

# ■ Indice

|            |   |   |    |
|------------|---|---|----|
| <b>■ 1</b> | <b>Introduzione alle strutture degli edifici</b> . . . . .          | Pag.  | 1  |
|            | 1.1   | Requisiti strutturali di forma e funzione . . . . . »                             | 1  |
|            | 1.2   | Resistenza, equilibrio globale e idoneità al servizio. . . . . »                  | 7  |
|            | 1.3   | Approcci teorici alla progettazione strutturale . . . . . »                       | 8  |
|            | 1.4   | Regole empiriche, dimensioni approssimate degli elementi strutturali . . . . . »  | 10 |
| <b>■ 2</b> | <b>Principi strutturali di base</b> . . . . . »                     |   | 19 |
|            | 2.1   | Forze . . . . . »   | 19 |
|            | 2.2   | Momenti . . . . . »   | 19 |
|            | 2.3   | Sforzo e deformazione . . . . . »   | 19 |
|            | 2.4   | Campo elastico e campo plastico . . . . . »                                       | 20 |
|            | 2.5   | Carichi principali su una costruzione. . . . . »                                  | 23 |
|            | 2.6   | Carichi secondari . . . . . »   | 26 |
| <b>■ 3</b> | <b>Teoria strutturale relativa alle travi semplici</b> . . . . . »  |   | 31 |
|            | 3.1   | Collasso delle travi per flessione, taglio ed eccesso di deformazione . . . . . » | 31 |
|            | 3.2   | Momento flettente e forza di taglio . . . . . »                                   | 34 |
|            | 3.3   | Diagrammi del momento flettente e del taglio . . . . . »                          | 36 |
|            | 3.4   | Legge della flessione . . . . . »   | 43 |
|            | 3.5   | Calcolo degli spostamenti della trave . . . . . »                                 | 45 |
| <b>■ 4</b> | <b>Introduzione al calcolo di travature reticolari.</b> . . . . . » |   | 51 |
|            | 4.1   | Forze e componenti vettoriali . . . . . »   | 52 |
|            | 4.2   | Notazione di Bow . . . . . »  | 54 |
|            | 4.3   | Puntoni e tiranti . . . . . »   | 56 |
| <b>■ 5</b> | <b>Teoria strutturale relativa ai pilastri semplici</b> . . . . . » |   | 61 |
|            | 5.1   | Collasso di un pilastro . . . . . »   | 61 |
|            | 5.2   | Lunghezza efficace . . . . . »  | 62 |
| <b>■ 6</b> | <b>Progetto di elementi strutturali in legno.</b> . . . . . »       |   | 65 |
|            | 6.1   | Classificazione delle varietà di legno dolce . . . . . »                          | 65 |

|             |  |          |            |
|-------------|--|----------|------------|
| 6.2         | Contenuto d'acqua . . . . .  | Pag.     | 66         |
| 6.3         | Dimensioni del legno per uso strutturale . . . . .   | »        | 66         |
| 6.4         | Classi di resistenza . . . . .   | »        | 67         |
| 6.5         | Progetto di una trave . . . . .  | »        | 68         |
| 6.6         | Elementi soggetti a compressione . . . . .   | »        | 70         |
| 6.7         | Resistenza al fuoco di elementi in legno massiccio . . . . .                                 | »        | 71         |
| 6.8         | Considerazioni di progetto . . . . .   | »        | 71         |
| <b>■ 7</b>  | <b>Progetto di elementi strutturali in acciaio . . . . .</b>                                 | <b>»</b> | <b>95</b>  |
| 7.1         | Acciaio da costruzione . . . . .   | »        | 95         |
| 7.2         | Dimensionamento di travi vincolate allo sbandamento laterale . . . . .                       | »        | 98         |
| 7.3         | Dimensionamento di travi non vincolate<br>allo sbandamento laterale . . . . .                | »        | 98         |
| 7.4         | Sostegno laterale efficace dell'ala compressa . . . . .                                      | »        | 100        |
| 7.5         | Deformabilità . . . . .  | »        | 101        |
| 7.6         | Taglio . . . . .   | »        | 102        |
| 7.7         | Confronto tra i carichi massimi . . . . .  | »        | 102        |
| <b>■ 8</b>  | <b>Progetto di elementi in muratura portante . . . . .</b>                                   | <b>»</b> | <b>119</b> |
| 8.1         | Resistenza di mattoni e blocchi . . . . .  | »        | 119        |
| 8.2         | Coefficiente di riduzione della resistenza . . . . .   | »        | 121        |
| 8.3         | Considerazioni pratiche relative alla disposizione<br>in pianta delle pareti . . . . .       | »        | 123        |
| 8.4         | Giunti di dilatazione . . . . .  | »        | 126        |
| 8.5         | Progetto di elementi strutturali in muratura mediante<br>calcolo agli stati limite . . . . . | »        | 127        |
| 8.6         | Resistenza caratteristica a compressione . . . . .   | »        | 127        |
| 8.7         | Resistenza teorica della muratura . . . . .  | »        | 127        |
| 8.8         | Piastre di appoggio . . . . .  | »        | 127        |
| <b>■ 9</b>  | <b>Progetto di travi in cemento armato . . . . .</b>   | <b>»</b> | <b>137</b> |
| 9.1         | Requisiti generali del calcolo allo stato limite . . . . .                                   | »        | 137        |
| 9.2         | Azioni e coefficienti di sicurezza . . . . .   | »        | 137        |
| 9.3         | Resistenza dei materiali . . . . .   | »        | 138        |
| 9.4         | Protezione dell'armatura di acciaio . . . . .  | »        | 139        |
| 9.5         | Regole pratiche di progettazione . . . . .   | »        | 141        |
| 9.6         | Progetto dell'armatura a taglio . . . . .  | »        | 142        |
| 9.7         | Progetto dell'armatura longitudinale . . . . .   | »        | 144        |
| 9.8         | Utilizzo dei grafici di progetto . . . . .   | »        | 144        |
| <b>■ 10</b> | <b>Eurocodici . . . . .</b>  | <b>»</b> | <b>163</b> |
| 10.1        | Eurocodici strutturali . . . . .   | »        | 163        |

- **A Appendice 1** . . . . . Pag. 167
  - A.1 Unità di misura SI . . . . . » 167
  
- **B Appendice 2** . . . . . » 169
  - B.1 Carichi accidentali. . . . . » 169
  
- **C Appendice 3** . . . . . » 171
  - C.1 Carichi permanenti . . . . . » 171
  
- **D Appendice 4** . . . . . » 173
  - D.1 Valori massimi dei momenti flettenti, delle forze  
di taglio e delle frecce per travi semplicemente appoggiate . . . » 173
  
