

**ALMA MATER STUDIORUM**  
**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BOLOGNA**

---

**FACOLTÀ DI INGEGNERIA**  
**CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA CIVILE**  
**D.A.P.T. DIPARTIMENTO DI ARCHITETTURA E PIANIFICAZIONE TERRITORIALE**

**PROTOTIPO DI EDIFICIO AD USO**  
**TEMPORANEO IN ALLUMINIO**

**TESI DI LAUREA IN**  
**Architettura tecnica**

Presentata da:  
**ANTONIO ERBIVENDOLO**

Relatore:  
**Chiar.mo Prof. Ing.**  
**LUCA GUARDIGLI**

*Sessione III*

---

*Anno Accademico 2009/2010*

---

# Indice

|   |         |
|---|---------|
| <b>Indice</b>   | pag. 1  |
| <b>Prefazione</b>   | pag. 3  |
| <b>1. Alluminio: caratteristiche, tecniche di produzione e utilizzo nelle costruzioni</b> |         |
| <b>1.1. Introduzione</b>  | pag. 5  |
| <b>1.2. Proprietà del materiale</b>   | pag. 6  |
| <b>1.3. Tecniche di produzione dell'alluminio</b>   | pag. 11 |
| 1.3.1. Processo Bayer   | pag. 12 |
| 1.3.2. Processo Hall-Heroult  | pag. 14 |
| 1.3.3. Bilancio quantitativo ed energetico  | pag. 16 |
| <b>1.4. Formatura del materiale</b>   | pag. 18 |
| 1.4.1. Laminazione  | pag. 18 |
| 1.4.2. Estrusione   | pag. 19 |
| 1.4.3. Cicli termici  | pag. 21 |
| <b>1.5. Utilizzo dell'alluminio nelle costruzioni</b>                                     | pag. 22 |
| <b>2. Concezione del modulo abitativo e scelte progettuali</b>                            |         |
| <b>2.1. Caratteristiche principali</b>  | pag. 31 |
| <b>2.2. Concezione del modulo abitativo</b>   | pag. 34 |
| <b>2.3. Scelte tecnologiche</b>   | pag. 35 |
| 2.3.1. Costruzioni stratificate a secco   | pag. 36 |
| <b>2.4. Decisioni progettuali</b>   | pag. 39 |
| <b>2.5. Risultato</b>   | pag. 47 |
| <b>3. Modellazione agli elementi finiti e verifiche strutturali</b>                       |         |
| <b>3.1. Introduzione</b>  | pag. 51 |
| <b>3.2. Creazione del modello strutturale</b>   | pag. 51 |

---

|   |              |
|---|--------------|
| <b>3.3. Attribuzione dei carichi al modello</b>         | pag. 54      |
| <b>3.4. Analisi statica lineare</b>                     | pag. 57      |
| <b>3.5. Verifiche degli elementi strutturali</b>        | pag. 63      |
| 3.5.1. Analisi dei carichi                              | pag. 65      |
| 3.5.2. Stati limite di esercizio                        | pag. 67      |
| 3.5.3. Stati limite ultimi (membrature)                 | pag. 75      |
| 3.5.3.1. Resistenza delle travi                         | pag. 81      |
| 3.5.3.2. Resistenza dei pilastri                        | pag. 99      |
| 3.5.4. Verifiche dei collegamenti                       | pag. 106     |
| 3.5.4.1. Telaio direzione x                             | pag. 110     |
| 3.5.4.2. Telaio direzione z                             | pag. 118     |
| 3.5.4.3. Collegamento trave secondaria-trave principale | pag. 123     |
| <br><b>Allegato</b>                                     | <br>pag. 125 |
| <br><b>Bibliografia</b>                                 | <br>pag. 139 |
| <br><b>Tavole</b>                                       | <br>pag. 143 |



## Capitolo 1

# Alluminio: caratteristiche, tecniche di produzione e utilizzo nelle costruzioni

### 1.1 Introduzione

L'alluminio è il terzo elemento più diffuso sulla crosta terrestre, essa ne contiene infatti l'8%; sebbene sia così abbondante risulta essere molto difficile trovarlo in forma libera, bensì lo si trova come componente comune a molti minerali, combinato con il silicio e l'ossigeno. In particolare l'alluminio si trova nella bauxite sotto forma di ossido di alluminio.

La bauxite contiene anche titanio, silicio e ossidi di ferro che gli conferiscono la colorazione rossa; si può osservare che la bauxite è l'unico minerale da cui l'alluminio può essere estratto in modo economico, ma perché sia commercialmente sfruttabile questa deve contenere almeno il 40% di ossido di alluminio. I giacimenti di bauxite sono localizzati al 90% nei Paesi della fascia tropicale e subtropicale, difatti l'Australia, attualmente, è in grado di coprire il 30% della produzione mondiale di alluminio. In Europa la bauxite viene estratta in Grecia, Ungheria, Francia e Jugoslavia; i giacimenti attuali, senza contare quelli che continuamente vengono scoperti, possono sopperire al fabbisogno per molti secoli.

L'alluminio era una volta considerato un metallo prezioso, con un valore superiore a quello dell'oro, a causa della difficoltà che si riscontrava nella separazione dell'alluminio stesso dalle altre rocce di cui faceva parte. Gli antichi greci e romani usavano l'allume che era prodotto dalla lavorazione della alunite, un solfato d'alluminio che si trova in natura. L'allume era fondamentale nell'industria tessile come fissatore per colori, per le stampe su pergamena, per la concia delle pelli, la produzione del vetro e, come emostatico, per curare le ferite. Nel 1761 Guyton de Morveau propose di chiamare l'alluminio base, allumina. Il metallo fu identificato per la prima volta da H.Davy, nell'allume  $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ , però non riuscì ad isolarlo, propose pertanto il nome

aluminium (dal Latino *alumen*, *alum*, sale amaro), poi modificato in aluminium, quindi in alluminio. Il primo scienziato ad isolare, in forma impura, il metallo fu H. C. Ørsted sfruttando la reazione tra l'amalgama di potassio ed  $\text{AlCl}_3$ ; Friedrich Wöhler è generalmente accreditato per aver isolato l'alluminio in forma massiva, nel 1827, migliorando il metodo di Ørsted. Henri Sainte-Claire Deville introdusse il metodo di riduzione diretta del metallo, per via elettrolitica a partire da  $\text{NaAlCl}_4$  fuso, processo studiato in modo indipendente pure da Bunsen. L'invenzione del processo Hall-Heroult nel 1886, ovvero elettrolisi di allumina disciolta in criolite  $\text{NaAlF}_4$ , rese economica l'estrazione dell'alluminio dai minerali, ed è comunemente in uso in tutto il mondo.

## 1.2 Proprietà del materiale

L'alluminio è stato chiamato “metallo magico” per le sue notevoli proprietà, sia come elemento sia sottoforma di lega; è un metallo leggero (con un aspetto grigio argento a causa del leggero strato di ossidazione che si forma rapidamente quando è esposto all'aria e che previene la corrosione in quanto non solubile), resistente e igienico, difatti l'alluminio e le sue leghe possono essere lavorati, formati, estrusi e riciclati. L'alluminio ha un peso specifico di circa un terzo dell'acciaio, o del rame; è malleabile, duttile e può essere lavorato facilmente; ha una eccellente resistenza alla corrosione e durata. Inoltre non è magnetico, non fa scintille, non è combustibile, non è tossico ed è il secondo metallo per malleabilità e sesto per duttilità. L'alluminio e le sue leghe possono essere lavorati, formati, estrusi e riciclati; possono anche essere pitturati, rivestiti, anodizzati o lasciati allo stato naturale.<sup>1</sup>

Le proprietà salienti dell'alluminio sono:

- Leggerezza
- Resistenza
- Resistenza alla corrosione
- Conducibilità
- Lavorabilità

---

<sup>1</sup> Le informazioni sintetiche che seguono sulle caratteristiche e sulle tecniche di produzione dell'alluminio, sono tratte da: sito web Metra SpA

- Alto potere riflettente
- Ininfiammabile
- Riciclabilità
- Eco logicità

### **LEGGEREZZA:**

l'alluminio è un metallo estremamente leggero: il suo peso specifico equivale a  $2,7 \frac{g}{cm^3}$  cioè solo un terzo rispetto a quello dell'acciaio.

### **RESISTENZA:**

la resistenza dell'alluminio può essere ottimizzata con l'aggiunta di piccole quantità di altri metalli che contribuiscono a migliorarne le caratteristiche meccaniche; particolari tipi di leghe possono rendere la resistenza dell'alluminio simile a quella dell'acciaio.

### **RESISTENZA ALLA CORROSIONE:**

il rivestimento naturale dell'alluminio, dovuto all'ossido che rende il metallo inerte, rappresenta una protezione agli attacchi dell'aria, del calore, dell'umidità e di alcuni aggressivi chimici. Anche se rimosso, questo rivestimento di ossido di alluminio si riforma molto rapidamente. La resistenza alla corrosione dell'alluminio può migliorare mediante l'utilizzo di rivestimenti (coating), per esempio con l'anodizzazione metallica o non metallica. I diversi fenomeni della corrosione che possono recare danni all'alluminio si classificano in:

- *corrosione galvanica (effetto pila)* : due materiali, chimicamente differenti, uniti e messi in contatto con una soluzione conduttrice, possono dar luogo all'effetto pila. I danni maggiori si hanno quando si verifica l'unione fra due metalli per la debole resistenza elettrica dovuta alla breve distanza che la corrente deve percorrere. L'accoppiamento fra l'alluminio e il rame o l'ottone, aumenta le capacità di attacco corrosivo in atmosfere normali o in ambiente umido, mentre il contatto tra alluminio e acciaio inossidabile dà luogo alla corrosione del primo in ambienti secchi. L'isolamento di un metallo rispetto a un altro è un modo

semplice per evitare la corrosione bimetallica, si può ad esempio interporre un materiale isolante come il neoprene.

- *corrosione dovuta alla fessurazione* : fessure sottili possono dar luogo a un fenomeno di corrosione intenso e localizzato, che va dalle semplici fessurazioni puntiformi al deterioramento di tutta la superficie. Le cause di queste fessurazioni possono essere la geometria della struttura, l'attrito tra metallo e parti solide non metalliche, la presenza di depositi di polvere, sporcizia o sabbia. Una ventilazione non continua ha un ruolo importante ma non assoluto per quel che riguarda la progressione di questo tipo di corrosione; si tratta infatti di un fenomeno complesso nel corso del quale si forma dell'acido all'interno delle crepe.
- *corrosione intergranulare* : è un attacco locale che si sviluppa lungo i bordi dei grani del materiale; questo meccanismo elettrochimico dipende dalla formazione di "cellule" sulla superficie dei grani metallici durante la seconda fase della precipitazione. Il grado di sensibilità di una lega verso la corrosione intergranulare dipende dalla sua microstruttura, dunque dal suo processo produttivo e dal trattamento termico a cui è sottoposta.
- *corrosione esfoliante* : è un attacco specifico e mirato che si sviluppa lungo i vari stretti passaggi fra le superfici esterne dei grani metallici e corre parallelamente alla superficie del metallo. Questo tipo di corrosione è associato a una direzione prevalente della struttura dei grani: scaglie e parti intere del rivestimento si separano dalla superficie senza che vengano applicate forze dall'esterno. Se la struttura granulare è isotropa, la corrosione esfoliante non si manifesta.
- *corrosione filiforme* : filamenti bianchi non ramificati, più antiestetici che dannosi per la struttura e la resistenza del metallo, vanno a occupare la superficie del metallo non protetto o si formano sotto lo strato di rivestimento. Questo tipo di corrosione può arrivare addirittura a perforare i fogli sottili in lega d'alluminio e ad attaccare le lastre sottili (come quelle che si usano nelle costruzioni aeronautiche), con una conseguente minore resistenza agli altri tipi di corrosione.

### *CONDUCIBILITA'*:

l'alluminio possiede un'ottima conducibilità elettrica e termica, a parità di peso la sua conducibilità è quasi doppia rispetto al rame. In una struttura in alluminio sottoposta a incendio, l'elevata conducibilità del materiale permette al calore di trasferirsi più



rapidamente da una zona più a rischio a un'altra, difatti questo risulta essere un espediente per ridurre al massimo le temperature nelle zone maggiormente sollecitate delle strutture, in maniera da aumentare la durata della resistenza della struttura stessa e la conseguente evacuazione.

#### *LAVORABILITA':*

la possibilità di usufruire di leghe che ne esaltano e completano le caratteristiche meccaniche fa utilizzare ampiamente l'alluminio nelle più svariate applicazioni.

#### *ALTO POTERE RIFLETTENTE:*

l'alluminio riflette in modo ottimale la luce visibile, l'irraggiamento termico e le onde elettromagnetiche, inoltre è anche un buon conduttore termico; queste caratteristiche unite alla leggerezza lo rendono particolarmente adatto nel settore dell'illuminazione.

#### *ININFIAMMABILITA':*

l'alluminio non brucia e fonde quando raggiunge la temperatura di 660 °C (valore che si raggiunge solo quando un incendio è pienamente sviluppato), temperatura di fusione ben più elevata di quella di collasso di altri materiali lignei; la sua conducibilità termica è all'incirca quattro volte maggiore dell'acciaio. Questo significa che il calore si disperde più rapidamente e che, di conseguenza, ci vuole una maggiore quantità di calore per portare una massa di alluminio a una data temperatura rispetto a quello che è richiesto da una uguale massa d'acciaio.

#### *RICICLABILITA':*

la rifusione dell'alluminio richiede una modesta quantità d'energia; nel processo di riciclaggio è sufficiente il 5% dell'energia utilizzata originariamente per la produzione del metallo primario con perdite di materiale inferiori al 3%. La riciclabilità risulta essere una delle qualità più importanti dell'alluminio. I prodotti per le costruzioni in alluminio sono, una volta smontati, riutilizzabili e infinitamente riciclabili senza che si verifichino scadimenti di qualità e delle proprietà di base del materiale. L'utilizzo dell'alluminio riciclato comporta importanti risparmi in termini energetici e inoltre, la sua leggerezza, fa sì che non solo venga utilizzata poca energia durante la lavorazione, il trasporto e la

manutenzione, ma anche che si ottenga una costruzione più leggera e, in questo modo, si utilizzi una minor quantità di materiale per realizzare le fondazioni.

*ECOLOGICITA'*:

nell'industria dell'alluminio, la produzione di gas che contribuiscono all'effetto serra è dovuta all'utilizzo di combustibili fossili e al processo di elettrolisi. Le quantità emesse di questi gas sono peraltro minime e la loro incidenza sul totale dei gas prodotti dall'uomo non è che l'1% circa. D'altro canto però, il crescente impiego dell'alluminio in settori come quello dei trasporti consente di ridurre di peso gli autoveicoli, limitando l'emissione di gas nell'atmosfera, e l'utilizzo di serramenti in alluminio a taglio termico consentono un notevole risparmio energetico.

Sono riassunte le caratteristiche fisiche e meccaniche dell'alluminio nella Tab.1:

| <b>CARTA DI IDENTITA' DELL'ALLUMINIO 99,99 A 20 °C</b> |  |
|--|--|
| Simbolo  | <b>Al</b>                                    |
| Numero atomico   | <b>13</b>                                    |
| Massa atomica  | <b>27 gmol<sup>-1</sup></b>                  |
| Temperatura di fusione                                 | <b>660 °C</b>                                |
| Temperatura di ebollizione                             | <b>2500 °C</b>                               |
| Densità  | <b>2,70</b>                                  |
| Resistività elettrica                                  | <b>26,6 nΩ·m</b>                             |
| Conducibilità termica                                  | <b>235 W·m<sup>-1</sup>· K<sup>-1</sup></b>  |
| Capacità termica della massa                           | <b>900 J Kg<sup>-1</sup>· K<sup>-1</sup></b> |
| Sistema cristallino                                    | <b>Cubico a facce centrate</b>               |
| Coefficiente di dilatazione                            | <b>0,000024 · K<sup>-1</sup></b>             |
| Modulo di elasticità                                   | <b>69000 MPa</b>                             |

**Tab.1 - Carta di identità dell'alluminio**

Per quanto riguarda le proprietà chimiche dell'alluminio, queste vengono riportate nella Tab.2:

| <b>Composizione chimica (in percentuale)</b> |                 |                 |            |                 |                 |                 |                 |
|--|-----------------|-----------------|------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| <b>Classificazione</b>                       | 5086            | 5251            | 5454       | 5754            | 6005A           | 6060            | 6161            |
| <b>Denominazione ISOAL</b>                   | AL Mg2          | AL Mg3<br>Mn    | Al Mg3     | Al Si Mg<br>(A) | Al Si Mg        | Al Mg1 Si<br>Cu |                 |
| <b>Si</b>                                    | 0,4             | 0,4             | 0,25       | 0,4             | Da 0,5 a<br>0,9 | Da 0,3 a<br>0,6 | Da 0,4 a<br>0,8 |
| <b>Fe</b>                                    | 0,5             | 0,5             | 0,4        | 0,4             | 0,35            | Da 0,1 a<br>0,3 | 0,7             |
| <b>Cu</b>                                    | 0,1             | 0,15            | 0,1        | 0,1             | 0,3             | 0,1             | 0,15 a 0,4      |
| <b>Mn</b>                                    | Da 0,2 a<br>0,7 | Da 0,1 a<br>0,5 | Da 0,5 a 1 | 0,5             | 0,5             | 0,1             | 0,15            |
| <b>Mg</b>                                    | Da 3,5 a<br>4,5 | Da 1,7 a<br>2,4 | Da 2,4 a 3 | 2,6 a 3,6       | Da 2,6 a<br>3,6 | 0,35 a 0,6      | Da 0,8 a<br>1,2 |
| <b>Cr</b>                                    | 0,05 a<br>0,25  | 0,15            | 0,05 a 0,2 | 0,3             | 0,3             | 0,05            | 0,04 a<br>0,35  |
| <b>Zn</b>                                    | 0,25            | 0,15            | 0,25       | 0,2             | 0,2             | 0,15            | 0,25            |
| <b>Ti</b>                                    | 0,15            | 0,15            | 0,2        | 0,15            | 0,15            | 0,1             | 0,15            |
| <b>Mn+Cr</b>                                 |                 |                 |            | Da 0,1 a<br>0,5 | 0,12 a 0,5      |                 |                 |
| <b>Altri elementi</b>                        | 0,15            | 0,15            | 0,15       | 0,15            | 0,15            | 0,15            | 0,15            |

**Tab.2 – Proprietà chimiche dell'alluminio**

### **1.3 Tecniche di produzione dell'alluminio**

Come anticipato nell'introduzione, l'alluminio non lo si trova mai in natura come metallo, bensì come componente comune a molti minerali, combinato con il silicio e l'ossigeno. La bauxite risulta essere l'unico minerale da cui l'alluminio può essere estratto in modo economico; perché sia commercialmente sfruttabile, questa deve contenere almeno il 40% di ossido di alluminio. Si riporta di seguito in Fig.1 il ciclo di produzione dell'alluminio primario che verrà subito dopo descritto :

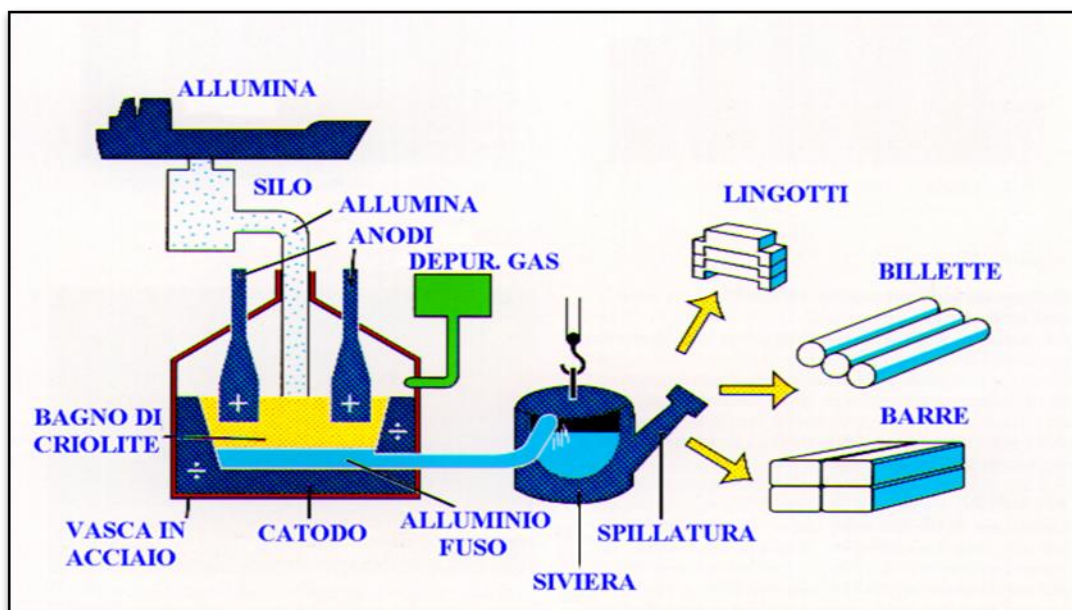


Fig.1 - Ciclo di produzione dell'alluminio primario (da sito Metra SpA)

La bauxite viene estratta principalmente in superficie e trasformata in allumina all'origine; viene poi avviata agli impianti elettrolitici in loco o più generalmente all'estero. Sono necessarie quattro/cinque tonnellate di bauxite per fornire due tonnellate di alluminio. La produzione dell'alluminio dalla bauxite quindi passa attraverso due procedimenti:

- Produzione di allumina  $Al_2O_3$  dalla bauxite (processo Bayer)
- Elettrolisi di allumina fusa in criolite (processo di Hall-Héroult)

### 1.3.1 Processo Bayer

Nell'ambito del processo Bayer, la prima tappa di produzione dell'alluminio consiste nell'estrarre idrossido di alluminio dalla bauxite sotto l'effetto della pressione e della temperatura, con lo scopo di ottenere allumina ( $Al_2O_3$ ) per calcinazione. La bauxite viene lavata e sciolta nella soda caustica (idrossido di sodio) ad alta pressione e ad alta temperatura. Il liquido che ne risulta è ricco di alluminati di sodio e di residui non disciolti di bauxite contenenti ferro, silicio e titanio. Questi residui chiamati "fanghi rossi" si depositano gradualmente sul fondo della vasca e vengono asportati. La soluzione chiara di alluminato di sodio viene pompata all'interno di una vasca molto grande detta "di decomposizione". Particelle fini di alluminio vengono aggiunte per dare

inizio alla precipitazione di particelle di alluminio pure, man mano che il liquido si raffredda. Le particelle precipitate sul fondo della vasca sono asportate e passate attraverso un forno rotante dove, a 1200 °C, l'acqua viene rimossa. Il risultato di queste operazioni è una polvere bianca: l'allumina allo stato puro. La soda caustica viene rimandata indietro all'inizio del procedimento e riutilizzata. Riportiamo allora di seguito in Fig.2 le fasi del processo appena descritto e ne riassumiamo schematicamente i passi:

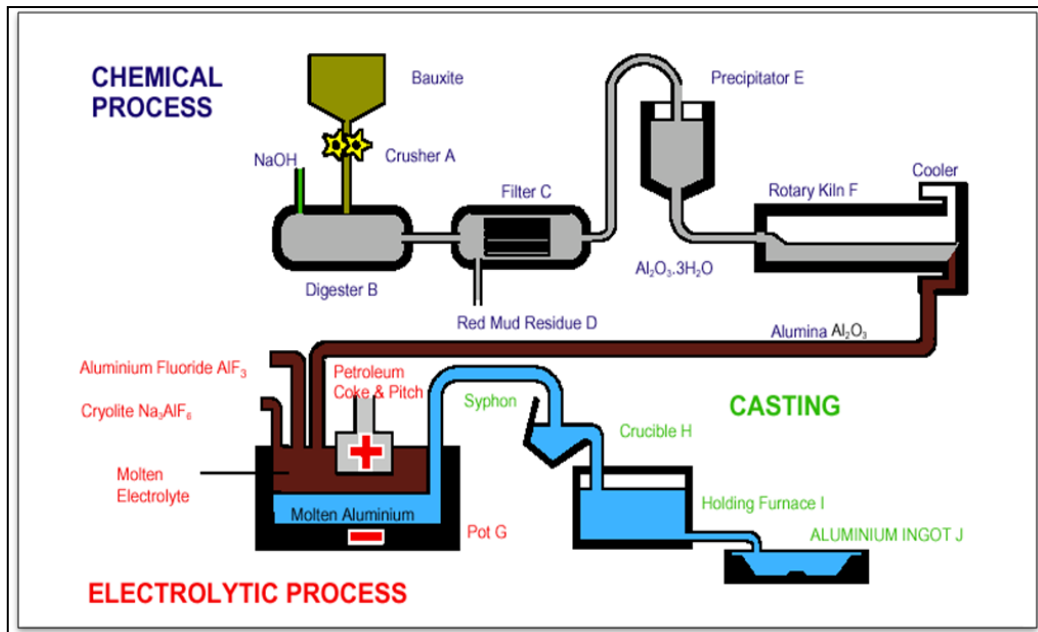


Fig.2 - Processo Bayer (da sito Metra SpA)

- asciugatura del minerale bauxite in corrente di aria calda (cicloni), o in forni rotativi, a seconda del grado di umidità
- frantumazione meccanica in mulini a palle, e polverizzazione a farina di bauxite
- bagno in calce e soda, in autoclavi dette “digestori” a temperatura di 150÷200°C e pressione 15÷20 atm, con trasformazione in alluminato sodico  $NaAlO_2$  in soluzione acquosa
- decantazione degli altri ossidi in sospensione, loro filtrazione e asportazione sotto forma di fanghi rossi
- ulteriore chiarificazione per precipitazione, seguita da filtratura

- idrolisi dell' alluminato sodico, con precipitazione dell' idrossido di alluminio
- separazione dei cristalli di idrossido di alluminio dalla soluzione di soda caustica, per filtrazione bianca
- lavaggio dei cristalli di idrossido di alluminio
- eliminazione dell' acqua per calcinazione in forni rotativi a 1200°C, con trasformazione dell' idrossido in ossido (allumina)

### **1.3.2 Processo Hall-Heroult**

E' un processo elettrochimico per la trasformazione dell' allumina in metallo liquido. La temperatura di fusione dell'allumina è molto elevata (circa 2000 °C); perciò il processo comincia, in un contenitore d'acciaio rivestito di carbonio o di grafite, sciogliendo l'allumina a circa 950 °C, in una soluzione di criolite fusa, un fluoruro naturale di alluminio e sodio, che fonde molto facilmente.

Una corrente continua a basso voltaggio ma ad alta intensità (150000 A) attraversa la soluzione elettrolitica tra un anodo di carbonio, che si consuma durante il processo, composto di carbon coke e di pece, e un catodo permanente formato dal carbonio o dalla grafite spessa che riveste la vasca. Questa corrente ha per effetto la decomposizione della soluzione in alluminio e ossigeno. Durante questa operazione, l'ossigeno si trasferisce verso l'elettrodo di carbonio immerso nella soluzione e si trasforma in ossido e biossido di carbonio.

Di tanto in tanto viene operato un foro, tramite un martello, nella crosta solidificata che si forma sulla superficie della soluzione e viene introdotta altra allumina.

L'alluminio fuso si deposita sul fondo del contenitore e viene aspirato a intervalli regolari; la sua purezza viene generalmente stimata intorno al 99,7 % e oltre; il restante 0,3 % consiste in piccole tracce di ferro, di silicio e di altri elementi presenti nell'allumina, nonché in altri materiali che entrano nel processo produttivo.

L'alluminio liquido viene prelevato tramite un crogiolo e portato in fonderia; viene messo in un forno detto "di mantenimento" ( la cui capacità è di 50 t di metallo ), pulito, continuamente degasato, solidificato e generalmente colato in lingotti a forma di

parallelepipedo o in blocchi più grandi, destinati alla rifusione. Spesso, ma non sempre, l'alluminio "puro" viene mescolato, secondo le specifiche richieste per produrre le leghe, per esempio con ferro, silicio, magnesio, rame, ecc.

Le leghe così ottenute vengono colate in lingotti parallelepipedi, in billette cilindriche destinate all'estrusione o alla forgiatura, o in lamine su nastri trasportatori, secondo il processo semicontinuo che vede il getto raffreddato direttamente.

Questi prodotti vengono diretti verso le presse di estrusione e i laminatoi per la produzione di prodotti semifiniti come i componenti estrusi o forgiati, le lamine, i fogli, i cavi, ecc. Una tecnica alternativa, la colata continua, evita la fase della produzione dei lingotti, portando il metallo fuso direttamente verso forme semifinite; questa tecnica viene specialmente usata per la produzione di lastre, fogli e cavi.

Viene riportata in Fig.3 la cella elettrolitica utilizzata nel processo appena riportato e se ne descrivono di seguito i componenti principali:

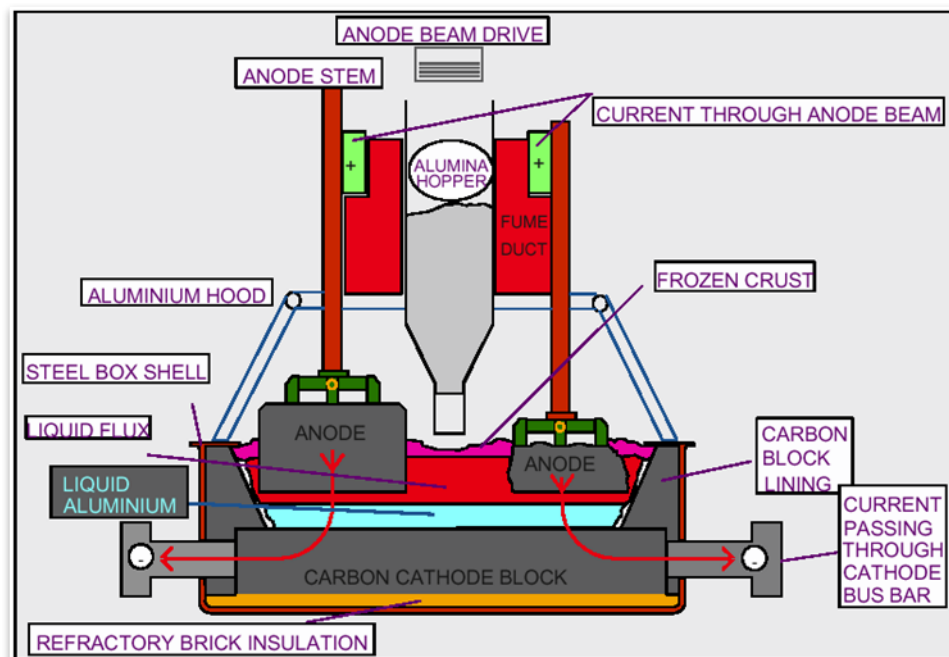


Fig.3 - Processo Hall-Heroult (da sito Metra SpA)

- *steel box shell*: vasca in lamiera di acciaio, isolata elettricamente dal bagno elettrolitico
- *refractory brick insulation*: strato in refrattario termo-isolante

- *carbon cathode block*: costituisce il fondo del bagno, collegato elettricamente con le barre catodiche esterne ( bus bar )
- *carbon block lining*: pareti laterali del bagno, anch' esse in carbone.
- *bagno di alluminio liquido*, a temperatura di circa 950°C
- *liquid flux* :soluzione elettrolitica, composta per il 95 % da sali fusi (criolite 83%, fluoruro di Al 6%, fluoruro di Ca 6%), in cui viene immessa periodicamente la polvere di allumina, nella misura del 5 %
- *anodo*: impasto di carbon coke di petrolio calcinato + coke di pece + catrame di carbon fossile, cotti a 1100÷1300°C
- *frozen crust* : crosta solida formata dall' esposizione all' aria del bagno elettrolitico. Tale crosta viene spezzata periodicamente da un punzone per immettere la polvere di allumina
- *anode stem* : è lo stelo scorrevole verticalmente per consentire la discesa dell' anodo, man mano che si consuma. Esso riceve corrente elettrica dalle barre anodiche e la trasmette all' anodo di carbone.

### 1.3.3 Bilancio quantitativo ed energetico

Una volta descritti i principali processi di produzione dell'alluminio a partire dalla bauxite, risulta importante tener conto del quantitativo di consumo energetico che viene speso per la produzione di questo metallo; si propone un sunto del consumo prendendo come esempio la produzione di 1 kg di alluminio primario:



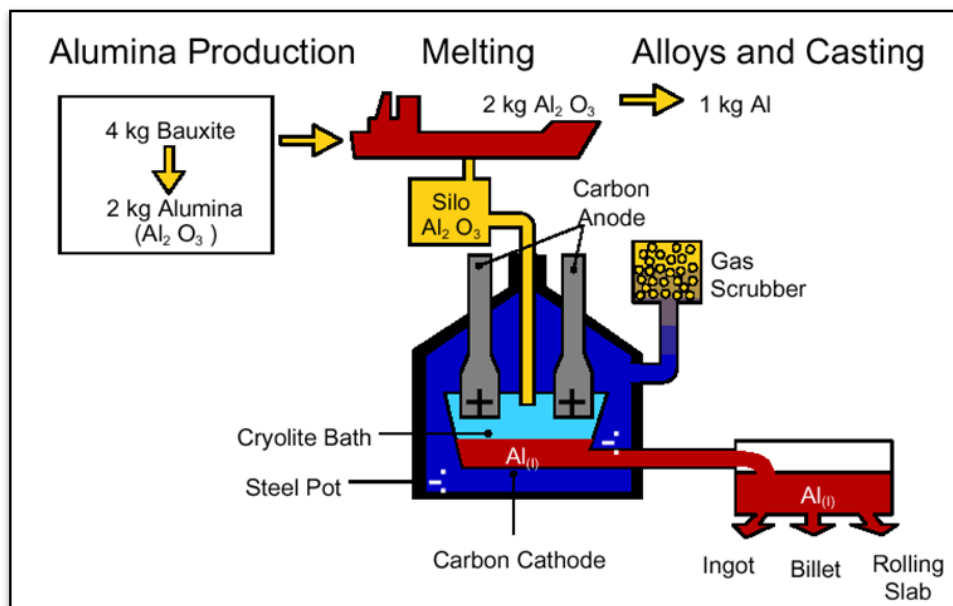


Fig.4 – Bilancio quantitativo (da sito Metra SpA)

Valutazione dei quantitativi di materiali trattati, a partire dall'estrazione della bauxite, per produrre 1 Kg di alluminio primario:

- estrazione di 4 Kg di bauxite ( per minerali particolarmente ricchi di allumina)
- prodotti del processo Bayer: 2 Kg di allumina in polvere calcinata + 2 Kg di fanghi rossi
- consumi e prodotti del processo elettrolitico: 0,5 Kg di Carbonio, con sua trasformazione in anidride  $CO_2$  gassosa

#### *Bilancio energetico*

Valutazione dell'energia combustibile ed elettrica necessaria per produrre 1 Kg di alluminio primario:

- energia meccanica per l'estrazione dalla miniera e il trasporto del minerale: equivalente a 0,45 Kg di gasolio
- energia elettrica richiesta dal processo Hall-Heroult: da 12 a 14 kilowattora

### *Risparmio energetico nel riciclo*

La qualità dell'alluminio non cambia con il riciclaggio. Gli scarti di produzione di primario vengono riciclati direttamente e reimpiegati. Per la rifusione di 1 Kg di alluminio è sufficiente il 5% circa dell'energia usata per la produzione del metallo dalla bauxite.

## **1.4 Formatura del materiale**

Le proprietà descritte nel paragrafo 1.2 consentono di mettere facilmente in forma l'alluminio e le sue leghe con le classiche tecniche delle lavorazioni metalliche: la laminatura, l'estrusione e la colata (o fusione).

### **1.4.1 Laminazione**

La laminazione permette di ottenere lamiere o lastre di alluminio. Uscita dalla prima fusione o dal riciclaggio, la piastra d'alluminio subisce una prima laminatura a caldo e poi una a freddo.

Con la laminazione a caldo, barre di alluminio lunghe dai 4 ai 7 metri con spessori fino a 60 cm, vengono riscaldate e rullate ottenendo nastri con spessori che variano dai 2 ai 6 mm.

Colando alluminio fuso si possono ottenere lamiere dallo spessore di 6 mm; una volta raffreddati i nastri di lamiera vengono rullati ottenendo lo spessore desiderato (laminazione a freddo).

Si riporta lo schema della laminazione in Fig.5:

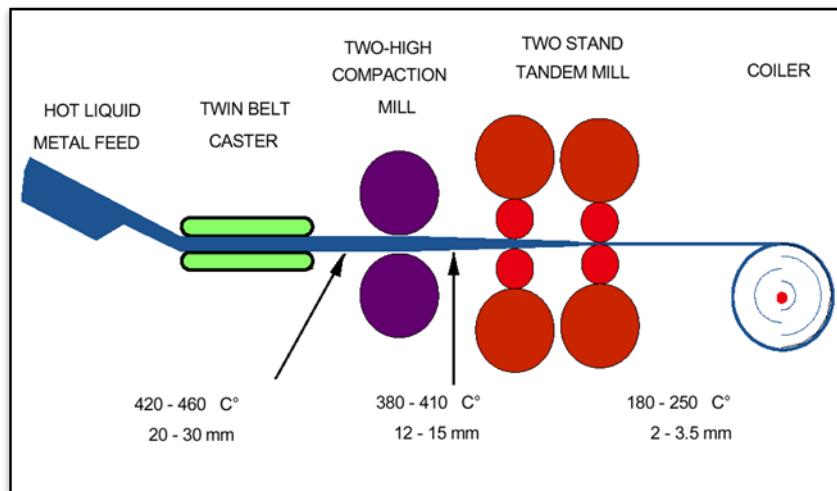


Fig.5-Laminazione (da sito Metra SpA)

## 1.4.2 Estrusione

L'estrusione è un procedimento che porta alla creazione di profilati con sezioni e forme varie, in grado di contribuire efficacemente alla definizione di numerose soluzioni tecniche innovative. Tecnicamente può essere descritta come un processo termomeccanico di deformazione plastica a caldo, in cui la massa metallica costituente la billetta viene portata allo stato pastoso mediante riscaldamento a temperature dell'ordine dei 500 °C, e successivamente sospinta al passaggio forzato attraverso un'apertura sagomata, che imprime la voluta forma geometrica.

Esistono diverse tipologie di estrusione che vengono di seguito riportate:

- *Estrusione diretta:* fra le molteplici tipologie impiantistiche finora adottate nell'industria, l'estrusione diretta è quella più comunemente diffusa. Il termine "diretta" sta a indicare che la spinta della pressa e la velocità d'uscita del profilo sono orientate nello stesso senso, come riportato in Fig.7.

- *Estrusione con foratore o mandrino* (Fig.8): si tratta di una particolare modalità di estrusione diretta, utilizzata nella produzione di tubi, o più in generale di estrusi con cavità disposte secondo una forma regolare e simmetrica. Una prominente, detta

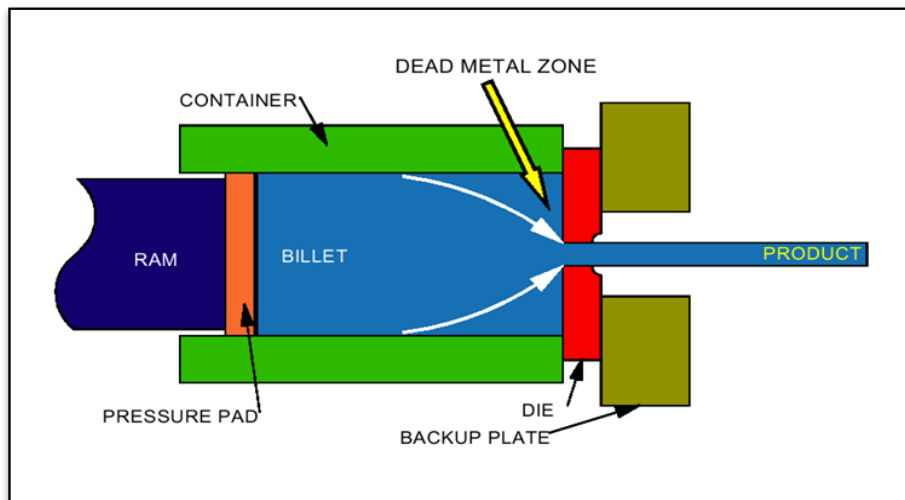


Fig.7 – Estrusione diretta (da sito Metra SpA)

mandrino, sporge in avanti rispetto alla testa pressante principale di una lunghezza pari a quella della billetta. Prima che la testa pressante inizi a spingere, il mandrino attraversa la billetta e si posiziona nella zona della matrice, impegnandone parzialmente il foro di passaggio. Pertanto nella successiva fase di estrusione resta disponibile solo un vano anulare per il flusso del metallo, e per la formazione della cavità.

