

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI ROMA TRE
FACOLTA' DI ARCHITETTURA



LABORATORIO DI COSTRUZIONI DELL'ARCHITETTURA 2

Fabrizio PAOLACCI, Alessandro RASULO, Lorena SGUERRI

PROGETTO DI STRUTTURE IN C.A.

Il solaio

**ANALISI DELLE SOLLECITAZIONI AGENTI SU DI UN SOLAIO
LATERO-CEMENTIZIO CON L'AUSILIO DEL SAP 2000**

INTRODUZIONE

I programmi di calcolo strutturale della famiglia SAP sono nati alla fine degli anni '60 dall'opera pionieristica di Ed. Wilson, studente di Clough Penzien all' University of California, Berkeley, dove il Prof. Wilson ha insegnato e di cui attualmente è professore emerito.

Lo sviluppo del programma SAP è nato dall'interazione fra mondo accademico e industria, dal momento che a partire dal 1963-65, Wilson ha lavorato come ingegnere nella società Aerojet General Corp. Di Sacramento in California. Qui le necessità di calcolo legate alla progettazione aero-spaziale hanno fatto da propulsore alla messa a punto di uno strumento di analisi che sfruttasse le potenzialità della formulazione agli elementi finiti, all'epoca appena messa a punto in ambiente accademico.

Negli anni febbrili a cavallo fra i '70 e gli '80, definiti da qualche commentatore "gli anni della rivoluzione degli elementi finiti", il programma subisce progressive evoluzioni fino alla versione SAP IV, il cui codice, liberamente distribuito da Ed Wilson e collaboratori, è tuttora il motore di molti dei programmi di analisi attualmente in commercio.

La possibilità di poter usare il SAP come strumento di analisi non-lineare è dovuta invece a Klaus-Jyrgen Bathe, studente di Wilson a Berkeley. Il programma NONSAP si è progressivamente accresciuto fino a diventare il codice di calcolo ADINA.

Il nome SAP è l'acronimo di "programma per l'analisi strutturale" (Structural Analysis Program), ma nello slogan anglosassone significa anche "esecutore acritico di ordini". Come spiegato da Ed Wilson, nel primo manuale utente del SAP questo gioco di parole è intenzionale.

Gli elementi disponibili nella versione corrente (SAP2000 Nonlinear) sono:

- elementi mono-dimensionali elastici trave/colonna [**Frame**]
- elementi bidimensionali elastici lastra/piastra [**Shell**]
- elementi elastici con stato piano di sforzo/deformazione [**Plate**]
- elementi tridimensionali elastici [**Solid, Asolid**]
- molle lineari collegate a terra [**Spring**]
- elementi non lineari [**Nonlinear Link, Push-over Plastic Hinge**].

Le possibili modalità d'analisi vanno dall'analisi sotto carichi statici (forze e spostamenti concentrati nei nodi, carichi distribuiti, pressioni idrostatiche, azioni termiche e precompressione), a quella di strutture da ponte soggette a carichi

mobili (secondo la teoria delle linee di influenza), alle azione dinamiche (sia analisi statica equivalente con spettro di risposta, che risposta nel dominio del tempo).

È prevista la possibilità di una progettazione assistita da calcolare, ma non è oggetto di esame in queste note visto che è ritenuto più utile dal punto di vista didattico che l'allievo provveda manualmente al dimensionamento e alla verifica della struttura assegnata nell'ambito del Laboratorio.

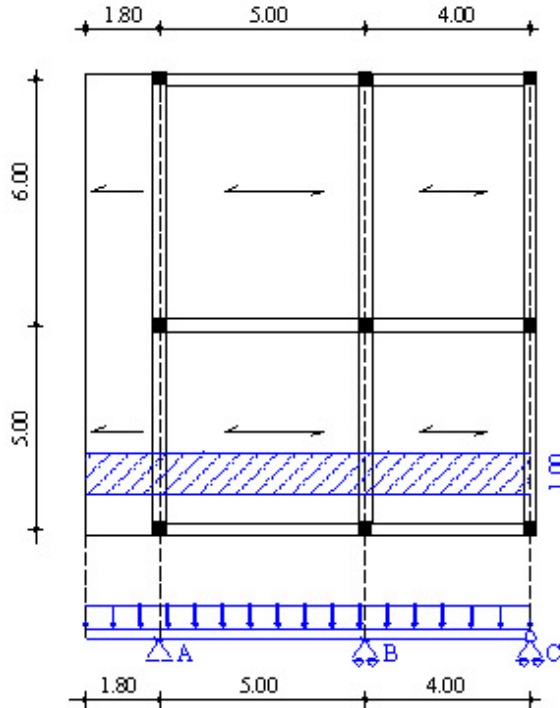
Versioni disponibili per ambiente Windows 95/98/NT/2000

