Workshop

Progetto di edifici antisismici con struttura in c.a.

Catania

aula IT del DAU

10-20 settembre 2013

16 – Modellazione della struttura

Codici di calcolo
e modellazione strutturale

Capitolo 10.2 – Uso di codici di calcolo

10.2 ANALISI E VERIFICHE SVOLTE CON L'AUSILIO DI CODICI DI CALCOLO

Qualora l'analisi strutturale e le relative verifiche siano condotte con l'ausilio di codici di calcolo automatico, il progettista dovrà controllare l'affidabilità dei codici utilizzati e verificare l'attendibilità dei risultati ottenuti, curando nel contempo che la presentazione dei risultati stessi sia tale da garantirne la leggibilità, la corretta interpretazione e la riproducibilità. In particolare nella Relazione di calcolo si devono fornire le seguenti indicazioni:

- *Tipo di analisi svolta*
- *Origine e Caratteristiche dei Codici di Calcolo*
- *Affidabilità dei codici utilizzati*
- *Validazione dei codici.*
- *Modalità di presentazione dei risultati.*
- *Informazioni generali sull'elaborazione.*
- *Giudizio motivato di accettabilità dei risultati.*

Problematiche:

√ Metodi di analisi

- Codici di calcolo e modellazione strutturale
- Schemi di calcolo e loro combinazione
- Giudizio motivato di accettazione dei risultati

Capitolo 10.2 – Uso di codici di calcolo

Notare:

Deve essere ben precisato quale programma si utilizza e che caratteristiche ha

10.2 A
C

Qualor
automa
l'atten
tale da garantirne la leggibilità, la corretta interpretazione e la riproducibilità. In particolare nella Relazione di calcolo si devono fornire le seguenti indicazioni:

- *Origine e Caratteristiche dei Codici di Calcolo*

  Occorre indicare con precisione l'origine e le caratteristiche dei codici di calcolo utilizzati riportando titolo, autore, produttore, eventuale distributore, versione, estremi della licenza d'uso o di altra forma di autorizzazione all'uso.

- *Affidabilità dei codici utilizzati*

  Il progettista dovrà esaminare preliminarmente la documentazione a corredo del software per valutarne l'affidabilità e soprattutto l'idoneità al caso specifico. La documentazione, che sarà fornita dal produttore o dal distributore del software, dovrà contenere una esauriente descrizione delle basi teoriche e degli algoritmi impiegati, l'individuazione dei campi d'impiego, nonché casi prova interamente risolti e commentati, per i quali dovranno essere forniti i file di input necessari a riprodurre l'elaborazione.

Capitolo 10.2 – Uso di codici di calcolo

Notare:

Deve essere ben precisato quale programma si utilizza e che caratteristiche ha

Il progettista deve capire bene come opera il programma, per essere sicuro che è idoneo al caso specifico che affronta

10.2 A
C

Qualor
automa
l'atten
tale da
Relazi

- *Ori*

  Oc
  riportando titolo, autore, produttore, eventuale distributore, versione, estremi della licenza d'uso o di altra forma di autorizzazione all'uso.

- *Affidabilità dei codici utilizzati*

  Il progettista dovrà esaminare preliminarmente la documentazione a corredo del software per valutarne l'affidabilità e soprattutto l'idoneità al caso specifico. La documentazione, che sarà fornita dal produttore o dal distributore del software, dovrà contenere una esauriente descrizione delle basi teoriche e degli algoritmi impiegati, l'individuazione dei campi d'impiego, nonché casi prova interamente risolti e commentati, per i quali dovranno essere forniti i file di input necessari a riprodurre l'elaborazione.

Capitolo 10.2 – Uso di codici di calcolo

Notare:

Deve essere ben precisato quale programma si utilizza e che caratteristiche ha

Il progettista deve capire bene come opera il programma, per essere sicuro che è idoneo al caso specifico che affronta

Spetta al produttore del software (non al progettista) garantire che il programma fa bene quello che deve fare

10.2 A
C

Qualor
automa
l'attenc
tale da
Relazic

- *Ori*

  Oc
  rip
  d'u

- *Affi*

  Il progettista dovrà esaminare preliminarmente la documentazione a corredo del software per valutarne l'affidabilità e soprattutto l'idoneità al caso specifico. La documentazione, che sarà fornita dal produttore o dal distributore del software, dovrà contenere una esauriente descrizione delle basi teoriche e degli algoritmi impiegati, l'individuazione dei campi d'impiego, nonché casi prova interamente risolti e commentati, per i quali dovranno essere forniti i file di input necessari a riprodurre l'elaborazione.

Capitolo 10.2 – Uso di codici di calcolo

10.2 A
C

Qualor
automa
l'attend
tale da
Relazio

Notare una omissione:

Si parla di "codice di calcolo" come se un programma potesse fare una sola cosa

In realtà qualunque programma consente molteplici scelte

- *Origine e Caratteristiche dei Codici di Calcolo*

  Occorre indicare con precisione l'origine e le caratteristiche dei codici di calcolo utilizzati
  rip
  d'u

Il progettista deve precisare come ha modellato la struttura e perché, quali scelte ha operato, ecc.

- *Affi*

  Il
  per valutarne l'affidabilità e soprattutto l'idoneità al caso specifico. La documentazione, che sarà fornita dal produttore o dal distributore del software, dovrà contenere una esauriente descrizione delle basi teoriche e degli algoritmi impiegati, l'individuazione dei campi d'impiego, nonché casi prova interamente risolti e commentati, per i quali dovranno essere forniti i file di input necessari a riprodurre l'elaborazione.

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

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

(modello di insieme spaziale di telai piani con impalcati indeformabili)

D.M. 14/9/05, punto 5.7.4.2

NTC 08, punto 7.2.6

Evoluzione del modello di telaio

Evoluzione legata allo sviluppo dei mezzi di calcolo:

- Calcolo di un unico telaio, quello "più sollecitato"
- 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)

Evoluzione del modello di telaio

Telaio spaziale e insieme spaziale di telai piani

Modello di insieme spaziale di telai piani

- Limiti:
  - La mancanza di aste verticali può inficiare il modello, che trascura la congruenza verticale dei telai ortogonali nei punti di contatto
  - La non ortogonalità di travi può inficiare il modello, che trascura la interazione flesso-torsionale tra i telai ortogonali
- Vantaggi:
  - Maggiore flessibilità nella descrizione della struttura

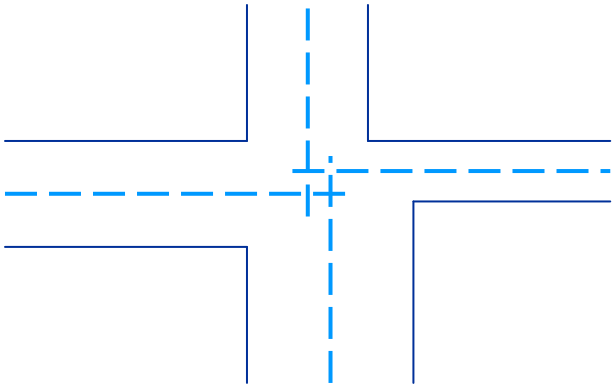
Modello di telaio spaziale

- Più preciso e sempre valido
- Maggiori problemi a causa della non convergenza degli assi

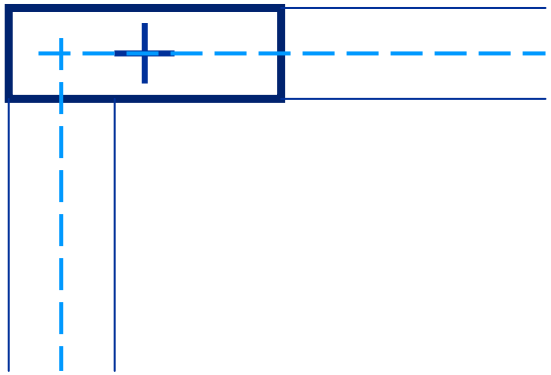
Il modello di telaio

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)



