

Corso di aggiornamento  
Progettazione strutturale e  
Norme Tecniche per le Costruzioni 2008

**Validazione del progetto strutturale  
secondo le indicazioni del capitolo 10 delle NTC08**

3 - Esame del modello strutturale e del tipo di analisi

Aula magna dell'ITCG G. Spagna, Spoleto  
1 febbraio 2012

Aurelio Ghersi

Definizione dello schema geometrico  
(modellazione della struttura)

# Modellazione della struttura

“Il modello della struttura deve essere tridimensionale e rappresentare in modo adeguato le effettive distribuzioni spaziali di massa, rigidezza e resistenza”.

Vecchie indicazioni

## Modellazione della struttura

"In generale il modello della struttura sarà costituito da elementi resistenti piani a telaio o a parete, connessi da diaframmi orizzontali.

Se i diaframmi orizzontali sono in grado di raccogliere le forze d'inerzia e trasmetterle ai sistemi resistenti verticali (telai, pareti e nuclei) comportandosi il più possibile come corpi rigidi nel proprio piano, i gradi di libertà dell'edificio possono essere ridotti a tre per piano"

Modello di telaio spaziale con impalcati indeformabili,  
o di insieme spaziale di telai piani

# Evoluzione del modello di telaio

Evoluzione legata allo sviluppo dei mezzi di calcolo:

- Singoli telai piani, con ripartizione delle forze orizzontali in base alla rigidezza dei telai
- Insieme spaziale di telai piani, collegati da impalcati planimetricamente indeformabili
- Telaio spaziale, con impalcati planimetricamente indeformabili (o con impalcati deformabili)

# Il modello di telaio

## Problemi:

- La presenza di aste con sezioni di dimensioni non trascurabili e diverse tra loro può inficiare il modello di telaio (piano o spaziale), che richiede che gli assi delle aste convergano in un punto (nodo)  
Aggiunta di tratti rigidi o offset, che complicano il modello
- La mancanza di aste verticali può inficiare il modello di insieme spaziale di telai piani, che trascura la congruenza verticale dei telai ortogonali nei punti di contatto
- La non ortogonalità di travi può inficiare il modello di insieme spaziale di telai piani, che trascura la interazione flessione-torsionale tra i telai ortogonali

# L'impalcato planimetricamente indeformabile

"Gli orizzontamenti possono essere considerati infinitamente rigidi nel loro piano, a condizione che siano realizzati in cemento armato, oppure in latero-cemento con soletta in c.a. di almeno 40 mm di spessore"

È comunque necessario verificare  
la rigidezza e la resistenza dell'impalcato

# L'impalcato

Impalcato =

insieme di solai e travi posti ad una stessa quota  
(in particolare, soggetti ad azioni orizzontali);  
la parte resistente di questo elemento è,  
soprattutto, la soletta del solaio.

Impalcato rigido:

modellato come vincolo mutuo tra i nodi del telaio

Impalcato deformabile:

modellato come insieme di lastre (o più grossolanamente come  
diagonali), collegate ai nodi del telaio spaziale



# Irregolarità strutturali per l'impalcato

Forma poco compatta, presenza di grosse rientranze, grossi fori o parti mancanti nell'impalcato:

riduce localmente la resistenza e rende possibili grosse deformazioni localizzate

Presenza di un numero molto basso di elementi resistenti verticali (singole pareti o nuclei irrigidenti):

nascono sollecitazioni e deformazioni rilevanti per riportare l'azione sismica a tali elementi

Variazione della rigidezza degli elementi resistenti verticali (soprattutto se pareti) tra un piano e l'altro :

nel trasferire azioni rilevanti da un punto all'altro l'impalcato può essere molto sollecitato e deformarsi molto

# Modellazione della struttura modulo elastico e rigidezza

“Per rappresentare la rigidezza degli elementi strutturali ... si deve tener conto della fessurazione dei materiali fragili.

In caso non siano effettuate analisi specifiche, la rigidezza flessionale e a taglio di elementi in cemento armato può essere ridotta sino al 50% della rigidezza dei corrispondenti elementi non fessurati, tenendo debitamente conto dell'influenza della sollecitazione assiale permanente.”

Differenza tra travi e pilastri

# Modellazione della struttura modulo elastico e rigidezza

## Riflessioni:

- Ridurre la rigidezza per tener conto delle condizioni fessurate, se fatto in misura uguale per tutti gli elementi, fa aumentare il periodo proprio (quindi spesso riduce le forze e proporzionalmente le sollecitazioni)
- Ridurre la rigidezza in maniera differenziata tra travi (di più) e pilastri (di meno) può aumentare le sollecitazioni nei pilastri

meglio lasciar perdere,  
finché non si hanno  
indicazioni più affidabili

# Modellazione della struttura

“Il modello della struttura deve essere tridimensionale e rappresentare in modo adeguato le effettive distribuzioni spaziali di massa, rigidezza e resistenza”.

Considerare, laddove necessario: contributo degli elementi non strutturali, interazione terreno-struttura.

Trascurare gli elementi non strutturali?

Oppure, se li si considera, come schematizzarli?

Usare un modello complessivo per struttura, fondazione e terreno, oppure modelli separati?

# Elementi non strutturali

(tramezzi, tamponature)

Effetto locale su travi e pilastri:

- variazione dello sforzo normale nei pilastri (dovuto alla componente verticale della forza nel pannello murario)
- variazione di taglio e momento nella zona di estremità dei pilastri (dovuto alla componente orizzontale della forza nella diagonale), perché il pannello murario ha un contatto diffuso con le aste e non trasmette la forza direttamente nel nodo
- variazione di taglio e momento agli estremi delle travi

# Elementi non strutturali

(tramezzi, tamponature)

Effetti globali:

- comportamento dinamico: l'irrigidimento dovuto alla presenza delle tamponature riduce il periodo proprio della struttura; ciò può comportare un incremento dell'azione sismica
- comportamento inelastico: la rottura delle tamponature è fragile; quando essa avviene, l'aliquota di azione sismica da loro portata si scarica istantaneamente sulla struttura

# Elementi non strutturali

(tramezzi, tamponature)

Effetti dovuti alla loro distribuzione:

- una distribuzione irregolare in pianta  
può provocare rotazione degli impalcati e quindi incrementi anche notevoli di sollecitazione sugli elementi più eccentrici  
attenzione in particolare agli edifici con struttura simmetrica o bilanciata (baricentro delle masse coincidente con quello delle rigidezze) e tamponature dissimetriche
- una distribuzione irregolare lungo l'altezza  
può portare a concentrazione di sollecitazione ad un piano ("piano soffice"), con riduzione della duttilità globale

# Elementi non strutturali

(tramezzi, tamponature)

Tenerne conto è importante quando:

- Sono pochi e molto robusti  
(rischio di forti sollecitazioni negli elementi strutturali adiacenti)
- Sono disposti in pianta in maniera molto irregolare  
(rischio di rotazione dell'impalcato e quindi di sollecitazioni negli elementi strutturali agli estremi)
- Sono distribuiti irregolarmente lungo l'altezza  
(rischio di creazione di piano soffice, con riduzione della duttilità globale)

In caso contrario si può analizzare un modello costituito dai soli elementi strutturali



# Elementi non strutturali

(tramezzi, tamponature)

Possibili schematizzazioni delle tamponature:

- insieme di lastre, collegate in più punti alla maglia di telaio
  - vantaggi:  
possibilità di analizzare pareti con aperture
  - svantaggi:  
complessità dello schema;  
difficoltà a tenere conto dell'unilateralità del vincolo

# Elementi non strutturali (tramezzi, tamponature)

Possibili schematizzazioni delle tamponature:

- pendolo, disposto nella diagonale compressa
  - lunghezza del pendolo  $l_d$  = lunghezza diagonale
  - spessore della sua sezione  $s$  = spessore muratura
  - larghezza della sua sezione  $B$  indicata da fonti bibliografiche:

M. Pagano	$B = 0.5 A_p / l_d \Rightarrow$	$B \cong 0.20 \div 0.25 l_d$
-----------	---------------------------------	------------------------------

