

Corso di aggiornamento

Progettazione strutturale e  
Norme Tecniche per le Costruzioni

**Progetto di edifici antisismici in c.a.**

6 - Concezione generale della struttura  
e impostazione della carpenteria

Spoletto

27-28 aprile 2015

Aurelio Gheresi

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 qualità  
Si vedano in particolare gli articoli:  
A. Gherzi
- La capacità  
La regolarità strutturale nella progettazione di edifici in  
strutturale zona sismica  
Atti del convegno tecnico-scientifico "Problemi attuali di  
Ingegneria Strutturale", dal volume omonimo, CUEN,  
Napoli, 2000
- Il costo  
A. Gherzi  
idoneo  
General considerations on structural regularity  
all'uso  
Proceedings of the 13<sup>th</sup> 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

Adeguate 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

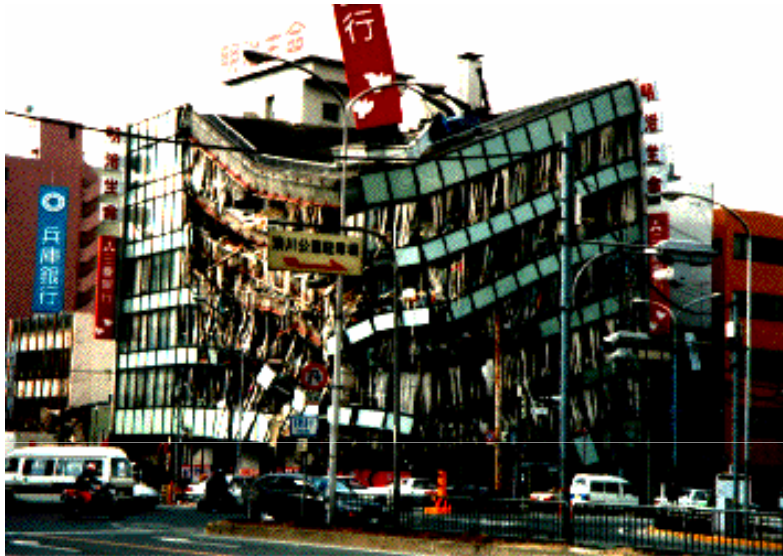
## Simmetria

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

Mancanza di regolarità  
planimetrica e di  
regolarità altimetrica



Stati Uniti

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

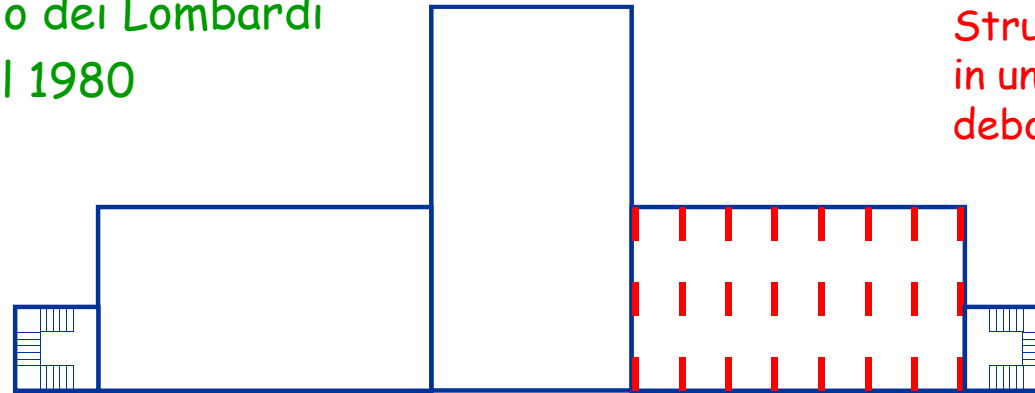
Forti differenze di rigidezza possono rendere  
rilevanti aspetti in genere trascurabili

# Principi base della progettazione strutturale

## Resistenza e rigidezza bi-direzionale

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

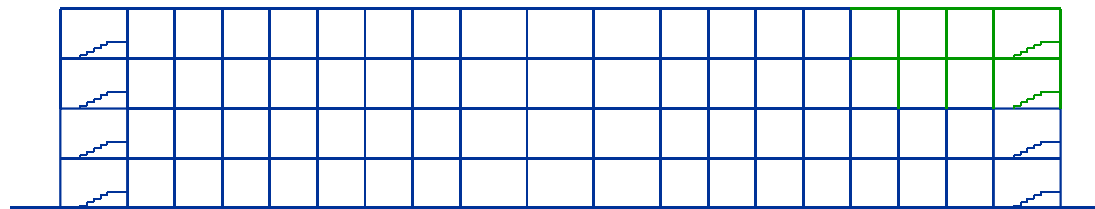
PIANTA



Struttura rigida  
in una direzione,  
debole nell'altra

Corpo scala non  
conteggiato nel  
calcolo

PROSPETTO



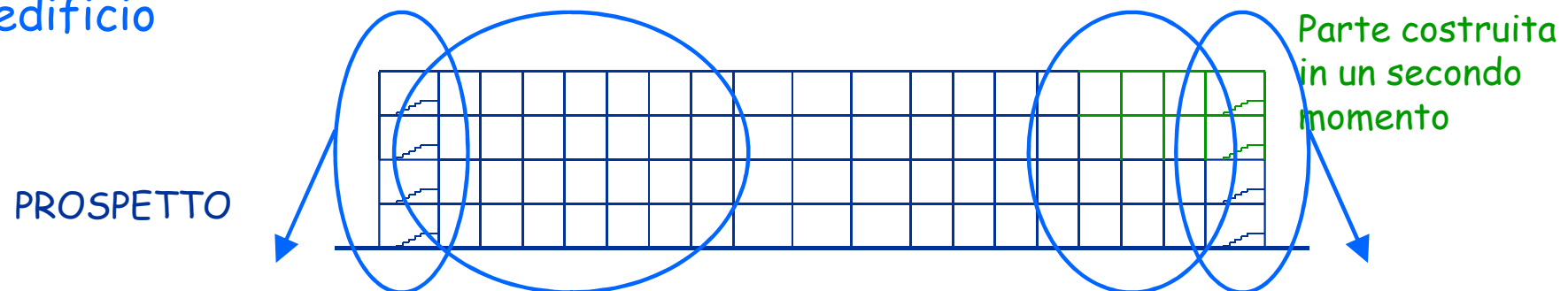
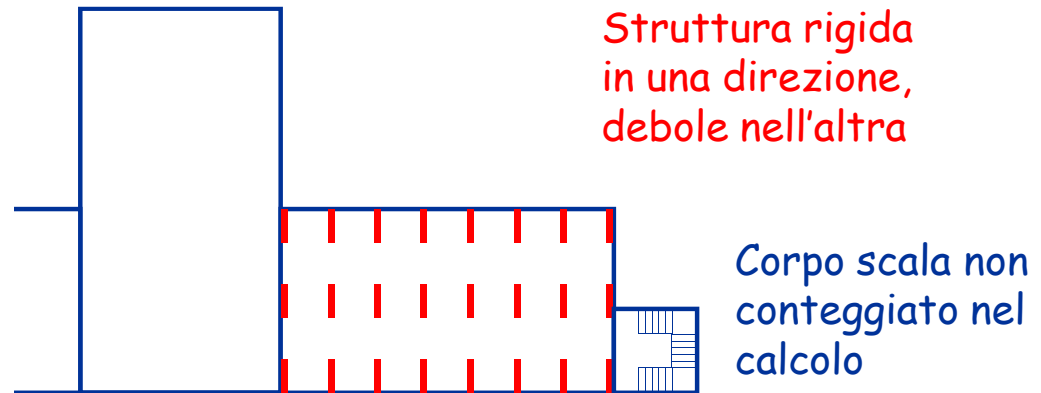
Parte costruita  
in un secondo  
momento

# 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

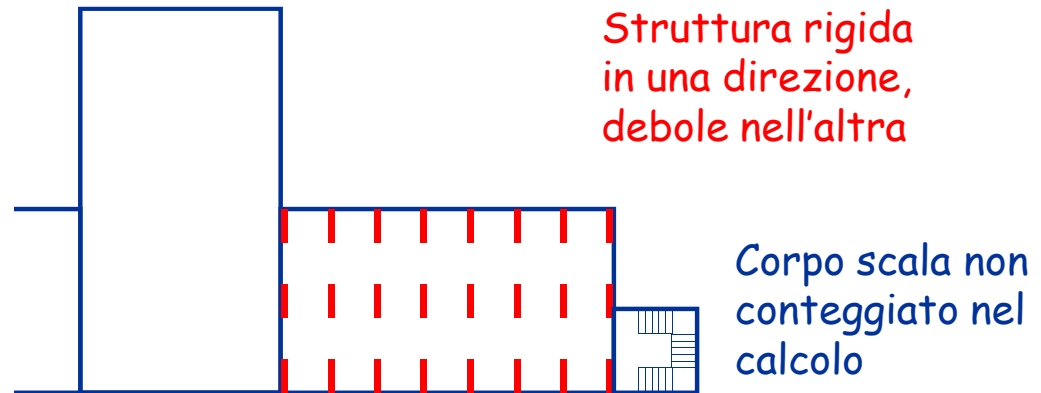


# Principi base della progettazione strutturale

## 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



danneggiato, ma in piedi

Parte costruita in un secondo momento

PROSPETTO



# Principi base della progettazione strutturale

Resistenza e rigidezza torsionale  
=

Adeguate 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

Adeguate 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.

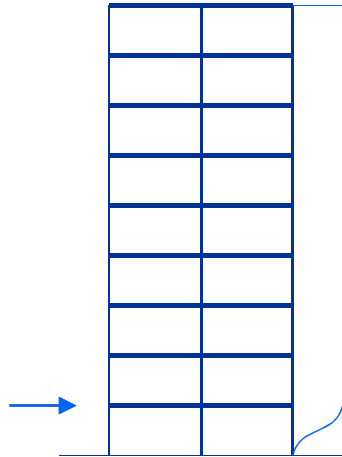
Compito dei diversi elementi:

- 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

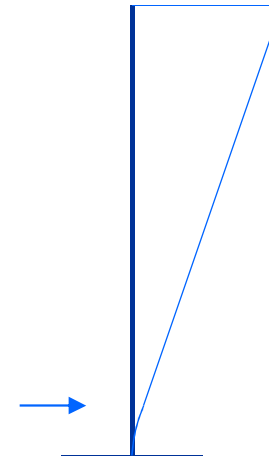
# Comportamento a mensola e comportamento a telaio



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:

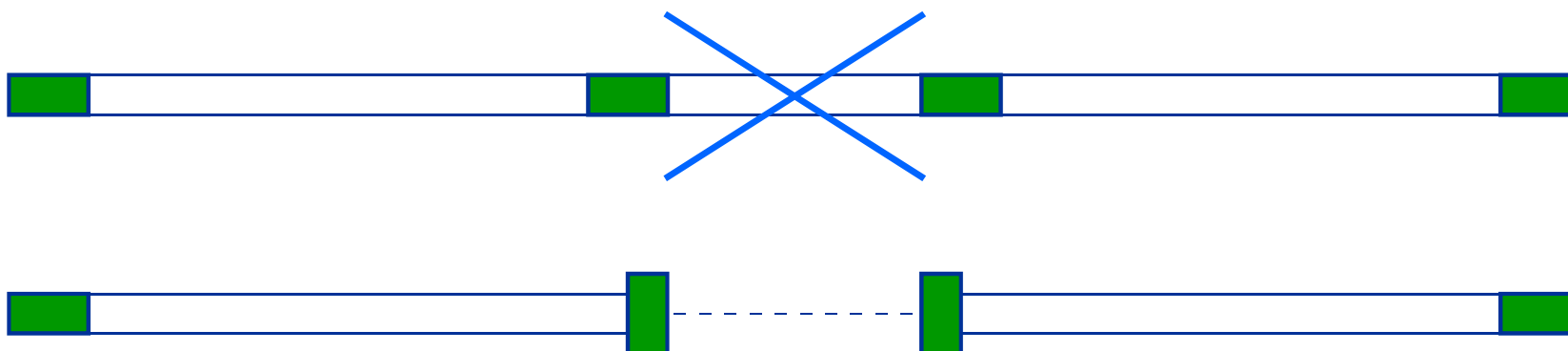
- Adottare per le luci di sbalzi, solai e travi limiti massimi leggermente inferiori a quelli consigliati in assenza di sisma

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:

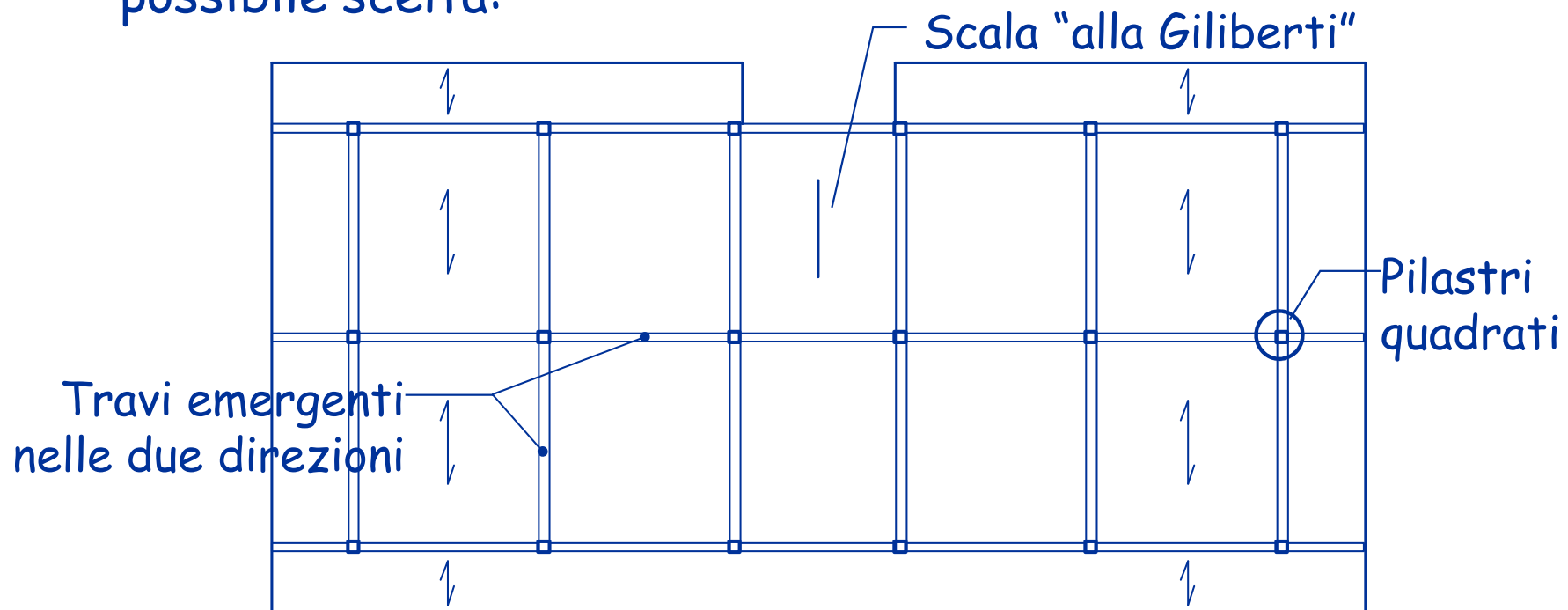
- Adottare per le luci di sbalzi, solai e travi limiti massimi leggermente inferiori a quelli consigliati in assenza di sisma
- Evitare campate di trave troppo corte, che provocherebbero concentrazione di sollecitazioni
- Evitare forti disuniformità di carico verticale sui pilastri  
(carichi maggiori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

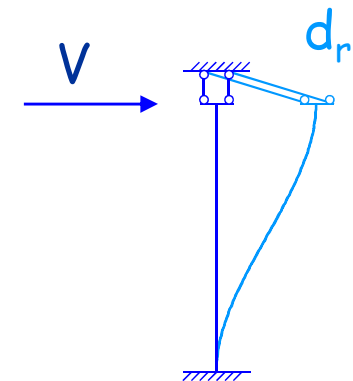
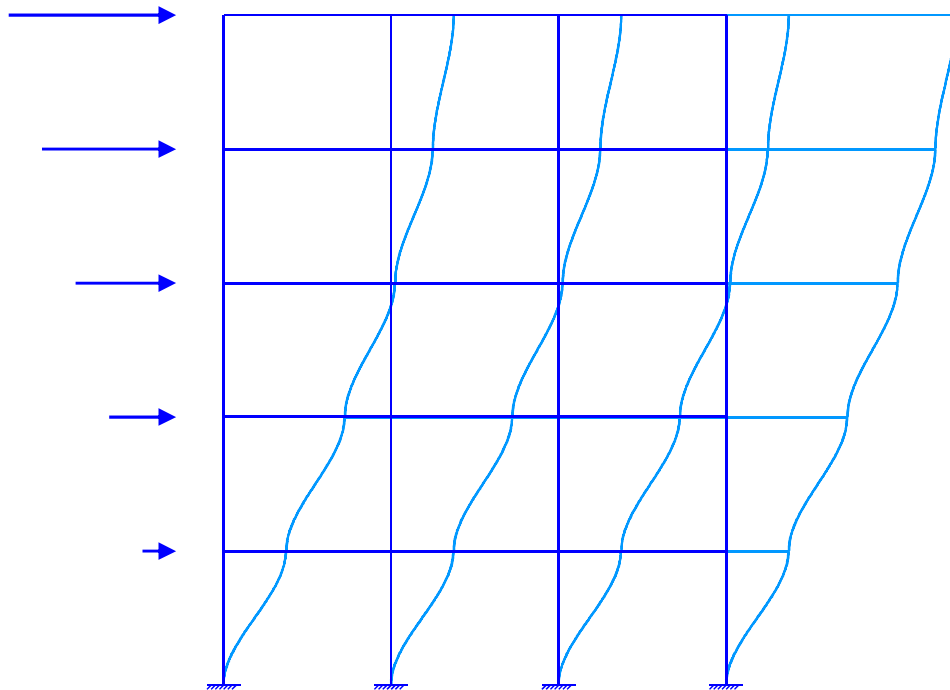
In realtà si hanno spesso travi sia emergenti che a spessore e pilastri rettangolari

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

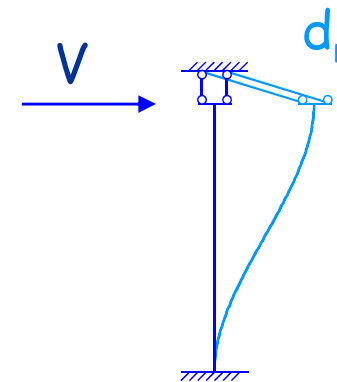
# Rigidezza

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

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

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

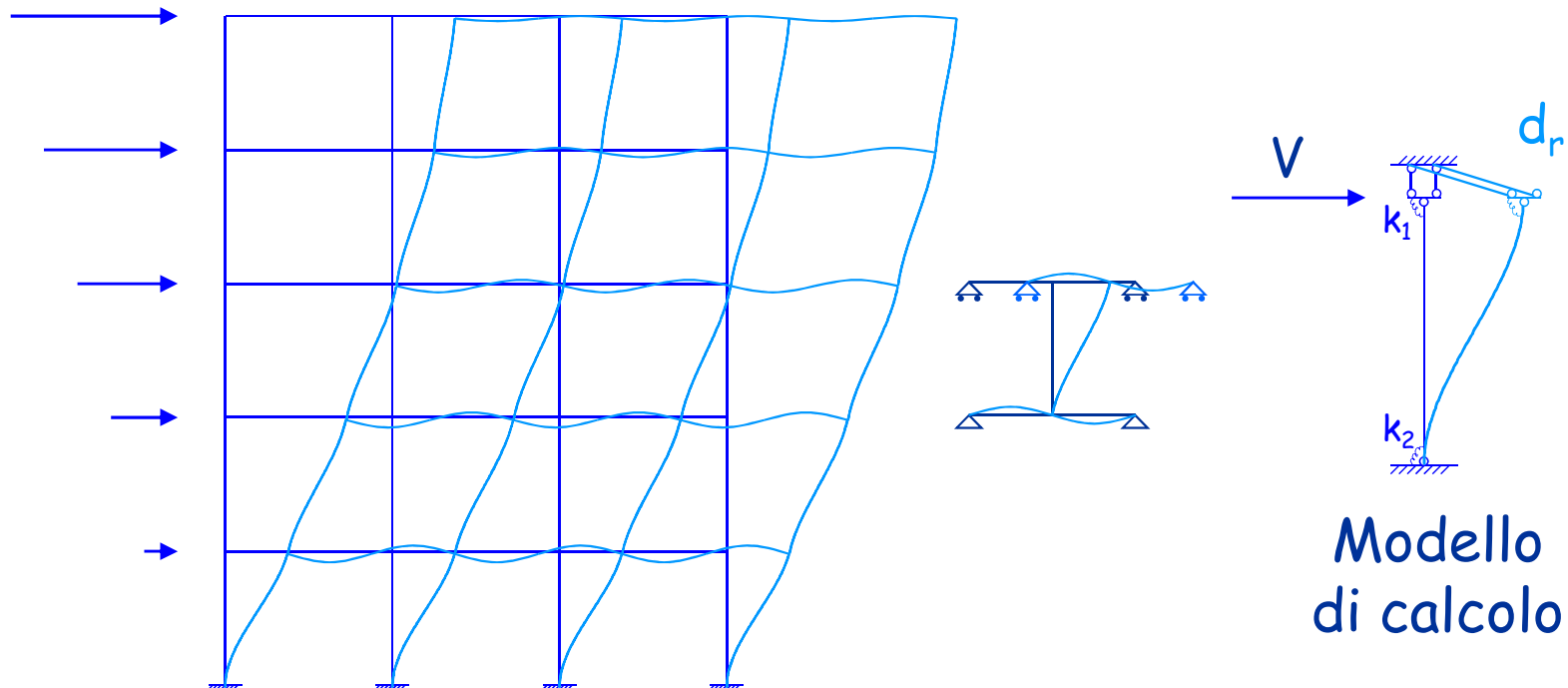
La rigidezza è proporzionale al momento d'inerzia della sezione



Modello  
di calcolo

# Rigidezza

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



# Rigidezza

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

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

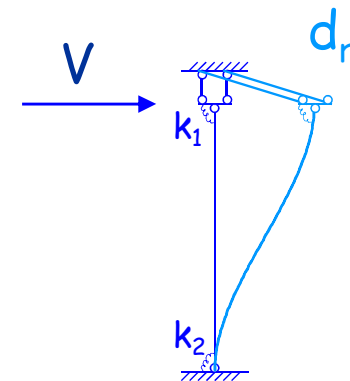


ma poiché la trave serve da vincolo anche al pilastro di sopra, prendo la metà

$$k_1 = \frac{6 E I_{t,\text{sup}}}{L_t}$$

$$k_2 = \frac{6 E I_{t,\text{inf}}}{L_t}$$

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

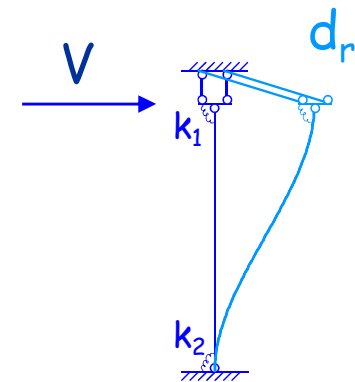


Modello di calcolo

# Rigidezza

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

$$\begin{aligned}d_r &= \frac{V L_p^3}{12 E I_p} \left[ 1 + \frac{1}{2} \frac{r_1 + r_2 + 2 r_1 r_2 / 3}{1 + (r_1 + r_2) / 6} \right] \\&= \frac{V L_p^3}{12 E I_p} \left[ 1 + \frac{1}{2} (r_1 + r_2) - \frac{1}{2} \frac{(r_1 - r_2)^2 / 6}{1 + (r_1 + r_2) / 6} \right] \\&\cong \frac{V L_p^3}{12 E I_p} \left[ 1 + \frac{1}{2} (r_1 + r_2) \right] \quad \text{se } r_1 \cong r_2\end{aligned}$$



