Workshop

Progetto di edifici antisismici con struttura in c.a.

Catania

aula IT del DAU

10-20 settembre 2013

06 - Impostazione della carpenteria (per carichi verticali)

Progettazione strutturale

Processo progettuale

1. Concezione generale della struttura, nel rispetto di principi base di buona progettazione

2. Impostazione della carpenteria dell'edificio

3. Dimensionamento delle sezioni e verifica di massima della struttura

4. Analisi strutturale dettagliata e verifica del comportamento della struttura

5. Definizione delle armature ed elaborati grafici

Principi base
della progettazione strutturale

Principi base
della progettazione strutturale

Regolarità

È un obiettivo fondamentale della progettazione …

… ma cosa vuol dire regolarità?

Concetto generale, di portata molto vasta,
facilmente intuibile ma difficile da definire

In realtà esistono molte problematiche,
completamente diverse, che rientrano
nel concetto di regolarità

Ad esempio: scelta del tipo di analisi (statica o modale);
scelta del fattore di comportamento

Principi base
della progettazione strutturale

Regolarità

Condiziona:

- La qualità del comportamento strutturale
- La capacità di prevedere il comportamento della struttura
- Il costo necessario per rendere la struttura idonea a sopportare le azioni e ad essere adatta all'uso per il quale è prevista

Principi base
della progettazione strutturale

Regolarità

Condiziona:

- La qua
- La cap
  strutt
- Il cos
  idonea
  all'uso

Si vedano in particolare gli articoli:

A. Ghersi
La regolarità strutturale nella progettazione di edifici in zona sismica
Atti del convegno tecnico-scientifico "Problemi attuali di Ingegneria Strutturale", dal volume omonimo, CUEN, Napoli, 2000

A. Ghersi
General considerations on structural regularity
Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, August 1-7, 2004

Principi base
della progettazione strutturale

Per valutare il comportamento sismico di un edificio occorre:

- Definire un modello geometrico e meccanico dell'edificio, includendo se necessario gli elementi non strutturali e tenendo conto del complesso terreno-fondazione
- Valutare la risposta sismica in campo elastico
- Valutare la risposta sismica oltre i limiti elastici

Se l'edificio è regolare è possibile usare modelli e tipi di analisi standard

Principi base
della progettazione strutturale

I cosiddetti
"principi base della progettazione strutturale"

Semplicità strutturale

Uniformità Simmetria Iperstaticità

Resistenza e rigidezza bi-direzionale

Resistenza e rigidezza torsionale

Resistenza e rigidezza dell'impalcato

Adeguata fondazione

consentono di usare modelli e tipi di analisi standard

Principi base
della progettazione strutturale

Semplicità strutturale
=
Esistenza di chiari e diretti percorsi di trasmissione delle forze verticali e sismiche

La modellazione, l'analisi, il dimensionamento, la definizione dei dettagli, la costruzione sono soggetti a minori incertezze

La previsione del comportamento della struttura è più affidabile

Principi base
della progettazione strutturale

Uniformità
=
Omogenea distribuzione degli elementi strutturali

Consente una trasmissione diretta
delle forze di inerzia
generate dalla massa distribuita dell'edificio

Evita concentrazioni di tensione
o elevate richieste di duttilità locale,
che possono causare
un collasso strutturale prematuro

Principi base
della progettazione strutturale

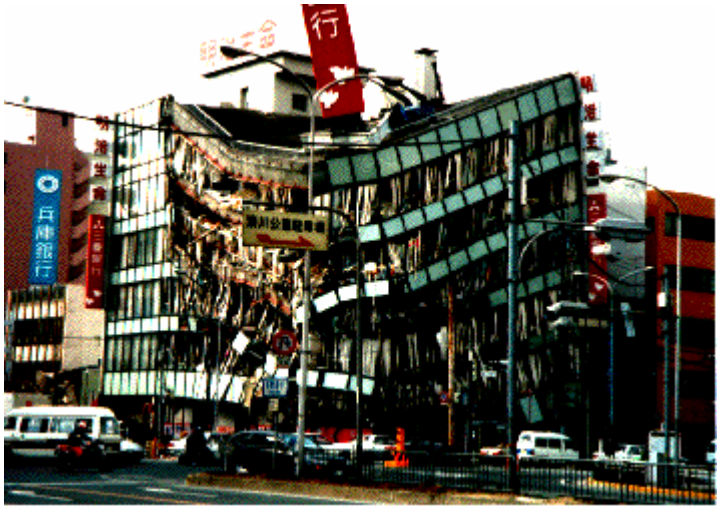
Simmetria

Se la configurazione dell'edificio è simmetrica o quasi simmetrica, una disposizione simmetrica degli elementi resistenti evita rotazioni in pianta, aiutando il raggiungimento dell'uniformità

Anche in assenza di simmetria, si possono disporre gli elementi strutturali in maniera bilanciata, in modo da limitare la rotazione in pianta

Principi base
della progettazione strutturale

Uniformità e Simmetria



1995 – Kobe

Stati Uniti

Mancanza di regolarità planimetrica e di regolarità altimetrica ⇨ Concentrazione del danno su pochi elementi strutturali

Principi base
della progettazione strutturale

Iperstaticità

L'impiego di tipologie strutturali fortemente iperstatiche, come i telai, consente una più diffusa dissipazione di energia all'interno della struttura

Principi base
della progettazione strutturale

Iperstaticità

1994 – Northridge

1999 – Turchia

Mancanza di iperstaticità ⇨ La crisi dei pochi elementi resistenti porta rapidamente al collasso

Principi base
della progettazione strutturale

Resistenza e rigidezza bi-direzionale

Il moto sismico ha sempre
due componenti orizzontali

La struttura dell'edificio deve essere in grado
di resistere ad azioni orizzontali
agenti in qualsiasi direzione

Forti differenze di rigidezza possono rendere
rilevanti aspetti in genere trascurabili

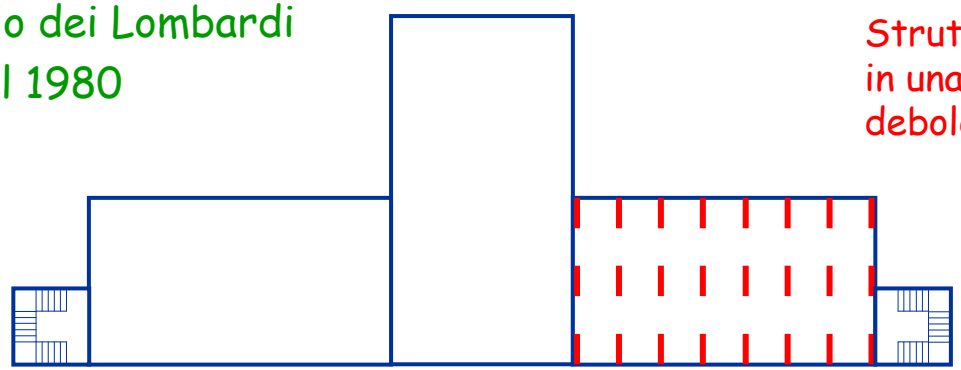
Principi base
della progettazione strutturale

Resistenza e rigidezza bi-direzionale

Ospedale di S. Angelo dei Lombardi
Crollato col sisma del 1980

Struttura rigida
in una direzione,
debole nell'altra

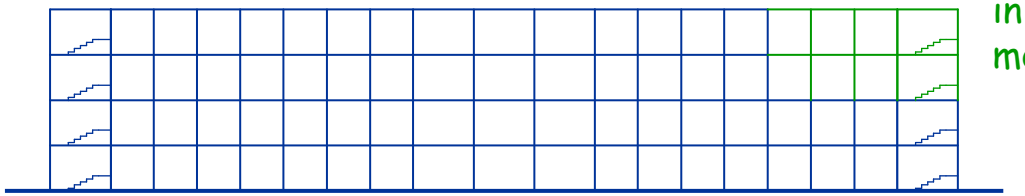
PIANTA



Corpo scala non
conteggiato nel
calcolo

Parte costruita
in un secondo
momento

PROSPETTO

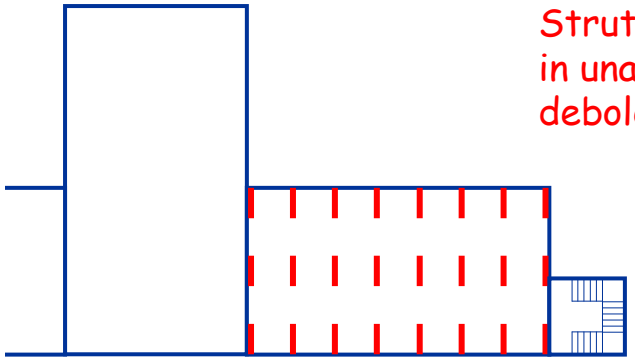


Principi base
della progettazione strutturale

Resistenza e rigidezza bi-direzionale

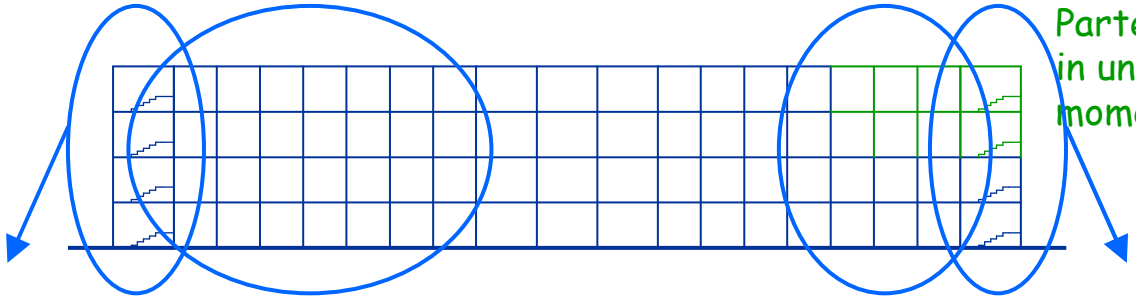
La zona scala, non conteggiata nel calcolo, era più rigida (in dir. x) della struttura e quindi ha subito sollecitazioni molto forti ed ha innescato il crollo

Nel crollo, la scala ha trascinato verso il basso tutto l'edificio



Struttura rigida in una direzione, debole nell'altra

Corpo scala non conteggiato nel calcolo



Parte costruita in un secondo momento

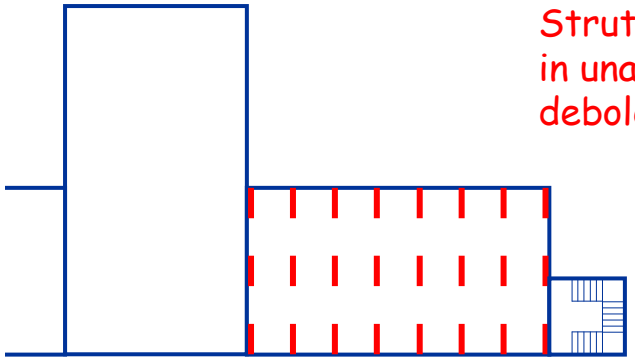
PROSPETTO

Principi base
della progettazione strutturale

Resistenza e rigidezza bi-direzionale

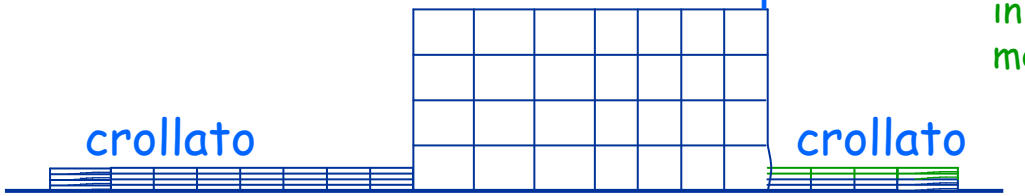
La zona scala, non conteggiata nel calcolo, era più rigida (in dir. x) della struttura e quindi ha subito sollecitazioni molto forti ed ha innescato il crollo

Nel crollo, la scala ha trascinato verso il basso tutto l'edificio



Struttura rigida in una direzione, debole nell'altra

Corpo scala non conteggiato nel calcolo



Parte costruita in un secondo momento

PROSPETTO

Principi base
della progettazione strutturale

Resistenza e rigidezza torsionale
=

Adeguata rigidezza e resistenza
agli elementi strutturali più eccentrici

Serve per limitare gli effetti dei moti torsionali
che tendono a sollecitare in modo
non uniforme i differenti elementi strutturali

Principi base
della progettazione strutturale

Resistenza e rigidezza dell'impalcato

=

Esistenza di una soletta di adeguato spessore, continua e senza forti riduzioni in pianta

Serve per garantire la trasmissione delle azioni inerziali dalle masse agli elementi resistenti

Consente di limitare il numero di modi da prendere in considerazione per valutare la risposta dinamica della struttura

Principi base
della progettazione strutturale

Adeguata fondazione
=

Elementi di fondazione ben collegati tra loro
e dotati di adeguata rigidezza

Serve per evitare cedimenti differenziali
(verticali e orizzontali) del piede dei pilastri

Assicura che l'intero edificio sia soggetto
ad una uniforme eccitazione sismica

Impostazione della carpenteria

Impostazione della carpenteria

Definizione dell'orditura dei solai e della posizione di travi e pilastri (pensando anche alla fondazione)

La struttura deve essere in grado di portare
- i carichi verticali
- le azioni orizzontali equivalenti al sisma

Obiettivi generali

Rendere la struttura il più regolare possibile

In particolare:

- Valutare la possibilità di dividere il fabbricato in blocchi staticamente separati da giunti
- Prestare molta attenzione alla scala

  La soluzione con travi a ginocchio introduce elementi molto rigidi con conseguente:

  - concentrazione delle sollecitazioni e riduzione della duttilità globale
  - possibilità di introdurre una forte asimmetria nella distribuzione di rigidezze

Edifici con pareti o nuclei in c.a.

Compito dei diversi elementi:

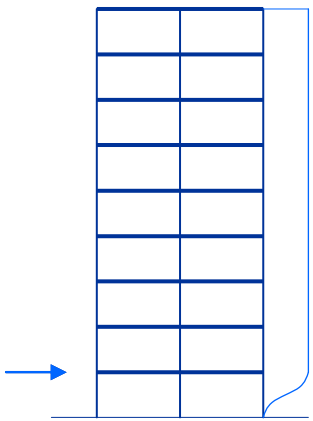
- Le pareti portano l'azione sismica
- Pilastri e travi portano i carichi verticali

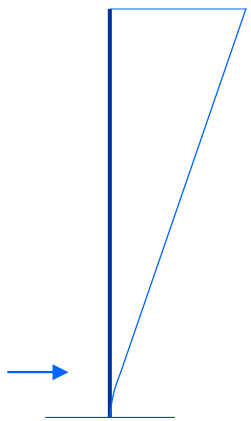
Impostazione separata, più semplice

Ma, attenzione:

Ai piani superiori l'azione sismica è portata dai telai, più che dalle pareti

Comportamento a mensola e comportamento a telaio





Telaio (con travi rigide)

Forze applicate ai piani inferiori provocano grossi spostamenti ...

