-13 Risultato finale

■ b. Esempio di calcolo per una partizione verticale

► PVI 4.1 – Parete interna permanente

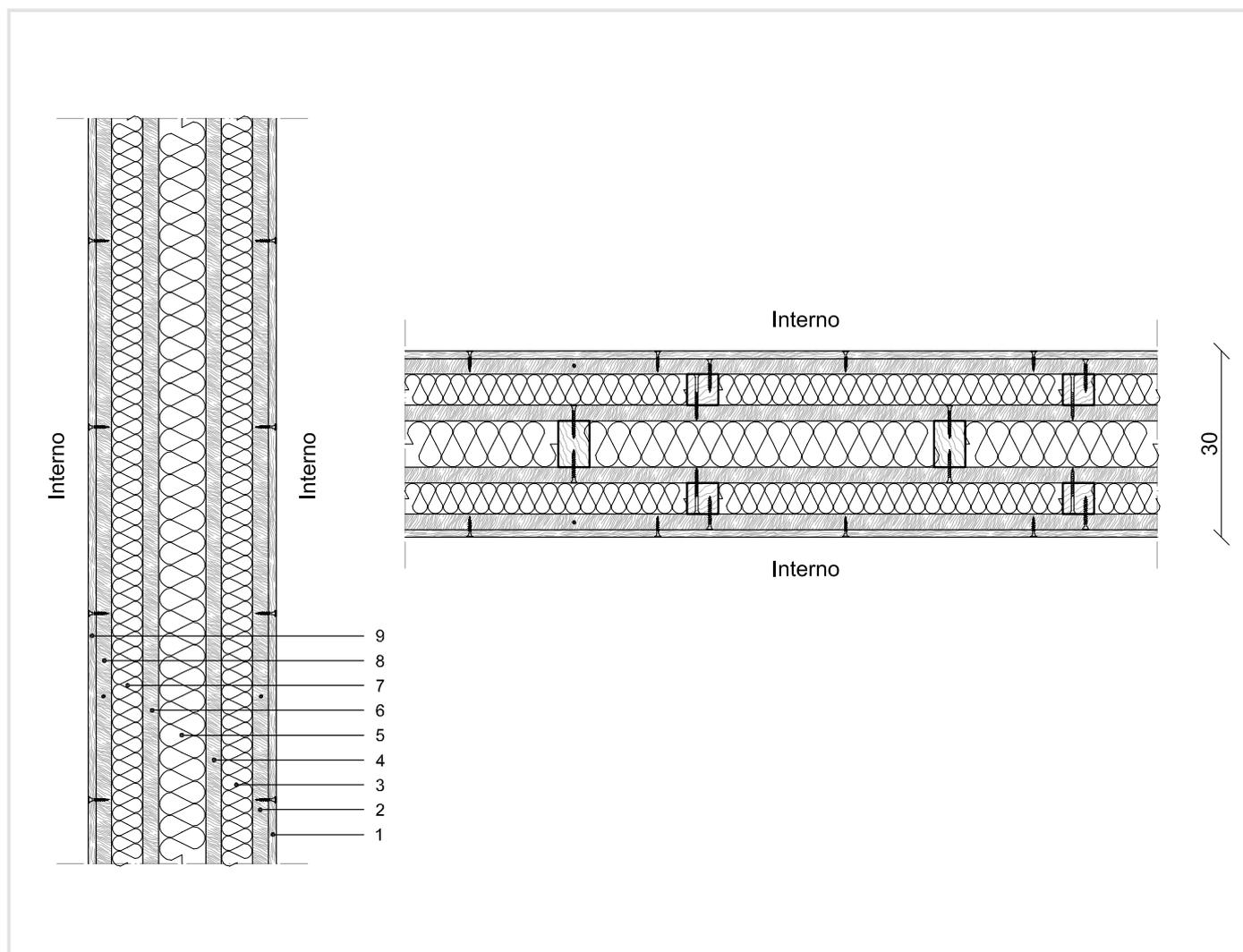


Fig. IX-2 Stratigrafia

| Numero strato | Spessore [cm] | Materiale [nome xls] | Densità [kg/m ³] | Massa superficiale [kg/m ²] |
|-----------------|---------------|---|------------------------------|---|
| 1 | 1,25 | Pannello di particelle legate con cemento | 1280 | 16,00 |
| 2 | 2,50 | Pannello di scaglie di legno orientate tipo OSB | 640 | 16,00 |
| 3 | 5,00 | Isolante termico semi-rigido di fibre di legno | 50 | 2,50 |
| 4 | 2,50 | Pannello di scaglie di legno orientate tipo OSB | 640 | 16,00 |
| 5 | 7,50 | Isolante termico semi-rigido di fibre di legno | 50 | 3,75 |
| 6 | 2,50 | Pannello di scaglie di legno orientate tipo OSB | 640 | 16,00 |
| 7 | 5,00 | Isolante termico semi-rigido di fibre di legno | 50 | 2,50 |
| 8 | 2,50 | Pannello di scaglie di legno orientate tipo OSB | 640 | 16,00 |
| 9 | 1,25 | Pannello di particelle legate con cemento | 1280 | 16,00 |
| Spessore totale | 30,00 | Massa superficiale totale | | 104,75 |

Tab. IX-14 Elementi continui

| Numero strato | Spessore [cm] | Materiale [nome xls] | Densità [kg/m³] | Massa superficiale [kg/m²] | Larghezza [cm] |
|---------------|---------------|---|-----------------|----------------------------|----------------|
| 3 | 5,00 | Legno massiccio per la realizzazione dei montanti | 600 | 2,50 | 5,00 |
| 5 | 7,50 | Legno massiccio per la realizzazione dei montanti | 600 | 3,75 | 5,00 |
| 7 | 5,00 | Legno massiccio per la realizzazione dei montanti | 600 | 2,50 | 5,00 |

Tab. IX-15 Elementi discreti (tipo montanti, traverse...)

| | |
|-----------------------------|--------|
| Massa lineare totale [kg/m] | 340,50 |
| Peso lineare totale [kN/m] | 3,41 |

Tab. IX-16 Risultato finale

c. Esempio di calcolo per una chiusura orizzontale

► CO4 – Copertura praticabile

In questo calcolo abbiamo considerato gli elementi strutturali leggeri di legno per il controsoffitto come delle superfici continue, calcolando la loro densità "effettiva" in funzione dalla densità del legno usato e dalle loro caratteristiche geometriche.

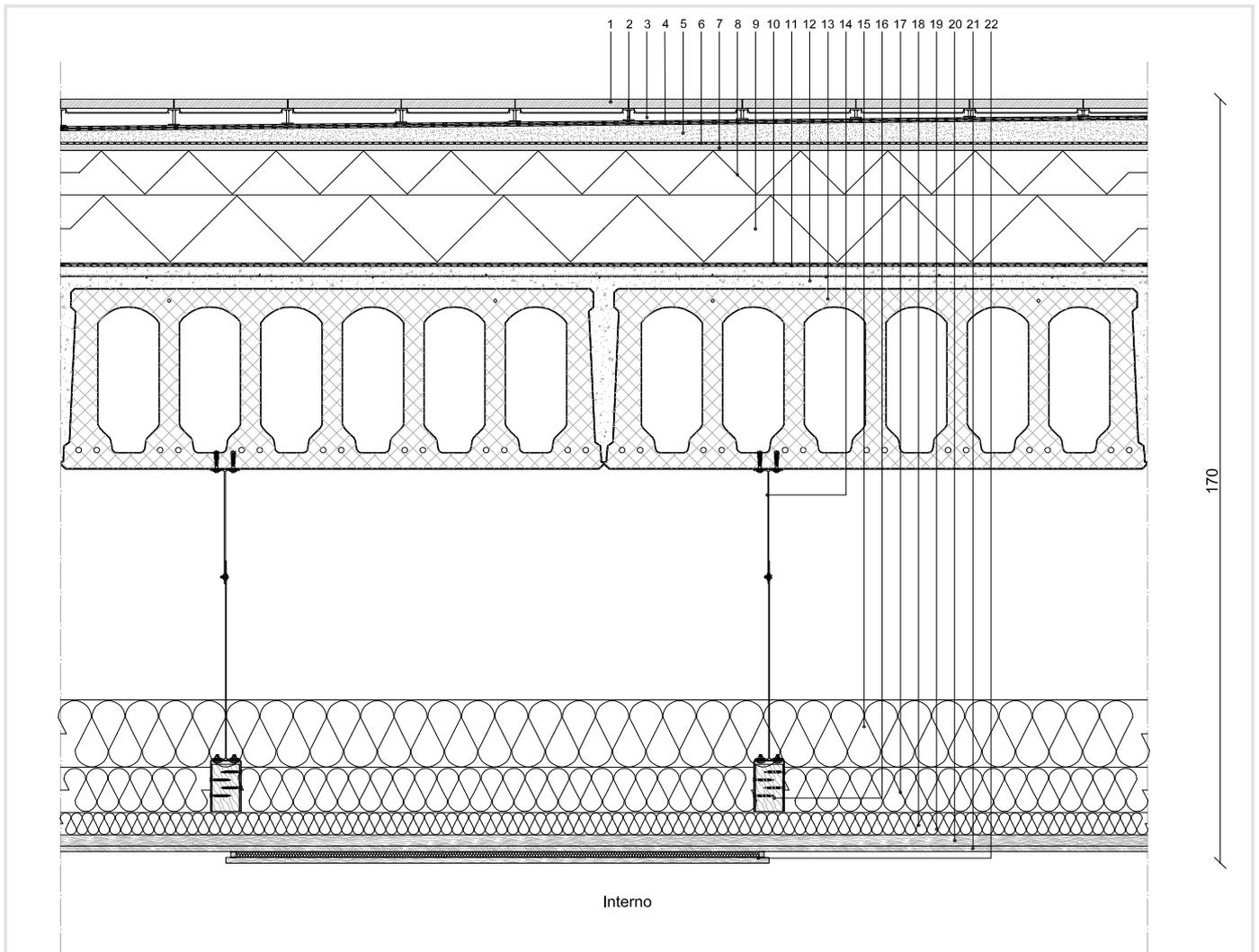


Fig. IX-3 Stratigrafia

| Numero strato | Spessore [cm] | Materiale [nome xls] | Densità [kg/m ³] | Massa superficiale [kg/m ²] |
|-----------------|---------------|--|------------------------------|---|
| 1 | 2,00 | Pannello con anima costituita da cemento fibrorinforzato e finitura tipo gres | 740 | 14,80 |
| 2 | 5,00 | Piedino regolabile e sovrastante struttura | 0 | 0,00 |
| 3 | 5,00 | Camera d'aria | 0 | 0,00 |
| 4 | 0,90 | Membrana Bituminosa Autoadesiva Rinforzata con Tessuto Non Tessuto in Poliestere per solai | 500 | 4,50 |
| 5 | 5,00 | Malta di livellamento con pendenza di 1% | 375 | 18,75 |
| 6 | 0,20 | Feltro in polipropilene per il rinforzo e la protezione | 500 | 1,00 |
| 7 | 1,50 | Materassino fonoisolante di polietilene | 930 | 13,95 |
| 8 | 10,00 | Isolante termico rigido di polistirene estruso | 40 | 4,00 |
| 9 | 15,00 | Isolante termico rigido di polistirene estruso | 40 | 6,00 |
| 10 | 0,40 | Membrana Bituminosa Autoadesiva Barriera Totale a Vapore, Radon e Metano | 500 | 2,00 |
| 11 | 0,40 | Feltro in polipropilene per il rinforzo e la protezione | 500 | 2,00 |
| 12 | 5,00 | Getto in calcestruzzo con rete elettrosaldata | 2500 | 125,00 |
| 13 | 40,00 | Solaio alveolare di calcestruzzo armato precompresso prefabbricato - tipo ECHO SCF 40 | 1195 | 478,00 |
| 14 | 77,00 | Pendino di altezza regolabile | 0 | 0,00 |
| 15 | 15,00 | Isolante termo-acustico morbido di lana li roccia | 35 | 5,25 |
| 16 | 10,00 | Travetto di legno | 30 | 3,00 |
| 17 | 10,00 | Isolante termo-acustico morbido di lana li roccia | 35 | 3,50 |
| 18 | 5,00 | Isolante termo-acustico morbido di lana li roccia | 35 | 1,75 |
| 19 | 5,00 | Travetto di legno | 30 | 1,50 |
| 20 | 2,50 | Pannello di scaglie di legno orientate tipo OSB | 640 | 16,00 |
| 21 | 1,25 | Pannello di particelle legate con cemento | 1280 | 16,00 |
| 22 | 2,50 | Pannello acustico con rivestimento di legno | 0 | 0,00 |
| Spessore totale | 173,65 | Massa superficiale totale | | 717,00 |

Tab. IX-17 Elementi continui

| | | | |
|---|--------|---|------|
| Carichi permanenti strutturali [kg/m ²] | 603,00 | Carichi permanenti strutturali [kN/m ²] | 6,03 |
| Carichi permanenti non strutturali [kg/m ²] | 114,00 | Carichi permanenti non strutturali [kN/m ²] | 1,14 |

Tab. IX-18 Risultato finale

d. Esempio di calcolo per una partizione orizzontale

► POI2 – Solaio interno tra due zone riscaldate

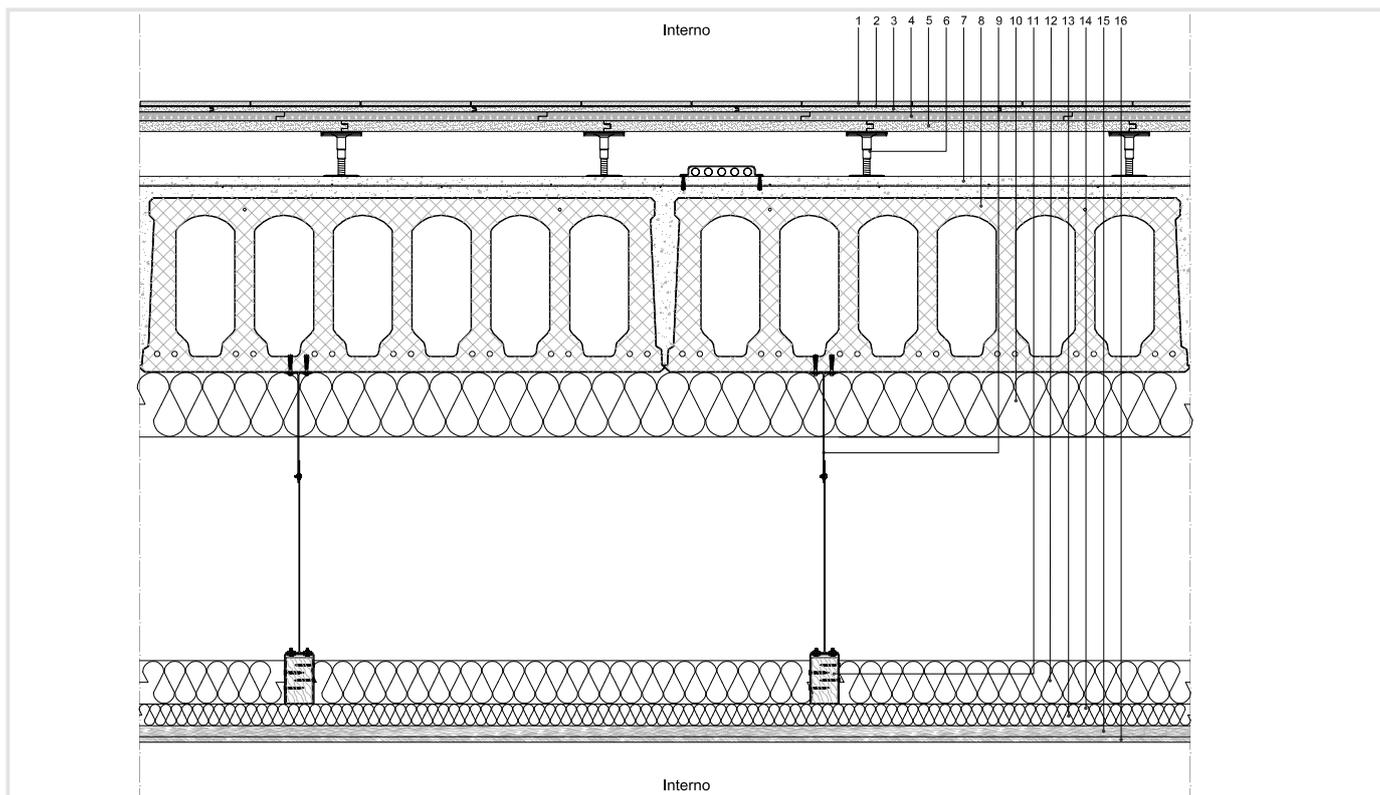


Fig. IX-4 Stratigrafia

| Numero strato | Spessore [cm] | Materiale [nome xls] | Densità [kg/m ³] | Massa superficiale [kg/m ²] |
|----------------|---------------|---|------------------------------|---|
| 1 | 1,00 | Pavimento in PVC flessibile, eterogeneo, rinforzato da una doppia griglia di fibra di vetro | 148,4 | 1,48 |
| 2 | 0,20 | Colla | 1200 | 2,40 |
| 3 | 1,25 | Lastra di gesso armato sagomata calpestabile | 420 | 5,25 |
| 4 | 2,00 | Isolante anticalpestio per pavimenti in fibre di legno | 250 | 5,00 |
| 5 | 2,50 | Lastra di gesso armato sagomata calpestabile | 420 | 10,50 |
| 6 | 9,80 | Piedino regolabile | 0 | 0,00 |
| 7 | 5,00 | Getto in calcestruzzo con rete elettrosaldata | 2500 | 125,00 |
| 8 | 40,00 | Solaio alveolare di calcestruzzo armato precompresso prefabbricato - tipo ECHO SCF 40 | 1195 | 478,00 |
| 9 | 77,00 | Pendino di altezza regolabile | 0 | 0,00 |
| 10 | 15,00 | Isolante termo-acustico morbido di lana li roccia | 35 | 5,25 |
| 11 | 10,00 | Travetto di legno | 30 | 3,00 |
| 12 | 10,00 | Isolante termo-acustico morbido di lana li roccia | 35 | 3,50 |
| 13 | 5,00 | Travetto di legno | 30 | 1,50 |
| 14 | 5,00 | Isolante termo-acustico morbido di lana li roccia | 35 | 1,75 |
| 15 | 2,50 | Pannello di scaglie di legno orientate tipo OSB | 640 | 16,00 |
| 16 | 1,25 | Pannello di particelle legate con cemento | 1280 | 16,00 |
| 17 | 2,50 | Pannello acustico con rivestimento di legno | 0 | 0,00 |
| Altezza totale | 150,00 | Massa superficiale totale | | 670,75 |

Tab. IX-19 Elementi continui

| | | | |
|---|--------|---|------|
| Carichi permanenti strutturali [kg/m ²] | 603,00 | Carichi permanenti strutturali [kN/m ²] | 6,03 |
| Carichi permanenti non strutturali [kg/m ²] | 67,75 | Carichi permanenti non strutturali [kN/m ²] | 0,68 |

Tab. IX-20 Risultato finale

e. Riepilogo dei carichi permanenti per tutte le stratigrafie

| Numero | Nome | Spessore [cm] | Peso lineare [kN/m] |
|--------|---|---------------|---------------------|
| CV 1 | Facciata con mattoni a vista non portante | 56,15 | 8,60 |
| CV 2 | Facciata con mattoni a vista portante | 56,15 | 17,63 |
| CV 3 | Facciata con mattoni a vista portante e resistente al fuoco | 54,90 | 16,91 |
| CV 4 | Facciata continua | 37,00 | 4,71 |
| CV 6 | Muro contro terra | 47,95 | 12,17 |

Tab. IX-21 Chiusure verticali

| Numero | Nome | Spessore [cm] | Peso lineare [kN/m] |
|---------|---|---------------|---------------------|
| PVI 1 | Parete interna portante tra spazio riscaldato e no riscaldato | 48,75 | 11,39 |
| PVI 2 | Parete interna resistente al fuoco tra l'ascensore e il vano scala | 40,00 | 10,31 |
| PVI 3 | Parete interna verticale di al livello dei nuclei | 50,00 | 4,31 |
| PVI 4.1 | Parete permanente interna | 30,00 | 3,41 |
| PVI 4.2 | Parete permanente interna con struttura a taglio-acustico | 30,00 | 3,41 |
| PVI 5 | Parete interna verticale tra due zone funzionali | 42,50 | 4,08 |
| PVI 6 | Parete interna verticale tra due zone funzionali e di controventatura | 50,00 | 11,45 |
| PVI 7 | Parete interna verticale spostabile | 15,00 | 2,15 |

Tab. IX-22 Partizioni verticali interne

| Numero | Nome | Spessore [cm] | Carichi Permanenti Strutturali [kN/m ²] | Carichi Permanenti Non Strutturali [kN/m ²] | Carichi Permanenti Totali [kN/m ²] |
|--------|--|---------------|---|---|--|
| CO 1 | Solaio controterra isolato | 100,00 | 3,05 | 0,59 | 3,64 |
| CO 2 | Solaio controterra garage | 100,00 | 4,46 | 0,44 | 4,90 |
| CO 3 | Solaio su spazi aperti | 100,00 | 6,03 | 0,73 | 6,76 |
| CO 4 | Copertura praticabile | 173,65 | 6,03 | 1,14 | 7,17 |
| CO 5 | Copertura verde | 188,95 | 6,03 | 1,11 | 7,14 |
| CO 6 | Copertura della palestra | 74,40 | 0,21 | 0,63 | 0,83 |
| CO 7.1 | Copertura praticabile verde | 74,90 | 6,03 | 0,42 | 6,45 |
| CO 7.2 | Copertura praticabile parcheggio | 100,00 | 6,03 | 2,22 | 8,25 |
| CO 7.3 | Copertura carrabile parcheggio | 100,00 | 6,03 | 2,22 | 8,25 |
| CO 8 | Copertura Centro di Documentazione | 74,40 | 0,21 | 0,63 | 0,83 |
| CO 9 | Copertura verde della rampa del garage | 74,90 | 6,03 | 0,42 | 6,45 |

Tab. IX-23 Chiusure orizzontali

| Numero | Nome | Spessore [cm] | Carichi Permanenti Strutturali [kN/m ²] | Carichi Permanenti Non Strutturali [kN/m ²] | Carichi Permanenti Totali [kN/m ²] |
|--------|--|---------------|---|---|--|
| POI 1 | Solaio interno | 150,00 | 6,03 | 0,65 | 6,68 |
| POI 2 | Solaio interno tra 2 spazi riscaldati | 150,00 | 6,03 | 0,68 | 6,71 |
| POI 3 | Solaio interno tra 1 spazio riscaldato e il garage | 99,45 | 6,03 | 0,84 | 6,87 |

Tab. IX-24 Chiusure orizzontali

f. Carichi finali perimetrali e interni permanenti

Nel nostro blocco, la chiusura perimetrale è la facciata Unitherm.

Peraltro, considerando la normativa italiana NTC, la parete divisoria interna non portante più pesante ha un peso lineare di 4,31 kN/m. Questo ci porta a un carico superficiale ripartito uguale a 2 kN/m².

2. CARICHI VARIABILI E DI ESERCIZIO

a. Carichi di esercizio

Il nostro edificio è dedicato a delle attività scolastiche. Quindi siamo nell'ambito della classe C1 per i carichi di esercizio.

La copertura del blocco centrale è accessibile per la sola manutenzione, quindi i carichi di copertura sono di classe H1 secondo le NTC.

b. Azione del Vento

Per il calcolo dell'azione del vento sulla nostra zona, coesistono due calcoli, uno secondo l'eurocodice 1, l'altro secondo la DTU NV 65 del 2009.v

Ma i dati relativi alla velocità del vento, ecc, per i due tipi di calcolo sono contenuti nella NV65 francese.

Usiamo i dati relativi alla regola francese NV65 che indica la mappa dei venti secondo la normativa europea di calcolo e contenuto nel documento relativo alla Francia (Eurocodice 1 - parte 1-3 (normativa UNI EN 1991-1-3/NA)).

Il nostro edificio si colloca a Aubervilliers, a nord dell'agglomerazione di Parigi. Siamo quindi in una regione di tipo 3.

Dopo la rugosità del terreno è caratteristica di una zona di tipo IV, zone di cui almeno il 15% della superficie sono occupati da strutture edilizie di cui l'altezza media è superiore ai 15 m. I valori provengono dal documento relativo all'applicazione dell'Eurocodice 1 nel territorio francese EN1991-1-4 NA:2008 .

Otteniamo così due azioni :

| Nome | Notazione | Valore | Unità |
|---|-----------|--------|-------------------|
| Carico pareti divisorie uniformemente distribuito | Ppv | 2,00 | kN/m ² |
| Parete Unitherm | Punitherm | 4,71 | kN/m |

Tab. IX-25 Carichi finali perimetrali e interni permanenti

| Nome | Notazione | Valore | Unità |
|--|-----------|--------|-------------------|
| Classe C1 - Scuole | qk | 3,00 | kN/m ² |
| Classe H1 - Coperture e sottotetti accessibili per solo manutenzione | qk | 0,50 | kN/m ² |

Tab. IX-26 Carichi di esercizio

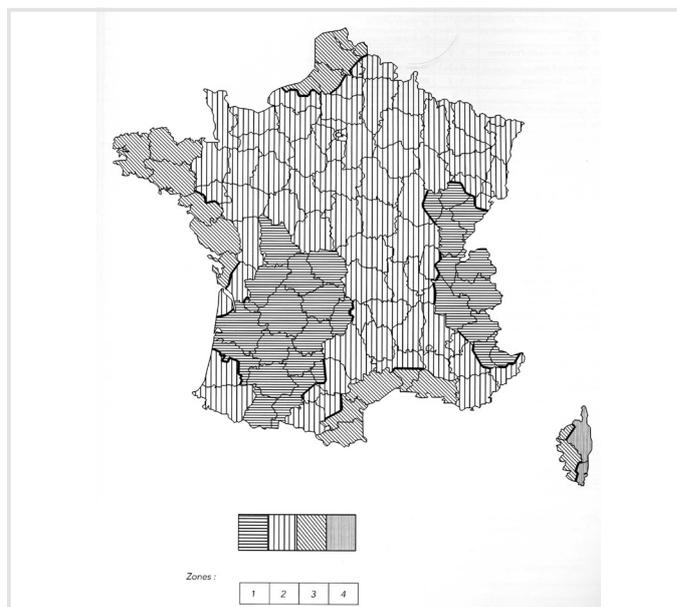


Fig. IX-5 Mappa dei venti secondo la regola NV65 di febbraio 2009

| Nome | Notazione | Valore | Unità |
|--|-----------|----------|---------------------|
| Velocità di base del vento | $V_{b,0}$ | 24,00 | m/s |
| Densità dell'aria | ρ_0 | 1.225 | kg/m ³ |
| Altezza riferita al suolo | z | 10,00 | m |
| Lunghezza di rugosità | z_0 | 1,00 | m |
| Altezza minima | z_{min} | 15,00 | m |
| Coefficiente di turbolenza | k_1 | 1,00 | |
| Coefficiente di rugosità | c_r | 0,64 | |
| Coefficiente di orografia | c_o | 1,00 | |
| Velocità media | V_m | 15,23 | m/s |
| Coefficiente di esposizione | c_e | 1,44 | |
| Pressione dinamica in esercizio | $q_p(z)$ | 509,30 | Pa=N/m ² |
| Pressione dinamica massima ($V_p = 35,3$ m/s) | $Q_p(z)$ | 763,90 | Pa=N/m ² |
| Modulo Elastico | E_c | 33300,00 | N/mm ² |

Tab. IX-27 Azione del vento secondo l'Eurocodice 1 EN1991-1-4

| Nome | Notazione | Valore | Unità |
|--|-----------|--------|---------------------------|
| Zona di vento | zone | 2,00 | |
| Pressione dinamica di riferimento | q_{10} | 600,00 | P_a N/m ² |
| Coefficiente di sito protetto | k_s | 0,80 | |
| Coefficiente di altezza (z=10m) | K_h | 1,00 | |
| Pressione dinamica in esercizio (Vn=28,0m/s) | q_z | 480,00 | P_a N/m ² |
| Pressione dinamica massima (Ve = 37,0 m/s) | Q_z | 840,00 | P_a N/m ² |
| Coefficiente di dimensione | Delta | 0,83 | |

Tab. IX-28 Azione del vento secondo il DTU NV65 2009

Otteniamo dei valori più importanti con il secondo calcolo per lo stato limite ultimo. Useremo quindi quest'ultimo valore per i nostri calcoli.

c. Azione della neve

Sempre con il DTU NV65 2009 ci collochiamo in una zona di tipo A1.

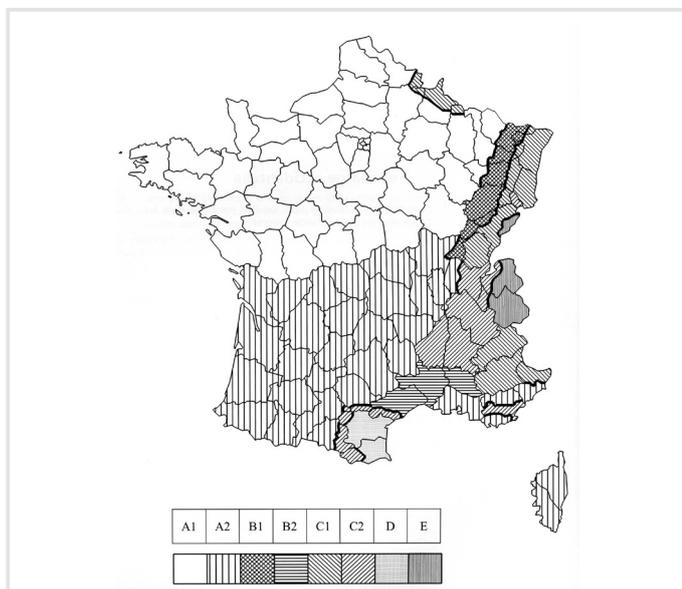


Fig. IX-6 Mappa della neve secondo la regola NV65 di febbraio 2009

| Nome | Notazione | Valore | Unità | Unità |
|------------------------------------|-----------|--------|-------------------|-------|
| Carico di neve sul suolo - Zona A1 | s_0 | 0,45 | kN/m ² | kPa |
| Maggiorazione - pendenza < 3% | s_1 | 0,20 | kN/m ² | kPa |
| Coefficiente nominale | μ | 0,80 | | |
| Carico di neve sulla copertura | s | 0,56 | kN/m ² | kPa |

Tab. IX-29 Azione del vento secondo il DTU NV65 2009

d. Valore finali usati nei calcoli massimizzando le possibilità di carico

► Coefficienti di combinazione

| Nome | Notazione | Condizione | Valore EQU | Valore STR |
|------------------------------------|-----------|-------------|------------|------------|
| Carichi permanenti | YG1 | Favorevoli | 0,9 | 1 |
| | | Sfavorevoli | 1,1 | 1,3 |
| Carichi permanenti non strutturali | YG2 | Favorevoli | 0 | 0 |
| | | Sfavorevoli | 1,5 | 1,5 |
| Carichi variabili | YQ | Favorevoli | 0 | 0 |
| | | Sfavorevoli | 1,5 | 1,5 |

Tab. IX-30 Coefficienti di combinazione

► Carichi al livello della copertura

| Nome | Notazione | Valore | Unità |
|------------------------------------|-----------|--------|-------------------|
| Carichi permanenti strutturali | G_1 | 6,03 | kN/m ² |
| Carichi permanenti non strutturali | G_2 | 1,14 | kN/m ² |
| Carichi variabili | Q | 1,06 | kN/m ² |
| Pannelli solari | P_s | 0,15 | kN/m ² |

Tab. IX-31 Carichi al livello della copertura

► Carichi al livello del secondo piano

| Nome | Notazione | Valore | Unità |
|------------------------------------|-----------|--------|-------------------|
| Carichi permanenti strutturale | G_1 | 6,03 | kN/m ² |
| Carichi permanenti non strutturali | G_2 | 0,65 | kN/m ² |
| Carichi variabili | Q | 5,00 | kN/m ² |
| Carichi perimetrali | Q_p | 4,71 | kN/m |

Tab. IX-32 Carichi al livello del secondo piano

► Carichi al livello del primo piano

| Nome | Notazione | Valore | Unità |
|------------------------------------|-----------|--------|-------------------|
| Carichi permanenti strutturale | G_1 | 6,03 | kN/m ² |
| Carichi permanenti non strutturali | G_2 | 0,65 | kN/m ² |
| Carichi variabili | Q | 5,00 | kN/m ² |
| Carichi perimetrali | Q_p | 4,71 | kN/m |

Tab. IX-33 Carichi al livello del secondo piano

D. DIMENSIONAMENTO DEI SOLAI

1. PREMESSA

Usiamo una soletta alveolare in calcestruzzo armato precompresso composta di elementi di 1,20 m di larghezza e di uno spessore di 40 cm. Su questi elementi viene gettata una soletta collaborante armata di 5 cm di spessore.

Si discretizza l'elemento per solaio, considerandolo come una giustapposizione di tante travi con sezione a I armate e precomprese. L'analisi del solaio, grazie a questa ipotesi, si riassume nello studio di una trave di calcestruzzo armato precompresso a I di un'unica campata e su semplici appoggi da entrambi i lati per il calcolo di resistenza a flessione e a taglio, e in semplice appoggio ai suoi estremi.

Ci si limita ad alcune principali verifiche, adottando anche alcune semplificazioni come quella di trascurare le armature nel calcolo delle caratteristiche geometriche della sezione e quella di trascurare il peso dei conci estremi della trave oltre gli appoggi. Seguiamo le NTC e il capitolo 10 del Volume 2B del libro Cemento armato : calcolo agli stati limite (Giandomenico

Toniolo, Tecnica delle costruzioni, volume 2B, Cemento armato : calcolo agli stati limiti, Masson, Milano, 1995).

Il calcolo verrà suddiviso in due parti. Una prima parte considerando l'elemento intero, cioè travetto e soletta collaborante uniti, permetterà di calcolare la quantità, la posizione e la tensione iniziale delle armature da precompressione. La seconda parte considerando l'unico travetto ci permetterà di verificare la fattibilità di un tale elemento ed il suo comportamento a vuoto (la parte centrale superiore potendo essere tesa ad esempio e il calcestruzzo quindi potendo fessurarsi). Quindi nell'ultima parte delle verifiche, ci accontenteremo di una verifica delle tensioni ammissibili, una verifica a rottura non avendo senso qui.

Il modello di solaio qui studiato riproduce quello ECHO SCF 40 della ditta ECHO.

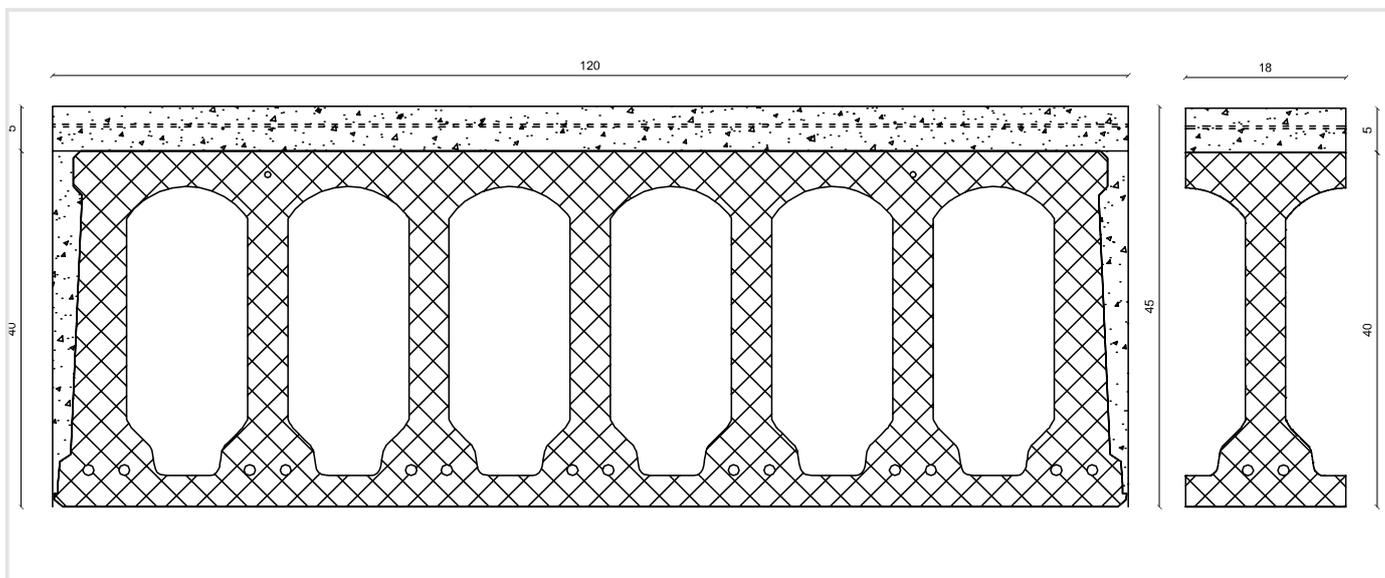


Fig. IX-7 Sezione di un elemento di solaio e di un particolare travetto secondo i dati forniti dalla ditta

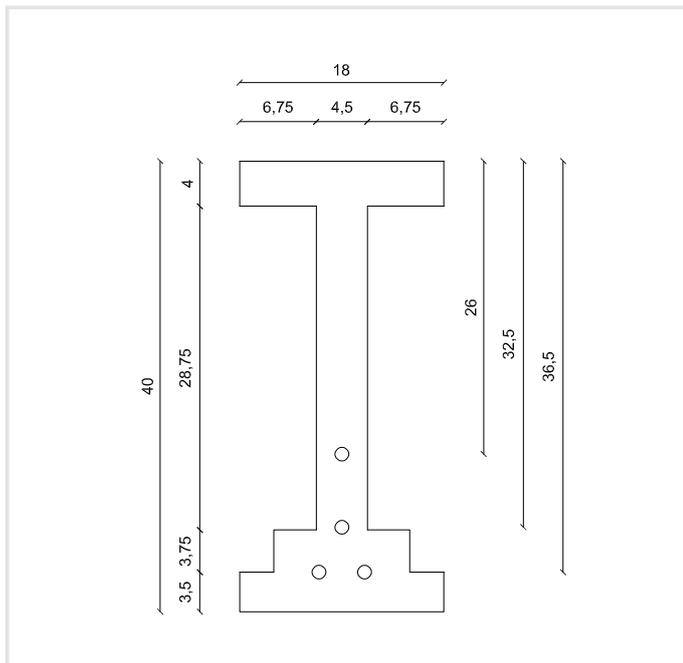


Fig. IX-8 Sezione di un travetto "nudo"

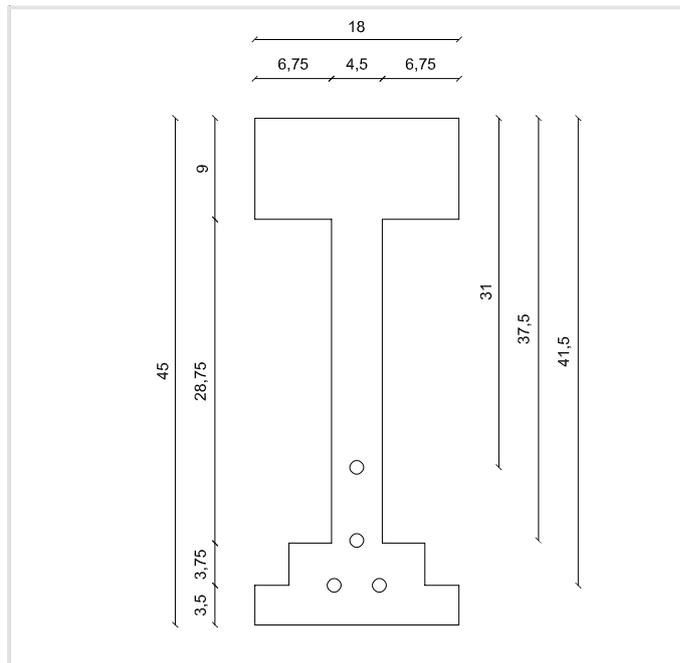


Fig. IX-9 Sezione di un travetto con la soletta collaborante

| Nome | Notazione | Valore | Unità |
|---|-------------|---------|----------------|
| Larghezza solaio | | 1,20 | m |
| Altezza soletta | | 5,00 | cm |
| Altezza trave | | 40,00 | cm |
| Altezza totale trave con soletta | | 45,00 | cm |
| Spessore copriferro | | 2,00 | cm |
| Posizione delle armature tese senza soletta | d | 29,84 | cm |
| Posizione delle armature tese con soletta | d | 34,84 | cm |
| Posizione delle armature di precompressione senza soletta | d_{p1} | 36,50 | cm |
| Posizione delle armature di precompressione senza soletta | d_{p2} | 26,00 | cm |
| Posizione delle armature di precompressione senza soletta | d_{p3} | 32,50 | cm |
| Posizione delle armature di precompressione con soletta | d_{p1} | 41,50 | cm |
| Posizione delle armature di precompressione con soletta | d_{p2} | 31,00 | cm |
| Posizione delle armature di precompressione con soletta | d_{p3} | 37,50 | cm |
| Luce | l | 1140,00 | cm |
| Braccio della copia interna approssimato adimensionale | ζ | 0,90 | |
| Braccio della copia interna (senza soletta) | z | 26,86 | cm |
| Braccio della copia interna (con soletta) | z | 31,36 | cm |
| Spessore d'anima | b_w | 4,50 | cm |
| Altezza dell'anima | | 32,50 | cm |
| Spessore ala superiore | b | 18,00 | cm |
| Altezza ala superiore (senza soletta) | | 4,00 | cm |
| Altezza ala superiore (con soletta) | | 9,00 | cm |
| Spessore ala inferiore | | 18,00 | cm |
| Altezza ala inferiore | | 3,50 | cm |
| Area sezione della trave (senza soletta) | A | 0,03 | m ² |
| Area sezione della trave (con soletta) | A | 0,04 | m ² |
| Angolo dei conci di calcestruzzo | λ_c | 2,00 | |

Tab. IX-34 Caratteristiche geometriche di un travetto

| Nome | Notazione | Valore | Unità |
|---|----------------|---------|-------------------|
| Diametro delle armature da precompressione 1 | φ_1 | 8,00 | mm |
| Numero di armature da precompressione | n_1 | 2,00 | |
| Area armatura di precompressione | A_{p1} | 100,53 | mm ² |
| Diametro delle armature da precompressione 2 | φ_2 | 16,00 | mm |
| Numero di armature da precompressione | n_2 | 1,00 | |
| Area armatura di precompressione | A_{p2} | 201,06 | mm ² |
| Diametro delle armature da precompressione 3 | φ_3 | 7,00 | mm |
| Numero di armature da precompressione | n_3 | 1,00 | |
| Area armatura di precompressione | A_{p3} | 38,48 | mm ² |
| Area totale armatura di precompressione | A_p | 340,08 | mm ² |
| sovratensione iniziale (<tensione ammissibile in esercizio) | σ'_{pi} | 1400,00 | N/mm ² |

Tab. IX-35 Dati geometrici delle armature da precompressione impiegate

2. VERIFICA DELL'ELEMENTO IN OPERA CON LA SOLETTA COLLABORANTE

a. Analisi delle sollecitazioni

In questa fase calcoliamo le diverse sollecitazioni al livello di diverse sezioni della trave, la sezione in mezzeria, la sezione di variazione dell'armatura pretesa, la sezione di transizione, la sezione di sollevamento che coincide con la fine dell'ancoraggio dei cavi pretesi per attrito con il calcestruzzo...

Il prospetto dell'elemento è riportato nella figura seguente, con indicate le sezioni di verifica : "a" di massimo momento, "b" di massimo taglio, "c" d'appoggio e "d" di cambiamento d'armatura.

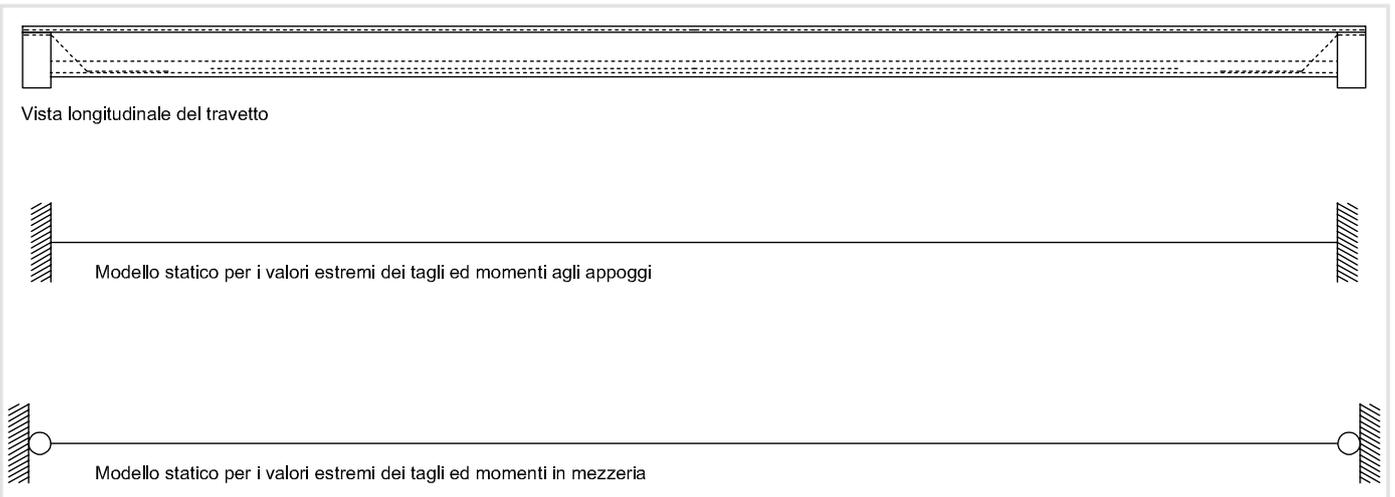


Fig. IX-10 Schemi di calcolo del travetto

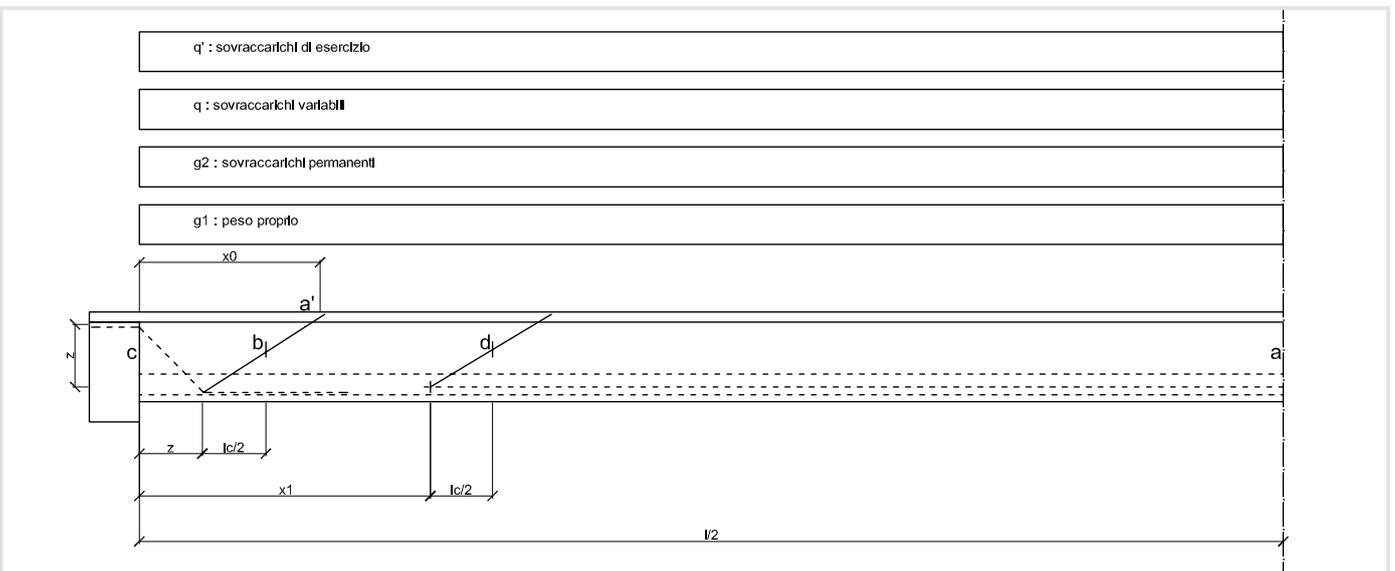


Fig. IX-11 Sezioni di calcolo all'interno del travetto - solo parte a sud - e condizioni di carico

b. Carichi

| Nome | Notazione | Valore | Unità |
|----------------------------|-----------|--------|-------|
| peso proprio | g_1 | 0,93 | kN/m |
| sovraccarichi permanenti | g_2 | 0,12 | kN/m |
| sovraccarichi variabili | q | 4,71 | kN/m |
| sovraccarichi di esercizio | q' | 0,54 | kN/m |

Tab. IX-36 Carichi

c. Sezione di progetto (ascisse x dall'incastro)

| Nome | Notazione | Valore | Unità |
|---|-----------|--------|-------|
| a - di massimo momento | x_a | 5,70 | m |
| b - di taglio massimo | x_b | 0,63 | m |
| c - d'incastro | x_c | 0,00 | m |
| | x_1 | 1,45 | m |
| d - di variazione armatura | x_d | 1,76 | m |
| a' - di minimo momento (gancio di sollevamento) | x_0 | 0,90 | m |

Tab. IX-37 Carichi

d. Calcolo delle componenti agenti

| Fase di calcolo | Notazione | Valore | Unità |
|--------------------------|-----------|--------|-------|
| Fase iniziale | R' | 5,29 | kN |
| | M'_a | 15,08 | kNm |
| | V'_b | 4,71 | kN |
| | M'_d | 7,89 | kNm |
| | x_d | 1,76 | m |
| Fase transitoria | R' | 5,29 | kN |
| | M_0 | -0,38 | kNm |
| | x | 2,78 | m |
| | M_{+d} | 6,36 | kNm |
| Sovraccarichi permanenti | R'' | 0,70 | kN |
| | M''_a | 1,98 | kNm |
| | V''_b | 0,62 | kN |
| | M''_d | 1,04 | kNm |
| Sovraccarichi variabili | R | 29,91 | kN |
| | M_a | 85,24 | kNm |
| | V_b | 26,96 | kN |
| | M_d | 44,59 | kNm |

Tab. IX-38 Sezione di progetto (ascisse x dall'incastro)

e. Caratteristiche dei materiali

| Nome | Notazione | Valore | Unità |
|--|-------------|---------|-------------------|
| Resistenza di calcolo a trazione a 1 giorno di maturazione | f_{ctdj} | 1,24 | N/mm ² |
| Valore di calcolo della resistenza di aderenza | f_{bd} | 5,74 | N/mm ² |
| Resistenza a trazione di calcolo dell'acciaio da precompressione | f_{pd} | 1456,00 | N/mm ² |
| diametro dei cavi 1 | φ_1 | 8,00 | mm |
| lunghezza d'ancoraggio terminale dei cavi pretesi 1 | l_{b1} | 50,75 | cm |
| diametro dei cavi 2 | φ_2 | 16,00 | mm |
| lunghezza d'ancoraggio terminale dei cavi pretesi 2 | l_{b2} | 101,51 | cm |
| diametro dei cavi 3 | φ_3 | 7,00 | mm |
| lunghezza d'ancoraggio terminale dei cavi pretesi 3 | l_{b3} | 44,41 | cm |

Tab. IX-39 Analisi dell'aderenza

| Nome | Notazione | Valore | Unità |
|---|------------------|----------|-------------------|
| sovratensione iniziale (<tensione ammissibile in esercizio) | σ'_{pi} | 1400,00 | N/mm ² |
| differenza di temperature durante la fase di maturazione forzata | $\Delta\theta$ | 50,00 | °C |
| coefficiente di dilatazione termica dell'acciaio da precompressione | α_T | 1,00E-05 | °C-1 |
| calo tensione per riscaldamento | $\Delta\sigma_p$ | 97,50 | N/mm ² |

Tab. IX-40 Tesatura dei cavi (a 14 ore di maturazione forzata del calcestruzzo)

| Nome | Notazione | Valore | Unità |
|----------------------------------|---------------|---------|-------------------|
| Tensione iniziale | σ_{pi} | 1302,50 | N/mm ² |
| Area armatura di precompressione | A_{p1} | 100,53 | mm ² |
| Precompressione al tiro dei cavi | P'_{01} | 130,94 | kN |
| Area armatura di precompressione | A_{p2} | 201,06 | mm ² |
| Precompressione al tiro dei cavi | P'_{02} | 261,88 | kN |
| Area armatura di precompressione | A_{p3} | 38,48 | mm ² |
| Precompressione al tiro dei cavi | P'_{03} | 50,13 | kN |

Tab. IX-41 Tensione iniziale

f. Verifica delle tensioni

► Caratteristiche della sezione

| Nome | Notazione | Valore | Unità |
|---|-----------|----------|-----------------|
| Area dell'ala superiore | A_{as} | 162,00 | m ² |
| Area dell'anima | A_{an} | 146,25 | m ² |
| Area dell'ala inferiore | A_{ai} | 63,00 | m ² |
| Area sezione della trave (con soletta) | A | 371,25 | cm ² |
| Momento statico dell'ala superiore | S_{as} | 729,00 | cm ³ |
| Momento statico dell'anima | S_{an} | 3692,81 | cm ³ |
| Momento statico dell'ala inferiore | S_{ai} | 2724,75 | cm ³ |
| Momento statico della sezione della trave | S | 7146,56 | cm ³ |
| peso proprio | g_1 | 0,93 | kN/m |
| Baricentro posizione inferiore | y'_0 | 19,25 | cm |
| Baricentro posizione superiore | y''_0 | 25,75 | cm |
| Momento d'inerzia dell'ala superiore | I_{as} | 36338,63 | cm ⁴ |
| Momento d'inerzia dell'anima | I_{an} | 26072,11 | cm ⁴ |
| Momento d'inerzia dell'ala inferiore | I_{ai} | 36352,31 | cm ⁴ |
| Momento d'inerzia della sezione della trave | I | 98763,05 | cm ⁴ |

| Nome | Notazione | Valore | Unità |
|--|-----------|---------|-----------------|
| Modulo resistente del bordo superiore | W' | 5130,55 | cm ³ |
| Modulo resistente del bordo inferiore | W'' | 3835,46 | cm ³ |
| Posizione del trefolio in corrispondenza all'asse baricentrico inferiore | y_1 | 22,25 | cm |
| Posizione del trefolio in corrispondenza all'asse baricentrico inferiore | y_2 | 11,75 | cm |
| Posizione del trefolio in corrispondenza all'asse baricentrico inferiore | y_3 | 18,25 | cm |
| Modulo resistente sui trefoli | W_1 | 4438,79 | cm ³ |
| Modulo resistente sui trefoli | W_2 | 8405,37 | cm ³ |
| Modulo resistente sui trefoli | W_3 | 5411,67 | cm ³ |
| Momento statico dell'anima sotto l'asse baricentrico | S'_{an} | 1113,89 | cm ³ |
| Momento statico dell'ala inferiore sotto l'asse baricentrico | S'_{ai} | 1512,00 | cm ³ |
| Momento statico sotto l'asse baricentrico | S' | 2625,89 | cm ³ |
| Braccio coppia interna | z_0 | 37,61 | cm |

Tab. IX-42 Caratteristiche della sezione

► Sezione a (con 2x1 + 1x1 + 1x1 trefoli)

| Nome | Notazione | Valore | Unità |
|---|---------------|--------|-------------------|
| Baricentro posizione inferiore | y'_0 | 19,25 | cm |
| Posizione delle armature di precompressione | d_{p1} | 41,50 | cm |
| Posizione delle armature di precompressione | d_{p2} | 31,00 | cm |
| Posizione delle armature di precompressione | d_{p3} | 37,50 | cm |
| Sforzo assiale dovuto ai trefoli in posizione bassa | N'_{p1} | 130,94 | kN |
| Sforzo assiale dovuto al trefolio in posizione alta | N'_{p2} | 261,88 | kN |
| Sforzo assiale dovuto al trefolio in posizione media | N'_{p3} | 50,13 | kN |
| Sforzo assiale totale | N_p | 442,95 | kN |
| Momento con riferimento all'asse baricentrico dovuto a 1 trefolio | M'_{p1} | 29,13 | kNm |
| Momento con riferimento all'asse baricentrico dovuto a 1 trefolio | M'_{p2} | 30,77 | kNm |
| Momento con riferimento all'asse baricentrico dovuto a 1 trefolio | M'_{p3} | 9,15 | kNm |
| Momento con riferimento all'asse baricentrico totale | M_p | 69,05 | kNm |
| $\sigma'_c = N_p/A - (M_p - M'a)/W'$ | σ'_c | 1,41 | N/mm ² |
| $\sigma''_c = N_p/A + (M_p - M'a)/W''$ | σ''_c | 26,00 | N/mm ² |
| $\sigma_{c1} = N_p/A + (M_p - M'a)/W_1$ | σ_{c1} | 12,28 | N/mm ² |
| $\sigma_{c2} = N_p/A + (M_p - M'a)/W_2$ | σ_{c2} | 6,54 | N/mm ² |
| $\sigma_{c3} = N_p/A + (M_p - M'a)/W_3$ | σ_{c3} | 10,09 | N/mm ² |

Tab. IX-43 Precompressione con peso proprio

Studio delle perdite

A partire dal suo valore iniziale σ_{pi} , la tensione nel cavo di precompressione subisce sensibili decremmenti $\Delta\sigma_p$, che si evidenziano via via nel tempo fino a stabilizzarsi sul valore finale $\sigma_{p\infty} = \sigma_{pi} - \Delta\sigma_{p\infty}$. In ordine di precedenza temporale, si studiano i contributi delle tre cause di perdite lente, quelle del rilassamento delle armature di precompressione, quelle di ritiro e finalmente quelle della viscosità del calcestruzzo.

| Nome | Notazione | Valore | Unità |
|------------------------------------|--|--------|--------------------|
| Perdite per rilassamento | r | 0,83 | |
| | $c(r)$ | 1,93 | |
| | τ | 500,00 | |
| | ρ_1 | 2,50 | % (classe 2) |
| | $\tau_{0,75(1-r)}$ | 2,24 | |
| | $\Delta\sigma_{p\infty} / \sigma_{pi}$ | 4,82 | % |
| | ΔN_{p1} | 6,30 | kN |
| | ΔN_{p2} | 6,30 | kN |
| | ΔN_{p3} | 2,41 | kN |
| Perdite per ritiro | $\Delta\sigma_{p\infty}$ | 68,25 | kN/mm ² |
| | ΔN_{p1} | 6,86 | kN |
| | ΔN_{p2} | 13,72 | kN |
| | ΔN_{p3} | 2,63 | kN |
| viscosità | $\alpha_e = E_p / E_c$ | 5,31 | |
| | $\Delta N_{p1} = \alpha_e \varphi_{\infty} \sigma_{c1} A_{p1}$ | 8,85 | kN |
| | $\Delta N_{p2} = \alpha_e \varphi_{\infty} \sigma_{c2} A_{p2}$ | 9,43 | kN |
| | $\Delta N_{p3} = \alpha_e \varphi_{\infty} \sigma_{c2} A_{p3}$ | 14,56 | kN |
| totale | ΔN_{p1} | 22,02 | kN |
| | ΔN_{p2} | 29,46 | kN |
| | ΔN_{p3} | 19,60 | kN |
| Totale delle perdite nella sezione | ΔN_p | 71,08 | kN |
| | ΔM_p | 11,94 | kNm |
| | $\Delta\sigma'_c$ | 0,41 | N/mm ² |
| | $\Delta\sigma''_c$ | -5,03 | N/mm ² |
| | σ'_c | 1,82 | N/mm ² |
| | σ''_c | 20,98 | N/mm ² |

Tab. IX-44 Studio delle perdite

| Nome | Notazione | Valore | Unità |
|---|-------------------------------------|--------|-------------------|
| Contributo dovuto ai carichi permanenti | $\Delta\sigma'_c = M''_a / W'$ | 0,39 | N/mm ² |
| Contributo dovuto ai carichi permanenti | $\Delta\sigma''_c = -M''_a / W''$ | -0,52 | N/mm ² |
| | σ'_c (somma con le perdite) | 2,21 | N/mm ² |
| | σ''_c (somma con le perdite) | 20,46 | N/mm ² |

Tab. IX-45 Studio delle tensioni dovute ai carichi permanenti

| Nome | Notazione | Valore | Unità |
|--|---------------------------------|------------|-------------------|
| Contributo dovuto ai carichi variabili | $\Delta\sigma'_c = M_a / W'$ | 16,61 | N/mm ² |
| Contributo dovuto ai carichi variabili | $\Delta\sigma''_c = -M_a / W''$ | -22,22 | N/mm ² |
| Tensione parte superiore | σ'_c | 18,82 | N/mm ² |
| Verifica se la tensione agente è inferiore alla tensione di compressione centrata massima ammissibile in esercizio | | verificato | |
| Tensione parte inferiore | σ''_c | -1,76 | N/mm ² |
| Verifica se la tensione agente è inferiore alla tensione di trazione massima ammissibile in esercizio | | verificato | |

Tab. IX-46 Studio delle tensioni dovute ai carichi variabili e verifiche finali per la sezione a

► **Sezione d' (con 2x1 + 1x1 trefoli)**

| Nome | Notazione | Valore | Unità |
|--|---------------------------------|------------|-------------------|
| Posizione di calcolo | $x = x_d + I_b$ | 2,78 | cm |
| sollevamento (effetto dinamico ± 0,15) | α effetto dinamico ± 15% | 0,15 | |
| Tensione parte superiore | σ'_c | -0,48 | N/mm ² |
| Verifica se la tensione agente è inferiore alla tensione di trazione massima ammissibile in esercizio | | verificato | |
| Tensione parte inferiore | σ''_c | 28,53 | N/mm ² |
| Verifica se la tensione agente è inferiore alla tensione di compressione centrata massima ammissibile in esercizio | | verificato | |

Tab. IX-47 Verifiche finali per la sezione d'

► **Sezione d (con 2x1 trefoli + 1x1)**

| Nome | Notazione | Valore | Unità |
|---|---------------|--------|-------------------|
| Numero di trefoli in posizione bassa | | 3,00 | cm |
| Sforzo assiale dovuto ai trefoli in posizione bassa | N'_{p1} | 130,94 | kN |
| Momento con riferimento all'asse baricentrico | M'_{p1} | 29,13 | kNm |
| Numero di trefoli in posizione alta | | 0,00 | |
| Sforzo assiale dovuto ai trefoli in posizione bassa | N'_{p2} | 0,00 | kN |
| Momento con riferimento all'asse baricentrico | M'_{p2} | 0,00 | kNm |
| Numero di trefoli in posizione media | | 1,00 | |
| Sforzo assiale dovuto ai trefoli in posizione bassa | N'_{p3} | 50,13 | kN |
| Momento con riferimento all'asse baricentrico | M'_{p3} | 9,15 | kNm |
| Sforzo assiale totale | N_p | 181,07 | kN |
| Momento con riferimento all'asse baricentrico dovuto a 1 trefolio | M_p | 38,28 | kNm |
| | σ'_c | -0,82 | N/mm ² |
| | σ''_c | 12,80 | N/mm ² |
| $\sigma_{c1} = N_p/A + (M_p - M'_d)/W_1$ | σ_{c1} | 11,73 | N/mm ² |
| $\sigma_{c2} = N_p/A + (M_p - M'_d)/W_2$ | σ_{c2} | 0,00 | N/mm ² |
| $\sigma_{c3} = N_p/A + (M_p - M'_d)/W_3$ | σ_{c3} | 10,49 | N/mm ² |

Tab. IX-48 Precompressione con peso proprio

Studio delle perdite

A partire dal suo valore iniziale σ_{pi} , la tensione nel cavo di precompressione subisce sensibili decrementi $\Delta\sigma_p$, che si evidenziano via via nel tempo fino a stabilizzarsi sul valore finale $\sigma_{p\infty} = \sigma_{pi} - \Delta\sigma_{p\infty}$. In ordine di precedenza temporale, si studiano i contributi delle tre cause di perdite lente, quelle del rilassamento delle armature di precompressione, quelle di ritiro e finalmente quelle della viscosità del calcestruzzo.

| Nome | Notazione | Valore | Unità |
|----------------------|--|--------|-------------------|
| Viscosità | $\alpha_e = E_p / E_c$ | 5,31 | kN |
| | $\Delta N_{p1} = \alpha_e \varphi_{\infty} \sigma_{c1} A_{p1}$ | 8,46 | kN |
| | $\Delta N_{p2} = \alpha_e \varphi_{\infty} \sigma_{c2} A_{p2}$ | 0,00 | kN |
| | $\Delta N_{p3} = \alpha_e \varphi_{\infty} \sigma_{c2} A_{p3}$ | 5,79 | kN |
| Rilassamento | ΔN_{p1} | 6,30 | kN |
| | ΔN_{p2} | 0,00 | kN |
| | ΔN_{p3} | 2,41 | kN |
| Ritiro | ΔN_{p1} | 6,86 | kN |
| | ΔN_{p2} | 0,00 | kN |
| | ΔN_{p3} | 2,63 | kN |
| Totale delle perdite | ΔN_{p1} | 21,62 | kN |
| | ΔN_{p2} | 0,00 | kN |
| | ΔN_{p3} | 10,83 | kN |
| Nella sezione | ΔN_p | 32,46 | kN |
| | ΔM_p | 6,79 | kNm |
| | $\Delta\sigma'_c$ | 0,45 | N/mm ² |
| | $\Delta\sigma''_c$ | -2,64 | N/mm ² |
| | σ'_c | -0,37 | N/mm ² |
| | σ''_c | 10,16 | N/mm ² |

Tab. IX-49 Studio delle tensioni dovute ai carichi variabili e verifiche finali

| Nome | Notazione | Valore | Unità |
|---|-----------------------------------|--------|-------------------|
| Contributo dovuto ai carichi permanenti | $\Delta\sigma'_c = M''_d / W'$ | 0,20 | N/mm ² |
| Contributo dovuto ai carichi permanenti | $\Delta\sigma''_c = -M''_d / W''$ | -0,27 | N/mm ² |
| | σ'_c | -0,17 | N/mm ² |
| | σ''_c | 9,89 | N/mm ² |

Tab. IX-50 Studio delle tensioni dovute ai carichi permanenti

| Nome | Notazione | Valore | Unità |
|--|---------------------------------|------------|-------------------|
| Contributo dovuto ai carichi variabili | $\Delta\sigma'_c = M_d / W'$ | 8,69 | N/mm ² |
| Contributo dovuto ai carichi variabili | $\Delta\sigma''_c = -M_d / W''$ | -11,62 | N/mm ² |
| Tensione parte superiore | σ'_c | 8,52 | N/mm ² |
| Verifica se la tensione agente è inferiore alla tensione di compressione centrata massima ammissibile in esercizio | | verificato | |
| Tensione parte inferiore | σ''_c | -1,74 | N/mm ² |
| Verifica se la tensione agente è inferiore alla tensione di trazione massima ammissibile in esercizio | | verificato | |

Tab. IX-51 Studio delle tensioni dovute ai carichi variabili e verifiche finali

► **Sezione a' (con 2x1 + 1x1 trefoli)**

| Nome | Notazione | Valore | Unità |
|--|---|------------|-------------------|
| contributi dovuti alla precompressione | σ'_c | -2,58 | N/mm ² |
| | σ''_c | 14,86 | N/mm ² |
| contributi dovuti al sollevamento | α effetto dinamico $\pm 15\%$ | 0,15 | |
| | $\Delta\sigma'_c = + (1+\alpha) M_0 / W'$ | -0,08 | N/mm ² |
| | $\Delta\sigma''_c = - (1+\alpha) M_0 / W''$ | 0,12 | N/mm ² |
| Tensione parte superiore | σ'_c | -2,67 | N/mm ² |
| Verifica se la tensione agente è inferiore alla tensione di trazione massima ammissibile in esercizio | | verificato | |
| Tensione parte inferiore | σ''_c | 14,98 | N/mm ² |
| Verifica se la tensione agente è inferiore alla tensione di compressione centrata massima ammissibile in esercizio | | verificato | |

Tab. IX-52 Verifiche finali per la sezione d'

■ **g. Verifica di resistenza**

► **Sezione a (con 2x1 + 1x1 + 1x1 trefoli)**

| Nome | Notazione | Valore | Unità |
|---|-------------------------------|------------|-------------------|
| Armatatura presollecitata | | | |
| Diametro delle armature da precompressione 1 | φ_1 | 8,00 | mm |
| Numero di armature da precompressione | n_1 | 2,00 | |
| Area armatura di precompressione | A_{p1} | 100,53 | mm ² |
| Posizione delle armature di precompressione senza soletta | d_{p1} | 41,50 | cm |
| Diametro delle armature da precompressione 2 | φ_2 | 16,00 | mm |
| Numero di armature da precompressione | n_2 | 1,00 | |
| Area armatura di precompressione | A_{p2} | 201,06 | mm ² |
| Posizione delle armature di precompressione con soletta | d_{p2} | 31,00 | cm |
| Diametro delle armature da precompressione 3 | φ_3 | 7,00 | mm |
| Numero di armature da precompressione | n_3 | 1,00 | |
| Area armatura di precompressione | A_{p3} | 38,48 | mm ² |
| Posizione delle armature di precompressione con soletta | d_{p3} | 37,50 | cm |
| Area armatura di precompressione | A_p | 340,08 | mm ² |
| Calcolo del momento resistente delle armature di precompressione | | | |
| Resistenza ala compressa | t | 9,00 | cm |
| | f^*_{cd} | 32,30 | N/mm ² |
| Altezza zona compressa | $x = f_{cd} A_p / b f^*_{cd}$ | 8,52 | cm |
| Posizione media delle armature di precompressione | d' | 34,84 | cm |
| Braccio della copia interna | z | 30,58 | cm |
| Momento resistente delle armature di precompressione | M_{Rd} | 151,42 | kNm |
| Calcolo del momento agente | | | |
| Carichi peso proprio | Y_{G1} | 1,30 | Favorevoli |
| Carichi permanenti | Y_{G2} | 1,50 | Favorevoli |
| Carichi variabili | Y_Q | 1,50 | Favorevoli |
| Momento agente di calcolo dovuto ai carichi del peso proprio | M_{adG1} | 19,60 | |
| Momento agente di calcolo dovuto ai carichi permanenti | M_{adG2} | 2,97 | |
| Momento agente di calcolo dovuto ai carichi variabili | M_{adQ} | 127,86 | |
| Momento agente | M_{ad} | 150,43 | kNm |
| Verifica momento agente inferiore al momento resistente | | verificato | |

Tab. IX-53 Verifiche di resistenza a flessione per la sezione a

► **Sezione d (con 2x1 + 1x1 trefoli)**

| Nome | Notazione | Valore | Unità |
|---|-------------------------------|--------|-------------------|
| Armatura presollecitata | | | |
| Diametro delle armature da precompressione 1 | φ_1 | 8,00 | mm |
| Numero di armature da precompressione | n_1 | 3,00 | |
| Area armatura di precompressione | A_{p1} | 150,80 | mm ² |
| Posizione delle armature di precompressione senza soletta | d_{p1} | 41,50 | cm |
| Diametro delle armature da precompressione 2 | φ_2 | 16,00 | mm |
| Numero di armature da precompressione | n_2 | 0,00 | |
| Area armatura di precompressione | A_{p2} | 0,00 | mm ² |
| Posizione delle armature di precompressione con soletta | d_{p2} | 31,00 | cm |
| Diametro delle armature da precompressione 3 | φ_3 | 7,00 | mm |
| Numero di armature da precompressione | n_3 | 1,00 | |
| Area armatura di precompressione | A_{p3} | 38,48 | mm ² |
| Posizione delle armature di precompressione con soletta | d_{p3} | 37,50 | cm |
| Area armatura di precompressione | A_p | 189,28 | mm ² |
| Calcolo del momento resistente delle armature di precompressione | | | |
| Resistenza ala compressa | t | 9,00 | cm |
| | f_{cd}^* | 32,30 | N/mm ² |
| Altezza zona compressa | $x = f_{cd} A_p / b f_{cd}^*$ | 8,52 | cm |
| Posizione media delle armature di precompressione | d' | 40,69 | cm |
| Braccio della copia interna | z | 36,43 | cm |
| Momento resistente delle armature di precompressione | M_{Rd} | 100,39 | kNm |
| Calcolo del momento agente | | | |
| Carichi peso proprio | Y_{G1} | 1,30 | Sfavorevoli |
| Carichi permanenti | Y_{G2} | 1,50 | Sfavorevoli |
| Carichi variabili | Y_Q | 1,50 | Sfavorevoli |
| Momento agente di calcolo dovuto ai carichi del peso proprio | M_{EdG1} | 10,25 | kNm |
| Momento agente di calcolo dovuto ai carichi permanenti | M_{EdG2} | 1,55 | kNm |
| Momento agente di calcolo dovuto ai carichi variabili | M_{EdQ} | 66,88 | kNm |
| Momento agente | M_{Ed} | 78,68 | kNm |
| Verifica momento agente inferiore al momento resistente | verificato | | |

Tab. IX-54 Verifiche di resistenza a flessione al livello della sezione d'

► **Sezione b (con 2x1 + 1x1 trefoli)**

| Nome | Notazione | Valore | Unità |
|---|------------|--------|-------------|
| Analisi del taglio agente | | | |
| Carichi peso proprio | Y_{G1} | 1,30 | Sfavorevoli |
| Carichi permanenti | Y_{G2} | 1,50 | Sfavorevoli |
| Carichi variabili | Y_Q | 1,50 | Sfavorevoli |
| Taglio agente di calcolo dovuto ai carichi del peso proprio | V_{EdG1} | 6,12 | kN |
| Taglio agente di calcolo dovuto ai carichi permanenti | V_{EdG2} | 0,93 | kN |
| Taglio agente di calcolo dovuto ai carichi variabili | V_{EdQ} | 40,43 | kN |
| Taglio agente | V_{Ed} | 47,48 | kN |

| Nome | Notazione | Valore | Unità |
|---|--|-----------------------------|--------------------|
| Braccio coppia interna | z_0 | 37,61 | cm |
| Spessore d'anima | b_w | 4,50 | cm |
| | τ_G | 2,81 | N/mm ² |
| Armatura presollecitata | | | |
| Diametro delle armature da precompressione 1 | φ_1 | 8,00 | |
| Numero di armature da precompressione | n_1 | 3,00 | |
| Area armatura di precompressione | A_{p1} | 150,80 | cm ² |
| Posizione delle armature di precompressione senza soletta | d_{p1} | 41,50 | cm |
| Diametro delle armature da precompressione 2 | φ_2 | 16,00 | |
| Numero di armature da precompressione | n_2 | 0,00 | |
| Area armatura di precompressione | A_{p2} | 0,00 | cm ² |
| Posizione delle armature di precompressione con soletta | d_{p2} | 31,00 | cm |
| Diametro delle armature da precompressione 3 | φ_3 | 7,00 | |
| Numero di armature da precompressione | n_3 | 1,00 | |
| Area armatura di precompressione | A_{p3} | 38,48 | cm ² |
| Posizione delle armature di precompressione con soletta | d_{p3} | 37,50 | cm |
| Analisi della precompressione agente | | | |
| | Y_P | 1,00 | |
| diffusione parziale della precompressione | x_b / I_b | 0,62 | |
| Perdite per rilassamento | r | 0,83 | |
| Forza di precompressione | N_P | 181,07 | kN |
| | N_{Ed} | 92,51 | kN |
| | σ_G | 0,25 | N/mm ² |
| | σ_I | 2,14 | N/mm ² |
| | $\lambda_I = \tau_G / \sigma_I$ | 1,31 | |
| Calcolo della staffatura minima | | | |
| | $a_w = 0,2 b_w f_{ctm} f_{yk}$ | 0,68 | cm ² /m |
| distanza tra le staffe | d_s | 200,00 | mm |
| diametro dei ferri | φ | 5,00 | mm |
| area finale | a_w | 1,96 | cm ² /m |
| rapporto meccanico | $\omega_w = a_w f_{yd} / b_w f_{c2}$ | 0,10 | |
| | $\lambda_r = \sqrt{(1 - \omega_w) / \omega_w}$ | 2,99 | |
| | $\lambda_{max} = \lambda_r + 1$ | 2,31 | |
| | abbiamo quindi | $\lambda_r > \lambda_{max}$ | |
| | si assume $\lambda_C =$ | 2,00 | |
| Taglio resistente | V_{Rd} | 57,80 | |

Tab. IX-55 Verifiche di resistenza al taglio al livello della sezione b

► Sezione d'appoggio (con 2x1 + 1x1 trefoli)

| Nome | Notazione | Valore | Unità |
|--------------------------------------|-----------|--------|-------------|
| Calcolo della reazione agente | | | |
| Carichi peso proprio | Y_{G1} | 1,30 | Sfavorevoli |
| Carichi permanenti | Y_{G2} | 1,50 | Sfavorevoli |
| Carichi variabili | Y_Q | 1,50 | Sfavorevoli |

| Nome | Notazione | Valore | Unità |
|--|--|------------|-----------------|
| Reazione agente di calcolo dovuto ai carichi del peso proprio | R_{EdG1} | 6,88 | kN |
| Reazione agente di calcolo dovuto ai carichi permanenti | R_{EdG2} | 1,04 | kN |
| Reazione agente di calcolo dovuto ai carichi variabili | R_{EdQ} | 44,86 | kN |
| Reazione agente di calcolo | R_E | 52,78 | kN |
| Disposizione e dimensione dei ferri | | | |
| <i>Ferri piegati</i> | | | |
| diametro | φ_t | 12,00 | mm |
| numero | n_t | 2,00 | |
| area | A_{st} | 2,26 | cm ² |
| inclinazione | α | 45,00 | ° |
| inclinazione adimensionata | λ_{st} | 1,00 | |
| <i>Ferri longitudinali superiori</i> | | | |
| diametro | φ_l | 8,00 | mm |
| numero | n_l | 4,00 | |
| area | A_{sl} | 2,01 | cm ² |
| inclinazione adimensionata del calcestruzzo | si assume $\lambda_C =$ | 2,00 | |
| Braccio della copia interna | z | 31,36 | cm |
| | λ' | 1,00 | |
| | $\lambda_0 = \lambda_C / 2$ | 1,00 | |
| | l_1 | 43,86 | cm |
| | l_3 | 43,86 | cm |
| | V_{Rd} | 57,80 | |
| Verifiche della resistenza ultima al bordo dell'incastro al nodo superiore | | | |
| Resistenza dei ferri piegati | $P_{rst} = A_{st} f_{sd} 1/\sqrt{2}$ | 62,59 | kN |
| verifica resistenza dei ferri piegati superiore alla reazione agente | | verificato | |
| Resistenza dei ferri longitudinali | $P_{rsl} = A_{sl} f_{sd} 1/\lambda'$ | 78,68 | kN |
| verifica resistenza dei ferri longitudinali superiore alla reazione agente | | verificato | |
| Verifiche della resistenza ultima al bordo dell'incastro al nodo inferiore a l_1 dal bordo | | | |
| Resistenza dei ferri da precompressione 1 | $R_{ld1} = (A_{p1} f_{pd} / \lambda_s + \lambda_0) (l_1 / l_{b1})$ | 63,24 | kN |
| Resistenza dei ferri da precompressione 3 | $R_{ld3} = (A_{p3} f_{pd} / \lambda_s + \lambda_0) (l_3 / l_{b3})$ | 27,67 | kN |
| Resistenza totale dei ferri da precompressione | R_{ld3} | 90,91 | kN |
| verifica resistenza dei ferri da compressione superiore alla reazione agente | | verificato | |

Tab. IX-56 Verifiche a rottura delle armature d'incastro ai bordi del travetto

3. VERIFICA DELL'ELEMENTO PREFABBRICATO NON IN OPERA

a. Analisi delle sollecitazioni

In questa parte ci interessiamo quindi alla sola edificabilità dell'elemento di calcestruzzo precompresso. Anche se abbiamo fatto un calcolo a rottura, non l'inseriremo all'interno di questa relazione perché tale situazione si rivela totalmente ipotetica. Ci interessa solo quindi il comportamento dell'elemento totalmente nudo. Usiamo i dati che provengono dal predimensionamento precedentemente effettuato e verifichiamo se a vuoto, in una situazione di esercizio, il travetto non si fessura.

► Carichi

| Nome | Notazione | Valore | Unità |
|--------------|-----------|--------|-------|
| Nome | Notazione | Valore | Unità |
| peso proprio | g_1 | 0,70 | kN/m |

Tab. IX-57 Condizioni di carico

► Sezione di progetto (ascisse x dall'incastro)

| Nome | Notazione | Valore | Unità |
|---|-----------|--------|-------|
| a - di massimo momento | x_a | 5,70 | m |
| b - di taglio massimo | x_b | 0,53 | m |
| c - d'incastro | x_c | 0,00 | m |
| | x_1 | 1,45 | m |
| d - di variazione armatura | x_d | 1,72 | m |
| a' - di minimo momento (gancio di sollevamento) | x_0 | 0,90 | m |

Tab. IX-58 Ascisse delle sezioni del travetto dove andranno fatte le verifiche

► Calcolo delle componenti agenti

| Nome | Notazione | Valore | Unità |
|------------------|-----------|--------|-------|
| Fase iniziale | R' | 4,01 | kN |
| | M'_a | 11,42 | kNm |
| | V'_b | 3,63 | kN |
| | M'_d | 5,84 | kNm |
| | x_d | 1,72 | m |
| Fase transitoria | R' | 4,01 | kN |
| | M_0 | -0,28 | kNm |
| | x | 2,73 | m |
| | M_d^+ | 4,71 | kNm |

Tab. IX-59 Calcolo delle componenti agenti al livello delle diverse sezioni di verifica

b. Verifica delle tensioni

► **Caratteristiche della sezione**

| Nome | Notazione | Valore | Unità |
|--|-----------|----------|-----------------|
| Area dell'ala superiore | A_{as} | 72,00 | m ² |
| Area dell'anima | A_{an} | 146,25 | m ² |
| Area dell'ala inferiore | A_{ai} | 63,00 | m ² |
| Area sezione della trave (con soletta) | A | 281,25 | cm ² |
| Momento statico dell'ala superiore | S_{as} | 144,00 | cm ³ |
| Momento statico dell'anima | S_{an} | 2961,56 | cm ³ |
| Momento statico dell'ala inferiore | S_{ai} | 2409,75 | cm ³ |
| Momento statico della sezione della trave | S | 5515,31 | cm ³ |
| peso proprio | g_1 | 0,70 | kN/m |
| Baricentro posizione inferiore | y'_0 | 19,61 | cm |
| Baricentro posizione superiore | y''_0 | 20,39 | cm |
| Momento d'inerzia dell'ala superiore | I_{as} | 22424,07 | cm ⁴ |
| Momento d'inerzia dell'anima | I_{an} | 15379,71 | cm ⁴ |
| Momento d'inerzia dell'ala inferiore | I_{ai} | 21953,64 | cm ⁴ |
| Momento d'inerzia della sezione della trave | I | 59757,42 | cm ⁴ |
| Modulo resistente del bordo superiore | W' | 3047,29 | cm ³ |
| Modulo resistente del bordo inferiore | W'' | 2930,72 | cm ³ |
| Posizione del trefolio in corrispondenza all'asse baricentrico inferiore | y_1 | 16,89 | cm |
| Posizione del trefolio in corrispondenza all'asse baricentrico inferiore | y_2 | 6,39 | cm |
| Posizione del trefolio in corrispondenza all'asse baricentrico inferiore | y_3 | 12,89 | cm |
| Modulo resistente sui trefoli | W_1 | 3538,04 | cm ³ |
| Modulo resistente sui trefoli | W_2 | 9351,71 | cm ³ |
| Modulo resistente sui trefoli | W_3 | 4635,95 | cm ³ |
| Momento statico dell'anima sotto l'asse baricentrico | S'_{an} | 641,86 | cm ³ |
| Momento statico dell'ala inferiore sotto l'asse baricentrico | S'_{ai} | 1174,32 | cm ³ |
| Momento statico sotto l'asse baricentrico | S' | 1816,18 | cm ³ |
| Braccio coppia interna | z_0 | 32,90 | cm |

Tab. IX-60 Caratteristiche della sezione

► Sezione a (con 2x1 + 1x1 + 1x1 trefoli)

| Nome | Notazione | Valore | Unità |
|---|---------------|--------|-------------------|
| Baricentro posizione inferiore | y'_0 | 19,61 | cm |
| Posizione delle armature di precompressione | d_{p1} | 36,50 | cm |
| Posizione delle armature di precompressione | d_{p2} | 26,00 | cm |
| Posizione delle armature di precompressione | d_{p3} | 32,50 | cm |
| Sforzo assiale dovuto ai trefoli in posizione bassa | N'_{p1} | 100,25 | kN |
| Sforzo assiale dovuto al trefolio in posizione alta | N'_{p2} | 261,88 | kN |
| Sforzo assiale dovuto al trefolio in posizione media | N'_{p3} | 65,47 | kN |
| Sforzo assiale totale | N_p | 427,61 | kN |
| Momento con riferimento all'asse baricentrico dovuto a 1 trefolio | M'_{p1} | 16,93 | kNm |
| Momento con riferimento all'asse baricentrico dovuto a 1 trefolio | M'_{p2} | 16,73 | kNm |
| Momento con riferimento all'asse baricentrico dovuto a 1 trefolio | M'_{p3} | 8,44 | kNm |
| Momento con riferimento all'asse baricentrico totale | M_p | 42,11 | kNm |
| | | | |
| $\sigma'_c = N_p/A - (M_p - M'a)/W'$ | σ'_c | 5,13 | N/mm ² |
| $\sigma''_c = N_p/A + (M_p - M'a)/W''$ | σ''_c | 25,67 | N/mm ² |
| $\sigma_{c1} = N_p/A + (M_p - M'a)/W1$ | σ_{c1} | 8,82 | N/mm ² |
| $\sigma_{c2} = N_p/A + (M_p - M'a)/W2$ | σ_{c2} | 3,43 | N/mm ² |
| $\sigma_{c3} = N_p/A + (M_p - M'a)/W3$ | σ_{c3} | 6,77 | N/mm ² |

Tab. IX-61 Precompressione con peso proprio

Studio delle perdite

A partire dal suo valore iniziale σ_{pi} , la tensione nel cavo di precompressione subisce sensibili decremmenti $\Delta\sigma_p$, che si evidenzia via via nel tempo fino a stabilizzarsi sul valore finale $\sigma_{p\infty} = \sigma_{pi} - \Delta\sigma_{p\infty}$. In ordine di precedenza temporale, si studiano i contributi delle tre cause di perdite lente, quelle del rilassamento delle armature di precompressione, quelle di ritiro e finalmente quelle della viscosità del calcestruzzo.

| Nome | Notazione | Valore | Unità |
|--------------------------|--|--------|-----------------|
| Perdite per rilassamento | r | 0,83 | |
| | $c(r)$ | 1,93 | |
| | τ | 500,00 | |
| | ρ_1 | 2,50 | % (classe 2) |
| | $\tau^{0,75(1-r)}$ | 2,24 | |
| | $\Delta\sigma_{p\infty} / \sigma_{pi}$ | 4,82 | % |
| | ΔN_{p1} | 4,83 | kN |
| | ΔN_{p2} | 4,83 | kN |
| | ΔN_{p3} | 3,15 | kN |

| Nome | Notazione | Valore | Unità |
|------------------------------------|--|--------|--------------------|
| Perdite per ritiro | $\Delta\sigma_{p\infty}$ | 68,25 | kN/mm ² |
| | ΔN_{p1} | 5,25 | kN |
| | ΔN_{p2} | 13,72 | kN |
| | ΔN_{p3} | 3,43 | kN |
| viscosità | $\alpha_e = E_p / E_c$ | 5,31 | |
| | $\Delta N_{p1} = \alpha_e \varphi_{\infty} \sigma_{c1} A_{p1}$ | 4,87 | kN |
| | $\Delta N_{p2} = \alpha_e \varphi_{\infty} \sigma_{c2} A_{p2}$ | 3,79 | kN |
| | $\Delta N_{p3} = \alpha_e \varphi_{\infty} \sigma_{c3} A_{p3}$ | 7,48 | kN |
| totale | ΔN_{p1} | 14,95 | kN |
| | ΔN_{p2} | 22,34 | kN |
| | ΔN_{p3} | 14,06 | kN |
| Totale delle perdite nella sezione | ΔN_p | 51,35 | kN |
| | ΔM_p | 5,77 | kNm |
| | $\Delta\sigma'_c$ | 0,07 | N/mm ² |
| | $\Delta\sigma''_c$ | -3,79 | N/mm ² |

Tab. IX-62 Effetto delle perdite SLE

Adesso possiamo ottenere quindi le massime tensioni all'interno del nostro travetto sottomesso alla sola azione dovuta al suo peso proprio. Vediamo che l'intero elemento è compresso.

| Nome | Notazione | Valore | Unità |
|---|--------------|------------|-------------------|
| | σ'_c | 5,20 | N/mm ² |
| Verifica se la tensione agente è inferiore alla tensione di compressione massima ammissibile in esercizio | | verificato | |
| | σ''_c | 21,88 | N/mm ² |
| Verifica se la tensione agente è superiore alla tensione di compressione massima ammissibile in esercizio | | verificato | |

Tab. IX-63 Verifiche delle tensioni massime ammissibili SLE al livello della sezione a

► **Sezione d' (con 2x1 + 1x1 + 1x1 trefoli)**

| Nome | Notazione | Valore | Unità |
|---|--------------------------------------|--------|-------|
| posizione di calcolo | $x = x_d + l_b$ | 2,73 | cm |
| sollevamento (effetto dinamico $\pm 0,15$) | α effetto dinamico $\pm 15\%$ | 0,15 | |

Tab. IX-64 -

Adesso possiamo ottenere quindi le massime tensioni all'interno del nostro travetto sottomesso alla sola azione dovuta al suo peso proprio. Vediamo che l'intero elemento è compresso.

| Nome | Notazione | Valore | Unità |
|---|--------------|------------|-------------------|
| | σ'_c | 2,70 | N/mm ² |
| Verifica se la tensione agente è inferiore alla tensione di compressione massima ammissibile in esercizio | | verificato | |
| | σ''_c | 28,20 | N/mm ² |
| Verifica se la tensione agente è superiore alla tensione di compressione massima ammissibile in esercizio | | verificato | |

Tab. IX-65 Verifiche delle tensioni massime ammissibili SLE al livello della sezione d'

► Sezione d (con 2x1 trefoli + 1x1)

| Nome | Notazione | Valore | Unità |
|---|---------------|--------|-------------------|
| Numero di trefoli in posizione bassa | | 3,00 | |
| Sforzo assiale dovuto ai trefoli in posizione bassa | N'_{p1} | 100,25 | kN |
| Momento con riferimento all'asse baricentrico | M'_{p1} | 16,93 | kNm |
| Numero di trefoli in posizione alta | | 0,00 | |
| Sforzo assiale dovuto ai trefoli in posizione bassa | N'_{p2} | 0,00 | kN |
| Momento con riferimento all'asse baricentrico | M'_{p2} | 0,00 | kNm |
| Numero di trefoli in posizione media | | 1,00 | |
| Sforzo assiale dovuto ai trefoli in posizione bassa | N'_{p3} | 65,47 | kN |
| Momento con riferimento all'asse baricentrico | M'_{p3} | 8,44 | kNm |
| Sforzo assiale totale | N_p | 165,72 | kN |
| Momento con riferimento all'asse baricentrico dovuto a 1 trefolio | M_p | 25,37 | kNm |
| | σ'_c | -0,23 | N/mm ² |
| | σ''_c | 12,56 | N/mm ² |
| $\sigma_{c1} = N_p/A + (M_p - M'_d)/W_1$ | σ_{c1} | 11,41 | N/mm ² |
| $\sigma_{c2} = N_p/A + (M_p - M'_d)/W_2$ | σ_{c2} | 0,00 | N/mm ² |
| $\sigma_{c3} = N_p/A + (M_p - M'_d)/W_3$ | σ_{c3} | 10,11 | N/mm ² |

Tab. IX-66 Precompressione con peso proprio

Studio delle perdite

A partire dal suo valore iniziale σ_{pi} , la tensione nel cavo di precompressione subisce sensibili decrementi $\Delta\sigma$, che si evidenzia via via nel tempo fino a stabilizzarsi sul valore finale $\sigma_{p\infty} = \sigma_{pi} - \Delta\sigma_{\infty}$. In ordine di precedenza temporale, si studiano i contributi delle tre cause di perdite lente, quelle del rilassamento delle armature di precompressione, quelle di ritiro e finalmente quelle della viscosità del calcestruzzo.

| Nome | Notazione | Valore | Unità |
|----------------------|--|--------|-------------------|
| viscosità | $\alpha_e = E_p / E_c$ | 5,31 | kN |
| | $\Delta N_{p1} = \alpha_e \varphi_{\infty} \sigma_{c1} A_{p1}$ | 6,30 | kN |
| | $\Delta N_{p2} = \alpha_e \varphi_{\infty} \sigma_{c2} A_{p2}$ | 0,00 | kN |
| rilassamento | $\Delta N_{p3} = \alpha_e \varphi_{\infty} \sigma_{c3} A_{p3}$ | 7,29 | kN |
| | ΔN_{p1} | 4,83 | kN |
| | ΔN_{p2} | 0,00 | kN |
| ritiro | ΔN_{p3} | 3,15 | kN |
| | ΔN_{p1} | 5,25 | kN |
| | ΔN_{p2} | 0,00 | kN |
| totale delle perdite | ΔN_{p3} | 3,43 | kN |
| | ΔN_{p1} | 16,38 | kN |
| | ΔN_{p2} | 0,00 | kN |
| nella sezione | ΔN_{p3} | 13,87 | kN |
| | ΔN_p | 30,25 | kN |
| | ΔM_p | 4,55 | kNm |
| | $\Delta\sigma'_c$ | 0,42 | N/mm ² |
| | $\Delta\sigma''_c$ | -2,63 | N/mm ² |

Tab. IX-67 Effetto delle perdite SLE

Adesso possiamo ottenere quindi le massime tensioni all'interno del nostro travetto sottomesso alla sola azione dovuta al suo peso proprio. Vediamo che l'intero elemento è compresso.

| Nome | Notazione | Valore | Unità |
|---|--------------|------------|-------------------|
| | σ'_c | 0,19 | N/mm ² |
| Verifica se la tensione agente è inferiore alla tensione di trazione massima ammissibile in esercizio | | verificato | |
| | σ''_c | 9,93 | N/mm ² |
| Verifica se la tensione agente è superiore alla tensione di compressione massima ammissibile in esercizio | | verificato | |

Tab. IX-68 Verifiche delle tensioni massime ammissibili SLE al livello della sezione d

► **Sezione a' (con 2x1 + 1x1 trefoli)**

| Nome | Notazione | Valore | Unità |
|--|---|--------|-------------------|
| contributi dovuti alla precompressione | σ'_c | -2,43 | N/mm ² |
| | σ''_c | 14,55 | N/mm ² |
| contributi dovuti al sollevamento | α effetto dinamico $\pm 15\%$ | 0,15 | |
| | $\Delta\sigma'_c = + (1+\alpha) M_0 / W'$ | -0,11 | N/mm ² |
| | $\Delta\sigma''_c = - (1+\alpha) M_0 / W''$ | 0,12 | N/mm ² |

Tab. IX-69 Precompressione con peso proprio

Adesso possiamo ottenere quindi le massime tensioni all'interno del nostro travetto sottomesso alla sola azione dovuta al suo peso proprio. Vediamo che la parte inferiore dell'elemento raggiunge una certa trazione ma sempre inferiore. La sezione non si parzializza.

| Nome | Notazione | Valore | Unità |
|---|--------------|------------|-------------------|
| | σ'_c | -2,54 | N/mm ² |
| Verifica se la tensione agente è inferiore alla tensione di trazione massima ammissibile in esercizio | | verificato | |
| | σ''_c | 14,67 | N/mm ² |
| Verifica se la tensione agente è superiore alla tensione di compressione massima ammissibile in esercizio | | verificato | |

Tab. IX-70 Verifiche delle tensioni massime ammissibili SLE al livello della sezione a'

E. DIMENSIONAMENTO E VERIFICA DELLE TRAVI LONGITUDINALI

1. PREMESSA

Il dimensionamento è stato effettuato per le 6 travi considerate. Ma alla fine il risultato è sempre lo stesso. Quindi in questa parte spiegheremo e svilupperemo l'unico predimensionamento della trave che sopporta il solaio del primo piano.

La seguente relazione ha per scopo di far capire quale procedimento scientifico è stato eseguito nel nostro campo. Per la totalità delle formule e maggiori dettagli, invitiamo il lettore a riferirsi alle NTC Italiane sul calcestruzzo, ai Eurocodici 2 sulla progettazione delle strutture in calcestruzzo armato e al libro Volume 2A Cemento Armato : Calcolo agli stati limiti

(Giandomenico Toniolo, Tecnica delle costruzioni, volume 2A, Cemento armato : calcolo agli stati limiti, Masson, Milano, 1995).

Ecco prima di tutto alcuni dati geometrici e di calcolo ritenuti per il predimensionamento delle travi.

2. ANALISI DEL TELAIO

a. Premessa

Consideriamo il telaio di 7 campate di cui i vari dati sono dettagliati nella seguente tabella.

| Nome | Notazione | Valore | Unità |
|---|-----------------|--------|-------------------|
| Densità del calcestruzzo | | 25,00 | kN/m ³ |
| Altezza della trave | h | 0,50 | m |
| Larghezza della trave | b | 0,25 | m |
| Superficie della trave | s _t | 0,13 | m ² |
| Profondità d'influenza del solaio | | 6,00 | m |
| Copriferro Inferiore | c | 0,04 | m |
| Altezza utile | d | 0,46 | m |
| Braccio della copia interna approssimato adimensionale | ζ | 0,90 | |
| Distanza dal bordo superiore dell'acciaio superiore | d' | 0,04 | m |
| Coefficiente di sicurezza per il dimensionamento delle armature | γ _f | 1,40 | |
| Rapporto di omogeneizzazione | m | 15,00 | |
| Inclinazione dei conci di calcestruzzo nell'anima della trave | λ _c | 2,00 | |
| Inclinazione delle staffe verticali | α | 90,00 | ° |
| Lunghezza ridotta approssimata dei conci | Δ _x | 41,40 | cm |
| Inclinazione del primo concio di calcestruzzo | ψ _i | 45,00 | ° |
| Inclinazione del primo concio di calcestruzzo | λ _i | 1,00 | |
| modello a stress block del cls | β ₀ | 0,80 | |
| Rapporto tra f _{sd} e f _{c1} | r | 15,35 | |
| Rapporto tra f _{sd} e f _{c2} | r | 30,69 | |
| limite tra il campo delle deboli armature e delle medie | ω _{sa} | 0,18 | |
| limite tra il campo delle medie armature e le forti | ω _{sc} | 0,46 | |
| Coefficiente di sicurezza per il dimensionamento delle armature | γ _f | 1,40 | |

Tab. IX-71 Dati geometrici e di calcolo

| Numero della campata | Coefficiente correttivo per l'influenza | Profondità d'influenza corretta [m] | Lunghezza della campata [m] | Carico fisso [kN/m] | Carico variabile [kN/m] | E _{cm} [N/mm ²] | I [cm ⁴] |
|----------------------|---|-------------------------------------|-----------------------------|---------------------|-------------------------|--------------------------------------|----------------------|
| a | 0,8 | 4,8 | 4,70 | 40,03 | 24,00 | 31357,16 | 260416,67 |
| b | 1 | 6 | 4,70 | 48,08 | 30,00 | 31357,16 | 260416,67 |
| c | 1,2 | 7,2 | 4,70 | 56,13 | 36,00 | 31357,16 | 260416,67 |
| d | 1,2 | 7,2 | 4,70 | 56,13 | 36,00 | 31357,16 | 260416,67 |
| e | 1,2 | 7,2 | 4,70 | 56,13 | 36,00 | 31357,16 | 260416,67 |
| f | 1 | 6 | 4,70 | 48,08 | 30,00 | 31357,16 | 260416,67 |
| g | 0,8 | 4,8 | 4,70 | 40,03 | 24,00 | 31357,16 | 260416,67 |

Tab. IX-72 Dati geometrici e di calcolo

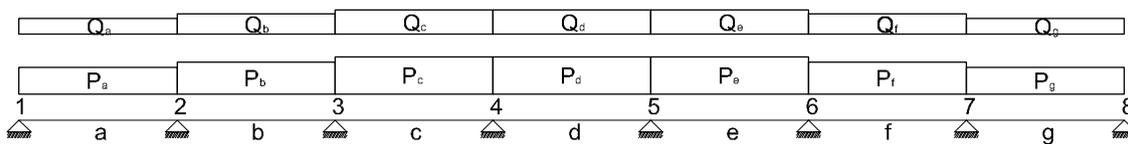


Fig. IX-12 Schema statico della trave a 6 campate

Per il calcolo dei momenti e tagli agenti massimi, sia in esercizio che a rottura, studiamo le diverse sovrapposizioni, stando attenti di applicare i fattori correttivi per il calcolo a rottura.

La determinazione di questi momenti e tagli agenti massimi viene effettuata in due tappe di calcolo.

La prima tappa consiste in un modello di trave a 7 campate e in semplice appoggio. Questo calcolo permette di determinare i momenti e taglie agenti massimi al livello degli appoggi (cioè degli incastrati con i pilastri) non di bordo.

La seconda tappa consiste a considerare tutte le campate incastrate ad ogni lato. Questo calcolo verrà effettuato solo per le campate estreme. Infatti, una verifica comunque da noi effettuata, conferma che il calcolo così effettuato per le altre campate porta a dei risultati inferiori a quelli ottenuti col modello a semplice appoggio.

b. Calcolo del telaio su semplice appoggio

Usiamo il metodo delle forze.

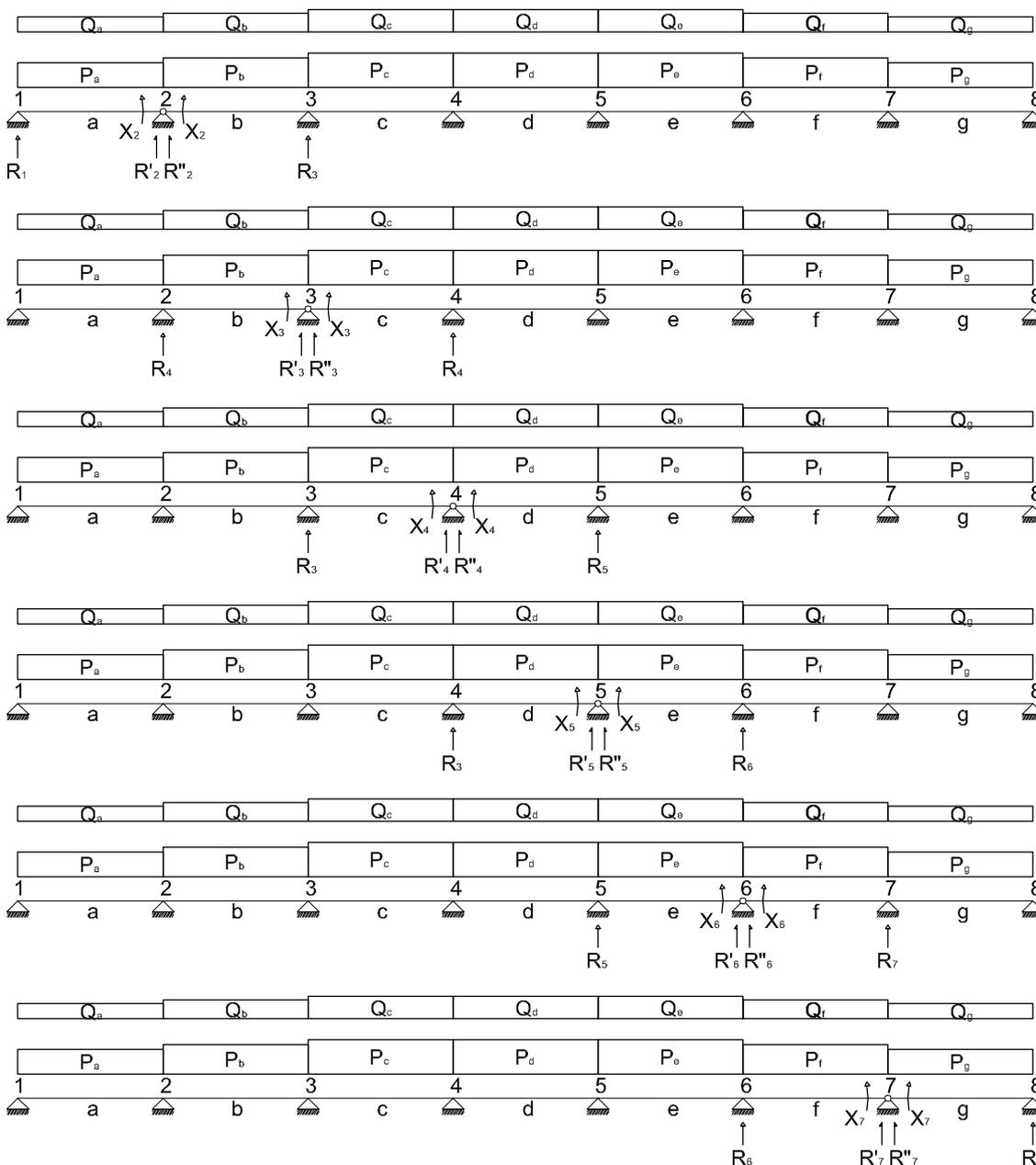


Fig. IX-13 Schemi statici del metodo delle forze

Dobbiamo risolvere un sistema di 6 equazioni lineari con 6 sconosciute e tutte indipendenti del tipo : $\Phi X + \Phi_0 = 0$.

