



SAP2000



## ESERCITAZIONI ALL'UTILIZZO DI SAP2000 PER L'ANALISI STRUTTURALE DI UN EDIFICIO IN C.A.

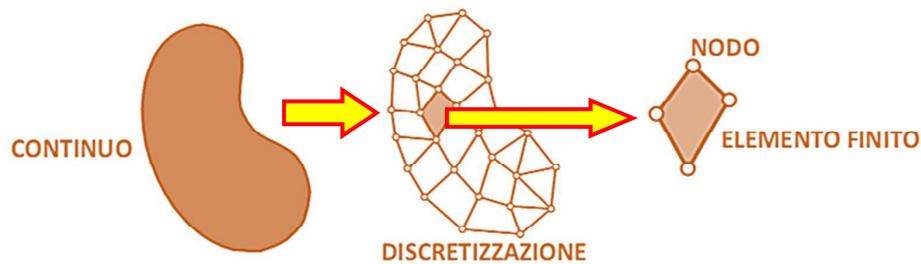
A. A. 2023-2024

*Esercitazioni all'utilizzo di SAP2000 per l'analisi strutturale di un edificio in c.a.*

### INTRODUZIONE

- L'obiettivo di un'analisi strutturale è la determinazione degli **stati tensionali e deformativi** di una struttura sotto l'effetto di condizioni al contorno e carichi noti, al fine di verificare il rispetto il rispetto di determinati criteri progettuali.
- In generale, il calcolo degli stati tensionali e deformativi di una struttura consiste nella **risoluzione delle equazioni**, con le relative **condizioni al contorno**, che descrivono il problema.
- Per **strutture semplici** questo avviene mediante l'applicazione dei **metodi classici** della scienza delle costruzioni: la struttura è trattata come un continuo, il cui comportamento è descritto da **equazioni differenziali**. Per geometrie e condizioni di carico relativamente semplici sono normalmente disponibili le **soluzioni analitiche**, in forma esatta.
- In realtà, nella maggior parte dei casi di interesse pratico che riguardano lo studio delle strutture, la forma geometrica, le condizioni al contorno e i carichi assegnati (statici e sismici) sono **troppo complessi** per poter applicare procedimenti analitici e trovare la soluzione analitica in forma chiusa a partire dalle equazioni differenziali.
- Sono pertanto stati elaborati numerosi **metodi numerici (approssimati)** che consentono di risolvere in maniera sistematica problemi complessi; il più utilizzato in campo strutturale è il **METODO AGLI ELEMENTI FINITI**.

- Il metodo ad elementi finiti (**FEM: Finite Element Method**) è una procedura informatica (numerica) che può essere utilizzata per l'analisi delle strutture e dei mezzi continui; applicazioni comuni riguardano lo studio del comportamento statico, dinamico e termico dei sistemi fisici e dei loro componenti.
- Il FEM considera la struttura come **discretizzata** in un insieme **elementi di piccole dimensioni** identificati da un **numero finito di punti**, detti nodi. Gli spostamenti di ogni elemento si rappresentano in funzione degli spostamenti dei nodi che sottendono l'elemento. Sia il comportamento degli elementi che quello dell'intera struttura possono essere descritti con sistemi di equazioni algebriche, di facile implementazione su personal computer.



- I continui progressi dell'hardware hanno reso semplice e molto efficiente l'utilizzo dei software FEM per la risoluzione di problemi ingegneristici, anche complessi, sui comuni PC.
- Nella fase di creazione del modello di calcolo occorre sempre ricordarsi che si tratta di un'idealizzazione del reale sistema fisico e che, tranne per poche eccezioni (analisi statica di aste, travi e membrane), **le analisi FEM non forniscono la soluzione esatta** del problema. È comunque possibile ottenere soluzioni numericamente molto **accurate** scegliendo un'ideale **modellazione**: è compito e responsabilità del progettista realizzare una modellazione che sia in grado di fornire risultati accurati.
- Se l'obiettivo dell'ingegnere è SVILUPPARE UN CODICE ad elementi finiti, è necessaria un'approfondita conoscenza delle basi teoriche. Ma anche se l'obiettivo è UTILIZZARE UN CODICE ad elementi finiti, l'ingegnere deve comunque possedere una conoscenza base dei concetti fondamentali del FEM e conoscere le principali caratteristiche ed i campi di applicazione (comprese le limitazioni) del software che intende utilizzare.