... ma gli spostamenti non aumentano ai piani superiori

Mensole (pareti, oppure telaio con travi a spessore)

Forze applicate ai piani inferiori provocano piccoli spostamenti ...

... ma gli spostamenti aumentano di molto ai piani superiori

Edifici con pareti o nuclei in c.a.

Compito dei diversi elementi:

- Le pareti portano l'azione sismica
- Pilastri e travi portano i carichi verticali

Impostazione separata, più semplice

Ma, attenzione:

Ai piani superiori l'azione sismica è portata dai telai, più che dalle pareti

Le fondazioni richiedono uno studio particolare (e costi maggiori)

Edifici a struttura intelaiata

Travi e pilastri portano sia carichi verticali che azioni orizzontali

Può essere utile scindere il problema in due fasi:

1. Impostare la carpenteria pensando innanzi tutto ai soli carichi verticali
   tenendo però presenti i criteri derivanti dalla contemporanea presenza di azioni orizzontali

2. Rivedere la carpenteria per renderla più idonea a sopportare azioni orizzontali

Edifici a struttura intelaiata

Nell'impostazione per carichi verticali:

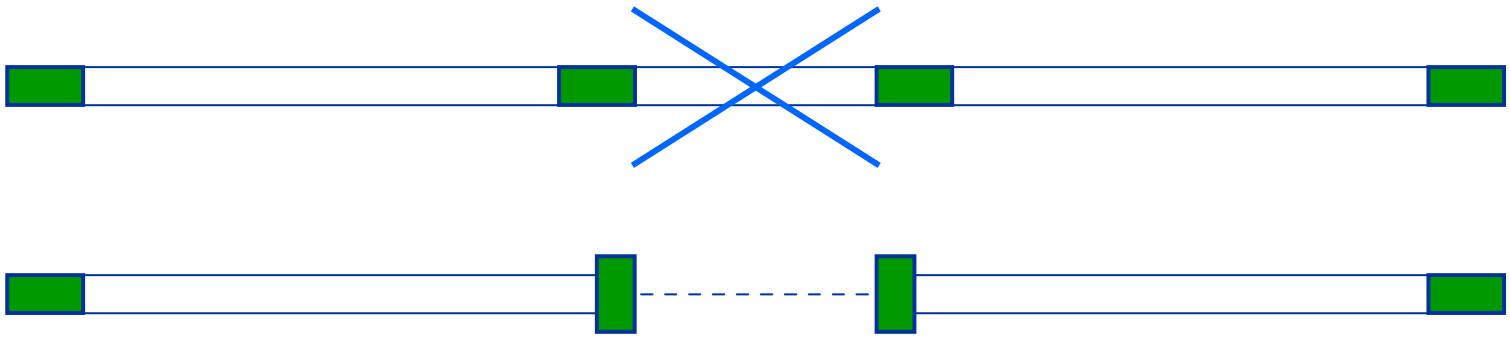
- Adottare per le luci di sbalzi, solai e travi limiti massimi leggermente inferiori a quelli consigliati in assenza di sisma

Elemento	Per soli carichi verticali	In zona sismica
Solaio	7.00 m	6.00 m
Sbalzo	2.50 m	2.00 m
Trave emergente che porta rilevanti carichi verticali	6.00 m	5.50 m
Trave a spessore che porta rilevanti carichi verticali	5.00 m	4.50 m

Edifici a struttura intelaiata

Nell'impostazione per carichi verticali:

- Adottare per le luci di sbalzi, solai e travi limiti massimi leggermente inferiori a quelli consigliati in assenza di sisma
- Evitare campate di trave troppo corte, che provocherebbero concentrazione di sollecitazioni



Edifici a struttura intelaiata

Nell'impostazione per carichi verticali:

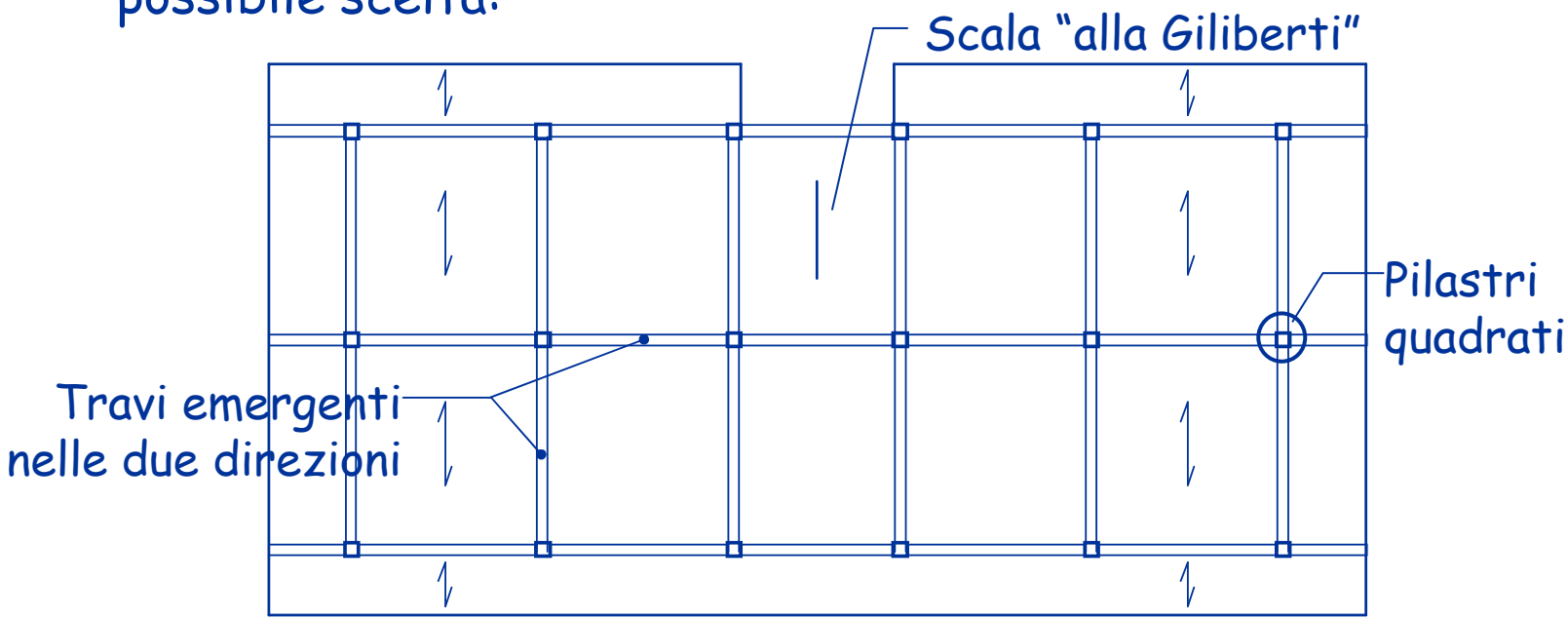
- Adottare per le luci di sbalzi, solai e travi limiti massimi leggermente inferiori a quelli consigliati in assenza di sisma
- Evitare campate di trave troppo corte, che provocherebbero concentrazione di sollecitazioni
- Evitare forti disuniformità di carico verticale sui pilastri
  (carichi maggiori richiedono sezioni maggiori, che provocherebbero concentrazione di sollecitazioni)

Edifici a struttura intelaiata

Nell'impostazione per azioni orizzontali:

- Garantire un irrigidimento uniforme nelle due direzioni, con elementi ben distribuiti in pianta

possibile scelta:



Elementi resistenti
alle azioni orizzontali

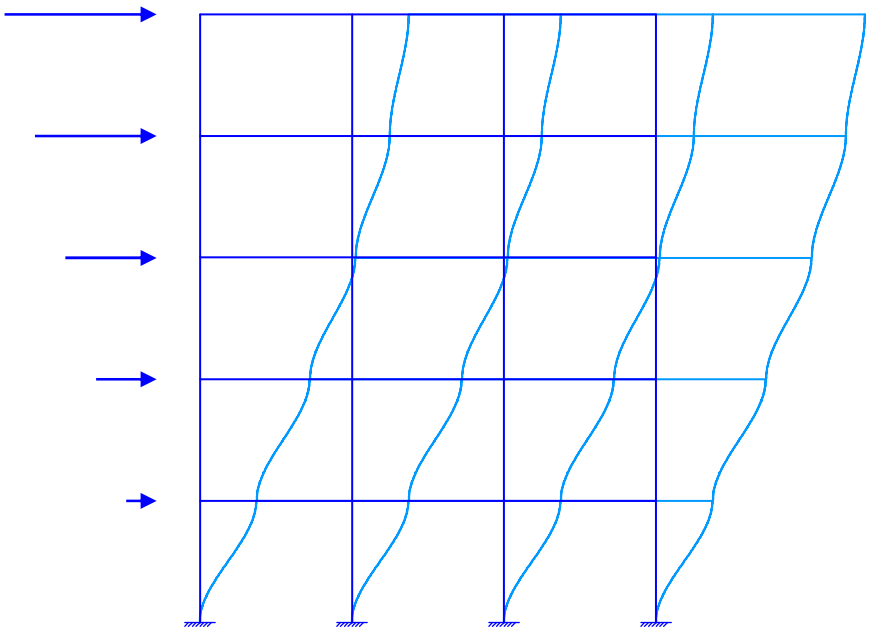
In realtà si hanno spesso travi sia emergenti che a spessore e pilastri rettangolari

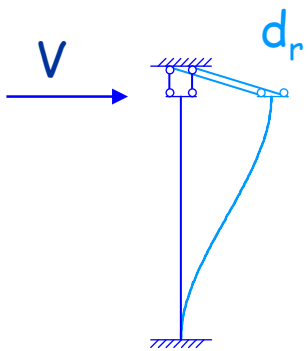
I singoli elementi assorbono un'aliquota dell'azione sismica minore o maggiore in proporzione alla loro rigidezza

In che modo si può stimare la rigidezza?

Rigidezza

- Rigidezza di un pilastro = rapporto tra taglio V e spostamento relativo d_r
- Se le travi sono infinitamente rigide





Modello
di calcolo

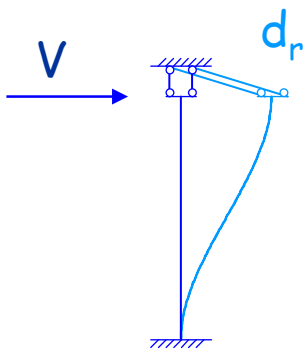
Rigidezza

- Rigidezza di un pilastro = rapporto tra taglio V e spostamento relativo d_r
- Se le travi sono infinitamente rigide

$$d_r = \frac{V\,L_p^{\,3}}{12\,E\,I_p}$$

$$\text{rigidezza} = \frac{12\,E\,I_p}{L_p^{\,3}}$$

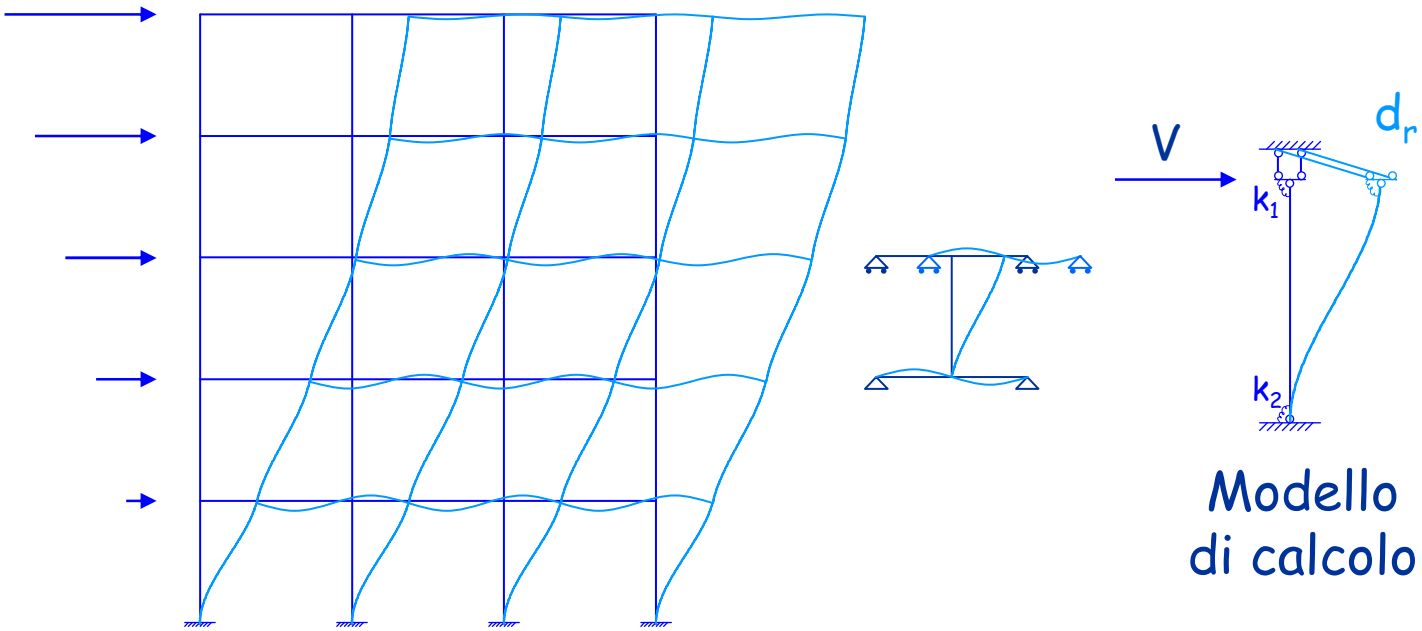
La rigidezza è proporzionale al momento d'inerzia della sezione



Modello di calcolo

Rigidezza

- Rigidezza di un pilastro = rapporto tra taglio V e spostamento relativo d_r
- In realtà le travi sono deformabili



Modello di calcolo

Rigidezza

- Rigidezza di un pilastro = rapporto tra taglio V e spostamento relativo d_r

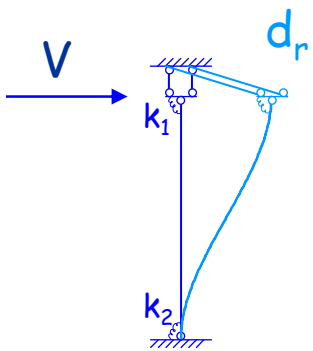
- In realtà le travi sono deformabili

$$k_1 = \frac{12\,E\,I_{t,sup}}{L_t}$$

ma poiché la trave serve da vincolo anche al pilastro di sopra, prendo la metà

$$k_1 = \frac{6\,E\,I_{t,sup}}{L_t} \qquad k_2 = \frac{6\,E\,I_{t,inf}}{L_t}$$

pongo $r_1 = \dfrac{E\,I_p / L_p}{E\,I_{t,sup} / L_t}$ $\quad r_2 = \dfrac{E\,I_p / L_p}{E\,I_{t,inf} / L_t}$