Ci portano a :

$$\begin{pmatrix} \varphi_{22} & \varphi_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \varphi_{32} & \varphi_{33} & \varphi_{34} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \varphi_{43} & \varphi_{44} & \varphi_{45} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \varphi_{54} & \varphi_{55} & \varphi_{56} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \varphi_{65} & \varphi_{66} & \varphi_{67} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \varphi_{76} & \varphi_{77} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \\ X_6 \\ X_7 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \varphi_{20} \\ \varphi_{30} \\ \varphi_{40} \\ \varphi_{50} \\ \varphi_{60} \\ \varphi_{70} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\Phi = \begin{pmatrix} 3,8 \text{ E-10} & 9,6 \text{ E-11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 9,6 \text{ E-11} & 3,8 \text{ E-10} & 9,6 \text{ E-11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 9,6 \text{ E-11} & 3,8 \text{ E-10} & 9,6 \text{ E-11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 9,6 \text{ E-11} & 3,8 \text{ E-10} & 9,6 \text{ E-11} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 9,6 \text{ E-11} & 3,8 \text{ E-10} & 9,6 \text{ E-11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 9,6 \text{ E-11} & 3,8 \text{ E-10} \end{pmatrix}$$

Ecco le varie espressioni dei diversi coefficienti :

$$\varphi_{30} = \frac{q_b * l_b^3}{24 * E_b * I_b} + \frac{q_c * l_c^3}{24 * E_c * I_c}$$

$$\varphi_{40} = \frac{q_c * l_c^3}{24 * E_c * I_c} + \frac{q_d * l_d^3}{24 * E_d * I_d}$$

$$\varphi_{50} = \frac{q_d * l_d^3}{24 * E_d * I_d} + \frac{q_e * l_e^3}{24 * E_e * I_e}$$

$$\varphi_{60} = \frac{q_e * l_e^3}{24 * E_e * I_e} + \frac{q_f * l_f^3}{24 * E_f * I_f}$$

$$\varphi_{70} = \frac{q_f * l_f^3}{24 * E_f * I_f} + \frac{q_g * l_g^3}{24 * E_g * I_g}$$

$$\varphi_{22} = \frac{l_a}{3 * E_a * I_a} + \frac{l_b}{3 * E_b * I_b}$$

$$\varphi_{33} = \frac{l_b}{3 * E_b * I_b} + \frac{l_c}{3 * E_c * I_c}$$

$$\varphi_{44} = \frac{l_c}{3 * E_c * I_c} + \frac{l_d}{3 * E_d * I_d}$$

$$\varphi_{55} = \frac{l_d}{3 * E_d * I_d} + \frac{l_e}{3 * E_e * I_e}$$

$$\varphi_{66} = \frac{l_e}{3 * E_e * I_e} + \frac{l_f}{3 * E_f * I_f}$$

$$\varphi_{77} = \frac{l_f}{3 * E_f * I_f} + \frac{l_g}{3 * E_g * I_g}$$

$$\varphi_{23} = \frac{l_b}{6 * E_b * I_b} = \varphi_{23}$$

$$\varphi_{34} = \frac{l_c}{6 * E_c * I_c} = \varphi_{43}$$

$$\varphi_{45} = \frac{l_d}{6 * E_d * I_d} = \varphi_{54}$$

$$\varphi_{56} = \frac{l_e}{6 * E_e * I_e} = \varphi_{65}$$

$$\varphi_{67} = \frac{l_f}{6 * E_f * I_f} = \varphi_{76}$$

$$\Phi^{-1} = \begin{pmatrix} 2,8 \text{ E+09} & -7,5 \text{ E+08} & 2,0 \text{ E+08} & -5,4 \text{ E+07} & 1,4 \text{ E+07} & -3,6 \text{ E+06} \\ -7,5 \text{ E+08} & 3,0 \text{ E+09} & -8,0 \text{ E+08} & 2,1 \text{ E+08} & -5,7 \text{ E+07} & 1,4 \text{ E+07} \\ 2,0 \text{ E+08} & -8,0 \text{ E+08} & 3,0 \text{ E+09} & -8,1 \text{ E+08} & 2,1 \text{ E+08} & -5,4 \text{ E+07} \\ -5,4 \text{ E+07} & 2,1 \text{ E+08} & -8,1 \text{ E+08} & 3,0 \text{ E+09} & -8,0 \text{ E+08} & 2,0 \text{ E+08} \\ 1,4 \text{ E+07} & -5,7 \text{ E+07} & 2,1 \text{ E+08} & -8,0 \text{ E+08} & 3,0 \text{ E+09} & -7,5 \text{ E+08} \\ -3,6 \text{ E+06} & 1,4 \text{ E+07} & -5,4 \text{ E+07} & 2,0 \text{ E+08} & -7,5 \text{ E+08} & 2,8 \text{ E+09} \end{pmatrix}$$

Così otteniamo subito i diversi momenti agenti secondo le condizioni di carico esterno. Infatti il valore delle condizioni iniziali si valuta secondo le condizioni di carico esterno.

Calcoliamo allo stesso momento i momenti in mezzeria alle travi e i vari tagli in corrispondenza con gli estremi delle campate.

Le espressioni dei momenti in mezzeria sono, ad esempio per la prima campata si ha:

$$X_a = \frac{X_1 + X_2}{2} + \frac{q_a l_a^2}{8}$$

in tale caso con X_1 uguale a 0 kNm ma così l'espressione è subito riutilizzabile per le altre campate, ma sempre con X_g uguale a 0 kNm.

Ecco le espressioni dei tagli al livello di una campata k:

$$V'_1 = \frac{X_i - X_{i+1}}{l_k} + \frac{q_k l_k}{2} \quad V'_{i+1} = \frac{X_i - X_{i+1}}{l_k} - \frac{q_k l_k}{2}$$

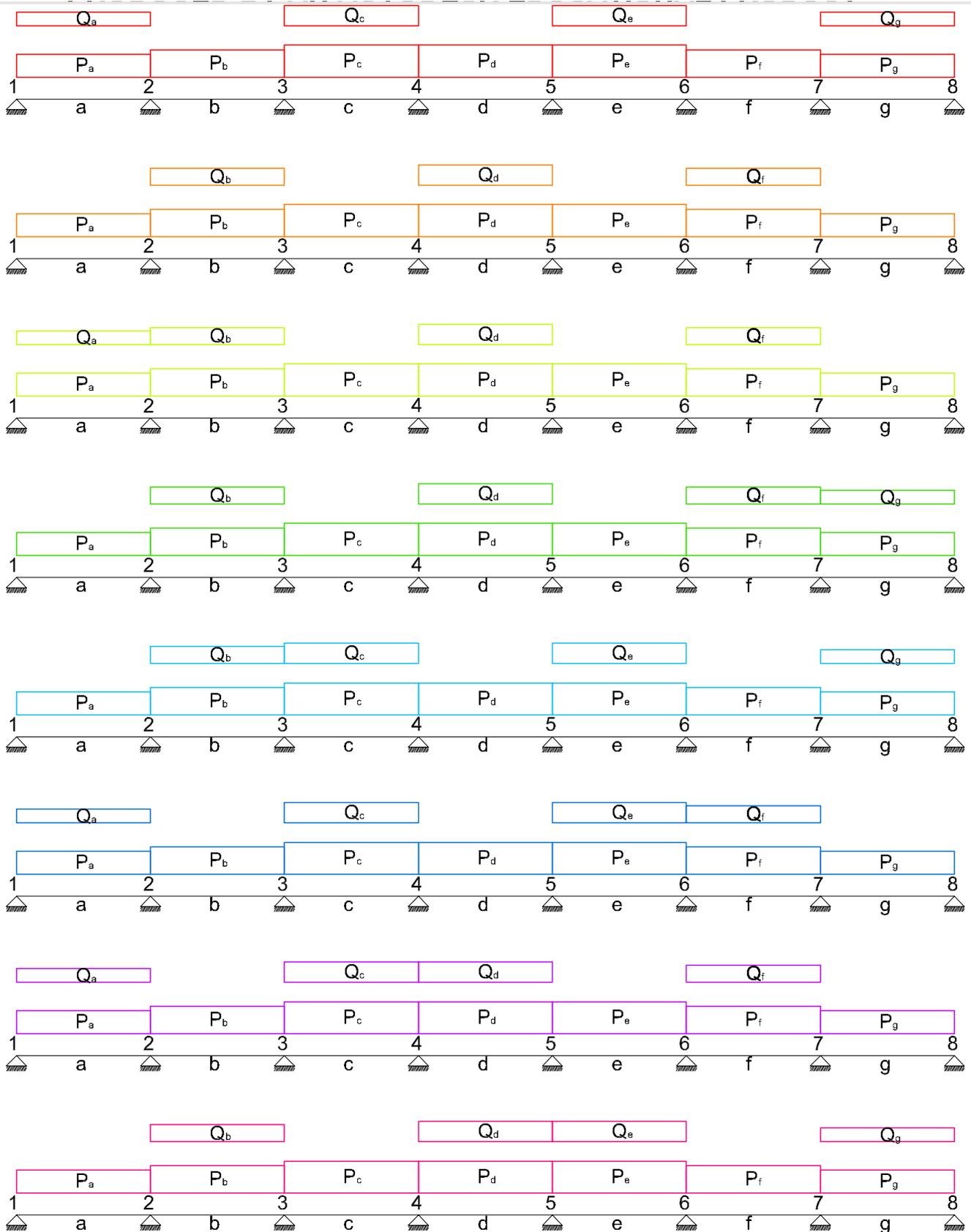


Fig. IX-14 8 condizioni di carico esterno differente

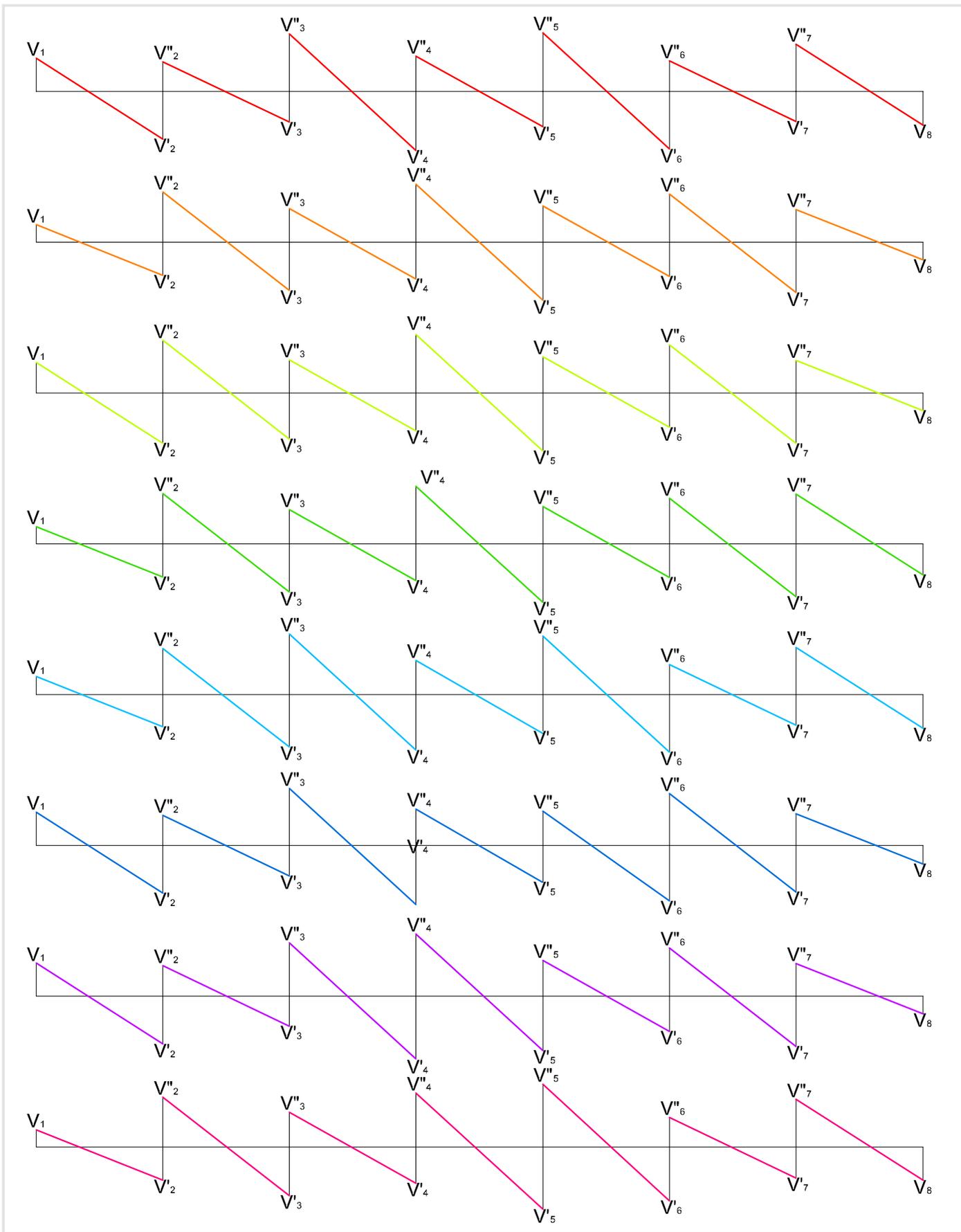


Fig. IX-15 Diagrammi dei tagli per le 8 condizioni di carico

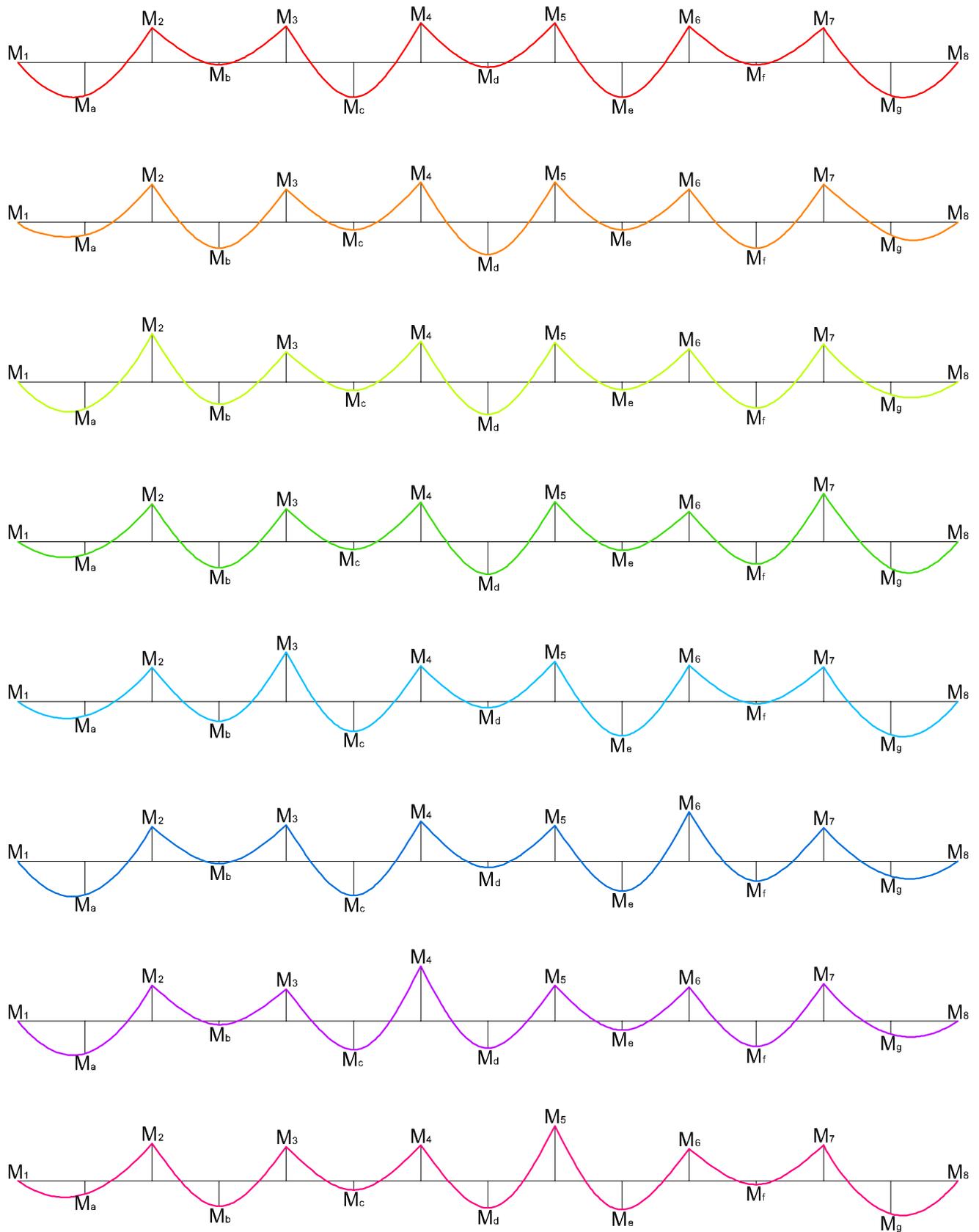


Fig. IX-16 Diagrammi dei momenti per le 8 condizioni di carico

Così otteniamo i momenti estremi e i tagli estremi per questo modello.

Abbiamo quindi un sistema a telaio con 8 sconosciute. Usiamo il metodo degli spostamenti.

| | Momenti finali estremi in esercizio [kNm] | Momenti finali estremi a rottura [kNm] |
|----------------|---|--|
| X ₁ | 0,00 | 0,00 |
| X _a | 115,46 | 169,43 |
| X ₂ | -169,39 | -239,67 |
| X _b | 90,29 | 142,42 |
| X ₃ | -173,58 | -252,12 |
| X _c | 121,16 | 184,51 |
| X ₄ | -194,58 | -281,00 |
| X _d | 113,98 | 176,40 |
| X ₅ | -194,58 | -281,00 |
| X _e | 121,16 | 184,51 |
| X ₆ | -173,58 | -252,12 |
| X _f | 90,29 | 142,42 |
| X ₇ | -169,39 | -239,67 |
| X _g | 115,46 | 169,43 |
| X ₈ | 0,00 | 0,00 |

Tab. IX-73 Momenti estremi

| | Tagli finali estremi in esercizio [kN] | Tagli finali estremi a rottura [kN] |
|------------------|--|-------------------------------------|
| V ₁ | 124,36 | 175,54 |
| V' ₂ | -186,51 | -257,88 |
| V'' ₂ | 196,71 | 277,84 |
| V' ₃ | -194,95 | -276,34 |
| V'' ₃ | 226,63 | 321,01 |
| V' ₄ | -233,79 | -329,91 |
| V'' ₄ | 231,11 | 327,18 |
| V' ₅ | -231,11 | -327,18 |
| V'' ₅ | 233,79 | 329,91 |
| V' ₆ | -226,63 | -321,01 |
| V'' ₆ | 194,95 | 276,34 |
| V' ₇ | -196,71 | -277,84 |
| V'' ₇ | 186,51 | 257,88 |
| V ₈ | -124,36 | -175,54 |

Tab. IX-74 Tagli estremi

c. Calcolo dei tagli massimi V₁ e V₈

Vogliamo determinare i tagli massimi al livello degli estremi della trave.

Ipotizziamo le connessioni estreme al livello dei pilastri P1 e P8 come degli incastri con una rotula a metà altezza del pilastro nella campata superiore e una rotula a metà altezza del pilastro nella campata inferiore. Consideriamo il carico massimo applicato su tutta la trave, sia in esercizio che a rottura.

| Nome | Simbolo | Valore | Unità |
|---|------------------|----------|-----------------|
| Profondità telaio | l | 6,00 | m |
| Altezza 2° -> Copertura | h _c | 4,50 | m |
| Altezza 1° -> 2° | h ₂ | 4,50 | m |
| Altezza Fondazioni -> 1° | h ₁ | 5,50 | m |
| Lunghezza Campata a | l _a | 4,70 | m |
| Diametro Pilastro P1 | ∅ | 0,25 | m |
| Momento Quadratico Pilastro P1 | I _{p1} | 19174,76 | cm ⁴ |
| Momento Quadratico Riportato alla trave a | I _{p1a} | 10199,34 | cm ⁴ |
| Lunghezza Campata g | l _g | 4,70 | m |
| Diametro Pilastro P8 | ∅ | 0,25 | m |
| Momento Quadratico Pilastro P8 | I _{p8} | 19174,76 | cm ⁴ |
| Momento Quadratico Riportato alla trave a | I _{p8g} | 10199,34 | cm ⁴ |

Tab. IX-75 Dati geometrici e di calcolo

Abbiamo un sistema del tipo $M \Phi + M_0 = 0$ con :

$$\begin{vmatrix} \varphi_{22} & \varphi_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \varphi_{32} & \varphi_{33} & \varphi_{34} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \varphi_{43} & \varphi_{44} & \varphi_{45} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \varphi_{54} & \varphi_{55} & \varphi_{56} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \varphi_{65} & \varphi_{66} & \varphi_{67} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \varphi_{76} & \varphi_{77} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \\ X_6 \\ X_7 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \varphi_{20} \\ \varphi_{30} \\ \varphi_{40} \\ \varphi_{50} \\ \varphi_{60} \\ \varphi_{70} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}$$

con

$$\begin{aligned}
 m_{10} &= -\frac{q_a l_a^2}{12} & m_{33} &= \frac{4E_{cm}I}{l_b} + \frac{4E_{cm}I}{l_c} \\
 m_{20} &= +\frac{q_a l_a^2}{12} - \frac{q_b l_b^2}{12} & m_{44} &= \frac{4E_{cm}I}{l_c} + \frac{4E_{cm}I}{l_d} \\
 m_{30} &= +\frac{q_b l_b^2}{12} - \frac{q_c l_c^2}{12} & m_{55} &= \frac{4E_{cm}I}{l_d} + \frac{4E_{cm}I}{l_e} \\
 m_{40} &= +\frac{q_c l_c^2}{12} - \frac{q_d l_d^2}{12} & m_{66} &= \frac{4E_{cm}I}{l_e} + \frac{4E_{cm}I}{l_f} \\
 m_{50} &= +\frac{q_d l_d^2}{12} - \frac{q_e l_e^2}{12} & m_{77} &= \frac{4E_{cm}I}{l_f} + \frac{4E_{cm}I}{l_g} \\
 m_{60} &= +\frac{q_e l_e^2}{12} - \frac{q_f l_f^2}{12} & m_{88} &= 2 * \frac{3E_{cm}I_{p8g}}{((h_1 + h_2)/2)/2} + \frac{4E_{cm}I}{l_g} \\
 m_{70} &= +\frac{q_f l_f^2}{12} - \frac{q_g l_g^2}{12} & m_{12} &= \frac{2E_{cm}I}{l_a} = m_{21} \\
 m_{80} &= +\frac{q_g l_g^2}{12} & m_{32} &= \frac{2E_{cm}I}{l_b} = m_{23} \\
 m_{11} &= 2 * \frac{3E_{cm}I_{p1a}}{((h_1 + h_2)/2)/2} + \frac{4E_{cm}I}{l_a} & m_{43} &= \frac{2E_{cm}I}{l_c} = m_{34} \\
 m_{22} &= \frac{4E_{cm}I}{l_a} + \frac{4E_{cm}I}{l_b} & m_{54} &= \frac{2E_{cm}I}{l_d} = m_{45}
 \end{aligned}$$

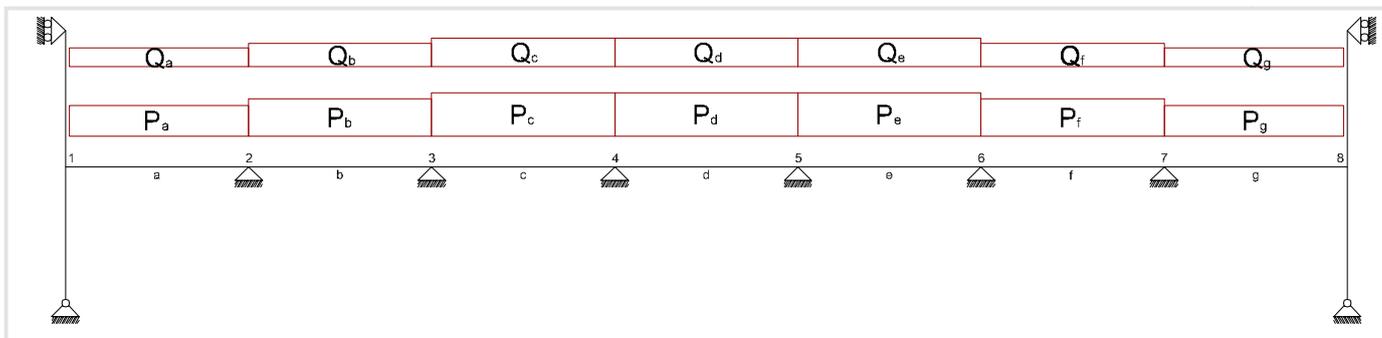


Fig. IX-17 Schema statico e condizione di carico

e

$$m_{65} = \frac{2E_{cm}I}{l_e} = m_{56}$$

$$m_{87} = \frac{2E_{cm}I}{l_g} = m_{78}$$

$$m_{76} = \frac{2E_{cm}I}{l_f} = m_{67}$$

otteniamo :

$$M = \begin{vmatrix} 7,72E+09 & 3,47E+09 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3,47E+09 & 1,39E+10 & 3,47E+09 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3,47E+09 & 1,39E+10 & 3,47E+09 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3,47E+09 & 1,39E+10 & 3,47E+09 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3,47E+09 & 1,39E+10 & 3,47E+09 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3,47E+09 & 1,39E+10 & 3,47E+09 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3,47E+09 & 1,39E+10 & 3,47E+09 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3,47E+09 & 7,72E+09 \end{vmatrix}$$

$$M^{-1} = \begin{vmatrix} 1,47E-10 & -3,95E-11 & 1,06E-11 & -2,83E-12 & 7,60E-13 & -2,04E-13 & 5,76E-14 & -2,59E-14 \\ -3,95E-11 & 8,77E-11 & -2,35E-11 & 6,30E-12 & -1,69E-12 & 4,54E-13 & -1,28E-13 & 5,76E-14 \\ 1,06E-11 & -2,35E-11 & 8,34E-11 & -2,23E-11 & 5,99E-12 & -1,61E-12 & 4,54E-13 & -2,04E-13 \\ -2,83E-12 & 6,30E-12 & -2,23E-11 & 8,31E-11 & -2,23E-11 & 5,99E-12 & -1,69E-12 & 7,60E-13 \\ 7,60E-13 & -1,69E-12 & 5,99E-12 & -2,23E-11 & 8,31E-11 & -2,23E-11 & 6,30E-12 & -2,83E-12 \\ -2,04E-13 & 4,54E-13 & -1,61E-12 & 5,99E-12 & -2,23E-11 & 8,34E-11 & -2,35E-11 & 1,06E-11 \\ 5,76E-14 & -1,28E-13 & 4,54E-13 & -1,69E-12 & 6,30E-12 & -2,35E-11 & 8,77E-11 & -3,95E-11 \\ -2,59E-14 & 5,76E-14 & -2,04E-13 & 7,60E-13 & -2,83E-12 & 1,06E-11 & -3,95E-11 & 1,47E-10 \end{vmatrix}$$

e

$$\begin{vmatrix} m_{10} \\ m_{20} \\ m_{30} \\ m_{40} \\ m_{50} \\ m_{60} \\ m_{70} \\ m_{80} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -117,86 \\ -25,86 \\ -25,86 \\ 0,00 \\ 0,00 \\ 25,86 \\ 25,86 \\ 117,86 \end{vmatrix}$$

che ci porta a :

$$\begin{vmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \\ \varphi_4 \\ \varphi_5 \\ \varphi_6 \\ \varphi_7 \\ \varphi_8 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1,66276E-08 \\ -3,00886E-09 \\ 2,85039E-09 \\ -9,50129E-10 \\ 9,50129E-10 \\ -2,85039E-09 \\ 3,00886E-09 \\ -1,66276E-08 \end{vmatrix}$$

Adesso possiamo ricavare i valori dei momenti e dei tagli all'interno del telaio.

Si ha quindi :

Ecco le espressioni dei momenti al livello dei nodi:

$$X_1 = -\frac{q_a l_a^2}{12} + \frac{4E_{cm}I}{l_a} \varphi_1 + \frac{2E_{cm}I}{l_a} \varphi_2$$

$$X_2 = -\frac{q_a l_a^2}{12} - \frac{2E_{cm}I}{l_a} \varphi_1 - \frac{4E_{cm}I}{l_a} \varphi_2$$

$$X_3 = -\frac{q_b l_b^2}{12} - \frac{2E_{cm}I}{l_b} \varphi_2 - \frac{4E_{cm}I}{l_b} \varphi_3$$

$$X_4 = -\frac{q_c l_c^2}{12} - \frac{2E_{cm}I}{l_c} \varphi_3 - \frac{4E_{cm}I}{l_c} \varphi_4$$

$$X_5 = -\frac{q_d l_d^2}{12} - \frac{2E_{cm}I}{l_d} \varphi_4 - \frac{4E_{cm}I}{l_d} \varphi_5$$

$$X_6 = -\frac{q_e l_e^2}{12} - \frac{2E_{cm}I}{l_e} \varphi_5 - \frac{4E_{cm}I}{l_e} \varphi_6$$

$$X_7 = -\frac{q_f l_f^2}{12} - \frac{2E_{cm}I}{l_f} \varphi_6 - \frac{4E_{cm}I}{l_f} \varphi_7$$

$$X_8 = -\frac{q_g l_g^2}{12} - \frac{2E_{cm}I}{l_g} \varphi_7 - \frac{4E_{cm}I}{l_g} \varphi_8$$

| | Momenti finali estremi in esercizio [kNm] | Momenti finali estremi a rottura [kNm] |
|----------------|---|--|
| X ₁ | -12,76 | -17,54 |
| X _a | 93,05 | 127,90 |
| X ₂ | -154,73 | -212,85 |
| X _b | 61,68 | 84,95 |
| X ₃ | -153,08 | -210,93 |
| X _c | 91,40 | 125,98 |
| X ₄ | -172,89 | -238,28 |
| X _d | 81,49 | 112,30 |
| X ₅ | -172,89 | -238,28 |
| X _e | 91,40 | 125,98 |
| X ₆ | -153,08 | -210,93 |
| X _f | 61,68 | 84,95 |
| X ₇ | -154,73 | -212,85 |
| X _g | 93,05 | 127,90 |
| X ₈ | -12,76 | -17,54 |

Tab. IX-76 Momenti estremi

E finalmente possiamo calcolare i diversi tagli :

$$V_1 = +\frac{q_a l_a}{2} + \frac{X_1 - X_2}{l_a} \quad V''_5 = +\frac{q_e l_e}{2} + \frac{X_5 - X_6}{l_e}$$

$$V'_2 = -\frac{q_a l_a}{2} + \frac{X_1 - X_2}{l_a} \quad V'_6 = -\frac{q_e l_e}{2} + \frac{X_5 - X_6}{l_e}$$

$$V''_2 = +\frac{q_b l_b}{2} + \frac{X_2 - X_3}{l_b} \quad V''_6 = +\frac{q_f l_f}{2} + \frac{X_6 - X_7}{l_f}$$

$$V'_3 = -\frac{q_b l_b}{2} + \frac{X_2 - X_3}{l_b} \quad V'_7 = -\frac{q_f l_f}{2} + \frac{X_6 - X_7}{l_f}$$

$$V''_3 = +\frac{q_c l_c}{2} + \frac{X_3 - X_4}{l_c} \quad V''_7 = +\frac{q_g l_g}{2} + \frac{X_7 - X_8}{l_g}$$

$$V'_4 = -\frac{q_c l_c}{2} + \frac{X_3 - X_4}{l_c} \quad V_8 = -\frac{q_g l_g}{2} + \frac{X_7 - X_8}{l_g}$$

$$V''_4 = +\frac{q_d l_d}{2} + \frac{X_4 - X_5}{l_d}$$

$$V'_5 = -\frac{q_d l_d}{2} + \frac{X_4 - X_5}{l_d}$$

| | Tagli finali estremi in esercizio [kN] | Tagli finali estremi a rottura [kN] |
|----------------|--|-------------------------------------|
| V ₁ | 180,67 | 248,44 |
| V'_2 | -120,26 | -165,33 |
| V''_2 | 183,13 | 252,22 |
| V'_3 | -183,83 | -253,03 |
| V''_3 | 220,71 | 304,18 |
| V'_4 | -212,28 | -292,55 |
| V''_4 | 216,50 | 298,37 |
| V'_5 | -216,50 | -298,37 |
| V''_5 | 212,28 | 292,55 |
| V'_6 | -220,71 | -304,18 |
| V''_6 | 183,83 | 253,03 |
| V'_7 | -183,13 | -252,22 |
| V''_7 | 120,26 | 165,33 |
| V ₈ | -124,36 | -175,54 |

Tab. IX-77 Tagli estremi

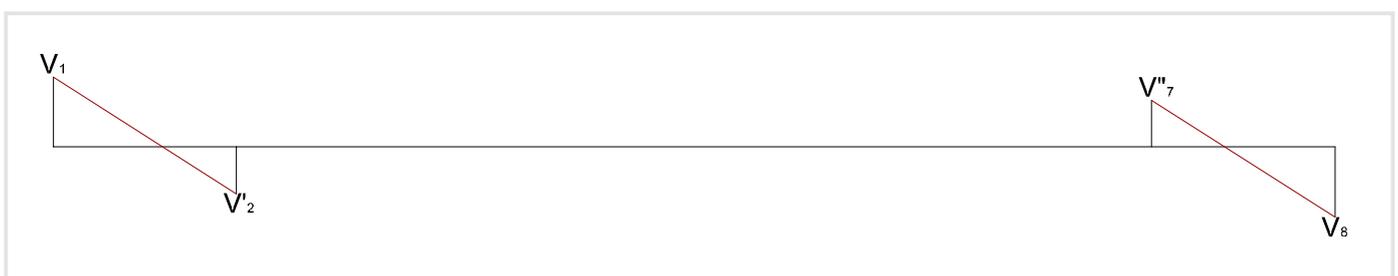


Fig. IX-18 Diagramma dei tagli

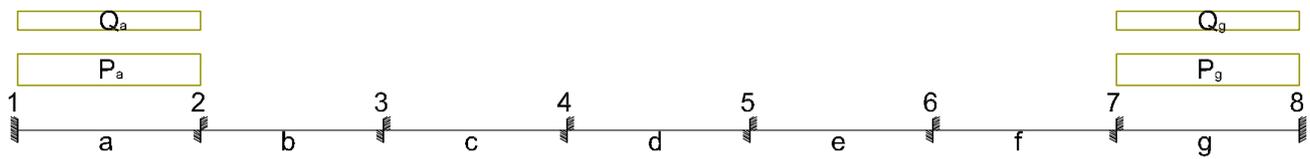


Fig. IX-19 Schema statico e condizione di carico



Fig. IX-20 Diagramma dei tagli

d. Calcolo dei momenti massimi X1 e X8

Le 7 campate sono in questa situazione considerate tutte indipendenti e perfettamente incastrate ai loro 2 estremi.

Quindi abbiamo in questa situazione :

$$\begin{aligned}
 X_1 &= -\frac{q_a l_a^2}{12} = X_2 & V_2 &= -\frac{q_a l_a}{2} \\
 X_7 &= -\frac{q_h l_h^2}{12} = X_8 & V_7 &= +\frac{q_h l_h}{2} \\
 V_1 &= +\frac{q_a l_a}{2} & V_8 &= -\frac{q_h l_h}{2}
 \end{aligned}$$

e. Risultati finali dei momenti agenti e dei tagli agenti di calcolo

| Posizione di calcolo | Momento agente finale in esercizio [kNm] | Momento agente finale a rottura [kNm] |
|----------------------|--|---------------------------------------|
| X ₁ | -117,86 | -162,06 |
| X _a | 115,46 | 127,90 |
| X ₂ | -169,39 | -212,85 |
| X _b | 90,29 | 84,95 |
| X ₃ | -173,58 | -210,93 |
| X _c | 121,16 | 125,98 |
| X ₄ | -194,58 | -238,28 |
| X _d | 113,98 | 112,30 |
| X ₅ | -194,58 | -238,28 |
| X _e | 121,16 | 125,98 |
| X ₆ | -173,58 | -210,93 |
| X _f | 90,29 | 84,95 |
| X ₇ | -169,39 | -212,85 |
| X _g | 115,46 | 127,90 |
| X ₈ | -117,86 | -162,06 |

Tab. IX-78 Momenti estremi

| Posizione di calcolo | Taglio agente finale in esercizio [kN] | Taglio agente finale a rottura [kN] |
|----------------------|--|-------------------------------------|
| V ₁ | 180,67 | 248,44 |
| V' ₂ | -186,51 | -109,23 |
| V'' ₂ | 196,71 | 251,67 |
| V' ₃ | -194,95 | -253,59 |
| V'' ₃ | 226,63 | 312,04 |
| V' ₄ | -233,79 | -284,69 |
| V'' ₄ | 231,11 | 298,37 |
| V' ₅ | -231,11 | -298,37 |
| V'' ₅ | 233,79 | 284,69 |
| V' ₆ | -226,63 | -312,04 |
| V'' ₆ | 194,95 | 253,59 |
| V' ₇ | -196,71 | -251,67 |
| V'' ₇ | 186,51 | 109,23 |
| V ₈ | -180,67 | -248,44 |

Tab. IX-79 Tagli estremi

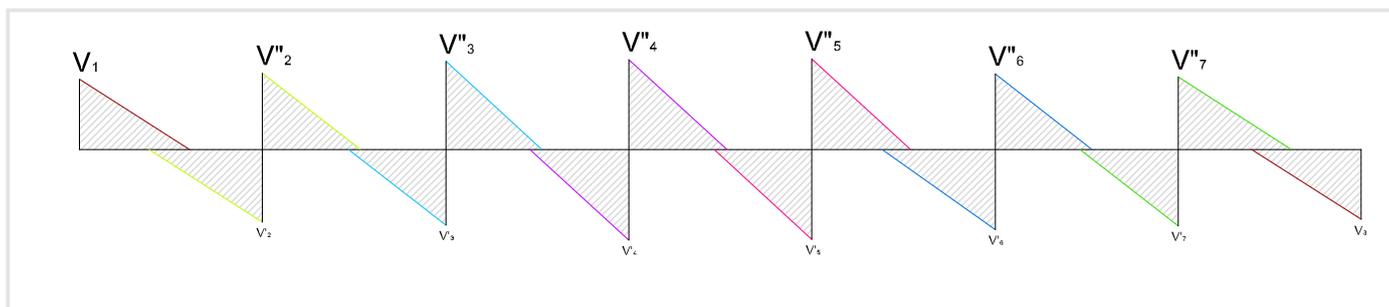


Fig. IX-21 Diagrammi di involucro per il taglio

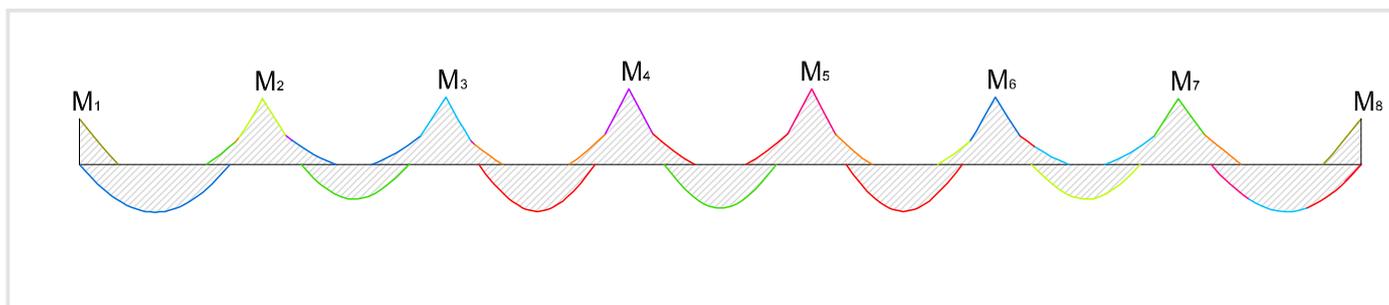


Fig. IX-22 Diagrammi di involucro per il momento

f. Predimensionamento dei ferri longitudinali

Abbiamo una prima indicazione per dimensionare i ferri con l'area minima d'acciaio A_{so} dove:

$$A_{so} = \frac{M_{ad} \cdot \gamma_f}{\zeta \cdot d}$$

| Posizione | Momento Agente Assoluto [kNm] | A_{so} [cm ²] | Diametro dei ferri [mm] estremi | Quantità | Diametro dei ferri [mm] medi | Quantità | Area d'acciaio progettata A_s [cm ²] |
|-----------|-------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|----------|------------------------------|----------|--|
| 1 | 117,86 | 9,17 | 25,00 | 2 | | | 9,82 |
| a | 115,46 | 8,98 | 16 | 2 | 16 | 4 | 12,06 |
| 2 | 169,39 | 13,18 | 25,00 | 2 | 20 | 3 | 19,24 |
| b | 90,29 | 7,02 | 16 | 2 | 16 | 4 | 12,06 |
| 3 | 173,58 | 13,50 | 25,00 | 2 | 20 | 3 | 19,24 |
| c | 121,16 | 9,42 | 16 | 2 | 16 | 4 | 12,06 |
| 4 | 194,58 | 15,13 | 25,00 | 2 | 20 | 3 | 19,24 |
| d | 113,98 | 8,87 | 16 | 2 | 16 | 4 | 12,06 |
| 5 | 194,58 | 15,13 | 25,00 | 2 | 20 | 3 | 19,24 |
| e | 121,16 | 9,42 | 16 | 2 | 16 | 4 | 12,06 |
| 6 | 173,58 | 13,50 | 25,00 | 2 | 20 | 3 | 19,24 |
| f | 90,29 | 7,02 | 16 | 2 | 16 | 4 | 12,06 |
| 7 | 169,39 | 13,18 | 25,00 | 2 | 20 | 3 | 19,24 |
| g | 115,46 | 8,98 | 16 | 2 | 16 | 4 | 12,06 |
| 8 | 117,86 | 9,17 | 25,00 | 2 | | | 9,82 |

Tab. IX-80 Predimensionamento dei ferri longitudinali

g. Predimensionamento dei ferri trasversali

| Nome | Simbolo | Valore | Unità |
|---|-------------|--------|--------------------|
| Copriferro Inferiore | c | 0,04 | m |
| Altezza utile | d | 0,46 | m |
| Braccio della copia interna approssimato adimensionalizzato | ζ | 0,90 | |
| Coefficiente di sicurezza per il dimensionamento delle armature | γ_f | 1,40 | |
| Diametro del pilastro | \emptyset | 0,25 | m |
| Staffatura minima richiesta in base alla larghezza della trave | a_s | 3,75 | cm ² /m |
| | λ_c | 2,00 | |
| Inclinazione delle staffe verticali | α | 90,00 | ° |
| Lunghezza ridotta approssimata dei conci | Δ_x | 41,40 | cm |

Tab. IX-81 -

Dobbiamo calcolare il taglio agente in corrispondenza all'incastro tra trave e pilastro che coincide con il taglio massimo nella trave al di fuori della zona d'incastro col pilastro. La meta in altezza del primo concio inclinato quindi, tutti i pilastri essendo della stessa dimensione, è sempre disposta a $\Delta_x/2 + \emptyset/2 = 33,20$ cm.

Così otteniamo :

| Estremità | Taglio Agente Assoluto in estremità [kN] | Taglio Agente Assoluto nel concio [kN] | a_{s0} [cm ² /m] | Diametro dei ferri [mm] | Spazzatura [mm] | Area d'acciaio progettata a_s [cm ²] | Area d'acciaio progettata A_s [cm ²] |
|-----------|--|--|-------------------------------|-------------------------|-----------------|--|--|
| x_1 | 180,67 | 223,18 | 6,20 | 10,00 | 150,00 | 10,47 | 9,82 |
| x'_2 | 186,51 | 231,35 | 6,43 | 10 | 150 | 10,47 | 12,06 |
| x''_2 | 196,71 | 239,11 | 6,64 | 10,00 | 150,00 | 10,47 | 19,24 |
| x'_3 | 194,95 | 236,64 | 6,57 | 10 | 150 | 10,47 | 12,06 |
| x''_3 | 226,63 | 274,46 | 7,62 | 10,00 | 150,00 | 10,47 | 19,24 |
| x'_4 | 233,79 | 284,48 | 7,90 | 10 | 150 | 10,47 | 12,06 |
| x''_4 | 231,11 | 280,74 | 7,80 | 10,00 | 150,00 | 10,47 | 19,24 |
| x'_5 | 231,11 | 280,74 | 7,80 | 10 | 150 | 10,47 | 12,06 |
| x''_5 | 233,79 | 284,48 | 7,90 | 10,00 | 150,00 | 10,47 | 19,24 |
| x'_6 | 226,63 | 274,46 | 7,62 | 10 | 150 | 10,47 | 12,06 |
| x''_6 | 194,95 | 236,64 | 6,57 | 10,00 | 150,00 | 10,47 | 19,24 |
| x'_7 | 196,71 | 239,11 | 6,64 | 10 | 150 | 10,47 | 12,06 |
| x''_7 | 186,51 | 231,35 | 6,43 | 10,00 | 150,00 | 10,47 | 19,24 |
| x_8 | 180,67 | 223,18 | 6,20 | 10 | 150 | 10,47 | 12,06 |

Tab. IX-82 Predimensionamento dei ferri trasversali

3. VERIFICA DEL COMPORTAMENTO DELLA TRAVE IN ESERCIZIO

a. Verifica del comportamento in esercizio della trave sottomessa alle sollecitazioni flessionali

| Sez. | Momento Agente Assoluto [kNm] | Diametro dei ferri tesi ai spigoli [mm] | Q.tà | Diametro dei ferri tesi medi [mm] | Q.tà | Area d'acciaio teso A_s [cm ²] | Diametro dei ferri compressi ai spigoli [mm] | Q.tà | Diametro dei ferri compressi medi [mm] | Q.tà | Area d'acciaio compresso A'_s [cm ²] |
|------|-------------------------------|---|------|-----------------------------------|------|--|--|------|--|------|--|
| 1 | 117,86 | 25,00 | 2 | 0,00 | 0 | 9,82 | 16,00 | 2 | 0,00 | 0 | 4,02 |
| a | 115,46 | 16,00 | 2 | 16,00 | 4 | 12,06 | 25,00 | 2 | 0,00 | 0 | 9,82 |
| 2 | 169,39 | 25,00 | 2 | 20,00 | 3 | 19,24 | 16,00 | 2 | 0,00 | 0 | 4,02 |
| b | 90,29 | 16,00 | 2 | 16,00 | 4 | 12,06 | 25,00 | 2 | 0,00 | 0 | 9,82 |
| 3 | 173,58 | 25,00 | 2 | 20,00 | 3 | 19,24 | 16,00 | 2 | 0,00 | 0 | 4,02 |
| c | 121,16 | 16,00 | 2 | 16,00 | 4 | 12,06 | 25,00 | 2 | 0,00 | 0 | 9,82 |
| 4 | 194,58 | 25,00 | 2 | 20,00 | 3 | 19,24 | 16,00 | 2 | 0,00 | 0 | 4,02 |
| d | 113,98 | 16,00 | 2 | 16,00 | 4 | 12,06 | 25,00 | 2 | 0,00 | 0 | 9,82 |
| 5 | 194,58 | 25,00 | 2 | 20,00 | 3 | 19,24 | 16,00 | 2 | 0,00 | 0 | 4,02 |
| e | 121,16 | 16,00 | 2 | 16,00 | 4 | 12,06 | 25,00 | 2 | 0,00 | 0 | 9,82 |
| 6 | 173,58 | 25,00 | 2 | 20,00 | 3 | 19,24 | 16,00 | 2 | 0,00 | 0 | 4,02 |
| f | 90,29 | 16,00 | 2 | 16,00 | 4 | 12,06 | 25,00 | 2 | 0,00 | 0 | 9,82 |
| 7 | 169,39 | 25,00 | 2 | 20,00 | 3 | 19,24 | 16,00 | 2 | 0,00 | 0 | 4,02 |
| g | 115,46 | 16,00 | 2 | 16,00 | 4 | 12,06 | 25,00 | 2 | 0,00 | 0 | 9,82 |
| 8 | 117,86 | 25,00 | 2 | 0,00 | 0 | 9,82 | 16,00 | 2 | 0,00 | 0 | 4,02 |

Tab. IX-83 Verifica del comportamento in esercizio della trave sottomessa alle sollecitazioni flessionali - prima parte

| ρ_t | ψ_t | δ | x [cm] | y_s [cm] | y'_s [cm] | I_x [cm ⁴] | σ_c [N/mm ²] | verifica $\sigma_c < \sigma_{cs}$ | σ_s [N/mm ²] | verifica $\sigma_s < \sigma_{ss}$ | Area d'acciaio compresso A'_s [cm ²] |
|----------|----------|----------|--------|------------|-------------|--------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|--|
| 0,01 | 0,18 | 0,73 | 16,80 | 29,20 | 12,80 | 174957,80 | 11,32 | verificato | 295,07 | verificato | 4,02 |
| 0,02 | 0,29 | 0,59 | 16,63 | 29,37 | 12,63 | 217908,83 | 8,81 | verificato | 233,45 | verificato | 9,82 |
| 0,02 | 0,30 | 0,84 | 21,77 | 24,23 | 17,77 | 274481,16 | 13,43 | verificato | 224,33 | verificato | 4,02 |
| 0,02 | 0,29 | 0,59 | 16,63 | 29,37 | 12,63 | 217908,83 | 6,89 | verificato | 182,57 | verificato | 9,82 |
| 0,02 | 0,30 | 0,84 | 21,77 | 24,23 | 17,77 | 274481,16 | 13,77 | verificato | 229,87 | verificato | 4,02 |
| 0,02 | 0,29 | 0,59 | 16,63 | 29,37 | 12,63 | 217908,83 | 9,24 | verificato | 244,97 | verificato | 9,82 |
| 0,02 | 0,30 | 0,84 | 21,77 | 24,23 | 17,77 | 274481,16 | 15,43 | verificato | 257,68 | verificato | 4,02 |
| 0,02 | 0,29 | 0,59 | 16,63 | 29,37 | 12,63 | 217908,83 | 8,70 | verificato | 230,46 | verificato | 9,82 |
| 0,02 | 0,30 | 0,84 | 21,77 | 24,23 | 17,77 | 274481,16 | 15,43 | verificato | 257,68 | verificato | 4,02 |
| 0,02 | 0,29 | 0,59 | 16,63 | 29,37 | 12,63 | 217908,83 | 9,24 | verificato | 244,97 | verificato | 9,82 |
| 0,02 | 0,30 | 0,84 | 21,77 | 24,23 | 17,77 | 274481,16 | 13,77 | verificato | 229,87 | verificato | 4,02 |
| 0,02 | 0,29 | 0,59 | 16,63 | 29,37 | 12,63 | 217908,83 | 6,89 | verificato | 182,57 | verificato | 9,82 |
| 0,02 | 0,30 | 0,84 | 21,77 | 24,23 | 17,77 | 274481,16 | 13,43 | verificato | 224,33 | verificato | 4,02 |
| 0,02 | 0,29 | 0,59 | 16,63 | 29,37 | 12,63 | 217908,83 | 8,81 | verificato | 233,45 | verificato | 9,82 |
| 0,01 | 0,18 | 0,73 | 16,80 | 29,20 | 12,80 | 174957,80 | 11,32 | verificato | 295,07 | verificato | 4,02 |

Tab. IX-84 Verifica del comportamento in esercizio della trave sottomessa alle sollecitazioni flessionali - prima parte

b. Verifica del comportamento in esercizio della trave sottomessa alle sollecitazioni di taglio

► **Verifica di esercizio dei conci di calcestruzzo compressi in vicinanza delle estremità**

| Numero | assise del cono considerato [cm] | Taglio Agente Assoluto in estremità [kN] | Valore assoluto di taglio in corrispondenza [kN] | σ_c [N/mm ²] | verifica $\sigma_c < 0,6 \cdot \sigma_{cs}$ |
|--------|----------------------------------|--|--|---------------------------------|---|
| x1 | 12,50 | 180,67 | 172,67 | 3,34 | verificato |
| x'2 | 12,50 | 186,51 | 178,50 | 3,45 | verificato |
| x''2 | 12,50 | 196,71 | 186,95 | 3,61 | verificato |
| x'3 | 12,50 | 194,95 | 185,19 | 3,58 | verificato |
| x''3 | 12,50 | 226,63 | 215,11 | 4,16 | verificato |
| x'4 | 12,50 | 233,79 | 222,27 | 4,30 | verificato |
| x''4 | 12,50 | 231,11 | 219,60 | 4,24 | verificato |
| x'5 | 12,50 | 231,11 | 219,60 | 4,24 | verificato |
| x''5 | 12,50 | 233,79 | 222,27 | 4,30 | verificato |
| x'6 | 12,50 | 226,63 | 215,11 | 4,16 | verificato |
| x''6 | 12,50 | 194,95 | 185,19 | 3,58 | verificato |
| x'7 | 12,50 | 196,71 | 186,95 | 3,61 | verificato |
| x''7 | 12,50 | 186,51 | 178,50 | 3,45 | verificato |
| x8 | 12,50 | 180,67 | 172,67 | 3,34 | verificato |

Tab. IX-85 Verifica di esercizio dei conci di calcestruzzo compressi in vicinanza delle estremità

► **Verifica di esercizio delle staffe in vicinanza delle estremità**

| Numero | assise del cono considerato [cm] | Taglio Agente Assoluto in estremità [kN] | V_{ak} Valore assoluto di taglio in corrispondenza [kN] | V'_{ctk} Taglio agente dal contributo del cls d'anima [kN] | σ_s [N/mm ²] | σ_s ammissibile in corrispondenza alla spaziatura delle staffe [N/mm ²] | verifica $\sigma_s < \sigma_{sk}$ |
|------------------|----------------------------------|--|---|--|---------------------------------|--|-----------------------------------|
| x ₁ | 33,20 | 221,45 | 200,19 | 162,70 | 0,36 | 100,00 | verificato |
| x' ₂ | 33,20 | 186,51 | 165,25 | 162,70 | 0,02 | 100,00 | verificato |
| x'' ₂ | 33,20 | 196,71 | 170,79 | 162,70 | 0,08 | 100,00 | verificato |
| x' ₃ | 33,20 | 194,95 | 169,03 | 162,70 | 0,06 | 100,00 | verificato |
| x'' ₃ | 33,20 | 226,63 | 196,04 | 162,70 | 0,32 | 100,00 | verificato |
| x' ₄ | 33,20 | 233,79 | 203,20 | 162,70 | 0,39 | 100,00 | verificato |
| x'' ₄ | 33,20 | 231,11 | 200,53 | 162,70 | 0,37 | 100,00 | verificato |
| x' ₅ | 33,20 | 231,11 | 200,53 | 162,70 | 0,37 | 100,00 | verificato |
| x'' ₅ | 33,20 | 233,79 | 203,20 | 162,70 | 0,39 | 100,00 | verificato |
| x' ₆ | 33,20 | 226,63 | 196,04 | 162,70 | 0,32 | 100,00 | verificato |
| x'' ₆ | 33,20 | 194,95 | 169,03 | 162,70 | 0,06 | 100,00 | verificato |
| x' ₇ | 33,20 | 196,71 | 170,79 | 162,70 | 0,08 | 100,00 | verificato |
| x'' ₇ | 33,20 | 186,51 | 165,25 | 162,70 | 0,02 | 100,00 | verificato |
| x ₈ | 33,20 | 221,45 | 200,19 | 162,70 | 0,36 | 100,00 | verificato |

Tab. IX-86 Verifica di esercizio delle staffe in vicinanza delle estremità

4. VERIFICA DEL COMPORTAMENTO A ROTTURA

a. Verifica della resistenza al momento flettente

Indichiamo prima di tutto i limiti dei campi delle deboli, medie e forti armature.

| Nome | Simbolo | Valore |
|---|---------------|--------|
| modello a stress block del cls | β_0 | 0,80 |
| Rapporto tra f_{sd} e f_{c1} | r | 15,35 |
| limite tra il campo delle deboli armature e delle medie | ω_{sa} | 0,18 |
| limite tra il campo delle medie armature e le forti | ω_{sc} | 0,46 |

Tab. IX-87 Caratteristiche del calcestruzzo e dell'acciaio longitudinale

Dopo di che possiamo procedere alle diverse verifiche :

| Sezione | Momento agente assoluto di calcolo [kNm] | Area d'acciaio teso A_s [cm ²] | Rapporto meccanico di armatura ω_s | Braccio della copia interna z [cm] | Momento resistente M_{rd} [kNm] | Verifica $M_{sd} < M_{rd}$ |
|---------|--|--|---|------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|
| 1 | 162,06 | 9,82 | 0,13 | 44,16 | 169,65 | verificato |
| a | 169,43 | 12,06 | 0,16 | 44,16 | 208,46 | verificato |
| 2 | 239,67 | 19,24 | 0,26 | 40,09 | 301,89 | verificato |
| b | 142,42 | 12,06 | 0,16 | 44,16 | 208,46 | verificato |
| 3 | 252,12 | 19,24 | 0,26 | 40,09 | 301,89 | verificato |
| c | 184,51 | 12,06 | 0,16 | 44,16 | 208,46 | verificato |
| 4 | 281,00 | 19,24 | 0,26 | 40,09 | 301,89 | verificato |
| d | 176,40 | 12,06 | 0,16 | 44,16 | 208,46 | verificato |
| 5 | 281,00 | 19,24 | 0,26 | 40,09 | 301,89 | verificato |
| e | 184,51 | 12,06 | 0,16 | 44,16 | 208,46 | verificato |
| 6 | 252,12 | 19,24 | 0,26 | 40,09 | 301,89 | verificato |
| f | 142,42 | 12,06 | 0,16 | 44,16 | 208,46 | verificato |
| 7 | 239,67 | 19,24 | 0,26 | 40,09 | 301,89 | verificato |
| g | 169,43 | 12,06 | 0,16 | 44,16 | 208,46 | verificato |
| 8 | 162,06 | 9,82 | 0,13 | 44,16 | 169,65 | verificato |

Tab. IX-88 Verifica della resistenza al momento flettente

b. Verifica della resistenza al taglio

Indichiamo prima di tutto i limiti dei campi delle deboli, medie e forti armature.

| Nome | Simbolo | Valore |
|---|-----------------|--------|
| modello a stress block del cls | β_0 | 0,80 |
| Rapporto tra f_{sd} e f_{c1} | r | 15,35 |
| Rapporto tra f_{sd} e f_{c2} | r | 30,69 |
| limite tra il campo delle deboli armature e delle medie | ω_{wa} | 0,20 |
| limite tra il campo delle medie armature e le forti | ω_{wc} | 0,50 |
| | λ_{max} | 2,00 |

Tab. IX-89 Caratteristiche del calcestruzzo e dell'acciaio trasversale

Dopo di che possiamo procedere alle diverse verifiche :

| Numero | Taglio Agente Assoluto in estremità V_{ag} [kN] | ω_w | λ_r | Taglio Resistente in estremità V_{rd} [kN] | Verifica $M_{ad} < M_{rd}$ |
|---------|---|------------|-------------|--|----------------------------|
| x_1 | 248,44 | 0,13 | 2,00 | 376,99 | verificato |
| x'_2 | 257,8793975 | 0,13 | 2,00 | 376,99 | verificato |
| x''_2 | 277,84 | 0,13 | 2,00 | 376,99 | verificato |
| x'_3 | 276,3416141 | 0,13 | 2,00 | 376,99 | verificato |
| x''_3 | 321,01 | 0,13 | 2,00 | 376,99 | verificato |
| x'_4 | 329,9127244 | 0,13 | 2,00 | 376,99 | verificato |
| x''_4 | 327,18 | 0,13 | 2,00 | 376,99 | verificato |
| x'_5 | 327,1810046 | 0,13 | 2,00 | 376,99 | verificato |
| x''_5 | 329,91 | 0,13 | 2,00 | 376,99 | verificato |
| x'_6 | 321,0064404 | 0,13 | 2,00 | 376,99 | verificato |
| x''_6 | 276,34 | 0,13 | 2,00 | 376,99 | verificato |
| x'_7 | 277,8386439 | 0,13 | 2,00 | 376,99 | verificato |
| x''_7 | 257,88 | 0,13 | 2,00 | 376,99 | verificato |
| x_8 | 248,4394485 | 0,13 | 2,00 | 376,99 | verificato |

Tab. IX-90 Verifica della resistenza al taglio

F. DIMENSIONAMENTO E VERIFICA DEI PILASTRI SUD

1. PREMESSA

La valutazione della sicurezza deve essere provata secondo i requisiti richiesti di resistenza, funzionalità, durabilità e robustezza garantiti se verificati rispetto allo stato limite ultimo e allo stato limite di esercizio della struttura, dei componenti strutturali e dei collegamenti. Il metodo di analisi deve essere coerente con le ipotesi di progetto. L'analisi deve essere basata su modelli strutturali di calcolo appropriati, a seconda dello stato limite considerato. Quindi il dimensionamento e la verifica dei pilastri sud verrà suddiviso in due parti principali. Una prima parte studierà la resistenza a compressione centrata dei pilastri cerchiati, solo in funzionamento a rottura. La seconda parte studierà lei il comportamento più specifico dei pilastri di bordo della trave perché sottoposti ad uno sforzo assiale verticale eccentrico.

Iniziamo prima con l'introduzione dei vari dati progettuali.

| Nome | Simbolo | Valore | Unità |
|---|---------|--------|-------------------|
| Dati relativi alle travi collocate a sud della facciata nel senso est-ovest | | | |
| Densità del calcestruzzo | ρ | 25 | kN/m ³ |
| Altezza della trave | h | 0,5 | m |
| Larghezza della trave | b | 0,25 | m |
| Superficie della trave | st | 0,125 | m ² |
| Dati relativi alla geometria della struttura | | | |
| Profondità telaio | l_s | 6,00 | m |
| Altezza 2° -> Copertura | h_c | 4,50 | m |
| Altezza 1° -> 2° | h_b | 4,50 | m |
| Altezza Fondazioni -> 1° | h_a | 5,50 | m |

Tab. IX-91 Dati geometrici

L'architettonico del progetto richiede in facciata sud dei pilastri circolari. Usiamo dei pilastro di calcestruzzo cerchiati con una ferro a spirale per la cerchiatura. Le varie verifiche seguenti sono eseguite secondo le indicazioni delle NTC italiane relative alle strutture edilizie di calcestruzzo e il loro riepilogo contenuto nei libri Cemento Armato : Calcolo agli Stati Limiti (•Giandomenico Toniolo, Tecnica delle costruzioni, volume 2A, Cemento armato : calcolo agli stati limiti, Masson, Milano, 1995, Giandomenico Toniolo, Tecnica delle costruzioni, volume 2B, Cemento armato : calcolo agli stati limiti, Masson, Milano, 1995).

2. VERIFICA A COMPRESSIONE CENTRATA

Le aree d'influenza dei pilastri P1 e P8 sono uguali, anche quelle dei pilastri P2 e P7 e dei pilastri P3, P4, P5 e P6. Per quest'ultimi 4 pilastri, la dimensione dell'area d'influenza è quella maggiore quindi le sollecitazioni agenti sono massime. Volendo semplificare la messa in opera del cantiere, ipotizziamo usare le stesse armature per tutti i pilastri e tutti i piani. Quindi indicheremo le verifiche a rottura per il pilastro P3 soltanto, che massimizza i sforzi agenti.

Adesso indichiamo i dati relativi alle armature dei pilastri cerchiati, ed anche le varie verifiche relative, ricordando che il dimensionamento delle armature è stato effettuato dopo il calcolo degli sforzi agenti.

| Nome | Simbolo | Valore | Unità |
|---|-------------|--------|-----------------|
| Diametro del pilastro | \emptyset | 0,25 | m |
| Area del pilastro | A_c | 0,05 | m ² |
| Spessore copriferro | c | 0,02 | m |
| Diametro della cerchiatura | D | 0,22 | m |
| Diametro ferro longitudinale | ϕ_l | 12,00 | mm |
| Numero ferro longitudinale | n | 8,00 | |
| Area totale longitudinale | A_l | 9,05 | cm ² |
| Diametro ferro spirale | ϕ_s | 8,00 | mm |
| Passo cerchiatura | s | 0,04 | m |
| Area spirale | a_w | 0,50 | cm ² |
| Area nucleo cerchiato | A_n | 380,13 | cm ² |
| Area equivalente spirale | A_w | 8,69 | cm ² |
| Rapporto resistente di calcolo | r_s | 13,81 | |
| Rapporto meccanico armatura longitudinale | ω_l | 0,33 | |
| Rapporto meccanico armatura cerchiante | ω_w | 0,32 | |

Tab. IX-92 Caratteristiche geometriche delle armature cerchianti e longitudinali

Così otteniamo una resistenza a compressione di 1759,45 kN.

Dobbiamo ancora fare le verifiche dei dati costruttivi, secondo i criteri delle NTC.

| | |
|--|------------|
| $n \geq 6$ | verificato |
| $s \leq D/5$ | verificato |
| $0,8 + \omega_l + 1,6 \omega_w \leq 2$ | verificato |
| $A_l \geq A_w/2$ | verificato |

Tab. IX-93 Verifiche del buon rispetto dei dati costruttivi

La seguente tabella indica per piani i carichi permanenti e di servizio, maggiorati a rottura tramite il coefficiente globale $\gamma_f = 1,4$.

| Nome | Simbolo | Valore | Unità |
|---|----------------|--------|-------------------|
| Numero Pilastro | | | |
| | P3 | | |
| Area d'Influenza | | 29,00 | m ² |
| Lunghezza della trave | | 4,70 | m |
| Copertura | | | |
| <i>Trave</i> | | | |
| Carico dovuto alla trave | | 14,69 | kN |
| <i>Pilastro</i> | | | |
| Altezza | | 4,50 | m |
| Carico dovuto al pilastro | | 5,52 | kN |
| <i>Carichi</i> | | | |
| Carichi permanenti strutturali | G ₁ | 6,03 | kN/m ² |
| Carichi permanenti non strutturali | G ₂ | 1,14 | kN/m ² |
| Carichi variabili | Q | 1,06 | kN/m ² |
| Voir pour le poids dû aux panneaux solaires | P _s | 0,15 | kN/m ² |
| Carichi totali permanenti | | 213,80 | kN |
| Carichi totali variabili | | 30,74 | kN |
| Carichi totali Copertura | F _k | 244,54 | kN |
| Piano 2 | | | |
| <i>Trave</i> | | | |
| Carico dovuto alla trave | | 14,69 | kN |
| <i>Pilastro</i> | | | |
| Altezza | | 4,50 | m |
| Carico dovuto al pilastro | | 5,52 | kN |
| <i>Carichi</i> | | | |
| Carichi permanenti strutturale | G ₁ | 6,03 | kN/m ² |
| Carichi permanenti non strutturali | G ₂ | 0,65 | kN/m ² |
| Carichi variabili | Q | 5,00 | kN/m ² |
| Carichi perimetrali | P _s | 4,71 | kN/m |
| Carichi totali permanenti | | 236,02 | kN |
| Carichi totali variabili | | 145,00 | kN |
| Carichi totali Piano 2 | F _k | 381,02 | kN |
| Piano 1 | | | |
| <i>Trave</i> | | | |
| Carico dovuto alla trave | | 14,69 | kN |
| <i>Pilastro</i> | | | |
| Altezza | | 5,50 | m |
| Carico dovuto al pilastro | | 6,75 | kN |
| <i>Carichi</i> | | | |
| Carichi permanenti strutturale | G ₁ | 6,03 | kN/m ² |
| Carichi permanenti non strutturali | G ₂ | 0,68 | kN/m ² |
| Carichi variabili | Q | 5,00 | kN/m ² |
| Carichi perimetrali | P _s | 4,71 | kN/m |
| Carichi totali permanenti | | 238,08 | kN |
| Carichi totali variabili | | 145,00 | kN |
| Carichi totali Piano 1 | F _k | 383,08 | kN |

Tab. IX-94 Carichi per piano applicati al pilastro

Finalmente calcoliamo adesso i carichi agenti per ciascun piano, somandoli con quelli del piano superiore.

| | F_k [kN] | N_k [kN] | N_{ad} [kN] | N_{rd} [kN] | $N_{rd} > N_{ad}$ |
|-----------|------------|------------|---------------|---------------|-------------------|
| Copertura | 244,54 | 244,54 | 342,36 | 1759,45 | verificato |
| Piano 2 | 381,02 | 625,56 | 875,79 | 1759,45 | verificato |
| Piano 1 | 383,08 | 1008,64 | 1412,10 | 1759,45 | verificato |

Tab. IX-95 Verifica allo stato limite ultimo della resistenza della sezione del pilastro alla compressione centrata

3. VERIFICA DEI PILASTRI DI BORDO ALLA PRESSO-FLESSIONE

a. Analisi delle sollecitazioni per il pilastro 1

Il dimensionamento effettuato precedentemente per i pilastri di bordo 1 e 8 porta ad una forte sovrastimazione delle armature per un comportamento sotto uno sforzo assiale centrato. Ma questi pilastri subiscono in realtà un sforzo assiale eccentrico. Dobbiamo quindi procedere alle verifiche a pressoflessione. La struttura essendo simmetrica, le analisi del pilastro 1 e del pilastro 8 sono uguali, quindi ci interessiamo all'unico pilastro 1.

| Nome | Simbolo | Valore | Unità |
|---|---------|--------|-------------------|
| Copertura | | | |
| <i>Trave</i> | | | |
| Carico dovuto alla trave | | 3,13 | kN/m |
| <i>Pilastro</i> | | | |
| Altezza | | 4,50 | m |
| Carico dovuto al pilastro | | 5,52 | kN |
| <i>Carichi</i> | | | |
| Carichi permanenti strutturali | G_1 | 6,03 | kN/m ² |
| Carichi permanenti non strutturali | G_2 | 1,14 | kN/m ² |
| Carichi variabili | Q | 1,06 | kN/m ² |
| Pannelli solari | P_s | 0,15 | kN/m ² |
| | | | |
| Peso del pilastro | | 5,52 | kN |
| Carichi totali permanenti strutturali | | 39,31 | kN/m |
| Carichi totali permanenti non strutturali | | 6,84 | kN/m |
| Carichi totali variabili | | 7,26 | kN/m |
| Carichi totali Copertura | F_k | 53,41 | kN/m |
| | | | |
| Piano 2 | | | |
| <i>Trave</i> | | | |
| Carico dovuto alla trave | | 3,13 | kN/m |
| <i>Pilastro</i> | | | |
| Altezza | | 4,50 | m |
| Carico dovuto al pilastro | | 5,52 | kN |
| <i>Carichi</i> | | | |
| Carichi permanenti strutturale | G_1 | 6,03 | kN/m ² |
| Carichi permanenti non strutturali | G_2 | 0,65 | kN/m ² |
| Carichi perimetrali | Q_p | 4,71 | kN/m |
| Carichi variabili | Q_v | 5,00 | kN/m ² |

| Nome | Simbolo | Valore | Unità |
|---|---------|--------|-------------------|
| Peso del pilastro | | 5,52 | kN |
| Carichi totali permanenti strutturali | | 39,31 | kN/m |
| Carichi totali permanenti non strutturali | | 8,60 | kN/m |
| Carichi totali variabili | | 30,00 | kN/m |
| Carichi totali Piano 2 | F_k | 69,31 | kN/m |
| Piano 1 | | | |
| <i>Trave</i> | | | |
| Carico dovuto alla trave | | 3,13 | kN |
| <i>Pilastro</i> | | | |
| Altezza | | 5,50 | m |
| Carico dovuto al pilastro | | 6,75 | kN |
| <i>Carichi</i> | | | |
| Carichi permanenti strutturale | G_1 | 6,03 | kN/m ² |
| Carichi permanenti non strutturali | G_2 | 0,68 | kN/m ² |
| Carichi variabili | Q_v | 5,00 | kN/m ² |
| Carichi perimetrali | Q_p | 4,71 | kN/m |
| Peso del pilastro | | 6,75 | kN |
| Carichi totali permanenti strutturali | | 39,31 | kN/m |
| Carichi totali permanenti non strutturali | | 8,77 | kN/m |
| Carichi totali variabili | | 30,00 | kN/m |
| Carichi totali Piano 1 | F_k | 69,31 | kN/m |

Tab. IX-96 - Carichi per piano applicati al pilastro

Ricordiamo i dati relativi al pilastro 1 così predimensionato precedentemente.

| Nome | Simbolo | Valore | Unità |
|---|-------------|--------|-----------------|
| Diametro del pilastro | \emptyset | 0,25 | m |
| Area del pilastro | A_c | 0,05 | m ² |
| Spessore copriferro | c | 0,02 | m |
| Diametro della cerchiatura | D | 0,22 | m |
| Diametro ferro longitudinale | φ_l | 12,00 | mm |
| Numero ferro longitudinale | n | 8,00 | |
| Area totale longitudinale | A_l | 9,05 | cm ² |
| Diametro ferro spirale | φ_s | 8,00 | mm |
| Passo cerchiatura | s | 0,04 | m |
| Area spirale | a_w | 0,50 | cm ² |
| Area nucleo cerchiato | A_n | 380,13 | cm ² |
| Area equivalente spirale | A_w | 8,69 | cm ² |
| Rapporto resistente di calcolo | r_s | 13,81 | |
| Rapporto meccanico armatura longitudinale | ω_l | 0,33 | |
| Rapporto meccanico armatura cerchiante | ω_w | 0,32 | |

Tab. IX-97 Caratteristiche geometriche delle armature cerchianti e longitudinali

b. Analisi del telaio semplificato

Risoliamo il telaio con il metodo degli spostamenti.

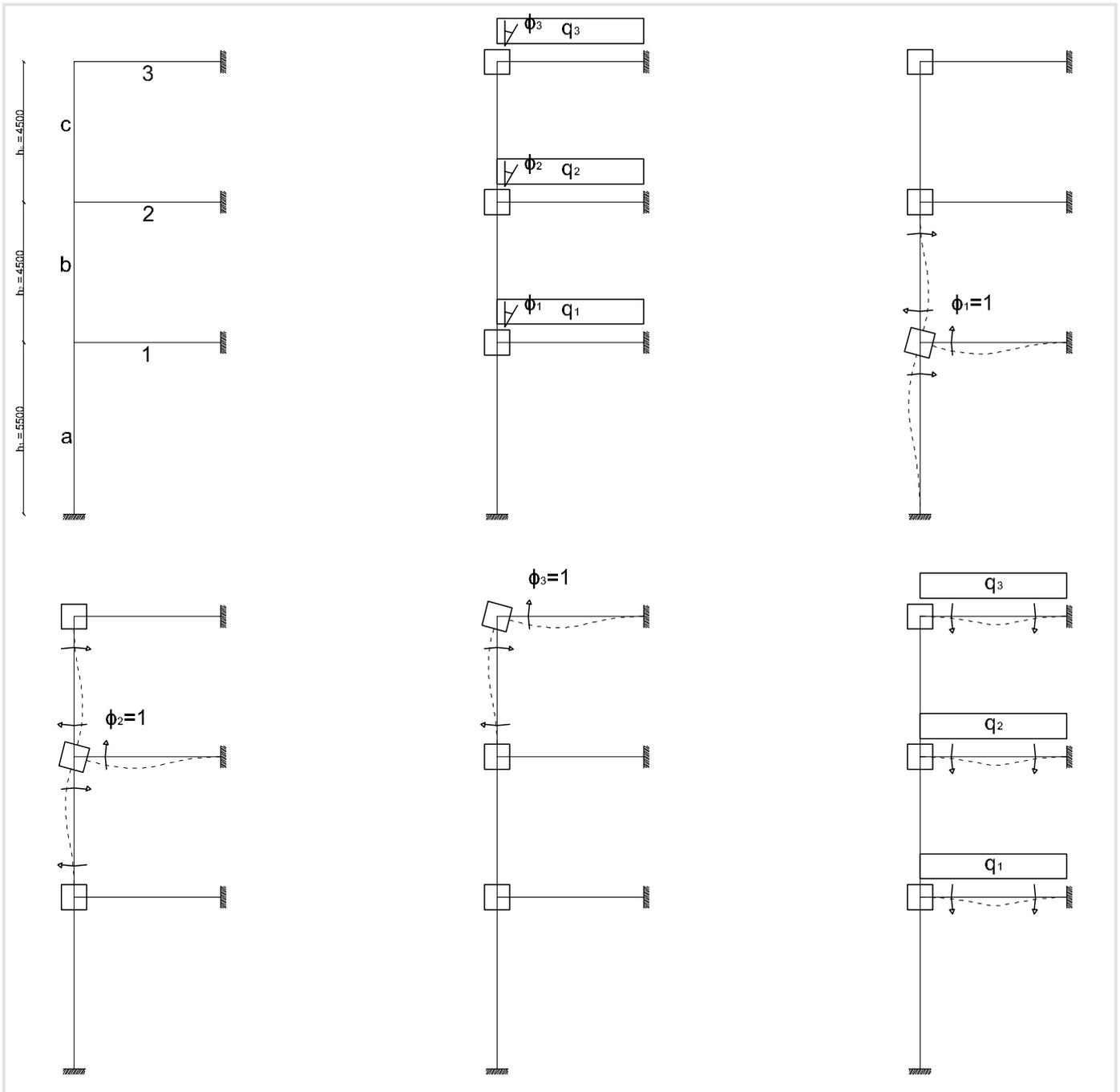


Fig. IX-23 Schema statico del telaio a nodi spostabili

Dobbiamo risolvere il sistema seguente $M \varphi + M_0 = 0$ con :

$$\begin{vmatrix} m_{11} & m_{12} & 0 \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ 0 & m_{32} & m_{33} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} m_{10} \\ m_{20} \\ m_{30} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}$$

Con :

$$m_{11} = \frac{4 * E_{cm} * I_{pa}}{h_a} + \frac{4 * E_{cm} * I_{pb}}{h_b} + \frac{4 * E_{cm} * I_t}{l}$$

$$m_{22} = \frac{4 * E_{cm} * I_{pb}}{h_b} + \frac{4 * E_{cm} * I_{pc}}{h_c} + \frac{4 * E_{cm} * I_t}{l}$$

$$m_{33} = \frac{4 * E_{cm} * I_{pc}}{h_c} + \frac{4 * E_{cm} * I_t}{l}$$

$$m_{12} = \frac{2 * E_{cm} * I_{pb}}{h_b} = m_{21}$$

$$m_{23} = \frac{2 * E_{cm} * I_{pc}}{h_c} = m_{32}$$

Quindi $\varphi = -M^{-1} M_0$.

Calcoliamo i coefficienti delle condizioni esterne secondo le diverse combinazioni di carico per poter ottenere i tagli e momenti massimi.

Ottenuti i vari ϕ_1 , ϕ_2 e ϕ_3 , dobbiamo ancora calcolare i vari momenti ad entrambi lati delle tre campate e delle tre sezioni del pilastro, con :

$$M_{01} = -\frac{q_1 * l^2}{12} - \frac{4 * E_{cm} * I_t}{l} * \varphi_1$$

$$M'_{01} = -\frac{q_1 * l^2}{12} - \frac{2 * E_{cm} * I_t}{l} * \varphi_1$$

$$M_{02} = -\frac{q_2 * l^2}{12} - \frac{4 * E_{cm} * I_t}{l} * \varphi_2$$

$$M'_{02} = -\frac{q_2 * l^2}{12} - \frac{2 * E_{cm} * I_t}{l} * \varphi_2$$

$$M_{03} = -\frac{q_3 * l^2}{12} - \frac{4 * E_{cm} * I_t}{l} * \varphi_3$$

$$M'_{03} = -\frac{q_3 * l^2}{12} - \frac{2 * E_{cm} * I_t}{l} * \varphi_3$$

$$M_{a0} = -\frac{2 * E_{cm} * I_{pa}}{h_a} * \varphi_1$$

$$M_{a1} = +\frac{4 * E_{cm} * I_{pa}}{h_a} * \varphi_1$$

$$M_{b1} = -\frac{4 * E_{cm} * I_{pb}}{h_b} * \varphi_1 - \frac{2 * E_{cm} * I_{pb}}{h_b} * \varphi_2$$

$$M_{b2} = +\frac{2 * E_{cm} * I_{pb}}{h_b} * \varphi_1 + \frac{4 * E_{cm} * I_{pb}}{h_b} * \varphi_2$$

$$M_{c2} = -\frac{4 * E_{cm} * I_{pc}}{h_c} * \varphi_2 - \frac{2 * E_{cm} * I_{pc}}{h_c} * \varphi_3$$

$$M_{c3} = +\frac{2 * E_{cm} * I_{pc}}{h_c} * \varphi_2 + \frac{4 * E_{cm} * I_{pc}}{h_c} * \varphi_3$$

Dopo di che possiamo calcolare i tagli agenti nelle travi al livello dei loro incastri nel pilastro.

$$V_{01} = +\frac{q_1 * l}{2} - \frac{M_{01} - M'_{01}}{l}$$

$$V'_{01} = -\frac{q_1 * l}{2} - \frac{M_{01} - M'_{01}}{l}$$

$$V_{02} = +\frac{q_2 * l}{2} - \frac{M_{02} - M'_{02}}{l}$$

$$V'_{02} = -\frac{q_2 * l}{2} - \frac{M_{02} - M'_{02}}{l}$$

$$V_{03} = +\frac{q_3 * l}{2} - \frac{M_{03} - M'_{03}}{l}$$

$$V'_{03} = -\frac{q_3 * l}{2} - \frac{M_{03} - M'_{03}}{l}$$

Abbiamo al livello di ciascun nodo gli equilibri seguenti :

$$N_c = V_{03}$$

$$N_b = V_{02} + N_c$$

$$N_a = V_{01} + N_b$$

che ci permettono di calcolare i vari sforzi normali al livello di ciascuna sezione del pilastro ma senza tener conto del suo

peso proprio. Verrà aggiunto dopo.

c. Risultati degli sforzi normali e dei momenti agenti a rottura ed in esercizio

Nelle seguenti tabelle indichiamo solo i valori estremi ottenuti tramite le diverse combinazioni di carico.

| Sezione di calcolo | Momenti massimi in esercizio [kN] | Momenti massimi a rottura [kN] |
|--------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| M ₀₁ | -21,62 | -30,25 |
| M' ₀₁ | -82,67 | -115,69 |
| M ₀₂ | -26,09 | -36,36 |
| M' ₀₂ | -84,75 | -118,51 |
| M ₀₃ | -11,28 | -15,48 |
| M' ₀₃ | -54,80 | -74,23 |
| M _{a0} | 3,91 | 5,48 |
| M _{a1} | -7,82 | -10,95 |
| M _{b1} | 13,93 | 19,50 |
| M _{b2} | -13,78 | -19,30 |
| M _{c2} | 12,53 | 17,39 |
| M _{c3} | -11,28 | -15,48 |

Tab. IX-98 Momenti agenti a rottura ed in esercizio

| Calcolo degli sforzi normali [kN] in esercizio | Sforzi normali massimi [kN] in esercizio | Sforzi normali massimi [kN] con peso proprio del pilastro in esercizio | Sforzi normali massimi [kN] a rottura | Sforzi normali massimi [kN] con peso proprio del pilastro a rottura |
|--|--|--|---------------------------------------|---|
| N _a | 457,32 | 480,45 | 634,50 | 657,63 |
| N _b | 286,83 | 302,79 | 395,93 | 411,89 |
| N _c | 116,24 | 123,42 | 157,28 | 164,46 |

Tab. IX-99 Sforzi normali agenti a rottura ed in esercizio

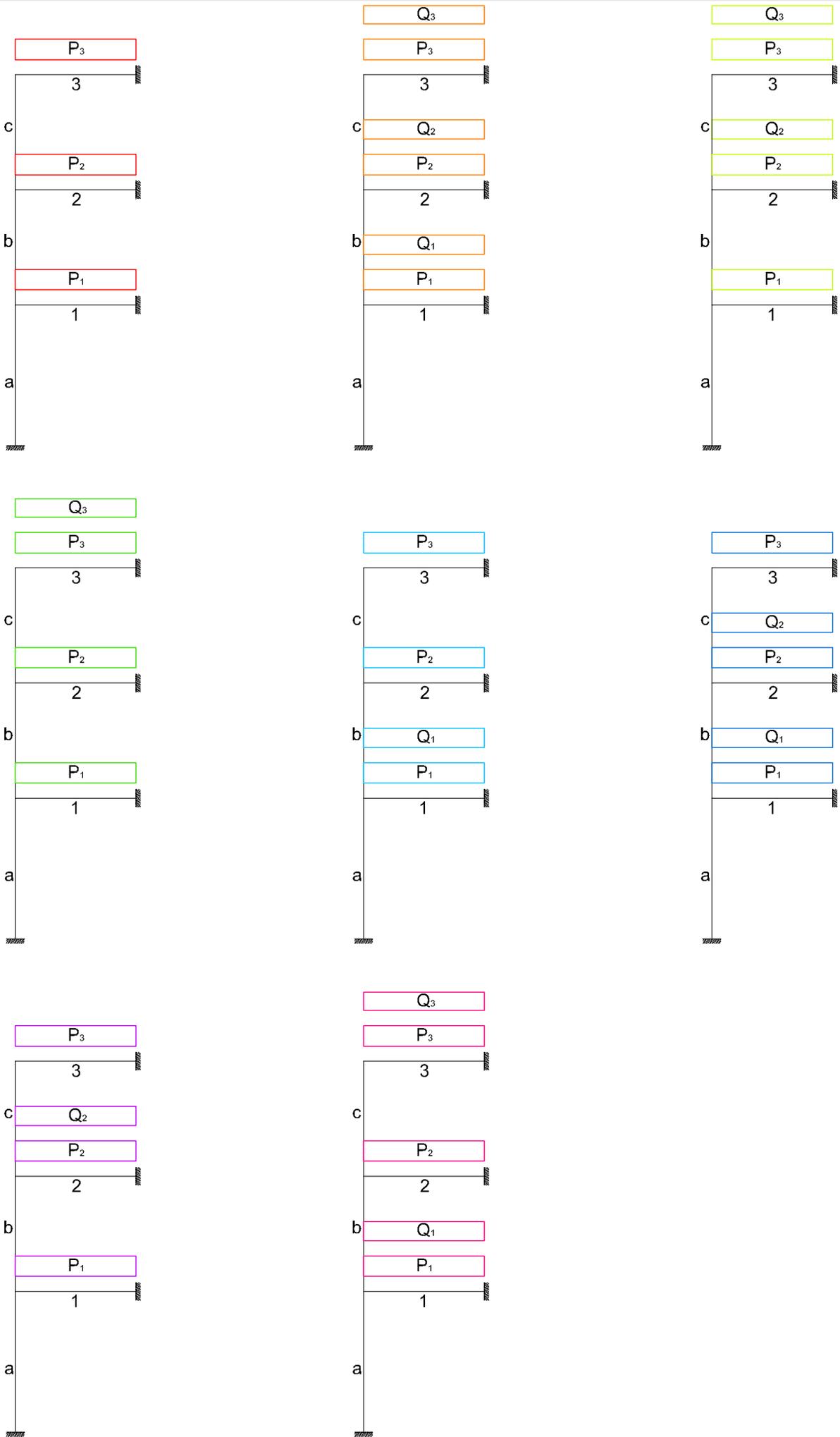


Fig. IX-24 8 combinazioni di carico

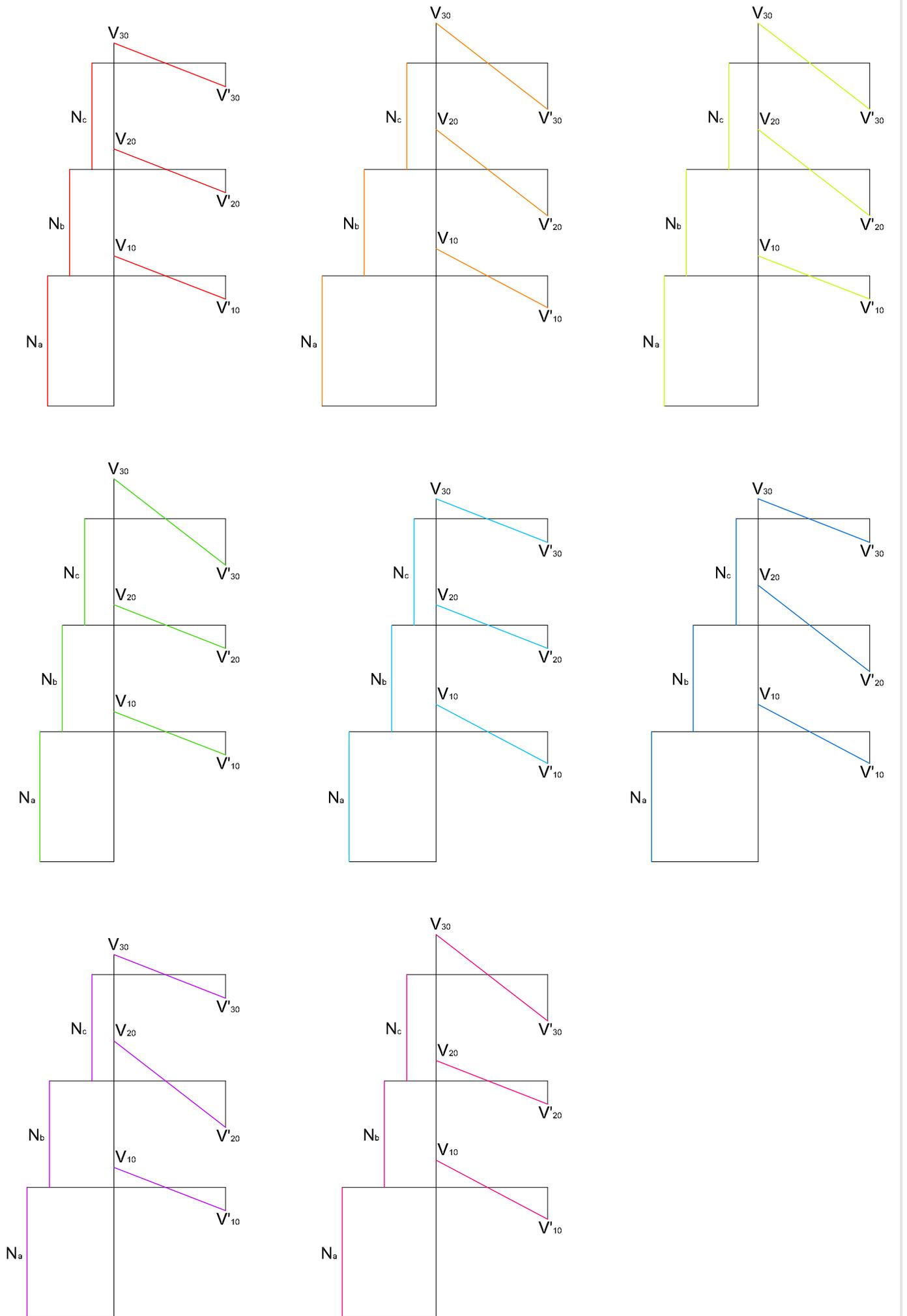


Fig. IX-25 Diagramma dei tagli agenti

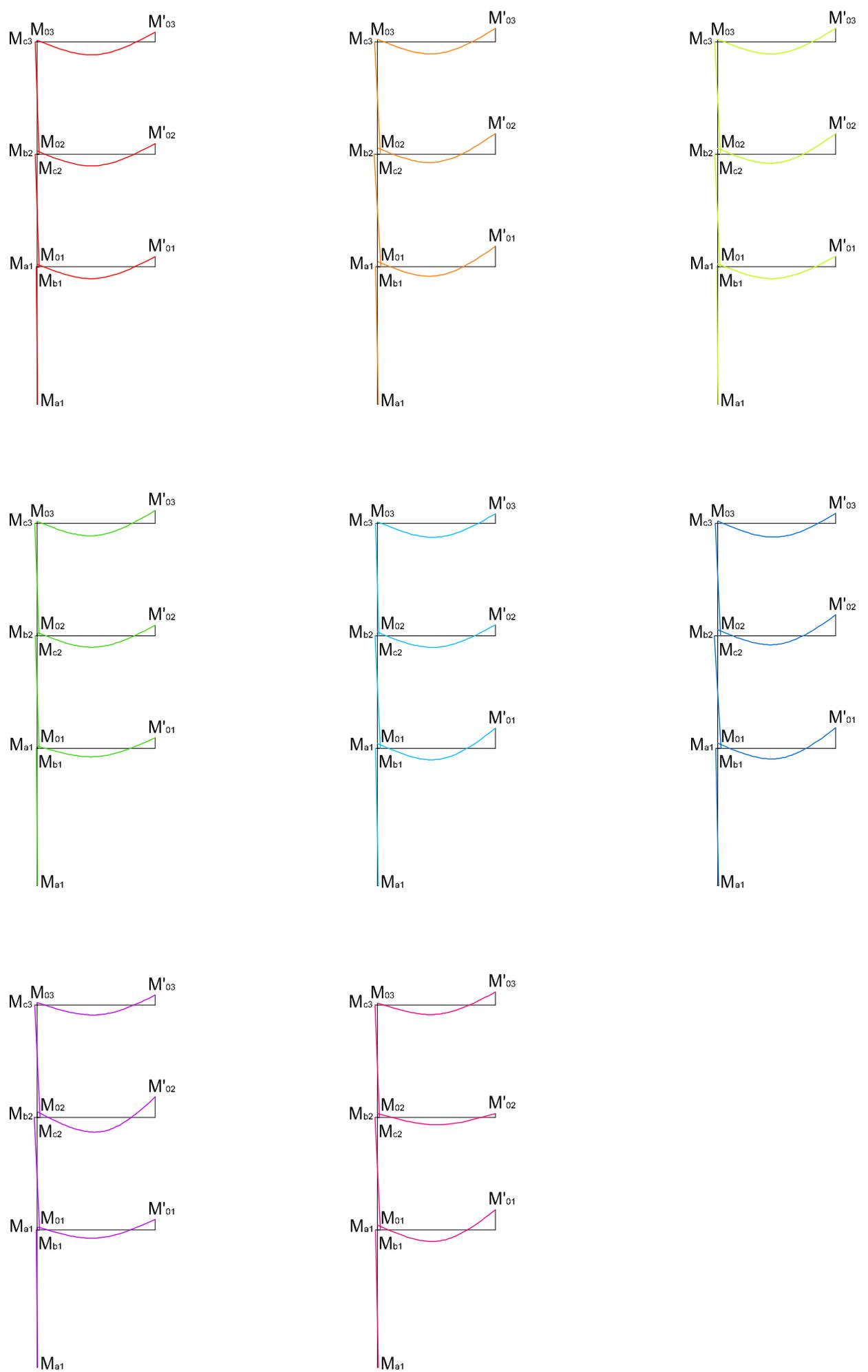


Fig. IX-26 Diagramma dei momenti agenti

d. Verifiche di esercizio

Vogliamo adesso effettuare la verifica in esercizio di un pilastro di sezione circolare a pressoflessione. Non esistono metodi algebrici diretti semplificati. Occorre un calcolo di tipo integrale. Davanti a queste difficoltà abbiamo pensato effettuare una verifica approssimata considerando la sezione del pilastro come una giustapposizione di striscie di sezione rettangolare di spessore costante. Il numero di striscie è stato calcolato in modo tale che i ferri longitudinali e a spirale rimangono sempre, più o meno, al centro di ciascuna striscia. Così abbiamo ottenuto un pilastro suddiviso in 8 striscie di 3,13 cm di spessore. Le condizioni di carico e il pilastro essendo assialmente simmetriche, è utile effettuare le verifiche solo per la metà delle striscie, numerotate da 1 a 4, dal nucleo del pilastro fino al copriferro.

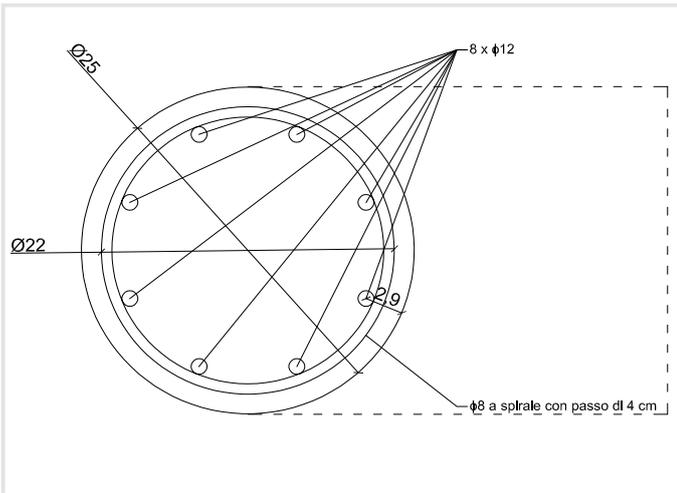


Fig. IX-27 Schema rappresentante la sezione tipo del pilastro precedentemente calcolato

Adesso proveremo a descrivere come abbiamo calcolato la sezione fittizia del nostro pilastro.

Dividiamo la sezione in $2n$ parti di larghezza costante L e introduciamo rettangoli di spessore L e di larghezza tale da mantenere costante l'area della sezione del pilastro.

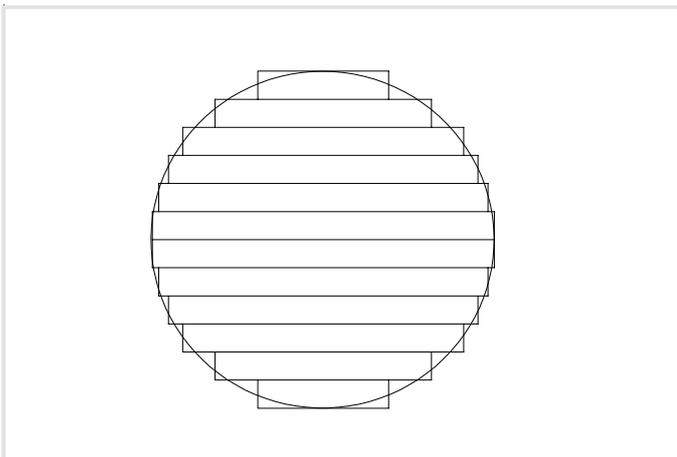


Fig. IX-30 Schema di principio rappresentante $2n$ striscie

Per la prima striscia verso l'alto sul disegno (il pilastro essendo simmetrico, ci interessiamo ad un'unica metà), calcoliamo l'area così suddivisa e ne ricaviamo la larghezza l_1 di questa prima striscia.

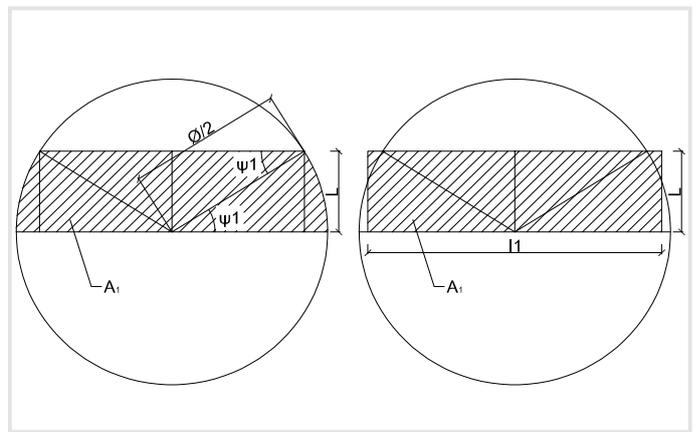


Fig. IX-28 Sezioni del pilastro con a sinistra l'area A_1 della prima striscia e a destra il rettangolo equivalente così calcolato

Con varie considerazioni geometriche, si ottiene l'espressione dell'area della prima striscia e di conseguenza la sua larghezza:

$$A_1 = \sin^{-1} \left(\frac{2L}{\varnothing} \right) \frac{\varnothing^2}{4} + L \sqrt{\frac{\varnothing^2}{4} - L^2}$$

$$l_1 = \frac{A_1}{L}$$

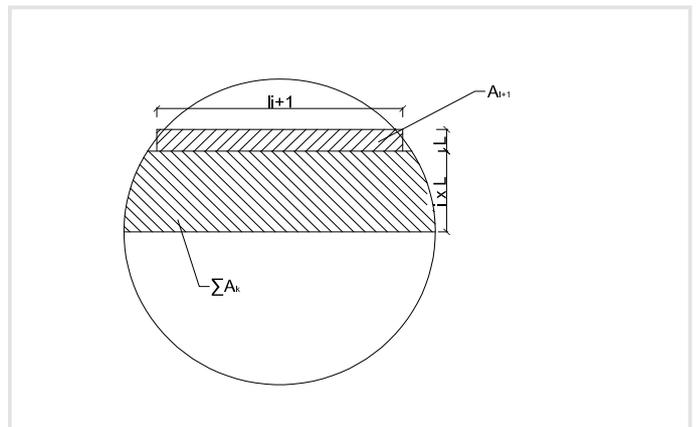


Fig. IX-29 Considerazioni geometriche per il calcolo delle varie larghezze delle striscie

Infine si ha una relazione di ricorrenza per $i = 2, \dots, n$:

$$A_{i+1} = \sin^{-1} \left(\frac{2L}{\varnothing} (i+1) \right) \frac{\varnothing^2}{4} + (i+1)L \sqrt{\frac{\varnothing^2}{4} - [(i+1)L]^2} - \sum_{k=1}^i A_k$$

e si ha sempre:

$$l_i = \frac{A_i}{L}$$

Si deve adesso procedere al calcolo dello spessore dei copriferri equivalenti all'interno di ciascun rettangolo della sezione fittizia. Dopo varie considerazioni geometriche, si ha con d_i lo spessore del copriferro:

$$d_i = \frac{l_i}{2} - \sqrt{\left(\frac{\varnothing}{2} - c \right)^2 - \left(i - \frac{1}{2} \right)^2 \left(\frac{L}{2} \right)^2}$$

con c lo spessore del copriferro del pilastro cerchiato.

Si trova qui la nostra condizione limitante per il numero di strisce possibili per il nostro pilastro perché la quantità

$$\left(\frac{\emptyset}{2} - c\right)^2 - \left(n - \frac{1}{2}\right)\left(\frac{L}{2}\right)^2$$

non può essere inferiore a 0.

Quindi :

$$\left(\frac{\emptyset}{2} - c\right)^2 - \left(n - \frac{1}{2}\right)\left(\frac{L}{2}\right)^2 \geq 0$$

ci porta a :

$$\left(\frac{\emptyset}{2} - c\right) \geq \left(n - \frac{1}{2}\right)\frac{\emptyset/2n}{2}$$

con $L = \emptyset/2n$ e troviamo il semplice limite :

$$\frac{\emptyset}{4c} \geq n.$$

Con $\emptyset = 25\text{cm}$ e $c = 1,5\text{ cm}$ si ha $4,17 \geq n$ quindi $n = 4$ e quindi la sezione può al massimo essere suddivisa in 8 strisce.

E per finire il diametro dei ferri di ciascun striscia viene calcolato in proporzione all'area della striscia davanti a quella della sezione totale del pilastro.

I diversi dati geometrici per ciascun sezione si ritrovano nella tabella *Tab. IX-100*.

Dopo di che le verifiche sono state effettuate per ciascun sezione al livello della somità del pilastro in corrispondenza con i solai, della copertura, del secondo e finalmente del primo piano.

Le azioni agenti, momento agente e sforzo normale agente sono state considerate come proporzionali all'area di ciascun piccola sezione del pilastro. La tensione agente nella parte compressa del calcestruzzo non deve superare la tensione limite ammissibile da parte del calcestruzzo, e la tensione agente nella parte tesa dell'acciaio non deve superare la tensione limite ammissibile da parte dell'acciaio.

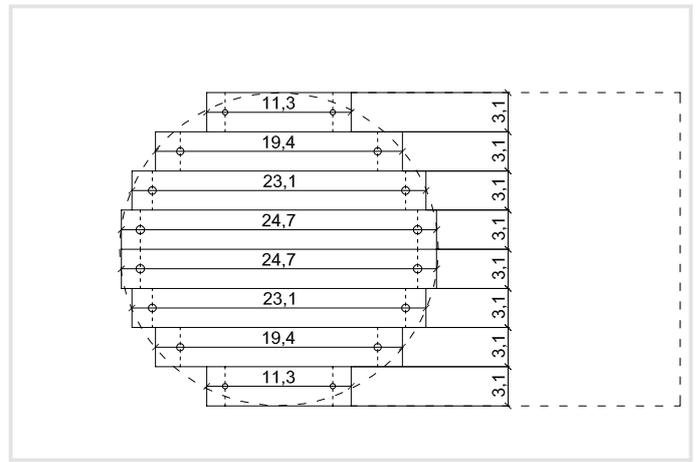


Fig. IX-31 Sezione fittizia del pilastro per la verifica a flessione

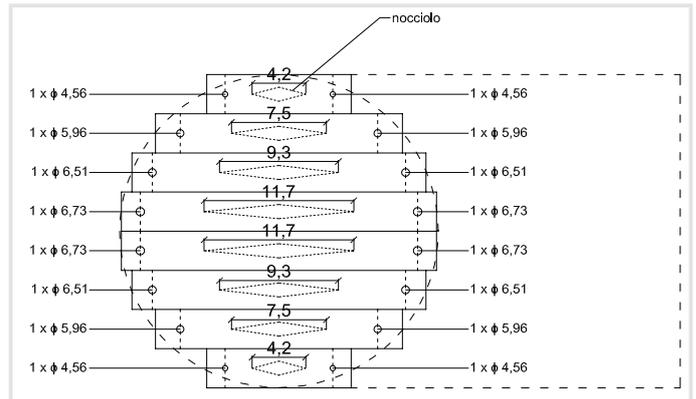


Fig. IX-32 Ferri fittizi e noccioli delle diverse striscie

Per poter calcolare facilmente le equazioni di terzo grado che permettono di ottenere la posizione dell'asse neutro nella sezione, abbiamo usato il software di calcolo Maple 12.