Modello  
di calcolo

Lo spostamento dipende anche  
dalla rigidezza delle travi

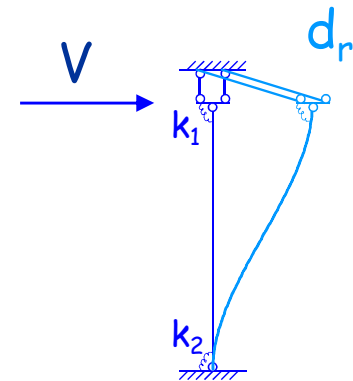
# Rigidezza

- 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		

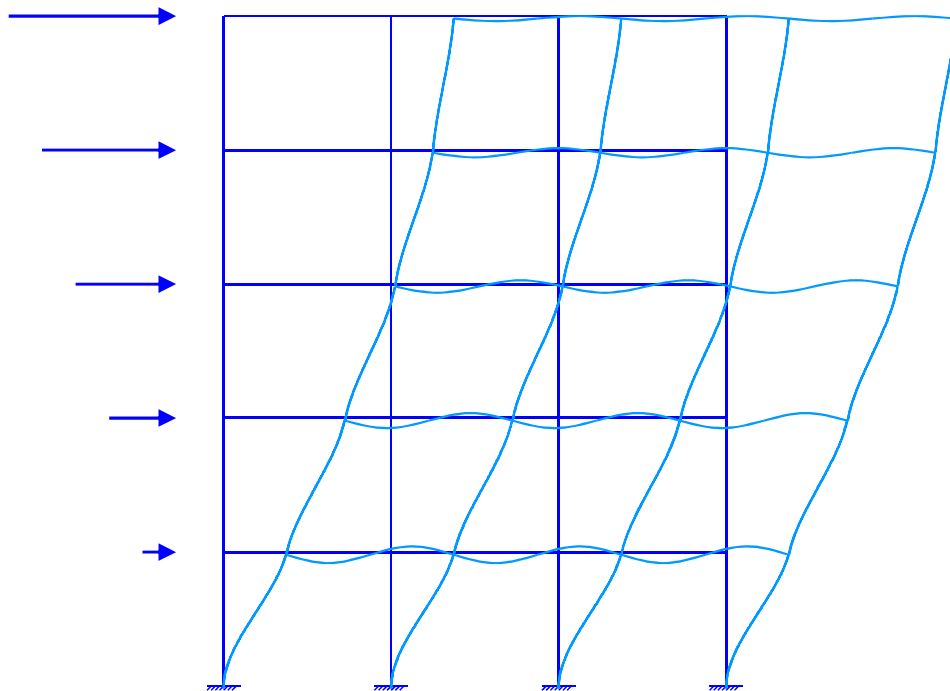
pilastro	30x70	$l=3.20$ m
travi	60x24	$l=4.50$ m
$k = 5.36$ kN/mm		

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

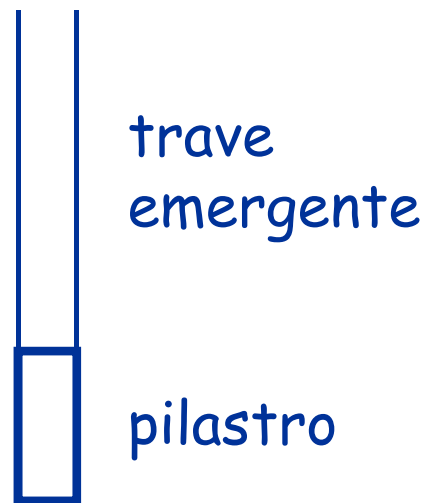
In particolare nel caso di un pilastro di piatto tra due pilastri di coltello



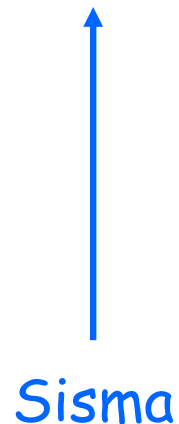
In questo caso la rotazione del nodo centrale può essere nulla; valutare la rigidezza del pilastro centrale senza riduzioni

# 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



# Elementi resistenti alle azioni orizzontali

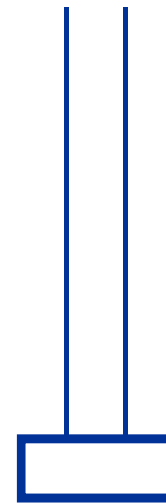
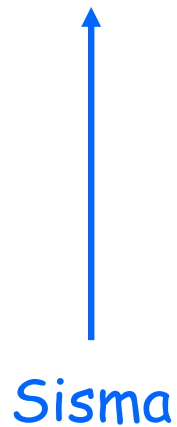
In realtà si hanno travi sia emergenti che a spessore  
e pilastri rettangolari



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



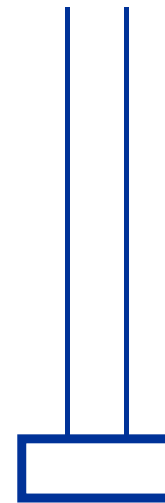
Elemento  
con buona  
rigidezza a  
tutti i piani



Elemento con  
rigidezza  
solo al primo  
piano



Sisma



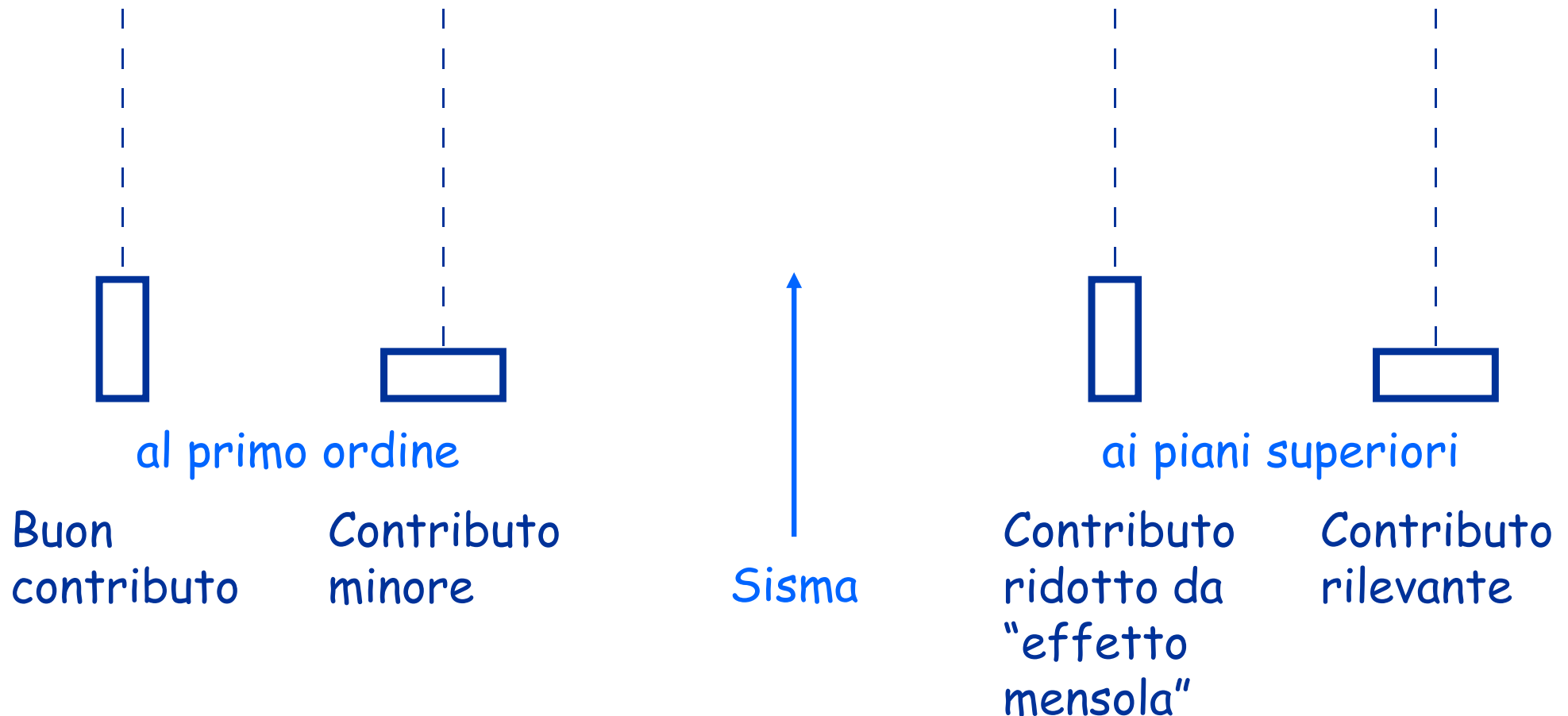
Elemento con  
rigidezza  
limitata a  
tutti i piani



Elemento con  
rigidezza  
trascurabile  
a tutti i piani

# Elementi resistenti alle azioni orizzontali

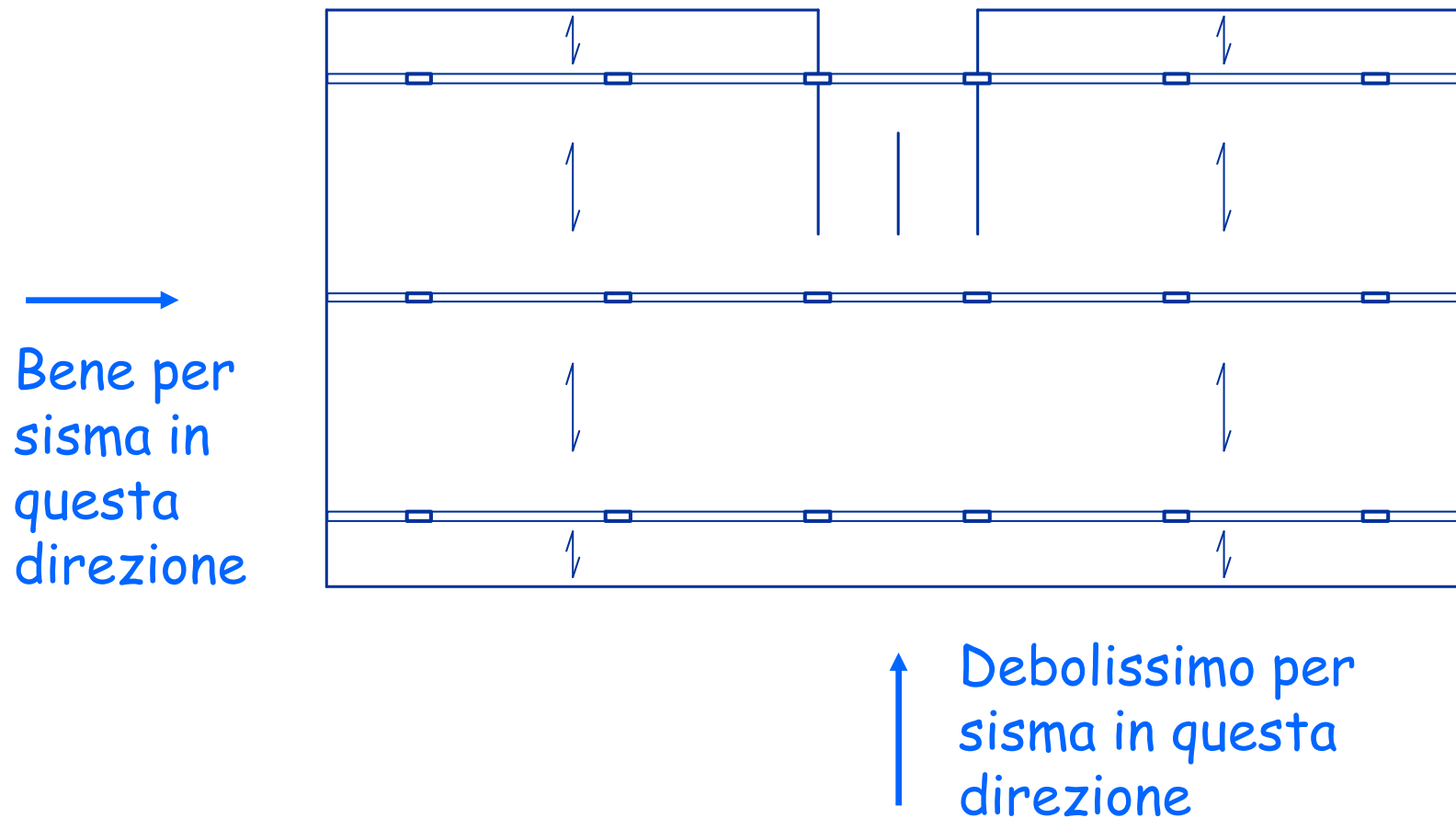
Se tutte le travi sono a spessore, il comportamento  
dei pilastri è un po' diverso