Modello di calcolo

Rigidezza

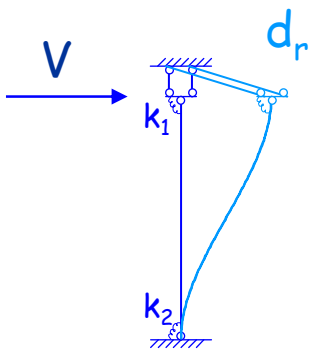
- Rigidezza di un pilastro = rapporto tra taglio V e spostamento relativo d_r

- In realtà le travi sono deformabili

$$d_r = \frac{V\,L_p^{\,3}}{12\,E\,I_p}\left[1+\frac{1}{2}\,\frac{r_1+r_2+2\,r_1\,r_2/3}{1+(r_1+r_2)/6}\right]$$

$$= \frac{V\,L_p^{\,3}}{12\,E\,I_p}\left[1+\frac{1}{2}\,(r_1+r_2)-\frac{1}{2}\,\frac{(r_1-r_2)^2/6}{1+(r_1+r_2)/6}\right]$$

$$\cong \frac{V\,L_p^{\,3}}{12\,E\,I_p}\left[1+\frac{1}{2}\,(r_1+r_2)\right] \qquad \text{se } r_1 \cong r_2$$



Modello di calcolo

Lo spostamento dipende anche dalla rigidezza delle travi

Rigidezza

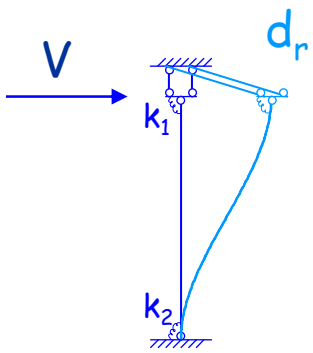
- Rigidezza di un pilastro = rapporto tra taglio V e spostamento relativo d_r

- In realtà le travi sono deformabili

Spostamento e rigidezze si possono esprimere direttamente con

$$d_r \cong \frac{V L_p^3}{12 E I_p}\left[1+\frac{1}{2}\left(\frac{E I_p / L_p}{E I_{t,sup} / L_t}+\frac{E I_p / L_p}{E I_{t,inf} / L_t}\right)\right]$$

$$\text{rigidezza} = \frac{12 E I_p}{L_p^3}\,\frac{1}{1+\frac{1}{2}\left(\frac{E I_p / L_p}{E I_{t,sup} / L_t}+\frac{E I_p / L_p}{E I_{t,inf} / L_t}\right)}$$



Modello di calcolo

Rigidezza

Esempi:

pilastro	30x70	l=3.20 m
travi	30x60	l=4.50 m

k = 30.60 kN/mm

pilastro	70x30	l=3.20 m
travi	30x60	l=4.50 m

k = 12.88 kN/mm

pilastro	30x70	l=3.20 m
travi	60x24	l=4.50 m

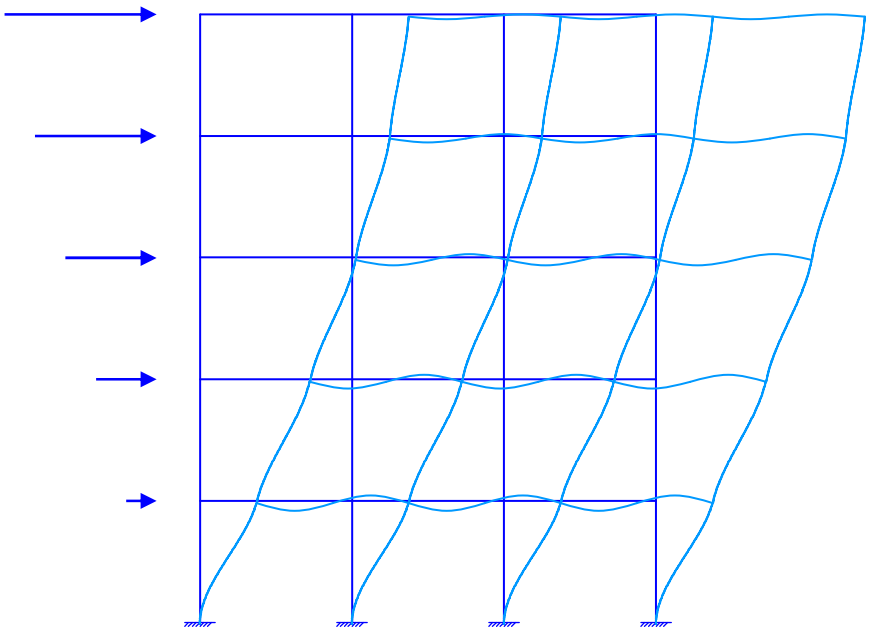
k = 5.36 kN/mm

Vedi file Excel Rigidezza

Rigidezza

Nota:

- Le formule sono ricavate nell'ipotesi di rotazione uguale per tutti i nodi



Cadono in difetto se vi sono forti variazioni tra un pilastro e l'altro

In particolare nel caso di un pilastro di piatto tra due pilastri di coltello

In questo caso la rotazione del nodo centrale può essere nulla; valutare la rigidezza del pilastro centrale senza riduzioni

Elementi resistenti
alle azioni orizzontali

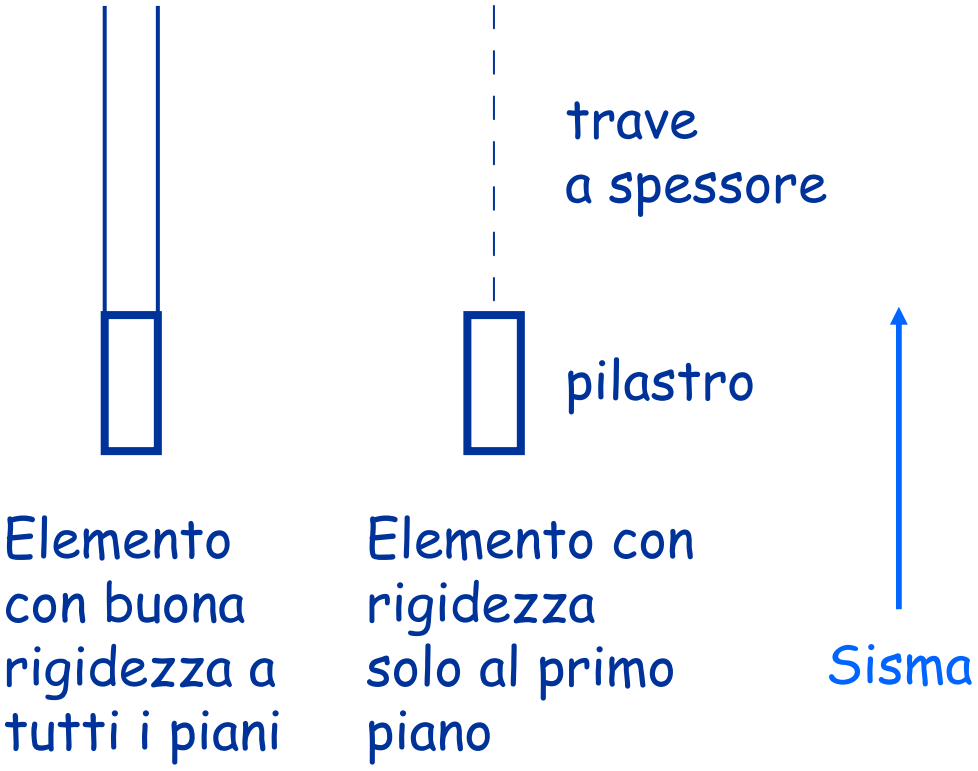
In realtà si hanno spesso travi sia emergenti che a spessore e pilastri rettangolari

Elemento con buona rigidezza a tutti i piani

La resistenza all'azione sismica è affidata ai pilastri allungati nella direzione del sisma ed accoppiati a travi emergenti

Elementi resistenti
alle azioni orizzontali

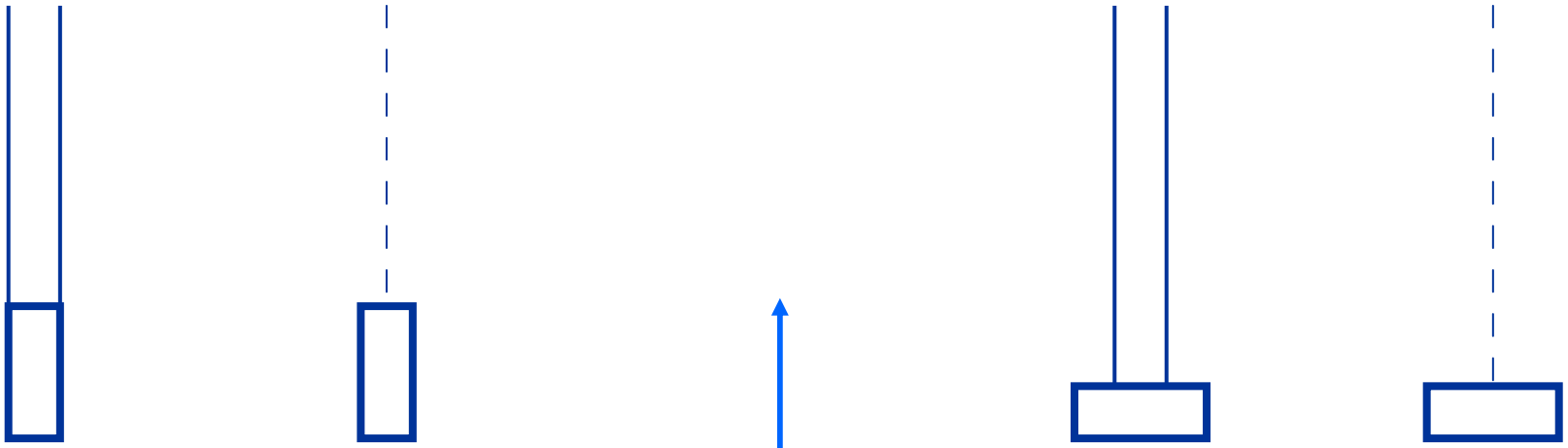
In realtà si hanno travi sia emergenti che a spessore e pilastri rettangolari



Un pilastro rigido accoppiato ad una trave a spessore fornisce un contributo basso a tutti i piani, tranne che al primo

Elementi resistenti
alle azioni orizzontali

In realtà si hanno travi sia emergenti che a spessore e pilastri rettangolari



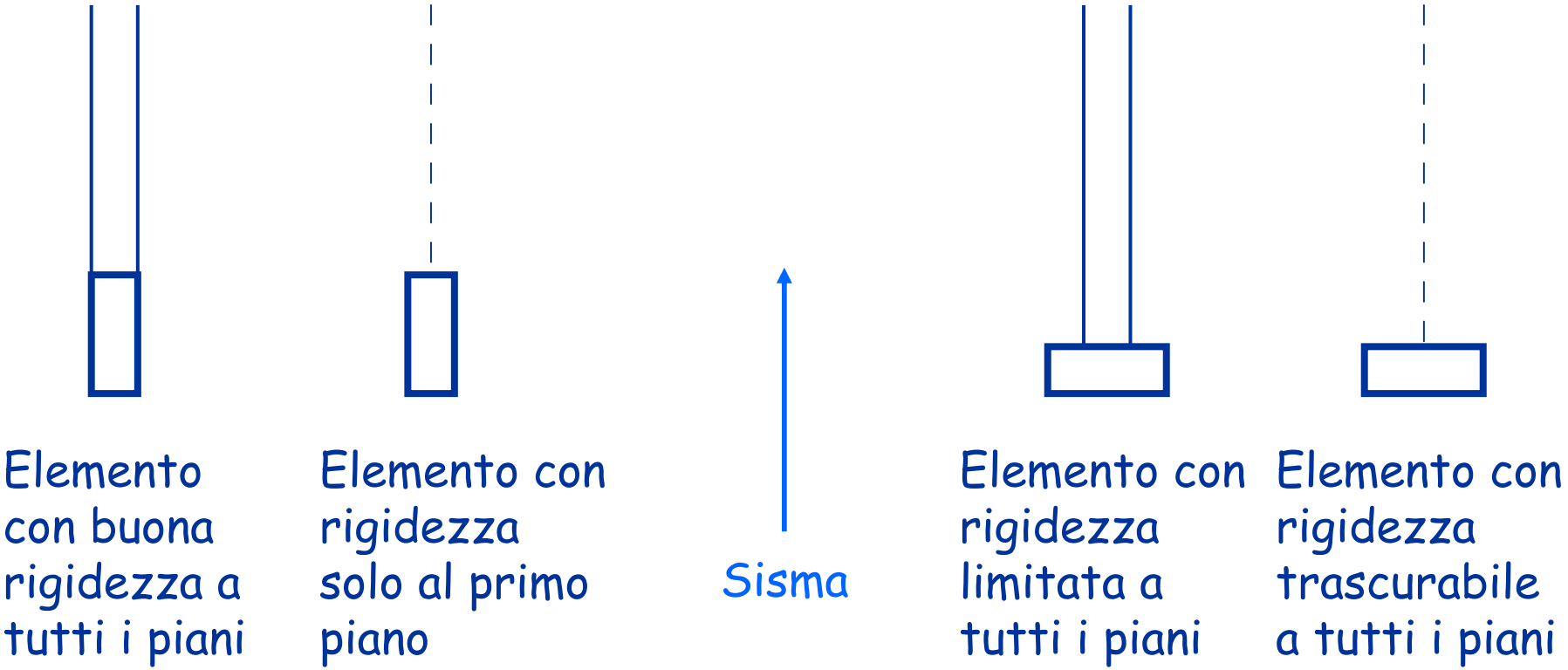
Elemento con buona rigidezza a tutti i piani

Elemento con rigidezza solo al primo piano

I pilastri con inerzia minima danno contributo in prima approssimazione trascurabile