Nel piano verticale



In pianta

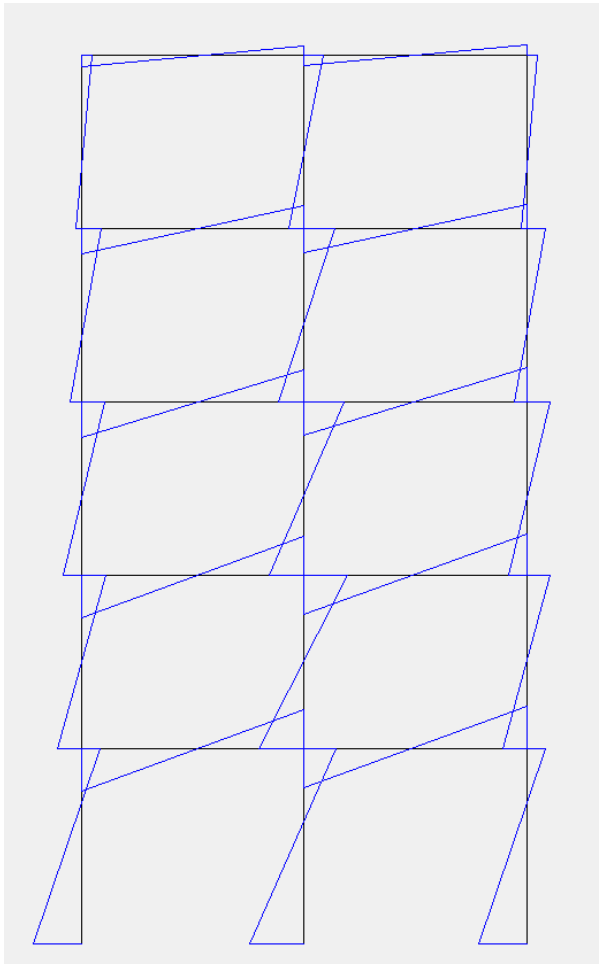
Il modello di telaio

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)

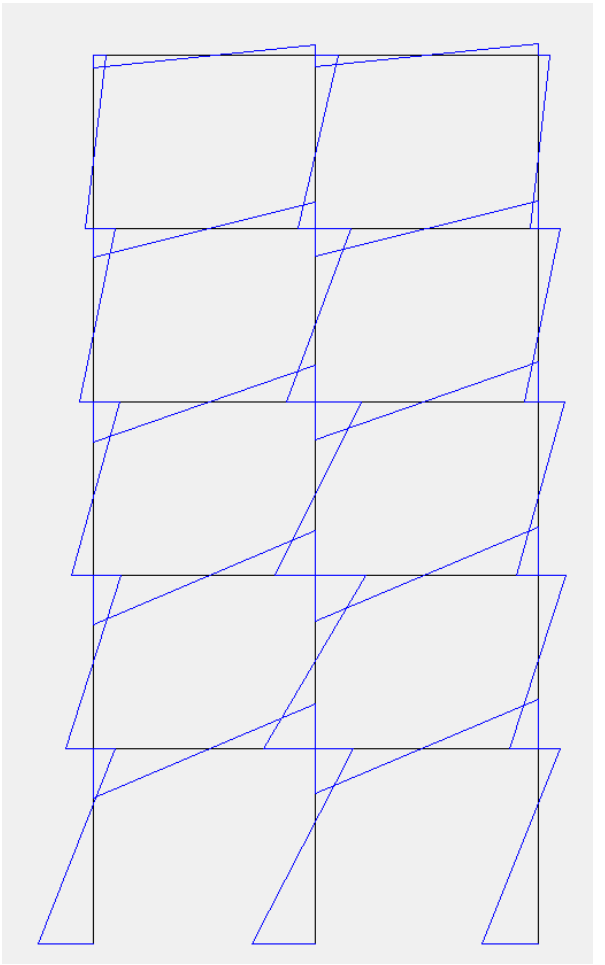
  Aggiunta di tratti rigidi o offset, che complicano il modello e modificano (sensibilmente) la rigidezza complessiva e quindi il periodo proprio della struttura

Senza tratti rigidi



analisi statica

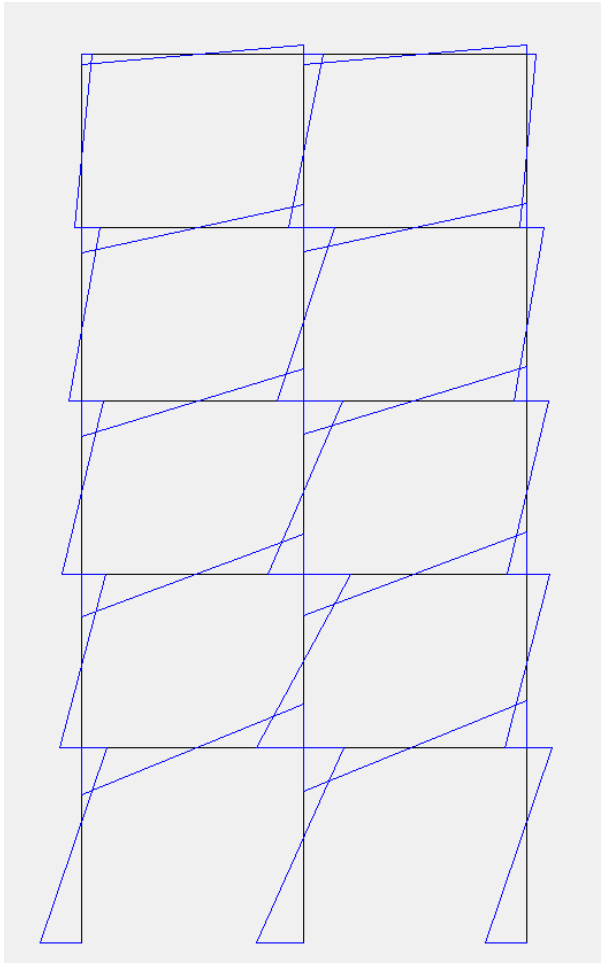
T = 0.533 s



analisi modale

vedi file
Tel_7y

Con tratti rigidi

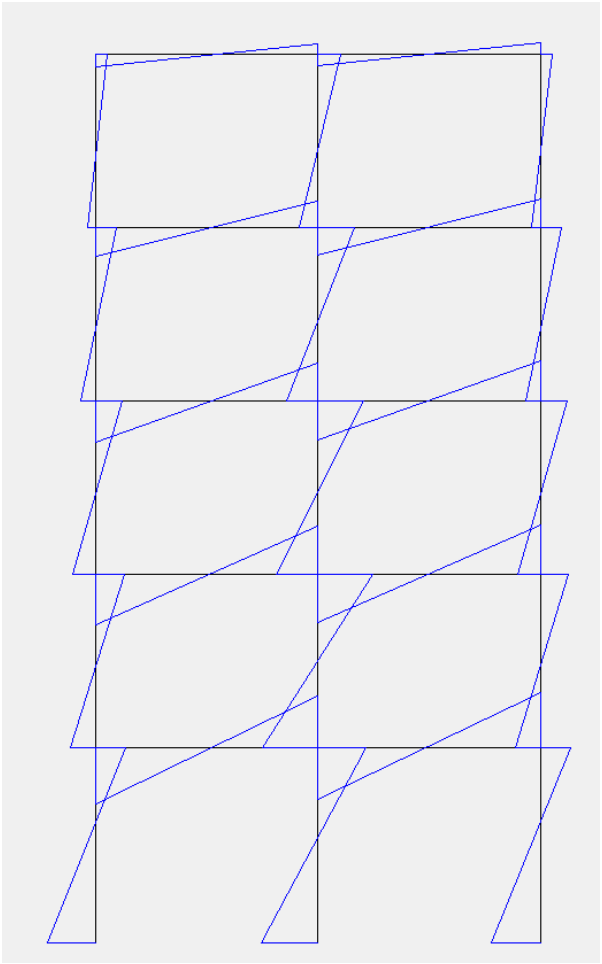


analisi statica

Cambia
(di molto)
il periodo

Cambia
qualcosa dove
c'è variazione
dei tratti
rigidi

T = 0.426 s



analisi modale

Modelli per le pareti

Alternative:

- Pareti come aste, con tratti rigidi per il collegamento alle travi e tenendo conto della deformazione a taglio
- Discretizzazione della parete in elementi finiti
  - Necessità di ritornare a caratteristiche di sollecitazione (come risultante delle tensioni)
  - Problemi numerici nel piano (drilling)
  - Problemi nel comportamento fuori piano

Questi aspetti sono esaminati nel corso "Problemi specifici nel progetto di strutture antisismiche con pareti in c.a."