L'espressione generale di tale equazione è :

$$x^3 + 3 \cdot d_0 \cdot x^2 + \frac{6 \cdot \alpha_e}{I_i} \cdot (A_s \cdot d_s + A'_s \cdot d'_s) \cdot x - \frac{6 \cdot \alpha_e}{I_A} \cdot (A_s \cdot d_s \cdot d_A + A'_s \cdot d'_s \cdot d'_A) = 0$$

| nome | simbolo | unità | striscia 1 | striscia 2 | striscia 3 | striscia 4 |
|---|-------------------------------------|-----------------|------------|------------|------------|------------|
| larghezza della striscia | L_i | cm | 3,13 | 3,13 | 3,13 | 3,13 |
| altezza della striscia | l_i | cm | 24,74 | 23,09 | 19,38 | 11,33 |
| Area della striscia | A_i | cm ² | 77,30 | 72,17 | 60,55 | 35,41 |
| Area totale dell'acciaio | A_{ti} | cm ² | 2,85 | 2,66 | 2,23 | 1,31 |
| Diametro dei ferri longitudinali | φ_i | mm | 6,73 | 6,51 | 5,96 | 4,56 |
| Numero di ferri totali | n_i | | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 |
| spessore copriferro | d'_i | cm | 1,48 | 1,60 | 1,94 | 1,44 |
| | d_i | cm | 23,26 | 21,50 | 17,43 | 9,89 |
| assisce acciaio | y_s | cm | 10,89 | 9,95 | 7,74 | 4,22 |
| Area ideale della striscia | A_i | cm ² | 93,22 | 87,03 | 73,02 | 42,71 |
| Rapporto dei moduli elastici dell'acciaio e del cls | α_e | | 5,59 | 5,59 | 5,59 | 5,59 |
| Momento d'inerzia | $I_i = I_{ic} + \alpha_e A_t y_s^2$ | cm ⁴ | 5829,20 | 4678,87 | 2642,16 | 509,21 |
| Momento d'inerzia adimensionale | i^2 | cm ² | 62,53 | 53,76 | 36,18 | 11,92 |
| Dimensione del nucleo | u | cm | 5,06 | 4,66 | 3,73 | 2,10 |

Tab. IX-100 Dati geometrici

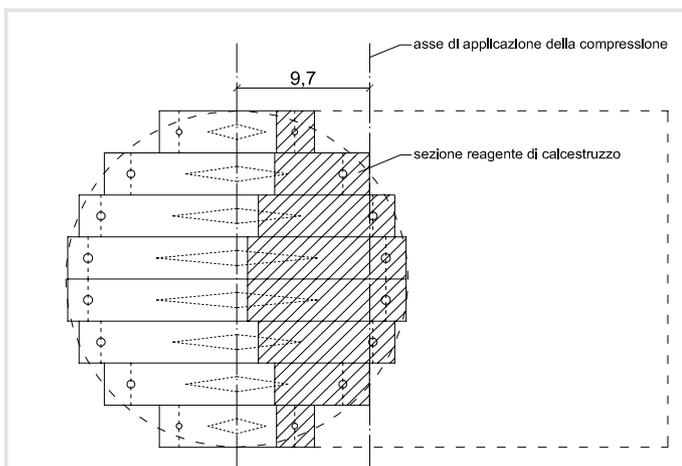


Fig. IX-33 Sezione del pilastro con la parte reagente e l'eccentricità dello sforzo assiale di compressione

| nome | simbolo | unità | striscia 1 | striscia 2 | striscia 3 | striscia 4 |
|--|---|-------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| momento agente | M_{adi} | kNm | 1,78 | 1,66 | 1,39 | 0,81 |
| Sforzo assiale agente - senza il peso del pilastro | N_{adi} | kN | 18,31 | 17,09 | 14,34 | 8,39 |
| eccentricità | e | cm | 9,71 | 9,71 | 9,71 | 9,71 |
| parzializzazione della sezione | | | la sezione si parzializza |
| Area ferri tesi | A_s | | 1,42 | 1,33 | 1,12 | 0,65 |
| Area ferri compressi | A'_s | | 1,42 | 1,33 | 1,12 | 0,65 |
| | $d_0 = e - l_A/2$ | | -2,66 | -1,84 | 0,02 | 4,04 |
| | $d_s = d_0 + d_i$ | | 20,60 | 19,66 | 17,45 | 13,93 |
| | $d'_s = d_0 + d'_i$ | | -1,18 | -0,24 | 1,96 | 5,48 |
| | $6 \alpha_e / l_i$ | | 1,35 | 1,45 | 1,73 | 2,96 |
| | $3 d_0$ | | -7,98 | -5,52 | 0,06 | 12,12 |
| | $6 \alpha_e / l_i (A_s d_s + A'_s d'_s)$ | | 37,48 | 37,48 | 37,48 | 37,48 |
| | $6 \alpha_e / l_i (A_s d_s d_A + A'_s d'_s d'_A)$ | | 921,31 | 815,10 | 594,63 | 281,29 |
| | x | cm | 11,60 | 9,97 | 6,93 | 2,77 |
| Momento statico sezione parzializzata | S_{ic} | cm ³ | 1663,68 | 1146,83 | 464,69 | 43,38 |
| Momento statico acciaio compresso | S'_{is} | cm ³ | 80,53 | 62,19 | 31,05 | 4,83 |
| Momento statico acciaio teso | S_{is} | cm ³ | 92,80 | 85,69 | 65,50 | 25,98 |
| Momento statico totale | S_i | cm ³ | 1651,41 | 1123,34 | 430,24 | 22,23 |
| tensione nel calcestruzzo | $-\sigma_c$ | N/mm ² | 1,29 | 1,52 | 2,31 | 10,44 |
| tensione nell'acciaio teso | $+\sigma_s$ | N/mm ² | 7,22 | 9,80 | 19,56 | 150,11 |

Tab. IX-101 Pilastro alla copertura - sezione di sommità

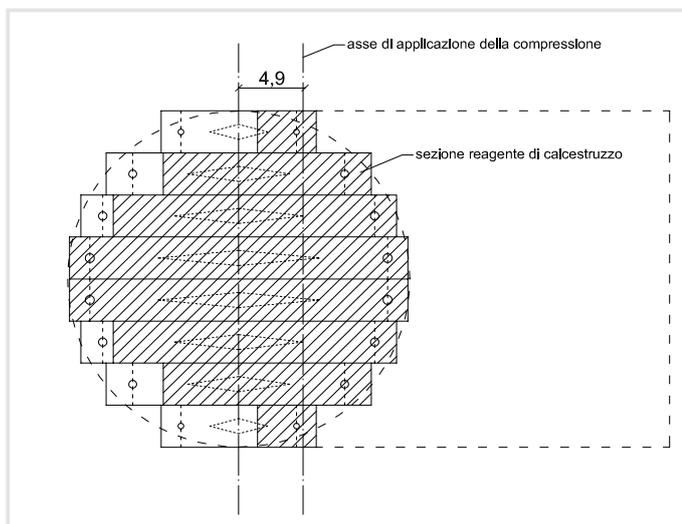


Fig. IX-34 Sezione del pilastro con la parte reagente e l'eccentricità dello sforzo assiale di compressione

| nome | simbolo | unità | striscia 1 | striscia 2 | striscia 3 | striscia 4 |
|--|---|-------------------|-----------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| momento agente | M_{adi} | kNm | 2,17 | 2,03 | 1,70 | 0,99 |
| Sforzo assiale agente - senza il peso del pilastro | N_{adi} | kN | 46,04 | 42,98 | 36,06 | 21,09 |
| eccentricità | e | cm | 4,71 | 4,71 | 4,71 | 4,71 |
| parzializzazione della sezione | | | sezione non fessurata | la sezione si parzializza | la sezione si parzializza | la sezione si parzializza |
| Area ferri tesi | A_s | | | 1,33 | 1,12 | 0,65 |
| Area ferri compressi | A'_s | | | 1,33 | 1,12 | 0,65 |
| | $d_0 = e - I_A/2$ | | | -6,83 | -4,97 | -0,95 |
| | $d_s = d_0 + d_i$ | | | 14,66 | 12,46 | 8,94 |
| | $d'_s = d_0 + d'_i$ | | | -5,24 | -3,03 | 0,49 |
| | $6 \alpha_e / I_i$ | | | 1,45 | 1,73 | 2,96 |
| | $3 d_0$ | | | -20,50 | -14,92 | -2,86 |
| | $6 \alpha_e / I_i (A_s d_s + A'_s d'_s)$ | | | 18,20 | 18,20 | 18,20 |
| | $6 \alpha_e / I_A (A_s d_s d_A + A'_s d'_s d'_A)$ | | | 592,46 | 407,82 | 172,04 |
| | x | cm | | 20,72 | 15,21 | 4,28 |
| Momento statico sezione parzializzata | S_{ic} | cm ³ | | 4959,06 | 2240,79 | 103,84 |
| Momento statico acciaio compresso | S'_{is} | cm ³ | | 142,13 | 82,69 | 10,35 |
| Momento statico acciaio teso | S_{is} | cm ³ | | 5,75 | 13,86 | 20,46 |
| Momento statico totale | S_i | cm ³ | | 5095,43 | 2309,61 | 93,74 |
| tensione nel calcestruzzo | $-\sigma_c$ | N/mm ² | 5,31 | 1,75 | 2,37 | 9,63 |
| tensione nell'acciaio teso | $+\sigma_s$ | N/mm ² | | 0,36 | 1,94 | 70,52 |

Tab. IX-102 Pilastro al 2° piano - sezione di sommità

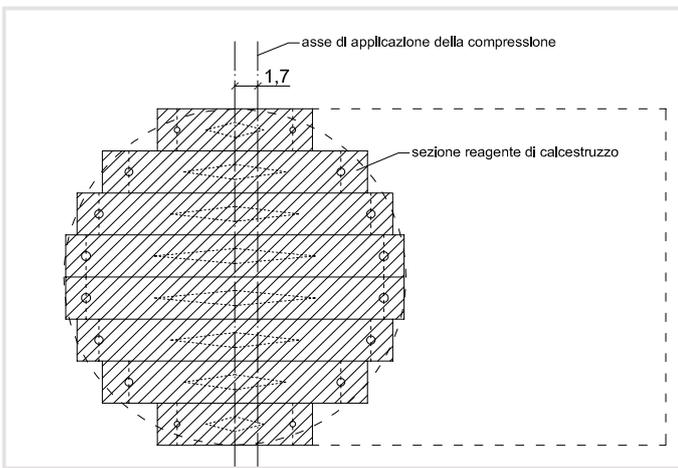


Fig. IX-35 Sezione del pilastro con la parte reagente e l'eccentricità dello sforzo assiale di compressione

| nome | simbolo | unità | striscia 1 | striscia 2 | striscia 3 | striscia 4 |
|--|-------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| momento agente | M_{adi} | kNm | 1,23 | 1,15 | 0,96 | 0,56 |
| Sforzo assiale agente - senza il peso del pilastro | N | kN | 73,76 | 68,86 | 57,77 | 33,79 |
| eccentricità | e | cm | 1,67 | 1,67 | 1,67 | 1,67 |
| parzializzazione della sezione | | | sezione non fessurata | sezione non fessurata | sezione non fessurata | sezione non fessurata |
| tensione nel calcestruzzo | $-\sigma_c$ | N/mm ² | 8,12 | 8,16 | 8,28 | 9,02 |

Tab. IX-103 Pilastro al 1° piano - sezione di sommità

e. Verifiche a rottura

Per ciascuna striscia rettangolare del nostro pilastro, si andrà a effettuare le verifiche a rottura per ciascun parte critica del pilastro, cioè al di sotto e al di sopra del suo incastro con la trave. Come prima, consideriamo i momenti e li sforzi assiali agenti su ciascun striscia come proporzionali all'area di ciascun striscia. Usiamo i risultati ottenuti per il pilastro completo e presentato in una precedente tabella.

I limiti della snervamento delle armature sono dati rispettivamente da:

$$\underline{\xi} = \xi * \beta_0 \leq \beta_0 \delta / (1 + \alpha_0) = \underline{\xi}_{sup}$$

$$\underline{\xi} = \xi * \beta_0 \leq \beta_0 \delta' / (1 + \alpha_0) = \underline{\xi}_{inf}$$

con ξ estensione del diagramma costante delle compressioni $\sigma_c = f_{c1}$.

I calcoli del momento resistente $M_{rd} = M_{rd}(N_{ad})$ per tutte le strisce al livello di ciascun sezione critica sono raggruppati nelle seguenti tabelle. Ad ogni piano sono associate due righe, una per la sezione di sommità e una per la sezione al piede.

Nella prima colonna sono riportate le azioni assiali $N_{ad} = \gamma_f N_{ak}$ espresse in kN, differenziate tra sommità e piede in base al peso proprio del pilastro.

Nella seconda colonna è riportata l'azione assiale adimensionale:

$$v_0 = N_{ad}/N_{co}$$

Nelle due colonne seguenti sono riportati i rapporti meccanici d'armatura. Nella quinta colonna è riportata l'impronta compressa di calcestruzzo:

$$\omega_s = \frac{f_{sd} A_s}{N_{co}} \quad e \quad \omega'_s = \frac{f_{sd} A'_s}{N_{co}}$$

Nella quinta colonna è riportata l'impronta compressa di calcestruzzo, calcolata con:

$$\underline{\xi} = v_0 + \omega_s - \omega'_s \quad \text{per} \quad \underline{\xi}_{inf} \leq \underline{\xi} \leq \underline{\xi}_{sup}$$

$$\underline{\xi} = v_0 + \omega_s \quad \text{per} \quad \underline{\xi} < \underline{\xi}_{inf}$$

$$\underline{\xi} = \left\{ (\alpha_0 v_0 - \omega_s - \alpha_0 \omega'_s) + \sqrt{(\alpha_0 v_0 - \omega_s - \alpha_0 \omega'_s)^2 + 4 \alpha_0 \beta_0 \omega_s \delta} \right\}$$

Per $\underline{\xi}_{sup} < \underline{\xi}$

Nella sesta colonna è posto il braccio della risultante delle compressioni:

$$\eta_0 = \eta_c - \underline{\xi}/2$$

Nelle due righe successive sono posti i rapporti

$$\alpha_s = \sigma_s / f_{sd} = (\beta_0 \delta - \underline{\xi}) / (\alpha_0 \underline{\xi}) \quad \text{per} \quad \underline{\xi}_{sup} < \underline{\xi}$$

$$\alpha_s = \sigma_s / f_{sd} = 1 \quad \text{per} \quad \underline{\xi} \leq \underline{\xi}_{sup}$$

$$\alpha'_s = \sigma'_s / f_{sd} = 1 \quad \text{per} \quad \underline{\xi}_{inf} \leq \underline{\xi}$$

$$\alpha'_s = \sigma'_s / f_{sd} = 0 \quad \text{per} \quad \underline{\xi} < \underline{\xi}_{inf}$$

| Nome | Notazione | Valore | Unità |
|---|----------------------------|--------|-------|
| Resistenza a compressione del solo calcestruzzo | $N_{cd} = f_{cd} L_i$ | 219,03 | kN |
| Resistenza a flessione del solo calcestruzzo | $M_{cd} = N_{co} l_i$ | 54,18 | kNm |
| posizione armatura tesa | δ | 0,94 | |
| posizione armatura compressa | δ' | 0,06 | |
| posizione asse di calcolo | η_c | 0,50 | |
| braccio di ω_s | $\eta_s = \delta + \eta_c$ | 0,44 | |
| braccio di ω'_s | $\eta_s = \eta_c - \delta$ | 0,44 | |
| limite dello snervamento a trazione | ξ_{sup} | 0,43 | |
| limite dello snervamento a compressione | ξ_{inf} | 0,19 | |

| Sezione | N_{Ed} [kN] | v_0 | ω_s | ω'_s | ξ | η_0 | α_s | α'_s | M_{Rd} [kNm] | M_{Ed} [kNm] |
|--|---------------|-------|------------|-------------|---------|----------|------------|-------------|----------------|----------------|
| Pilastro 2° -> Copertura - sezione di sommità | 49,54 | 0,23 | 0,28284 | 0,28284 | 0,35871 | 0,32064 | 1,00 | 1,00 | 19,72 | 4,87 |
| Pilastro 2° -> Copertura - sezione di base | 51,80 | 0,24 | 0,28284 | 0,28284 | 0,36195 | 0,31903 | 1,00 | 1,00 | 19,75 | 5,48 |
| Pilastro 1° -> 2° - sezione di sommità | 126,97 | 0,58 | 0,28284 | 0,28284 | 0,49434 | 0,25283 | 0,70 | 1,00 | 18,23 | 6,08 |
| Pilastro 1° -> 2° - sezione di base | 129,23 | 0,59 | 0,28284 | 0,28284 | 0,49914 | 0,25043 | 0,68 | 1,00 | 18,10 | 6,14 |
| Pilastro Fondazioni -> 1° - sezione di sommità | 204,37 | 0,93 | 0,28284 | 0,28284 | 0,68646 | 0,15677 | 0,13 | 1,00 | 13,44 | 3,45 |
| Pilastro Fondazioni -> 1° - sezione di base | 207,13 | 0,95 | 0,28284 | 0,28284 | 0,69436 | 0,15282 | 0,11 | 1,00 | 13,25 | 1,72 |

Tab. IX-104 Risultati per la sezione 1

| Nome | Notazione | Valore | Unità |
|---|----------------------------|--------|-------|
| Resistenza a compressione del solo calcestruzzo | $N_{cd} = f_{cd} L_i$ | 204,47 | kN |
| Resistenza a flessione del solo calcestruzzo | $M_{cd} = N_{co} l_i$ | 47,22 | kNm |
| posizione armatura tesa | δ | 0,93 | |
| posizione armatura compressa | δ' | 0,07 | |
| posizione asse di calcolo | η_c | 0,50 | |
| braccio di ω_s | $\eta_s = \delta + \eta_c$ | 0,43 | |
| braccio di ω'_s | $\eta_s = \eta_c - \delta$ | 0,43 | |
| limite dello snervamento a trazione | ξ_{sup} | 0,43 | |
| limite dello snervamento a compressione | ξ_{inf} | 0,22 | |

| Sezione | N_{Ed} [kN] | v_0 | ω_s | ω'_s | ξ | η_0 | α_s | α'_s | M_{Rd} [kNm] | M_{Ed} [kNm] |
|--|---------------|-------|------------|-------------|---------|----------|------------|-------------|----------------|----------------|
| Pilastro 2° -> Copertura - sezione di sommità | 46,25 | 0,23 | 0,28284 | 0,28284 | 0,35628 | 0,32186 | 1,00 | 1,00 | 16,93 | 4,55 |
| Pilastro 2° -> Copertura - sezione di base | 48,36 | 0,24 | 0,28284 | 0,28284 | 0,35950 | 0,32025 | 1,00 | 1,00 | 16,95 | 5,11 |
| Pilastro 1° -> 2° - sezione di sommità | 118,53 | 0,58 | 0,28284 | 0,28284 | 0,49172 | 0,25414 | 0,69 | 1,00 | 15,62 | 5,67 |
| Pilastro 1° -> 2° - sezione di base | 120,64 | 0,59 | 0,28284 | 0,28284 | 0,49651 | 0,25175 | 0,67 | 1,00 | 15,51 | 5,73 |
| Pilastro Fondazioni -> 1° - sezione di sommità | 190,79 | 0,93 | 0,28284 | 0,28284 | 0,68391 | 0,15805 | 0,12 | 1,00 | 11,54 | 3,22 |
| Pilastro Fondazioni -> 1° - sezione di base | 193,37 | 0,95 | 0,28284 | 0,28284 | 0,69181 | 0,15409 | 0,10 | 1,00 | 11,38 | 1,61 |

Tab. IX-105 Risultati per la sezione 2

| Nome | Notazione | Valore | Unità |
|---|----------------------------|--------|-------|
| Resistenza a compressione del solo calcestruzzo | $N_{c0} = f_{cd} L_i$ | 171,56 | kN |
| Resistenza a flessione del solo calcestruzzo | $M_{c0} = N_{c0} l_i$ | 33,24 | kNm |
| posizione armatura tesa | δ | 0,90 | |
| posizione armatura compressa | δ' | 0,10 | |
| posizione asse di calcolo | η_c | 0,50 | |
| braccio di ω_s | $\eta_s = \delta + \eta_c$ | 0,40 | |
| braccio di ω'_s | $\eta_s = \eta_c - \delta$ | 0,40 | |
| limite dello snervamento a trazione | ξ_{sup} | 0,41 | |
| limite dello snervamento a compressione | ξ_{inf} | 0,32 | |

| Sezione | N_{Ed} [kN] | v_0 | ω_s | ω'_s | ξ | η_0 | α_s | α'_s | M_{Rd} [kNm] | M_{Ed} [kNm] |
|--|---------------|-------|------------|-------------|---------|----------|------------|-------------|----------------|----------------|
| Pilastro 2° -> Copertura - sezione di sommità | 38,80 | 0,23 | 0,28284 | 0,28284 | 0,50901 | 0,24549 | 0,55 | 1,00 | 9,99 | 3,82 |
| Pilastro 2° -> Copertura - sezione di base | 40,57 | 0,24 | 0,28284 | 0,28284 | 0,51933 | 0,24033 | 0,52 | 1,00 | 9,85 | 4,29 |
| Pilastro 1° -> 2° - sezione di sommità | 99,45 | 0,58 | 0,28284 | 0,28284 | 0,48275 | 0,25862 | 0,66 | 1,00 | 10,38 | 4,76 |
| Pilastro 1° -> 2° - sezione di base | 101,22 | 0,59 | 0,28284 | 0,28284 | 0,48753 | 0,25623 | 0,64 | 1,00 | 10,31 | 4,81 |
| Pilastro Fondazioni -> 1° - sezione di sommità | 160,08 | 0,93 | 0,28284 | 0,28284 | 0,67520 | 0,16240 | 0,09 | 1,00 | 7,73 | 2,70 |
| Pilastro Fondazioni -> 1° - sezione di base | 162,24 | 0,95 | 0,28284 | 0,28284 | 0,68313 | 0,15844 | 0,07 | 1,00 | 7,63 | 1,35 |

Tab. IX-106 Risultati per la sezione 2

| Nome | Notazione | Valore | Unità |
|---|----------------------------|--------|-------|
| Resistenza a compressione del solo calcestruzzo | $N_{c0} = f_{cd} L_i$ | 100,34 | kN |
| Resistenza a flessione del solo calcestruzzo | $M_{c0} = N_{c0} l_i$ | 11,37 | kNm |
| posizione armatura tesa | δ | 0,87 | |
| posizione armatura compressa | δ' | 0,13 | |
| posizione asse di calcolo | η_c | 0,50 | |
| braccio di ω_s | $\eta_s = \delta + \eta_c$ | 0,37 | |
| braccio di ω'_s | $\eta_s = \eta_c - \delta$ | 0,37 | |
| limite dello snervamento a trazione | ξ_{sup} | 0,40 | |
| limite dello snervamento a compressione | ξ_{inf} | 0,40 | |

| Sezione | N_{Ed} [kN] | v_0 | ω_s | ω'_s | ξ | η_0 | α_s | α'_s | M_{Rd} [kNm] | M_{Ed} [kNm] |
|--|---------------|-------|------------|-------------|---------|----------|------------|-------------|----------------|----------------|
| Pilastro 2° -> Copertura - sezione di sommità | 22,69 | 0,23 | 0,28284 | 0,28284 | 0,50901 | 0,24549 | 0,50 | 1,00 | 3,22 | 2,23 |
| Pilastro 2° -> Copertura - sezione di base | 23,73 | 0,24 | 0,28284 | 0,28284 | 0,51933 | 0,24033 | 0,46 | 1,00 | 3,17 | 2,51 |
| Pilastro 1° -> 2° - sezione di sommità | 58,17 | 0,58 | 0,28284 | 0,28284 | 0,47493 | 0,26254 | 0,63 | 1,00 | 3,37 | 2,78 |
| Pilastro 1° -> 2° - sezione di base | 59,20 | 0,59 | 0,28284 | 0,28284 | 0,47971 | 0,26015 | 0,61 | 1,00 | 3,35 | 2,81 |
| Pilastro Fondazioni -> 1° - sezione di sommità | 93,63 | 0,93 | 0,28284 | 0,28284 | 0,66761 | 0,16620 | 0,06 | 1,00 | 2,53 | 1,58 |
| Pilastro Fondazioni -> 1° - sezione di base | 94,89 | 0,95 | 0,28284 | 0,28284 | 0,67556 | 0,16222 | 0,04 | 1,00 | 2,50 | 0,79 |

Tab. IX-107 Risultati per la sezione 4

G. DIMENSIONAMENTO E VERIFICA DEI PILASTRI NORD

1. PREMESSA

La valutazione della sicurezza deve essere provata secondo i requisiti richiesti di resistenza, funzionalità, durabilità e robustezza garantiti se verificati rispetto allo stato limite ultimo e allo stato limite di esercizio della struttura, dei componenti strutturali e dei collegamenti. Il metodo di analisi deve essere coerente con le ipotesi di progetto. L'analisi deve essere basata su modelli strutturali di calcolo appropriati, a seconda dello stato limite considerato. Quindi il dimensionamento e la verifica dei pilastri sud verrà suddiviso in due parti principali. Una prima parte studierà la resistenza a compressione centrata dei pilastri nord a sezione rettangolare, solo in funzionamento a rottura. La seconda parte studierà il comportamento più

specifico di controventatura di essi pilastri. Infatti nel senso est-ovest, fin'adesso, nessun elemento della struttura garantisce di sicuro la controventatura dell'edificio. Quindi, in legame con la struttura della facciata a moduli pieni e vuoti, pensiamo sovradimensionare a rottura i pilastri con una sezione molto più importante di quella necessaria per la sola compressione centrata ed anche, anche se non è stato verificato, per la pressoflessione. La verifica a flessione dovuta all'azione del vento risulta alla fine quella più vincolante e quella più importante.

Iniziamo prima con l'introduzione dei vari dati progettuali.

| Nome | Simbolo | Valore | Unità |
|---|----------------|--------|-------------------|
| Densità del calcestruzzo | | 25,00 | kN/m ³ |
| Altezza della trave | h | 0,50 | m |
| Larghezza della trave | b | 0,25 | m |
| Superficie della trave | st | 0,13 | m ² |
| Profondità telaio | l | 6,00 | m |
| Altezza 2° -> Copertura | h _c | 4,50 | m |
| Altezza 1° -> 2° | h ₂ | 4,50 | m |
| Altezza Fondazioni -> 1° | h ₁ | 5,50 | m |
| limite dello snervamento a compressione | ξ_{inf} | 0,40 | |

Tab. IX-108 Dati geometrici relativi al telaio

| Nome | Simbolo | Valore | Unità |
|------------------------|----------------|--------|----------------|
| Pilastri P'2 a P'7 | | | |
| Spessore del pilastro | b | 0,25 | m |
| Larghezza del pilastro | a | 0,80 | m |
| Area del pilastro | A _c | 0,20 | m ² |
| Spessore copriferro | c | 0,02 | m |

Tab. IX-109 Dati geometrici relativi ai pilastri

| Nome | Simbolo | Valore | Unità |
|---|----------------|--------|-------|
| Coefficiente di omogeneizzazione | m | 15,00 | |
| Rapporto resistente di calcolo | r _s | 23,21 | |
| Coefficiente di sicurezza che amplifica i carichi | Y _f | 1,40 | |

Tab. IX-110 Dati costruttivi relativi ai materiali

| Numero Pilastro | Area d'influenza [m ²] | Lunghezza trave [m] |
|-----------------|------------------------------------|---------------------|
| P'2 | 29,00 | 4,30 |
| P'3 | 29,00 | 4,80 |
| P'4 | 29,00 | 4,80 |
| P'5 | 29,00 | 4,80 |
| P'6 | 29,00 | 4,80 |
| P'7 | 29,00 | 4,30 |

Tab. IX-111 Dati geometrici relativi al telaio

2. VERIFICA ALLA COMPRESSIONE CENTRATA

a. Analisi dei carichi

Le aree d'influenza dei pilastri P'2 e P'7 sono uguali, anche quelle dei pilastri P'3, P'4, P'5 e P'6. Per quest'ultimi 4 pilastri, la dimensione dell'area d'influenza è quella maggiore quindi le sollecitazioni agenti sono massime. Volendo semplificare

la messa in opera del cantiere, ipotizziamo usare le stesse armature per tutti i pilastri e tutti i piani. Quindi indicheremo le verifiche a rottura per il pilastro P'4 soltanto, che massimizza i sforzi agenti.

Adesso indichiamo i dati relativi alle armature dei pilastri cerchiati, ed anche le varie verifiche relative, ricordando che il dimensionamento delle armature è stato effettuato dopo il calcolo degli sforzi agenti.

| Nome | Simbolo | Valore | Unità |
|------------------------------------|----------------|--------|-------------------|
| Numero Pilastro | | | |
| | P'4 | | |
| Area d'Influenza | | 29,00 | m ² |
| Lunghezza della trave | | 4,80 | m |
| Copertura | | | |
| <i>Trave</i> | | | |
| Carico dovuto alla trave | | 15,00 | kN |
| <i>Pilastro</i> | | | |
| Altezza | | 4,50 | m |
| Carico dovuto al pilastro | | 22,50 | kN |
| Carichi | | | |
| Carichi permanenti strutturali | G ₁ | 6,03 | kN/m ² |
| Carichi permanenti non strutturali | G ₂ | 1,14 | kN/m ² |
| Carichi variabili | Q _v | 1,06 | kN/m ² |
| Pannelli solari | P _s | 0,15 | kN/m ² |
| Carichi totali permanenti | | 245,43 | kN |
| Carichi totali variabili | | 30,74 | kN |
| Carichi totali Copertura | F _k | 276,17 | kN |
| Piano 2 | | | |
| <i>Trave</i> | | | |
| Carico dovuto alla trave | | 15,00 | kN |
| <i>Pilastro</i> | | | |
| Altezza | | 4,50 | m |
| Carico dovuto al pilastro | | 22,50 | kN |
| Carichi | | | |
| Carichi permanenti strutturale | G ₁ | 6,03 | kN/m ² |
| Carichi permanenti non strutturali | G ₂ | 0,65 | kN/m ² |
| Carichi variabili | Q _v | 5,00 | kN/m ² |
| Carichi perimetrali | Q _p | 4,71 | kN/m |
| Carichi totali permanenti | | 253,78 | kN |
| Carichi totali variabili | | 145,00 | kN |
| Carichi totali Piano 2 | F _k | 398,78 | kN |
| Piano 1 | | | |
| <i>Trave</i> | | | |
| Carico dovuto alla trave | | 15,00 | kN |
| <i>Pilastro</i> | | | |
| Altezza | | 5,50 | m |
| Carico dovuto al pilastro | | 27,50 | kN |
| Carichi | | | |
| Carichi permanenti strutturale | G ₁ | 6,03 | kN/m ² |
| Carichi permanenti non strutturali | G ₂ | 0,68 | kN/m ² |
| Carichi variabili | Q _v | 5,00 | kN/m ² |
| Carichi perimetrali | Q _p | 4,71 | kN/m |
| Carichi totali permanenti | | 259,61 | kN |
| Carichi totali variabili | | 145,00 | kN |
| Carichi totali Piano 1 | F _k | 404,61 | kN |

Tab. IX-112 Carichi per piano applicati al pilastro

Dopo di che dobbiamo procedere alle diverse verifiche. Come già indicato precedentemente, il comportamento finale a rottura per compressione centrata dei nostri pilastri risulterà ottimo perché calcolati anche per la loro resistenza a flessione, ciò che ci ha fatto molto aumentare la loro larghezza. Quindi in questa parte verrà soprattutto analizzato il rispetto dei diversi criteri costruttivi oltre alla sola resistenza a compressione.

b. Verifica della resistenza a rottura per compressione centrata

Nella seguente tabella viene calcolato per ciascun piano in corrispondenza con la parte bassa del pilastro (quindi prendendo in conto il peso proprio delle varie sezioni del pilastro) i carichi verticali agenti caratteristici. Di là si ottengono i carichi verticali di calcolo con:

$$N_{ad} = \gamma_f * N_k.$$

Dopo si ottiene per un predimensionamento il valore A_{C0} dell'area di calcestruzzo minimo necessaria con:

$$A_{C0} = N_{ad}/f_{c1}$$

La colonna A_c indica l'area effettiva.

| Sezione | F_k [kN] | N_k [kN] | N_{ad} [kN] | A_{C0} [cm ²] | A_c [cm ²] |
|-----------|------------|------------|---------------|-----------------------------|--------------------------|
| Copertura | 276,17 | 276,17 | 386,64 | 229,35 | 2000,00 |
| Piano 2 | 398,78 | 674,95 | 944,94 | 560,52 | 2000,00 |
| Piano 1 | 404,61 | 1079,57 | 1511,39 | 896,53 | 2000,00 |

Tab. IX-113 Verifica della resistenza a rottura per compressione centrata Verifica della resistenza a rottura per compressione centrata

Nello stesso modo calcoliamo per un predimensionamento veloce il valore A_{S0} dell'area d'acciaio longitudinale necessario con:

$$A_{S0} = 0,15 * N_{ad}/f_{sd}$$

| Sezione | A_{S0} [cm ²] | numero di ferri ai spigoli | diametro dei ferri ai spigoli ϕ [mm] | numero di ferri secondo b | diametro dei ferri secondo b ϕ [mm] | numero di ferri secondo a | diametro dei ferri secondo a ϕ [mm] | area dei ferri longitudinali |
|-----------|-----------------------------|----------------------------|---|---------------------------|--|---------------------------|--|------------------------------|
| Copertura | 1,48 | 4,00 | 16,00 | 0,00 | 16,00 | 6,00 | 12,00 | 14,83 |
| Piano 2 | 3,62 | 4,00 | 20,00 | 4,00 | 16,00 | 6,00 | 12,00 | 27,39 |
| Piano 1 | 5,79 | 4,00 | 25,00 | 4,00 | 16,00 | 8,00 | 12,00 | 36,73 |

Tab. IX-114 Caratteristiche delle armature longitudinali

L'area ideale raggugiata è data da :

$$A_{ie} = m * A_s + A_c$$

e la tensione nel calcestruzzo si ricava da :

$$-\sigma_c = N_{ad}/A_{ie}$$

che deve essere inferiore alla tensione massima ammissibile a compressione dal calcestruzzo.

L'area ideale raggiunta è data da :

$$A_{ir} = r_s * A_s + A_c$$

e la tensione di resistenza si ricava da :

$$N_{rd} = A_{ir} * f_{c1}$$

Il criterio finale che deve essere rispettato è dato da :

$$\gamma_R = \frac{N_{rd}}{N_{ad}} \geq 1.$$

| Sezione | area ideale raggiunta A_{re} [cm ²] | tensione nel cls σ_c [N/mm ²] | area ideale raggiunta A_{ir} [cm ²] | Tensione di resistenza N_{rd} [kN] | Y_R |
|-----------|---|--|---|--------------------------------------|-------|
| Copertura | 2222,42 | 0,17 | 2344,18 | 3951,91 | 10,22 |
| Piano 2 | 2410,92 | 0,39 | 2635,87 | 4443,63 | 4,70 |
| Piano 1 | 2550,88 | 0,59 | 2852,44 | 4808,74 | 3,18 |

Tab. IX-115 Verifica allo stato limite ultimo della resistenza a compressione centrata

c. Verifica del buon rispetto dei criteri costruttivi

| Sezione | $A_s \geq 0,15 N_{as} / f_{sd}$ | ρ_s | $\rho_s \geq 0,003$ | $\rho_s \leq 0,04$ | $\phi \geq 12$ mm |
|-----------|---------------------------------|----------|---------------------|--------------------|-------------------|
| Copertura | verificato | 0,00741 | verificato | verificato | verificato |
| Piano 2 | verificato | 0,01370 | verificato | verificato | verificato |
| Piano 1 | verificato | 0,01836 | verificato | verificato | verificato |

Tab. IX-116 Verifica del buon rispetto dei criteri costruttivi - 1

| Sezione | interasse ferri longitudinali secondo a [cm] | $i \leq 30$ cm | interasse ferri longitudinali secondo a [cm] | $i \leq 30$ cm | ϕ' diametro staffe [mm] | s passo staffe tratto corrente [cm] | s' passo staffe estremi pilastro [cm] |
|-----------|--|----------------|--|----------------|------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| Copertura | 19,00 | verificato | 21,00 | verificato | 6 | 18 | 9 |
| Piano 2 | 19,00 | verificato | 7,00 | verificato | 6 | 18 | 9 |
| Piano 1 | 15,20 | verificato | 7,00 | verificato | 8 | 18 | 9 |

Tab. IX-117 Verifica del buon rispetto dei criteri costruttivi - 2

| Sezione | $\phi' \geq \phi / 4$ | $s \leq 30$ cm | $s \leq 12 \phi$ | $s' \leq 0,6 s$ |
|-----------|-----------------------|----------------|------------------|-----------------|
| Copertura | verificato | verificato | verificato | verificato |
| Piano 2 | verificato | verificato | verificato | verificato |
| Piano 1 | verificato | verificato | verificato | verificato |

Tab. IX-118 Verifica del buon rispetto dei criteri costruttivi - 3

3. VERIFICA A FLESSIONE DOVUTA ALL'AZIONE DEL VENTO

a. Premessa

Procediamo adesso alla verifica a flessione del pilastro sottoposto ad uno sforzo orizzontale di vento. In questa parte presentiamo i risultati per i pilastri P'2, ..., P'7. I pilastri P'2 e P'7 sono uguali, come lo sono i pilastri P'3, P'4, P'5 e P'6.

Quindi bastano le verifiche per i pilastri P'2 e P'3.

Presenteremo comunque la sola verifica per il pilastro P'3. Sempre per i stessi criteri di semplicità di messa in opera, abbiamo scelto di usare le stesse armature per i 6 pilastri. L'unica differenza tra i due pilastri risulta nell'influenza dei carichi orizzontali. Infatti, nel caso dei pilastri P'2 e P'7, le aree d'influenza non sono simmetriche attorno al pilastro, così diminuendo il momento flettente al piede del pilastro ma aumentando il taglio in sommità del pilastro, ma rimanando

sempre nei limiti per le verifiche a rottura di resistenza al taglio.

Quindi consideriamo i risultati simili, anche se il foglio di calcolo è stato impostato prevedendo questo caso.

Alla fine, per la valutazione dello sforzo orizzontale, dobbiamo considerare l'effetto del vento. Per ragioni di sicurezza, consideriamo che ciascun pilastro possa sopportare il carico orizzontale del vento massimo secondo il suo lato orientato nord-sud da 12m di lunghezza.

L'edificio essendo molto basso, 13,5m, in un ambiente cittadino molto denso, di tipo 4, il carico del vento non è uguale lungo tutta la facciata.

Comunque, il coefficiente d'omogeneità rimane costante per un edificio di meno di 15m di altezza. Abbiamo deciso di studiare due condizioni di carico, la prima con la stessa pressione del vento lungo tutta l'altezza, la seconda con la metà di tale pressione sulle 2 prime campate più basse del pilastro e il doppio per l'ultima campata.

| Nome | Simbolo | Valore | Unità |
|--|-----------|--------|-------|
| Pressione orizzontale del vento in stadio elastico | p_e | 600 | Pa |
| Carico orizzontale del vento in stadio elastico | q_e | 7,2 | kN/m |
| Pressione orizzontale del vento in stadio ultimo | p_u | 840 | Pa |
| Carico orizzontale del vento in stadio ultimo | q_u | 10,08 | kN/m |
| Lunghezza della rugosità | Z_0 | 1 | m |
| Altezza minima dove al di sotto C_e è costante | Z_{min} | 15 | m |

Tab. IX-119 Caratteristiche del carico del vento

Che ci porta alle condizioni di carico seguenti :

| Sezione del pilastro | Condizione di carico 1 [kN] | Condizione di carico 2 [kN] |
|----------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Fondazioni -> 1° | 10,08 | 5,04 |
| 1° -> 2° | 10,08 | 5,04 |
| 2° -> Copertura | 10,08 | 20,16 |

Tab. IX-120 Carico del vento

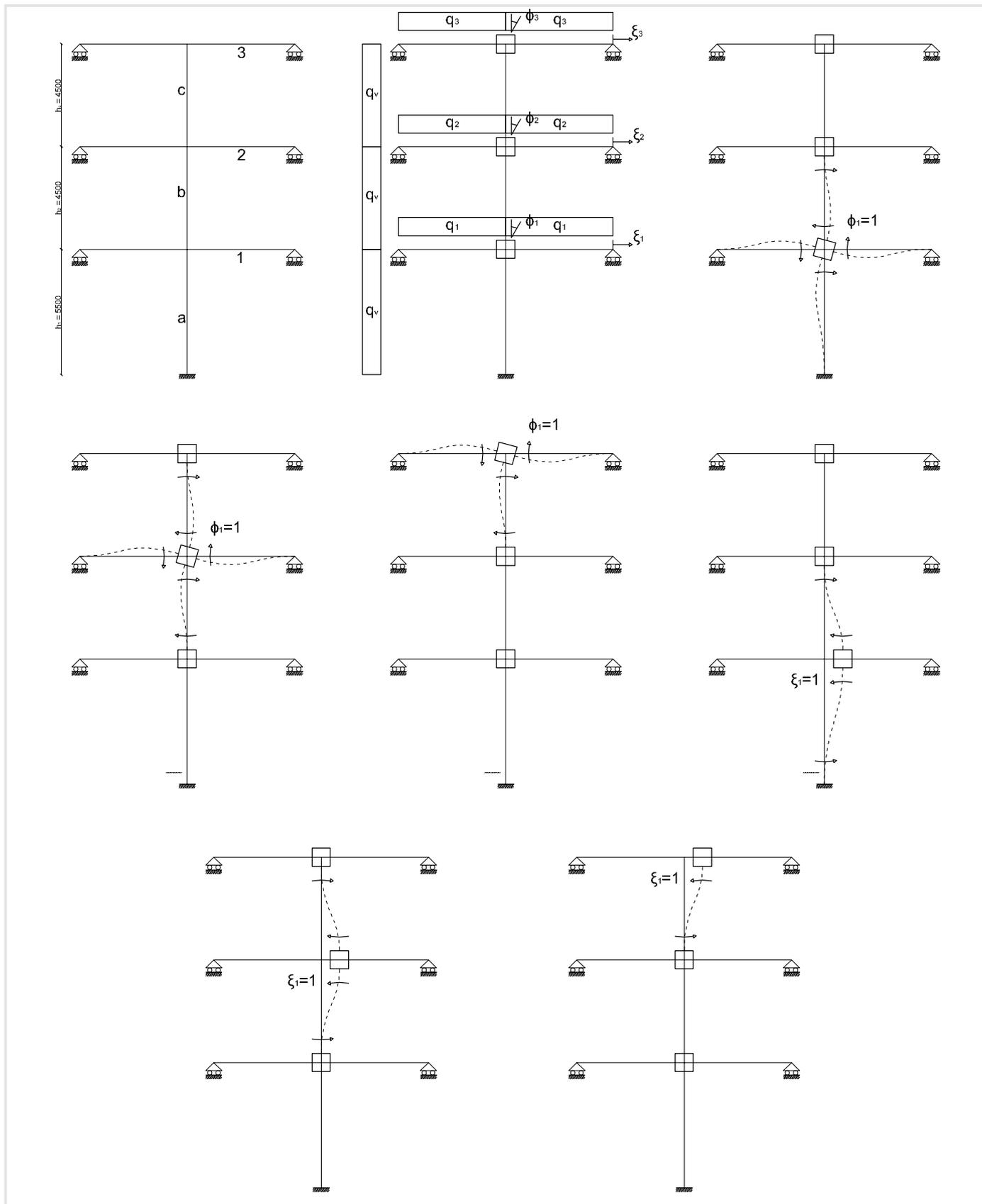


Fig. IX-36 Schema statico del telaio a nodi spostabili

b. Analisi del telaio

Abbiamo quindi i dati seguenti :

| Sezione del pilastro | Altezza Pilastro [m] | Momento d'inerzia del pilastro [cm ⁴] | Modulo elastico del pilastro [N/mm ²] | Lunghezza trave sinistra [m] | Momento d'inerzia della trave [cm ⁴] | Modulo elastico della trave [N/mm ²] |
|----------------------|----------------------|---|---|------------------------------|--|--|
| Fondazioni -> 1° | 5,50 | 1066666,67 | 33300,00 | 2,40 | 260416,67 | 36700,00 |
| 1° -> 2° | 4,50 | 1066666,67 | 33300,00 | 2,40 | 260416,67 | 36700,00 |
| 2° -> Copertura | 4,50 | 1066666,67 | 33300,00 | 2,40 | 260416,67 | 36700,00 |

Tab. IX-121 Caratteristiche delle sezioni del pilastro e delle travi che compongono il telaio - 1

| Sezione del pilastro | Lunghezza trave destra [m] | Momento d'inerzia della trave [cm ⁴] | Modulo elastico della trave [N/mm ²] | Carichi totali permanenti strutturali [kN/m] | Carichi totali permanenti non strutturali [kN/m] | Carichi totali variabili [kN/m] | Carichi totali [kN/m] |
|----------------------|----------------------------|--|--|--|--|---------------------------------|-----------------------|
| Fondazioni -> 1° | 2,40 | 260416,67 | 36700,00 | 39,31 | 4,07 | 58,24 | 101,61 |
| 1° -> 2° | 2,40 | 260416,67 | 36700,00 | 39,31 | 3,89 | 58,24 | 101,44 |
| 2° -> Copertura | 2,40 | 260416,67 | 36700,00 | 39,31 | 6,84 | 7,26 | 53,41 |

Tab. IX-122 Caratteristiche delle sezioni del pilastro e delle travi che compongono il telaio - 2

Risolviamo il nostro telaio con il metodo degli spostamenti.

Abbiamo il sistema seguente :

$$\begin{vmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{1a} & m_{1b} & m_{1c} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{2a} & m_{2b} & m_{2c} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{3a} & m_{3b} & m_{3c} \\ r_{a1} & r_{a2} & r_{a3} & r_{aa} & r_{ab} & r_{ac} \\ r_{b1} & r_{b2} & r_{b3} & r_{ba} & r_{bb} & r_{bc} \\ r_{c1} & r_{c2} & r_{c3} & r_{ca} & r_{cb} & r_{cc} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \\ \xi_a \\ \xi_b \\ \xi_c \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} m_{10} \\ m_{20} \\ m_{30} \\ r_{a0} \\ r_{b0} \\ r_{c0} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}$$

con :

$$m_{01} = + \frac{q_1 l_{1s}^2}{12} - \frac{q_1 l_{1d}^2}{12} + \frac{q_{va} h_a^2}{12} - \frac{q_{vb} h_b^2}{12}$$

$$m_{02} = + \frac{q_2 l_{2s}^2}{12} - \frac{q_2 l_{2d}^2}{12} + \frac{q_{vb} h_b^2}{12} - \frac{q_{vc} h_c^2}{12}$$

$$m_{03} = + \frac{q_3 l_{3s}^2}{12} - \frac{q_3 l_{3d}^2}{12} + \frac{q_{vc} h_c^2}{12}$$

$$r_{a0} = - \frac{q_{va} h_a}{2} - \frac{q_{vb} h_b}{2}$$

$$r_{b0} = - \frac{q_{vb} h_b}{2} - \frac{q_{vc} h_c}{2}$$

$$r_{c0} = - \frac{q_{vc} h_c}{2}$$

$$r_{aa} = + \frac{12 E_p I_p}{h_a^3} + \frac{12 E_p I_p}{h_b^3}$$

$$r_{ab} = - \frac{12 E_p I_p}{h_b^3} = r_{ba}$$

$$r_{ac} = +0 = r_{ca}$$

$$r_{a1} = + \frac{6 E_p I_p}{h_b^2} - \frac{6 E_p I_p}{h_a^2} = m_{1a}$$

$$r_{a2} = + \frac{6 E_p I_p}{h_b^2} = m_{2a}$$

$$r_{a3} = +0 = m_{3a}$$

$$m_{11} = + \frac{4 E_p I_p}{h_a} + \frac{4 E_p I_p}{h_b} + \frac{6E_t I_t}{l_{1s}} + \frac{6E_t I_t}{l_{1d}}$$

$$m_{12} = + \frac{2 E_p I_p}{h_b} = m_{21}$$

$$m_{13} = +0 = m_{31}$$

$$m_{1a} = + \frac{6 E_p I_p}{h_b^2} - \frac{6 E_p I_p}{h_a^2} = r_{a1}$$

$$m_{1b} = - \frac{6 E_p I_p}{h_b^2} = r_{b1}$$

$$m_{1c} = +0 = r_{c1}$$

$$m_{21} = + \frac{2 E_p I_p}{h_b} = m_{12}$$

$$m_{22} = + \frac{4 E_p I_p}{h_b} + \frac{4 E_p I_p}{h_c} + \frac{6E_t I_t}{l_{2s}} + \frac{6E_t I_t}{l_{2d}}$$

$$m_{23} = + \frac{2 E_p I_p}{h_c} = m_{32}$$

$$m_{2a} = + \frac{6 E_p I_p}{h_b^2} = r_{a2}$$

$$m_{2b} = \frac{6 E_p I_p}{h_c^2} - \frac{6 E_p I_p}{h_b^2} = r_{b2}$$

$$m_{2c} = - \frac{6 E_p I_p}{h_c^2} = r_{c2}$$

$$m_{31} = +0 = m_{13}$$

$$m_{32} = + \frac{2 E_p I_p}{h_c} = m_{23}$$

$$m_{33} = + \frac{4 E_p I_p}{h_c} + \frac{6E_t I_t}{l_{3s}} + \frac{6E_t I_t}{l_{3d}}$$

$$m_{3a} = +0 = r_{a3}$$

$$m_{3b} = \frac{6 E_p I_p}{h_c^2} = r_{b3}$$

$$m_{3c} = - \frac{6 E_p I_p}{h_c^2} = r_{c3}$$

$$r_{ba} = - \frac{12 E_p I_p}{h_b^3} = r_{ab}$$

$$r_{bb} = + \frac{12 E_p I_p}{h_b^3} + \frac{12 E_p I_p}{h_c^3}$$

$$r_{bc} = - \frac{12 E_p I_p}{h_c^3} = r_{cb}$$

$$r_{b1} = - \frac{6 E_p I_p}{h_b^2} = m_{1b}$$

$$r_{b2} = \frac{6 E_p I_p}{h_c^2} - \frac{6 E_p I_p}{h_b^2} = m_{2b}$$

$$r_{b3} = \frac{6 E_p I_p}{h_c^2} = m_{3b}$$

$$r_{ca} = +0 = r_{ac}$$

$$r_{cb} = - \frac{12 E_p I_p}{h_c^3} = r_{bc}$$

$$r_{cc} = + \frac{12 E_p I_p}{h_c^3}$$

$$r_{c1} = +0 = m_{1c}$$

$$r_{c2} = - \frac{6 E_p I_p}{h_c^2} = m_{2c}$$

$$r_{c3} = - \frac{6 E_p I_p}{h_c^2} = m_{3c}$$

di la abbiamo:

$$M = \begin{vmatrix} 1,05193E+11 & 15786666667 & 0 & 3479155188 & -10524444444 & 0 \\ 15786666667 & 1,10933E+11 & 15786666667 & 10524444444 & 0 & -10524444444 \\ 0 & 15786666667 & 79359791667 & 0 & 10524444444 & -10524444444 \\ 3479155188 & 10524444444 & 0 & 7239454230 & -4677530864 & 0 \\ -10524444444 & 0 & 10524444444 & -4677530864 & 9355061728 & -4677530864 \\ 0 & -10524444444 & -10524444444 & 0 & -4677530864 & 4677530864 \end{vmatrix}$$

e quindi:

$$M = \begin{vmatrix} 1,05193E+11 & 15786666667 & 0 & 3479155188 & -10524444444 & 0 \\ 15786666667 & 1,10933E+11 & 15786666667 & 10524444444 & 0 & -10524444444 \\ 0 & 15786666667 & 79359791667 & 0 & 10524444444 & -10524444444 \\ 3479155188 & 10524444444 & 0 & 7239454230 & -4677530864 & 0 \\ -10524444444 & 0 & 10524444444 & -4677530864 & 9355061728 & -4677530864 \\ 0 & -10524444444 & -10524444444 & 0 & -4677530864 & 4677530864 \end{vmatrix}$$

che ci porta a :

per le due condizioni di carico :

$$\begin{array}{|l|l|} \hline \varphi_1 & 8,12569E-09 \\ \hline \varphi_2 & 4,37251E-09 \\ \hline \varphi_3 & 1,23085E-09 \\ \hline \xi_a & 6,85765E-08 \\ \hline \xi_b & 1,11244E-07 \\ \hline \xi_c & 1,287E-07 \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|l|l|} \hline \varphi_1 & 9,35526E-09 \\ \hline \varphi_2 & 6,49621E-09 \\ \hline \varphi_3 & 2,02071E-09 \\ \hline \xi_a & 7,18595E-08 \\ \hline \xi_b & 1,27405E-07 \\ \hline \xi_c & 1,55296E-07 \\ \hline \end{array}$$

c. Determinazione dei momenti agenti e dei tagli agenti massimi a rottura

I valori dei momenti e dei tagli agenti massimi si ottengono tramite le seguenti formule :

$$M_{a0} = + \frac{2E_p I_p}{h_a} \varphi_1 - \frac{6E_p I_p}{h_a^2} \xi_a - \frac{q_{va} h_a^2}{12}$$

$$M'_a = + \frac{M_{a0} + M_{a1}}{2} + \frac{q_{va} h_a^2}{8}$$

$$M_{a1} = - \frac{4E_p I_p}{h_a} \varphi_1 + \frac{6E_p I_p}{h_a^2} \xi_a - \frac{q_{va} h_a^2}{12}$$

$$M_{b1} = + \frac{4E_p I_p}{h_b} \varphi_1 + \frac{2E_p I_p}{h_b} \varphi_2 + \frac{6E_p I_p}{h_b^2} \xi_a - \frac{6E_p I_p}{h_b^2} \xi_b - \frac{q_{vb} h_b^2}{12}$$

$$M'_b = + \frac{M_{b1} + M_{b2}}{2} + \frac{q_{vb} h_b^2}{8}$$

$$M_{b2} = - \frac{2E_p I_p}{h_b} \varphi_1 - \frac{4E_p I_p}{h_b} \varphi_2 - \frac{6E_p I_p}{h_b^2} \xi_a + \frac{6E_p I_p}{h_b^2} \xi_b - \frac{q_{vb} h_b^2}{12}$$

$$M_{c2} = + \frac{4E_p I_p}{h_c} \varphi_2 + \frac{2E_p I_p}{h_c} \varphi_3 + \frac{6E_p I_p}{h_c^2} \xi_b - \frac{6E_p I_p}{h_c^2} \xi_c - \frac{q_{vc} h_c^2}{12}$$

$$M'_c = + \frac{M_{c2} + M_{c3}}{2} + \frac{q_{vc} h_c^2}{8}$$

$$M_{c3} = - \frac{2E_p I_p}{h_c} \varphi_2 - \frac{4E_p I_p}{h_c} \varphi_3 - \frac{6E_p I_p}{h_c^2} \xi_b + \frac{6E_p I_p}{h_c^2} \xi_c - \frac{q_{vc} h_c^2}{12}$$

$$V_{a0} = + \frac{M_{a1} - M_{a0}}{h_a} + \frac{q_{va} h_a}{2}$$

$$V_{a1} = + \frac{M_{a1} - M_{a0}}{h_a} - \frac{q_{va} h_a}{2}$$

$$V_{b1} = + \frac{M_{b2} - M_{b1}}{h_b} + \frac{q_{vb} h_b}{2}$$

$$V_{b2} = + \frac{M_{b2} - M_{b1}}{h_b} - \frac{q_{vb} h_b}{2}$$

$$V_{c2} = + \frac{M_{c3} - M_{c2}}{h_c} + \frac{q_{vc} h_c}{2}$$

$$V_{c3} = + \frac{M_{c3} - M_{c2}}{h_c} - \frac{q_{vc} h_c}{2}$$

Che portano ai seguenti risultati :

| Sezione di calcolo | Momento agente a rottura massimo - condizione 1 [kNm] | Momento agente a rottura massimo - condizione 2 [kNm] |
|--------------------|---|---|
| M _{a0} | -403,60 | -410,84 |
| M' _a | -39,77 | -47,71 |
| M _{a1} | 247,82 | 239,19 |
| M _{b1} | -140,47 | -203,67 |
| M' _b | 38,13 | 31,07 |
| M _{b2} | 165,71 | 214,78 |
| M _{c2} | -43,24 | -73,54 |
| M' _c | 33,30 | 43,83 |
| M _{c3} | 58,82 | 110,17 |

Tab. IX-123 Momento agente allo stato limite ultimo secondo le condizioni di carico

| Sezione di calcolo | Taglio agente a rottura massimo - condizione 1 [kN] | Taglio agente a rottura massimo - condizione 2 [kN] |
|--------------------|---|---|
| V _{a0} | 146,16 | 145,91 |
| V _{a1} | 90,72 | 90,47 |
| V _{b1} | 90,72 | 115,67 |
| V _{b2} | 45,36 | 70,31 |
| V _{c2} | 45,36 | 63,50 |
| V _{c3} | 0,00 | 18,14 |

Tab. IX-124 Taglio agente allo stato limite ultimo secondo le condizioni di carico

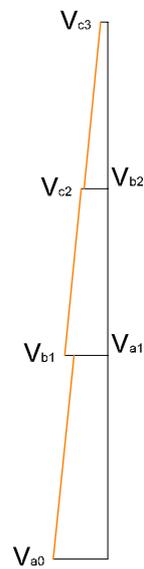
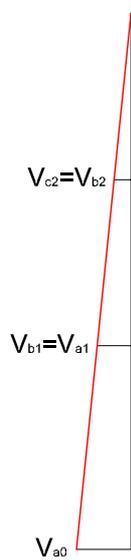
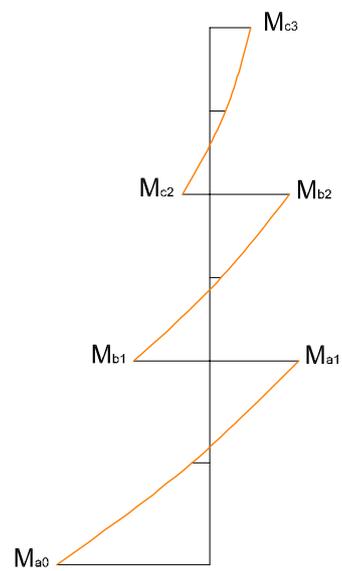
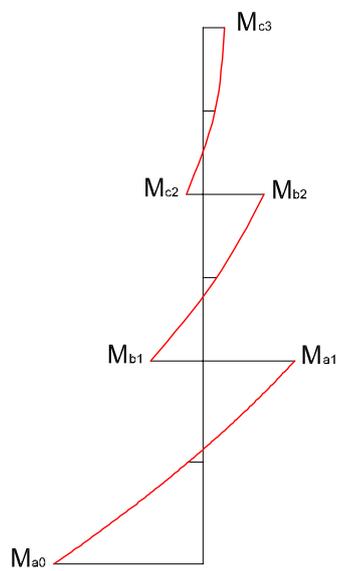
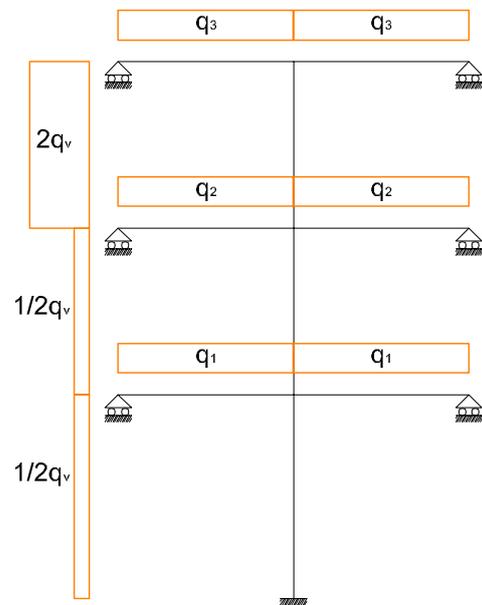
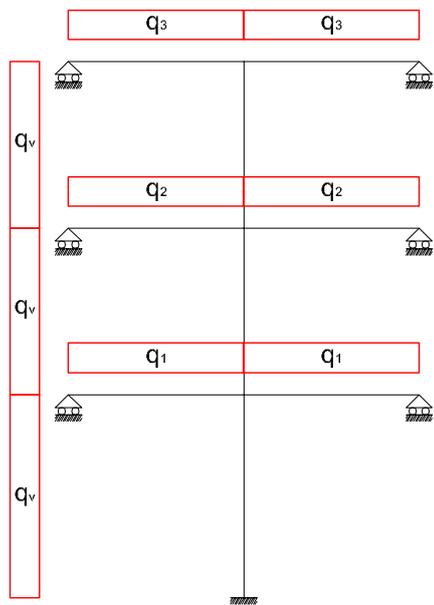


Fig. IX-37 Schema statico del telaio a nodi spostabili

d. Determinazione del braccio interno equivalente dei ferri tesi e compressi all'interno di ciascuna sezione del pilastro

Per condurre le seguenti verifiche di resistenza del pilastro ad un corico orizzontale, provendiamo adesso ad una semplificazione del problema. Cioè semplifichiamo lo schema delle armature del pilastro in un modo baricentrico e proporzionale.

così per la campata a (dalle fondazioni fino al primo piano), abbiamo :

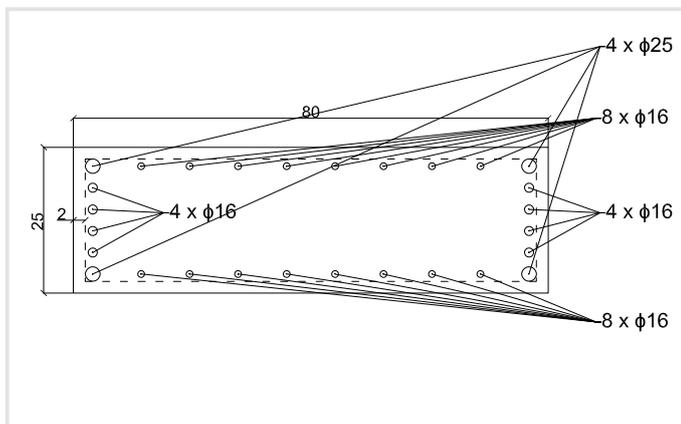


Fig. IX-38 Sezione del pilastro originaria

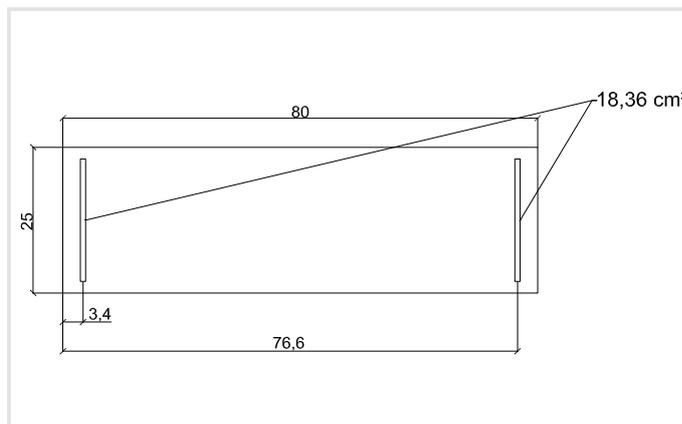


Fig. IX-39 Sezione del pilastro fittizia

| Nome | Simbolo | Valore | Unità |
|--------------------------------------|-----------|--------|-----------------|
| braccio dei ferri esterni a sinistra | d'_1 | 2,00 | cm |
| area dei ferri esterni a sinistra | A'_{s1} | 13,84 | cm ² |
| braccio dei ferri interni a sinistra | d'_2 | 7,70 | cm |
| area dei ferri interni a sinistra | A'_{s2} | 4,52 | cm ² |
| braccio dei ferri esterni a destra | d_1 | 78,00 | cm |
| area dei ferri esterni a destra | A_{s1} | 13,84 | cm ² |
| braccio dei ferri interni a destra | d_2 | 72,30 | cm |
| area dei ferri interni a destra | A_{s2} | 4,52 | cm ² |
| braccio dei ferri a sinistra | d' | 3,40 | cm |
| area totale d'acciaio a sinistra | A'_s | 18,36 | cm ² |
| braccio dei ferri a destra | d | 76,60 | cm |
| area totale d'acciaio a destra | A_s | 18,36 | cm ² |

Tab. IX-125 Caratteristiche delle armature longitudinali della sezione fittizia a del pilastro

Così per la campata b (dal primo piano fino al secondo piano), abbiamo :

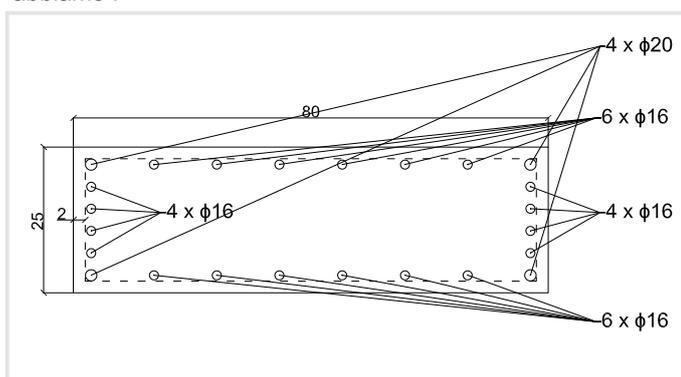


Fig. IX-40 Sezione del pilastro originaria

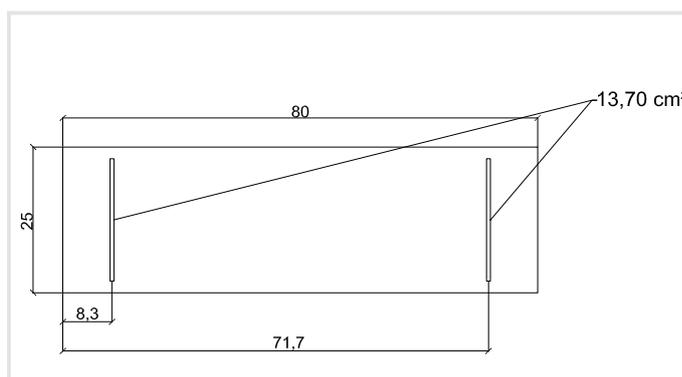


Fig. IX-41 Sezione del pilastro fittizia

| Nome | Simbolo | Valore | Unità |
|--------------------------------------|-----------|--------|-----------------|
| braccio dei ferri esterni a sinistra | d'_1 | 2,00 | cm |
| area dei ferri esterni a sinistra | A'_{s1} | 10,30 | cm ² |
| braccio dei ferri interni a sinistra | d'_2 | 27,33 | cm |
| area dei ferri interni a sinistra | A'_{s2} | 3,39 | cm ² |
| braccio dei ferri esterni a destra | d_1 | 78,00 | cm |
| area dei ferri esterni a destra | A_{s1} | 10,30 | cm ² |
| braccio dei ferri interni a destra | d_2 | 52,67 | cm |
| area dei ferri interni a destra | A_{s2} | 3,39 | cm ² |
| braccio dei ferri a sinistra | d' | 8,28 | cm |
| area totale d'acciaio a sinistra | A'_s | 13,70 | cm ² |
| braccio dei ferri a destra | d | 71,72 | cm |
| area totale d'acciaio a destra | A_s | 13,70 | cm ² |

Tab. IX-126 Caratteristiche delle armature longitudinali della sezione fittizia b del pilastro

Così per la campata c (dal secondo piano fino alla copertura), abbiamo :

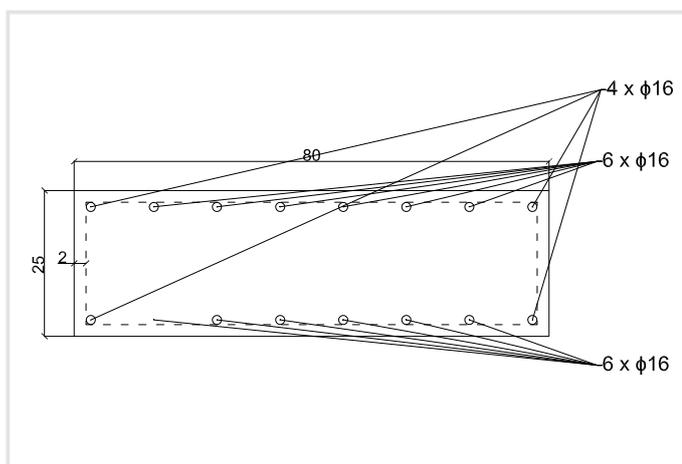


Fig. IX-42 Sezione del pilastro originaria

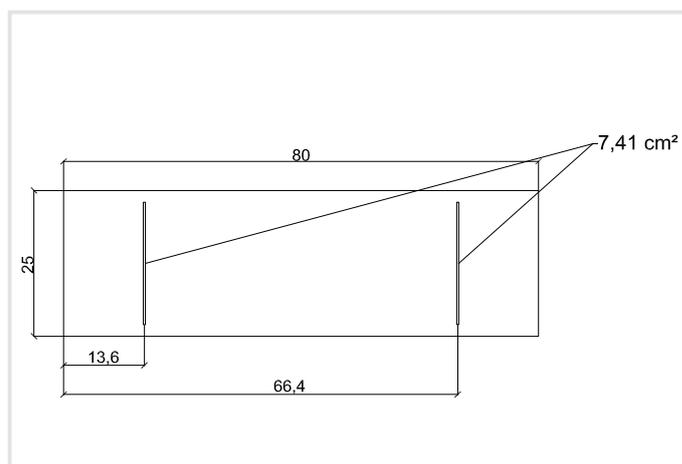


Fig. IX-43 Sezione del pilastro fittizia

| Nome | Simbolo | Valore | Unità |
|--------------------------------------|-----------|--------|-----------------|
| braccio dei ferri esterni a sinistra | d'_1 | 2,00 | cm |
| area dei ferri esterni a sinistra | A'_{s1} | 4,02 | cm ² |
| braccio dei ferri interni a sinistra | d'_2 | 27,33 | cm |
| area dei ferri interni a sinistra | A'_{s2} | 3,39 | cm ² |
| braccio dei ferri esterni a destra | d_1 | 78,00 | cm |
| area dei ferri esterni a destra | A_{s1} | 4,02 | cm ² |
| braccio dei ferri interni a destra | d_2 | 52,67 | cm |
| area dei ferri interni a destra | A_{s2} | 3,39 | cm ² |
| braccio dei ferri a sinistra | d' | 13,59 | cm |
| area totale d'acciaio a sinistra | A'_s | 7,41 | cm ² |
| braccio dei ferri a destra | d | 66,41 | cm |
| area totale d'acciaio a destra | A_s | 7,41 | cm ² |

Tab. IX-127 Caratteristiche delle armature longitudinali della sezione fittizia c del pilastro

e. Verifiche di resistenza

Come effettuato per la trave S1 studio nella quinta parte, procediamo alle verifiche di resistenza al momento flettente e al taglio. Prima di tutto indichiamo alcuni dati tecnologici per il calcolo a resistenza.

| Nome | Simbolo | Valore |
|---|-----------------|-------------|
| modello a stress block del cls | β_0 | 0,8 |
| Rapporto tra f_{sd} e f_{c1} | r | 23,21133057 |
| Rapporto tra f_{sd} e f_{c2} | r | 39,45926197 |
| limite tra il campo delle deboli armature e delle medie longitudinali | ω_{sa} | 0,191171994 |
| limite tra il campo delle medie armature e le forti longitudinali | ω_{sc} | 0,497543804 |
| limite tra il campo delle deboli armature e delle medie trasversali | ω_{wa} | 0,20 |
| limite tra il campo delle medie armature e le forti trasversali | ω_{wc} | 0,50 |
| Inclinazione massima dei conci | λ_{max} | 2,00 |

Tab. IX-128 Caratteristiche dei materiali impiegati per i pilastri nord

f. Resistenza al momento flettente

Per il calcolo del rapporto meccanico di armatura e del braccio della copia interna, dobbiamo stare attenti alla posizione delle fibre tesi e delle fibre compresse nel pilastro.

Così,

$$\omega_s = \frac{A'_s f_{sd}}{b a f_{c1}} \text{ se } M_{ad} \leq 0; \frac{A_s f_{sd}}{b a f_{c1}} \text{ se no}$$

E così dopo :

$$z = 0,96 d \text{ se } \omega_s < \omega_{sa}$$

$$z = \left(1 - \frac{\omega_s}{2}\right) d \text{ se } \omega_{sa} \leq \omega_s \leq \omega_{sc}$$

il campo delle forti armature non ci interessa qui.

Finalmente si ottiene il momento resistente.

Così abbiamo per le due condizioni di carico :

| Numero della sezione | M_{ad} [kNm] | d' [cm] | A'_s [cm ²] | d [cm] | A_s [cm ²] | ω_s | z [cm] | M_{rd} [kNm] | Verifica $M_{ad} < M_{rd}$ |
|----------------------|----------------|-----------|---------------------------|----------|--------------------------|------------|----------|----------------|----------------------------|
| a_0 | -403,60 | 3,40 | 18,36 | 76,60 | 18,36 | 0,21 | 68,43 | 491,72 | verificato |
| a' | -39,77 | 3,40 | 18,36 | 76,60 | 18,36 | 0,21 | 68,43 | 491,72 | verificato |
| a_1 | 247,82 | 3,40 | 18,36 | 76,60 | 18,36 | 0,21 | 68,43 | 491,72 | verificato |
| b_1 | -140,47 | 8,28 | 13,70 | 71,72 | 13,70 | 0,16 | 68,86 | 369,06 | verificato |
| b' | 38,13 | 8,28 | 13,70 | 71,72 | 13,70 | 0,16 | 68,86 | 369,06 | verificato |
| b_2 | 165,71 | 8,28 | 13,70 | 71,72 | 13,70 | 0,16 | 68,86 | 369,06 | verificato |
| c_2 | -43,24 | 13,59 | 7,41 | 66,41 | 7,41 | 0,09 | 63,75 | 184,95 | verificato |
| c' | 33,30 | 13,59 | 7,41 | 66,41 | 7,41 | 0,09 | 63,75 | 184,95 | verificato |
| c_2 | 58,82 | 13,59 | 7,41 | 66,41 | 7,41 | 0,09 | 63,75 | 184,95 | verificato |

Tab. IX-129 Prima condizione di carico

| Numero della sezione | M_{ad} [kNm] | d' [cm] | A'_s [cm ²] | d [cm] | A_s [cm ²] | ω_s | z [cm] | M_{rd} [kNm] | Verifica $M_{ad} < M_{rd}$ |
|----------------------|----------------|-----------|---------------------------|----------|--------------------------|------------|----------|----------------|----------------------------|
| a_0 | -410,84 | 3,40 | 18,36 | 76,60 | 18,36 | 0,21 | 68,43 | 491,72 | verificato |
| a' | -47,71 | 3,40 | 18,36 | 76,60 | 18,36 | 0,21 | 68,43 | 491,72 | verificato |
| a_1 | 239,19 | 3,40 | 18,36 | 76,60 | 18,36 | 0,21 | 68,43 | 491,72 | verificato |
| b_1 | -203,67 | 8,28 | 13,70 | 71,72 | 13,70 | 0,16 | 68,86 | 369,06 | verificato |
| b' | 31,07 | 8,28 | 13,70 | 71,72 | 13,70 | 0,16 | 68,86 | 369,06 | verificato |
| b_2 | 214,78 | 8,28 | 13,70 | 71,72 | 13,70 | 0,16 | 68,86 | 369,06 | verificato |
| c_2 | -73,54 | 13,59 | 7,41 | 66,41 | 7,41 | 0,09 | 63,75 | 184,95 | verificato |
| c' | 43,83 | 13,59 | 7,41 | 66,41 | 7,41 | 0,09 | 63,75 | 184,95 | verificato |
| c_2 | 110,17 | 13,59 | 7,41 | 66,41 | 7,41 | 0,09 | 63,75 | 184,95 | verificato |

Tab. IX-130 Seconda condizione di carico

Per la resistenza al momento flettente i risultati rimangono assai simili. Alla fine, la maggiore differenza si trova per la resistenza al taglio della parte in sommità della sezione del pilastro tra il secondo piano e la copertura.

g. Resistenza al taglio

Per effettuare la verifica della resistenza del pilastro al taglio, cerchiamo anche la posizione di annullamento del momento e il taglio corrispondente.

Con un momento del tipo :

$$M(x) = a x^2 + b x + c$$

Abbiamo un'espressione del taglio :

$$V(x) = 2 a x + b$$

Per una sezione di lunghezza h , abbiamo le seguenti espressioni di a , b e c :

$$a = \frac{V(h) - V(0)}{2 h}$$

$$b = V(0)$$

$$c = M(0)$$

E quindi la posizione x_0 di annullamento del momento è una delle due radici dell'equazione:

$$a x^2 + b x + c = 0$$

Nel nostro caso esiste sempre un'unica radice positiva.

Abbiamo quindi:

$$x_0 = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

E il taglio corrispondente si ricava subito da:

$$V(x_0) = 2 a x_0 + b$$

Così per la prima condizione di carico abbiamo :

| | | |
|---------------------|---------|------|
| V(0) | 146,16 | kN |
| V(h _a) | 90,72 | kN |
| M(0) | -403,60 | kNm |
| a | -5,04 | kN/m |
| b | 146,16 | kN |
| c | -403,60 | kNm |
| x _{0a} | 3,09 | m |
| V(x _{0a}) | 115,01 | kN |

Tab. IX-131 Sezione a

| | | |
|---------------------|---------|------|
| V(0) | 90,72 | kN |
| V(h _b) | 45,36 | kN |
| M(0) | -140,47 | kNm |
| a | -5,04 | kN/m |
| b | 90,72 | kN |
| c | -140,47 | kNm |
| x _{0b} | 1,71 | m |
| V(x _{0b}) | 73,47 | kN |

Tab. IX-132 Sezione b

| | | |
|---------------------|-------|------|
| V(0) | 45,36 | kN |
| V(h _c) | 0,00 | kN |
| M(0) | 33,30 | kNm |
| a | -5,04 | kN/m |
| b | 45,36 | kN |
| c | 33,30 | kNm |
| x _{0c} | 0,81 | m |
| V(x _{0c}) | 37,23 | kN |

Tab. IX-133 Sezione c

Mentre per la seconda condizione di carico abbiamo :

| | | |
|---------------------|---------|------|
| V(0) | 145,91 | kN |
| V(h _a) | 90,47 | kN |
| M(0) | -410,84 | kNm |
| a | -5,04 | kN/m |
| b | 145,91 | kN |
| c | -410,84 | kNm |
| x _{0a} | 3,16 | m |
| V(x _{0a}) | 114,05 | kN |

Tab. IX-134 Sezione a

| | | |
|---------------------|---------|------|
| V(0) | 115,67 | kN |
| V(h _b) | 70,31 | kN |
| M(0) | -203,67 | kNm |
| a | -5,04 | kN/m |
| b | 115,67 | kN |
| c | -203,67 | kNm |
| x _{0b} | 1,92 | m |
| V(x _{0b}) | 96,30 | kN |

Tab. IX-135 Sezione b

| | | |
|---------------------|-------|------|
| V(0) | 63,50 | kN |
| V(h _c) | 18,14 | kN |
| M(0) | 43,83 | kNm |
| a | -5,04 | kN/m |
| b | 63,50 | kN |
| c | 43,83 | kNm |
| x _{0c} | 0,73 | m |
| V(x _{0c}) | 56,12 | kN |

Tab. IX-136 Sezione c

Finalmente otteniamo per la prima condizione di carico:

| Posizione | Taglio agente [kN] | a_s [cm ²] | ω_w | λ_r | Taglio Resistente in estremità V_{rd} [kN] | Verifica $M_{ad} < M_{rd}$ |
|--------------------------|--------------------|--------------------------|------------|-------------|--|----------------------------|
| x_{a0} | 146,16 | 11,17 | 0,18 | 2,00 | 629,4112586 | verificato |
| x_a (mezzeria) | 118,44 | 5,59 | 0,09 | 2,00 | 314,7056293 | verificato |
| x_{0a} (momento nullo) | 115,01 | 5,59 | 0,09 | 2,00 | 314,7056293 | verificato |
| x_{a1} | 90,72 | 11,17 | 0,18 | 2,00 | 629,4112586 | verificato |
| x_{b1} | 90,72 | 6,28 | 0,10 | 2,00 | 354,043833 | verificato |
| x_{0b} (momento nullo) | 73,47 | 3,14 | 0,05 | 2,00 | 177,0219165 | verificato |
| x_b (mezzeria) | 68,04 | 3,14 | 0,05 | 2,00 | 177,0219165 | verificato |
| x_{b2} | 45,36 | 6,28 | 0,10 | 2,00 | 354,043833 | verificato |
| x_{c2} | 45,36 | 6,28 | 0,10 | 2,00 | 354,043833 | verificato |
| x_{0c} (momento nullo) | 37,23 | 3,14 | 0,05 | 2,00 | 177,0219165 | verificato |
| x_c (mezzeria) | 22,68 | 3,14 | 0,05 | 2,00 | 177,0219165 | verificato |
| x_{c3} | 0,00 | 6,28 | 0,10 | 2,00 | 354,043833 | verificato |

Tab. IX-137 Prima condizione di carico

| Posizione | Taglio agente [kN] | a_s [cm ²] | ω_w | λ_r | Taglio Resistente in estremità V_{rd} [kN] | Verifica $M_{ad} < M_{rd}$ |
|--------------------------|--------------------|--------------------------|------------|-------------|--|----------------------------|
| x_{a0} | 145,91 | 11,17 | 0,18 | 2,00 | 629,4112586 | verificato |
| x_a (mezzeria) | 118,19 | 5,59 | 0,09 | 2,00 | 314,7056293 | verificato |
| x_{0a} (momento nullo) | 114,05 | 5,59 | 0,09 | 2,00 | 314,7056293 | verificato |
| x_{a1} | 90,47 | 11,17 | 0,18 | 2,00 | 629,4112586 | verificato |
| x_{b1} | 115,67 | 6,28 | 0,10 | 2,00 | 354,043833 | verificato |
| x_{0b} (momento nullo) | 96,30 | 3,14 | 0,05 | 2,00 | 177,0219165 | verificato |
| x_b (mezzeria) | 92,99 | 3,14 | 0,05 | 2,00 | 177,0219165 | verificato |
| x_{b2} | 70,31 | 6,28 | 0,10 | 2,00 | 354,043833 | verificato |
| x_{c2} | 63,50 | 6,28 | 0,10 | 2,00 | 354,043833 | verificato |
| x_{0c} (momento nullo) | 56,12 | 3,14 | 0,05 | 2,00 | 177,0219165 | verificato |
| x_c (mezzeria) | 40,82 | 3,14 | 0,05 | 2,00 | 177,0219165 | verificato |
| x_{c3} | 18,14 | 6,28 | 0,10 | 2,00 | 354,043833 | verificato |

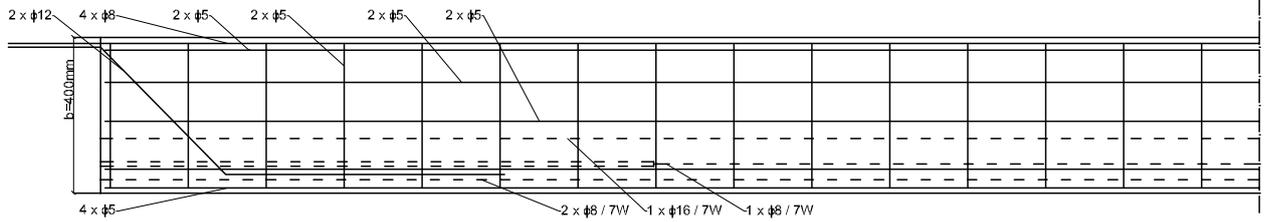
Tab. IX-138 Prima condizione di carico

H. SCHEMI ESECUTIVI

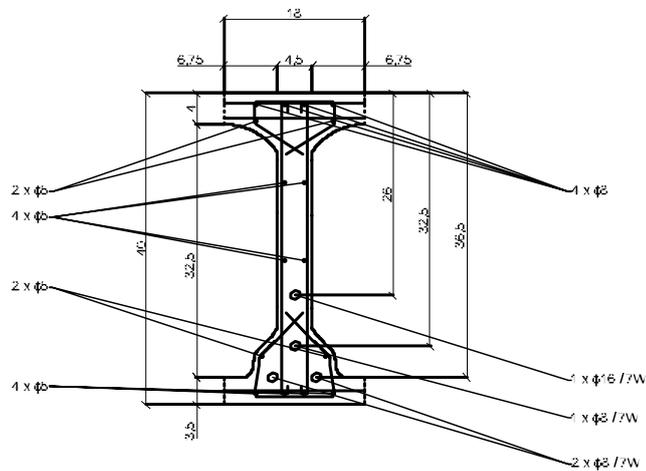
1. SOLAIO

TAVOLA IX-2

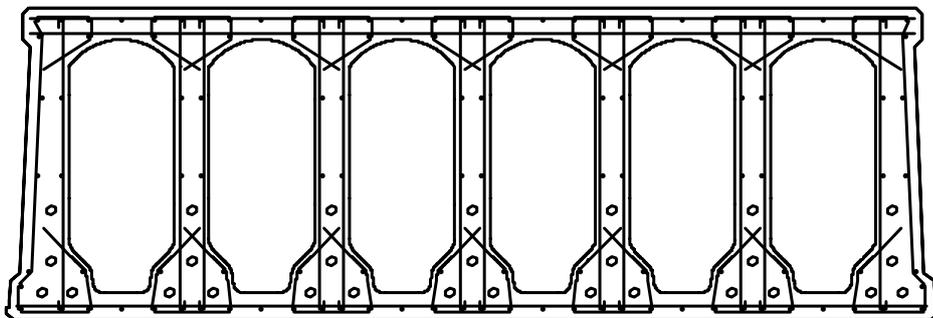
Disegno esecutivo del solaio alveolare.



SEZIONE LONGITUDINALE



SEZIONE DEL TRAVETTO



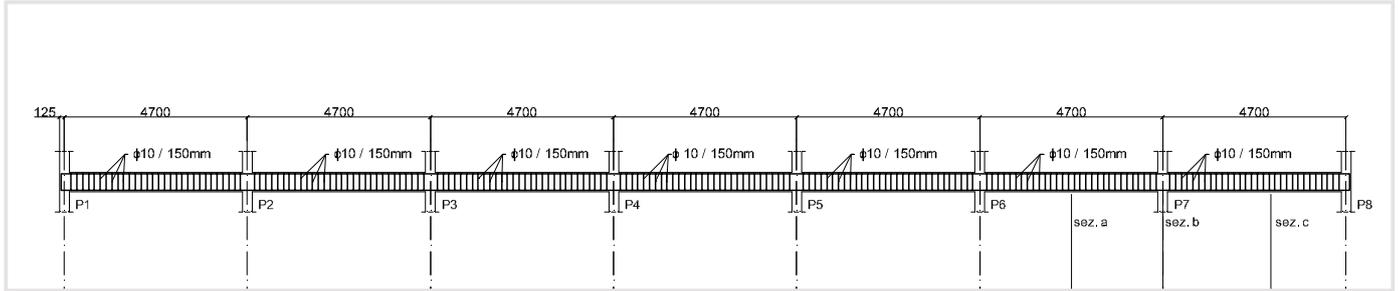
SEZIONE DELL'INTERO ELEMENTO (IPOTESI)

DISEGNO ESECUTIVO DEL SOLAIO

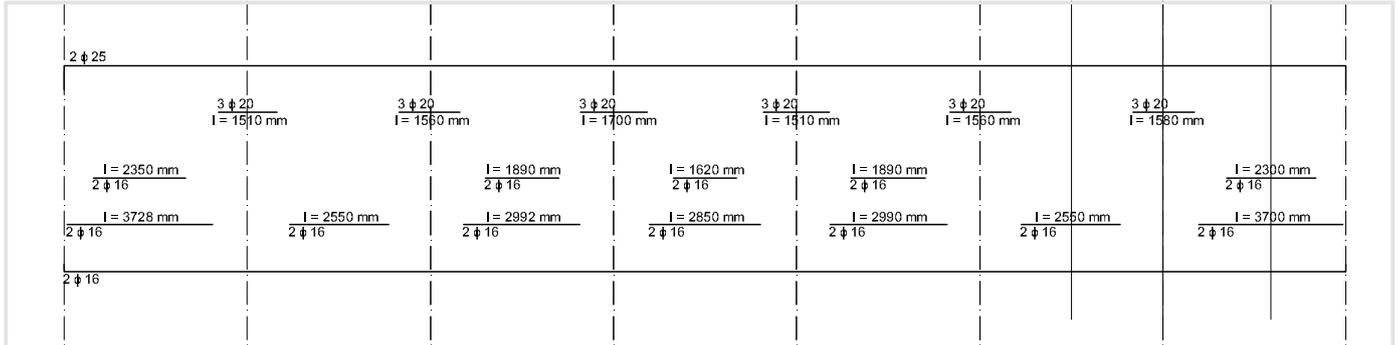
2. TRAVE

TAVOLA IX-3

Disegno esecutivo della trave longitudinale



SEZIONE LONGITUDINALE



FERRI

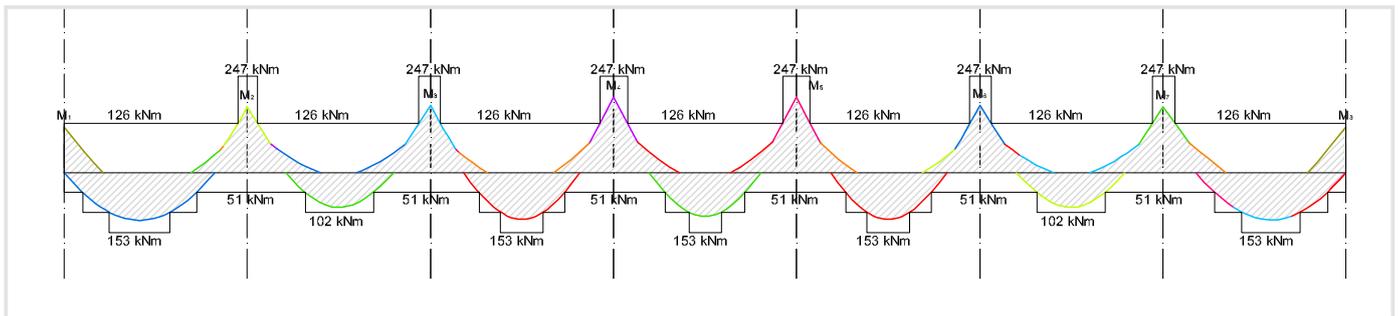
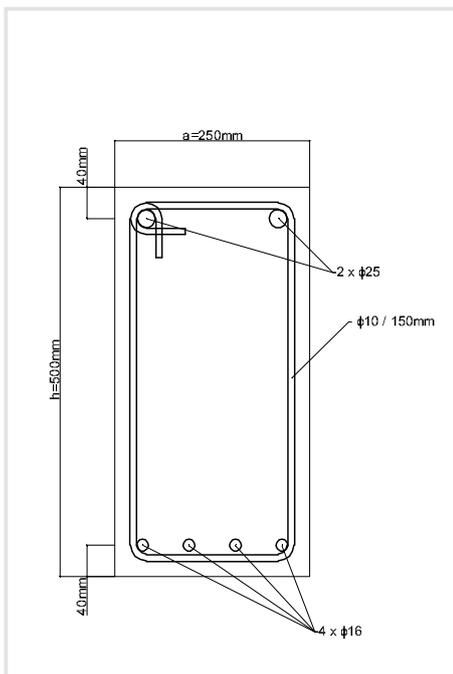
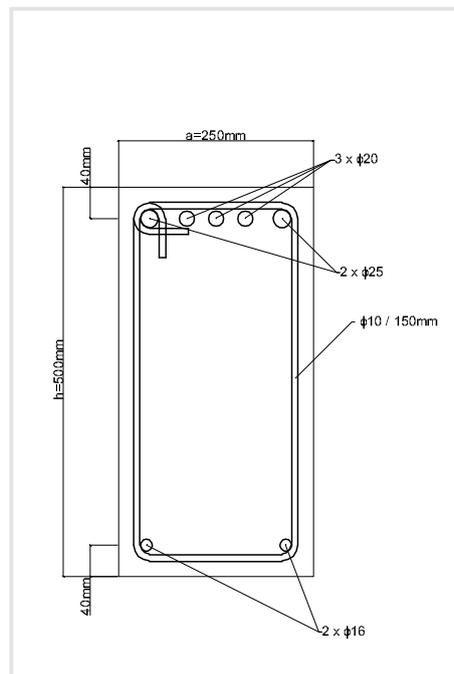


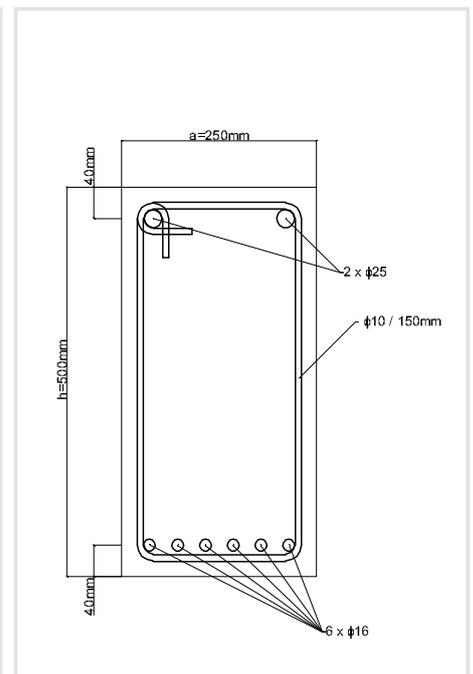
DIAGRAMMA DI RICOPRIMENTO



SEZIONE a



SEZIONE b



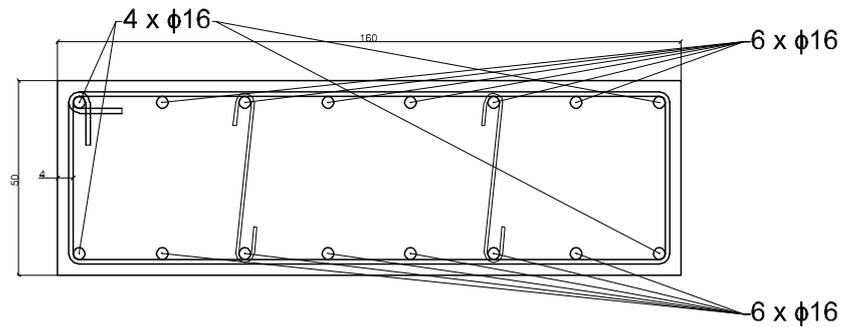
SEZIONE c

DISEGNO ESECUTIVO DELLA TRAVE

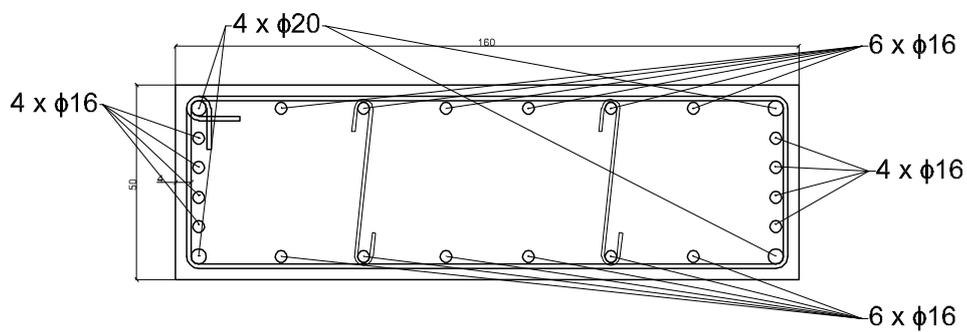
3. PILASTRI

TAVOLA IX-4

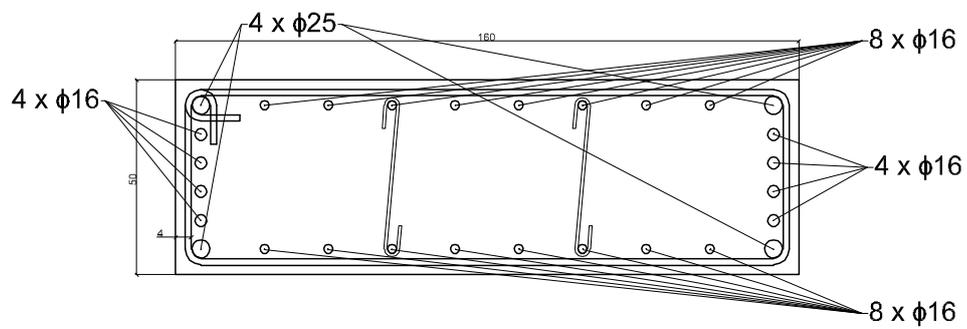
Disegno esecutivo del pilastro cerchiato a sud.e del pilastro a nord, rettangolare che serve di contraventazione.



SEZIONE TRASVERSALE DEL PILASTRO COMPRESO TRA IL SECONDO PIANO E LA COPERTURA

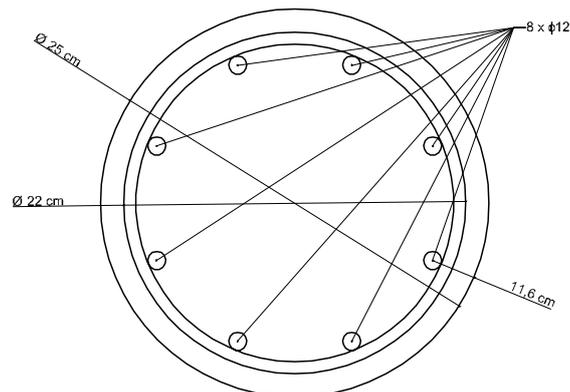


SEZIONE TRASVERSALE DEL PILASTRO COMPRESO TRA IL PRIMO E IL SECONDO PIANO



SEZIONE TRASVERSALE DEL PILASTRO COMPRESO TRA IL PLINTO DI FONDAZIONE E IL PRIMO PIANO

DISEGNO ESECUTIVO DEL PILASTRO RETTANGOLARE A NORD



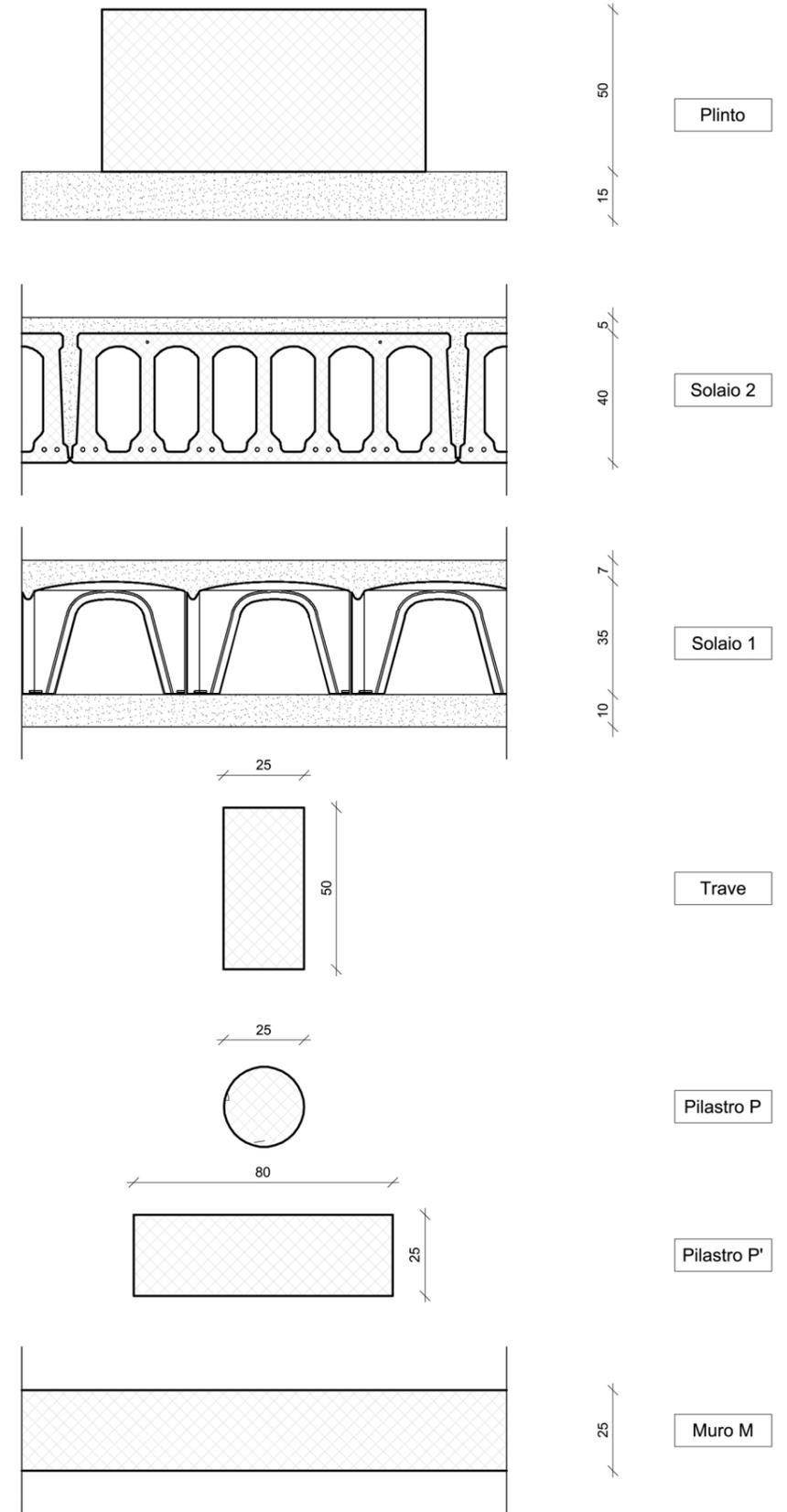
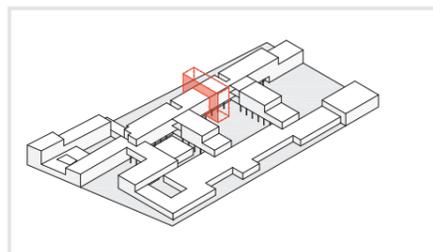
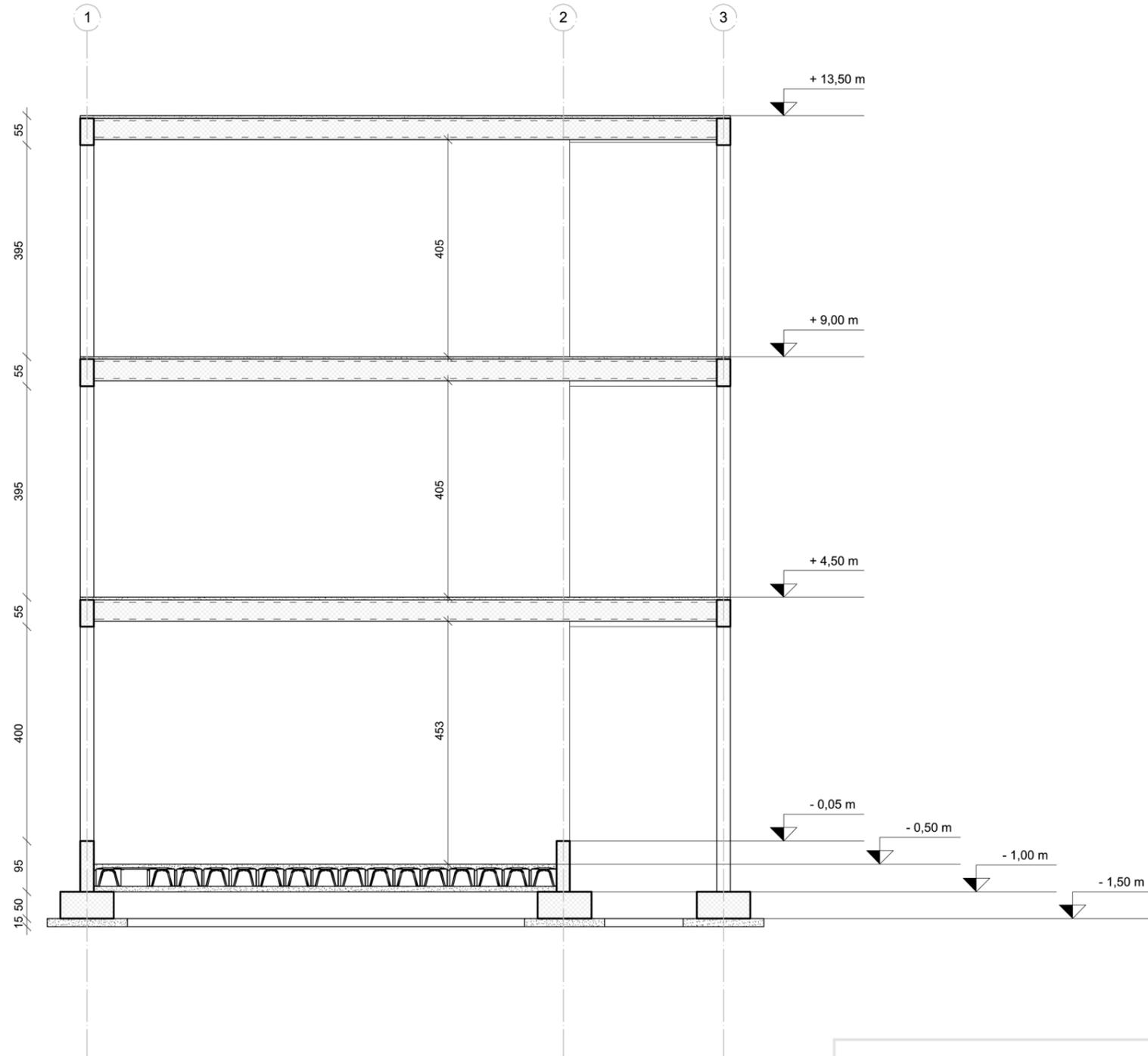
SEZIONE TRASVERSALE

DISEGNO ESECUTIVO DEL PILASTRO CERCHIATO A SUD

4. SEZIONE TRASVERSALE E ELEMENTI SPECIFICI

TAVOLA IX-5

Sezione trasversale strutturale e elementi strutturali specifici del blocco centrale.



1 m

SCALA 1:100

SEZIONE STRUTTURALE

ABACCHI STRUTTURALI

5. PIANTE STRUTTURALE
TAVOLA IX-6

Pianta strutturale delle fondazioni del blocco centrale.

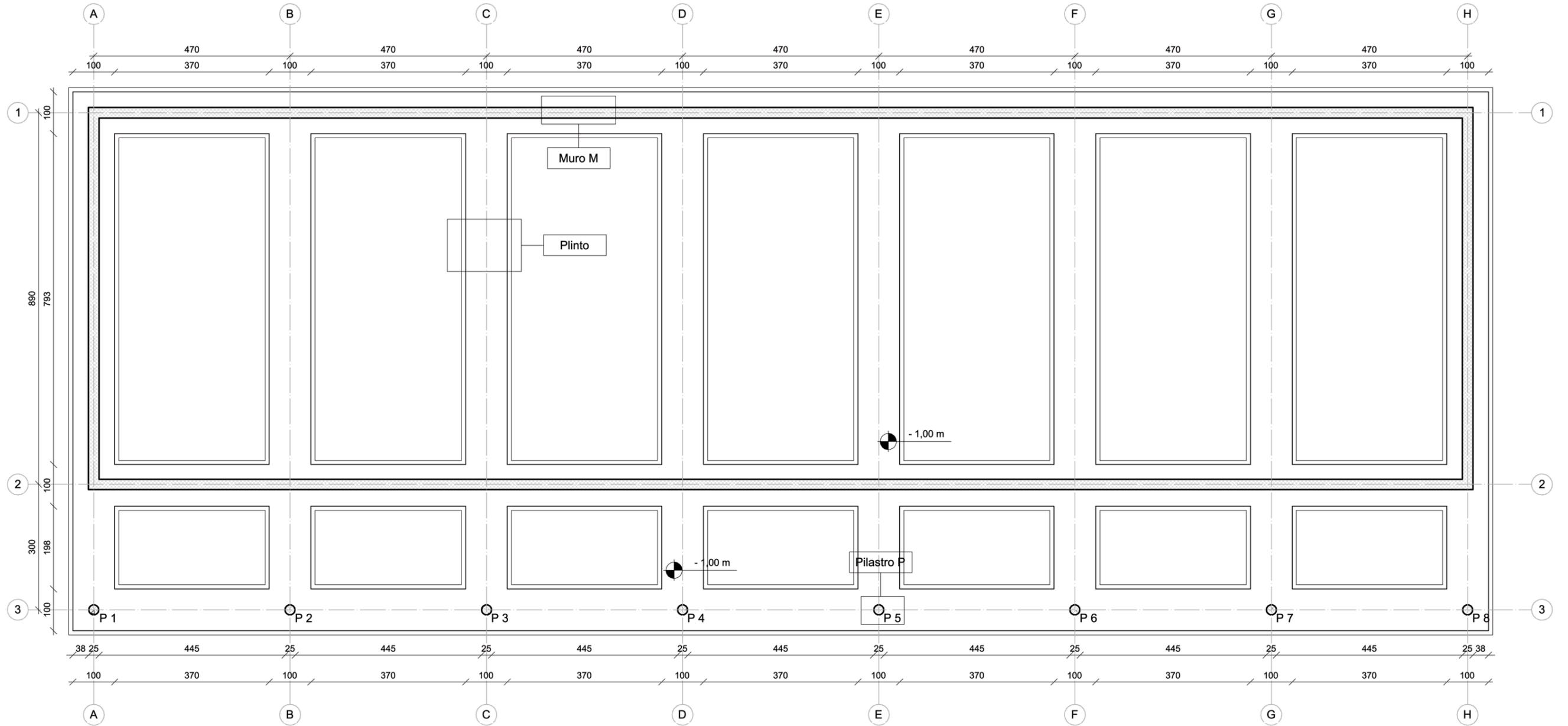


TAVOLA IX-7

Pianta strutturale del piano terra del blocco centrale.