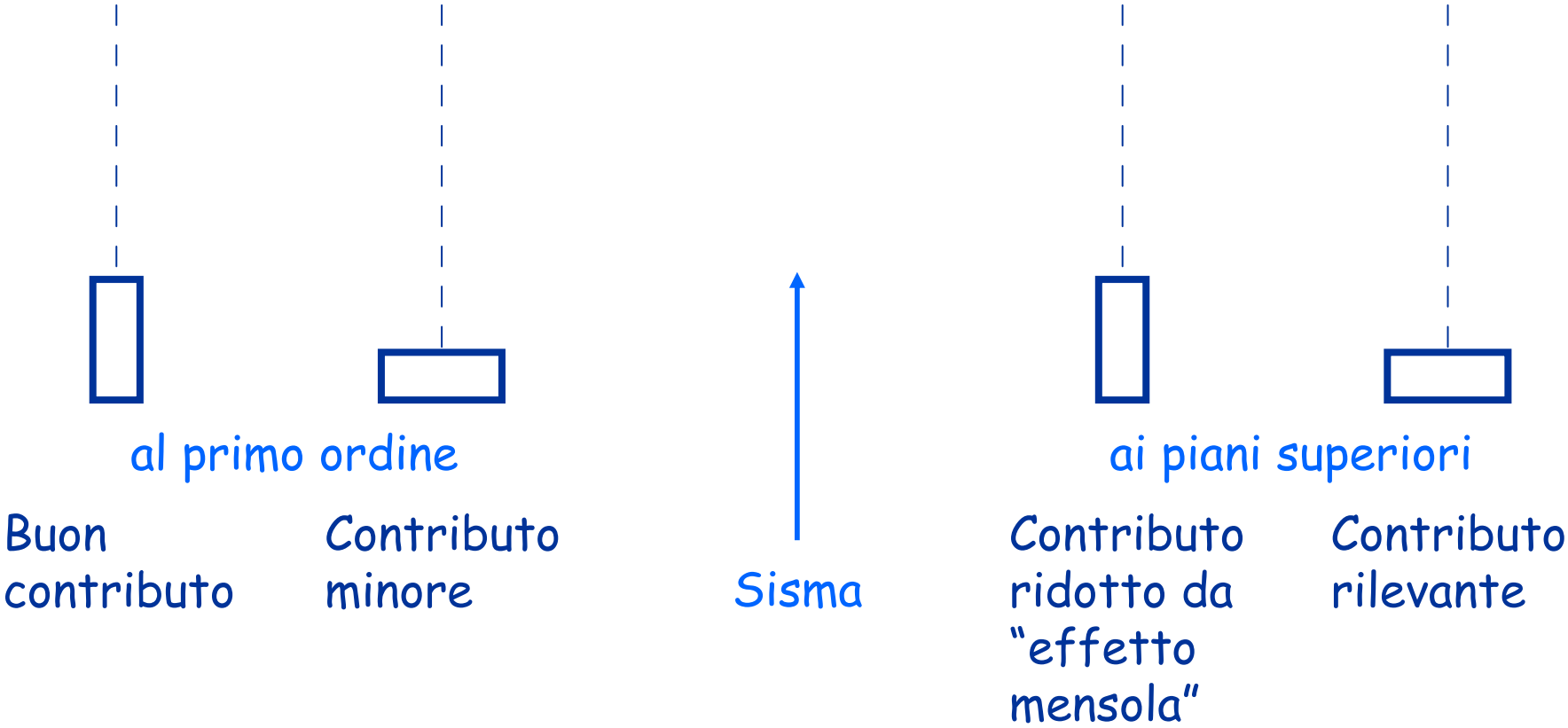
Elementi resistenti
alle azioni orizzontali

In realtà si hanno travi sia emergenti che a spessore e pilastri rettangolari



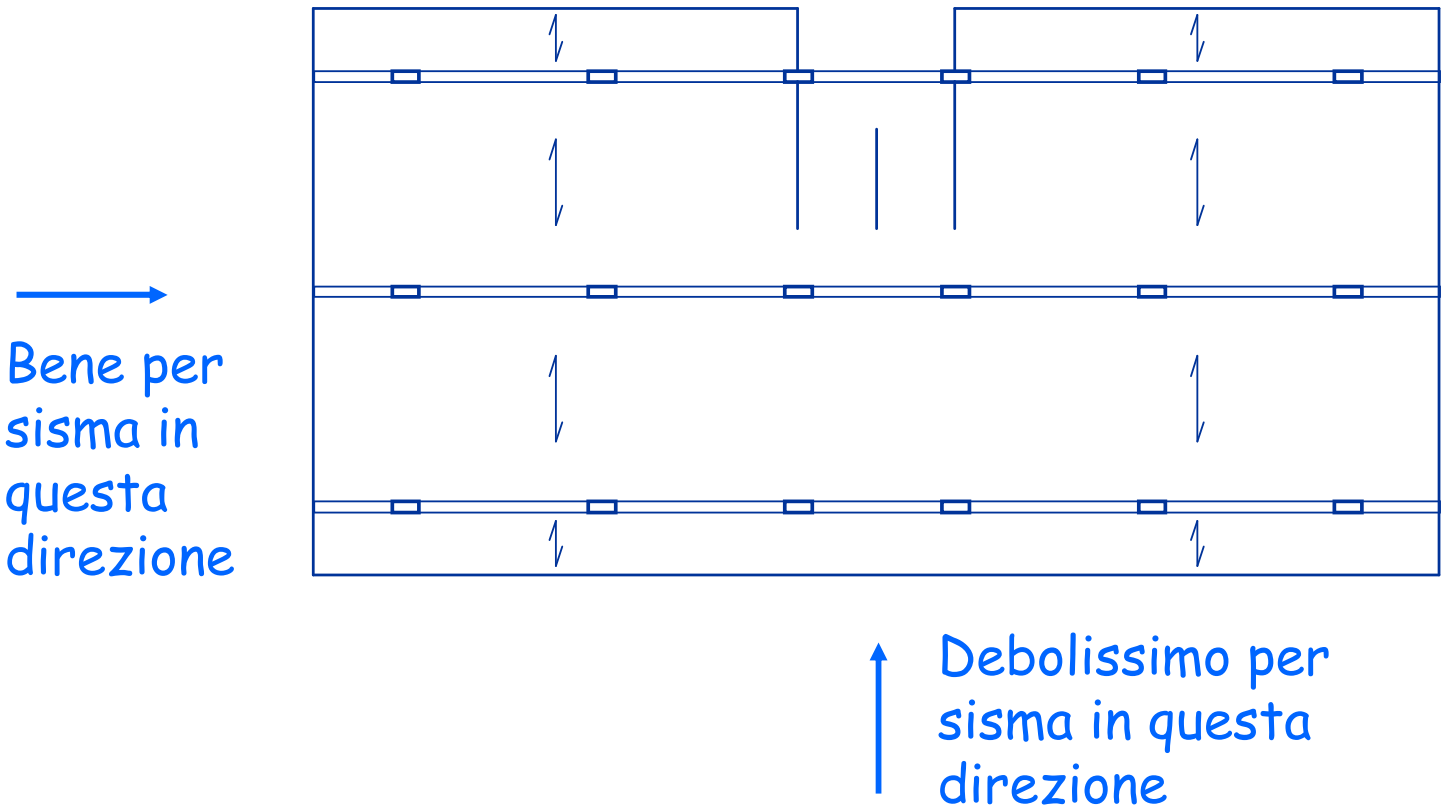
Elementi resistenti
alle azioni orizzontali

Se tutte le travi sono a spessore, il comportamento dei pilastri è un po' diverso



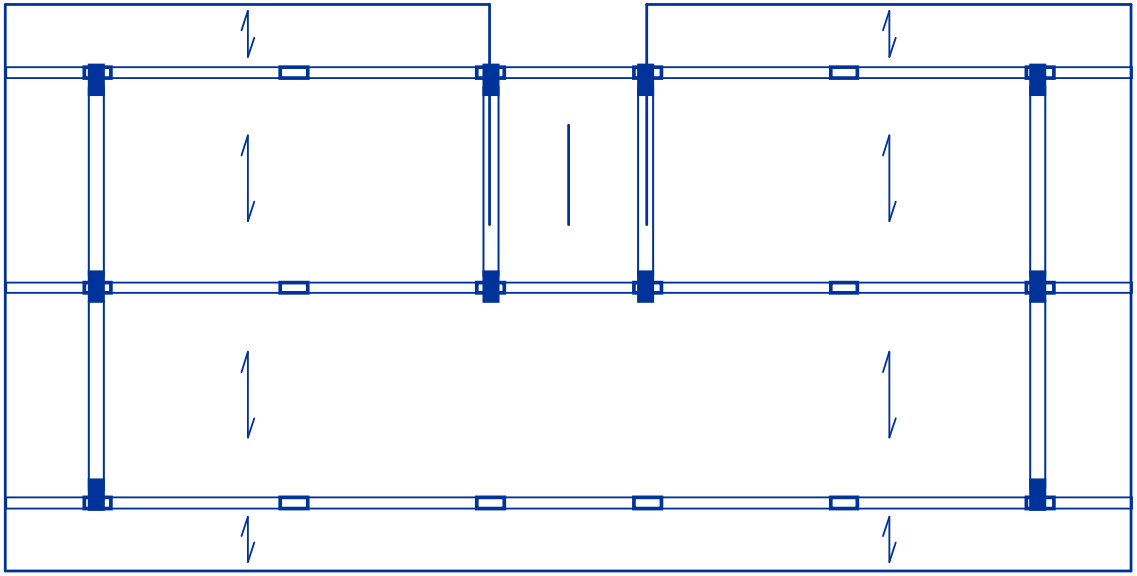
Carpenteria:
da soli carichi verticali ad azioni orizzontali

Al limite, per soli carichi verticali:



Carpenteria:
da soli carichi verticali ad azioni orizzontali

Interventi, per azioni orizzontali:

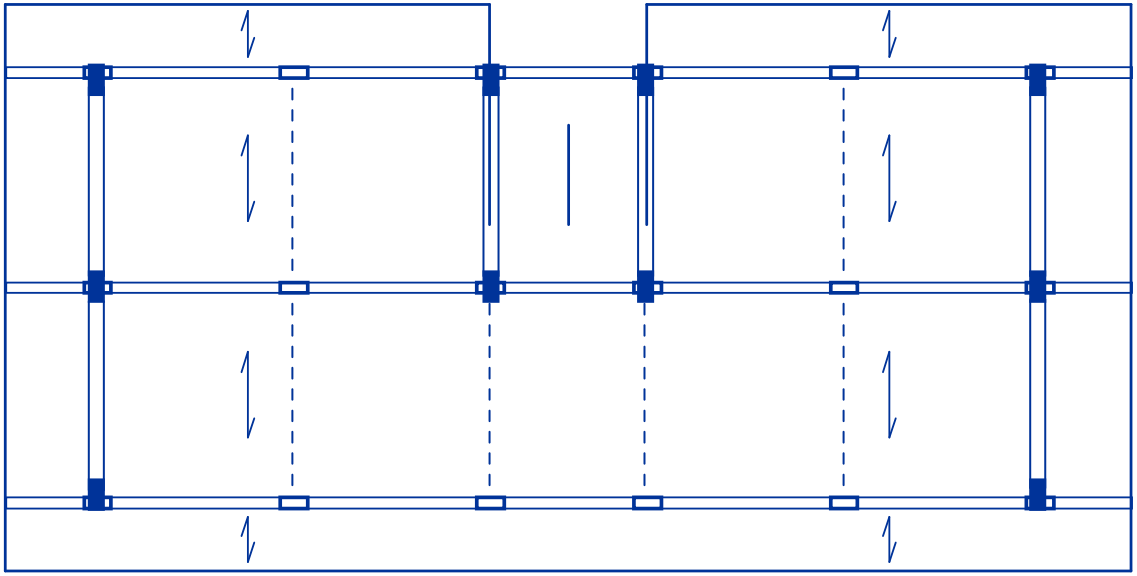


Girare un certo numero di pilastri

Aggiungere travi emergenti per renderli efficaci

Carpenteria:
da soli carichi verticali ad azioni orizzontali

Interventi, per azioni orizzontali:



Si potranno poi aggiungere altre travi, a spessore, che sono però irrilevanti ai fini sismici

Esempio

Edificio analizzato

Tipologia:

edificio adibito a civile abitazione, a 5 piani

Classe dell'edificio:

classe II (costruzione con normale affollamento, senza contenuti pericolosi e funzioni sociali essenziali)

Ubicazione:

zona sismica con $a_g = 0.25\ g$

Categoria di suolo:

categoria C (sabbie e ghiaie mediamente addensate)

Edificio analizzato

Struttura portante principale:

con struttura intelaiata in cemento armato

Solai:

in latero-cemento, gettati in opera

Scale:

a soletta rampante (tipologia "alla Giliberti")

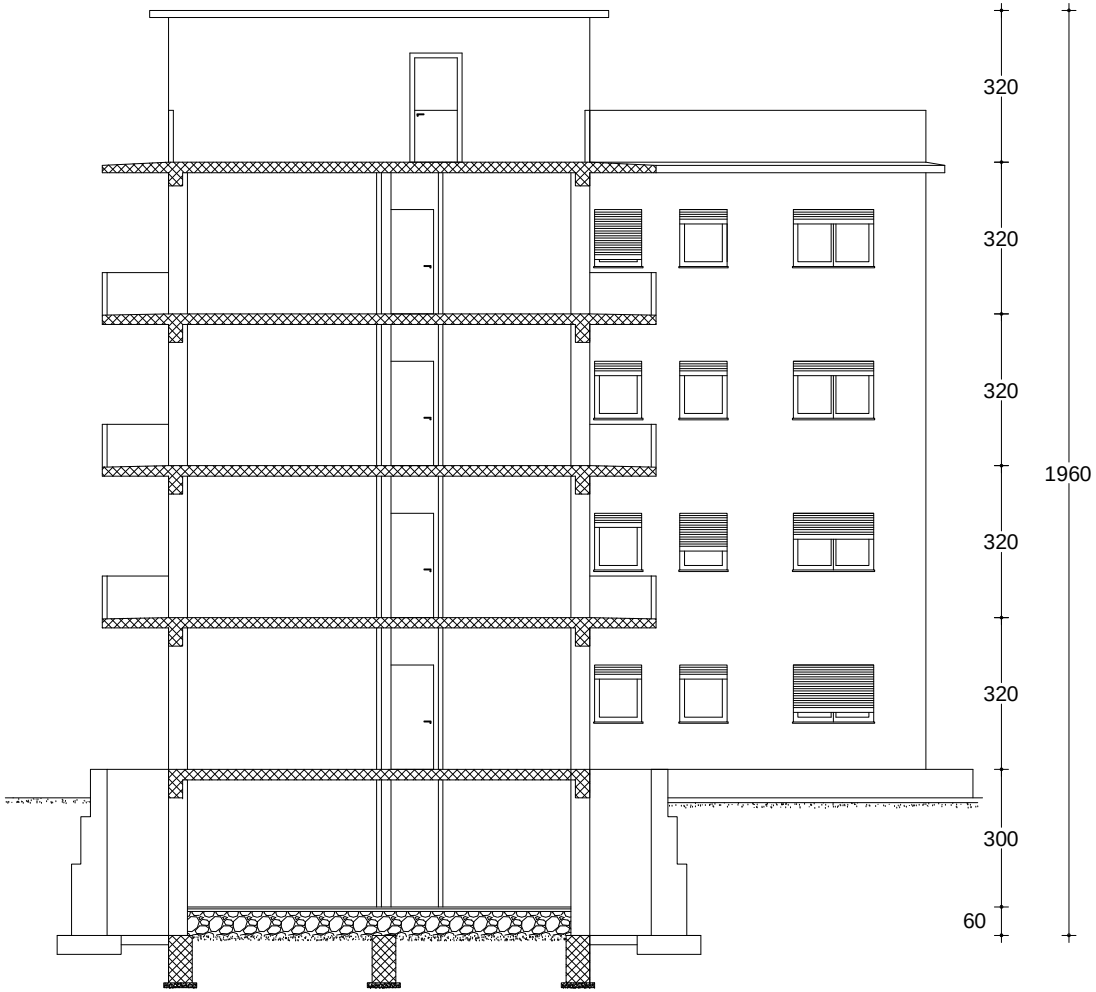
Fondazioni:

reticolo di travi rovesce

Materiali:

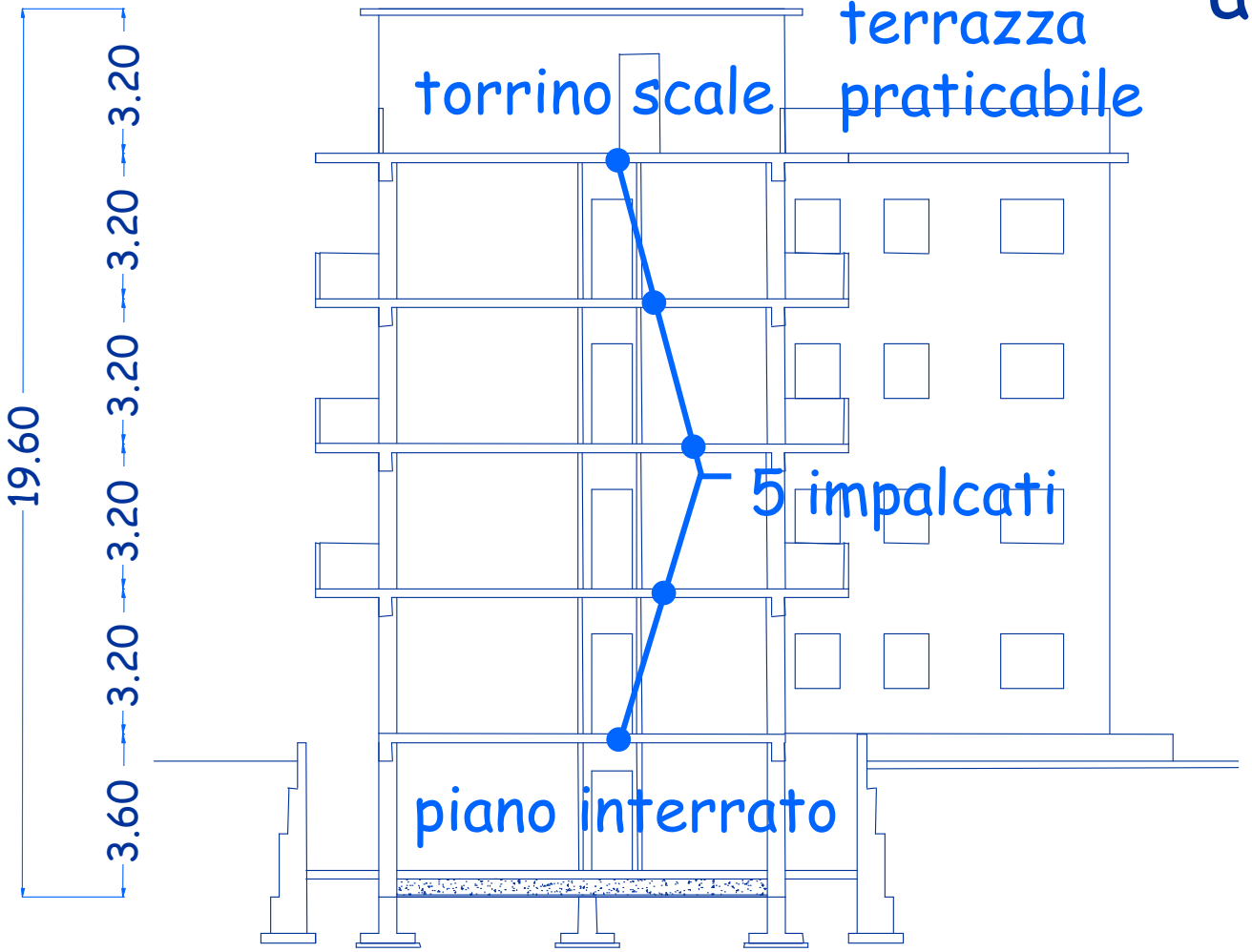
calcestruzzo C25/30 (f_{ck} = 25 MPa, R_{ck} = 30 MPa)
acciaio B450C

Edificio analizzato



Sezione

Edificio analizzato

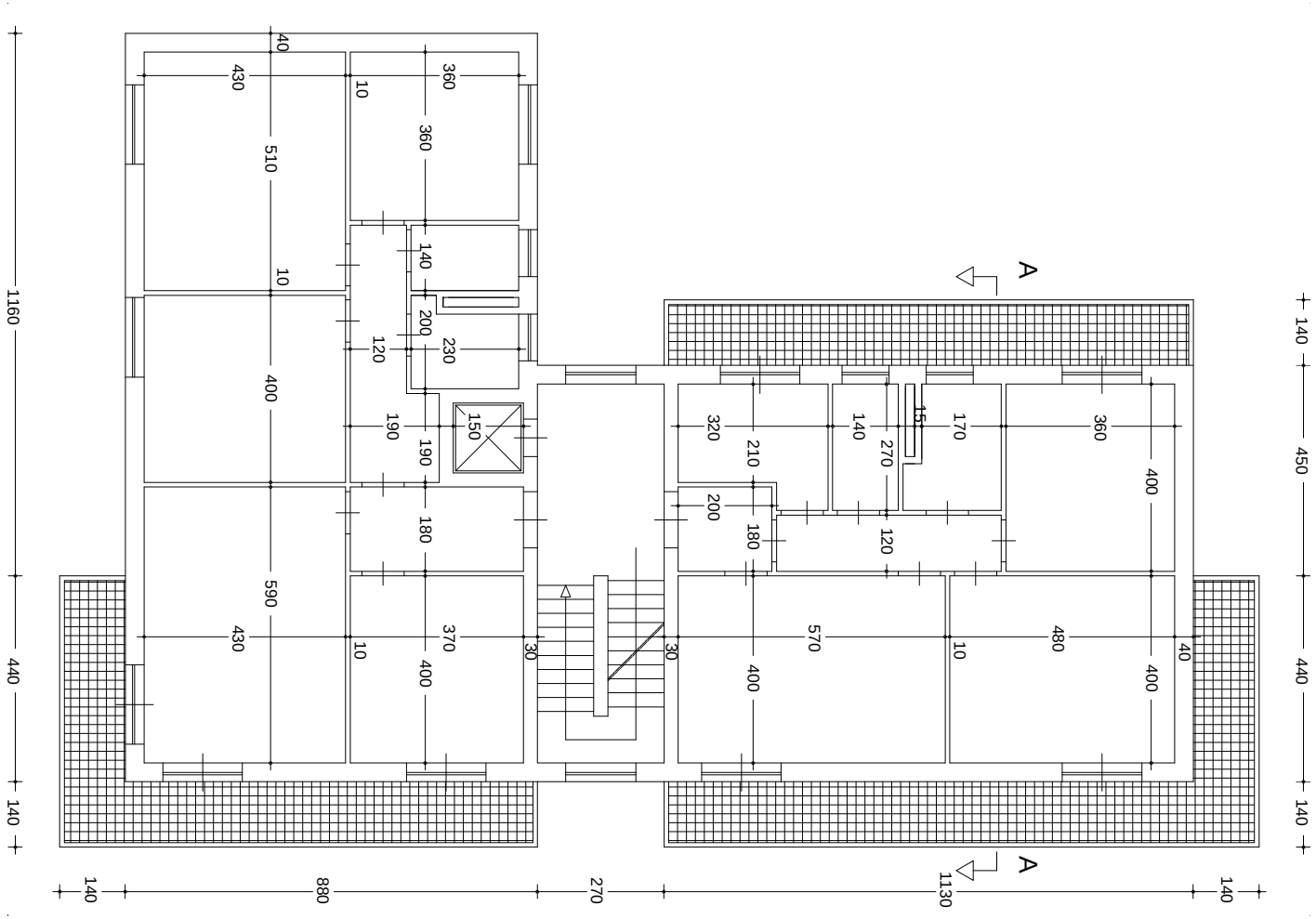


Sezione

Sismicità media = ex zona 2

Terreno costituito da sabbie e ghiaie mediamente addensate

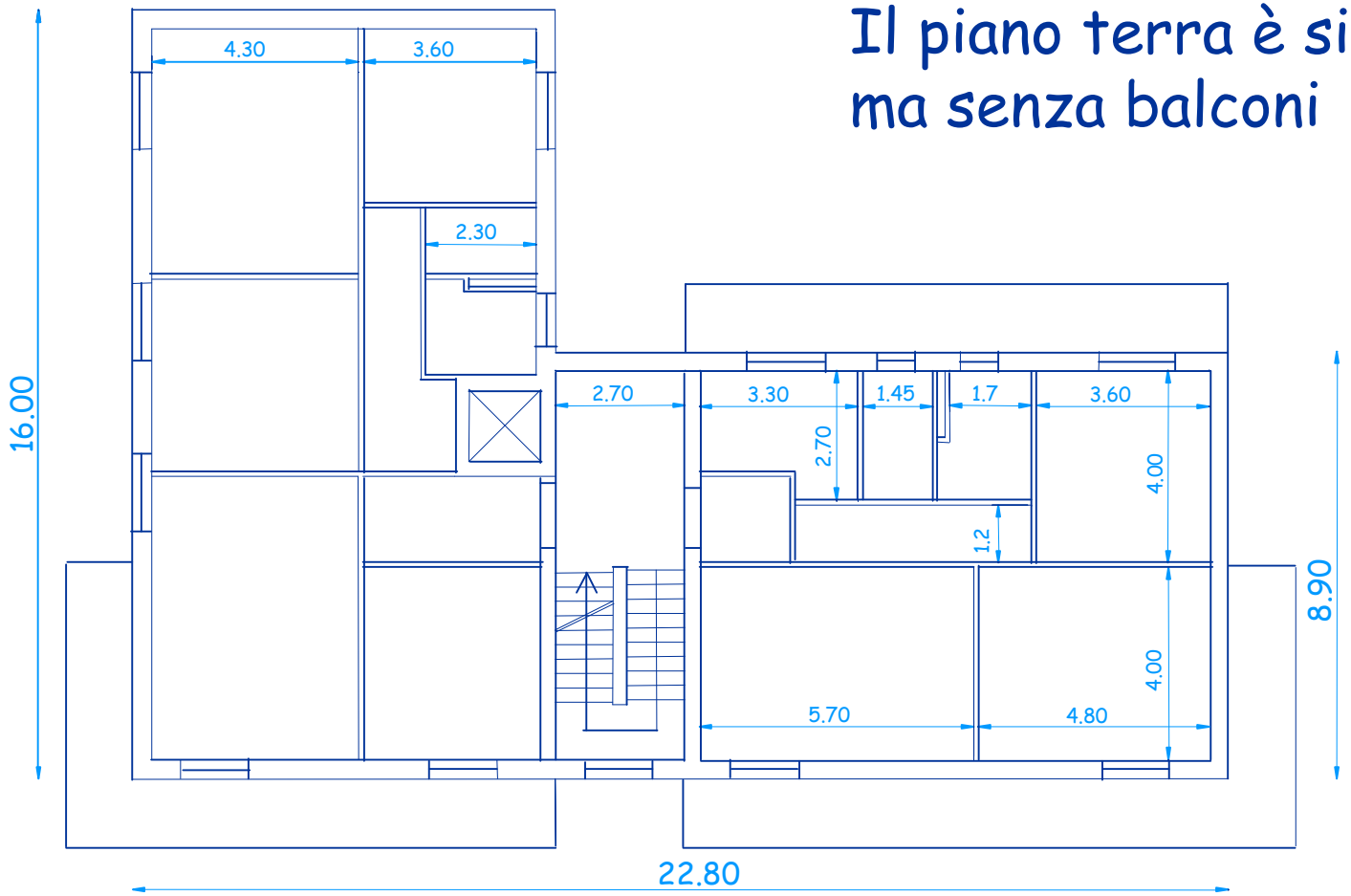
Piano tipo



A
A
1160
440
140
140
880
270
1130
140
450
440
140
430
510
10
360
360
140
200
230
120
400
190
190
150
180
590
430
10
370
400
30
30
320
210
140
270
15
170
360
400
200
180
120
570
400
10
480
400
40