B. Stafford Smith		$B \cong 0.15 \div 0.30 l_d$
-------------------	--	------------------------------

D.M. 2/7/81		$B = 0.10 l_d$
-------------	--	----------------

$A_p$  = area del pannello murario

# Struttura, fondazione e terreno

Effetto della deformabilità della fondazione:

- cedimenti verticali differenziali
- rotazioni al piede dei pilastri del primo ordine



variazione della rigidezza relativa dei diversi pilastri e quindi diversa distribuzione delle azioni sismiche

attenzione in particolare agli elementi molto rigidi, come le pareti, la cui rigidezza può essere vanificata dalla rotazione al piede

# Struttura, fondazione e terreno

Ulteriore effetto della deformabilità del terreno:

- maggiore deformabilità complessiva



aumento del periodo proprio della struttura;  
ciò comporta in genere una riduzione dell'azione  
sismica, ma un aumento degli spostamenti

# Struttura, fondazione e terreno

È necessario modellare insieme struttura, fondazione e terreno quando:

- La fondazione non è adeguatamente rigida (rischio di cedimenti differenziali, rotazioni al piede, redistribuzione dell'azione sismica)
- Il terreno è molto deformabile (rischio di variazione notevole del periodo proprio)

In caso contrario (fondazione più rigida della struttura in elevazione, terreno non particolarmente deformabile), si può considerare la struttura incastrata al piede ed analizzare poi separatamente l'insieme fondazione-terreno con le azioni trasmesse dalla struttura sovrastante

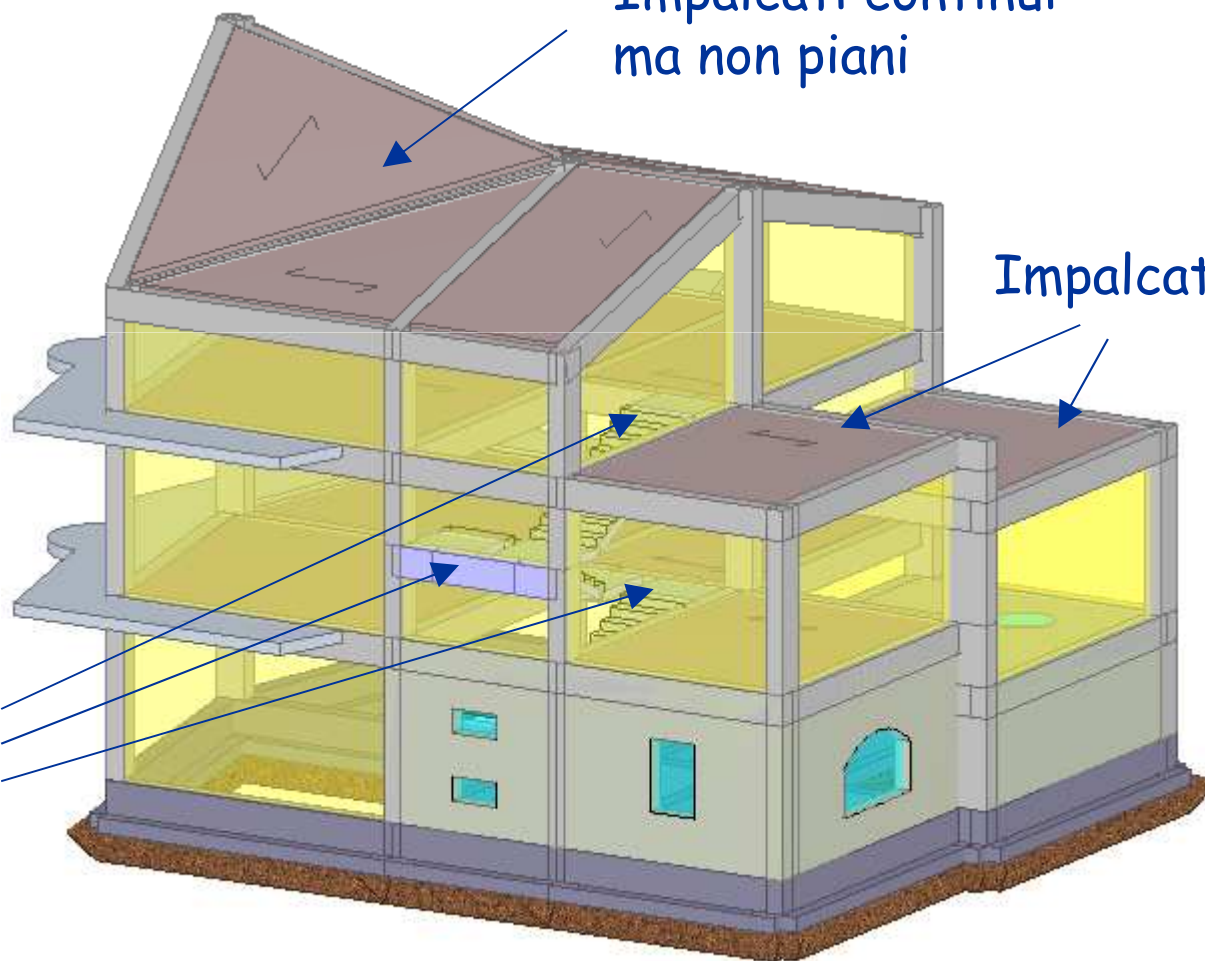
# Modellazione: qualche considerazione

Problemi:

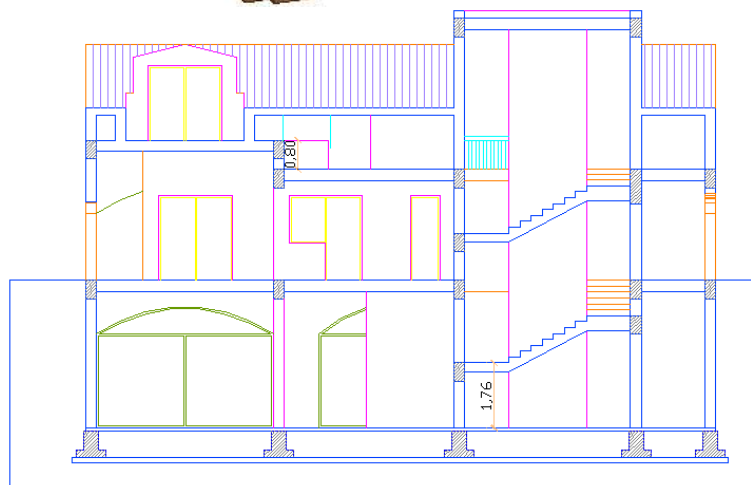
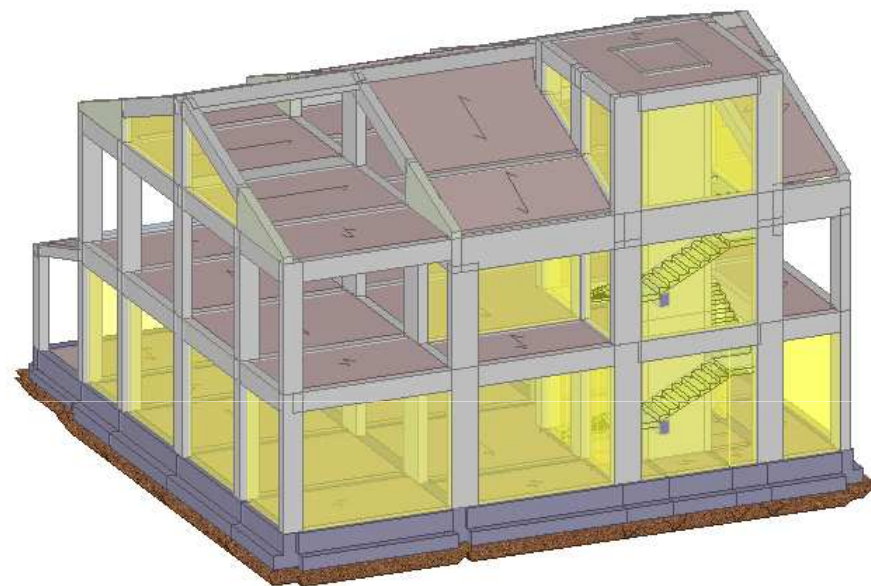
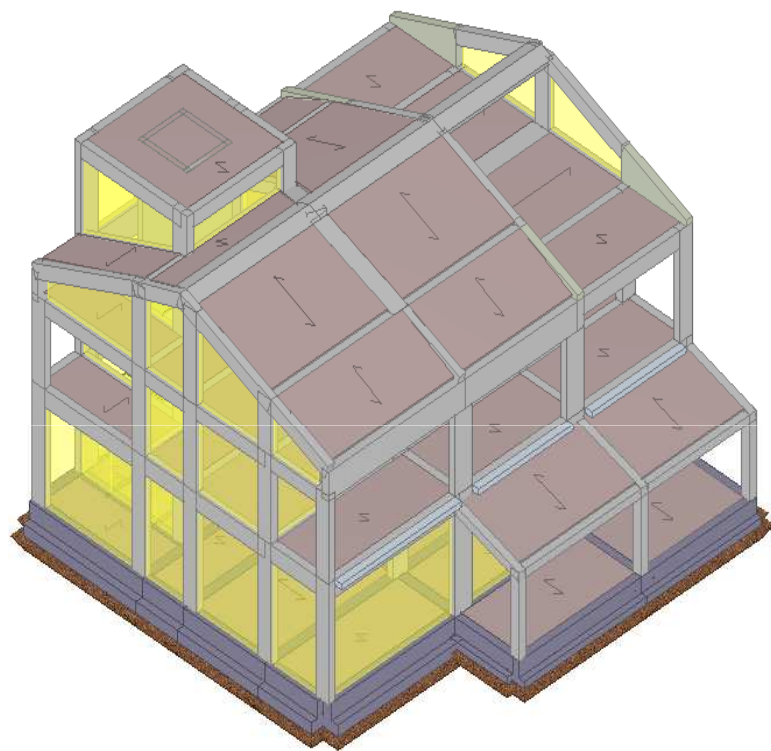
Scale, che  
creano  
collegamenti  
tra impalcati