# Carpenteria:

da soli carichi verticali ad azioni orizzontali

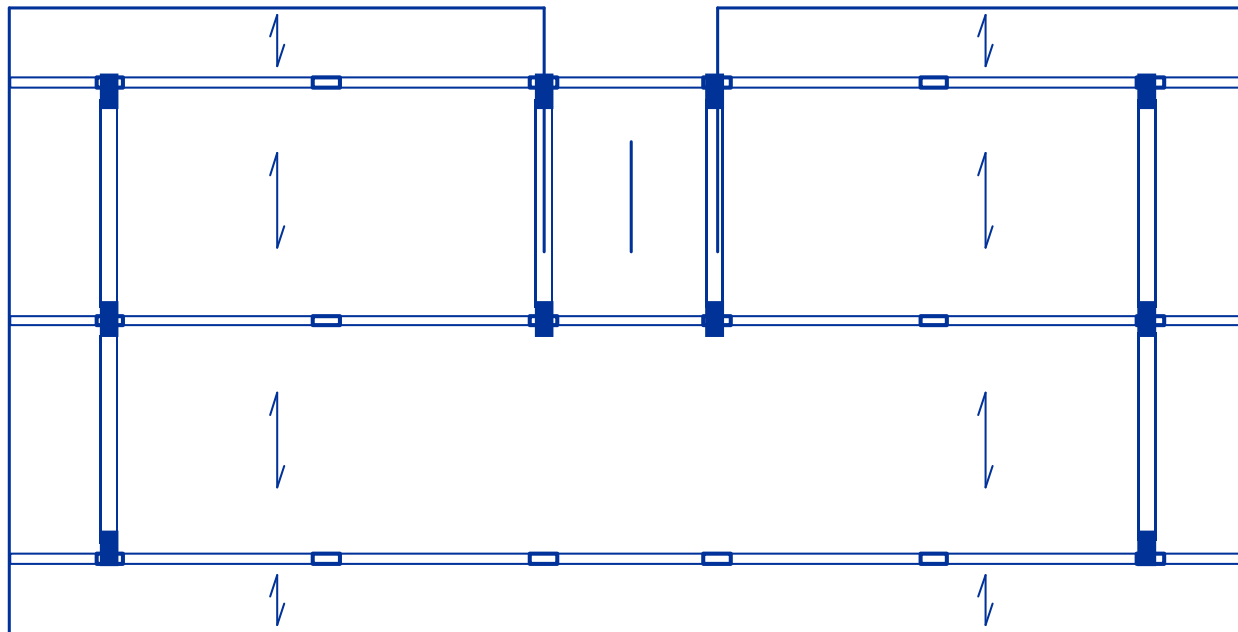
Al limite, per soli carichi verticali:



# Carpenteria:

da soli carichi verticali ad azioni orizzontali

Interventi, per azioni orizzontali:



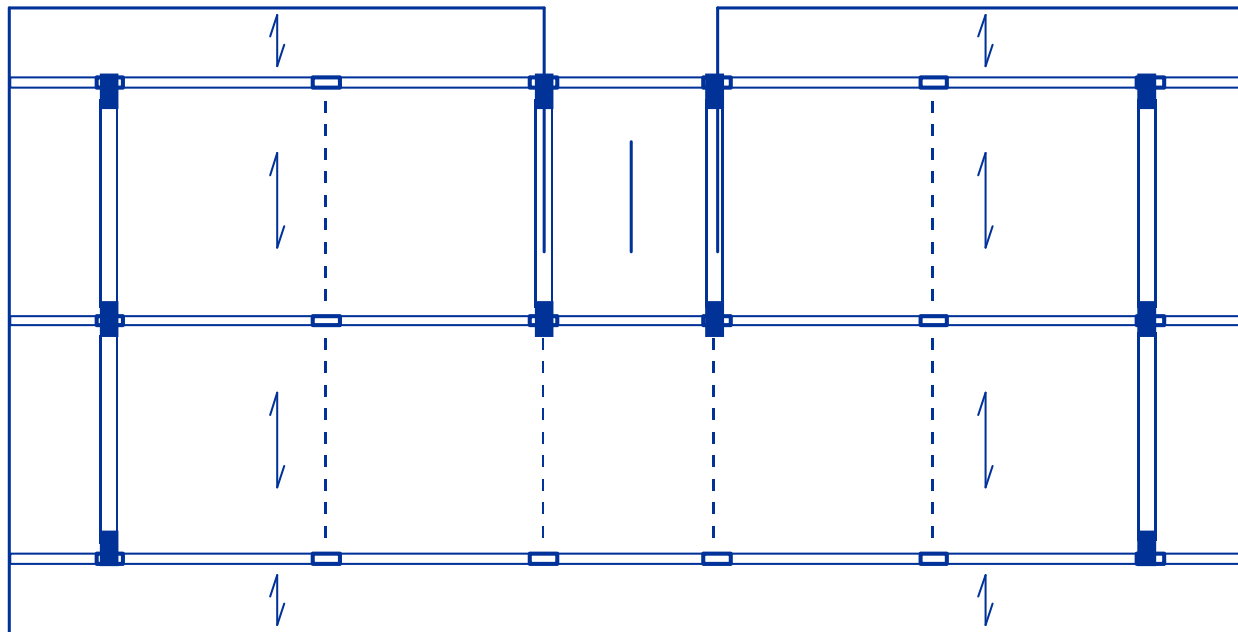
Girare un certo numero  
di pilastri

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:

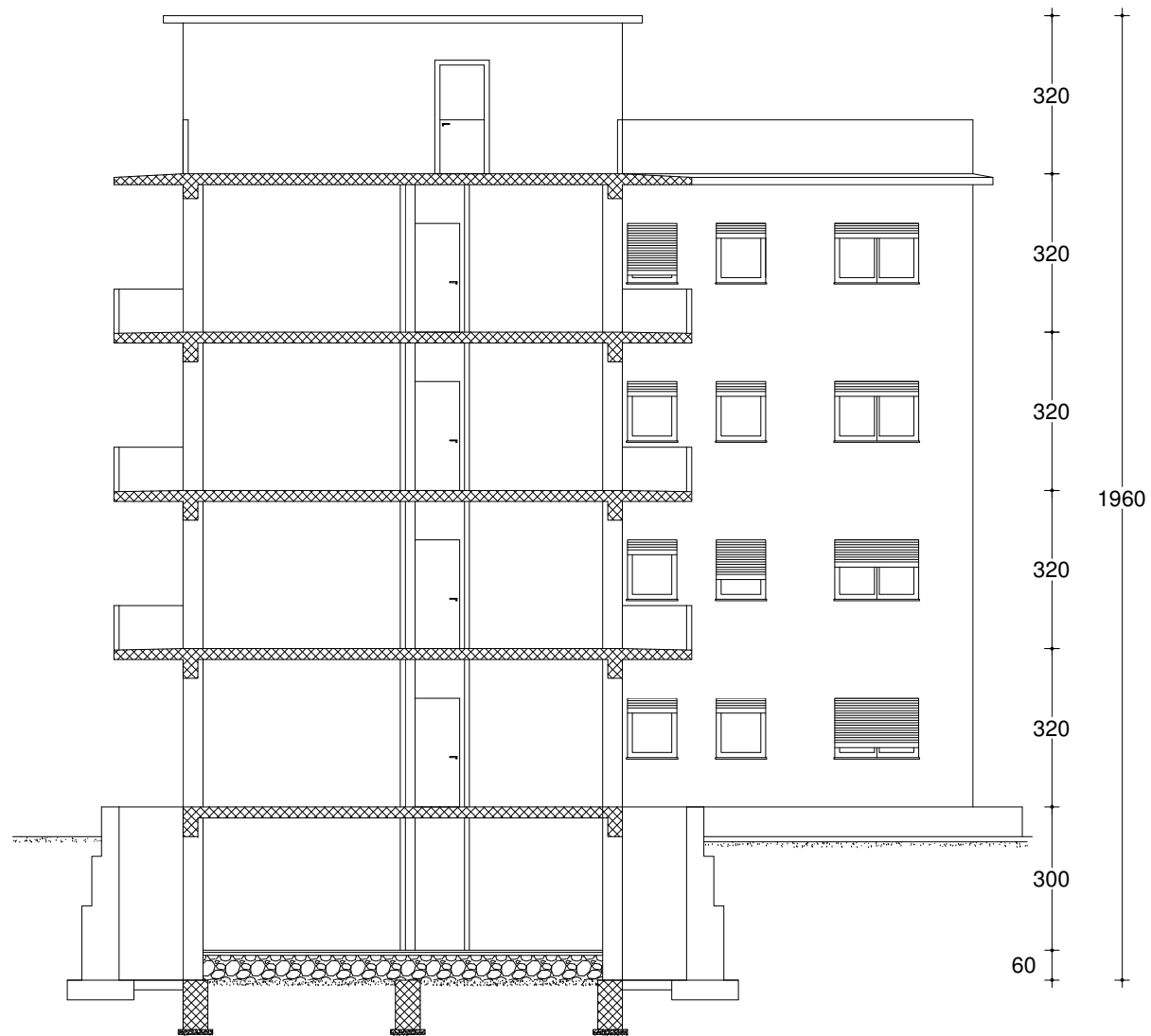
reticolo di travi rovesce

Materiali:

calcestruzzo C25/30 ( $f_{ck} = 25 \text{ MPa}$ ,  $R_{ck} = 30 \text{ MPa}$ )