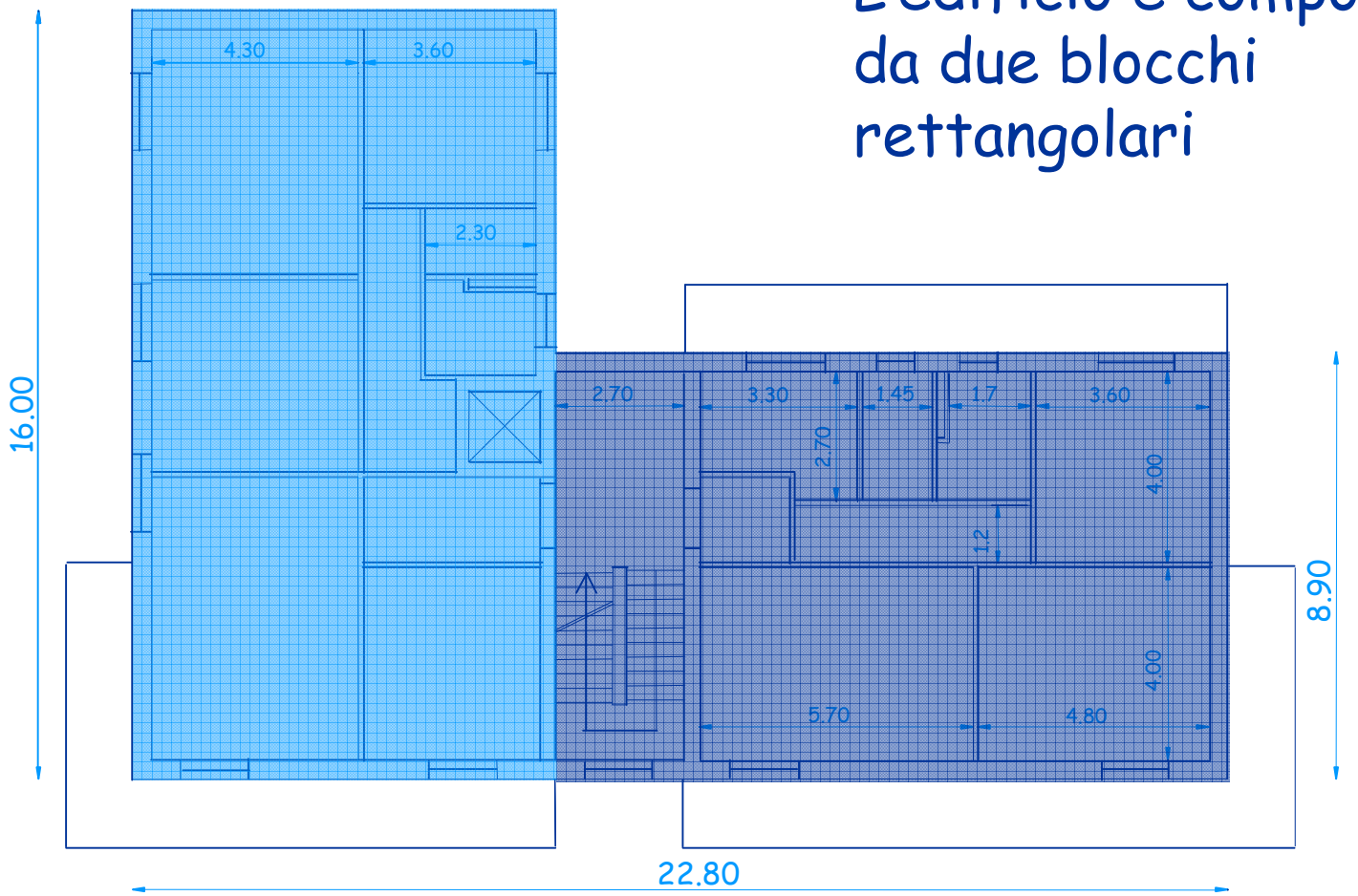
Piano tipo

Il piano terra è simile,
ma senza balconi



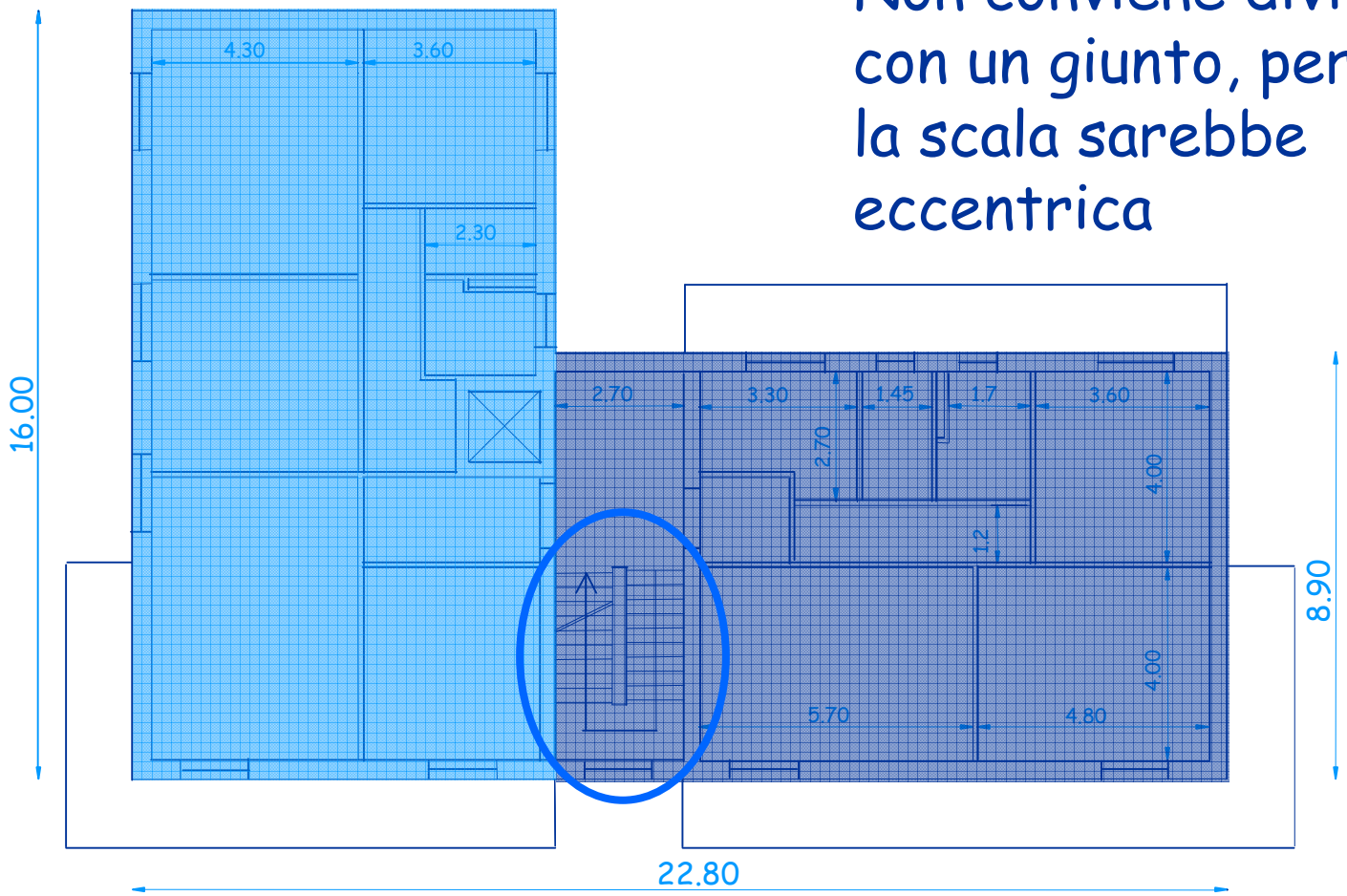
Piano tipo

L'edificio è composto da due blocchi rettangolari



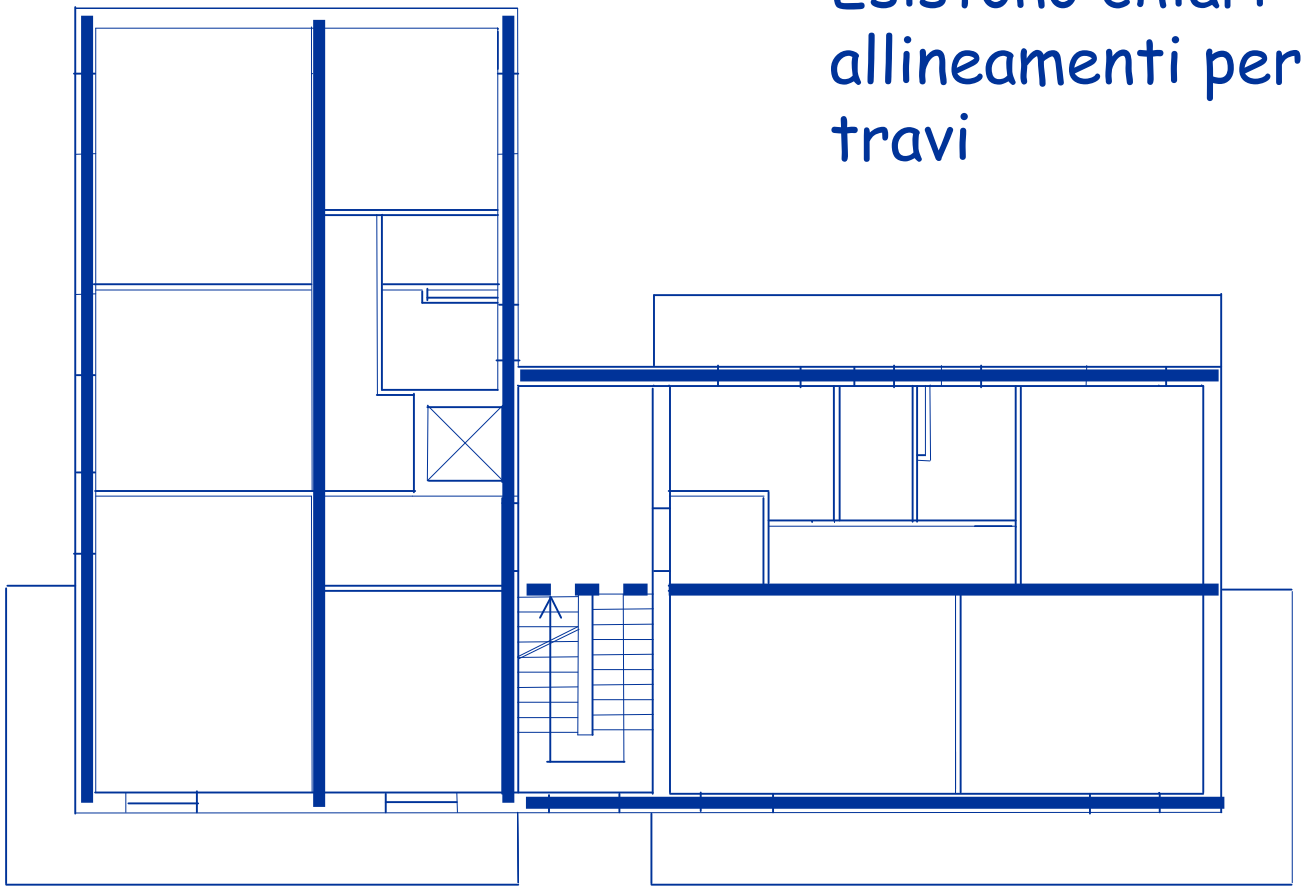
Piano tipo

Non conviene dividerli con un giunto, perché la scala sarebbe eccentrica

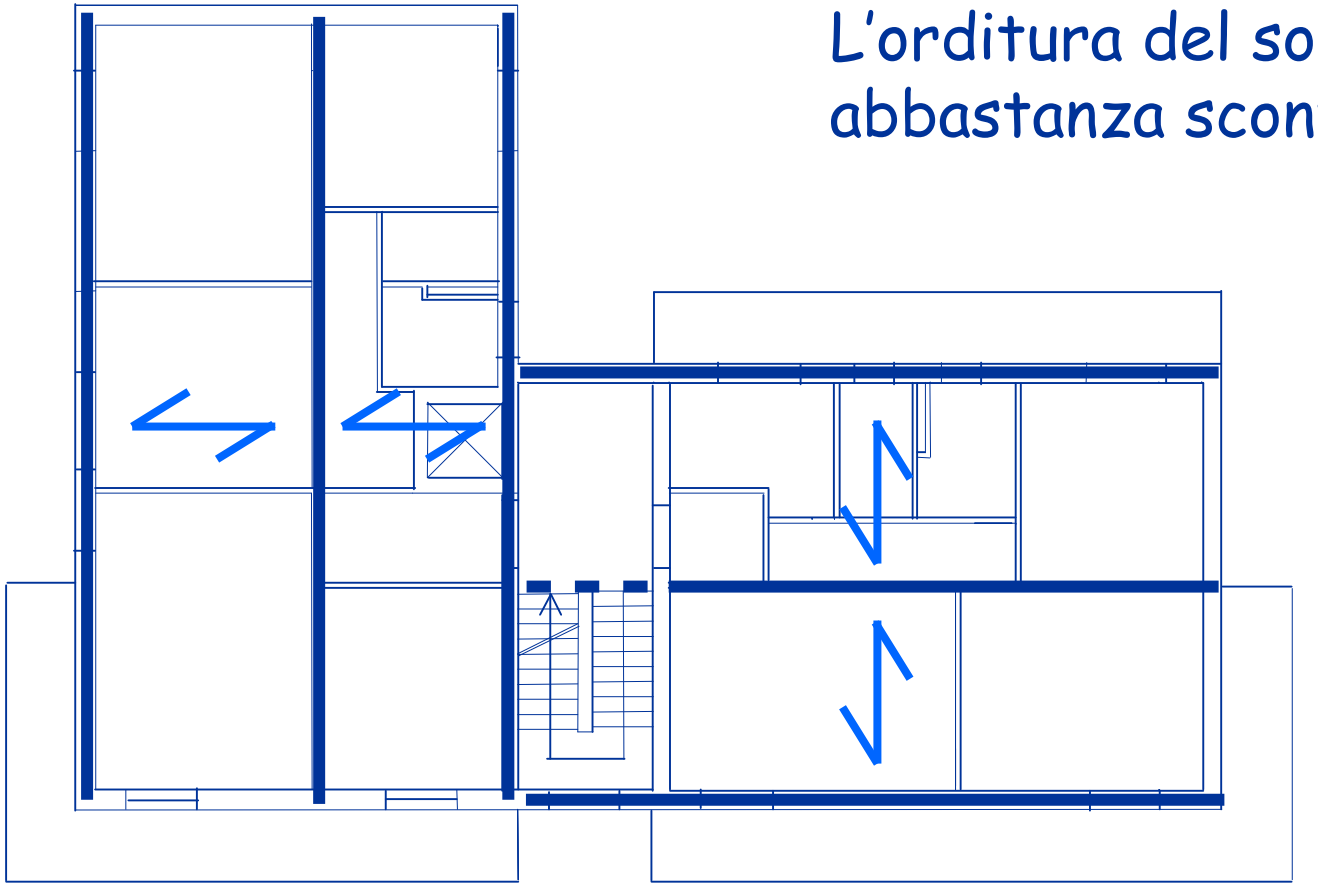


Impostazione della carpenteria
pensando ai carichi verticali

Esistono chiari allineamenti per le travi

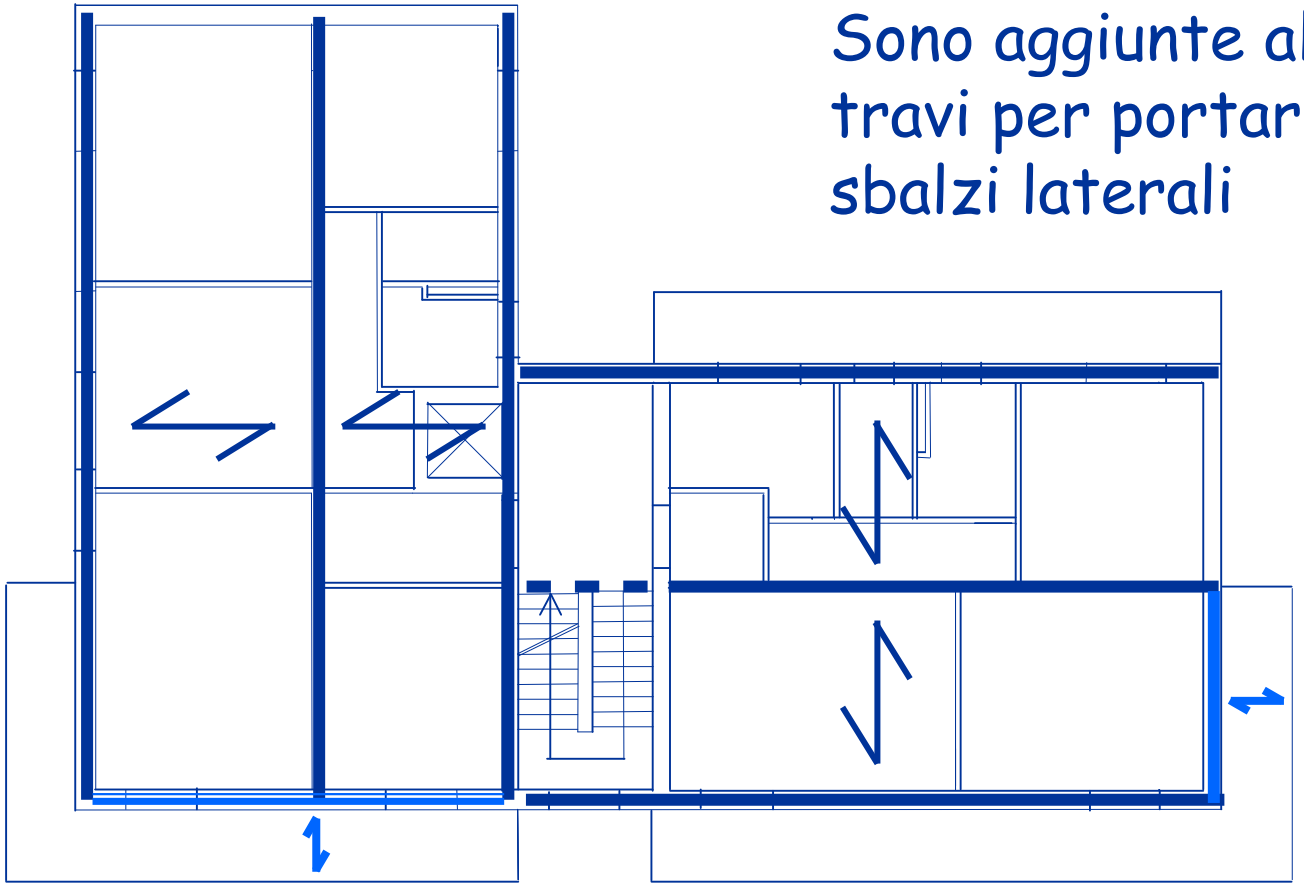


Impostazione della carpenteria
pensando ai carichi verticali



L'orditura del solaio è abbastanza scontata

Impostazione della carpenteria
pensando ai carichi verticali



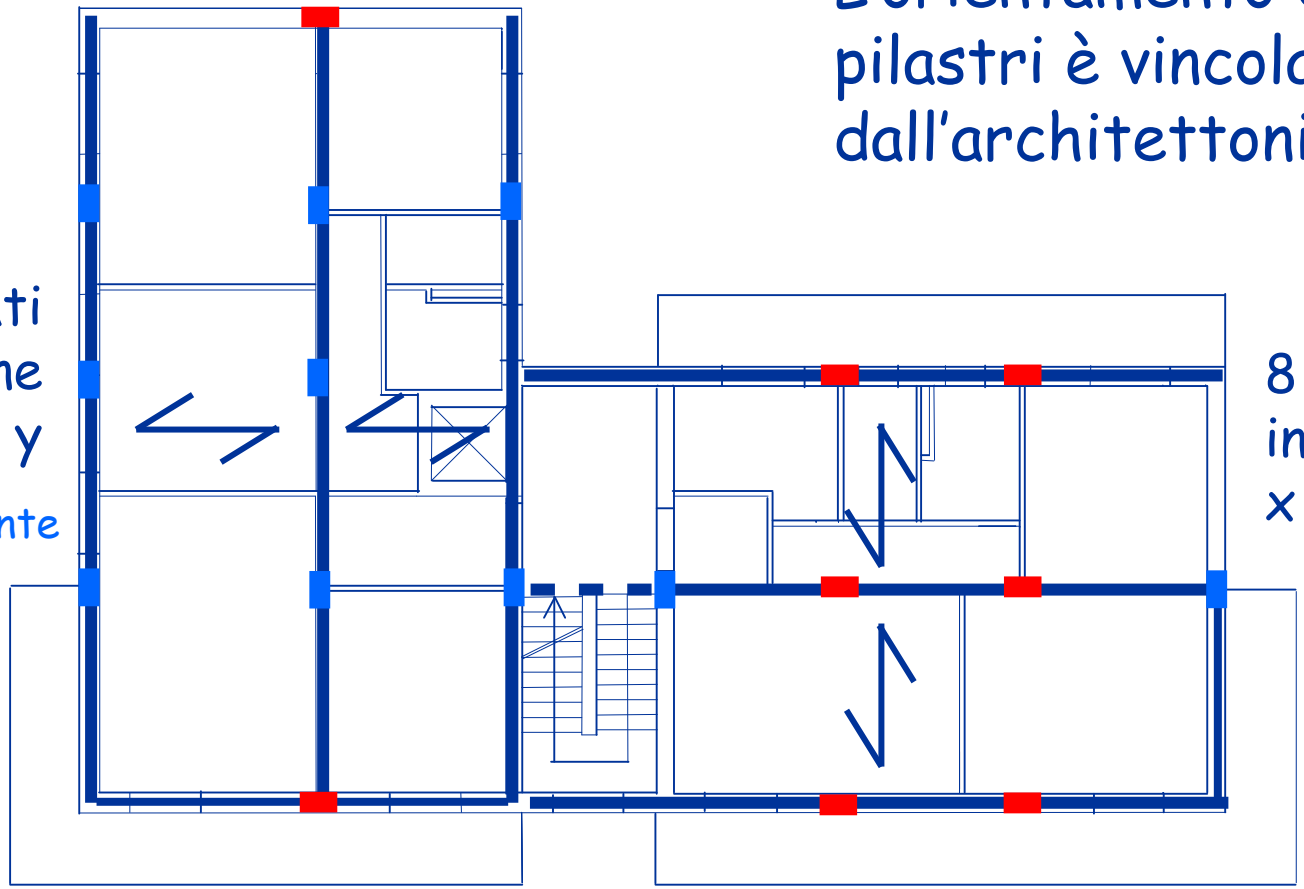
Sono aggiunte alcune travi per portare gli sbalzi laterali