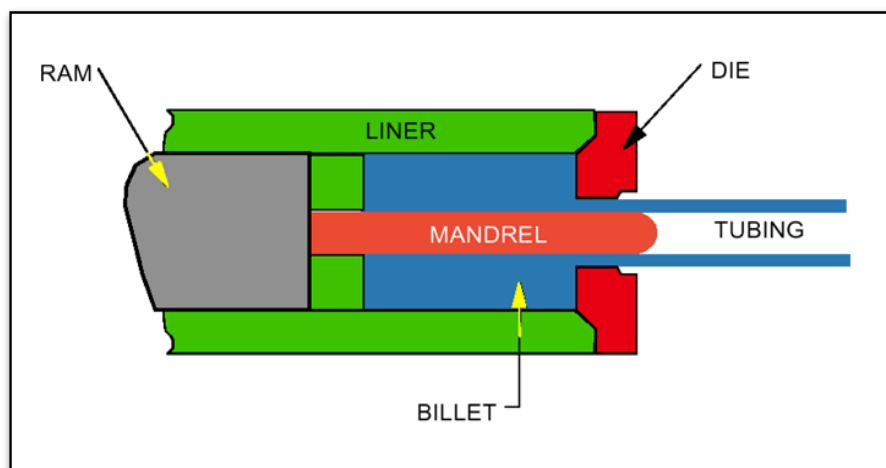


Fig.8 – Estrusione a mandrino (da sito Metra SpA)

- *Estrusione indiretta o inversa*: è un processo finalizzato a ridurre le resistenze meccaniche dissipate per attrito durante lo strisciamento della massa metallica lungo le pareti interne del contenitore. A differenza dell'estrusione diretta, ove la matrice viene tenuta ferma rispetto al contenitore, qui vi è invece movimento relativo tra contenitore e

matrice, mentre la billetta è ferma rispetto al contenitore. Questo modo di funzionare riduce in ampia misura gli strisciamenti del materiale e le conseguenti perdite di potenza dell'impianto.

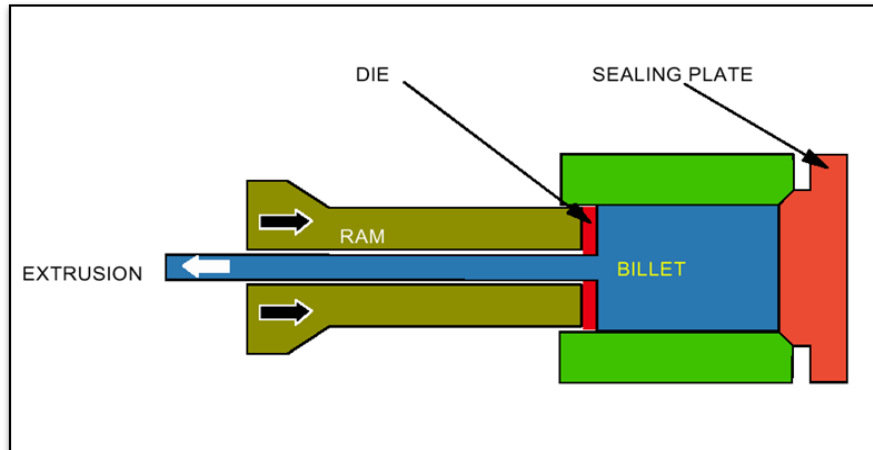


Fig.9 – Estrusione inversa (da sito Metra SpA)

### 1.4.3 Cicli termici

Si vuole concludere questo paragrafo dedicato alla formatura del materiale andando a descrivere brevemente quelli che sono i *cicli termici* del metallo durante questa sua produzione. In Fig.10 si riporta la storia termica del materiale nelle varie fasi del ciclo produttivo:

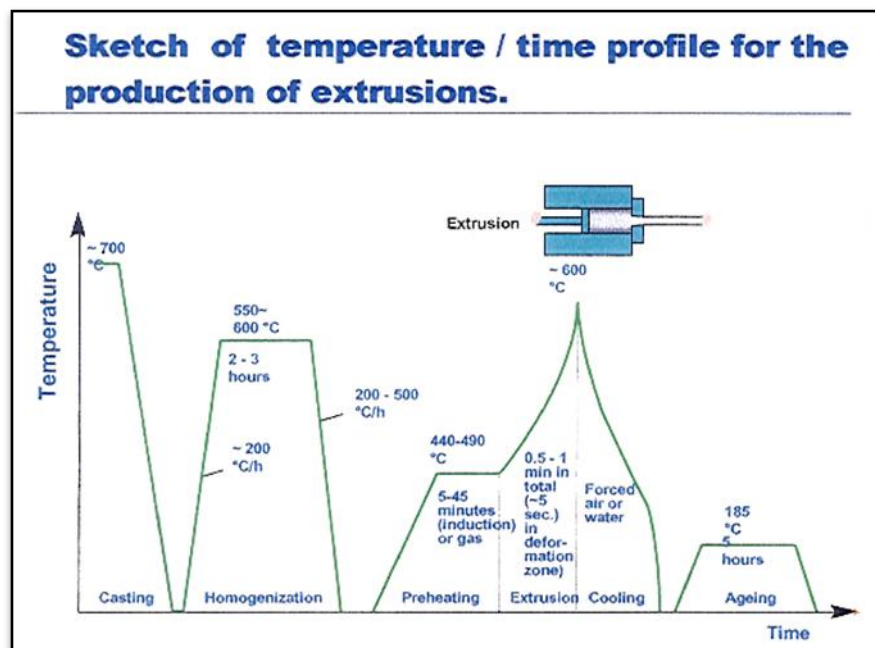


Fig.10 – Cicli termici del materiale (da sito Metra SpA)

- colata del metallo liquido a temperatura di circa 700 °C entro appositi stampi a parete d'acqua per la formazione delle billette
- trattamento di omogeneizzazione allo stato solido delle billette in forno a gas, con salita di 200 °C/ora
- permanenza a 550÷600°C per 2÷3 ore, e successivo raffreddamento lento di 200÷500°C/ora
- trattamento di pre-riscaldamento delle billette a 440÷490°C ottenuto con permanenza minima di 5 minuti, se in forno a induzione, o fino a 45 minuti massimo, se in forno a gas
- trasformazione termo meccanica durante l'estrusione con generazione di calore per attrito interno fino a 600°C di picco
- raffreddamento veloce subito dopo l'estrusione ottenuto con diversi sistemi di tempra (acqua, aria nebulizzata, aria forzata)
- invecchiamento artificiale delle barre estruse, in forno a circolazione di aria calda, per 5÷8 ore a 185°C

## 1.5 Utilizzo dell'alluminio nelle costruzioni

L'alluminio, grazie alle sue particolari proprietà, trova molteplici applicazioni e il suo utilizzo segue un andamento costante di crescita. In particolare l'alluminio viene impiegato nei seguenti campi:

- *alluminio in edilizia*: l'alluminio viene impiegato per la costruzione di serramenti, facciate continue, infissi, porte, finestre, persiane, controfinestre, zanzariere, verande, ringhiere, recinzioni, cancelli, gronde, frangisole, tende da sole, tende veneziane, edilizia prefabbricata, termosifoni e scambiatori di calore, lamiera per controsoffittature, pannelli solari, per coperture ecc;
- *alluminio nei trasporti* (ferroviari, aeronautici ed automobilistici): grazie al suo elevato rapporto resistenza/peso l'alluminio è impiegato per la costruzione di motori, pompe, pistoni, ruote, bielle, mozzi, valvole, cornici e finiture, paraurti, sponde da camion, furgonature, elementi di carrozzeria e radiatori e scambiatori di calore. Il settore dei trasporti è quello a più alta utilizzazione d'alluminio, pari a

circa un terzo di tutto il metallo consumato in Europa. Una delle principali ragioni è che muovere un peso costa energia.

- *alluminio nelle costruzioni meccaniche*: l'alluminio viene utilizzato nella fabbricazione di macchine e nell'impiantistica. Macchine per stampa, macchine tessili, macchine per la lavorazione dei legni, macchine per ufficio e computers, strumentazione scientifica.
- *alluminio in elettronica*: l'alluminio è il principale materiale in competizione con il rame, grazie all'elevata conducibilità elettrica. L'applicazione maggiormente conosciuta è quella delle linee elettriche aeree di distribuzione, quasi tutte in cavi d'alluminio.
- *alluminio nel settore domestico*: l'alluminio viene utilizzato in numerosi prodotti di uso domestico: pentolame, elettrodomestici, scale, cabine doccia, mobilio, apparecchiatura di illuminazione, componenti dell'arredamento, attrezzature per sport e tempo libero.

Sono veramente pochi i settori di applicazione in cui non viene impiegato l'alluminio. L'utilizzo è destinato progressivamente a crescere in quanto le sue proprietà sono particolarmente apprezzate dai progettisti, architetti e ingegneri, dai costruttori e dagli utilizzatori finali del prodotto.

In questa trattazione quello che più ci preme analizzare è il primo tra gli usi precedentemente elencati; il successo dell'alluminio nel settore dell'edilizia (o comunque nel campo dell'architettura) è dovuto ad alcuni vantaggi e ad alcune proprietà specifiche.<sup>2</sup> Questo materiale ha una notevole longevità e richiede una manutenzione molto ridotta; anzi, ha una durata quasi illimitata e la copertura della cupola di San Giocchino (Roma 1897), gli elementi dell'Empire State Building (New York 1935) o la statua di Eros a Piccadilly Circus (Londra 1893) lo testimoniano, essendo ancora oggi in ottimo stato di conservazione. L'alluminio non assorbe umidità, non si gonfia, non marcisce, non si restringe, non si fessura, non si spacca; non richiede alcuna protezione dai raggi ultravioletti, né, come i materiali di natura organica, è soggetto a

---

<sup>2</sup> Per avere un approfondimento sull'utilizzo dell'alluminio nelle costruzioni, vedere: "Atlante dell'alluminio" di Hugues Wilkin, UTET Scienze Tecniche, 2003.



**Fig.11 – Empire State Building (New York,1935)**

invecchiamento. Le leghe impiegate in architettura sfidano il tempo e sono resistenti a fattori ambientali.

L'alluminio nelle costruzioni, eccettuati interventi di pulitura, ha una lunga durata e non richiede manutenzione particolare. Una delle applicazioni dell'alluminio in fogli sottili riguarda la protezione dei materiali da costruzione, fra cui i pannelli per l'isolamento termico.

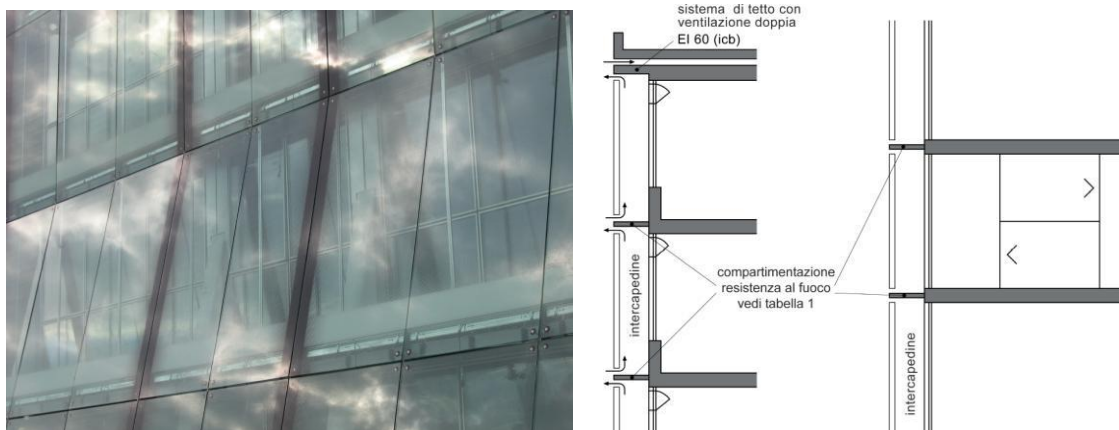
Poiché l'alluminio è impermeabile, la lamina sottile è in grado di fermare l'acqua e impedire l'imbibimento del materiale isolante. Il *pannello monostrato* è l'applicazione più diretta per i fogli d'alluminio; permette di aumentare la resistenza ai fattori atmosferici nelle coperture e nelle tamponature. Può essere utilizzato per rivestire una struttura portante o una tamponatura in cemento armato, in muratura, ecc. e presenta una superficie piana o nervata; quest'ultima è in grado di aumentare la rigidità trasversale.

Il *pannello a doppio strato* è formato da un paramento esterno metallico fissato ad uno interno; questo è agganciato ad una struttura esistente o a una struttura secondaria, che sostiene la facciata e riconduce i carichi alla struttura primaria. I pannelli formati da



lastre generalmente piane, si possono posare, sia direttamente sia tramite una struttura secondaria, sulla struttura portante. I *pannelli sandwich* o *pannelli compositi*, sono elementi chiusi che si compongono di un paramento esterno, di un'anima isolante che può essere, per esempio in schiuma di polietilene espanso, e di un paramento interno. L'isolante contribuisce ad irrigidire il pannello e garantisce le richieste prestazioni termiche. La lunghezza di questi pannelli può arrivare oltre i 15 metri e si possono disporre sia orizzontalmente che verticalmente. L'anima, a volte, è una struttura a nido d'ape in alluminio o in materiale plastico che assicura la perfetta planarità del pannello.

La *facciata a doppia pelle* (Fig.12) è, dal punto di vista progettuale, una facciata interna rivestita esternamente di una pelle di vetro strutturalmente indipendente. Queste due facciate sono separate da una camera d'aria di almeno 15 centimetri di spessore. Gli elementi della vetrata strutturale, la struttura delle intelaiature in facciata, i pannelli opachi e gli elementi del montaggio possono essere in lega di alluminio.



**Fig.12 – Esempio e sezione di facciata a doppia pelle**

Per alcune specifiche di prestazione, il basso rapporto resistenza/peso dell'alluminio (densità  $27 \text{ KN/m}^3$ ) permette di ridurre il peso proprio della struttura. A parità di massa l'alluminio offre una maggiore resistenza e una migliore rigidità rispetto agli altri materiali, a parità di condizioni.

Le leghe di alluminio utilizzate nelle costruzioni hanno un modulo di elasticità di 70000 MPa e un'elevata resistenza a rottura. Il materiale presenta, d'altronde, un comportamento elastoplastico apprezzabile dal momento che la rottura non avviene

brutalmente (non trattandosi di un materiale fragile); qualità questa indispensabile per sistema di sicurezza come i parapetti. Il metallo trova dunque un campo di applicazione privilegiato nella costruzione di strutture sottili e solide, anche di grandi dimensioni come le strutture prefabbricate, le facciate continue, le pannellature di facciata, le vetrate, le finestre, le porte, ecc. in cui viene richiesta la rigidità strutturale: luoghi esposti, edifici di grande altezza, intelaiature di grandi dimensioni, strutture portanti. La rigidità del metallo permette a intelaiature assai sottili, in condizioni normali di impiego, di non deformarsi.

Alcuni sistemi di serramenti e facciate perfettamente isolate rendono possibile una gestione ecologica e compatibile degli edifici. Gli addetti del settore della produzione dell'alluminio, nel campo dei serramenti e delle facciate, hanno indirizzato contemporaneamente la ricerca verso un processo di minimizzazione delle strutture e delle intelaiature coniugandovi la massima trasparenza. Le applicazioni nel campo dei rivestimenti (tamponamenti, coperture, ecc) sfruttano proprio questo basso rapporto peso/resistenza. La leggerezza del materiale riduce i costi di trasporto, facilita la manutenzione e diminuisce il peso proprio dell'involucro. Pannelli del peso di 2-3 kg/m<sup>2</sup> possono essere manovrati a mano senza ricorrere a mezzi pesanti. L'alluminio, combinato o meno con altri materiali come il legno e le plastiche, è utilizzato anche per schermature, giardini d'inverno, rivestimenti per coperture.

Inoltre l'alluminio è in grado di offrire al progettista una grande varietà di applicazioni; come spiegato precedentemente ad esempio, con l'estrusione si può ottenere una grande varietà di profili (Fig.13) cavi e pieni, che combinano le caratteristiche rispondenti all'uso richiesto con tolleranze dell'ordine di qualche centesimo di millimetro. Tutte le forme estruse sono gestibili, dalle forme più generiche dettate da ragioni estetiche (rettangolari, circolari, ovali o di altra sezione) alle forme utilizzate per motivi tecnici (supporti di chiusura, scanalature per giunti, elementi in grado di contrastare i ponti termici, canalette di raccolta delle acque di condensa, supporti di vetrate, ecc.).

Il guadagno in termini tecnici e produttivi nella progettazione delle filiere e nell'estrusione hanno indotto a stabilire a nuovi standard per quel che riguarda l'impermeabilità all'aria e all'acqua. La facilità di estrusione delle leghe d'alluminio permette di utilizzare il materiale unicamente ove è necessario, un ulteriore vantaggio in

rapporto al costo del materiale. Questa adattabilità compensa il fatto che l'alluminio e le sue leghe hanno un modulo di elasticità pari a un terzo di quello dell'acciaio. Aumentando le dimensioni di una trave in alluminio di 1,5 volte, è possibile raggiungere i valori della resistenza propri dell'acciaio con la metà del peso proprio. Allo stesso modo è facile, nel caso dell'alluminio estruso, realizzare sezioni in grado di resistere a torsione, creare aperture per il passaggio di canalizzazione per cavi o di tubazioni per fluidi, o di aggiungere sistemi di aggancio per controsoffittature.

Il costo relativamente contenuto di una filiera di alluminio (1500 euro), il tempo sempre più breve della sua sostituzione sulla pressa apposita e la possibilità di produrre anche piccole quantità di alluminio (alcune centinaia di chilogrammi) permettono di creare profili speciali, anche in progetti relativamente modesti. I pannelli possono essere piatti, curvi o di varia forma secondo le diverse applicazioni richieste dall'involucro dell'edificio (coperture, facciate, ecc). Alcune forme speciali possono essere realizzate in opera con macchinari mobili per la formatura. Alcuni elementi specifici possono essere ottenuti mediante getti di alluminio. L'alluminio può essere segato, forato, inchiodato, piegato, curvato, assemblato e saldato, sia in opera sia fuori opera. L'alluminio può anche essere trattato, come è stato già detto, principalmente mediante anodizzazione o laccatura. L'anodizzazione consiste nel creare sulla superficie uno strato ossido naturale o colorato grazie ad un processo elettrolitico; al numero modesto di colore dei primi tempi (naturale, bronzo o champagne) si sono aggiunti toni più raffinati, a effetto metallico o minerale.



**Fig.13 – Varietà di profili estrusi in alluminio**

Anodizzazioni a effetto dicroico (cambiamento di colore in funzione dell'angolo di incidenza della luce) sono utilizzate in alcuni edifici, specialmente in Giappone. La pittura, normalmente realizzata tramite polverizzazione elettrostatica a cui segue una cottura in forno, può essere applicata puntualmente, elemento per elemento, o in maniera continua su bobine di lastre (coil coating). E' anche molto diffuso il trattamento con lacche di poliestere cotte in forno, in quanto permette di creare una gamma infinita di colori e di effetti materici. L'introduzione di lacche a effetto "grana" o metallizzato lascia intravedere ulteriori sviluppi in questa direzione. Alcuni produttori stanno mettendo a punto ulteriori componenti come i rivestimenti incollati, a base di laminati in legno.

Risulta importante inoltre analizzare le prestazioni termiche che offre questo metallo nell'arco della vita utile di una struttura. In un edificio la dispersione termica è la somma delle dispersioni dovute alla conducibilità termica e alla ventilazione. L'alluminio, come anticipato nei precedenti paragrafi, è un buon conduttore di calore; è dunque necessario ricorrere a diversi dispositivi in grado di contrastare i ponti termici. La notevole stabilità dimensionale degli elementi e soprattutto dei profilati in alluminio (scarsa dilatazione, assenza di distorsioni) assicura un'impermeabilità di lunga durata nei confronti dell'aria, del vento e dell'acqua. Le intelaiature di porte e finestre in alluminio sono infatti costituite da due semiprofilati uniti mediante un isolante termico scelto in base alla sua rigidità, stabilità dimensionale e nel tempo. La superficie interna dell'elemento è termicamente isolata grazie alla superficie esterna: ciò riduce notevolmente la perdita di energia; inoltre, l'aumento della temperatura superficiale interna evita problemi di condensa. I giunti di chiusura assicurano una certa impermeabilità del telaio. Le perdite per conducibilità o ventilazione si spostano, di conseguenza, verso i giunti di raccordo con la struttura primaria. Sono dunque indispensabili un montaggio curato con giunti di raccordo chiusi e permanenti e una struttura primaria senza ponti termici.

I profili in alluminio sono largamente impiegati nella chiusura di facciate ventilate a doppio strato o multistrato. I pannelli di rivestimento di facciate possono presentare una certa debolezza in termini di conducibilità termica nei punti di connessione fra la superficie esterna e gli elementi di supporto interni, sia a causa della inevitabile coesione meccanica sia per un'eccessiva compressione dell'isolante in quei punti. D'altra parte, se

i giunti interni non sono sufficientemente sigillati o non lo sono affatto, l'aria interna, se sotto pressione, penetra all'interno della struttura di facciata e riscalda la faccia interna della superficie esterna. Se, nonostante il riscaldamento, la temperatura della superficie esterna rimane inferiore a quella del punto di rugiada, si verifica la condensa, e notevoli quantità di acqua possono ristagnare all'interno del pannello. Per evitare il rischio di raffreddamento della superficie esterna (provocato da una temperatura superficiale bassa, inferiore a quella dell'aria), con fenomeni di condensa sulla superficie interna, inaccessibile, l'unica soluzione è ricorrere a costruzioni non ventilate, ovvero a tetti caldi. Il sistema a giunti in rilievo costituisce una possibilità, fra le tante, di costruire un tetto caldo in alluminio. I pannelli a U sono montati su ancoraggi di alluminio estruso e fissati, tramite un elemento isolante, sul supporto. Per ottenere intercapedini ben sigillate ed evitare moti convettivi interni, l'isolante è applicato con uno spessore eccessivo, che verrà ricondotto alla dimensione richiesta, grazie alla pressione esercitata dalla posa degli elementi componenti la copertura. I giunti in rilievo sono ribattuti con una macchina: questo fissaggio senza perforazioni esterne garantisce un'impermeabilità ottimale e permette la libera dilatazione della lastra. Gli strati di copertura con funzione di barriera al vapore devono essere fissati con cura per evitare il passaggio del vapore dall'interno verso la copertura, in caso di depressioni esterne generate dall'azione del vento.

## Capitolo 2

# Concezione del modulo abitativo e scelte progettuali

### 2.1 Caratteristiche principali

L'obiettivo concreto di questo lavoro consiste nel promuovere l'uso dell'alluminio attraverso la sperimentazione di un piccolo prototipo abitativo. Si vuole realizzare un modulo abitativo che sia quasi interamente costruito in alluminio in maniera da conferire al modulo uniformità sia in termini estetici che strutturali. In questo progetto perciò si vuole andare ad utilizzare l'alluminio in maniera da perseguire sia l'unità della struttura che delle finiture. Questo avviene andando a combinare le più funzioni dell'alluminio sia come materiale da rivestimento che come elemento estruso con funzione strutturale.

Si sono individuati allora, alcuni punti fondamentali che un modello di abitazione innovativa (del tipo che si vuole progettare) dovrebbe avere per definirsi tale e che si è cercato di conferire al modello in questione.

È bene specificare sin da subito che l'edificio è stato pensato come un archetipo ambientabile e costruibile in paesi sviluppati senza particolare riferimento ad un clima specifico e quindi non legato a condizioni particolari riconducibili ad un dato luogo. Esso vuole essere come un sistema pronto all'uso ed ad ogni evenienza, adatto nello specifico a varie condizioni ambientali e climatiche. Una soluzione già pronta, veloce, adattabile ed efficiente nella maggior parte dei casi. Sicuramente, questo obiettivo è ambizioso e di difficile raggiungimento, ma si è ritenuto importante affrontarlo, per due ragioni principali:

- *il degrado e l'obsolescenza del patrimonio edilizio esistente*: esso richiede infatti grandi interventi di riqualifica ed "aggiornamento" dei vecchi fabbricati; quindi si ha la necessità di strutture efficienti, anche provvisorie che rimpiazzino queste strutture obsolete o che fungano da abitazioni temporanee per gli utenti dei vecchi edifici mentre questi vengono riqualificati;

- *le situazioni di catastrofe*: come ha evidenziato il terremoto dell'Aquila, è necessario avere a disposizione strutture d'emergenza e di accoglienza di qualità con la caratteristica di poter essere adattate ad ogni luogo ed esigenza e, in futuro, essere riqualificate in modo rapido e poco oneroso.

Questo obiettivo ha generato tutta una serie di caratteristiche sulle quali si è basato il progetto.

Prima di tutto si è voluto creare un oggetto, che potesse “evolversi” da uno stato iniziale ad uno finale, in base alla durata della sua vita, alle necessità da soddisfare e al mutare del nucleo utente; la prima caratteristica è quindi quella della “flessibilità nel tempo”.

Le tipologie di abitazione odierne, vengono concepite in maniera statica, pensando solo a ciò che dovranno garantire in un immediato futuro e senza prendere in considerazione che un edificio è un bene che abbia una vita molto lunga, capace di attraversare diverse fasi storiche e diversi cambiamenti, che inevitabilmente, avvengono nel quadro delle esigenze. Il prototipo pensato invece vuole essere una costruzione dinamica, capace di assecondare agevolmente questi cambiamenti e qualora diventi obsoleto, essere dismesso facilmente, con il minimo impatto ambientale e il massimo riciclo di materiali.

Relativamente a questo ultimo aspetto, un ruolo fondamentale è giocato dalle pubbliche amministrazioni e dagli imprenditori; le pubbliche amministrazioni per il loro ruolo normativo: oggi le leggi urbanistiche, forse un po' troppo preoccupate di prevenire danni al tessuto urbano derivanti dall'introduzione di nuove tipologie e basate su indici numerici, non consentono o, per lo meno, rendono molto difficile la progettazione e la proposta di edifici che possano cambiare nel tempo. La maggior parte degli imprenditori, invece, un po' per un fatto culturale, un po' per effetto delle stesse norme urbanistiche, tende a costruire complessi che saturano completamente la capacità edificatoria di un sito, costruendo fino all'ultimo centimetro quadrato, per ottenere immediatamente il massimo profitto.

Sarebbe auspicabile più lungimiranza da entrambe le parti. Si potrebbero pensare a leggi che favoriscano la costruzione di edifici flessibili, in base ad una serie di soluzioni stabilite a priori dal progettista e approvata dalla Pubblica Amministrazione. Si potrebbe consentire la vendita delle zone adibite alle future espansioni secondo un criterio di plusvalore, riservando all'acquirente il diritto di costruire nuovi vani secondo le alternative e i metodi stabiliti in fase progettuale, e consentendo all'imprenditore di

realizzare un utile non solo sul costruito. Il costruttore potrebbe rendersi conto che il valore di un sito non risiede solo nella sua capacità edificatoria ma anche nel modo in cui viene progettato e usato nel corso del tempo. Costruire meno riservandosi di completare la struttura in fasi successive, richiederebbe meno investimenti iniziali, con una conseguente riduzione dei rischi d'impresa. Così come avviene in molti settori del commercio e dell'economia, costruire "a rate" potrebbe rivelarsi vantaggioso.

La possibilità che la struttura accolga nuclei di vario genere come famiglie e gruppi di studenti, che ovviamente fanno dell'ambiente domestico un uso diverso, ha reso indispensabile fornire una flessibilità ed una adattabilità degli ambienti interni, sia dal punto di vista distributivo, sia dal punto di vista degli impianti. Variabili come il numero delle camere o le dotazioni tecnologiche influenzano in maniera forte, le caratteristiche degli spazi interni. In particolare è stata presa in considerazione la variazione nel tempo della distribuzione interna e delle dotazioni tecnologiche, in modo da rendere facilmente aggiornabile il fabbricato.

La personalizzabilità è un altro aspetto che si è voluto conferire al prototipo. Non solo allo scopo di rendere ogni utente capace di riconoscersi nella propria abitazione, ma anche da un punto di vista più tecnico; si è voluto cioè rendere ogni parete personalizzabile, direttamente con optional definiti in sede progettuale, ma anche capace di fornire prestazioni termiche differenti, in base al materiale usato come riempimento, in modo che l'orientamento non sia determinante oltremodo.

Il carattere di soluzione d'emergenza implica inevitabilmente la rapidità di costruzione, inoltre deve essere possibile la rapida modifica di tutto l'impianto dell'edificio per rispondere alle rapide variazioni di esigenze dell'utenza. In sintesi, si è ritenuto opportuno integrare nel progetto la possibilità di variare configurazione con interventi per lo meno "semi-soft".

Ultimo, ma non per importanza, il carattere della sostenibilità, per quanto riguarda tutta la vita del prodotto. Quindi si è cercato di utilizzare materiali e lavorazioni che recassero un danno minimo all'ambiente. Si è pensato ad un metodo costruttivo che rendesse efficiente al massimo l'impiego di risorse ed energia, che consentisse un massimo recupero una volta esaurita la vita utile dell'edificio e che rendesse possibile ripristinare il sito d'installazione allo stato precedente la realizzazione dell'opera.

Nei prossimi paragrafi, si tratterà della traduzione di questi aspetti in scelte



architettoniche compositive e tecnologiche.

## 2.2 Concezione del modulo abitativo

L'idea di fondo è stata quella di creare un prototipo di casa singola unifamiliare che riesca a soddisfare i tre bisogni fondamentali che manifesta l'utenza: privacy e relax, sicurezza e vita sociale, ottimizzazione di spazio e risorse; la soluzione proposta infatti vuole avere una dotazione di verde, spazi accessori e privacy paragonabile con quelle di una abitazione unifamiliare classica. Le caratteristiche descritte nel paragrafo precedente, si sono tradotte in una forte modularità di tutta la struttura. Si è ricercato un modulo standard che potesse assolvere a varie funzioni, da solo o tramite la sua aggregazione. Un ambiente che potesse fare da camera, soggiorno, cucina, ma anche da serra o luogo comune per le attività di più persone.

Questo oggetto si è risolto in un vano quadrato di 3,60x3,60 m (misure riferite agli assi delle pareti), che è stato trattato come una specie modulo base su cui è basata tutta la composizione e da cui si è anche sfruttato un sottomodulo di 3,60x1,80 m (misure riferite agli assi delle pareti). Il passo successivo è stato quello di saturare la volumetria costruibile di un ipotetico lotto, con l'aggregazione di tanti moduli organizzati secondo una griglia tridimensionale di organizzazione degli spazi, modulare e flessibile. In base ai bisogni di chi inizierà a vivere nella struttura, si eliminano i moduli in eccesso partendo dall'alto, fino ad ottenere un corpo composto dagli spazi chiusi strettamente necessari e da altri già predisposti per l'evoluzione della costruzione.

In questo modo si è definita la tipologia di alloggio variabile per caratteristiche e dimensione, che può poi essere ampliata, nelle varie fasi di vita dell'edificio, aggiungendo di nuovo i moduli o viceversa.

L'edificio in esame è stato costruito a partire dall'aggregazione di quattro moduli standard che contengono cucina, soggiorno, e servizi igienici. A questo blocco possono poi venire aggiunti altri vani accessori secondo i bisogni. In particolare è stata fatta la scelta di tenere vicini i locali della cucina e del bagno, in modo da avere una sola parete tecnica contenente gli impianti principali.

Al fine di avere un basso impatto sul sito, non sono previsti garage interrati. Essi saranno

costituiti da moduli separati a seconda delle richieste degli acquirenti e alla configurazione della zona di costruzione.

## 2.3 Scelte tecnologiche

La decisione di garantire una rapida ed efficiente realizzazione, un'efficiente dismissione, e un'ottima modularità al nostro prototipo, ha condizionato in modo importante le scelte tecnologiche legate soprattutto alla struttura ed al metodo costruttivo.

I sistemi tradizionali si distinguono per la realizzazione in opera della maggior parte delle lavorazioni che le rende soggette a molte imperfezioni dovute, in primo luogo, alle condizioni in cui si lavora in cantiere, in secondo luogo, le maestranze non sono sempre qualificate, in particolare, per conferire quel carattere di modularità che poi consente l'espansione, l'intercambiabilità e la variazione degli elementi e degli assetti. I tempi di realizzazione sono lunghi a causa della realizzazione delle opere accessorie funzionali alla costruzione, come casseri gabbie d'armatura e ponteggi, per non parlare poi dei tempi minimi necessari al disarmo del calcestruzzo che rendono la tempistica quasi obbligata. È difficile quantificare in modo esatto le quantità di materie prime (calcestruzzo, ferro, ecc.) necessarie, anche a causa dell'imprecisione delle lavorazioni a cui si è già accennato e che spesso richiedono correzioni in corso d'opera, con i conseguenti consumi imprevedibili di materiali e risorse. Questo ultimo aspetto porta a una produzione eccessiva di rifiuti e ad un consumo non efficiente di risorse ed energie. La struttura realizzata risulta poi "pesante", "poco agile" e poco adatta ad essere cambiata nel tempo. Travi e pilastri, per non parlare delle pareti portanti sono elementi impossibili da modificare in assetto e configurazione, se non attraverso interventi che comportano ingenti spese a carico dell'utente. Le pareti esterne e gli elementi divisorii interni risultano avere caratteristiche molto diverse che ne impediscono l'intercambiabilità: una parete inizialmente progettata come interna non potrà mai sopperire, ad esempio alla richiesta di isolamento termico o di resistenza strutturale come sicuramente è in grado di fare una parete esterna, salvo opere di modifica onerose. Questo ultimo problema potrebbe essere risolto dando le stesse caratteristiche a tutte le pareti, ma si otterrebbero spessori eccessivi, con un grande spreco di spazio. La variazione degli assetti distributivi è anche ostacolata

dall'installazione degli impianti, che devono essere installati con appositi scassi o tagliole, oppure posti in vani attrezzati che sono difficili da spostare e da portare in nuovi punti della casa a secondo delle esigenze.

Il prodotto finale è un complesso molto pesante da richiedere opere di fondazione importanti, come ad esempio platee e pali, che non consentono quell'approccio soft con il sito per consentirne l'eventuale ripristino, che è uno dei punti chiave a base del progetto.

Inoltre la dismissione di un oggetto realizzato con tecnologie e metodi standard è difficile ed inefficace, soprattutto a causa del grande numero di elementi incollati tra loro e che proprio per questo risultano non riutilizzabili. Lo smontaggio dei vari componenti è reso impossibile dal carattere di monoliticità che risulta avere tutta la struttura.

Di contro a questi difetti, c'è da dire che l'edificio in cemento armato e tamponamenti in laterizio è sicuramente sicuro dal punto di vista strutturale e del pericolo d'incendi. Esso attraverso l'aggiunta di piccoli aggiustamenti, come un isolamento a cappotto esterno, è in grado di raggiungere condizioni di isolamento e inerzia termica elevate.

L'obiettivo è stato quello di trovare un metodo costruttivo e una struttura che colmasse le mancanze della tradizione, mantenendone i pregi.

L'attenzione è stata subito rivolta alle metodologie di costruzione stratificate a secco.

### **2.3.1 Costruzioni stratificate a secco**

Soprattutto nei paesi del Nord America e del Nord Europa, il settore immobiliare, nella sua frangia più avanzata, si sta oggi indirizzando sempre più verso nuovi metodi costruttivi, prediligendo tra tutti il sistema costruttivo a secco. Si tratta di una scelta epocale, che rivoluzionerà il modo di concepire l'azione stessa del costruire, coinvolgendo l'intera filiera dell'edilizia: dal legislatore, al progettista, dal produttore al costruttore.

Si continua illustrando le principali innovazioni e caratteristiche di questo sistema.

Innanzitutto il sistema costruttivo a secco si contrappone alle tecniche costruttive tradizionali che impiegano leganti, come malte, cementi, colle, poiché le strutture vengono assemblate meccanicamente in cantiere in base a strati funzionali. Questo metodo presuppone che tutti i componenti da assemblare vengano direttamente forniti,

secondo progetto esecutivo, da fabbriche specializzate e siano quindi, una volta confluiti in cantiere, già collaudati e dotati di certificazione. Il cantiere diventa quindi il luogo dell'assemblaggio dei componenti di alta qualità, in cui operai specializzati compongono quello che è un sistema meccanico, tutto realizzato a priori dal progettista.



**Fig.14 – Differenza tra cantiere tradizionale (a sinistra) e cantiere di una costruzione stratificata a secco (a destra)**

Uno dei vantaggi delle costruzioni a secco è la mancanza del vincolo al laterocemento. Il progettista in questo caso è libero di scegliere tra molti materiali costruttivi, individuando di volta in volta l'elemento che gli consente le prestazioni volute. Se il calcestruzzo per esempio è conveniente per fondamenta e pilastri, l'acciaio o l'alluminio possono essere principalmente impiegati per le connessioni e, assieme al legno, sono indicati per le parti prefabbricate.

Il sistema a secco si fonda sulla prefabbricazione (almeno parziale) e, in quanto tale, presuppone che i componenti vengano fabbricati tutti a priori con precisione e controllo dei tempi. Questo consente di avere una previsione, impossibile con tecnologie standard, sui tempi e sui costi di realizzazione. La prefabbricazione consente inoltre di ottenere i singoli componenti completi di impianti e rivestimenti.

Una volta realizzato il progetto e sviluppato il progetto esecutivo, viene lanciata la

produzione di tutte le parti necessarie che possono essere costruite contemporaneamente, ottimizzando i tempi di consegna in cantiere. Questo consente il montaggio della costruzione completa in tempi ridottissimi, vantaggio che viene amplificato peraltro dalla mancanza delle fasi di asciugatura e maturazione proprie del conglomerato cementizio armato.

Attraverso questo metodo, è possibile inoltre rispondere con flessibilità alle esigenze estetiche dei progettisti, poiché è per definizione versatile e pensato per rispondere alle differenti necessità compositive.

I metodi costruttivi a secco favoriscono il risparmio energetico. Si tratta, infatti, di sistemi avanzati già predisposti sia per quanto riguarda l'isolamento termico e acustico, sia per quanto riguarda l'impiantistica, ad ottimizzare i consumi energetici e a produrre energia da fonti rinnovabili. In somma si tratta di un sistema che pensa al comfort di chi abiterà la casa e ai suoi consumi.

Questo sistema di costruire si sta affermando sempre di più anche nel nostro paese e il suo successo è dovuto a più fattori.

Innanzitutto, oggi il committente richiede in maniera crescente la puntualità dei tempi di consegna dell'edificio e il rispetto dei costi di produzione, e ciò non sarebbe possibile con gli altri sistemi costruttivi. Inoltre la difficoltà a reperire manodopera nelle tecniche costruttive tradizionali, sposta l'interesse su nuove soluzioni, più snelle, immediate e controllabili. L'aumento delle installazioni impiantistiche e la conseguente necessità di trovare metodi per semplificare la manutenzione o la riparazione, richiede la costruzione di sistemi flessibili, facilmente ispezionabili.

A tutto ciò si aggiunge l'alto grado di sostenibilità di questi edifici, poiché i consumi energetici sono calcolabili e controllabili in ogni fase della loro vita: dalla nascita dei suoi componenti, all'assemblaggio, dalla gestione dell'edificio, alla sua demolizione. Tutto questo senza rinunciare agli stili dell'architettura contemporanea. Esistono però alcuni punti fondamentali che devono essere rispettati nella costruzione a secco:

- *assemblabilità*: i componenti devono essere maneggevoli e collegabili con facilità e devono essere assemblati anche in previsione della loro smontabilità e del loro riutilizzo;
- *flessibilità*: i componenti devono consentire anche modifiche in fase d'esercizio, come per esempio il cambiamento della distribuzione degli spazi interni di un ufficio;

- *reversibilità*: vi deve essere la possibilità di dismissione di un'opera tenendo presente l'eventuale possibilità di riuso, riciclo o smaltimento delle parti, per poi consentire un uso ridotto delle materie prime per la produzione di nuovi componenti.