- **E Appendice 5** . . . . . » 175
  - E.1 Valori di I e W. . . . . » 175

# ■ 1 Introduzione alle strutture degli edifici

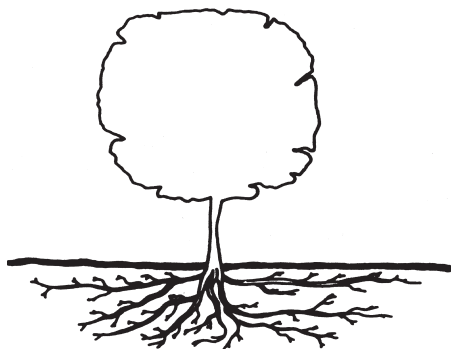
L'obiettivo fondamentale di questo libro è spiegare come calcolare le dimensioni degli elementi strutturali di costruzioni realizzate in legno, acciaio, muratura e calcestruzzo. Si farà inoltre qualche accenno ai concetti generali di stabilità, forma e funzione, per mostrare quanto un buon progetto sia strettamente connesso a valide scelte di natura strutturale.

Per progetto e scelte strutturali si intende l'insieme delle operazioni che conducono alla realizzazione di un sistema atto a sostenere una data forma e a evitarne il crollo. Il sistema di sostegno è detto struttura; gli elementi strutturali sono le singole parti che collaborano a sostenere la forma.

In questo capitolo introduttivo, prima che il lettore approfondisca lo studio dei semplici esempi di calcolo riportati nei capitoli successivi, i principi fondamentali dei sistemi di sostegno degli edifici saranno presentati e discussi facendo riferimento a semplici esempi tratti dalla natura. In questo modo sarà possibile acquisire sufficiente familiarità con i principi strutturali che consentiranno nel seguito di affrontare la soluzione di problemi reali di varia natura e complessità e di comprendere come un valido progetto strutturale dipenda più da una corretta impostazione generale che dall'uso di formule matematiche complesse.

## 1.1 Requisiti strutturali di forma e funzione

Si può imparare molto dalle forme e dalle strutture che si trovano in natura. Ovunque assistiamo a fenomeni di adattamento che consentono l'acquisizione dell'idoneità meccanica allo svolgimento di funzioni specifiche. Le forme esterne e le strutture interne sono spesso in armonia a conferma del fatto che tutto ciò che esiste in natura ha una funzione. Lo studio di come la natura utilizza le proprietà meccaniche dei materiali può quindi aiutare a comprendere le regole fondamentali del "funzionamento" delle strutture. I materiali devono essere sufficientemente resistenti per opporsi a tutte le forze cui sono soggetti durante la loro vita. Tali forze assumono forme diverse e inducono nelle strutture sollecitazioni che, semplificando, possono essere ricondotte a due tipi principali: compressione e trazione. Gli elementi compressi devono essere sufficientemente rigidi per evitare fenomeni di instabilità, mentre gli elementi tesi necessitano di una sufficiente resistenza a trazione, ma non di elevata rigidità per sopportare il tiro cui sono soggetti. La struttura di un osso è rigida e soddisfa i requisiti richiesti per l'assorbimento di forze di compressione; il tendine di un muscolo ha invece un'eccellente resistenza alla trazione, pur essendo assai deformabile.

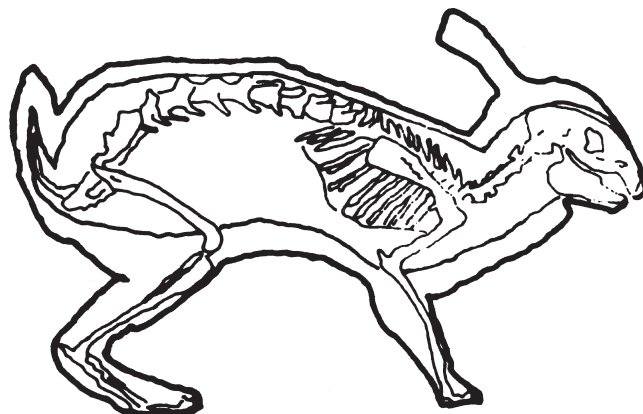


**Figura 1.1** Stabilità di un albero.

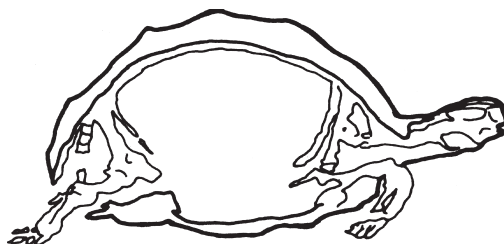
Oltre all'esigenza di avere elementi strutturali sufficientemente resistenti, vi è la necessità di garantire l'equilibrio complessivo della struttura e di limitarne le deformazioni: si pensi infatti alle radici di un albero, che per impedirne il ribaltamento (Fig. 1.1) si diffondono su una superficie superiore a quella dei rami e forniscono in tal modo una base adeguata a sostenere le forze indotte dalle oscillazioni dei rami che si verificano in una giornata ventosa. L'albero ha inoltre una certa rigidità interna che impedisce al tronco e ai rami di subire deformazioni eccessive per effetto del vento. Molti alberi durante i mesi ventosi perdono le foglie riducendo in tal modo la superficie su cui agisce il vento e quindi riducendone globalmente l'azione.

Negli animali le zampe sono disposte in modo tale da garantire in ogni caso l'equilibrio globale: durante la corsa, il moto lento o in posizione di quiete. La limitazione delle deformazioni è ottenuta grazie alla rigidità interna del corpo, che è il risultato di una buona combinazione di ossa e muscoli e, in qualche misura, della tensione esercitata dalla pelle. Gli organi interni devono essere protetti e non devono subire deformazioni eccessive: di conseguenza, l'involucro del corpo (la forma esterna) deve essere sufficientemente rigido da mantenere la propria sagoma senza rovinarsi per effetto di una generica sollecitazione: la cassa toracica di un animale per esempio deve essere sufficientemente rigida da evitare lo schiacciamento dei polmoni così come il cranio deve essere sufficientemente rigido da proteggere il cervello.

Le strutture create dall'uomo devono obbedire alle medesime leggi fondamentali della natura: gli elementi strutturali devono possedere resistenza sufficiente a sopportare sollecitazioni indotte dalle forze esterne, l'equilibrio complessivo deve essere garantito, così come una sufficiente rigidità deve essere assicurata per limitare le deformazioni. Un edificio non deve essere spazzato via dal vento, né abbattuto da una tempesta o crollare se sovraffollato; se sottoposto alle scosse prodotte da un terremoto, l'edificio deve presentare una probabilità sufficientemente elevata di superare l'evento senza danneggiarsi cagionando vittime. In breve, un edificio deve soddisfare tutti i requisiti elementari richiesti dalla sua funzione e in particolare tutti quelli di natura strutturale.