Impostazione della carpenteria
pensando alle azioni orizzontali

L'orientamento di molti pilastri è vincolato dall'architettonico

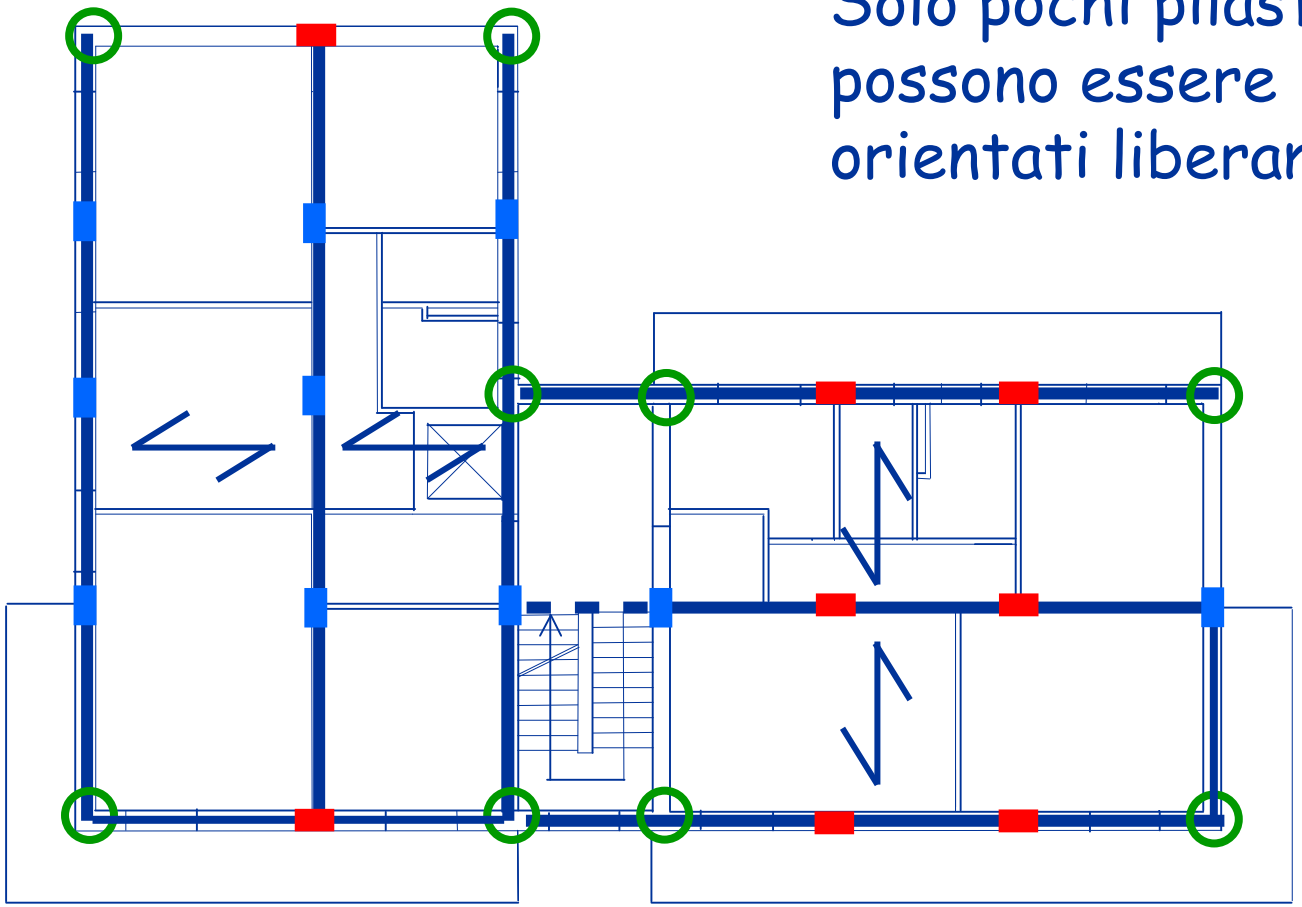
10 allungati in direzione y

prevalentemente nella parte sinistra del fabbricato



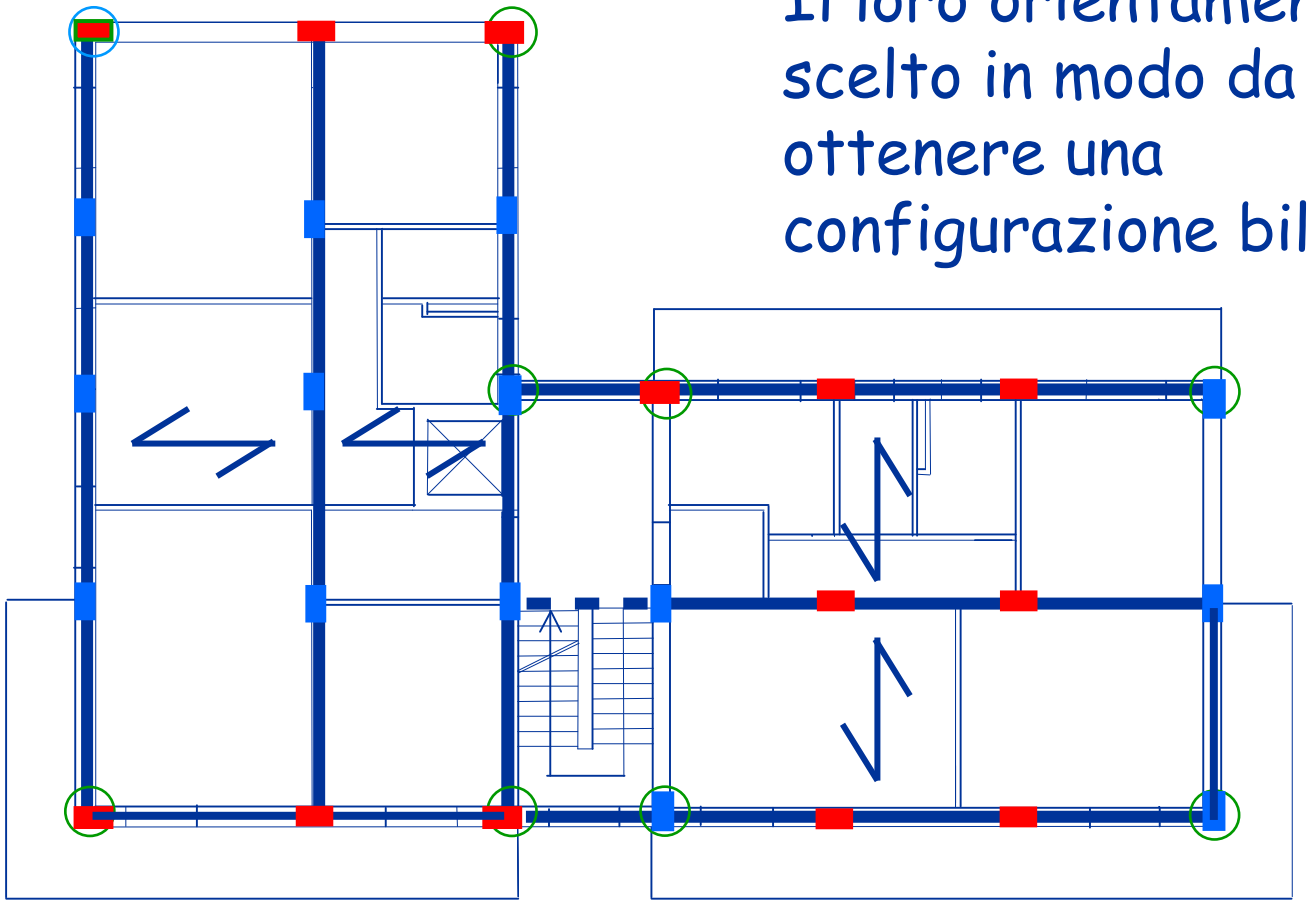
8 allungati in direzione x

Impostazione della carpenteria
pensando alle azioni orizzontali



Solo pochi pilastri (9) possono essere orientati liberamente

Impostazione della carpenteria
pensando alle azioni orizzontali



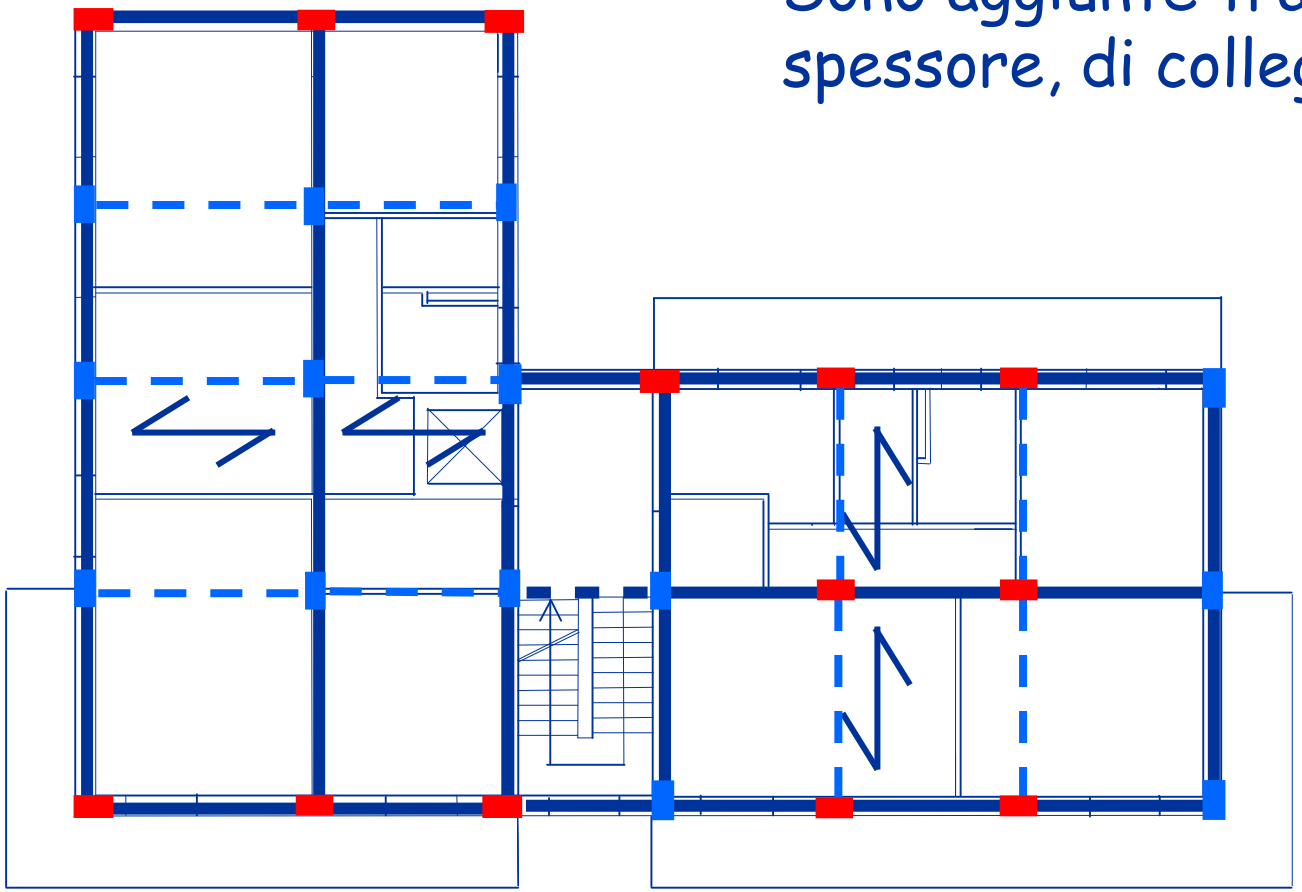
Il loro orientamento è scelto in modo da ottenere una configurazione bilanciata

Impostazione della carpenteria
pensando alle azioni orizzontali

Sono aggiunte travi emergenti per dare rigidezza ai pilastri

Impostazione della carpenteria