Per le considerazioni appena fatte, il sistema costruttivo a secco è sembrato la soluzione migliore per ottenere quegli obiettivi che stanno alla base del progetto.

## 2.4 Decisioni progettuali

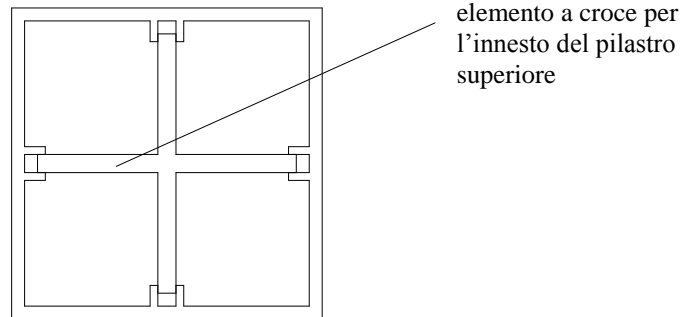
Il passo successivo è stato quello di passare alla definizione delle decisioni progettuali da adottare nel prototipo.

Si è deciso di utilizzare l'alluminio per tutti i componenti della struttura e per gli elementi di facciata, andando così ad annullare le differenze tra elemento strutturale, tamponatura e dettaglio costruttivo. L'obiettivo che si vuole perseguire, architettonicamente parlando, è quello di ottenere una "costruzione globale". Per far questo si è deciso difatti di realizzare i montanti, le porte e le finestre completamente integrati nello spessore della struttura stessa. Si evita di percepire in questa maniera la dominanza della struttura sugli elementi di finitura e di arredo conferendo all'ambiente una sensazione di totale armonia.

Come accennato nel capitolo precedente, sezioni complesse in alluminio sono facilmente estraibili, anche con grande precisione; questo approccio altamente tecnologico porta incontestabilmente la progettazione verso una concezione dell'edificio assimilabile a quella del prodotto industriale. Proprio a questo scopo si è deciso di definire quelli che sono i componenti principali (sia strutturali, che non strutturali ma solo di completamento) del nostro prototipo come elementi prefabbricati, in maniera da poter avere l'opportunità di renderli producibili in serie. In questo modo si vuole far sì che i componenti vengano prodotti in toto negli stabilimenti adibiti e successivamente trasportati in cantiere con il solo compito, da parte della manodopera, di essere assemblati nella maniera più facile e veloce possibile.

Riportiamo allora di seguito gli elementi in alluminio che sono stati scelti e pensati proprio al fine di realizzare questo prototipo di edificio:

- **Pilastri cavi a sezione quadrata 120x120x5 mm**



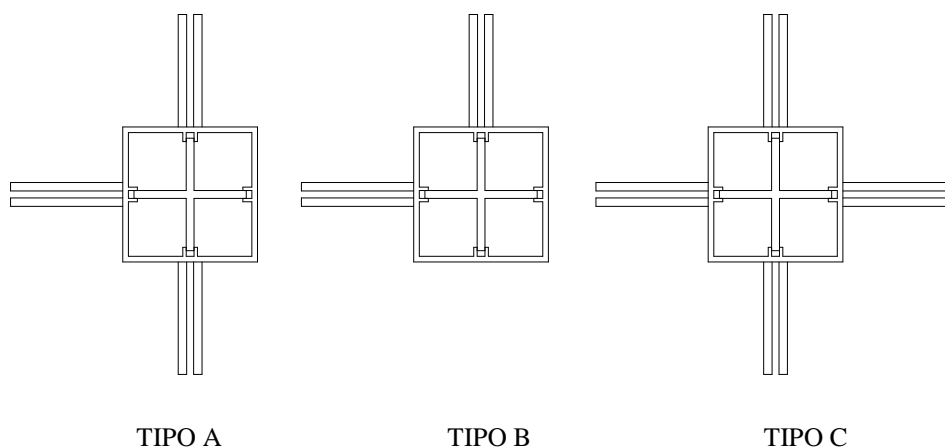
**Fig.15 – Sezione pilastro**

Questa tipologia di componente è stata scelta allo scopo di poter rendere il pilastro non solo elemento strutturale, ma anche montante delle intelaiature di porte e finestre; l'estrusione difatti permette di realizzare in un unico pezzo sia il pilastro che il telaio della finestra. La cosa che rende questa tipologia di elemento molto utile risiede anche negli interstizi che sono presenti all'interno del profilato estruso che consentono per l'appunto il passaggio, ad esempio, di alcuni cavi o comunque componenti utili per l'installazione degli impianti. Si è deciso inoltre di posizionare internamente al pilastro un elemento a croce (opportunamente fissato) che fungesse da innesto per il pilastro superiore in maniera da rendere immediato il montaggio dei due elementi in cantiere (Fig.15).

La struttura sarà costituita da 15 pilastri per piano; nel nostro caso, essendo due i piani, verranno utilizzati 30 pilastri. Il modulo base di 3,60x3,60 m sarà realizzato con l'uso di 6 pilastri, mentre il modulo completo del nostro prototipo che, come anticipato nel paragrafo precedente, consta di 4 moduli base accostati l'uno all'altro fino a formare una pianta quadrata di 7,2x7,2 m (misure riferite all'asse dei pilastri) sarà ottenuto per l'appunto mediante l'uso dei 15 pilastri.

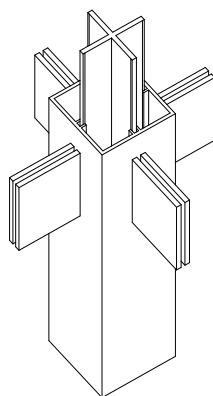
Ovviamente avremo diverse tipologie di pilastro in funzione del posizionamento in pianta dello stesso; difatti disporremo di 4 pilastri TIPO B (dotati di squadrette opportunamente saldate e dimensionate, disposte su due lati adiacenti del pilastro stesso per il collegamento con le travi), 8 pilastri TIPO A (dotati di squadrette disposte su tre dei quattro lati del pilastro, per il collegamento con le travi) e 3 pilastri TIPO C (dotati di

squadrette disposte su tutti i lati del pilastro per il collegamento con le travi. Il tutto risulta essere illustrato nella figura seguente:



**Fig.16 – Diverse tipologie di pilastri utilizzati**

L'altezza dei pilastri sarà di 2,7 metri, il che li rende tranquillamente trasportabili con i classici mezzi di trasporto e anche facilmente assemblabili in cantiere; i due piani del prototipo porteranno quindi ad un'altezza massima di 5,5 metri.



**Fig.16b – Pilastro TIPO C in vista**

- **Profilati estrusi di completamento non portanti in alluminio**

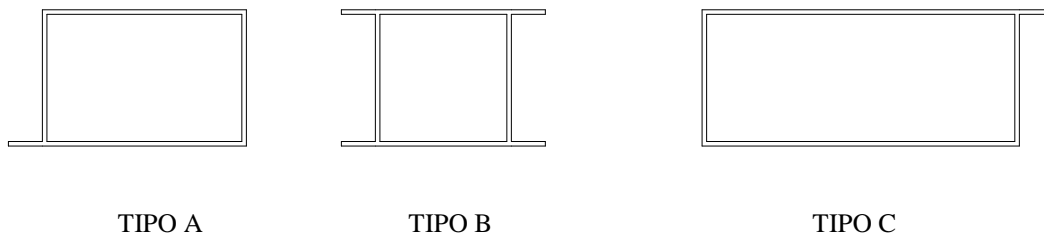
Volendo realizzare elementi producibili in serie, e quindi di grandezze e dimensioni ben definite, risulta necessario pensare anche alla presenza di elementi che fungano da completamento a quelle parti di edificio (tamponamenti esterni, pareti divisorie interne,



ecc.) che, variando di disposizione e accostamento da caso a caso in funzione delle necessità del progettista, necessitano di elementi in più per il loro collegamento ottimale in opera.

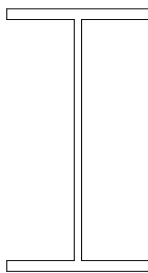
Naturalmente questi elementi sono dei componenti che non risultano adibiti a compiti di natura portante, per cui non necessariamente provvederanno a scaricare a terra i carichi della struttura. Proprio per questo motivo, questi elementi sono stati anch'essi pensati come profilati estrusi a sezioni cave (e quindi molto leggeri) alleggeriti ulteriormente riducendo lo spessore della sezione; dai 5 mm dei pilastri portanti si è passati ai 4 mm di questi componenti.

Per l'esecuzione ottimale della nostra casetta unifamiliare è stato necessario l'utilizzo di: 5 elementi per il piano terra e 6 elementi per il primo piano del TIPO A (sezione: 120x180x4 mm); 4 elementi per il piano terra e 5 elementi per il primo piano del TIPO B (sezione: 120x120x4 mm); 1 elemento per il piano terra e 1 elemento per il primo piano del TIPO C (sezione: 120x280x4 mm).



**Fig.17 – Diverse tipologie di profili estrusi di completamento utilizzati**

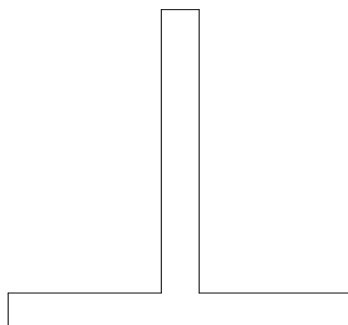
- **Trave profilo ipe 240 (240x120x9,8x6,2 mm)**



**Fig.18 – Sezione trave principale ipe 240**

La travatura principale del modulo viene realizzata mediante l'utilizzo di travi aventi come sezione il classico profilo ipe utilizzato per le strutture in acciaio; come verificato nel capitolo successivo, è stato necessario utilizzare una sezione del tipo "ipe 240" per ottenere risultato positivo in tutte le verifiche effettuate. Le travi assumono due lunghezze differenti, 3,60 e 1,80 metri; le travi di lunghezza minore vengono utilizzate come travi perimetrali disposte ortogonalmente alle travi di lunghezza maggiore e anche come collegamento tra le pilastrate centrali. Le travi di 3,6 metri presentano squadrette saldate ogni 60 centimetri su tutta la loro lunghezza allo scopo di poter collegare in maniera diretta i travetti secondari alle travi principali stesse; in questa maniera si riesce anche ad evitare che queste travi di luce discreta si instabilizzino nel piano del solaio.

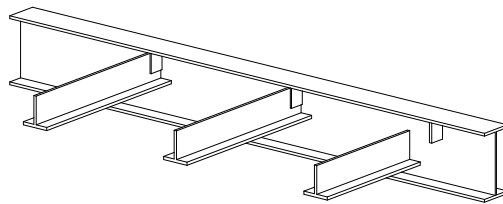
- **Trave secondaria a T spigolo vivo 100x100x11 mm**



**Fig.19 – Sezione trave secondaria a T spigolo vivo**

Vengono disposti questi travetti secondari a 60 centimetri di distanza l'uno dall'altro; essi fungono in realtà da nervatura alla piastra in alluminio che deve venire opportunamente saldata subito sopra ai travetti stessi. Per velocizzare al massimo l'assemblaggio di questi elementi alle travature principali si è deciso di saldare delle squadrette sulle travi principali a distanza per l'appunto di 60 centimetri l'una dall'altra, cui di conseguenza vanno a innestarsi e a collegarsi mediante bullonatura i travetti stessi.

Questi elementi ovviamente contribuiscono a conferire il carico ricevuto dal solaio alle travi principali.



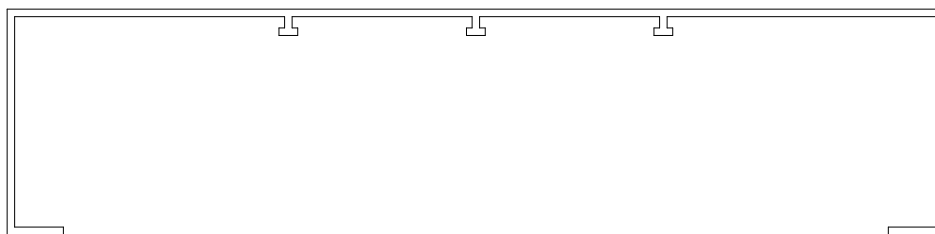
**Fig.20 – Innessi dei travetti nella trave principale**

- **Elemento di pannellatura nervato**

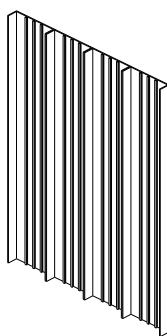
Si è pensato all'utilizzo di pannelli di chiusura in alluminio, estrusi, che riprendono una forma a U curvata alle estremità. Questi moduli da 500 mm presentano anche tre T all'interno, estruse con il profilo stesso, che servono ad irrigidire l'elemento che pur non essendo portante potrebbe comunque risentire di parte del carico essendo comunque posizionato subito al di sotto delle travi principali.

Questi pannelli svolgeranno sia funzione di tamponatura esterna che di parete divisoria interna, in maniera da avere un unico elemento riutilizzabile in diverse circostanze e quindi pronto all'uso in caso di redistribuzione degli ambienti interni, o aggiunta di moduli esterni per l'ampliamento dell'edificio. I pannelli che vengono utilizzati come pareti esterne verranno spruzzati con vernice a base di uretano con funzione di isolante

termico. I giunti tra i diversi pannelli sono realizzati mediante membrane in gomma; internamente questi pannelli saranno dotati di una superficie in legno o comunque in cartongesso che potrà essere lasciata a vista, o da dipingere.



**Fig.21 – Sezione elemento di pannellatura (500x4 mm)**



**Fig.22 – Elementi di pannellatura affiancati a formare una parte di parete**

Una volta definiti gli elementi principali utilizzati nella realizzazione del prototipo; è possibile passare ad elencare brevemente quelle che sono le fasi principali di costruzione o comunque di montaggio dell'edificio stesso.

L'aspetto molto positivo del prototipo pensato risiede nel fatto che, da un punto di vista lavorativo, il processo di assemblaggio delle diverse parti è del tutto simile alle lavorazioni standard degli edifici in acciaio; inoltre, i collegamenti tra i diversi componenti prima elencati sono del tutto privi di materiale destinato a consolidarsi dopo la posa, quindi si utilizzano esclusivamente tecniche di giunzione a secco. I dispositivi metallici di fissaggio meccanico utilizzati non sono altro che unioni bullonate; da questo si deduce che non c'è assolutamente nessuna nuova tecnica da imparare e nessuna nuova

attrezzatura da acquistare. Il montaggio dei moduli vuole essere del tutto simile a quello di una classica strutturina a telaio in acciaio; tant'è vero che i componenti portanti dell'edificio non sono altro che la trave ipe e i pilastri a sezione cava.

E' possibile allora distinguere quattro fasi principali necessarie alla realizzazione dell'edificio:

- FASE 1: si getta una platea in cemento dello spessore di 250 millimetri dopo aver già posizionato al di sotto di essa una massicciata dello spessore di 60 millimetri, un isolante termico dello spessore di 50 millimetri e un massetto in cemento dello spessore di 50 millimetri; si posizionano poi tutti i pilastri e gli elementi di pannellatura del primo piano che vengono opportunamente collegati a terra e ben sigillati tra essi.
- FASE 2: si prosegue con il montaggio del primo solaio per step. In un primo step si procede bullonando le travi principali ipe 240 ai pilastri già posizionati mediante la presenza delle squadrette già precedentemente saldate sui pilastri; in un secondo step si innestano i travetti secondari alle travi principali, anche qui mediante le squadrette precedentemente saldate sulla lunghezza delle travi stesse; in un terzo step si completa il solaio posizionando la piastra in alluminio sui travetti.
- FASE 3: innesto e collegamento dei pilastri e delle pannellature del piano superiore opportunamente sigillate tra esse.
- FASE 4: montaggio del solaio di copertura (seguendo gli stessi step del solaio intermedio) su cui verranno posizionate ovviamente una barriera al vapore dello spessore di 20 millimetri e una membrana impermeabilizzante anch'essa dello spessore di 20 millimetri.

Si vuole ottenere così una struttura solida, realizzata in modo rapido e pulito che può abbinarsi facilmente con elementi tipici dell'edilizia.

Riassumendo possiamo dire che la struttura è posata su una platea in cemento; sopra la fondazione vengono posizionate le pareti, formate da un'intelaiatura costituita da montanti in alluminio di sezione generalmente di 12x12 cm, posti ad un interasse di 3,6 metri in una direzione e 1,8 metri nell'altra e completati da un corrente inferiore e dalle travi principali superiori di stessa larghezza sezionale bullonate ai montanti stessi.

Sul lato interno dell'intelaiatura viene posizionato il rivestimento formato generalmente da compensato avente spessore di 30 mm, oppure da altri pannelli quali ad esempio il cartongesso.

Le aperture vengono opportunamente riempite dalle intelaiature di porte e finestre che si vanno a collegare ai montanti già posizionati precedentemente.

I pregi fondamentali dei componenti progettati e utilizzati possono essere riassunti brevemente:

- riduzione al minimo di tutti i ponti termici tramite la disposizione di materiale isolante sia tra le connessioni che internamente ad essi;
- il peso ridotto, l'alta maneggevolezza e la conseguente rapidità e facilità di messa in opera;
- elevata capacità portante;
- essendo fabbricati in stabilimento, sono elementi dimensionalmente tutti uguali e con una bassa tolleranza d'imprecisione;
- gli impianti possono essere facilmente installati grazie alla presenza di vani appositi che si ottengono dalle cavità degli elementi stessi, essendo essi per la maggior parte molto sottili e comunque a sezione aperta o cava;
- sono facilmente lavorabili

## 2.5 Risultato

Il risultato è un edificio ad uso unifamiliare di due piani, composto da 4 moduli di base di 3,6x3,6 m affiancati l'uno all'altro a formare un piano. Ogni piano contiene quindi quattro moduli base per un totale di 8 moduli.

La tipologia di abitazione ricavata misura all'incirca 50 mq per piano; si è scelto di dislocare la zona giorno interamente al piano terra, mentre la zona notte interamente al primo piano.

La zona giorno risulta composta da un piccolo ingresso disposto a ovest dell'edificio, da un ampio soggiorno che misura circa 20 mq, da una cucina abitabile di circa 12 mq e da un bagno non molto grande di 4,5 mq; sia il soggiorno che la cucina sono ampiamente illuminati da vetrate molto grandi che guardano a sud e a nord dell'edificio. Si è deciso infatti di utilizzare finestre di tipo scorrevole su doppio binario di altezza pari a quella della parete stessa.

La zona notte risulta invece composta da due camere doppie di circa 13 mq che possono svolgere quindi anche compito di camera matrimoniale, e da un bagno delle stesse dimensioni di quello del piano inferiore e disposto ovviamente subito al di sopra di esso in maniera da avere facilità di disposizione degli impianti. Anche per le camere da letto le finestre risultano delle stesse dimensioni del piano inferiore e consentono anche l'uscita su due piccoli terrazzini che vengono disposti per l'appunto sui lati dell'edificio dove si affacciano le camere.

Ovviamente, come anticipato nei precedenti paragrafi, c'è grande flessibilità nella distribuzione degli ambienti interni dell'edificio in funzione soprattutto delle decisioni degli occupanti, che possono svariare dalla famiglia già stabile (con almeno 4 componenti) alle giovani famiglie. Queste ultime magari possono necessitare di una camera in meno e/o di un bagno in meno; ambienti che invece, ad esempio, possono essere utilizzati come studio, come ripostigli o come aree adibite alla multimedialità.

I due corpi principali (piano terra e primo piano) sono aggregati tra di loro mediante una scala interna metallica in alluminio o acciaio; scala della larghezza di 80 centimetri che parte subito vicino l'ingresso dell'edificio e che risulta composta da 15 scalini caratterizzati da una pedata pari a 28 centimetri e da un'alzata pari a 18 centimetri. Essa si aggancia ad una trave del solaio intermedio mediante semplice collegamento bullonato, proprio in linea con quella che è stata l'idea di costruzione e assemblaggio seguita per l'intero prototipo.

La copertura dell'edificio è di tipo piana; un'idea è quella di porre dei pannelli fotovoltaici su di essa con funzione doppia: da un lato fornire energia rinnovabile e pulita al complesso, dall'altro ombreggiare la copertura sottostante.

Tutto il complesso ha fondazioni poco profonde, compatibilmente con le caratteristiche del terreno. Il solaio del piano terra è rialzato, rispetto alla quota zero. Lo spazio ricavato è riempito di ciottoli, anche eventualmente trovati nelle operazioni di scavo, che fungono da regolatori della temperatura dell'aria: in inverno la temperatura negli interstizi è maggiore di quella esterna e quindi è come se si avesse un cuscino d'aria calda sul quale poggia l'edificio; in estate al contrario questa temperatura è minore e si ottiene l'effetto inverso. Tutto ciò sempre a beneficio del clima dell'abitazione.

Si può osservare come le pareti e i solai risultino in parte cavi e quindi riempibili con qualsiasi tipo di isolante, previo calcolo strutturale, o fungere da vani tecnici per impianti. È possibile anche prevedere riempimenti diversi in base all'orientamento delle pareti, e quindi alle diverse prestazioni richieste in termini di isolamento o massa termica per garantire il benessere.

Non si fanno considerazioni in merito alla tipologia di impianti con cui dotare la struttura, perchè avendola proposta per un ambito generale, sarà necessario di volta in volta valutare le effettive esigenze. Si è fiduciosi che l'edificio sia adatto ad accogliere qualsiasi tipo d'impianto, data la grande flessibilità dei suoi componenti.

Dal punto di vista della classificazione energetica, quest'ultima osservazione non ci permette di effettuare considerazioni precise. L'edificio comunque, impiegando serramenti e impianti di qualità media, dovrebbe garantire facilmente il raggiungimento di una categoria B. Starà poi all'utente, in base alle sue necessità e disponibilità economica, montare componenti più performanti (serramenti, impianti ed isolanti) in modo da migliorare la classe energetica. Anche questo aspetto potrebbe essere visto come evolutivo: in funzione del budget si potrebbe partire da una classe energetica B, per poi migliorarla con la sostituzione o aggiunta di componenti, resa facile e veloce dalla flessibilità della struttura impiegata.

In generale tutte le aperture (sia piano inferiore, che piano superiore) sono occultabili tramite serrande in alluminio scorrevoli su binari.

Per concludere si possono ribadire i concetti principali su cui si è basata la nostra idea. Si è cercato di creare un prototipo di edificio nuovo e leggero, che potesse crescere o rimpicciolire grazie alla modularità di base sulla quale è stato pensato. Particolare importanza è stata data alla flessibilità ad ogni livello di progettazione, in modo che sia possibile variare l'assetto distributivo e degli impianti in qualsiasi momento con il



minimo sforzo. Si è voluto creare un edificio sostenibile, attraverso l'impiego di un materiale giovane e leggero come l'alluminio, che ottimizza le risorse, e soprattutto ne consente la rigenerazione. Anche la possibilità di applicazione dei pannelli fotovoltaici contribuisce al percorrimto della stessa strada, specialmente riducendo le immissioni dannose.

Si continua nel capitolo successivo con l'analisi delle sollecitazioni agenti sul nostro prototipo mediante modellazione agli elementi finiti e con successiva verifica degli elementi strutturali secondo l'EUROCODICE 9 (normativa europea che regola l'utilizzo dell'alluminio in ambito strutturale).

## Capitolo 3

# Modellazione agli elementi finiti e verifiche strutturali

### 3.1 Introduzione

In questo capitolo si procede modellando la struttura del prototipo (descritta nel capitolo precedente) agli elementi finiti e, successivamente, si effettuano le verifiche sugli elementi strutturali delle sollecitazioni calcolate. Per la modellazione agli elementi finiti si è utilizzato un programma di calcolo strutturale chiamato “Straus7”.

I passi progettuali seguiti in questa prima parte possono essere riassunti come:

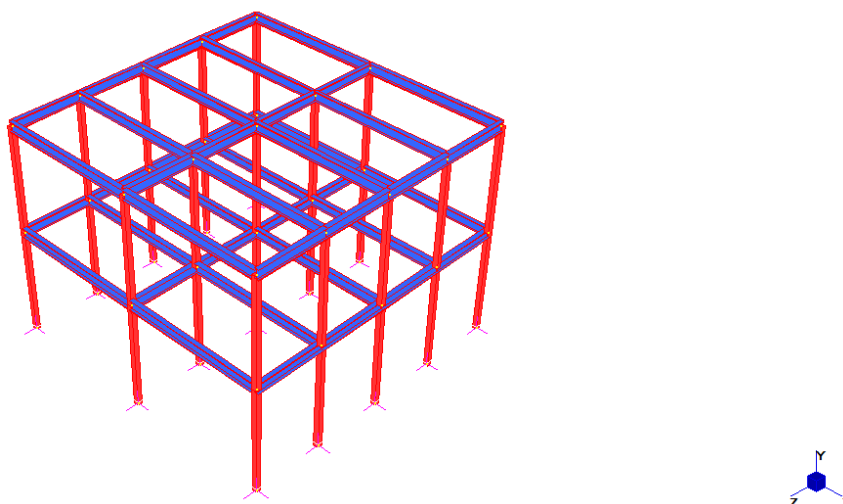
- creazione del modello strutturale;
- applicazione dei carichi alla struttura;
- analisi statica lineare (linear static).

Si procede quindi analizzando gli step appena descritti nei paragrafi seguenti.

### 3.2 Creazione del modello strutturale

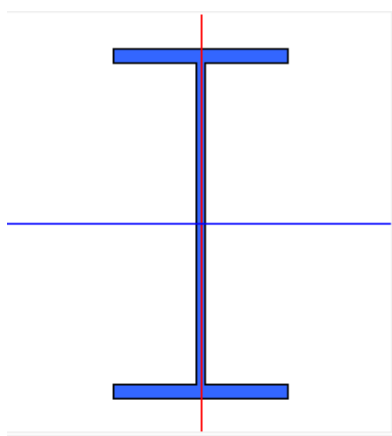
La modularità del prototipo progettato e la sua componentistica strutturale costituita prettamente da pilastri e da travi, ci permettono di modellare l’edificio come una strutturina intelaiata doppiamente simmetrica e regolare sia in pianta che in altezza.

Il modello strutturale viene allora creato andando a disporre cinque telai in direzione z distanziati di 1,8 metri l’uno dall’altro; i solai vengono orditi nella sola direzione z (mediante le travi secondarie a T spigoli vivi) e i piani che costituiscono l’edificio sono 2, disposti rispettivamente a 2,7 e 5,4 metri d’altezza rispetto al livello del terreno (Fig.23).

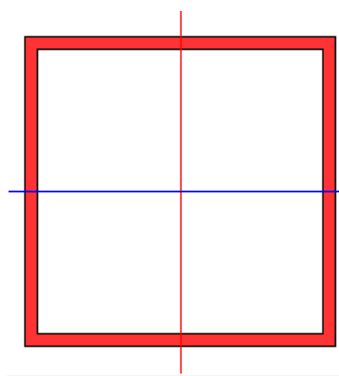


**Fig.23 – Creazione del modello strutturale**

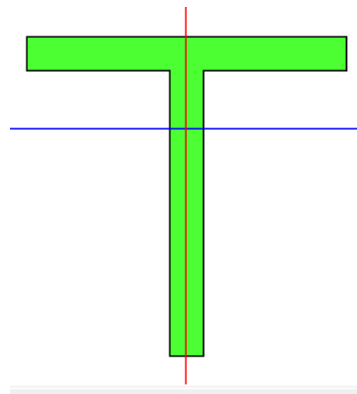
Gli elementi strutturali impiegati nel modello vengono modellati come elementi beam:



**Fig.24 – Trave ipse 240 modellata come elemento beam**



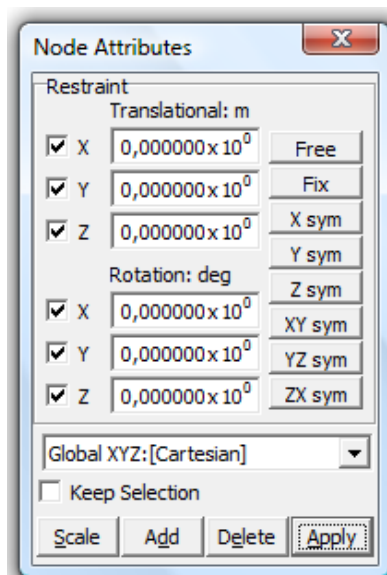
**Fig.25 – Pilastro a sezione quadrata cava modellato come elemento beam**



**Fig.26 – Trave a T spigoli vivi modellata come elemento beam**

Tutti gli elementi strutturali sono stati modellati utilizzando come materiale una lega d'alluminio 6082 - T6 presente nella libreria dei materiali fornita dal programma e caratterizzato da un modulo elastico (E) pari a  $6,9 * 10^{10}$  Pa.

Una volta collegati tutti gli elementi strutturali e creato il modello si è proceduto attribuendo i vincoli alla base dei pilastri portanti per mezzo del comando “Attributes” cui è seguito il comando “node” ed infine quello “restraint”; una volta evidenziati i nodi utili si è quindi provveduto a bloccare le traslazioni e le rotazioni in tutte le direzioni, in maniera da fornire vincolo di incastro alla base del pilastro (Fig.27).



**Fig.27 – Blocco traslazioni e rotazioni per applicazione vincoli**

### 3.3 Attribuzione dei carichi al modello

Ultimato il modello strutturale si può procedere attribuendo i carichi al modello stesso; per fare questo bisogna in primo luogo conferire peso proprio agli elementi strutturali precedentemente creati. Si è allora utilizzato il comando “Load and freedom cases” nel menù a tendina “Global”; qui sono state create due condizioni di carico: “carichi totali” e “carico da vento”.

Ovviamente alla condizione “carico da vento” non è stata assegnata nessuna condizione di peso proprio agli elementi, mentre alla condizione “carichi totali” è stata assegnata l’opzione “gravity” con la quale si è attribuita l’accelerazione di gravità ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ) in direzione Y negativa ai nostri elementi (Fig.28).

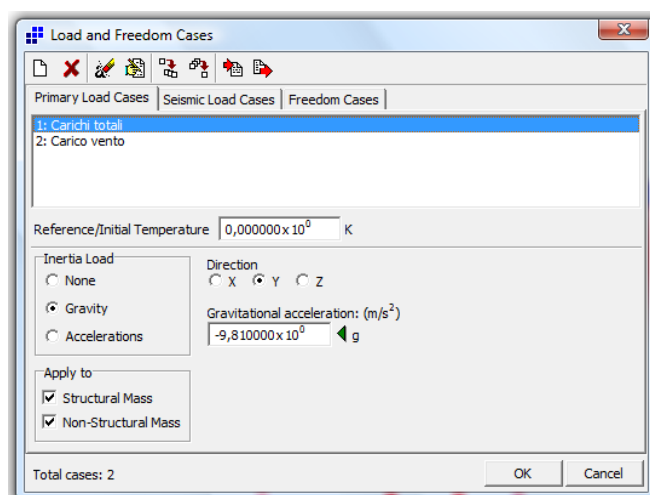


Fig.28 – Assegnazione del peso proprio agli elementi strutturali

In questo modo viene tenuto in conto il peso proprio delle travi e dei pilastri andando a considerare la densità e l’accelerazione di gravità.

Il passo successivo è stato quello di andare ad attribuire il carico alla struttura mediante un comando particolare chiamato “load patch”; è stato necessario allora in primo luogo effettuare un’analisi accurata dei carichi con annessa combinazione agli stati limite, ma si omettono in questo paragrafo i passaggi eseguiti per non appesantire ulteriormente il lavoro avendo già riportato il tutto nei paragrafi che seguono dove si trattano le verifiche degli elementi strutturali.

Si propone esclusivamente un breve sunto del valore dei carichi sul solaio di copertura e sul solaio intermedio:

*solaio di copertura:*

- carichi permanenti strutturali:  $140 \text{ kg/m}^2$
- carichi permanenti non strutturali:  $28 \text{ kg/m}^2$
- carichi accidentali:  $200 \text{ kg/m}^2$

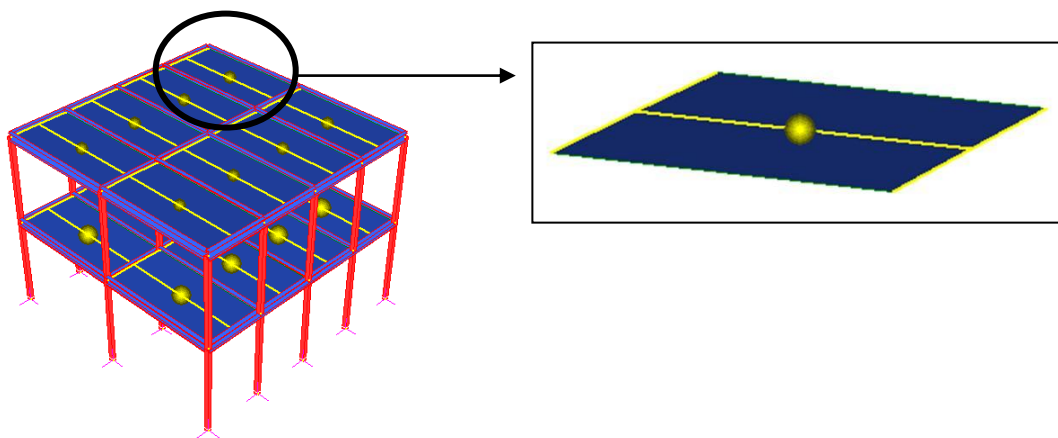
Per un totale di  $368 \text{ kg/m}^2$ .

*Solaio intermedio:*

- carichi permanenti strutturali:  $140 \text{ kg/m}^2$
- carichi permanenti non strutturali:  $162 \text{ kg/m}^2$
- carichi accidentali:  $200 \text{ kg/m}^2$

Per un totale di  $502 \text{ kg/m}^2$ .

I carichi appena elencati sono stati attribuiti alla struttura modellando il solaio come elemento “plate” cui è stata assegnata la proprietà di “load patch”; proprietà che permette di creare un elemento fittizio cui risulta possibile attribuire una massa (Fig.29).

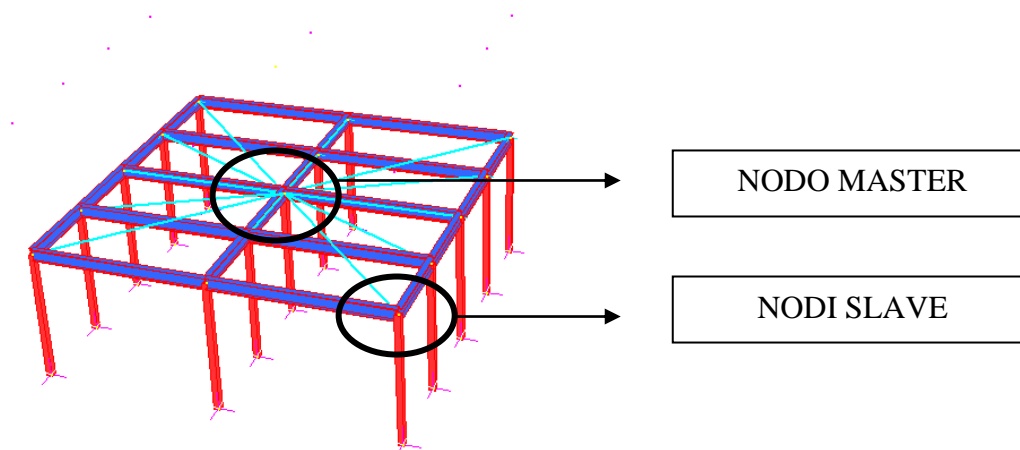


**Fig.29 – Elemento plate con proprietà di “load patch”**

La massa che viene attribuita all'elemento è una massa non strutturale (“face non structural mass”) scelta nel menù “Attributes” cui segue il comando “plate”.

La ripartizione del carico alle travi avviene poi per mezzo del comando “load patch type” che si trova sempre nel menù “attributes” e che consente di suddividere l'elemento plate in svariati modi; nel caso in esame si è deciso di suddividere l'elemento in due parti (come riportato in figura) in maniera da mandare il carico di metà elemento sulla trave da esso influenzata.

Si vuole a questo punto considerare il solaio infinitamente rigido nel proprio piano mediante l'introduzione di *link rigidi* nel piano xz. Il comando viene assegnato nel menù “tools” cui segue la funzione “autoassign”, poi “restraints” e infine “rigid connections”; i *link* generati non fanno altro che creare delle connessioni rigide all'interno del piano cui si fa riferimento, che nel caso in esame risulta essere il piano del solaio.



**Fig.30 – Infinita rigidità nel piano del solaio**

Con l'introduzione delle connessioni rigide il programma di calcolo crea automaticamente un nodo “master” che vincola tutti gli altri nodi (nodi “slave”) a muoversi rigidamente rispetto ad esso.

### 3.4 Analisi statica lineare (linear static)

Terminati i passi progettuali di creazione del modello strutturale e attribuzione dei carichi al modello, è stato possibile procedere effettuando un'analisi statica lineare sul modello. Il solutore, completato il calcolo, registra il risultato in un file con lo stesso nome di quello del modello (che ha estensione ST7), ma con una estensione diversa a seconda del tipo di soluzione (ad esempio LSA per l'analisi statica lineare eseguita in questo caso).

L'analisi viene fatta partire con l'opzione "linear static" della finestra di dialogo "solver" dove viene richiesto al programma di calcolare le sollecitazioni e le tensioni sugli elementi beam precedentemente modellati. Una volta svolto il calcolo, risulta possibile visualizzare i risultati ottenuti utilizzando il comando "open results file"; in questo ambiente è possibile visualizzare ogni tipo di stato di sollecitazione o stato tensionale cui gli elementi sono sottoposti, la deformata della struttura, gli spostamenti dei nodi, ecc.

Si decide in questo caso di riportare i diagrammi delle sollecitazioni che risultano utili per le verifiche dei prossimi paragrafi (sforzo normale, taglio, momento flettente) e la deformata della struttura dovuta al carico da vento.

- *Deformata dovuta al carico da vento*

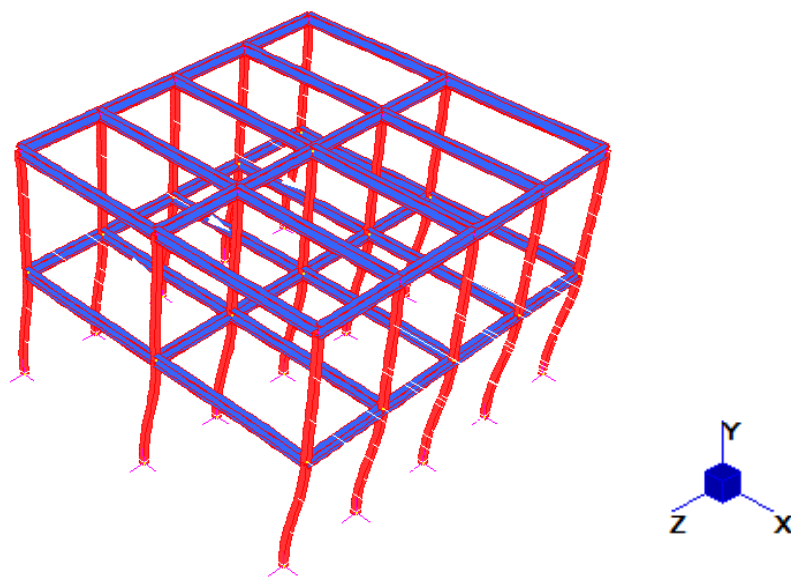


Fig.31 – Deformata della struttura in direzione x



La deformata ci mostra come la struttura tenda a spostarsi verso la direzione x avendo come punti di massimo spostamento quelli posti in sommità dell'edificio.

Risulta possibile quindi leggere il valore di questi spostamenti e notare la differenza dei valori ottenuti per mezzo dell'opzione "displacement" che si può trovare tramite il comando "contour".