**Figura 1.2** Sezione trasversale di un coniglio (struttura di sostegno interna).



**Figura 1.3** Sezione trasversale di una tartaruga (struttura di sostegno esterna).

Per approfondire ulteriormente l'argomento relativo ai requisiti strutturali, è necessario porsi la domanda "a cosa servono gli edifici?". Per rispondere in termini semplici, si potrebbe dire che una costruzione racchiude uno spazio e lo protegge dagli agenti naturali. L'involucro che avvolge l'edificio ne garantisce la protezione e può essere costituito da materiali diversi: mattoni, pietra naturale, calcestruzzo, legno, acciaio, plastica rinforzata, vetro ecc. Se i materiali utilizzati per l'involucro hanno buone proprietà strutturali, sono possibili diverse scelte progettuali ciascuna delle quali costituisce la risposta a uno dei seguenti quesiti:

- a) L'involucro della costruzione deve essere portante?
- b) L'involucro deve essere sorretto da un'intelaiatura indipendente?
- c) Si deve utilizzare una combinazione di (a) e di (b)?

Per ogni approccio, i requisiti strutturali sono diversi e necessitano di un'attenta analisi, ma i requisiti fondamentali, ossia resistenza, rigidità ed equilibrio globale, sono i medesimi qualunque sia la tipologia strutturale adottata.

A questo punto è opportuno fare nuovamente ricorso agli esempi tratti dalla natura. Il coniglio e la tartaruga illustrati nelle figure 1.2 e 1.3 sono validi esempi di "costruzioni", dotate di struttura l'una interna (lo scheletro del coniglio) e l'altra esterna (il guscio della tartaruga). Il coniglio è l'esempio di una forma dotata di un sistema di sostegno

con ossatura interna, mentre la tartaruga ha un sistema di sostegno basato sulla rigidità dell'involucro.

Il coniglio ha una pelliccia (involucro esterno) che racchiude tutte le funzioni vitali e lo tiene caldo; gli organi sono protetti dalla cassa toracica sostenuta dalla colonna vertebrale, a sua volta sostenuta dalle zampe. Il cervello, l'organo più delicato, è ben protetto dal cranio. La testa stessa è sostenuta dal collo esattamente come una trave a mensola sostiene un carico, cosa che richiede una resistenza notevole nella zona in cui il collo si collega alla parte principale del corpo. Tale resistenza è ottenuta mediante una combinazione di ossa incastrate tra loro a formare la colonna vertebrale, e di muscoli che avvolgono le ossa in modo da assicurare un funzionamento unitario all'insieme. L'impianto costruttivo dell'intero scheletro di un coniglio è in grado di rispondere alla richiesta di resistenza in ogni suo punto. Lo scheletro modifica costantemente forma e dimensione utilizzando solo il quantitativo e la porzione di ossa e muscoli realmente necessari e consentendo al tempo stesso libertà di movimento. L'intero sistema di sostegno strutturale mantiene il coniglio sollevato dal suolo e gli consente di svolgere tutte le funzioni: correre, saltare, sedersi, mangiare ecc.

La tartaruga invece rimane sempre in prossimità del suolo, non ha grande possibilità di movimento ed è dotata di una corazza che la protegge. La testa normalmente si protende verso l'esterno, ma si ritrae bruscamente in caso di pericolo, nascondendosi sotto la corazza, che funge anche da sistema di sostegno principale dell'intero corpo. Le zampe e il collo sono collegati alla corazza e l'intero impianto costruttivo è realizzato in accordo con la natura della tartaruga, nota per i suoi movimenti lenti ma ben protetta dal mondo esterno. La struttura è molto resistente e rigida e offre all'interno uno spazio nel quale cuore e polmoni possono funzionare protetti da sollecitazioni esterne. La resistenza alle azioni esterne è fornita dalla corazza, che è dotata di irrigidimenti locali disposti nei punti maggiormente sollecitati. La corazza svolge pertanto sia la funzione di sostegno che quella di involucro, anche se ciò va a scapito della libertà di movimento. Questo tuttavia, nel caso della tartaruga, non ha grande rilevanza, essendo la limitazione dei movimenti uno dei parametri alla base del progetto.

Nel caso delle costruzioni, un confronto analogo può essere condotto tra gli edifici sostenuti da un'intelaiatura interna e quelli sostenuti da un'involucro esterno. Un'intelaiatura è in generale più deformabile e si adatta meglio ai movimenti, mentre una struttura a involucro portante tende a essere rigida e poco capace di assecondare i movimenti senza danneggiarsi.

Dopo aver confrontato le caratteristiche della tartaruga e del coniglio in termini di resistenza strutturale, bisogna affrontare il problema dell'equilibrio globale. Viste le ridotte capacità motorie, la tartaruga ha possibilità molto limitate: le zampe fuoriescono direttamente dai bordi della corazza e non consentono alcuna opportunità di modificare la posizione di equilibrio (Fig. 1.4). La posizione di equilibrio è strettamente legata a quella del centro di gravità che è il punto, all'interno di un corpo, in cui si può considerare concentrato tutto il peso del corpo stesso, a prescindere dalla sua posizio-



**Figura 1.4** Stabilità di una tartaruga.



**Figura 1.5** Stabilità di un coniglio in posizione seduta.



**Figura 1.6** Stabilità di un coniglio in posizione eretta.

ne. Nel caso della tartaruga, il centro di gravità è approssimativamente al centro del corpo e avanza leggermente quando la tartaruga fa uscire la testa dalla corazza. A prescindere da quello che la tartaruga fa con le zampe, il centro di gravità è ubicato ben all'interno dell'area compresa tra i quattro "appoggi" e ciò assicura una condizione di equilibrio globale stabile, tanto che, nel caso essa si rovesci sul dorso (altra condizione di equilibrio stabile) difficilmente potrà rigirarsi nuovamente.