- SAP2000 Educational. Come la versione Nonlinear ma con un limite di 30 nodi, Trattandosi di una versione distribuita a scopo educativo, l'uso commerciale è proibito.
- SAP2000 Standard. Analisi statica e dinamica (analisi spettrale) per telai e strutture bidimensionali. Limite 1500 nodi.
- SAP2000 Plus. Aggiunge alle funzioni della versione standard l'analisi con carichi mobili e l'analisi dinamica nel dominio del tempo nonché l'uso di elementi Plane, Solid e Asolid.
- SAP2000 Nonlinear. Aggiunge alle funzioni della versione Plus gli elementi non lineari.

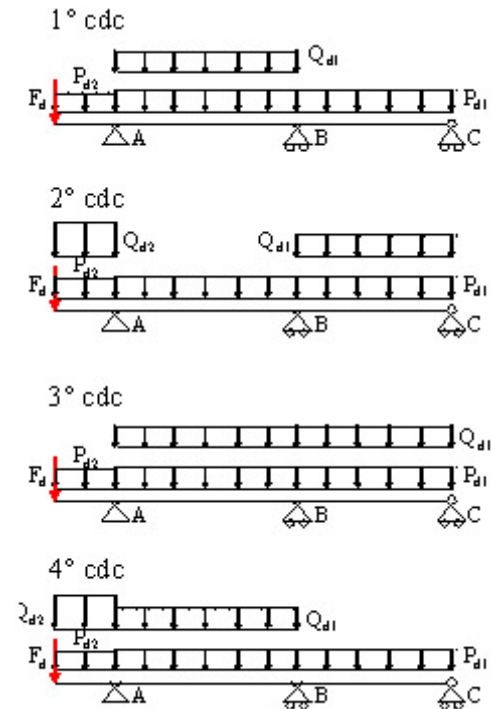
DEFINIZIONE DEL MODELLO GEOMETRICO

Si desidera calcolare il solaio riportato in figura con le relative combinazioni di carico.

Solaio di studio

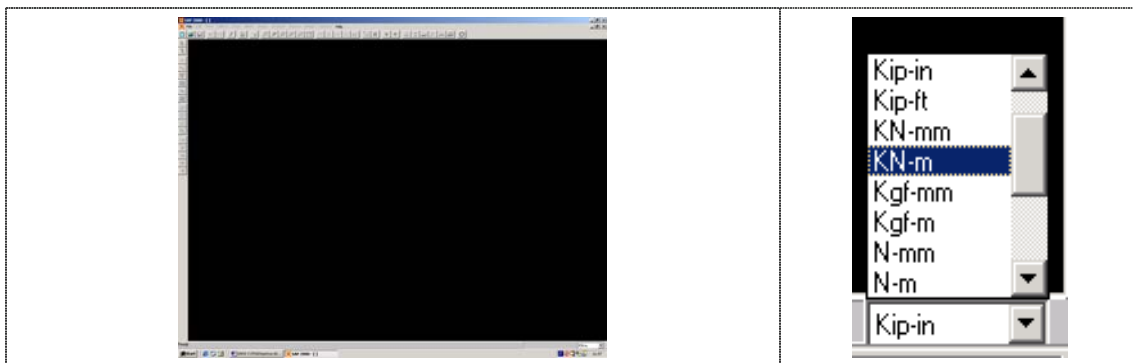


Combinazioni di carico



| Destinazione d'uso | P_k | $P_d = 1.4 \times P_k$ | Q_k | $Q_d = 1.5 \times Q_k$ |
|-----------------------------------|-----------|------------------------|-----------|------------------------|
| Solaio interno: civile abitazione | 4.96 kN/m | 7.00 kN/m | 2.00 kN/m | 3.00 kN/m |
| Balcone | 3.89 kN/m | 5.50 kN/m | 4.00 kN/m | 6.00 kN/m |
| Parapetto | 3.48 kN | 4.90 kN | | |