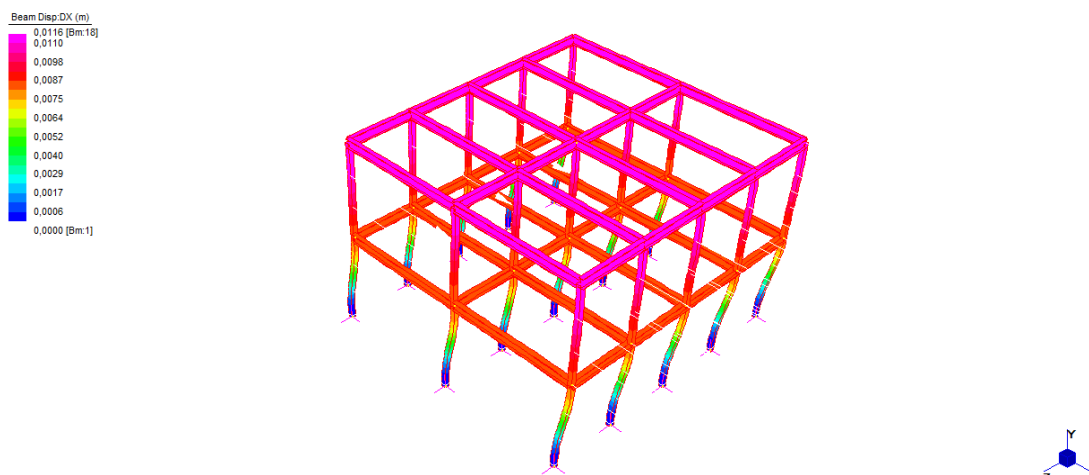


Fig.32 – Spostamenti in direzione x

Si evita anche in questo caso di riportare i valori ottenuti in quanto già sufficientemente analizzati nei paragrafi che seguono di verifica degli elementi strutturali.

- *Diagramma dello sforzo normale agente sui pilastri*

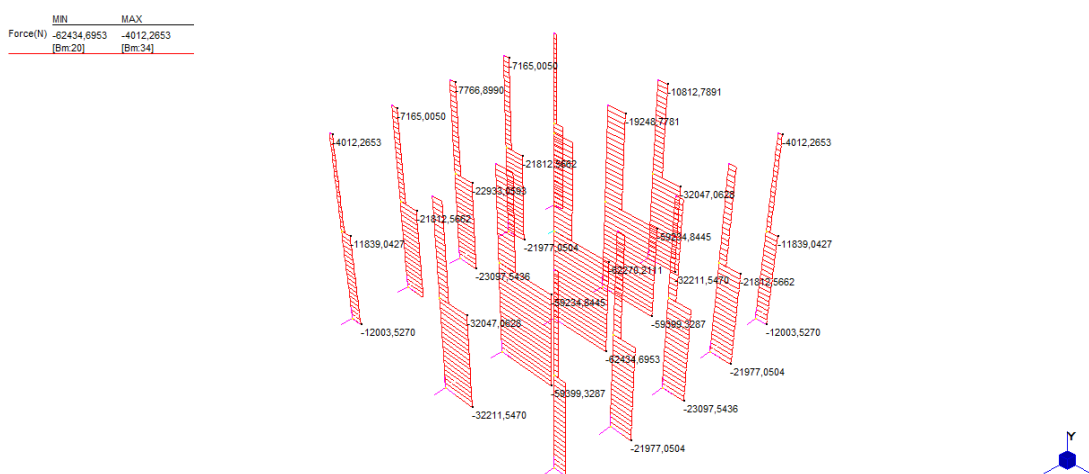


Fig.33 – Sforzo normale agente sui pilastri

Come si può ben notare dalla figura riportata e come ci si poteva aspettare, lo sforzo normale più elevato si registra sui pilastri centrali.

A conferma del risultato appena ottenuto si riporta di seguito lo stato tensionale cui sono sottoposti i pilastri; anche in questo caso il risultato non cambia.

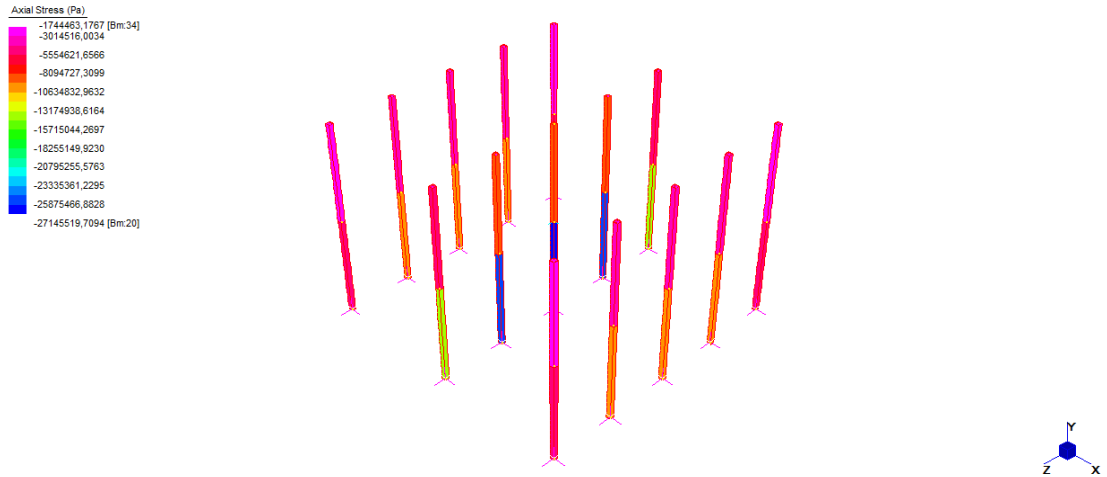


Fig.34 – Tensioni agenti sui pilastri

- *Diagramma del taglio*

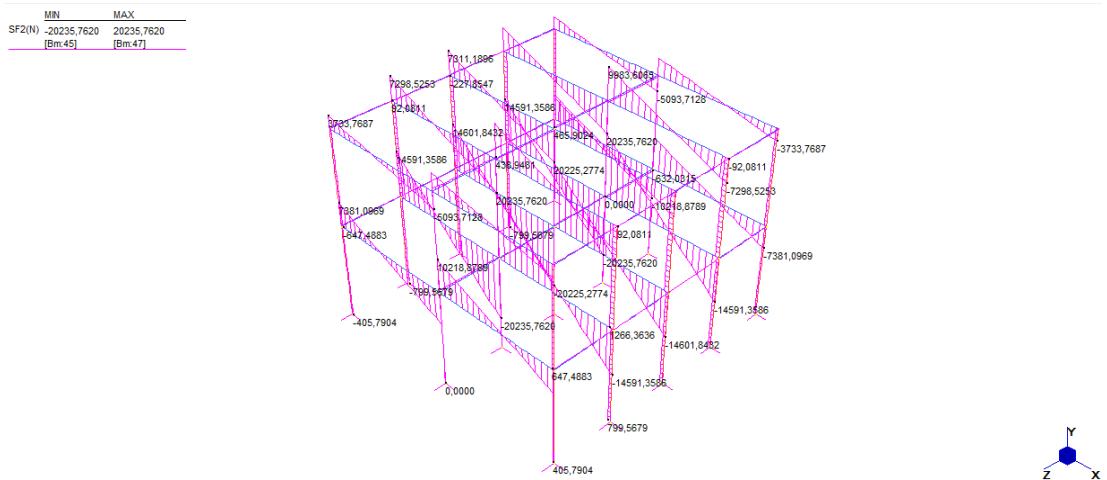


Fig.35 – Sollecitazioni di taglio sulla struttura

Il taglio agente sulla struttura può essere meglio visualizzato guardando i telai in 2D:

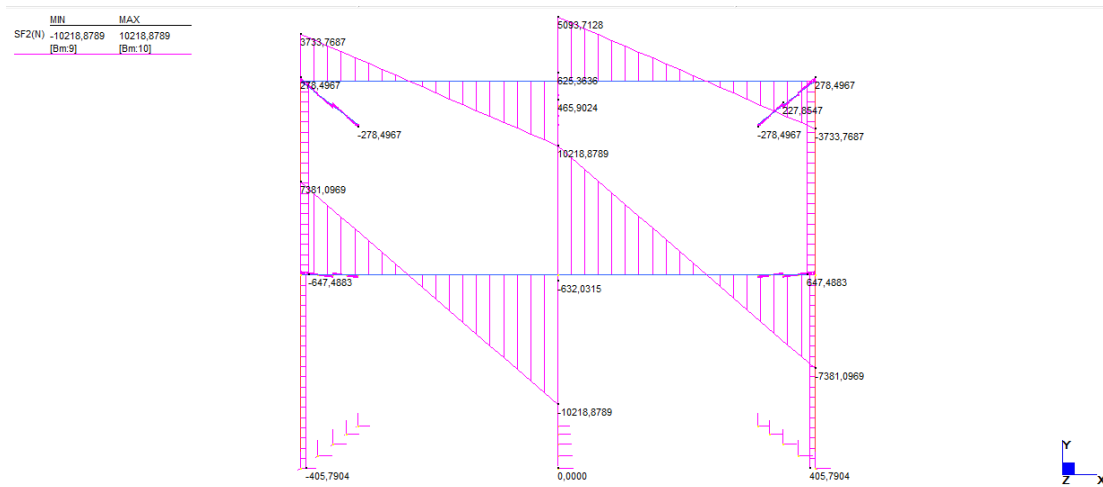


Fig.36 – Taglio agente sul telaio in direzione x

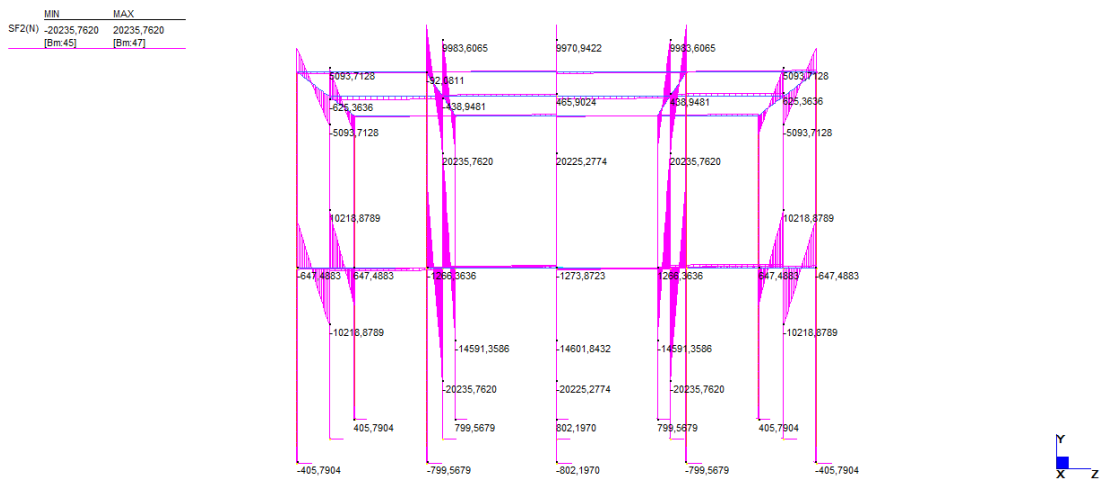
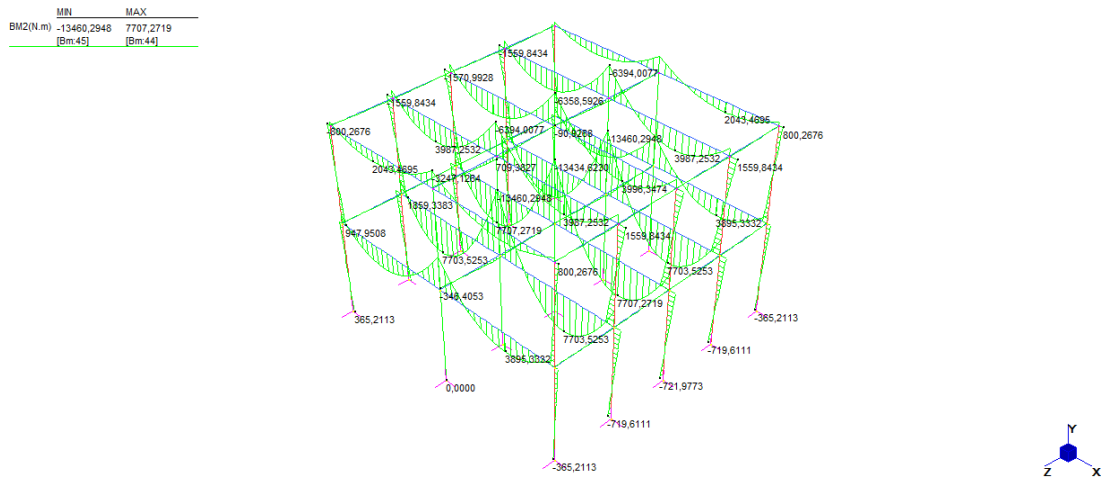


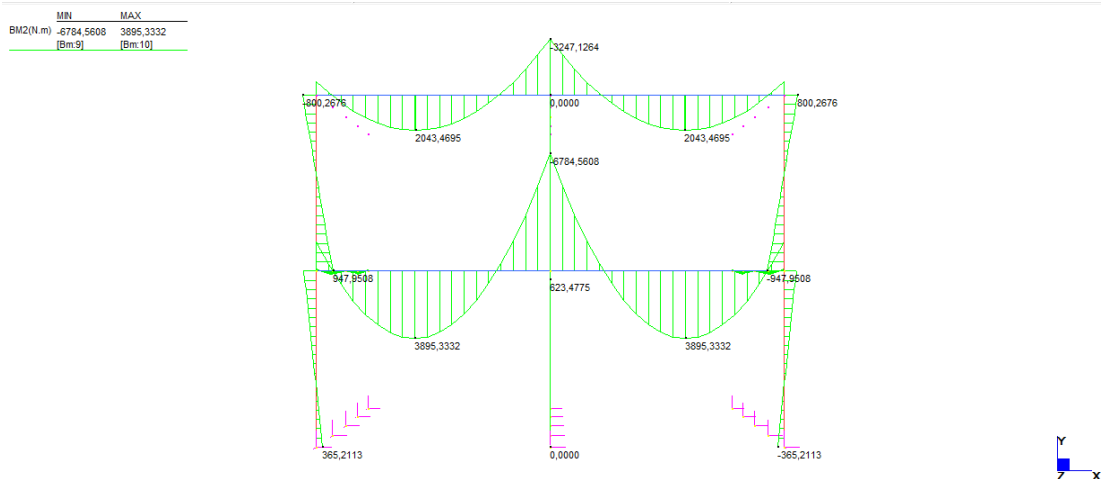
Fig.37 – Taglio agente sul telaio in direzione z

- *Diagramma del momento*

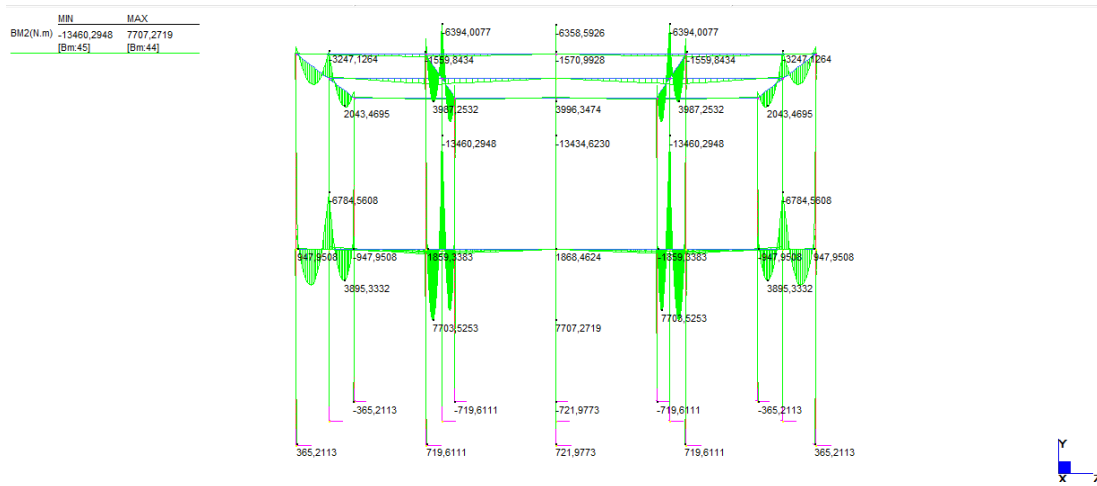


**Fig.38 – Momento flettente agente sulla struttura**

Anche in questa circostanza si procede visualizzando il momento nei telai disposti lungo le due direzioni:



**Fig.39 – Momento flettente agente sul telaio in direzione x**



**Fig.40 – Momento flettente agente sul telaio in direzione z**

### 3.5 Verifiche degli elementi strutturali

Le normative cui viene fatto riferimento in questo capitolo sono: l'**Eurocodice 9** per la "Progettazione delle strutture di alluminio" ( UNI ENV 1999-1-1 ) e le **NTC del 14/01/2008** (norme tecniche per le costruzioni). Si sono allora seguiti i passi indicati da queste due normative allo scopo di effettuare la corretta verifica degli elementi strutturali che compongono il nostro edificio.

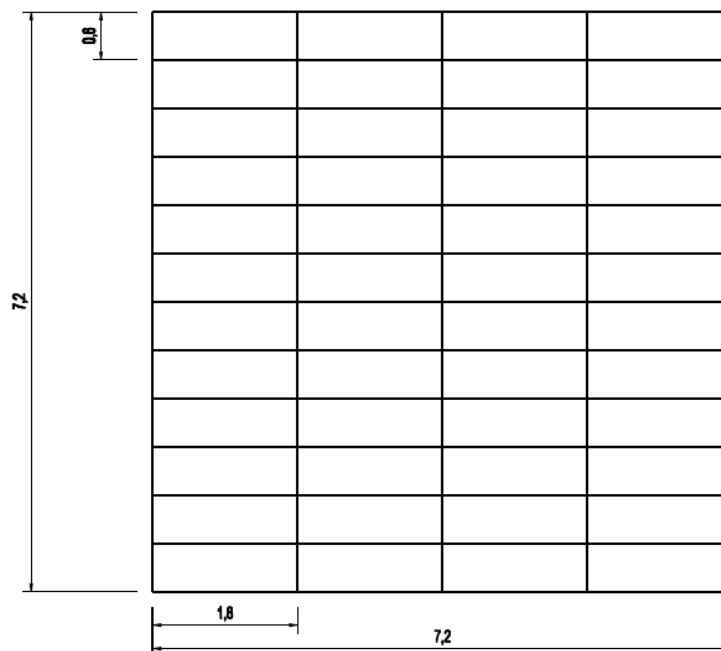


Fig.41 – Disposizione travi principali e secondarie

Riassumiamo che l'edificio viene realizzato in pianta quadrata doppiamente simmetrica come riportato in Fig.41. La struttura portante è costituita da 5 telai principali distanziati di 1,8 metri l'uno dall'altro e collegati mediante travi; essa viene realizzata interamente in lega d'alluminio e i suoi componenti assumono dimensioni standardizzate allo scopo di avere tempi di costruzione ridotti e modalità di assemblaggio semplificate grazie alla leggerezza dell'alluminio.

Gli elementi strutturali sono:

- TRAVI IPE 240 (lunghezza di 3,6 metri e 1,8 metri)
- TRAVI A T SPIGOLI VIVI 100x11 (lunghezza di 1,8 metri)
- PILASTRI IN ALLUMINIO A SEZIONE QUADRATA CAVA 120 mm (lunghezza 2,7 metri)

I carichi verticali vengono trasmessi dalle travi secondarie alle travi principali che a loro volta li trasmettono sui pilastri e successivamente scaricati a terra. I solai sono realizzati mediante una doppia orditura di travi: la principale (costituita dalle travi IPE di lunghezza pari a 3,6 metri) avente interasse pari a 1,8 metri e la secondaria (costituita dalle travi a T di lunghezza pari a 1,8 metri) che collega le travi principali mediante travetti con interasse pari a 0,6 metri. Grazie alla presenza di una fitta orditura secondaria risulta evitabile il posizionamento di controventi di piano ad evitare l'instabilizzazione delle travi.

Il capitolo 3 dell'Eurocodice 9 elenca i valori minimi di resistenza per le leghe di alluminio da lavorazione plastica per uso strutturale nel prospetto 3.2b; per gli elementi strutturali precedentemente descritti, sono stati utilizzati profili caratterizzati da una lega d'alluminio del tipo **EN AW-6082**. I valori di resistenza delle diverse tempere vengono riportati in Tab.3.

I dati di calcolo utilizzati sono stati di conseguenza i seguenti:

- Modulo elasticità  $E = 70000 \text{ N/mm}^2$
- Modulo elasticità tangenziale  $G = 27000 \text{ N/mm}^2$
- Coefficiente di Poisson  $\nu = 0,3$
- Massa specifica  $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$
- Resistenza ultima  $f_u = 205 \text{ N/mm}^2$
- Resistenza al limite elastico  $f_{0,2} = 110 \text{ N/mm}^2$

prospetto 3.2b

Valori minimi garantiti della resistenza al limite elastico convenzionale  $f_{0,2}$  corrispondente alla deformazione residua dello 0,2% e della resistenza ultima di trazione  $f_u$  per leghe di alluminio da lavorazione plastica - Profili estrusi, tubi estrusi, barre e tondi estrusi e tubi trafilati

| Lega            | Forma del  | Tempra | Dimensione t,     | $f_{0,2}$  | $f_u$ | $A_{50}$ |
|-----------------|--|--------|-------------------|------------|-------|----------|
| EN AW-6082      | EP, ET, ER/B   | T4     | $t \leq 25$       | 110        | 205   | 14       |
|                 | EP/O, EP/H   | T5     | $t \leq 5$        | 230        | 270   | 8        |
|                 | EP/O, EP/H<br>ET   | T6     | $t \leq 5$        | 250        | 290   | 8        |
|                 |  |        | $5 < t \leq 25$   | 260        | 310   | 10       |
|                 | ER/B   | T6     | $t \leq 20$       | 250        | 295   | 8        |
|                 |  |        | $20 < t \leq 150$ | 260        | 310   | 8        |
|                 | DT   | T6     | $t \leq 5$        | 255        | 310   | 8        |
| $5 < t \leq 20$ |  |        | 240               | 310        | 10    |          |
| EN AW-7020      | EP/ER/B, DT,<br>ET   | T6     | $t \leq 15$       | <b>280</b> | 350   | 10       |
| Legenda         | EP - Profilo estruso EP/O - Profili aperto estruso<br>EP/H - Profili cavo estruso ET - Tubo estruso<br>ER/B - Tondo e barra estrusi DT - Tubo trafilato  |        |                   |            |       |          |
| Nota 1          | Quando i valori sono riportati in <b>grassetto</b> , è consentito utilizzare, per alcune forme, spessori maggiori e/o valori delle proprietà meccaniche più elevati. Vedere EN e prEN elencati in 1.3.1.3.   |        |                   |            |       |          |
| Nota 2          | Quando i valori minimi dell'allungamento sono riportati in <b>grassetto</b> , per alcune forme e spessori, possono essere assunti valori minimi maggiori.  |        |                   |            |       |          |
| Nota 3          | Nei casi in cui per un prodotto estruso si fa uso di spessori che rientrano nell'intervallo degli spessori sopra indicati, può essere utilizzato il maggiore tra i valori specificati, purché il produttore sia in grado di comprovare l'opportunità di assumere un tale valore, attraverso un appropriato certificato di assicurazione della qualità. |        |                   |            |       |          |

Tab.3 – Prospetto 3.2b (vedi Eurocodice 9)

### 3.5.1 Analisi dei carichi

Allo scopo di effettuare in maniera corretta l'analisi dei carichi agenti sui nostri elementi strutturali si è proceduto distinguendo l'analisi del solaio di copertura dall'analisi del solaio intermedio; successivamente sono state effettuate le opportune verifiche sia agli *stati limite di esercizio* che agli *stati limite ultimo* dei nostri elementi secondo le indicazioni dell'Eurocodice 9.

L'analisi è stata effettuata mediante l'ausilio di un foglio di calcolo excel con il quale sono stati svolti i calcoli principali e tabellati tutti i valori di interesse; di seguito si riportano alcune delle tabelle realizzate.



*SOLAIO DI COPERTURA :*

| <b>Carichi permanenti non strutturali</b> |  |  |                                | <b>kg/m<sup>2</sup></b> |
|---|--|--|--------------------------------|-------------------------|
| Membrana imp.                             |  |  |                                | 4,5                     |
| Isolante Termico(5 cm)                    |  |  |                                | 2,2                     |
| Barriera vapore(3 cm)                     |  |  |                                | 1,05                    |
| Controsoffitto                            |  |  |                                | 9                       |
| Lamiera Allum. (4mm)                      |  |  | 0,004                          | 10,8                    |
| <b>Carichi permanenti strutturali</b>     |  |  |                                | <b>kg/m<sup>2</sup></b> |
| Trave secondaria ( T)                     |  |  |                                | 56,133                  |
| Trave principale (IPE)                    |  |  |                                | 83,6658                 |
|   |  |  | <b>TOTALE PERMANENTI(kg/m)</b> | 167,348                 |
|   |  |  |                                | 8                       |

| <b>Carichi accidentali</b> |  |  |                                      | <b>kg/m<sup>2</sup></b> |
|----------------------------|--|--|--------------------------------------|-------------------------|
| Ispezione                  |  |  |                                      | 50                      |
| Neve                       |  |  |                                      | 150                     |
|                            |  |  | <b>TOTALE ACC.(kg/m<sup>2</sup>)</b> | 200                     |

**Tab.4 – Carichi agenti sul solaio di copertura**

E' possibile osservare come sia stata del tutto trascurata l'azione del vento nel contributo dovuto ai carichi accidentali proprio in virtù del fatto che la copertura viene realizzata piana.

*SOLAIO INTERMEDIO :*

| <b>Carichi permanenti non strutturali</b> |  |           |       | <b>kg/m<sup>2</sup></b> |
|---|--|-----------|-------|-------------------------|
| Pavimento Legno(2 cm)                     |  |           |       | 18                      |
| Pannello OSB legno (12 mm)                |  |           |       | 8,4                     |
| Appoggi in legno (3 cm)                   |  |           |       | 21                      |
| Isolante Termico(5 cm)                    |  |           |       | 2,2                     |
| Isolante Acustico(5 mm)                   |  |           |       | 2                       |
| Controsoffitto                            |  |           |       | 9                       |
| Tramezzi(Alluminio+cartongesso)           |  |           |       | 90                      |
| Lamiera alluminio                         |  | spess (m) | 0,004 | 10,8                    |

| Carichi permanenti Strutturali |  |  | kg/m <sup>2</sup>                      |
|--------------------------------|--|--|--|
| Trave secondaria ( T )         |  |  | 56,133                                 |
| Trave principale (IPE)         |  |  | 83,6658                                |
|                                |  |  | <b>TOTALE PERM. (kg/m<sup>2</sup>)</b> |
|                                |  |  | 301,1988                               |

| Carichi accidentali |  |  | kg/m <sup>2</sup>  |
|---------------------|--|--|--------------------|
| Sovracc. Uso resid. |  |  | 200                |
|                     |  |  | <b>TOTALE ACC.</b> |
|                     |  |  | 200                |

Tab.5 – Carichi agenti sul solaio intermedio

Il passo successivo alla definizione dei carichi agenti sulla nostra struttura è stato quello di andare a combinare i nostri carichi secondo quanto indicato nelle **NORME TECNICHE PER LE COSTRUZIONI ( 2008 )** in funzione delle verifiche che si vogliono effettuare.

### 3.5.2 Stati limite di esercizio

L'Eurocodice 9 tratta gli stati limite di esercizio nel capitolo 4 e impone ( nel paragrafo 4.2.3 ) che gli spostamenti elastici dovrebbero essere determinati con riferimento alla combinazione di carico frequente. Riportiamo allora questa combinazione di carico direttamente dal capitolo 2 ( paragrafo 2.5.3 ) delle NTC 2008:

- *Combinazione frequente*, generalmente impiegata per gli stati limite di esercizio (SLE) reversibili:

$$G_1 + G_2 + P + \psi_{11} \times Q_{k1} + \psi_{22} \times Q_{k2} + \psi_{23} \times Q_{k3} + \dots$$

Dove:

- peso proprio di tutti gli elementi strutturali ( G1 );
- peso proprio di tutti gli elementi non strutturali ( G2 );
- pretensione e precompressione ( P );
- azione variabile dominante ( Q<sub>k1</sub> );
- azioni variabili che possono agire contemporaneamente a quella dominante ( Q<sub>k2</sub>, Q<sub>k3</sub> );

Riportiamo allora di seguito la combinazione frequente dei carichi agenti sia sulla trave principale che su quella secondaria per il *SOLAIO DI COPERTURA* :

|  | TRAVE PRINCIPALE | TRAVE SECONDARIA |
|--|------------------|------------------|
| G1(permanenti str.)kg/m <sup>2</sup>     | 139,7988         | 56,133           |
| G2(permanenti non str.)kg/m <sup>2</sup> | 27,55            | 27,55            |
| ψ <sub>11</sub>                          | 0,5              | 0,5              |
| Q <sub>1</sub>                           | 150              | 150              |
| ψ <sub>22</sub>                          | 0,3              | 0,3              |
| Q <sub>2</sub>                           | 50               | 50               |
| <b>combinazione(kg/m<sup>2</sup>)</b>    | <b>257,3488</b>  | <b>173,683</b>   |

Tab.6 – Combinazione frequente per solaio di copertura

E' possibile allora esprimere i diversi interassi di influenza sia per le travi principali che per quelle secondarie in maniera da poter procedere al calcolo dei carichi linearizzati; gli interassi risultano di 1,8 metri e 0,6 metri rispettivamente per le principali e le secondarie. Una volta definito il carico linearizzato si può procedere al calcolo della freccia della trave allo scopo di poterne effettuare la verifica. Lo schema statico con il quale è stato definito il valore delle frecce è quello di una trave su due appoggi sottoposta a carico uniforme  $F_d$  :

$$\text{freccia}_{\max} = \frac{5}{384} \frac{F_d * l^4}{EJ}$$

I valori ottenuti dai calcoli appena descritti sono i seguenti:

|                                 | TRAVE PRINCIPALE   | TRAVE SECONDARIA   |
|---------------------------------|--------------------|--------------------|
| interasse Travi (m)             | 1,8                | 0,6                |
| $F_d$ (kg/m)                    | 463,22784          | 104,2098           |
| luce trave (m)                  | 3,6                | 1,8                |
| E alluminio(kg/m <sup>2</sup> ) | 7000000000         | 7000000000         |
| <b>FRECCIA (m)</b>              | <b>0,003942438</b> | <b>0,001042307</b> |

Tab.7 – Calcolo della freccia

La freccia calcolata deve risultare minore del valore prescritto dalla normativa che in questo caso risulta essere pari a  $L/200$  :

| verifica                             | TRAVE PRINCIPALE |                   | TRAVE SECONDARIA |                   |
|--------------------------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| $l/200(m)$                           | 0,018            |                   | 0,009            |                   |
| <b>freccia<math>&lt;l/200</math></b> | 0,0039 $<0,018$  | <b>VERIFICATA</b> | 0,001 $<0,009$   | <b>VERIFICATA</b> |

Tab.8 – Verifica frecce

Una volta effettuate le verifiche sulle travi per il solaio di copertura si può procedere secondo gli stessi passi anche per il *SOLAIO INTERMEDIO* :

|                                       | TRAVE PRINCIPALE | TRAVE SECONDARIA |
|---------------------------------------|------------------|------------------|
| G1(perm. Str.)kg/m <sup>2</sup>       | 139,7988         | 56,133           |
| G2(perm. Non str.)kg/m <sup>2</sup>   | 161,4            | 161,4            |
| $\psi_{11}$                           | 0,5              | 0,5              |
| Q1                                    | 200              | 200              |
| <b>combinazione(kg/m<sup>2</sup>)</b> | <b>401,1988</b>  | <b>317,533</b>   |

Tab.9 – Combinazione frequente per solaio intermedio

Procediamo analogamente alla linearizzazione del carico e al conseguente calcolo delle frecce delle travi :

|                                 | TRAVE PRINCIPALE   | TRAVE SECONDARIA  |
|---------------------------------|--------------------|-------------------|
| interasse Travi (m)             | 1,8                | 0,6               |
| Fd(kg/m)                        | 722,15784          | 190,5198          |
| luce trave (m)                  | 3,6                | 1,8               |
| E alluminio(kg/m <sup>2</sup> ) | 7000000000         | 7000000000        |
| <b>FRECCIA (m)</b>              | <b>0,006146139</b> | <b>0,00190558</b> |

Tab.10 – Calcolo della freccia

La freccia calcolata deve risultare minore del valore prescritto dalla normativa che in questo caso risulta essere pari a  $L/250$  :

| verifica                             | TRAVE PRINCIPALE |                   | TRAVE SECONDARIA |                   |
|--------------------------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| $l/250(m)$                           | 0,0144           |                   | 0,0072           |                   |
| <b>freccia<math>&lt;l/500</math></b> | 0,0061 $<0,0144$ | <b>VERIFICATA</b> | 0,0019 $<0,0072$ | <b>VERIFICATA</b> |

Tab.11 – Verifica frecce

E' possibile notare come le verifiche siano ampiamente soddisfatte sia per le travi principali ( travi IPE ) sia per le travi secondarie ( travi a T spigolo vivo ).

Una volta trattati gli spostamenti verticali delle membrature, ed effettuate le opportune verifiche, si è passati a studiare il comportamento della struttura sotto le **forze orizzontali**.

Si è fatto riferimento alle **NORME TECNICHE PER LE COSTRUZIONI** del 2008 che trattano le azioni del vento sulla struttura nel capitolo 3.3 e indicano come pressione del vento il valore ottenuto dalla seguente espressione:

$$p = q_b c_e c_p c_d$$

dove:

-  $q_b$  è la pressione cinetica di riferimento in  $N/m^2 = 0,5 \rho v_b^2$

$v_b$  è la velocità di riferimento del vento ( in m/s ) ed è ottenuta mediante la seguente espressione  $v_b = v_{b,0}$  per  $a_s \leq a_0$  , dove  $a_s$  è l'altitudine sul livello del mare ( in m ) del sito ove sorge la costruzione mentre  $a_0$  è un parametro legato alla regione dove sorge la costruzione in esame;

$\rho$  è la densità dell'aria assunta convenzionalmente costante e pari a  $1,25 \text{ kg/m}^3$ ;

-  $c_e$  è il coefficiente di esposizione; dipende dall'altezza  $z$  sul suolo del punto considerato, dalla topografia del terreno, e dalla categoria di esposizione del sito ove sorge la costruzione. In assenza di analisi specifiche che tengano in conto la direzione di

provenienza del vento e l'effettiva scabrezza e topografia del terreno che circonda la costruzione, per altezze sul suolo non maggiori di  $z = 200$  m, esso è dato dalla formula:

$$c_e(z) = k_r^2 c_t \ln(z/z_0) [7 + c_t \ln(z/z_0)] \text{ per } z \geq z_{\min}$$

$$c_e(z) = c_e(z_{\min}) \text{ per } z < z_{\min}$$

-  $c_p$  è il coefficiente di forma ( o coefficiente aerodinamico ), funzione della tipologia e della geometria della costruzione e del suo orientamento rispetto alla direzione del vento. Il suo valore può essere ricavato da dati suffragati da opportuna documentazione o da prove sperimentali in galleria del vento;

-  $c_d$  è il coefficiente dinamico con cui si tiene conto degli effetti riduttivi associati alla non contemporaneità delle massime pressioni locali e degli effetti amplificativi dovuti alle vibrazioni strutturali.

Anche in questo caso è stato utilizzato il foglio di calcolo di excel nel quale sono stati definiti i parametri appena descritti ed è stato effettuato il calcolo della pressione del vento sulla nostra struttura; se ne riporta di seguito la tabella:

| $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) | $a_s$ (m) | $a_0$ (m) | $a_s < a_0$    | $v_{b0}$ (m/s) | $q_{ref}$ (N/m <sup>2</sup> ) | $c_d$ | $c_p$ (sopravento) |
|-----------------------------|-----------|-----------|----------------|----------------|-------------------------------|-------|--------------------|
| 1,25                        | 54        | 750       | $v_b = v_{b0}$ | 25             | 390,625                       | 1     | 0,8                |

| $c_p$ (sottovento) | $k_r$ | $z_0$ (m) | $z_{\min}$ (m) | $z$ (m) | $c_t$ | $c_e$    |
|--------------------|-------|-----------|----------------|---------|-------|----------|
| 0,4                | 0,22  | 0,3       | 8              | 5,4     | 1     | 1,383604 |

Tab.12 – Parametri utili per il calcolo dell'azione da vento

Il valore del carico per le zone sopravvento e sottovento risulta essere pari a :

|            | P (N/m <sup>2</sup> ) |
|------------|-----------------------|
| sopravento | <b>432,3761</b>       |
| sottovento | <b>216,1881</b>       |

Tab.13 – Valori del carico da vento

E' stato deciso a questo punto di andare a considerare l'azione del vento agente sia in una direzione sul nostro edificio (direzione x) e sia sulla direzione ortogonale ad essa (direzione z) in maniera da andare a verificare la situazione più gravosa. Sono stati allora estrapolati i due telai (aventi interasse maggiore) dalla struttura nelle due diverse direzioni e vi è stato applicato il carico appena calcolato in maniera da poter successivamente ottenere lo spostamento laterale dei nostri telai sotto il carico da vento.