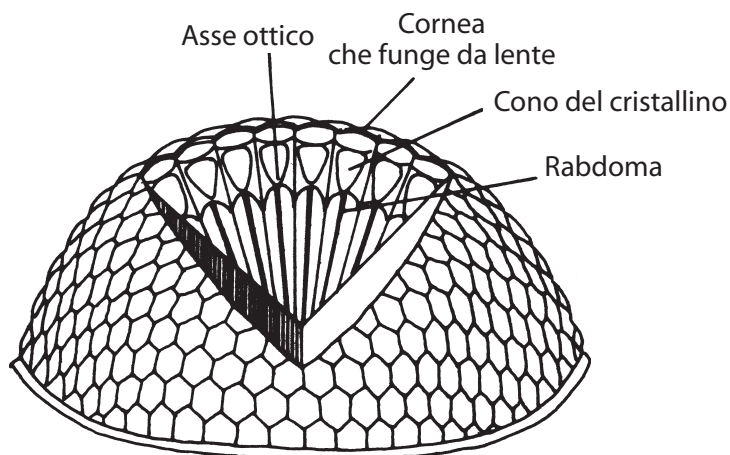
Un coniglio al contrario, essendo più flessibile, può facilmente porre rimedio a una condizione di squilibrio, quale quella di essere sul dorso. Tuttavia, per il coniglio è più usuale stare sulle quattro zampe o mettersi seduto su quelle posteriori: vale la pena studiare l'equilibrio (globale) del coniglio in queste due posizioni (si vedano le Figg. 1.5 e 1.6). Anche in questo caso, la posizione di equilibrio dipende da quella del centro di gravità, che si trova approssimativamente attorno al cuore. Quando il coniglio poggia sulle quattro



zampe, il centro di gravità si trova all'interno dell'area compresa tra queste come illustrato nella figura 1.5. In questa posizione esso è in equilibrio stabile e, anche se urtato, non cade. Se il coniglio si sposta all'indietro sedendosi sulle zampe posteriori, il centro di gravità si muove nella stessa direzione: se in tale posizione si tracciasse una retta verticale per il centro di gravità, essa passerebbe molto vicina alla tibia e ben all'interno dell'impronta della zampa posteriore sul suolo. Essendo il piede e la parte bassa della zampa a contatto con il suolo, il coniglio è in equilibrio stabile (Fig. 1.6). Ciò è consentito soprattutto dalla particolare conformazione delle zampe posteriori, che sono lunghe e piegate in avanti fino a toccare lo stomaco; l'articolazione del ginocchio del coniglio funge da fulcro, intorno al quale il corpo del coniglio è in equilibrio. Al contrario la tartaruga, dotata di zampe corte e dritte, non ha altra possibilità di equilibrio oltre a quella raggiunta appoggiandosi sulle quattro zampe.

Come si può immaginare facilmente, ogni essere vivente in natura potrebbe essere utilizzato come esempio di "struttura": è dotato di forma strutturale, e poiché tutte le creazioni naturali sono frutto di un lungo processo di adattamento ci si può aspettare che la "progettazione strutturale" in questi casi abbia raggiunto un elevato livello qualitativo. Tuttavia quando si confrontano le strutture naturali con quelle create dall'uomo è necessario tenere a mente il fatto che mentre la natura utilizza materiali vivi l'uomo ne usa di inanimati e le due varianti non si comportano sempre allo stesso modo: per esempio, se usate in eccesso le suole delle scarpe si consumano mentre le piante dei piedi nudi si ispessiscono.

Anche entità di dimensioni così ridotte da impedirci di vederle a occhio nudo sono sostenute da una struttura: nella figura 1.7 è schematizzata (molto ingrandita) quella dell'occhio di un insetto. Esso presenta numerose cornee che fungono da lenti: la luce che attraversa ciascuna di esse viene concentrata, mediante un cono trasparente, su un elemento fotosensibile detto rabdoma. Tutti questi elementi devono essere collegati e sostenuti: questa funzione viene svolta, come illustrato nella figura 1.7, da un



**Figura 1.7** Struttura dell'occhio di un insetto (*Scientific American*).

reticolo emisferico posto sulla parte esterna dell'occhio. Ogni nodo del reticolo è vincolato da tre piccole aste che, dotate di lunghezza modesta, sono resistenti sia a trazione sia a compressione. In questo modo l'intelaiatura strutturale costituita dal reticolo a cupola fornisce alle cornee un sostegno rigido e resistente che consente all'occhio dell'insetto di funzionare con la massima efficienza.

Il ben noto matematico, pedagogista e ingegnere Buckminster Fuller, ha utilizzato questo schema elementare in molte delle sue famose strutture artificiali, definite cupole geodetiche, il cui funzionamento strutturale è identico a quello riscontrato nell'occhio di un insetto. Questo esempio, per mostrare come molti architetti e ingegneri abbiano inconsapevolmente "copiato" forme naturali elementari per creare strutture ed edifici grandiosi, molti dei quali famosi. Il progettista creativo può far propri molti dei principi utilizzati in natura e che non sono stati ancora totalmente esplorati dall'uomo.

Sarebbe certamente possibile illustrare molte altre forme strutturali adottate in natura, ma, come detto in precedenza, non è negli intenti dell'autore di questo libro dilungarsi su questo tema cui si è accennato solo per stimolare il lettore a osservare gli esempi offerti in natura per trarne suggerimenti per le proprie scelte strutturali, anche se di modesta rilevanza.

## 1.2 Resistenza, equilibrio globale e idoneità al servizio

Nel paragrafo precedente si è sottolineato il fatto che le strutture di una tartaruga e di un coniglio devono essere resistenti, globalmente equilibrate e sufficientemente rigide da consentire a questi animali lo svolgimento delle funzioni quotidiane. Gli ingegneri definiscono quest'ultimo requisito "idoneità al servizio" o "funzionalità".

Così come le forme naturali, anche le costruzioni devono essere dotate di resistenza e stabilità e presentare idoneità al servizio. È compito del progettista soddisfare tutti e tre i requisiti e verificare che ciascuno di essi risponda agli standard minimi suggeriti, in genere, dalle normative vigenti:

- 1 *Resistenza*: gli elementi strutturali devono possedere resistenza sufficiente da sopportare tutte le forze applicate all'edificio durante la sua vita utile. Ciò significa per esempio, che se è possibile che le forze applicate sollecitino uno stesso elemento strutturale a trazione in una determinata condizione, a compressione in un'altra o a torsione in un'altra ancora, il progettista deve considerare la peggiore combinazione possibile di forze (o in generale di azioni) e studiare in quale rapporto stia l'effetto di tale azione con la resistenza dell'elemento.
- 2 *Equilibrio globale*: l'edificio non deve raggiungere il collasso a causa di spostamenti eccessivi che possano provocarne il crollo o il ribaltamento. Per esempio, in un edificio deve essere disposta una controventatura sufficiente a limitare gli spostamenti orizzontali che potrebbero causare rotazioni delle strutture verticali con conseguente perdita di equilibrio dell'edificio.

- 3 *Idoneità al servizio o funzionalità*: l'edificio deve presentare i requisiti necessari perché possa essere utilizzato e risultare confortevole per gli occupanti. Per esempio, gli elementi strutturali devono presentare rigidità sufficiente a impedire deformazioni o rotazioni dei solai e/o oscillazioni eccessive dell'edificio nel suo complesso.