pensando alle azioni orizzontali

Sono aggiunte travi a spessore, di collegamento



Impostazione della carpenteria
pensando alle azioni orizzontali

tot. 13

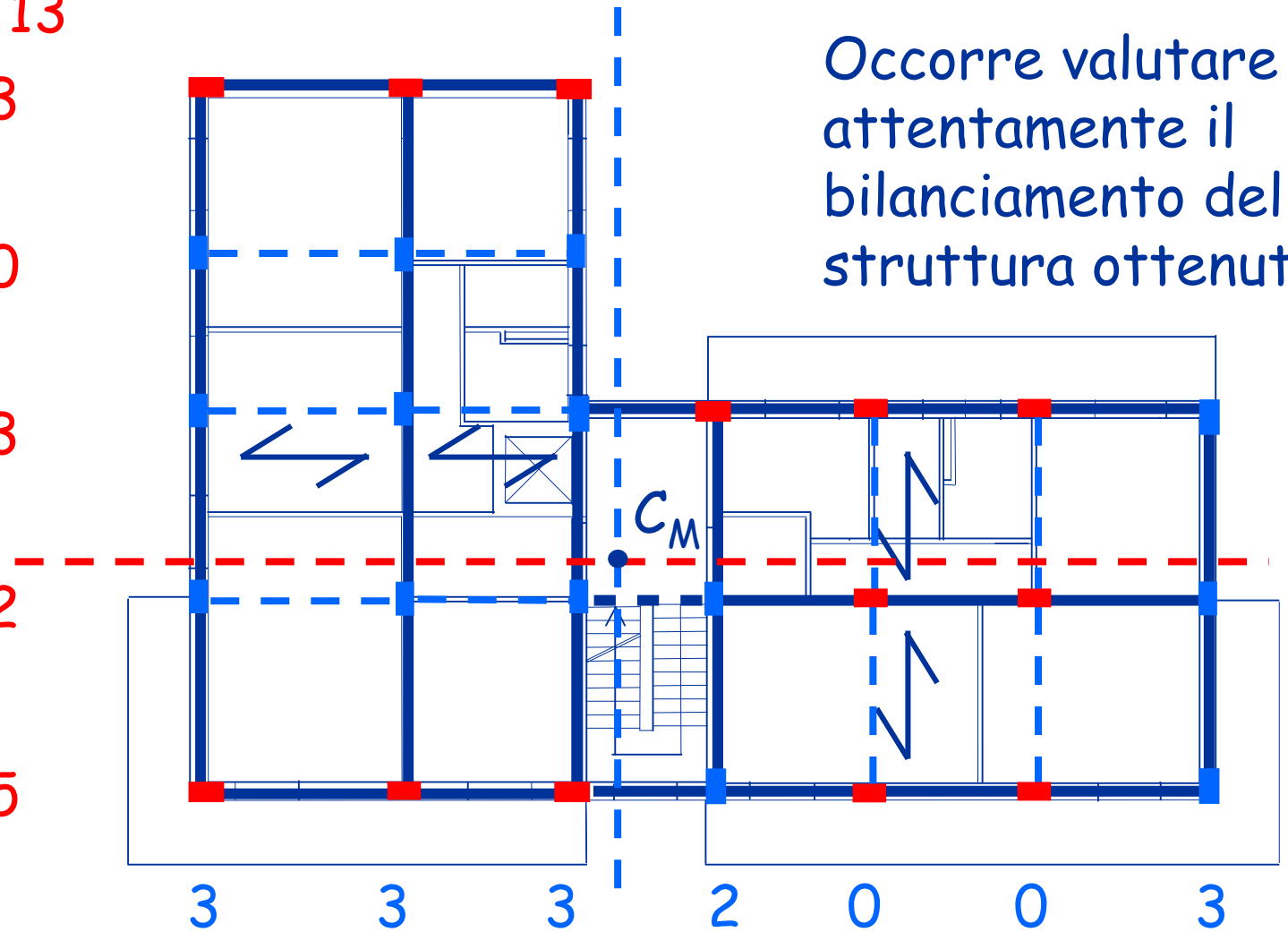
3

0

3

2

5



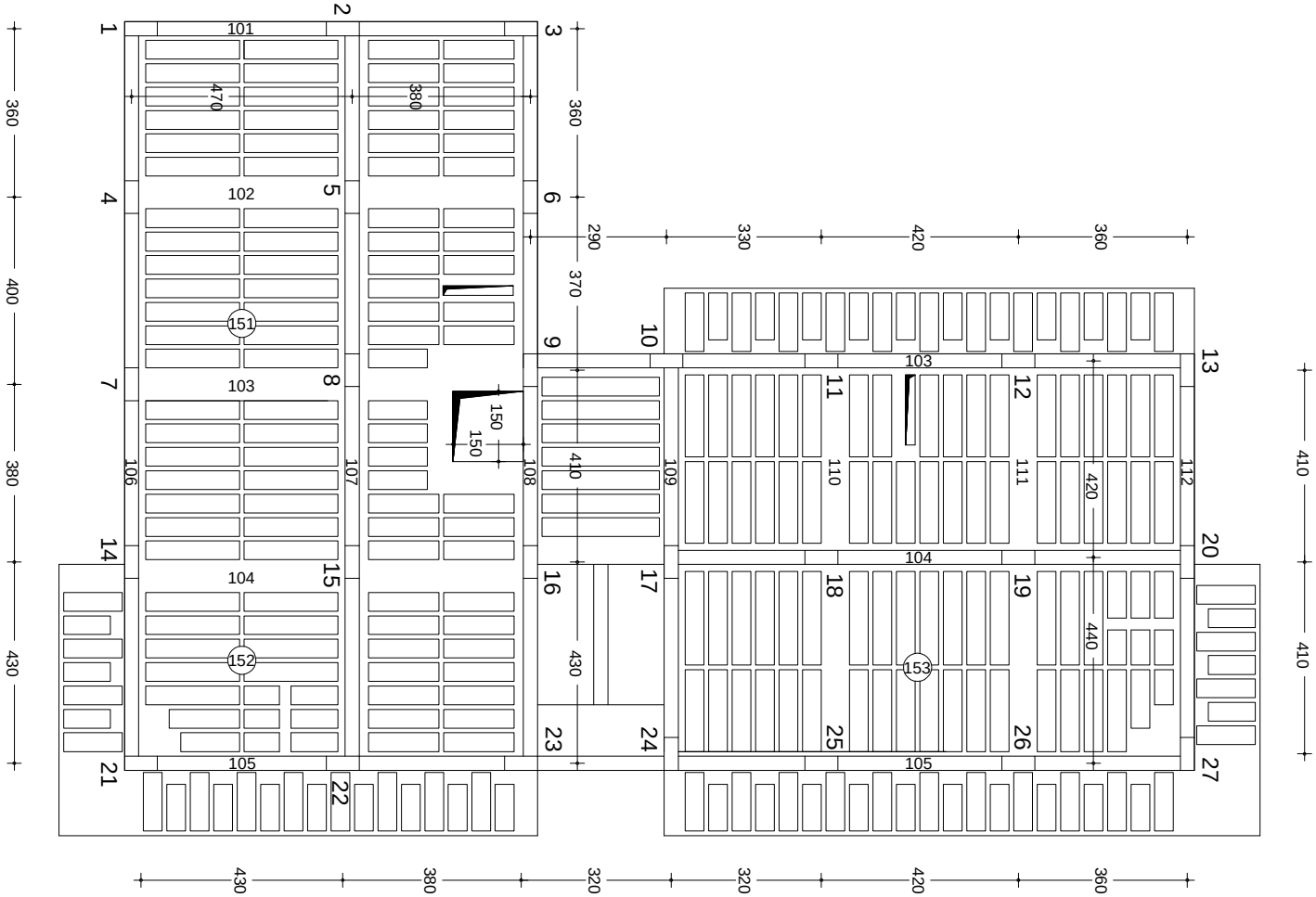
3 3 3 2 0 0 3 tot. 14

Occorre valutare attentamente il bilanciamento della struttura ottenuta

Il lato destro è meno rigido?

È bene irrigidirlo (o indebolire l'altro lato)

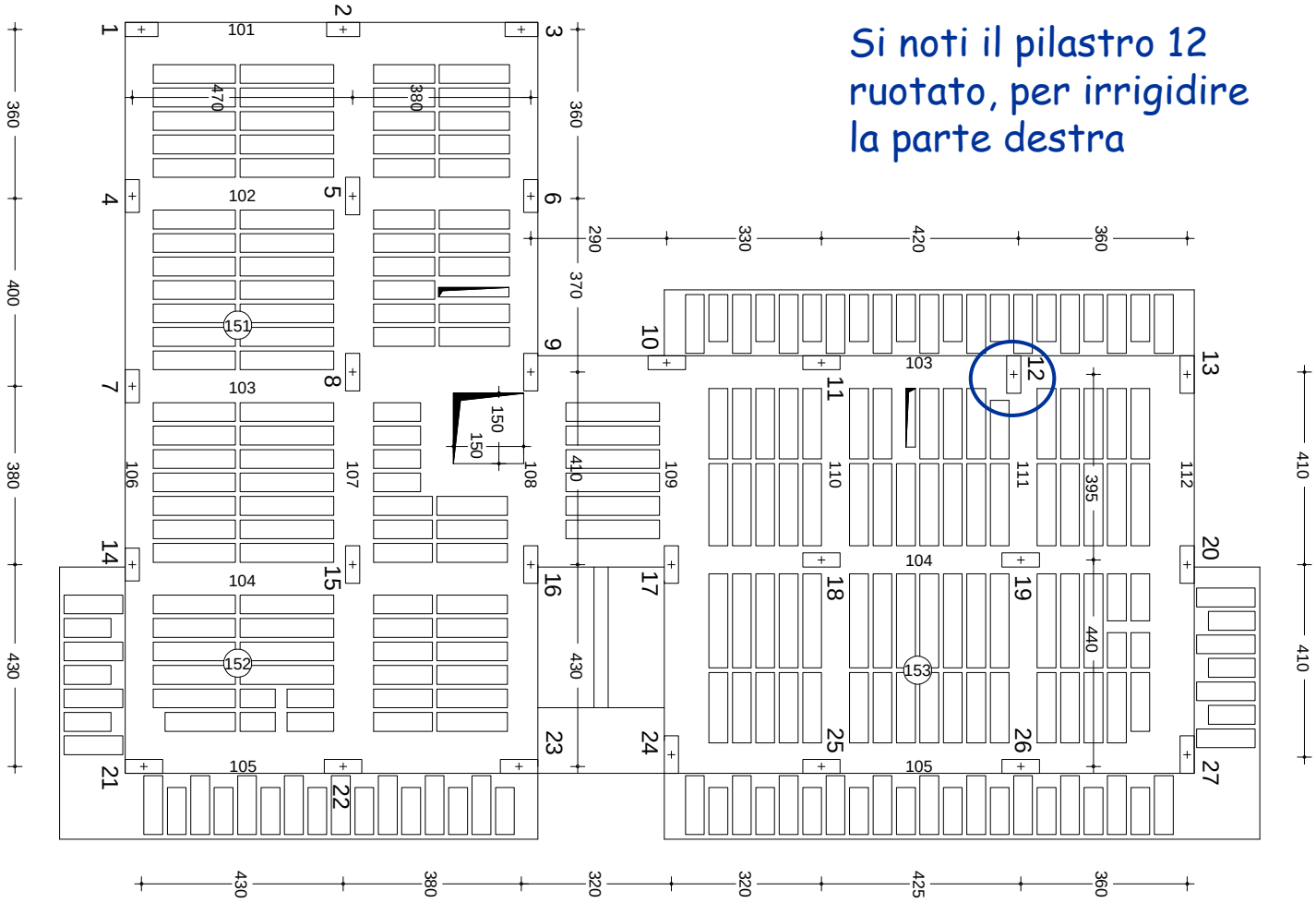
Carpenteria del piano tipo



Se l'edificio avesse solo travi a spessore

- I ragionamenti fatti non cambiano
- L'organizzazione della carpenteria può essere la stessa
- Lo spessore del solaio e le dimensioni degli elementi strutturali devono variare

Carpenteria edificio con travi a spessore



Si noti il pilastro 12 ruotato, per irrigidire la parte destra