## REDAZIONE DEI PROGETTI STRUTTURALI ESECUTIVI E DELLE RELAZIONI DI CALCOLO

Estratto NTC 2018

### 10.1. CARATTERISTICHE GENERALI

[...]

Particolare cura andrà posta nello sviluppare le relazioni di calcolo, con riferimento alle analisi svolte con l'ausilio del calcolo automatico, sia ai fini di facilitare l'interpretazione e la verifica dei calcoli, sia ai fini di consentire elaborazioni indipendenti da parte di soggetti diversi dal redattore del documento.

Il progettista resta comunque responsabile dell'intera progettazione strutturale.

Nel caso di analisi e verifica svolte con l'ausilio di codici di calcolo, oltre a quanto sopra specificato, e in particolare oltre alla Relazione generale strutturale, si dovranno seguire le indicazioni fornite in § 10.2.

### 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.

Il progettista dovrà quindi esaminare preliminarmente la documentazione a corredo del software per valutarne l'affidabilità e soprattutto l'idoneità al caso specifico. In tal senso 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.

[...]

*Giudizio motivato di accettabilità dei risultati.*

Spetta al progettista il compito di sottoporre i risultati delle elaborazioni a controlli che ne comprovino l'attendibilità. Tale valutazione consisterà nel confronto con i risultati di semplici calcoli, anche di larga massima, eseguiti con riferimento a schemi o soluzioni noti e adottati, ad esempio, in fase di primo proporzionamento della struttura. Inoltre, sulla base di considerazioni riguardanti gli stati tensionali e deformativi determinati, valuterà la consistenza delle scelte operate in sede di schematizzazione e di modellazione della struttura e delle azioni.

Nella relazione devono essere elencati e sinteticamente illustrati i controlli svolti, quali verifiche di equilibrio tra reazioni vincolari e carichi applicati, comparazioni tra i risultati delle analisi e quelli di valutazioni semplificate, etc.

## FASE DI MODELLAZIONE FEM

La modellazione ad elementi finiti si articola in:

- **FASE DI PRE-PROCESSING:** in cui il progettista deve intervenire maggiormente e quindi deve avere dimestichezza con i concetti base del FEM. Gli attuali software commerciali propongono interfacce grafiche user-friendly;
  - ✓ **DEFINIZIONE DEGLI ELEMENTI:** l'utente sceglie la tipologia degli elementi finiti da utilizzare, ne definisce le proprietà geometriche e caratteristiche dei materiali;
  - ✓ **DISCRETIZZAZIONE O MODELLAZIONE DELLA STRUTTURA:** l'utente modella la struttura assemblando una serie di elementi finiti (con eventuali sconnessioni interne tra elementi); spesso i software sono in grado di aiutare l'utente nella creazione di un'appropriata mesh (discretizzazione). Questo è il passo cruciale per ottenere una soluzione accurata del problema;
  - ✓ **DEFINIZIONE DELLE CONDIZIONI AL CONTORNO:** l'utente definisce e applica le condizioni di vincolo e le relative proprietà (vincoli fissi, cedevoli, spostamenti imposti, ecc...);
  - ✓ **APPLICAZIONE DEI CARICHI:** l'utente definisce e applica i carichi (forze o spostamenti impressi come carichi nodali, distribuiti, termici, time histories, ecc...).