Se un edificio soddisfa solo uno o due dei requisiti, ma non tutti e tre, è un'opera mal riuscita. Per esempio, una trave può essere sufficientemente resistente, globalmente equilibrata, ma se presenta un'inflexione eccessiva, non è idonea al servizio e quindi costituisce un elemento mal progettato.

### 1.3 Approcci teorici alla progettazione strutturale

Di seguito si discutono alcuni approcci teorici alla progettazione strutturale.

#### ***Il metodo di progetto basato sulla crescita***

Come già illustrato nel paragrafo 1.1, per ottenere forme e funzioni strutturali la natura utilizza un approccio unico e senza uguali: una data struttura si sviluppa infatti nella forma idonea e con la resistenza adeguata perché durante la crescita è in grado di adattarsi gradualmente alle forze agenti. Per esempio, se si pone un carico sul ramo di un albero, quel ramo vi si adatterà lentamente e crescerà più robusto per poter sostenerlo.

Gli sforzi dell'uomo, sebbene encomiabili, non sono neanche paragonabili a questo grado di perizia.

#### ***Esperienza, intuizione e regole empiriche***

Artigiani esperti quali il falegname, il muratore o il costruttore dispongono di un notevole bagaglio di esperienza accumulata negli anni e derivante da interventi effettuati su molti edifici. Se all'esperienza si aggiungono intuizione e buonsenso, queste figure professionali sono in grado di dimensionare la maggior parte degli elementi strutturali di un edificio senza dover ricorrere a normative e formule matematiche e possono arrivare per intuizione alle dimensioni corrette. Coloro i quali, dotati di minore esperienza, non riescono a intuire le dimensioni strutturali corrette devono affidarsi a regole empiriche analoghe a quelle che verranno trattate in dettaglio nel paragrafo successivo (1.4). Tali regole possono essere usate per dimensionare gli elementi strutturali in modo adeguato e sono comunque utili per un dimensionamento preliminare e orientativo da affinare in seguito mediante analisi più rigorose.

Regole, intuizione e capacità critica costituiscono la base di una corretta progettazione. D'altra parte si deve ricordare che l'intuizione e il buonsenso sono figlie della ripetizione e sono quindi sufficienti solo per la progettazione di opere che non presentano innovazioni; l'utilizzo di computer e codici di calcolo ha in questi casi il solo scopo di confermare le valutazioni fatte in questa fase iniziale. Senza la conoscenza delle

“regole” fondamentali, l’esperienza di per se non è sufficiente alla buona e sicura progettazione soprattutto quando la struttura ha carattere particolare o innovativo.

### **Calcolo: metodo delle tensioni ammissibili**

I materiali strutturali di buona qualità presentano un comportamento elastico: se sottoposti a sollecitazioni di qualunque tipo: trazione, compressione, flessione o torsione, essi non subiscono danni permanenti e, quando le forze applicate vengono rimosse, la struttura torna ad assumere la configurazione originaria. Se le azioni esercitate sul materiale aumentano fino al verificarsi di un danno permanente, il comportamento del materiale cessa di essere elastico. Il superamento del limite elastico è facilmente riconoscibile in quanto la struttura, allorché le forze vengono rimosse, non ritorna alla configurazione originaria (deformazione permanente). Il valore della sollecitazione oltre il quale inizia a verificarsi una deformazione permanente è detto limite di snervamento. L’argomento verrà discusso in maggiore dettaglio nel paragrafo 2.4; per il momento, basti sapere che l’approccio elastico alla progettazione strutturale è basato sulla definizione del limite ammissibile di sollecitazione come rapporto tra il limite di snervamento e un certo coefficiente di sicurezza.

Pertanto, nel caso del calcolo elastico:

$$\text{Limite ammissibile} = \frac{\text{Limite di snervamento del materiale}}{\text{Coefficiente di sicurezza}}$$

In altre parole si stabilisce innanzitutto di utilizzare il materiale esclusivamente nell’ambito del comportamento elastico, inoltre si decide prudenzialmente di limitare le sollecitazioni sulla struttura in modo che il materiale sia ben lontano dal limite del comportamento elastico. Tale prudenza si rende necessaria per cautelarsi da possibili incertezze sia sulla misura del limite elastico sia sul valore delle sollecitazioni agenti sulla struttura.

### **Calcolo: metodo agli stati limite**

Il calcolo agli stati limite prende in considerazione separatamente un certo numero di condizioni limite relative a resistenza, equilibrio globale e idoneità al servizio.

In merito al primo di questi limiti, la resistenza di un materiale è assunta pari al limite di rottura ed è quindi, in generale, superiore al limite di snervamento preso in considerazione dal metodo elastico. Il coefficiente di sicurezza per il calcolo del massimo valore di resistenza da considerare nei calcoli viene in questo caso applicato al limite di rottura invece che a quello di snervamento.

Il metodo agli stati limite tiene in considerazione sia la variabilità della resistenza della struttura (attraverso le resistenze dei materiali impiegati) sia quella dell’intensità dei carichi che gravano sulla struttura. Tale variabilità è tenuta in conto mediante la defini-

zione di valori "caratteristici", sia della resistenza dei materiali che delle azioni esterne, corrispondenti ciascuno a una data probabilità di superamento. Per esempio, i valori caratteristici delle resistenze dei materiali sono definiti come quelli che hanno il 95% di probabilità di essere superati. In altre parole, esiste una probabilità del 95% che il materiale presenti una resistenza superiore al valore caratteristico. Oltre alla variabilità dei valori di azioni e resistenze, il metodo tiene conto delle incertezze (di entità diversa) connesse con la loro determinazione e impone la necessità di applicare separatamente i coefficienti di sicurezza ai valori caratteristici dei carichi agenti e della resistenza dei materiali. Questo consente di effettuare un progetto caratterizzato, con probabilità accettabile, da un grado di sicurezza e di funzionalità considerato sufficiente. In questo caso il confronto per la verifica della sicurezza strutturale è condotto tra i valori caratteristici delle resistenze, ridotti secondo i relativi coefficienti di sicurezza, e i valori caratteristici delle azioni incrementati secondo i relativi coefficienti di sicurezza.

$$\frac{\text{Resistenza caratteristica}}{\text{coefficiente di sicurezza resistenza}} >$$

$$> (\text{coefficiente di sicurezza azione}) \times \text{Azione caratteristica}$$

L'approccio alle tensioni ammissibili sarà utilizzato nei capitoli 6 e 7 per legno e acciaio, mentre l'approccio basato sugli stati limite sarà illustrato nei capitoli 8 e 9 per elementi in muratura e cemento armato. Entrambi i metodi fanno uso di coefficienti di sicurezza (differenti nei due casi) i cui valori sono definiti, come riportato dalle Norme Italiane, "in funzione dei materiali, delle tipologie strutturali, delle modalità costruttive, della destinazione e della durata prevista dell'opera al fine di conseguire il necessario livello di sicurezza".