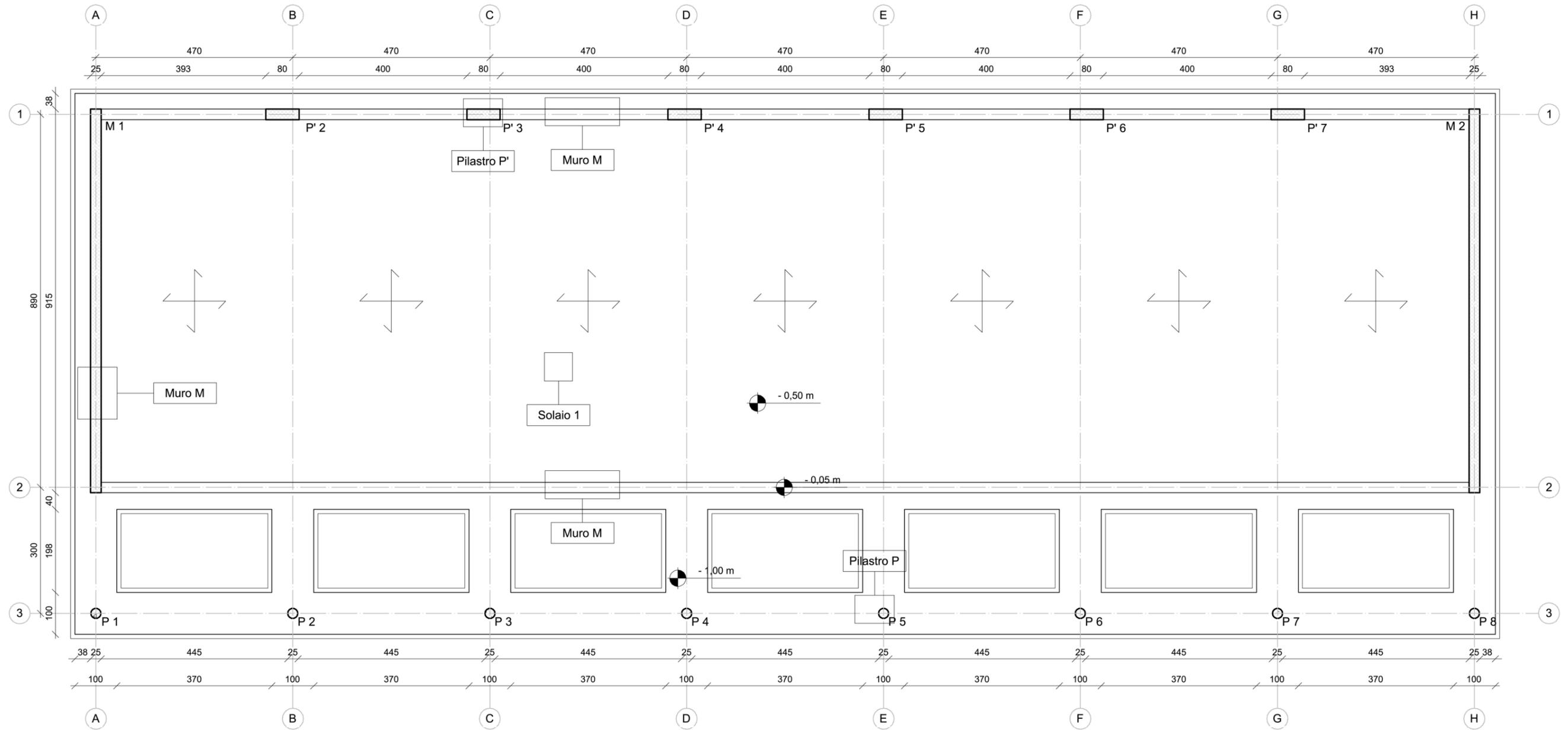


TAVOLA IX-8

Pianta strutturale del primo piano del blocco centrale.

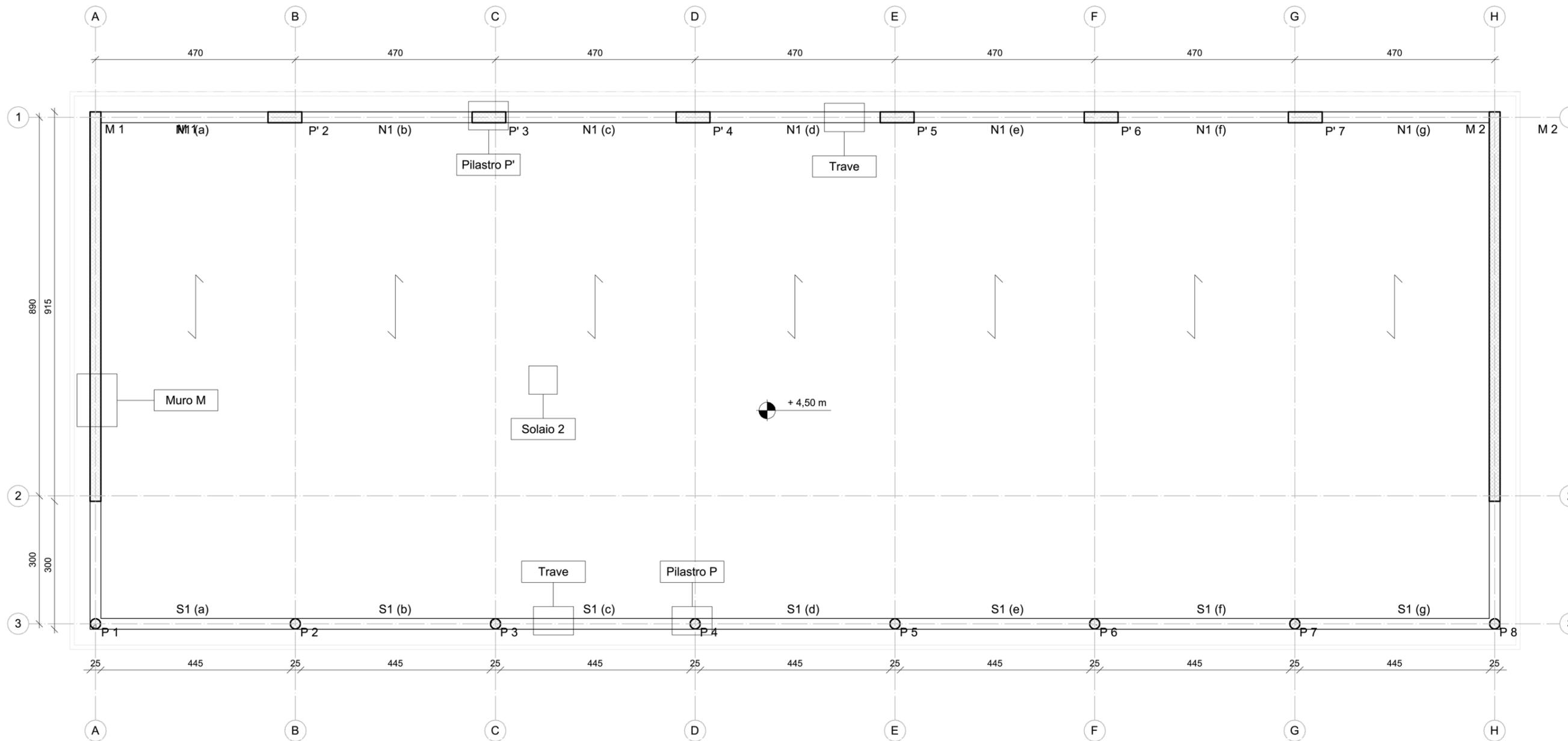


TAVOLA IX-9

Pianta strutturale del secondo piano del blocco centrale.

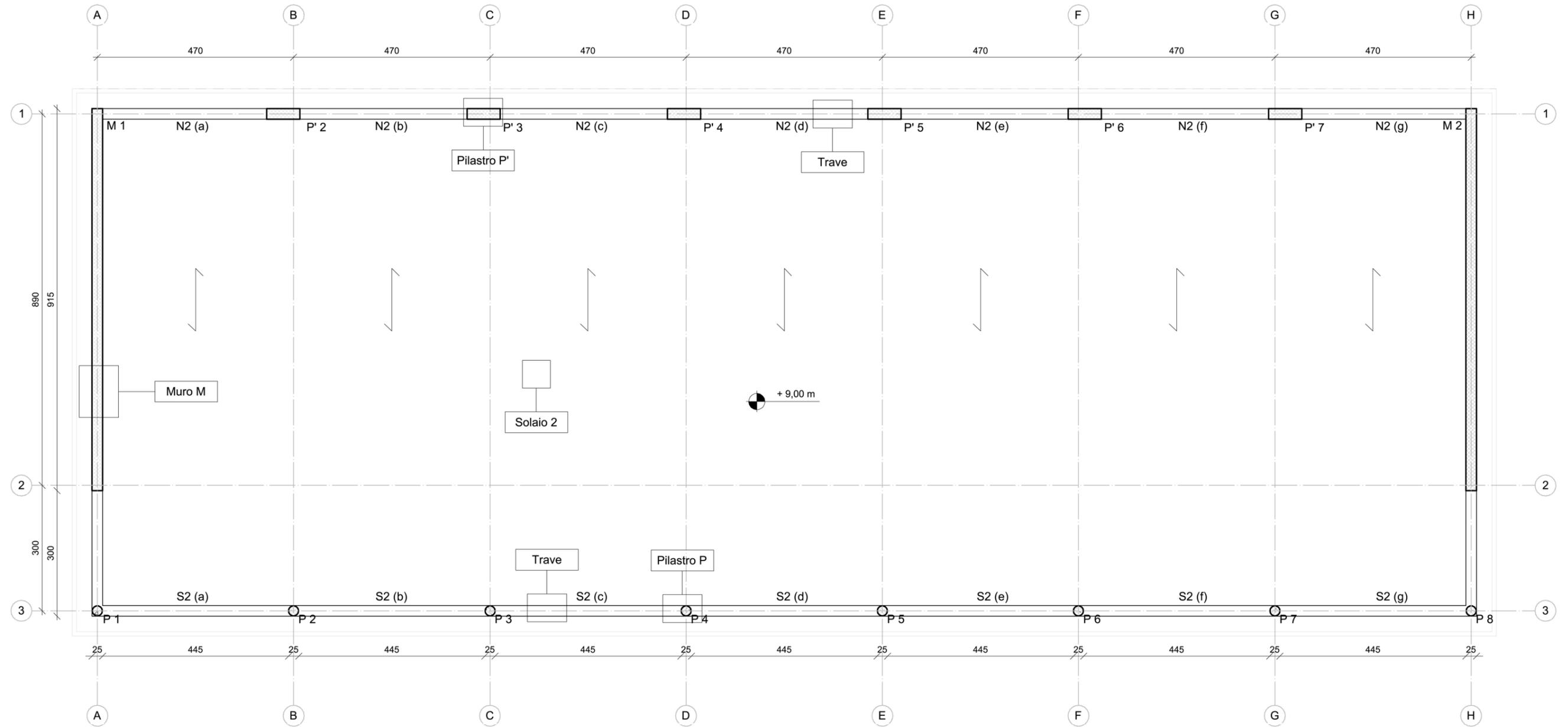
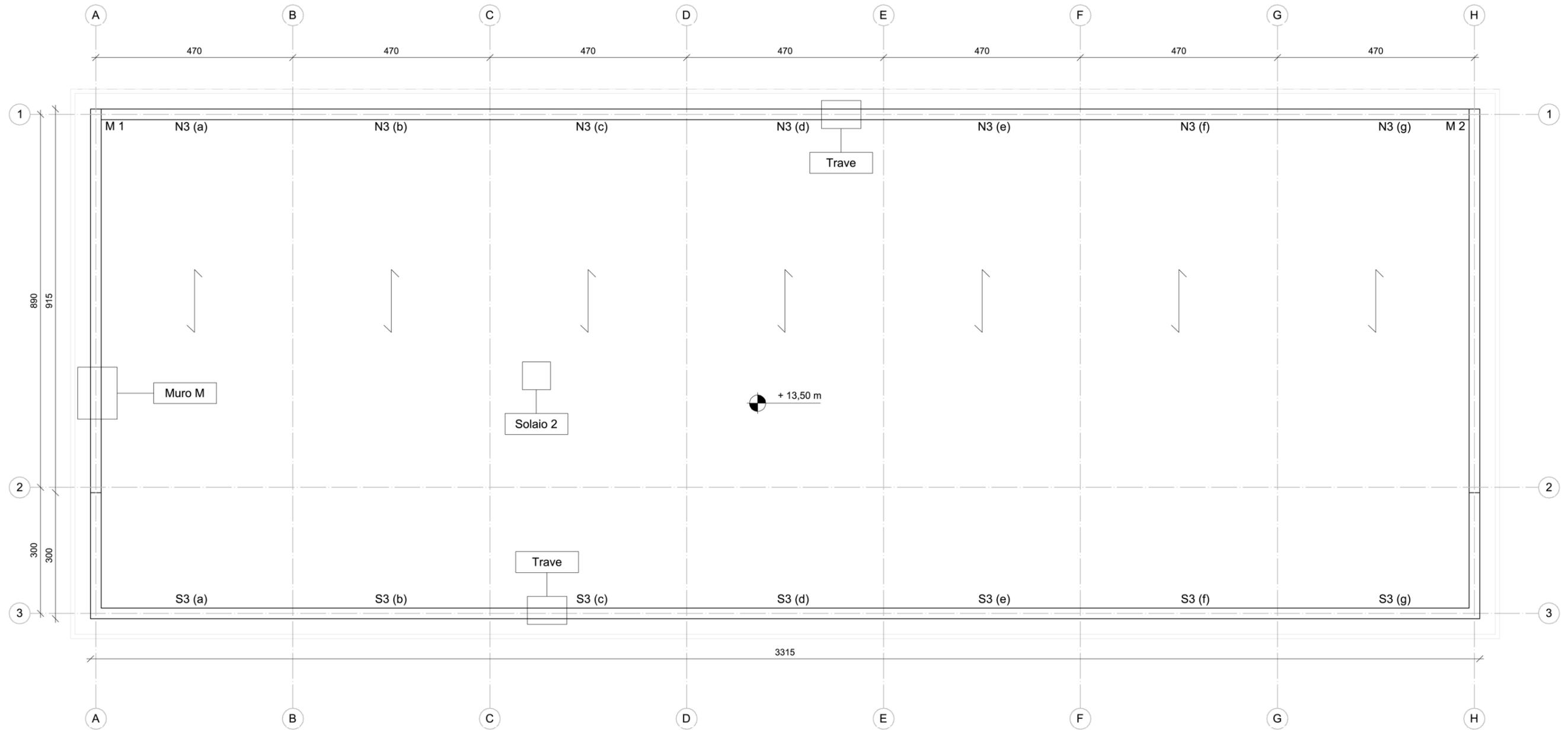


TAVOLA IX-10

Pianta strutturale della copertura del blocco centrale.



IX. PROGETTO ENERGETICO

La garanzia di un benessere ambientale di alto livello all'interno dell'edificio e la riduzione del fabbisogno energetico annuale sono state affrontate insieme attraverso la progettazione di un sistema impiantistico efficace.

| | | | |
|--|------------|---|------------|
| A. PREMESSA : GLI OBIETTIVI ENERGETICI | 453 | E. SCELTA DEL SISTEMA IMPIANTISTICO DI VENTILAZIONE E DI RISCALDAMENTO | 482 |
| B. LA STRATEGIA BIOCLIMATICA | 454 | 1. AULE SCOLASTICHE | 482 |
| 1. ANALISI DEL CLIMA LOCALE | 454 | a. Strategia | 482 |
| 2. STRATEGIA E SCELTE ARCHITETTONICHE DEL PROGETTO | 457 | b. Dimensionamento della rete di erogazione | 482 |
| a. Strategia invernale | 457 | c. Scelta delle unità di controsoffitto | 488 |
| b. Strategia estiva | 459 | d. Scelta degli scambiatori di calore | 489 |
| C. IL FABBISOGNO TERMICO | 461 | e. Dimensionamento dei canali d'aria | 489 |
| 1. IL MODELLO TERMICO | 461 | f. Scelta del sistema di umidificazione | 489 |
| a. Introduzione al bilancio termico | 461 | 2. AMMINISTRAZIONE | 491 |
| b. Principali dati dell'edificio | 461 | 3. PALESTRA | 491 |
| c. Principali dati climatici | 461 | 4. CIO | 491 |
| d. Scenario di simulazione | 461 | 5. ALLOGGI | 491 |
| 2. BENESSERE INVERNALE | 464 | 6. RIASSUNTO DELL'INTERO SISTEMA IMPIANTISTICO | 493 |
| a. Risultati per il fabbisogno invernale | 464 | F. PRODUZIONE LOCALE D'ENERGIA | 497 |
| b. Analisi del comportamento dell'edificio | 465 | 1. GEOTERMICA : POMPA DI CALORE AD ACQUA DI FALDA | 497 |
| c. Conclusione | 465 | a. Presentazione del funzionamento della pompa di calore ad acqua di falda | 497 |
| 3. BENESSERE ESTIVO E VENTILAZIONE NATURALE | 466 | b. Dimensionamento della pompa di calore | 497 |
| a. Comportamento termico estivo | 466 | 2. PANNELLI SOLARI IBRIDI | 498 |
| b. Funzionamento della ventilazione naturale | 466 | a. Presentazione dei pannelli ibridi | 498 |
| c. Studio del vento | 468 | b. Connessione dei pannelli alla rete | 499 |
| d. Modellizzazione della ventilazione | 469 | c. Uso di una pompa di calore intermedia | 499 |
| e. Conclusione | 470 | d. Dimensionamento dei pannelli solari ibridi | 500 |
| D. IL FABBISOGNO ENERGETICO | 471 | e. Collegamento alla rete di teleriscaldamento del quartiere | 502 |
| 1. FABBISOGNO MASSIMO DI DIMENSIONAMENTO DELL'EDIFICIO | 471 | f. Valutazione energetica della soluzione ibrida | 503 |
| a. Condizioni esterne estreme per il dimensionamento | 471 | g. Valutazione economica dell'uso di pannelli ibridi | 504 |
| b. Dispersioni dovute al condizionamento dell'aria | 471 | 3. PIANTA FUNZIONALE DEL SISTEMA IMPIANTISTICO | 507 |
| 2. DIMENSIONAMENTO | 471 | G. BILANCIO ENERGETICO GLOBALE | 509 |
| a. Dispersioni per trasmissione | 471 | 1. MODELIZZAZIONE DEL COMPORTAMENTO ENERGETICO DELL'EDIFICIO | 509 |
| b. Dispersioni dovute alla ventilazione | 471 | a. Sistemi di generazione e di accumulo | 509 |
| c. Fabbisogno termico massimo | 473 | b. Distribuzione dell'acqua calda sanitaria | 509 |
| d. Sintesi | 475 | c. Distribuzione del riscaldamento ambientale | 509 |
| 3. FABBISOGNO DI ACQUA CALDA SANITARIA (ACS) | 475 | 2. FABBISOGNO ENERGETICO RICHiesto | 509 |
| a. Procedura di calcolo | 475 | 3. PRODUZIONE DELL'ENERGIA RICHiesta | 512 |
| b. Tabelle di calcolo | 475 | 4. FABBISOGNO DI ENERGIA PRIMARIA | 512 |
| c. Sintesi | 478 | 5. CONSIDERAZIONI AGGIUNTIVI SUL FUNZIONAMENTO DEL SISTEMA IMPIANTISTICO | 512 |
| 4. CONSUMO ELETTRICO | 478 | | |
| a. Illuminazione | 478 | | |
| b. Consumo per la burocratica e l'uso domestico | 481 | | |
| c. Sintesi | 481 | | |
| d. Conclusione : Bbio secondo la RT2012 | 481 | | |

A. PREMESSA : GLI OBIETTIVI ENERGETICI

Affinché si raggiungano gli obiettivi energetici europei 20-20-20 per 2020 (20% di miglioramento dell'efficienza energetica, 20% di riduzione delle emissioni di CO₂, 20% di produzione di energia da fonti rinnovabili) la Francia ha appena aggiornato la sua normativa energetica edilizia. Il nuovo regolamento termico di 2012 (RT2012) impone dei nuovi ambiziosi obiettivi sui nuovi edifici e le rinnovazioni: gli edifici costruiti dopo il 1° gennaio 2013 devono essere a basso consumo (Bâtiment Basse Consommation – BBC) cioè con un fabbisogno medio di energia primaria massima di 50 kWh/m²/anno.

La norma RT2012 usa tre indicatori con dei livelli massimi, ponderati secondo la zona geografica, la funzione dell'edificio e diversi parametri che caratterizzano il progetto.

- il Bbio: il fabbisogno bioclimatico dell'edificio che caratterizza la qualità dell'edificio e il suo isolamento senza tenere conto del sistema impiantistico. Il Bbio è un valore adimensionale che tiene conto del fabbisogno annuale di riscaldamento, raffrescamento e illuminazione.
- il C_{ep}: il fabbisogno annuale di energia primaria massima in kWh/m².anno, tiene conto del riscaldamento, del raffrescamento, degli ausiliari impiantistici, dell'acqua calda sanitaria e dell'illuminazione.
- il T_{ic}: la temperatura interna massima rilevata durante cinque giornate calde in estate. Questo indicatore rappresenta il benessere estivo dell'edificio.

Secondo la RT2012, il nostro edificio deve rispettare i seguenti obiettivi:

| Indicatore | Valore massima |
|---|--|
| Fabbisogno climatico : Bbio | Bbio _{max} : 44 |
| Fabbisogno annuale di energia primaria massimo : C _{ep} | Cep _{max} : 60,5 kWh/m ² /anno |
| Temperatura interna massima rilevata durante 5 giornate calde in estate : T _{ic} | T _{ic} max : 28°C |

Tab. X-1 Obiettivi della RT2012

Il programma ambientale specifico del committente richiede uno sforzo supplementare per il fabbisogno energetico, vale a dire un Cep di 55 kWh/m².anno al massimo.

Il metodo di modellazione e di calcolo francese (Th-BCE), messo a punto dal CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment), è ancora in periodo di prova. Dal momento che tale metodo non fa riferimento ad alcuna norma internazionale o europea e non è quindi possibile svolgere dei calcoli precisi, consideriamo i requisiti da esso indicati come degli obiettivi approssimativi.

L'approccio normativo Th-BCE ci fornisce alcuni indicatori molto utili ma non sufficienti allo sviluppo del progetto. Abbiamo deciso di seguire l'approccio progettuale sviluppato dalla Negawatt, associazione francese di esperti nel settore energetico che propone un'ambiziosa strategia per sfruttare al meglio l'energia disponibile piuttosto che produrne ulteriormente.

La fondazione Negawatt, in risposta al problema del riscaldamento globale, del consumo eccessivo delle risorse e della conseguente rarefazione delle risorse energetiche fossili, sostiene un modello di società che abbandona i combustibili fossili a favore delle fonti rinnovabili. Dopo avere simulato diversi scenari, è giunta alla modellazione di uno scenario realista del 2050 in cui il fabbisogno di energia primaria diminuisce del 65% rispetto al fabbisogno del 2010 e l'emissione di CO₂ sia ridotta

fino ad 1/16 di quella attuale. Questo scenario impone l'uso prioritario dell'energia rinnovabile (91% nel 2050). Con 45% del consumo finale, gli edifici sono i primi consumatori di energia e quindi il primo settore di intervento.

L'associazione Negawatt struttura il suo approccio in tre principi:

1. la sobrietà
2. l'efficienza
3. l'uso delle energie rinnovabili

Il nostro progetto si prefigge tre obiettivi: rendere sobrio il comportamento degli alunni, rendere efficaci la concezione dell'edificio ed i sistemi impiantistici, ed infine rendere il fabbisogno energetico annuale controbilanciato con risorse rinnovabili, senza creare un edificio passivo.

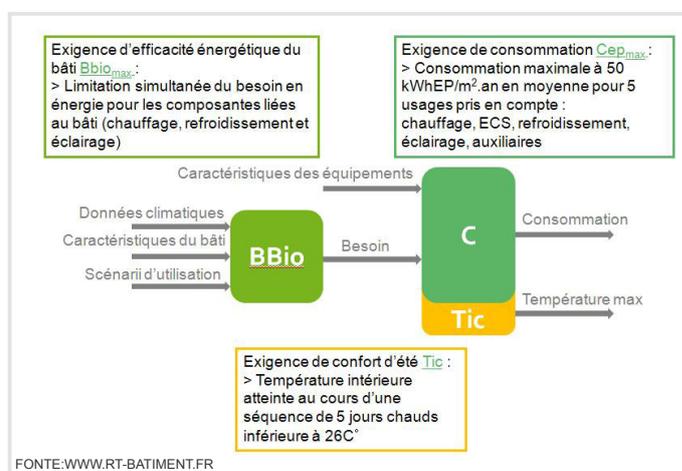


Fig. X-1 Schema di calcolo della norma RT2012

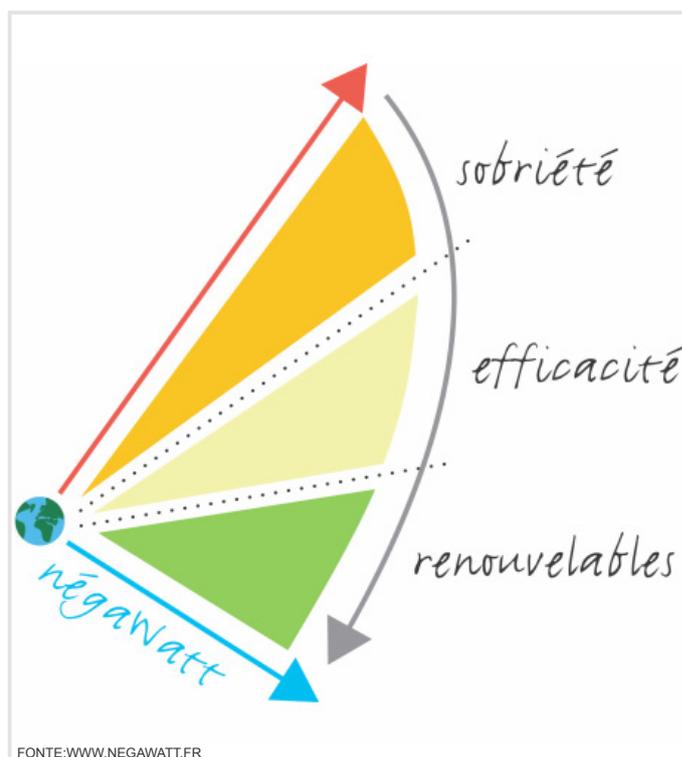


Fig. X-2 Logo dell'associazione Negawatt con i principi di base

B. LA STRATEGIA BIOCLIMATICA

1. ANALISI DEL CLIMA LOCALE

La nostra zona d'intervento si colloca nella regione di Parigi, caratterizzata da un clima temperato. I diagrammi psicrometrici, che rappresentano graficamente le coppie [temperatura ; umidità relativa] per ogni ora del periodo considerato, permettono di studiare le diverse condizioni esterne a seconda della stagione.

Il modello delle temperature effettive standard (Standard effective temperature - SET), sviluppato da Gagge nel 1986, permette di delimitare un range sul diagramma psicrometrico entro il quale il 90% delle persone si sentono a loro agio. Tale zona grafica, chiamata "zona comfort", dipende dalla temperatura esterna media e dalle condizioni di umidità massime ammissibili.

Lo studio climatico è stato condotto sulle tre stagioni dell'anno scolastico - autunno (settembre–novembre), inverno (dicembre–febbraio), primavera (marzo–maggio)- ed il mese di giugno.

Ciascuna croce blu rappresenta le condizioni di temperatura e di umidità relativa per ogni ora della stagione. La temperatura si trova sull'asse orizzontale e l'umidità assoluta (che dipende dall'umidità relativa, legata a sua volta alla temperatura) su quello verticale.

La zona delimitata dalla linea gialla rappresenta la zona comfort. Tutte le ore rappresentate a sinistra della zona comfort, caratterizzate da una temperatura troppo bassa, necessitano di un processo di riscaldamento. Le ore a destra della zona comfort risultano invece troppo calde. Tale problematica può essere risolta attraverso diverse strategie: diminuzione della temperatura dell'aria, aumento dell'umidità relativa, movimento sensibile dell'aria (ventilazione)

Lo studio dei diagrammi psicrometrici ci permette di concludere che risulta necessario sviluppare un sistema di riscaldamento efficace per ogni stagione. Il raffrescamento non sarà invece necessario a causa delle vacanze estive scolastiche.

| | Condizioni esterne medie | Zona comfort |
|-----------|--------------------------|--------------------------------|
| Autunno | 11,1°C ; 84% (6,9 g/kg) | [19 - 22,5] °C ; [4 - 12] g/kg |
| Inverno | 4,9°C ; 92 % (4,5 g/kg) | [16 - 21] °C ; [4 - 12] g/kg |
| Primavera | 10,4°C ; 73% (5,7 g/kg) | [19 - 22,5] °C ; [4 - 12] g/kg |
| Giugno | 16,8°C ; 65% (7,7 g/kg) | [21-25]°C ; [4 - 12] g/kg |

Tab. X-2 Definizione delle condizione esterne medie e delle zone comfort

Psychrometric Chart

Location: PARIS - ORLY, FRA
Data Points: 1st September to 1st December
Weekday Times: 00:00-24:00 Hrs
Weekend Times: 00:00-24:00 Hrs
Barometric Pressure: 101.36 kPa
© Weather Tool

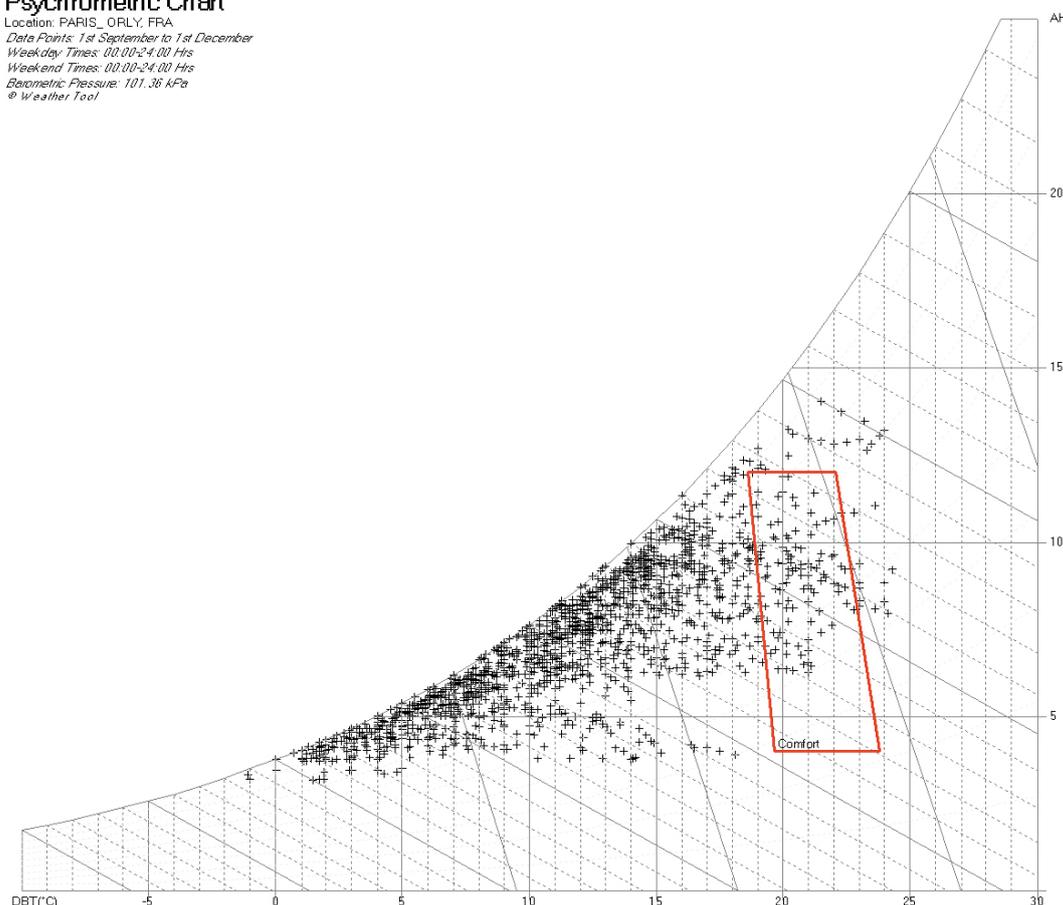


Fig. X-3 Diagramma psicrometrico : Autunno

Psychrometric Chart

Location: PARIS_ORLY, FRA
Data Points: 1st December to 1st March
Weekday Times: 00:00-24:00 Hrs
Weekend Times: 00:00-24:00 Hrs
Barometric Pressure: 101.36 kPa
© Weather Tool

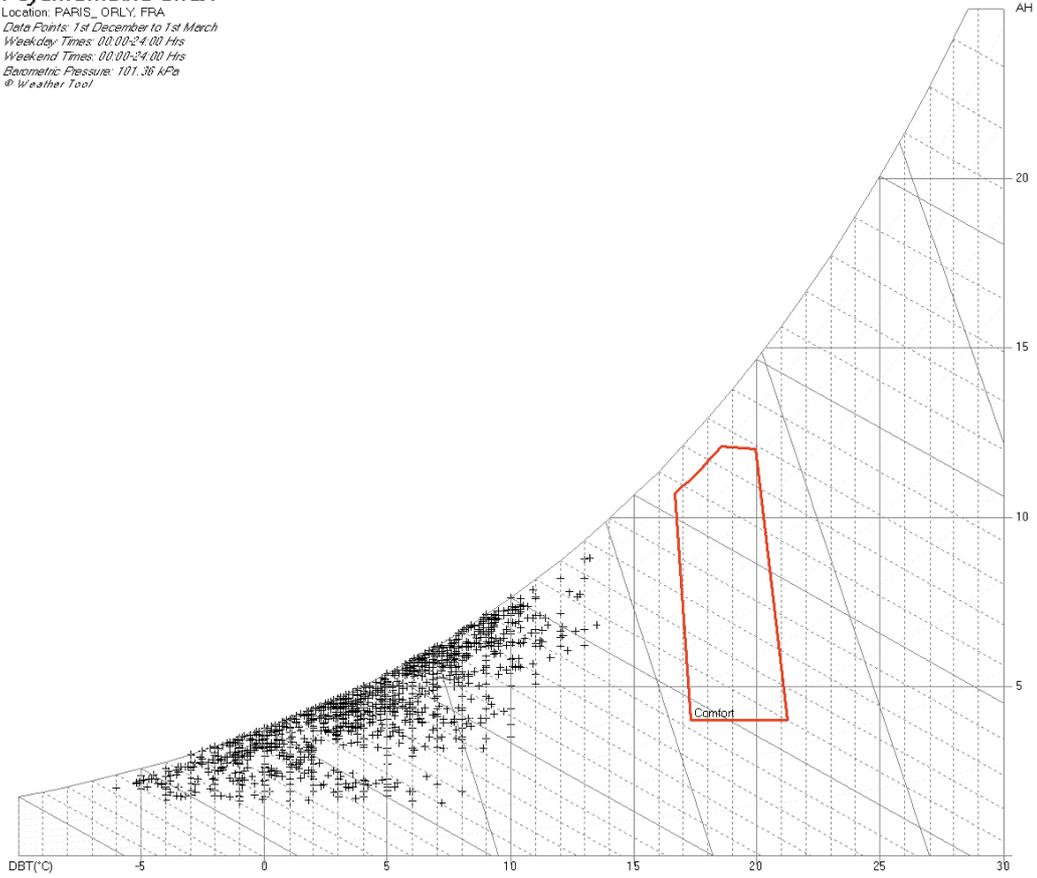


Fig. X-4 Diagramma psicrometrico : Inverno

Psychrometric Chart

Location: PARIS_ORLY, FRA
Data Points: 1st March to 1st June
Weekday Times: 00:00-24:00 Hrs
Weekend Times: 00:00-24:00 Hrs
Barometric Pressure: 101.36 kPa
© Weather Tool

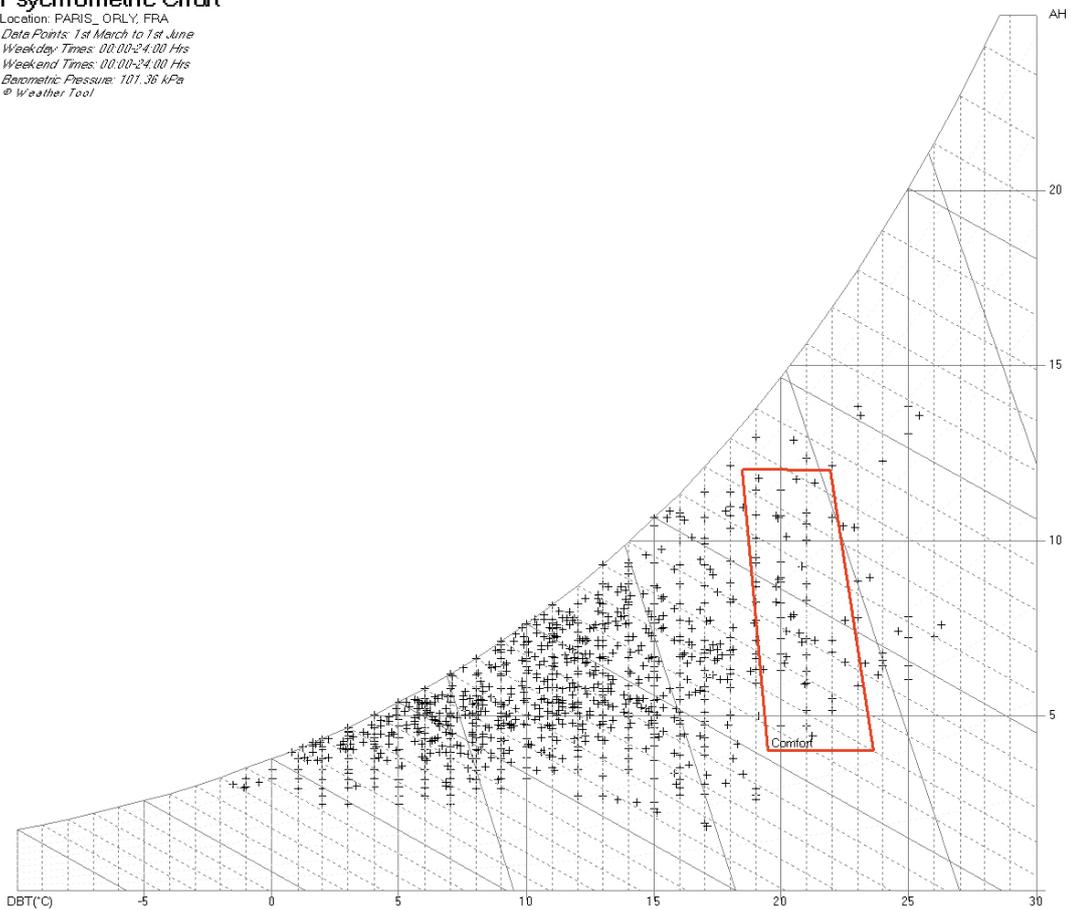


Fig. X-5 Diagramma psicrometrico : Primavera

Psychrometric Chart

Location: PARIS_ORLY, FRA
Data Points: 1st June to 30th June
Weekday Times: 00:00-24:00 Hrs
Weekend Times: 00:00-24:00 Hrs
Barometric Pressure: 101.36 kPa
© Weather Tool

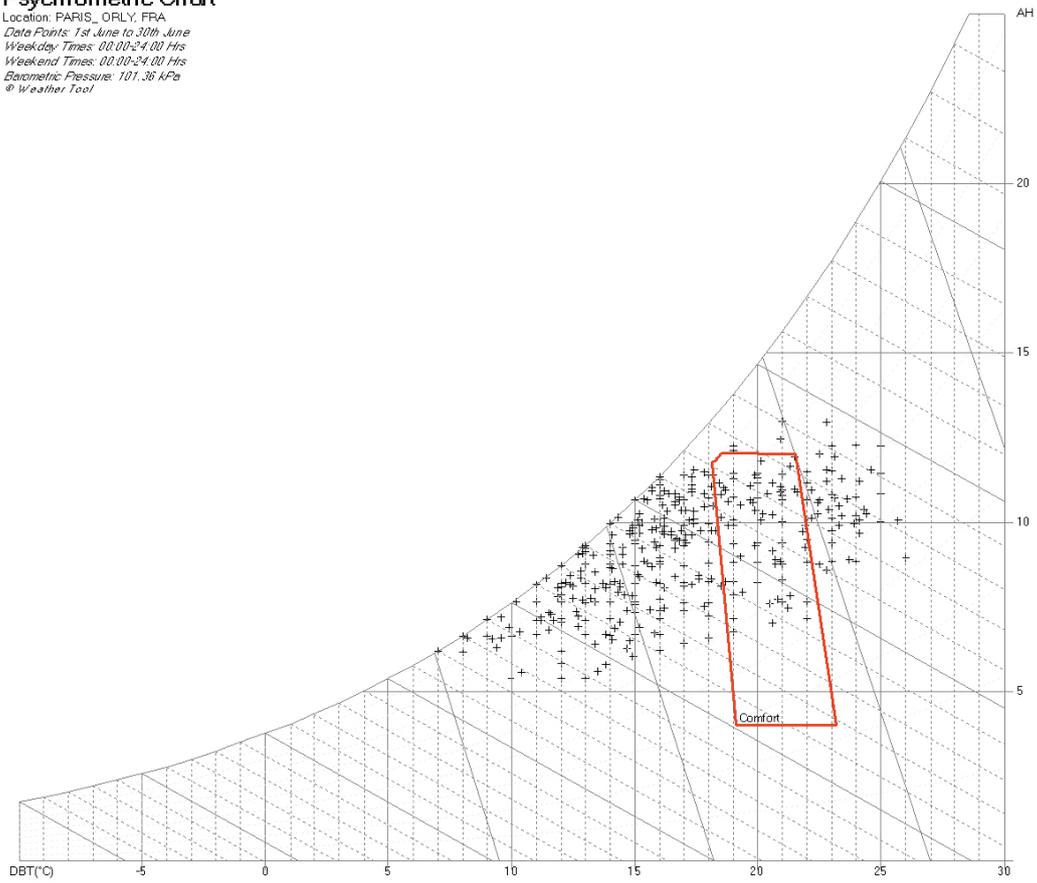


Fig. X-6 Diagramma psicrometrico : Mese di giugno

2. STRATEGIA E SCELTE ARCHITETTONICHE DEL PROGETTO

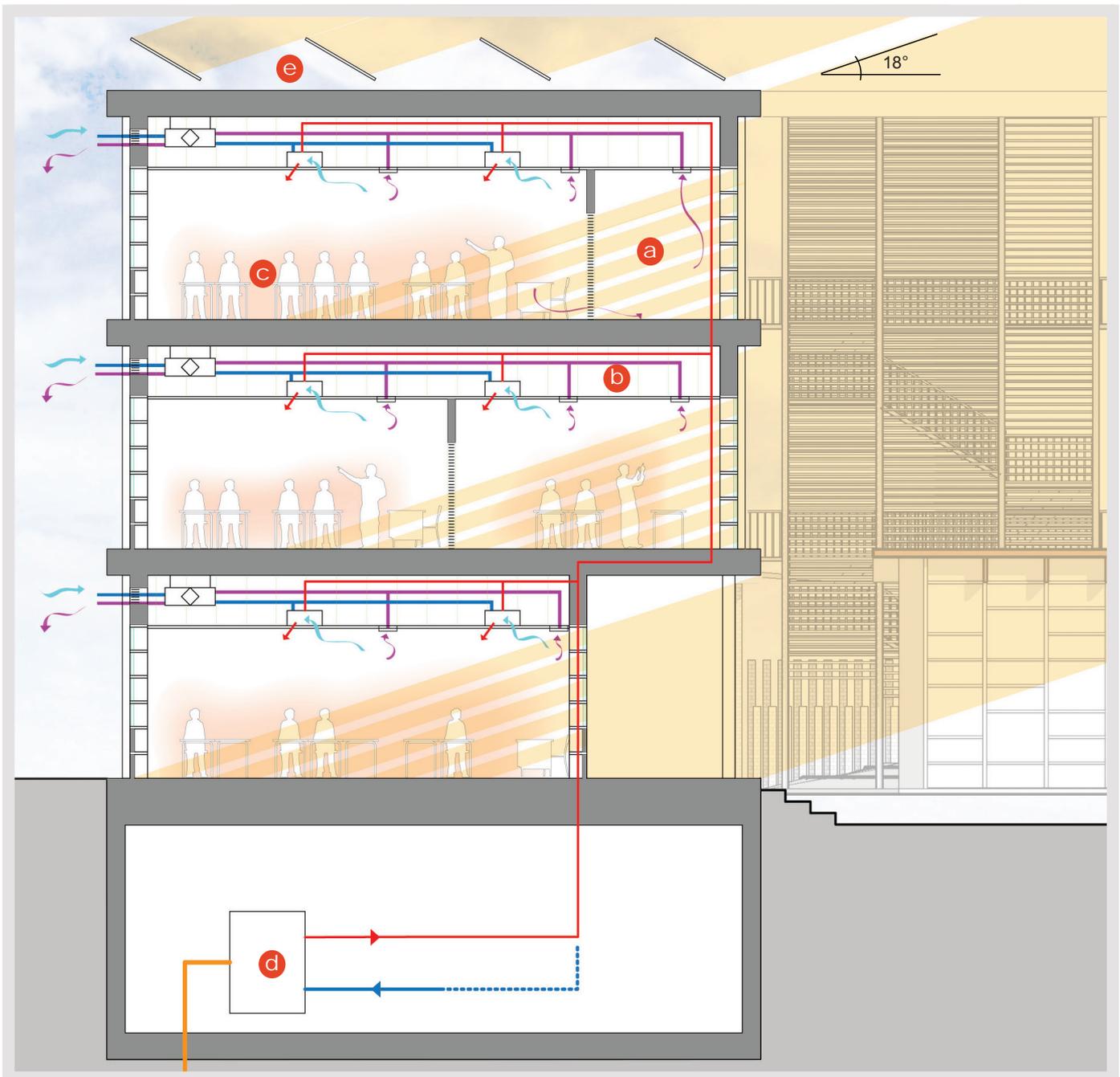
a. Strategia invernale

TAVOLA X-1

Le condizioni igrotermiche interne per il benessere degli utenti possono essere raggiunte assumendo un obiettivo di riduzione massima del fabbisogno energetico dell'edificio. Le scelte architettoniche passive, di prima rilevanza per raggiungere tale scopo, permettono di diminuire le dispersioni termiche, di aumentare i guadagni gratuiti e di sfruttare al massimo la luce naturale.

In sintesi, per la stagione invernale, le principali scelte progettuali sono :

- Iper-isolamento dell'involucro edilizio
- Facciata vetrata orientata verso Sud
- Finestre ad alta efficienza termica al Nord (triplo vetro)
- Scelta di un sistema impiantistico ad attivazione veloce con possibilità di regolare le condizioni interne per ogni spazio
- Uso del principio : "gli studenti producono il calore per il loro ambiente".
- Recuperatore di calore a doppio flusso per la ventilazione
- Divisione degli spazi per un uso differenziato dell'edificio
- Trattamento dei ponti termici



a Facciata orientata verso Sud che lascia entrare i raggi solari in inverno

c Gli studenti riscaldano le aule con il loro metabolismo (tale fenomeno costituisce il 50% degli apporti gratuiti in inverno)

b Sistema impiantistico decentralizzato in ogni controsoffitto

Energie rinnovabili impiegate:
d Pompa di calore ad acqua di falda (perforazione di 60m)

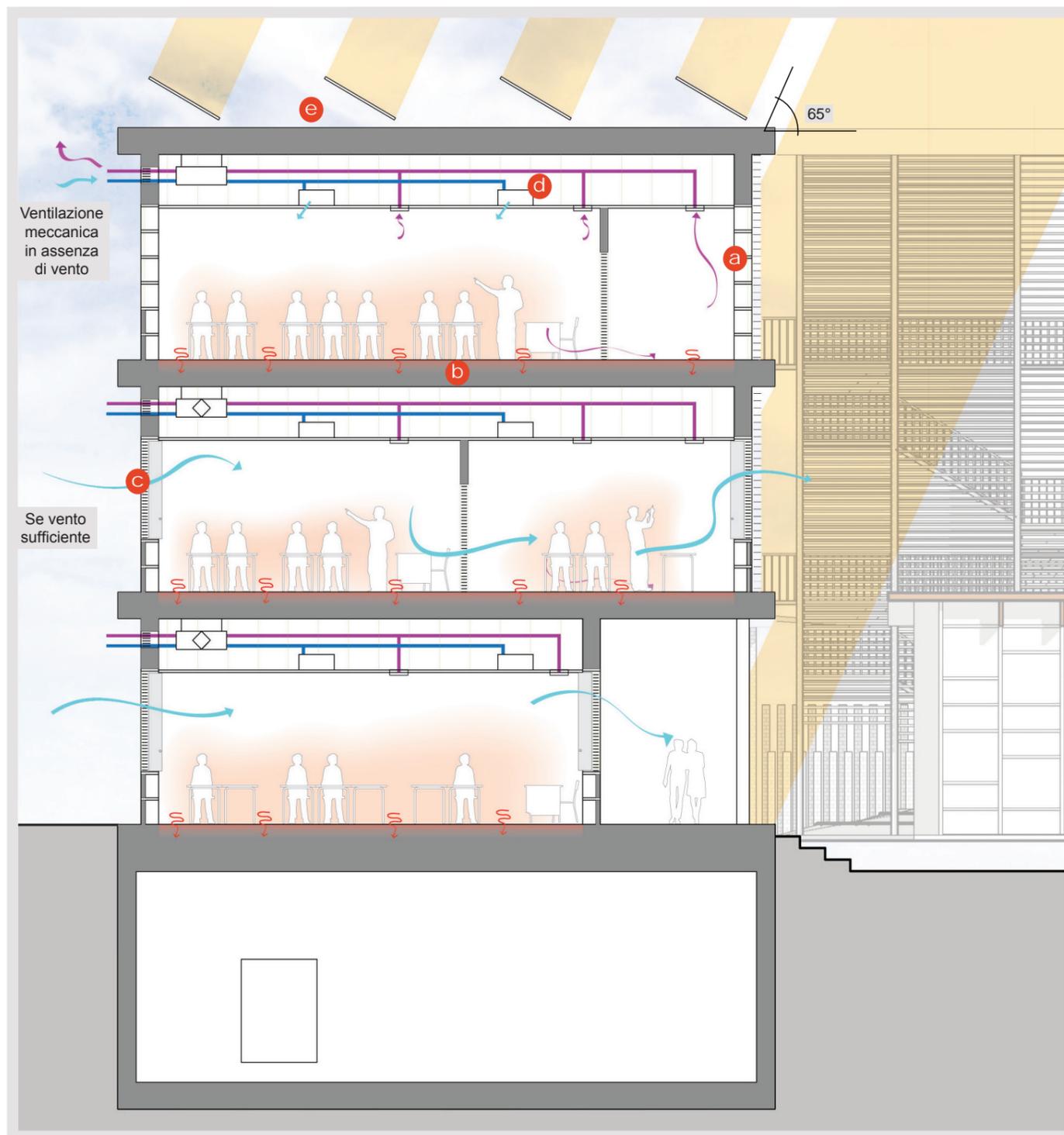
e Pannelli solari ibridi ad alto rendimento che producono elettricità e energia termica

b. Strategia estiva

TAVOLA X-2

In sintesi, per la stagione estiva, le principali scelte progettuali sono :

- Massa dell'involucro per lo sfasamento/decremento con la temperatura notturna più bassa
- Frangi-sole orientabili ed impacchettabili a Sud, Est e Ovest
- Uso della ventilazione naturale unicamente (senza sistema impiantistico di climatizzazione)
- Ventilazione naturale : cross-ventilation con aperture dedicate, indipendente dalle finestre ad apertura motorizzata
- Night purge : ventilazione notturna per ridurre di 2-3°C la temperatura massima diurna

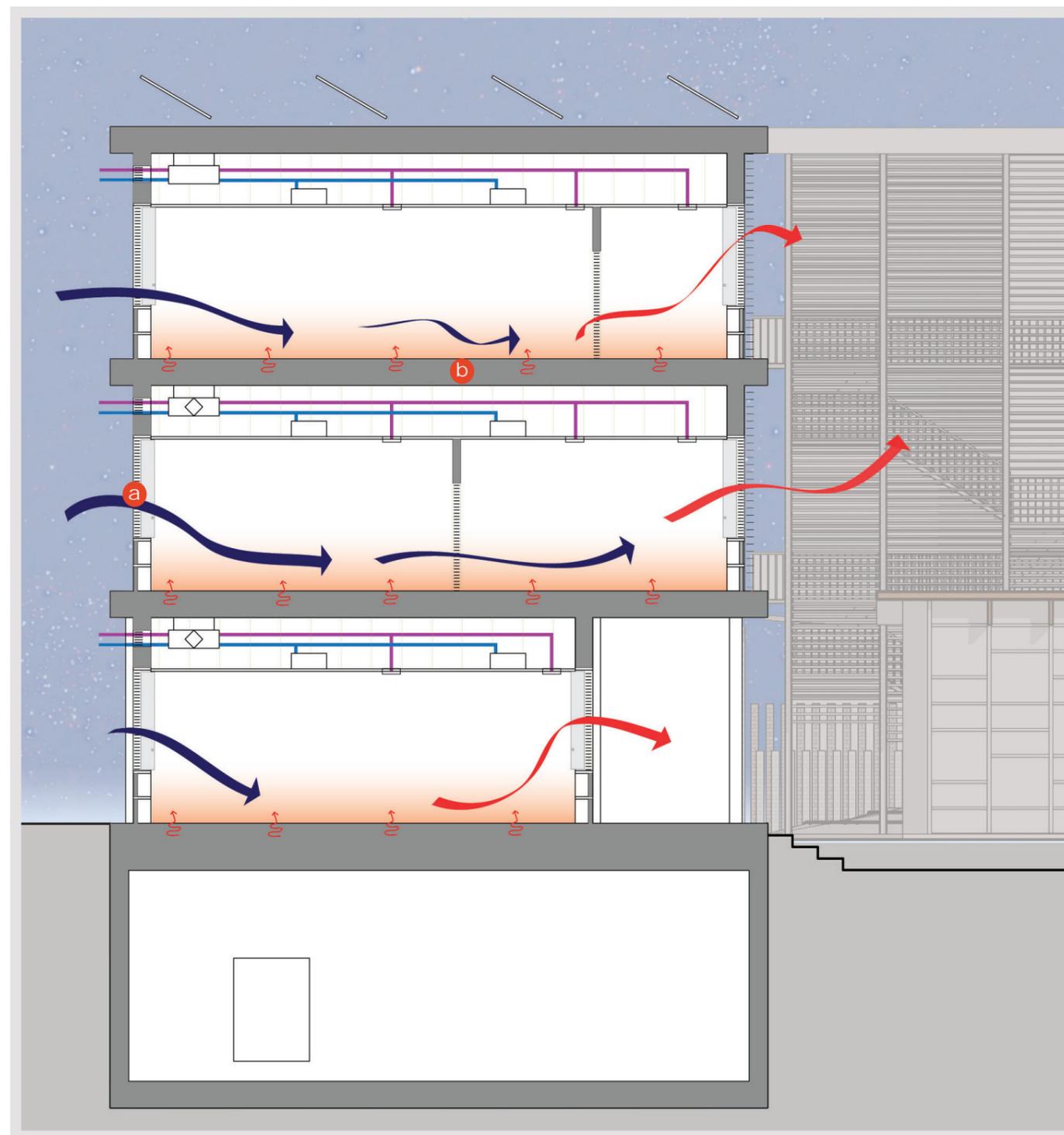


- a** Frangi-sole orientabili ed impacchettabili sulla facciata Sud
- b** Uso della massa dei solai per accumulare in calore in eccedenza

- Ricambio d'aria :
- c** Ventilazione naturale trasversale attraverso aperture dedicate se presenza di vento
 - d** Ventilazione meccanizzata se assenza di vento

- Energie rinnovabili impiegate:
- e** Pannelli solari ibridi ad alta rendimento producendo elettricità e energia termica

STRATEGIA ESTIVA DIURNA



- a** Ventilazione notturna (night purge)
- b** Scarico del calore accumulato durante la giornata nella massa

STRATEGIA ESTIVA NOTTURNA

C. IL FABBISOGNO TERMICO

1. IL MODELLO TERMICO

a. Introduzione al bilancio termico

Per valutare il fabbisogno termico annuale del progetto e le sue prestazioni termiche, abbiamo scelto di effettuare delle simulazioni dinamiche con un programma informatico dedicato : Ecotect.

Al di là della complessità del nostro edificio e quindi della semplificazione del calcolo computerizzato, questo approccio ci ha permesso di ottenere presto nel processo di progettazione un estimo delle prestazioni termiche. Abbiamo potuto valutare diverse scelte architettoniche e tecnologiche ottenendo un edificio con alte prestazioni. Questo calcolo non è solo una verifica, ma l'ultimo risultato di diverse prove.

Ecotect usa come metodo di calcolo il metodo delle ammettenze (Admittance Method) dell' organismo britannico CIBSE (Chartered Institute of Building Engineers). A differenza della norma UNI 11300 attualmente in uso in Italia, questo metodo prende in considerazione gli stati anteriori dell'edificio (con la sua capacità termica) e valuta le condizioni interne come un bilanciamento tra i carichi (dispersioni per conduttività, infiltrazione, guadagni solari tra pareti opache e trasparenti e apporti interni) e la temperatura interna. Con questo metodo, possiamo immaginare di fare una simulazione termica semplificata.

Il calcolo si effettua ora per ora : possiamo ottenere una simulazione del comportamento termico dell'edificio giorno per giorno con accuratezza.

b. Principali dati dell'edificio

Studiamo esclusivamente la scuola. Questa zona esclude gli alloggi e il CIO.

Per semplificare i calcoli, il modello informatico di riferimento è stato leggermente semplificato. L'edificio è stato considerato come un unico involucro senza pareti o solai interni.

I carichi tra zone interne (tra pareti e solai) non sono prese in considerazione (Inter-zonal gain trascurati).

c. Principali dati climatici

I dati climatici usati per valutare il fabbisogno termico sono i valori della stazione meteorologica dell'aeroporto di Orly (a 15km al Sud di Parigi). Il periodo di riferimento è compreso tra il 1986 e il 1996.

I dati climatici che abbiamo utilizzato, tra i più affidabili e completi, sono gli unici disponibili sul motore di calcolo americano Energy-Plus.

d. Scenario di simulazione

Per effettuare la stima del fabbisogno termico annuale, abbiamo creato uno scenario d'uso che prevede gli orari di occupazione, l'affollamento e le attività interne. Questo scenario simula la realtà di un anno scolastico, semplificando le diverse possibilità di attività.

► Il periodo di funzionamento

Il periodo di funzionamento di tutti locali (eccetto la mensa) è un anno accademico con le vacanze scolastiche. La settimana tipo corrisponde a :

- da lunedì a venerdì dalle 8:00 alle 18:00
- il sabato dalle 8:00 alle 13:00.

La mensa funziona durante l'anno accademico dal lunedì al venerdì dalle 10:00 alle 15:00.



Fonte: ECOTECT

Fig. X-7 Modello 3D semplificato per la simulazione termica

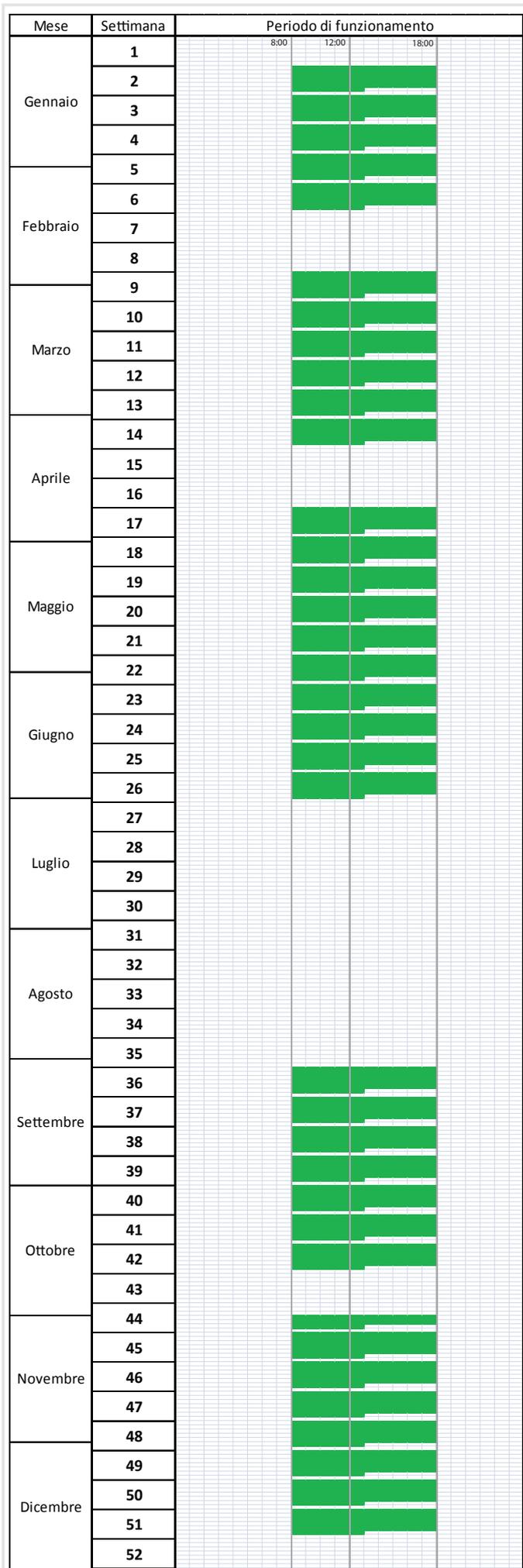


Fig. X-8 Calendario di funzionamento

| | Affollamento | Attività | Guadagni sensibili interni | Ricambio d'aria reale | Ricambio d'aria virtuale |
|---------------------|-----------------------------|-------------------------|----------------------------|--|--|
| Spazi di studio | 3,3 m ² /persona | Media : 80 W/persona | 5 W/m ² | 2,5 vol/ora | 0,9 vol/ora |
| Amministrazione | 5 m ² /persona | Media : 80 W/persona | 5 W/m ² | 2 vol/ora | 0,7 vol/ora |
| Mensa | 1 m ² /persona | Media : 80 W/persona | 10 W/m ² | 7,2 vol/ora | 2,5 vol/ora |
| Zona Collège Aperto | 10 m ² /persona | Media : 80 W/persona | 5 W/m ² | 4 vol/ora | 1,4 vol/ora |
| Palestra | 14 m ² /persona | Alta : 150 W/persona | 5 W/m ² | Aula : 1,5 vol/ora Spogliatoi : 8 vol/ora | Aula : 0,5 vol/ora Spogliatoi : 2,7 vol/ora |

Tab. X-3 Affollamento, attività interna e cambiamento d'aria

► Affollamento, attività interna e cambiamento d'aria

Il tasso di ricambio d'aria è stato calcolato con il dimensionamento degli impianti. Il risparmio energetico dovuto allo scambiatore di calore a doppio-flusso (66% di resa) per la ventilazione è simulato con un tasso di ricambio d'aria virtuale del solo 33% del volume reale.

La tabella Tab. X-3 riassume i diversi valori di affollamento e di ricambio d'aria.

► Condizioni igrotermiche richieste

La temperatura minima di benessere richiesta nel nostro caso è di 19° durante il periodo di funzionamento e di 12°C negli altri casi. I limite superiore della zona comfort è di 26°C, che, essendo relativa alle condizioni estive, non viene presa in considerazione per conoscere il fabbisogno termico per il riscaldamento invernale.

L'umidificazione dell'aria nuova non può essere simulata con questo programma.

Il programma Ecotect non può considerare due temperature diverse come input, come nel nostro caso tra il periodo di occupazione e inegli altri casi. Lo studio del fabbisogno termico è stato effettuato in tre tappe :

1. il calcolo con un input di 19°C
2. un calcolo con una input di 12°C
3. una scelta ora per ora dei carichi calcolati da usare a seconda l'occupazione.

Questo metodo (misto tra due calcoli per due temperature di input) ci permette di ottenere un risultato più vicino al comportamento reale dell'edificio e contemporaneamente un risultato maggiore di quello reale.

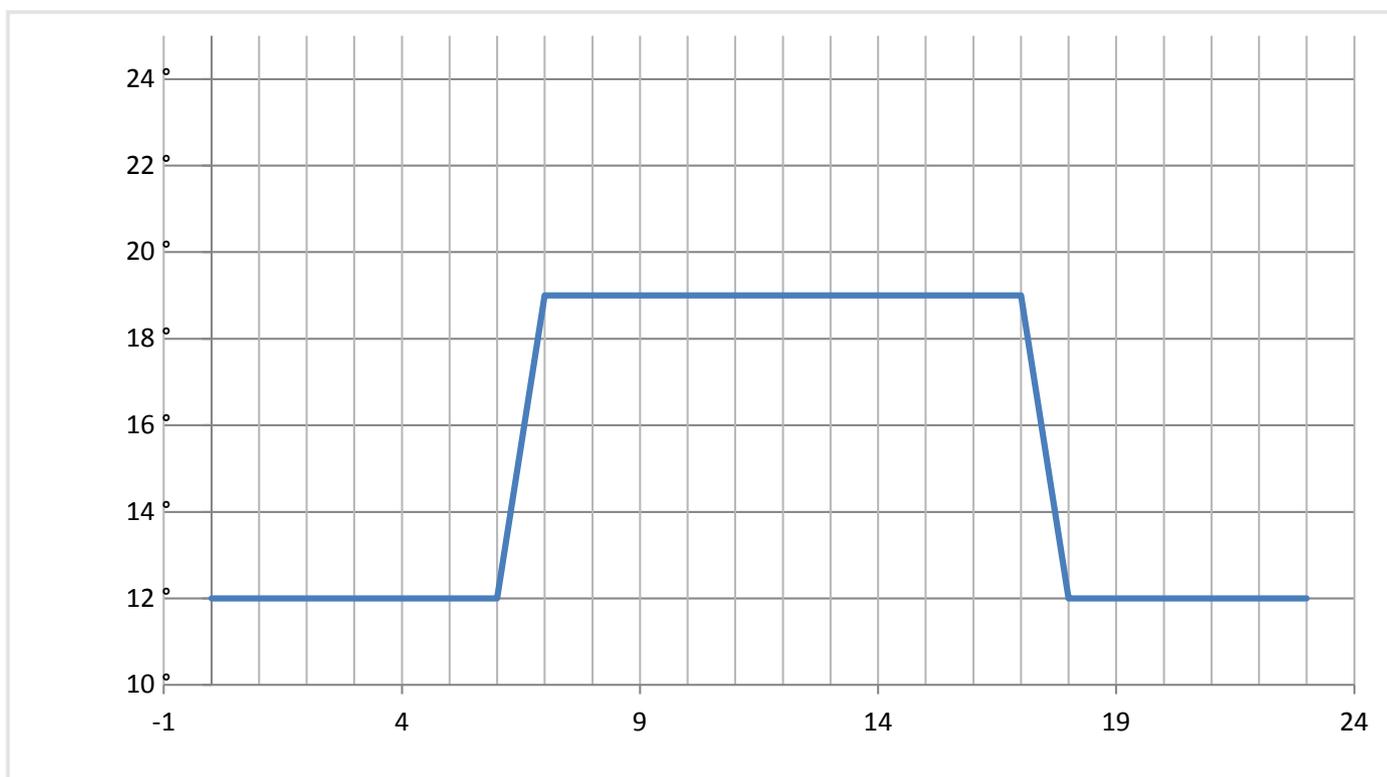


Fig. X-9 Temperatura richiesta : esempio di una giornata durante la settimana

2. BENESSERE INVERNALE

a. Risultati per il fabbisogno invernale

| | Carichi mensili per conduzione e apporti solari sulle pareti opache [kWh] | Carichi mensili per gli apporti solari sulle pareti trasparente [kWh] | Carichi mensili per gli apporti interni gratuiti [kWh] | Carichi mensili per ventilazione [kWh] | Fabbisogno termico mensile per il riscaldamento [kWh] |
|---------------|---|---|--|--|---|
| Gennaio | -18364 | 2166 | 33366 | -48423 | -29654 |
| Febbraio | -15352 | 3182 | 20484 | -26314 | -17746 |
| Marzo | -13388 | 4499 | 39773 | -41105 | -12861 |
| Aprile | -6475 | 6145 | 22244 | -15235 | -4657 |
| Maggio | -3515 | 7238 | 42729 | -15395 | -619 |
| Giugno | -872 | 8273 | 38013 | -5748 | -42 |
| Luglio | 465 | 8614 | 0 | 0 | 0 |
| Agosto | 393 | 8456 | 0 | 0 | 0 |
| Settembre | -1986 | 5885 | 39209 | -9026 | -257 |
| Ottobre | -5639 | 4563 | 28087 | -15068 | -2522 |
| Novembre | -14424 | 2768 | 39773 | -48640 | -19387 |
| Dicembre | -16414 | 1394 | 28087 | -34299 | -19451 |
| TOTALE | | | | | -107 202 kWh |

IL FABBISOGNO TERMICO

464

Tab. X-4 Fabbisogno termico mensile dell'edificio

PROGETTO ENERGETICO

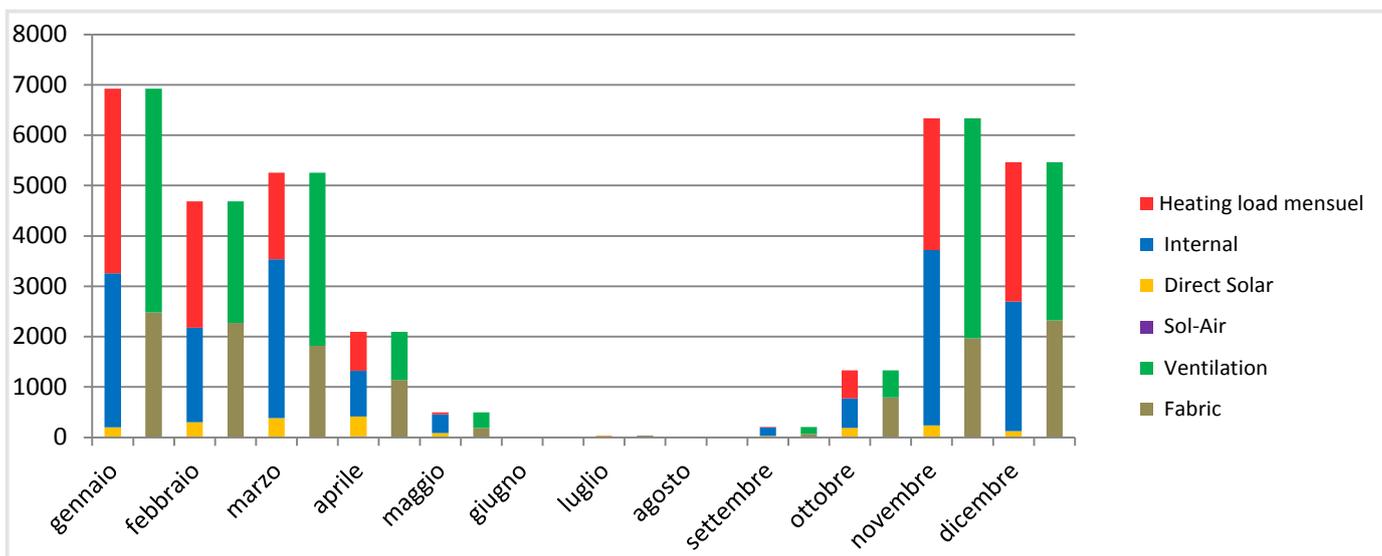


Fig. X-10 Distribuzione dei carichi mensili [Wh]

La simulazione annuale ci fornisce le seguenti informazioni :

| | |
|----------------------------|--|
| Fabbisogno termico annuale | 9,83 kWh/m ² . |
| Potenza termica massima | 269 kW (26 gennaio alle 14:00 con una temperatura esterna di -3°C) |

Tab. X-5 Risultati della simulazione termica annuale

Per gli ulteriori calcoli, il fabbisogno termico annuale per il CIO e gli alloggi sarà preso pari a 15 kWh/m² (livello soglia per una PassivHaus). Queste 2 parti non sono state progettate con sufficienti dettagli per permettere il calcolo di un bilancio termico corretto.

di transizione tra il periodo di riscaldamento e il periodo senza riscaldamento. (22-28 aprile). Cf figure I-11 e I-12. Il fabbisogno termico orario è negativo se riguarda il riscaldamento.

c. Conclusione

Le caratteristiche di funzionamento di un edificio scolastico (700 studenti in attività) influenzano il comportamento termico del progetto :

- il riscaldamento degli spazi di studio è dovuto in maggioranza dal metabolismo degli studenti (apporti interni gratuiti). Per esempio, in gennaio : per 29,7MWh di fabbisogno termico, si hanno 33,4 MWh di apporti gratuiti.
- il periodo di riscaldamento risulta particolarmente lungo in questa zona climatica : dal 15 settembre al 15 maggio.
- il ricambio d'aria è responsabile di più del 75% delle dispersioni. Il rinnovo dell'aria per gli studenti è essenziale e non può pertanto essere ridotto. L'uso di uno scambiatore di calore con alta efficienza (Ipotesi di resa : 66%) è l'unico modo di minimizzare queste dispersioni. Un isolamento termico maggiore non cambierebbe in modo significativo il fabbisogno termico.

| Zona | fabbisogno termico annuale |
|-----------------------------|----------------------------|
| Scuola | 9,83 kWh/m ² |
| CIO | 15 kWh/m ² |
| Alloggi | 15 kWh/m ² |
| Media per l'intero progetto | 10,47 kWh/m ² |

Tab. X-6 Fabbisogno termico annuale

b. Analisi del comportamento dell'edificio

Un approfondimento è stato effettuato su due settimane. La settimana più fredda dell'anno (15-21 gennaio) e la settimana

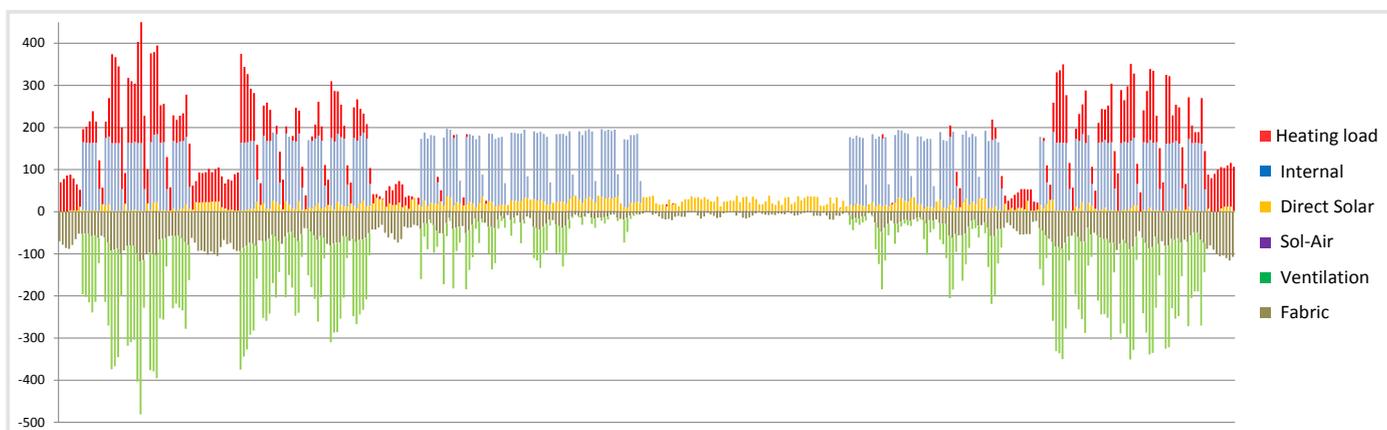


Fig. X-11 Distribuzione quotidiana dei diversi carichi termici

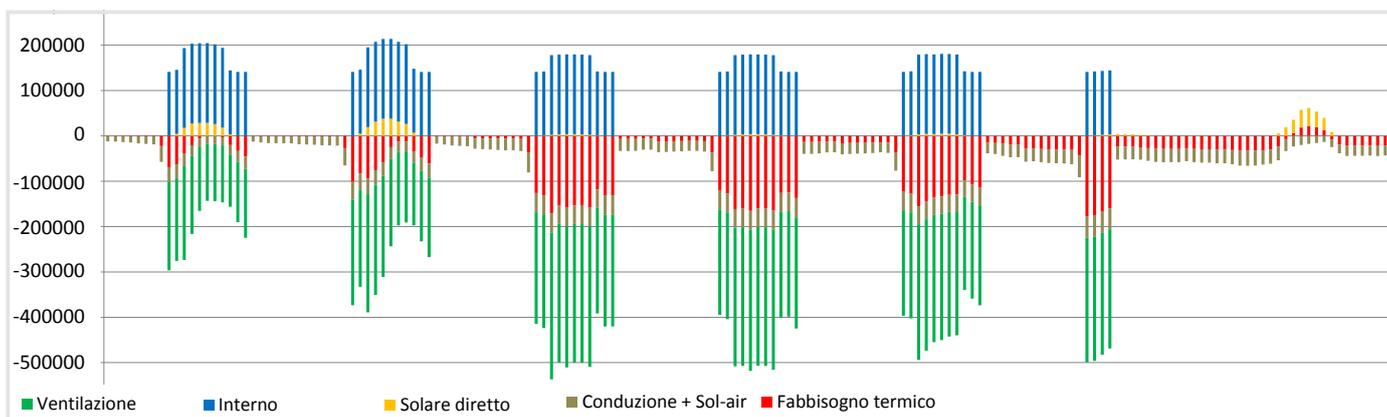


Fig. X-12 Fabbisogno termico ora per ora per la settimana del 15 gennaio [Wh]

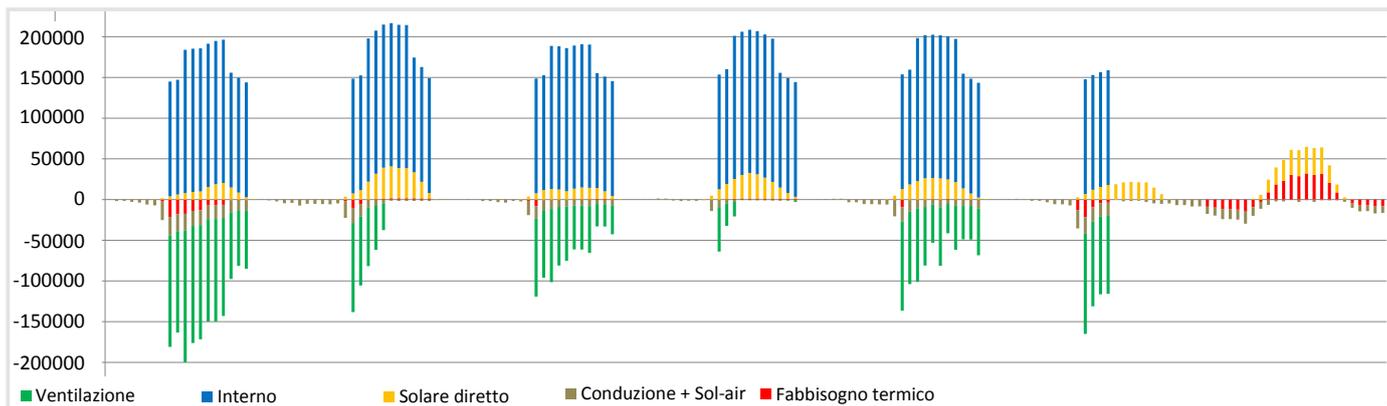


Fig. X-13 Fabbisogno termico ora per ora per la settimana del 22 aprile [Wh]

3. BENESSERE ESTIVO E VENTILAZIONE NATURALE

Il committente richiede di non usare un sistema di climatizzazione durante il periodo estivo. Questa scelta è confermata dallo studio del diagramma psicrometrico per giugno, il mese più caldo dell'anno. Invece di un sistema di climatizzazione, scegliamo di sviluppare la ventilazione naturale per un raffrescamento passivo associato ad una ventilazione notturna forzata (night-purge) per abbassare la temperatura diurna.

Per valutare l'efficienza delle ventilazione naturale, utilizziamo una simulazione del comportamento termico dell'edificio grazie al modello Ecotect a seconda dei vari tassi di ricambio d'aria. Conoscendo il ricambio da raggiungere durante il giorno e la notte (night-purge), valutiamo poi l'efficienza della ventilazione naturale secondo la distribuzione locale del vento.

a. Comportamento termico estivo

La simulazione del comportamento termico di una platea di quattro aule al primo piano durante il periodo estivo ci permette di conoscere il numero di ore dove le condizioni igrotermiche si collocano al di fuori della zona comfort.

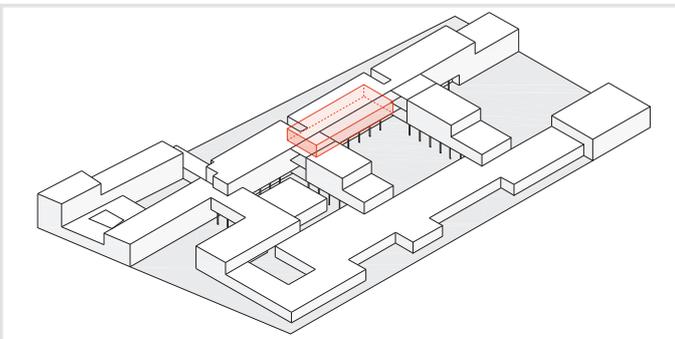


Fig. X-14 Zona di studio: platea centrale al primo piano

La temperatura massima ammissibile per la zona comfort è calcolata in 2 modi :

1. con la temperatura massima richiesta dal programma di 26°C
2. con la temperatura neutra T_n calcolata secondo la temperatura media mensile esterna T_m

$$T_n = 17,6 + 0,31 \cdot T_m$$

Il calcolo secondo la temperatura neutra, più bassa della temperatura massima richiesta nel programma del committente (26°C), risulta di un numero di ore fuori dalla zona comfort più alto.

Secondo diversi valori del tasso di ricambio d'aria durante il periodo di funzionamento diurno e il tasso di ricambio d'aria durante la notte, otteniamo i risultati per l'anno intero riassunti nella tabella Tab. X-7.

Il solo ricambio d'aria diurno con il tasso richiesto dalla norma (2,5 vol/ora) non permette di ottenere una temperatura interna inferiore a 26°C. Con un ricambio notturno allo stesso tasso (2,5 vol/ora), la temperatura interna rimane quasi-sempre inferiore a 26°C.

Il raffrescamento notturno ci permette di abbassare considerevolmente il numero di ore al di fuori delle condizioni di benessere durante la giornata. Aumentare il tasso di ricambio dell'aria durante la notte è più pertinente che aumentare il tasso di ricambio diurno. Oltretutto, l'aumento del tasso di ricambio

diurno può creare una condizione di discomfort nelle aule dovuta ad un movimento sgradevole dell'aria.

Massimizzare il raffrescamento notturno può essere quindi una soluzione per migliorare il benessere durante il periodo estivo.

Il sistema meccanico di ricambio d'aria dovrà essere accompagnato dalla ventilazione naturale, in modo tale da aumentare il tasso di ricambio senza.

Il sistema di ventilazione progettato è un sistema ibrido tra ventilazione meccanica e ventilazione naturale. Dei sensori di pressione sulla facciata sotto vento informano il sistema di gestione degli impianti : se la velocità del vento è superiore ad un certo valore, la ventilazione meccanica si ferma e viene sostituita da quella naturale.

b. Funzionamento della ventilazione naturale

La ventilazione può essere sia meccanica, con il sistema di ricambio d'aria necessario per l'inverno, sia naturale. Il sistema è ibrido.

Il progetto è teso a massimizzare l'uso della ventilazione naturale per diminuire il fabbisogno termico dell'edificio (night-purge) e evitare l'uso di ventilazione meccanica e il suo fabbisogno energetico conseguente. In questa parte, verrà spiegato lo schema generale di ventilazione naturale, in seguito viene valutata l'efficienza di questa ventilazione naturale.

Grazie alla bassa profondità delle diverse parti del nostro progetto al primo e secondo piano (12m ca.), scegliamo di usare una ventilazione naturale trasversale (cross-ventilation).

Le esigenze di sicurezza degli studenti durante la giornata, e l'esigenza di protezione contro le intrusioni ci inducono a separare la funzione di apertura per la vista e la luce naturale e la funzione di ricambio d'aria. Le finestre non sono apribili, salvo qualche infisso di sicurezza apribile in caso d'incendio sulla facciata Nord per l'accessibilità dei pompieri.

Il principio della ventilazione delle diverse parte dell'edificio è la cross-ventilation. Il vento venendo principalmente dal Nord durante il periodo estivo attraversa trasversalmente le diverse parti dell'edificio poco larghe (12m di larghezza in media).

La ventilazione è effettuata con delle aperture dedicate sulle facciate indipendenti dalle finestre. Le aperture sono motorizzate per una gestione centralizzata, ma anche apribili da parte dai utenti per dar loro la possibilità di gestire il proprio comfort.

Le aperture permanenti sopra gli infissi delle porte assicurano la circolazione trasversale dell'aria. Queste aperture sono pensate come trappole acustiche per assicurare un isolamento corretto tra l'aula e il corridoio.

L'efficienza di un tale dispositivo dipende da diversi fattori :

- l'orientamento dell'edificio sopra vento
- le aperture con le loro dimensioni e la loro disposizione sulla parete
- la velocità del vento

Valutare il funzionamento preciso di un tale dispositivo di cross-ventilation non è facile, se non si usano potenti modelli di simulazione informatica con programmi dedicati al calcolo della dinamica dei fluidi (computational fluid dynamics CFD). Per ottenere una prima valutazione per la progettazione usiamo un modello di calcolo semplice, presentato in seguito.

| | Denominazione del caso | Tasso di ricambio d'aria diurna | Tasso di ricambio d'aria notturna | Numero di ore durante l'anno con $T_{int} > 26^{\circ}\text{C}$ | Numero di ore durante l'anno con $T_{int} > T_n$ |
|---|---|---------------------------------|-----------------------------------|---|--|
| 1 | Ricambio d'aria diurno secondo la norma, senza raffrescamento notturno | 2,5 vol/ora | 0 vol/ora | 135 ore | 467 ore |
| 2 | Ricambio d'aria diurno migliorato, senza raffrescamento notturno | 3,5 vol/ora | 0 vol/ora | 105 ore | 357 ore |
| 3 | Ricambio d'aria diurno secondo la norma, con il raffrescamento notturno basso | 2,5 vol/ora | 2,5 vol/ora | 2 ore | 149 ore |
| 4 | Ricambio d'aria diurno migliorato, con raffrescamento notturno medio | 3 vol/ora | 4 vol/ora | 0 ore | 92 ore |
| 5 | Ricambio d'aria diurno secondo la norma, con il raffrescamento notturno alto | 2,5 vol/ora | 5 vol/ora | 0 ore | 42 ore |

Tab. X-7 Tasso di ricambio d'aria in funzione del momento della giornata

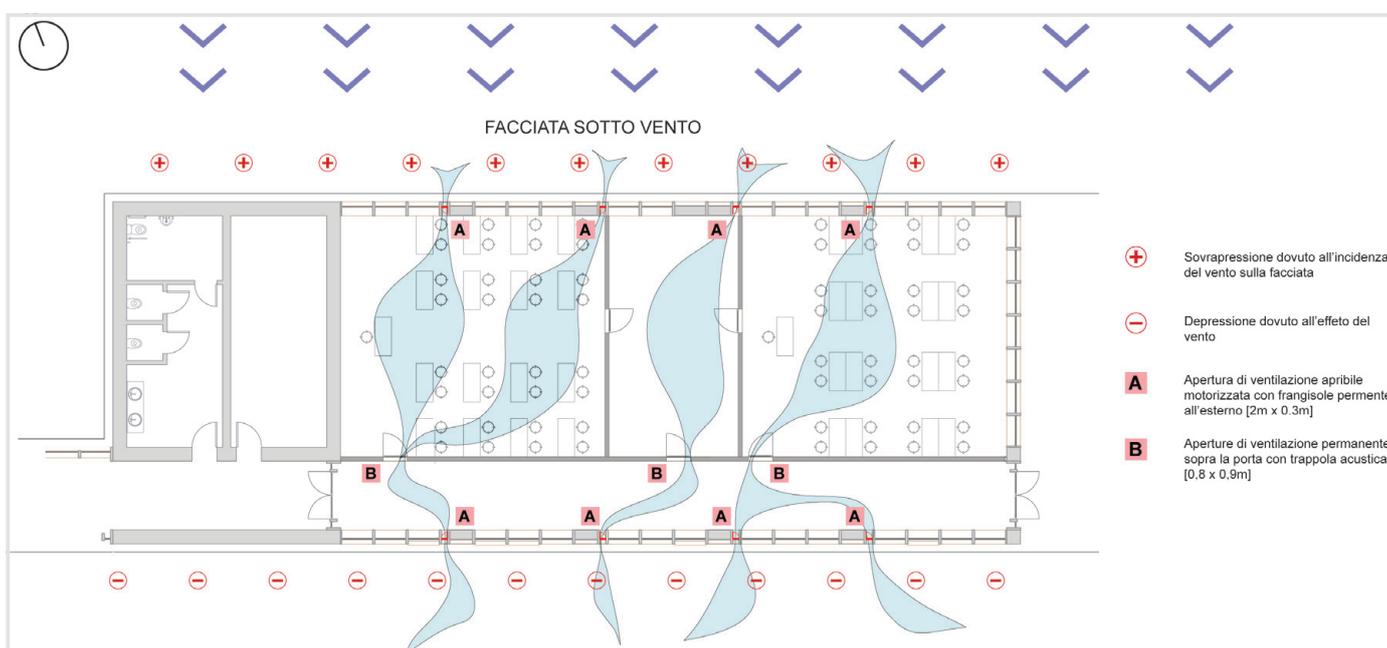


Fig. X-15 Schema di principio della ventilazione naturale

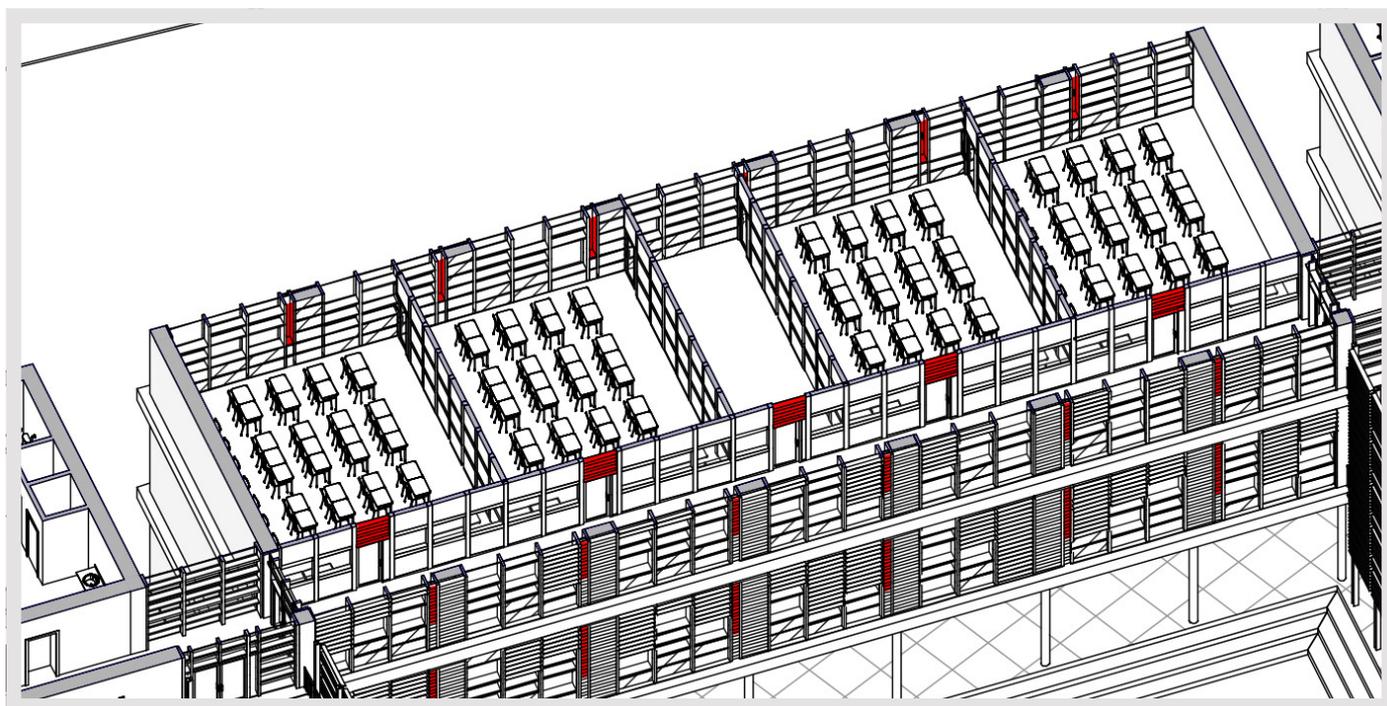


Fig. X-16 Distribuzione delle porte di ventilazione.

c. Studio del vento

La previsione del comportamento del vento è una scienza molto complessa che dipende da molti parametri locali. Per l'esattezza della previsione, i dati statistici sulla direzione e la velocità del vento devono provenire da un rilievo locale.

Per questo studio, usiamo una serie statistica della stazione meteorologica della città di St-Denis, limitrofa di Aubervilliers. Questo rilievo è stato fatto durante l'anno 2006 a 10m di altezza.

La ventilazione naturale è necessaria soprattutto durante il mese di giugno, il più caldo dell'anno accademico. Questi due diagrammi mostrano sullo stesso grafico la direzione, la velocità e la periodicità del vento per il mese di giugno sia per il pomeriggio (14:00–18:00) sia per la notte (22:00–9:00).

Nelle due situazioni, vediamo che l'edificio è ben orientato (orientato a 21° est) con la facciata Nord ortogonale alla direzione principale del vento. La bassa profondità dell'edificio (12m al massimo) ci permette di prevedere una ventilazione trasversale (cross-ventilation).

Questo studio si completa con il calcolo preciso del periodo in cui il vento è effettivamente orientato ortogonalmente alla parete. Il calcolo si effettua per il periodo dove il riscaldamento non è richiesto, cioè per i mesi di aprile, maggio, giugno, settembre e ottobre. 2 velocità di soglia sono prese : 2 m/s e 3m/s. *Tab. X-8 e Tab. X-9*

α è l'angolo d'incidenza del vento sulla facciata (orientata a 21° all'est).

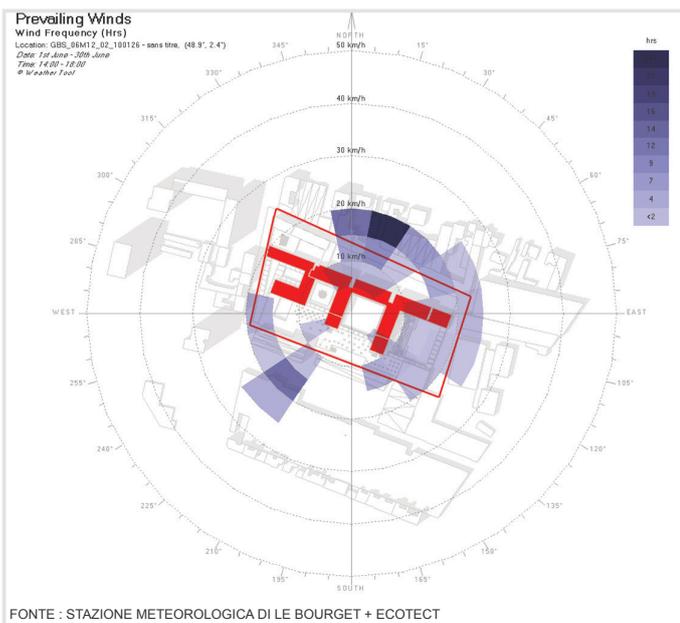


Fig. X-17 Distribuzione del vento pe il mese di giugno durante il pomeriggio (14:00–18:00)

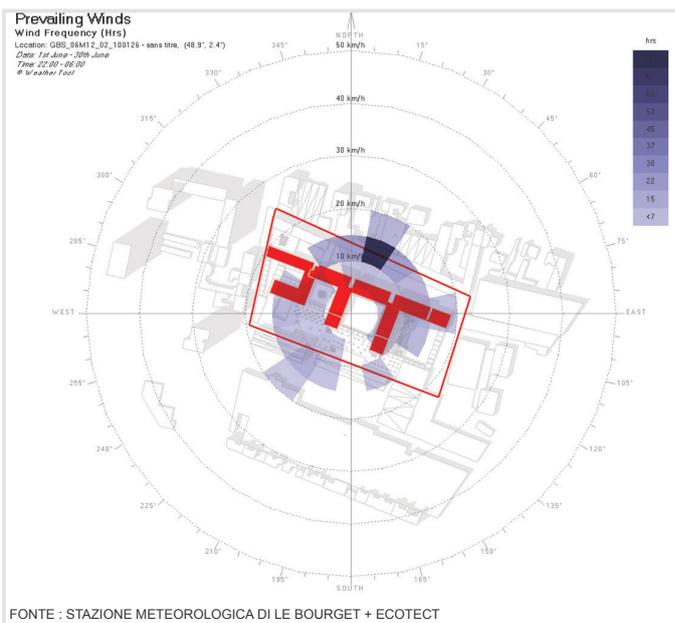


Fig. X-18 Distribuzione del vento pe il mese di giugno durante la notte (22:00-9:00)

| Numero di ore in cui $v_z > 2 \text{ m/s}$ (7,2 km/h) per i mesi di aprile, maggio, giugno, settembre e ottobre | | % del tempo |
|---|----------|-------------|
| Giorno 8:00 – 18:00 $-90^\circ < \alpha < 90^\circ$ | 1185 ore | 78,00% |
| Giorno 8:00 – 18:00 $-45^\circ < \alpha < 45^\circ$ | 777 ore | 51% |
| Notte 19:00 – 8:00 $-90^\circ < \alpha < 90^\circ$ | 1332 ore | 63% |
| Notte 19:00 – 8:00 $-45^\circ < \alpha < 45^\circ$ | 925 ore | 43% |

Tab. X-8 Numero di giorni con vento $V_z > 2 \text{ m/s}$

| Numero di ore in cui $v_z > 3 \text{ m/s}$ (10,8 km/h) per i mesi di aprile, maggio, giugno, settembre e ottobre | | % del tempo |
|--|---------|-------------|
| Giorno 8:00 – 18:00 $-90^\circ < \alpha < 90^\circ$ | 781 ore | 51% |
| Giorno 8:00 – 18:00 $-45^\circ < \alpha < 45^\circ$ | 508 ore | 33% |
| Notte 19:00 – 8:00 $-90^\circ < \alpha < 90^\circ$ | 608 ore | 29% |
| Notte 19:00 – 8:00 $-45^\circ < \alpha < 45^\circ$ | 447 ore | 21,00% |

Tab. X-9 Numero di giorni con vento $V_z > 3 \text{ m/s}$

d. Modellizzazione della ventilazione

► Presentazione del modello di calcolo

Esistono pochi modelli semplici per la valutazione semplificata della ventilazione trasversale (cross-ventilation). Usiamo un modello di valutazione del tasso di flusso istantaneo volumico dell'aria attraverso chiusure permeabili quali bacchette di ventilazione, finestre e porte aperte. (Grosso M., Il raffrescamento passivo degli edifici, Maggioli editore, 2008 e Herrlin M.K., Air-flow studies in multizone buildings: models and applications, department of building services engineering, royal institute of technology, Bulletin N° 23, Stoccolma, 1992). Il modello permette di valutare il flusso di un fluido non-ideale attraverso orifici a spigolo vivo con elementi spaziali in sequenza, non tiene conto delle dispersioni di moto dovute all'attrito.

Il calcolo del flusso si svolge grazie alla formula :

$$q_v = v_z \cdot \sqrt{\frac{C_p^+ - C_p^-}{\frac{1}{C_{d1}^2 \cdot A_1^2} + \frac{1}{C_{d2}^2 \cdot A_2^2} + \frac{1}{C_{d3}^2 \cdot A_3^2}}}$$

con

- q_v : Flusso istantaneo volumico d'aria attraverso la zona [m^3/s]
- v_z : Velocità del vento ad un'altezza di riferimento [m/s]
- C_p^+ : Coefficiente di pressione del vento sull'apertura d'ingresso dell'aria
- C_p^- : Coefficiente di pressione del vento sull'apertura di uscita dell'aria
- C_{d1} : Coefficiente di scarico di ogni apertura
- A_i : Area di ogni apertura [m^2]

I diversi coefficienti sono disponibili per edifici aventi non più di due piani fuori terra e rapporti larghezza/altezza e profondità/altezza inferiore a 2.

Anche se nel nostro caso il rapporto larghezza/altezza è più alto ($\sim 40/12 = 3,3$) abbiamo deciso di utilizzare i coefficienti, approssimando così in calcolo

Per noi :

| α | 0 | Coefficienti di pressione | |
|----------|------|---------------------------|------|
| h | 12,5 | A | 0,7 |
| l | 40 | B | -0,3 |
| w | 12 | C | -0,7 |
| h/w | 1,04 | D | -0,7 |
| l/w | 3,3 | | |

Tab. X-10 Coefficienti

Con

- A_p = Area totale della parete (o A_{tr} = Area della sezione trasversale)
- A = Area apertura
- L_a = Larghezza dell'apertura
- H_a = Altezza dell'apertura
- L_{tr} = Larghezza della sezione trasversale al flusso
- H_v = Altezza della sezione trasversale al flusso
- A_u/A_i = rapporto tra i valori netti delle aree di apertura di uscita, A_u e di ingresso A_i dell'aria

► 2 simulazioni

Studieremo 2 casi per la platea centrale di 4 aule al primo piano. Il primo caso considera un calcolo globale per tutta la platea, il secondo verifica il funzionamento di un'unica aula

avente accesso a solo un'apertura su ogni facciata.

La velocità del vento sarà presa di 2 m/s. Durante i mesi di raffrescamento, questa velocità è effettiva 51% del tempo durante la giornata e 43% durante le notte.

Caso A

Si studia il caso della platea del primo piano con 4 aule.

Superficie della zona : $12 \times 32m = 384m^2$

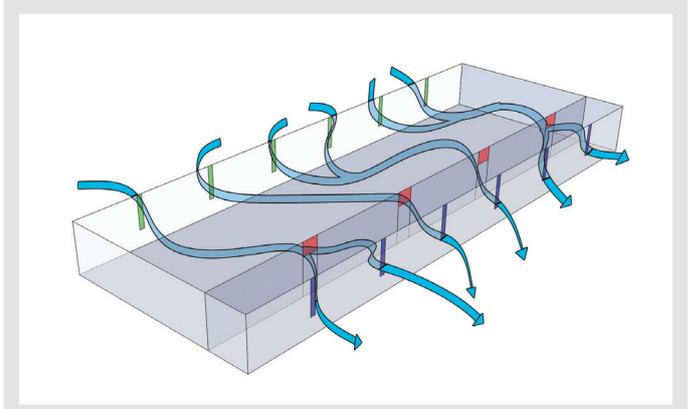


Fig. X-19 Caso A: modello semplificato per la simulazione con una platea di $384 m^2$

| | A1 (aperture blu) | A2 (aperture rosse) | A3 (aperture verda) |
|---|-------------------------|---------------------------|---------------------------|
| A_p (Area totale della parete) | 96 m^2 | 96 m^2 | 96 m^2 |
| Numero di aperture | 6 | 4 | 6 |
| L_a (Larghezza dell'apertura) | 0,2 m | 0,8 m | 0,2 m |
| H_a (Altezza dell'apertura) | 2 m | 0,9 m | 2 m |
| A (Area apertura) | 0,4 m^2 | 0,72 m^2 | 0,4 m^2 |
| A_u (Area totale delle aperture) | 2,4 m^2 | 2,88 m^2 | 2,4 m^2 |
| L_{tr} (Larghezza della sezione trasversale al flusso) | 32 | 32 | 32 |
| H_v (Altezza della sezione trasversale al flusso) | 3 | 3 | 3 |
| A_u/A_i (rapporto tra i valori netti delle aree di apertura di uscita, A_u e di ingresso A_i dell'aria) | | | 1 |
| C_d | 0,5 | 0,5 | 1 |

Tab. X-11 Caso A: Dati geometrici

| | |
|---|--------------------------|
| v_z (velocità del vento) [m/s] | 2 m/s (7,2 km/s) |
| q_v (flusso d'aria) [m^3/s] | 0,92 m^3/s |
| Q_1 (ricambio d'aria in 1 ora) [volume/ora] | 3,6 vol/ora |
| Q_{12} (ricambio d'aria in 12 ore) [volume/notte] | 43 vol/notte |

Tab. X-12 Caso A: Risultati

Caso B

Si studia il caso di un'unica aula al primo piano .

Superficie della zona : $12 \times 7 \text{ m} = 84 \text{ m}^2$

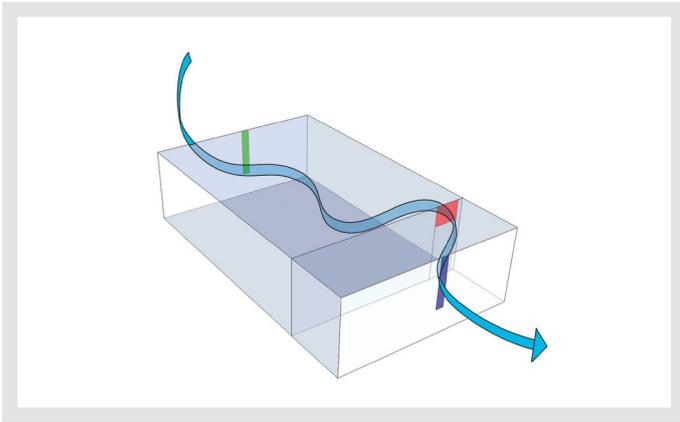


Fig. X-20 Caso B: modello semplificato per la simulazione con un'aula semplice di 84 m^2

Nei 2 casi (Tab. X-12 e Tab. X-14), otteniamo dei tassi di ricambio d'aria quasi simile tra loro.

Il tasso di 3,6 vol/ora permette di abbassare la temperatura interna per evitare di raggiungere 26°C (caso 4 della simulazione di ventilazione. Tab. X-7).

Una nuova simulazione con un angolo di incidenza di 45° , non esplicitata in questa sede, mostra un tasso di ricambio del 70% rispetto al tasso relativo ad un vento ortogonale alla parete. Questo tasso di 2,5 vol/ora ci conduce al caso 3 della simulazione di ventilazione. Ci sono quindi solo due ore durante tutto il periodo con una temperatura interna superiore a 26°C .

e. Conclusione

Il dispositivo di ventilazione naturale trasversale permette di raggiungere senza apporti esterni delle condizioni in cui la temperatura interna non supera in nessuna occasione i 26°C .