Impalcati continui  
ma non piani

Impalcati sfalsati



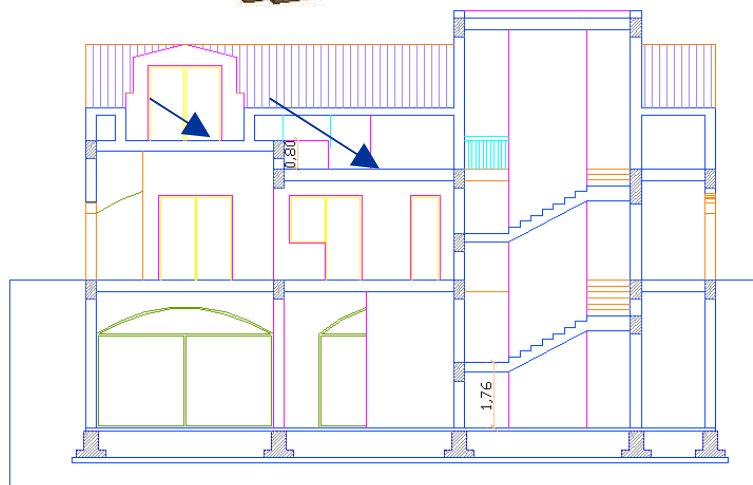
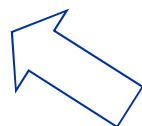
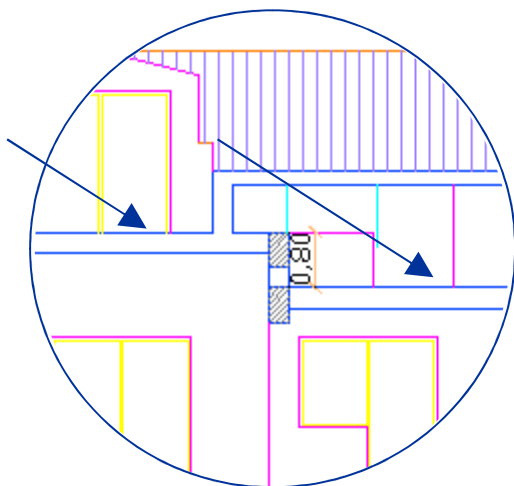
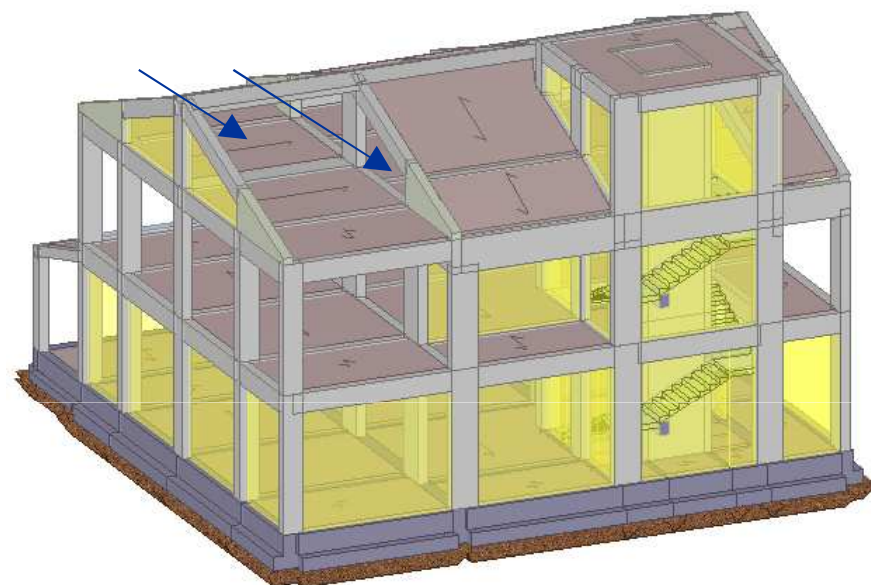
# Modellazione: un esempio reale



Si ringrazia  
l'ing. Alfio Gruppillo

# Modellazione: un esempio reale (1)

Nel sottotetto le due  
parte di impalcato sono  
sfalsate di 80 cm

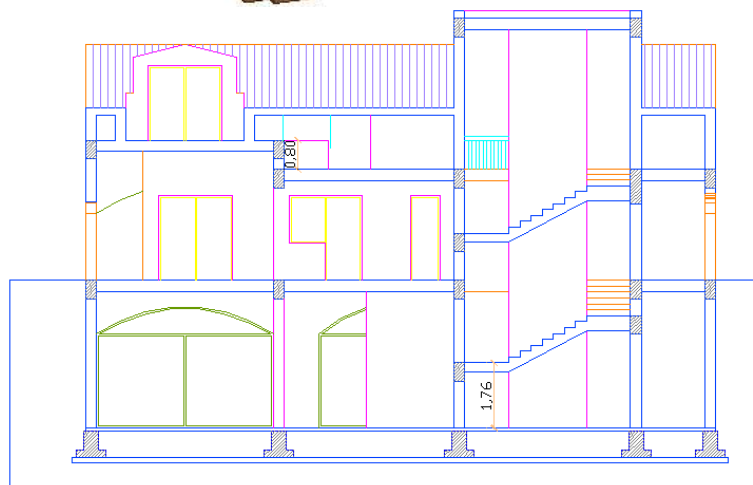
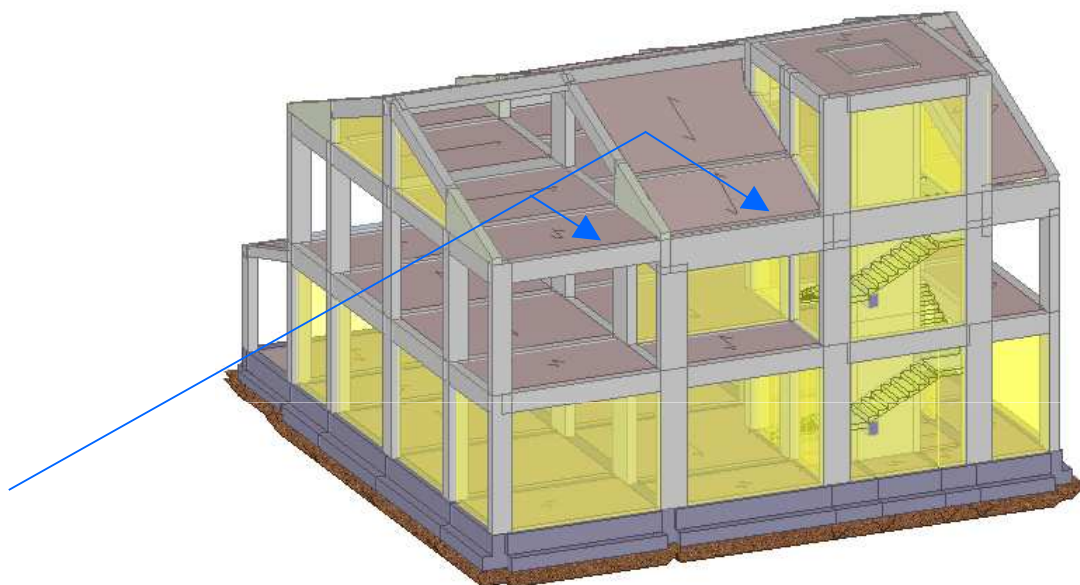