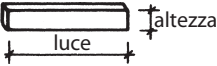

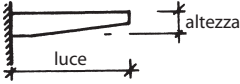

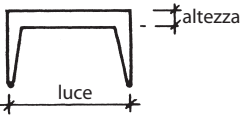
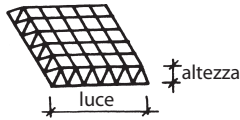
#### 1.4 Regole empiriche, dimensioni approssimate degli elementi strutturali

Le informazioni strutturali più importanti di cui necessita un architetto in fase di impostazione del progetto sono:

- a) un'idea piuttosto precisa dello schema strutturale da realizzare;
- b) una stima dell'ingombro, ovvero sia delle dimensioni di massima degli elementi strutturali.

Se queste informazioni sono disponibili, è possibile definire alcune dimensioni quali, per esempio, l'altezza libera degli ambienti, senza dover successivamente effettuare delle pesanti modifiche al progetto. Per costruzioni ordinarie, l'esperienza acquisita negli anni indica all'architetto e all'ingegnere esperti la forma e le dimensioni strutturali idonee; lo studente può sopperire alla mancanza di esperienza mediante alcune semplici regole empiriche.

**Tabella 1.1** Dimensioni approssimate degli elementi strutturali.

| Tipo di elemento  | Altezza approssimata            |                                    |
|---|---------------------------------|------------------------------------|
| <b>Trave</b><br>                       | (a) Carico leggero.             | Altezza = $\frac{\text{Luce}}{20}$ |
|   | (b) Carico pesante.             | Altezza = $\frac{\text{Luce}}{18}$ |
| <b>Soletta</b><br>                     | Semplicemente appoggiata.       | Altezza = $\frac{\text{Luce}}{30}$ |
| <b>Mensola</b><br>                     | Vincolata a una sola estremità. | Altezza = $\frac{\text{Luce}}{7}$  |
| <b>Travatura reticolare</b><br>       | Semplicemente appoggiata.       | Altezza = $\frac{\text{Luce}}{14}$ |
| <b>Telaio semplice o portale</b><br> |                                 | Altezza = $\frac{\text{Luce}}{40}$ |
| <b>Telaio spaziale</b><br>           | Appoggio continuo               |                                    |
|   | Nervature incrociate.           | Altezza = $\frac{\text{Luce}}{40}$ |
|   | Appoggi isolati.                |                                    |
|   | Nervature parallele.            | Altezza = $\frac{\text{Luce}}{15}$ |

**Tabella 1.2** Dimensioni approssimate dei pilastri.

| Tipo di pilastro  | Carico, altezza e dimensione   |     |     |     |     |     |     |     |     |     |   |   |   |    |    |     |     |     |     |
|---|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---|---|---|----|----|-----|-----|-----|-----|
| Cemento armato<br>(3 m di altezza)  | <table border="1"> <tr> <td>200</td> <td>250</td> <td>300</td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> </tr> <tr> <td>200</td> <td>250</td> <td>300</td> </tr> </table> <p>Dimensioni del pilastro (mm)</p>  | 200 | 250 | 300 | X   | X   | X   | 200 | 250 | 300 |   |   |   |    |    |     |     |     |     |
| 200   | 250  | 300 |     |     |     |     |     |     |     |     |   |   |   |    |    |     |     |     |     |
| X   | X  | X   |     |     |     |     |     |     |     |     |   |   |   |    |    |     |     |     |     |
| 200   | 250  | 300 |     |     |     |     |     |     |     |     |   |   |   |    |    |     |     |     |     |
| Acciaio dolce<br>(3 m di altezza)<br>Profilati a sezione<br>rettangolare cava | <table border="1"> <tr> <td>100</td> <td>150</td> <td>200</td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> </tr> <tr> <td>100</td> <td>150</td> <td>200</td> </tr> </table> <p>Dimensioni del pilastro (mm)</p>  | 100 | 150 | 200 | X   | X   | X   | 100 | 150 | 200 |   |   |   |    |    |     |     |     |     |
| 100   | 150  | 200 |     |     |     |     |     |     |     |     |   |   |   |    |    |     |     |     |     |
| X   | X  | X   |     |     |     |     |     |     |     |     |   |   |   |    |    |     |     |     |     |
| 100   | 150  | 200 |     |     |     |     |     |     |     |     |   |   |   |    |    |     |     |     |     |
| Acciaio dolce<br>(carico 260 kN)<br>Profilati a sezione<br>rettangolare cava  | <table border="1"> <tr> <td>75</td> <td>87</td> <td>100</td> <td>114</td> <td>150</td> <td>178</td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> </tr> <tr> <td>75</td> <td>87</td> <td>100</td> <td>114</td> <td>150</td> <td>178</td> </tr> </table> <p>Dimensioni del pilastro (mm)</p> | 75  | 87  | 100 | 114 | 150 | 178 | X   | X   | X   | X | X | X | 75 | 87 | 100 | 114 | 150 | 178 |
| 75  | 87   | 100 | 114 | 150 | 178 |     |     |     |     |     |   |   |   |    |    |     |     |     |     |
| X   | X  | X   | X   | X   | X   |     |     |     |     |     |   |   |   |    |    |     |     |     |     |
| 75  | 87   | 100 | 114 | 150 | 178 |     |     |     |     |     |   |   |   |    |    |     |     |     |     |

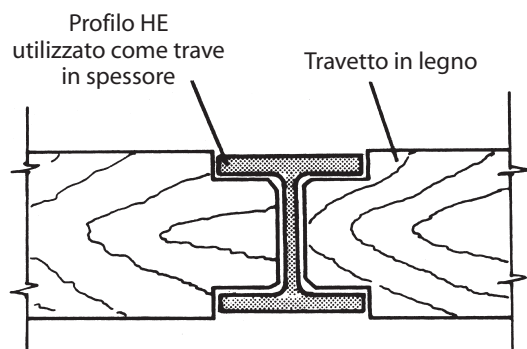
Le tabelle 1.1 e 1.2 illustrano alcune regole relative a travi, telai semplici o portali, elementi a mensola, solette e pilastri.

I minimi valori di altezza degli elementi strutturali derivano principalmente dalla necessità di soddisfare il requisito della funzionalità. È possibile irrobustire una trave aumentando la quantità di materiale e dotandola di sufficiente controventatura laterale, tuttavia, per rendere un edificio funzionale, la trave dovrà essere sufficientemente rigida da evitare fessurazione dei soffitti e movimenti degli oggetti all'interno degli ambienti a causa di eccessive deformazioni dei solai. Il modo più efficace per limitare

le deformazioni, è fornire alla trave un'altezza sufficiente: i rapporti luce/altezza riportati nella tabella 1.1 danno una stima iniziale dei valori più efficienti delle altezze di travi e solette, indipendentemente dal materiale con cui esse sono realizzate.