Modellazione della struttura

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

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

NTC 08, punto 7.2.6

NTC13, punto 7.2.6

Modellazione della struttura

Rigidezza degli elementi strutturali

Strutture in acciaio:

- Assegnando la sezione si definiscono sia rigidezza che resistenza

Strutture in c.a. (approccio convenzionale):

- La rigidezza è assunta pari a quella della sezione geometrica
- La resistenza è considerata indipendente e viene dosata aggiungendo le armature necessarie

Strutture in c.a. (realtà):

- Rigidezza e resistenza sono comunque legate
  (si pensi al momento d'inerzia della sezione reagente omogeneizzata)
  Paulay, anni '90 del XX secolo (con riferimento a pareti in c.a.)

Modellazione della struttura

Rigidezza degli elementi strutturali

Strutture in c.a. (approccio convenzionale)

- Già nel D.M. 10/1/1907 (prima norma sul c.a.) si ha:

  "Se si tratta di costruzioni staticamente indeterminate, allo scopo di calcolare le forze incognite, nel valutare gli enti geometrici delle sezioni trasversali dei solidi … se la percentuale metallica è inferiore al 2% si può … fare astrazione alla presenza del ferro"

- Se si volesse tener conto rigorosamente della sezione fessurata si dovrebbe:
  - Definire le armature prima del calcolo
  - Considerare un momento d'inerzia che varia ogni volta che cambiano le armature o si inverte il segno di M
  - Considerare un momento d'inerzia che varia con continuità in presenza di N con M variabile (pilastri)

Modellazione della struttura

Rigidezza degli elementi strutturali

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

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

Tener conto rigorosamente della variazione oggi sarebbe forse possibile (con un modello elastico) grazie alla potenza dei computer attuali, ma comunque sarebbe estremamente oneroso

E oltre il limite elastico?

NTC 08, punto 7.2.6

NTC13, punto 7.2.6

Modellazione della struttura

Rigidezza degli elementi strutturali

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

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

Normativa:

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

→ quindi differenza tra travi e pilastri

NTC 08, punto 7.2.6

NTC13, punto 7.2.6

Modellazione della struttura

Rigidezza degli elementi strutturali

Considerazioni:

- In pratica, c'è chi riduce a priori la rigidezza in maniera forfetaria (spesso senza nemmeno distinguere tra travi e pilastri)

  Così si continua a mantenere indipendenti rigidezza e resistenza, mentre la motivazione di base era quella di metterle in relazione

Modellazione della struttura

Rigidezza degli elementi strutturali

Considerazioni:

- In pratica, c'è chi riduce a priori la rigidezza in maniera forfetaria (spesso senza nemmeno distinguere tra travi e pilastri)

Aspetti negativi:

- Ridurre la rigidezza per tener conto delle condizioni fessurate, se fatto in misura uguale per tutti gli elementi, serve solo ad aumentare il periodo proprio (quindi spesso riduce le forze e proporzionalmente le sollecitazioni)

Conseguenza forse accettabile:

- Se ben dosata, la riduzione forfetaria di rigidezza si limita a bilanciare l'incremento di rigidezza dovuta agli offset

Modellazione della struttura

Rigidezza degli elementi strutturali

Considerazioni:

- In pratica c'è chi riduce a priori la rigidezza in maniera
  distingue

Aspetti ne

- Ridurre la
  fessurate
  serve solo
  riduce le f

Conseguen

- Se ben dosata, la riduzione forfetaria di rigidezza si limita a bilanciare l'incremento di rigidezza dovuta agli offset

Ma in sostanza questo della "rigidezza fessurata" è un problema non ancora definito a livello scientifico.

Forse la normativa avrebbe fatto meglio a non introdurlo proprio

Modellazione della struttura

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

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 cemento armato di almeno 40 mm di spessore

L'ipotesi di impalcato rigido è fondamentale nella modellazione della struttura

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

NTC 08, punto 7.2.6

NTC13, punto 7.2.6

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

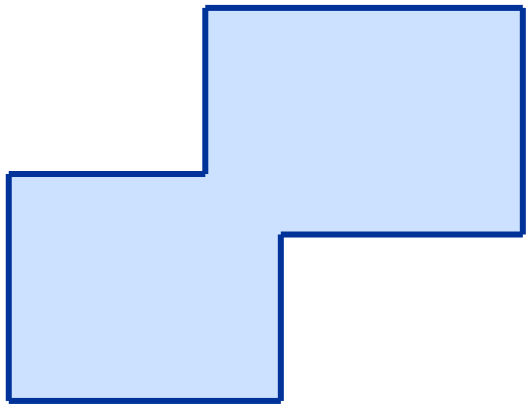
Impalcato deformabile:

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

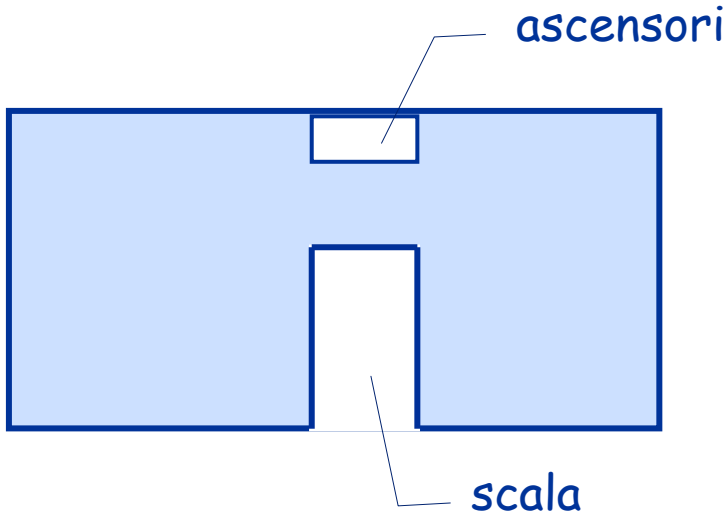
Irregolarità strutturali per l'impalcato

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

riduce localmente la resistenza e rende possibili grosse deformazioni localizzate



qui la debolezza è evidente



in altri casi uno sguardo superficiale può trarre in inganno

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

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

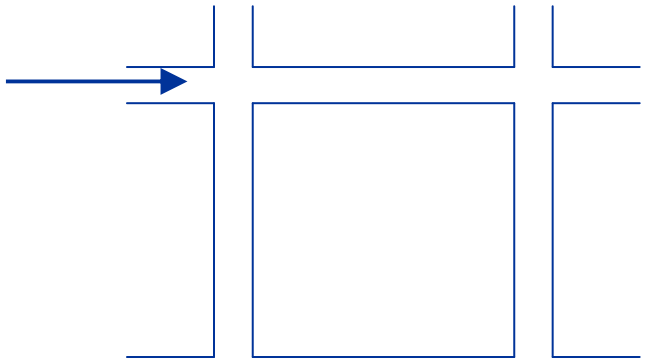
Gli elementi non strutturali (quali tamponature e tramezzi) possono essere rappresentati unicamente in termini di massa, considerando il loro contributo alla rigidezza e alla resistenza del sistema strutturale solo qualora tale contributo modifichi significativamente il comportamento del modello

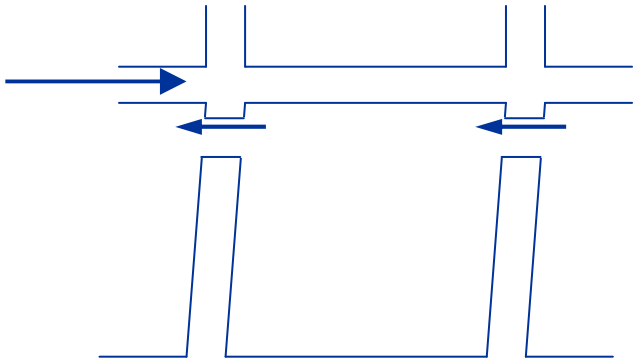
In quali casi il contributo degli elementi non strutturali modifica il comportamento?