Secondo i dati statistici, durante i mesi in cui il raffrescamento è necessario, la ventilazione naturale permette per il 51% del tempo diurno di non usare un sistema meccanico. Il raffrescamento notturno può essere effettuato con la ventilazione naturale per il 41% delle notti.

Negli altri casi, il ricambio meccanico dell'aria in giornata accoppiato ad una ventilazione meccanica notturna con lo stesso tasso permette di minimizzare il numero di ore fuori al di fuori della zona comfort.

Per assicurare un ricambio d'aria sufficiente in ogni momento, si prevede un sistema di sensori di pressione del vento che comanda l'apertura motorizzata delle porte di ventilazione o loro chiusura con l'accensione della ventilazione meccanica.

Questo sistema ibrido di ventilazione assicura il massimo sfruttamento del vento come vettore di ricambio d'aria e riduce il fabbisogno energetico necessario in caso di ventilazione meccanica.

| | A1 (aperture blu) | A2 (aperture rosse) | A3 (aperture verde) |
|---|-------------------------|---------------------------|---------------------------|
| A_p (Area totale della parete) | 21 m^2 | 21 m^2 | 21 m^2 |
| Numero di aperture | 1 | 1 | 1 |
| L_a (Larghezza dell'apertura) | 0,2 m | 0,8 m | 0,2 m |
| H_a (Altezza dell'apertura) | 2 m | 0,9 m | 2 m |
| A (Area apertura) | $0,4 \text{ m}^2$ | $0,72 \text{ m}^2$ | $0,4 \text{ m}^2$ |
| A_u (Area totale delle aperture) | $0,4 \text{ m}^2$ | $0,72 \text{ m}^2$ | $0,4 \text{ m}^2$ |
| L_{tr} (Larghezza della sezione trasversale al flusso) | 7 | 7 | 7 |
| H_v (Altezza della sezione trasversale al flusso) | 3 | 3 | 3 |
| A_u/A_i (rapporto tra i valori netti delle aree di apertura di uscita, A_u e di ingresso A_i dell'aria) | | | 1 |
| C_d | 0,5 | 0,5 | 1 |

Tab. X-13 Caso B: Dati geometrici

| | |
|---|----------------------------|
| v_z (velocità del vento) [m/s] | 2 m/s (7,2 km/s) |
| q_v (flusso d'aria) [m^3/s] | 0,26 m^3/s |
| Q_1 (ricambio d'aria in 1 ora) [volume/ora] | 3,8 vol/ora |
| Q_{12} (ricambio d'aria in 12 ore) [volume/notte] | 45 vol/notte |

Tab. X-14 Caso B: Risultati

D. IL FABBISOGNO ENERGETICO

Il fabbisogno energetico consiste in una parte termica (per il riscaldamento ambientale e l'acqua calda sanitaria (ACS)) e una parte elettrica (per gli ausiliari, l'illuminazione e gli usi domestici).

Il progetto non prevede un sistema di climatizzazione.

Il fabbisogno termico annuale per il riscaldamento ambientale è già calcolato attraverso la simulazione termica.

1. FABBISOGNO MASSIMO DI DIMENSIONAMENTO DELL'EDIFICIO

a. Condizioni esterne estreme per il dimensionamento

Il dimensionamento del sistema di riscaldamento ambientale si esegue nelle seguenti condizioni esterne : 7°C con 90% di umidità relativa. Queste condizioni corrispondono alla fine di Gennaio verso le 7:00.

b. Dispersioni dovute al condizionamento dell'aria

Il ricambio d'aria necessita di un impianto che la riscaldi e ne aumenti l'umidità assoluta e che assicuri le condizioni di benessere degli utenti.

- Condizioni esterne : -7°C con 90% di umidità relativa (2,07g di acqua per m³ d'aria)
- Condizione interne richieste : 19°C con 50% di umidità relativa (7,05g di acqua per m³ d'aria)

Il condizionamento si effettua nel nostro caso in tre tappe (Fig. X-22 e Tab. X-15) :

1. Lo scambio di calore tra l'aria in entrata e l'aria in uscita attraverso un sistema di scambiatore di calore sensibile a doppio-flusso ad alto rendimento [1]. Fig. X-21
2. l'aria è preriscaldata a 31,2°C [2]
3. l'umidificazione dell'aria si produce prima della diffusione nell'ambiente da riscaldare [3]

Energia necessaria per condizionare 1000 m³ di aria:
q = 6,1 kWh/1000 m³ d'aria

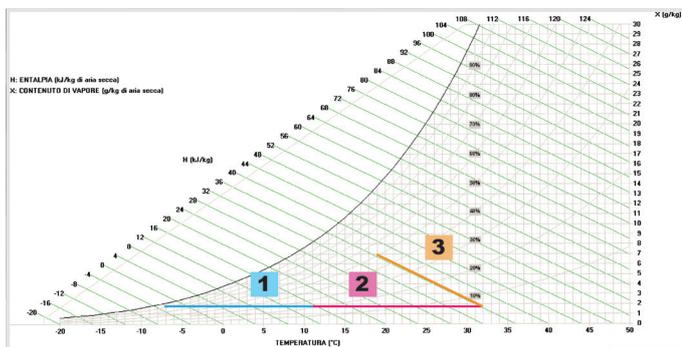


Fig. X-22 Schema psicrometrico: operazioni del riscaldamento dell'aria rinnovata

| Operazione | Temperatura | Umidità relativa | Umidità assoluta | Entalpia |
|---|-------------|------------------|------------------------------|---------------------|
| 0 | -7°C | 90,00% | 2,07 g/m ³ d'aria | -0,56 Wh/kg di aria |
| 1. scambio di calore sensibile attraverso il recuperatore di calore a doppio-flusso | 10°C | - | 2,07 g/m ³ d'aria | 4,2 Wh/kg di aria |
| 2. riscaldamento grazie ad un fluido termo-vettore | 31,2°C | - | 2,07 g/m ³ d'aria | 10,13 Wh/kg di aria |
| 3. umidificazione adiabatica | 19°C | 50,00% | 7,05 g/m ³ d'aria | 10,13 Wh/kg di aria |

Tab. X-15 Entalpia delle diverse operazioni del riscaldamento dell'aria rinnovata

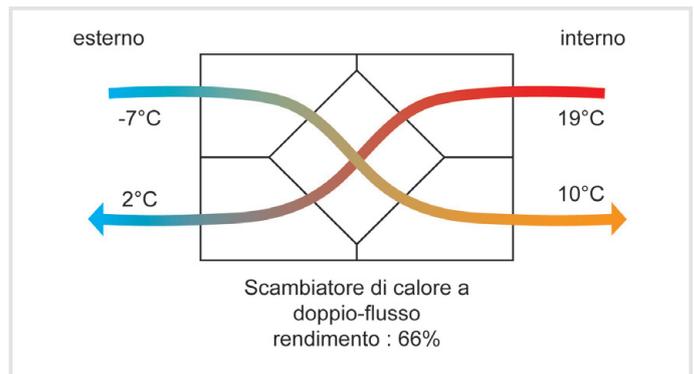


Fig. X-21 Funzionamento dello scambiatore di calore a doppio flusso

2. DIMENSIONAMENTO

Il dimensionamento degli impianti si esegue calcolando la potenza termica in una condizione esterna estrema. Sono allora prese in considerazione le dispersioni per ventilazione meccanica e le dispersioni per trasmissione tra le pareti esterne dell'edificio.

a. Dispersioni per trasmissione

$$Q_T = \sum U_i \cdot S_i \cdot \Delta T = \sum H_i \cdot \Delta T$$

Con

- QT : dispersioni totale per trasmissione [W]
- Ui : superficie dell'elemento di tipo i [m²]
- Si : trasmittanza dell'elemento di tipo i [W/m²K]
- Hi = Ui · Si : coefficiente di scambio termico degli elementi di tipo i [W/m²K]
- ΔT : differenza di temperatura tra aria interna e aria esterna preso uguale a 26°C (19°C - (-7°C))

b. Dispersioni dovute alla ventilazione

Con

$$\dot{V} = n_{si} \cdot S_i \cdot Q_{op}$$

$$Q_v = \frac{\dot{V}}{1000} \cdot q$$

- Q_v : dispersioni dovute alla ventilazione [kW]
- V : portata d'aria per la zona i [m³/h]
- q : energia necessaria per condizionare 1000 m³ di aria [kWh/1000 m³ d'aria]
- n_{si} : affollamento nella zona i secondo UNI10339 [pers/m²]
- S_i : superficie della zona i [W/m²K]
- Q_{op} : portata specifica di aria esterna per persona secondo UNI10339 [m³/h.pers]

c. Fabbisogno termico massimo

TAVOLA X-3

| Nome del locale | altezza interna [m] | Superficie di base per locale [m ²] | Superfici corridoi + spazi tecnici [m ²] | superfici spazi in uso [m ²] | Volume del locale [m ³] | Affollamento [pers/m ²] | Popolazione [pers] | Portata di aria esterna [L/sec.pers] | Tasso di ricambio d'aria [vol/ora] | Rendimento scambiatore di calore [%] | Portata di Aria primaria per locale (UNI 10339) [m ³ /ora] | Potenza termica Ventilazione meccanica per locale [kW] | ΣUi.Si [W/K] | ΣUi.Si.ΔT per locale [kW] | Potenza totale Ventilazione + Dispersioni per trasmissione [kW] |
|-----------------------|---------------------|---|--|--|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------|--------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|---|--|--------------|---------------------------|---|
| Principale Ovest_0 | 3,00 m | 223 m ² | 9,2 m ² | 213,8 m ² | 669 m ³ | 0,30 pers/m ² | 64,14 | 7,00 L/sec.pers | 2,52 | 66% | 1616 m ³ /h | 9,70 kW | 127,9 | 3,32 kW | 13,02 kW |
| Principale Ovest_1 | 3,00 m | 334 m ² | 74,0 m ² | 260,0 m ² | 1002 m ³ | 0,30 pers/m ² | 78 | 7,00 L/sec.pers | 2,52 | 66% | 1966 m ³ /h | 11,79 kW | 139,3 | 3,62 kW | 15,42 kW |
| Principale Ovest_2 | 3,00 m | 334 m ² | 74,0 m ² | 260,0 m ² | 1002 m ³ | 0,30 pers/m ² | 78 | 7,00 L/sec.pers | 2,52 | 66% | 1966 m ³ /h | 11,79 kW | 168,7 | 4,39 kW | 16,18 kW |
| Principale Centrale_0 | 3,00 m | 272 m ² | 16,8 m ² | 255,2 m ² | 816 m ³ | 0,30 pers/m ² | 76,56 | 7,00 L/sec.pers | 2,52 | 66% | 1929 m ³ /h | 11,58 kW | 155,0 | 4,03 kW | 15,61 kW |
| Principale Centrale_1 | 3,00 m | 369 m ² | 81,0 m ² | 288,4 m ² | 1108 m ³ | 0,30 pers/m ² | 86,52 | 7,00 L/sec.pers | 2,52 | 66% | 2180 m ³ /h | 13,08 kW | 153,9 | 4,00 kW | 17,08 kW |
| Principale Centrale_2 | 3,00 m | 369 m ² | 81,0 m ² | 288,4 m ² | 1108 m ³ | 0,30 pers/m ² | 86,52 | 7,00 L/sec.pers | 2,52 | 66% | 2180 m ³ /h | 13,08 kW | 191,9 | 4,99 kW | 18,07 kW |
| Principale Est_0 | 3,00 m | 215 m ² | 0,0 m ² | 214,9 m ² | 645 m ³ | 0,30 pers/m ² | 64,47 | 7,00 L/sec.pers | 2,52 | 66% | 1625 m ³ /h | 9,75 kW | 136,9 | 3,56 kW | 13,31 kW |
| Principale Est_1 | 3,00 m | 562 m ² | 137,8 m ² | 424,0 m ² | 1685 m ³ | 0,30 pers/m ² | 127,2 | 7,00 L/sec.pers | 2,52 | 66% | 3205 m ³ /h | 19,23 kW | 229,9 | 5,98 kW | 25,21 kW |
| Principale Est_2 | 3,00 m | 342 m ² | 88,6 m ² | 252,9 m ² | 1025 m ³ | 0,30 pers/m ² | 75,87 | 7,00 L/sec.pers | 2,52 | 66% | 1912 m ³ /h | 11,47 kW | 162,7 | 4,23 kW | 15,70 kW |
| Pilotis sOvest_1 | 3,00 m | 287 m ² | 63,0 m ² | 224,3 m ² | 862 m ³ | 0,30 pers/m ² | 67,29 | 7,00 L/sec.pers | 2,52 | 66% | 1696 m ³ /h | 10,17 kW | 177,7 | 4,62 kW | 14,80 kW |
| Pilotis Ovest-2 | 3,00 m | 164 m ² | 36,0 m ² | 128,0 m ² | 492 m ³ | 0,30 pers/m ² | 38,4 | 7,00 L/sec.pers | 2,52 | 66% | 968 m ³ /h | 5,81 kW | 115,9 | 3,01 kW | 8,82 kW |
| Pilotis Est_1 | 3,00 m | 368 m ² | 81,0 m ² | 287,4 m ² | 1105 m ³ | 0,30 pers/m ² | 86,22 | 7,00 L/sec.pers | 2,52 | 66% | 2173 m ³ /h | 13,04 kW | 225,9 | 5,87 kW | 18,91 kW |
| Pilotis Est_2 | 3,00 m | 210 m ² | 44,9 m ² | 165,5 m ² | 631 m ³ | 0,30 pers/m ² | 49,65 | 7,00 L/sec.pers | 2,52 | 66% | 1251 m ³ /h | 7,51 kW | 139,9 | 3,64 kW | 11,14 kW |
| CDI_0 | 3,00 m | 207 m ² | 0,0 m ² | 207,4 m ² | 622 m ³ | 0,30 pers/m ² | 62,22 | 6,00 L/sec.pers | 2,16 | 66% | 1344 m ³ /h | 8,06 kW | 321,1 | 8,35 kW | 16,41 kW |
| Segpa_0 | 3,00 m | 720 m ² | 98,5 m ² | 621,5 m ² | 2160 m ³ | 0,20 pers/m ² | 124,3 | 7,00 L/sec.pers | 1,68 | 66% | 3132 m ³ /h | 18,79 kW | 386,6 | 10,05 kW | 28,85 kW |
| Spogliatoi_0 | 3,00 m | 283 m ² | 104,0 m ² | 179,0 m ² | 849 m ³ | 0,20 pers/m ² | 35,8 | 8 vol/h | 8 | 66% | 4296 m ³ /h | 25,78 kW | 135,5 | 3,52 kW | 29,30 kW |
| Palestra_tecnico_0 | 3,00 m | 61 m ² | 0,0 m ² | 61,3 m ² | 184 m ³ | 0,20 pers/m ² | 12,26 | 7,00 L/sec.pers | 1,68 | 66% | 309 m ³ /h | 1,85 kW | 24,1 | 0,63 kW | 2,48 kW |
| Palestra_aula_0 | 6,00 m | 347 m ² | 0,0 m ² | 347,0 m ² | 2082 m ³ | 0,20 pers/m ² | 69,4 | 12,50 L/sec.pers | 1,5 | 66% | 3123 m ³ /h | 18,74 kW | 311,3 | 8,09 kW | 26,83 kW |
| Ammin_0 | 3,00 m | 202 m ² | 0,0 m ² | 202,0 m ² | 606 m ³ | 0,30 pers/m ² | 60,6 | 6,00 L/sec.pers | 2,16 | 66% | 1309 m ³ /h | 7,85 kW | 113,2 | 2,94 kW | 10,80 kW |
| Ammin_1 | 3,00 m | 738 m ² | 260,0 m ² | 478,0 m ² | 2214 m ³ | 0,20 pers/m ² | 95,6 | 6,00 L/sec.pers | 1,44 | 66% | 2065 m ³ /h | 12,39 kW | 324,9 | 8,45 kW | 20,84 kW |
| Collège Aperto_0 | 3,00 m | 397 m ² | 69,2 m ² | 328,2 m ² | 1192 m ³ | 0,60 pers/m ² | 196,92 | 5,50 L/sec.pers | 3,96 | 66% | 3899 m ³ /h | 23,39 kW | 215,8 | 5,61 kW | 29,01 kW |
| Mensa_0 | 3,00 m | 672 m ² | 76,8 m ² | 595,2 m ² | 2016 m ³ | 0,60 pers/m ² | 357,12 | 10,00 L/sec.pers | 7,2 | 66% | 12856 m ³ /h | 77,14 kW | 368,9 | 9,59 kW | 86,73 kW |
| Manutenzione_0 | 3,00 m | 292 m ² | 91,7 m ² | 199,9 m ² | 875 m ³ | 0,10 pers/m ² | 19,99 | 7,00 L/sec.pers | 0,84 | 66% | 504 m ³ /h | 3,02 kW | 146,0 | 3,80 kW | 6,82 kW |
| Medico-Sociale_0 | 3,00 m | 162 m ² | 0,0 m ² | 162,2 m ² | 487 m ³ | 0,12 pers/m ² | 19,464 | 11,00 L/sec.pers | 1,584 | 66% | 771 m ³ /h | 4,62 kW | 89,9 | 2,34 kW | 6,96 kW |
| CIO_0 | 3,00 m | 555 m ² | 32,7 m ² | 522,3 m ² | 1665 m ³ | 0,30 pers/m ² | 156,69 | 7,00 L/sec.pers | 2,52 | 66% | 3949 m ³ /h | 23,69 kW | 317,1 | 8,24 kW | 31,94 kW |
| Alloggi_0 | 3,00 m | 146 m ² | 0,0 m ² | 146,1 m ² | 438 m ³ | 0,04 pers/m ² | 5,844 | 11,00 L/sec.pers | 0,528 | 66% | 231 m ³ /h | 1,39 kW | 81,7 | 2,12 kW | 3,51 kW |
| AlloggiA_1 | 3,00 m | 212 m ² | 0,0 m ² | 212,0 m ² | 636 m ³ | 0,04 pers/m ² | 8,48 | 11,00 L/sec.pers | 0,528 | 66% | 336 m ³ /h | 2,01 kW | 166,0 | 4,32 kW | 6,33 kW |
| AlloggiB_1 | 3,00 m | 119 m ² | 0,0 m ² | 119,0 m ² | 357 m ³ | 0,04 pers/m ² | 4,76 | 11,00 L/sec.pers | 0,528 | 66% | 188 m ³ /h | 1,13 kW | 65,7 | 1,71 kW | 2,84 kW |
| Alloggi_2 | 3,00 m | 121 m ² | 0,0 m ² | 121,0 m ² | 363 m ³ | 0,04 pers/m ² | 4,84 | 11,00 L/sec.pers | 0,528 | 66% | 192 m ³ /h | 1,15 kW | 87,4 | 2,27 kW | 3,42 kW |

CALCOLO DELLA POTENZA TERMICA MASSIMA NECESSARIA

| Zona funzionale | $\Sigma U_i.S_i$ | Q_T Dispersioni per trasmissione $\Sigma U_i.S_i.\Delta T$ [kW] | V Portata d'aria primaria [m ³ /h] | Q_v Dispersioni dovute alla ventilazione [kW] | $Q_T + Q_v$ Potenza termica totale [kW] |
|-----------------|------------------|---|--|--|--|
| Scuola | 4563 W/K | 119 kW | 58275 m ³ /h | 350 kW | 468 kW |
| CIO | 317 W/K | 8 kW | 3949 m ³ /h | 24 kW | 32 kW |
| Alloggi | 7185 W/K | 10 kW | 947 m ³ /h | 6 kW | 16 kW |
| TOTALE | 5598 W/K | 137 kW | 63171 m ³ /h | 379 kW | 516 kW |

Tab. X-16 Potenza termica massima necessaria

d. Sintesi

La tabella Tab. X-16 riassume i risultati importanti per ogni zona funzionale.

La potenza termica totale necessaria nelle condizioni estreme è di 516 kW.

3. FABBISOGNO DI ACQUA CALDA SANITARIA (ACS)

a. Procedura di calcolo

Lo schema globale di calcolo del fabbisogno energetico per l'acqua calda sanitaria fa riferimento alla norma 11300.

La temperatura di erogazione dell'acqua è considerata pari a 40°C, e le temperature d'ingresso sono le temperature locali di Parigi (fonte : software Solo di Tecsol www.tecsol.fr).

I volumi d'acqua richiesti secondo i diversi usi sono rintracciabili nella nuova regolamentazione RT2012 che riporta valori più sobri rispetto alla UNI 11300.

$$Q_{DHW} = \rho \cdot C \cdot V_w \cdot (\theta_{er} - \theta_o) \cdot N$$

Con

- Q_{DHW} : Fabbisogno energetico mensile per la produzione di acqua calda sanitaria [Wh]
- ρ : massa volumica dell'acqua, assunta pari a 1 kg/L
- C : capacità termica specifica dell'acqua, assunta pari a 1,162 Wh/kg.K
- V_w : volume dell'acqua richiesta durante il periodo di calcolo [L/giorno]
- θ_{er} : temperatura di erogazione dell'acqua calda sanitaria assunta pari a 40°C
- θ_i : temperatura di ingresso dell'acqua calda sanitaria

b. Tabelle di calcolo

Vedere le 5 tabelle seguenti.

| | V_w [L/giorno] | | | θ_{er} [°C] | θ_o [°C] | N [giorni] | Q_{DHW} [kWh] |
|---------------|------------------------------------|----------------------------|-------------|-----------------------|--------------------|---------------|--------------------|
| | a [L/settimana.m ²] | N_u [m ²] | L/settimana | | | | |
| Gennaio | 0,2 | 6768,7 | 1353,74 | 40 | 7 | 19,5 | 184 kWh |
| Febbraio | 0,2 | 6768,7 | 1353,74 | 40 | 7,4 | 11 | 103 kWh |
| Marzo | 0,2 | 6768,7 | 1353,74 | 40 | 9,1 | 24,5 | 217 kWh |
| Aprile | 0,2 | 6768,7 | 1353,74 | 40 | 10,6 | 12 | 101 kWh |
| Maggio | 0,2 | 6768,7 | 1353,74 | 40 | 12,5 | 25 | 197 kWh |
| Giugno | 0 | 6768,7 | 0 | 40 | 14 | 23,5 | 0 kWh |
| Luglio | 0 | 6768,7 | 0 | 40 | 15 | 0 | 0 kWh |
| Agosto | 0,2 | 6768,7 | 1353,74 | 40 | 14,7 | 0 | 0 kWh |
| Settembre | 0,2 | 6768,7 | 1353,74 | 40 | 13,4 | 22 | 167 kWh |
| Ottobre | 0,2 | 6768,7 | 1353,74 | 40 | 11,1 | 16,5 | 136 kWh |
| Novembre | 0,2 | 6768,7 | 1353,74 | 40 | 8,9 | 24 | 213 kWh |
| Dicembre | 0,2 | 6768,7 | 1353,74 | 40 | 7,5 | 17 | 158 kWh |
| Totale | | | | | | 195 g | 1476 kWh |

Tab. X-17 Fabbisogno di ACS : Parte insegnamento e amministrazione

| | V_w [L/giorno] | | | θ_{gr} [°C] | θ_o [°C] | N [giorni] | Q_{DHW} [kWh] |
|---------------|-----------------------|---------------|-------------|-----------------------|--------------------|---------------|--------------------|
| | a [L/settimana.m²] | N_u [m²] | L/settimana | | | | |
| Gennaio | 45 | 400 | 18000 | 40 | 7 | 19,5 | 2447 kWh |
| Febbraio | 45 | 400 | 18000 | 40 | 7,4 | 11 | 1364 kWh |
| Marzo | 45 | 400 | 18000 | 40 | 9,1 | 24,5 | 2879 kWh |
| Aprile | 45 | 400 | 18000 | 40 | 10,6 | 12 | 1342 kWh |
| Maggio | 45 | 400 | 18000 | 40 | 12,5 | 25 | 2615 kWh |
| Giugno | 0 | 400 | 0 | 40 | 14 | 23,5 | 0 kWh |
| Luglio | 0 | 400 | 0 | 40 | 15 | 0 | 0 kWh |
| Agosto | 45 | 400 | 18000 | 40 | 14,7 | 0 | 0 kWh |
| Settembre | 45 | 400 | 18000 | 40 | 13,4 | 22 | 2225 kWh |
| Ottobre | 45 | 400 | 18000 | 40 | 11,1 | 16,5 | 1813 kWh |
| Novembre | 45 | 400 | 18000 | 40 | 8,9 | 24 | 2838 kWh |
| Dicembre | 45 | 400 | 18000 | 40 | 7,5 | 17 | 2101 kWh |
| Totale | | | | | | 195 g | 19625 kWh |

Tab. X-19 Fabbisogno di ACS : Mensa

| | V_w [L/giorno] | | | θ_{gr} [°C] | θ_o [°C] | N [giorni] | Q_{DHW} [kWh] |
|---------------|-----------------------|---------------|-------------|-----------------------|--------------------|---------------|--------------------|
| | a [L/settimana.m²] | N_u [m²] | L/settimana | | | | |
| Gennaio | 90 | 130 | 64350 | 40 | 7 | 19,5 | 8749 kWh |
| Febbraio | 90 | 130 | 64350 | 40 | 7,4 | 11 | 4875 kWh |
| Marzo | 90 | 130 | 64350 | 40 | 9,1 | 24,5 | 10292 kWh |
| Aprile | 90 | 130 | 64350 | 40 | 10,6 | 12 | 4796 kWh |
| Maggio | 90 | 130 | 64350 | 40 | 12,5 | 25 | 9347 kWh |
| Giugno | 90 | 130 | 64350 | 40 | 14 | 23,5 | 8307 kWh |
| Luglio | 90 | 0 | 0 | 40 | 15 | 0 | 0 kWh |
| Agosto | 90 | 0 | 0 | 40 | 14,7 | 0 | 0 kWh |
| Settembre | 90 | 130 | 64350 | 40 | 13,4 | 22 | 7956 kWh |
| Ottobre | 90 | 130 | 64350 | 40 | 11,1 | 16,5 | 6483 kWh |
| Novembre | 90 | 130 | 64350 | 40 | 8,9 | 24 | 10148 kWh |
| Dicembre | 90 | 130 | 64350 | 40 | 7,5 | 17 | 7511 kWh |
| Totale | | | | | | 195 g | 78464 kWh |

Tab. X-18 Fabbisogno di ACS : Palestra

| | V_w [L/giorno] | | | θ_{er} [°C] | θ_o [°C] | N [giorni] | Q_{DHW} [kWh] |
|---------------|------------------------------------|----------------------------|-------------|-----------------------|--------------------|---------------|--------------------|
| | a [L/settimana.m ²] | N_u [m ²] | L/settimana | | | | |
| Gennaio | 1,25 | 555 | 693,75 | 40 | 7 | 19,5 | 94 kWh |
| Febbraio | 1,25 | 555 | 693,75 | 40 | 7,4 | 11 | 53 kWh |
| Marzo | 1,25 | 555 | 693,75 | 40 | 9,1 | 24,5 | 111 kWh |
| Aprile | 1,25 | 555 | 693,75 | 40 | 10,6 | 12 | 52 kWh |
| Maggio | 1,25 | 555 | 693,75 | 40 | 12,5 | 25 | 101 kWh |
| Giugno | 1,25 | 555 | 693,75 | 40 | 14 | 23,5 | 90 kWh |
| Luglio | 1,25 | 555 | 693,75 | 40 | 15 | 0 | 0 kWh |
| Agosto | 1,25 | 555 | 693,75 | 40 | 14,7 | 0 | 0 kWh |
| Settembre | 1,25 | 555 | 693,75 | 40 | 13,4 | 22 | 86 kWh |
| Ottobre | 1,25 | 555 | 693,75 | 40 | 11,1 | 16,5 | 70 kWh |
| Novembre | 1,25 | 555 | 693,75 | 40 | 8,9 | 24 | 109 kWh |
| Dicembre | 1,25 | 555 | 693,75 | 40 | 7,5 | 17 | 81 kWh |
| Totale | | | | | | 195 g | 846 kWh |

Tab. X-21 Fabbisogno di ACS : CIO

| | superficie per 1 alloggio | numero alloggi | V_w [L/giorno] | | | θ_{er} [°C] | θ_o [°C] | N [giorni] | Q_{DHW} [kWh] |
|---------------|------------------------------|-------------------|-------------------------------|----------------------------|-------------|-----------------------|--------------------|---------------|--------------------|
| | | | [L/settimana.m ²] | N_u [m ²] | L/settimana | | | | |
| Gennaio | 90 | 6 | 0,2 | 6768,7 | 1353,74 | 40 | 7 | 19,5 | 184,05 kWh |
| Febbraio | 90 | 6 | 0,2 | 6768,7 | 1353,74 | 40 | 7,4 | 11 | 102,56 kWh |
| Marzo | 90 | 6 | 0,2 | 6768,7 | 1353,74 | 40 | 9,1 | 24,5 | 216,52 kWh |
| Aprile | 90 | 6 | 0,2 | 6768,7 | 1353,74 | 40 | 10,6 | 12 | 100,90 kWh |
| Maggio | 90 | 6 | 0,2 | 6768,7 | 1353,74 | 40 | 12,5 | 25 | 196,63 kWh |
| Giugno | 90 | 6 | 0 | 6768,7 | 0 | 40 | 14 | 23,5 | 0,00 kWh |
| Luglio | 90 | 6 | 0 | 6768,7 | 0 | 40 | 15 | 0 | 0,00 kWh |
| Agosto | 90 | 6 | 0,2 | 6768,7 | 1353,74 | 40 | 14,7 | 0 | 0,00 kWh |
| Settembre | 90 | 6 | 0,2 | 6768,7 | 1353,74 | 40 | 13,4 | 22 | 167,37 kWh |
| Ottobre | 90 | 6 | 0,2 | 6768,7 | 1353,74 | 40 | 11,1 | 16,5 | 136,38 kWh |
| Novembre | 90 | 6 | 0,2 | 6768,7 | 1353,74 | 40 | 8,9 | 24 | 213,48 kWh |
| Dicembre | 90 | 6 | 0,2 | 6768,7 | 1353,74 | 40 | 7,5 | 17 | 158,02 kWh |
| Totale | | | | | | | | 195 g | 1475,9 kWh |

Tab. X-20 Fabbisogno di ACS : Alloggi

| | Consumo quotidiano [L/giorno] | QDHW,year [kWh] |
|--------------------------------------|-------------------------------|--------------------|
| Parte insegnamento e amministrazione | 246,1 L | 1 476 kWh |
| Mensa | 3 272,7 L | 19 625 kWh |
| Palestra | 11700 L | 78 465 kWh |
| Totale scuola | 15 218,9 L | 99 565 kWh |
| CIO | 126,1 L | 11 457 kWh |
| Alloggi | 930 L | 846 kWh |
| TOTALE | 16 275 L/giorno | 111 868 kWh |

Tab. X-22 Sintesi del fabbisogno termico di ACS

La potenza massima necessaria per la produzione d'ACS è di 30kW.

4. CONSUMO ELETTRICO

a. Illuminazione

Il calcolo del fabbisogno elettrico per l'illuminazione si svolge utilizzando la seguente formula :

$$Q_{illu} = \sum (P - E) \cdot (1 - D) \cdot n_u \cdot Q_i \cdot S_i \cdot N_a$$

Con

- Q_{illu} : Fabbisogno elettrico annuale di illuminazione [Wh]
- P : periodo di funzionamento quotidiano possibile [ore]
- E : spegnimento a mezzogiorno [h]
- D : Daylight autonomy (% dell'arco di tempo entro il quale l'illuminazione naturale è sufficiente) [%]
- n_u : coefficiente d'uso della zona [%]
- Q_i : potenza d'illuminazione per m² della zona i [W/m²]
- S_i : superficie della zona i [m²]
- N_a : numero di giorni di funzionamento durante l'anno [giorni]

Le alte prestazioni energetiche dei sistemi a LED permettono attualmente di raggiungere una bassa potenza d'illuminazione pari a 6 W/m². Per poter godere di una certa flessibilità nella scelta dei sistemi d'illuminazione, la potenza d'illuminazione viene considerata pari a 7 W/m² per gli spazi studio. Le altre potenze corrispondono ad un' illuminazione con sistemi CFL (compact fluorescent lamp).

| illuminamento medio richiesto [lux] | Potenza elettrica necessaria con sistema CFL (compact fluorescent lamp) [W/m ²] |
|-------------------------------------|---|
| 100 lux | 4,8 W/m ² |
| 150 lux | 7,2 W/m ² |
| 200 lux | 9,6 W/m ² |
| 300 lux | 14,4 W/m ² |

FONTE : UCL

Tab. X-23 Potenza elettrica necessaria a seconda dell' illuminamento richiesto

TAVOLA X-4

L'energia elettrica assorbita annualmente dai dispositivi di controllo e dalle batterie di ricarica dei sistemi di illuminazione d'emergenza è considerata pari a 1,4 kWh/m². Questo valore corrisponde ad un sistema a LED basso consumo.

Il daylight autonomy (% del tempo di illuminazione naturale sufficiente) è stato calcolato con un modello di simulazione Ecotect.

| | Superficie | Illuminamento medio richiesto [lux] | P Periodo di funzionamento quotidiano possibile [h] | E Spegnimento a mezzogiorno [h] | D Daylight autonomy [%] | n _u coefficiente d'uso della zona [%] | Durata d'uso [h] | Q _i Potenza d'illuminazione per m ² [W/m ²] | Potenza necessaria per la zona [kW] | Q _{illu} Consumo annuale [kWh/anno] |
|---|-----------------------------|-------------------------------------|--|------------------------------------|----------------------------|---|--------------------------|--|-------------------------------------|---|
| spazi di studio | 4171,4 m ² | 300 lux | 10,0 h | 2,0 h | 86% | 100,0% | 1,1 h | 7,0 W/m ² | 29,20 kW | 6377,2 kWh |
| corridoi | 1503,1 m ² | 150 lux | 10,0 h | 0,0 h | 90% | 100,0% | 1,0 h | 6,0 W/m ² | 9,02 kW | 1758,7 kWh |
| scale | 46,2 m ² | 150 lux | 10,0 h | 2,0 h | 0% | 100,0% | 8,0 h | 6,0 W/m ² | 0,28 kW | 432,4 kWh |
| bagni | 273,5 m ² | 200 lux | 10,0 h | 2,0 h | 20% | 40,0% | 2,6 h | 10,0 W/m ² | 2,74 kW | 1365,5 kWh |
| mensa | 374,0 m ² | 300 lux | 5,0 h | 0,0 h | 80% | 80,0% | 0,8 h | 20,0 W/m ² | 7,48 kW | 1166,7 kWh |
| cucina della mensa | 111,7 m ² | 300 lux | 5,0 h | 0,0 h | 50% | 100,0% | 2,5 h | 15,0 W/m ² | 1,68 kW | 817,0 kWh |
| archivi | 907,7 m ² | 150 lux | 10,0 h | 2,0 h | 0% | 15,0% | 1,2 h | 5,0 W/m ² | 4,54 kW | 1062,0 kWh |
| parcheggio | 1990,9 m ² | 150 lux | 10,0 h | 2,0 h | 0% | 25,0% | 2,0 h | 5,0 W/m ² | 9,95 kW | 3882,3 kWh |
| spazi esterni | 0,0 m ² | | 10,0 h | 2,0 h | 0% | | 0,0 h | 5,0 W/m ² | 0,00 kW | 0,0 kWh |
| energia elettrica assorbita annualmente dai dispositivi di controllo e dalle batterie di ricarica dei sistemi di illuminazione di emergenza | 9378,6 m ² | - | - | - | - | - | kWh/m ² .anno | 1,4 kWh/m ² | | 13130,0 kWh |
| TOTALE | 9378,6 m² | | | | | | | | TOTALE | 29 991,9 kWh |
| | | | | | | | | | | 3,2 kWh/m² |

SCUOLA

| | Superficie | Illuminamento medio richiesto [lux] | P Periodo di funzionamento quotidiano possibile [h] | E Estinzione a mezzogiorno [h] | D Daylight autonomy [%] | n _u coefficiente d'uso della zona [%] | Durata d'uso [h] | Q _i Potenza d'illuminazione per m ² [W/m ²] | Potenza necessaria per la zona [kW] | Q _{illu} Consumo annuale [kWh/anno] |
|---|----------------------|-------------------------------------|--|-----------------------------------|----------------------------|---|------------------|--|-------------------------------------|---|
| CIO | 555,0 m ² | 300 lux | 10,0 h | 2,5 h | 75% | 100,0% | 1,9 h | 7,0 W/m ² | 3,89 kW | 1420,5 kWh |
| "energia elettrica parassita assorbita annualmente dai dispositivi di controllo e dalle batterie di ricarica dei sistemi di illuminazione di emergenza" | 555,0 m ² | - | - | - | - | - | - | 1,4 kWh/m ² .an | | 777,0 kWh |

CIO

| | Periodo di funzionamento [h] | Potenza per m ² [W/m ²] | Potenza totale F4 [W] | Potenza totale F5 [W] | Consumo annuale F4 [kWh] | Consumo annuale F5 [kWh] | Consumo annuale F4 [kWh/m ²] | Consumo annuale F5 [kWh/m ²] |
|---------|------------------------------|--|-----------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|--|--|
| Alloggi | 4 | 10 | 850 | 1050 | 310,25 kWh | 383,25 kWh | 3,65 | 4,51 |

ALLOGGI
CONSUMO ELETTRICO PER L'ILLUMINAZIONE

■ b. Consumo per la burotica e l'uso domestico

La valutazione del consumo elettrico per gli usi diversi dall'illuminazione tiene conto di :

- burotica e l'apparecchiatura degli utenti
- ascensori
- apparecchiatura della mensa scolastica
- elettrodomestici per gli alloggi

■ c. Sintesi

| | Consumo annuale [kWh] | Consumo annuale [kWh/m ²] |
|--|-----------------------|---------------------------------------|
| PARTE SCUOLA | | |
| Illuminazione | 29 992 kWh | 3,69 kWh/m ² |
| burotica | 40 411 kWh | 4,97 kWh/m ² |
| ascensore | 291 kWh | 0,04 kWh/m ² |
| mensa | 37 347 kWh | 4,59 kWh/m ² |
| Totale Scuola | 108 040 kWh | 13,29 kWh/m ² |
| PARTE ALLOGGI | | |
| Illuminazione | 1934 kWh | 3,23 kWh/m ² |
| fabbisogno domestico (senza illuminazione) | 22 360 kWh | 37,38 kWh/m ² |
| ascensore | 48 kWh | 0,08 kWh/m ² |
| Totale Alloggi | 24 343 kWh | 40,7 kWh/m ² |
| PARTE CIO | | |
| Illuminazione | 2 198 kWh | 3,96 kWh/m ² |
| burotica | 1 771 kWh | 3,19 kWh/m ² |
| Totale CIO | 3 968 kWh | 7,15 kWh/m ² |
| TOTALE | 272 701 kWh | 35,06 kWh/m² |

Tab. X-24 Consumo elettrico annuale per la scuola, gli alloggi ed il CIO

■ d. Conclusione : Bbio secondo la RT2012

La nuova regolamentazione francese RT2012 si serve di un indicatore adimensionale chiamato Bbio per classificare le prestazioni bioclimatiche dei nuovi edifici. Il Bbio dell'edificio non deve superare un Bbiomax calcolato a seconda della zona geografica e della funzione dell'edificio. Nel nostro caso $Bbio_{max} = 44$.

Tale indicatore, che dipende dal fabbisogno termico per il riscaldamento ambientale e dal fabbisogno elettrico per l'illuminazione, si calcola con la seguente formula :

$$B_{bio} = 2 \cdot Q_{risc} + 5 \cdot Q_{illu}$$

Con

Q_{risc} = fabbisogno termico annuale per il riscaldamento ambientale [kWh/m²]

Q_{illu} = fabbisogno elettrico annuale per l'illuminazione [kWh/m²]

| | |
|---|--|
| Q_{risc} = fabbisogno termico annuale per il riscaldamento ambientale [kWh/m ²] | 10,47 kWh/m ² |
| Q_{illu} = fabbisogno elettrico annuale per l'illuminazione [kWh/m ²] | 3,68 kWh/m ² |
| Bbio | 40 < Bbio_{max} (44) |

Tab. X-25 Verifica del Bbio secondo la RT2012

E. SCELTA DEL SISTEMA IMPIANTISTICO DI VENTILAZIONE E DI RISCALDAMENTO

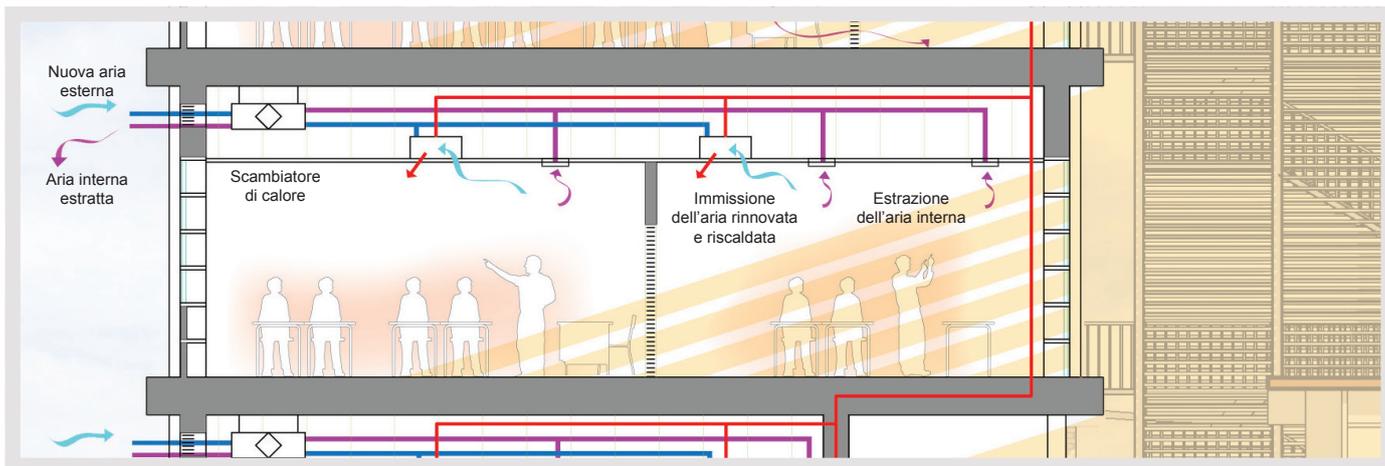


Fig. X-23 Schema del principio del funzionamento degli impianti a controsoffitto

1. AULE SCOLASTICHE

a. Strategia

Il progetto ha diversi requisiti :

- La flessibilità degli spazi d'apprendimento con la possibilità di cambiare facilmente la disposizione interna delle pareti è un caratteristica fondamentale del progetto. Il sistema impiantistico di ventilazione e di riscaldamento è stato scelto per seguire questa strategia.
- Il programma richiede anche di dare la possibilità agli utenti di controllare la temperatura interna di ogni aula ($\pm 2^\circ\text{C}$).
- Il funzionamento di una scuola con la presenza intermittente degli studenti richiede una grande reattività del sistema di riscaldamento

Questi requisiti ci portano a scegliere un sistema decentralizzato di ventil-convettori organizzati intorno ad ogni platea con un insieme di unità di piccole dimensioni distribuite regolarmente.

L'intero sistema di ricambio d'aria e di riscaldamento ambientale si colloca nel controsoffitto, con delle bocchette di presa d'aria distribuite in facciata. Un insieme di scambiatori di calore, associati alle prese d'aria ed ai ventil-convettori, sono distribuiti su ogni platea attraverso una rete di canali di circolazione.

b. Dimensionamento della rete di erogazione

La disposizione del sistema impiantistico è stata studiata sulla platea centrale al primo piano.

La possibilità di spostare le pareti in maniera flessibile ci consente di assicurare la presenza di almeno un diffusore di calore per aula.

La disposizione del sistema impiantistico permette di regolare gli apporti di calore per ogni ventil-convettore. L'organizzazione, basata su quattro scambiatori di calore indipendenti, permette agli utenti di regolare, per ogni gruppo di due o quattro ventil-convettori, l'accensione e la portata della ventilazione.

Per evitare una velocità dell'aria troppo alta e sgradevole per gli utenti, è necessario posizionare i diffusori lontano dalle pareti. La collocazione delle bocchette di diffusione di aria è studiata per essere distanti almeno 1,2m dalle pareti. Nel caso in cui i diffusori siano vicini alla parete, potranno rimanere spenti: gli altri diffusori dell'aula risulteranno sufficienti per riscaldare l'ambiente.

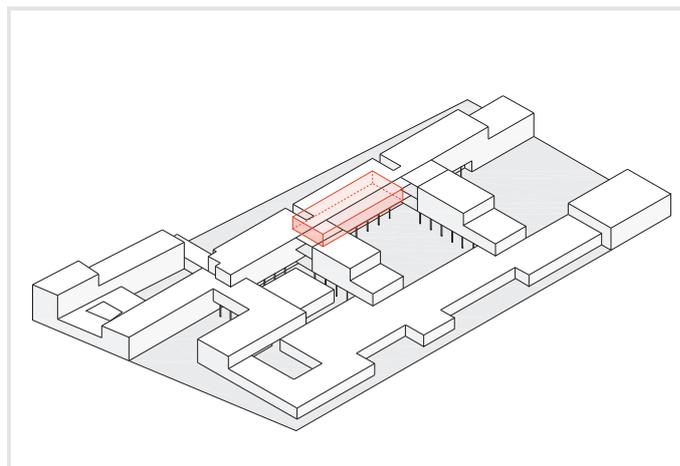
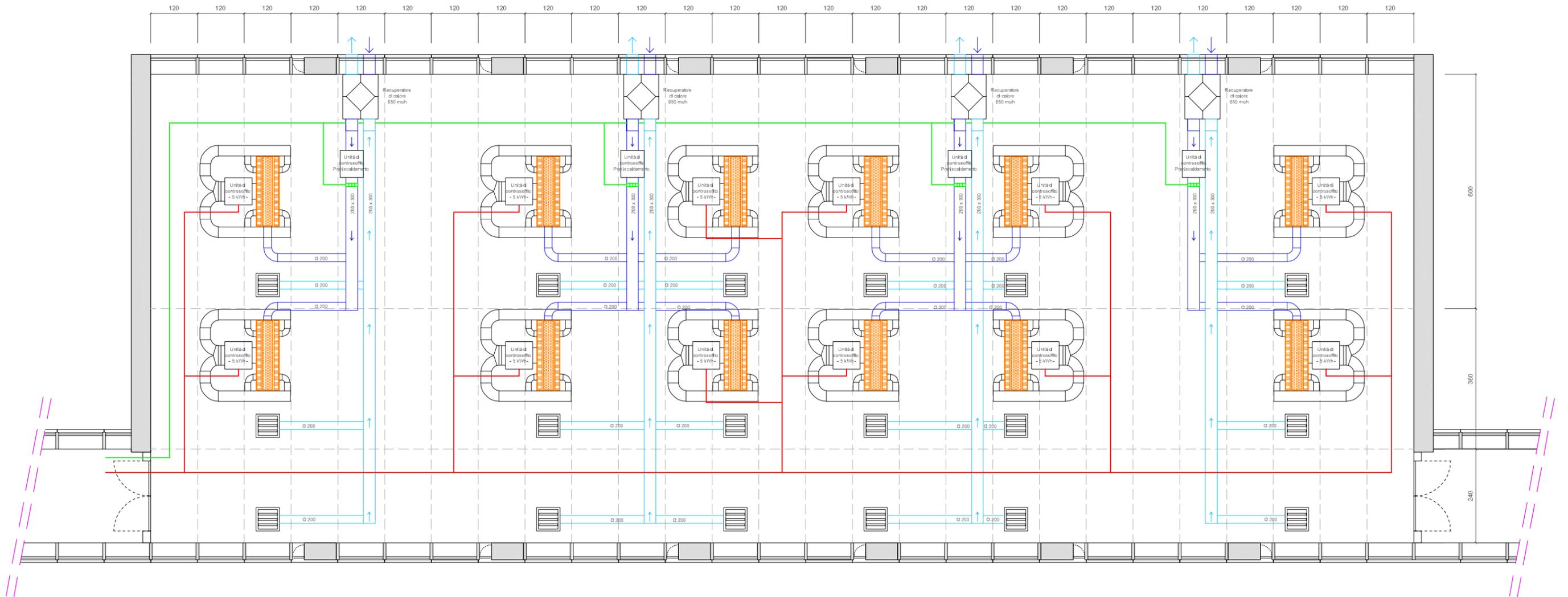


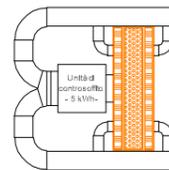
Fig. X-24 Zona di studio: platea centrale al primo piano

| | |
|--|--|
| Superficie | 369 m ² |
| Altezza interna | 3 m |
| Portata d'aria massima | 2180 m ³ /h = 5,9 m ³ /h.m ² |
| Potenza termica massima per l'aria primaria | 13,08 kW |
| Dispersioni massime per trasmissione | 4 kW |
| Potenza termica totale massima per il riscaldamento ambientale | 17,08 kW = 46,3 W/m ² |

Tab. X-26 Dati di dimensionamento degli impianti



- Fluido termovettore per il riscaldamento ambientale [45°C] dalla pompa di calore ad acqua di falda
- Acque pressurizzate per l'umidificazione dell'aria con acqua atomizzata ad alta pressione dalla stazione di pompaggio di ogni piano
- Condotte di immissione dell'aria rinnovata
- ← Condotte di estrazione dell'aria interna



Diffusore di calore e dell'aria rinnovata



Unità di preriscaldamento e di umidificazione dell'aria rinnovata



Ripresa dell'aria interna



Scambiatore di calore a doppio-flusso

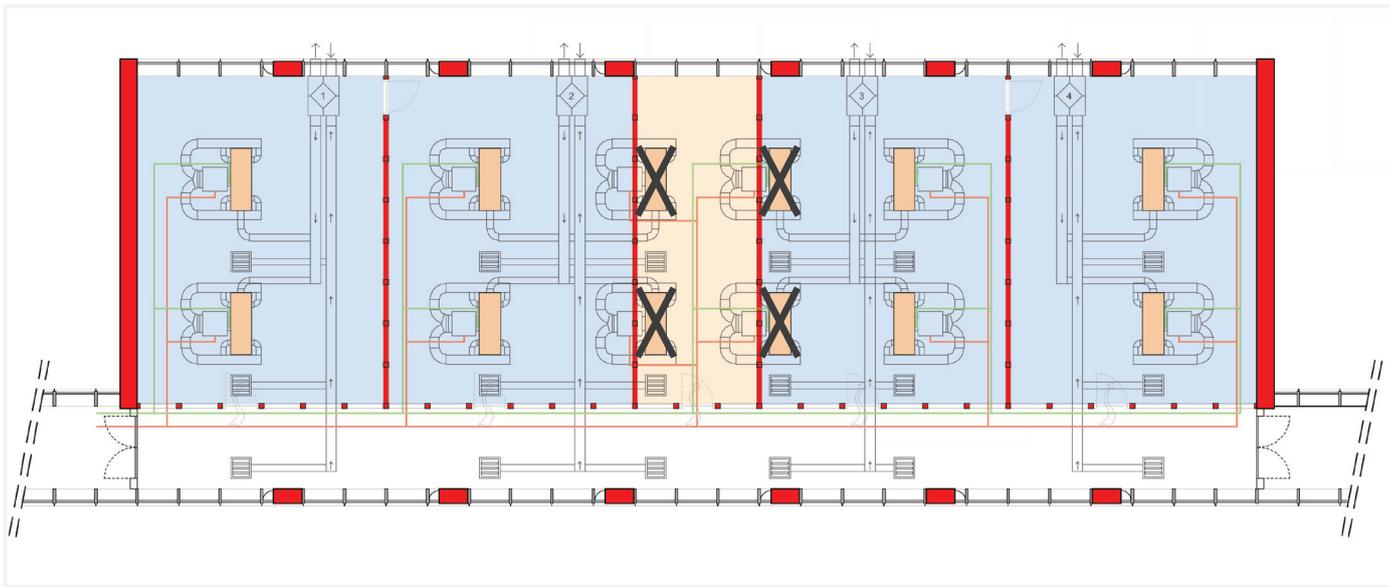


Fig. X-25 Flessibilità dell'organizzazione dei diffusori nel controsoffitto : Combinazione A con quattro diffusori spenti

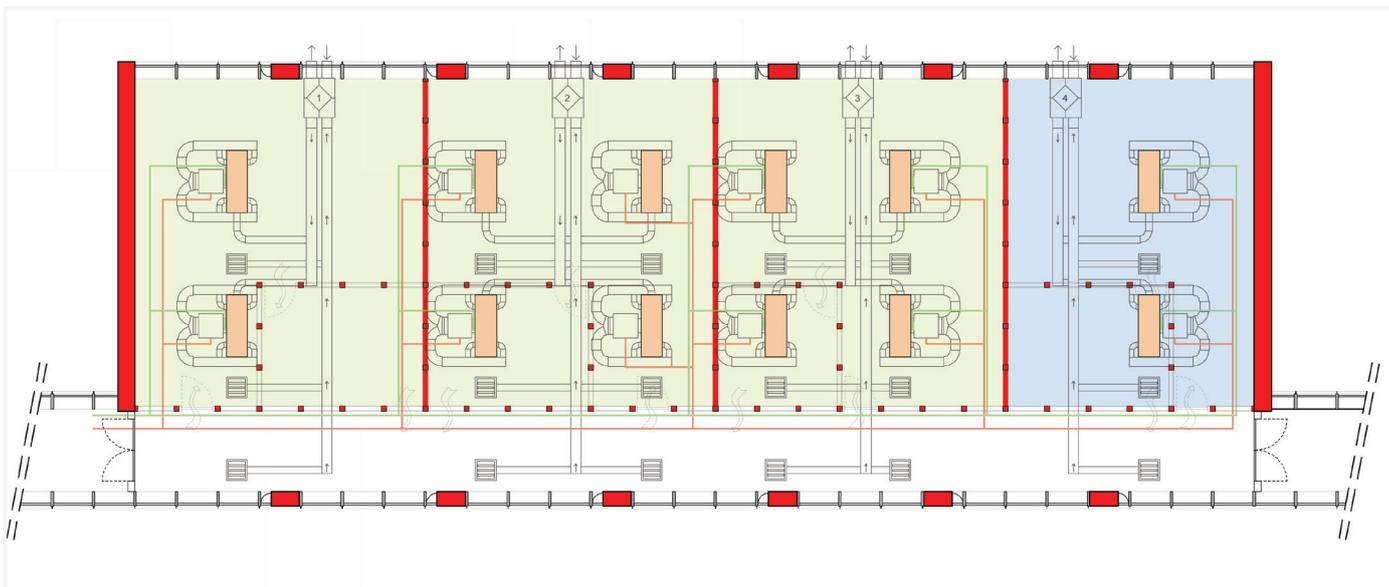


Fig. X-26 Flessibilità dell'organizzazione dei diffusori nel controsoffitto : Combinazione B

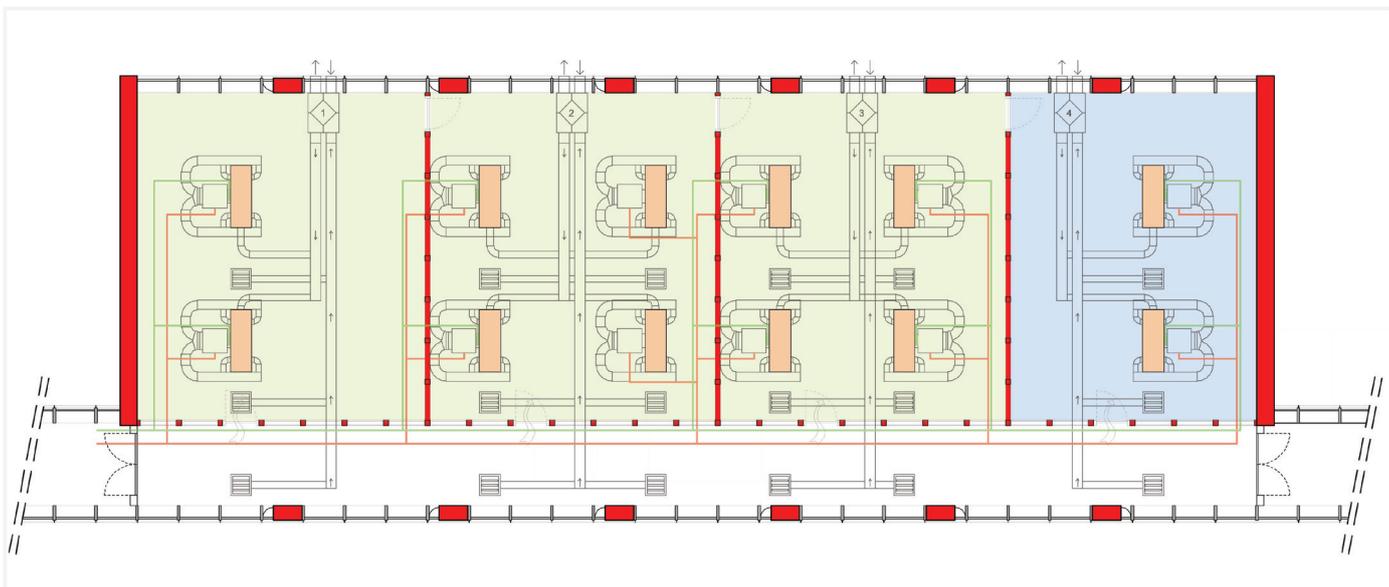


Fig. X-27 Flessibilità dell'organizzazione dei diffusori nel controsoffitto : Combinazione C

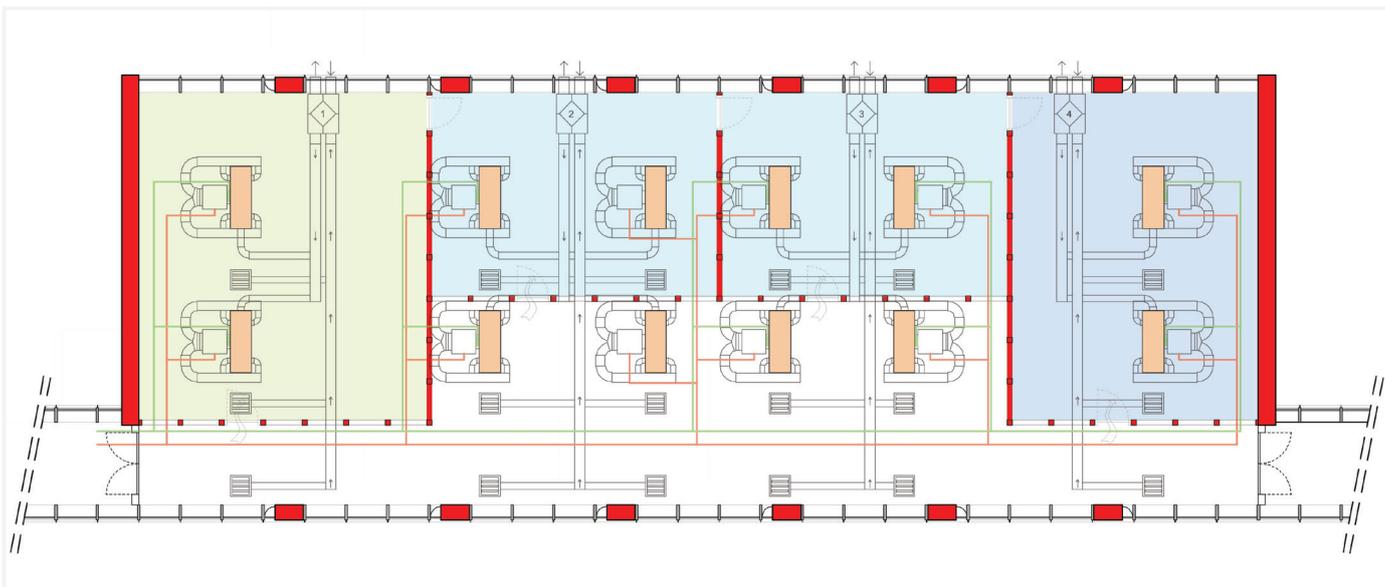


Fig. X-28 Flessibilità dell'organizzazione dei diffusori nel controsoffitto : Combinazione D

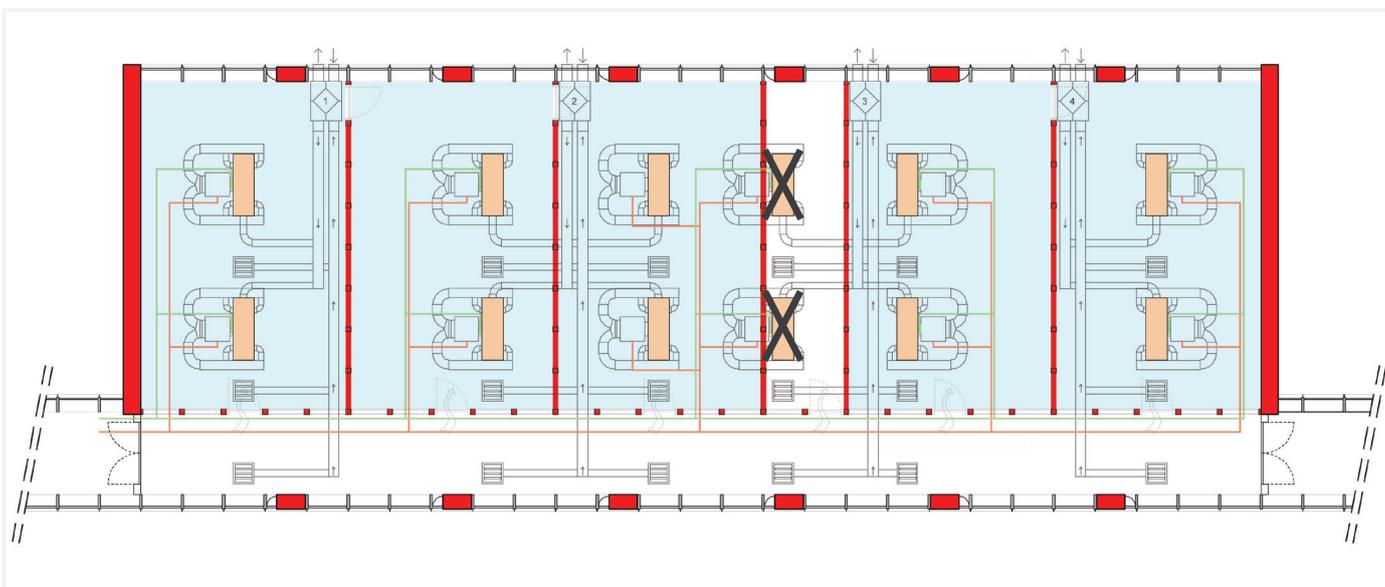


Fig. X-29 Flessibilità dell'organizzazione dei diffusori nel controsoffitto : Combinazione E con due diffusori spenti

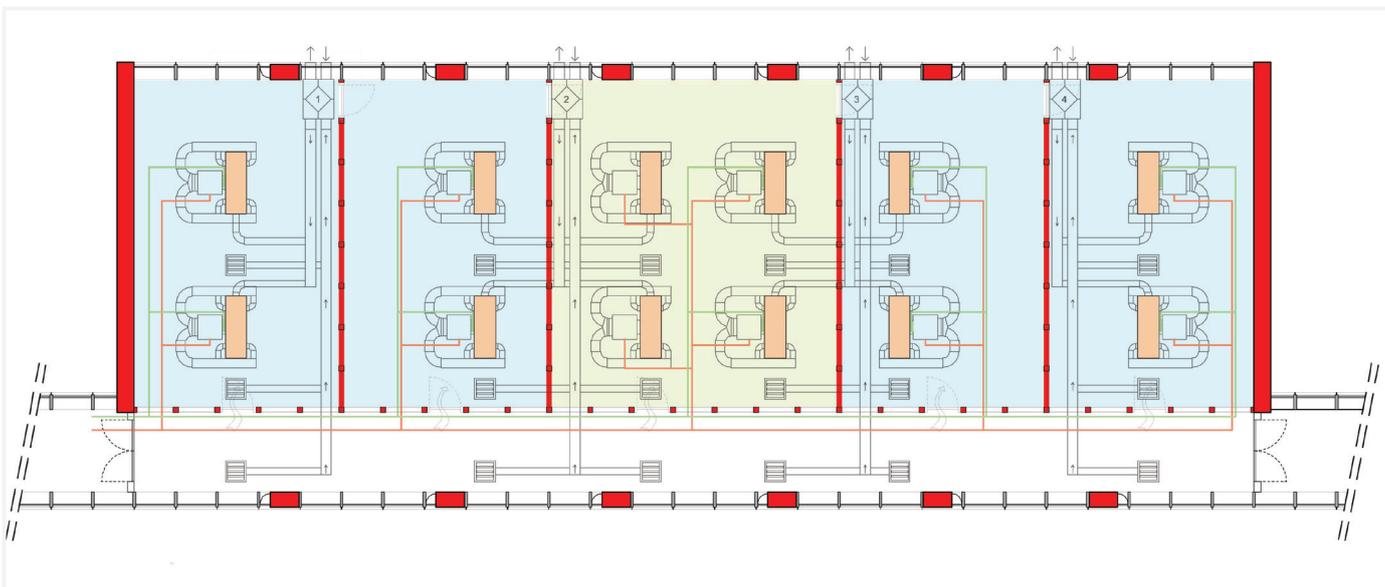


Fig. X-30 Flessibilità dell'organizzazione dei diffusori nel controsoffitto : Combinazione F

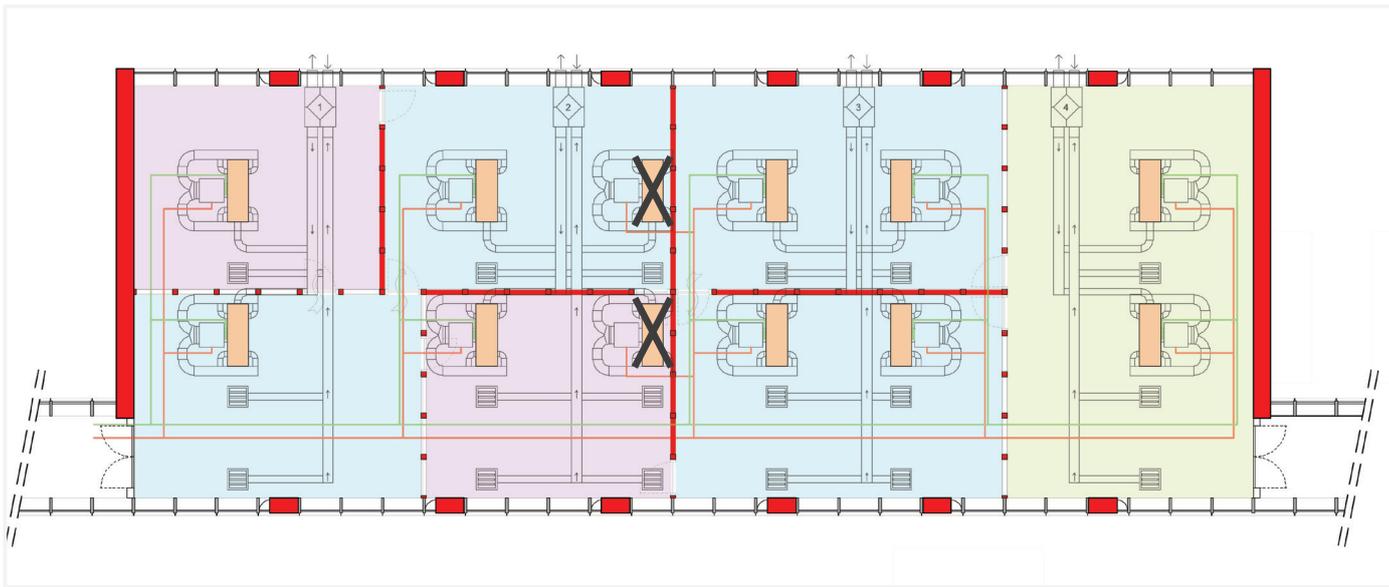


Fig. X-31 Flessibilità dell'organizzazione dei diffusori nel controsoffitto : Combinazione G con due diffusori spenti

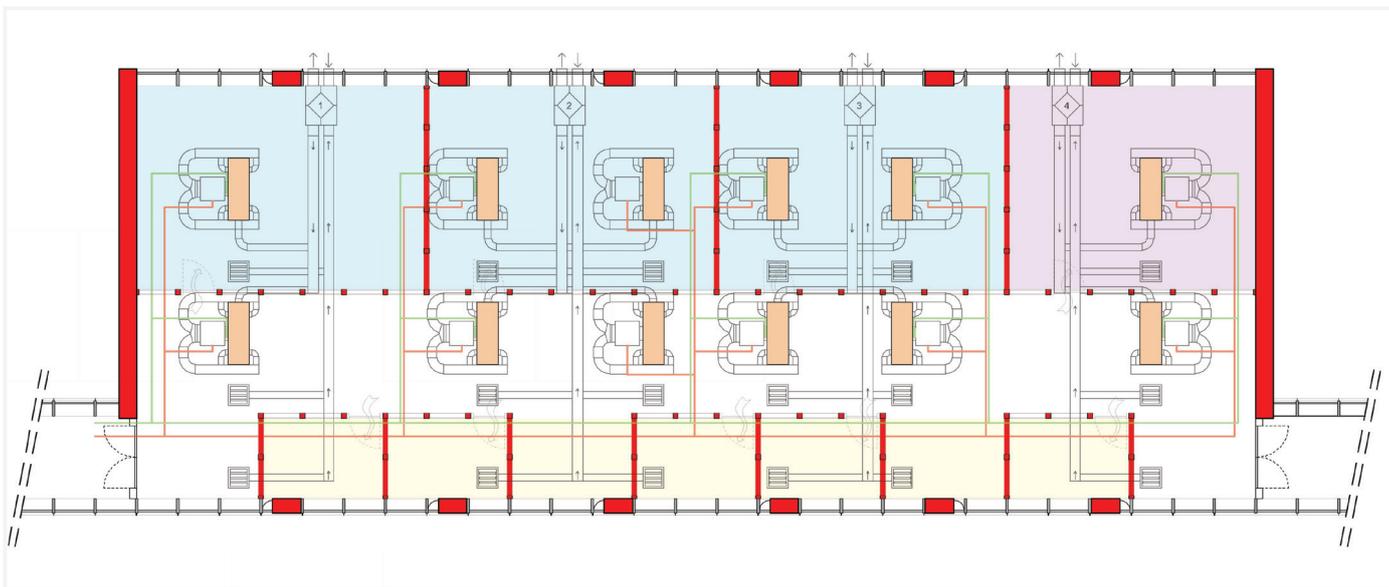


Fig. X-32 Flessibilità dell'organizzazione dei diffusori nel controsoffitto : Combinazione H

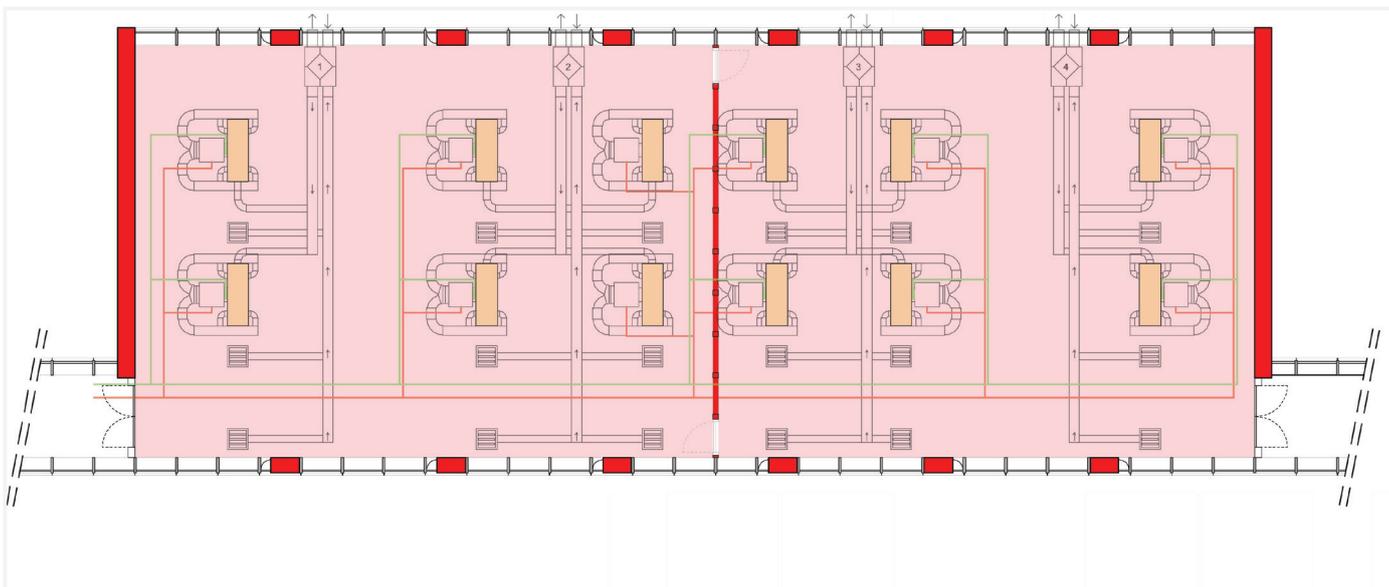


Fig. X-33 Flessibilità dell'organizzazione dei diffusori nel controsoffitto : Combinazione I

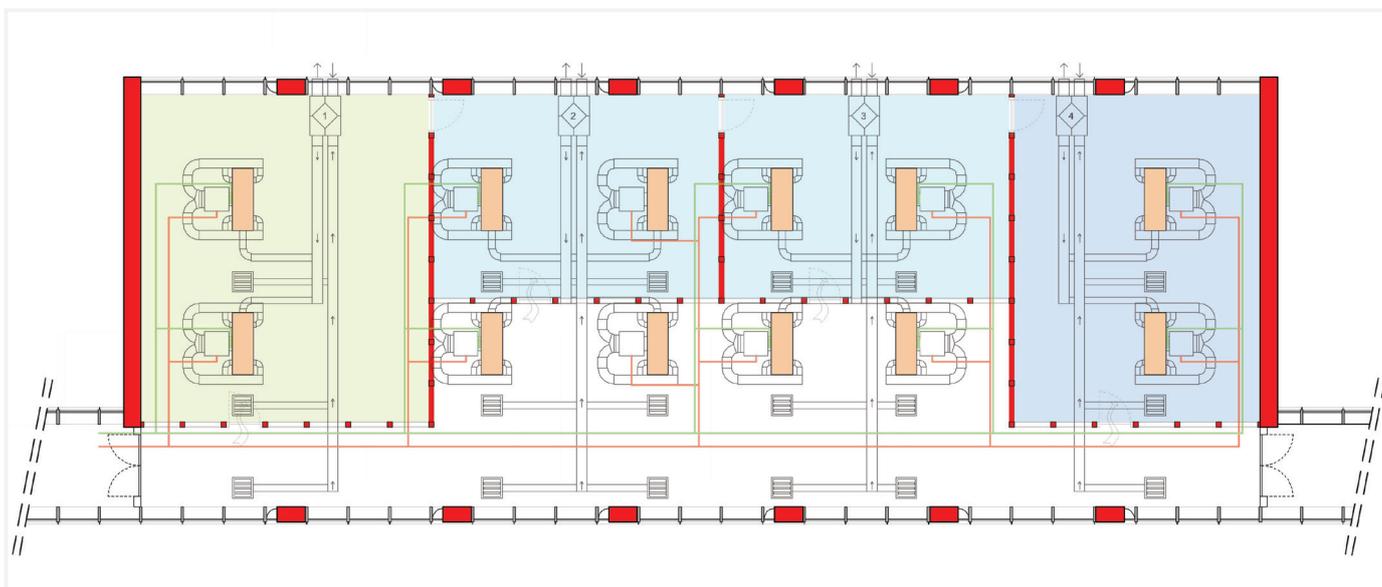


Fig. X-36 Flessibilità dell'organizzazione dei diffusori nel controsoffitto : Combinazione J

c. Scelta delle unità di controsoffitto

Si usa un insieme di 12 unità di controsoffitto (tipo FXMQ-PVE di Daikin) con una potenza di riscaldamento pari 5 kW.

Un'unica unità può fornire una potenza sufficiente per 108 m² (5000/46,3).

Un'unità consuma 140 W di potenza elettrica per il suo funzionamento.



Fig. X-35 Esempio di modello di unità di controsoffitto : FXMQ-PVE di Daikin

| 1-1 Dati tecnici | | | | FXMQ40PVE | FXMQ50PVE | FXMQ63PVE | FXMQ80PVE | FXMQ100PVE | FXMQ125PVE | |
|--------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|--|
| Capacità | Raffreddamento | kW | 4.5 | 5.6 | 7.1 | 9.0 | 11.2 | 14.0 | | |
| | Riscaldamento | kW | 5.0 | 6.3 | 8.0 | 10.0 | 12.5 | 16.0 | | |
| Potenza assorbita (50Hz) | Raffreddamento | kW | 0.194 | 0.215 | 0.230 | 0.298 | 0.376 | 0.461 | | |
| | Riscaldamento | kW | 0.182 | 0.203 | 0.218 | 0.286 | 0.364 | 0.449 | | |
| Potenza assorbita (60Hz) | Raffreddamento | kW | 0.193 | 0.214 | 0.229 | 0.297 | 0.375 | 0.460 | | |
| | Riscaldamento | kW | 0.182 | 0.203 | 0.218 | 0.286 | 0.364 | 0.449 | | |
| Copertura | Materiale Lamiera in acciaio zincato | | | | | | | | | |
| Dimensioni | Unità | Altezza | mm | 300 | | | | | | |
| | | Larghezza | mm | 700 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,400 | 1,400 | |
| | | Profondità | mm | 700 | | | | | | |
| Peso | Peso dispositivo | kg | 28 | 36 | 36 | 36 | 46 | 46 | | |
| Scambiatore di calore | Dimensioni | Nr. di file | 3 | | | | | | | |
| | | Passo alette | mm | 1.75 | | | | | | |
| | | Superficie anteriore | m ² | 0.148 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.383 | 0.383 | |
| | | Nr. di stadi | 16 | | | | | | | |
| Ventilatore | Tipo Ventilatore Sirocco | | | | | | | | | |
| Portata aria | Raffreddamento | Alto alto | m ³ /min | 16 | 18 | 19.5 | 25 | 32 | 39 | |
| | | Alto | m ³ /min | 13 | 16.5 | 17.5 | 22.5 | 27 | 33 | |
| | | Bassa | m ³ /min | 11 | 15 | 16 | 20 | 23 | 28 | |
| Ventilatore | Prevalenza esterna | Alto | Pa | 160 | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 | |
| | | Standard | Pa | 100 | | | | | | |
| | | Bassa | Pa | 30 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | |
| Motore | Uscita (alto) | W | 140 | 350 | 350 | 350 | 350 | 350 | | |
| | | Trazione Accoppiamento diretto | | | | | | | | |
| Connessione tubazioni | Liquido (D.E.) | Tipo Attacco a cartella | | | | | | | | |
| | | Diametro | mm | 6.35 | 9.52 | 9.52 | 9.52 | 9.52 | 9.52 | |
| | Gas | Tipo Attacco a cartella | | | | | | | | |
| | | Diametro | mm | 12.7 | 15.9 | 15.9 | 15.9 | 15.9 | 15.9 | |
| Drenaggio | Diametro | mm | VP25 (I.D. 32/O.D. 25) | | | | | | | |

Fig. X-34 Tabella tecnica del FXMQ-PVE di Daikin

d. Scelta degli scambiatori di calore

Si usa un insieme di 4 scambiatori di calore (tipo VAM di Daikin) con una portata d'aria pari a 650m³/ora. Sono collocati sulla facciata nord con delle bocchette d'aria. La portata totale può raggiungere quindi 2600 m³/ora. Un'unica unità può fornire una potenza sufficiente per 110 m² (650/5,9).

Un'unità consuma 180 W di potenza elettrica per il suo funzionamento.



Fonte: DAIKIN

Fig. X-37 Esempio di modello di scambiatore di calore: VAM di Daikin

| Nome modello | | | | VAM500FA | | VAM650FA | | |
|---|----|----------------------------|------|---|--------------------|-----------------|-------------|-----|
| Alimentazione | | | | Monofase 220 - 240 V, 50 Hz | | | | |
| Rendimento dello scambio di temperatura | | Ultra-alta | % | 74 | 74 | 74 | 74 | |
| | | Alto | % | 74 | 74 | 74 | 74 | |
| | | Basso | % | 77 | 77 | 77 | 77 | |
| Rendimento dello scambio di entalpia rendimento | | Raffreddamento | | Ultra-alta | % | 58 | 58 | |
| | | | | Alto | % | 58 | 58 | |
| | | | | Basso | % | 63 | 63 | |
| | | Riscaldamento | | Ultra-alta | % | 62 | 63 | 63 |
| | | | | Alto | % | 62 | 63 | |
| | | | | Basso | % | 67 | 66 | |
| Carrozzeria | | | | Lamiera d'acciaio zincato | | | | |
| Materiale isolante | | | | Espanso uretanico autoestinguente | | | | |
| Dimensioni | | A x L x P | mm | 285 x 812 x 800 | | 348 x 988 x 852 | | |
| Sistema di scambio del calore | | | | Scambio totale di calore (calore sensibile + calore latente) a flusso incrociato aria - aria | | | | |
| Elemento di scambio del calore | | | | Carta ignifuga trattata in modo speciale | | | | |
| Filtro depuratore d'aria | | | | Vello fibroso pluridirezionale | | | | |
| Ventilatore | | Tipo | | Ventilatore Sirroco | | | | |
| | | Velocità ventilatore | | Ultra-alta | m ³ / h | 500 | 650 | 650 |
| | | | | Alto | m ³ / h | 500 | 650 | 650 |
| | | | | Basso | m ³ / h | 350 | 500 | 500 |
| | | Pressione statica esterna | | Ultra-alta | Pa | 98 | 93 | 93 |
| | | | | Alto | Pa | 54 | 39 | 39 |
| Basso | Pa | | | 25 | 25 | 25 | | |
| Motore del ventilatore | | | Tipo | Motore ad induzione bifase tramite circuito derivato permanente artificialmente sfasato, con condensatore del tipo aperto, 4 poli x 2 | | | | |
| Potenza del motore | | | kW | 0,090 x 2 | | 0,140 x 2 | | |
| Livello di pressione sonora | | Modalità scambio di calore | | Ultra-alta | dBA | 33 - 34,5 | 34,5 - 35,5 | |
| | | | | Alto | dBA | 31,5 - 33 | 33 - 34 | |
| | | | | Basso | dBA | 24,5 - 26,5 | 27 - 28 | |
| | | Modalità bypass | | Ultra-alta | dBA | 33,5 - 34,5 | 34,5 - 35,5 | |
| | | | | Alto | dBA | 32,5 - 33,5 | 34 - 35 | |
| | | | | Basso | dBA | 25,5 - 27,5 | 27 - 28,5 | |
| Limiti di funzionamento (Ambiente) | | | | -15°C - 50°CBS (80% UR o meno) | | | | |
| Diametro canale di connessione | | | mm | φ 200 | | φ 200 | | |
| Peso | | | kg | 33 | | 48 | | |
| Numero del disegno | | | | 4D036752 | | 4D036753 | | |

Fig. X-38 Tabella tecnica del VAM di Daikin

e. Dimensionamento dei canali d'aria

I canali per l'aria si dimensionano sulla base di perdite di carico lineari non superiori a 0,7 Pa/m.

Per una portata d'aria di 650m³/ora (portata massima di uno scambiatore di calore), il diametro minimo richiesto è di 25 cm. Una condotta rettangolare di 20 cm x 30 cm corrisponde ad un diametro equivalente di 25 cm.

f. Scelta del sistema di umidificazione

L'umidificazione è un processo importante per il benessere degli utenti. Senza di essa, l'umidità relativa (UR) interna conseguente al riscaldamento dell'aria in ingresso a -7°C e 90% di UR sarebbe del 15% circa. Questo valore ci porta fuori dalla zona di comfort. Il processo di umidificazione consente di raggiungere un livello di umidità relativa interna di circa 50%.

L'assenza di un sistema centralizzato di trattamento dell'aria

(UTA) complica l'umidificazione dell'aria rinnovata. Il grande numero di scambiatori di calore con le unità di controsoffitto ci spinge ad utilizzare ad usare un sistema di umidificazione ad acqua atomizzata ad alta pressione. Questo sistema permette di sfruttare l'energia termica d'origine rinnovabile piuttosto che l'energia elettrica in una batteria di umidificazione.

Una stazione di pompaggio pressurizza l'acqua che viene atomizzata da speciali ugelli in acciaio inox nelle condotte. La miscela si effettua dopo il riscaldamento dell'aria che precede la diffusione nell'ambiente. Un'unica stazione di pompaggio può pressurizzare l'acqua per diverse zone a gestione indipendente.

Questa operazione (n° 3 sul diagramma psicrometrico) fa passare l'aria da un'umidità assoluta di 2,07 g/m³ ad un'umidità assoluta pari a 7,05 g/m³ d'aria. Una portata d'aria di 1000 m³/ora necessita di 5 L d'acqua per ora.

L'intera scuola (esclusa la palestra) richiede una portata d'aria massima di 54 842 m³/ora. Il fabbisogno massimo di

produzione d'acqua atomizzata è quindi di 251 kg/ora.

Il sistema di riferimento è Humifog multizona dell'azienda Carel. (www.carel.com). Un'unica stazione di pompaggio produce 100 kg/ora di acqua atomizzata. Ogni piano richiede al massimo circa 30 kg/ora di acqua atomizzata. Il sistema di umidificazione potrà essere distribuito sull'intero edificio posizionando una stazione per ciascun piano della zona d'insegnamento ed una dedicata al piano terra (Tab. X-27).

Una stazione di pompaggio richiede una potenza elettrica di 955 W.

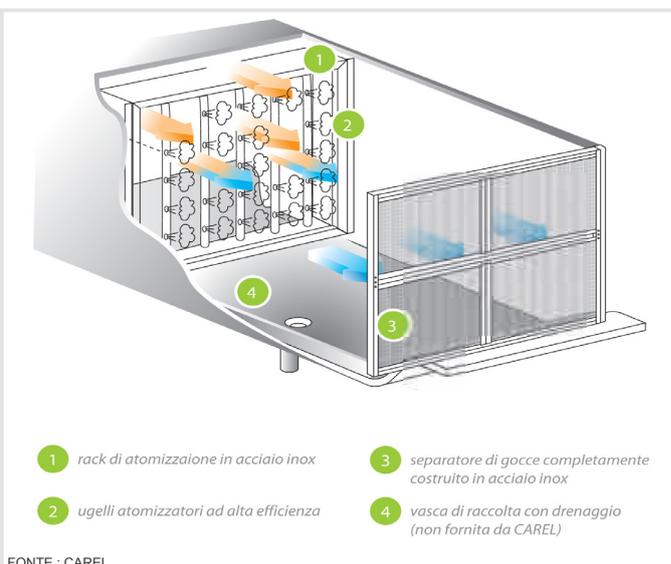


Fig. X-40 Sistema di atomizzazione dell'acqua nelle condotte

| | UA100* | UA200* | UA320* | UA460* | UA600* |
|--|---|--------|--------|--------|--------|
| Caratteristiche | | | | | |
| Modelli controllo | Stazione di pompaggio singlezona, stazione di pompaggio multizona, controllore di zona | | | | |
| Capacità nominali kg/h | 100 | 200 | 320 | 460 | 600 |
| Alimentazione | 230 V, 1 fase, 50 Hz oppure 208 V, 1 fase, 60 Hz | | | | |
| Consumo elettrico Stazione di pompaggio kW | 0,955 | 0,955 | 1,15 | 1,15 | 1,95 |
| Consumo elettrico controllori di zona kW | 0,28 | | | | |
| Condizionamento di funzionamento | 1T40 °C <80 % U.R. non condensante | | | | |
| Condizioni di immagazzinamento | 1T50 °C <80 % U.R. non condensante | | | | |
| Grado di protezione | IP20 | | | | |
| Certificazioni | | | | | |
| Certificazione igienica per applicazioni di condizionamento dell'aria generico | VDI 6022, page 1 (04/06), VDI 3803 (10/02), ONORM H 6021 (09/03), SWKI VA104-01 (04/06), DIN EN 13779 (09/07) | | | | |
| Certificazione igienica per applicazioni ospedaliere | DIN 1946, part 4 (01/94), ONORM H 6020 (02/07)*, SWKI 99-3 (03/04) | | | | |
| Certificazioni | CE ed ETL998 (stazione di pompaggio); ETL508A (controllori di zona) | | | | |
| Ingresso acqua | | | | | |
| Connessione | G3/4" F (NPT3/4F per le versioni UL) | | | | |
| Limiti di temperatura | 1T40 °C / 34T104 °F | | | | |
| Limiti di Pressione | 0,3...0,8 Mpa | | | | |
| Durezza totale (ppm CaCO ₃) | 0...25 | | | | |
| Limite conducibilità µS/cm | 0...50 µS/cm (pompa inox) – 30...50 µS/cm (pompa ottone) | | | | |
| pH | 6,5...8,5 | | | | |
| Uscita acqua | | | | | |
| Connessione | M16,5m DIN 2353 (G3/8" F) (NPT3/8F per le versioni UL) | | | | |
| Scarico acqua | | | | | |
| Connessione | Tubo in acciaio inox φ esterno 10 mm/ 0.4 inch | | | | |
| Comunicazione seriale | protocollo CAREL, Modbus® (altre opzionali) | | | | |
| Regolazione | | | | | |
| Regolazione | Segnale esterno, regolazione di temperatura o umidità; inoltre sonda limite di temperatura o umidità | | | | |
| Tipo segnali ingresso | 0...1 V, 0...10 V, 2...10 V, 0...20 mA, 4...20 mA, NTC | | | | |
| Dimensioni e pesi | | | | | |
| Dimensione stazione di pompaggio (LxWxH) mm | 1030 x 400 x 860 mm | | | | |
| Pesi stazione di pompaggio kg | 85 | 85 | 95 | 95 | 100 |
| Dimensione controllore di zona (LxWxH) mm | 500 x 150 x 580 mm | | | | |
| Peso controllore di zona kg | 19,5 | | | | |

Fig. X-39 Tabella tecnica del sistema Humifog multizona di Carel

| Zona | Portata d'aria massima [m³/ora] | Quantità massima di acqua atomizzata per la zona [kg d'acqua/ora] |
|---|---------------------------------|---|
| Zona A : Insegnamento – piano terra | 8594 m³/ora | 43 kg d'acqua/ora |
| Zona B : Insegnamento primo piano | 13285 m³/ora | 66 kg d'acqua/ora |
| Zona C : Insegnamento secondo piano | 8277 m³/ora | 41 kg d'acqua/ora |
| Zona D : Mensa + Collège aperto + Amministrazione piano terra + Segpa | 20391 m³/ora | 101 kg d'acqua/ora |

Tab. X-27 Tabella riassuntiva delle zone di umidificazione

2. AMMINISTRAZIONE

L'amministrazione della scuola è composta di numerose aule di piccole dimensioni (circa 20 m²). Il sistema di riscaldamento a tutt'aria con unità di controsoffitto non è adatto a questa situazione. I movimenti dell'aria risulterebbero sgradevoli agli utenti ed occorrerebbero numerose unità di controsoffitto a dimensioni ridotte.

Si predilige un sistema ad aria primaria con diffusori d'aria dislocati nei corridoi ed un sistema di riscaldamento composto da unità ambientali di tipo ventil-convettore dislocate in ogni aula. I ventil-convettori saranno alimentati col medesimo fluido vettore a servizio delle unità a controsoffitto.

Per la valutazione del fabbisogno energetico dell'intero edificio, la potenza elettrica necessaria per il funzionamento delle unità di controsoffitto per l'aria primaria e per i ventil-convettori sarà considerato uguale alla potenza del sistema impiantistico delle aule d'insegnamento.

3. PALESTRA

La palestra, composta dallo spazio dedicato alle attività sportive e dal locale tecnico, costituisce una zona termica isolata caratterizzata da un'ampia altezza (6m). Questa zona richiede una portata d'aria di 3432 m³/ora e una potenza termica massima di 29,31 kW.

La progettazione di un sistema di umidificazione dedicato alla palestra può essere evitata grazie ai carichi lantenti elevati in questo tipo di ambiente e ad un basso requisito di comfort.

Si sceglie un sistema a tutt'aria con un'unità di trattamento dell'aria (UTA) dedicata sopra il locale tecnico. Il fluido termovettore utilizzato sarà quello posto a servizio delle unità a controsoffitto.

Questa UTA può essere dimensionata secondo la portata richiesta e la velocità d'uscita dell'aria.

Se si prende come riferimento il catalogo di UTA della Tecfer (www.tecfer.com) si sceglie per la coppia {3 400 m³/ora ; 2,8 m/sec} il modello UT 30 (0,75 m x 1 m). La potenza elettrica necessaria è di 1,6 kW. (Fig. X-41)

Il locale dedicato situato sopra il locale tecnico dell'aula ha dimensioni sufficienti per accogliere questo dispositivo.

4. CIO

I uffici del CIO sono riscaldati con lo stesso sistema impiantistico che colui utilizzato per gli uffici dell'amministrazione della scuola : sistema ad aria primaria con unità di controsoffitto

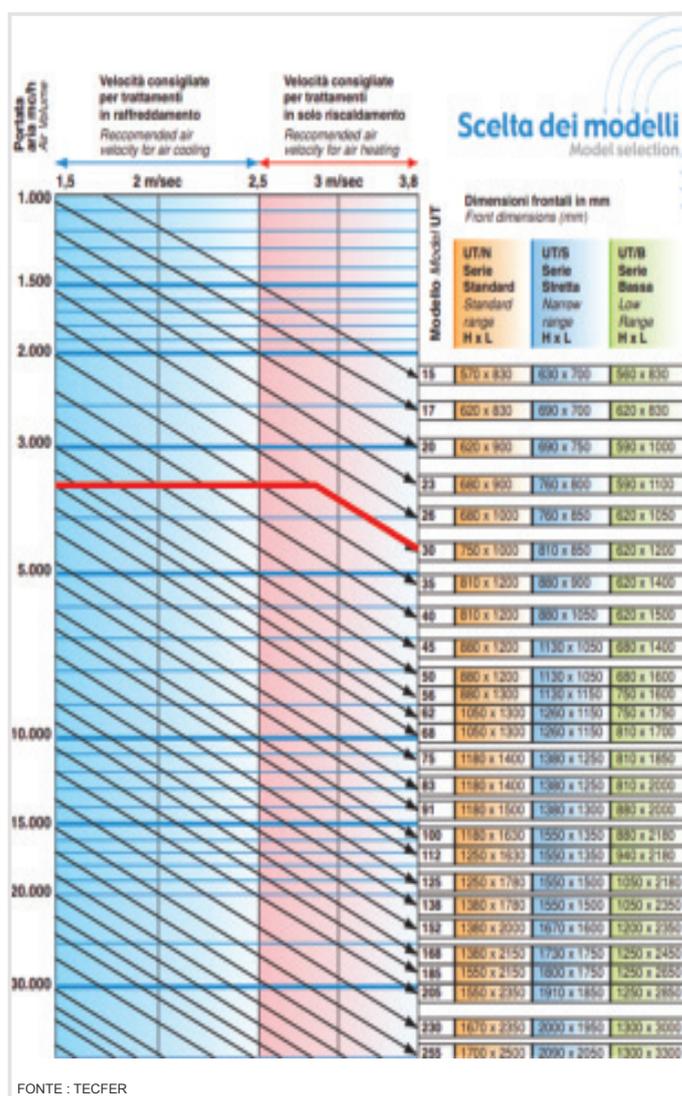


Fig. X-41 Esempio di UTA : FXMQ-PVE di Tecfer

e scambiatori di calore rivolti verso la facciata. Si prevedono inoltre delle unità ambientali (ventil-convettori) nei vari spazi per il riscaldamento.

5. ALLOGGI

Il sistema impiantistico a servizio degli alloggi non sarà dimensionato in maniera approfondita. Si prevede comunque, per ogni alloggio, un sistema di riscaldamento ambientale a solaio radiante ed un sistema di ventilazione meccanica accoppiato a scambiatori di calore di dimensioni ridotte.

6. RIASSUNTO DELL'INTERO SISTEMA IMPIANTISTICO

TAVOLA X-6

Riassunto dei sistemi impiantistici a seconda delle zone : Prima parte.

| | Denominazione della zona | Fabbisogno termico annuale [kWh/m²] | Fabbisogno termico annuale [kWh] | Sistema impiantistico | Umidificazione | Numero scambiatore di calore | Tipo di scambiatore di calore [m²/h] | Potenza necessaria allo scambiatore di calore [kW] | Periodo quotidiano di funzionamento [h] | Numero di giorni in uso | Numero di giorni con ventilazione naturale | Numero di giorni con ventilazione meccanica | Consumo annuale [kWh] |
|----|--------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|--|-------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|--|---|-------------------------|--|---|-----------------------|
| 1 | Principale Ovest_0 | 9,83 | 2192 | Tutt'aria con unità di controsoffitto | con acqua atomizzata (zona A) | 2 | 1000 | 0,46 | 9 | 195 | 77,7 | 117,3 | 971 |
| 2 | Principale Ovest_1 | 9,83 | 3283 | Tutt'aria con unità di controsoffitto | con acqua atomizzata (zona B) | 4 | 650 | 0,28 | 9 | 195 | 77,7 | 117,3 | 1182 |
| 3 | Principale Ovest_2 | 9,83 | 3283 | Tutt'aria con unità di controsoffitto | con acqua atomizzata (zona C) | 4 | 650 | 0,28 | 9 | 195 | 77,7 | 117,3 | 1182 |
| 4 | Principale Centrale_0 | 9,83 | 2673 | Tutt'aria con unità di controsoffitto | con acqua atomizzata (zona A) | 3 | 650 | 0,28 | 9 | 195 | 77,7 | 117,3 | 886 |
| 5 | Principale Centrale_1 | 9,83 | 3631 | Tutt'aria con unità di controsoffitto | con acqua atomizzata (zona B) | 4 | 650 | 0,28 | 9 | 195 | 77,7 | 117,3 | 1182 |
| 6 | Principale Centrale_2 | 9,83 | 3631 | Tutt'aria con unità di controsoffitto | con acqua atomizzata (zona C) | 4 | 650 | 0,28 | 9 | 195 | 77,7 | 117,3 | 1182 |
| 7 | Principale Est_0 | 9,83 | 2112 | Tutt'aria con unità di controsoffitto | con acqua atomizzata (zona A) | 3 | 650 | 0,28 | 9 | 195 | 77,7 | 117,3 | 886 |
| 8 | Principale Est_1 | 9,83 | 5522 | Tutt'aria con unità di controsoffitto | con acqua atomizzata (zona B) | 5 | 650 | 0,28 | 9 | 195 | 77,7 | 117,3 | 147 |
| 9 | Principale Est_2 | 9,83 | 3356 | Tutt'aria con unità di controsoffitto | con acqua atomizzata (zona C) | 3 | 650 | 0,28 | 9 | 195 | 77,7 | 117,3 | 886 |
| 10 | Pilotis Ovest_1 | 9,83 | 2824 | Tutt'aria con unità di controsoffitto | con acqua atomizzata (zona B) | 3 | 650 | 0,28 | 9 | 195 | 77,7 | 117,3 | 886 |
| 11 | Pilotis Ovest-2 | 9,83 | 1612 | Tutt'aria con unità di controsoffitto | con acqua atomizzata (zona C) | 2 | 650 | 0,28 | 9 | 195 | 77,7 | 117,3 | 591 |
| 12 | Pilotis Est_1 | 9,83 | 3621 | Tutt'aria con unità di controsoffitto | con acqua atomizzata (zona B) | 4 | 650 | 0,28 | 9 | 195 | 77,7 | 117,3 | 1182 |
| 13 | Pilotis Est_2 | 9,83 | 2068 | Tutt'aria con unità di controsoffitto | con acqua atomizzata (zona C) | 2 | 650 | 0,28 | 9 | 195 | 77,7 | 117,3 | 591 |
| 14 | CDI_0 | 9,83 | 2038 | Tutt'aria con unità di controsoffitto | con acqua atomizzata (zona A) | 2 | 650 | 0,28 | 9 | 195 | 77,7 | 117,3 | 591 |
| 15 | Segpa_0 | 9,83 | 7077 | Tutt'aria con unità di controsoffitto | con acqua atomizzata (zona D) | 5 | 650 | 0,28 | 9 | 195 | 77,7 | 117,3 | 1477 |
| 16 | Spogliatoi_0 | 9,83 | 2781 | Tutt'aria con unità di controsoffitto | senza | 5 | 1000 | 0,46 | 9 | 195 | 77,7 | 117,3 | 2428 |
| 17 | Palestra_tecnico_0 | 9,83 | 602 | UTA | senza | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 18 | Palestra_aula_0 | 9,83 | 3411 | UTA | senza | 1 | UT30 | 1,6 | 9 | 195 | 77,7 | 117,3 | 1689 |
| 19 | Ammin_0 | 9,83 | 1985 | Tutt'aria con unità di controsoffitto | con acqua atomizzata (zona D) | 2 | 650 | 0,28 | 9 | 195 | 77,7 | 117,3 | 591 |
| 20 | Ammin_1 | 9,83 | 7254 | Ad aria primaria con ventil-convettori | con acqua atomizzata (zona B) | 4 | 650 | 0,28 | 9 | 195 | 77,7 | 117,3 | 1182 |
| 21 | Collège Aperto_0 | 9,83 | 3906 | Tutt'aria con unità di controsoffitto | con acqua atomizzata (zona D) | 6 | 650 | 0,28 | 9 | 195 | 77,7 | 117,3 | 1773 |
| 22 | Mensa_0 | 9,83 | 6605 | Tutt'aria con unità di controsoffitto | con acqua atomizzata (zona D) | 8 | 2000 | 0,92 | 9 | 195 | 77,7 | 117,3 | 7769 |
| 23 | Manutenzione_0 | 9,83 | 2866 | Tutt'aria con unità di controsoffitto | con acqua atomizzata (zona D) | 3 | 650 | 0,28 | 9 | 195 | 77,7 | 117,3 | 886 |
| 24 | Medico-Sociale_0 | 9,83 | 1594 | Tutt'aria con unità di controsoffitto | con acqua atomizzata (zona A) | 2 | 650 | 0,28 | 9 | 195 | 77,7 | 117,3 | 591 |
| 25 | CIO_0 | 15 | 8325 | Ad aria primaria con ventil-convettori | con acqua atomizzata (zona E) | 4 | 1000 | 0,46 | 9 | 195 | 77,7 | 117,3 | 1942 |
| 26 | Alloggi_0 | 15 | 2191 | Ad aria primaria con solaio radiante | senza | 1 | 250 | 0,06 | 6 | 365 | 77,7 | 287,3 | 103 |
| 27 | AlloggiA_1 | 15 | 3180 | Ad aria primaria con solaio radiante | senza | 2 | 250 | 0,06 | 6 | 365 | 77,7 | 287,3 | 206 |
| 28 | AlloggiB_1 | 15 | 1785 | Ad aria primaria con solaio radiante | senza | 1 | 250 | 0,06 | 6 | 365 | 77,7 | 287,3 | 103 |
| 29 | Alloggi_2 | 15 | 1815 | Ad aria primaria con solaio radiante | senza | 1 | 250 | 0,06 | 6 | 365 | 77,7 | 287,3 | 103,428 |

TAVOLA X-7

Riassunto dei sistemi impiantistici secondo la zone : Seconda parte.

| | numero di unità di controsoffitto | Tipo di unità di controsoffitto (potenza termica erogata) [kW] | Potenza elettrica necessaria per il riscaldamento [kW] | Potenza elettrica necessaria per il ventilatore dell'unità di controsoffitto [kW] | % della potenza erogata [potenza elettrica necessaria/ potenza termica di riscaldamento fornita all'ambiente] | consumo annuale [kWh] |
|----|-----------------------------------|--|--|---|---|-----------------------|
| 1 | 4 | 5 | 0,322 | 0,14 | 9,2% | 202 |
| 2 | 10 | 5 | 0,322 | 0,14 | 9,2% | 303 |
| 3 | 10 | 5 | 0,322 | 0,14 | 9,2% | 303 |
| 4 | 7 | 5 | 0,322 | 0,14 | 9,2% | 247 |
| 5 | 12 | 5 | 0,322 | 0,14 | 9,2% | 335 |
| 6 | 12 | 5 | 0,322 | 0,14 | 9,2% | 335 |
| 7 | 5 | 5 | 0,322 | 0,14 | 9,2% | 195 |
| 8 | 20 | 5 | 0,322 | 0,14 | 9,2% | 510 |
| 9 | 12 | 5 | 0,322 | 0,14 | 9,2% | 310 |
| 10 | 12 | 5 | 0,322 | 0,14 | 9,2% | 260 |
| 11 | 4 | 5 | 0,322 | 0,14 | 9,2% | 148 |
| 12 | 16 | 5 | 0,322 | 0,14 | 9,2% | 334 |
| 13 | 8 | 5 | 0,322 | 0,14 | 9,2% | 191 |
| 14 | 4 | 5 | 0,322 | 0,14 | 9,2% | 188 |
| 15 | 20 | 5 | 0,322 | 0,14 | 9,2% | 653 |
| 16 | 12 | 5 | 0,322 | 0,14 | 9,2% | 257 |
| 17 | - | - | - | - | - | - |
| 18 | - | - | - | - | - | - |
| 19 | 5 | 5 | 0,322 | 0,14 | 9,2% | 183 |
| 20 | 18 | 5 | 0,322 | 0,14 | 9,2% | 670 |
| 21 | 12 | 5 | 0,322 | 0,14 | 9,2% | 360 |
| 22 | 20 | 5 | 0,322 | 0,14 | 9,2% | 610 |
| 23 | 4 | 5 | 0,322 | 0,14 | 9,2% | 264 |
| 24 | 4 | 5 | 0,322 | 0,14 | 9,2% | 147 |
| 25 | 13 | 5 | 0,322 | 0,14 | 9,2% | 769 |
| 26 | - | - | - | - | - | - |
| 27 | - | - | - | - | - | - |
| 28 | - | - | - | - | - | - |
| 29 | - | - | - | - | - | - |

F. PRODUZIONE LOCALE D'ENERGIA

In questa parte, sarà valutato lo schema di produzione d'energia locale. L'energia termica viene prodotta principalmente da una pompa di calore ad acqua di falda. La trasformazione dell'energia solare è resa possibile da una soluzione innovativa, che consiste nell'utilizzo di un pannello ibrido sia fotovoltaico che solare. L'adozione della suddetta strategia è stata preceduta dal confronto con la tecnologia classica (che prevede la separazione delle funzioni di solare e fotovoltaico) e da una valutazione economica spalmata su un periodo ventennale.

