

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

Progetto di edifici antisismici in c.a.

8 - Modellazione della struttura

Spoletto  
11-13 novembre 2010  
Aurelio Ghersi

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

10.2

Notare:

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

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:

• 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

10.2

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

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:

• 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

10.2

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

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:

• 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

10.2

Qualora  
automa  
l'attenu  
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

• Affa

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

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

NTC 08, punto 7.2.6

## 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 rigidità) 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  $B = 0.5 A_p / l_d \Rightarrow B \equiv 0.20 \div 0.25 l_d$   
B. Stafford Smith  $B \equiv 0.15 \div 0.30 l_d$   
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, 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

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

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

## 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

NTC 08, 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

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

NTC 08, punto 7.2.6

## Modellazione della struttura modulo elastico e rigidezza

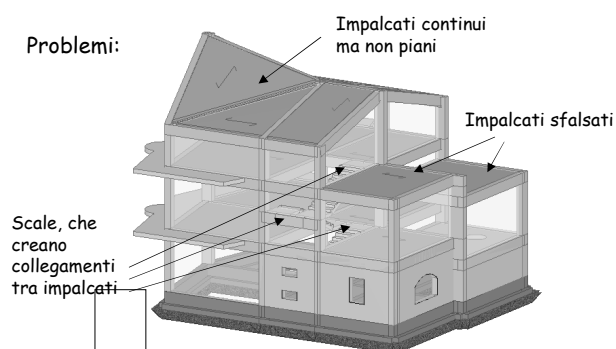
Riflessioni:

- 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

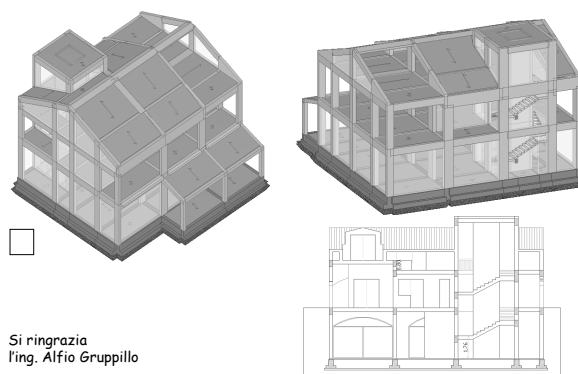
meglio lasciar perdere,  
finché non si hanno  
indicazioni più affidabili

## Modellazione: qualche considerazione

Problemi:

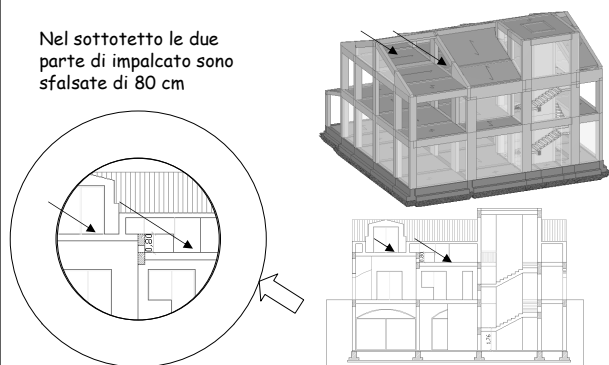


## Modellazione: un esempio reale



## Modellazione: un esempio reale (1)

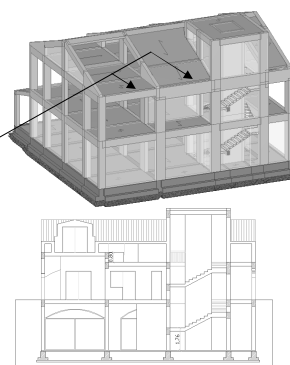
Nel sottotetto le due  
parte di impalcato sono  
sfalsate di 80 cm



## Modellazione: un esempio reale (1)

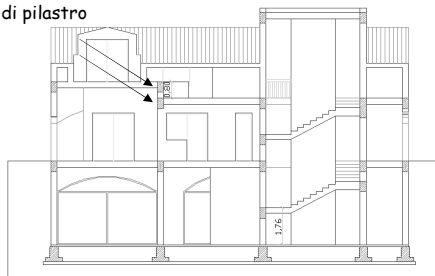
Nel sottotetto le due  
parte di impalcato sono  
sfalsate di 80 cm

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



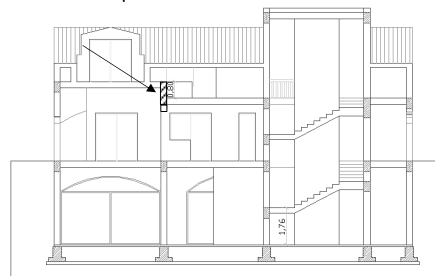
### Modellazione: un esempio reale (1)

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

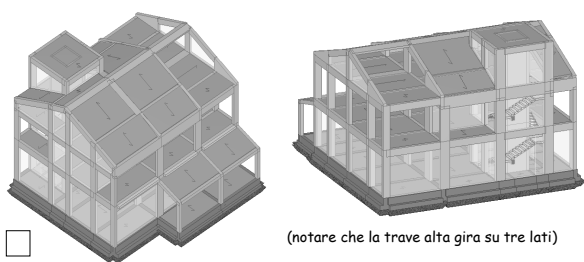


### Modellazione: un esempio reale (1)

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



### Modellazione: un esempio reale (1)



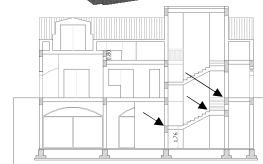
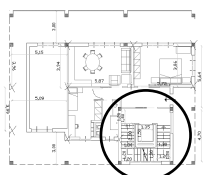
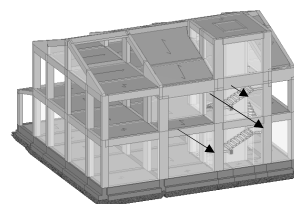
(notare che la trave alta gira su tre lati)

... 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