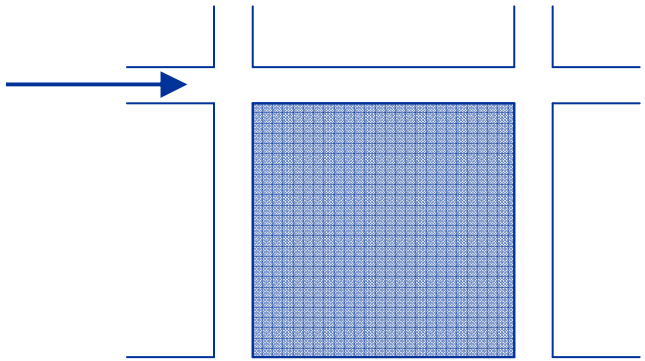
NTC 08, punto 7.2.6

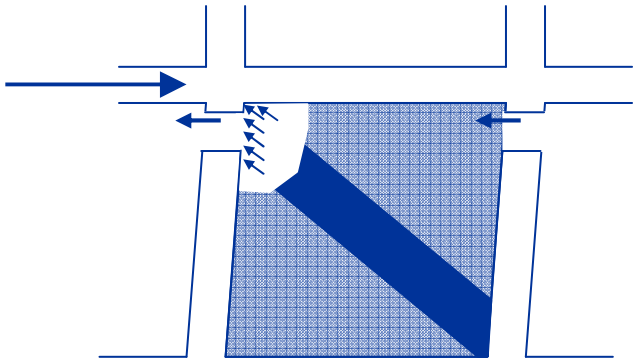
NTC13, punto 7.2.6

Elementi non strutturali
(tramezzi, tamponature)





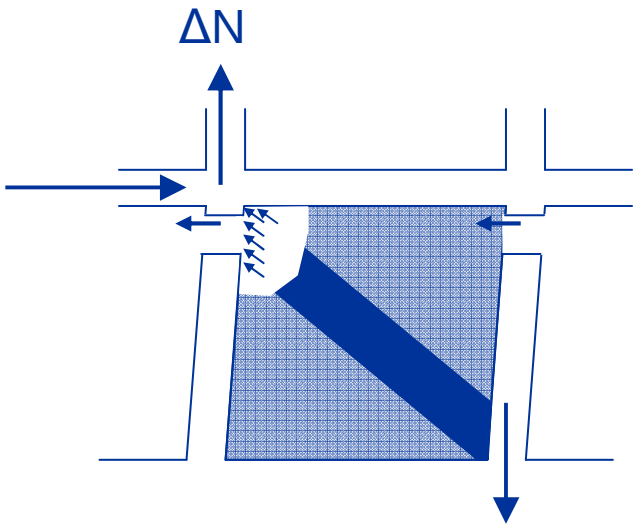




Elementi non strutturali
(tramezzi, tamponature)

Effetto locale su travi e pilastri:

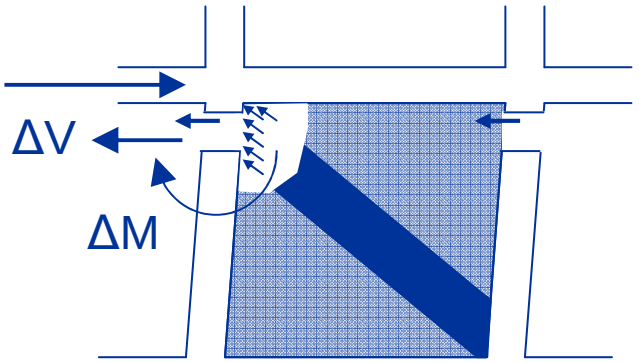
- variazione dello sforzo normale nei pilastri (dovuto alla componente verticale della forza nel pannello murario)



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)



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 dissimmetriche
- 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

Modellazione della struttura

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

Nella definizione dell'azione sismica sulla struttura, si possono considerare la deformabilità del complesso fondazione-terreno e la sua capacità dissipativa

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

NTC 08, punto 7.2.6

NTC13, punto 7.2.6

Struttura, fondazione e terreno

Effetto della deformabilità della fondazione (comportamento statico):

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

$\Downarrow$

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

Effetto della deformabilità della fondazione (comportamento dinamico):

- maggiore deformabilità complessiva

$\Downarrow$

aumento del periodo proprio della struttura;

ciò comporta in genere una riduzione dell'azione sismica, ma un aumento degli spostamenti

Struttura, fondazione e terreno

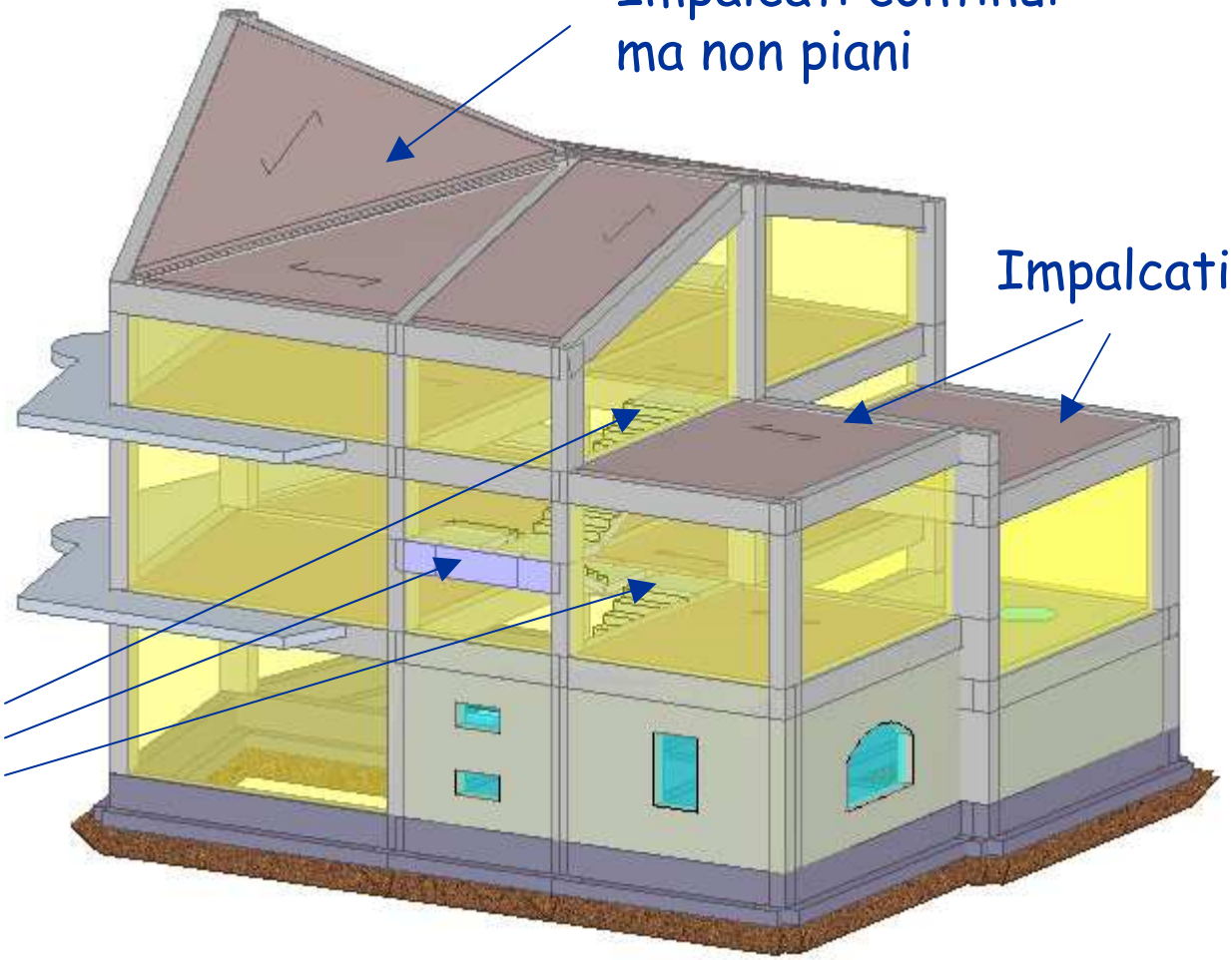
È necessario modellare insieme struttura, fondazione e terreno quando:

- La fondazione non è adeguatamente rigida (rischio di cedimenti differenziali, rotazioni al piede, ridistribuzione 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 altra considerazione

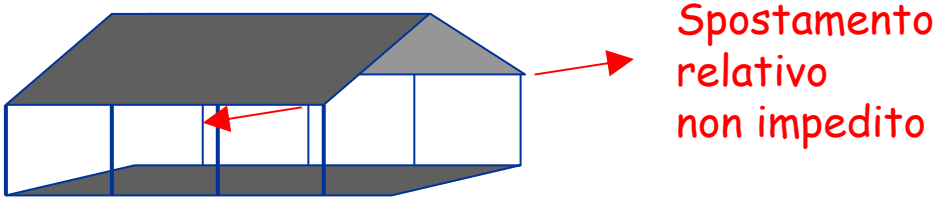
Problemi:



Impalcati continui ma non piani

- Modello più semplice: vincolo mutuo agli spostamenti orizzontali (nonostante la non planarità)

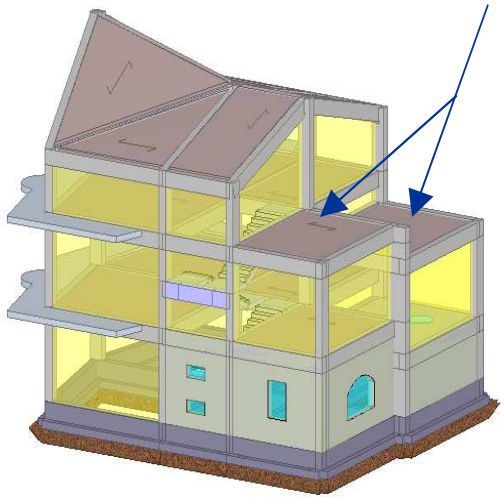
  Attenzione ai casi in cui in una direzione gli spostamenti relativi non sono impediti



- Alternativa: modellazione dei singoli campi con elementi bidimensionali oppure aste pendolari

Impalcati sfalsati

Impalcati sfalsati



- Uno sfalsamento di mezzo piano può creare problemi ma in genere è accettabile

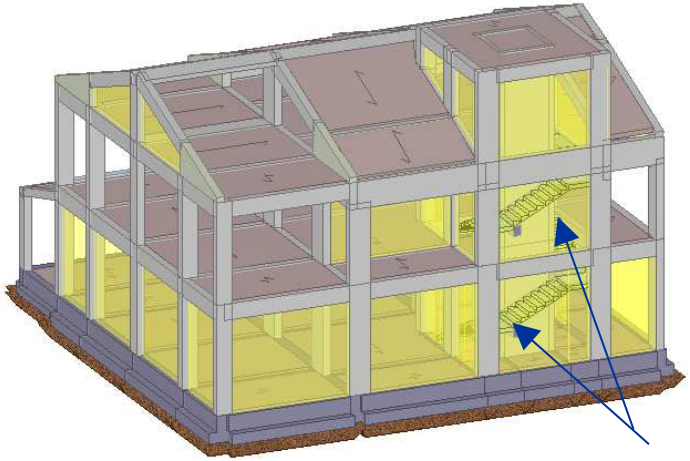
- Sfalsamenti minori creano pilastri molto corti, con comportamento non accettabile

In presenza di sfalsamenti minori è opportuno solidarizzare i due impalcati in modo da costringerli a spostarsi della stessa quantità senza movimenti relativi (trave unica e/o altri accorgimenti)

Scale che creano collegamento tra gli impalcati

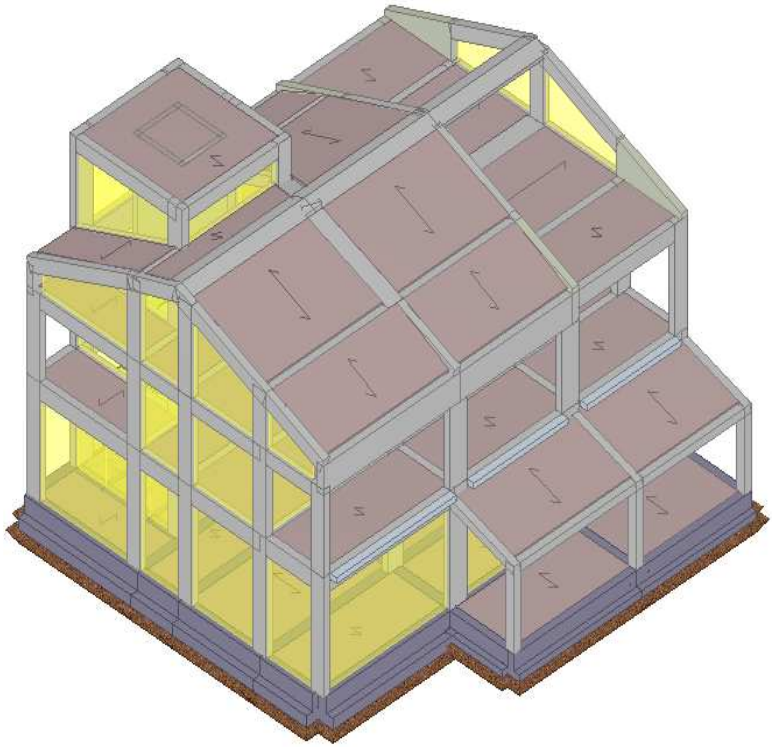
- L'effetto fortemente negativo travi a ginocchio è stato evidenziato da molto tempo

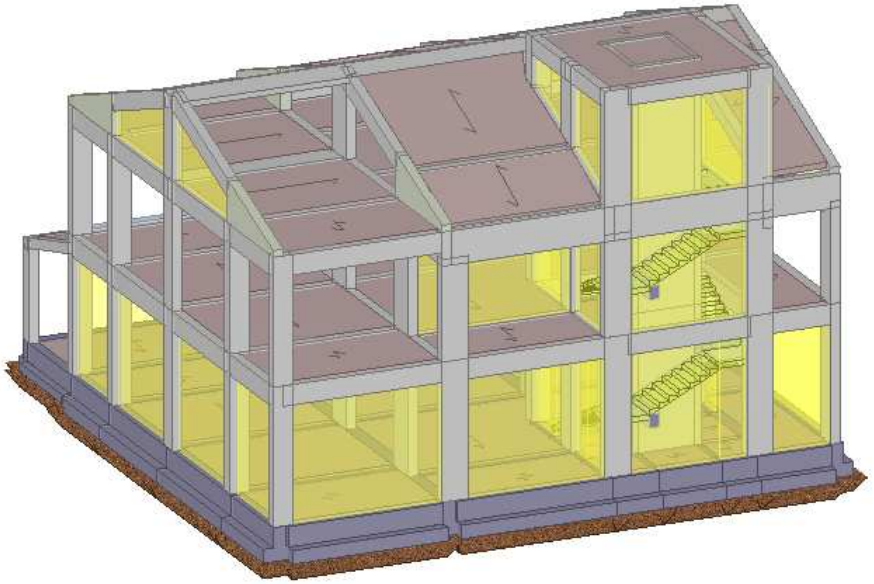
- Anche le solette rampanti creano problemi rilevanti (evidenziati solo in tempi più recenti)