Una volta avviato il programma, comparirà la finestra con l'ambiente di lavoro, come nella figura seguente:

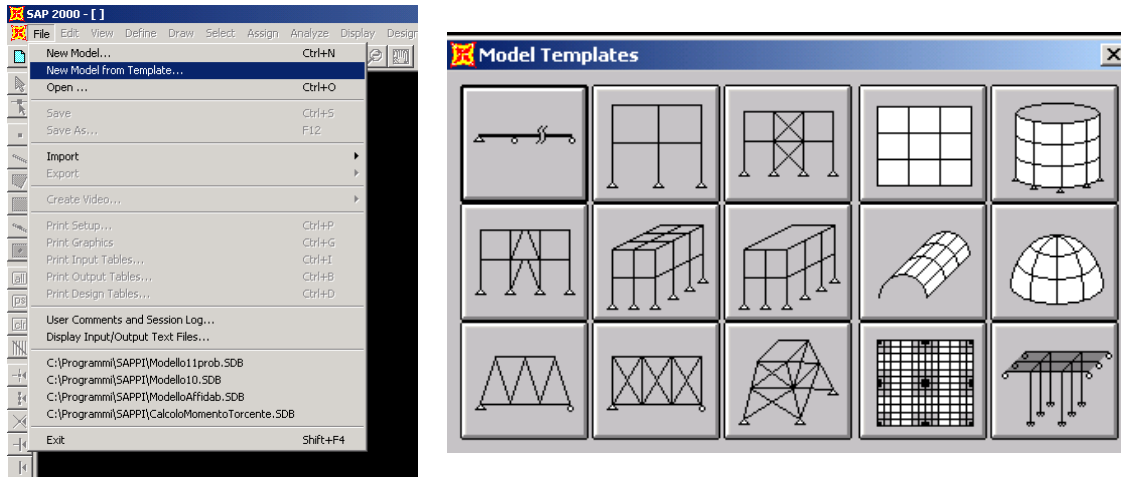


Si procederà innanzitutto selezionando, nell'angolo in basso a destra, le unità di misura più convenienti per l'analisi che si intende condurre (ad es. kN-m).

Si provvederà poi a selezionare dalla barra degli strumenti l'opzione:

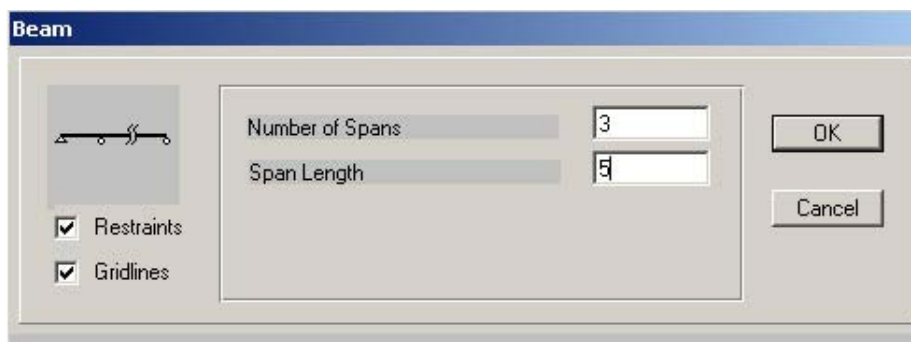
File, New Model from Template...

Apparirà, quindi, il seguente schema, in cui sono elencati i modelli base per i quali il SAP2000 fornisce la possibilità di eseguire una creazione assistita:

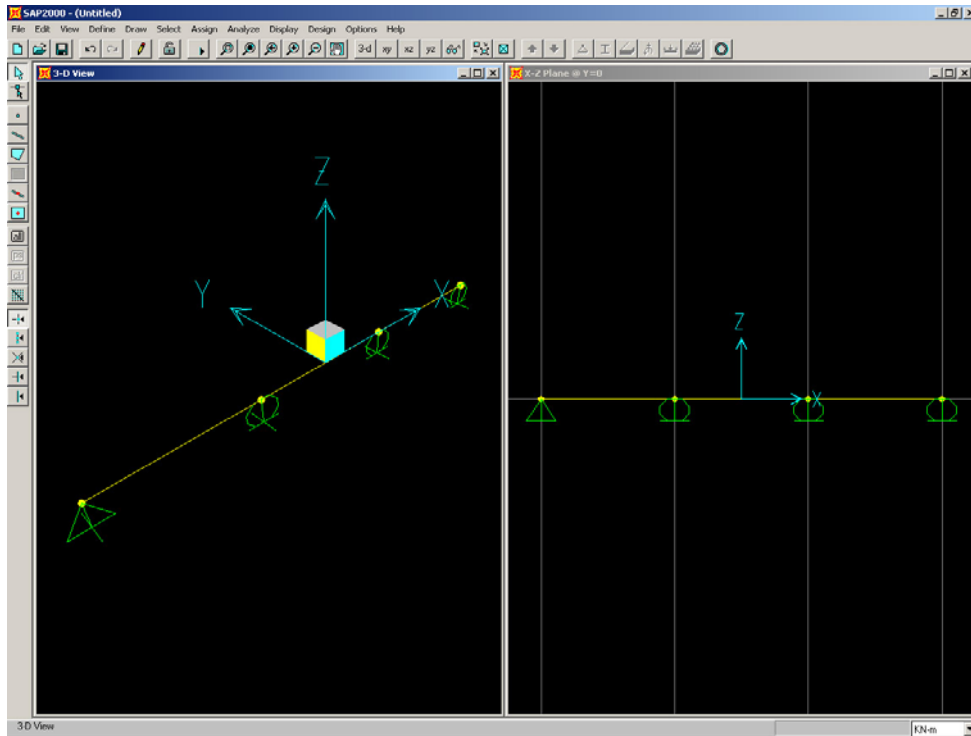


A questo punto, occorre selezionare lo schema statico che più si avvicina alla struttura che si vuole analizzare. Nel caso di un solaio è opportuno scagliere lo schema di trave continua (nell'angolo in alto a sinistra).

Apparirà una schermata in cui vengono richiesti il numero delle campate e la lunghezza (uguale per tutte le campate). Specificare i dati (nel caso in esame 3 campate con lunghezza costante pari a 5 metri) e confermare cliccando **OK**.

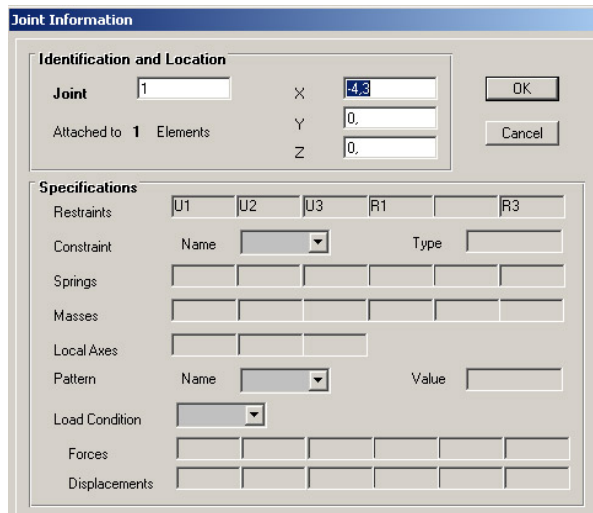
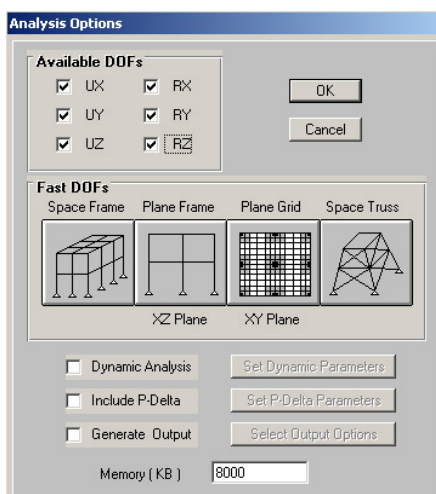


Se tutto è andato come previsto il risultato sarà la seguente schermata:



Si fa notare come la posizione dei vincoli (alle estremità dello sbalzo) e le lunghezze delle campate non coincidono con lo schema statico del nostro esempio; prima di correggere la geometria del modello, provendiamo a rimuovere i gradi di libertà superflui della struttura. Trattandosi di una struttura che giace tutta nel piano XZ (si veda il riferimento cartesiano che compare nella figura precedente) e soggetta ai soli carichi verticali (lungo Z) gli unici gradi di libertà che ci interessano sono: la traslazione lungo l'asse X; la traslazione lungo Z; la rotazione intorno a Y.