Ovviamente è stato ottenuto il carico per metro lineare da applicare ai nostri due telai andando a moltiplicare il valore del carico stesso per l'interasse dei telai considerati :

|            | P (N/m <sup>2</sup> ) | int. Telaio 1 (m) | int. Telaio 2 (m) | P sul telaio 1 (N/m) | P sul telaio 2 (N/m) |
|------------|-----------------------|-------------------|-------------------|----------------------|----------------------|
| sopravento | 432,376               | 1,8               | 3,6               | <b>778,277</b>       | <b>1556,554</b>      |
| sottovento | 216,188               | 1,8               | 3,6               | <b>389,1385</b>      | <b>778,277</b>       |

Tab.14 – Carico da vento agente sui singoli telai

Il calcolo dello spostamento laterale è stato effettuato mediante l'ausilio del programma di calcolo agli elementi finiti Straus7 (come descritto nei paragrafi precedenti); se ne riportano di seguito i telai estrapolati e i risultati ottenuti :

- Telaio 1 disposto lungo la direzione x del sistema di riferimento globale

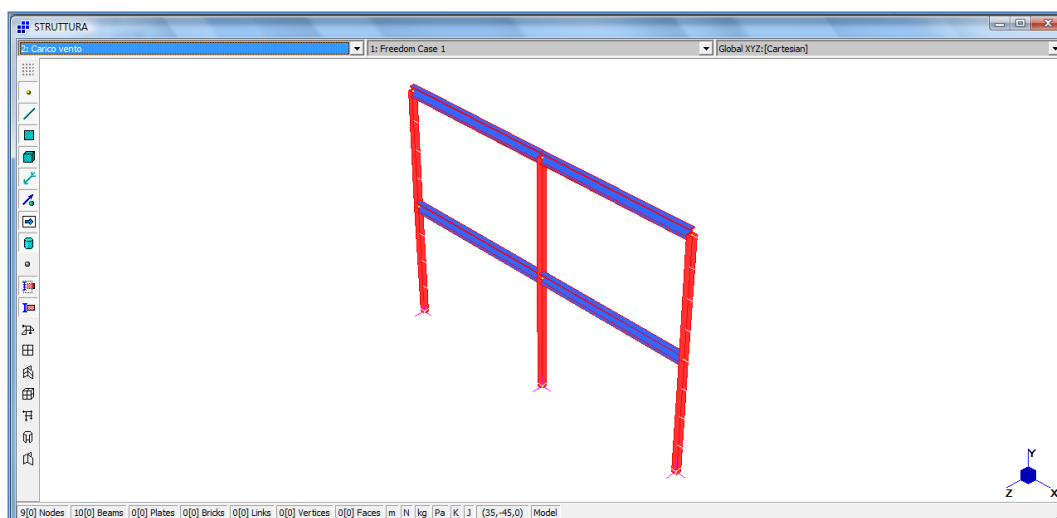
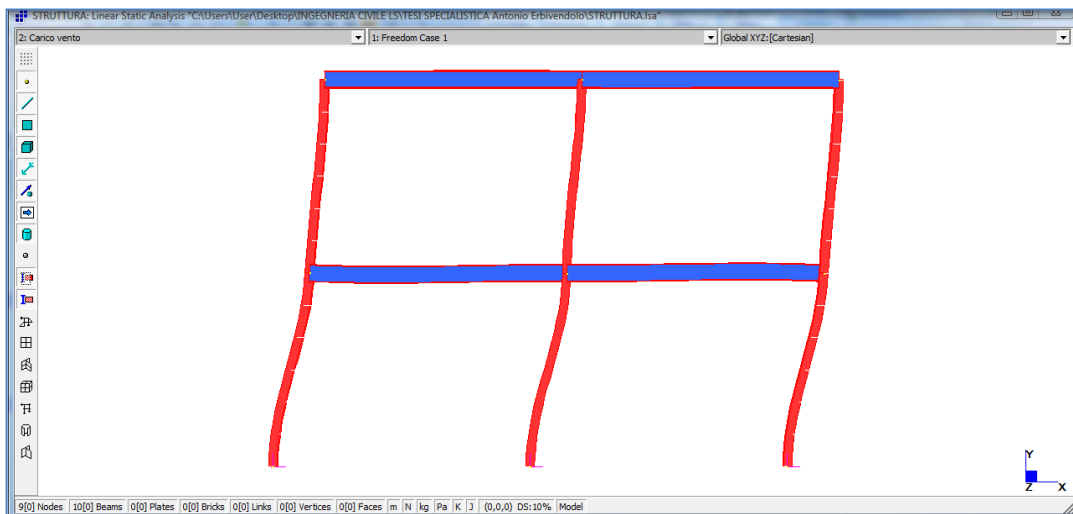


Fig.42 – Telaio disposto in direzione x

- Attribuzione del carico sia lato sopravvento (778 N/m) che lato sottovento (389 N/m) mediante il comando “load and freedom case”
- Risoluzione della struttura mediante un’analisi statica lineare (solver ; “linear static”) che permette di osservare la deformata della struttura sotto il carico da vento applicato



**Fig.43 – Deformata del telaio in direzione x**

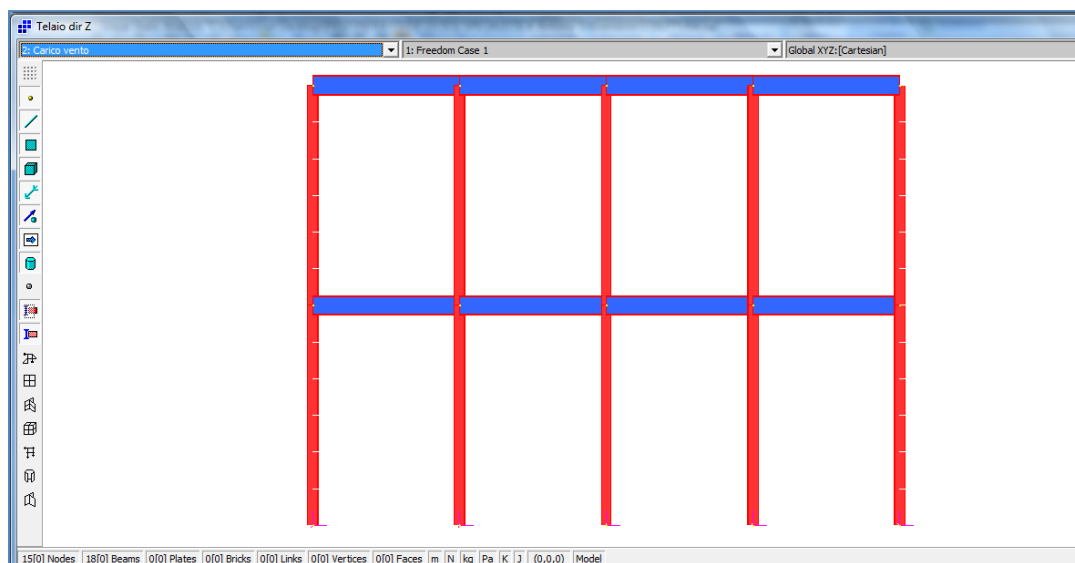
- Lettura dello spostamento laterale in sommità del telaio mediante il comando “peek” (risultato verificato successivamente mediante calcolo a mano)

|                 | <b>Spostamento : <math>\Delta</math> (m)</b> |
|-----------------|--|
| <b>Telaio 1</b> | <b>0,0116</b>                                |

**Tab.15 – Spostamento in direzione x**

- Stesso procedimento seguito per il Telaio 2 estrapolato ortogonalmente al telaio 1 (direzione z) ed al quale sono stati attribuiti il carico sia lato sopravvento (1556 N/m) che lato sottovento (778 N/m)





**Fig.44 – Telaio disposto in direzione z**

- Dopo aver risolto la struttura mediante la solita analisi statica lineare è stato possibile leggere lo spostamento laterale in sommità del telaio mediante il comando “peek”

|          |  |
|----------|--|
|          | <b>Spostamento : <math>\Delta</math> (m)</b> |
| Telaio 2 | <b>0,0129</b>                                |

**Tab.16 – Spostamento in direzione z**

Ottenuti a questo punto i valori degli spostamenti laterali dei due telai si è proceduto a verificare che questi non superino i valori limite imposti dalla normativa; si fa riferimento nuovamente all’EUROCODICE 9 che nel capitolo 4 ( paragrafo 4.2.3 ) impone uno spostamento orizzontale limite pari a  $L/300$ . Nel caso in esame si ha :

|          | $\Delta$ (m) | $\Delta_{lim}$ (m) | $\Delta \leq \Delta_{lim}$ |            |
|----------|--------------|--------------------|----------------------------|------------|
| Telaio 1 | 0,0116       | 0,018              | SI                         | VERIFICATO |
| Telaio 2 | 0,0129       | 0,018              | SI                         | VERIFICATO |

**Tab.17 – Verifica degli spostamenti**

### 3.5.3 Stati limite ultimi (membrature)

Si procede anche per gli stati limite ultimi seguendo quanto riportato nell'Eurocodice 9 che tratta l'argomento in questione nel capitolo 5; si osserva che per poter effettuare le verifiche sui nostri elementi strutturali è stato necessario in primo luogo andare a classificare la sezione trasversale dell'elemento strutturale.

Procederemo trattando per prime le membrature soggette alle azioni di taglio e di momento flettente (quindi le travi IPE e le travi a T) e successivamente le membrature soggette a compressione e instabilità (quindi i pilastri a sezione cava).

Si riportano di seguito i valori delle resistenze caratteristiche e dei coefficienti parziali che sono stati utilizzati nei calcoli per le verifiche delle membrature in esame :

| $f_{0,2}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | $f_u$ (N/mm <sup>2</sup> ) | $\gamma_{M1}$ | $\gamma_{M2}$ | $f_0$ (N/mm <sup>2</sup> ) | $f_a$ (N/mm <sup>2</sup> ) | $f_v$ (N/mm <sup>2</sup> ) | E (N/mm <sup>2</sup> ) |
|--------------------------------|----------------------------|---------------|---------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------|
| 110                            | 205                        | 1,1           | 1,25          | 110                        | 205                        | 63,50852961                | 70000                  |

Tab.18 – Parametri utili per le verifiche agli SLU

Dove :

- $f_{0,2}$  è la resistenza al limite elastico
- $f_u$  è la resistenza ultima
- $f_0$  è la resistenza caratteristica per flessione e compressione
- $f_a$  è la resistenza caratteristica a rottura di una sezione netta a trazione o compressione
- $f_v$  è la resistenza caratteristica a taglio, pari a :  $\frac{f_0}{\sqrt{3}}$
- $\gamma_{M1}$  coefficiente parziale di sicurezza
- $\gamma_{M2}$  coefficiente parziale di sicurezza per la resistenza delle sezioni nette in corrispondenza delle forature dei bulloni

### *CLASSIFICAZIONE DELLE SEZIONI TRASVERSALI*

Come espresso precedentemente, la classificazione delle sezioni è necessaria quando si considera la resistenza delle membrature nei confronti del momento flettente e delle combinazioni di flessione, taglio e sforzo assiale. Nel paragrafo 5.4.2 dell'Eurocodice 9 si vengono allora a definire le seguenti 4 classi di sezioni trasversali :

**Classe 1:** sono quelle sezioni trasversali in grado di sviluppare una cerniera plastica avente la capacità rotazionale richiesta per l'analisi plastica.

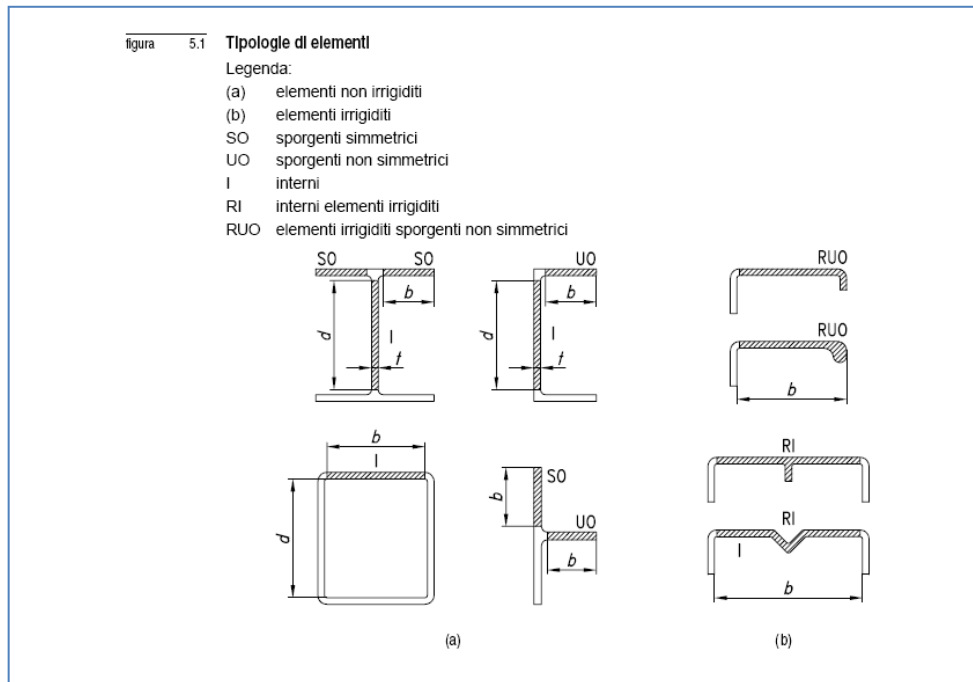
**Classe 2:** sono quelle sezioni trasversali in grado di sviluppare il proprio momento resistente plastico, ma che hanno una capacità rotazionale limitata.

**Classe 3:** sono quelle sezioni trasversali nelle quali le tensioni calcolate nelle fibre esterne compresse della membratura possono raggiungere la resistenza elastica convenzionale, ma l'instabilità locale può impedire lo sviluppo del momento resistente plastico.

**Classe 4:** sono quelle sezioni trasversali per le quali è necessario mettere esplicitamente in conto gli effetti dell'instabilità locale nella determinazione del loro momento resistente o della loro resistenza a compressione.

La classificazione di una sezione trasversale dipende dai rapporti dimensionali di ciascuno dei suoi elementi compressi. Per elemento compresso si intende ogni elemento della sezione trasversale che sia totalmente o parzialmente compresso, per effetto di uno sforzo assiale o di un momento flettente, in presenza della combinazione di carico considerata. I vari elementi compressi di una sezione trasversale (quali anime o flange) possono, in generale, appartenere a classi differenti.

Le sezioni trasversali dovrebbero essere classificate considerando i parametri di snellezza degli elementi che compongono la sezione. In mancanza di un più preciso criterio di classificazione, una sezione trasversale può essere classificata indicando la classe più alta (meno favorevole) tra quelle dei suoi elementi compressi.



**Fig.45 – Tipologie di elementi utilizzati per la classificazione delle sezioni trasversali**

*Trave IPE 240* : costituita da “elementi sporgenti simmetrici” ( SO ) e “elementi interni” ( I ) ; nel paragrafo 5.4.3 viene definito il calcolo del *parametro di snellezza*  $\beta$  che risulta essere pari a :

$$\beta = g * \frac{b}{t} \quad \text{nel caso degli elementi sporgenti simmetrici}$$

$$\beta = 0,4 * \frac{b}{t} \quad \text{nel caso degli elementi interni}$$

dove :

-  $g$  è il coefficiente del gradiente di tensione pari a :

$$g = 0,70 + 0,30\psi \quad \text{per } (1 > \psi > -1)$$

$$g = 0,80/(1 - \psi) \quad \text{per } (\psi \leq 1)$$

dove  $\psi$  è il rapporto tra il valore della tensione in corrispondenza dei bordi dell'elemento piano considerato e la massima tensione di compressione. In generale, l'asse neutro dovrebbe essere assunto come asse neutro elastico, ma nel controllare se una sezione è di classe 2 è lecito fare riferimento all'asse neutro plastico.

-  $b$  è la larghezza di un elemento

-  $t$  è lo spessore dell'elemento

Una volta definito il parametro di snellezza per gli elementi che compongono la sezione bisogna definire i limiti ( $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ ) del parametro stesso al fine di poter ottenere la classe della sezione in esame; questi limiti sono riportati nel prospetto 5.1 del paragrafo 5.4.4 :

| prospetto 5.1 Parametri di snellezza $\beta_1, \beta_2$ e $\beta_3$ |                                     |   |                                     |                                     |   |                                     |                                     |   |                                     |
|---|-------------------------------------|---|-------------------------------------|-------------------------------------|---|-------------------------------------|-------------------------------------|---|-------------------------------------|
| Elementi  | $\beta_1$                           |   |                                     | $\beta_2$                           |   |                                     | $\beta_3$                           |   |                                     |
|   | Trattati termicamente e non saldati | Trattati termicamente e saldati, oppure non trattati termicamente e non saldati | Non trattati termicamente e saldati | Trattati termicamente e non saldati | Trattati termicamente e saldati, oppure non trattati termicamente e non saldati | Non trattati termicamente e saldati | Trattati termicamente e non saldati | Trattati termicamente e saldati, oppure non trattati termicamente e non saldati | Non trattati termicamente e saldati |
| Sporgenti   | 3 $\epsilon$                        | 2,5 $\epsilon$  | 2 $\epsilon$                        | 4,5 $\epsilon$                      | 4 $\epsilon$  | 3 $\epsilon$                        | 6 $\epsilon$                        | 5 $\epsilon$  | 4 $\epsilon$                        |
| Interni   | 11 $\epsilon$                       | 9 $\epsilon$  | 7 $\epsilon$                        | 16 $\epsilon$                       | 13 $\epsilon$   | 11 $\epsilon$                       | 22 $\epsilon$                       | 18 $\epsilon$   | 15 $\epsilon$                       |

Tab.19 – Prospetto 5.1 (vedi Eurocodice 9)

Dove :

$$\epsilon = \sqrt{\frac{250}{f_0}}$$

si ottiene la classe degli elementi appartenenti a membrature inflesse :

-  $\beta \leq \beta_1$  : **classe 1**

-  $\beta_1 \leq \beta \leq \beta_2$  : **classe 2**

-  $\beta_2 \leq \beta \leq \beta_3$  : **classe 3**

-  $\beta_3 \leq \beta$  : **classe 4**

Mentre per gli elementi appartenenti a membrature compresse :

-  $\beta \leq \beta_2$  : **classe 1 o 2**

-  $\beta_2 \leq \beta \leq \beta_3$  : **classe 3**

-  $\beta_3 \leq \beta$  : **classe 4**

Si riportano di seguito i valori dei parametri appena descritti :

|                           | $\beta$     | $\epsilon$  | $\beta_1$   | $\beta_2$  | $\beta_3$  |
|---------------------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------|
| <b>Elementi sporgenti</b> | 5,806122449 | 1,507556723 | 3,768891807 | 6,03022689 | 7,53778361 |
| <b>Elementi interni</b>   | 14,21935484 | 1,507556723 | 13,56801051 | 19,5982374 | 27,136021  |

Tab.20 – Parametro di snellezza e suoi limiti per trave IPE 240

Per cui :

Elementi sporgenti :  $\beta_1 \leq \beta \leq \beta_2$  : **classe 2**

Elementi interni :  $\beta_1 \leq \beta \leq \beta_2$  : **classe 2**

La sezione della trave IPE 240 risulta di **CLASSE 2**.

*Trave a T spigoli vivi* : costituita da “elementi sporgenti simmetrici” ( SO ) e “elementi sporgenti non simmetrici” ( UO ) ; anche in questo caso vengono seguiti i passi descritti precedentemente per il calcolo del *parametro di snellezza*  $\beta$  e dei suoi limiti. I valori ottenuti sono riportati di seguito :

|                            | $\beta$     | $\epsilon$  | $\beta_1$   | $\beta_2$  | $\beta_3$  |
|----------------------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------|
| <b>Elementi simmetrici</b> | 4,045454545 | 1,507556723 | 3,768891807 | 6,03022689 | 7,53778361 |
| <b>Elementi non simm.</b>  | 8,090909091 | 1,507556723 | 3,768891807 | 6,03022689 | 7,53778361 |

Tab.21 – Parametro di snellezza e suoi limiti per trave a T spigoli vivi

In questo caso :

Elementi simmetrici :  $\beta_1 \leq \beta \leq \beta_2$  : **classe 2**

Elementi non simmetrici :  $\beta_3 \leq \beta$  : **classe 4**

Per l'elemento di classe 4 è necessario allora andare a definire un *coefficiente di instabilità locale*  $\rho_c$  descritto nel paragrafo 5.4.5 dell'Eurocodice 9 che ci permette di portare in conto l'effetto di instabilità locale delle membrature di classe 4 riducendo lo spessore della sezione reale.

I valori di  $\rho_c$  sono i seguenti :

Elementi piani sporgenti appartenenti a sezioni trasversali simmetriche :

- trattati termicamente, non saldati:

$$\rho_c = 1,0 \text{ quando } \beta/\varepsilon \leq 6,$$

$$\rho_c = 10/(\beta/\varepsilon) - 24/(\beta/\varepsilon)^2 \text{ quando } \beta/\varepsilon > 6.$$

- trattati termicamente e saldati, non trattati termicamente e non saldati:

$$\rho_c = 1,0 \text{ quando } \beta/\varepsilon \leq 5,$$

$$\rho_c = 9/(\beta/\varepsilon) - 20/(\beta/\varepsilon)^2 \text{ quando } \beta/\varepsilon > 5.$$

- non trattati termicamente e saldati:

$$\rho_c = 1,0 \text{ quando } \beta/\varepsilon \leq 4,$$

$$\rho_c = 8/(\beta/\varepsilon) - 16/(\beta/\varepsilon)^2 \text{ quando } \beta/\varepsilon > 4.$$

Per elementi piani sporgenti appartenenti a sezioni trasversali non simmetriche,  $\rho_c$  è fornito dalle espressioni sopra riportate relative ad elementi piani sporgenti appartenenti a sezioni simmetriche, ma non può essere maggiore di  $120/(\beta/\varepsilon)^2$ .

Il rapporto  $\beta/\varepsilon$  dell'elemento in esame risulta maggiore di 5, quindi il valore del coefficiente di instabilità locale risulta pari a :

$$\rho_c = 9/(\beta/\varepsilon) - 20/(\beta/\varepsilon)^2 = 0,9825 \approx 1$$

*Pilastro a sezione quadrata cava* : costituito unicamente da “elementi interni” ( I ) ; il parametro di snellezza  $\beta$  e i limiti imposti per la classificazione risultano essere pari a :

|                         | $\beta$ | $\varepsilon$ | $\beta_1$ | $\beta_2$  | $\beta_3$   |
|-------------------------|---------|---------------|-----------|------------|-------------|
| <b>Elementi interni</b> | 22      | 1,507557      | 13,56801  | 19,5982374 | 27,13602101 |

**Tab.22 – Parametro di snellezza e suoi limiti per pilastro a sezione quadrata cava**

Elementi interni :  $\beta_2 \leq \beta \leq \beta_3$  : **classe 3**

La sezione del pilastro risulta di **CLASSE 3**.

### **3.5.3.1 Resistenza delle travi**

Le verifiche agli stati limite ultimi delle travi sono riportate nel paragrafo 5.6 dell' Eurocodice 9 nel quale viene precisato che bisogna tenere opportunamente in conto la classe della sezione trasversale e la presenza di eventuali fori nei calcoli.

Le resistenze che vengono generalmente verificate sono :

- taglio
- flessione, includendo, ove necessario, la riduzione indotta dal taglio che accompagna la flessione
- resistenza dell'anima
- instabilità flesso-torsionale



*Resistenza a taglio*

La verifica della resistenza a taglio delle membrature viene riportata nel paragrafo 5.6.3 dell'Eurocodice 9 :

$$V_{Ed} \leq V_{c,Rd}$$

Dove:

$V_{Ed}$  è il valore di progetto della forza di taglio;

$V_{c,Rd}$  è la resistenza di progetto della sezione trasversale, dipendente dalla classificazione della sezione a taglio.

$$V_{c,Rd} = \frac{A_v f_v}{\gamma_{M1}} \text{ per sezioni di classe 1, 2 o 3}$$

$$A_v = \sum_1^N [0,8 D (t_w)_i] \text{ per sezioni con anime che lavorano a taglio}$$

dove :

$N$  è il numero delle anime;

$t_w$  è lo spessore dell'anima;

$D$  è l'altezza globale della sezione misurata tra le superfici esterne delle flange.

Classificazione della sezione a taglio:

anche in questo caso la suscettibilità all'instabilità per taglio è definita mediante il parametro  $\beta = \frac{b}{t}$  . La classificazione si ottiene da :

$$\beta \leq 49 \text{ e classi 1, 2 o 3}$$

$$\beta > 49 \text{ e classe 4}$$

dove :

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{150}{f_v}}$$

$f_v$  è la resistenza caratteristica a taglio espressa in  $N/mm^2$ .

Si riportano allora nella tabella seguente le classi a taglio delle sezioni delle travi utilizzate nell'edificio in esame e il conseguente calcolo della resistenza di progetto delle sezioni stesse :

| SEZIONE A TAGLIO       | $\varepsilon$ | 49 $\varepsilon$ |                         |                     | $A_v (m^2)$ | $V_{c,Rd} (kg)$ |
|------------------------|---------------|------------------|-------------------------|---------------------|-------------|-----------------|
| Trave IPE 240          | 1,536843344   | 75,30532387      | $\beta < 49\varepsilon$ | <b>CLASSE 1,2,3</b> | 0,00119     | 6872,778        |
| Trave a T spigoli vivi | 1,536843344   | 75,30532387      | $\beta < 49\varepsilon$ | <b>CLASSE 1,2,3</b> | 0,00088     | 5080,682        |

**Tab.23 – Classi di resistenza a taglio delle sezioni e resistenze di progetto**

Ottenuto il valore della resistenza di progetto a taglio della sezione (  $V_{c,Rd}$  ), non resta che calcolare il valore di progetto della forza di taglio (  $V_{Ed}$  ) ; a questo scopo si fa riferimento alla combinazione di carico fondamentale agli stati limite ultimi presente nel capitolo 2 ( paragrafo 2.5.3 ) delle NORME TECNICHE PER LE COSTRUZIONI del 2008 :

*Combinazione fondamentale, generalmente impiegata per gli stati limite ultimi ( SLU ):*

$$\gamma_{G1} \times G_1 + \gamma_{G2} \times G_2 + \gamma_P \times P + \gamma_{Q1} \times Q_{k1} + \gamma_{Q2} \times \psi_{02} \times Q_{k2} + \gamma_{Q3} \times \psi_{03} \times Q_{k3} + \dots$$

dove :

-  $\gamma_{G1}, \gamma_{G2}, \gamma_P, \gamma_{Q1}, \gamma_{Q2}, \gamma_{Q3}$  sono i coefficienti parziali di sicurezza ;

-  $\psi_{02}, \psi_{03}$  sono i coefficienti di combinazione.

Nel caso in esame gli unici coefficienti che risultano utili ai fini del calcolo sono :

| $\gamma_{G1}$ | $\gamma_{G2}$ | $\gamma_{Q1}$ | $\gamma_{Q2}$ |
|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 1,1           | 1,5           | 1,5           | 1,5           |

**Tab.24 – Coefficienti parziali**

Si riportano di seguito i valori dei carichi (ottenuti dalla combinazione) agenti sulle travi principali e secondarie del *SOLAIO DI COPERTURA* :

| COPERTURA     | $G_1$ (kg/m <sup>2</sup> ) | $G_2$ (kg/m <sup>2</sup> ) | $Q_{k1}$ (kg/m <sup>2</sup> ) | Comb. Fond. SLU(kg/m <sup>2</sup> ) |
|---------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| Trave IPE 240 | 139,7988                   | 27,55                      | 150                           | <b>420,10368</b>                    |
| Trave a T     | 56,133                     | 27,55                      | 150                           | <b>328,0713</b>                     |

**Tab.25 – Combinazione di carico agli SLU per solaio di copertura**

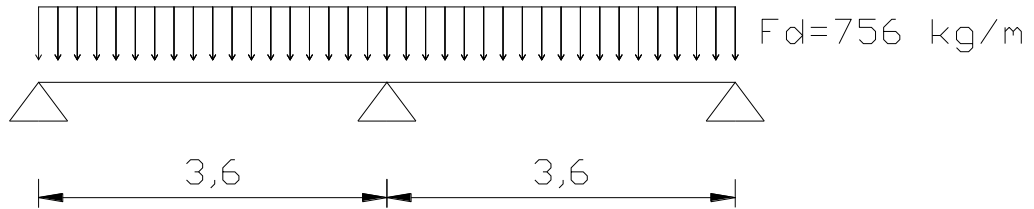
Si procede a questo punto andando a linearizzare i carichi ottenuti moltiplicandoli per l'interasse di influenza delle travi più sollecitate ( che risultano sempre pari a 1,8 metri per le travi IPE e 0,6 metri per le travi a T ), in maniera da ottenere il valore del carico in kg/m :

| COPERTURA     | Comb. Fond. SLU (kg/m <sup>2</sup> ) | Interasse (m) | $F_d$ (kg/m)    |
|---------------|--------------------------------------|---------------|-----------------|
| Trave IPE 240 | 420,10368                            | 1,8           | <b>756,1866</b> |
| Trave a T     | 328,0713                             | 0,6           | <b>196,8428</b> |

**Tab.26 – Combinazione di carico agli SLU per solaio di copertura**

Si risolve ora lo schema statico per le due tipologie di travi e si ottengono così sia i valori di taglio che di momento flettente che sollecitano le membrature in esame.

- schema statico copertura trave IPE 240 ( trave su 3 appoggi ) direzione x



Anche in questo caso si è utilizzato il programma di calcolo STRAUS 7 per ottenere i risultati cercati; risultati che sono stati successivamente confermati da un calcolo a mano:

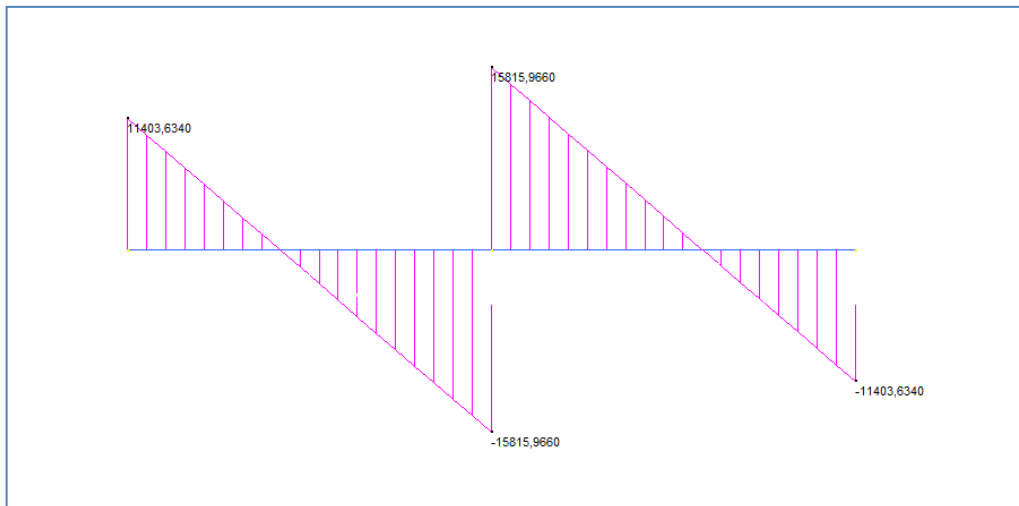


Fig.46 – Diagramma del taglio agente sulla trave di copertura IPE 240

Il taglio sollecitante massimo si viene ad avere sull'appoggio centrale ed assume valore pari a :  $T_{\max} = 0,625 F_d * L \approx 1700 \text{ kg}$  ; la verifica risulta soddisfatta se questo valore è minore della resistenza di progetto precedentemente calcolata :

| $V_{c,Rd} \text{ (kg)}$ | $V_{ed} \text{ (kg)}$ | $V_{ed} < V_{c,Rd}$ |
|-------------------------|-----------------------|---------------------|
| 6872,778                | 1701,42               | <b>VERIFICATA</b>   |

Tab.27 – Verifica del taglio sulla trave di copertura IPE 240

La verifica risulta soddisfatta per la trave di copertura più sollecitata del telaio lungo la direzione x.

- schema statico copertura trave a T ( trave su 5 appoggi ) direzione z

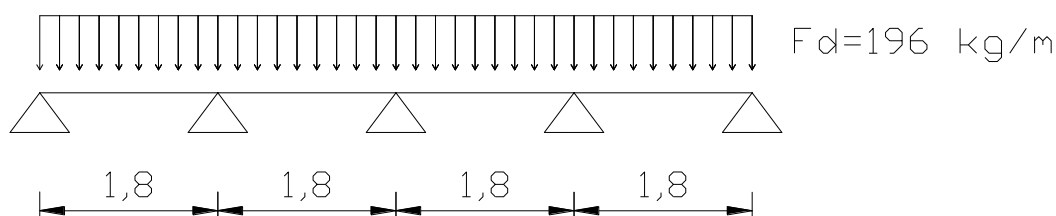


Diagramma del taglio inerente lo schema statico appena rappresentato :

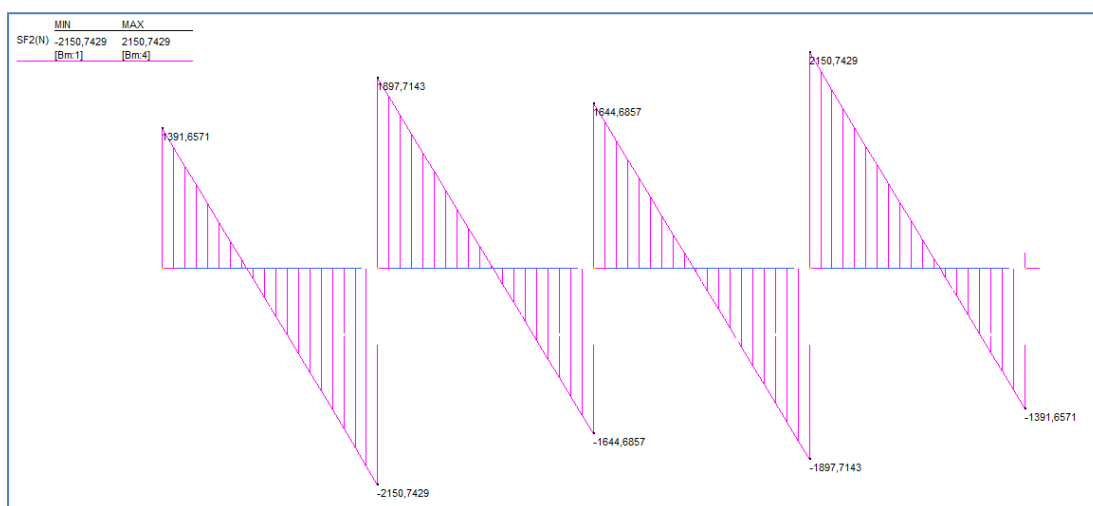


Fig.47 – Diagramma del taglio agente sulla trave di copertura a T

Il taglio sollecitante massimo si viene ad avere sul secondo e sul quarto appoggio e assume valore pari a  $T_{max} = 0,607 F_d * L \approx 215 \text{ kg}$  ; la verifica risulta soddisfatta se questo valore è minore della resistenza di progetto precedentemente calcolata :

| $V_{c,Rd} \text{ (kg)}$ | $V_{ed} \text{ (kg)}$ | $V_{ed} < V_{c,Rd}$ |
|-------------------------|-----------------------|---------------------|
| 5080,682                | 215,0704              | <b>VERIFICATA</b>   |

Tab.28 – Verifica del taglio sulla trave di copertura a T

La verifica risulta soddisfatta per la trave di copertura più sollecitata del telaio lungo la direzione z.

Si ripete lo stesso procedimento riportando il valore dei carichi (ottenuti dalla combinazione fondamentale) agenti sulle travi principali e secondarie del *SOLAIO INTERMEDIO* :

| INTERMEDIO    | $G_1$ (kg/m <sup>2</sup> ) | $G_2$ (kg/m <sup>2</sup> ) | $Q_{k1}$ (kg/m <sup>2</sup> ) | Comb. Fond. SLU(kg/m <sup>2</sup> ) |
|---------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| Trave IPE 240 | 139,7988                   | 161,4                      | 200                           | <b>695,87868</b>                    |
| Trave a T     | 56,133                     | 161,4                      | 200                           | <b>603,8463</b>                     |

Tab.29 – Combinazione di carico agli SLU per solaio intermedio

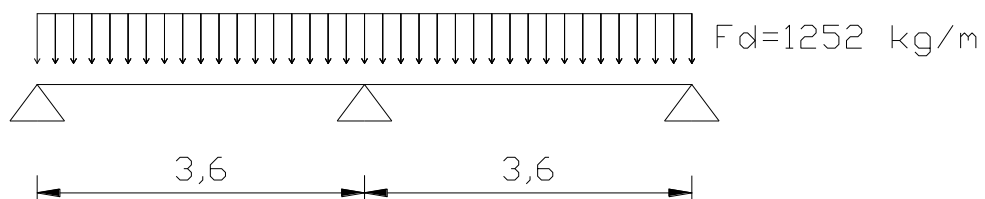
Si linearizzano i carichi nella stessa maniera precedente andando così ad ottenere i kg/m:

| INTERMEDIO    | Comb. Fond. SLU (kg/m <sup>2</sup> ) | Interasse (m) | $F_d$ (kg/m)    |
|---------------|--------------------------------------|---------------|-----------------|
| Trave IPE 240 | 695,87868                            | 1,8           | <b>1252,582</b> |
| Trave a T     | 603,8463                             | 0,6           | <b>362,3068</b> |

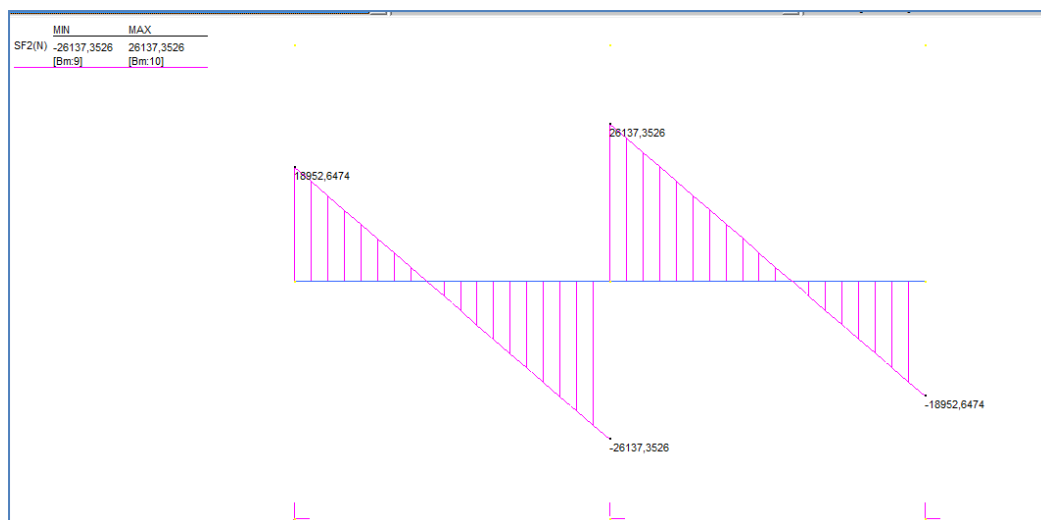
Tab.30 – Combinazione di carico agli SLU per solaio intermedio

Si risolvono anche qui gli schemi statici al fine di ottenere i valori dei tagli sollecitanti :

- schema statico intermedio trave IPE 240 ( trave su 3 appoggi ) direzione x



Il diagramma del taglio che si ottiene è il seguente :



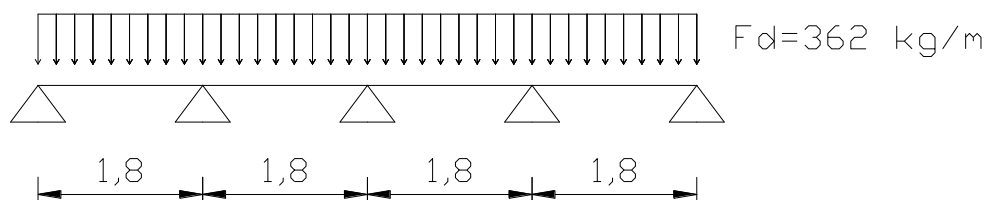
**Fig.48 – Diagramma del taglio agente sulla trave intermedia IPE 240**

Il valore del taglio massimo risulta di circa **2800 kg** ; la verifica risulta soddisfatta se questo valore è minore della resistenza di progetto precedentemente calcolata :

| $V_{c,Rd}$ (kg) | $V_{ed}$ (kg) | $V_{ed} < V_{c,Rd}$ |
|-----------------|---------------|---------------------|
| 6872,778        | 2818,309      | <b>VERIFICATA</b>   |

**Tab.31 – Verifica del taglio sulla trave intermedia IPE 240**

- schema statico intermedio trave a T ( trave su 5 appoggi ) direzione z :



Si ottiene il diagramma del taglio riportato in Fig.49. Il valore del taglio massimo risulta di circa **400 kg** ; la verifica risulta soddisfatta se questo valore è minore della resistenza di progetto precedentemente calcolata :

| $V_{c,Rd}$ (kg) | $V_{ed}$ (kg) | $V_{ed} < V_{c,Rd}$ |
|-----------------|---------------|---------------------|
| 5080,682        | 395,8575      | <b>VERIFICATA</b>   |

Tab.32 – Verifica del taglio sulla trave intermedia a T

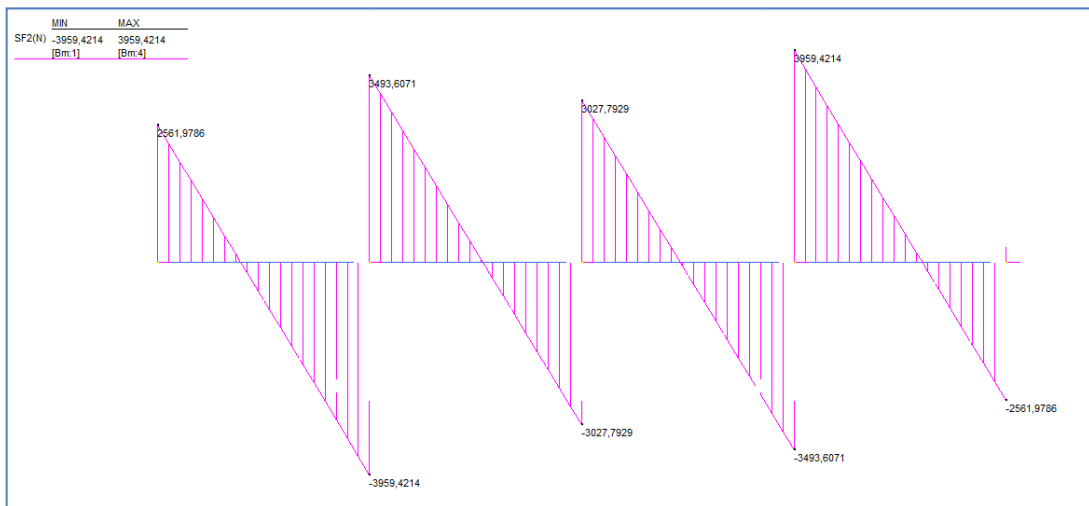


Fig.49 – Diagramma del taglio agente sulla trave intermedia a T

### *Resistenza a flessione*

La verifica della resistenza a flessione delle membrature viene riportata nel paragrafo 5.6.2 dell'Eurocodice 9 :

$$M_{Ed} \leq \min ( M_{c,Rd} ; M_{a,Rd} )$$



Questa condizione ci dice che il valore del momento resistente di progetto a flessione  $M_{Rd}$  dovrebbe essere il minore tra  $M_{a,Rd}$  e  $M_{c,Rd}$  ; dove :

$$M_{a,Rd} = \frac{f_a * W_{net}}{\gamma_{M2}} \text{ relativo ad una sezione netta ;}$$

$$M_{c,Rd} = \frac{f_c * W_{el} * \alpha}{\gamma_{M1}} \text{ relativo ad una generica sezione trasversale ;}$$

$$\alpha = \text{fattore di forma} = \frac{W_{pl}}{W_{el}} \text{ per la classe 2 ;}$$