- **FASE DI PROCESSING:** di totale competenza del software. L'utilizzo di algoritmi performanti ed ormai consolidati (quali le matrici sparse) abbinato agli hardware degli attuali pc hanno ridotto notevolmente i tempi di calcolo.
  - ✓ **ASSEMBLAGGIO DELLA MATRICE DI RIGIDEZZA DEGLI ELEMENTI:** le matrici di rigidezza degli elementi vengono determinate automaticamente dal software seguendo criteri es. di equilibrio o energetici;
  - ✓ **RISOLUZIONE DEL SISTEMA LINEARE DI EQUAZIONI ALGEBRICHE:** il software, attraverso l'impiego di opportuni algoritmi di calcolo matriciale, risolve il sistema di equazioni le cui incognite sono gli spostamenti nodali (es.: in statica, metodo degli spostamenti).
- **FASE DI POST-PROCESSING:** il software fornisce all'utente i risultati dell'analisi sotto forma di tabulati e in forma grafica.
  - ✓ **OUTPUT DEI RISULTATI:** su richiesta dell'utente, il software può fornire spostamenti, deformazioni, reazioni vincolari, caratteristiche di sollecitazioni, tensioni, ecc... (che possono poi essere inseriti nelle relazioni di calcolo);
  - ✓ **VERIFICHE STRUTTURALI:** molti software FEM per l'analisi strutturale propongono un verificatore degli elementi, secondo svariate normative (nazionali ed internazionali). Occorre prestare molta attenzione, in quanto l'evoluzione normativa non sempre lascia i tempi tecnici necessari per l'aggiornamento e la validazione del software relativamente alle verifiche.

## PRINCIPALI TIPOLOGIE DI ELEMENTI FINITI

Le tipologie di elementi finiti possono essere raggruppate secondo un criterio DIMENSIONALE:

- **ELEMENTI MONODIMENSIONALI (1D, LINE Elements)**
  - Asta (truss, bar)
  - Trave (beam, frame)
  - Molla (spring, link)
  - Elemento rigido (rigid link)
- **ELEMENTI BIDIMENSIONALI (2D, AREA Elements)**
  - Stato piano di tensione (lastra, plane stress)
  - Stato piano di deformazione (plane strain)
  - Assialsimmetrico (axisymmetric)
  - Membrana (membrane)
  - Lastra-piastra, guscio (plate, shell)
- **ELEMENTI TRIDIMENSIONALI (3D, VOLUME Elements)**
  - Solido (solid, brick)
  - Tetraedro, piramide, prisma (tetrahedra, pyramid, wedge)
- **ELEMENTI SPECIALI**
  - Cavi (cable)
  - Gap tra elementi strutturali (lineari e non lineari)
  - Gap tra struttura e contorno (lineari e non lineari)

## CONNESSIONE TRAVI-SETTI

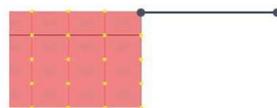
Nella modellazione di una struttura in c.a. con il metodo degli elementi finiti può capitare di dover creare un modello in cui sono usati sia elementi bidimensionali (es. shell, per i setti) che elementi trave (es. frame, per travi e pilastri).

Nasce un problema quando bisogna collegare queste due tipologie di elementi finiti: ci si aspetta, infatti, che l'innesto della trave in un setto complanare determini una limitazione alla rotazione della trave in quell'estremità, generando un momento diverso da zero.

Nella modellazione numerica FEM, invece, senza le dovute accortezze, questo momento risulta nullo. Questo è legato alle caratteristiche proprie dei due elementi finiti:

- l'elemento trave/frame, possiede tutti e 6 i gradi di libertà per nodo:  $u_x, u_y, u_z, \theta_x, \theta_y, \theta_z$
- l'elemento guscio/shell ha invece solo 5 gradi di libertà per nodo:  $u_x, u_y, u_z, \theta_x, \theta_y$ , mentre non possiede il grado di libertà relativo alla rotazione intorno all'asse perpendicolare al piano dell'elemento,  $\theta_z$ , e pertanto non trasferisce alcuna rigidità per il grado di libertà rimanente.