1. GEOTERMICA : POMPA DI CALORE AD ACQUA DI FALDA

a. Presentazione del funzionamento della pompa di calore ad acqua di falda

Il comune di Aubervilliers si colloca in una zona ad alto potenziale geotermico. Il BRGM (bureau de recherche géologique et minière) responsabile della prospettiva geotermica fornisce le seguenti informazioni, inerenti al nostro sito :

| | |
|---|-------------------------------|
| Temperatura invernale media delle acque (riscaldamento) per la regione Ile-de-France di tutti gli acquiferi | 12°C (a titolo indicativo) |
| Temperatura estivale media delle acque (raffrescamento) per la regione Ile-de-France di tutti gli acquiferi | 16°C (a titolo indicativo) |
| Profondità | 10-20 m |
| Portata | > 100 m ³ /s |
| Spessore | 75-100 m |

FONTE : [HTTP://WWW.GEOTHERMIE-PERSPECTIVES.FR](http://www.geothermie-perspectives.fr)

Tab. X-28 Tabella di dati geotermici per il sito

L'alto potenziale e la vicinanza dell'acquifero (a solo 20m di profondità) ci portano a scegliere un sistema di generazione termica composto da una pompa di calore ad acqua di falda collegata ad una doppia perforazione geotermica locale.

b. Dimensionamento della pompa di calore

| | |
|---|--------|
| Potenza termica necessaria per il riscaldamento ambientale [kW] (Tab. X-16) | 516 kW |
| Potenza termica addizionale per l'acqua calda sanitaria [kW] (page 478) | 30 kW |
| Potenza termica totale [kW] | 546 kW |

Tab. X-29 Potenza termica totale per il dimensionamento della pompa di calore ad acqua di falda.

Scegliamo una pompa di calore acqua-acqua a quattro vie. La prima uscita fornisce acqua a 45°C per il riscaldamento ambientale e la seconda uscita fornisce acqua a 54°C per la produzione di ACS.

L'alta potenza richiesta implica l'uso di due pompe di 226 kW.

Scegliamo come prodotto di riferimento il NECS-WQ 0704 di Climaveneta. Con una produzione d'acqua a 45°C ed un ritorno a 40°C, il rendimento (COP) è di 3,18. (Fig. X-44)



FONTE : CLIMAVENETA

Fig. X-42 Esempio di pompa di calore ad acqua di falda

DATI TECNICI GENERALI

| GRANDEZZA | 0704 | 0804 |
|---|------------|------------|
| NECS-WQ REFRIGERAZIONE | | |
| Potenza frigorifera | 211 | 239 |
| Potenza assorbita totale (unità) | 44,9 | 50,7 |
| EER | 4,71 | 4,72 |
| ESEER | - | - |
| Portata acqua scambiatore | 36,4 | 41,2 |
| Perdita di carico scambiatore | 39,2 | 38,6 |
| Portata acqua scambiatore lato sorgente | 43,9 | 49,7 |
| Perdite di carico scambiatore lato sorgente | 57,1 | 56,2 |
| NECS-WQ RISCALDAMENTO | | |
| Potenza termica | 226 | 255 |
| Potenza assorbita totale (unità) | 54,2 | 61,1 |
| COP | 4,18 | 4,18 |
| Portata acqua scambiatore | 39,4 | 44,3 |
| Perdita di carico scambiatore | 45,9 | 44,8 |
| NECS-WQ REFRIGERAZIONE E RISCALDAMENTO | | |
| Potenza frigorifera | 188 | 212 |
| Potenza assorbita totale (unità) | 54,7 | 61,8 |
| Portata acqua scambiatore | 36,4 | 41,2 |
| Perdita di carico scambiatore | 39,2 | 38,6 |
| Potenza termica al recupero | 240 | 270 |
| TER - Total Efficiency Ratio | 7,81 | 7,80 |
| Portata scambiatore al recupero | 41,6 | 46,9 |
| Perdita di carico scambiatore al recupero | 51,3 | 50,2 |
| COMPRESSORI | | |
| Numero | 4 | 4 |
| Numero gradini | 4 | 4 |
| Numero circuiti | 2 | 2 |
| Tipo regolazione | STEPS | STEPS |
| Gradino minimo | 25 | 25 |
| Tipo refrigerante | R410A | R410A |
| Carica refrigerante | 25 | 30,4 |
| Carica olio | 15,9 | 18,8 |
| LIVELLI SONORI | | |
| Potenza sonora totale | 87 | 88 |
| Pressione sonora totale | 55 | 56 |
| DIMENSIONE E PESI | | |
| Lunghezza | 2560 | 2560 |
| Larghezza | 891 | 891 |
| Altezza | 1810 | 1810 |
| Peso | 1165 | 1365 |

FONTE : CLIMAVENETA

Fig. X-43 Dati tecnici per la pompa di calore ad acqua di falda NECS-WQ 0704 (Climaveneta)

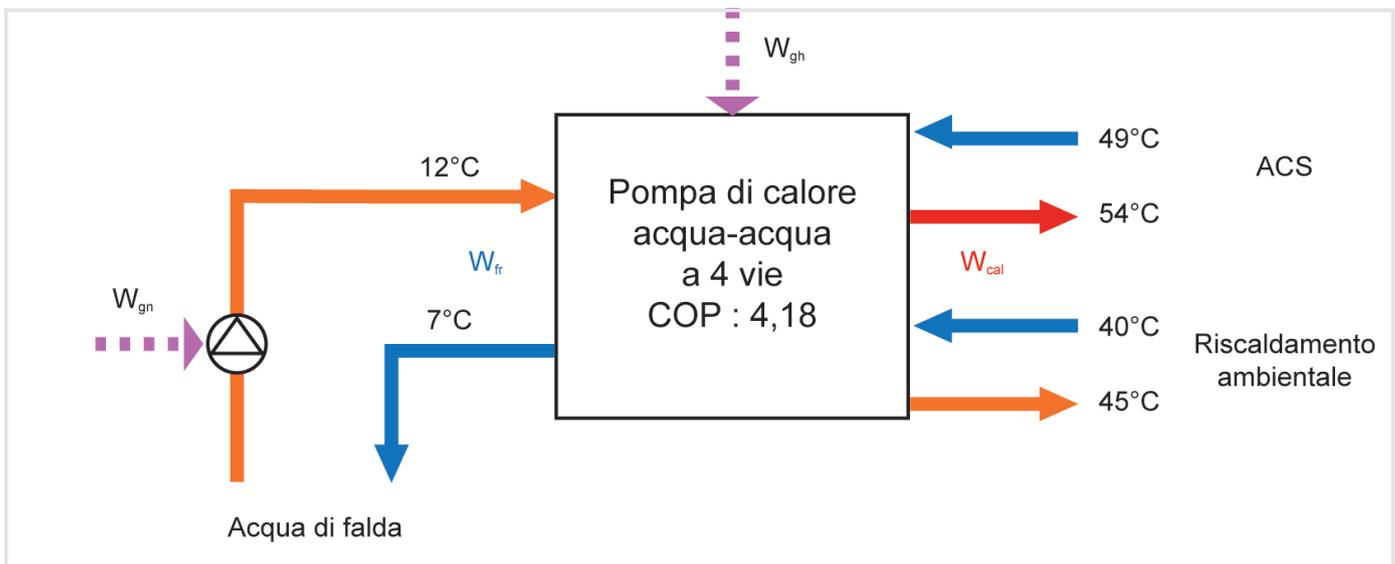


Fig. X-44 Schema di principio della pompa di calore ad acqua di falda

Con

- W_{cal} : potenza ceduta alla sorgente calda [W]
- W_{fr} : potenza sottratta alla sorgente fredda [W]
- $W_{gh} = W_{comp}$: potenza necessaria per il compressore [W]
- W_{gn} : potenza necessaria per la pompa della perforazione geotermiche [W]

2. PANNELLI SOLARI IBRIDI

a. Presentazione dei pannelli ibridi

Lo sfruttamento dell'energia solare può essere effettuato attraverso due sistemi diversi producendo 2 tipi di energia : sia una produzione d'elettricità con pannelli fotovoltaici, sia una produzione d'energia termica con pannelli solari termici. Il rendimento dei pannelli solari termici (fino a 60%) può essere molto più alto rispetto al rendimento dei pannelli fotovoltaici (fino a 17% circa), tuttavia l'energia elettrica è più facilmente sfruttabile poiché trasportabile attraverso la rete elettrica nazionale e trasformabile (in energia termica, meccanica, ecc...). Al contrario, l'energia termica prodotta dai pannelli solari termici è difficile da accumulare e le possibilità di uso ridotte : l'acqua calda a 60°C può servire al solo riscaldamento ambientale e agli usi domestici.

La sfruttabilità dell'energia elettrica e l'alto rendimento dei pannelli solari termici ci conducono alla scelta di una soluzione mista. Usiamo dei pannelli di tipo ibrido : sono dei pannelli fotovoltaici raffreddati da un fluido termo-vettore che permette di sfruttare parte dell'energia solare sotto la forma di energia termica. Questa soluzione tecnologica permette di produrre elettricità con un rendimento maggiore del 17% rispetto ai pannelli fotovoltaici classici (fino a 16,5% con cellule monocristalline al posto di 14%). La temperatura del fluido termo-vettore, adibito al raffreddamento dei pannelli, si attesterà tra i 25°C ed i 30°C. Una pompa di calore acqua-acqua, collocata tra i pannelli ibridi, sarà adibita allo sfruttamento dell'energia termica così prodotta. L'accumulo di acqua calda concorrerà infine a fornire a un nuovo fluido termo-vettore ad una temperatura superiore a 40°C.

L'energia solare è intermittente. L'elettricità prodotta può essere esportata nella sulla rete nazionale, ma l'energia termica dovrà corrispondere al fabbisogno orario irregolare. Si sceglie di utilizzare l'energia termica solo per l'acqua calda sanitaria mediante dei serbatoi di accumulo ed l'integrazione con la pompa di calore ad acqua di falda. Tali serbatoi permettono di immagazzinare l'energia termica dei pannelli solari e di restituirla a seconda della domanda durante la giornata.

Il prodotto di riferimento è il pannello ibrido dell'azienda

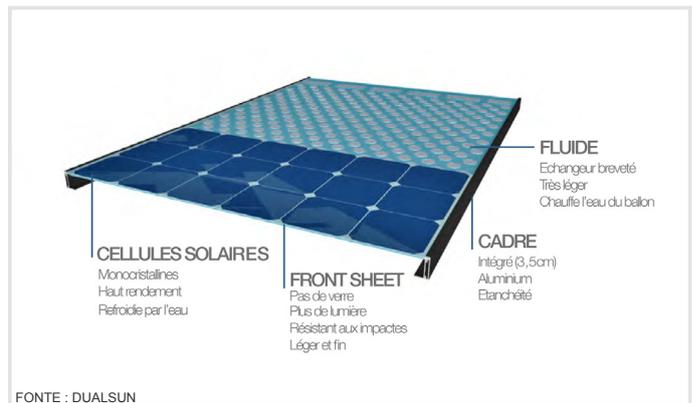


Fig. X-45 Composizione del pannello ibrido

| PANNEAU SOLAIRE 2 EN 1 PANNEAU HYBRIDE PHOTOVOLTAÏQUE ET THERMIQUE | |
|---|---|
| SPECIFICATIONS TECHNIQUES | |
| DUALSUN 250M | |
| PANNEAU | |
| Largeur | 0,994 m |
| Longueur | 1,651 m |
| Épaisseur | 5 cm |
| Poids à vide/rempli | 10,4 kg / 14 kg |
| PHOTOVOLTAÏQUE | |
| Nombre de cellules | 60 |
| Type de Cellules (Dimensions) | Monocristallin (156mm x 156mm) |
| Puissance nominale (Pmpp) | 250 Wc |
| Tolérance | -3% / 3% |
| Tension à la puissance nominale (Vmpp) | 30,91 V |
| Intensité à la puissance nominale (Impp) | 8,09A |
| Tension Circuit Ouvert (Vco) | 37,8V |
| Intensité Court-Circuit (Icc) | 8,67 A |
| Rendement du module PV | 15,2% |
| Connectiques | Connexions MC4 étanches-3 diodes bypass |
| THERMIQUE | |
| Surface totale du capteur | 1,64 m ² |
| Surface d'entrée (sans le cadre) | 1,62 m ² |
| Surface de l'absorbeur | 1,35m ² |
| Rendement optique a0 | 61% |
| Coefficient pertes thermiques a1 | 13,8 W/K/m ² |
| Fluide Caloporteur | Eau glycolée |
| Volume liquide | 3,27 L |
| Température de stagnation | 72 °C |
| INTEGRE EN TOITURE | |
| Couleur Cadre/Feuille arrière | Noir/Noir ou Noir/Blanc |
| Tarif de Rachat par EDF | Intégré au bâti |

FONTE : DUALSUN

Fig. X-46 Dati tecnici del pannello ibrido (Dualsun)

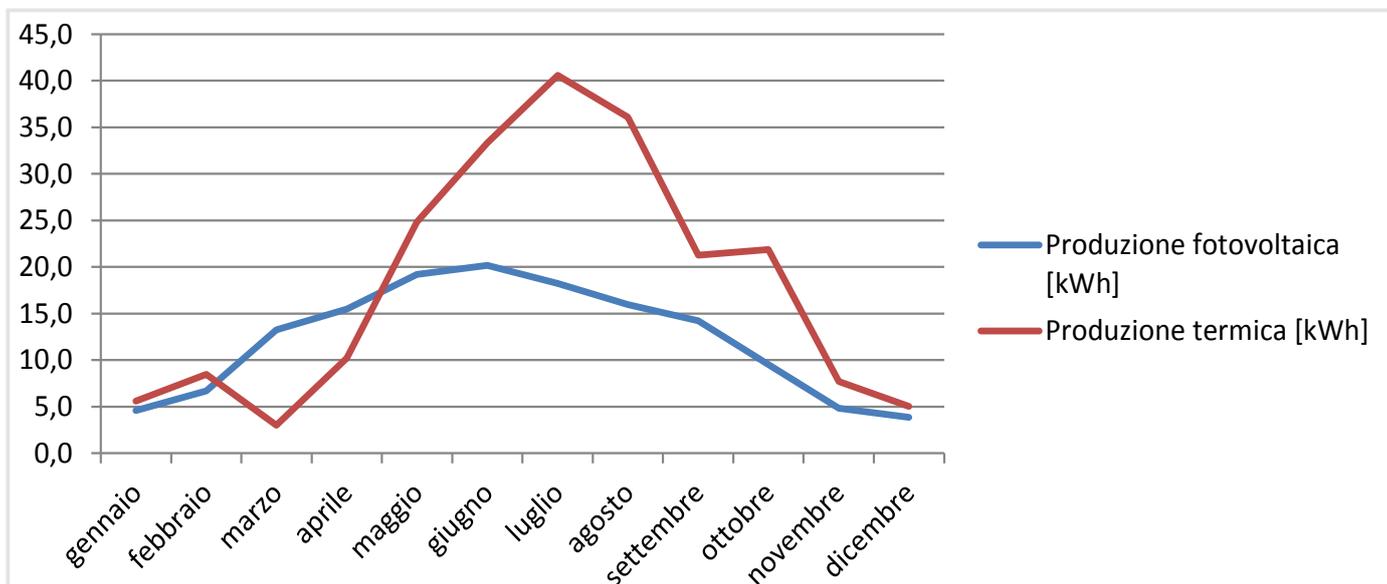


Fig. X-47 Produzione mensile di energia elettrica e termica per 1 m² di pannello ibrido orientato verso il Sud inclinato di 30° nella vicinanza di Parigi.

Dualsun (www.dualsun.fr). Il pannello è composto da celle solari monocristalline raffreddate nella parte anteriore con acqua. Il suo funzionamento termico è paragonabile a quello di un collettore piano. La scelta del produttore di non isolare termicamente il pannello, che implica delle significative dispersioni durante il periodo invernale, rende possibile il raffreddamento naturale delle celle solari quando il sistema circolatorio dell'acqua è spento (per esempio durante l'estate, quando non si necessita di energia termica).

■ b. Connessione dei pannelli alla rete

L'elettricità risulta difficile da immagazzinare. Il sistema elettrico del nostro edificio sarà connesso alla rete urbana preesistente. I pannelli producono energia elettrica per l'utenza e cedono la quantità eccedente alla rete urbana durante il giorno, mentre in caso di produzione fotovoltaica insufficiente sfruttano l'allacciamento per l'alimentazione tradizionale.

Questo collegamento necessita di un insieme di componenti per trasformare la corrente continua prodotta del generatore fotovoltaico in alternata il più possibile simile a quella fornita dalla rete. Questo insieme, il BOS (Balance of system), possiede un rendimento pari a 75-85%.

■ c. Uso di una pompa di calore intermedia

La produzione d'energia termica con i pannelli ibridi richiede una rete di condotti complessa : i pannelli possono essere accoppiati tra di loro in gruppi di quattro o sei al massimo. L'intero sistema deve essere irrigato dal fluido termo-vettore (acqua) con una rete in derivazione.

La temperatura del fluido termo-vettore (acqua) non deve superare i 30°C per assicurare il raffreddamento delle celle solari. Una pompa di calore acqua-acqua permette di trasformare questa energia termica a bassa temperatura. Il fluido termo-vettore viene utilizzato come sorgente fredda, riscaldata in permanenza nei pannelli solari. La pompa di calore ad alto rendimento (COP=4,5) produce in uscita un secondo fluido termo-vettore a 50°C. (Fig. X-48)

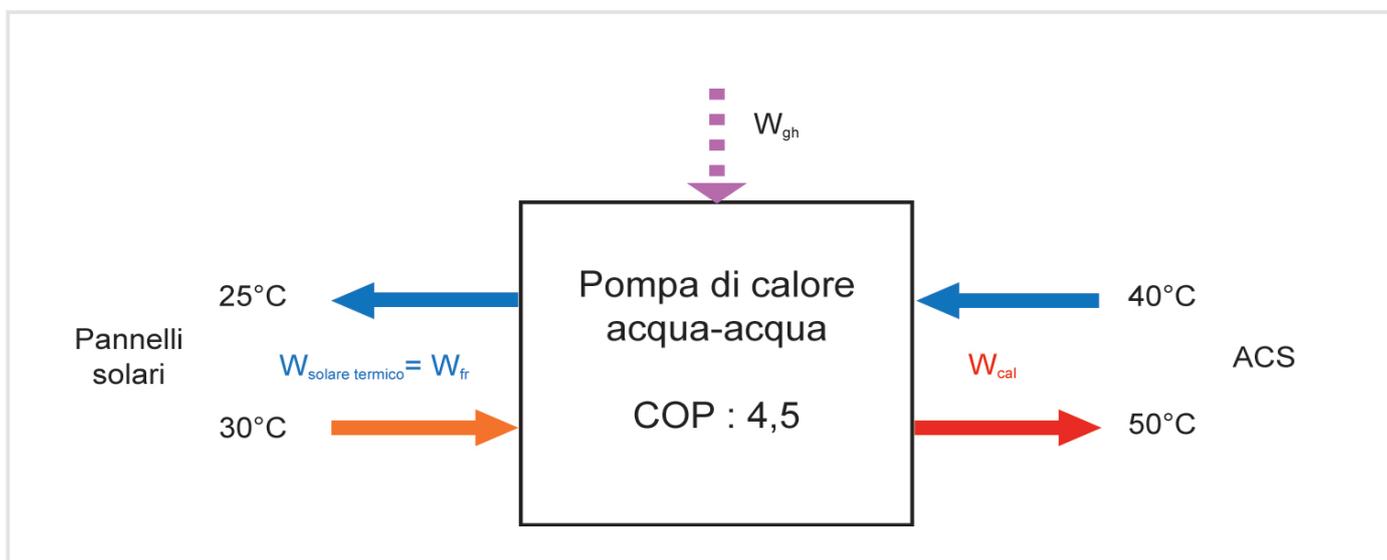


Fig. X-48 Schema di principio della pompa di calore intermedia

$$W_{cal} = W_{comp} \cdot COP$$

$$W_{fr} = W_{cal} - W_{comp} = W_{cal} \cdot \left(1 - \frac{1}{COP}\right)$$

$$W_{cal} = W_{fr} \cdot \frac{COP}{COP - 1} = W_{solare\ termico} \cdot \frac{COP}{COP - 1}$$

Con

- W_{cal} : potenza ceduta alla sorgente calda [W]
- W_{fr} : potenza sottratta alla sorgente fredda [W]
- $W_{solare\ termico}$: potenza termica fornita dai pannelli solari [W]
- COP : rendimento della pompa di calore acqua-acqua
- $W_{gn} = W_{comp}$: potenza necessaria per il compressore [W]

d. Dimensionamento dei pannelli solari ibridi

L'irraggiamento solare assimilabile alla nostra area è quello registrato nella stazione meteorologica di Le Bourget, a 5 km ad ovest di Aubervilliers. L'inclinazione dei pannelli è preso pari a 30°.

La superficie disponibile per la loro installazione (tetto piano delle aule scolastiche al secondo piano) è di 1418 m². L'accesso

alle radiazioni solari durante l'inverno (con un angolo di 18°) è reso possibile grazie ad uno spazio di separazione di 1,77m tra le file. Un pannello con una superficie di 1m² richiede 2,4m² di spazio libero sul suolo. (Fig. X-50)

Utilizzando la totalità dei tetti disponibili, possiamo installare 550 m² di pannelli ibridi.

Ipotesi di calcolo :

- si fa riferimento alla norma UNI11300
- rendimento della produzione elettrica : 16,5% o 14,5% durante luglio e agosto (raffreddamento spento)
- coefficiente ottico del pannello solare : 61% (coefficiente n0 nella UNI11300)
- coefficiente di dispersioni termiche del pannello solare : 13,8 W/Km² (coefficiente a1 nella UNI11300)
- coefficiente a1 (secondo UNI11300) : 0,008

I pannelli producono 82,2 MWh di energia elettrica e 119,8 MWh di energia termica. Questa produzione è calcolata considerando l'arresto del sistema di raffreddamento durante luglio e agosto (mese di vacanze)

L'energia elettrica è facilmente sfruttabile ed esportabile in caso di produzione superiore al fabbisogno ; l'energia termica, tuttavia, non gode di questa possibilità. La non-concomitanza tra produzione termica e fabbisogno implica una messa in opera complessa.

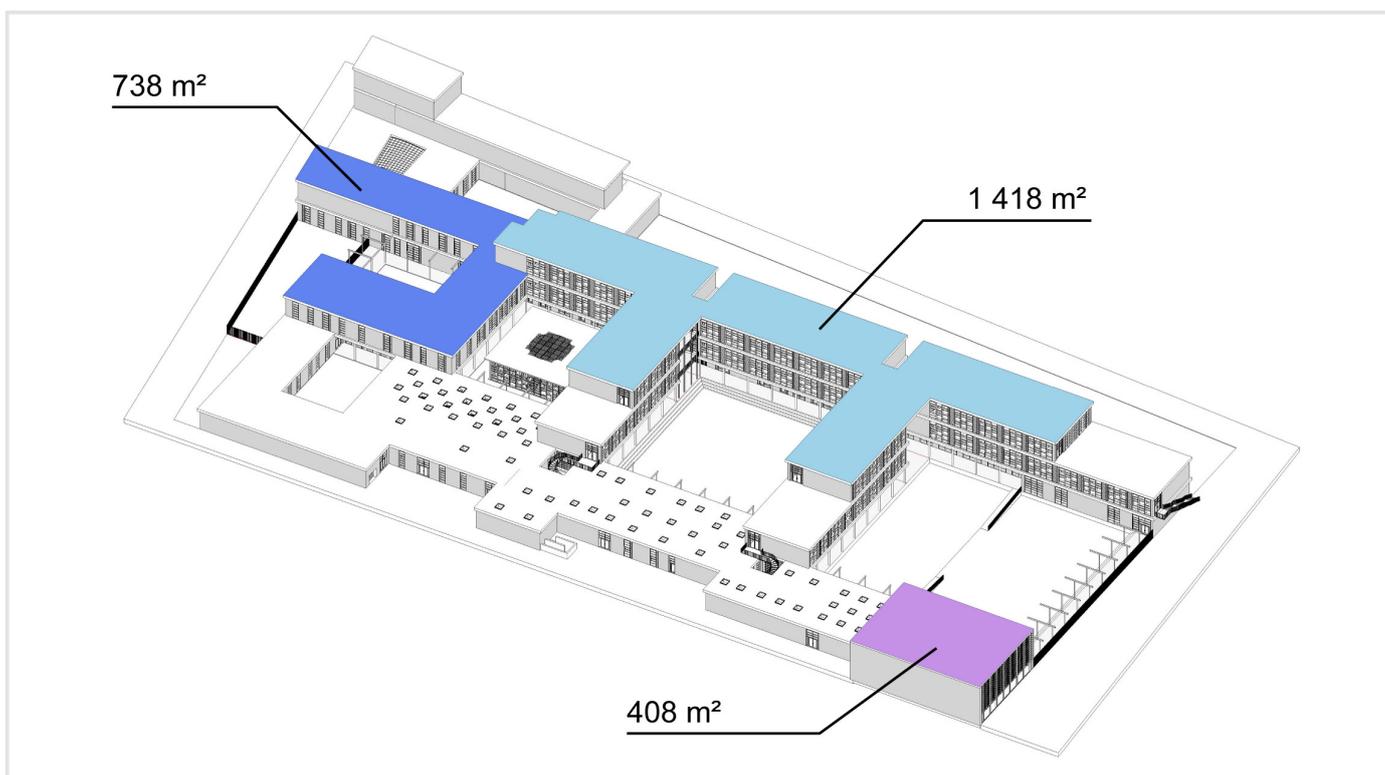


Fig. X-49 Superficie disponibile per l'installazione dei pannelli solari.

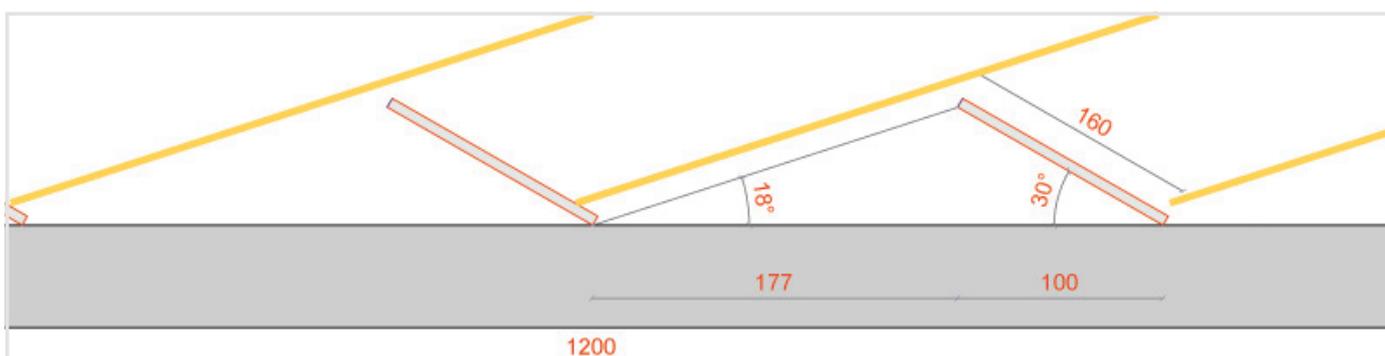


Fig. X-50 Schema di installazione dei pannelli solari secondo l'inclinazione delle radiazioni solari in inverno

| | Gen. | Feb. | Mar. | Apr. | Mag. | Giu. | Lug. | Ago. | Sett. | Ott. | Nov. | Dic. | Anno |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Irradiazione globale sul piano a 30° (kWh/m²) | 37,0 | 54,0 | 107,0 | 125,0 | 155,0 | 163,0 | 162,0 | 142,0 | 115,0 | 77,0 | 39,0 | 31,0 | 1207 |
| PRODUZIONE D'ELETTRICITA' | | | | | | | | | | | | | |
| Rendimento BOS [%] | 75% | 75% | 75% | 75% | 75% | 75% | 75% | 75% | 75% | 75% | 75% | 75% | 75% |
| Rendimento pannello fotovoltaico semplice [%] | 14,5% | 14,5% | 14,5% | 14,5% | 14,5% | 14,5% | 14,5% | 14,5% | 14,5% | 14,5% | 14,5% | 14,5% | 14,5% |
| Rendimento pannello fotovoltaico ibrido [%] | 16,5% | 16,5% | 16,5% | 16,5% | 16,5% | 16,5% | 14,5% | 14,5% | 16,5% | 16,5% | 16,5% | 16,5% | 16,5% |
| Produzione elettrica mensile totale con pannello semplice (kWh/m²) | 4,02 | 5,87 | 11,64 | 13,59 | 16,86 | 17,73 | 17,62 | 15,44 | 12,51 | 8,37 | 4,24 | 3,37 | 131,3 |
| Produzione elettrica mensile totale con pannello ibrido (kWh/m²) | 4,58 | 6,68 | 13,24 | 15,47 | 19,18 | 20,17 | 17,62 | 15,44 | 14,23 | 9,53 | 4,83 | 3,84 | 144,8 |
| PRODUZIONE D'ENERGIA TERMICA | | | | | | | | | | | | | |
| T media mensile | 3,8 | 4,1 | 6,9 | 9,9 | 14,3 | 16,8 | 19,4 | 19,6 | 15,7 | 11,3 | 6,4 | 4,4 | |
| T media del fluido | 30 | 30 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 30 | 30 | 30 | |
| ΔT | 26,2 | 25,9 | 33,1 | 30,1 | 25,7 | 23,2 | 20,6 | 20,4 | 24,3 | 18,7 | 23,6 | 25,6 | |
| Rendimento mensile per un pannello solare sottovuoto | 0,714 | 0,714 | 0,699 | 0,706 | 0,715 | 0,720 | 0,725 | 0,725 | 0,718 | 0,728 | 0,719 | 0,715 | |
| Rendimento mensile per un pannello solare ibrido | 0,151 | 0,157 | 0,028 | 0,082 | 0,160 | 0,204 | 0,250 | 0,254 | 0,185 | 0,284 | 0,197 | 0,162 | |
| Produzione termica mensile totale con sotto vuoto (kWh/m²) | 5,6 | 8,5 | 3,0 | 10,2 | 24,8 | 33,3 | 40,6 | 36,1 | 21,3 | 21,9 | 7,7 | 5,0 | 217,9 |
| Produzione termica mensile totale con ibridi(kWh/m²) | 5,59 | 8,45 | 3,00 | 10,21 | 24,81 | 33,32 | 40,57 | 36,06 | 21,27 | 21,86 | 7,70 | 5,02 | 218 |

Tab. X-30 Produzione mensile dei pannelli : paragone tra pannelli semplici e pannelli ibridi



Fig. X-51 Fabbisogno quotidiano degli utenti e produzione di energia termica in proveniente dai pannelli solari. [kWh/giorno].

e. Collegamento alla rete di teleriscaldamento del quartiere

L'energia termica prodotta in eccesso dai pannelli solari non può essere accumulata totalmente, in quanto il calore prodotto può essere immagazzinato soltanto per qualche giorno nei serbatoi appositi. Tale soluzione non consente tuttavia di sfruttare tutta l'energia prodotta durante i periodi di inattività della scuola (week-end e vacanze).

L'estate è la stagione in cui si registrano le maggiori perdite di energia termica prodotta (Fig. X-51 zona verde).

Al contrario, la produzione invernale non permette di rispondere al fabbisogno e risulta quindi necessario incrementarla con energia termica addizionale (Fig. X-51 zona gialla).

Una simulazione del comportamento termico del sistema permette di quantificare l'energia che viene prodotta senza essere utilizzata. (Tab. X-31)

Le ipotesi che stanno alla base della suddetta simulazione sono:

- volume dei serbatoi pari a 30 m³ (6 serbatoi da 5 m³)

| | |
|---|--|
| Fabbisogno di energia termica addizionale [kWh] | 55 142 kWh |
| Produzione termica in eccedenza [kWh] | 77 629 kWh (53 342 kWh durante luglio e agosto) |

Tab. X-31 Risultati della simulazione: Fabbisogno di energia termica addizionale e produzione termica in eccedenza

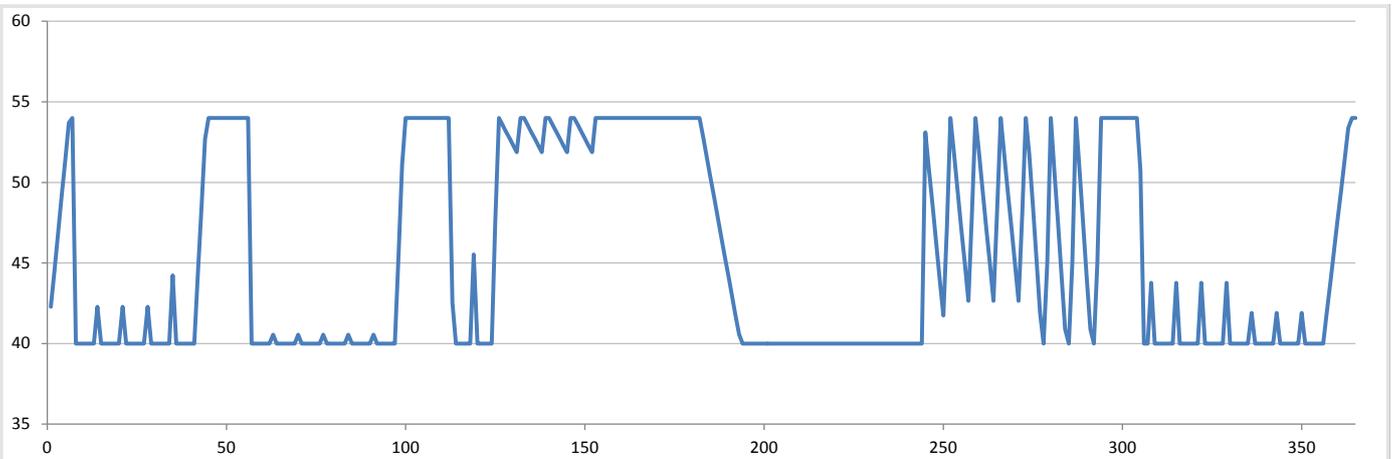


Fig. X-52 Temperatura giornaliera dell'acqua nel serbatoio di accumulo

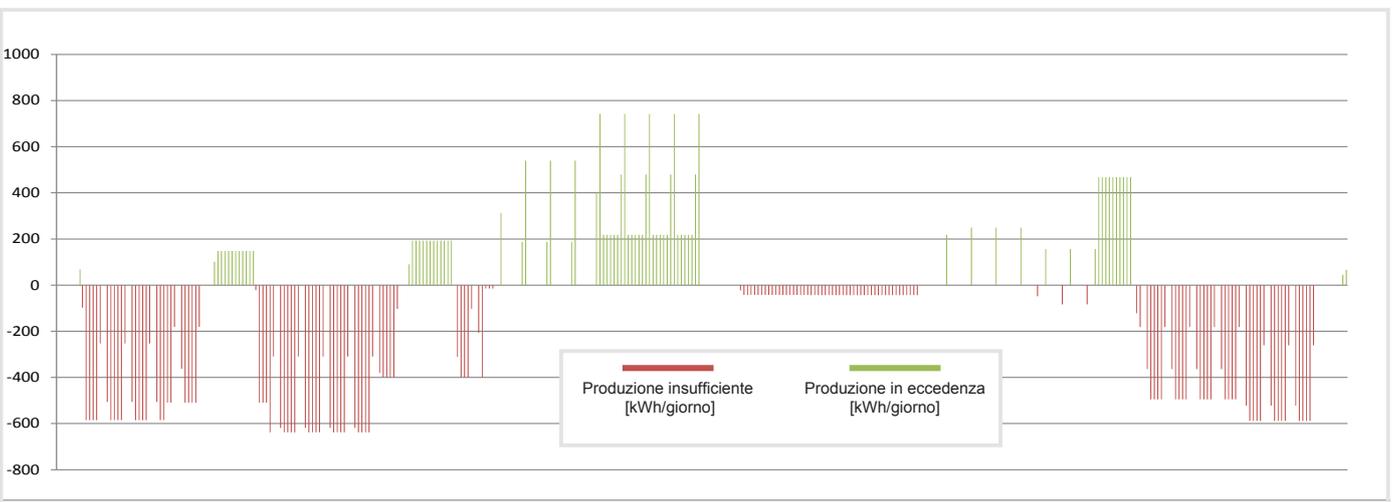


Fig. X-53 Temperatura giornaliera dell'acqua nel serbatoio di accumulo

- dispersioni quotidiane nell'accumulo pari a 12 kWh (norma UNI11300)
- temperatura massima nell'accumulo pari a 54°C (temperatura massima in uscita dalla pompa di calore ad acqua di falda)
- temperatura minima richiesta per l'ACS pari a 40°C

Il fabbisogno di energia termica addizionale è soddisfatto attraverso l'incremento della potenza della pompa di calore ad acqua di falda.

La produzione termica in eccedenza può essere esportata ed utilizzata dagli edifici vicini: si prevede infatti un programma immobiliare sul lotto a nord del nostro sito, consisterà nell'edificazione di alloggi privati distribuiti in due o tre palazzi da tre piani ciascuno. I due nuovi progetti potrebbero funzionare in sinergia: l'energia termica prodotta in eccedenza dei nostri pannelli solari sarà esportata attraverso una rete locale comune. La scuola esporterebbe nel quartiere l'energia prodotta sul suo tetto durante i week-end (salvo durante l'inverno) e le vacanze.

Il periodo estivo rappresenta un momento critico per tale funzionamento in sinergia: il fabbisogno termico per l'ACS degli alloggi del nuovo programma immobiliare è ridotto ed il nostro sistema produce la più grande quantità di energia termica dell'anno. Si sceglie di bloccare sia il sistema di raffreddamento delle celle solari, al fine di diminuire il rendimento elettrico, che la produzione di energia termica durante i mesi di luglio ed agosto.

La seguente sintesi (Fig. X-54) contiene le scelte ed i ragionamenti fatti. I valori, leggermente diversi da quelli della simulazione precedente, si riferiscono ai mesi di luglio ed agosto in cui la produzione di energia termica risulta bloccata.

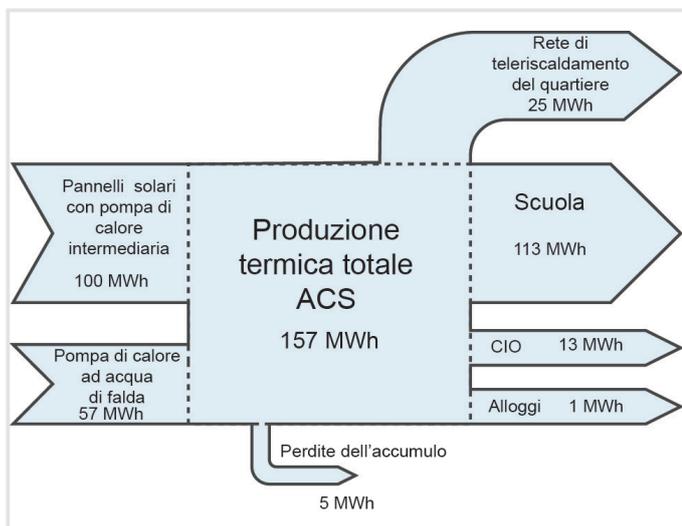


Fig. X-54 Produzione e fabbisogno annuale globale per l'acqua calda sanitaria

f. Valutazione energetica della soluzione ibrida

La scelta dei pannelli ibridi rispetto a quelli classici è stata effettuata sulla base di un paragone della produzione energetica globale tra le due soluzioni.

L'indicatore scelto per valutare le diverse soluzioni è la produzione energetica netta annuale togliendo il consumo per l'ACS, cioè la differenza tra la produzione di energia elettrica ed il fabbisogno di energia termica addizionale per la produzione d'acqua calda sanitaria.

Quest'ultimo, non potendo essere calcolato con l'aiuto di un'equazione unica, dovrà essere ricavato in maniera empirica da una simulazione annuale giornaliera (assimilabile a quella descritta nel paragrafo precedente).

Ipotesi di calcolo :

- La produzione d'energia termica risulta bloccata durante i mesi di luglio e agosto.
- Il caso di base è costituito di 550m² di pannelli ibridi. Il

| | Superficie di pannelli ibridi [m ²] | Q _e Produzione elettrica dei pannelli fotovoltaici [MWh] | Q _{sol} Produzione termica dei pannelli solari [MWh] | Q _{add} Fabbisogno di energia termica addizionale [MWh] | Q _{ecc} Produzione termica in eccedenza [MWh] | Q _e - Q _{add} Produzione energetica netta annuale (senza esportazione) [MWh] |
|-----------------------------|---|---|---|--|--|--|
| Caso di base : tutto ibrido | 550 | 82,2 MWh | 119,8 MWh | 55,1 MWh | 77,6 MWh | 27,7 MWh |

Tab. X-32 Produzione dei pannelli : Caso di base

| | Superficie di pannelli fotovoltaici con celle monocristalline [m ²] | Superficie pannelli solari sotto vuoto [m ²] | Q _e Produzione elettrica dei pannelli fotovoltaici [MWh] | Q _{sol} Produzione termica dei pannelli solari [MWh] | Q _{add} Fabbisogno di energia termica addizionale [MWh] | Q _{ecc} Produzione termica in eccedenza [MWh] | Q _e - Q _{add} Produzione energetica netta annuale (senza esportazione) [MWh] |
|----------------------------|---|--|---|---|--|--|--|
| Caso A : solo termico | 0 | 550 | 0 | 354,7 MWh | 1,9 MWh | 466,6 MWh | -1,9 MWh |
| Caso B | 150 | 400 | 19 MWh | 258 MWh | 9,8 MWh | 311,2 MWh | 9,2 MWh |
| Caso C | 250 | 300 | 31,7 MWh | 193,5 MWh | 18,9 MWh | 221,3 MWh | 12,8 MWh |
| Caso D | 300 | 250 | 38 MWh | 161,2 MWh | 23,9 MWh | 161,8 MWh | 14,1 MWh |
| Caso E | 325 | 225 | 41,2 MWh | 141,5 MWh | 26,7 MWh | 13,4 MWh | 14,5 MWh |
| Caso F | 350 | 200 | 44,3 MWh | 129 MWh | 30,2 MWh | 113,6 MWh | 14,1 MWh |
| Caso G | 400 | 150 | 50,7 MWh | 97,8 MWh | 40,5 MWh | 69,4 MWh | 10,2 MWh |
| Caso H | 500 | 50 | 63,4 MWh | 32,3 MWh | 93 MWh | 13 MWh | -29,6 MWh |
| Caso I : solo fotovoltaico | 550 | 0 | 69,7 MWh | 0 | 134,5 MWh | 0 | -64,8 MWh |

Tab. X-33 Produzione dei pannelli : Combinazione di pannelli fotovoltaici con celle monocristalline e di pannelli solari sottovuoto

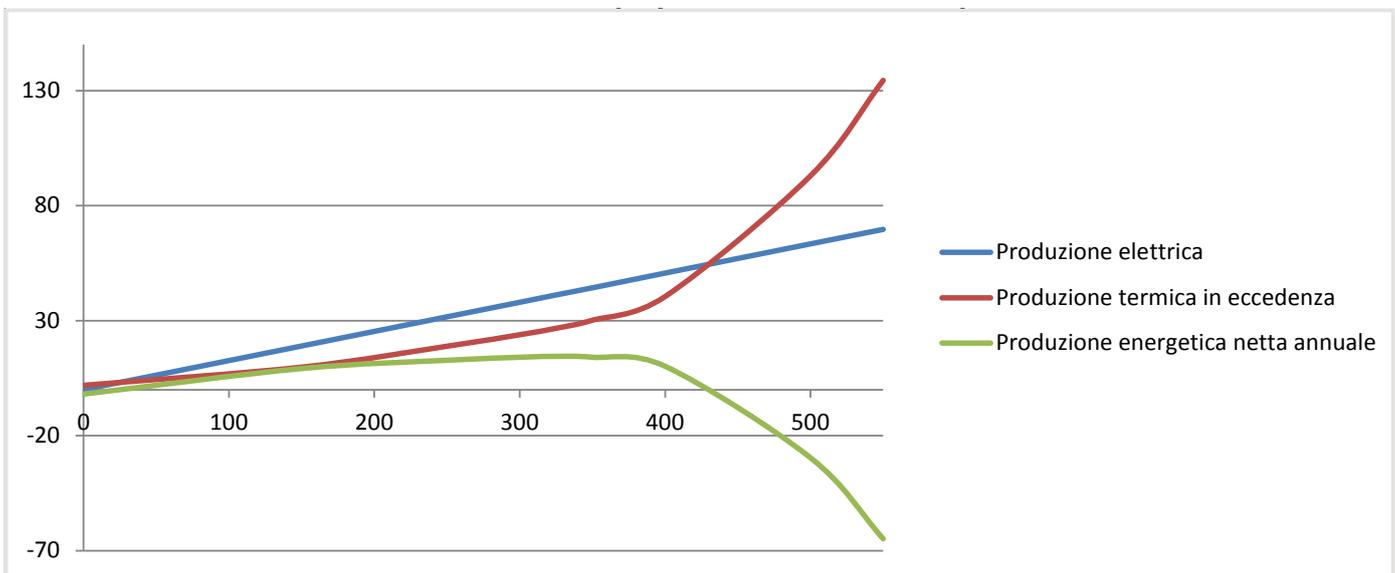


Fig. X-55 Produzione energetica annuale per varie combinazioni di pannelli fotovoltaici e pannelli solari a seconda della superficie di pannelli fotovoltaici [MWh a seconda della superficie di pannelli fotovoltaici].

rendimento della produzione d'energia elettrica durante i mesi di luglio e agosto è considerato pari a quello relativo ad un pannello fotovoltaico classico. (14%) (Tab. X-32)

- La superficie totale tra pannelli fotovoltaici e pannelli solari rimane uguale a 550 m².
- Si considera, per i pannelli fotovoltaici, un rendimento del 14% ed un rendimento del BOS del 75%.
- I pannelli solari sono orientati verso Sud con un'inclinazione di 30°.
- I pannelli solari, sottovuoto, assumono un rendimento compreso tra il 69% ed il 72,5% a seconda del mese..

La produzione energetica annuale raggiunge un massimo di 14,4 MWh con il 40% di pannelli solari sottovuoto (Tab. X-33). Tale valore risulta inferiore a quello ottenuto nel caso in cui si utilizzano esclusivamente pannelli ibridi.

La soluzione, adottata nel nostro progetto e caratterizzata da 550 m² di pannelli solari ibridi, porta ad una produzione di energia più cospicua rispetto a quella che prevede la separazione tra elettrico e termico.

g. Valutazione economica dell'uso di pannelli ibridi

L'investimento iniziale può essere ulteriormente confermato grazie ad una semplice valutazione economica di un pannello ibrido.

Tale valutazione è condotta sulla base delle seguenti ipotesi :

- la potenza del pannello di riferimento è considerata pari a 1 kWc
- il rendimento medio della produzione elettrica del pannello è considerato pari a 15%
- il costo del materiale e di posa è considerato pari al costo medio costatato in 2011 (fonte : <http://www.photovoltaique.info/>) e maggiorato di 0,7 €/Wc (dati del costruttore di pannelli solari ibridi)
- esiste un sussidio regionale per l'installazione di pannelli solari sugli edifici pubblici. I pannelli non integrati al costruito ottengono una tariffa di riscatto di 0,6€/kWh.
- La manutenzione annuale è considerata pari all'1,5% del costo iniziale
- La durata di vita del pannello è considerata pari a 20 anni.
- Il tasso di attualizzazione del denaro è considerata pari a 4,5% (fonte : OECD)

Grazie al sussidio della regione, l'investimento è lucrativo : dopo 18,6 anni, il costo iniziale è rimborsato ed ogni unità di produzione di 1kW produce un beneficio di 1 235 € dopo 20 anni. (Tab. X-35)

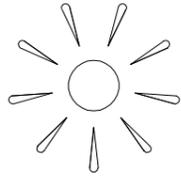
| | |
|--|--------------------|
| IGP annuale (Irradiazione globale sul piano) [kWh] | 1207,0 kWh |
| Rendimento delle celle fotovoltaiche [%] | 15% |
| Rendimento del BOS [%] | 75% |
| Produzione elettrica annuale di un pannello da 1m ² [kWh] | 135,8 kWh |
| Superficie di un pannello per 1kWc [m ²] | 6,7 m ² |
| Costo materiale + Posa [€/HT/Wc] | € 5,70 |
| Produzione di un pannello da 1kWc per anno [kWh] | 905,3 kWh |
| Costo di un pannello ibrido di 1kWc [€HT] | 5 700 € |
| Sussidio regionale [%] | 0% |
| Costo dopo sussidio [€] | 5 700 € |
| Tasso di attualizzazione del denaro [%] | 4,5% |
| Costo della manutenzione annuale (% del costo iniziale) | 1,5% |
| Costo della manutenzione annuale [€/anno] | € 85,50 |
| Tariffa di riscatto del kWh con il sussidio regionale [€/kWh] | € 0,60 |
| Vita utile del pannello [anni] | 20 |
| Entrata annuale [€/anno] | € 543,15 |

Tab. X-34 Calcolo dell'entrata annuale per un pannello ibrido di 1kWc

| VALUTAZIONE SULLA VITA UTILE | |
|--|-------------|
| entrata su 20 anni [€] | 10 863,00 € |
| entrata su 20 ans attualizzata [€] | 17 781,72 € |
| costo del pannello non attualizzato [€] | 5 700,00 € |
| costo del pannello attualizzato su 20 anni [€] | 13 746,77 € |
| costo della manutenzione durante 20 anni [€] | 1 710,00 € |
| costo della manutenzione durante 20 anni attualizzato [€] | 2 799,11 € |
| TRB (tempo di ritorno bruto) | 5 700 € |
| [investimento / entrata annuale] | 10,5 anni |
| CGA (Costo globale attualizzato del kWh prodotto) | 5 700 € |
| [(investimento + manutenzione) / produzione totale in 20 anni] | € 0,56 |
| TRA (tempo di ritorno attualizzato) | 1,5% |
| [investimento attualizzato / entrata annuale] | 18,6 anni |
| Guadagno dopo 20 anni senza attualizzazione | 3 453,00 € |
| Guadagno dopo 20 anni con attualizzazione | 1 235,84 € |

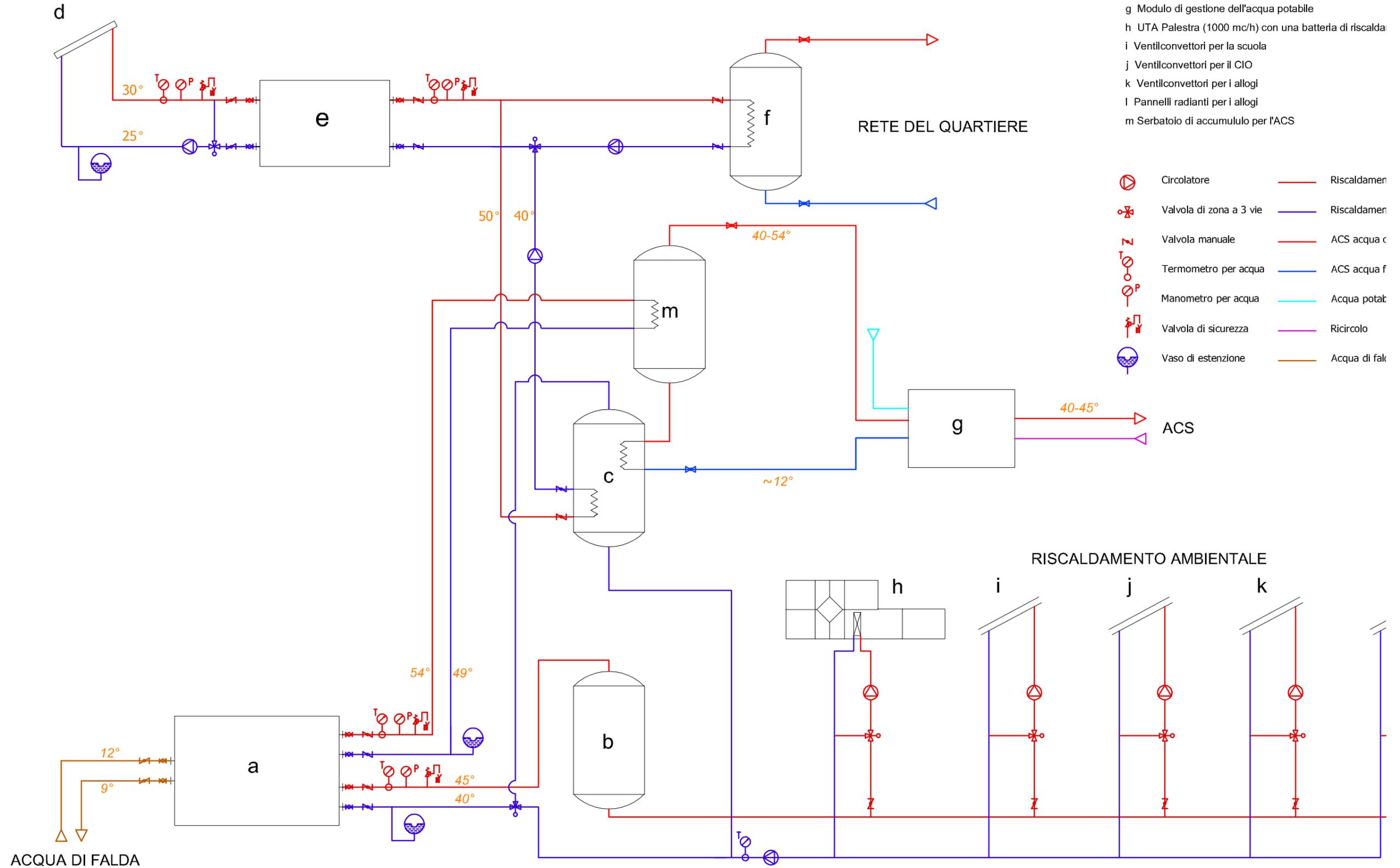
Tab. X-35 Calcolo del guadagno dopo 20 anni un pannello ibrido di 1kWc

3. PIANTA FUNZIONALE DEL SISTEMA IMPIANTISTICO
TAVOLA X-8



- a Pompa di calore ad acqua di falda a 4 vie (610 kW riscaldamento)
- b Serbatoio di accumulo per il riscaldamento ambientale
- c Serbatoio di pre-riscaldamento dell'ACS
- d Pannelli solari (750 m² a 30° verso il Sud)
- e Pompa di calore acqua-acqua per assicurare il raffreddamento pannelli solari ibridi
- f Serbatoio di accumulo per la rete del quartiere
- g Modulo di gestione dell'acqua potabile
- h UTA Palestra (1000 mc/h) con una batteria di riscaldamento
- i Ventilconvettori per la scuola
- j Ventilconvettori per il CIO
- k Ventilconvettori per i alloggi
- l Pannelli radianti per i alloggi
- m Serbatoio di accumulo per l'ACS

- | | | | |
|--|-------------------------|--|------------------|
| | Circolatore | | Riscaldamento |
| | Valvola di zona a 3 vie | | Riscaldamento |
| | Valvola manuale | | ACS acqua calda |
| | Termometro per acqua | | ACS acqua fredda |
| | Manometro per acqua | | Acqua potabile |
| | Valvola di sicurezza | | Ricircolo |
| | Vaso di estensione | | Acqua di falda |



G. BILANCIO ENERGETICO GLOBALE

1. MODELIZZAZIONE DEL COMPORTAMENTO ENERGETICO DELL'EDIFICIO

Per effettuare la modellazione del fabbisogno energetico dell'edificio si fa riferimento alla norma. UNI11300.

I diversi rendimenti, tabellati nella norma, sono considerati pari a :

| | |
|---|------------|
| COP pompa di calore ad acqua di falda | 4,18 |
| COP pompa di calore per l'ACS | 4,5 |
| Rendimento della pompa di emungimento | 0,3 |
| Prevalenza della perforazione geotermica | 600 000 Pa |
| ΔT : ribasso della temperatura della sorgente fredda (acqua di falda) | 5°C |
| Rendimento della pompa di circolazione per la rete di produzione di ACS | 0,35 |
| Prevalenza della rete di produzione di ACS | 200 000 Pa |
| ΔT : salto di temperatura per la rete di produzione di ACS | 10°C |

Tab. X-36 Sistema di generazione

| | |
|--|-------|
| Serbatoio per l'ACS : coefficiente di perdita in funzione della classe di volume del serbatoio di accumulo [W] | 500 W |
|--|-------|

Tab. X-37 Sistemi di accumulo

a. Sistemi di generazione e di accumulo

b. Distribuzione dell'acqua calda sanitaria

| | |
|--|------------|
| Coefficiente di perdita | 0,08 |
| Coefficiente di recupero | 0,5 |
| Rendimento della pompa di circolazione | 0,35 |
| Prevalenza | 200 000 Pa |

Tab. X-38 Sistema di distribuzione

c. Distribuzione del riscaldamento ambientale

| | | |
|--|-------------------------|-------|
| Rendimento termico | Unità di controsoffitto | 0,975 |
| | ventil-convettore | 0,975 |
| | Pannelli radianti | 0,975 |
| ΔT : salto di temperatura | 5°C | |
| Rendimento della pompa di circolazione | 0,35 | |

Tab. X-39 Sistema di distribuzione

| | | |
|--|-------------------------|-------|
| Rendimento termico | Unità di controsoffitto | 0,920 |
| | ventil-convettore | 0,92 |
| | Pannelli radianti | 0,94 |
| ΔT : salto di temperatura | 5°C | |
| Rendimento della pompa di circolazione | 0,35 | |
| Potenza elettrica assorbita per il riscaldamento per unità di controsoffitto 5kW | 0,322 kW | |

Tab. X-40 Sistema di erogazione

2. FABBISOGNO ENERGETICO RICHIESTO

| | kWh | kWh/m ² |
|---|---------|--------------------|
| FABBISOGNO ELETTRICO | | |
| Fabbisogno elettrico : usi domestici | 102 228 | 11,01 |
| Fabbisogno elettrico : illuminazione | 34 123 | 3,68 |
| Fabbisogno elettrico : ausiliari Ventilazione (ventilatore) | 34 531 | 3,72 |
| Fabbisogno elettrico : umidificazione | 13 786 | 1,48 |
| Fabbisogno elettrico : ausiliari dell'impianto di ACS (pompa di circolazione) | 528 | 0,06 |
| Fabbisogno elettrico : ausiliari dell'impianto di riscaldamento ambientale (pompa, ventilatore) | 5 873 | 0,63 |
| FABBISOGNO TERMICO | | |
| Fabbisogno termico : ACS | 127 730 | 13,76 |
| Fabbisogno termico : riscaldamento ambientale | 105 924 | 11,41 |

Tab. X-41 Sistema di distribuzione

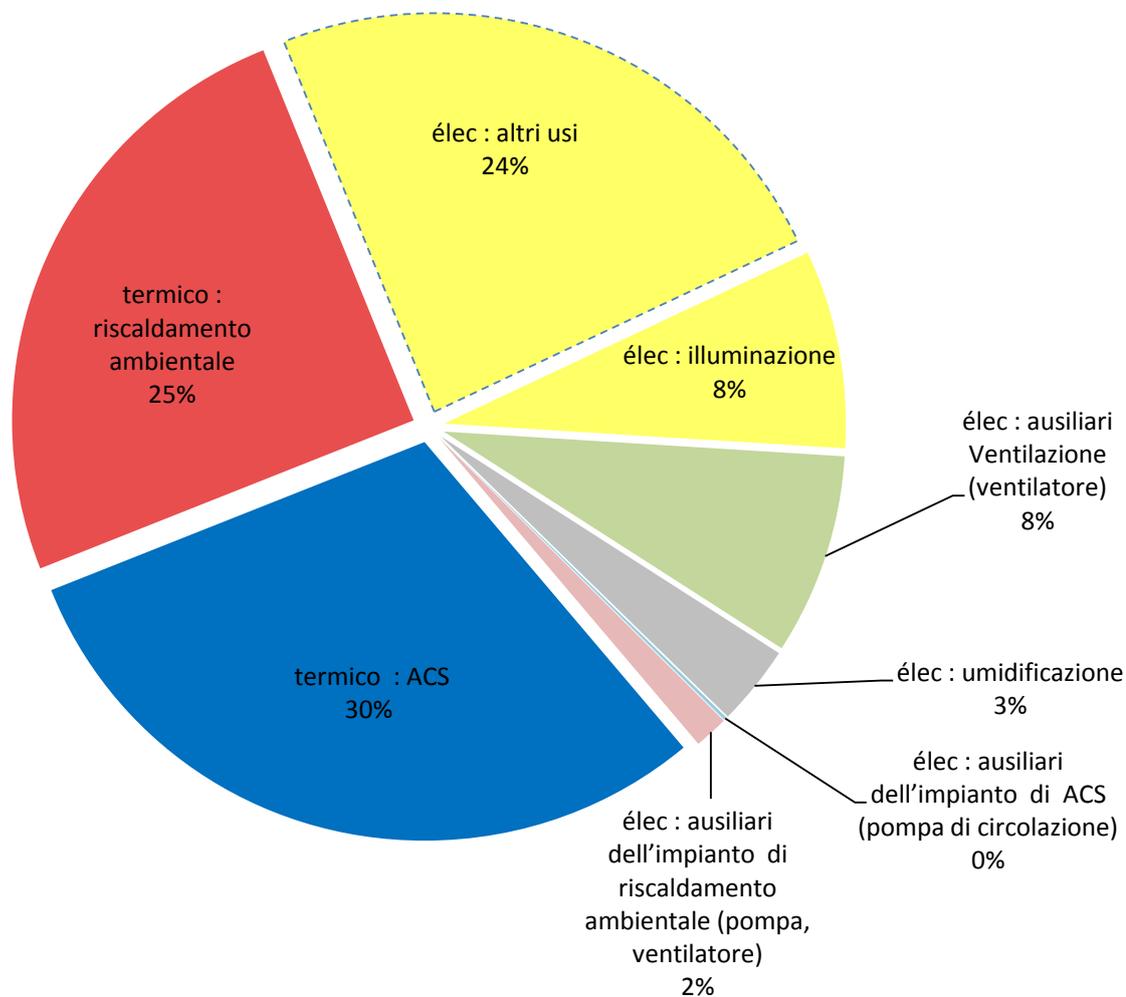


Fig. X-56 Fabbisogno energetico richiesto

| | Fabbisogno [kWh] | Fabbisogno [kWh/m ²] |
|--|------------------|----------------------------------|
| Usi domestici | 102228 | 11,01 |
| Illuminazione | 34123 | 3,68 |
| Ausiliari Ventilazione (ventilatore) | 34 531 | 3,72 |
| Umidificazione | 13 786 | 1,48 |
| Ausiliari dell'impianto di ACS (pompa di circolazione) | 765 | 0,08 |
| Ausiliari dell'impianto di riscaldamento ambientale (pompa, ventilatore) | 17 768 | 1,91 |
| PdC (acqua di falda e ACS) | 61 244 | 6,6 |
| TOTALE | 264 446 | 28,48 |

Tab. X-42 Fabbisogno di energia elettrica

| | Apporti [kWh] | Apporti [kWh/m ²] |
|---|----------------|-------------------------------|
| Apporti elettrici pannelli fotovoltaici | 80 270 | 8,65 |
| Apporti elettrici esterni (esclusi gli usi domestici) | 81 948 | 8,83 |
| Apporti elettrici esterni per gli usi domestici | 102228 | 11,01 |
| TOTALE | 264 446 | 28,48 |

Tab. X-43 Apporti di energia elettrica

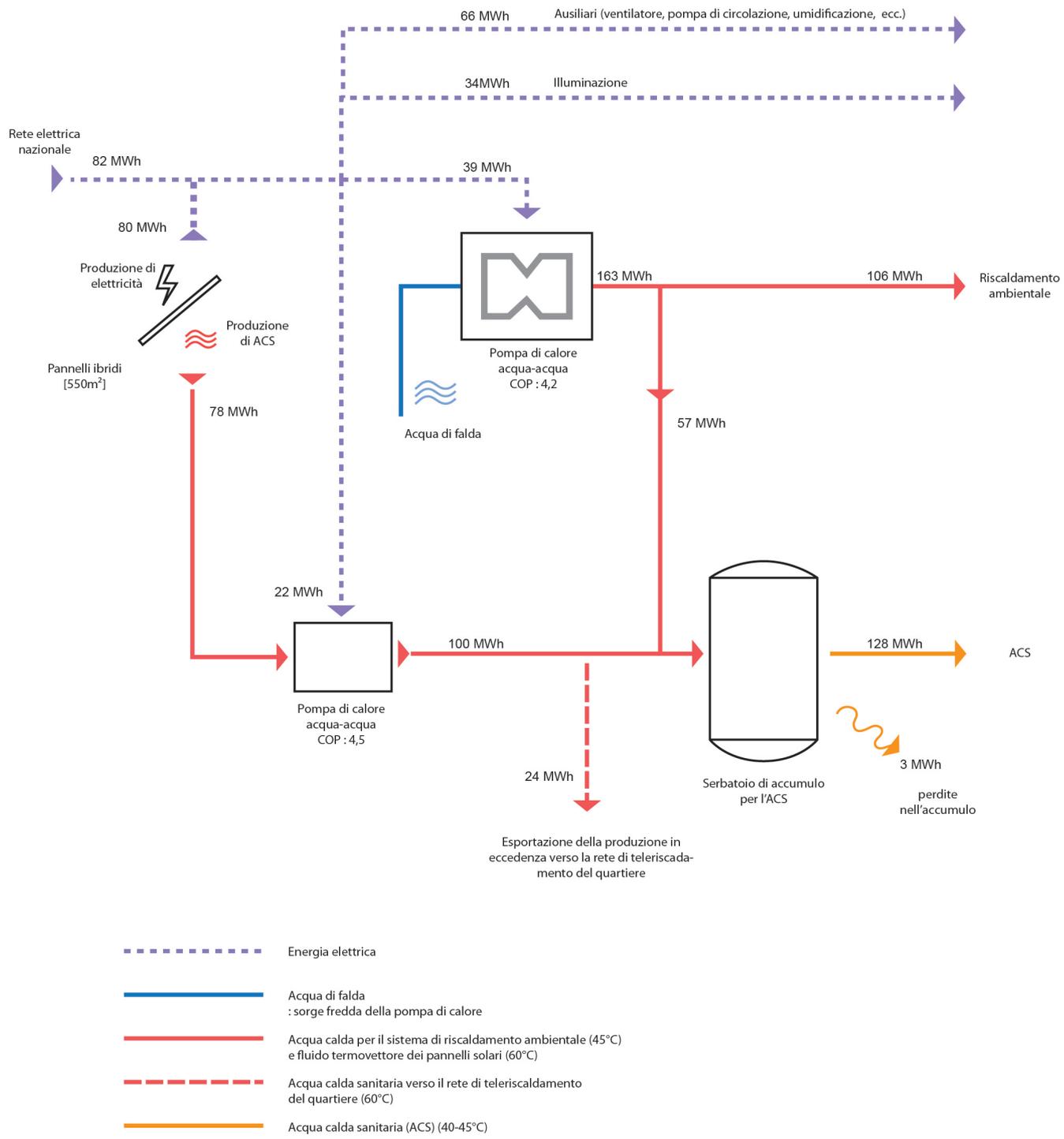


Fig. X-57 Produzione dell'energia

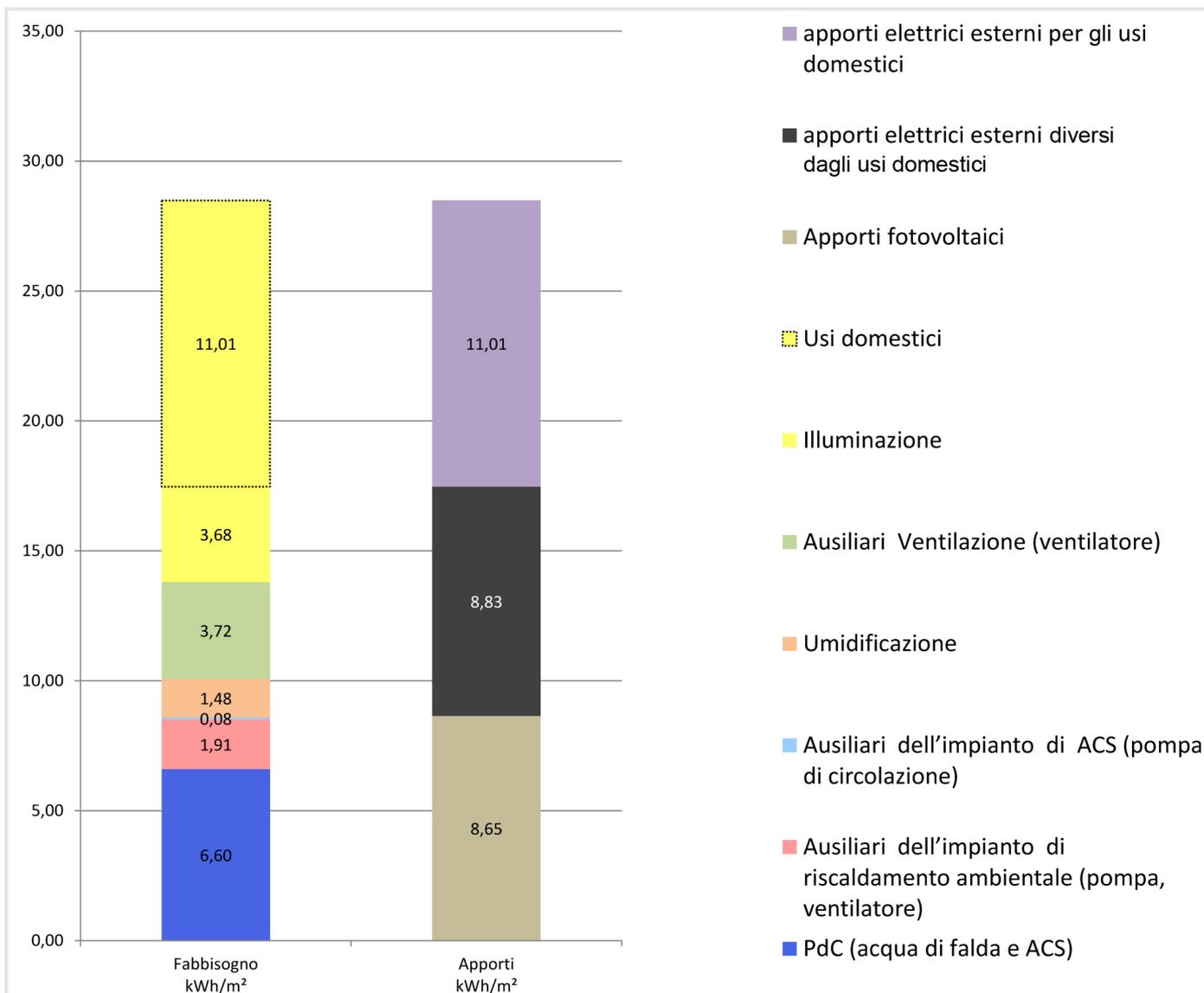


Fig. X-58 Fabbisogno ed apporti finali

3. PRODUZIONE DELL'ENERGIA RICHIESTA

| | |
|--|-------------|
| Apporti elettrici esterni (esclusi gli usi domestici) [kWh/m²] | 8,83 kWh/m² |
| Coefficiente di conversione in energia primaria | 2,58 |
| Fabbisogno annuale di energia primaria [kWh/m²] | 22,8 kWh/m² |

Tab. X-44 Valutazione del fabbisogno annuale di energia primaria

4. FABBISOGNO DI ENERGIA PRIMARIA

La regolamentazione francese RT2012 richiede un fabbisogno annuale di energia primaria inferiore a 60,5 kWh/m². Dal momento che tale limite viene superato dal nostro edificio, abbiamo deciso di fare riferimento alla norma "casa 3 litri", che concerne gli immobili che consumano all'anno meno di tre litri

di combustibile al m² per m² all'anno (30,3 kWh/m²).

L'esportazione dell'energia termica in eccedenza (24 MWh) ci permette di sottrarre a questo fabbisogno globale 2,6 kWh/m².

5. CONSIDERAZIONI AGGIUNTIVE SUL FUNZIONAMENTO DEL SISTEMA IMPIANTISTICO

Il sistema impiantistico scelto permette di massimizzare la flessibilità degli spazi d'insegnamento. La criticità riscontrata consiste nella necessità di un numero elevato di unità decentralizzate, che comporta un fabbisogno energetico elevato. Il fabbisogno per il funzionamento dei diversi ventilatori e pompe (66 MWh) è più alto di quello per la generazione dell'energia termica (61 MWh per le due pompe di calore) (Fig. X-57). I calcoli non tengono conto della quota di energia meccanica prodotta dai ventilatori, che viene convertita in energia termica attraverso il fenomeno di attrito sulle pareti.

X. PROGETTO ILLUMINOTECNICO

La luce, intesa in senso generale, ha un ruolo prominente nella progettazione di un edificio scolastico. Di conseguenza, questo capitolo presenterà tanti aspetti diversi dell'integrazione della variabile "luce" all'interno del nostro progetto :

- I requisiti in termine di qualità dell'illuminazione naturale degli ambienti interni della scuola, secondo le richieste progettuali del programma
- Le condizioni dell'illuminamento nella città di Aubervilliers
- L'ombreggiamento dovuto agli edifici attorno
- L'influenza e l'ombreggiamento dovuti ai diversi volumi del complesso edilizio
- La valutazione del Fattore di Luce Diurna
- L'analisi dell'impatto delle diverse configurazioni della fenestrazione delle pareti interne sul FLD delle aule di studio del blocco centrale
- La ricerca della posizione ideale della fenestrazione nella parete divisoria tra aula di studio e corridoio
- L'analisi dell'influenza della presenza o no di frangisole sull'irraggiamento interne delle aule di studio del blocco centrale
- L'abbagliamento

| | |
|--|------------|
| A. PREMESSA: LUCE NATURALE E FENOMENI ILLUMINOTECNICI | 515 |
| B. PROGETTO ILLUMINOTECNICO | 516 |
| 1. PROCESSO DI STUDIO..... | 516 |
| 2. SCELTA DEGLI INDICATORI..... | 516 |
| 3. REQUISITI DEL PROGRAMMA FUNZIONALE..... | 517 |
| 4. CONCETTI BASILARI..... | 518 |
| 5. MODELLO DI SIMULAZIONE..... | 519 |
| 6. OMBRE..... | 520 |
| 7. POSIZIONE DELLE FINESTRE..... | 520 |
| 8. CONFIGURAZIONI FLESSIBILE DELL'AMBIENTE DI STUDIO..... | 521 |
| 9. PRESENZA DI SCHERMATURE ESTERNE..... | 521 |
| 10. ABBAGLIAMENTO..... | 521 |
| C. RISULTATI DELLE SIMULAZIONI | 522 |
| 1. OMBRE..... | 523 |
| 2. POSIZIONE DELLE FINESTRE..... | 525 |
| 3. CONFIGURAZIONI FLESSIBILE DELL'AMBIENTE DI STUDIO..... | 527 |
| 4. PRESENZA DI SCHERMATURE ESTERNE..... | 533 |

A. PREMESSA: LUCE NATURALE E FENOMENI ILLUMINOTECNICI

L'80 % delle nostre percezioni sensoriali sono visive. La luce costituisce un importante fattore di comfort per l'utente: fenomeni come l'abbagliamento ed una resa di colori inadeguata possono contribuire a distrarre la sua attenzione o comunque a creare un fastidio.

La luce naturale costituisce inoltre una fonte energetica gratuita: un progetto illuminotecnico che ne prevede un corretto sfruttamento può condurre a risparmi notevoli e non va quindi trascurato.

La gestione adeguata della luce si rivela quindi di prima importanza per il successo del progetto.

Le sorgenti di luce naturale sono di tre tipi :

- luce naturale diretta dal sole
- luce della volta celeste
- luce riflessa su superfici esterne

A queste si aggiungono le fonti di luce artificiale più note :

- alogene
- fluorescenti
- incandescenti
- scarica a gas
- LED

La progettazione di un ambiente sano, sicuro e confortevole deve prendere in considerazione i seguenti aspetti connessi alla presenza di luce :

► **Intensità d'illuminazione**

L'occhio umano è in grado di adattarsi a differenti condizioni di illuminazione: l'aspetto di maggior rilievo dell'intensità di luce non risulta quindi tanto il suo valore assoluto, bensì la gestione della sua distribuzione nello spazio.

► **Distribuzione della luminosità**

Un'aula studio è caratterizzata da differenti livelli di luminosità, variabili ad esempio tra il tavolo e le pareti, che conferiscono all'ambiente una certa dinamicità. Un buon progetto illuminotecnico deve infatti aspirare a preservare tanto l'occhio umano dal discomfort legato alla migrazione in spazi a diverso livello luminoso, quanto la suddetta dinamicità.

► **Abbagliamento**

L'abbagliamento è un fenomeno di discomfort, dovuto all'eccessivo contrasto di luminanza tra il tavolo e lo sfondo, che porta ad una perdita temporanea della vista. Le cause principali di tale fenomeno possono essere legate all'eccessiva intensità luminosa della sorgente ed all'eventuale presenza di una fonte di luce molto maggiore rispetto a quelle reali o apparenti presenti nel campo.

► **Ombre**

Le ombre, presenti inevitabilmente in ogni ambiente illuminato, costituiscono tanto un fattore di discomfort quanto un sostegno alla percezione della tridimensionalità. Tenendo conto di questi fattori risulta necessario, ad esempio, collocare la sorgente luminosa alla sinistra di un individuo destrorso intento a scrivere e, contemporaneamente, in posizione non eccessivamente rialzata.

► **Proprietà cromatiche**

Lo spettro visibile, contenente lunghezze d'onda comprese tra 380nm e 780nm circa, è continuo e fornisce una gamma

completa di colori, che la luce artificiale non è in grado di offrire. L'utente, il cui occhio è in grado di percepire tale discrepanza, accusa un disagio di fronte a tale fenomeno.

► **Dinamica**

La luce naturale dona, a differenza di quella artificiale, la percezione del tempo che passa in quanto la posizione del sole varia nel corso del giorno e delle stagioni.

B. PROGETTO ILLUMINOTECNICO

1. PROCESSO DI STUDIO

Lo sviluppo del progetto illuminotecnico è stato condotto ricalcando le seguenti tappe :

1/ Stabilire i criteri per valutare la qualità dell'illuminamento e i differenti requisiti per l'edificio

2/ Sviluppare i concetti basilari per l'illuminazione dell'edificio

3/ Scegliere la modalità di simulazione: programmi basati su modelli a Radiosity o con motori di calcolo di tipo Raytracing (Ecotect o Radiance e DAYSIM)

4/ Creare un modello per le differenti configurazioni dell'edificio

5/ Calcolare le differenti variabili evidenziate

6/ Confrontare i differenti risultati per ogni configurazione dell'edificio

7/ Fare una sintesi e stabilire la configurazione da mantenere nel progetto finale

8/Validare il modello completo

2. SCELTA DEGLI INDICATORI

L'analisi dei fenomeni è basata sulla scelta di indicatori che consentono di confrontare tra loro le differenti soluzioni spaziali e tecnologiche, come ad esempio la disposizione e le dimensioni delle aperture.

Gli indicatori scelti sono i seguenti:

► **FLD**

L'FLD è il rapporto tra l'illuminamento E_i in un punto posto su una superficie interna all'ambiente e l'illuminamento E_e che si ha nello stesso istante in un punto posto su una superficie orizzontale esterna esposta in modo tale da ricevere la luce dall'intera volta celeste.

Il valore minimo del Fattore medio di Luce Diurna è spesso assunto pari al 5% (nel caso in cui non si utilizza la luce artificiale durante la giornata) o al 2% (nel caso opposto).

Il programma funzionale consultato chiede tuttavia di fare riferimento a valori differenti, che vedremo in seguito.

► **Illuminanza (lux)**

L'illuminamento permette di valutare la luce incidente su una superficie di riferimento. Tale grandezza può variare da più di 100000 lux in una giornata di sole estiva fino a meno di 5000 lux in una giornata invernale a cielo coperto. Ciascun ambiente possiede un valore di illuminamento a cui fare riferimento.

► **Luminanza (cd/m²)**

La luminanza è definita come il rapporto tra l'intensità luminosa emessa da una sorgente verso una superficie normale alla direzione del flusso e l'area della superficie stessa. Tale grandezza permette di stimare il fenomeno di abbagliamento e di ipotizzare la conseguente disposizione di schermature mobili o di tende apposite, come richiesto dallo stesso programma funzionale.

► **Contrasto**

Il contrasto, definito come rapporto tra le luminanze di oggetti vicini e solitamente compreso tra 3 e 10, viene assunto inferiore a 3 per i luoghi di lavoro (scuole incluse).

► **Daylight Autonomy**

La Daylight Autonomy corrisponde alla percentuale di ore all'anno in cui il livello minimo di illuminamento viene garantito con la sola luce naturale.

3. REQUISITI DEL PROGRAMMA FUNZIONALE

Il programma funzionale riporta i requisiti relativi ad per ogni aula. La tabella sottostante sintetizza le informazioni fin ora raccolte:

| Nome dello spazio | Illuminazione generale | Illuminazione naturale | Viste esterne | Protezione solare |
|---|------------------------|---|---------------|-------------------|
| CIO | | | | |
| Uffici | 300 lux | Luce naturale FLD>2%/1,5% per 80% della superfici | Si | Si |
| Aula per il personale/Aula per riunioni | 400 lux | Luce naturale FLD>2%/1,5% per 80% della superfici | Si | Si |
| Direzione e inquadramento pedagogico | | | | |
| Uffici/spazio per il personale | 300 lux | Luce naturale FLD>2%/1,5% per 80% delle superfici | Si | Si |
| Bagni | 100-200 lux | Luce naturale se possibile | Inidifferente | Inidifferente |
| Accoglienza | 200 lux | Luce naturale FLD>2%/1,5% per 80% delle superfici | Si | Si |
| Polo accoglienza | | | | |
| Portinaria/Accoglienza genitori | 300 lux | Luce naturale FLD>2%/1,5% per 80% delle superfici | Si | Si |
| Atrio di accoglienza | 200 lux | Luce naturale FLD>2%/1,5% per 80% delle superfici | Si | Si |
| Polo aperto | | | | |
| Aula per le associazioni/Aula polivalente | 300 lux | Luce naturale FLD>2%/1,5% per 80% delle superfici | Si | Si |
| Aula mostra | 200-400 lux | Luce naturale FLD>2%/1,5% per 80% delle superfici | Si | Si |
| Atrio di accoglienza | 200 lux | Luce naturale FLD>2%/1,5% per 80% delle superfici | Si | Si |
| Bagni | 100-200 lux | Luce naturale se possibile | Inidifferente | Inidifferente |
| Locali tecnici | 150 lux | Solo luce artificiale | No | No |
| Polo insegnamento | | | | |
| Aule semplici/per le arti plastiche/musica | 300lux | Luce naturale FLD>2%/1,5% per 80% delle superfici | Si | Si |
| Aule di scienze/Aule di tecnologia | 400 lux | Luce naturale FLD>2%/1,5% per 80% delle superfici | Si | Si |
| Bagni | 100-200 lux | Luce naturale se possibile | Inidifferente | Inidifferente |
| Servizio medico-sociale | | | | |
| Uffici | 300 lux | Luce naturale FLD>2%/1,5% per 80% delle superfici | Si | Si |
| Attesa/Bagni | 100-200 lux | Luce naturale se possibile | Inidifferente | Inidifferente |
| Mensa scolastica | | | | |
| Mensa allievi/adulti | 300 lux | Luce naturale FLD>2%/1,5% per 80% delle superfici | Si | Si |
| Accoglienza | 200 lux | Luce naturale FLD>2%/1,5% per 80% delle superfici | Si | Si |

Tab. XI-1 Requisiti del programma funzionale

4. CONCETTI BASILARI

Il lotto in cui si colloca il nostro collège è caratterizzato dalla presenza di edifici alti. La criticità delle condizioni al contorno, legate anche al suo orientamento, e le richieste precise formulate dal programma funzionale ci hanno spinto ad approfondire il tema della luce naturale sin dai primi schizzi.

La definizione di alcuni concetti basilari ci ha permesso di definire le seguenti strategie :

► Orientamento

Il lato del lotto che si sviluppa lungo l'asse est/ovest risulta il doppio rispetto a quello lungo l'asse nord/sud. I rapporti tra le parti e l'orientamento di cui sopra hanno influenzato in maniera significativa il nostro progetto, offrendoci oltretutto la possibilità di minimizzare la quantità di schermature da predisporre contro l'abbagliamento.

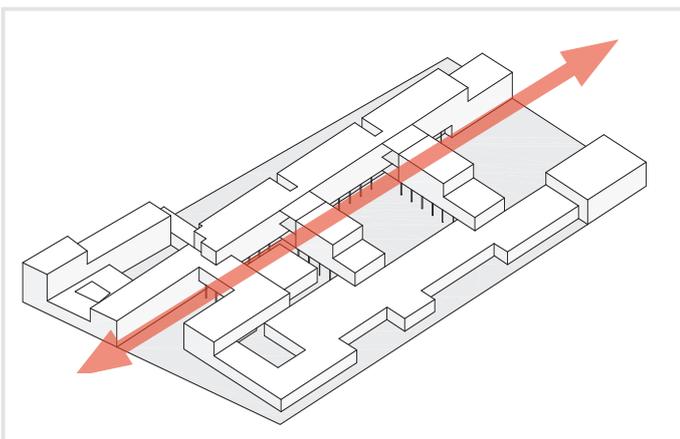


Fig. XI-1 Orientamento secondo un asse est/ovest

► Forma

La forma dell'edificio, piramidale a gradinate, risponde alla volontà di massimizzare la luminosità.

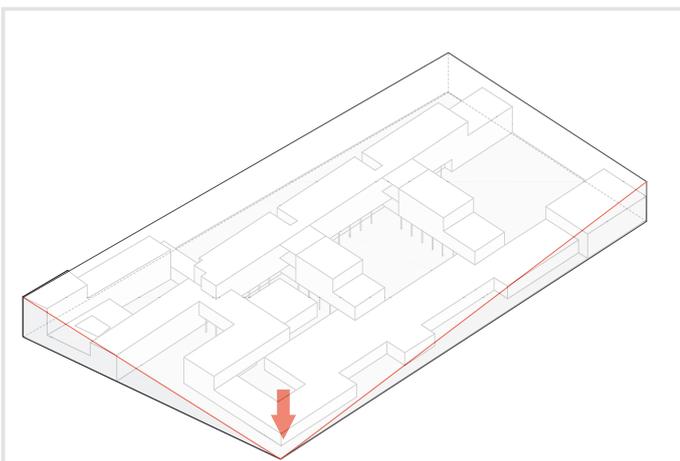


Fig. XI-2 Forma piramidale

► Profondità

La distribuzione canonica delle aule negli edifici scolastici, spesso dettata da ragioni economiche, risulta simmetrica rispetto ad un corridoio di larghezza compresa tra due e tre metri, dando origine ad un corpo di fabbrica profondo fino a venti metri. Ipotizzando un'altezza di interpiano di tre metri e sapendo quindi che la luce naturale perde di intensità oltre una distanza dal tamponamento trasparente pari a sei metri, abbiamo abbandonato la disposizione canonica a favore di una distribuzione asimmetrica che garantisce una profondità del corpo di fabbrica di dodici metri.

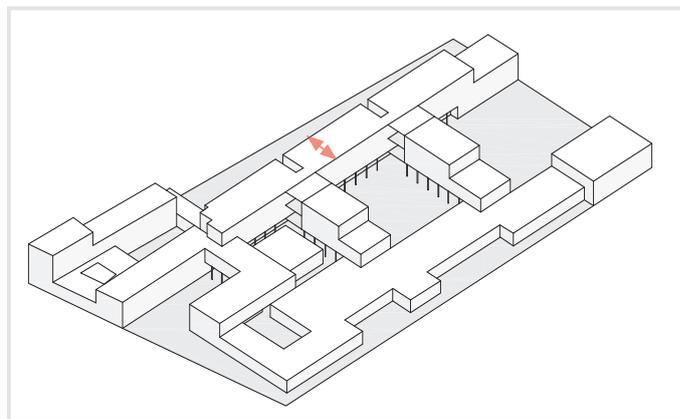


Fig. XI-4 Profondità limitata della sezione trasversale dell'edificio

► Distribuzioni

La scelta distributiva asimmetrica è stata condotta anche al fine di illuminare naturalmente i corridoi ed a consentire una piacevole vista verso l'esterno.

► Pareti

Approfittando della ridotta profondità del corpo di fabbrica, abbiamo interposto delle pareti vetrate tra ambienti di studio e corridoi al fine di illuminare adeguatamente anche la porzione di aula più distante dalle aperture.

► Posizione

L'ala contenente le aule è stata collocata il più lontano possibile dalla strada e dalle torri alte situate di fronte all'edificio per evitare che ostruissero la volta celeste.

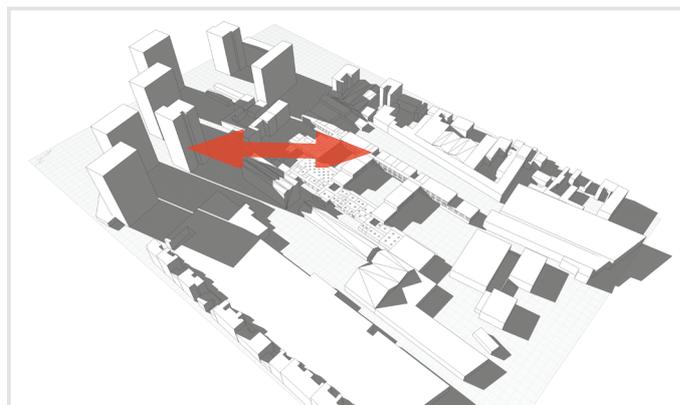


Fig. XI-3 Grande distanza di separazione col contesto che garantisce un ombreggiamento minimo da parte degli edifici attorni

► Livello di riflessione

I soffitti e le parete verticale sono scelte con un alto livello di riflessione.

► Opacità

La scelta di rivestire in maniera opaca la fascia inferiore ad un metro del perimetro delle aule è stata dettata dallo scarso contributo all'illuminazione di tale porzione di parete, che risulta oltretutto ostruita dalla presenza dei banchi.

5. MODELLO DI SIMULAZIONE

In seguito alla definizione delle linee-guida sopra citate, abbiamo effettuato delle simulazioni numeriche che ci permettessero di analizzare i fenomeni illuminotecnici agenti sul nostro caso di studio secondo un approccio maggiormente scientifico. L'obiettivo principale di tale operazione era il confronto tra le differenti configurazioni, finalizzato alla scelta della soluzione ottimale.

La modellazione dell'edificio, condotta per poli funzionali, è stata effettuata con l'ausilio del software Ecotect.

I calcoli sono stati effettuati con l'ausilio di Radiance, motore di calcolo Raytracing noto per la sua affidabilità.

I due programmi sono stati connessi tra loro grazie all'adozione della versione Desktop, che si avvale di un processo automatico di import-export.

Per i materiali, ci siamo messi nel caso seguente assai normalizzato:

| Elementi | Coefficiente di riflessione |
|----------|-----------------------------|
| Muri | 50 % |
| Suoli | 30 % |
| Soffitti | 70 % |

Tab. XI-2 Coefficienti di riflessione

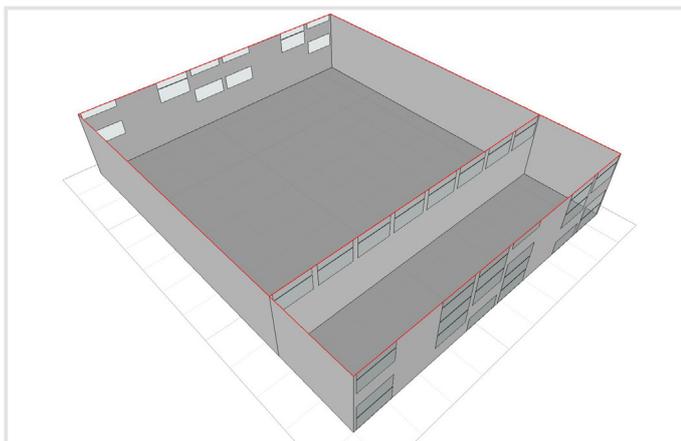


Fig. XI-6 Modello iniziale di studio

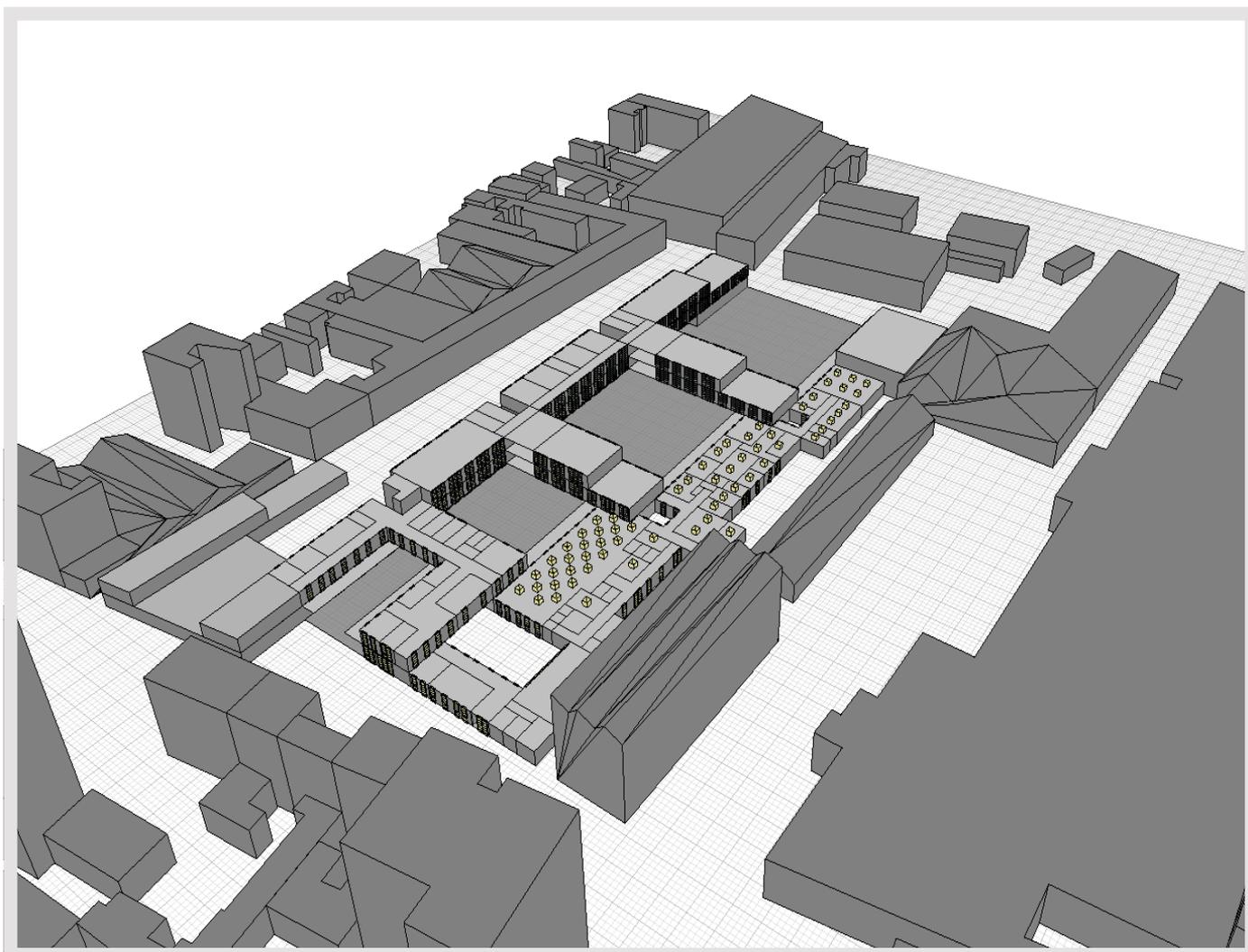


Fig. XI-5 Vista totale del modello ecotect con il contesto

6. OMBRE

Lo studio delle ombre, condotto dapprima in maniera qualitativa, è stato in seguito approfondito attraverso l'analisi del fenomeno durante tre particolari momenti dell'anno: il solstizio d'estate, il solstizio d'inverno ed uno solo dei due equinozi in quanto caratterizzati dalla medesima posizione del sole.

La figura e la *Tavola XI-2*, contengono una spiegazione più dettagliata di quanto detto sopra.

Gli unici momenti dell'anno in cui le ombre proiettate dal contesto influiscono in maniera significativa sulle aule sono le prime ore del mattino e del tardo pomeriggio invernale. L'utilizzo della luce artificiale risulta in questi casi l'unica soluzione possibile.

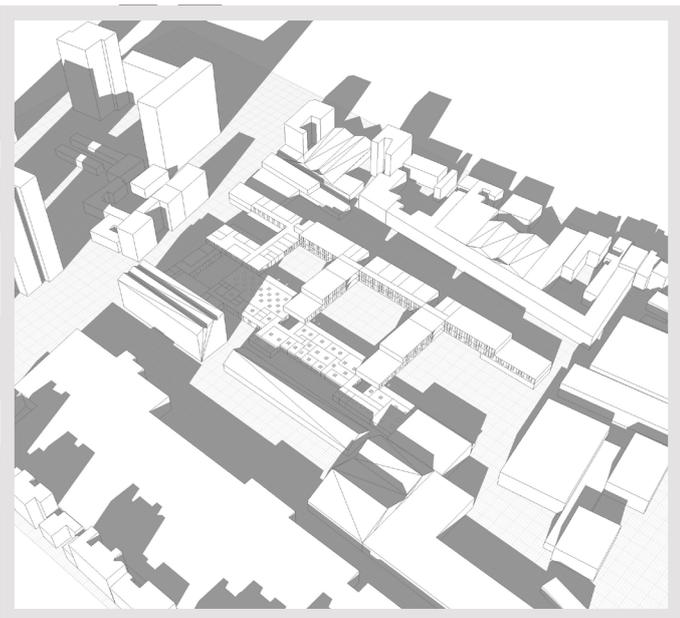


Fig. XI-7 Ombre - solstizio d'inverno (21 dicembre) - 13:00

7. POSIZIONE DELLE FINESTRE

La configurazione di base del primo piano del blocco centrale è costituita da quattro aule di studio e da un deposito. La posizione delle finestre in modo da illuminare sufficientemente gli ambienti minimizzando le porzioni vetrate è stata scelta tra tre possibili disposizioni.

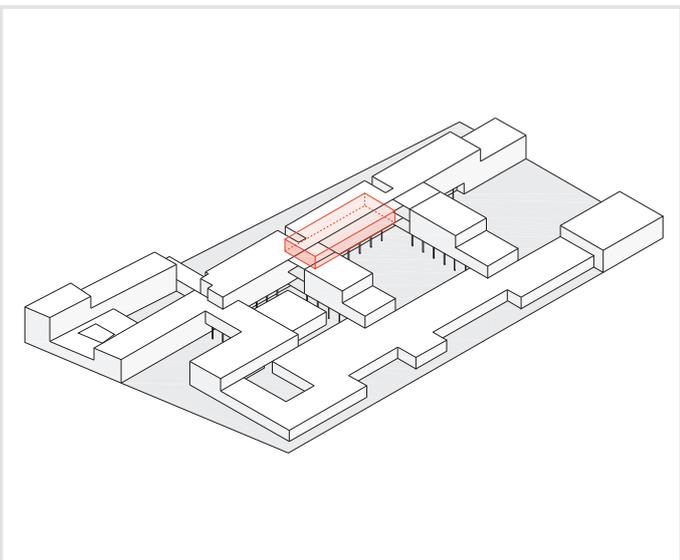


Fig. XI-8 Zona studiata : 1° piano del blocco centrale

Le tre situazioni studiate sono :

- Parete interna cieca
- Finestre disposte nella terza parte della parete collocata in alto
- Finestre disposte nella terza parte della parete collocata al centro

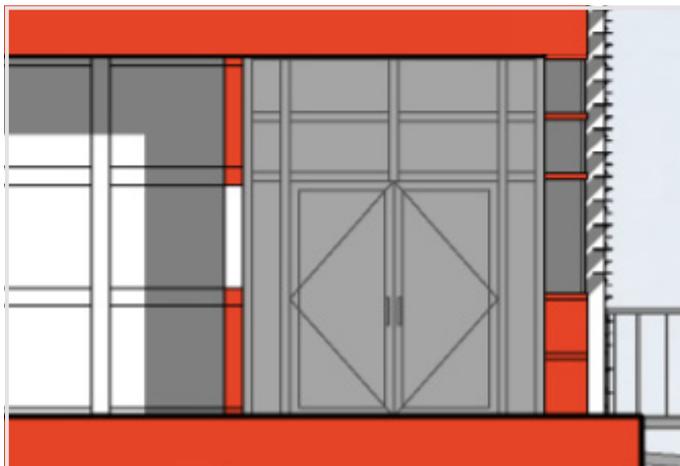


Fig. XI-9 Sezione : terzo centrale della parete finestrato

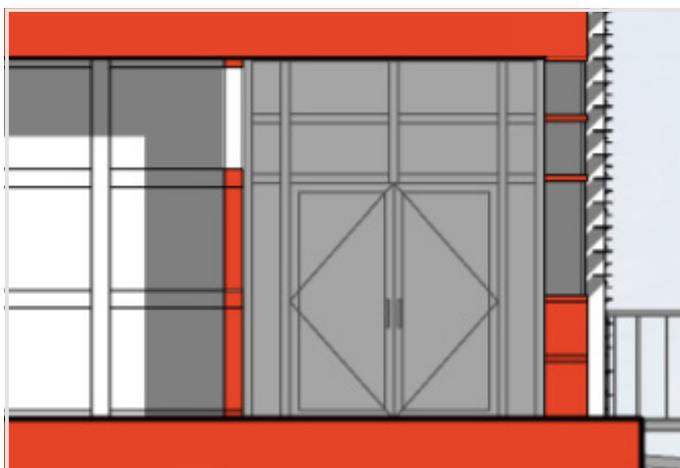


Fig. XI-10 Sezione : terzo in alto della parete finestrato

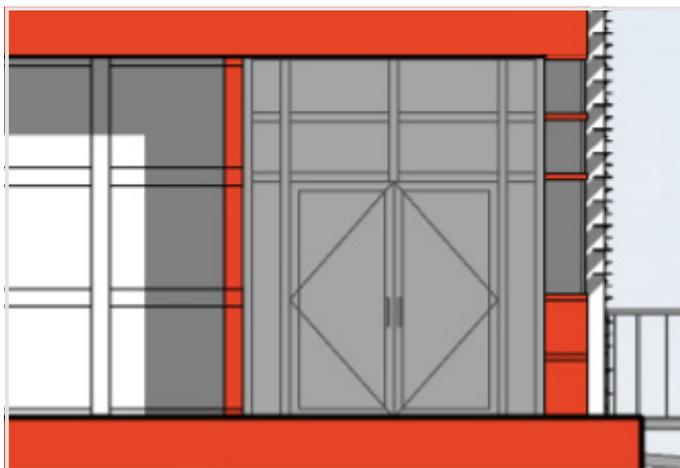


Fig. XI-11 Sezione : parete totalmente non finestrata

I risultati delle simulazioni sono stati riassunti nella *Tavola XI-2*.

La posizione del tamponamento trasparente che risulta più vantaggiosa si trova nella fascia centrale della parete, compresa tra un metro e due metri di altezza da terra.

Se si adattasse una simile soluzione ad una scuola caratterizzata da un modello distributivo simmetrico, l'apertura suddetta consentirebbe un mutuo contatto visivo tra due aule

affrontate, causando la distrazione degli alunni.

Adattando invece la soluzione suddetta al nostro caso di studio, si rivolgerebbe l'apertura verso il corridoio, favorendo una sorveglianza indiretta dello stesso, particolarmente utile in un istituto frequentato da allievi problematici.

L'altezza esecutiva della finestra viene infine portata a 1,20m per consentire continuità del traverso situato sopra la porta d'ingresso, all'altezza di 2,20m.

8. CONFIGURAZIONI FLESSIBILE DELL'AMBIENTE DI STUDIO

Il tema della parete spostabile, che conferisce flessibilità all'organizzazione delle aule è stato oggetto di studio dei diversi aspetti della progettazione architettonica :

- le tipologie di spazio rapportate all'utente
- la tecnologia di montaggio
- le configurazioni impiantistiche e la loro gestione
- l'acustica e l'illuminotecnica dei differenti spazi.

Lo studio della flessibilità degli ambienti è stato effettuato, come per diversi altri aspetti del progetto, sul blocco centrale dell'edificio.

Il vincolo impiantistico ha imposto di limitare il campo di scelta a nove configurazioni, in seguito adeguatamente modellate con l'ausilio di Ecotect al fine di valutarne l'FLD.

I risultati delle simulazioni sono riportati nelle tavole *Tavola XI-3*, *Tavola XI-4* e *Tavola XI-5*.

Come si può vedere nelle tabelle dei risultati, in tutte le aule – a parte i depositi – il requisito di 80% della superficie con un FLD > 1,5% è rispettato. Inoltre, la maggior parte delle aule superano il secondo requisito con un FLD > 2%. Quindi nostro approccio flessibile della progettazione delle aule scolastiche si adatta bene alle esigenze illuminotecniche del programma funzionale.

Le tabelle di sintesi mostrano che in tutte le aule, ad eccezione dei depositi, viene rispettato un FLD maggiore dell'1,5% per almeno l'80% della loro superficie. La maggior parte degli ambienti presenta inoltre un FLD maggiore del 2%. Tali risultati confermano l'adeguatezza del sistema a pareti flessibili ai requisiti illuminotecnici del programma funzionale.

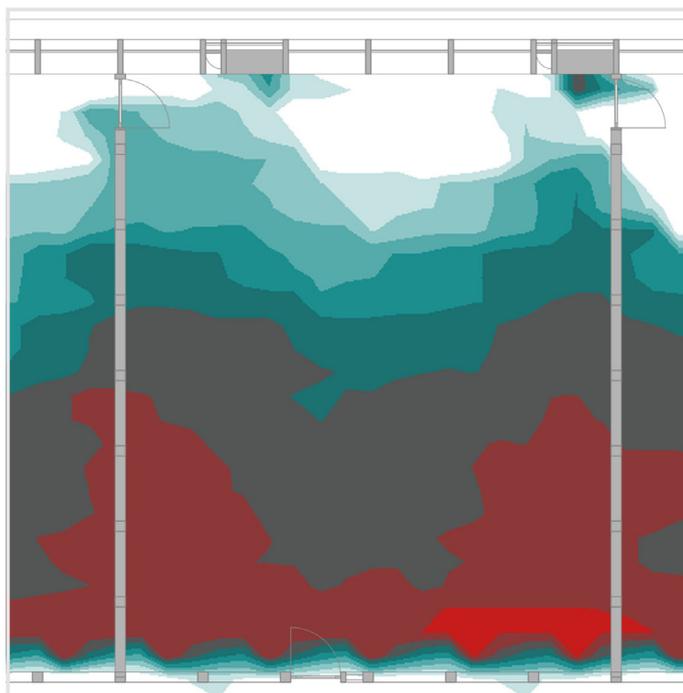


Fig. XI-12 FLD: Configurazione A - Aula 2 - FLD

Riportando sull'asse delle ascisse di un grafico cartesiano i valori di FLD precedentemente determinati e sull'asse delle ordinate la percentuale di Daylight Autonomy, siamo riusciti a stimare quest'ultima in maniera approssimativa.

La curva che maggiormente ci interessa tra quelle disegnate, relativa ad un illuminamento minimo di 300 lux, è colorata in rosso.