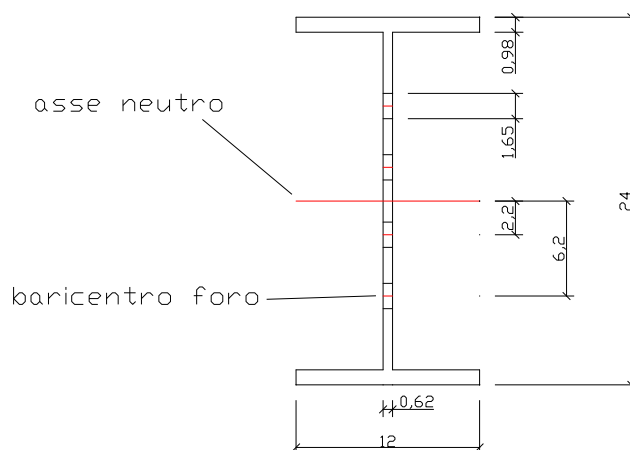
$W_{el}$  = modulo elastico della sezione lorda ;

$W_{pl}$  = modulo plastico della sezione lorda ;

$W_{net}$  = modulo elastico della sezione netta ( sezione alla quale sono stati detratti i fori ) ;

per il calcolo del modulo elastico della sezione netta sono state utilizzate le sezioni delle travi cui sono stati apportati il numero maggiore di fori ; se ne riportano di seguito le sezioni stesse con le distanze espresse in cm :

- TRAVE IPE 240 con 4 fori da 1,65 cm :



**Fig.50 – sezione netta trave IPE 240**

- TRAVE A T SPIGOLI VIVI con 1 foro da 1,25 cm :

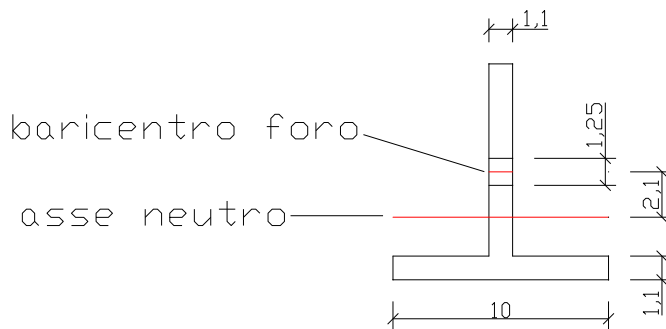


Fig.51 – Sezione netta trave a T spigolo vivo

Si riportano di seguito i valori dei parametri utilizzati per il calcolo dei diversi moduli di resistenza (elastico, plastico e netto) ; ovviamente risulta necessario calcolare i diversi momenti d'inerzia delle sezioni sia in assenza che in presenza dei fori :

- TRAVE IPE 240 :

| MOMENTO D'INERZIA IN ASSENZA DI FORI |            |
|--------------------------------------|------------|
| $I(m^4)$                             | 3,671 E-05 |

Per trovare il momento d'inerzia netto si effettua il calcolo del momento d'inerzia dell'anima (cui viene sottratto quello dei fori) e si somma infine al momento d'inerzia delle due ali :

| $I_{ala} (m^4)$ | $I_{foro1} (m^4)$ | $I_{foro2} (m^4)$ | $I_{metà\ anima} (m^4)$ | $I_{netto} (m^4)$ |
|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------------|-------------------|
| 1,55891 E-05    | 5,18341 E-08      | 3,95562 E-07      | 2,76576 E-06            | 3,5815 E-05       |

Tab.33 – Valori dei momenti d'inerzia in assenza o in presenza di fori (trave IPE 240)

il modulo elastico netto risulta allora pari a :

$$W_{net} = \frac{I_{netto}}{y} = 0,000298 \text{ m}^3$$

Gli altri due moduli di resistenza invece risultano pari a :

| $W_{el} (m^3)$ | $W_{pl} (m^3)$ |
|----------------|----------------|
| 0,00030591     | 0,00034601     |

Tab.34 – Valori dei moduli di resistenza calcolati (trave IPE 240)

Calcolando anche il valore del parametro  $\alpha$  si riescono ad ottenere i due momenti resistenti da confrontare :

|               | $\alpha=(W_{pl}/W_{el})$ | $M_{a,Rd} (kg*m)$ | $M_{c,Rd} (kg*m)$ |
|---------------|--------------------------|-------------------|-------------------|
| Trave IPE 240 | 1,131064017              | 4894,70028        | 3460,08248        |

Tab.35 – Valore dei momenti resistenti (trave IPE 240)

Dai risultati ottenuti è possibile dedurre che il momento resistente di progetto a flessione per la trave IPE 240 è  $M_{c,Rd}$  :

|                       | MOMENTO RESISTENTE | (kg*m)     |
|-----------------------|--------------------|------------|
| $M_{a,Rd} > M_{c,Rd}$ | $M_{c,Rd}$         | 3460,08248 |

Tab.36 – Momento resistente di progetto (trave IPE 240)

- TRAVE A T SPIGOLI VIVI :

| MOMENTO D'INERZIA IN ASSENZA DI FORI |             |
|--------------------------------------|-------------|
| $I(m^4)$                             | 1,9523 E-06 |

Anche in questo caso si riporta il valore del momento d'inerzia netto omettendo i calcoli effettuati per non appesantire ulteriormente la relazione, ma il tutto è riportato nel foglio di calcolo excel :

| $I_{ala} (m^4)$ | $I_{anima} (m^4)$ | $I_{netto} (m^4)$ |
|-----------------|-------------------|-------------------|
| 6,18567 E-07    | 7,9122 E-07       | 1,40979 E-06      |

**Tab.37 – Valori dei momenti d’inerzia in assenza o in presenza di fori (trave a T)**

il modulo elastico netto risulta allora pari a :

$$W_{net} = \frac{I_{netto}}{y} = 0,0000198 m^3$$

si riportano anche i valori degli altri due moduli di resistenza :

| $W_{el} (m^3)$ | $W_{pl} (m^3)$ |
|----------------|----------------|
| 2,7497 E-05    | 0,00005195     |

**Tab.38 – Valori dei moduli di resistenza calcolati (trave a T)**

Il valore del parametro  $\alpha$  ci permette di ottenere i due momenti resistenti da confrontare:

|           | $\alpha=(W_{pl}/W_{el})$ | $M_{a,Rd} (kg*m)$ | $M_{c,Rd} (kg*m)$ |
|-----------|--------------------------|-------------------|-------------------|
| Trave a T | 1,889297213              | 325,640818        | 519,5             |

**Tab.39 – Valore dei momenti resistenti (trave a T)**

dai risultati ottenuti è possibile dedurre che il momento resistente di progetto a flessione per la trave a T spigoli vivi è  $M_{a,Rd}$  :

|                       | <b>MOMENTO RESISTENTE</b> | <b>(kg*m)</b>      |
|-----------------------|---------------------------|--------------------|
| $M_{a,Rd} < M_{c,Rd}$ | $M_{a,Rd}$                | <b>325,6408181</b> |

**Tab.40 – Momento resistente di progetto (trave a T)**

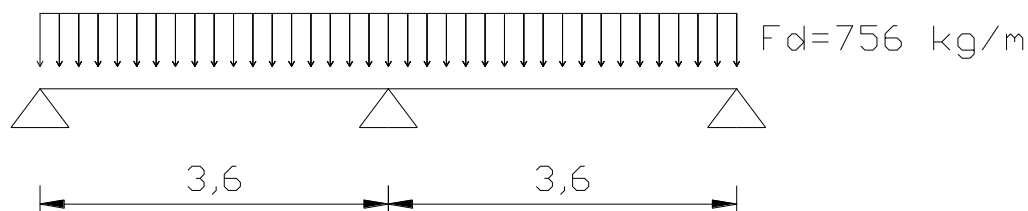
Ottenuto il valore della resistenza di progetto a flessione della sezione ( $M_{Rd}$ ), non resta che calcolare il valore di progetto del momento flettente ( $M_{Ed}$ ). Come fatto precedentemente per il taglio si fa riferimento alla combinazione di carico fondamentale agli stati limite ultimi; di conseguenza si omette di riportare i passaggi eseguiti nel paragrafo precedente ma si ricorda esclusivamente il valore del carico linearizzato:

| COPERTURA     | Comb. Fond. SLU ( $\text{kg/m}^2$ ) | Interasse (m) | $F_d(\text{kg/m})$ |
|---------------|-------------------------------------|---------------|--------------------|
| Trave IPE 240 | 420,10368                           | 1,8           | <b>756,1866</b>    |
| Trave a T     | 328,0713                            | 0,6           | <b>196,8428</b>    |

Tab.41 – Combinazione di carico agli SLU per solaio di copertura

Anche in questo caso i riportano gli schemi statici per le due tipologie di travi:

- schema statico copertura trave IPE 240 (trave su 3 appoggi) direzione x



Il diagramma del momento flettente che si ottiene viene di seguito riportato:

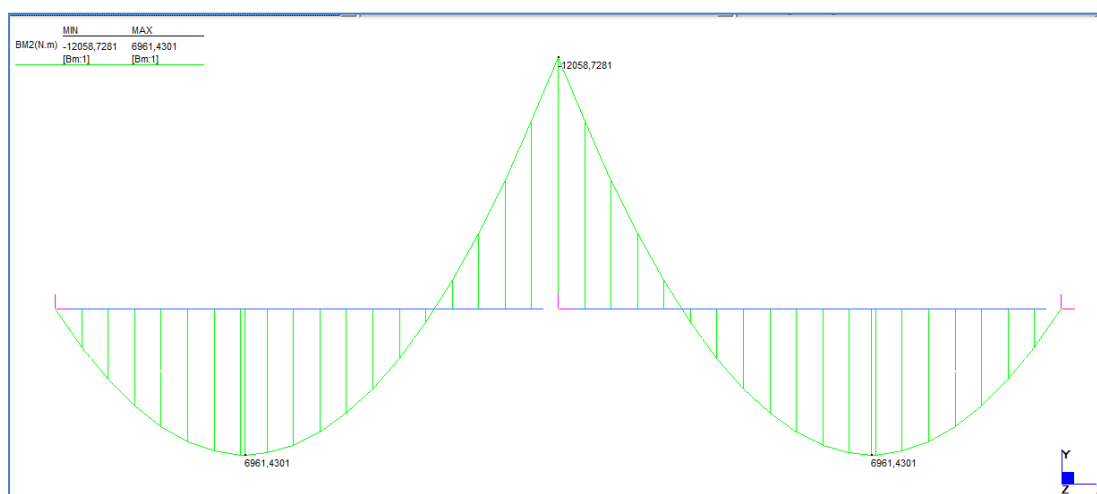


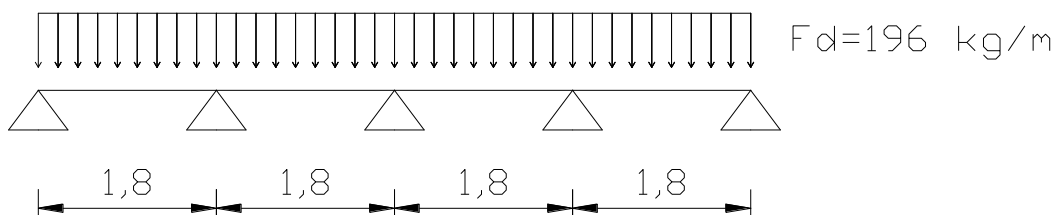
Fig.52 – Diagramma del momento agente sulla trave di copertura IPE 240

Il momento sollecitante massimo negativo si viene ad avere sull'appoggio centrale ed assume valore pari a :  $M_{\max}^- = - \frac{F_d \cdot L^2}{8} \approx 1200 \text{ kg} \cdot \text{m}$  ; mentre il momento massimo positivo in campata assume valore pari a :  $M_{\max}^+ = \frac{F_d \cdot L^2}{14,3} \approx 680 \text{ kg} \cdot \text{m}$ . La verifica risulta soddisfatta se questo valore è minore della resistenza di progetto precedentemente calcolata :

| $M_{ed}^- \text{ (kg} \cdot \text{m)}$ | $M_{ed}^+ \text{ (kg} \cdot \text{m)}$ | $M_{c,Rd} \text{ (kg} \cdot \text{m)}$ | $M_{ed} < M_{Rd}$ |
|--|--|--|-------------------|
| 1225,022331                            | 685,3271781                            | 3460,08248                             | VERIFICATA        |

Tab.42 – Verifica a flessione della trave di copertura IPE 240

- schema statico copertura trave a T ( trave su 5 appoggi ) direzione z :



Si riporta di seguito il diagramma del momento flettente :

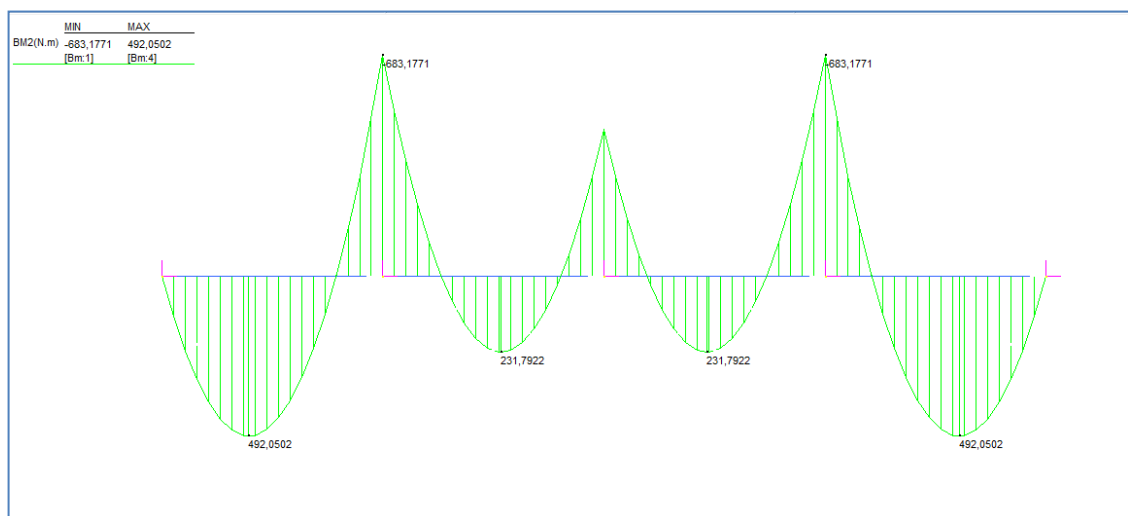


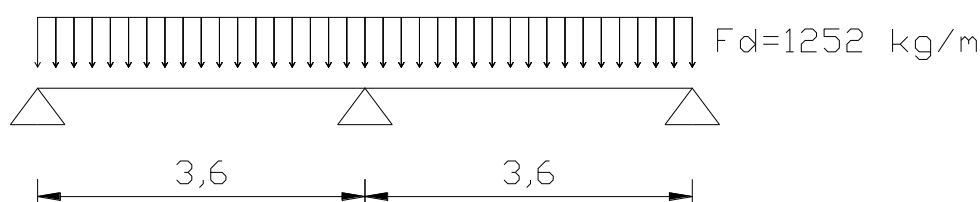
Fig.53 – Diagramma del momento agente sulla trave di copertura a T

Il momento sollecitante massimo negativo si viene ad avere sul secondo e sul quarto appoggio ed assume valore pari a :  $M_{\max}^- = - \frac{F_d * L^2}{9,34} \approx 68 \text{ kg*m}$  ; mentre il momento massimo positivo assume valore pari a :  $M_{\max}^+ = \frac{F_d * L^2}{13} \approx 49 \text{ kg*m}$ . La verifica risulta soddisfatta se questo valore è minore della resistenza di progetto precedentemente calcolata :

| $M_{ed}^- \text{ (kg*m)}$ | $M_{ed}^+ \text{ (kg*m)}$ | $M_{a,Rd} \text{ (kg*m)}$ | $M_{ed} < M_{Rd}$ |
|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------|
| 68,28379                  | 49,05927                  | 325,64                    | VERIFICATA        |

Tab.43 – Verifica a flessione della trave di copertura a T

- schema statico intermedio trave IPE 240 ( trave su 3 appoggi ) direzione x :



Il diagramma del momento flettente viene di seguito riportato :

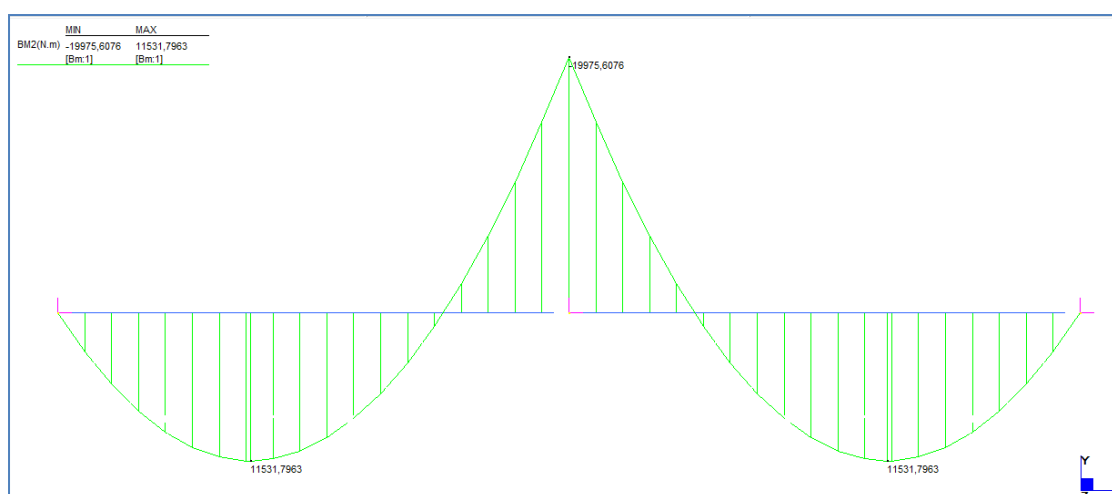


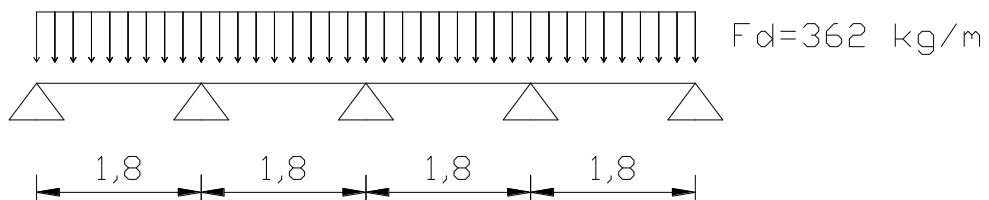
Fig.54 – Diagramma del momento agente sulla trave intermedia IPE 240

Si riportano direttamente nella tabella seguente i valori massimi dei momenti positivi e negativi ottenuti, con conseguente verifica :

| $M_{ed}^-$ (kg*m) | $M_{ed}^+$ (kg*m) | $M_{c,Rd}$ (kg*m) | $M_{ed} < M_{Rd}$ |
|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 2029,1822         | 1135,206842       | 3460,08248        | VERIFICATA        |

Tab.44 – Verifica a flessione della trave intermedia IPE 240

- schema statico intermedio trave a T ( trave su 5 appoggi ) direzione z



Il diagramma del momento flettente viene di seguito riportato :

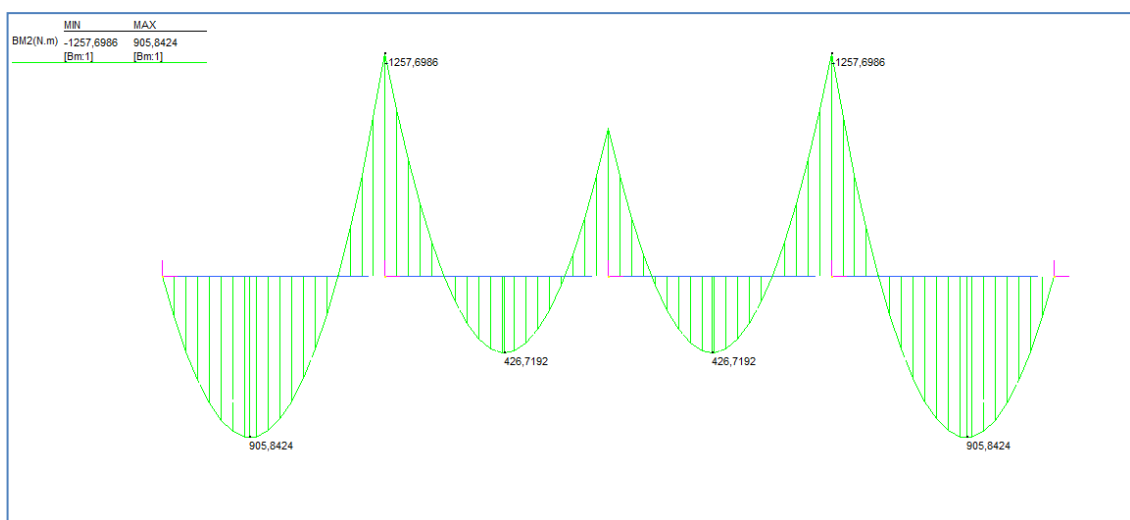


Fig.55 – Diagramma del momento agente sulla trave intermedia a T



Anche in questo caso si riportano direttamente nella tabella i valori dei momenti massimi sia positivi che negativi e se ne effettua la verifica :

| $M_{ed}^-$ (kg*m) | $M_{ed}^+$ (kg*m) | $M_{a,Rd}$ (kg*m) | $M_{ed} < M_{Rd}$ |
|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 125,6827          | 90,2982           | 325,64            | VERIFICATA        |

**Tab.45 – Verifica a flessione della trave intermedia a T**

Per tutti i casi considerati le verifiche a flessione risultano pienamente soddisfatte.

E' possibile osservare che nel capitolo 5 ( paragrafo 5.6.4 ) dell'Eurocodice 9 viene riportato come sia possibile trascurare la combinazione di flessione e taglio in determinati casi : è noto che il momento resistente teorico di una sezione trasversale è ridotto dalla presenza del taglio ; questa riduzione risulta trascurabile quando la forza di taglio non supera la metà della resistenza a taglio.

Nel caso in esame si viene a verificare proprio la condizione appena riportata, quindi si viene a trascurare la riduzione che il taglio apporta al momento resistente.

#### *Resistenza dell'anima*

Nel caso in esame viene trascurata questa tipologia di verifica in quanto pertinente al progetto di anime soggette a forze localizzate indotte da carichi concentrati.

#### *Instabilità flessio-torsionale*

Anche questa tipologia di verifica viene trascurata in quanto le travi principali risultano completamente vincolate nei confronti degli spostamenti laterali per tutta la loro lunghezza. Questo avviene grazie alla presenza delle travi secondarie che nello specifico caso non risultano appoggiate alle travi principali, bensì, essendo collegate ad esse tramite bullonatura in un collegamento a cerniera ogni 60 cm, vengono a costituire vincolo agli spostamenti laterali per le travi stesse.

### 3.5.3.2 Resistenza dei pilastri

L'eurocodice 9 tratta nel capitolo 5, paragrafo 5.8, la resistenza delle membrature compresse; in particolare indica come modalità di collasso delle membrature soggette a compressione assiale le seguenti :

- Instabilità flessionale
- Instabilità torsionale
- Schiacciamento locale

Prima di procedere alle verifiche delle resistenze ricordiamo che la sezione della membratura in esame soggetta a compressione assiale risulta appartenere alla **classe 3**.

#### *Instabilità flessionale*

Come riportato nel paragrafo 5.8.3 dell'Eurocodice 9, la verifica all'instabilità flessionale deve soddisfare la seguente condizione :

$$N_{Ed} \leq N_{b,Rd}$$

dove :

$N_{Ed}$  è il valore di progetto della forza di compressione ;

$N_{b,Rd} = \frac{f_s \cdot A}{\gamma_{M1}}$  è la resistenza di progetto all'instabilità ;

$A$  è l'area lorda della sezione ;

$f_s$  è la tensione di instabilità per instabilità flessionale o torsionale.

Il calcolo della tensione di instabilità  $f_s$  è riportato nel paragrafo 5.8.4 dell'Eurocodice 9 ; la relazione risulta la seguente :

$$f_s = \chi \eta k_1 k_2 f_0$$

dove :

- $k_1$  è un fattore che consente di portare in conto l'asimmetria della sezione trasversale ;

-  $k_2$  è un fattore che consente di portare in conto gli effetti dell'indebolimento dovuto alle saldature ;

-  $\eta$  è il fattore che consente di portare in conto una qualsiasi sezione efficace, ridotta rispetto a quella lorda per effetto della presenza di elementi di classe 4 ;

-  $\chi$  è il fattore di riduzione per instabilità ( parametro che porta in gioco la snellezza ) :

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

con :

$$\Phi = 0,5 [1 + \alpha(\lambda - \lambda_0) + \lambda^2] ;$$

$\alpha$  è un fattore di imperfezione ;

$\lambda_0$  è il limite del piano orizzontale ;

$$\lambda = \sqrt{\frac{A \eta f_0}{N_{cr}}} ;$$

dove  $N_{cr} = \frac{\pi^2 E J}{l_0^2}$  è il carico critico elastico per l'asse considerato.

Il valore del carico critico, e dei parametri che compaiono nell'equazione, risulta pari a :

| E (N/mm <sup>2</sup> ) | J (m <sup>4</sup> ) | l <sub>0</sub> | N <sub>cr</sub> (kg) |
|------------------------|---------------------|----------------|----------------------|
| 70000                  | 5,07917 E-06        | 5,4            | 12021,6002           |

Tab.46 – Valore del carico critico

grazie ad esso è stato possibile calcolare il parametro  $\lambda$  :

| A ( m <sup>2</sup> ) | f <sub>0</sub> (N/mm <sup>2</sup> ) | η | N <sub>cr</sub> (kg) | λ        |
|----------------------|-------------------------------------|---|----------------------|----------|
| 0,0024               | 110                                 | 1 | 12021,6002           | 1,481907 |

Tab.47 – Coefficienti per il calcolo di λ

e con λ il parametro Φ :

| α    | λ <sub>0</sub> | λ        | φ        |
|------|----------------|----------|----------|
| 0,32 | 0              | 1,481907 | 1,835129 |

Tab.48 – Coefficienti per il calcolo di φ

Si riesce così ad ottenere il parametro χ con il quale si arriva a calcolare la tensione di instabilità f<sub>s</sub> :

| η | χ          | k <sub>1</sub> | k <sub>2</sub> | f <sub>s</sub> |
|---|------------|----------------|----------------|----------------|
| 1 | 0,34275259 | 1              | 1              | 3770278,5      |

Tab.49 – Calcolo della tensione di instabilità

La resistenza di progetto all'instabilità della nostra membratura soggetta a forze di compressione risulta pari a :

$$N_{b,Rd} = \frac{f_s * A}{\gamma_{M1}} = 8226 \text{ kg}$$

Non resta ora che calcolare il valore di progetto della sollecitazione ( N<sub>Ed</sub> ). Come fatto precedentemente, si fa riferimento alla combinazione di carico fondamentale agli stati limite ultimi ; di conseguenza si ricordano esclusivamente i valori dei carichi agenti sia sulla copertura che sull'intermedio in kg/m<sup>2</sup> .

*COPERTURA* :

| $G_1$ (kg/m <sup>2</sup> ) | $G_2$ (kg/m <sup>2</sup> ) | $Q_{k1}$ (kg/m <sup>2</sup> ) | Comb. Fond. SLU(kg/m <sup>2</sup> ) |
|----------------------------|----------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| 139,7988                   | 27,55                      | 150                           | 420,10368                           |

**Tab.50 – Combinazione di carico agli SLU per solaio di copertura**

*INTERMEDIO* :

| $G_1$ (kg/m <sup>2</sup> ) | $G_2$ (kg/m <sup>2</sup> ) | $Q_{k1}$ (kg/m <sup>2</sup> ) | Comb. Fond. SLU(kg/m <sup>2</sup> ) |
|----------------------------|----------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| 139,7988                   | 161,4                      | 200                           | 695,87868                           |

**Tab.51 – Combinazione di carico agli SLU per solaio intermedio**

Si procede verificando esclusivamente i pilastri più sollecitati del piano superiore e del piano inferiore che ovviamente saranno i pilastri sottoposti ad un'area d'influenza maggiore ( pilastri centrali ) :

| <b>COPERTURA</b>         | <b>Area influenza (m<sup>2</sup>)</b> | <b>N<sub>ed</sub> (kg)</b> | <b>N<sub>ed</sub> &lt; N<sub>b,Rd</sub></b> |
|--------------------------|---------------------------------------|----------------------------|---|
| Pilastro più sollecitato | 6,48                                  | 2739,768                   | <b>VERIFICATO</b>                           |

**Tab.52 – Verifica ad instabilità del pilastro più sollecitato del piano superiore**

Sul pilastro del piano inferiore andranno ad agire anche i carichi del piano superiore, di conseguenza la sollecitazione sarà notevolmente maggiore rispetto al precedente :

| <b>INTERMEDIO</b>        | <b>Area influenza (m<sup>2</sup>)</b> | <b>N<sub>ed</sub> (kg)</b> | <b>N<sub>ed</sub> &lt; N<sub>b,Rd</sub></b> |
|--------------------------|---------------------------------------|----------------------------|---|
| Pilastro più sollecitato | 6,48                                  | 7266,558                   | <b>VERIFICATO</b>                           |

**Tab.53 – Verifica ad instabilità del pilastro più sollecitato del piano intermedio**

Le verifiche risultano soddisfatte per i pilastri più sollecitati, di conseguenza lo saranno anche per tutti gli altri pilastri di cui omettiamo i calcoli effettuati.

### *Instabilità torsionale*

Il paragrafo 5.8.5 dell'Eurocodice 9 ci dice che la verifica all'instabilità torsionale può essere ignorata nei seguenti casi :

- sezioni cave chiuse ;
- sezioni a I doppiamente simmetriche ;
- sezioni composte interamente da elementi sporgenti disposti in direzione radiale.

Poiché la sezione della membratura in esame è cava chiusa, se ne omette la verifica all'instabilità torsionale.

### *Schiacciamento locale*

Questa tipologia di verifica risulta necessaria solo in presenza di puntoni tozzi che sono significativamente indeboliti localmente da fori o saldature ; la membratura in esame non rientra in questa casistica di conseguenza se ne omette la verifica.

Si osserva come il pilastro dell'edificio in esame sia soggetto oltre che a compressione assiale anche a flessione, di conseguenza si procede nell'effettuare una ulteriore verifica che tenga conto del contributo di entrambe le sollecitazioni al fine di garantire la stabilità della membratura.

### *Flessione e compressione assiale*

Per membrature soggette a flessione e compressione assiale la formula di interazione viene riportata nel paragrafo 5.9.4 dell'Eurocodice 9 :

- sezioni trasversali cave e tubi :

$$\left( \frac{N_{Ed}}{\chi \omega_x N_{Rd}} \right)^{\psi_c} + \frac{1}{\omega_0} \left[ \left( \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} \right)^{1,7} + \left( \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} \right)^{1,7} \right]^{0,6} \leq 1,00$$

l'espressione può essere adoperata assumendo  $\psi_c = 0,8$ .

I nuovi parametri che compaiono nell'espressione sono riportati di seguito :

$M_{y,Ed}$  ,  $M_{z,Ed}$  momento flettente intorno all'asse y oppure z ;

$$M_{y,Rd} = \frac{\alpha_y W_y f_0}{\gamma_{M1}} ;$$

$$M_{z,Rd} = \frac{\alpha_z W_z f_0}{\gamma_{M1}} ;$$

$\alpha_y$  ,  $\alpha_z$  sono i fattori di forma ( per la CLASSE 3 sono pari a 1 ) ;

$\omega_x$  ,  $\omega_0$  sono i fattori di addolcimento.

Si riportano di seguito i valori dei parametri appena elencati :

- COPERTURA :

| $\omega_x$ | $\omega_0$ | $\psi_c$ | $\alpha_y$ | $\alpha_z$ | $M_{y,ed} \text{ (kg*m)}$ | $M_{z,ed} \text{ (kg*m)}$ |
|------------|------------|----------|------------|------------|---------------------------|---------------------------|
| 1          | 1          | 0,8      | 1          | 1          | 58                        | 125                       |

**Tab.54 – Parametri per la verifica di compressione e flessione assiale**

con i moduli di resistenza si calcolano anche i momenti resistenti :

| $W_y \text{ (m}^3\text{)}$ | $W_z \text{ (m}^3\text{)}$ | $M_{y,Rd} \text{ (kg*m)}$ | $M_{z,Rd} \text{ (kg*m)}$ |
|----------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 0,0000847                  | 0,0000847                  | 847                       | 847                       |

**Tab.55 – Momenti resistenti**

Gli altri parametri presenti nell'espressione assumono i seguenti valori :

| $N_{Rd}$ (kg) | $\chi$      | $N_{ed}$ (kg) |
|---------------|-------------|---------------|
| 24000         | 0,342752591 | 2739,767846   |

Tab.56 – Ulteriori parametri di verifica

Sostituendo i valori trovati nell'espressione iniziale si effettua la verifica all'instabilità flessionale del pilastro superiore sottoposto a flessione e compressione :

| Risultato dell'espressione |            |
|----------------------------|------------|
| $0,578995181 \leq 1$       | VERIFICATO |

Tab.57 – Verifica a compressione e flessione assiale

- INTERMEDIO

| $\omega_x$ | $\omega_0$ | $\psi_c$ | $\alpha_y$ | $\alpha_z$ | $M_{y,ed}$ (kg*m) | $M_{z,ed}$ (kg*m) |
|------------|------------|----------|------------|------------|-------------------|-------------------|
| 1          | 1          | 0,8      | 1          | 1          | 40                | 90                |

Tab.58 – Parametri per la verifica di compressione e flessione assiale

momenti resistenti :

| $W_y(m^3)$ | $W_z(m^3)$ | $M_{y,Rd}$ (kg*m) | $M_{z,Rd}$ (kg*m) |
|------------|------------|-------------------|-------------------|
| 0,0000847  | 0,0000847  | 847               | 847               |

Tab.59 – Momenti resistenti

altri parametri :

| $N_{Rd}$ (kg) | $\chi$      | $N_{ed}$ (kg) |
|---------------|-------------|---------------|
| 24000         | 0,342752591 | 7266,557693   |

Tab.60 – Ulteriori parametri



L'interazione tra flessione e compressione dà come risultato :

|                                   |                   |
|-----------------------------------|-------------------|
| <b>Risultato dell'espressione</b> |                   |
| $1,0 \leq 1$                      | <b>VERIFICATO</b> |

Tab.61 – Verifica a compressione e flessione assiale

### 3.5.4 Verifiche dei collegamenti

I collegamenti soggetti a carichi statici tra membrature sono trattati nel capitolo 6 dell'Eurocodice 9 ; per la struttura in esame si è deciso di utilizzare esclusivamente collegamenti bullonati al fine di rendere il più veloce possibile la fase di montaggio dell'edificio e avere la possibilità di smontare altrettanto velocemente nel caso di spostamento e riutilizzo.

Si introduce in questa analisi il coefficiente di sicurezza parziale per i collegamenti bullonati:

- resistenza dei collegamenti bullonati  $\gamma_{Mb} = 1,25$

Nel paragrafo 6.5 viene riportata l'importanza del posizionamento dei fori e i limiti da rispettare per la spaziatura dei dispositivi di giunzione :

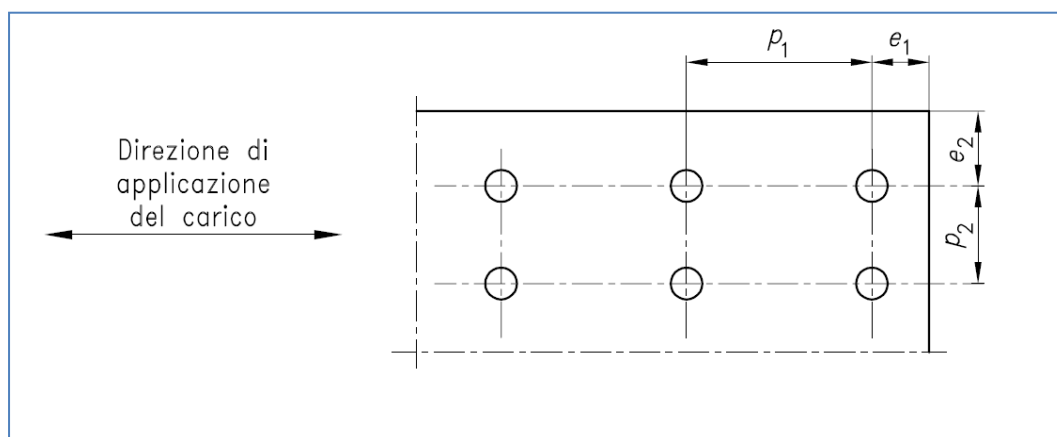


Fig.56 – Posizionamento dei fori e limiti da rispettare

In Fig.56 compaiono delle distanze che vengono di seguito specificate insieme ai loro limiti :

- la distanza  $e_1$  dal centro del foro di un dispositivo di giunzione al lembo estremo di ciascuna parte, misurata nella direzione di applicazione del carico, dovrebbe essere, generalmente,  $2,0 d_0$  ( diametro del foro ). In situazioni estreme, essa non dovrebbe essere minore di  $1,2 d_0$ .

- La distanza dal bordo  $e_2$ , dal centro del foro di un dispositivo di giunzione al bordo adiacente di ciascuna parte, misurata perpendicolarmente alla direzione di applicazione del carico, dovrebbe essere, generalmente, non minore di  $1,5 d_0$ . In situazioni estreme, la distanza dal bordo può essere ridotta a non meno di  $1,2 d_0$ .

- L'interasse  $p_1$  tra i centri dei fori dei dispositivi di giunzione, nella direzione di applicazione del carico, dovrebbe essere, generalmente, pari a  $2,5 d_0$ , in situazioni estreme non minore di  $2,2 d_0$ .

- L'interasse  $p_2$  tra le file dei dispositivi di giunzione, misurato perpendicolarmente alla direzione di applicazione del carico, dovrebbe essere, generalmente, pari a  $3,0 d_0$ .