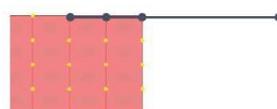
Pertanto nella connessione elemento bidimensionale-trave, la trave non riesce a trasmettere all'elemento bidimensionale a cui è connesso la rotazione intorno all'asse locale z dell'elemento bidimensionale: la trave risulta praticamente sconnessa a tale rotazione, per cui il modello di analisi risulta non veritiero (momento nullo nella trave, all'innesto nel setto).



Elementi trave connessi a elementi senza *drilling* d.o.f.  
Il nodo di connessione si comporta come una cerniera

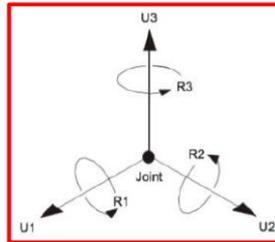
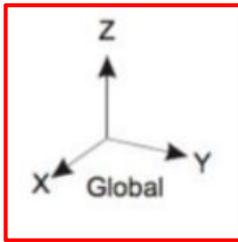
### SOLUZIONE:

- 1) «automatica»: sono disponibili elementi bidimensionali dotati di 6 gradi di libertà per nodo e cioè dotati di rigidità anche per il cosiddetto «drilling» d.o.f.
- 2) «manuale»: si prolunga la trave nella parete (due nodi dentro al setto sono sufficienti). Le porzioni di fittizie di trave all'interno del setto avranno la sezione della trave stesse e peso proprio nullo. Inoltre all'estremità interna saranno rilasciate tutte le sollecitazioni (assiale, torsione e momenti) tranne il taglio (release).

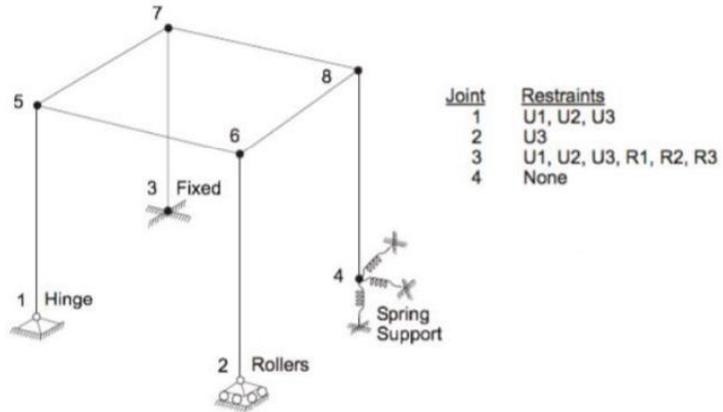


Si può allungare la trave facendo attenzione poiché gli sforzi non sono realistici nei pressi della connessione

## NOTE SU ORIENTAMENTO ASSI IN SAP2000

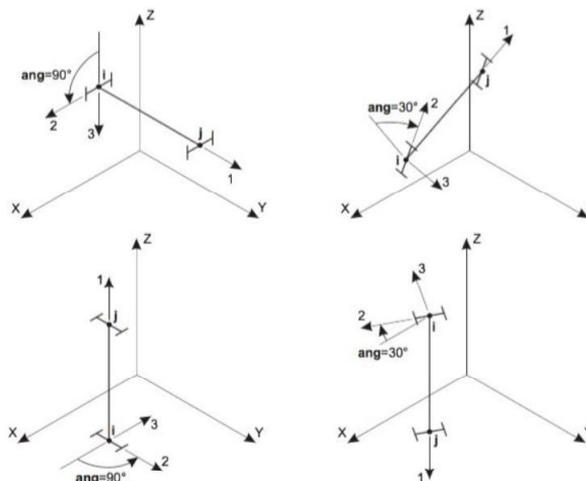


Per i joints:



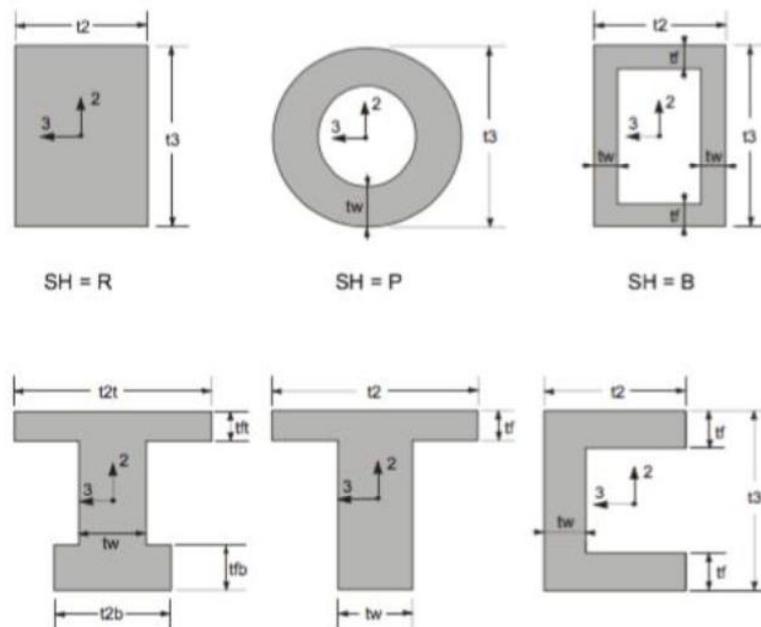
Per gli elementi frame:

- Asse 1 (Rosso): orientato lungo la direzione e verso con cui disegno dell'elemento frame
- Asse 2 (Verde): risiede nel piano verticale (verso l'alto) per elementi in posizione generica, ma è orientato verso X per elementi verticali
- Asse 3 (Azzurro): orientato secondo la regola della mano destra, definiti 1 e 2



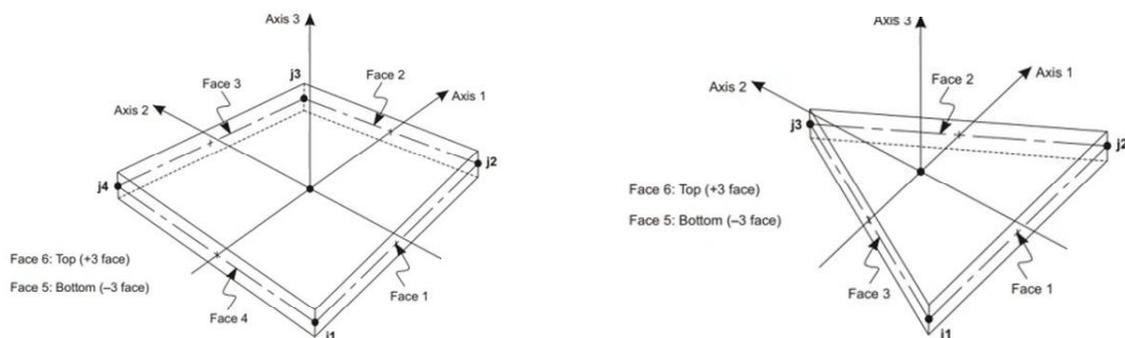
Per le sezioni degli elementi frame:

- Asse 2 (Verde)
- Asse 3 (Azzurro)



Per gli elementi shell:

- Asse 1 (Rosso): nel piano dell'elemento, orientato nella direzione identificata dai primi due punti disegnati
- Asse 2 (Verde): nel piano dell'elemento, ortogonale all'asse 1
- Asse 3 (Azzurro): ortogonale al piano, regola della mano destra