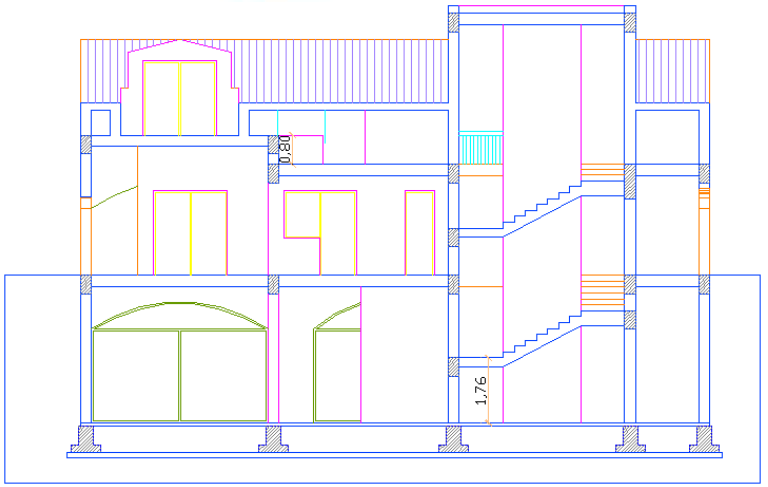


Occorre ripensare drasticamente la soluzione strutturale da usare per le scale

Modellazione: un esempio reale



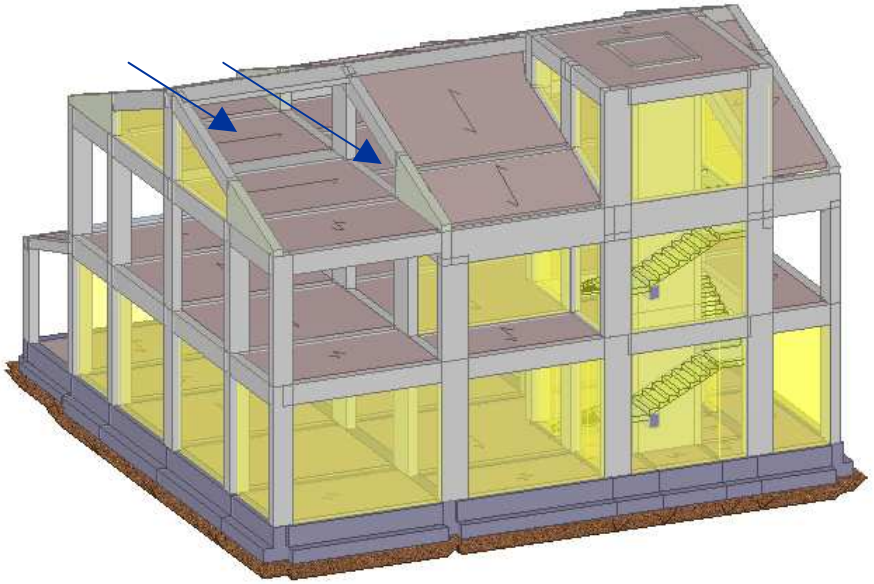


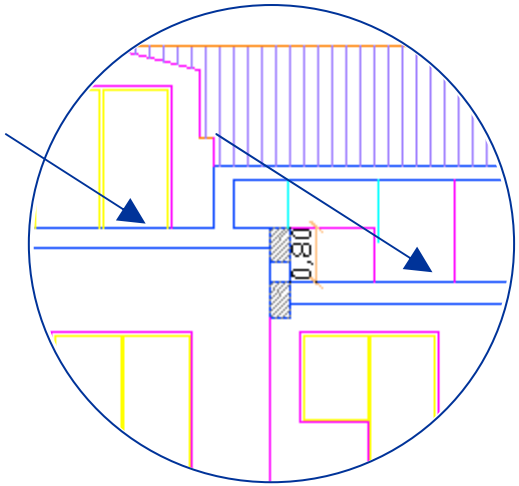


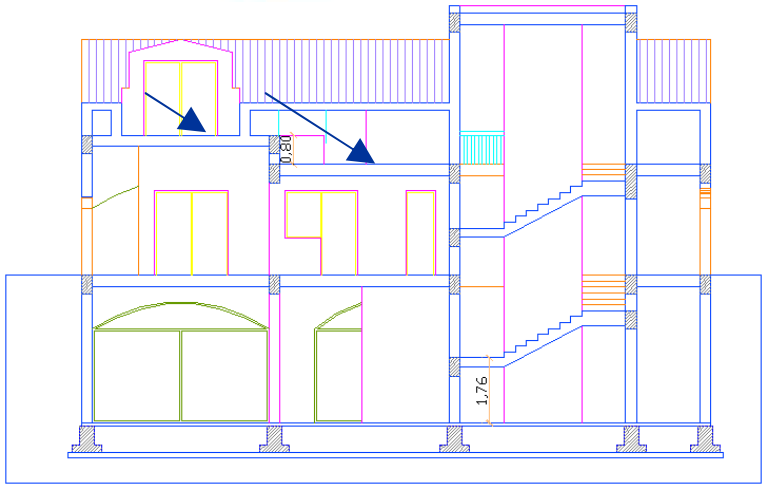
Si ringrazia
l'ing. Alfio Gruppillo

Modellazione: un esempio reale (1)

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

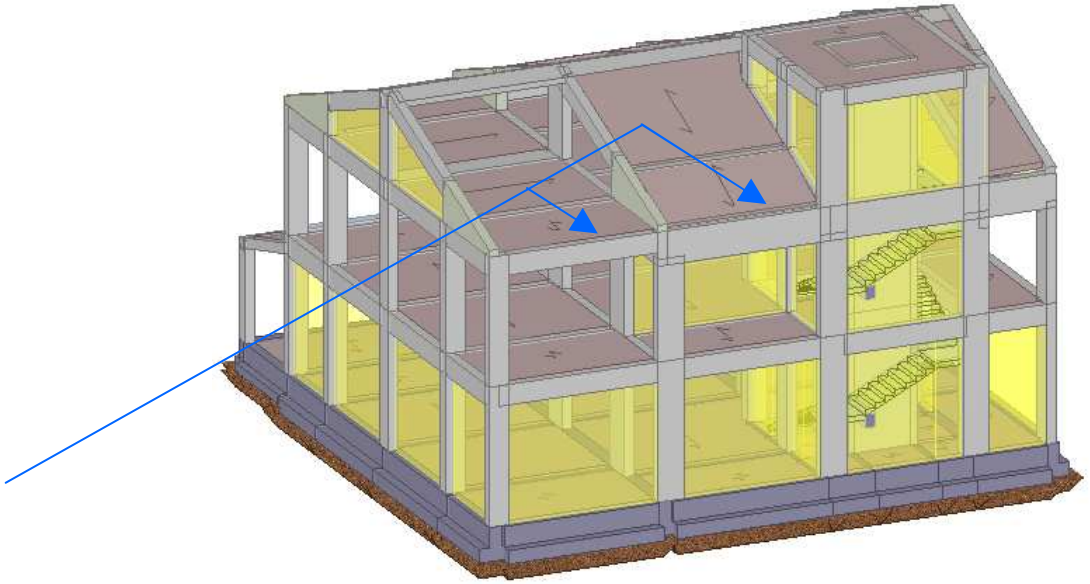




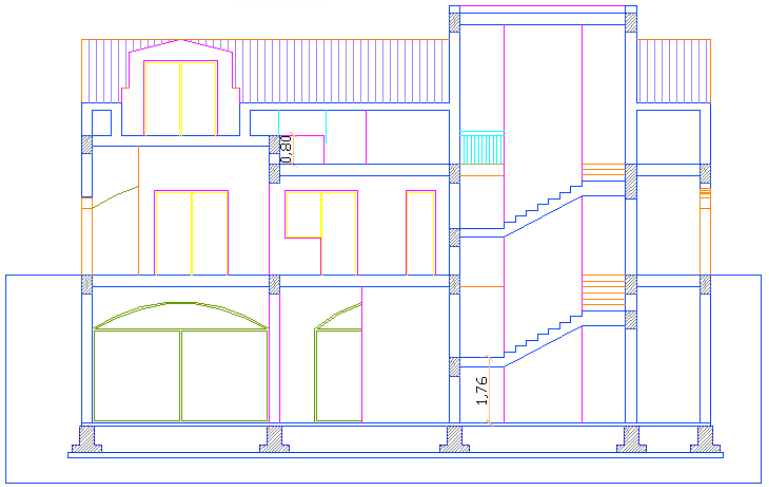


Modellazione: un esempio reale (1)