acciaio B450C

# Edificio analizzato

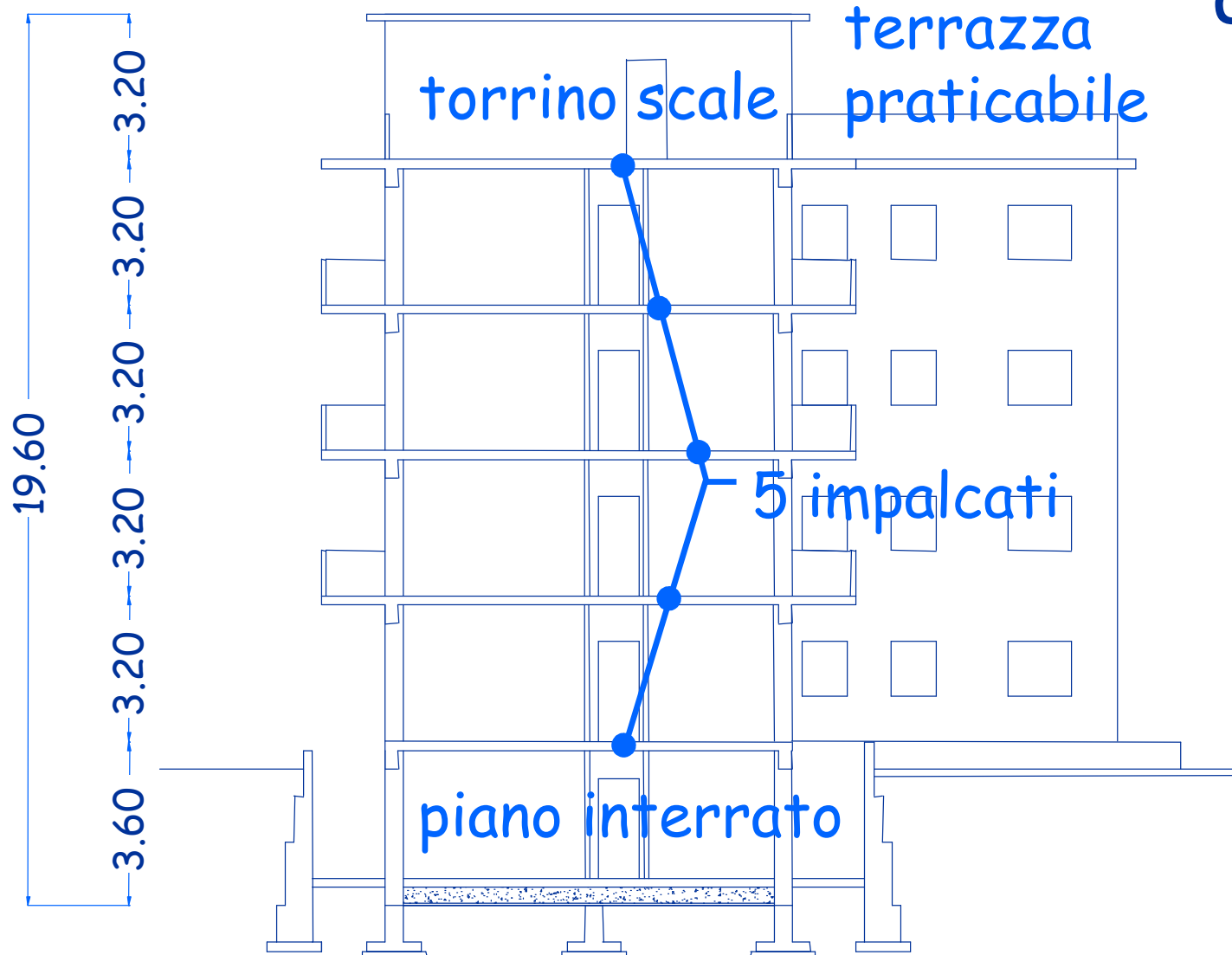


Sezione

# Edificio analizzato

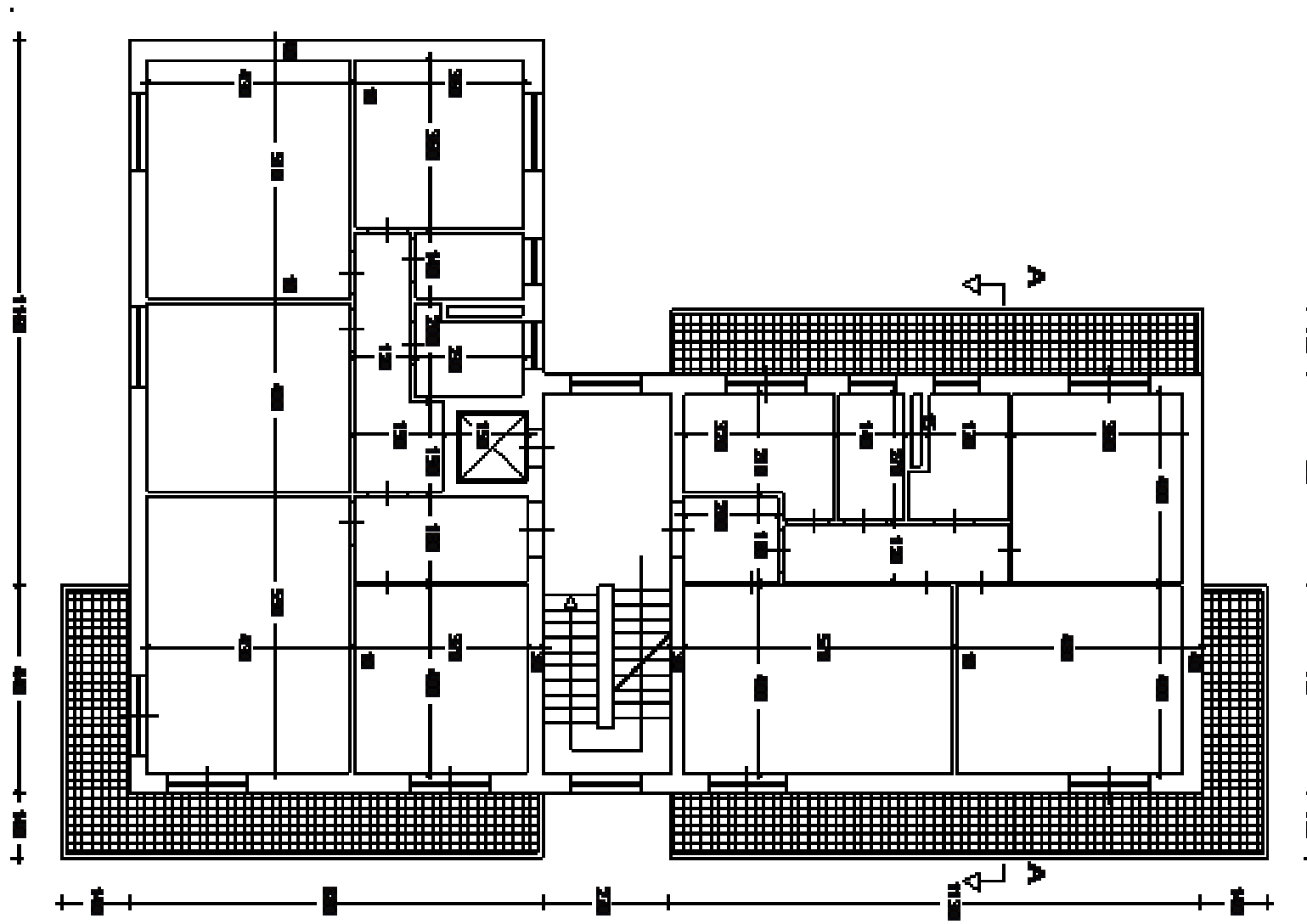
Sismicità media  
= ex zona 2

Terreno  
costituito da  
sabbie e ghiaie  
mediamente  
addensate



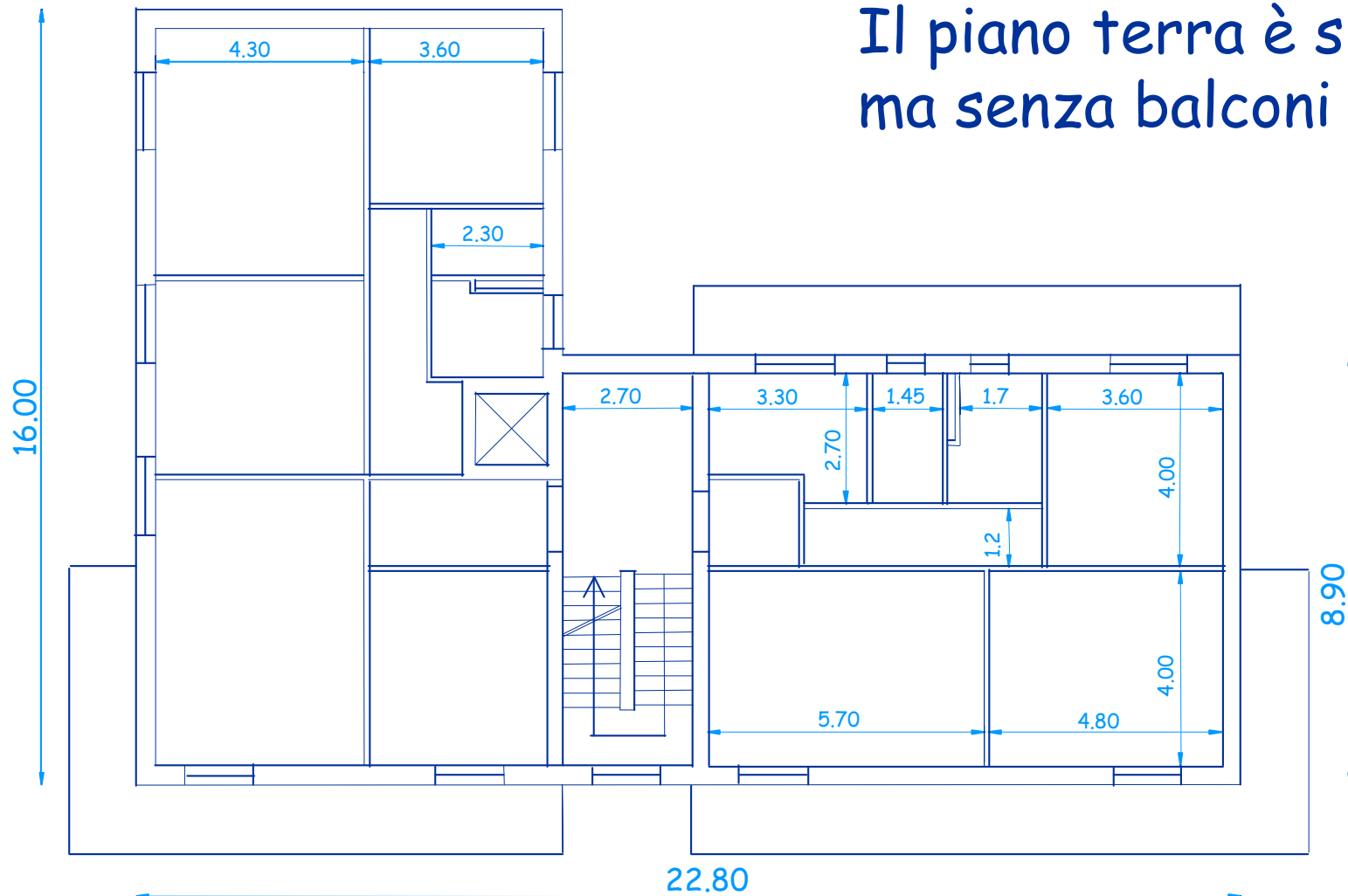
Sezione

# Piano tipo



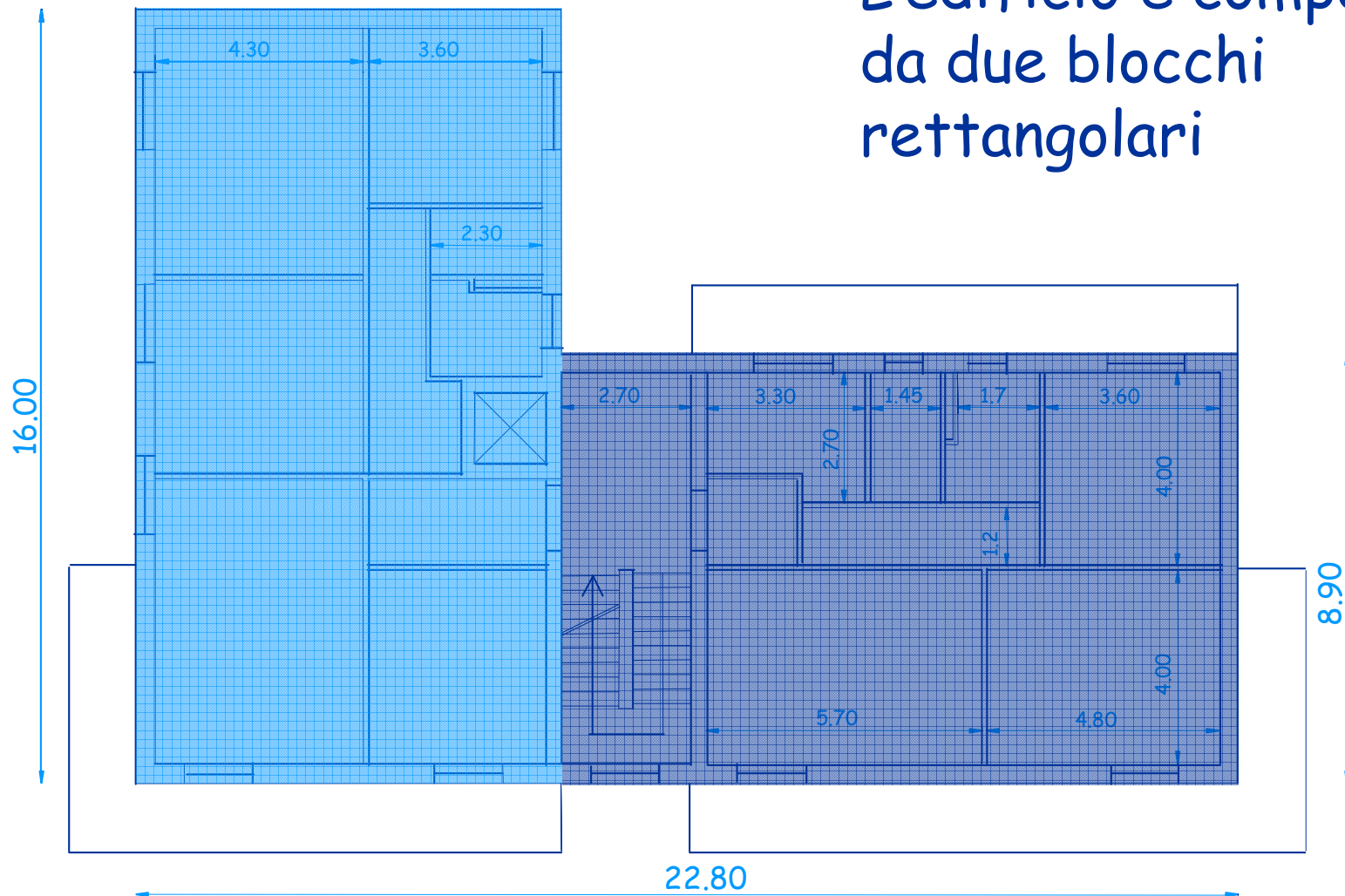
# Piano tipo

Il piano terra è simile,  
ma senza balconi