# Modellazione: un esempio reale (1)

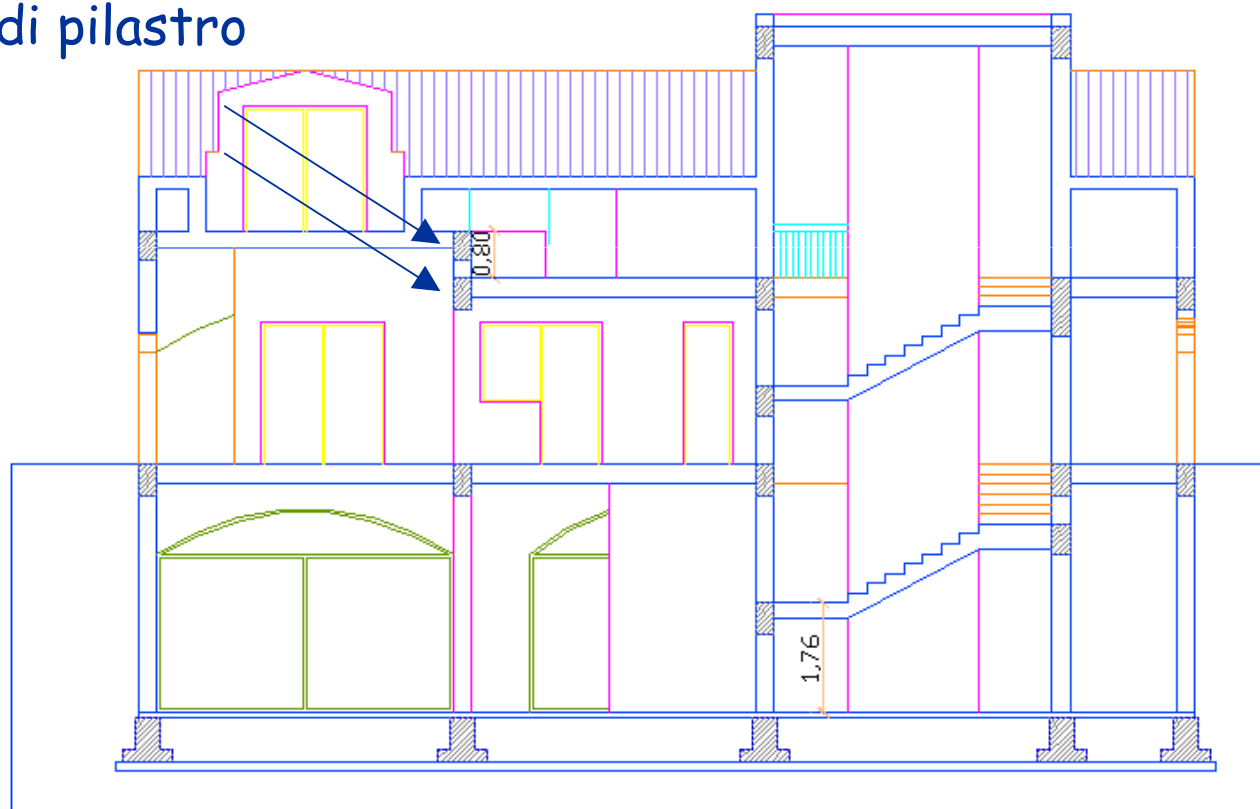
Nel sottotetto le due  
parte di impalcato sono  
sfalsate di 80 cm

... e il tetto inclinato  
converge fino alla quota  
della parte superiore  
dell'impalcato



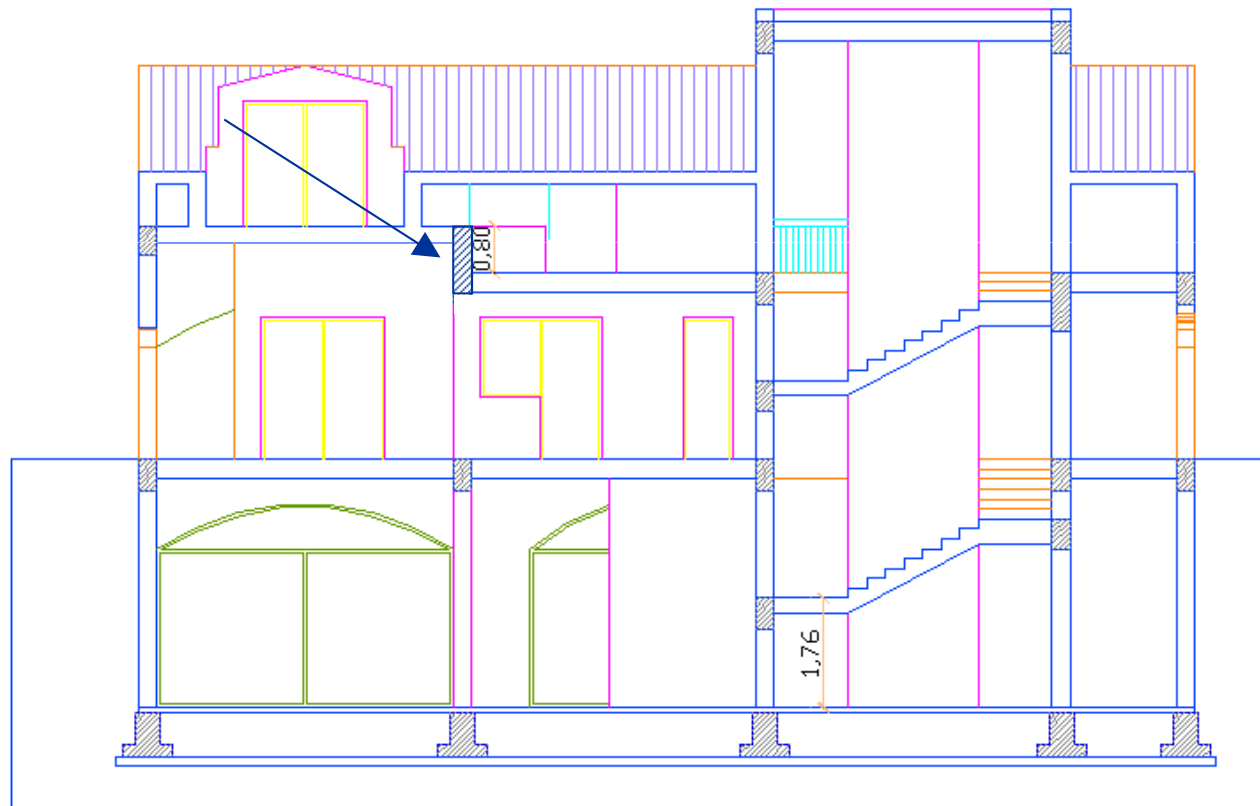
# Modellazione: un esempio reale (1)

Il progetto iniziale prevedeva due travi sfalsate, con un tratto cortissimo di pilastro