Definiti alcuni parametri utili per le verifiche dei bulloni, si procede andando a calcolare le **resistenza di progetto dei bulloni** ( paragrafo 6.5.5 dell' Eurocodice 9 ). La normativa impone che allo stato limite ultimo le resistenze da verificare per un bullone sono :

- resistenza di progetto a taglio  $F_{v,Rd}$  ;
- resistenza di progetto a rifollamento  $F_{b,Rd}$  ;

I bulloni utilizzati nell'edificio in esame sono bulloni d'acciaio aventi classe di resistenza pari a 6.8 ; i valori delle resistenze da essi garantiti sono riportati nel prospetto 3.4 del capitolo 3 ( paragrafo 3.3.2 ) dell'Eurocodice 9 e che vengono elencati in Tab.62.

| Materiale | Tipo di dispositivo di giunzione | Classe della lega | Tempra | $f_{0,2}$<br>resistenza al limite elastico convenzionale<br>corrispondente alla deformazione residua<br>dello 0,2%<br>N/mm <sup>2</sup> | $f_u$<br>resistenza<br>ultima<br>N/mm <sup>2</sup> |
|-----------|----------------------------------|-------------------|--------|---|--|
| Acciaio   | Bulloni                          | 4.6               |        | 240   | 400  |
|           |                                  | 5.6               |        | 300   | 500  |
|           |                                  | 6.8               |        | 480   | 600  |
|           |                                  | 8.8               |        | 640   | 800  |
|           |                                  | 10.9              |        | 900   | 1 000  |

**Tab.62 – Valori di resistenza dei bulloni (prospetto 3.4 dell' Eurocodice 9)**

Quindi le resistenze per i bulloni in esame risultano :

- $f_{ub} = 600 \text{ N/mm}^2$  ( resistenza ultima ) ;
- $f_0 = 480 \text{ N/mm}^2$  ( resistenza al limite elastico convenzionale ).

Si riportano di seguito le espressioni per il calcolo delle resistenze di progetto precedentemente elencate e utili per le verifiche :

$$F_{v,Rd} = \frac{0,6 f_{ub} A}{\gamma_{Mb}}$$

con  $A$  = area della sezione lorda del gambo del bullone ;

$$F_{b,Rd} = \frac{2,5 \alpha f_u d t}{\gamma_{Mb}}$$

con :

$d$  = diametro del bullone ;

$t$  = spessore della squadretta ;

$\alpha$  è il minore tra :  $\frac{e_1}{3 d_0}$  ;  $\frac{p_1}{3 d_0} - \frac{1}{4}$  ;  $\frac{f_{ub}}{f_u}$  .

Una volta introdotte le resistenze di progetto dei bulloni, risulta necessario introdurre anche come vengono distribuite le forze tra i dispositivi di giunzione ; questo argomento vien trattato nel paragrafo 6.5.4 dell'Eurocodice 9. La normativa impone che :

la distribuzione delle forze interne tra i dispositivi di giunzione dovuta al momento flettente allo stato limite ultimo deve essere proporzionale alla distanza dal centro di rotazione, mentre la distribuzione della forza di taglio deve essere di tipo uniforme nei seguenti casi:

- collegamenti resistenti ad attrito di categoria C

- altri collegamenti a taglio in cui la resistenza di progetto a taglio  $F_{v,Rd}$  di un dispositivo di giunzione risulta minore della resistenza di progetto a rifollamento  $F_{b,Rd}$ .

Negli altri casi, la distribuzione delle forze interne tra i dispositivi di giunzione dovuta al momento flettente allo stato limite ultimo si può assumere corrispondente a quella plastica, mentre quella dovuta alla forza di taglio si può assumere di tipo uniforme.

Riportiamo di seguito due esempi di rappresentazione delle distribuzioni delle forze appena elencate ripresi dalla figura 6.9 del medesimo paragrafo :

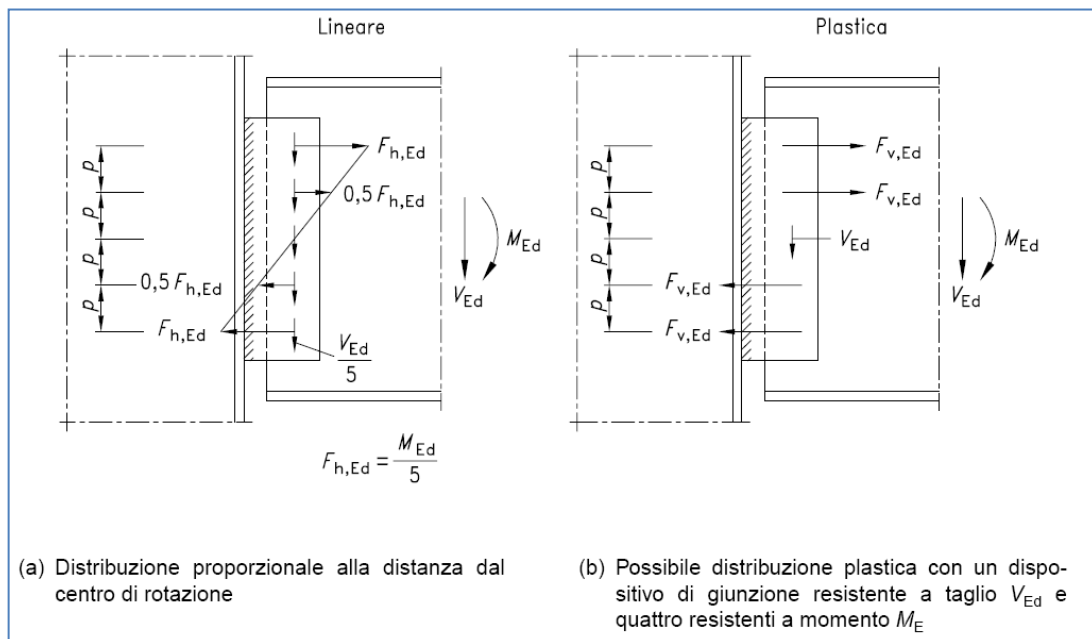


Fig.57 – Distribuzione delle forze sui bulloni del collegamento

$$a) F_{v,Ed} = \sqrt{\frac{M_{Ed}}{5p} + \frac{V_{Ed}}{5}}$$

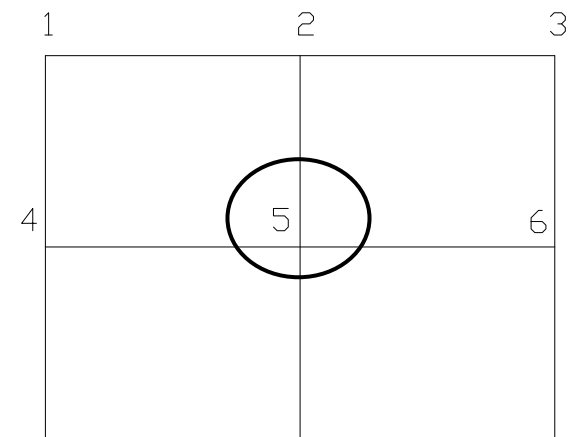
$$b) F_{v,Ed} = \frac{M_{Ed}}{6p}$$

I collegamenti in esame fanno parte di quella casistica che contempla la distribuzione delle forze dovuta al momento flettente assunta corrispondente a quella plastica, mentre quella dovuta alla forza di taglio assunta di tipo uniforme.

Si passa alle verifiche dei collegamenti dei nodi studiati (che risultano essere quelli maggiormente sollecitati) .

### 3.5.4.1 Telaio direzione x

*NODO 5*



**Fig.58 – Posizione sul telaio del collegamento studiato**

Il nodo in esame prevede un collegamento bullonato ( trave IPE 240 – pilastro a sezione quadrata cava ) mediante 8 bulloni M16 6.8 e squadretta in acciaio dello spessore di 15 mm.

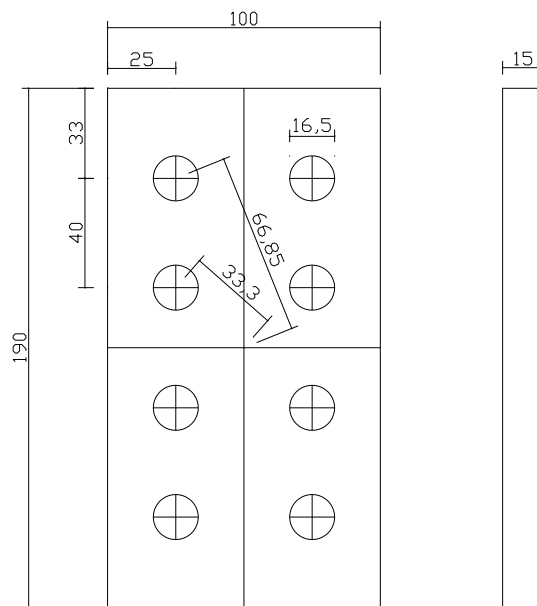


Fig.59 – Squadretta utilizzata nel nodo 5

Le quote riportate in figura sono espresse in mm e il carico viene applicato verticalmente dall'alto. Le distanze riportate sono ovviamente conformi ai limiti precedentemente indicati inerenti i parametri :  $e_1$ ,  $e_2$ ,  $p_1$ ,  $p_2$  . Si riportano in tabella i valori dei parametri utili per il calcolo del coefficiente  $\alpha$  presente nell'espressione della resistenza a rifollamento :

| $f_{ub}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | $f_u$ (N/mm <sup>2</sup> ) | $f_{ub}/f_u$ |
|-------------------------------|----------------------------|--------------|
| 600                           | 205                        | 2,926829     |

| $e_1$ (mm) | $d_0$ (mm) | $e_1/3d_0$ |
|------------|------------|------------|
| 33         | 16,5       | 0,666667   |

| $p_1$ (mm) | $(p_1/(3d_0))-1/4$ |
|------------|--------------------|
| 40         | 0,558081           |

Tab.63 – Parametri utili per il calcolo del coefficiente  $\alpha$

Dovendo essere  $\alpha$  il minore dei tre valori ottenuti, avremo un coefficiente  $\alpha$  pari a :

$\alpha = 0,558081$  ; i parametri rimanenti per il calcolo delle resistenze a taglio e rifollamento sono :

| $A_{\text{GAMBO}} \text{ (mm}^2\text{)}$ | $D \text{ (mm)}$ | $t \text{ (mm)}$ |
|--|------------------|------------------|
| 200,96                                   | 16               | 15               |

Tab.64 – Parametri ulteriori di calcolo

Si vengono così ad ottenere i valori delle resistenze per questa tipologia di collegamento:

| $F_{v,Rd} \text{ (N)}$ | $F_{b,Rd} \text{ (N)}$ |
|------------------------|------------------------|
| 48230,4                | 54915,15               |

Tab.65 – Valori di resistenza

Si procede ora al calcolo della sollecitazione sui bulloni e sulla squadretta secondo la distribuzione plastica precedentemente descritta :

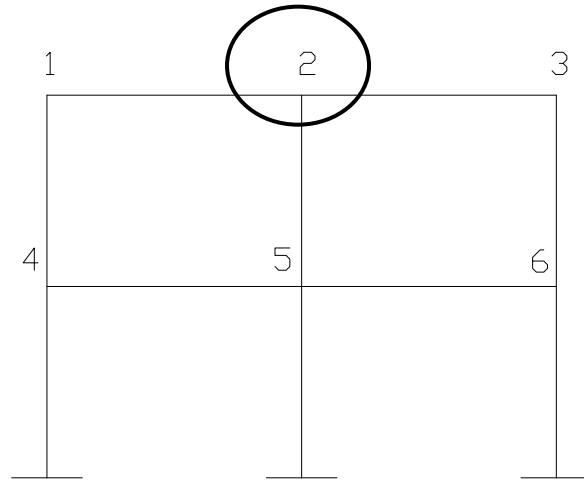
$$F_{v,Ed} = \frac{M_{Ed}}{(4 r_2) + (4 r_1)} ;$$

dove  $r_2$  corrisponde alla distanza del baricentro del foro più lontano dal baricentro della squadretta e  $r_1$  alla distanza del baricentro del foro più vicino dal baricentro della squadretta. Si possono allora effettuare le verifiche del bullone e della squadretta :

| $V_{Ed} \text{ (N)}$ | $M_{Ed} \text{ (N*m)}$ | $F_{v,Ed} \text{ (N)}$ | $F_{v,Ed} < F_{v,Rd}$ |            |
|----------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|------------|
| 26737                | 17233                  | 43017,01               | SI                    | VERIFICATA |

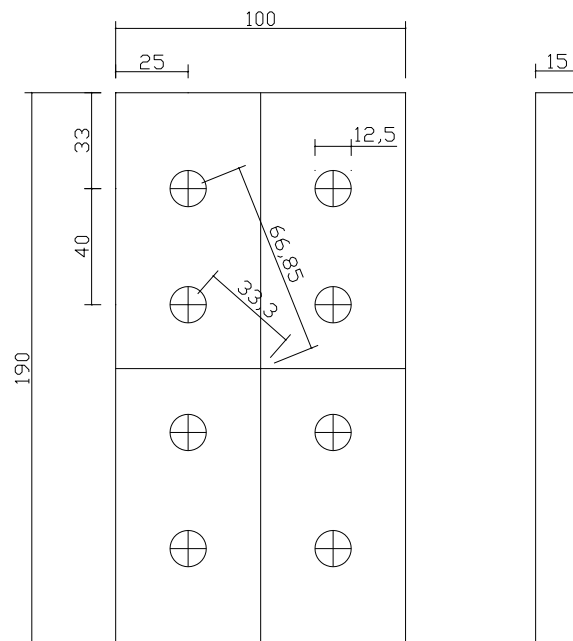
Tab.66 – Verifica del collegamento

NODO 2



**Fig.60 – Posizione sul telaio del collegamento studiato**

Il nodo in esame prevede un collegamento bullonato ( trave IPE 240 – pilastro a sezione quadrata cava ) mediante 8 bulloni M12 6.8 e squadretta in acciaio dello spessore di 15 mm.



**Fig.61 – Squadretta utilizzata nel nodo 2**



Riportiamo anche qui i parametri utili per il calcolo del coefficiente  $\alpha$  :

| $f_{ub}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | $f_u$ (N/mm <sup>2</sup> ) | $f_{ub}/f_u$ |
|-------------------------------|----------------------------|--------------|
| 600                           | 205                        | 2,926829     |

| $e_1$ (mm) | $d_0$ (mm) | $e_1/3d_0$ |
|------------|------------|------------|
| 33         | 12,5       | 0,88       |

| $p_1$ (mm) | $(p_1/(3d_0))-1/4$ |
|------------|--------------------|
| 40         | 0,816667           |

Tab.67 – Parametri utili per il calcolo del coefficiente  $\alpha$

In questo caso  $\alpha$  assumerà valore pari a **0,816667**. I parametri restanti sono :

| $A_{GAMBO}$ (mm <sup>2</sup> ) | $D$ (mm) | $t$ (mm) |
|--------------------------------|----------|----------|
| 113,04                         | 12       | 15       |

Tab.68 – Parametri ulteriori di calcolo

Le resistenze per questo tipo di collegamento assumono i seguenti valori :

| $F_{v,Rd}$ (N) | $F_{b,Rd}$ (N) |
|----------------|----------------|
| 27129,6        | 60270          |

Tab.69 – Valori di resistenza

Si procede ora al calcolo della sollecitazione sui bulloni e sulla squadretta secondo la distribuzione plastica precedentemente descritta :

$$F_{v,Ed} = \frac{M_{Ed}}{(4 r_2) + (4 r_1)} ;$$

calcolando il valore della sollecitazione si riescono ad effettuare le verifiche :

| $V_{Ed}$ (N) | $M_{Ed}$ (N*m) | $F_{v,Ed}$ (N) | $F_{v,Ed} < F_{v,Rd}$ |            |
|--------------|----------------|----------------|-----------------------|------------|
| 15838        | 9158           | 22860          | SI                    | VERIFICATA |

Tab.70 – Verifica del collegamento

*NODO 4*

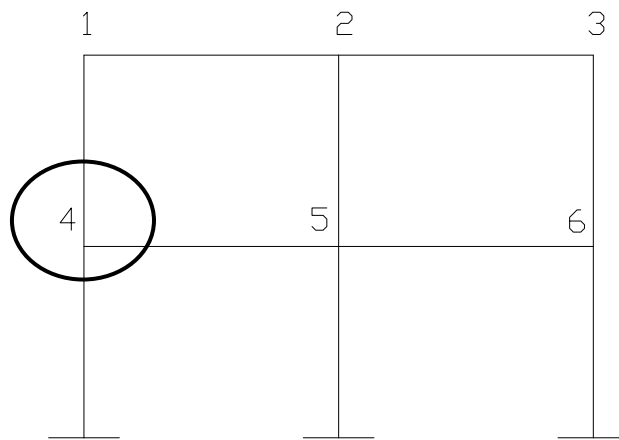


Fig.62 – Posizione sul telaio del collegamento studiato

Il nodo in esame prevede un collegamento bullonato ( trave IPE 240 – pilastro a sezione quadrata cava ) mediante 3 bulloni M12 6.8 e squadretta in acciaio dello spessore di 15 mm.

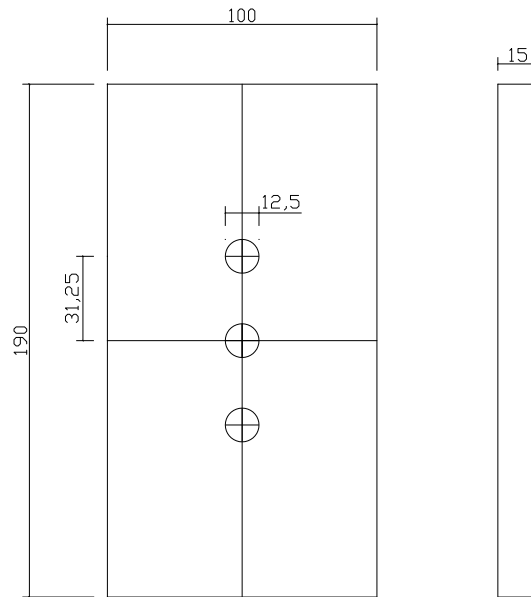


Fig.63 – Squadretta utilizzata nel nodo 4

Riportiamo anche qui i parametri utili per il calcolo del coefficiente  $\alpha$  :

| $f_{ub}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | $f_u$ (N/mm <sup>2</sup> ) | $f_{ub}/f_u$ |
|-------------------------------|----------------------------|--------------|
| 600                           | 205                        | 2,926829     |

| $e_1$ (mm) | $d_0$ (mm) | $e_1/3d_0$ |
|------------|------------|------------|
| 63,75      | 12,5       | 1,7        |

| $p_1$ (mm) | $(p_1/(3d_0))-1/4$ |
|------------|--------------------|
| 31,25      | 0,583333           |

Tab.71 – Parametri utili per il calcolo del coefficiente  $\alpha$

In questo caso  $\alpha$  assumerà valore pari a **0,583333**. I parametri restanti sono :

| $A_{GAMBO}$ (mm <sup>2</sup> ) | $D$ (mm) | $t$ (mm) |
|--------------------------------|----------|----------|
| 113,04                         | 12       | 15       |

Tab.72 – Parametri ulteriori di calcolo

Le resistenze per questo tipo di collegamento assumono i seguenti valori :

| $F_{v,Rd}$ (N) | $F_{b,Rd}$ (N) |
|----------------|----------------|
| 27129,6        | 43050          |

Tab.73 – Valori di resistenza

Si procede ora al calcolo della sollecitazione sui bulloni e sulla squadretta secondo la distribuzione plastica precedentemente descritta :

$$F_{v,Ed} = \frac{M_{Ed}}{(2 p)} ;$$

dove  $p$  = distanza del baricentro del foro dal baricentro della squadretta;

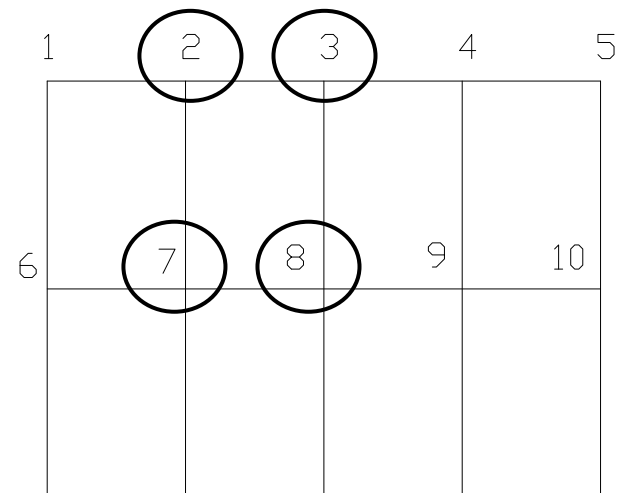
calcolando il valore della sollecitazione si riescono ad effettuare le verifiche :

| $V_{Ed}$ (N) | $M_{Ed}$ (N*m) | $F_{v,Ed}$ (N) | $F_{v,Ed} < F_{v,Rd}$ |            |
|--------------|----------------|----------------|-----------------------|------------|
| 18353        | 1245           | 19920          | SI                    | VERIFICATA |

Tab.74 – Verifica del collegamento

**3.5.4.2 Telaio direzione z**

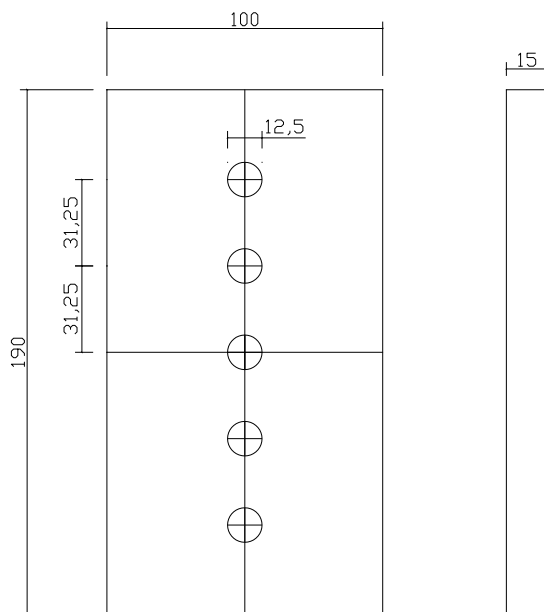
*NODI 7, 8, 2, 3*



**Fig.64 – Posizione sul telaio dei collegamenti studiati**

Considerando il telaio più esterno avremo sempre delle travi IPE 240 che si collegano ai pilastri della lunghezza però di 1,8 metri ; considerando invece i diversi telai interni, le travi della lunghezza di 1,8 metri saranno quelle a T spigolo vivo.

I nodi in esame prevedono un collegamento bullonato ( trave IPE 240 – pilastro a sezione quadrata cava ) mediante 5 bulloni M12 6.8 e squadretta in acciaio dello spessore di 15 mm.



**Fig.65 – Squadretta utilizzata nei nodi 7, 8, 2, 3**

Riportiamo anche qui i parametri utili per il calcolo del coefficiente  $\alpha$  :

|        | $f_{ub}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | $f_u$ (N/mm <sup>2</sup> ) | $f_{ub}/f_u$ |
|--------|-------------------------------|----------------------------|--------------|
| NODO 7 | 600                           | 205                        | 2,926829     |
| NODO 8 | 600                           | 205                        | 2,926829     |
| NODO 2 | 600                           | 205                        | 2,926829     |
| NODO 3 | 600                           | 205                        | 2,926829     |

|        | $e_1$ (mm) | $d_0$ (mm) | $e_1/3d_0$ |
|--------|------------|------------|------------|
| NODO 7 | 32,5       | 12,5       | 0,866667   |
| NODO 8 | 32,5       | 12,5       | 0,866667   |
| NODO 2 | 32,5       | 12,5       | 0,866667   |
| NODO 3 | 32,5       | 12,5       | 0,866667   |

|        | $p_1$ (mm) | $(p_1/(3d_0))-1/4$ |
|--------|------------|--------------------|
| NODO 7 | 31,25      | 0,583333           |
| NODO 8 | 31,25      | 0,583333           |
| NODO 2 | 31,25      | 0,583333           |
| NODO 3 | 31,25      | 0,583333           |

Tab.75 – Parametri utili per il calcolo del coefficiente  $\alpha$

Quindi il parametro  $\alpha$  per tutti i nodi in questione assume valore pari a **0,583333**. I parametri restanti saranno i medesimi per tutti i nodi :

|                 | $A_{GAMBO}$ (mm <sup>2</sup> ) | D (mm) | t (mm) |
|-----------------|--------------------------------|--------|--------|
| NODI 7, 8, 2, 3 | 113,04                         | 12     | 15     |

Tab.76 – Parametri ulteriori di calcolo

e lo stesso sarà per le resistenze :

|                 | $F_{v,Rd}$ (N) | $F_{b,Rd}$ (N) |
|-----------------|----------------|----------------|
| NODI 7, 8, 2, 3 | 27129,6        | 43050          |

**Tab.77 – Valori di resistenza**

Si procede ora al calcolo della sollecitazione sui bulloni e sulla squadretta secondo la distribuzione plastica precedentemente descritta :

$$F_{v,Ed} = \frac{M_{Ed}}{(6 p)} ;$$

dove p = distanza del baricentro del foro più vicino dal baricentro della squadretta;  
calcolando il valore della sollecitazione si riescono ad effettuare le verifiche :

|        | $V_{Ed}$ (N) | $M_{Ed}$ (N*m) | $F_{v,Ed}$ (N) | $F_{v,Ed} < F_{v,Rd}$ |            |
|--------|--------------|----------------|----------------|-----------------------|------------|
| NODO 7 | 13130        | 4037           | 21530,67       | SI                    | VERIFICATA |
| NODO 8 | 10858        | 3165           | 16880          | SI                    | VERIFICATA |
| NODO 2 | 8000         | 2450           | 13066,67       | SI                    | VERIFICATA |
| NODO 3 | 6500         | 1900           | 10133,3        | SI                    | VERIFICATA |

**Tab.78 – Verifica dei collegamenti**

NODI 6, 1

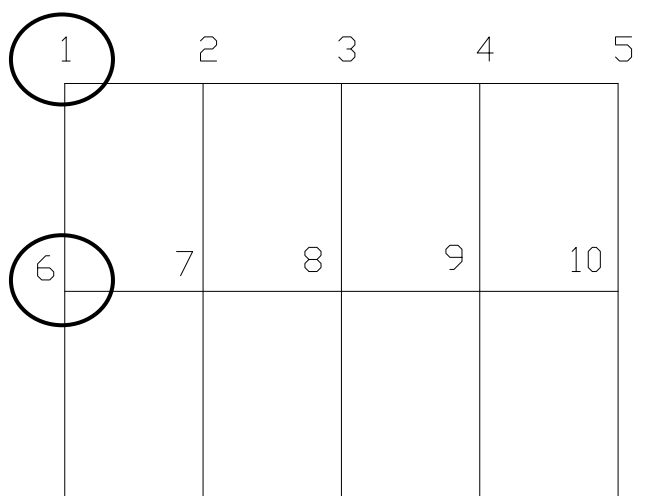


Fig.66 – Posizione sul telaio dei collegamenti studiati

I nodi in esame prevedono un collegamento bullonato ( trave IPE 240 – pilastro a sezione quadrata cava ) mediante 3 bulloni M12 6.8 e squadretta in acciaio dello spessore di 15 mm ( omettiamo di riportare la rappresentazione grafica poiché risulta essere la medesima del nodo 4 nel telaio in direzione x ).

|           | $f_{ub}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | $f_u$ (N/mm <sup>2</sup> ) | $f_{ub}/f_u$ |
|-----------|-------------------------------|----------------------------|--------------|
| NODI 6, 1 | 600                           | 205                        | 2,926829     |

|           | $e_1$ (mm) | $d_0$ (mm) | $e_1/3d_0$ |
|-----------|------------|------------|------------|
| NODI 6, 1 | 63,75      | 12,5       | 1,7        |

|           | $p_1$ (mm) | $(p_1/(3d_0))-1/4$ |
|-----------|------------|--------------------|
| NODI 6, 1 | 31,25      | 0,583333           |

 Tab.79 – Parametri utili per il calcolo del coefficiente  $\alpha$



Il parametro  $\alpha$  assumerà valore pari a **0,583333**. I parametri restanti saranno i medesimi per tutti i nodi :

|           | $A_{\text{GAMBO}} \text{ (mm}^2\text{)}$ | $D \text{ (mm)}$ | $t \text{ (mm)}$ |
|-----------|--|------------------|------------------|
| NODI 6, 1 | 113,04                                   | 12               | 15               |

**Tab.80 – Parametri ulteriori di calcolo**

e lo stesso sarà per le resistenze :

|           | $F_{v,Rd} \text{ (N)}$ | $F_{b,Rd} \text{ (N)}$ |
|-----------|------------------------|------------------------|
| NODI 6, 1 | 27129,6                | 43050                  |

**Tab.81 – Valori di resistenza**

Si procede ora al calcolo della sollecitazione sui bulloni e sulla squadretta secondo la distribuzione plastica precedentemente descritta :

$$F_{v,Ed} = \frac{M_{Ed}}{(2 p)} ;$$

dove  $p$  = distanza del baricentro del foro più vicino dal baricentro della squadretta;  
calcolando il valore della sollecitazione si riescono ad effettuare le verifiche :

|        | $V_{Ed} \text{ (N)}$ | $M_{Ed} \text{ (N*m)}$ | $F_{v,Ed} \text{ (N)}$ | $F_{v,Ed} < F_{v,Rd}$ |                   |
|--------|----------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|-------------------|
| NODO 6 | 9414                 | 693                    | 11088                  | SI                    | <b>VERIFICATA</b> |

**Tab.82 – Verifica dei collegamenti**

### 3.5.4.3 Collegamento tra trave secondaria e trave principale

Per quanto riguarda il collegamento tra trave secondaria ( trave a T spigolo vivo ) e trave principale ( trave IPE 240 ) si è deciso di utilizzare lo stesso collegamento per tutti i nodi in questione ; la trave principale è dotata di squadrette ad essa saldate dello spessore di 10 mm distanti fra loro 60 cm. Il collegamento è realizzato mediante 2 bulloni M12 6.8 . La direzione di applicazione del carico anche in questo caso risulta verticale dall'alto e le distanze riportate nella figura seguente sono in millimetri.

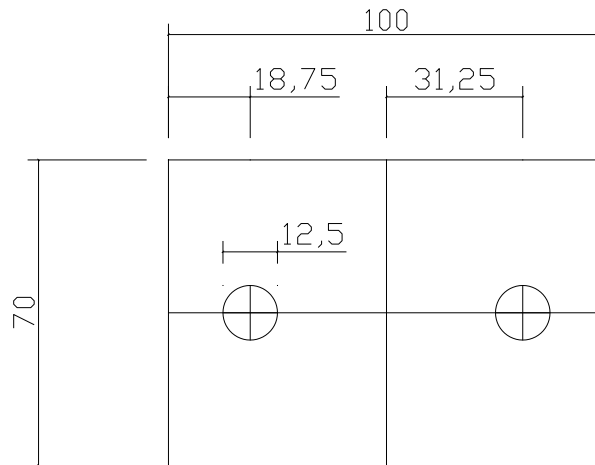


Fig.67 – Squadretta utilizzata nel collegamento

Riportiamo anche qui i parametri utili per il calcolo del coefficiente  $\alpha$  :

| $f_{ub}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | $f_u$ (N/mm <sup>2</sup> ) | $f_{ub}/f_u$ |
|-------------------------------|----------------------------|--------------|
| 600                           | 205                        | 2,926829     |

| $e_1$ (mm) | $d_0$ (mm) | $e_1/3d_0$ |
|------------|------------|------------|
| 35         | 12,5       | 0,93333    |

Tab.83 – Parametri utili per il calcolo del coefficiente  $\alpha$

In questo caso  $\alpha$  assumerà valore pari a **0,93333**.

I parametri restanti sono :

| $A_{\text{GAMBO}} \text{ (mm}^2\text{)}$ | $D \text{ (mm)}$ | $t \text{ (mm)}$ |
|--|------------------|------------------|
| 113,04                                   | 12               | 10               |

**Tab.84 – Parametri restanti**

Le resistenze per questo tipo di collegamento assumono i seguenti valori :

| $F_{v,Rd} \text{ (N)}$ | $F_{b,Rd} \text{ (N)}$ |
|------------------------|------------------------|
| 27129,6                | 45920                  |

**Tab.85 – Valori di resistenza**

Si procede ora al calcolo della sollecitazione sui bulloni e sulla squadretta secondo la distribuzione plastica precedentemente descritta :

$$F_{v,Ed} = \frac{M_{Ed}}{(2 p)} ;$$

dove  $p$  = distanza del baricentro del foro dal baricentro della squadretta;  
calcolando il valore della sollecitazione si riescono ad effettuare le verifiche :

| $V_{Ed} \text{ (N)}$ | $M_{Ed} \text{ (N*m)}$ | $F_{v,Ed} \text{ (N)}$ | $F_{v,Ed} < F_{v,Rd}$ |                   |
|----------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|-------------------|
| 3500                 | 1258                   | 20128                  | SI                    | <b>VERIFICATA</b> |

**Tab.86 – Verifica del collegamento**

## Allegato

Si è deciso di riportare in questo capitolo alcuni esempi di edifici esistenti che sfruttano l'alluminio nelle più diverse e particolari forme architettoniche; questi edifici risultano progettualmente concepiti seguendo le medesime linee guida del prototipo progettato, proprio per questo sono stati studiati e presi da esempio per il nostro lavoro.

*Georgica Pond-House from steel, aluminum and glass*



This limestone, steel, aluminum and glass house built on the exact same footprint as one-story wood house that was here before. The house is now have two stories and the main entrance has double staircase to the second floor. The living room, dining room, kitchen, utility room, library, and two guest bedrooms with baths are on the first floor. The second floor has the master bedroom / sitting room with two dressing rooms, two vanity areas and a large bathroom with separate tub and shower. All rooms are open to walkways and terraces at both the first and second floors. The studio and garage are attached to the

main house with a glass walled and roofed corridor. The swimming pool is located near the house with its own view of the surroundings. The house is designed by Bates Masi Architects.

*Aluminum House solar power green*



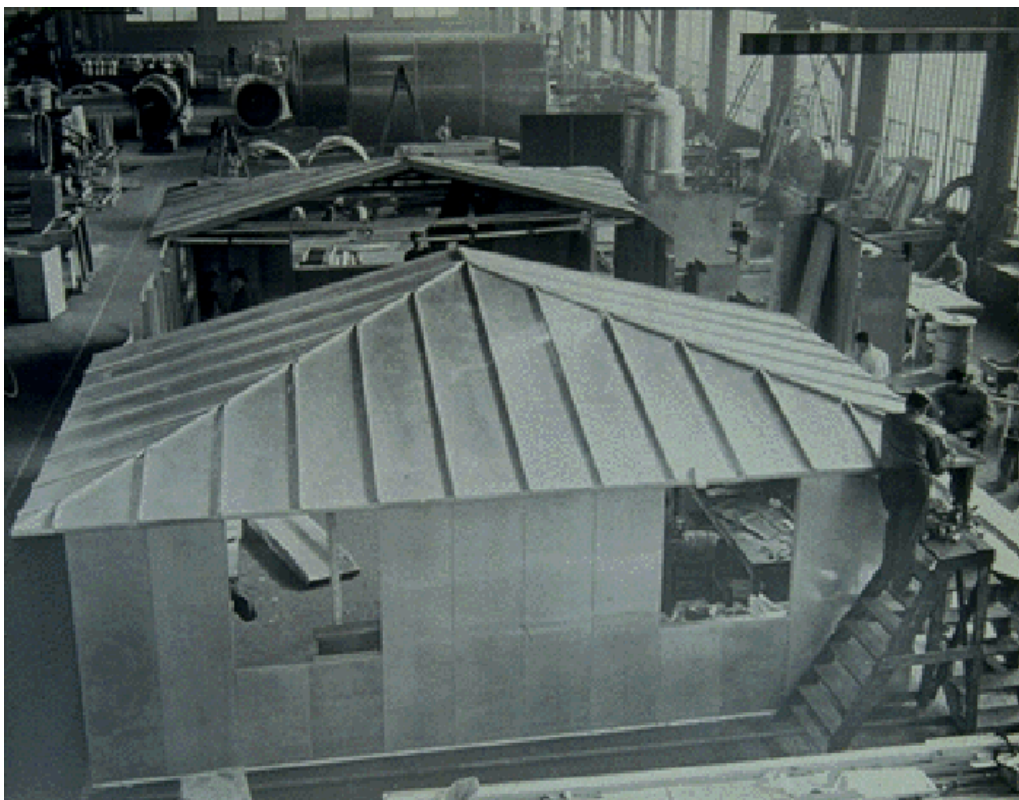
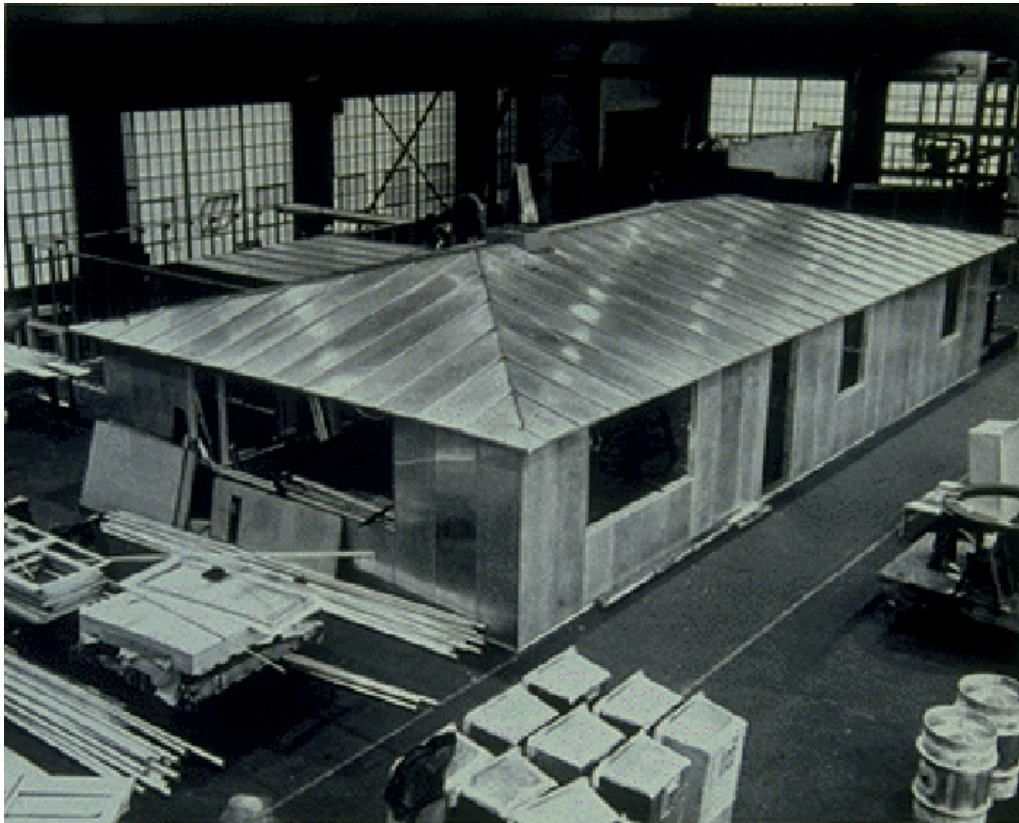
*Atelier Tekuto (yasuhiro yamashita, 2005)*



*Riken Yamamoto's Ecoms House*

Riken Yamamoto's Ecoms House exemplifies a new kind of home economics. Constructed out of aluminum panels, this diminutive 24-foot by 24-foot box demonstrates how economy in size and fabrication can lead to surplus in style and coolness. A prototype residence for SUS Corporation, a manufacturer of aluminum precision machine parts and furniture, this home was initially an experiment to create something out of aluminum that could not be expressed with steel. The exterior is inspired by the traditional use of tatami mats in Japanese homes — each of the four sides featuring transparent, opaque, and glass-covered aluminum lattice panels.

*Aluminum corporation of America Experimental Aluminum House*



*Aluminum cottage (Toyo Ito)*

Aluminium cottage is a work of the architect Toyo Ito is one example of a small house and creative. The house is located in Minamikoma-gun, Yamanashi, Japan and has a building area of 57.42 square meters. There were two perfect combination of material sufficient contrast in this house is aluminium and wood to create two different sides of the cold and warmth. This aluminium cottage be an efficient small house and also provide comfort for occupants. One of the innovative home design that comes from great ideas by the Japanese architect.





---

*Modern Aluminum House Design from Walsenhoff*

The Aluminum house design project has been introduced for the first time at architecture exhibition walsenhoff in 1927, the picture was shown by old house aluminum. Aluminum house picture that you see was located in New York US. The experimental sample was constructed in just 10 days on the architecture exhibition in New York on the latest technological advances at the time.