# Piano tipo

L'edificio è composto da due blocchi rettangolari



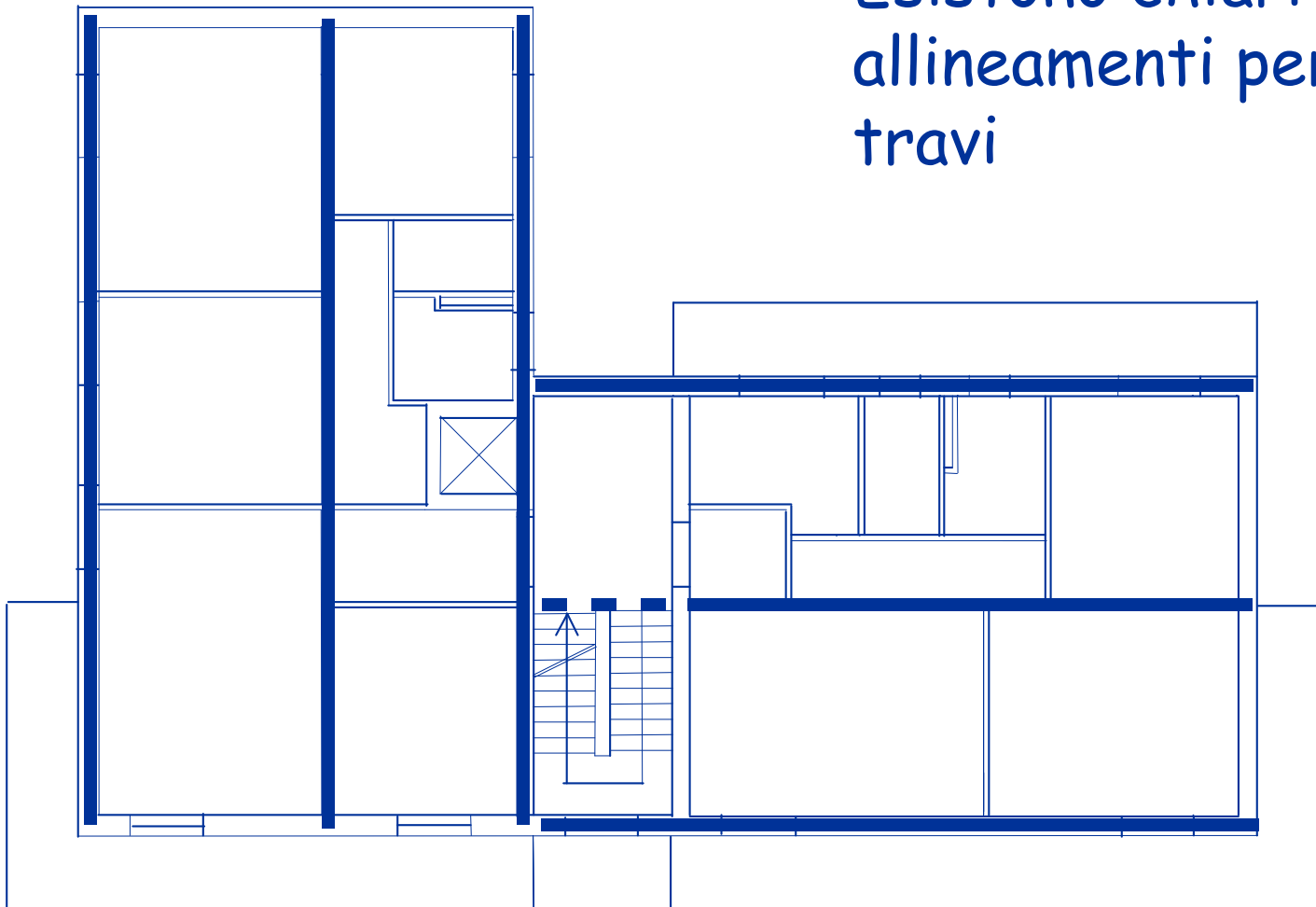
# Piano tipo

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



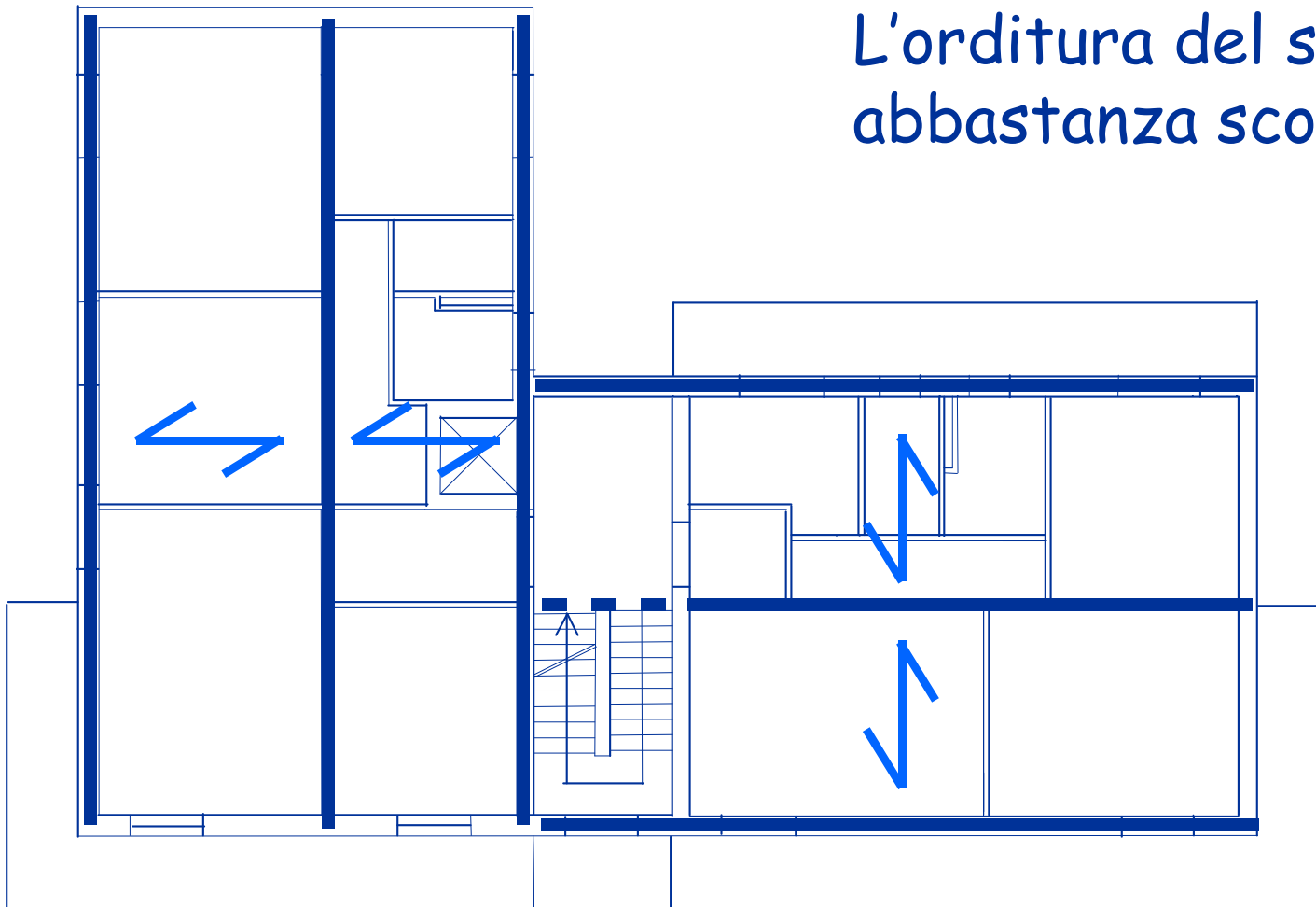
# Impostazione della carpenteria pensando ai carichi verticali

Esistono chiari  
allineamenti per le  
travi



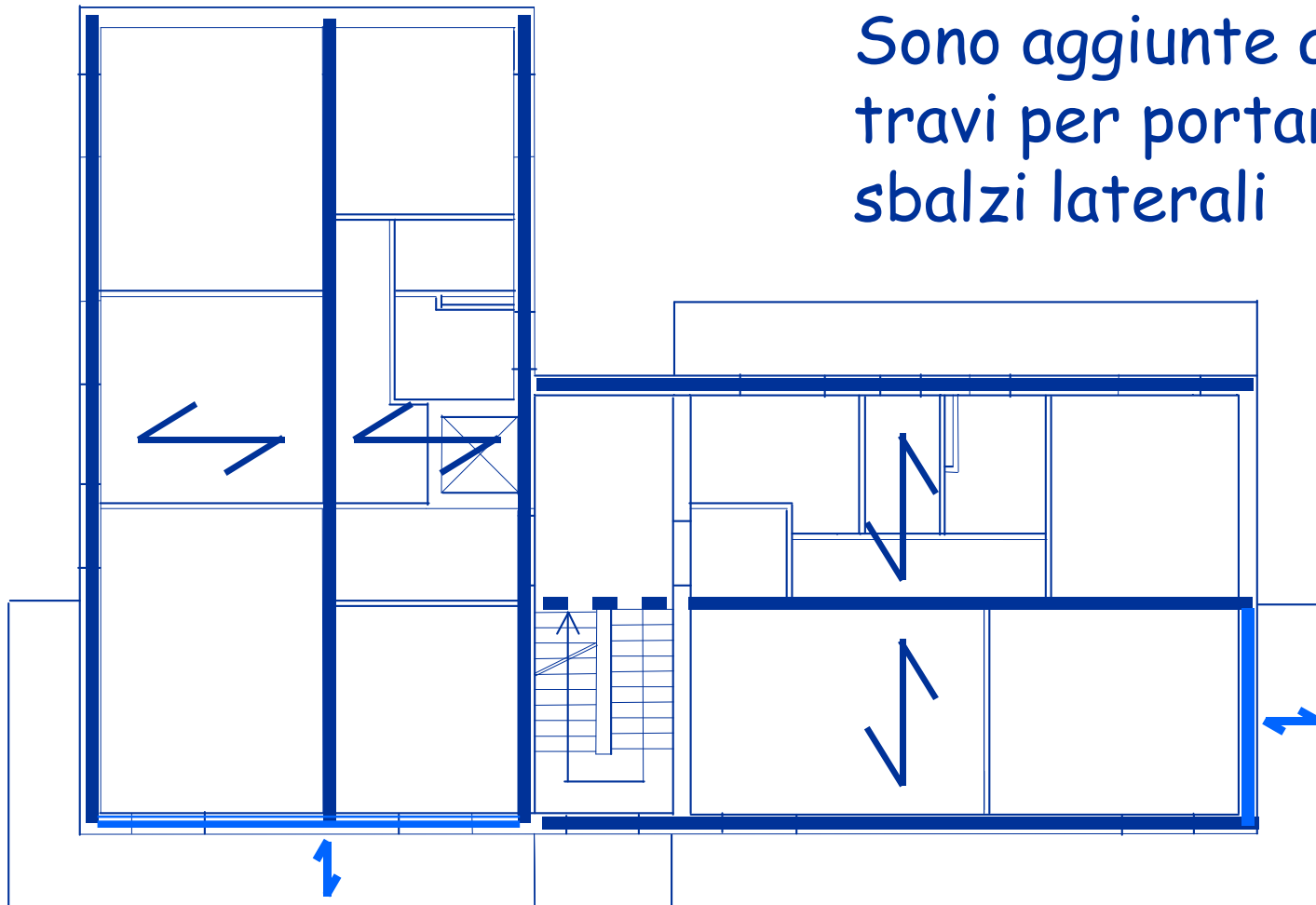
# Impostazione della carpenteria pensando ai carichi verticali