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

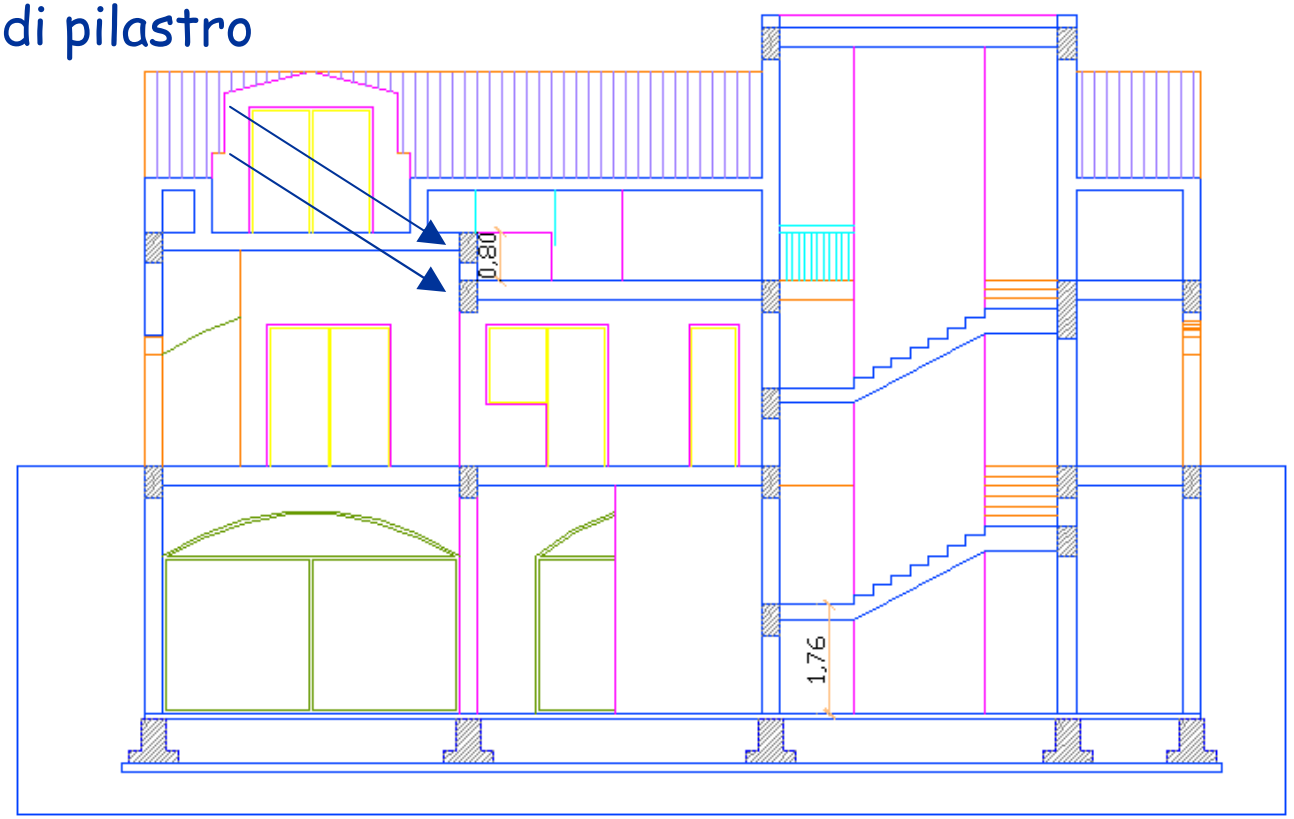


… e il tetto inclinato converge fino alla quota della parte superiore dell'impalcato



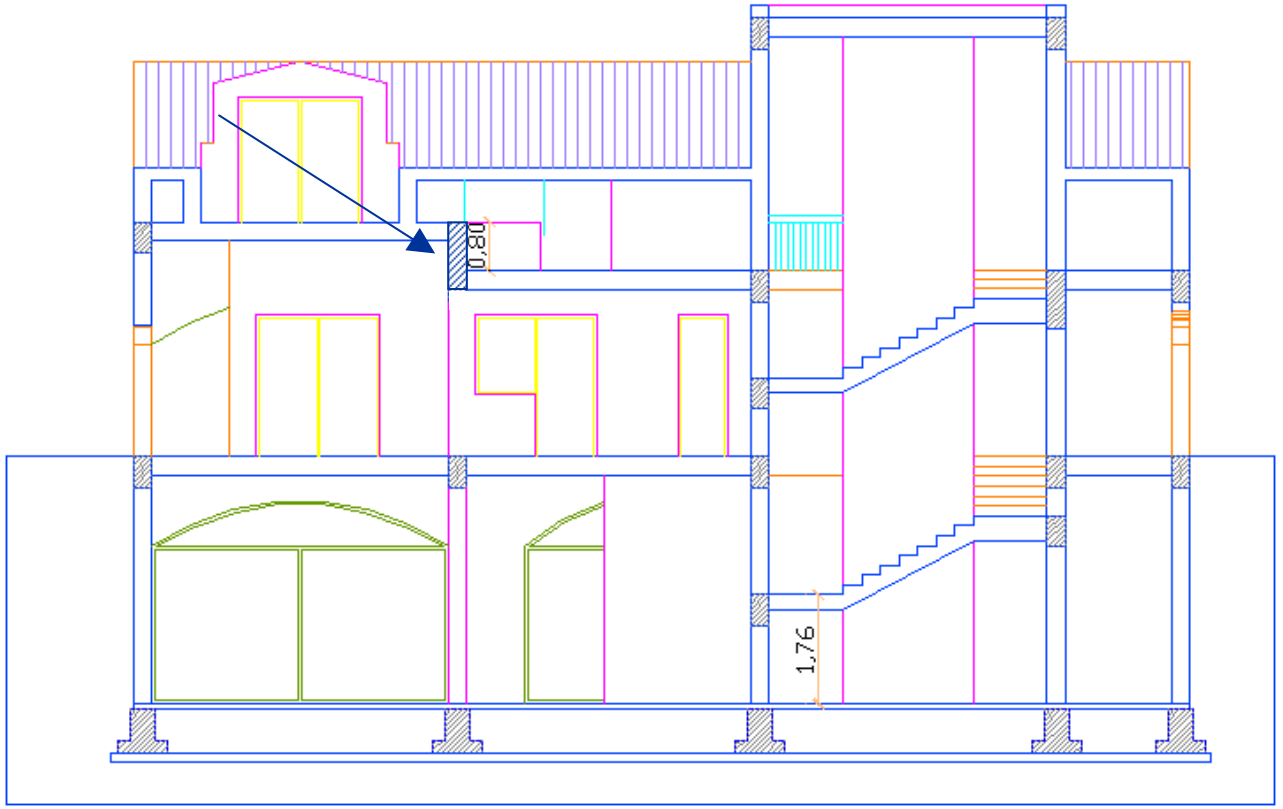
Modellazione: un esempio reale (1)