Il valore medio dell'FLD pari a 3, ottenuto per la configurazione A di base della seconda aula, determina un valore della daylight autonomy pari all'82% circa. La simulazione appena svolta si rivela utile soprattutto per valutare il fabbisogno elettrico per l'illuminazione artificiale.

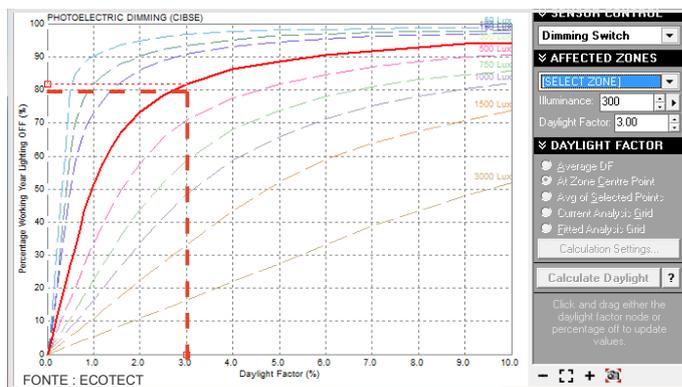


Fig. XI-13 La curva del Daylight Autonomy in funzione del FLD per dei requisiti d'illuminanza specifici - in rosso la curva a 300 lux

9. PRESENZA DI SCHERMATURE ESTERNE

Il bilancio energetico dell'edificio ci ha permesso di evidenziare la necessità di adottare delle schermature esterne al fine di limitare il surriscaldamento estivo. Tale sistema potrebbe, tuttavia, condizionare in maniera significativa il grado di illuminazione delle aule.

L'illuminamento è stato misurato ad un'altezza di 70 cm dal piano di lavoro per tenere conto della minore luminosità dovuta alla presenza dei frangisole.

I risultati della simulazione sono evidenziati nella *Scheda VI-5*.

La modellazione ci permette di notare che il sistema di schermature non influisce sull'illuminamento dell'ambiente esterno delle aule, soprattutto perché risultano orientate verso nord.

Le aule rivolte verso est o ovest, essendo soggette anche al fenomeno dell'abbagliamento, richiedono uno studio più approfondito che tenga conto di tale fenomeno.

10. ABBAGLIAMENTO

Esistono differenti tipi di abbagliamento :

► Abbagliamento debilitante (disability glare)

Disagio visivo che provoca un peggioramento istantaneo delle funzioni dell'apparato oculare, impedendo la sensibilità a cogliere i contrasti.

► Abbagliamento di disagio o psicologico (discomfort glare)

Tipo di abbagliamento più riscontrabile negli interni e che determina una sensazione di disagio soggettivo di origine non ben identificata e di conseguenza non facilmente misurabile. Esso avviene qualora alcune condizioni di illuminazione, in apparenza soddisfacenti, producono con il tempo un disagio

soggettivo. La CIE lo definisce “abbagliamento che produce una sensazione sgradevole senza necessariamente impedirne la visione”.

► **Abbagliamento diretto**

Fenomeno provocato da sorgenti luminose naturali ed artificiali agenti sull'ambiente visivo, nel quale l'immagine della sorgente abbagliante cade nella zona centrale di massima sensibilità della retina (area foveale), creando il maggior disturbo.

► **Abbagliamento indiretto**

Fenomeno provocato quando la luminanza che disturba cade al di fuori della fovea, per questo motivo è meno percettibile ma può dare in ogni caso luogo a stanchezza e disturbi alla visione.

► **Abbagliamento per contrasto**

Abbagliamento dovuto ad un forte contrasto fra le luminosità delle superfici presenti all'interno del campo visivo.

► **Abbagliamento per saturazione**

Abbagliamento dovuto all'eccessiva luminosità della sorgente luminosa.

► **Abbagliamento riflesso**

Fastidio causato dalla riflessione speculare di uno o più oggetti che ricevono la luce da sorgenti interne o esterne ed è quindi dovuto alla elevata luminanza di superfici lucide secondo le prescrizioni della norma UNI 10380, l'abbagliamento riflesso può essere valutato mediante il fattore di resa del contrasto CFR.

Il rischio di abbagliamento è un fenomeno che, data la natura non prettamente illuminotecnica della tesi, ci limitiamo a segnalare in alcune porzioni critiche del nostro edificio. Le aule su pilotis, ad esempio, presentano dei tamponamenti

trasparenti che consentono l'ingresso orizzontale dei raggi solari all'interno delle stesse, foriero di abbagliamento.

L'ausilio di radianze ci ha permesso di simulare le condizioni di illuminazione di un'aula esposta ad ovest ed in particolare di calcolare la luminanza percepita da un allievo seduto nel proprio banco.

L'immagine tridimensionale renderizzata dal software ci consente di rilevare che il valore di base della luminanza caratterizzante la maggior parte delle superfici interne è di circa 400 cd/m².

Tale valore deve essere confrontato con quello attraverso la finestra, oscillante tra 800 cd/m², al livello del suolo, e tra 2500 cd/m² in direzione del cielo.

Il rapporto di luminanza che ne risulta, variando tra 2 e 6, vanifica la possibilità di ottenere un valore inferiore a 3 e ci conduce nel caso di un abbagliamento per contrasto.

Il rapporto di luminanza, pari a 12, che si rileva verso la cattedra, elemento maggiormente soggetto allo sguardo degli studenti, rappresenta una situazione ben più problematica della precedente. Il valore ottenuto, superando di gran lunga (di quattro volte) il requisito massimo di comfort per ambienti di lavoro, viene oltretutto aggravato dall'elevato coefficiente di riflessione della cattedra, rivestita con Polyvision in acciaio porcellanato.

Il caso critico dell'abbagliamento rilevato nelle suddette aule può essere risolto esclusivamente mediante l'utilizzo di tende apposite, in quanto le schermature, per proteggere gli sguardi da raggi solari praticamente orizzontali, dovrebbero essere chiuse in modo da procurare l'oscuramento totale dell'ambiente. Le tende non solo consentono all'utente di guardare all'esterno seppur proteggendolo dall'abbagliamento, ma possono anche tornare utili nel caso di proiezioni di video o diapositive.

C. RISULTATI DELLE SIMULAZIONI

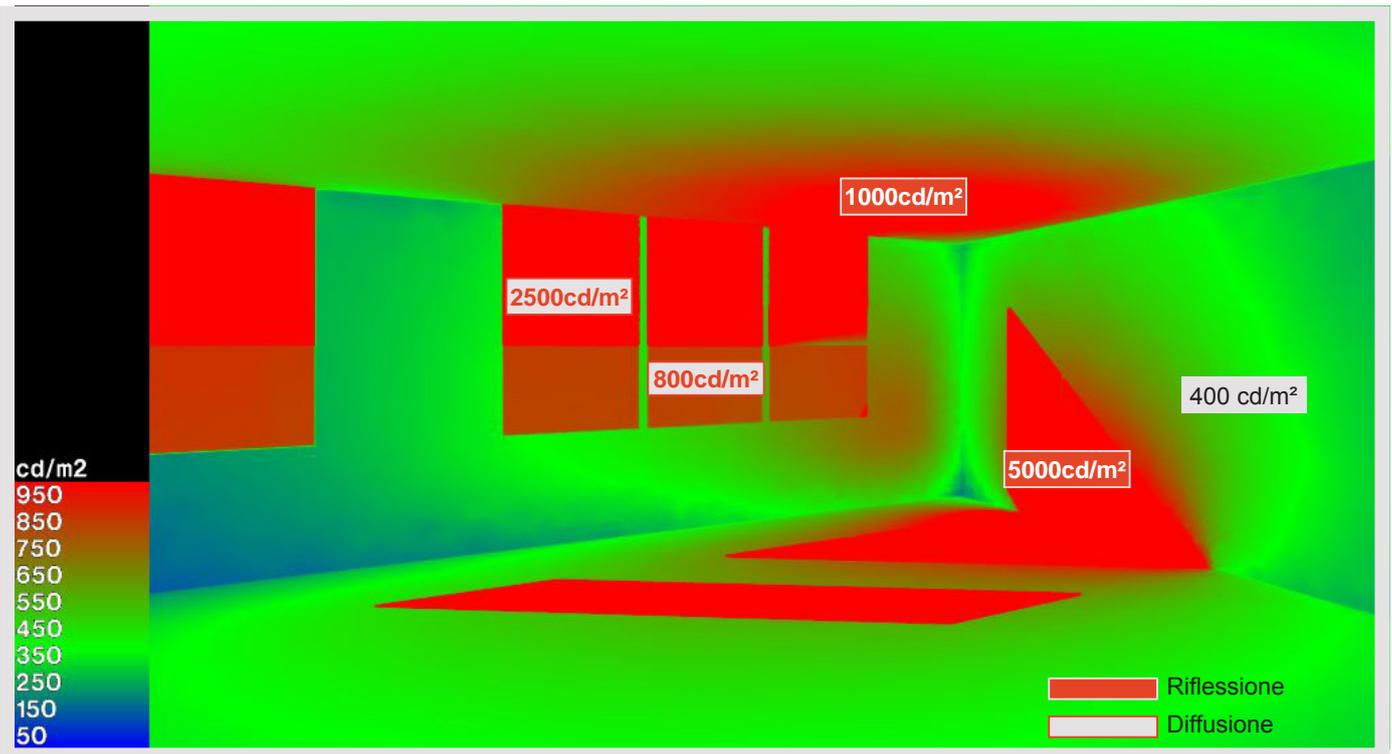
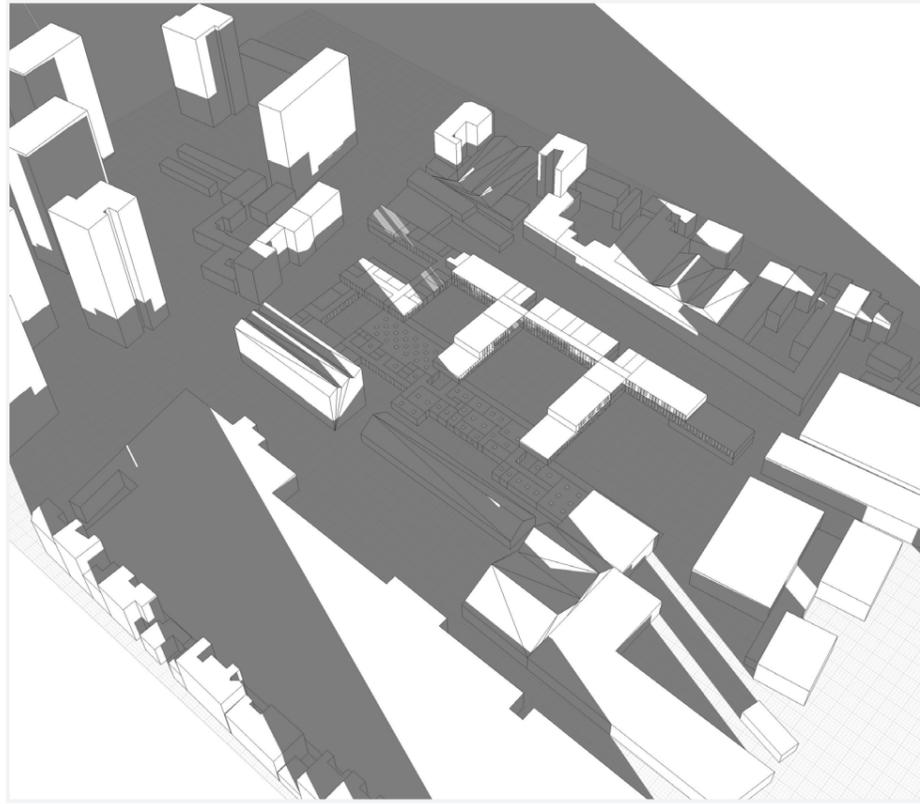


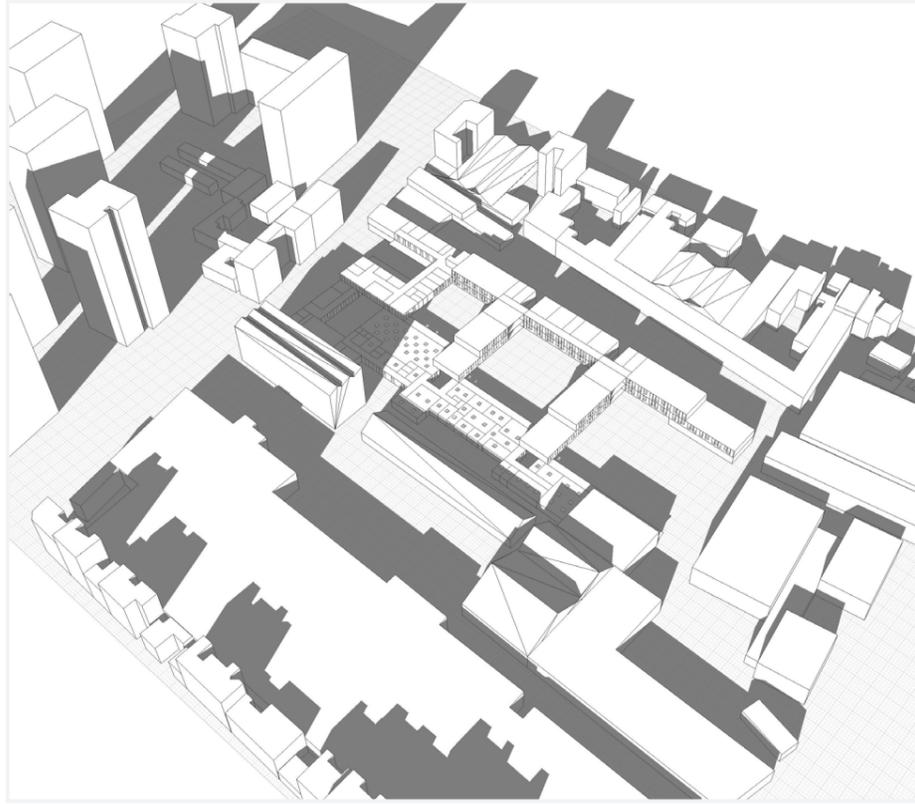
Fig. XI-14 Luminanza percepita in un'aula di cui la facciata vetrata è orientata verso ovest - 21 marzo alle 16:00

1. OMBRE
TAVOLA XI-1

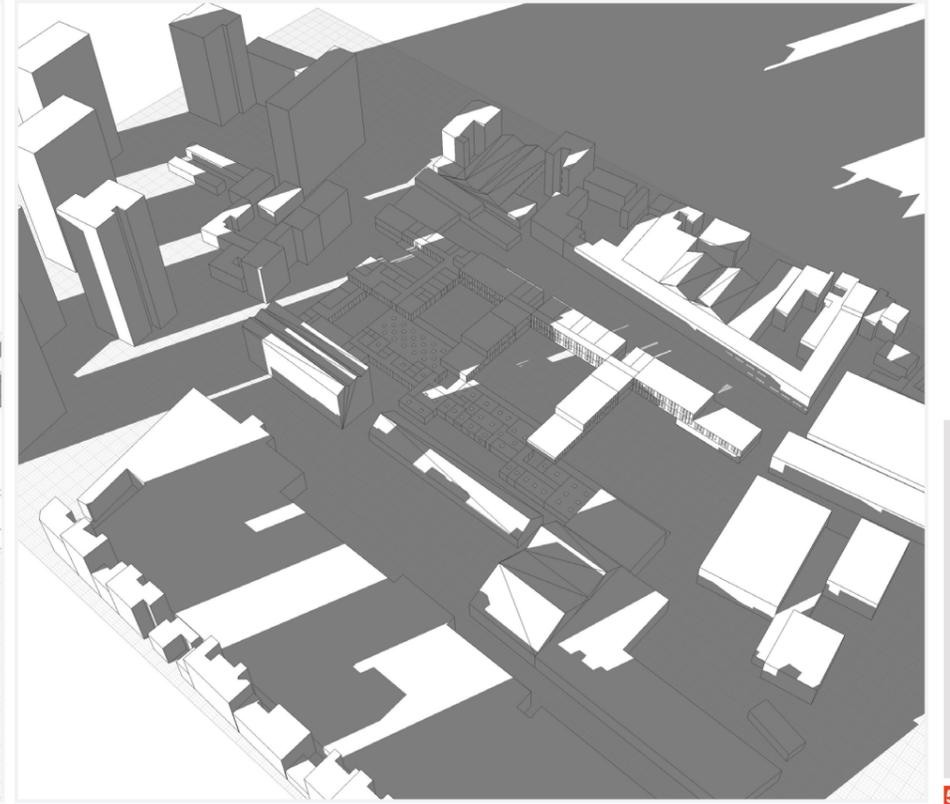
studio delle ombre create sia dall'edificio stesso che dagli edifici circostanti, e soprattutto dall'insieme di torre di abitazione ad ovest che sono alte 13 piani. Lo studio è condotto per il giorno 21 dicembre e 21 giugno che sono i casi estremi.



09.00

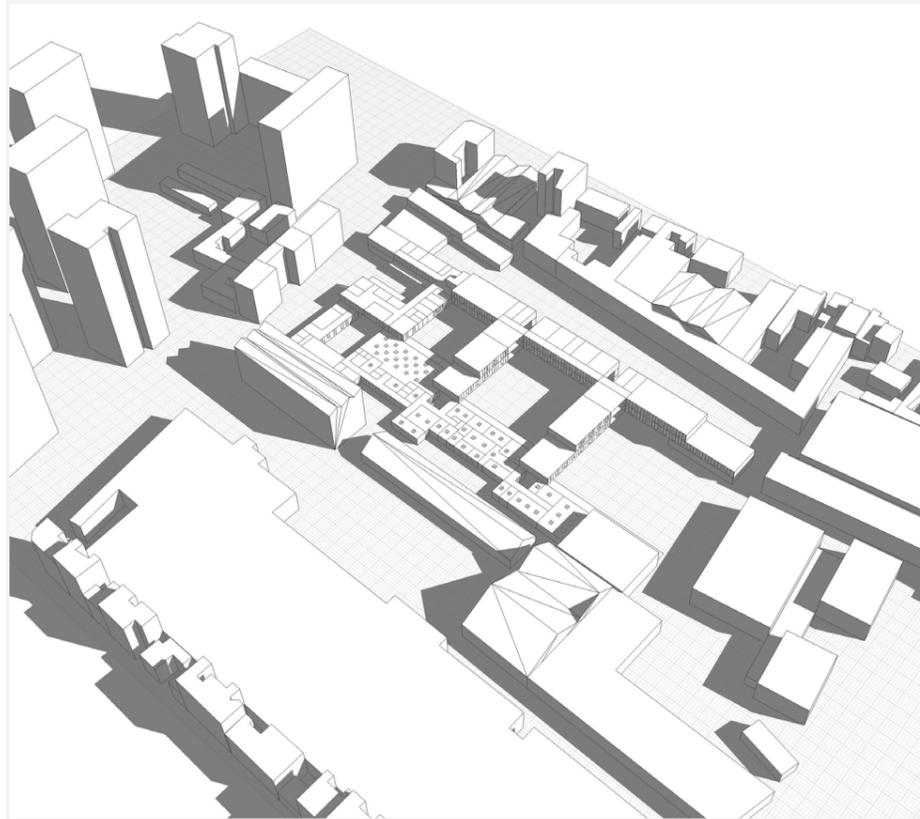


13.00

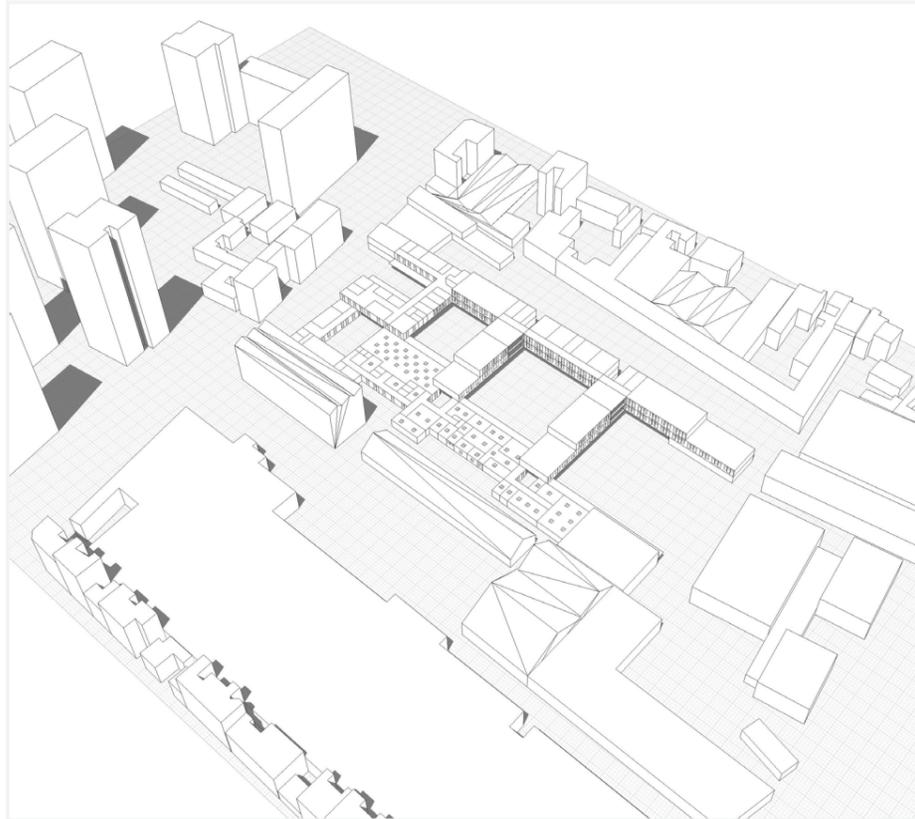


16.00

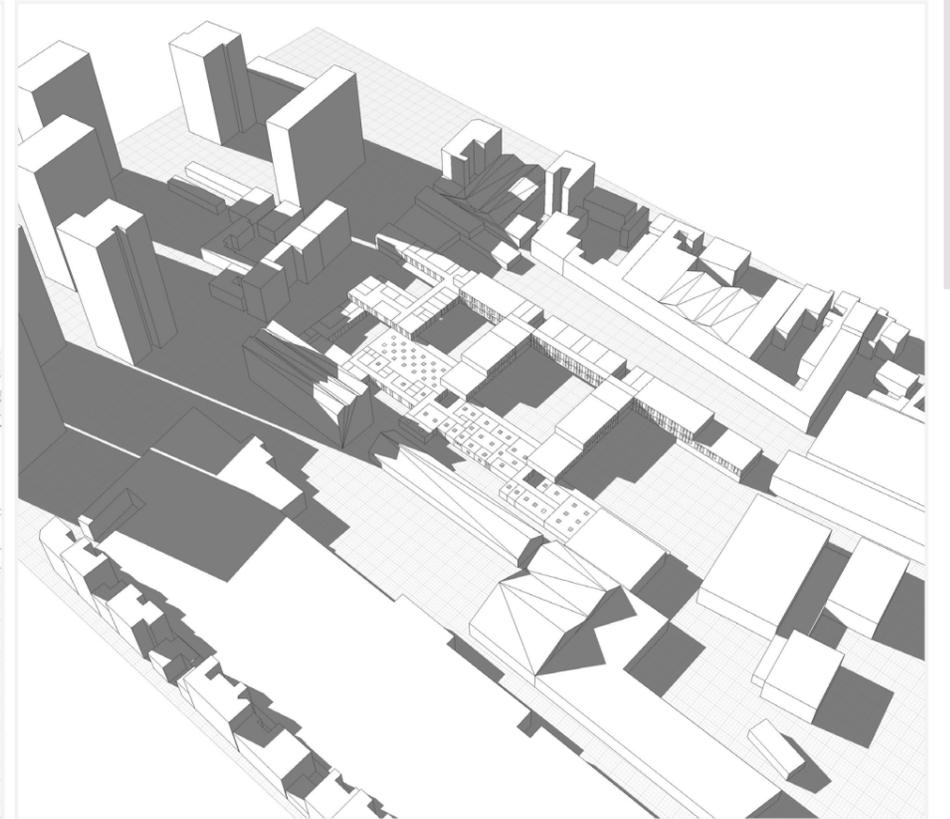
21 DICEMBRE



08.00



13.00



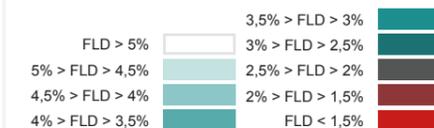
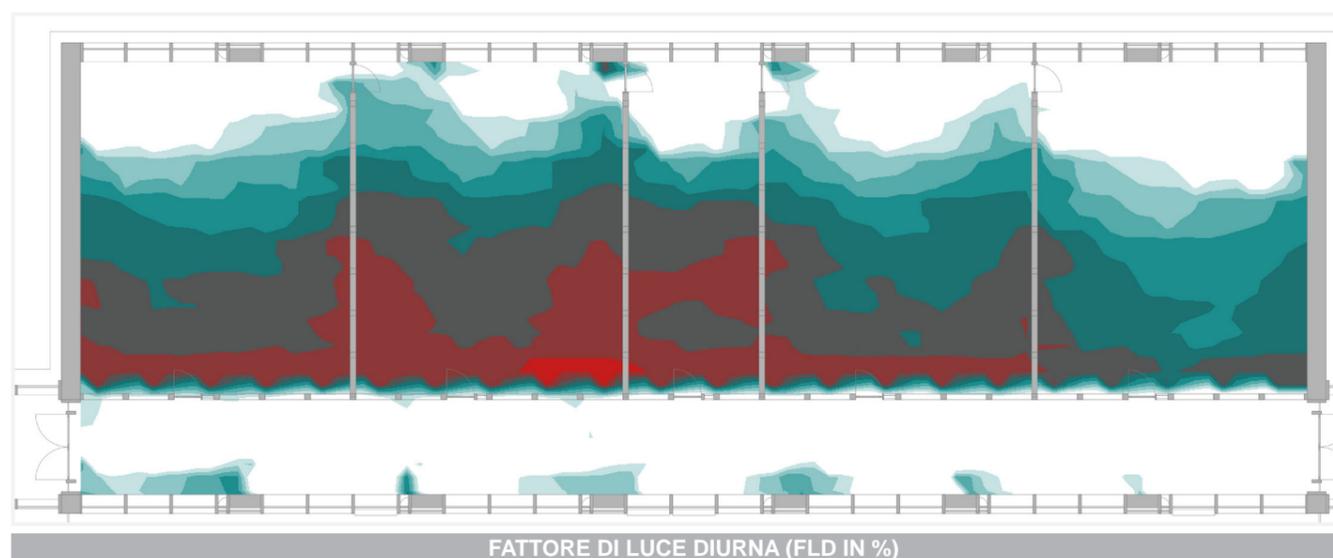
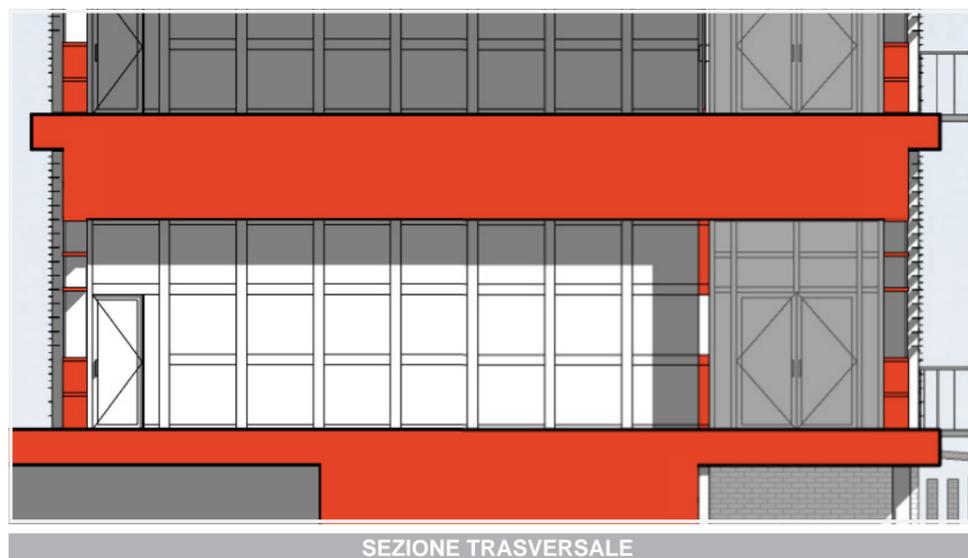
18.00

21 GIUGNO

2. POSIZIONE DELLE FINESTRE

TAVOLA XI-2

Studio dell'influenza della presenza e della posizione di finestre nella parete tra circolazione e aula nella configurazione A. Si ricorda i requisiti del programma funzionale che richiede uno FLD > 2% o FLD > 1,5% su 80% della superficie dell'aula. La griglia di misura è stata impostata ad un'altezza di 70 cm che corrisponde all'altezza di una scrivania.

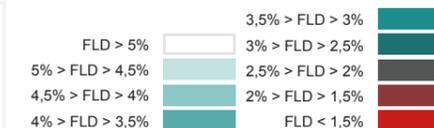
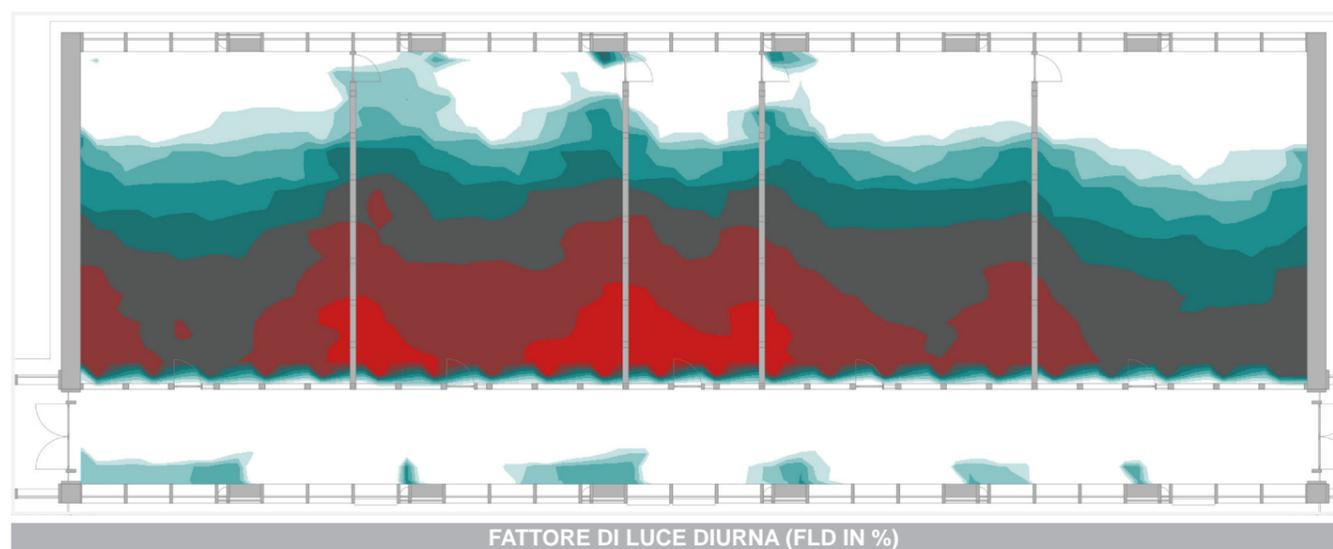
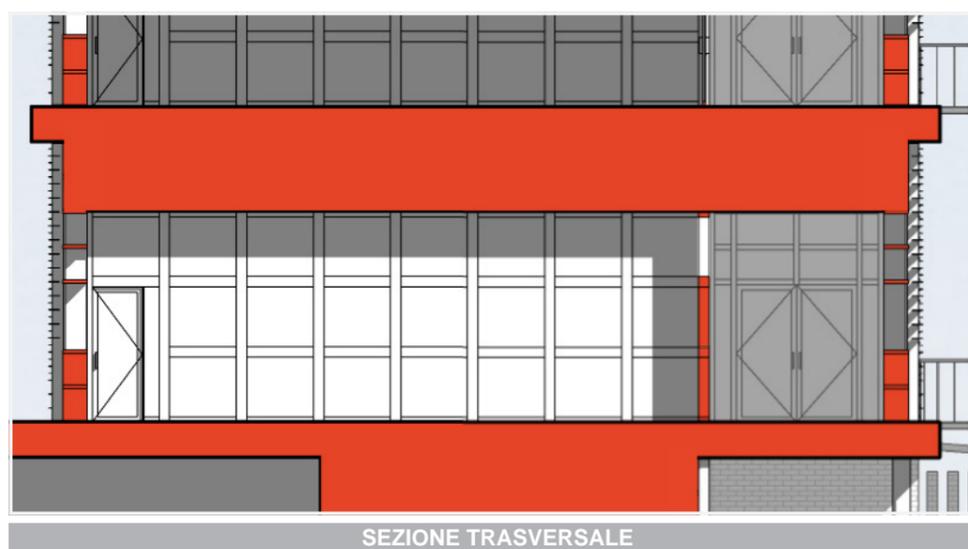


LEGGENDA

| aula | superficie con FLD>2% | superficie con FLD>1,5% |
|------------------------|-----------------------|-------------------------|
| BLOCCO CENTRALE | | |
| Aula 1 | 83% | 99% |
| Aula 2 | 65% | 90% |
| Aula 3 | 62% | 83% |
| Aula 4 | 78% | 99% |
| Aula 5 | 98% | 100% |

PERCENTUALE DI SUPERFICIE

FINESTRE IN MESO ALLA PARETE

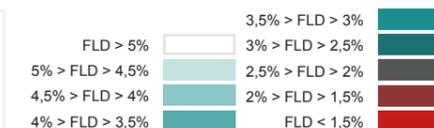
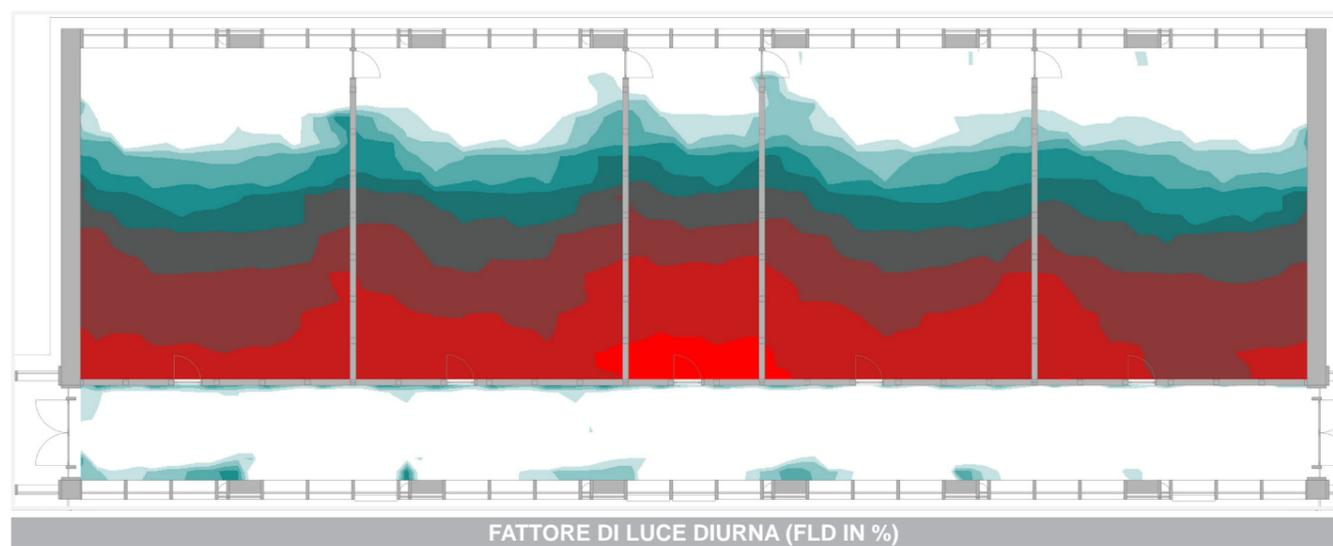
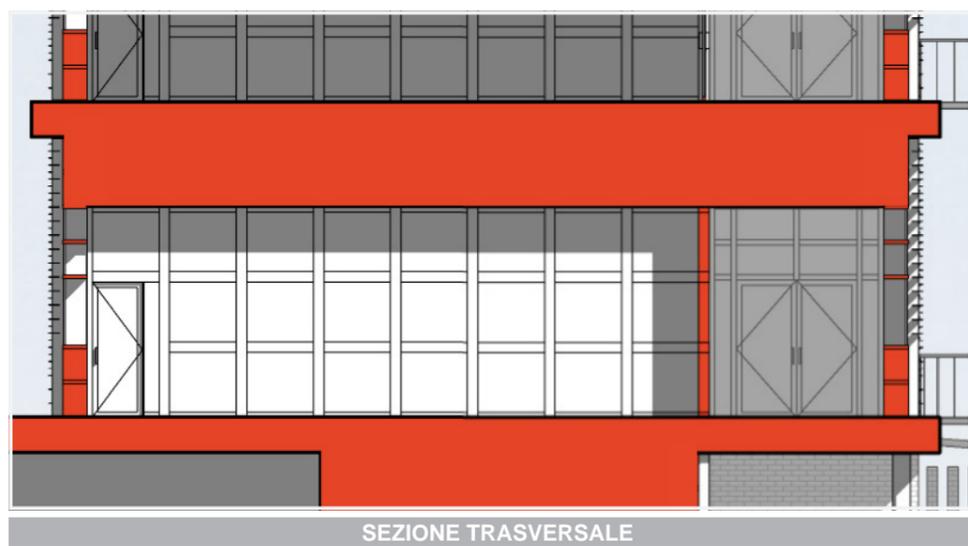


LEGGENDA

| aula | superficie con FLD>2% | superficie con FLD>1,5% |
|------------------------|-----------------------|-------------------------|
| BLOCCO CENTRALE | | |
| Aula 1 | 71% | 97% |
| Aula 2 | 59% | 83% |
| Aula 3 | 58% | 77% |
| Aula 4 | 70% | 97% |
| Aula 5 | 89% | 100% |

PERCENTUALE DI SUPERFICIE

FINESTRE IN ALTO DELLA PARETE



LEGGENDA

| aula | superficie con FLD>2% | superficie con FLD>1,5% |
|------------------------|-----------------------|-------------------------|
| BLOCCO CENTRALE | | |
| Aula 1 | 62% | 85% |
| Aula 2 | 58% | 76% |
| Aula 3 | 52% | 63% |
| Aula 4 | 60% | 75% |
| Aula 5 | 65% | 89% |

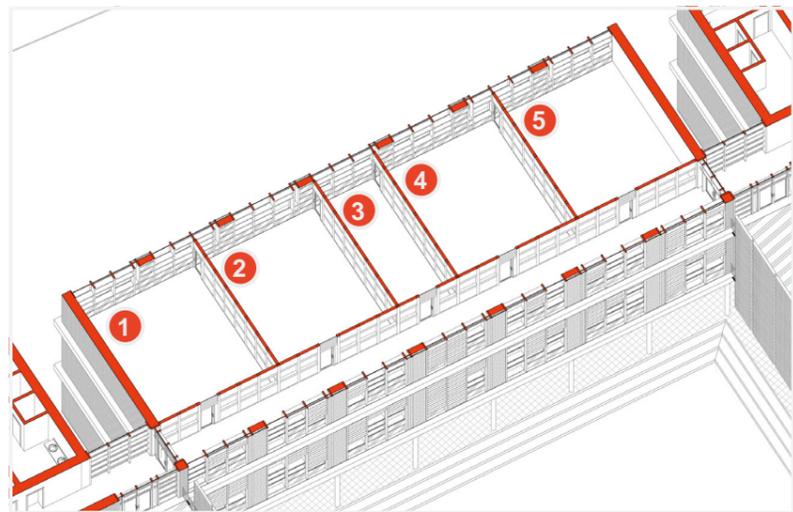
PERCENTUALE DI SUPERFICIE

NESSUNA FINESTRE NELLA PARETE

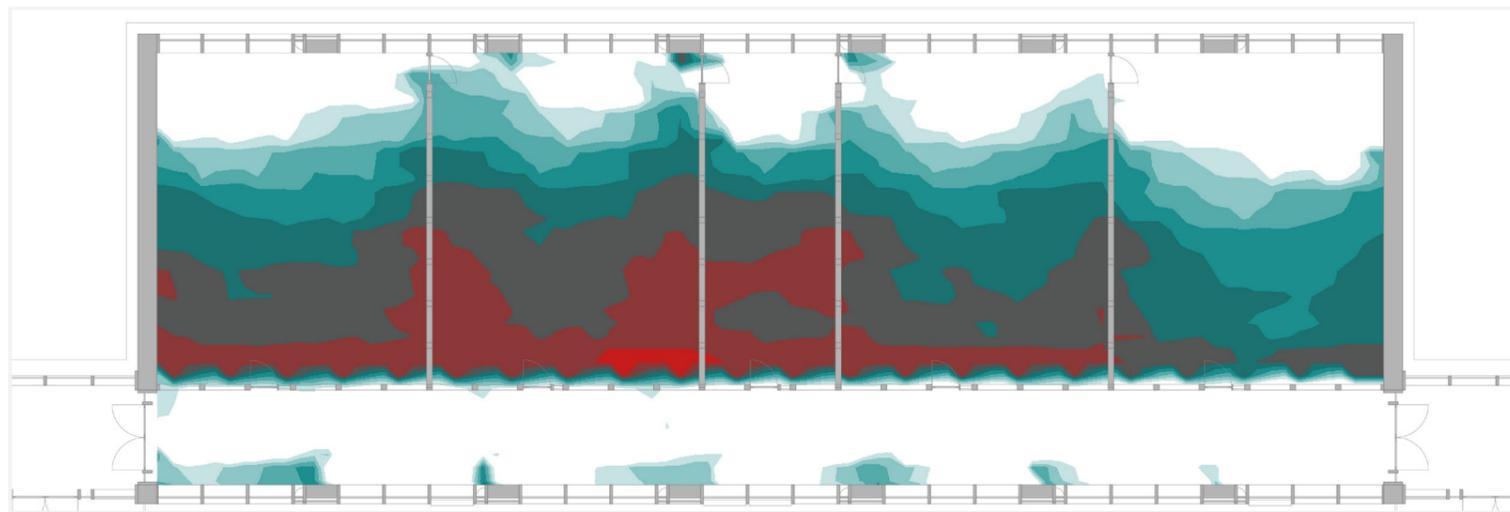
3. CONFIGURAZIONI FLESSIBILE DELL'AMBIENTE DI STUDIO

TAVOLA XI-3

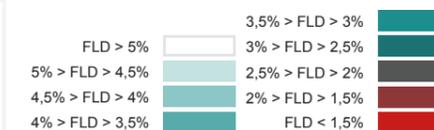
Studio del Fattore di Luce Diurna (FLD) per il blocco centrale al secondo piano. Si fa le verifiche secondo i requisiti del programma funzionale che richiede uno FLD > 2% o FLD > 1,5% su 80% della superficie dell'aula. La griglia di misura è stata impostata ad un'altezza di 70 cm che corrisponde all'altezza di una scrivania.



ORGANIZZAZIONE SPAZIALE



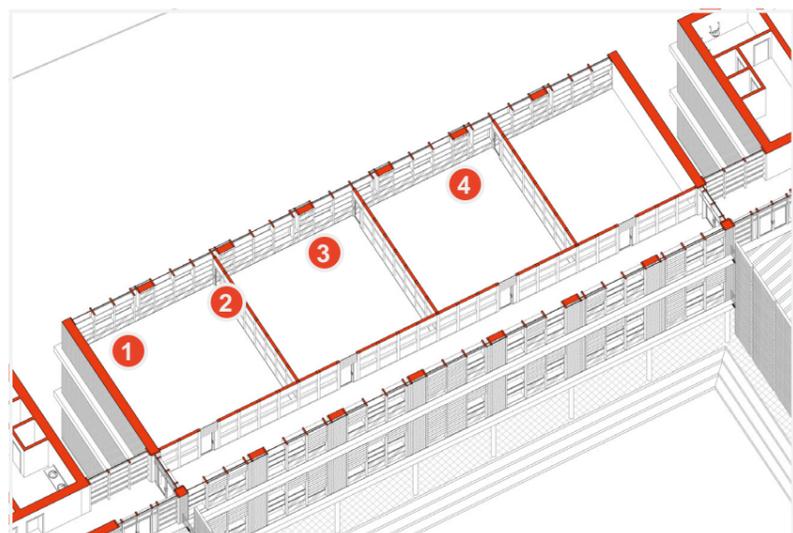
FATTORE DI LUCE DIURNA (FLD IN %)



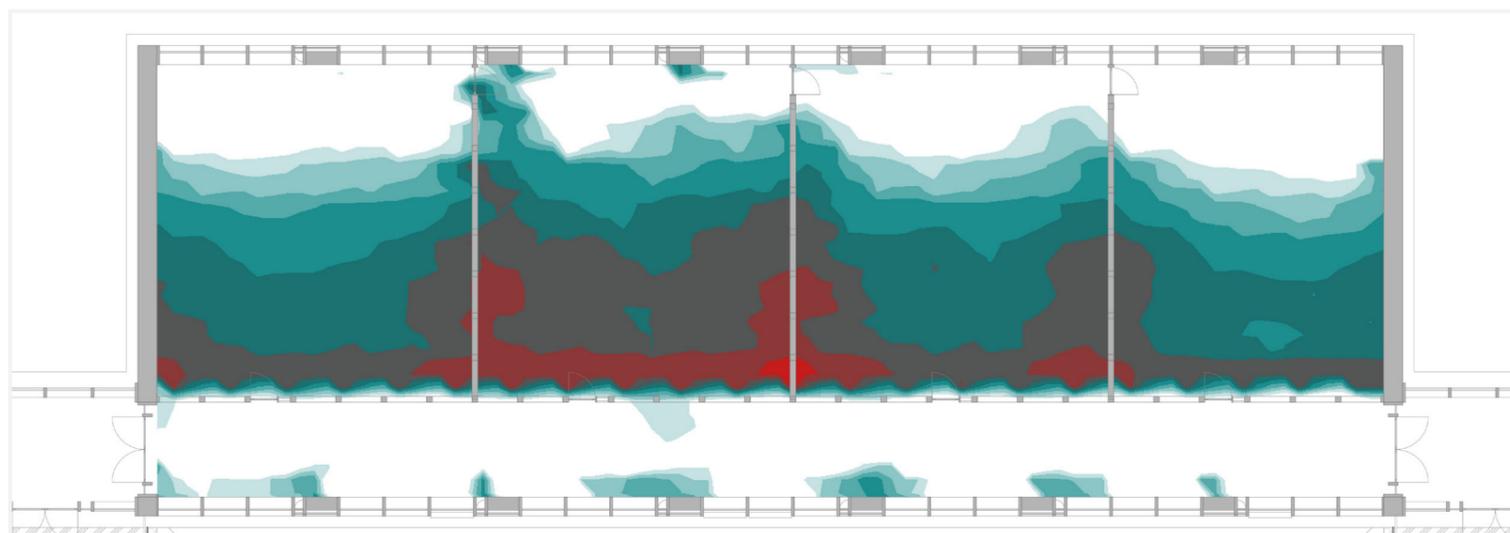
LEGGENDA

| aula | superficie con FLD>2% | superficie con FLD>1,5% |
|------------------------|-----------------------|-------------------------|
| BLOCCO CENTRALE | | |
| Aula 1 | 88% | 100% |
| Aula 2 | 75% | 97% |
| Aula 3 | 74% | 99% |
| Aula 4 | 90% | 100% |
| Aula 5 | 99% | 100% |

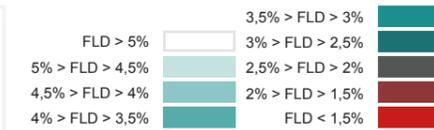
PERCENTUALE DI SUPERFICIE



ORGANIZZAZIONE SPAZIALE



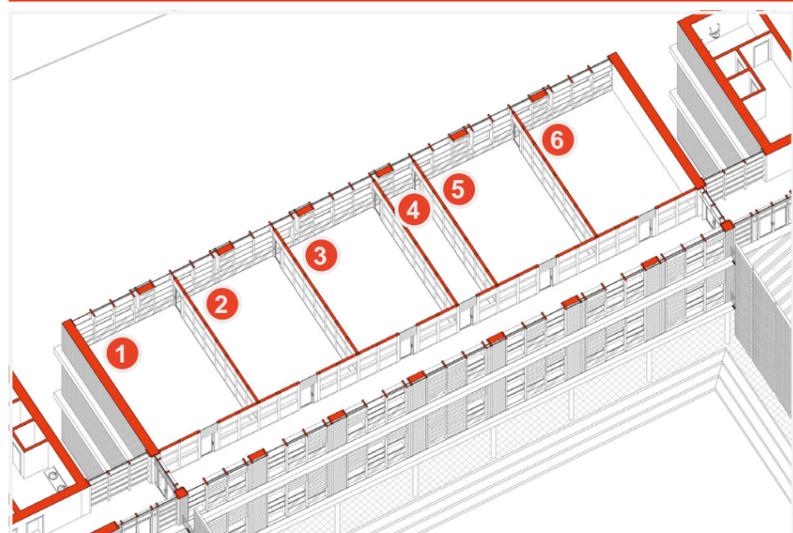
FATTORE DI LUCE DIURNA (FLD IN %)



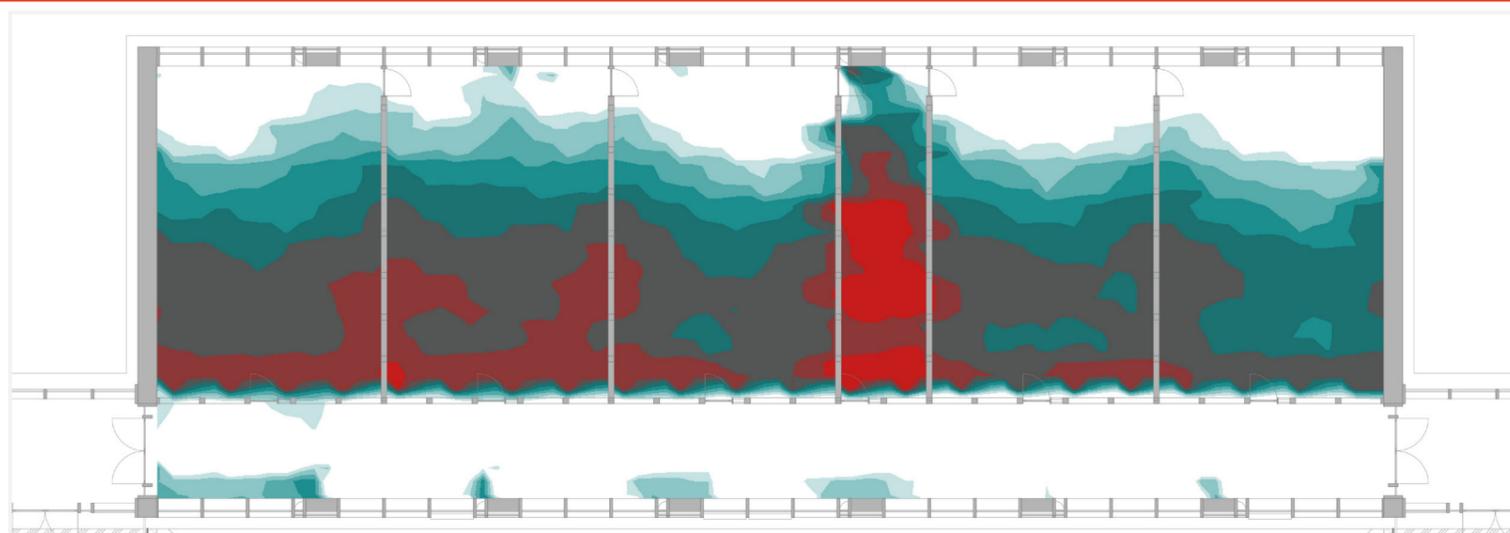
LEGGENDA

| aula | superficie con FLD>2% | superficie con FLD>1,5% |
|------------------------|-----------------------|-------------------------|
| BLOCCO CENTRALE | | |
| Aula 1 | 97% | 100% |
| Aula 2 | 85% | 99% |
| Aula 3 | 93% | 100% |
| Aula 4 | 100% | 100% |

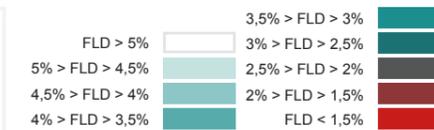
PERCENTUALE DI SUPERFICIE



ORGANIZZAZIONE SPAZIALE



FATTORE DI LUCE DIURNA (FLD IN %)



LEGGENDA

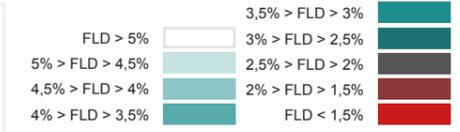
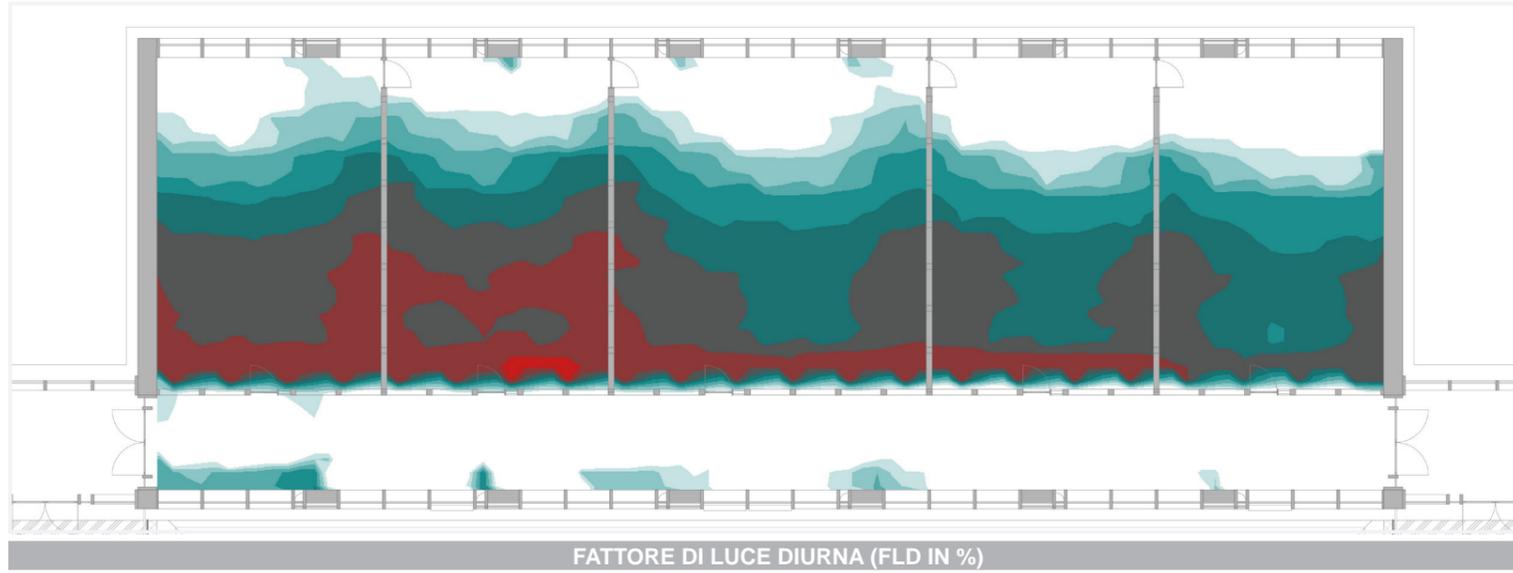
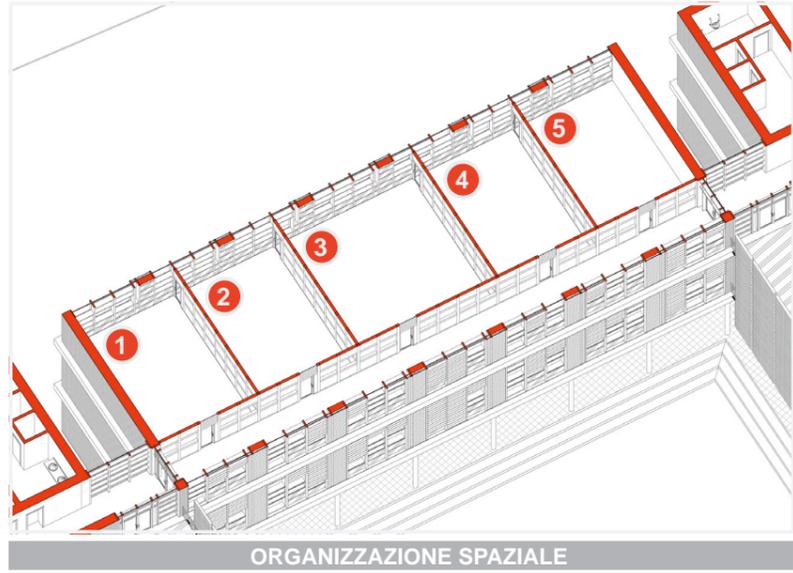
| aula | superficie con FLD>2% | superficie con FLD>1,5% |
|------------------------|-----------------------|-------------------------|
| BLOCCO CENTRALE | | |
| Aula 1 | 86% | 100% |
| Aula 2 | 78% | 99% |
| Aula 3 | 89% | 100% |
| Aula 4 | 44% | 66% |
| Aula 5 | 92% | 99% |
| Aula 6 | 98% | 100% |

PERCENTUALE DI SUPERFICIE

COMBINAZIONE DI PARETE INTERNE C

TAVOLA XI-4

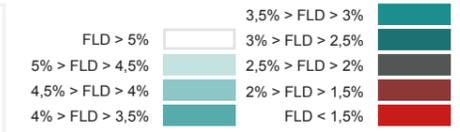
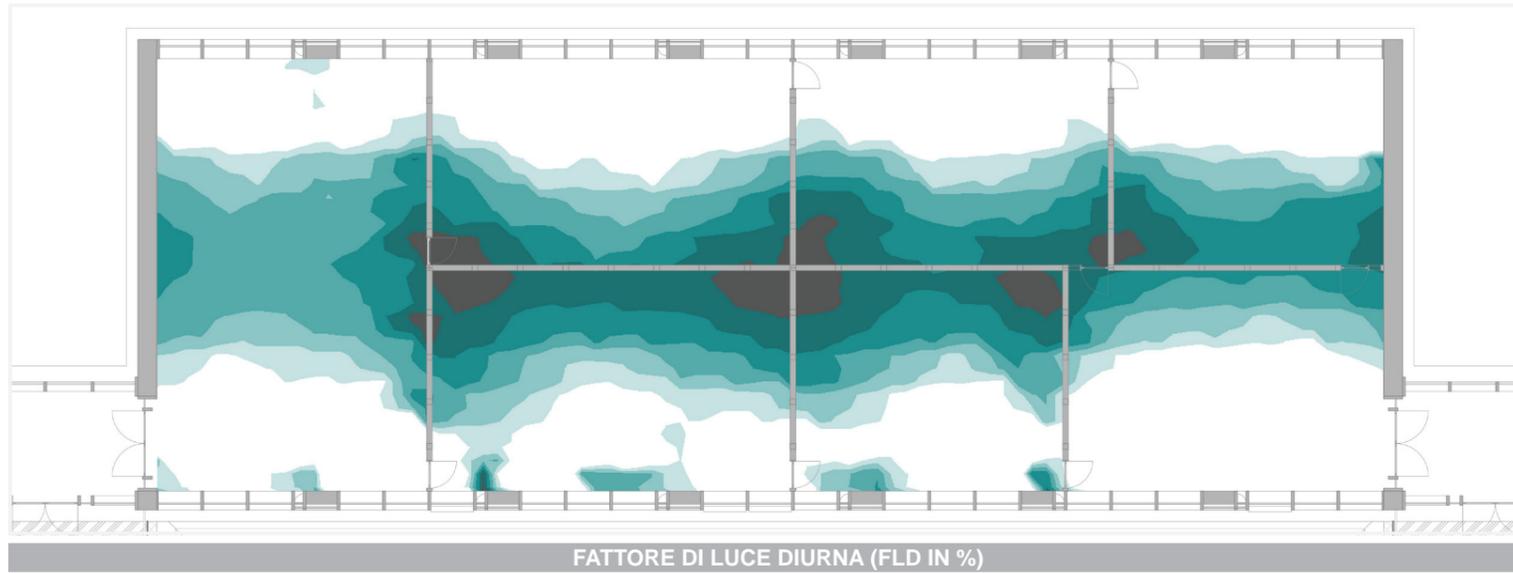
Studio del Fattore di Luce Diurna (FLD) per il blocco centrale al secondo piano. Si fa le verifiche secondo i requisiti del programma funzionale che richiede uno FLD > 2% o FLD > 1,5% su 80% della superficie dell'aula. La griglia di misura è stata impostata ad un'altezza di 70 cm che corrisponde all'altezza di una scrivania.



| aula | superficie con FLD>2% | superficie con FLD>1,5% |
|------------------------|-----------------------|-------------------------|
| BLOCCO CENTRALE | | |
| Aula 1 | 82% | 100% |
| Aula 2 | 74% | 98% |
| Aula 3 | 89% | 100% |
| Aula 4 | 92% | 100% |
| Aula 5 | 98% | 100% |

PERCENTUALE DI SUPERFICIE

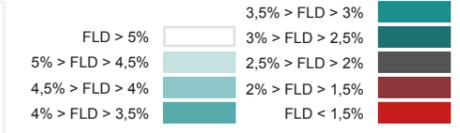
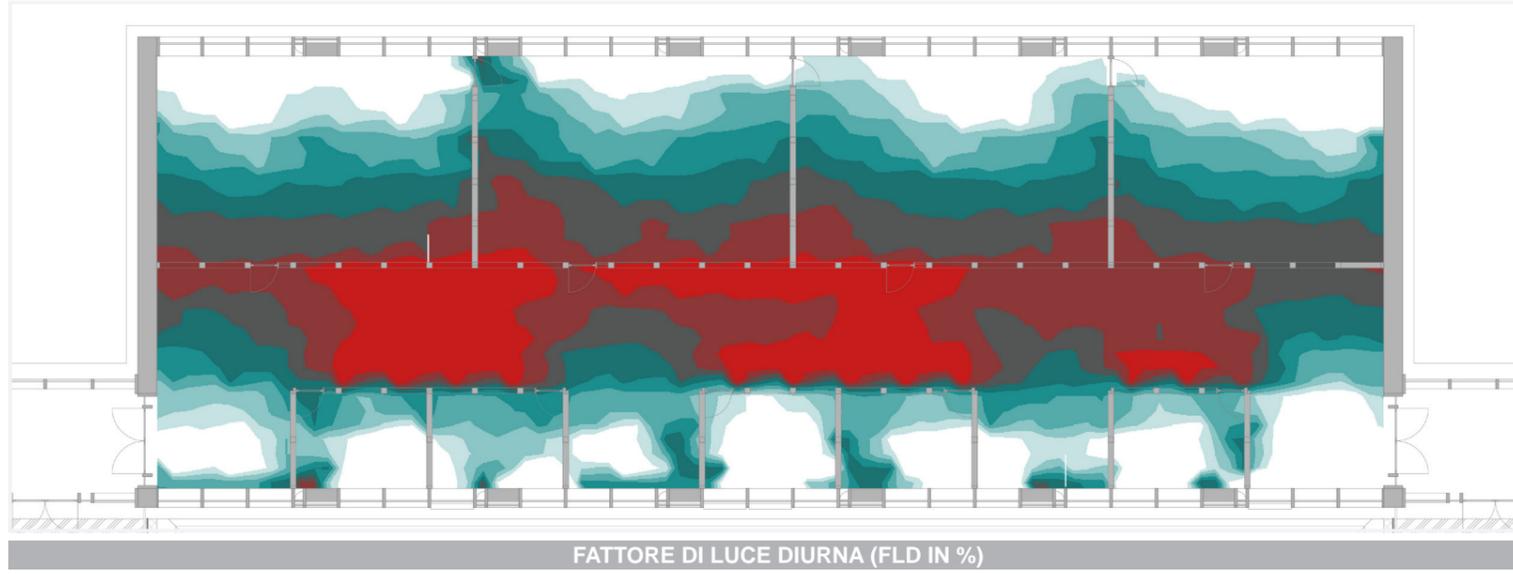
COMBINAZIONE DI PARETE INTERNE D



| aula | superficie con FLD>2% | superficie con FLD>1,5% |
|------------------------|-----------------------|-------------------------|
| BLOCCO CENTRALE | | |
| Aula 1 | 100% | 100% |
| Aula 2 | 100% | 100% |
| Aula 3 | 100% | 100% |
| Aula 4 | 100% | 100% |
| Aula 5 | 100% | 100% |
| Aula 6 | 100% | 100% |
| Aula 7 | 100% | 100% |

PERCENTUALE DI SUPERFICIE

COMBINAZIONE DI PARETE INTERNE E



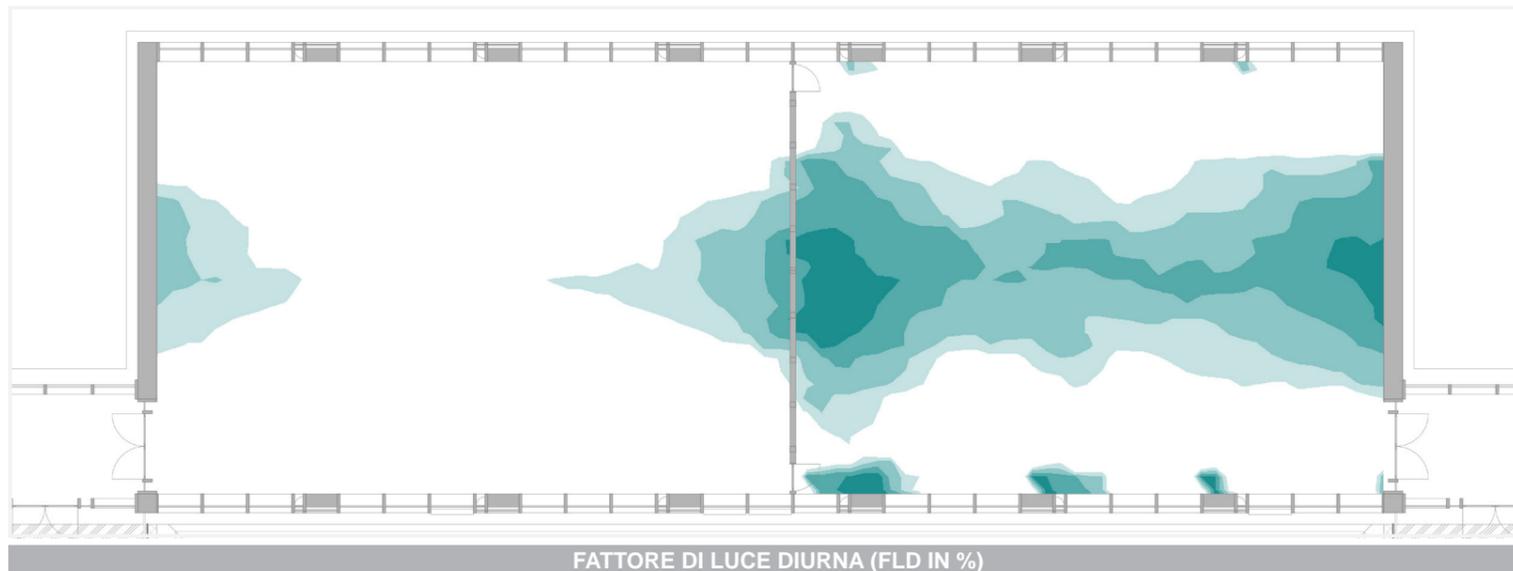
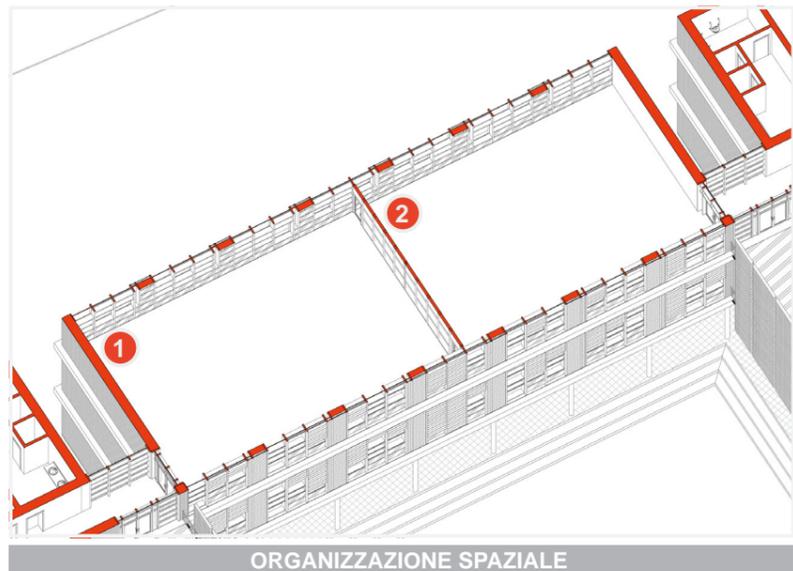
| aula | superficie con FLD>2% | superficie con FLD>1,5% |
|------------------------|-----------------------|-------------------------|
| BLOCCO CENTRALE | | |
| Aula 1 | 97% | 100% |
| Aula 2 | 86% | 99% |
| Aula 3 | 91% | 100% |
| Aula 4 | 99% | 100% |

PERCENTUALE DI SUPERFICIE

COMBINAZIONE DI PARETE INTERNE F

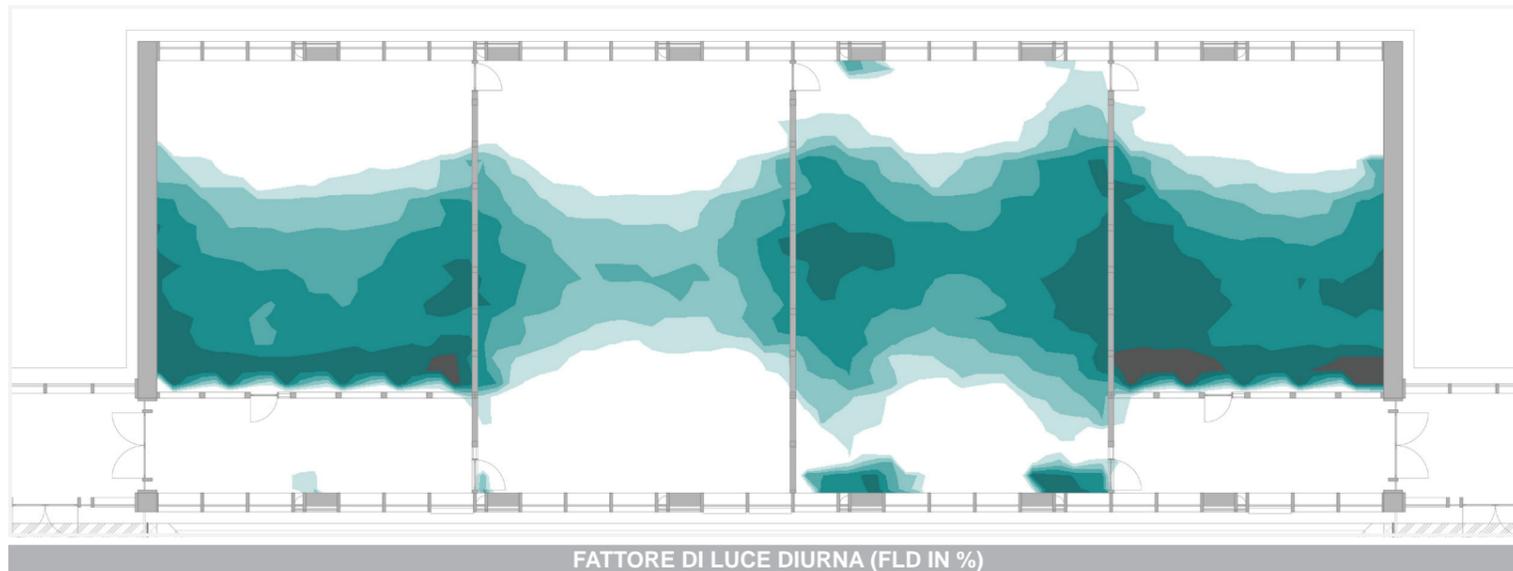
TAVOLA XI-5

Studio del Fattore di Luce Diurna (FLD) per il blocco centrale al secondo piano. Si fa le verifiche secondo i requisiti del programma funzionale che richiede uno FLD > 2% o FLD > 1,5% su 80% della superficie dell'aula. La griglia di misura è stata impostata ad un'altezza di 70 cm che corrisponde all'altezza di una scrivania.



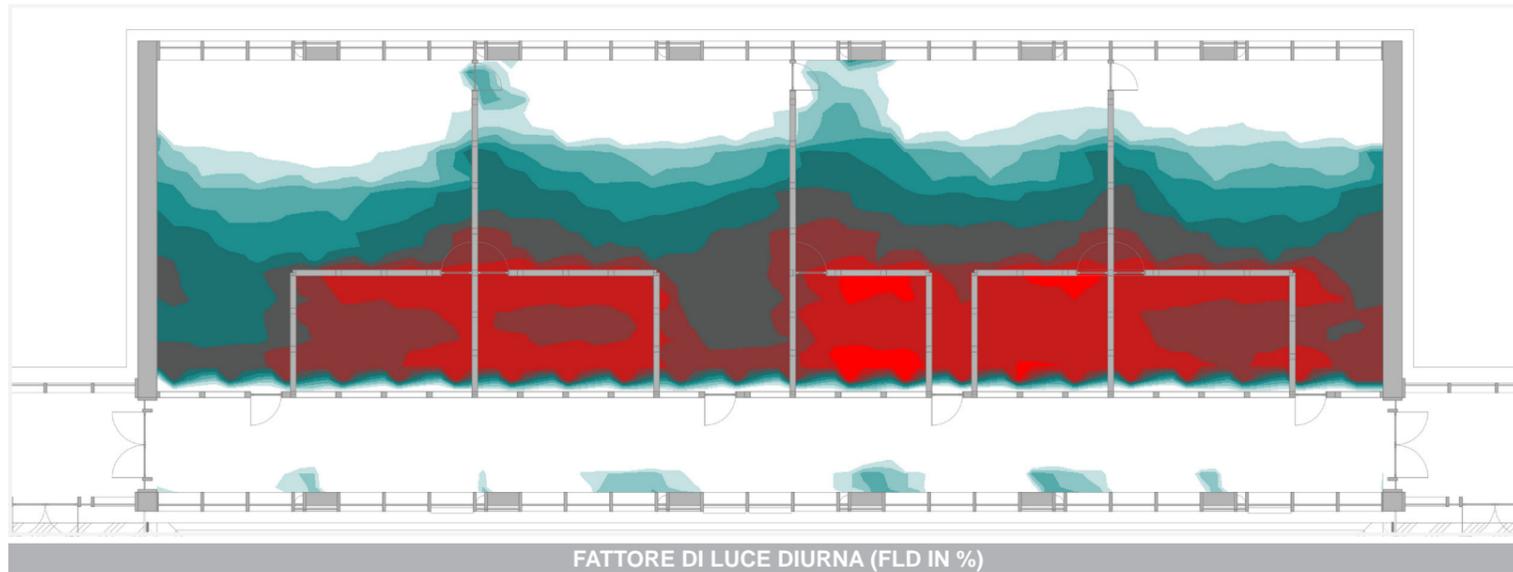
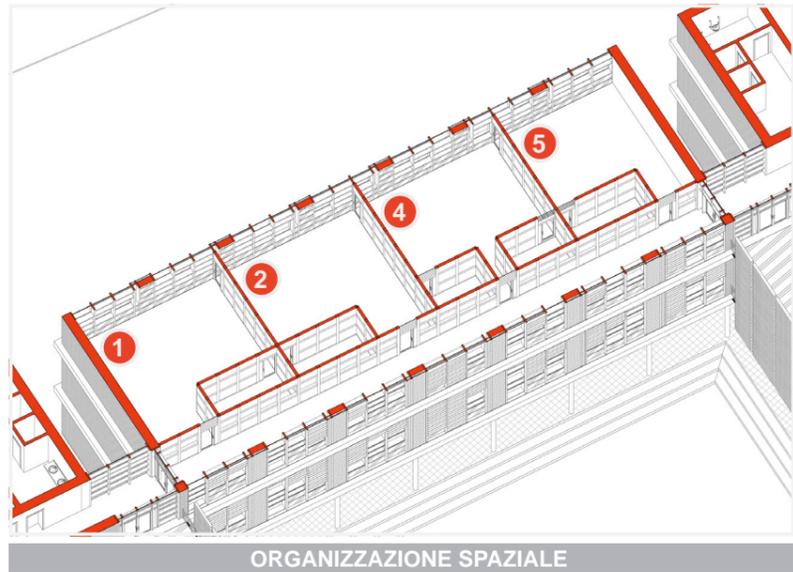
| LEGGENDA | | |
|------------------------|-----------------------|-------------------------|
| aula | superficie con FLD>2% | superficie con FLD>1,5% |
| BLOCCO CENTRALE | | |
| Aula 1 | 100% | 100% |
| Aula 2 | 100% | 100% |

COMBINAZIONE DI PARETE INTERNE G



| LEGGENDA | | |
|------------------------|-----------------------|-------------------------|
| aula | superficie con FLD>2% | superficie con FLD>1,5% |
| BLOCCO CENTRALE | | |
| Aula 1 | 100% | 100% |
| Aula 2 | 100% | 100% |
| Aula 3 | 100% | 100% |
| Aula 4 | 100% | 100% |

COMBINAZIONE DI PARETE INTERNE H



| LEGGENDA | | |
|------------------------|-----------------------|-------------------------|
| aula | superficie con FLD>2% | superficie con FLD>1,5% |
| BLOCCO CENTRALE | | |
| Aula 1 | 86% | 96% |
| Aula 2 | 72% | 84% |
| Aula 3 | 64% | 70% |
| Aula 4 | 70% | 86% |

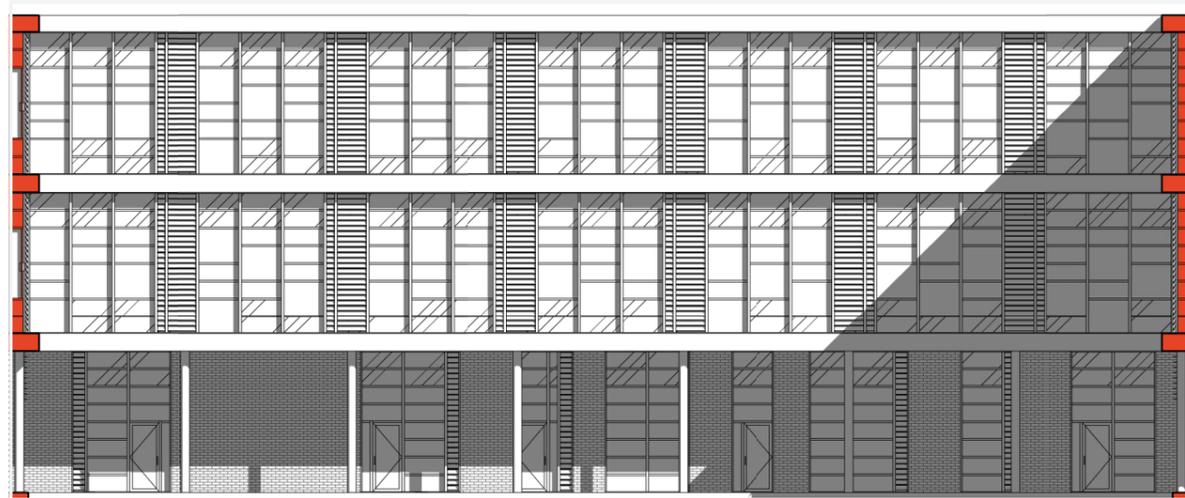
COMBINAZIONE DI PARETE INTERNE I

*superficie delle aule a forma quadrata con compreso il carrel

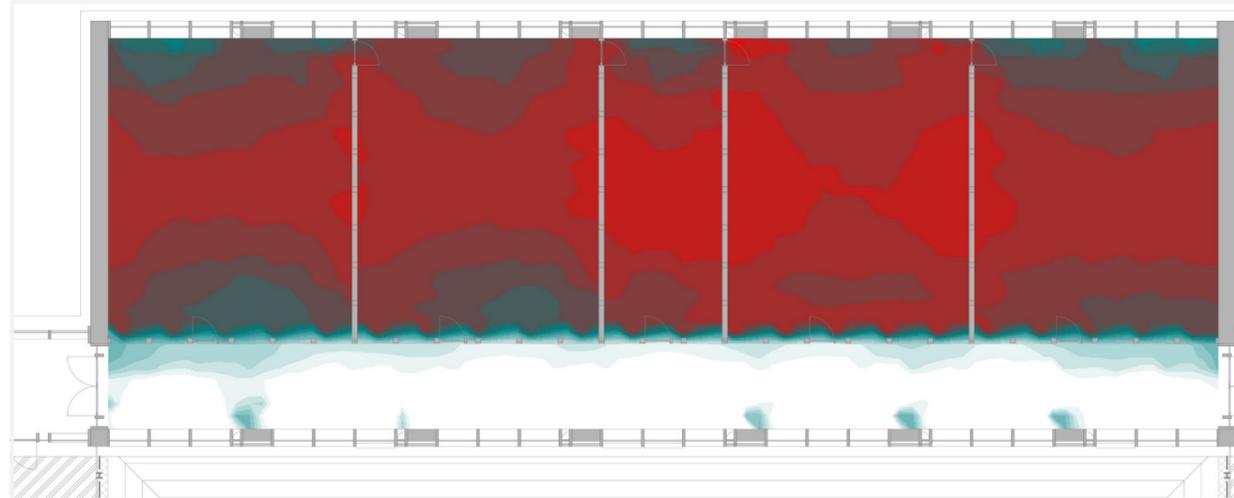
4. PRESENZA DI SCHERMATURE ESTERNE

TAVOLA XI-6

Valutazione dell'influenza del uso delle frangisole impacchettabili ed orientabili pari a delle veneziane esterne. Si studia sempre il blocco centrale del polo insegnamento. Si misura qui l'illuminanza per il 21 giugno alle ore 14 per valutare l'influenza delle frangisole. La griglia di misura è stata impostata ad un'altezza di 70 cm che corrisponde all'altezza di una scrivania.



PROSPETTO SUD

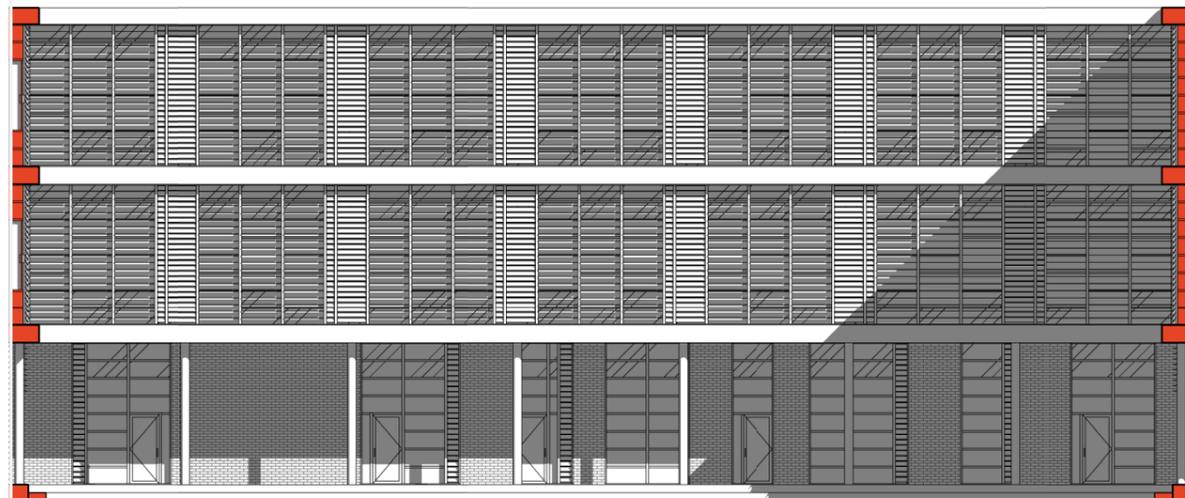


ILLUMINAZIONE (LUX) IL 21 GIUGNO ALLE 14.00 CON SOLE

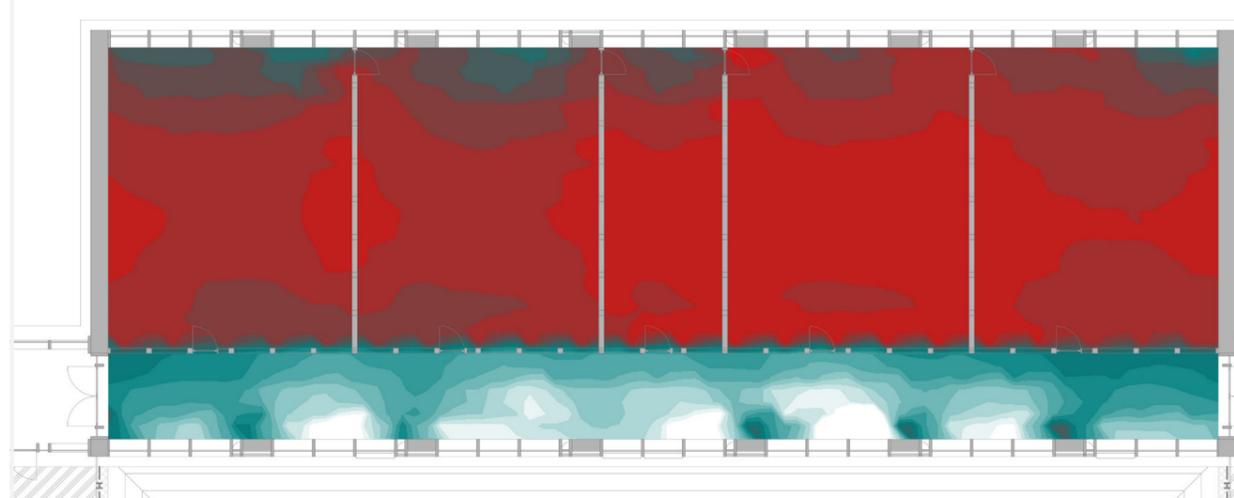


LEGGENDA

SENZA SCHERMATURA



PROSPETTO SUD

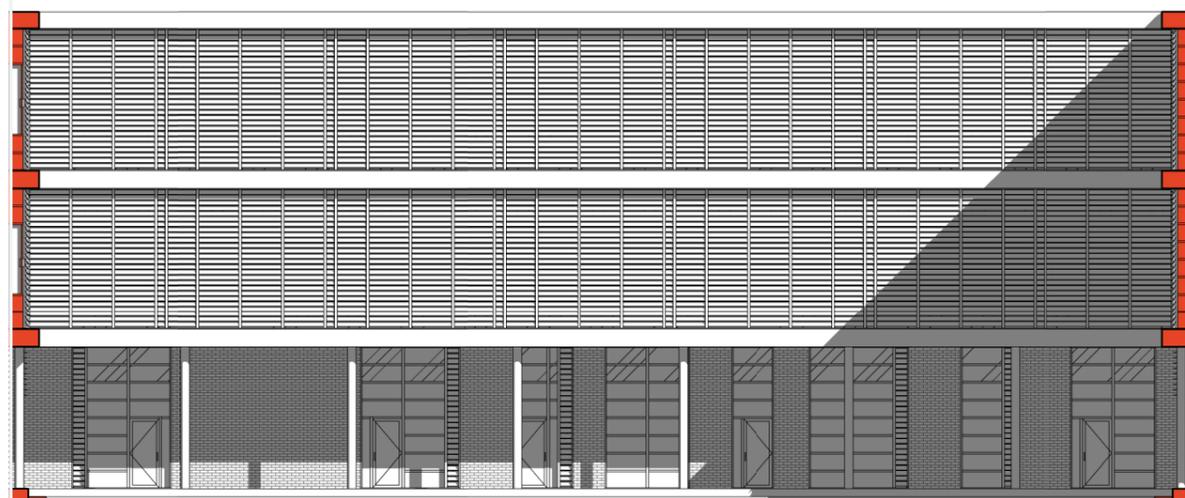


ILLUMINAZIONE (LUX) IL 21 GIUGNO ALLE 14.00 CON SOLE

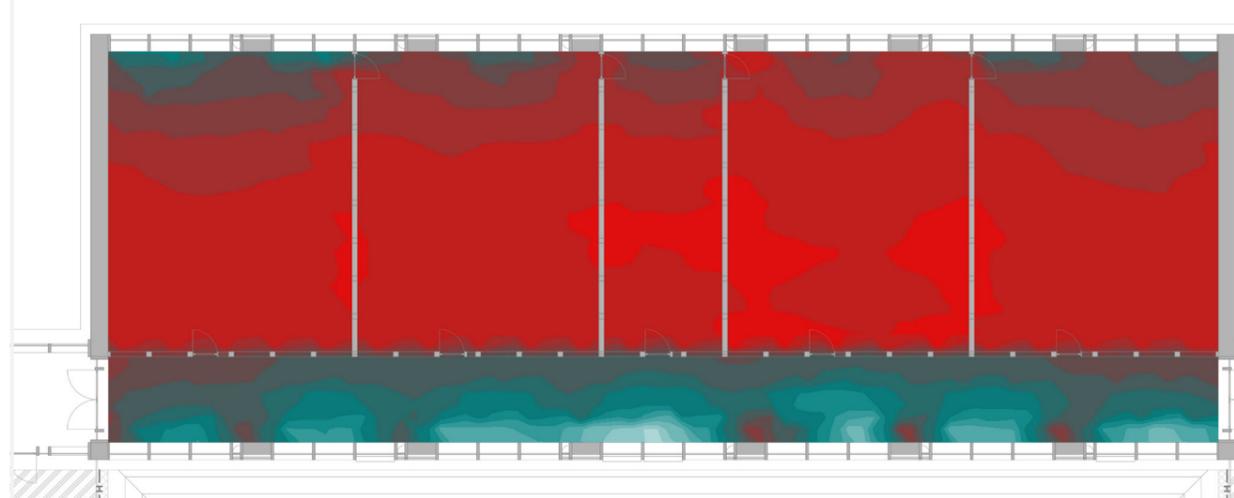


LEGGENDA

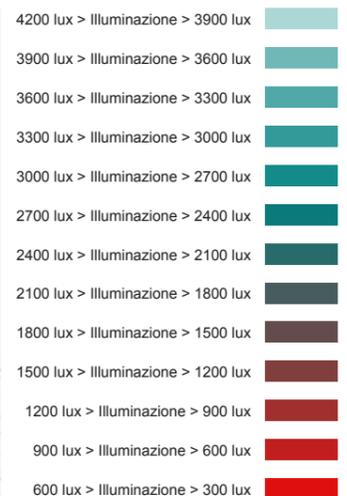
FRANGISOLE ORIZZONTALE - LAMELLE DI LARGHEZZA 150mm



PROSPETTO SUD



ILLUMINAZIONE (LUX) IL 21 GIUGNO ALLE 14.00 CON SOLE



LEGGENDA

FRANGISOLE ORIENTATE DI UN ANGOLO 45° - LAMELLE DI LARGHEZZA 150mm

In questa parte verrà studiata la qualità acustica degli spazi dedicati all'apprendimento e all'insegnamento. La qualità acustica di un'aula di classe è particolarmente importante. Infatti per l'alunno l'aula coincide con il luogo in cui egli passa la maggior parte del suo tempo quotidiano. Deve poter concentrarsi. Deve poter ascoltare gli altri, ascoltare la lezione, partecipare. L'aula deve allora proporre le migliori condizioni per assicurare delle ottime condizioni di lavoro.

| | |
|---|------------|
| A. PREMESSA | 537 |
| B. ACUSTICA EDILIZIA | 538 |
| 1. PREMESSA | 538 |
| 2. ISOLAMENTO ACUSTICO AI RUMORI AEREI TRA LOCALI INTERNI | 538 |
| <i>a. Potere fonoisolante apparente della partizione verticale smontabile tra aule (PVI7)</i> | 538 |
| <i>b. Potere fonoisolante apparente della parete orizzontale tra aule (POI1 e POI2)</i> | 541 |
| 3. LIVELLO DEI RUMORI DI CALPESTIO E DI SHOCK (POI1 E POI2) | 544 |
| C. ACUSTICA ARCHITETTONICA | 545 |
| 1. ISOLAMENTO ACUSTICO AI RUMORI AEREI ESTERNI | 545 |
| 2. CRITERI PER UNA BUONA QUALITÀ ACUSTICA INTERNA | 546 |
| 3. ANALISI DEL FENOMENO DEI MODI PROPRI - DETERMINAZIONE DELLE CAPACITÀ FONOASSORBENTI | 547 |
| 4. TEMPO DI RIVERBERAZIONE ALL'INTERNO DI UN AULA TIPO | 548 |

B. ACUSTICA EDILIZIA

1. PREMESSA

Isolare acusticamente vuol dire ridurre la quantità di energia sonora, trasmessa prevalentemente dalle vibrazioni, che passa da un ambiente all'altro. Il tema della protezione dal rumore in edilizia è, quindi, un problema di corretta progettazione architettonica che, partendo dalla destinazione d'uso e dalla tipologia dell'edificio (distribuzione degli spazi interni e delle funzioni) giunge alla scelta di soluzioni costruttive che tengano conto degli effettivi livelli prestazionali necessari.

I parametri - in parte già elencati nell'introduzione - che descrivono le capacità fonoisolanti degli elementi edilizi fanno riferimento a specifiche condizioni di valutazione e non sono direttamente confrontabili tra di loro. Questi sono:

Potere fonoisolante (R) : caratteristica dell'elemento architettonico che descrive la sua capacità a ridurre l'energia sonora trasmessa.

Potere fonoisolante apparente (R') : a differenza del parametro precedente, R' tiene conto dell'energia acustica trasmessa lateralmente attraverso le strutture che delimitano l'elemento.

Isolamento acustico (D) : differenza di livello sonoro che si riscontra tra due ambienti contigui, come ad esempio la facciata. Anch'esso è un parametro idoneo per il collaudo acustico perché descrive il comportamento dell'elemento in rapporto con le strutture circostanti.

Per i calcoli si è utilizzato il software ECHO 4.0., che ha consentito di verificare il rispetto dei limiti normativi relativi all'acustica.

2. ISOLAMENTO ACUSTICO AI RUMORI AEREI TRA LOCALI INTERNI

a. Potere fonoisolante apparente della partizione verticale smontabile tra aule (PVI7)

Calcoliamo il potere fonoisolante apparente della parete smontabile per le aule di studio (PVI7) tenendo conto della presenza di un corridoio. Quindi abbiamo i seguenti dati geometrici :

- Superficie della parete divisoria : 29 m²
- Lunghezza dei lati della parete divisoria :

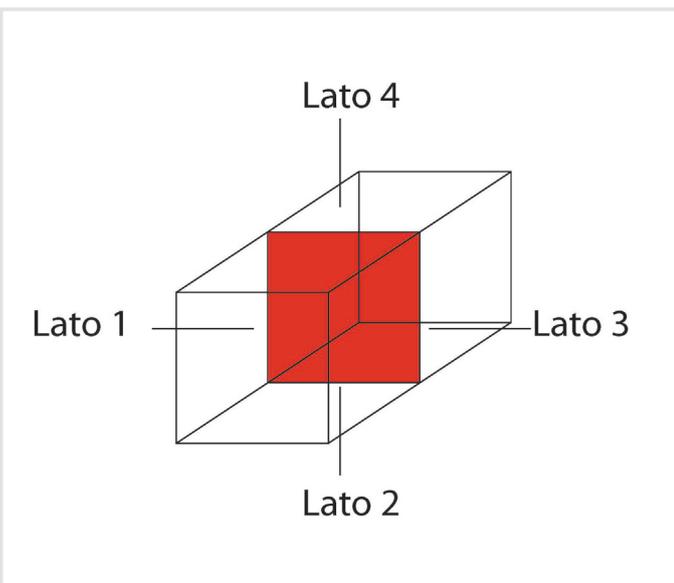


Fig. XII-2 Legenda dei lati dell'elemento divisorio qui studiato

| Lato | Lunghezza [m] |
|------|---------------|
| 1 | 4,5 |
| 2 | 9,6 |
| 3 | 4,5 |
| 4 | 9,6 |

Tab. XII-2 Dati geometrici della parete studiata

- Elementi che compongono la struttura

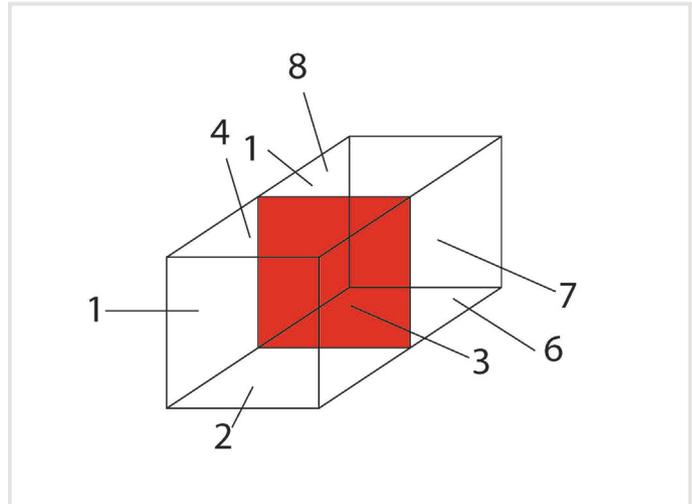


Fig. XII-3 Struttura studiata

| | Struttura | Massa Superficiale [kg/m ²] | Indice valutazione Acustica [dB] |
|---|-----------|---|----------------------------------|
| S | PVI7 | 67,75 | 66,03 |
| 1 | CV5 | 88,00 | 76,28 |
| 2 | POI1 | 667,90 | 62,64 |
| 3 | PVI7 | 67,75 | 66,03 |
| 4 | POI1 | 667,90 | 62,64 |
| 5 | CV5 | 88,00 | 76,28 |
| 6 | POI1 | 667,90 | 62,64 |
| 7 | PVI7 | 67,75 | 66,03 |
| 8 | POI1 | 667,90 | 62,64 |

Tab. XII-3 Dati geometrici

Adesso si procede alla determinazione dei tipi di collegamento tra il nostro divisorio e le strutture accanto usando i dati empirici forniti dalla normativa EN UNI 12354 - 1.

Si ha ad esempio :

- Per un giunto di tipo a T tra strutture omogenee e pareti leggere, trasmissione attraverso strutture omogenee :

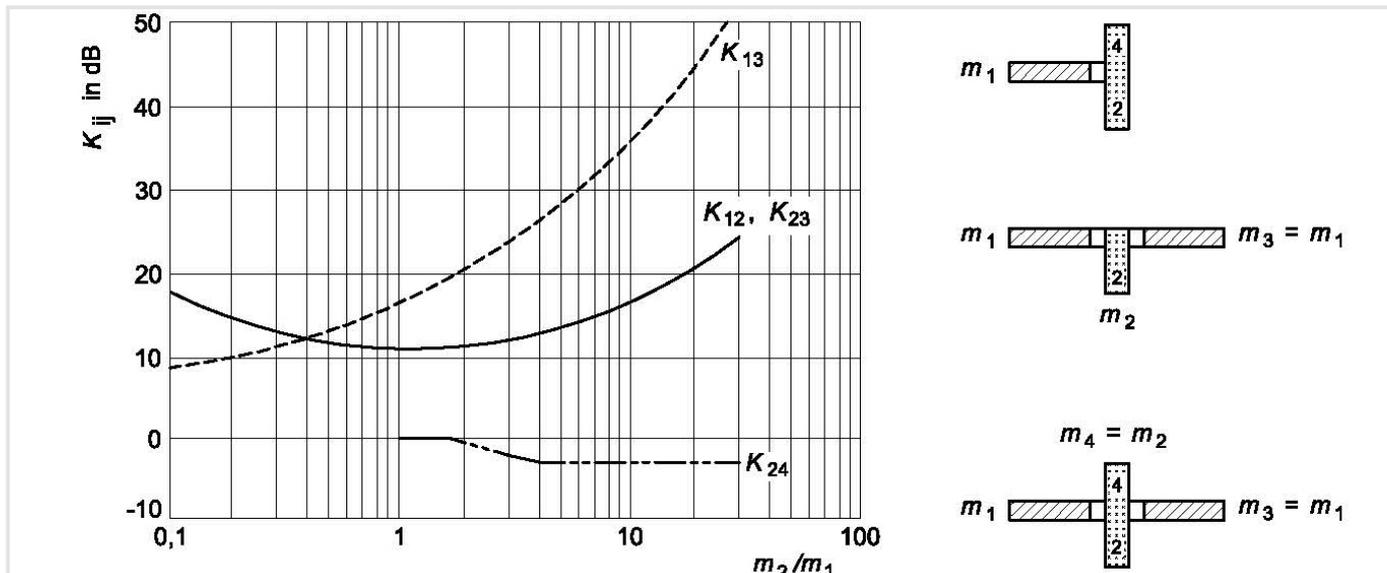


Fig. XII-4 Indice di riduzione delle vibrazioni per ciascuna via di trasmissione ij su un giunto

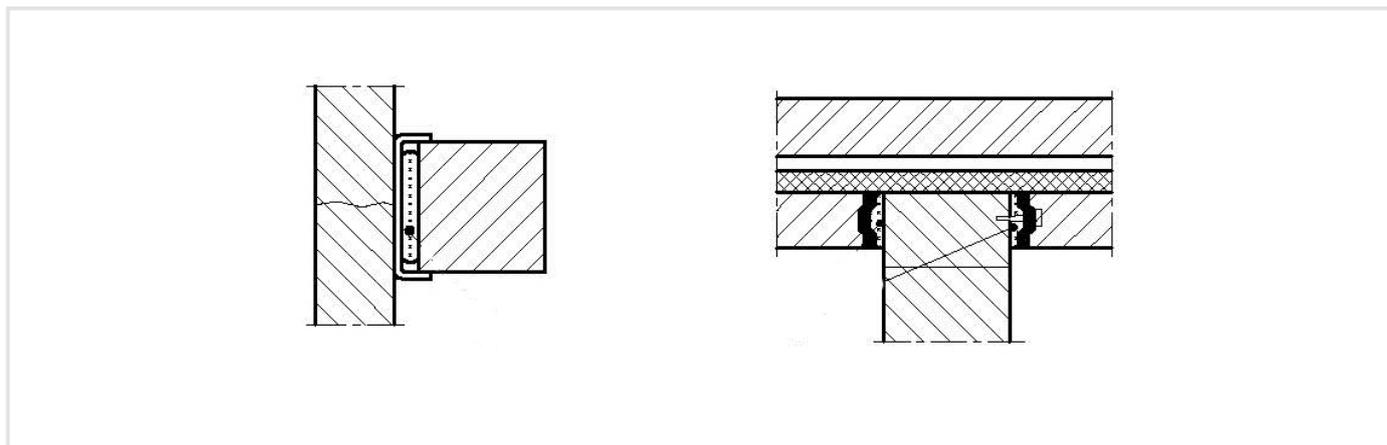


Fig. XII-5 Illustrazione ricavata dalla normativa EN UNI 12354-1

- Per un giunto di tipo a T tra strutture omogenee e pareti leggere, trasmissione attraverso pareti leggere :

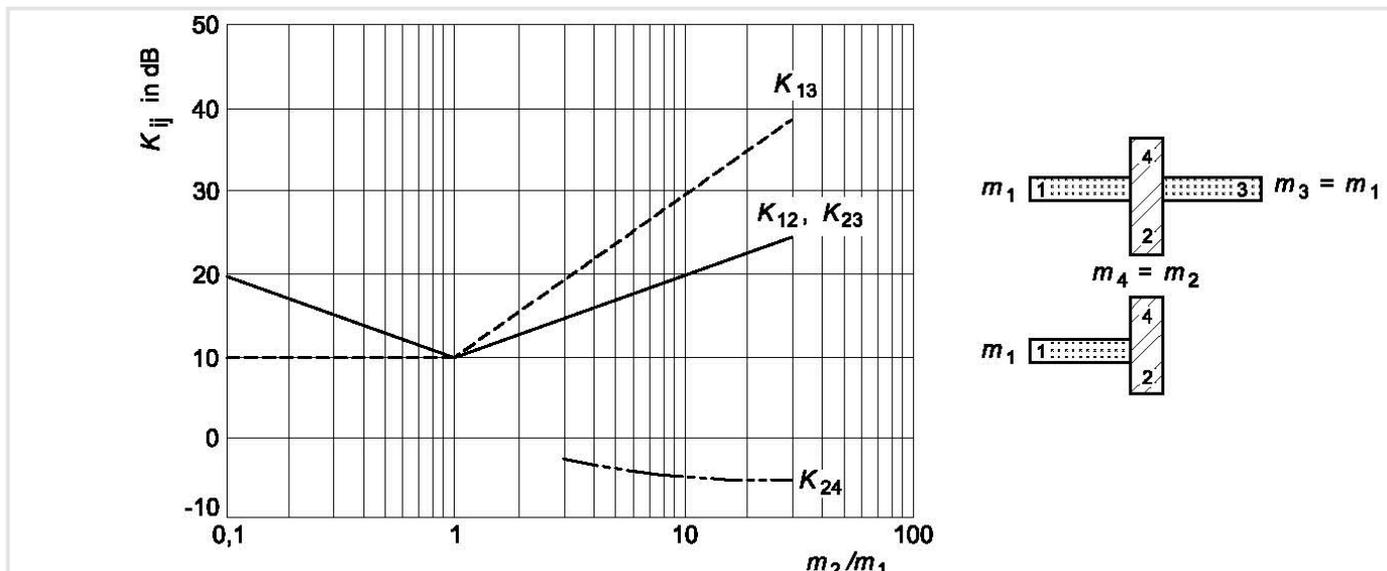


Fig. XII-6 Indice di riduzione delle vibrazioni per ciascuna via di trasmissione ij su un giunto

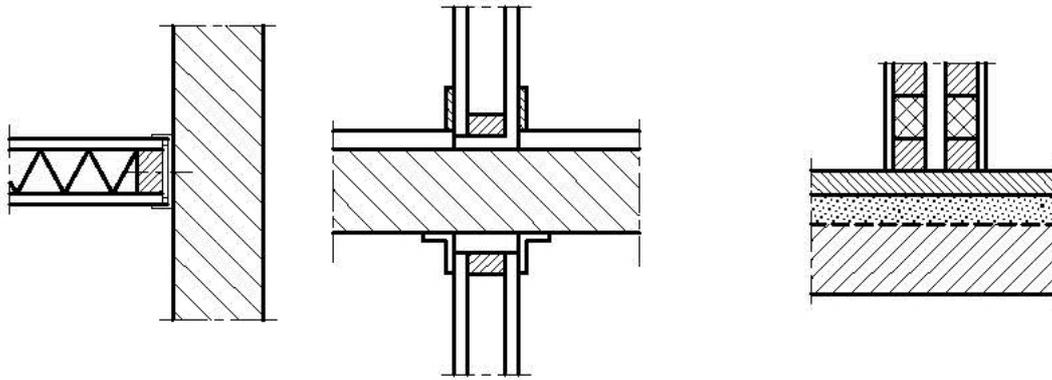


Fig. XII-7 Illustrazione ricavata dalla normativa EN UNI 12354-1

- Per un giunto di tipo a croce o a T tra pareti leggere :

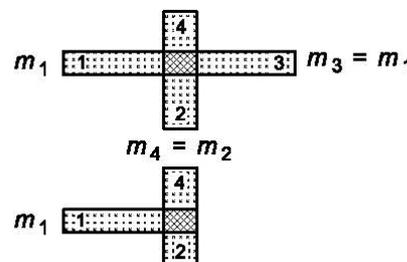
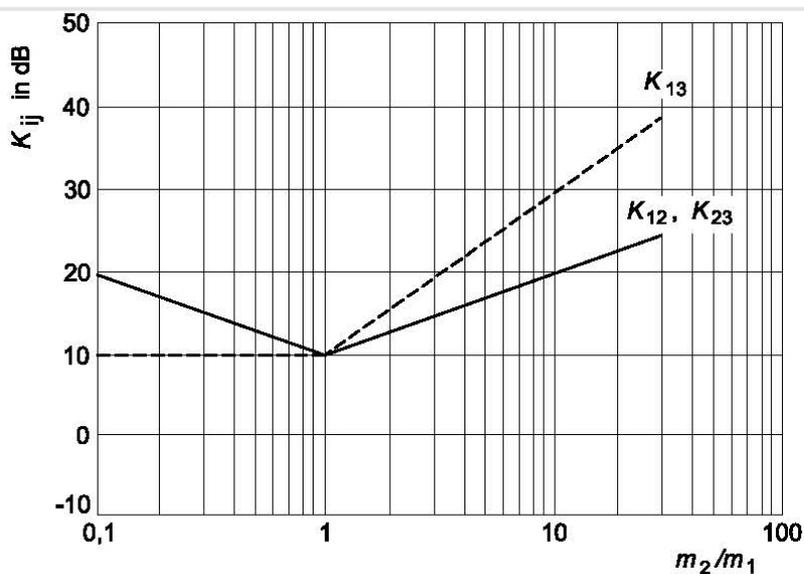


Fig. XII-8 Indice di riduzione delle vibrazioni per ciascuna via di trasmissione ij su un giunto

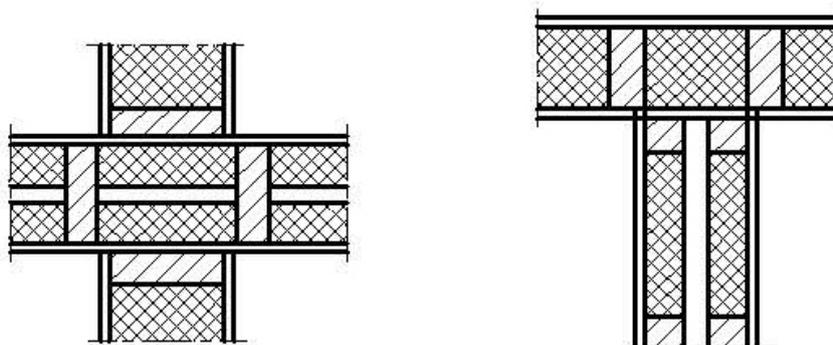


Fig. XII-9 Illustrazione ricavata dalla normativa EN UNI 12354-1

E quindi abbiamo :

| Lato | Tipo di collegamento |
|------|--|
| 1 | Collegamento a T tra strutture omogenee e pareti leggere, trasmissione attraverso strutture omogenee |
| 2 | Collegamento a T tra strutture omogenee e pareti leggere, trasmissione attraverso pareti leggere |
| 3 | Collegamento a croce o a T tra pareti leggere |
| 4 | Collegamento a T tra strutture omogenee e pareti leggere, trasmissione attraverso pareti leggere |

Tab. XII-4 Tipo di collegamento

Tale tabella ci porta alla seguente valutazione dei percorsi e del potere fonoisolante laterale di ciascun componente della struttura :

| Lato | Tipo di collegamento | R _l w potere fonoisolante laterale [dB] |
|-------|--|--|
| S | Diretto | 66,03 |
| 1 - 5 | Collegamento a T tra strutture omogenee e pareti leggere, trasmissione attraverso strutture omogenee | 85,45 |
| 2 - 6 | Collegamento a T tra strutture omogenee e pareti leggere, trasmissione attraverso pareti leggere | 85,99 |
| 3 - 7 | Collegamento a croce o a T tra pareti leggere | 84,12 |
| 4 - 8 | Collegamento a T tra strutture omogenee e pareti leggere, trasmissione attraverso pareti leggere | 85,99 |
| 1 - s | Collegamento a T tra strutture omogenee e pareti leggere, trasmissione attraverso strutture omogenee | 90,69 |
| 2 - s | Collegamento a T tra strutture omogenee e pareti leggere, trasmissione attraverso pareti leggere | 87,68 |
| 3 - s | Collegamento a croce o a T tra pareti leggere | 84,12 |
| 4 - s | Collegamento a T tra strutture omogenee e pareti leggere, trasmissione attraverso pareti leggere | 87,68 |
| S - 5 | Collegamento a T tra strutture omogenee e pareti leggere, trasmissione attraverso strutture omogenee | 90,69 |
| S - 6 | Collegamento a T tra strutture omogenee e pareti leggere, trasmissione attraverso pareti leggere | 80,1+ |
| S - 7 | Collegamento a croce o a T tra pareti leggere | 84,12 |
| S - 8 | Collegamento a T tra strutture omogenee e pareti leggere, trasmissione attraverso strutture omogenee | 80,16 |

Tab. XII-5 Potere fonoisolante laterale

E quindi abbiamo come potere fonoisolante del divisorio tra aule $R'w = 65,33$ dB, valore ammissibile superiore al minimo di 50dB secondo il DPCM.

b. Potere fonoisolante apparente della parete orizzontale tra aule (POI1 e POI2)

Le verifiche saranno effettuate esclusivamente sulla partizione POI1, meno isolata acusticamente rispetto alla partizione POI2, in modo da minorare i risultati così applicati a quest'ultima.