È utile sottolineare che si tratta di regole empiriche e che, in generale, questi rapporti luce/altezza indicano le sezioni più economiche in termini di peso della trave per una data luce. Spesso queste indicazioni vengono modificate da altri requisiti progettuali. Se, per esempio, una trave metallica deve sostenere un pavimento in legno, può essere utile incorporare la trave entro lo spessore del solaio in legno utilizzando un profilo tipo HE come illustrato nella figura 1.8. Procedendo in questo modo il peso della trave metallica potrebbe diventare di quattro volte superiore rispetto a quello della sezione economica. Nel bilancio complessivo va tenuto però conto anche del fatto che il profilo scelto consente un vantaggio non trascurabile dal punto di vista estetico, cioè l'assenza di travi fuori spessore. La sezione di altezza inferiore può inoltre far risparmiare uno o due corsi di muratura e quindi generare una soluzione globalmente più economica.

Le regole empiriche riportate nelle tabelle 1.1 e 1.2 sono illustrate negli esempi 1.1 – 1.5 nei quali il dimensionamento degli elementi è condotto sulla base del tipo di carico (pesante, medio o leggero) e dei rapporti luce/altezza consigliati.



**Figura 1.8** Trave a doppio T.

### **Per ulteriori approfondimenti**

Thompson, D'Arcy (1917) *On Growth and Form*, volumi I e II. Cambridge University Press.

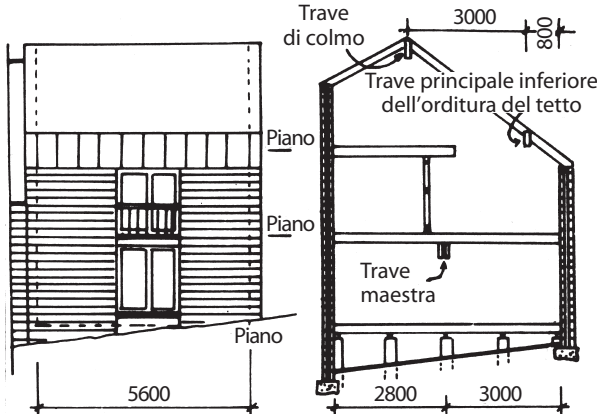
Hogden, Lancelot (1936) *Mathematics For the Million*. George Allen and Unwin, London.



**Esempio 1.1**

Progetto: Casa unifamiliare

Dimensionamento delle travi

| Rif.     | Calcoli   | Risultato                  |
|----------|---|----------------------------|
|          |    |                            |
|          | <p>Il monolocale è progettato secondo uno schema molto aperto con travi in legno a vista. Il tetto è sostenuto da travi che poggiano sui muri di confine. I travetti si estendono dalla facciata al retro dell'edificio e sono sostenuti al centro da una trave appoggiata sui muri di confine.</p> |                            |
| D.       | <p>Quali sono le altezze approssimative:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>delle travi principali dell'orditura del tetto?</li> <li>delle travi maestre?</li> <li>dei travetti?</li> </ul>   | Altezze                    |
| Risp.    | <p><u>Trave di colmo</u>                      <math>altezza = luce / 18 = 5600 / 18 \cong 300</math></p>  | Travi principali del tetto |
| Fig. 1.4 | <p><u>Trave principale inferiore</u>    <math>altezza = 5600 / 18 \cong 300</math></p> <p>Si noti che queste travi sostengono un'ampia superficie del tetto</p>   | Legno laminato 300 mm      |
|          | <p><u>Falsi puntoni</u>                      <math>altezza = luce / 20 = 3000 / 20 \cong 150</math></p>   | Falsi puntoni 150 mm       |
|          | <p><u>Trave maestra</u>                      <math>altezza = luce / 18 = 5600 / 18 \cong 300</math></p> <p>Si noti che questa trave sostiene il primo e il secondo impalcato</p>  | Trave maestra 300 mm       |
|          | <p><u>Travetti</u>                              <math>altezza = luce / 20 = 3000 / 20 = 150</math></p>  | Travetti 150 mm            |

## Esempio 1.2

Progetto: Villetta a schiera

Dimensionamento di travetti e travi

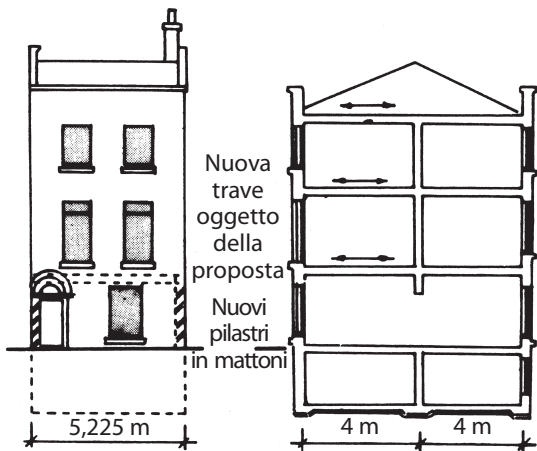
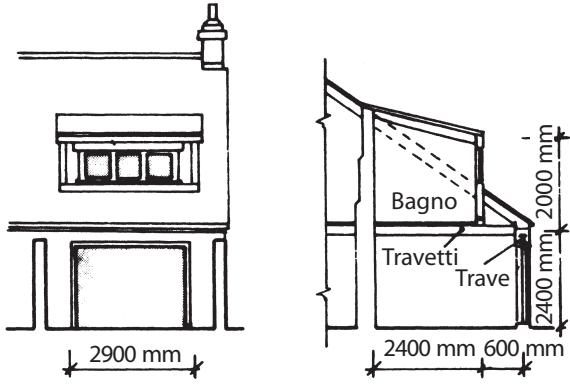
| Rif | Calcoli  | Risultato   |
|-----|--|---|
|     |  <p data-bbox="217 933 1019 1145">           La villetta a schiera presenta travetti appoggiati sulle pareti anteriori, sulle pareti posteriori e su un muro divisorio portante al centro.<br/>           Si propone di convertire il piano terra in un negozio con un'ampia vetrina sulla facciata. La muratura in mattoni e i solai ubicati sopra la vetrina saranno sostenuti da una trave metallica appoggiata agli estremi su nuovi pilastri in mattoni inseriti nei muri di confine.         </p> <p data-bbox="217 1210 322 1238">Domande</p> <p data-bbox="217 1247 796 1321">           a. Qual è l'altezza approssimata dei travetti in legno?<br/>           b. Qual è l'altezza approssimata della nuova trave?         </p> <p data-bbox="217 1358 309 1386">Risposte</p> <p data-bbox="217 1395 783 1469">           a. Travetti. Luce 4 m (solo carico del pavimento)<br/> <math>altezza = luce / 20 = 4000 / 20 = 200 \text{ mm}</math> </p> <p data-bbox="217 1515 987 1589">           b. Trave metallica (carico pesante comprendente impalcato e muratura in mattoni)         </p> <p data-bbox="217 1626 756 1672"> <math>altezza = luce / 18 = 5000 / 18 = 280 \text{ mm}</math> </p> | <p data-bbox="1026 1386 1125 1478">Travetti<br/>Altezza = 200 mm</p> <p data-bbox="1026 1515 1105 1580">Trave metallica</p> <p data-bbox="1026 1626 1125 1690">Altezza = 280 mm</p> |