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

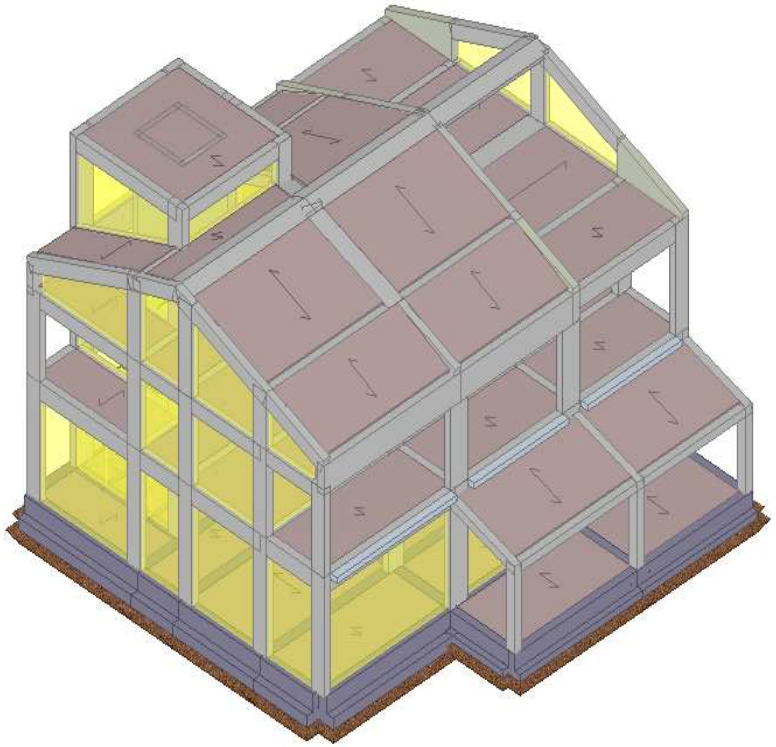


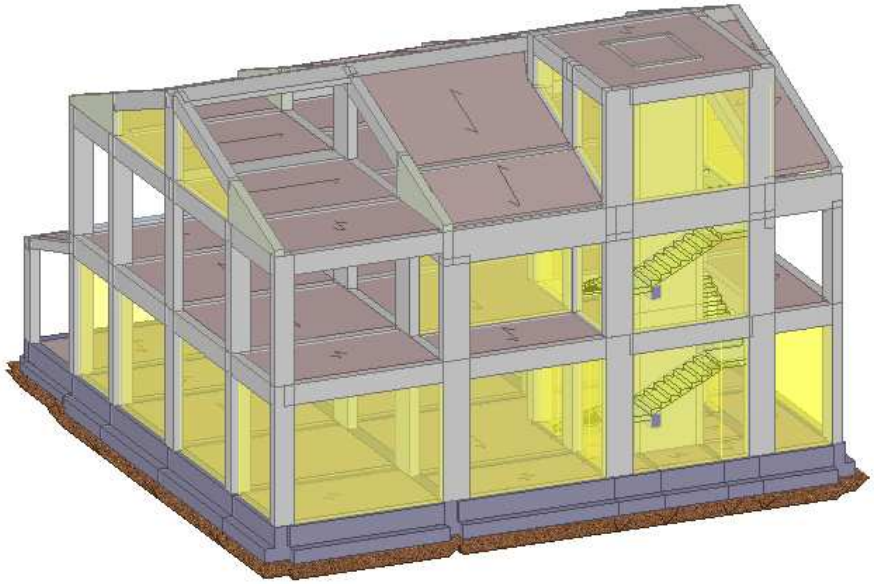
Modellazione: un esempio reale (1)

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



Modellazione: un esempio reale (1)





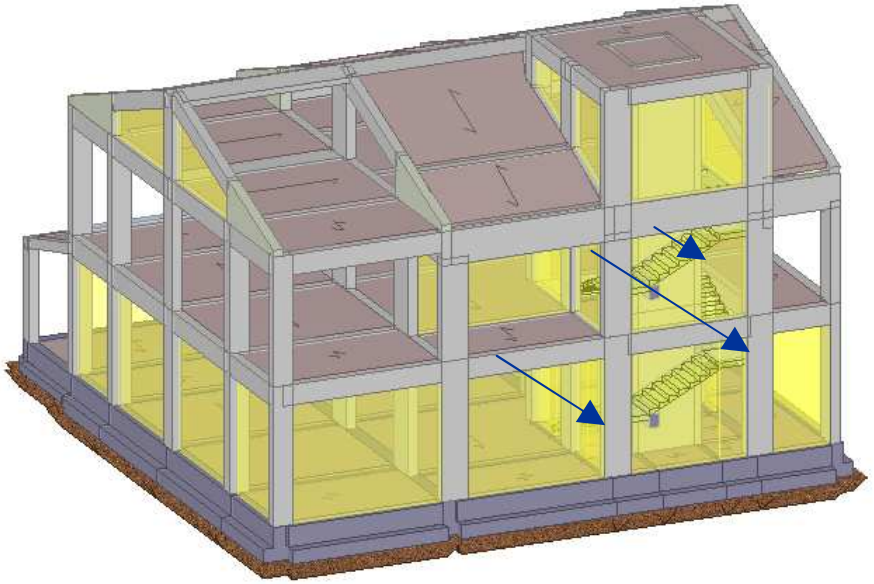
(notare che la trave alta gira su tre lati)

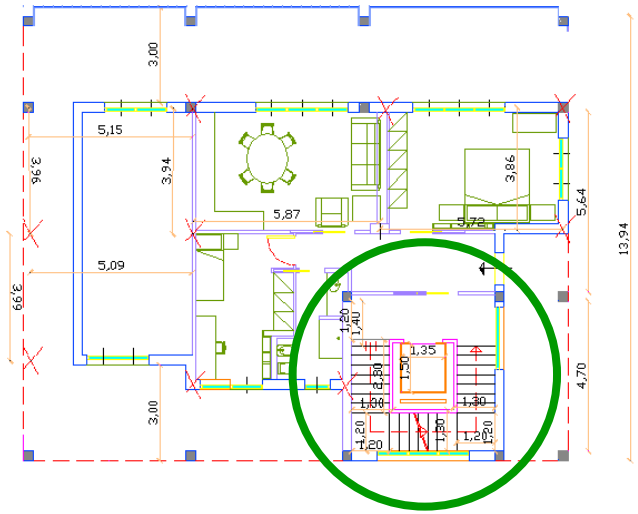
… e anche il tetto inclinato, poggiato su una trave così alta, diventa un tutt'uno con l'impalcato di sottotetto

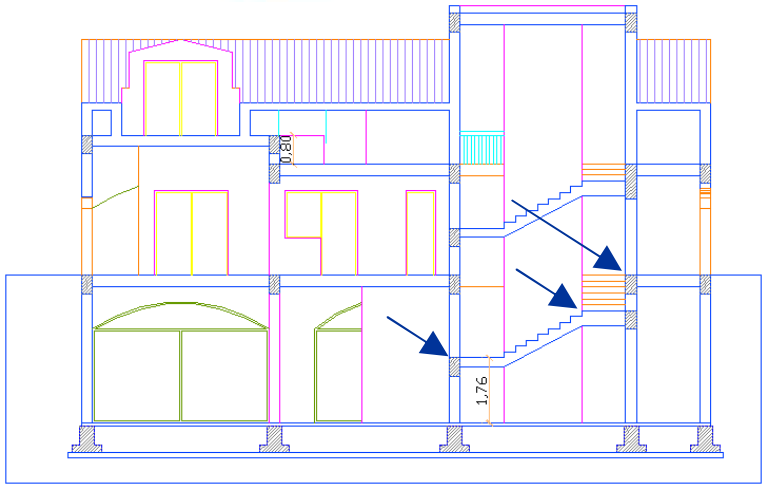
Modellazione: un esempio reale (2)

La scala costituisce un elemento di forte irregolarità

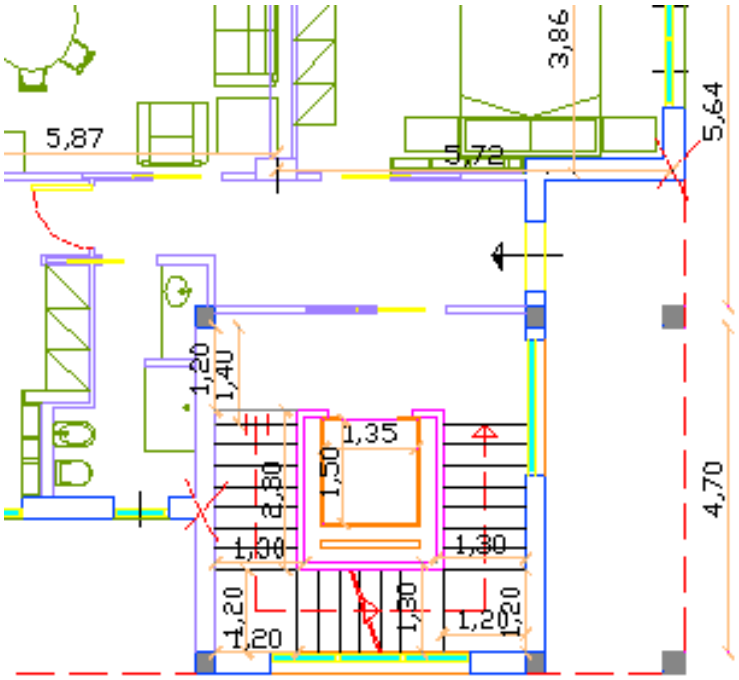
- Crea un collegamento tra quote diverse
- È in una posizione fortemente eccentrica

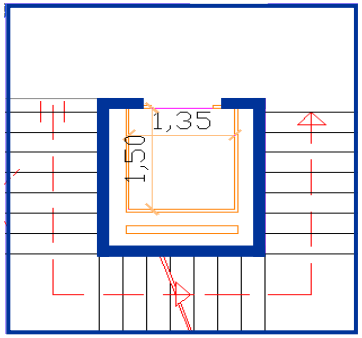






Modellazione: un esempio reale (2)



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