Per rimuovere i gradi di libertà indesiderati occorre selezionare sulla barra degli **strumenti: Analyze, Set Options ...** e deselezionare UY; RX E RZ alla voce **Available DOFs** .

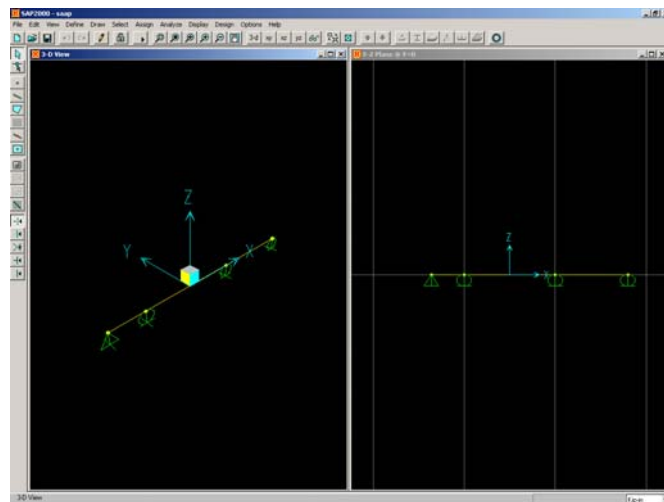
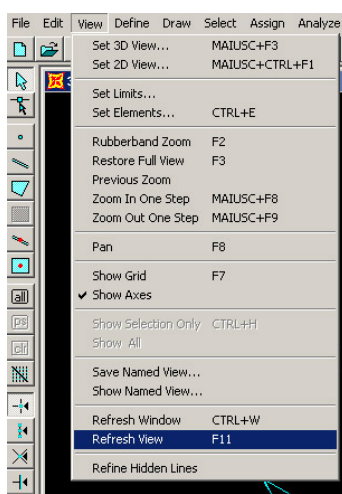


Per correggere la geometria dello schema strutturale, invece, si procede cliccando con il tasto destro del mouse i nodi dei quali si vuole cambiare la posizione ed inserendo le nuove coordinate cartesiane.

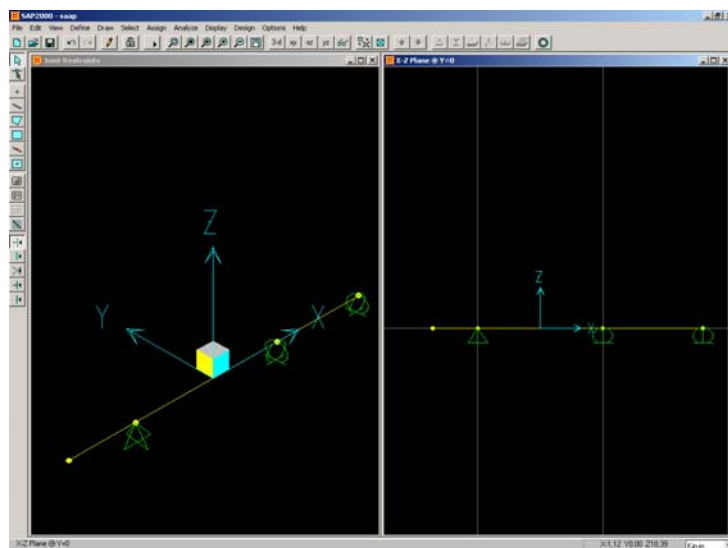
Una possibile definizione delle coordinate, compatibile con la geometria dello schema da analizzare, è riportata nella tabella che segue:

| NUMERO NODO | X(m) | Y(m) | Z(m) |
|-------------|------|------|------|
| 1 | -4.3 | 0 | 0 |
| 2 | -2.5 | 0 | 0 |
| 3 | 2.5 | 0 | 0 |
| 4 | 6.5 | 0 | 0 |

Dopo aver modificato le coordinate dei nodi ed eseguito una rigenerazione grafica di entrambe le viste col comando: **View, Refresh View**, lo schermo dovrebbe apparire come segue:

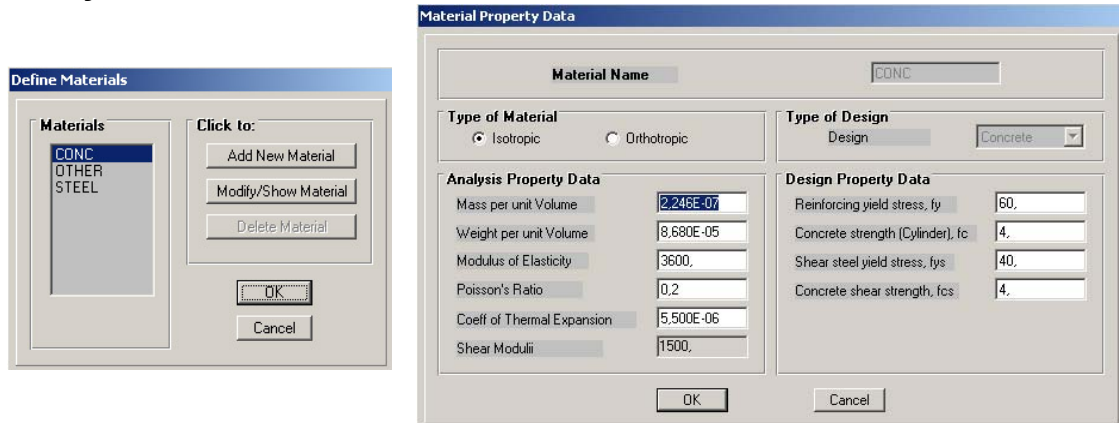


Per completare la definizione della geometria dello schema non resta che modificare, se serve, i vincoli. Selezionare, quindi, i nodi sui quali apportare le modifiche e utilizzare lo strumento **Assign, Joint, Restraint...**; ad esempio, per eliminare il vincolo dall'estremità dello sbalzo, bisogna ridare al nodo tutti i suoi gradi di libertà nel piano.



DEFINIZIONE DEI MATERIALI

Selezionare dalla barra degli strumenti **Define, Materials...**, in modo da ottenere la seguente finestra; il programma ha già predefinite le proprietà del calcestruzzo (*concrete*) e dell'acciaio (*steel*). L'utente può aggiungere nuovi materiali cliccando su **Add New Material**; se invece si vuole verificare o modificare le proprietà dei materiali già esistenti occorre cliccare su **Modify/Show Material**

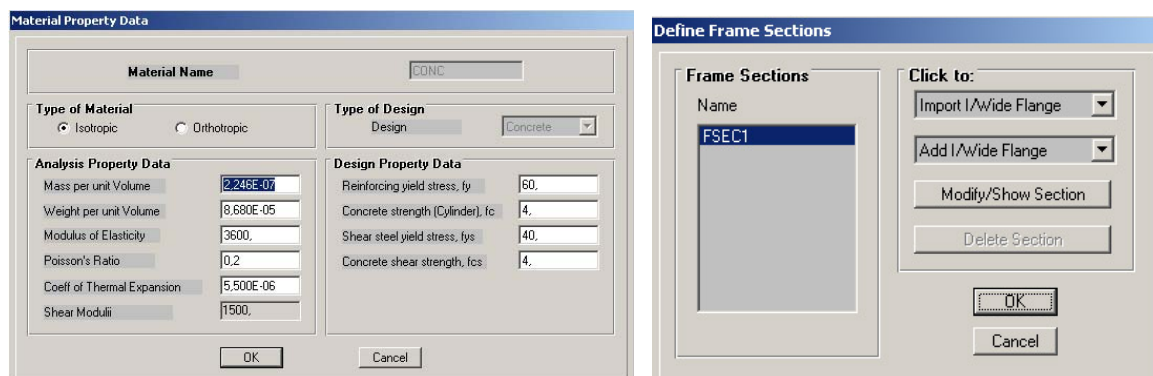


Verificare che le proprietà predefinite possano andare bene per il caso che si vuole analizzare. Qualora ci si accorgesse che qualcosa non va, si può cambiare l'input selezionando le singole caselle e introducendo il valore voluto. Nel nostro caso (soffitto in struttura mista) non è necessario modificare alcun valore.