L'orditura del solaio è abbastanza scontata

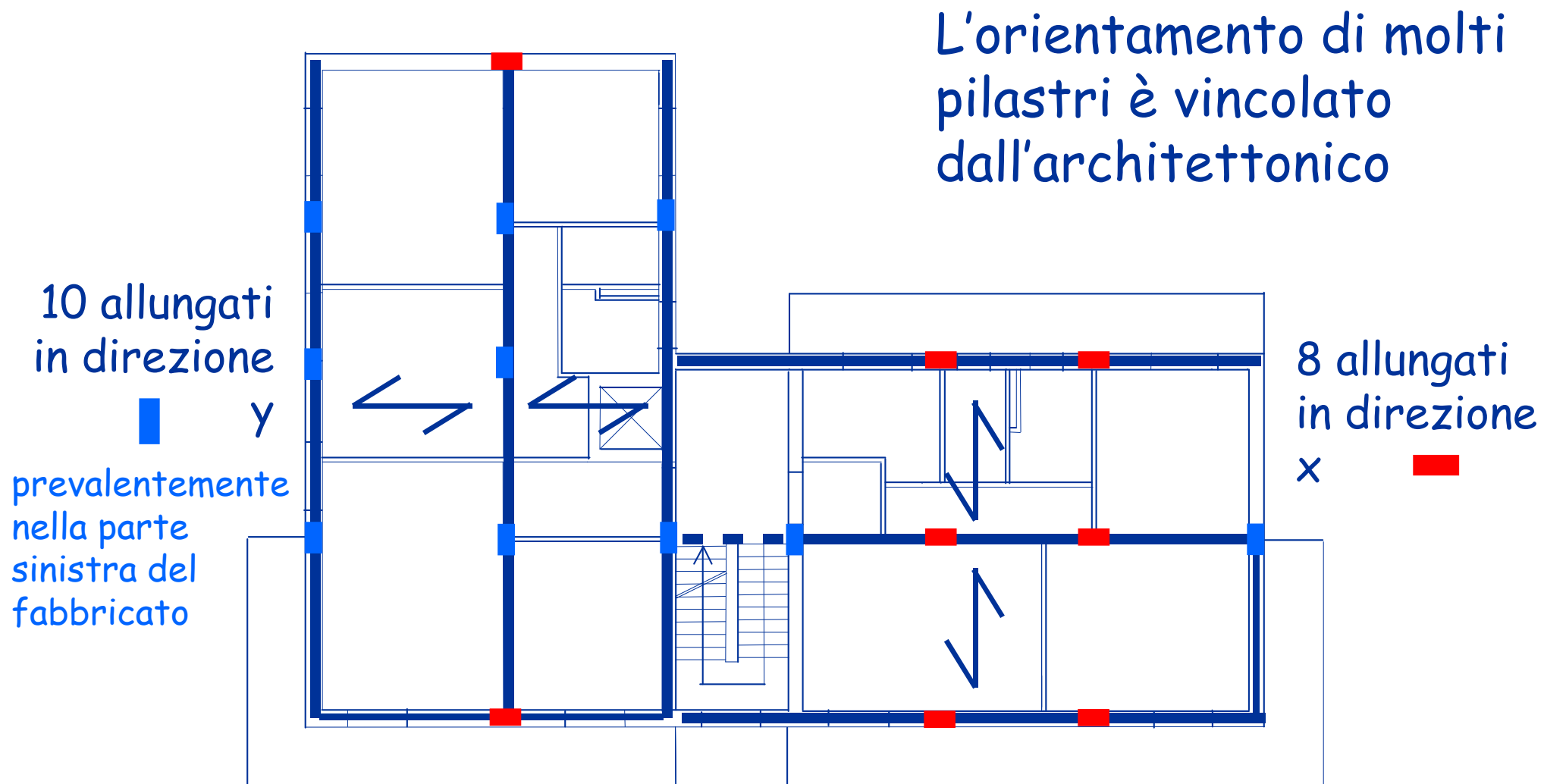


# Impostazione della carpenteria pensando ai carichi verticali

Sono aggiunte alcune travi per portare gli sbalzi laterali

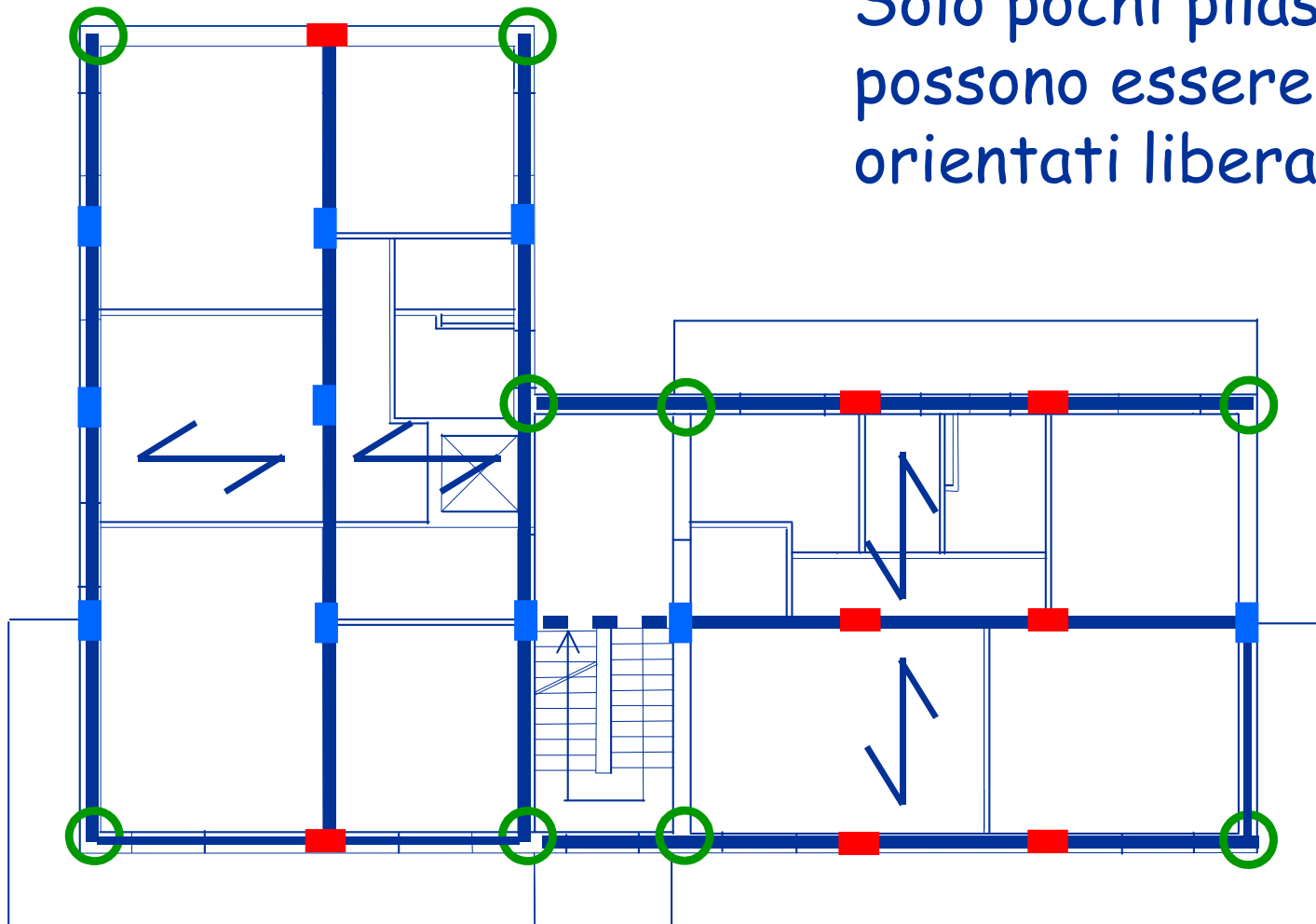


# Impostazione della carpenteria pensando alle azioni orizzontali



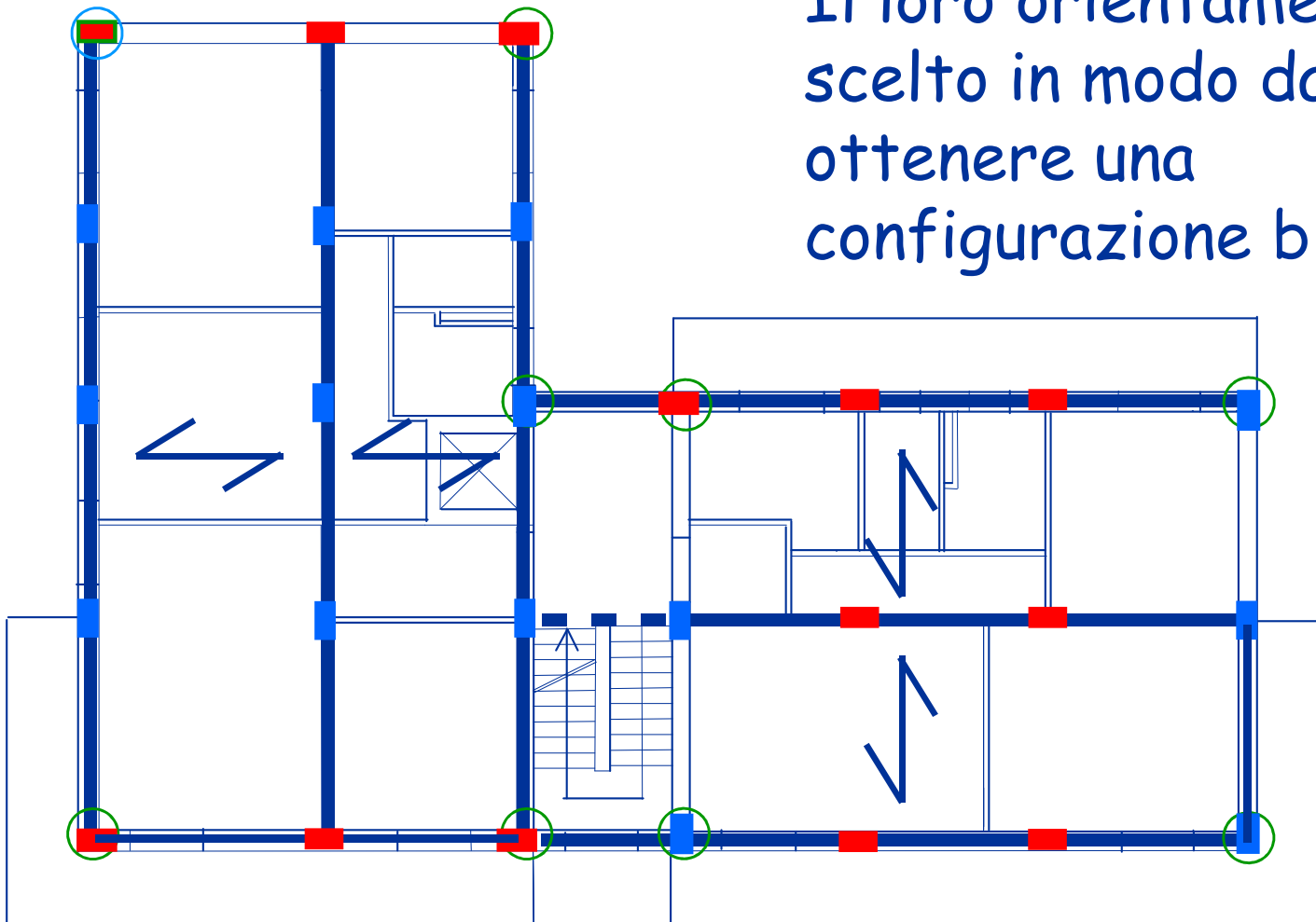
# Impostazione della carpenteria pensando alle azioni orizzontali

Solo pochi pilastri (9)  
possono essere  
orientati liberamente



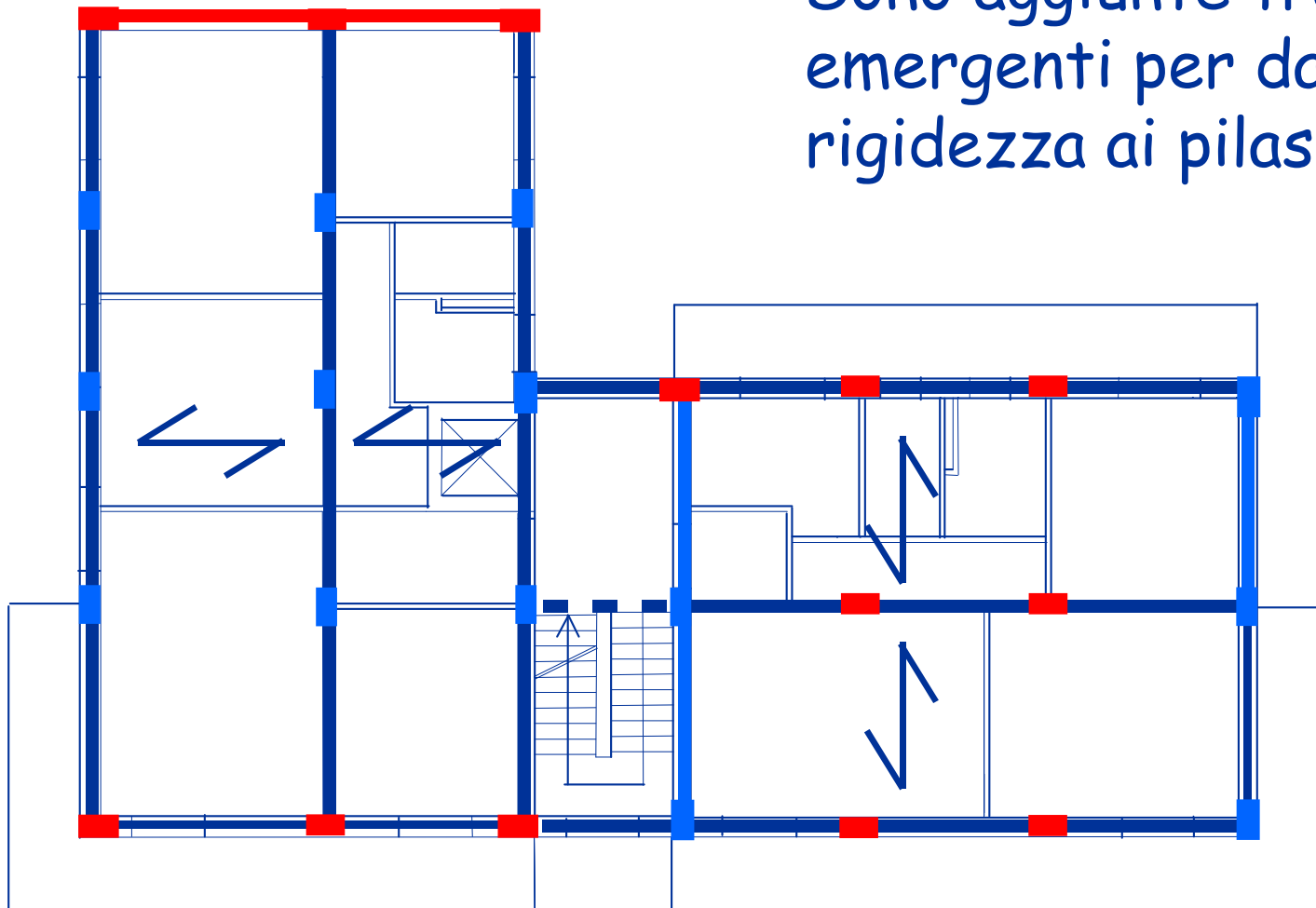
# Impostazione della carpenteria pensando alle azioni orizzontali