*TKiT House*

TK iT House is an ambitiously “smart” prefab house that comes with a whole host of high-tech amenities such as radiant heat flooring, photovoltaic roof, and custom-designed vinyl panels to screen your glass walls. In short: its a high-tech prefab dream. Today, not one, but two of their sleek glass houses are set to shine on actual sites.



Come riportato nel primo capitolo, l'alluminio, grazie alle sue particolari proprietà, trova molteplici applicazioni e il suo utilizzo segue un andamento costante di crescita; in particolare in edilizia può essere impiegato per la costruzione di serramenti, facciate continue, infissi, porte, finestre, persiane, controfinestre, per coperture ecc. Allo scopo di illustrare i diversi impieghi di questo giovane metallo, si riportano in questo allegato una serie di esempi esistenti realizzati dall'azienda Metra SpA leader nella produzione dell'alluminio.

*525 Borden Avenue, New York, USA*

Progettista: Gilman Architects - Facciate continue e serramenti realizzati da: Euroteq Window Systems



*Hearst Building, New York, USA*

Progettista: Foster + Partners - Facciate continue e serramenti realizzati da: Permasteelisa CladdingTechnologies



*Al Dar Headquarters Abu Dhabi - United Arab Emirates*

Progettista: Architects MZ & Partners - Facciate continue e serramenti realizzati da:  
PermasteelisaGroup



*Pyramide du Louvre : Parigi – Francia*

Progettista: Arch. Ieoh Ming Pei, Arch. Michel Macary, Arch. Georges Duval

Facciate continue e serramenti realizzati da: C.F.E.M., Francia



*Frangisole, Brescia*

Progettista: Boschi e Serboli architetti associati



*Veranda Sistema Estensia*

Progettista: Ing Pietro Benassai e staff tecnico della Steel Serramenti Srl, Figline Valdarno (FI)



*Sistemi scorrevoli per scuola media, Marano Vicentino*

Progettista: Studio Altieri spa, Thiene (VI) - Facciate continue e serramenti realizzati da:  
Metalsud sas di S. Bellofatto & C., Sperone (AV)



*Sistemi scorrevoli per abitazione privata, Londra*

Progettista: Mark Robinson, Munden Robinson Architects, Regno Unito - Facciate continue e serramenti realizzati da: Linea Glass, Polonia





*Dockland, Amburgo, Germania*

Progettista: Studio BRT Architetti - Jans Bothe, Kai Richter, Hadi Teherani - Facciate continue e serramenti realizzati da: Frener & Reifer



---

## Bibliografia

- “Atlante dell’alluminio” di Hugues Wilkin, 2003 Unione Tipografico-Editrice Torinese.
- Aluglobe in “Hydro” , n° 2, settembre 2000.
- Marinata F. , 1998, “Alluminio” in Boaga G., *Dizionario dei materiali*, Utet, Torino.
- Toyo ito, “blurring Architecture”, Charta Edizioni, Milano 1999.
- “Costruire”, n° 298, 2008.
- “Detail” , n° 4, 2001, in *Modular System*.
- *L’aluminium pour les générations futures*,EAA-European Aluminium Associations, 1999.
- *La toiture métallique*, in “L’architecture d’Aujourd’hui”, n° 329, Parigi 2000.
- *Légère et japonaise*, in “Techniques & architecture”, n° 448, Parigi 2000.
- Giuseppe Turchini – Manuela Grecchi, “Nuovi modelli per l’abitare-Evoluzione dell’edilizia residenziale di fronte alle nuove esigenze”, Il Sole 24ORE, Milano, 2006.
- Chris Van Uffelen, “Ecological Architecture”, Braun, Berlino, 2009.

---

## **NORMATIVA DI RIFERIMENTO**

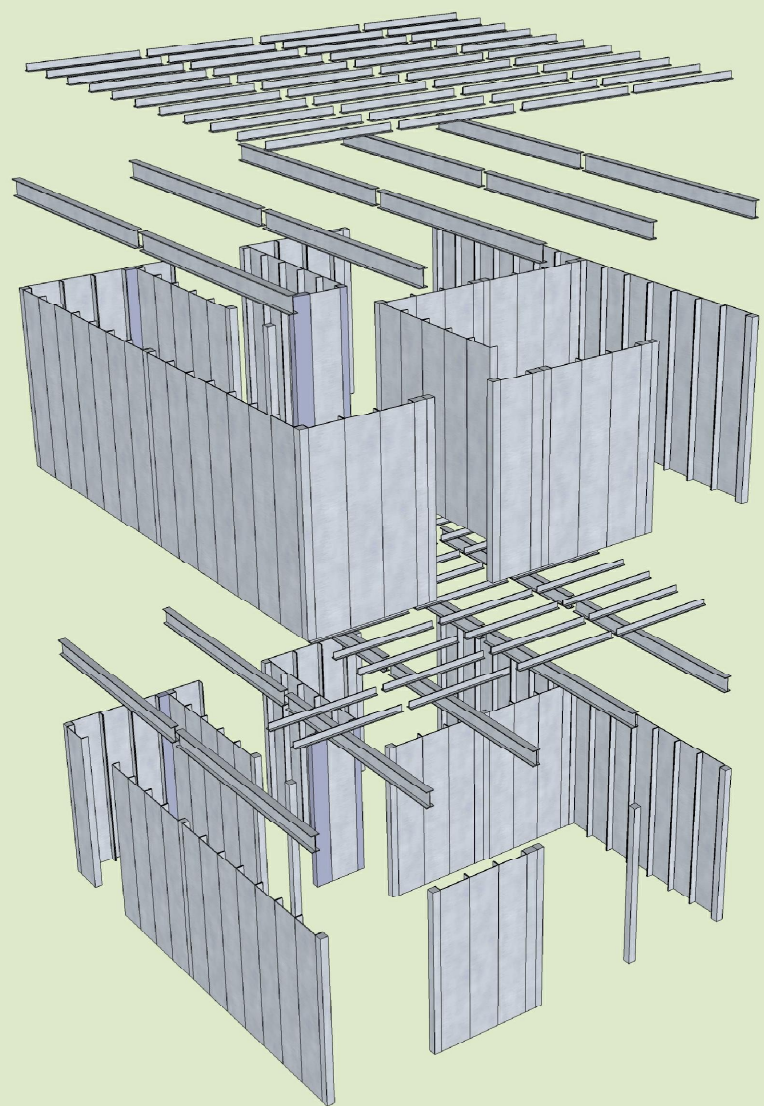
- Ente nazionale Italiano di Unificazione (UNI), Eurocodice 9, “Progettazione delle strutture in alluminio”, UNI ENV 1999-1-1.
- Ente nazionale Italiano di Unificazione (UNI), “Norme tecniche per le costruzioni”, UNI-EN 10408, 2008.

## **SITOGRAFIA**

- Metra – [www.metra.it](http://www.metra.it)
- Ricarch.com – [www.ricarch.com](http://www.ricarch.com)
- e-architect - [www.e-architect.co.uk](http://www.e-architect.co.uk)
- Queen Decorate - [www.queendecorate.com](http://www.queendecorate.com)
- Infobuild – [www.infobuild.it](http://www.infobuild.it)
- Edilportale – [www.edilportale.com](http://www.edilportale.com)
- Aluplanet - <http://aziende.aluplanet.com/ITA/home.asp>

---

# TAVOLE



**TAVOLA - 1**

**TITOLO - esploso assonometrico**



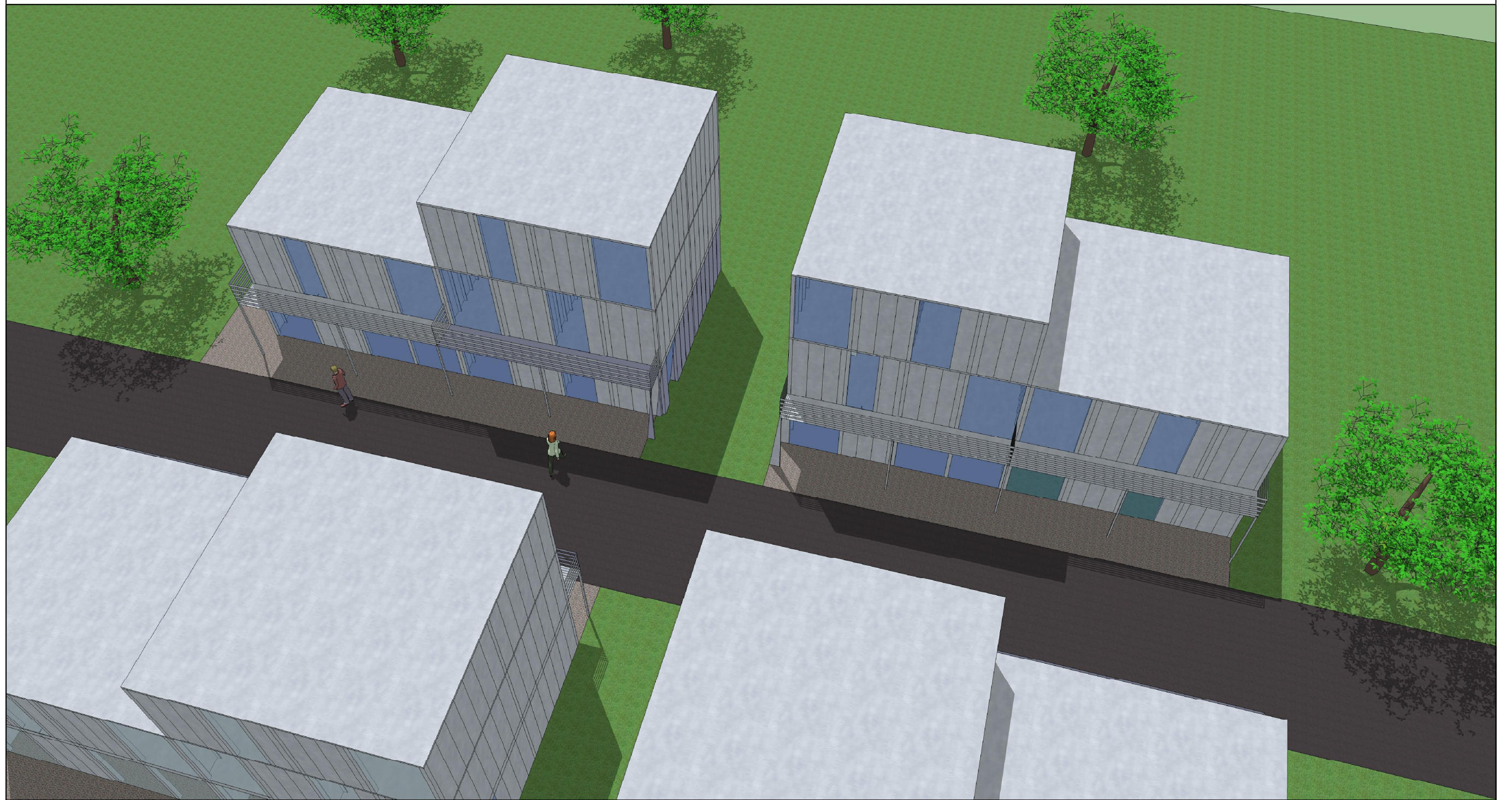
**TAVOLA - 2**

**TITOLO - vista complesso formato da più prototipi**



**TAVOLA - 3**

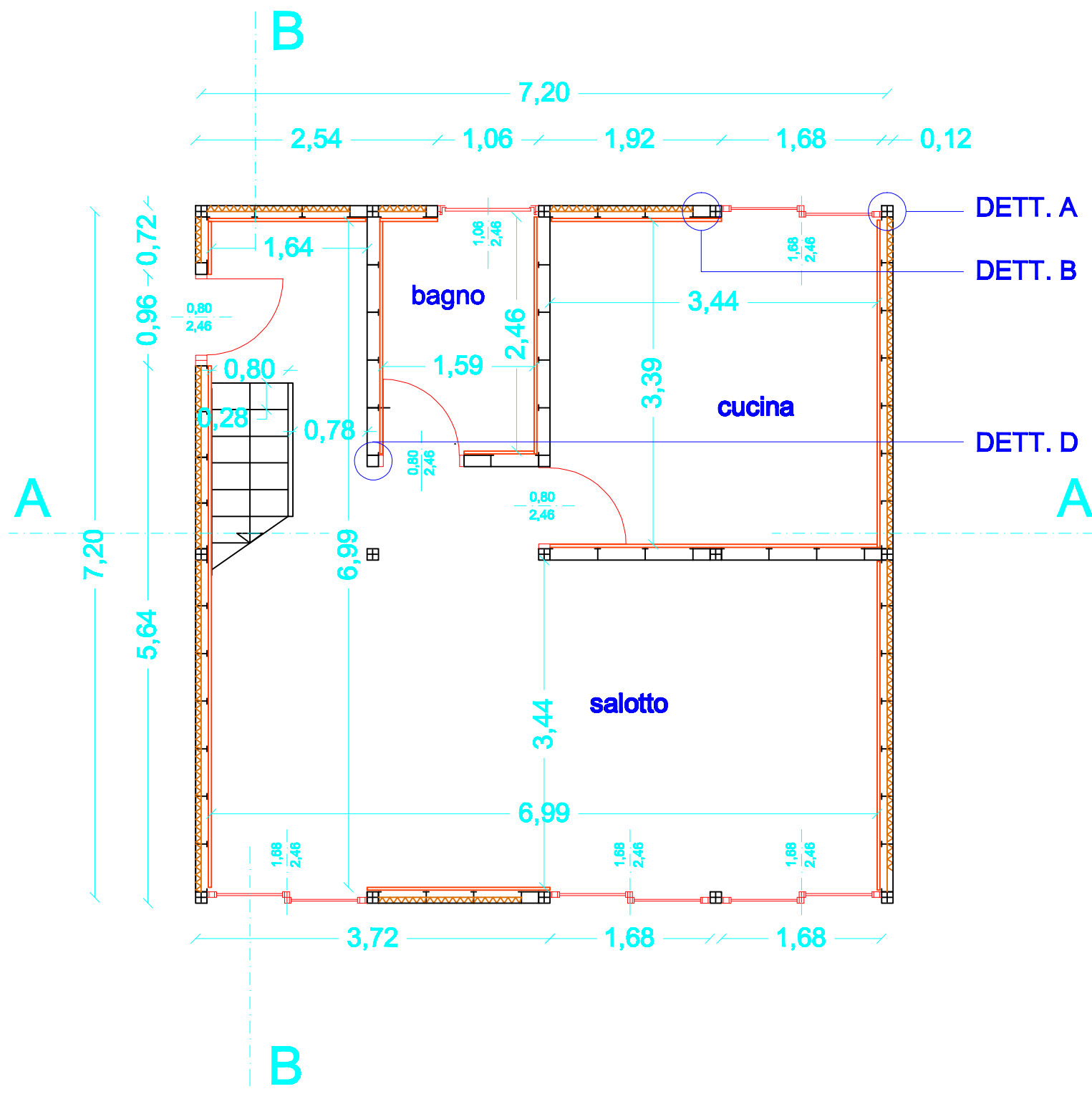
**TITOLO - vista complesso formato da più prototipi**



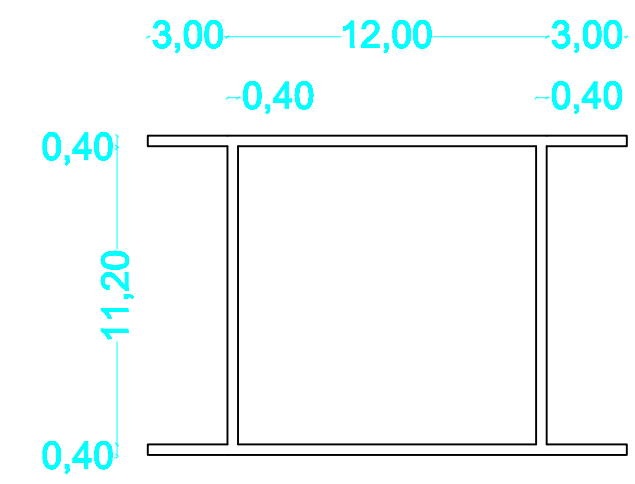
**TAVOLA - 4**

**TITOLO - vista complesso formato da più prototipi**

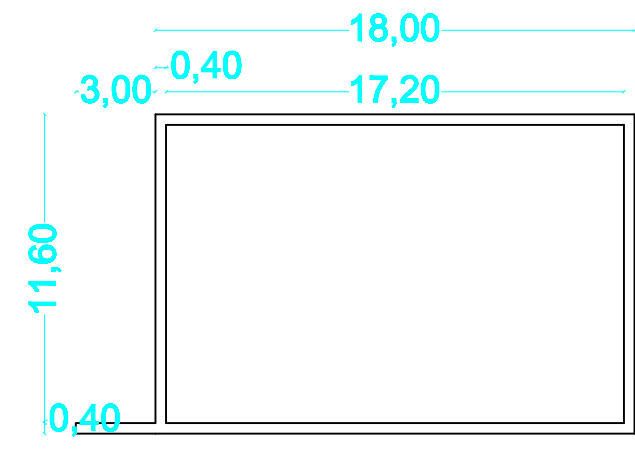




DETT. D : ELEMENTI DI COMPLETAMENTO NON PORTANTI IN ALLUMINIO ( in cm)



DETT. B : ELEMENTI DI COMPLETAMENTO NON PORTANTI IN ALLUMINIO ( in cm)



DETT. A : ELEMENTO PORTANTE PILASTRO IN ALLUMINIO ( in cm)

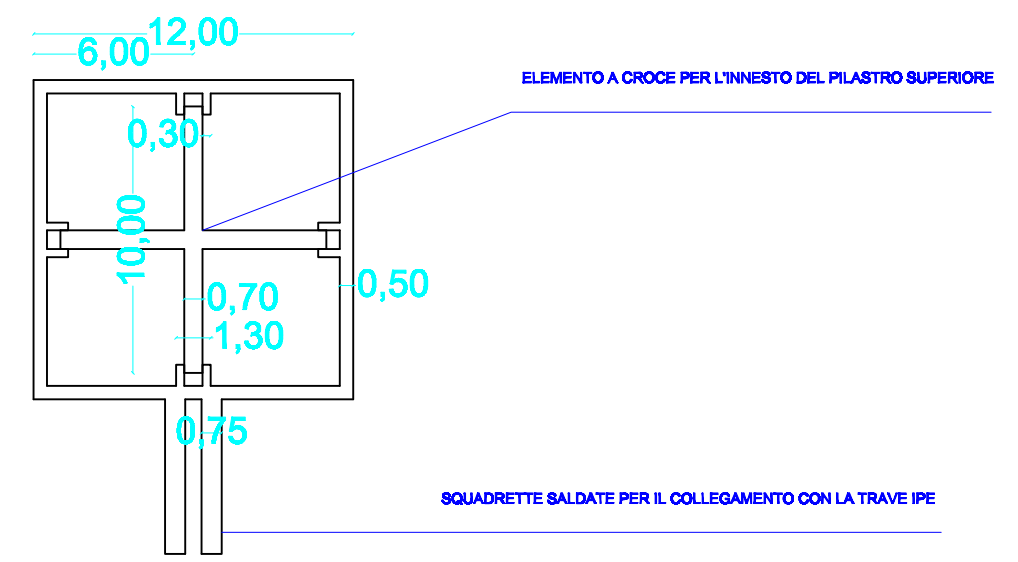
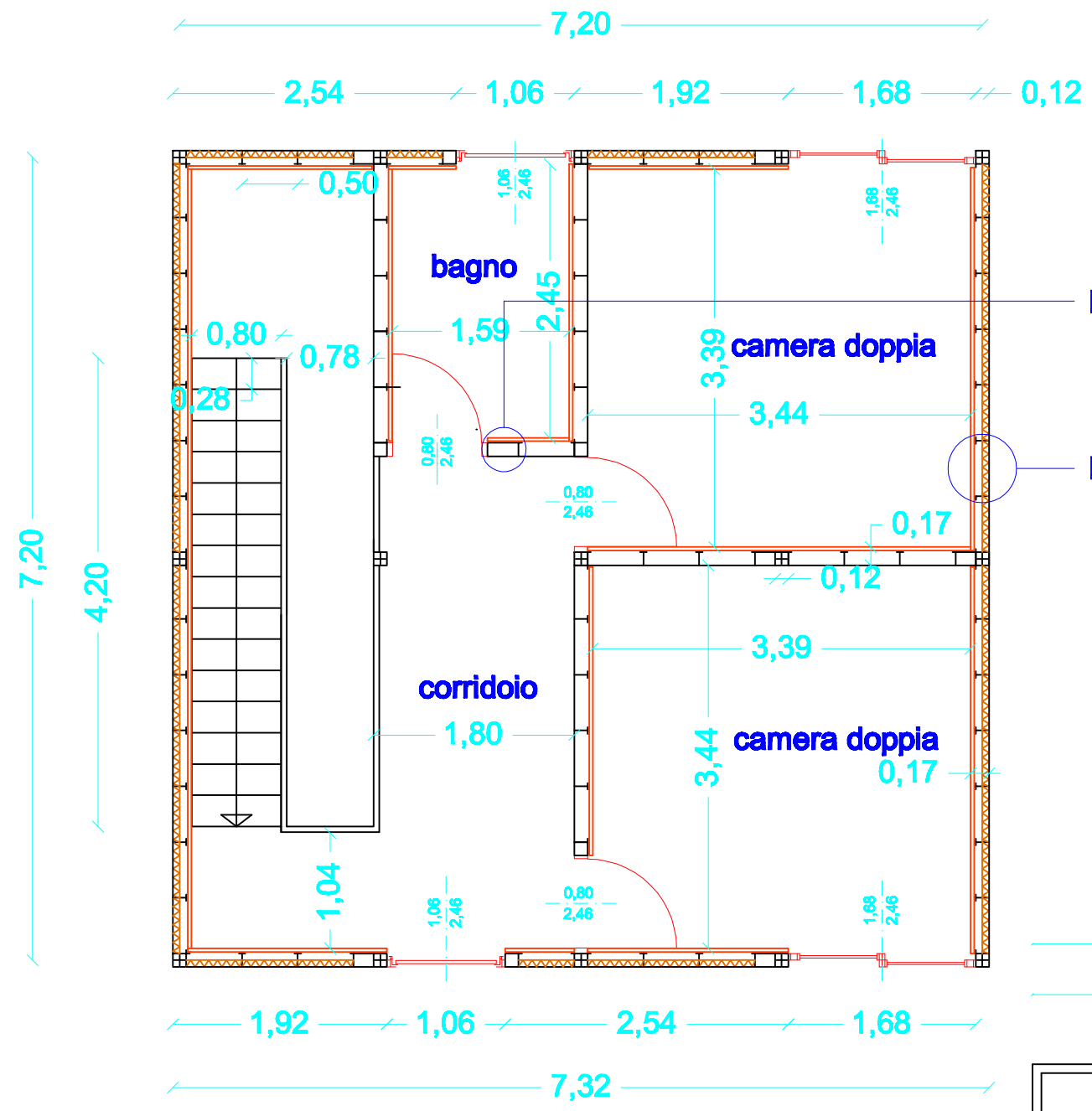


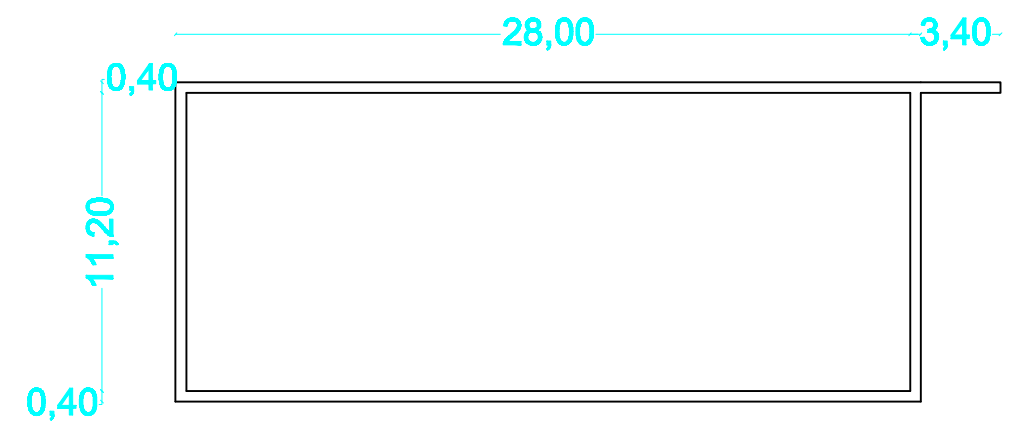
TAVOLA - 5

TITOLO - pianta piano 0

SCALA - 1:50 1:10



DETT. C : ELEMENTI DI COMPLETAMENTO NON PORTANTI IN ALLUMINIO ( quote in cm)



DETT. E : ELEMENTO DI PANNELLATURA DI IRRIGIDIMENTO IN ALLUMINIO ( quote in cm)

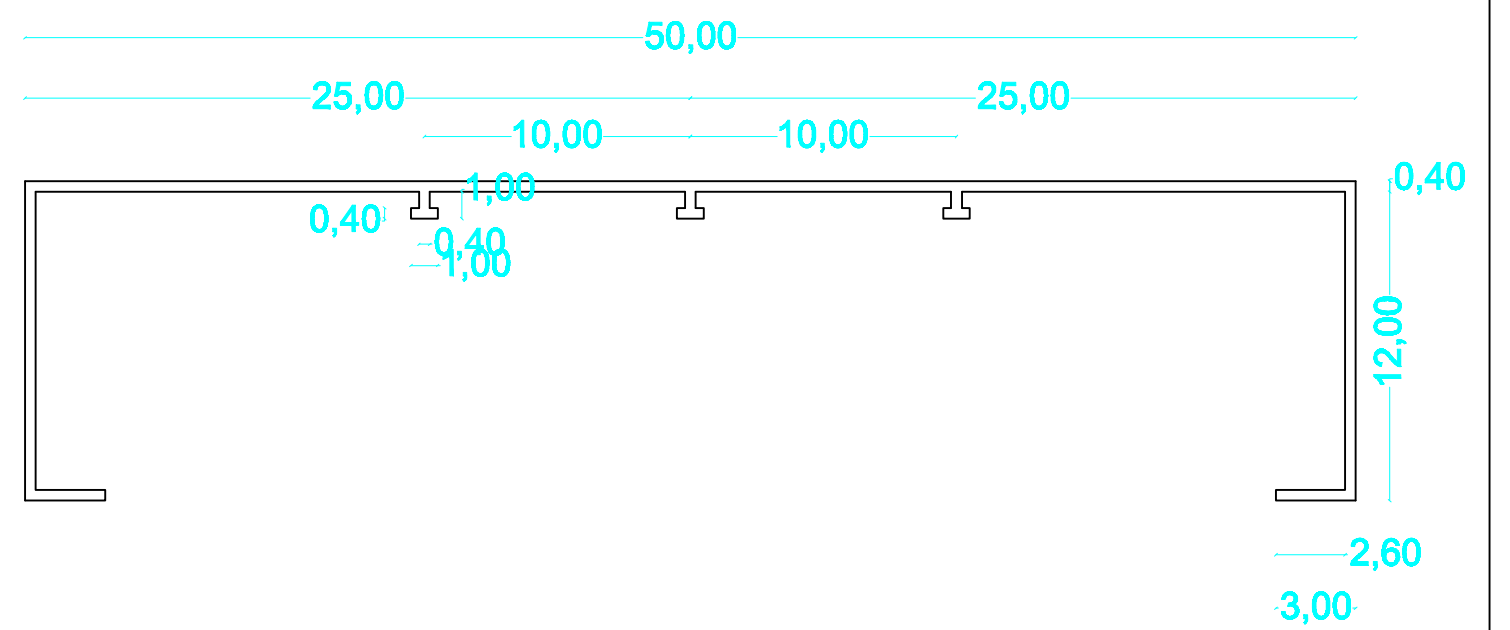
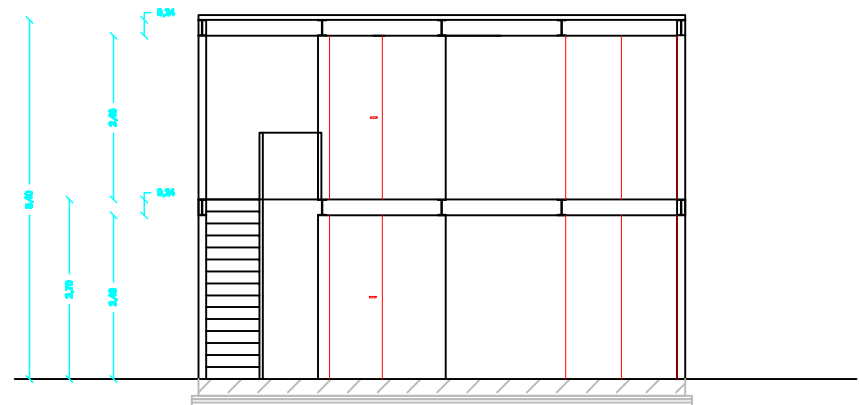


TAVOLA - 6

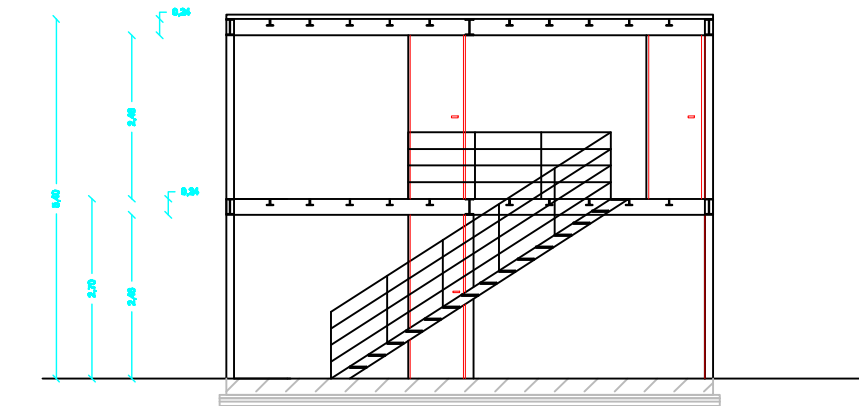
TITOLO - pianta piano 1

SCALA - 1:50 1:10

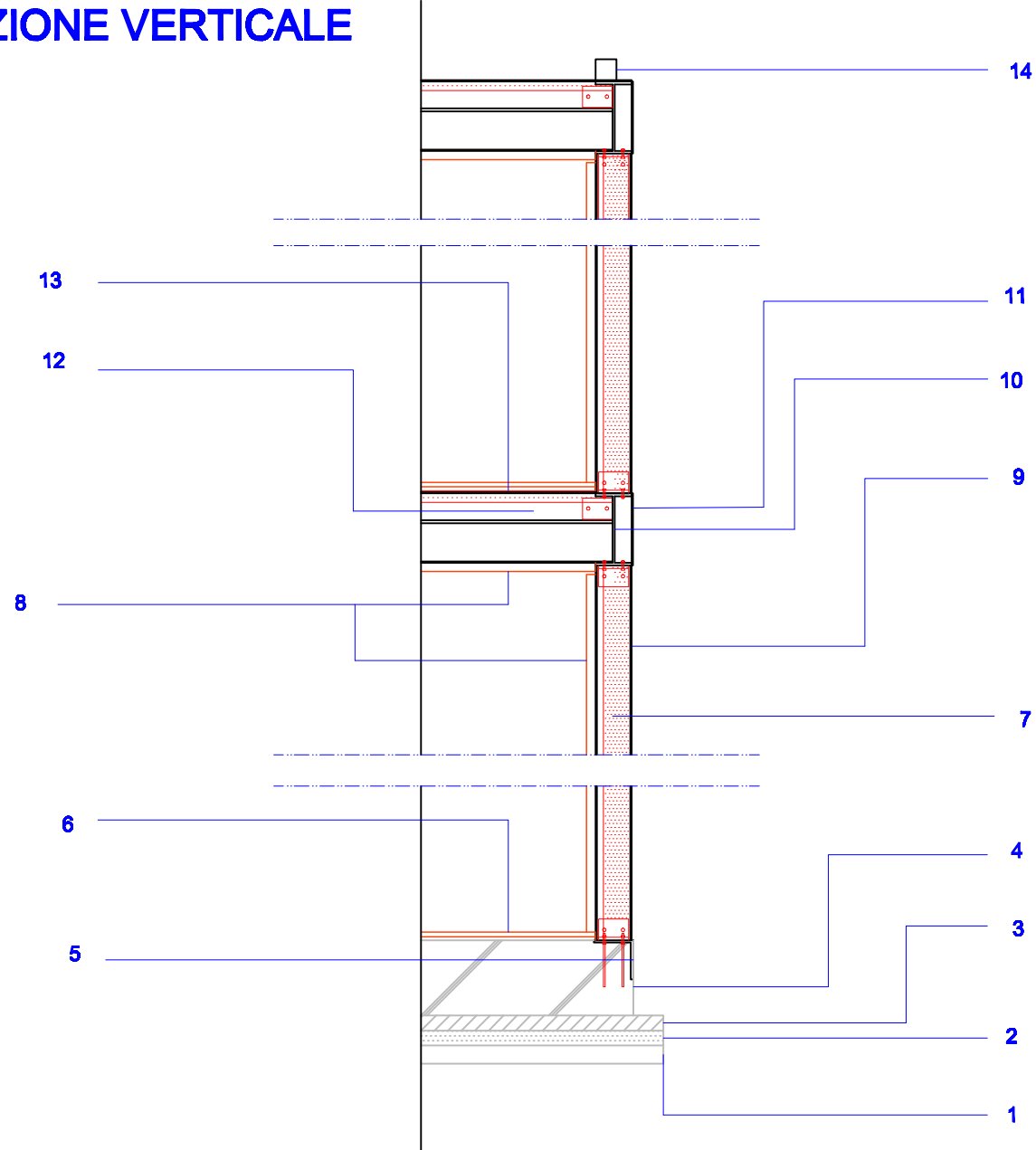
### SEZIONE A-A



### SEZIONE B-B



### SEZIONE VERTICALE



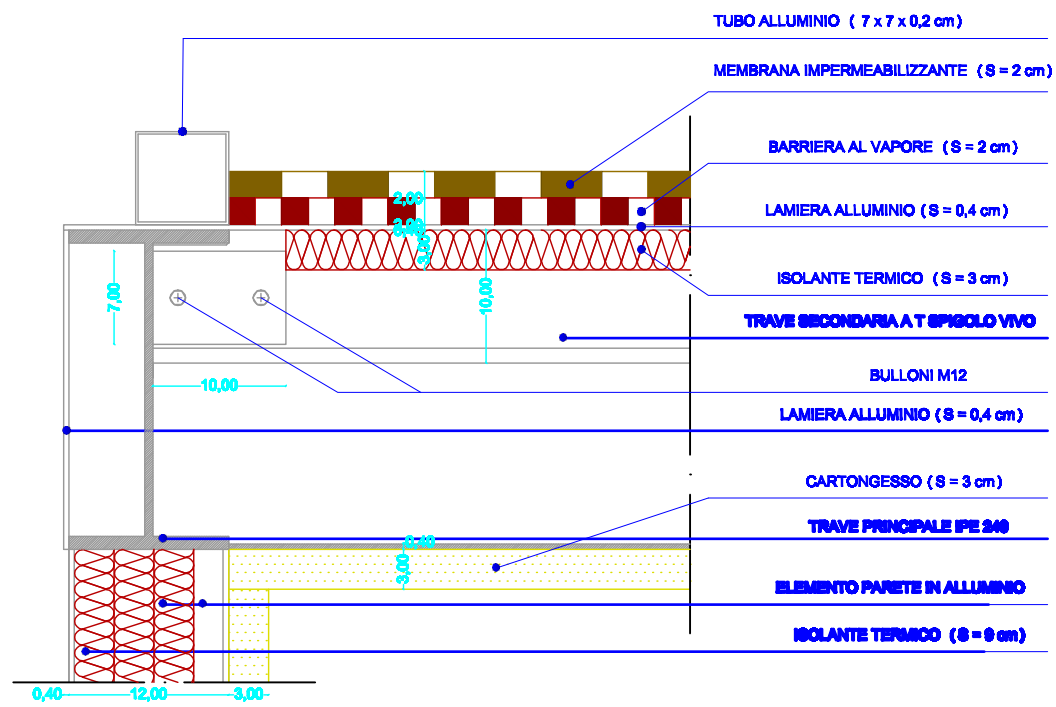
- 1 MASSICCIATA DELLO SPESSORE DI 60 mm
- 2 ISOLANTE TERMICO DELLO SPESSORE DI 50 mm
- 3 MASSETTO IN CEMENTO DELLO SPESSORE DI 50 mm
- 4 BASE IN CEMENTO DELLO SPESSORE DI 250 mm
- 5 ANGOLARE IN ALLUMINIO , 13x13x8 mm
- 6 PAVIMENTO IN LEGNO MONTATO A SECCO DELLO SPESSORE DI 15 mm
- 7 ISOLANTE TERMICO DELLO SPESSORE DI 90 mm
- 8 PANNELLO DI CARTONGESSO DELL SPESSORE DI 30 mm
- 9 ELEMENTO DI PANNELLATURA IN ALLUMINIO, LARGHEZZA 500 mm
- 10 TRAVE PRINCIPALE IN ALLUMINIO IPE 240
- 11 ELEMENTO DI CHIUSURA, SPSSORE 4 mm
- 12 TRAVE SECONDARIA A T, SPIGOLO VIVO 100x100 mm
- 13 ISOLANTE ACUSTICO DELLO SPESSORE DI 5 mm
- 14 TUBO DI CHIUSURA IN ALLUMINIO 70x70x2 mm

TAVOLA - 7

TITOLO - sezioni

SCALA - 1:100 1:20

### SOLAIO COPERTURA - PARETE



### SOLAIO INTERMEDIO - PARETE

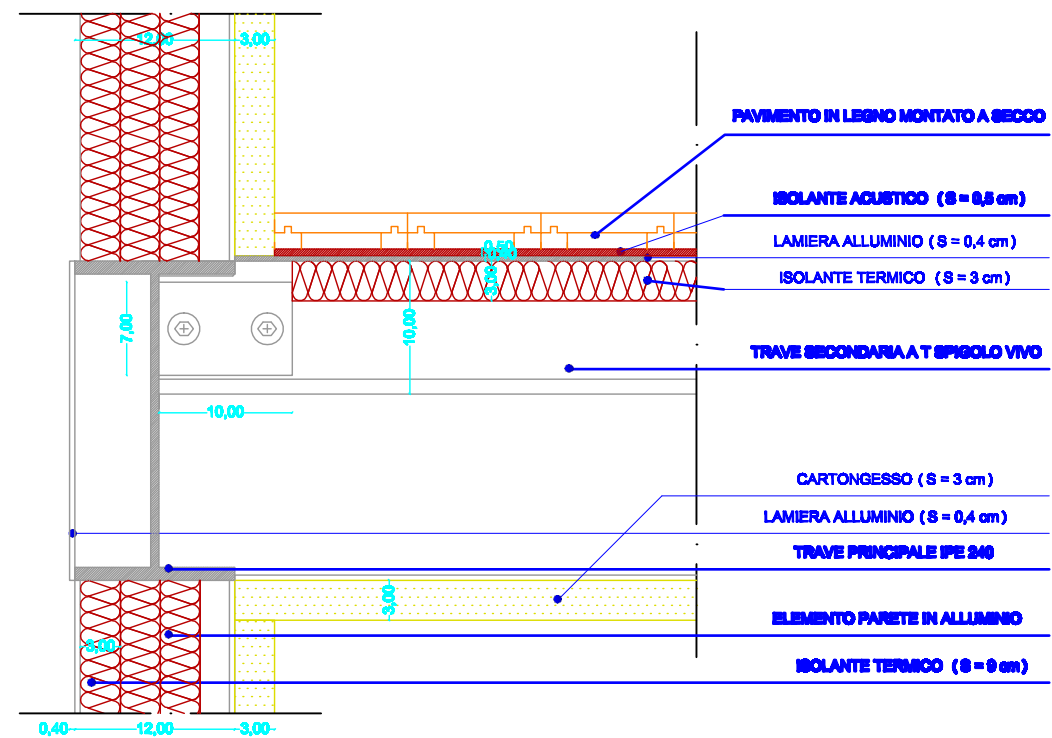


TAVOLA - 8

TITOLO - dettaglio solaio

SCALA - 1:5