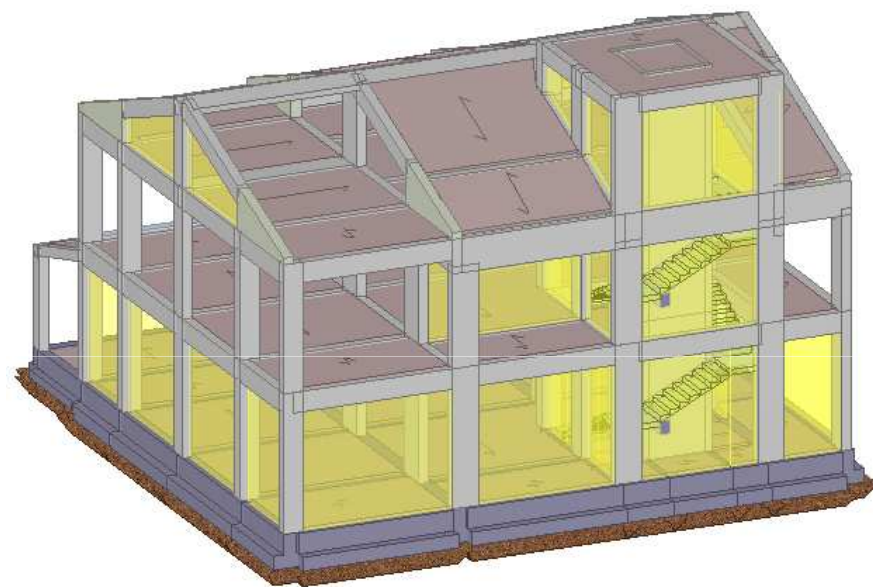
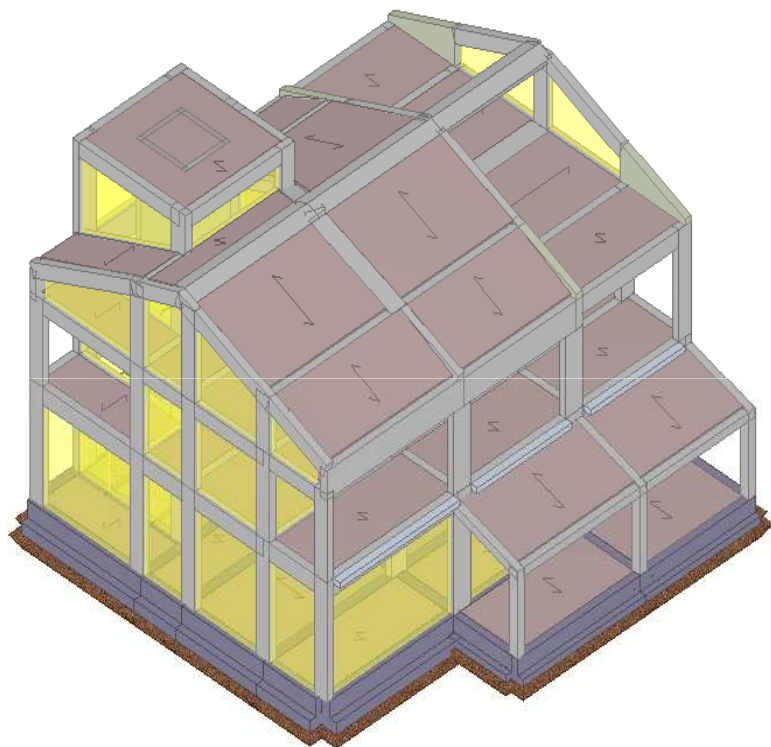


# Modellazione: un esempio reale (1)

Con una trave unica (alta 100 cm) si è potuto ipotizzare un impalcato continuo ...



## Modellazione: un esempio reale (1)



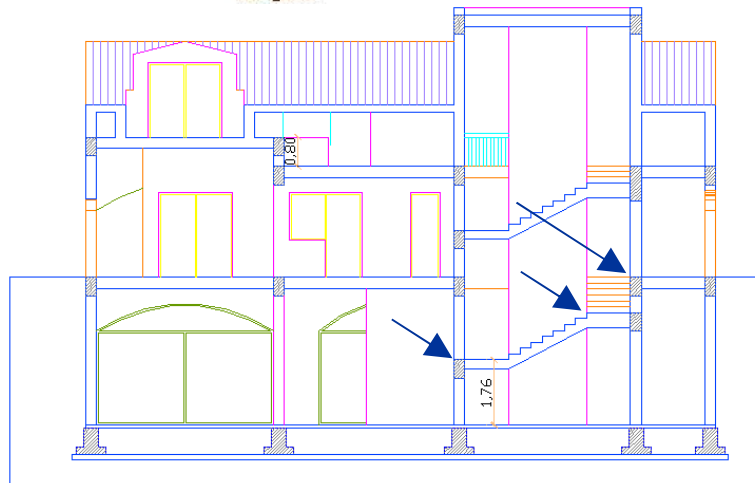
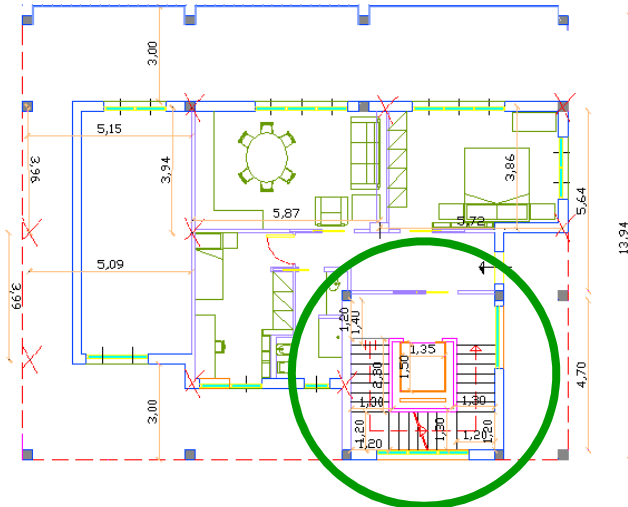
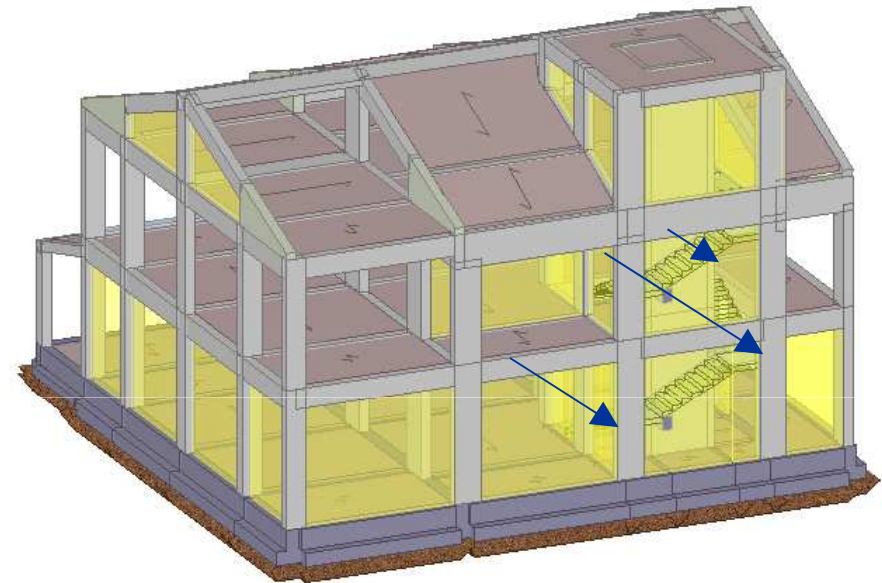
(notare che la trave alta gira su tre lati)

... e anche il tetto inclinato, poggiano su una trave così alta, diventa un tutt'uno con l'impalcato di sottotetto