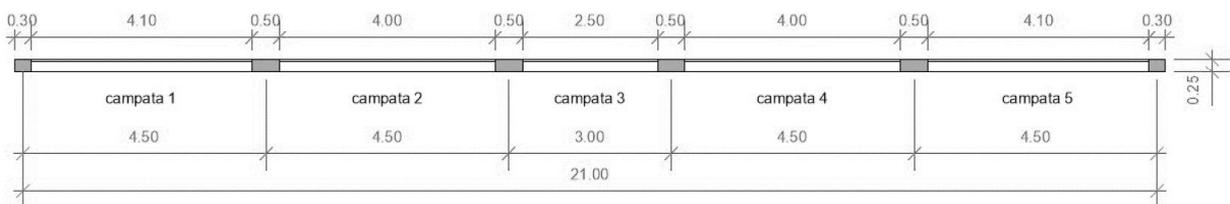


## NOTE SUI CARICHI IN SAP2000

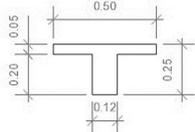
- **LOAD PATTERN:** identifica la singola tipologia di carico da applicare (un carico permanente, un carico accidentale, il vento in una certa direzione...)
- **LOAD CASE:** definisce il tipo di analisi (lineare, modale, non lineare, time history ...) e tipologie di carichi che devono essere considerati (scelti tra i load pattern). È il problema che viene effettivamente risolto dal computer.
- **LOAD COMBO:** è la combinazione di più risultati di load case, ad esempio per ricreare le combinazioni di normativa (SLU, SLE, ...) o per cercare l'involuppo di più risultati. Si possono creare anche dopo aver lanciato l'analisi dei singoli load case.

## ESEMPIO 01\_Trave continua

Sezione longitudinale



Sezione trasversale



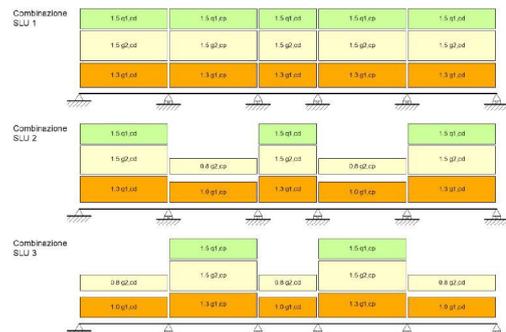
Carichi

- carichi permanenti strutturali:  $g_1 = 3.12 \cdot 0.50 = 1.56 \text{ kN/m}$
- carichi permanenti non strutturali:  $g_2 = 2.80 \cdot 0.50 = 1.40 \text{ kN/m}$
- carichi variabili (cat. A):  $q_1 = 2.00 \cdot 0.50 = 1.00 \text{ kN/m}$

Tab. 26.1 – Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni nelle verifiche SLU

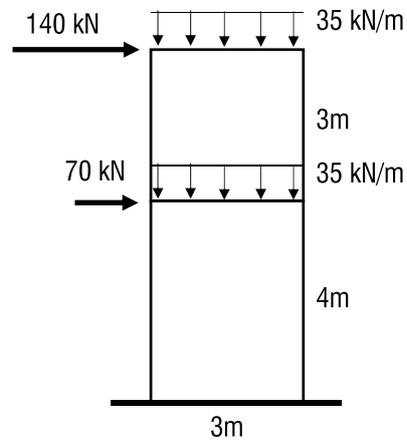
|   |             | Coefficiente  | EQU | A1  | A2  |
|---|-------------|---------------|-----|-----|-----|
|   |             | $\gamma_f$    |     |     |     |
| Carichi permanenti $G_i$                    | Favorevoli  | $\gamma_{G1}$ | 0,9 | 1,0 | 1,0 |
|   | Sfavorevoli |               | 1,1 | 1,3 | 1,0 |
| Carichi permanenti non strutturali $G_{i2}$ | Favorevoli  | $\gamma_{G2}$ | 0,8 | 0,8 | 0,8 |
|   | Sfavorevoli |               | 1,5 | 1,5 | 1,3 |
| Azioni variabili Q                          | Favorevoli  | $\gamma_{Q1}$ | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
|   | Sfavorevoli |               | 1,5 | 1,5 | 1,3 |

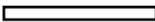
<sup>ii)</sup> Nel caso in cui l'intensità dei carichi permanenti non strutturali o di una parte di essi (ad es. carichi permanenti portati) sia ben definita in fase di progetto, per detti carichi o per la parte di essi nota si potranno adottare gli stessi coefficienti parziali validi per le azioni permanenti.



## ESEMPIO 02\_Setto

Vista frontale



Sezione trasversale  0,25 m