Tabella  
1.1

**Esempio 1.3**

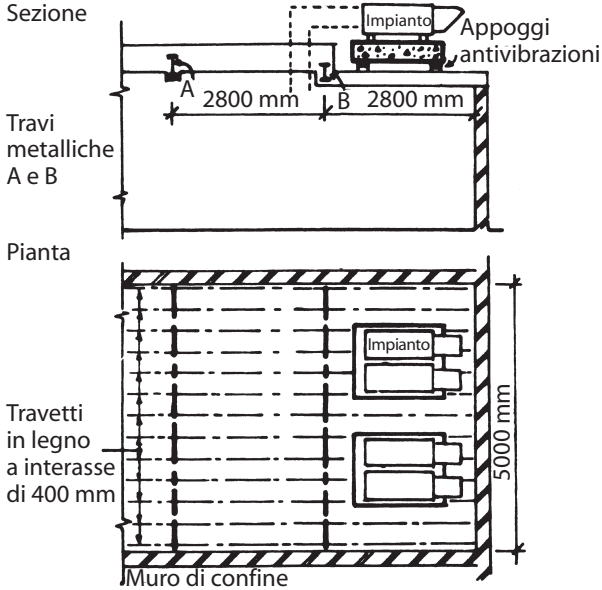
Progetto: Ampliamento di una villetta

Dimensionamento di trave e travetti

| Rif | Calcoli  | Risultato   |
|-----|--|---|
|     |  <p>L'ampliamento della villetta prevede un abbaino al primo piano e una veranda a vetrate al piano terra. I travetti in legno sostengono l'abbaino e il relativo tetto così come il primo piano, pertanto sono sottoposti a un carico notevole.</p> <p><i>Domanda</i><br/>Qual è l'altezza approssimata:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• dei travetti</li> <li>• della trave sopra la veranda</li> </ul> <p><i>Risposte</i></p> <p>Altezza dei travetti in legno<br/> <math>Altezza = luce / 18 = 3000 / 18 = 167</math></p> <p>Altezza della trave metallica<br/> <math>Altezza = luce / 20 = 2900 / 20 = 145</math></p> | <p>Travetti in legno<br/>Altezza = 175 mm</p> <p>Trave metallica<br/>Altezza = 150 mm</p> |

**Esempio 1.4**

Progetto: Ampliamento di un negozio  
Dimensioni approssimate delle travi

| Rif.        | Calcoli  | Risultato   |
|-------------|--|---|
|             |  <p>Sezione</p> <p>Travi metalliche A e B</p> <p>Pianta</p> <p>Travetti in legno a interasse di 400 mm</p> <p>Muro di confine</p> <p>Impianto</p> <p>Appoggi antivibratori</p> <p>A 2800 mm</p> <p>B 2800 mm</p> <p>5000 mm</p> <p>L'impianto di aria condizionata deve essere ubicato sul tetto di un'area di ampliamento di un negozio. Per ridurre le vibrazioni, l'impianto deve poggiare su due basamenti in calcestruzzo pesante che, a loro volta, sono collocati su appoggi che distribuiscono il carico tra più travetti. Tra i basamenti e gli appoggi sono stati inseriti degli appoggi antivibratori.</p> <p>Domanda: Dimensionare le travi metalliche e i travetti in legno per il sostegno dell'impianto e del tetto.</p> |   |
| Tabella 1.1 | <p>a) Altezza dei travetti in legno<br/>(i basamenti in calcestruzzo costituiscono un carico notevole per il legno)</p> <p><math>Altezza = luce / 18 = 2800 / 18 = 156 \text{ mm}</math></p> <p>b) Altezza delle travi metalliche</p> <p><math>Altezza = luce / 20 = 5000 / 20 = 250 \text{ mm}</math></p>   | <p>Travetti</p> <p>Altezza = 175 mm</p> <p>Travi a doppio T</p> <p>Altezza = 260 mm</p> |

**Esempio 1.5**

Progetto: Open space/laboratorio

Dimensionare gli elementi strutturali

| Rif         | Calcoli  | Risultato  |
|-------------|--|--|
|             | <p>La sezione del laboratorio mostra l'ossatura strutturale. Il tetto è sostenuto da una travatura reticolare in acciaio sorretta da pilastri in acciaio. Il primo piano è sorretto da travi in cemento armato che poggiano su pilastri anch'essi in cemento armato.</p> <p>Dimensione degli elementi strutturali:</p> |  |
| Tabella 1.1 | <p>Travatura reticolare del tetto</p> <p>Altezza = luce / 14 = 8000/14 = 572 mm</p>  | <p>Travatura reticolare</p> <p>Altezza = 600 mm</p>                |
| Tabella 1.2 | <p>Pilastri in acciaio</p> <p>Altezza singola (2,5 m)</p> <p>Profilato a sezione rettangolare cava 100 mm x 100 mm</p> <p>Altezza doppia (4,9 m)</p> <p>Profilato a sezione rettangolare cava 114 mm x 114 mm</p>  | <p>Pilastro</p> <p>100 x 100 mm</p> <p>114 x 114 mm</p>            |
| Tabella 1.1 | <p>Travi in cemento armato</p> <p>Altezza = luce / 20 = 3400 / 20 = 170 mm</p> <p>Elemento a mensola in cemento armato</p> <p>Altezza = luce / 7 = 1300 / 7 = 186 mm</p>   | <p>Trave</p> <p>200 mm</p> <p>Elemento a mensola</p> <p>200 mm</p> |
| Tabella 1.2 | <p>Pilastro in cemento armato</p> <p>Altezza inferiore ai 3 metri</p> <p>Pilastro su cemento armato 200 mm x 200 mm</p>  | <p>Pilastro</p> <p>200 x 200 mm</p>                                |