## Modellazione: un esempio reale (2)

La scala costituisce un elemento di forte irregolarità

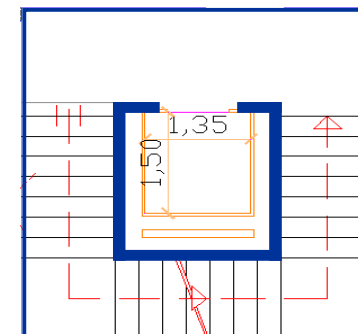
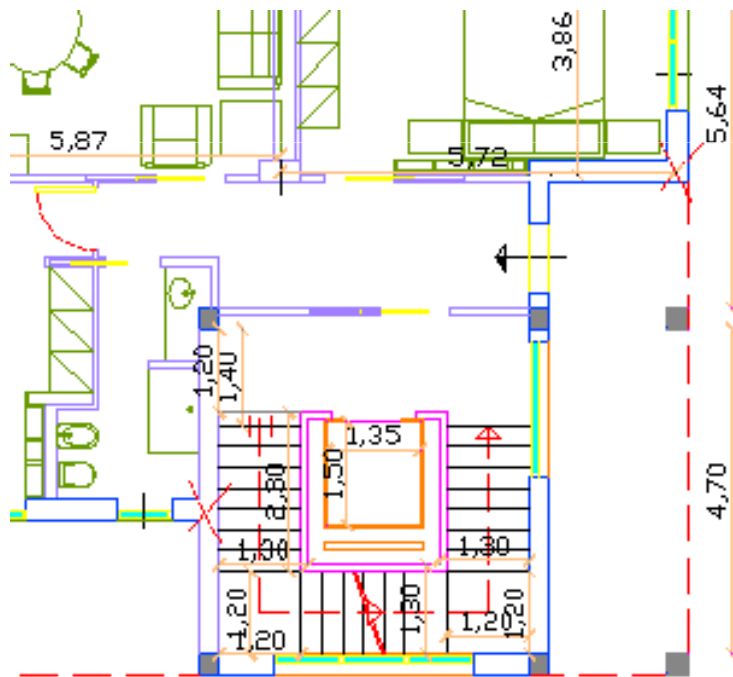
- Crea un collegamento tra quote diverse
- È in una posizione fortemente eccentrica



## Modellazione: un esempio reale (2)

Una possibile soluzione:

- La scala come elemento indipendente, che esce a sbalzo da un nucleo (vano ascensore)
- Collegata in fondazione ma per il resto staccata dall'edificio



Metodi di analisi  
previsti dalla norma

# Comportamento reale di una struttura durante il sisma

- Il sisma è un'azione dinamica (il moto del suolo causa il movimento di tutte le parti della struttura)
- Durante un terremoto violento si supera il limite elastico dei materiali: il comportamento è quindi non lineare
- Una conoscenza "esatta" del comportamento durante il sisma dovrebbe essere cercata con una **analisi dinamica non lineare**:
  - Assegnare un accelerogramma
  - Integrare le equazioni del moto
  - Usare un modello della struttura non lineare



# Analisi dinamica non lineare

Consente di valutare bene la risposta strutturale, ma:

- Può essere usata solo per verifica (richiede una preliminare definizione delle resistenze)
- Va effettuata con specifici accelerogrammi - vedi NTC 08, punto 3.2.3.6 (almeno 3  $\Rightarrow$  ma sono sufficienti?)
- Richiede l'uso di programmi molto sofisticati ed una accurata modellazione del comportamento ciclico delle sezioni  $\Rightarrow$  possibili errori

Quindi: possibile solo a livello di ricerca

# Modi approssimati per valutare la risposta al sisma

Effettuare una **analisi statica non lineare**

- Stimare gli spostamenti che la struttura avrà durante il terremoto  
(ipotesi di uguaglianza - o relazione nota - tra spostamenti dinamici in campo elastico e in campo non lineare)
- Esaminare il comportamento non lineare della struttura soggetta a forze statiche crescenti  
(analisi pushover)
- Giudicare la struttura in base a quello che le accade per gli spostamenti da sisma stimati

**Displacement based design**  
**Progettazione basata sugli spostamenti**

# Analisi statica non lineare

In quali casi può essere utile?

Progetto di nuove costruzioni:

- Solo in casi particolari, se si vuole dimostrare che il superamento della resistenza in qualche sezione non porta comunque al collasso

Valutazione della vulnerabilità di costruzioni esistenti:

- Se la struttura non ha collasso fragile, l'analisi statica non lineare può essere indispensabile per tener conto correttamente della duttilità

# Modi approssimati per valutare la risposta al sisma

Approccio tradizionale: *analisi lineare*

- Si assume che il comportamento dinamico non lineare della struttura sarà accettabile se essa è in grado di sopportare forze nettamente più piccole di quelle che subirebbe se rimanesse in campo elastico
- Le forze sono valutate mediante un coefficiente riduttivo  $q$  (fattore di struttura)
- Si giudicare la struttura in base alla resistenza delle sezioni alle sollecitazioni prodotte dalle forze così determinate

*Force based design*

Progettazione basata sulle forze

# Analisi lineare

Le caratteristiche di sollecitazione possono essere determinate mediante analisi modale (con spettro di risposta) o analisi statica

- Oggi si usa sempre l'analisi modale con spettro di risposta
- In un gran numero di casi i risultati dell'analisi modale sono quasi gli stessi di quelli dell'analisi statica

# Analisi modale con spettro di risposta

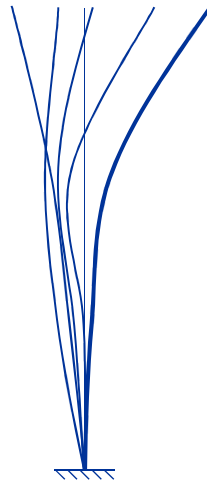
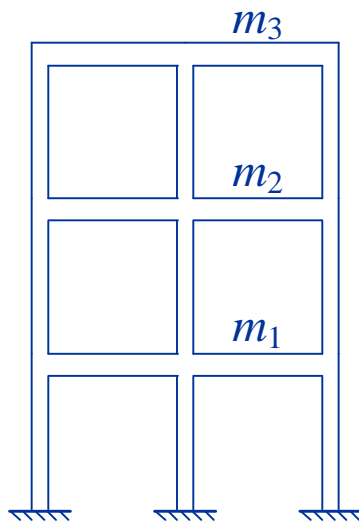
Ricordare che:

- “modale” indica il riferimento ai “modi di oscillazione libera della struttura”

# Analisi modale

## Modi di oscillazione libera della struttura

- Se si assegna una deformata iniziale qualsiasi e si lascia la struttura libera di oscillare ...

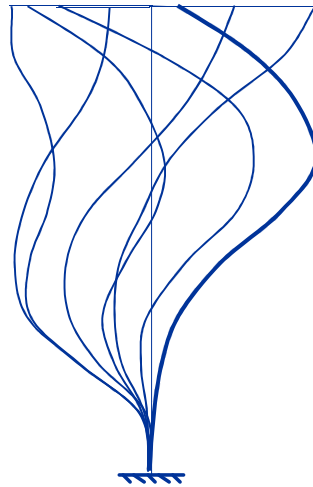
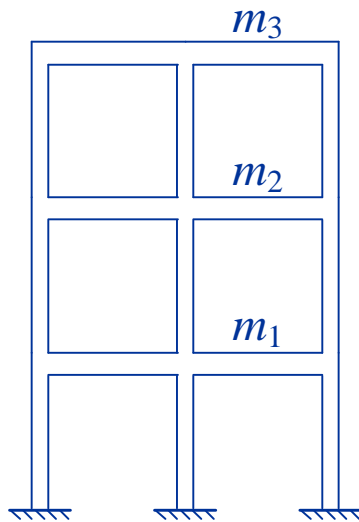


... la struttura si muove in maniera disordinata

# Analisi modale

## Modi di oscillazione libera della struttura

- Se si assegna una deformata iniziale qualsiasi e si lascia la struttura libera di oscillare ...



... la struttura si muove in maniera disordinata

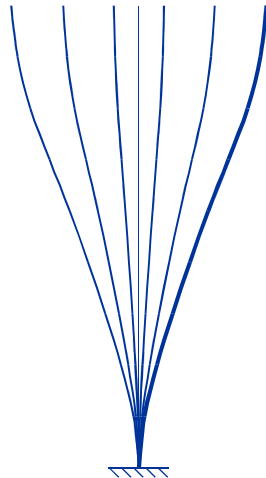
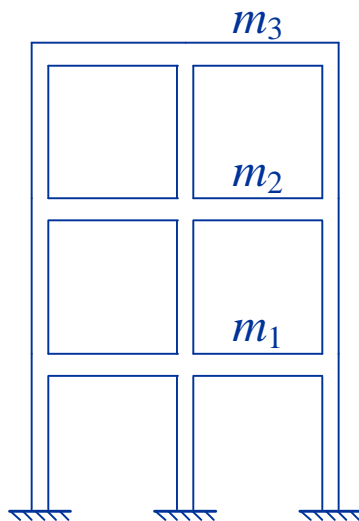
altro esempio



# Analisi modale

Questo è un "modo di oscillazione libera"

- Se si assegna una particolare deformata iniziale e si lascia la struttura libera di oscillare ...