Calcoliamo il potere fonoisolante apparente della parete smontabile per le aule di studio (PVI7) tenendo conto della presenza di un corridoio. Quindi abbiamo i seguenti dati geometrici :

- Superficie della parete divisoria : 69 m²
- Lunghezza dei lati della parete divisoria

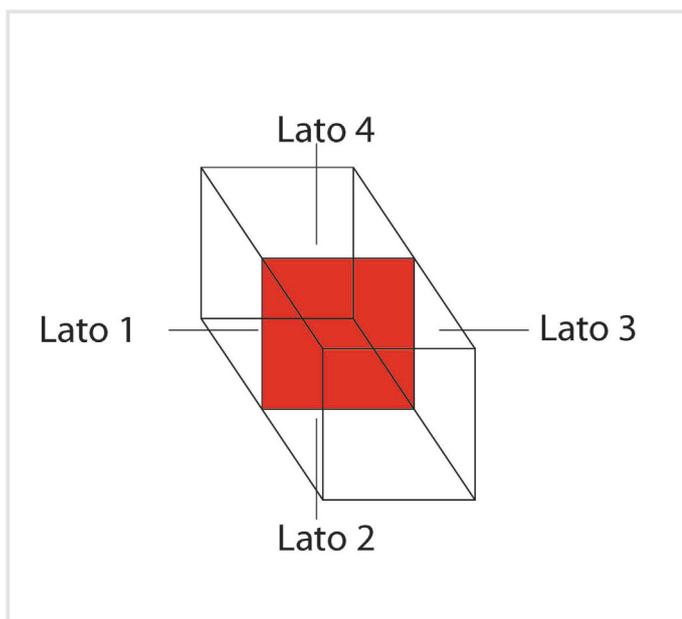


Fig. XII-10 Legenda dei lati dell'elemento divisorio qui studiato

| Lato | Lunghezza [m] |
|------|---------------|
| 1 | 7,2 |
| 2 | 9,6 |
| 3 | 7,2 |
| 4 | 9,6 |

Tab. XII-6 Dati geometrici

- Elementi che compongono la struttura

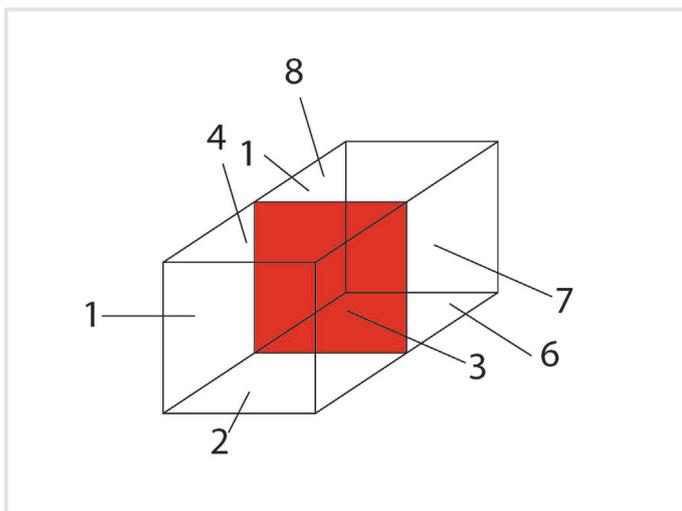


Fig. XII-11 Struttura studiata

| | Struttura | Massa Superficiale [kg/m ²] | Indice valutazione Acustica [dB] |
|---|-----------|---|----------------------------------|
| S | POI1 | 667,90 | 62,64 |
| 1 | CV5 | 88,00 | 76,28 |
| 2 | PVI7 | 67,75 | 66,03 |
| 3 | PVI7 | 67,75 | 66,03 |
| 4 | PVI7 | 67,75 | 66,03 |
| 5 | CV5 | 88,00 | 76,28 |
| 6 | PVI7 | 67,75 | 66,03 |
| 7 | PVI7 | 67,75 | 66,03 |
| 8 | PVI7 | 67,75 | 66,03 |

Tab. XII-7 Dati geometrici

Adesso si procede alla determinazione dei tipi di collegamento tra la nostra partizione e le strutture accanto usando i dati empirici forniti dalla normativa EN UNI 12354 - 1.

Si ha ad esempio :

- Per un giunto di tipo a T tra strutture omogenee e pareti leggere, trasmissione attraverso strutture omogenee :

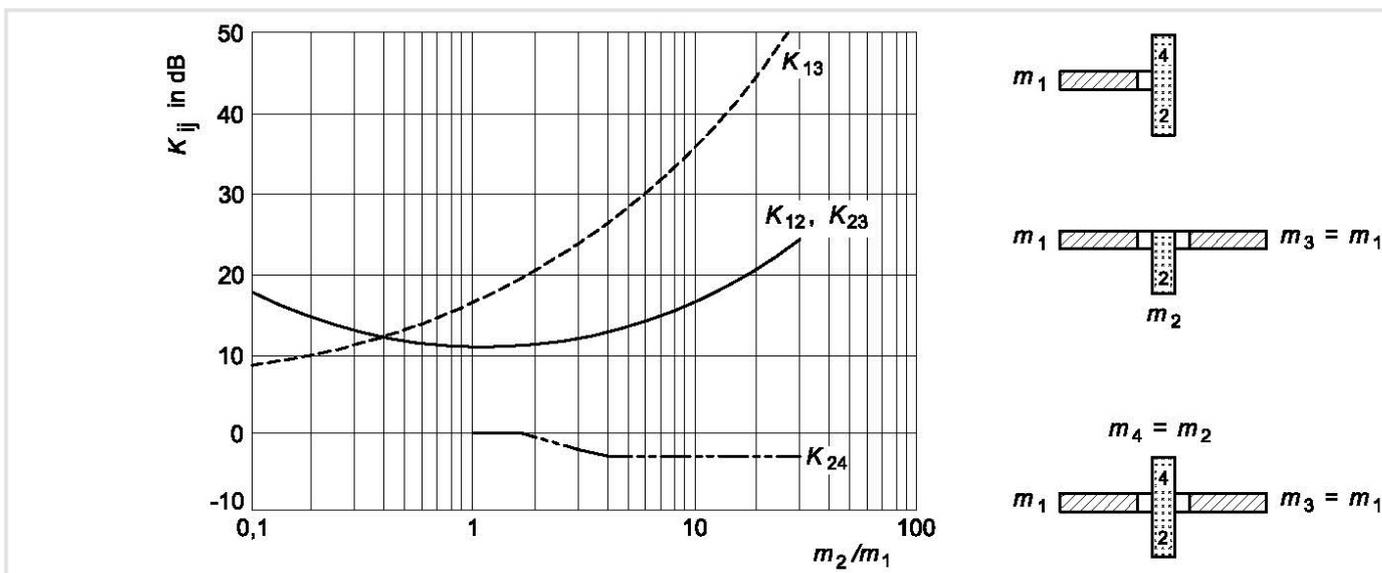


Fig. XII-13 Indice di riduzione delle vibrazioni per ciascuna via di trasmissione ij su un giunto

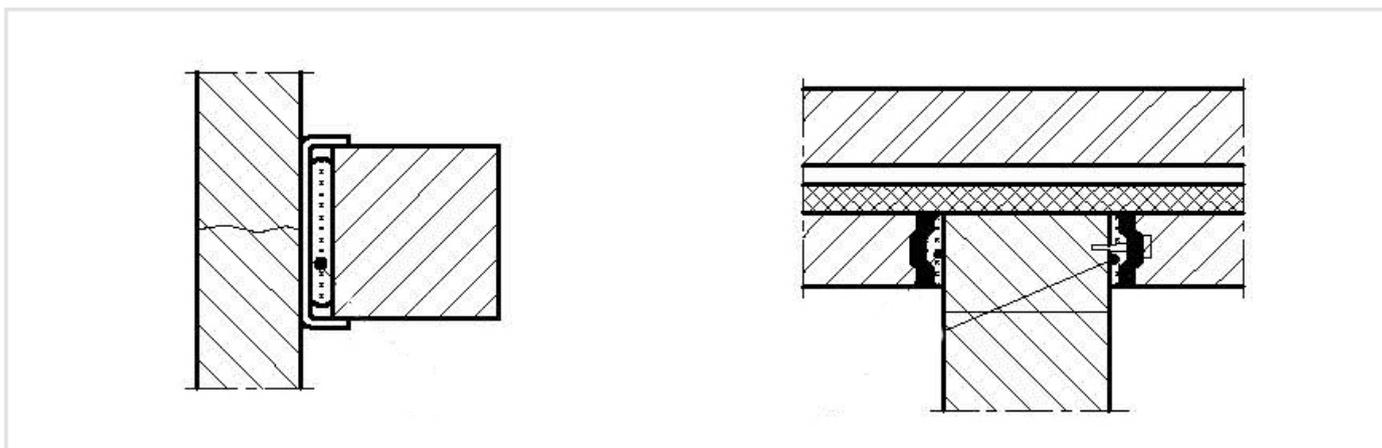


Fig. XII-12 Illustrazione ricavata dalla normativa EN UNI 12354-1

- Per un giunto di tipo a T tra strutture omogenee con strati rigidi :

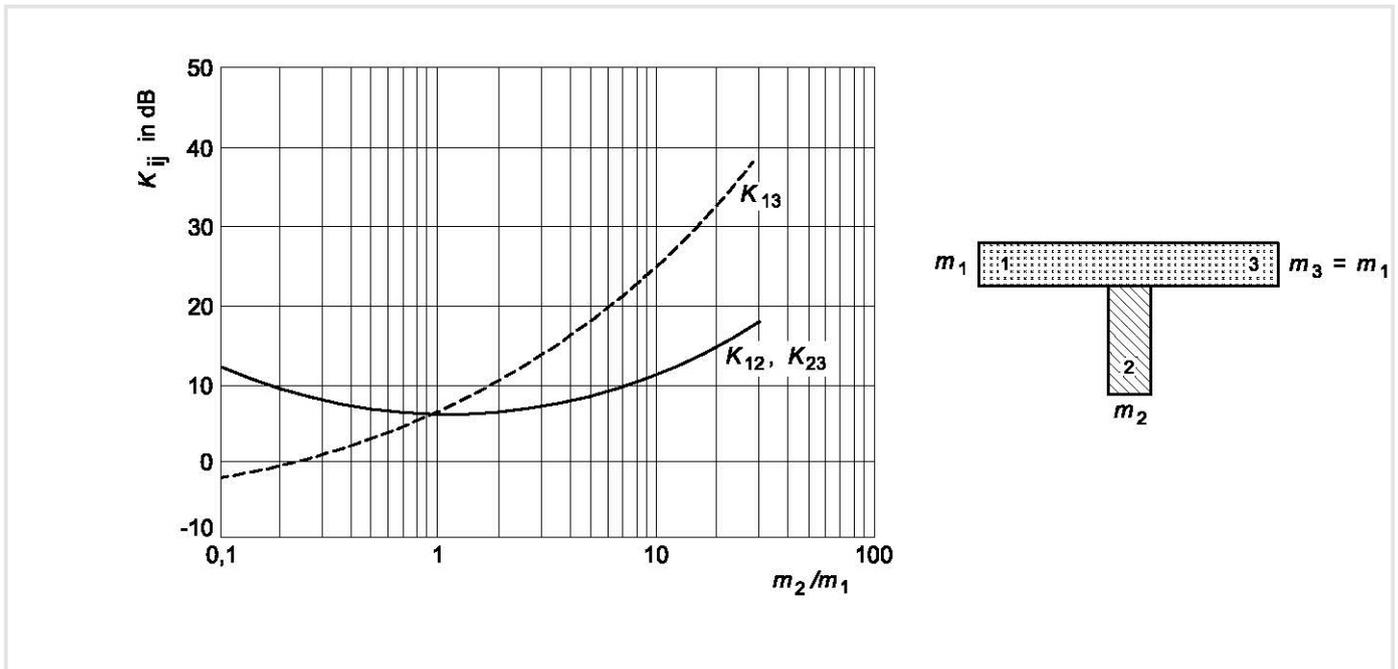


Fig. XII-15 Indice di riduzione delle vibrazioni per ciascuna via di trasmissione ij su un giunto

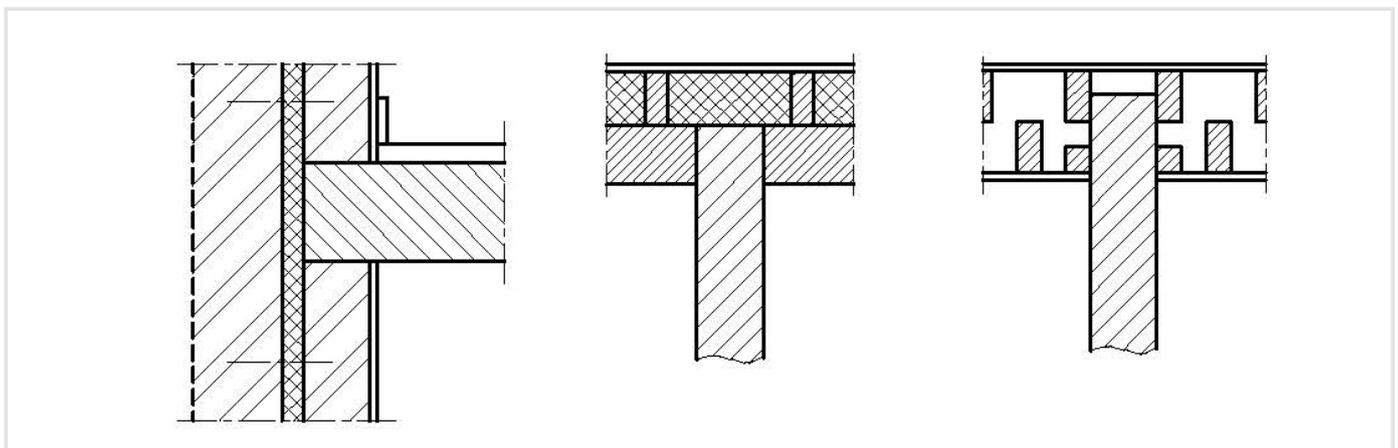


Fig. XII-14 Illustrazione ricavata dalla normativa EN UNI 12354-1

E quindi abbiamo :

| Lato | Tipo di collegamento |
|------|--|
| 1 | Collegamento a T tra strutture omogenee con strati rigidi |
| 2 | Collegamento a T tra strutture omogenee e pareti leggere, trasmissione attraverso strutture omogenee |
| 3 | Collegamento a T tra strutture omogenee e pareti leggere, trasmissione attraverso strutture omogenee |
| 4 | Collegamento a T tra strutture omogenee e pareti leggere, trasmissione attraverso strutture omogenee |

Tab. XII-8 Tipo di collegamento

Tale tabella ci porta alla seguente valutazione dei percorsi e del potere fonoisolante laterale di ciascun componente della struttura :

| Lato | Tipo di collegamento | Rijw potere fonoisolante laterale [dB] |
|-------|--|--|
| S | Diretto | 62,64 |
| 1 - 5 | Collegamento a T tra strutture omogenee con strati rigidi | 94,73, |
| 2 - 6 | Collegamento a T tra strutture omogenee e pareti leggere, trasmissione attraverso pareti leggere | 85,68 |
| 3 - 7 | Collegamento a T tra strutture omogenee e pareti leggere, trasmissione attraverso pareti leggere | 86,93 |
| 4 - 8 | Collegamento a T tra strutture omogenee e pareti leggere, trasmissione attraverso pareti leggere | 85,68 |
| 1 - s | Collegamento a T tra strutture omogenee con strati rigidi | 87,91 |
| 2 - s | Collegamento a T tra strutture omogenee e pareti leggere, trasmissione attraverso pareti leggere | 91,51 |
| 3 - s | Collegamento a T tra strutture omogenee e pareti leggere, trasmissione attraverso pareti leggere | 92,76 |
| 4 - s | Collegamento a T tra strutture omogenee e pareti leggere, trasmissione attraverso pareti leggere | 91,51 |
| S - 5 | Collegamento a T tra strutture omogenee con strati rigidi | 77,90 |
| S - 6 | Collegamento a T tra strutture omogenee e pareti leggere, trasmissione attraverso pareti leggere | 91,51 |
| S - 7 | Collegamento a T tra strutture omogenee e pareti leggere, trasmissione attraverso pareti leggere | 92,76 |
| S - 8 | Collegamento a T tra strutture omogenee e pareti leggere, trasmissione attraverso pareti leggere | 91,51 |
| S - 8 | Collegamento a T tra strutture omogenee e pareti leggere, trasmissione attraverso strutture omogenee | 80,16 |

Tab. XII-9 Potere fonoisolante laterale

E quindi abbiamo come potere fonoisolante del divisorio orizzontale tra aule $R'_w = 62,41$ dB, valore ammissibile superiore al minimo di 50dB secondo il DPCM.

3. LIVELLO DEI RUMORI DI CALPESTIO E DI SHOCK (POI1 E POI2)

Le aule sono disposte su più piani: un' ulteriore fonte di disturbo acustica per le aule al piano terra ed al primo piano è costituita dalla presenza di un secondo piano. Sembra quindi opportuno valutare l'isolamento acustico da calpestio $L'_{n,w}$ tra le aule, che indica effettivamente la capacità di un solaio di abbattere i rumori impattivi.

Per il calcolo abbiamo usato il metodo semplificato fornito dalla norma UNI EN 12354 - 2 che indica :

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

espresso in dB.

Con :

- K la correzione per la trasmissione dei rumori di calpestio attraverso le costruzioni laterali omogenee in dB.
- ΔL_w indice di valutazione del livello di pressione sonora di calpestio.

- $L_{n,w,eq}$ indice di valutazione del livello equivalente di pressione sonora di calpestio normalizzato del pavimento.

I valori della tabella Tab. IX-10 per il termine di correzione K sono stati estrapolati dalla normativa

Nel nostro caso quindi abbiamo $K = 5$ dB con una massa superficiale della partizione interna inferiore a 100 kg/m^2 e una massa superficiale del divisorio orizzontale superiore ai 600 kg/m^2 .

Echo ci fornisce il valore di $L_{n,w,eq}$ (indice di valutazione del livello equivalente di pressione sonora di calpestio normalizzato) del pavimento : $L_{n,w,eq} = 64,47$ dB.

I dati tecnici forniti dalla ditta Knauf, produttrice del nostro pavimento sopraelevato, indicano un ΔL_w compreso tra 13 e 26 dB.

Questo ci porta a un valore di $L'_{n,w}$ compreso tra 43,47 dB e 56,47 dB, quindi sempre inferiore al valore limite massimo di 58dB.

| 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/m²] | | | | | | | | | |
|---|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|
| | 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 | |

Tab. XII-10-Massa media per unità di area degli elementi laterali omogenei non ricoperti con rivestimenti supplementari²

1. ISOLAMENTO ACUSTICO AI RUMORI AEREI ESTERNI

Si procede ora alla valutazione dell'isolamento acustico normalizzato di facciata ai rumori aerei $D_{2m,nT,w}$, che indica la capacità di una facciata di abbattere i rumori aerei provenienti dall'esterno. Il DPCM 5.12.1997, relativo alla determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici, indica un valore minimo di 48 dB.

Il calcolo dell'isolamento acustico di facciata viene eseguito con le formule della normativa EN UNI 12354-1 :

$$D_{2m,nT,w} = R'_w + \Delta L_{fs} + 10 \log \frac{V}{6T_0S}$$

Con :

- R'_w l'indice di valutazione del potere fonoisolante apparente della facciata;
- S la superficie totale della facciata considerata dall'interno dell'ambiente;
- V il volume dell'ambiente considerato
- T_0 il tempo di riverberazione di riferimento pari a 0,5 s
- ΔL_{fs} la differenza di livello di pressione sonora in facciata che dipende dalla forma della facciata, dall'assorbimento acustico delle superfici aggettanti e dalla direzione del campo sono.

Il valore di R'_w viene ricavato dalla formula :

$$R'_w = -10 \log \left[\sum \frac{S_i}{S} 10^{(-\frac{R_{w,i}}{10})} + \sum \frac{A_0}{S} 10^{(-\frac{D_{n,e,w,i}}{10})} \right] - K$$

Con :

- $R_{w,i}$ il potere fonoisolante composto delle parti opache e trasparenti della facciata
- A_0 l'area di assorbimento equivalente di riferimento
- $D_{n,e,w,i}$ l'isolamento acustico normalizzato di piccoli elementi (transiti d'aria...)
- K correzione per il contributo globale della trasmissione laterale.

Abbiamo effettuato la verifica per 3 tipi di aule : una con due pilastri all'interno della facciata, una con un solo pilastro (il caso più frequente) e una con nessun pilastro (caso non presente ma potenzialmente verificabile in caso di smontaggio e rimontaggio delle pareti interne).

I tre casi di studio sono quelli elencati di seguito :

► Caso di una facciata senza pilastro :

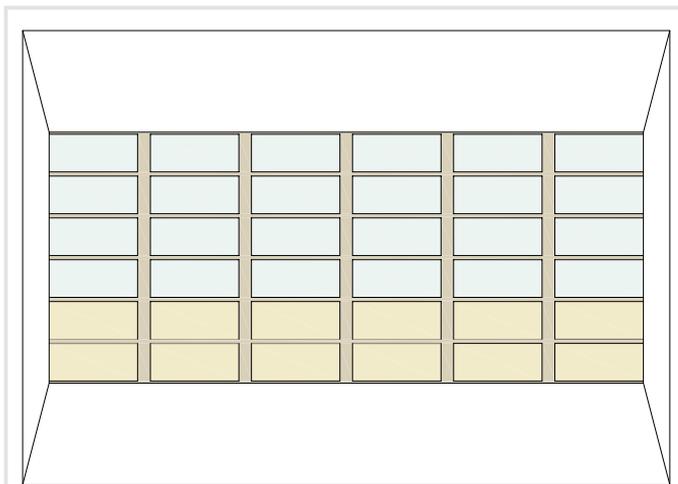


Fig. XII-16 Aula senza pilastro in facciata

| Materiale | Superficie in facciata [m²] |
|---------------------------------|-----------------------------|
| Legno Lamellare | 4,14 |
| Vetro Saint-Gobain ClimaPlus | 11,34 |
| Tamponamento opaco CV4 | 5,67 |

Tab. XII-11 Dati geometrici

► Caso di una facciata con un pilastro :

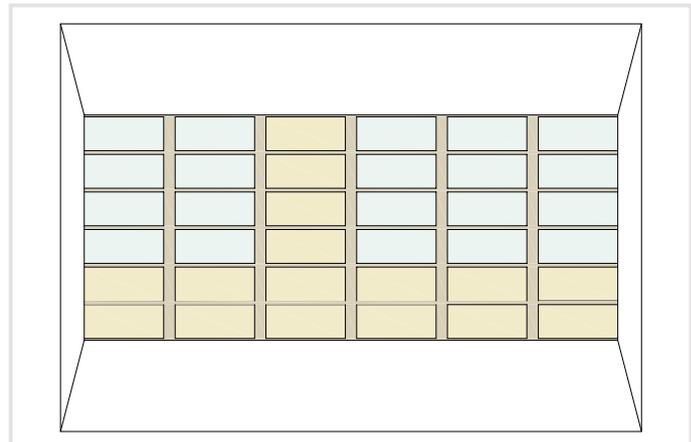


Fig. XII-17 Aula con un pilastro in facciata

| Materiale | Superficie in facciata [m²] |
|---------------------------------|-----------------------------|
| Legno Lamellare | 4,14 |
| Vetro Saint-Gobain ClimaPlus | 9,45 |
| Tamponamento opaco CV4 | 7,56 |

Tab. XII-12 Dati geometrici

► Caso di una facciata con due pilastri :

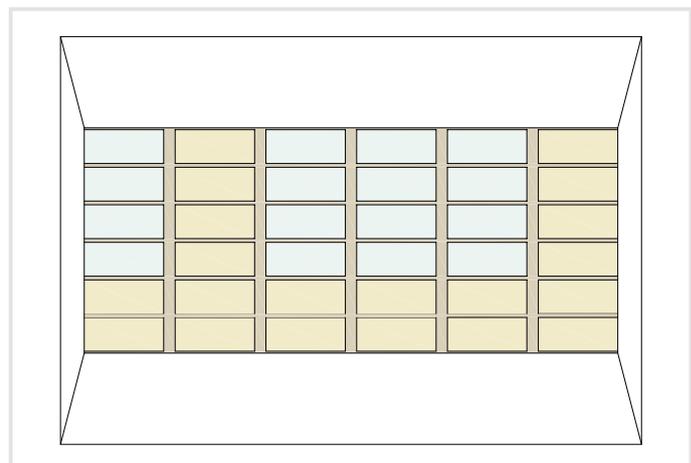


Fig. XII-18 Aula con due pilastri in facciata

| Materiale | Superficie in facciata [m²] |
|---------------------------------|-----------------------------|
| Legno Lamellare | 4,14 |
| Vetro Saint-Gobain ClimaPlus | 11,34 |
| Tamponamento opaco CV4 | 5,67 |

Tab. XII-13 Dati geometrici

Ecco i dati geometrici dell'aula :

| | |
|--|-------|
| Superficie della facciata [m ²] | 21,15 |
| Volume dell'aula di studio [m ³] | 185 |
| Correzione K [dB] | 0 |
| ΔL_{fs} [dB] | 0 |

Tab. XII-14 Dati geometrici

Ed ecco i dati acustici dei vari elementi

| Materiale | Potere fonoisolante [dB] |
|------------------------------|--------------------------|
| Legno Lamellare | 50,04 |
| Vetro Saint-Gobain ClimaPlus | 42 |
| Tamponamento opaco CV4 | 88,38 |

Tab. XII-15 Dati acustici

Alla fine otteniamo i seguenti risultati :

| Caso in considerazione | Potere fonoisolante apparente della facciata $R'w$ [dB] | Isolamento acustico di facciata finale $D2m,nT,w$ [dB] |
|------------------------|---|--|
| Nessun pilastro | 44,46 | 53 |
| 1 pilastro | 45,21 | 52 |
| 2 pilastri | 46,11 | 51 |

Tab. XII-16 Risultati

Superiamo sempre il valore limite minima ammissibile di 48 dB.

2. CRITERI PER UNA BUONA QUALITÀ ACUSTICA INTERNA

Spostiamo ora la nostra attenzione all'interno dell'aula di studio, andando ad approfondire la comprensione del parlato e del livello sonoro di fondo.

Lo schema mostrato sopra, che spiega il comportamento di un'onda acustica all'interno di un'aula da concerto, può essere applicato ad una qualsiasi aula in quanto si rilevano i medesimi fenomeni acustici. A seconda delle attività che si devono svolgere all'interno delle aule, il progetto acustico dello spazio dovrà rispettare criteri sensibilmente diversi.

Le teorie e le modellizzazioni del comportamento delle onde acustiche all'interno di un volume chiuso consentono di capire quale elemento o materiale cambiare per modificare l'ambiente acustico. La teoria di Sabine, costruita su un modello statistico, permette così, attraverso il tempo di riverberazione a 60 dB e il potere fonoassorbente dei diversi materiali, di capire e quindi di gestire il comfort acustico. Basta aumentare o diminuire la finestra equivalente aperta dell'aula per modificare il tempo di riverberazione. Quest'ultimo, che coincide con la decrescita di 60 dB della potenza di una fonte sonora istantanea, è la grandezza più facilmente accessibile e misurabile relativamente alle caratteristiche acustiche di un ambiente.

Le ricerche effettuate sui criteri di comfort psico-acustico hanno dimostrato che l'esclusiva gestione del tempo di riverberazione non basta per creare un ambiente gradevole.

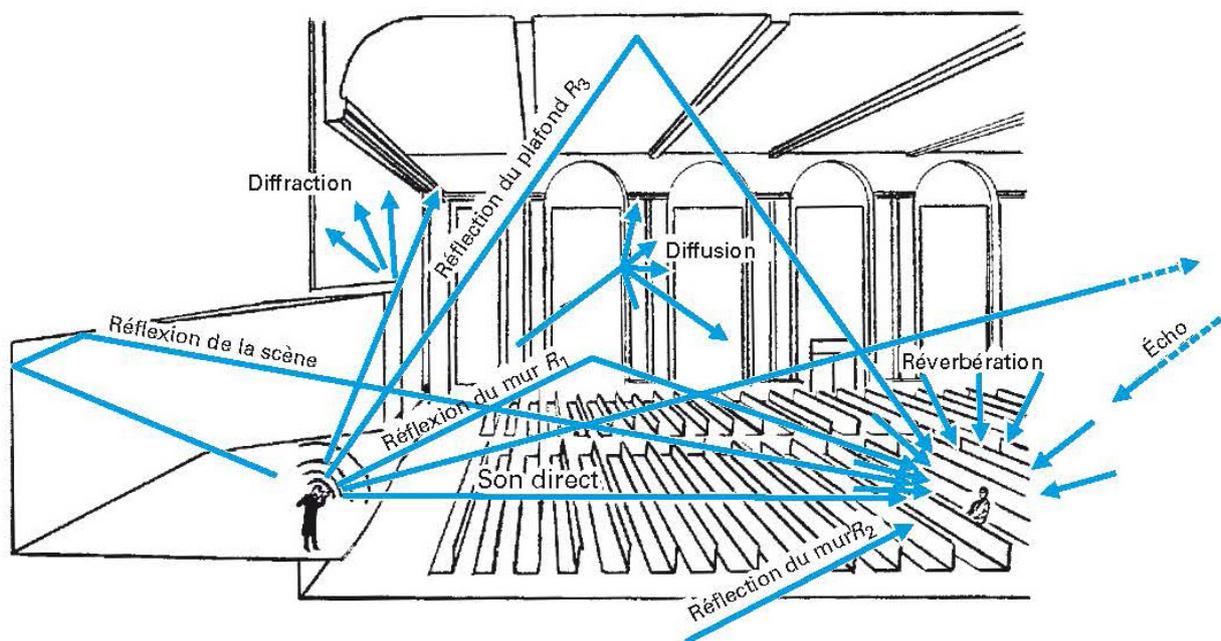
I fenomeni di eco, ad esempio, devono essere adeguatamente gestiti in quanto creano una situazione acustica piuttosto sgradevole. Il riverbero si differenzia dall'eco in quanto nel primo caso l'onda incidente e l'onda riflessa si confondono nell'orecchio dell'ascoltatore, mentre nel secondo caso coincidono.

Questi ultimi aspetti possono essere gestiti tramite un modello geometrico che calcola le traiettorie delle onde sonore a partire da una fonte puntuale.

Nel nostro ambito scolastico, attraverso le diverse ricerche effettuate, siamo riusciti a definire alcuni criteri da rispettare per poter garantire una buona qualità acustica degli spazi didattici.

Le aule didattiche possono essere usate per due tipi di pedagogia non tanto diversi in termini di requisiti acustici : una lezione frontale dove tutti gli studenti sono interessati all'ascolto di un unico oratore (il professore o lo studente davanti alla lavagna), oppure la creazione all'interno dell'aula di piccoli gruppi di studio che possono parlare a bassa voce tra di loro senza interferire con il lavoro degli altri gruppi.

Per una persona che parla davanti alla lavagna, una buona qualità acustica coinciderà con le uniche onde riflesse dal



FONTE : TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR - T1 - BR1100

Fig. XII-19 Onda diretta, prime riflessioni e illustrazione di qualche fenomeno acustico all'interno di un'aula

soffitto sentite da parte dell'oratore: il materiale dovrà quindi essere molto riflettente.

Per uno studente collocato in mezzo all'aula e che deve ascoltare l'oratore davanti alla lavagna, una buona qualità acustica coinciderà con l'unica percezione dell'onda sonora diretta: il materiale dovrà quindi essere fonoassorbente.

Nel caso di attività di gruppo, un assorbimento troppo forte del suono non permetterà agli studenti di sentirsi parlare e creerà una situazione poco confortevole, che può essere combattuta con un soffitto non troppo alto.

Le nostre aule di studio avranno un volume di 200 m³ minimo. La normativa francese richiede un tempo di riverberazione Tr compreso tra 0,4 e 0,8 s.

L'eco deve essere limitato a 35 ms.

3. ANALISI DEL FENOMENO DEI MODI PROPRI - DETERMINAZIONE DELLE CAPACITÀ FONO-ASSORBENTI

Un elemento importante e parecchie volte trascurato durante le fasi progettuali è costituito dai modi propri delle aule di piccole dimensioni. La teoria indica che in questo tipo di aula, di forma regolare (di parallelepipedo), appaiono delle pulsazioni proprie di risonanza presso le frequenze basse. Quindi quando la fonte acustica emette un suono di cui una delle frequenze è uguale a uno dei modi propri, l'intensità di questa componente aumenta. Risulta quindi molto importante prevedere un trattamento che possa far diminuire queste risonanze.

Abbiamo quindi effettuato il calcolo del valore dei primi modi propri. Dopo abbiamo calcolato il ricoprimento tra le frequenze proprie per certi segmenti di frequenza. Al di sotto di 5 Hz, esistono dei vuoti troppo significativi tra due frequenze proprie. Si deve quindi prevedere un'assorbimento molto forte di queste frequenze.

Per un'aula rettangolare, abbiamo :

$$f_{mnp} = \frac{c}{2} \left(\frac{m^2}{L_x^2} + \frac{n^2}{L_y^2} + \frac{p^2}{L_z^2} \right)^{1/2}$$

con L_x, L_y e L_z le dimensioni dell'aula, e m,n,p tre numeri interi mai uguali a 0 contemporaneamente, e c la velocità del suono.

Abbiamo come dati :

Ecco un campione dei modi propri che abbiamo calcolato. I

| | |
|--------------------|--------|
| c [m.s-1] | 343,00 |
| L _x [m] | 7,20 |
| L _y [m] | 9,60 |
| L _z [m] | 3,00 |

Tab. XII-17-

calcoli sono stati effettuati per m, n e p che si succedevano da 0 a 6. Quindi abbiamo calcolato 342 modi propri.

| m | n | p | f _{m,n,p} [Hz] | Δf tra due modi successivi [Hz] |
|---|---|---|-------------------------|---------------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 0 | 1 | 0 | 17,86 | 17,86 |
| 1 | 0 | 0 | 23,82 | 5,95 |
| 1 | 1 | 0 | 29,77 | 5,95 |
| 0 | 2 | 0 | 35,73 | 5,95 |
| 1 | 2 | 0 | 42,94 | 7,21 |
| 2 | 0 | 0 | 47,64 | 4,70 |

| m | n | p | f _{m,n,p} [Hz] | Δf tra due modi successivi [Hz] |
|---|---|---|-------------------------|---------------------------------|
| 2 | 1 | 0 | 50,88 | 3,24 |
| 0 | 3 | 0 | 53,59 | 2,72 |
| 0 | 0 | 1 | 57,17 | 3,57 |
| 1 | 3 | 0 | 58,65 | 1,48 |
| 2 | 2 | 0 | 59,55 | 0,90 |
| 0 | 1 | 1 | 59,89 | 0,34 |
| 1 | 0 | 1 | 61,93 | 2,04 |
| 1 | 1 | 1 | 64,46 | 2,53 |
| 0 | 2 | 1 | 67,41 | 2,96 |
| 3 | 0 | 0 | 71,46 | 4,04 |
| 0 | 4 | 0 | 71,46 | 0,00 |
| 1 | 2 | 1 | 71,50 | 0,04 |
| 2 | 3 | 0 | 71,71 | 0,21 |
| 3 | 1 | 0 | 73,66 | 1,95 |
| 2 | 0 | 1 | 74,41 | 0,76 |
| 1 | 4 | 0 | 75,32 | 0,91 |
| 2 | 1 | 1 | 76,53 | 1,20 |
| 0 | 3 | 1 | 78,36 | 1,83 |
| 3 | 2 | 0 | 79,89 | 1,53 |
| 1 | 3 | 1 | 81,90 | 2,01 |
| 2 | 2 | 1 | 82,55 | 0,65 |
| 2 | 4 | 0 | 85,88 | 3,33 |
| 3 | 3 | 0 | 89,32 | 3,44 |
| 0 | 5 | 0 | 89,32 | 0,00 |
| 3 | 0 | 1 | 91,51 | 2,19 |
| 0 | 4 | 1 | 91,51 | 0,00 |
| 2 | 3 | 1 | 91,70 | 0,19 |
| 1 | 5 | 0 | 92,44 | 0,74 |
| 3 | 1 | 1 | 93,24 | 0,79 |
| 1 | 4 | 1 | 94,56 | 1,32 |
| 4 | 0 | 0 | 95,28 | 0,72 |
| 4 | 1 | 0 | 96,94 | 1,66 |
| 3 | 2 | 1 | 98,24 | 1,30 |
| 3 | 4 | 0 | 101,06 | 2,82 |
| 2 | 5 | 0 | 101,23 | 0,18 |
| 4 | 2 | 0 | 101,76 | 0,52 |
| 2 | 4 | 1 | 103,17 | 1,41 |
| 3 | 3 | 1 | 106,05 | 2,88 |
| 0 | 5 | 1 | 106,05 | 0,00 |
| 0 | 6 | 0 | 107,19 | 1,14 |
| 1 | 5 | 1 | 108,69 | 1,50 |
| 4 | 3 | 0 | 109,32 | 0,62 |
| 1 | 6 | 0 | 109,80 | 0,49 |
| 4 | 0 | 1 | 111,11 | 1,31 |
| 4 | 1 | 1 | 112,54 | 1,43 |
| 0 | 0 | 2 | 114,33 | 1,79 |
| 3 | 5 | 0 | 114,39 | 0,06 |
| 0 | 1 | 2 | 115,72 | 1,33 |
| 3 | 4 | 1 | 116,11 | 0,39 |
| 2 | 5 | 1 | 116,26 | 0,15 |
| 4 | 2 | 1 | 116,72 | 0,46 |
| 1 | 0 | 2 | 116,79 | 0,07 |
| 2 | 6 | 0 | 117,30 | 0,51 |

Tab. XII-18 Valutazione dei 60 primi modi propri

Procediamo ad una quantificazione dei modi propri per intermedi di frequenze.

| | da 0 a 100 Hz | da 100 a 200 Hz | da 200 a 300 Hz | da 0 e 70 Hz | da 70 a 100 Hz |
|-------------------------------------|---------------|-----------------|-----------------|--------------|----------------|
| media degli intervalli di frequenza | 2,52 | 0,77 | 1,06 | 4,49 | 1,28 |
| numero di frequenze presenti | 39,00 | 130,00 | 96,00 | 15,00 | 24,00 |

Tab. XII-19 -

Infine vediamo che sarà necessario provocare un forte abbattimento delle frequenze comprese tra 0 e 70 Hz.

4. TEMPO DI RIVERBERAZIONE ALL'INTERNO DI UN AULA TIPO

Procediamo adesso all'analisi del tempo di riverberazione mediante il software ecotect.

Usiamo i valori dati dalla formula di Eyring (o di Sabine migliorata) che suppone un' omogeneità sonora e quindi un' aula non troppo grande (rimaniamo nei limiti) ed un assorbimento acustico medio :

$$a = \frac{\sum a_i S_i}{\sum S_i}$$

Il calcolo effettuato da Eyring consiste in :

A l'istante 0 :energia

$$E(0) = E_0.$$

A l'istante τ : energia

$$E(\tau) = E_0(1 - a)$$

A l'istante $t = n \tau$: energia

$$E(t) = E_0(1 - a)^n$$

E così

$$E(t) = E_0(1 - a)^{t/\tau} = E_0(1 - a)^{\frac{S\Omega}{4V}t}$$

con

$$\tau = \frac{S\Omega}{4V}$$

e con Ω la celerità del suono, V il volume dell'aula e

$$S = \sum S_i$$

la superficie totale delle pareti.

Supponendo le decrescita dell'energia come funzione esponenziale del tempo e la decrescita del livello come funzione lineare del tempo, si ottiene:

$$T_r = \frac{0,07 V}{S \log_{10}(1 - a)^{-1}}$$

Abbiamo creato con ecotect un modello di aula tipo inserendo i vari materiali finali scelti e la morfologia delle aule di studio. La formula precedente è integrata a delle considerazioni geometriche che tengono in conto la posizione dei materiali e della fonte sonora.

Per poter integrare la modularità e la possibilità di spostare le pareti, è stato scelto un controsoffitto composto da due strati acustici, uno maggiormente riflettente e l'altro maggiormente assorbente. Quest'ultimo può essere smontato, consentendo così un ulteriore aggiustamento della qualità acustica degli ambienti scolastici dopo la ristrutturazione.

Il tempo di riverberazione deve essere infine valutato sia per l'aula vuota, che contenente tutti gli studenti. La presenza degli alunni, infatti, abbassa notevolmente il tempo di riverberazione in quanto aumenta l'area equivalente di assorbimento acustico e viceversa.

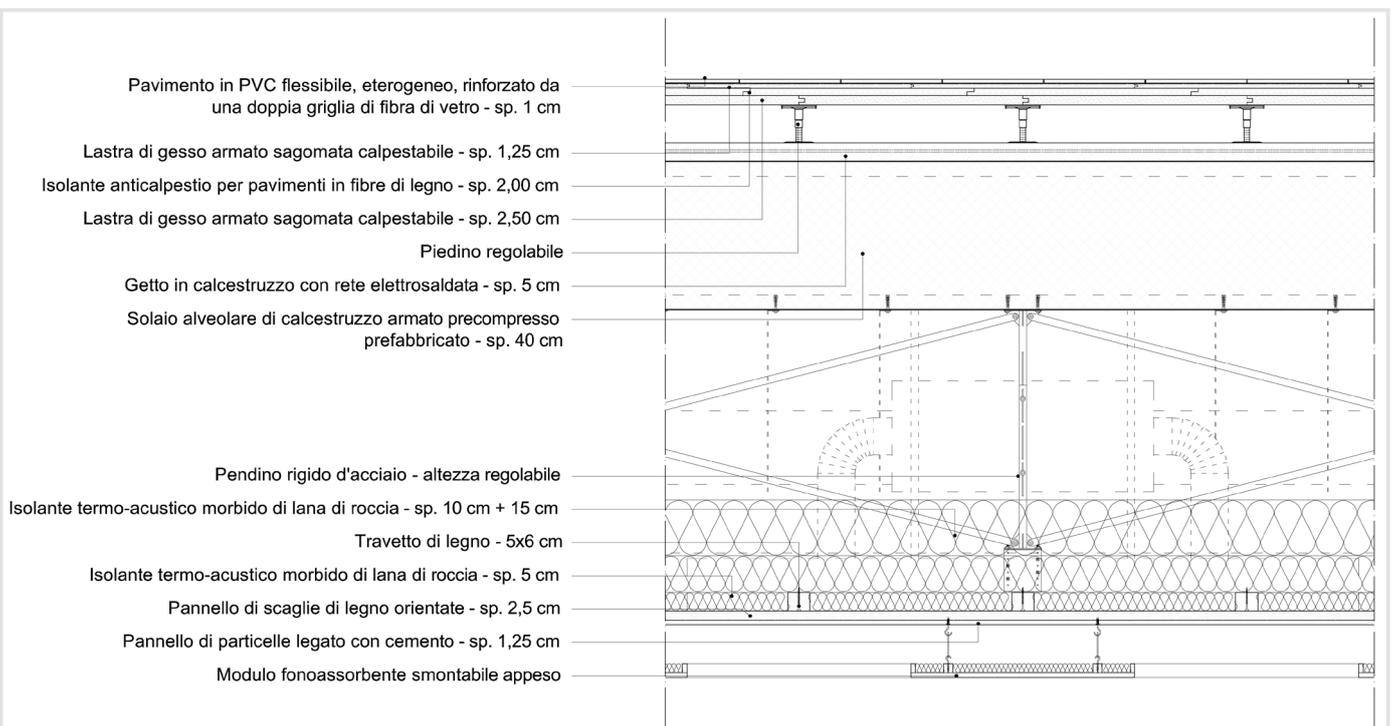


Fig. XII-20 POI1 con i moduli fonoassorbenti smontabili

Abbiamo quindi sviluppato diverse simulazioni, basate su diverse posizioni della fonte sonora (vicino alla lavagna, in fondo all'aula, negli spigoli dell'aula).

Ecco le caratteristiche dei materiali indicate dai costruttori :

► **Tavole appese fonoassorbenti - Rockfon Eclipse**

| Frequenza [Hz] | Coefficiente di assorbimento α |
|----------------|---------------------------------------|
| 63 | 0,05 |
| 125 | 0,12 |
| 250 | 0,20 |
| 500 | 0,27 |
| 1000 | 0,35 |
| 2000 | 0,39 |
| 4000 | 0,50 |
| 8000 | 0,64 |
| 16000 | 0,62 |

Fig. XII-21 Coefficiente di assorbimento delle tavole appese fonoassorbenti

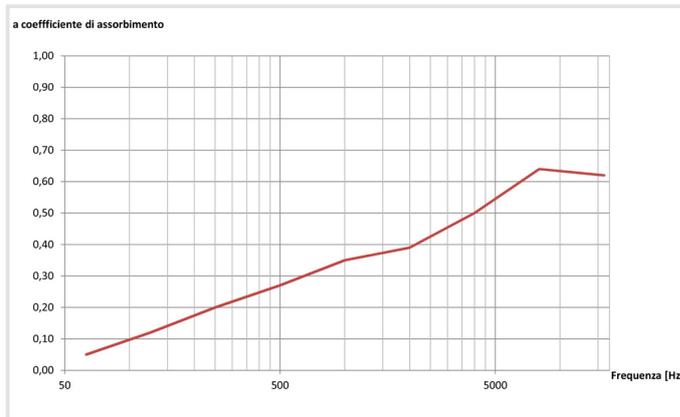


Fig. XII-22 Coefficiente di assorbimento delle tavole appese fonoassorbenti

► **Tavole appese diffondenti - Squarrydiffusor**

| Frequenza [Hz] | Coefficiente di assorbimento α |
|----------------|---------------------------------------|
| 63 | 0,37 |
| 125 | 0,08 |
| 250 | 0,06 |
| 500 | 0,06 |
| 1000 | 0,06 |
| 2000 | 0,08 |
| 4000 | 0,10 |
| 8000 | 0,10 |
| 16000 | 0,18 |

Fig. XII-23 Coefficiente di assorbimento delle tavole appese diffondenti

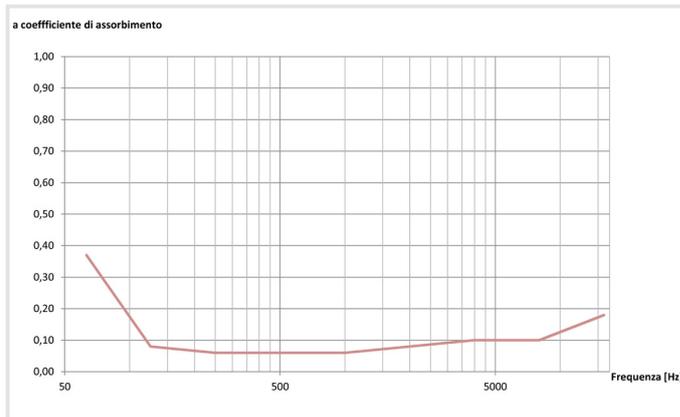


Fig. XII-24 Coefficiente di assorbimento delle tavole appese diffondenti

► **Rivestimento del controsoffitto - Pannello di particelle legate con cemento**

| Frequenza [Hz] | Coefficiente di assorbimento α |
|----------------|---------------------------------------|
| 63 | 0,06 |
| 125 | 0,17 |
| 250 | 0,19 |
| 500 | 0,20 |
| 1000 | 0,19 |
| 2000 | 0,15 |
| 4000 | 0,14 |
| 8000 | 0,12 |
| 16000 | 0,11 |

Fig. XII-25 Coefficiente di assorbimento del rivestimento del controsoffitto

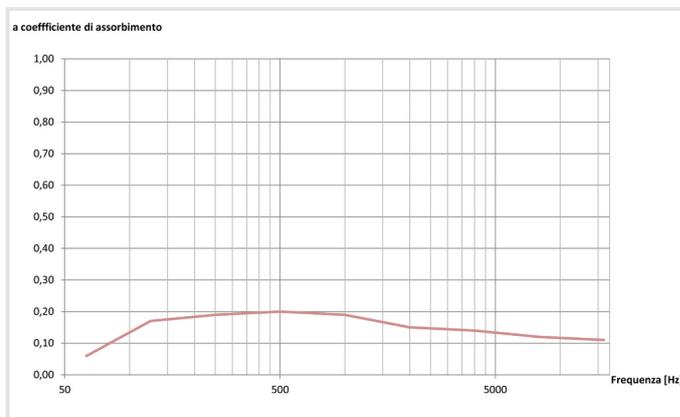


Fig. XII-26 Coefficiente di assorbimento del rivestimento del controsoffitto

► **Rivestimenti delle pareti laterali - Lastra d'acciaio smaltato Polyvision**

| Frequenza [Hz] | Coefficiente di assorbimento α |
|----------------|---------------------------------------|
| 63 | 0,21 |
| 125 | 0,08 |
| 250 | 0,13 |
| 500 | 0,11 |
| 1000 | 0,11 |
| 2000 | 0,09 |
| 4000 | 0,13 |
| 8000 | 0,11 |
| 16000 | 0,11 |

Fig. XII-27 Coefficiente di assorbimento delle pareti laterali

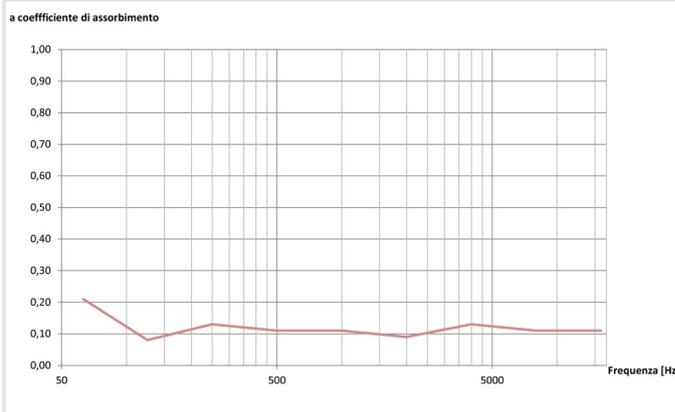


Fig. XII-28 Coefficiente di assorbimento delle pareti laterali

► **Rivestimenti del solaio - Pavimento in PVC flessibile Gerfloor**

| Frequenza [Hz] | Coefficiente di assorbimento α |
|----------------|---------------------------------------|
| 63 | 0,43 |
| 125 | 0,40 |
| 250 | 0,34 |
| 500 | 0,25 |
| 1000 | 0,19 |
| 2000 | 0,15 |
| 4000 | 0,14 |
| 8000 | 0,12 |
| 16000 | 0,11 |

Fig. XII-29 Coefficiente di assorbimento del rivestimento del solaio

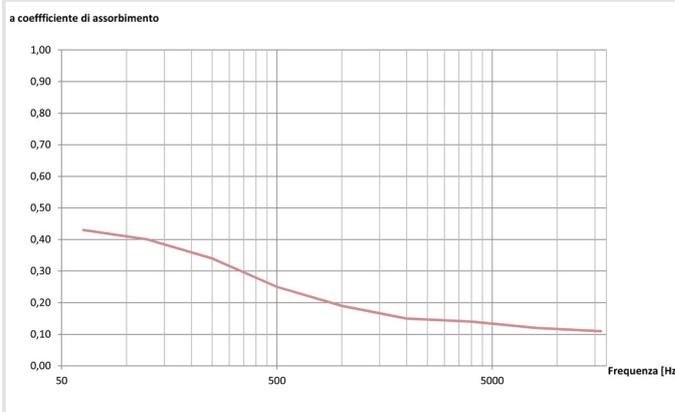


Fig. XII-30 Coefficiente di assorbimento del rivestimento del solaio

► **Tamponamenti trasparenti - Vetro Saint Gobain**

| Frequenza [Hz] | Coefficiente di assorbimento α |
|----------------|---------------------------------------|
| 63 | 0,05 |
| 125 | 0,05 |
| 250 | 0,02 |
| 500 | 0,01 |
| 1000 | 0,01 |
| 2000 | 0,02 |
| 4000 | 0,01 |
| 8000 | 0,01 |
| 16000 | 0,02 |

Fig. XII-31 Coefficiente di assorbimento dei vetri

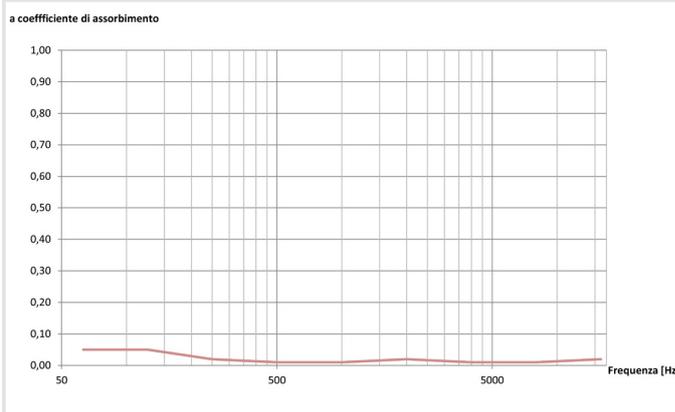


Fig. XII-32 Coefficiente di assorbimento dei vetri

Abbiamo rispettato i criteri elencati nella parte precedente. Le parti diffondenti sono state così posizionate verso la lavagna, mentre le lastre assorbenti dal lato degli studenti.

Ecco una breve vista della configurazione definitiva della nostra aula :

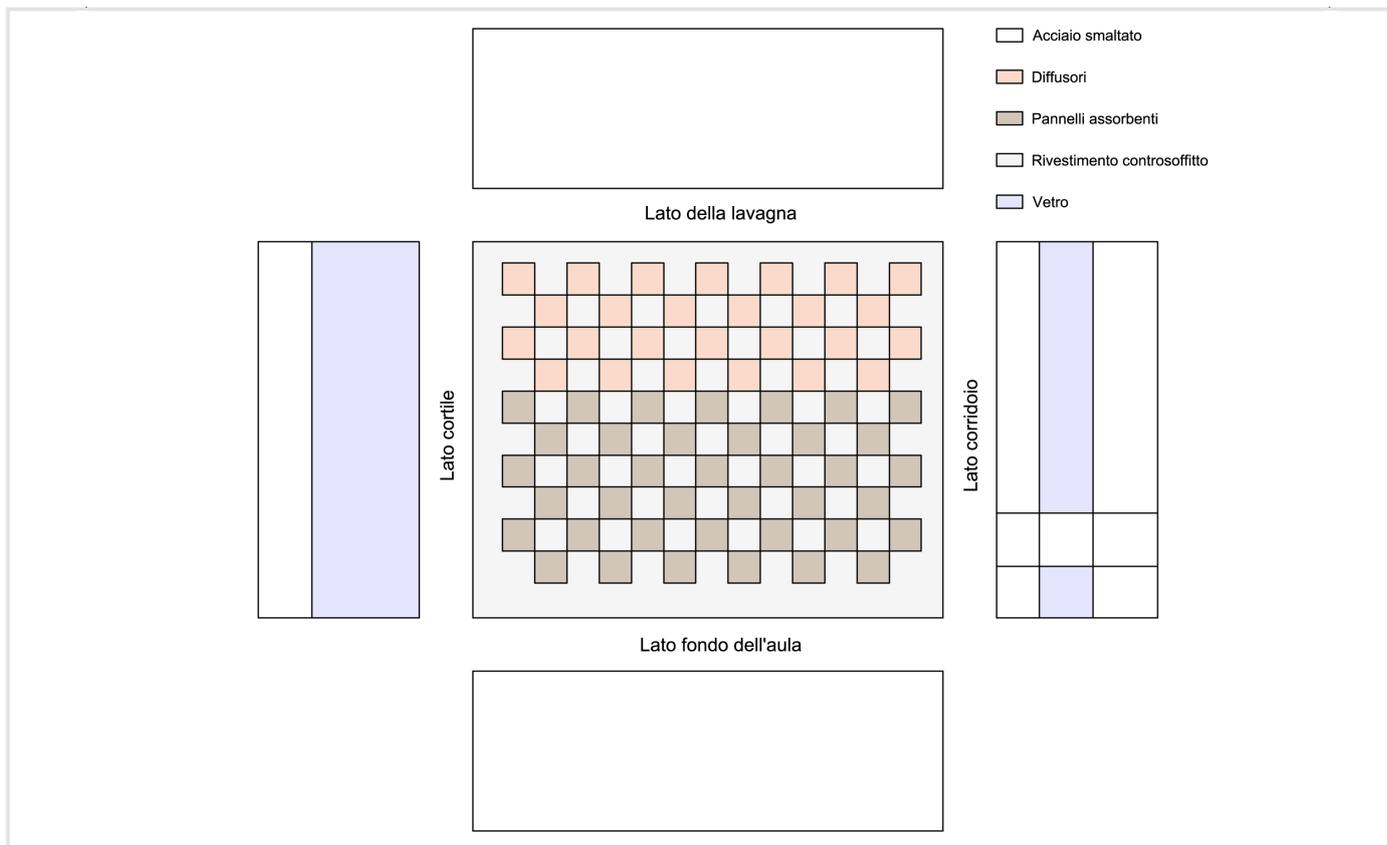


Fig. XII-33 Pianta del soffitto e delle pareti in un' aula tipo di studio

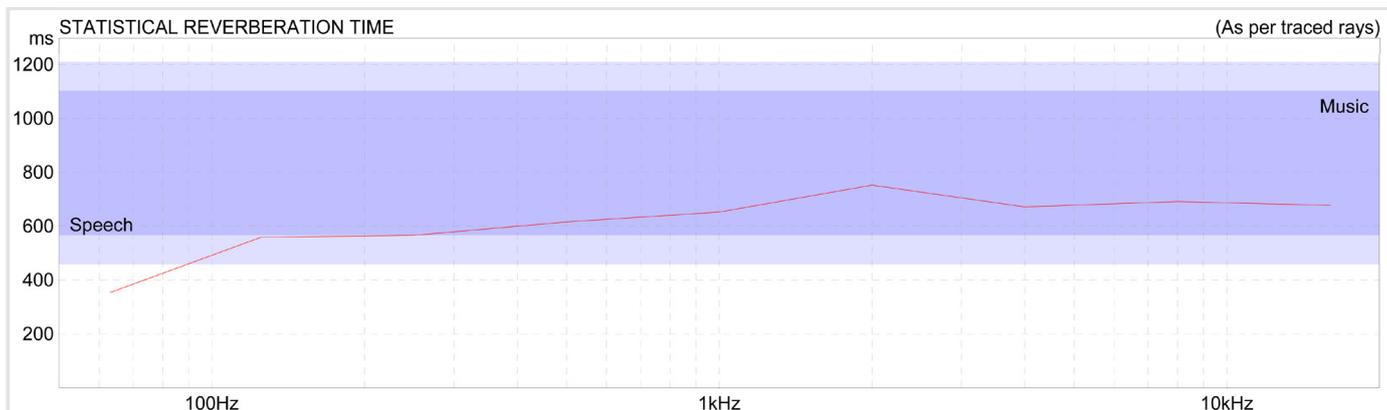


Fig. XII-34 Tempo di riverberazione dell'aula vuota

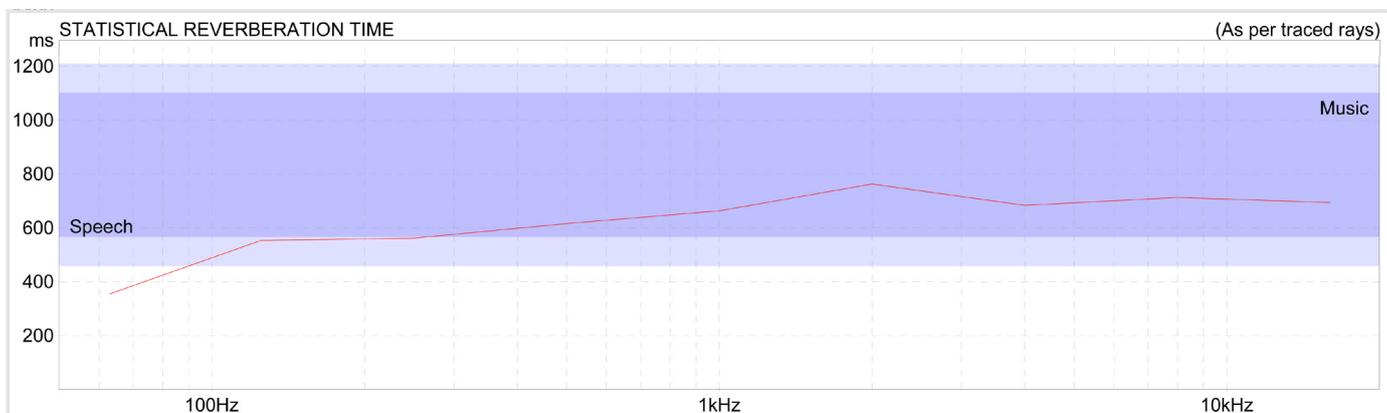


Fig. XII-35 Tempo di riverberazione con 30 persone d'inverno

Il tempo di riverberazione non viene molto influenzato da un numero di persone così piccolo. Riusciamo a rispettare i requisiti normativi raggiungendo l'abbattimento per le onde sonore con una frequenza inferiore a 70 Hz.

XII. PROGETTO DELLA GESTIONE DELL'ACQUA PIOVANA

Lo sfruttamento delle acque piovane per certi usi da parte degli utenti consente un'ulteriore riduzione dell'impatto ambientale dello stabilimento. Peraltro, l'alto rischio d'alluvioni in questa zona ci obbliga a progettare un impianto specifico per la gestione delle acque meteoriche.

| | |
|--|------------|
| A. PREMESSA | 555 |
| B. DIMENSIONAMENTO DELLA VASCA D'ACCUMULO PER IL RIUTILIZZO DELLE ACQUE PIOVANE | 556 |
| 1. SCHEMA DI FUNZIONAMENTO | 556 |
| 2. CONSUMO DELL'ACQUA PIOVANA | 556 |
| 3. PRECIPITAZIONI RACCOLTE | 557 |
| 4. SIMULAZIONE QUOTIDIANA | 558 |
| C. PREVENZIONE DELLE ALLUVIONI | 560 |
| 1. REQUISITI | 560 |
| 2. STRATEGIA DI GESTIONE DELL'ACCUMULO DELLE ACQUE METEORICHE | 560 |
| 3. TRATTAMENTO DELLE SUPERFICI | 560 |
| 4. ZONA VERDE DI RITENZIONE AL NORD | 560 |
| 5. ZONA AD ALLAGAMENTO PROGETTATO | 561 |
| 6. SINTESI DELLA GESTIONE DELL'ACCUMULO DELLE ACQUE PIOVANE | 561 |
| a. <i>evento piovoso mensile (381 m³ da accumulare)</i> | 561 |
| b. <i>Evento piovoso annuale (458 m³ da accumulare)</i> | 561 |
| c. <i>Evento piovoso decennale (583 m³ da accumulare)</i> | 561 |

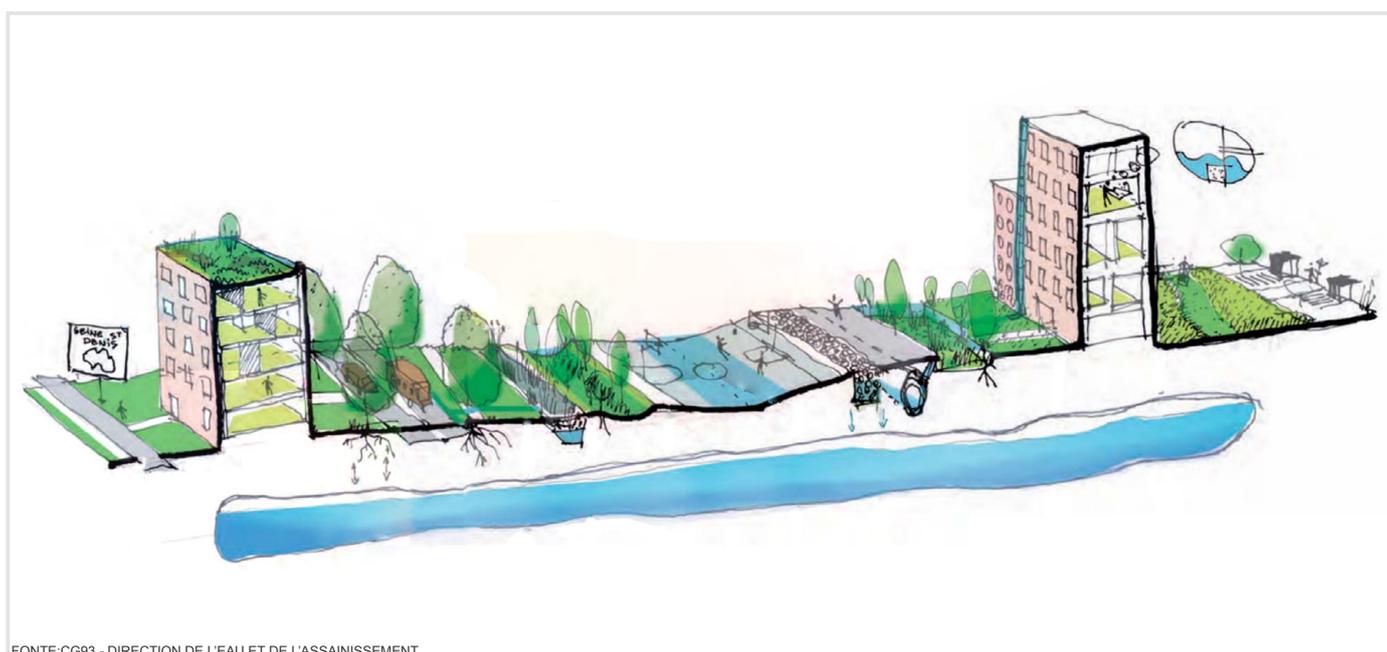
A. PREMESSA

Il dipartimento di Seine-Saint-Denis è particolarmente sensibile ai fenomeni di alluvioni durante degli episodi piovosi importanti : la sua topografia e la sua rete per le acque reflue non permettono un'infiltrazione e un'evacuazione abbastanza efficaci. Una limitazione della portata di rigetto è quindi imposta.

Peraltro, l'inquinamento e la geologia del suolo rendono impossibile l'infiltrazione diretta delle acque piovane nel suolo : infatti, una grande parte dei prodotti chimici usati da parte della macelleria industriale collocata sul nostro isolato all'inizio del XX° secolo si è infiltrata nella parte superiore del suolo e la presenza di argilla sotto impedisce l'infiltrazione efficace dell'acqua. Un sistema di accumulo diventa un'esigenza essenziale per la qualità ambientale del progetto. Lo svolgimento del progetto paesaggistico integra quest'elemento.

In aggiunta, si prevede un sistema di riutilizzo delle acque piovane integrato. È un processo rispettoso dell'ambiente che consente una diminuzione del rigetto all'interno della rete comunale, una riduzione dell'uso delle stazioni di epurazione, e infine un'abbassamento del consumo in acqua potabile all'interno dell'edificio.

In una prima parte, studiamo un dimensionamento di un sistema di riutilizzo delle acque meteoriche e i suoi vantaggi. Poi in una seconda parte, progettiamo l'integrazione dei diversi sistemi di accumulo all'interno del nostro progetto.



FONTE:CG93 - DIRECTION DE L'EAU ET DE L'ASSAINISSEMENT

Fig. XIII-1 Schema illustrativo della gestione delle acque piovane in un ambiente urbano

B. DIMENSIONAMENTO DELLA VASCA D'ACCUMULO PER IL RIUTILIZZO DELLE ACQUE PIOVANE

Il dimensionamento segue la norma DIN 1989-1.

1. SCHEMA DI FUNZIONAMENTO

Il riutilizzo delle acque piovane implica una messa in opera di un sistema impiantistico complesso integrando :

- la raccolta dell'acqua sui tetti
- il filtraggio
- l'accumulo con una vasca interrata
- un adduzione di acqua potabile in caso di penuria
- la messa in circolazione tramite un pompa
- il collegamento con la rete comunale delle acque reflue per lo scarico dell'acqua eccedentaria.

Lo schema di principio Fig. XIII-3 sintetizza il funzionamento del sistema.

2. CONSUMO DELL'ACQUA PIOVANA

Sono previste due tipi di uso dell'acqua meteorica :

- usi esterni : irrigazione delle aree verdi, pulizia della pavimentazione, ecc.
- uso domestico : bagni, pulizia del pavimento

| | |
|---------------|-----------------------------------|
| Bagni, scuola | 6L/giorni.persona |
| Irrigazione | 10L/m ² ogni 10 giorni |

Tab. XIII-1 Consumo secondo i vari usi

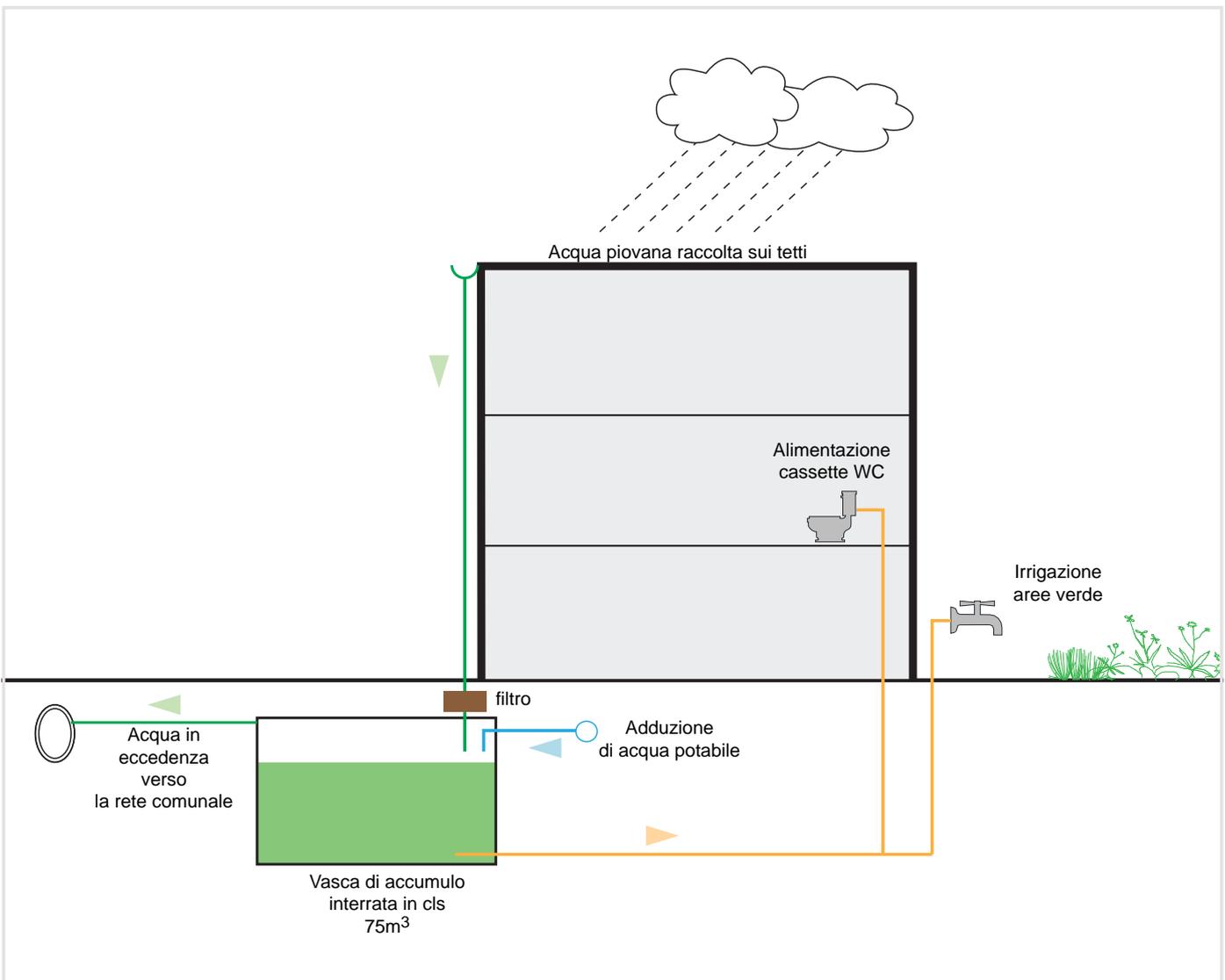


Fig. XIII-2 Schema di principio del sistema di riutilizzo dell'acqua piovana

3. PRECIPITAZIONI RACCOLTE

I tetti sono le superfici le più adatte per la raccolta delle acque piovane, perché necessitano solo un breve e leggero filtraggio.

Il volume di precipitazioni raccolte dipende della tipologia della superficie raccogliente. Il coefficiente di raccolta permette di valutare questo comportamento.

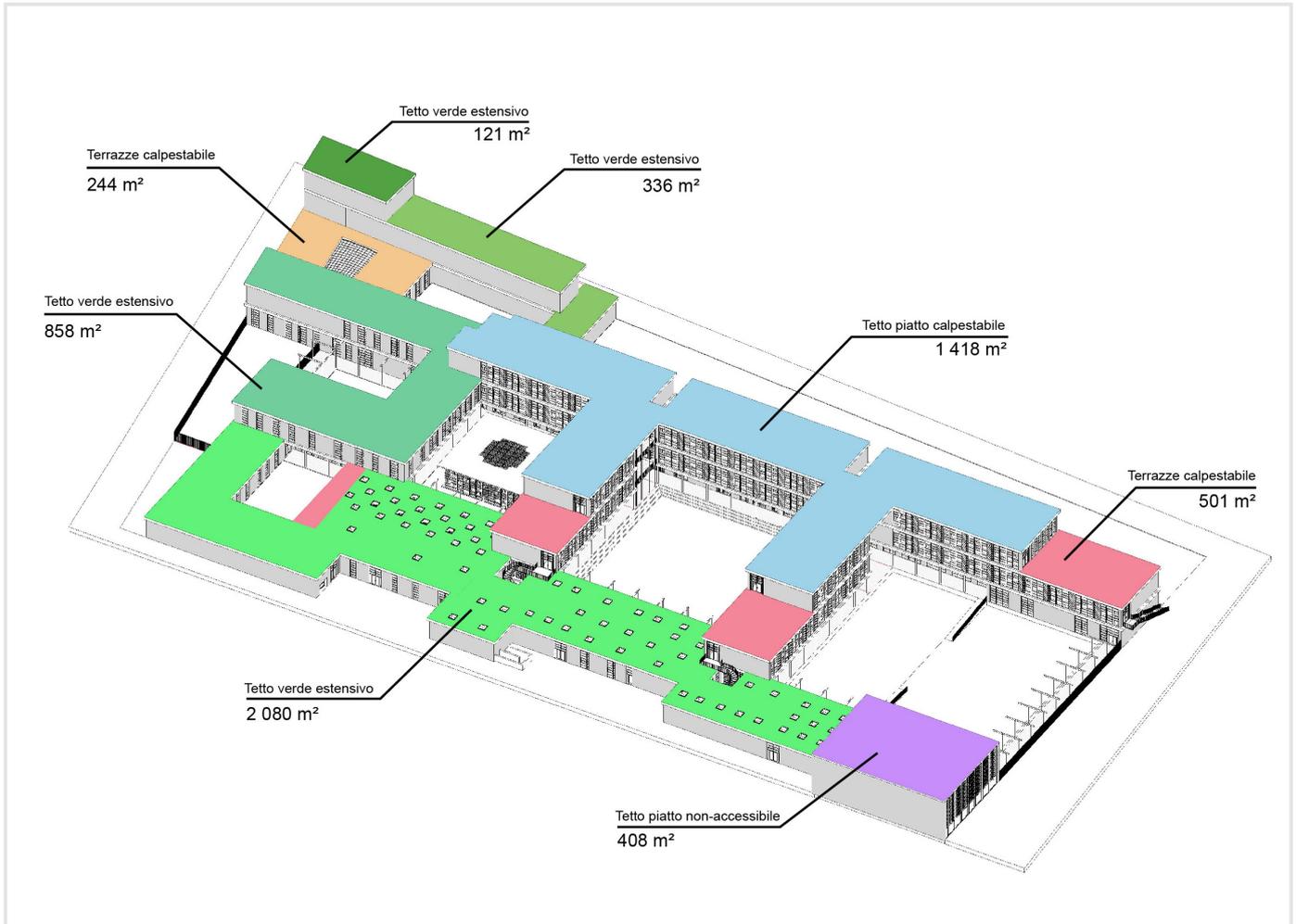


Fig. XIII-3 Superficie di raccolta

| | Superficie | Coefficiente di raccolta | Superficie equivalente |
|---|----------------------|--------------------------|------------------------|
| Tetto piatto calpestabile : secondo piano | 1 418 m ² | 0,6 | 850,8 m ² |
| Tetto verde estensivo : primo piano (Amministrazione) | 858 m ² | 0,3 | 257,4 m ² |
| Tetto piatto non-accessibile : Palestra | 408 m ² | 0,6 | 244,8 m ² |
| Terrazze calpestabili | 501 m ² | 0,6 | 300,6 m ² |
| Tetto verde estensivo : Piano terra | 2 080 m ² | 0,3 | 624 m ² |
| | 5 265 m ² | | 2277,6 m ² |

Tab. XIII-2 Superficie di raccolta equivalente

| | Numero di giorni | Numero di irrigazione | Precipitazioni raccolte | | Fabbisogno | | |
|-----------------------|------------------|-----------------------|-------------------------|--|------------------------------------|--|--|
| | | | Precipitazioni [mm] | Volume mensile delle precipitazioni raccolte [m ³] | Uso : bagni [m ³ /mese] | Uso : irrigazione [m ³ /mese] | Fabbisogno totale mensile [m ³ /mese] |
| v | 31 | 0 | 49,4 | 130,8 | 93,6 | 0 | 93,6 |
| Febraio | 28 | 0 | 43 | 113,8 | 52,8 | 0 | 52,8 |
| Marzo | 31 | 0 | 47,3 | 125,2 | 117,6 | 0 | 117,6 |
| Aprile | 30 | 3 | 49,3 | 130,5 | 57,6 | 55,9 | 113,4 |
| Maggio | 31 | 3 | 59,3 | 157,0 | 120 | 55,9 | 175,8 |
| Giugno | 30 | 3 | 49,8 | 131,8 | 112,8 | 55,9 | 168,6 |
| Luglio | 31 | 3 | 54,4 | 144,0 | 0 | 55,9 | 55,9 |
| Agosto | 31 | 3 | 44 | 116,5 | 0 | 55,9 | 55,9 |
| Settembre | 30 | 3 | 55,2 | 146,1 | 105,6 | 55,9 | 161,4 |
| Ottobre | 31 | 3 | 56,1 | 148,5 | 79,2 | 55,9 | 135,1 |
| Novembre | 30 | 0 | 51,7 | 136,9 | 115,2 | 0 | 115,2 |
| Dicembre | 31 | 0 | 53,3 | 141,1 | 81,6 | 0 | 81,6 |
| Totale annuale | | 0 | 612,8 | 1622,2 | 936 | 391 | 1327 |

Tab. XIII-3 fabbisogno e precipitazione raccolte mensile

Il volume delle precipitazioni raccolte (Tab. XIII-3 1 622 m³) permetterebbe di soddisfare l'intero fabbisogno annuale (Tab. XIII-3 1 327 m³). Quest'approccio non fa caso della non-concomitanza quotidiana tra il fabbisogno in acqua e il livello di acqua meteorica accumulata nella vasca e disponibile.

Il diagramma del fabbisogno e della precipitazione settimanale per settimana ci indica un fabbisogno molto più importante concentrato in qualche momento e un volume raccolto superiore al fabbisogno collocato in qualche altro momento. La vasca di accumulo deve essere dimensionata per garantire delle prestazioni ottime malgrado questa non-concomitanza.

Fig. XIII-4

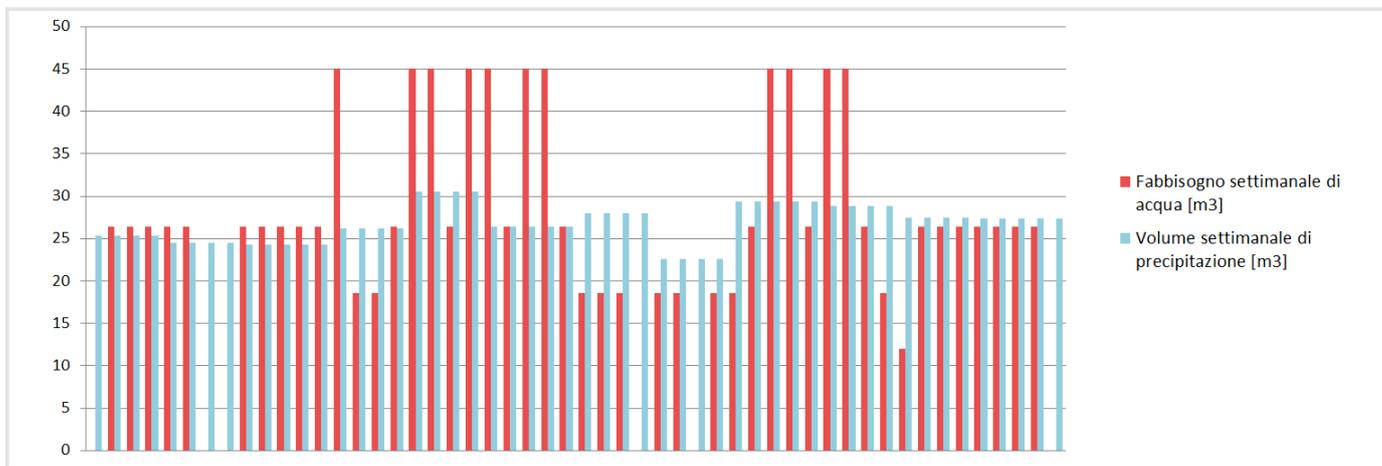


Fig. XIII-4 Fabbisogno e volume raccolto per settimana [m³/settimana]

4. SIMULAZIONE QUOTIDIANA

Una simulazione quotidiana permette di valutare il volume necessario della vasca di accumulo. Fig. XIII-5

Il calcolo si basa sulle seguenti ipotesi :

- un evento piovoso ogni 7 giornate
- 800 persone nella scuola. L'impatto dei fabbisogni degli alloggi e del CIO viene trascurato.
- 1800 m² di zona verde disponibile per l'irrigazione
- la vasca è considerata piena all'inizio dell'anno (ipotesi confermata con il livello della vasca alla fine dell'anno)
- il volume della vasca è stato preso successivamente pari a 50 m³, 75 m³, 100 m³ e 150 m³.

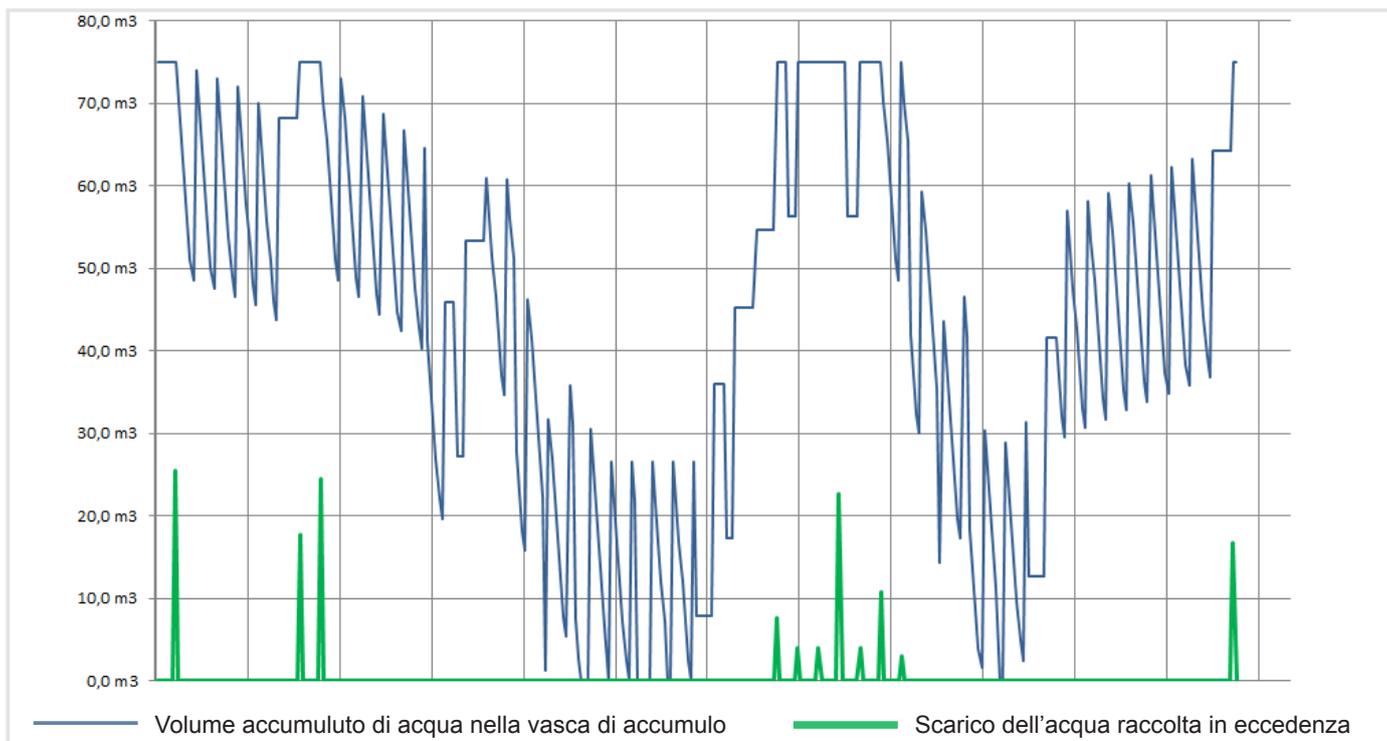


Fig. XIII-5 Simulazione con una vasca di accumulo di 75 m³ : Volume di acqua piovana raccolta nella vasca e scarico dell'acqua raccolta in eccedenza [m³]

| Volume della vasca | Scarico dell'acqua in eccedenza [m ³] | Fabbisogno in acqua potabile addizionale per soddisfare il fabbisogno [m ³] | Autonomia : soddisfazione del fabbisogno annuale |
|--------------------|---|---|--|
| 50 m ³ | 190 | 125 | 91 % |
| 75 m ³ | 140 | 75 | 94 % |
| 100 m ³ | 100 | 36 | 97 % |
| 150 m ³ | 68 | 0 | 100 % |

Tab. XIII-4 Comportamento secondo diversi i volume di vasca

L'obiettivo del riutilizzo dell'acqua piovana non è la totale autonomia dell'edificio, ma una riduzione dell'impatto ambientale dell'edificio. Questa simulazione non prende in considerazione il carattere aleatorio e imprevedibile intrinseco alle previsioni degli eventi meteorologici. Il sistema deve, in ogni caso, integrare un adduzione di acqua potabile per soddisfare il fabbisogno.

Infine si sceglierà una vasca di 75 m³ (costituita da 2 vasche in calcestruzzo di 8m x 2,5 m x 2,5 m). Verrà collocata nella zona Nord. Ci permetterà di usare l'acqua piovana per il 94% degli usi.



Fig. XIII-6 esempio di messa in opera di vasche di accumulo in cls

C. PREVENZIONE DELLE ALLUVIONI

1. REQUISITI

Il rigetto nella rete per le acque reflue delle acque meteoriche è costretto ad una limitazione della sua portata uguale a 10L/sec/ettaro. Il volume di precipitazione (e quindi il volume di accumulo da prevedere per limitare il rigetto) può essere caratterizzato dalla frequenza della ricorrenza di un evento piovoso. I dati meteorologici del dipartimento di Seine-Saint-Denis indicano un livello di precipitazione di 25mm in un ora per un evento normale di frequenza mensile, 30mm in un ora per un evento raro di frequenza annuale e 38mm in un ora per un evento ancora più eccezionale con una frequenza decennale.

Considerando la portata degli eventi piovosi eccezionali decennali di 38 mm in un ora, è necessaria la realizzazione di dispositivi di accumulo di circa 350 m³/ettaro di portata.

| Tipo di evento piovoso | Precipitazioni | Volume raccolto durante l'evento |
|--------------------------|----------------|----------------------------------|
| Evento piovoso mensile | 25 mm | 381 m ³ |
| Evento piovoso annuale | 30 mm | 458 m ³ |
| Evento piovoso decennale | 38 mm | 583 m ³ |

Tab. XIII-5 Volume da raccogliere ed accumulare per i diversi tipi di eventi piovosi

Per il nostro progetto è necessario prevedere un impianto che potrà raccogliere un volume di 583 m³ di acqua.

2. STRATEGIA DI GESTIONE DELL'ACCUMULO DELLE ACQUE METEORICHE

La gestione delle acque meteoriche segue una strategia riassunta nei seguenti punti :

- Privilegiare le opere all'aperto : la loro complessità di messa in opera è controbilanciata dalla loro semplificata manutenzione e dalla loro qualità paesaggistica
- Diminuire l'impermeabilizzazione per così abbassare il volume da accumulare
- Usare tetti verdi per un accumulo temporaneo
- Risanare le acque inquinate con dispositivi naturali
- Creare delle superfici multifunzionali per l'accumulo : il campo sportivo è progettato per essere allagato se necessario.
- Accumulare in superficie tramite l'uso di sistemi integrati al progetto paesaggistico.

3. TRATTAMENTO DELLE SUPERFICI

Le diverse superfici del complesso scolastico sono progettate per essere permeabili e poter accumulare l'acqua piovana temporaneamente. Così l'accumulo temporaneo consente di spostare il momento del rigetto delle acque di circa 2 - 3 ore.

- Le diverse aree verdi dei cortili sono permeabili con un infiltrazione diretta dell'acqua che viene subito recuperata grazie un sistema di drenaggio e poi accumulata per finalmente essere rigettata.
- L'uso di tetti verdi estensivi (2 900 m² ca.) consente un accumulo temporaneo delle acque con un sistema di drenaggio apposito per gli eventi mensili di pioggia. Una portata di 25 mm permette di accumulare 74 m³. Non è sufficiente per ritenere totalmente l'acqua di un evento piovoso mensile.
- La parte pavimentata della zona al Nord per l'accesso dei vigili del fuoco, consente un infiltrazione diffusa grazie all'uso di una pavimentazione buccata e quindi permeabile. Fig. XIII-7



Fig. XIII-7 Esempio di pavimentazione permeabile (zona Nord)

4. ZONA VERDE DI RITENZIONE AL NORD

La parte Nord del progetto (2900 m²) accoglie un ampio giardino paesaggistico dedicato alla gestione degli eventi piovosi maggiori. Esso è composto di una parte verde (1 100 m²) centrale circondata dalle vie di accesso dei vigili del fuoco, vie rivestite con una pavimentazione permeabile semi-verde.

Questa zona può essere vista dalle piazze della scuola e dalle aule scolastiche orientate a nord, ma non è accessibile al personale della scuola, salvo i vigili del fuoco in caso d'intervento e le situazioni di emergenza. S'integrerà nello prossimo sviluppo immobiliare della particella collocata subito a Nord del progetto.

La porzione verde (1 100 m²) accoglie dei fossati erbosi e paesaggistici in debole pendenza. Fig. XIII-8. Essi permettono di ricevere e di contenere l'acqua piovana dell'intero complesso quando gli altri dispositivi hanno giunto il loro massimo livello di accumulo. L'acqua è lentamente rigettata nella rete comunale durante le 24 o 48 ore dopo l'evento piovoso grazie ad un sistema meccanico che regola la portata di rigetto. Il riempimento dei fossati deve essere eccezionale per salvaguardare le diverse piantagioni inserite nel loro paesaggio. Con un riempimento di 20 cm, questa zona permette di accumulare 180 m³.



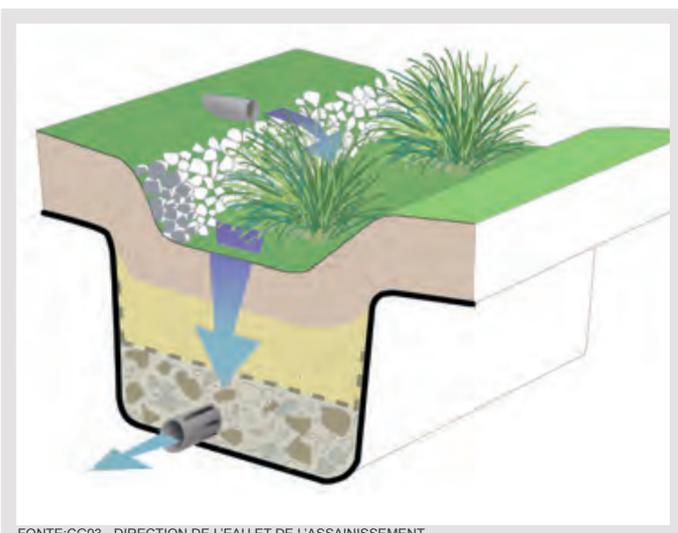
Fig. XIII-8 Esempio di fossato di ritenzione, Collège des Cheneuvreux, Nanterre

A questi fossati è accoppiato una zona di risanamento delle acque raccolte sulla via di accesso al parcheggio interrato. E un filtro naturale a sabbia. Il dispositivo permette di effettuare una decantazione e una filtrazione naturale per togliere le diverse particelle inquinante (idrocarburi) prima di rigettare le acque nella rete comunale. *Fig. XIII-9 e Fig. XIII-10*



FONTE:CG93 - DIRECTION DE L'EAU ET DE L'ASSAINISSEMENT

Fig. XIII-9 Esempio di trattamento superficiale di una zona di filtrazione delle acque inquinate (parcheggio de l'île Saint-Denis)



FONTE:CG93 - DIRECTION DE L'EAU ET DE L'ASSAINISSEMENT

Fig. XIII-10 Stratigrafia di un filtro di risanamento a sabbia

5. ZONA AD ALLAGAMENTO PROGETTATO

La qualità paesaggistica del giardino di ritenzione a nord non consente l'uso ricorrente dei fossati piantati per ritenere l'acqua piovana. Le diverse piante non resisterebbero ad un allagamento di frequenza mensile: non deve essere uno stagno. E' necessario quindi prevedere un sistema supplementare per gestire gli eventi mensili

Si prevede di poter allagare il campo sportivo con un altezza massima di 5 cm di acqua. Quest'allagamento non danneggia il rivestimento del campo sportivo. Ma permette anche di richiamare l'esistenza di un sistema di gestione delle acque piovane per ogni evento piovoso maggiore ai studenti e soprattutto ai gestori della scuola.

Per ridurre la durata e la frequenza dell'allagamento, il sistema prevede una vasca di accumulo interrata sotto il campo sportivo. Con una capacità di 400 m³ (20m x 40m x 0,5 m), questa vasca permette di ritenere l'acqua di un evento piovoso mensile (381 m³) ma non di un evento annuale (458 m³). Questo implica un allagamento di 58 m³ del campo sportivo, cioè su un'altezza di

3,5 cm. Questa acqua verrà velocemente dispersa nell'impianto dopo la fine dell'evento piovoso, garantendo un terreno sportivo praticabile soltanto dopo qualche ora.

6. SINTESI DELLA GESTIONE DELL'ACCUMULO DELLE ACQUE PIOVANE

a. evento piovoso mensile (381 m³ da accumulare)

La vasca interrata sotto il campo gioco si riempie parzialmente

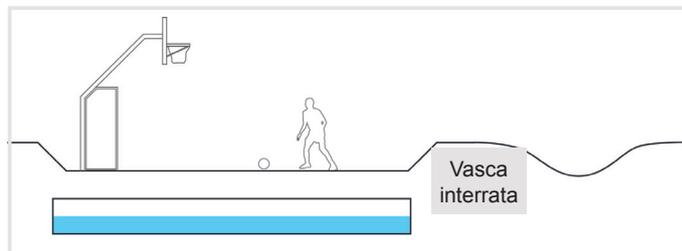


Fig. XIII-11 In caso di una pioggia di frequenza mensile

b. Evento piovoso annuale (458 m³ da accumulare)

La vasca interrata sotto il campo gioco si riempie totalmente (400 m³)

Il campo sportivo è allagato con 3,5 cm (58 m³)

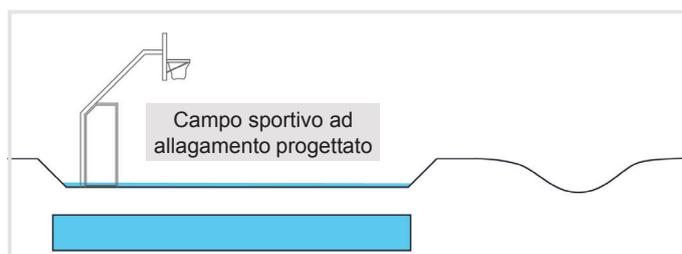


Fig. XIII-12 In caso di pioggia di frequenza annuale

c. Evento piovoso decennale (583 m³ da accumulare)

la vasca interrata sotto il campo gioco si riempie totalmente (400 m³)

il campo sportivo è allagato con 3,5 cm (58 m³)

la zona piantata al Nord è riempita (125 m³)

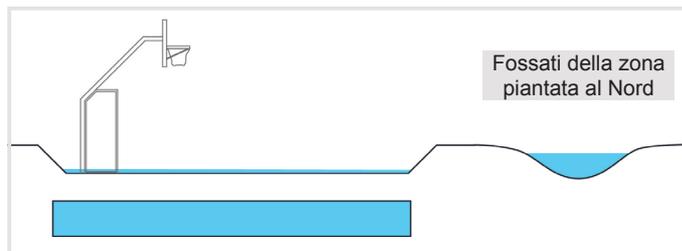
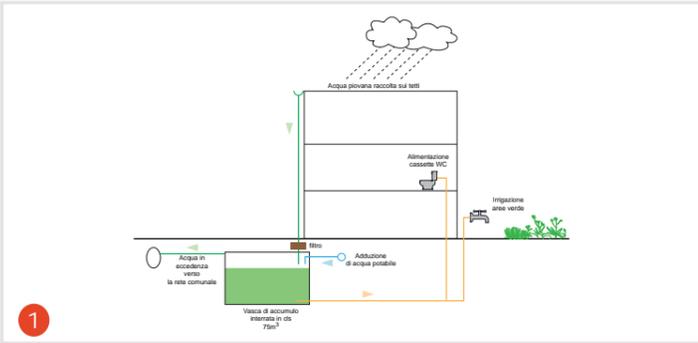
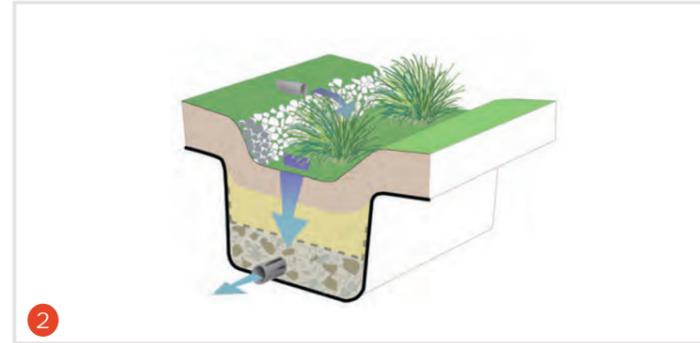


Fig. XIII-13 In caso di pioggia di frequenza decennale



VASCA DI ACCUMULO PER IL RIUTILIZZO DELLE ACQUE PIOVANE
RIUTILIZZO DELLE ACQUE PIOVANE



RISANAMENTO DELLE ACQUE CON UN FILTRA NATURALE A SABBIA
RISANAMENTO DELLE ACQUE CON UN FILTRA NATURALE A SABBIA



RISANAMENTO DELLE ACQUE CON UN FILTRA NATURALE A SABBIA
ZONA VERDE DI ACCUMULO AL NORD



LEGENDA



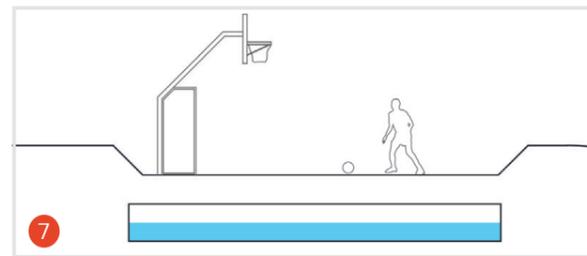
TETTI VERDI PER UN ACCUMULO TEMPORANEO



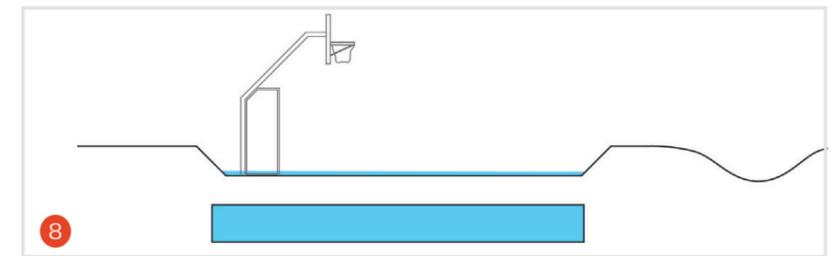
PAVIMENTAZIONE PERMEABILE



AREE VERDE : INFILTRAZIONE DIRETTA



VASCA DI ACCUMULO TEMPORANEO INTERRATA (400M³)



CAMPO SPORTIVO PROGETTATO PER UN ALLAGAMENTO ANNUALE

TRATTAMENTO PERMEABILE DELLE SUPERFICIE

ZONA AD ALLAGAMENTO PROGETTATO

SINTESI