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



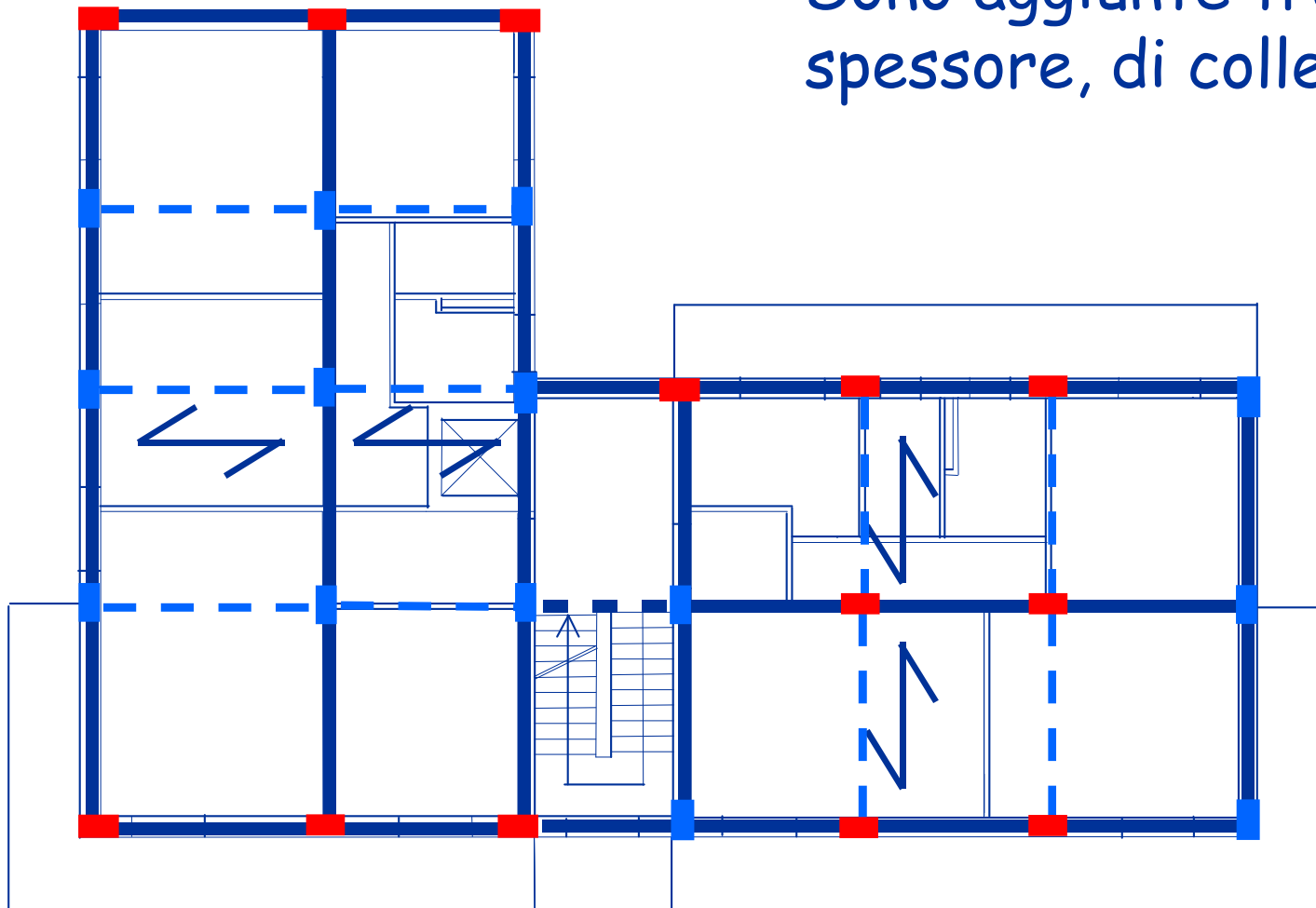
# Impostazione della carpenteria pensando alle azioni orizzontali

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

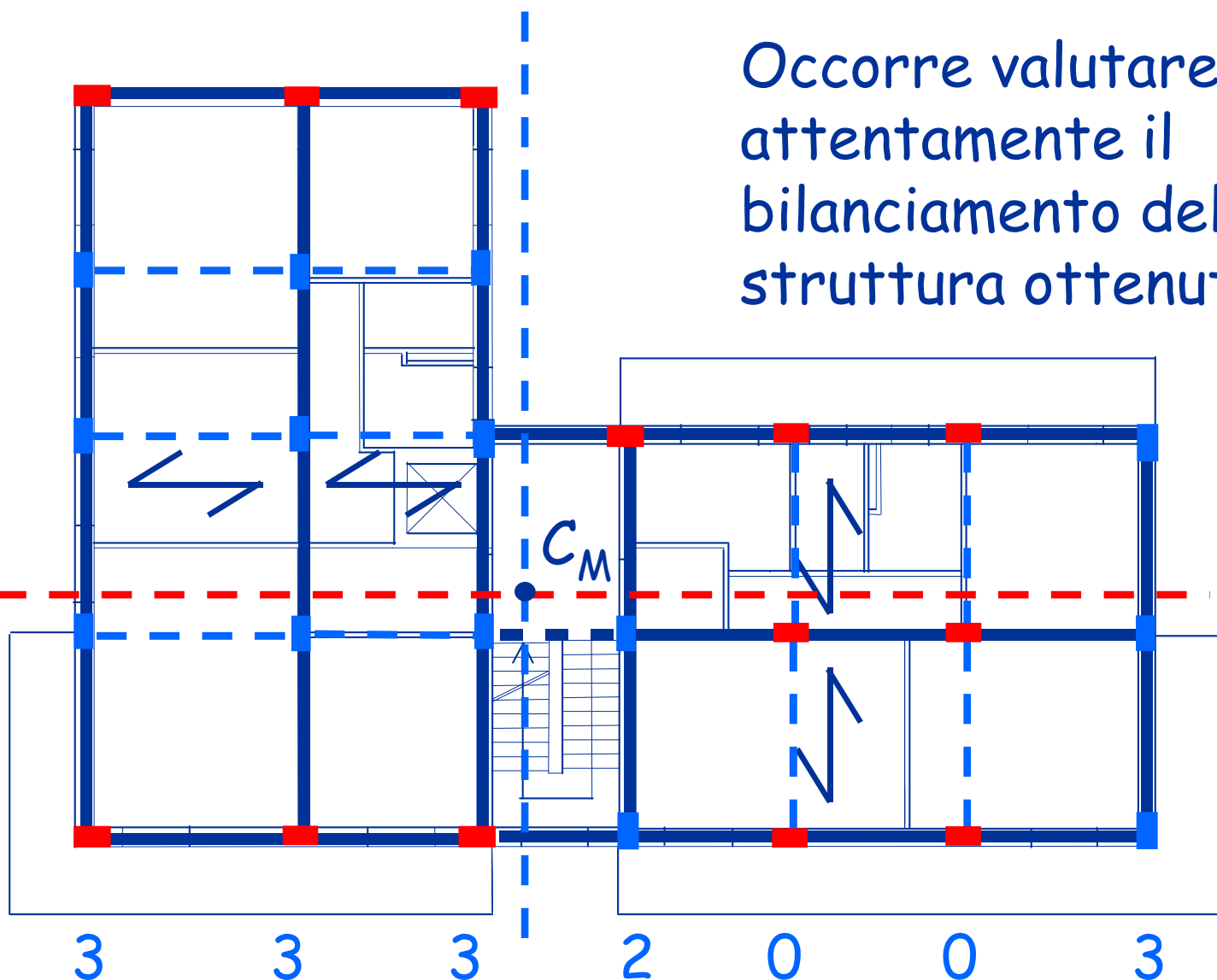
3

0

3

2

5



Occorre valutare attentamente il bilanciamento della struttura ottenuta

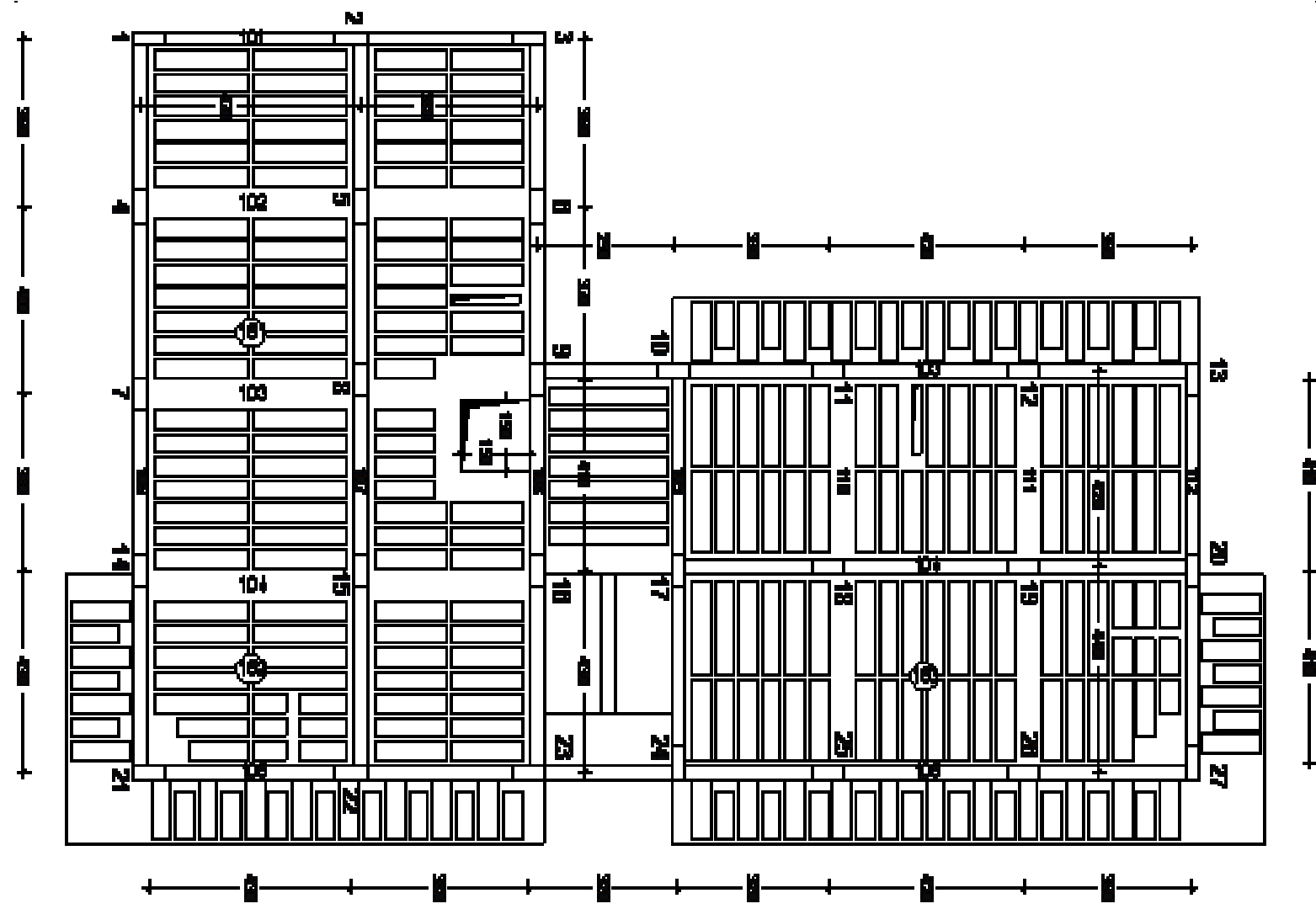
Il lato destro è meno rigido?



È bene irrigidirlo (o indebolire l'altro lato)

tot. 14

# 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

Negli edifici con travi a spessore l'orientamento dei pilastri rettangolari influisce meno sulla rigidezza