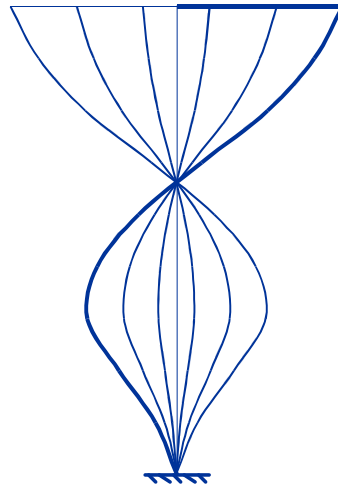
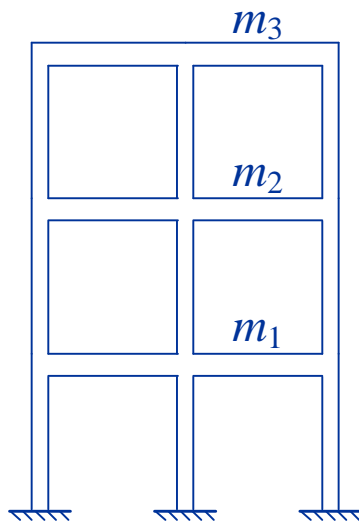
... la struttura si muove mantenendo la forma della deformata ed oscilla con un periodo ben preciso

$T$  = periodo di oscillazione libera

# Analisi modale

Questo è un "modo di oscillazione libera"

- Se si assegna una particolare deformata iniziale e si lascia la struttura libera di oscillare ...



altro esempio

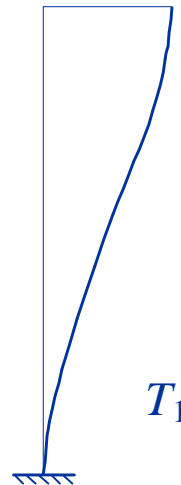
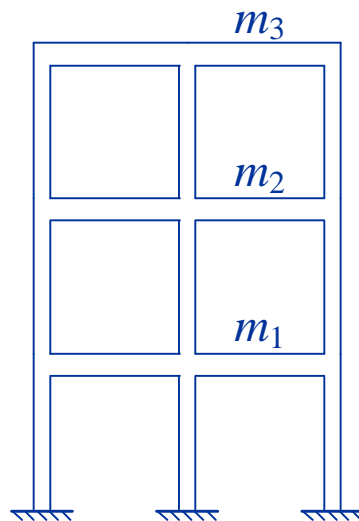
... la struttura si muove mantenendo la forma della deformata ed oscilla con un periodo ben preciso

$T$  = periodo di oscillazione libera

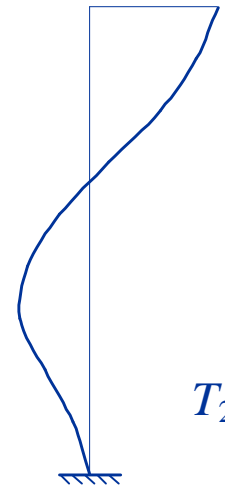
# Modi di oscillazione libera

Telaio piano (con traversi inestensibili):

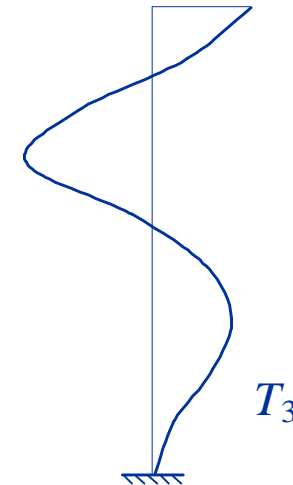
numero di modi di oscillazione libera = numero di piani



Primo modo



Secondo modo



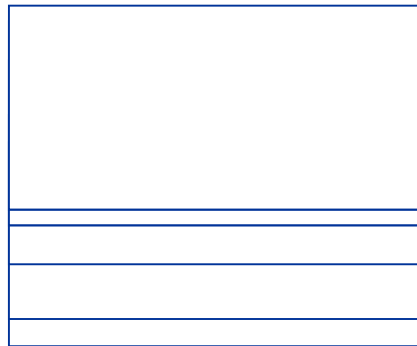
Terzo modo

# Modi di oscillazione libera

Telaio spaziale (con impalcati indeformabili nel piano):

numero di modi di oscillazione libera =  $3 \times$  numero di piani

Se la pianta ha due assi di simmetria, i modi di oscillazione libera sono disaccoppiati:  
- n modi di traslazione in una direzione



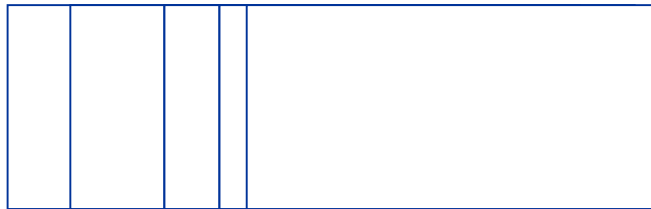
# Modi di oscillazione libera

Telaio spaziale (con impalcati indeformabili nel piano):

numero di modi di oscillazione libera =  $3 \times$  numero di piani

Se la pianta ha due assi di simmetria, i modi di oscillazione libera sono disaccoppiati:

- n modi di traslazione in una direzione
- n modi di traslazione nell'altra direzione



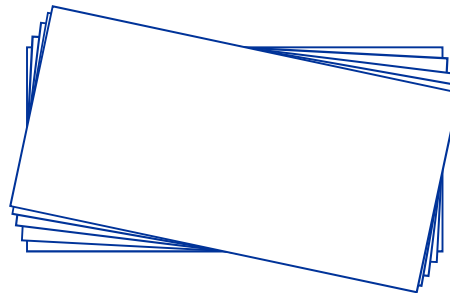
# Modi di oscillazione libera

Telaio spaziale (con impalcati indeformabili nel piano):

numero di modi di oscillazione libera =  $3 \times$  numero di piani

Se la pianta ha due assi di simmetria, i modi di oscillazione libera sono disaccoppiati:

- n modi di traslazione in una direzione
- n modi di traslazione nell'altra direzione
- n modi di rotazione

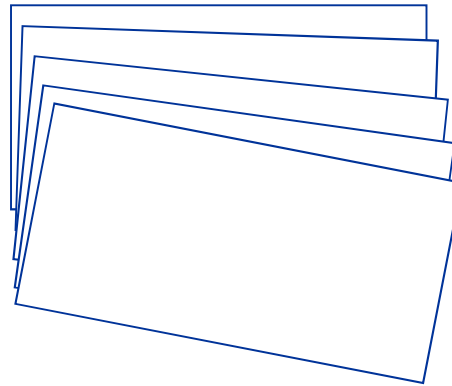


# Modi di oscillazione libera

Telaio spaziale (con impalcati indeformabili nel piano):

numero di modi di oscillazione libera =  $3 \times$  numero di piani

Se la pianta non ha assi di simmetria, i modi di oscillazione libera sono accoppiati



# Analisi modale con spettro di risposta

Ricordare che:

- “modale” indica il riferimento ai “modi di oscillazione libera della struttura”
  - la struttura che oscilla secondo uno dei suoi “modi” si comporta come un oscillatore semplice
  - è possibile ricavare di conseguenza un insieme di forze e calcolare le sollecitazioni prodotte
  - il moto complessivo è combinazione dei moti secondo ciascun modo, ognuno dei quali ha una importanza differente in funzione della massa partecipante
- La somma delle masse partecipanti di tutti i modi è pari alla massa totale della struttura (per questo motivo si parla in genere di masse partecipanti come percentuale della massa totale)



# Analisi modale con spettro di risposta

Consiste nel valutare separatamente la risposta della struttura vincolata a deformarsi secondo ciascuno dei suoi modi di oscillazione . . .

. . . e poi combinare le massime sollecitazioni (o spostamenti) trovati per i singoli modi con criteri statistici

- SRSS = radice quadrata della somma dei quadrati
- CQC = combinazione quadratica completa

- Attenzione: nel fare la combinazione si perde il segno (che può essere utile);  
ma se c'è un modo prevalente si può assegnare a ciascun valore il segno che esso ha nel modo prevalente

# Analisi modale con spettro di risposta

## Contributo dei singoli modi

Negli schemi piani, il primo modo è nettamente predominante per entità di massa partecipante. Le forze sono tutte dello stesso verso

Gli altri modi hanno masse partecipanti via via minori. Essi danno forze discordi, che producono un effetto minore rispetto alla base

In generale, è opportuno considerare tanti modi da:

- raggiungere una massa partecipante dell'85%
- non trascurare modi con massa partecipante superiore al 5%

# Analisi modale con spettro di risposta

## Contributo dei singoli modi

Negli schemi spaziali è più difficile valutare l'importanza dei modi:

- se il comportamento è disaccoppiato, sono eccitati solo quei modi che danno spostamento nella direzione di azione del sisma
- in caso contrario tutti i modi possono dare contributo
- se non vi è un impalcato indeformabile nel suo piano il numero di modi cresce enormemente ed è più difficile cogliere la risposta totale della struttura

# Analisi modale con spettro di risposta

## Contributo dei singoli modi

Negli schemi spaziali è più probabile avere modi con periodi molto vicini tra loro:

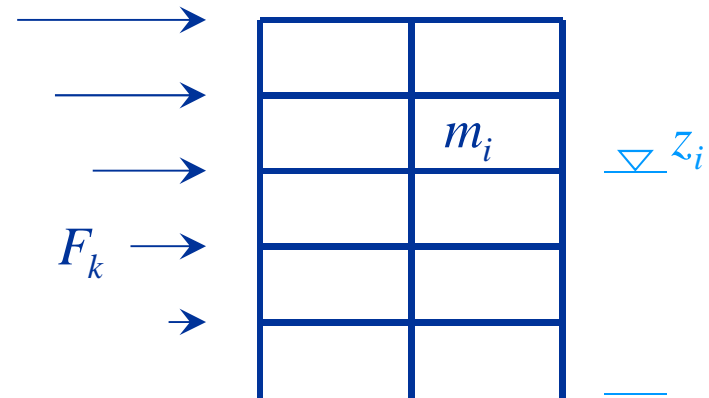
- in questo caso è opportuno usare la sovrapposizione quadratica completa (CQC)

Una buona impostazione progettuale deve mirare ad avere una struttura con impalcato rigido e con comportamento disaccoppiato (cioè minime rotazioni planimetriche)

# Analisi statica

Consiste nel considerare un unico insieme di forze, che rappresentano (in modo semplificato) l'effetto del primo modo

$$F_k = m_k z_k \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{\sum_{i=1}^n m_i z_i} S_e(T_1)$$



Il periodo proprio può essere valutato con formule semplificate

$$T_1 = C_1 H^{3/4}$$

Le forze possono essere ridotte con  $\lambda=0.85$  se l'edificio ha almeno 3 piani e periodo non troppo alto

# Analisi statica e modale

- In entrambi i casi le forze sono ridotte mediante il **fattore di struttura**  $q$ , che tiene conto della duttilità delle sezioni ma anche del comportamento globale della struttura

# Fattore di struttura

Dipende da:

- Classe di duttilità dell'edificio
- Duttilità generale della tipologia strutturale
- Rapporto tra resistenza ultima e di prima plasticizzazione
- Regolarità dell'edificio

$$q = q_0 K_R$$


# Classe di duttilità (comportamento globale e duttilità locale)

## Classe di duttilità alta: CD"A"

Richiede maggiori accorgimenti e maggiori coefficienti di sicurezza nel calcolo ed impone dettagli costruttivi più severi

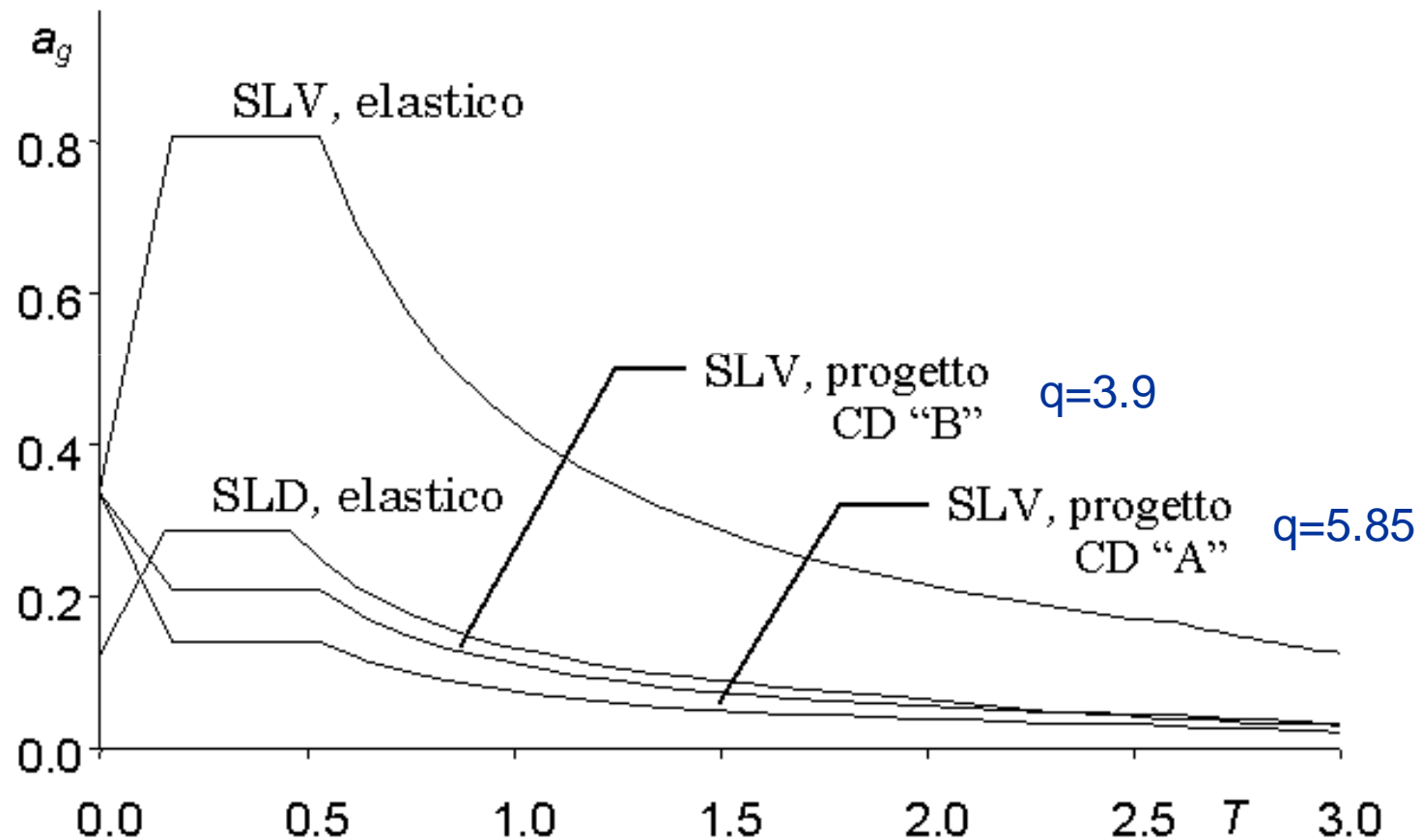
## Classe di duttilità bassa: CD"B"

Forze di calcolo maggiori

Il progettista deve scegliere, a priori, quale classe di duttilità adottare



# Confronto tra spettri



Valori riferiti a Messina, Piazza Cairolì, suolo C