DEFINIZIONE DEGLI ELEMENTI

Per controllare le modalità di visualizzazione degli elementi occorre selezionare la voce **View, Set Elements...**

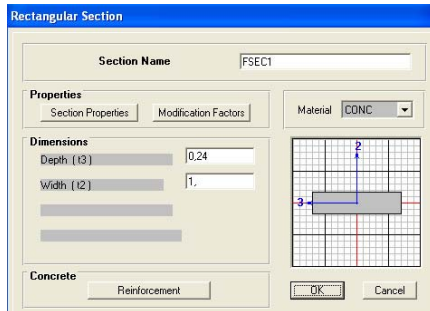
È utile al fine di verificare visivamente il corretto orientamento degli elementi di soffitto, che l'opzione **Show Extrusions** sia selezionata



Per definire la sezione del soffitto occorre selezionare **Define, Frame Sections...**

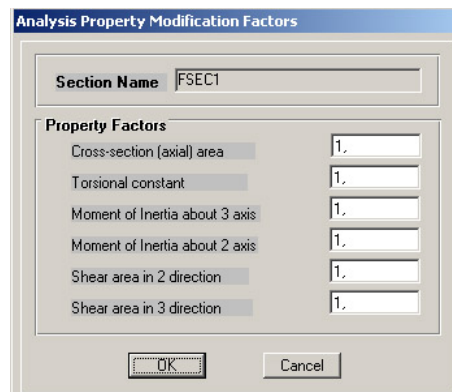
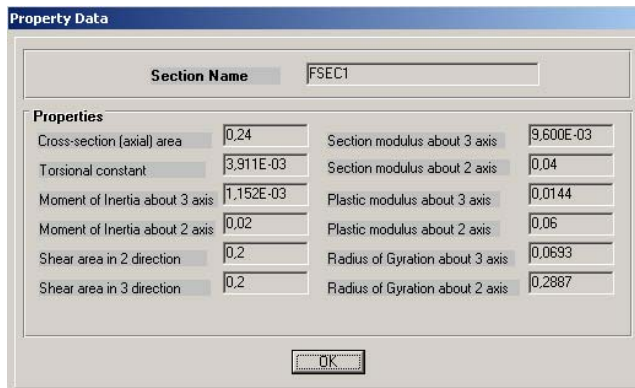
È già definita una sezione rettangolare di default (FSEC1); è possibile modificare questa sezione, quanto importare o aggiungerne di nuove.

Per modificare la sezione esistente basta selezionare **FSEC1** e poi cliccare su **Modify/Show Section**. Dal momento che vogliamo modellare una fascia di solaio la cui larghezza (**Width**) è 1m, e la cui altezza (**Depth**) è 0.24, la sezione andrà impostata con questi dati; è possibile anche definire un nome da assegnare alla sezione scrivendolo nel campo **Section name**. Assicurarsi che il materiale (**Material**) coincida con quello definito prima (CONC).



Cliccando su **Section Properties**, è possibile verificare anche le proprietà geometriche relative alla sezione appena definita, dato che il SAP le calcola in automatico.

Se si reputa opportuno modificare le proprietà appena visualizzate, si può **cliccare sul bottone Modification Factor** per introdurre dei coefficienti moltiplicativi.



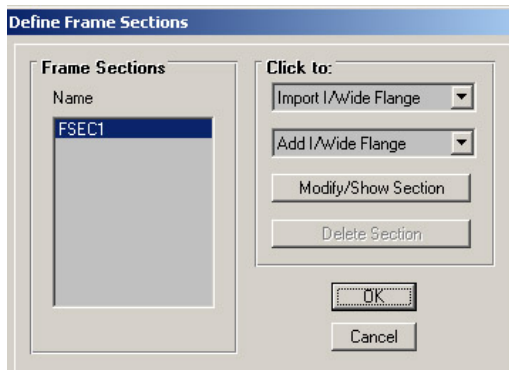
Si fa notare che nel caso della sezione in calcestruzzo le proprietà sono calcolate supponendo la sezione interamente reagente, trascurando quindi l'effetto di parzializzazione indotto dalla formazione di fessure nel lembo teso. Un simile effetto ha grande influenza ai fini di un calcolo accurato delle frecce di inflessione del solaio per il quale è opportuno tenere in conto l'effetto di riduzione dell'inerzia ad opera della fessurazione, ma tale fenomeno non influenza significativamente il calcolo delle sollecitazioni e verrà pertanto trascurato in questa sede.

Per assegnare una particolare sezione ad un elemento presente nel modello, bisogna selezionarlo e quindi attivare i comandi **Assign, Frame, Section...** scegliere la sezione desiderata e premere **OK**.

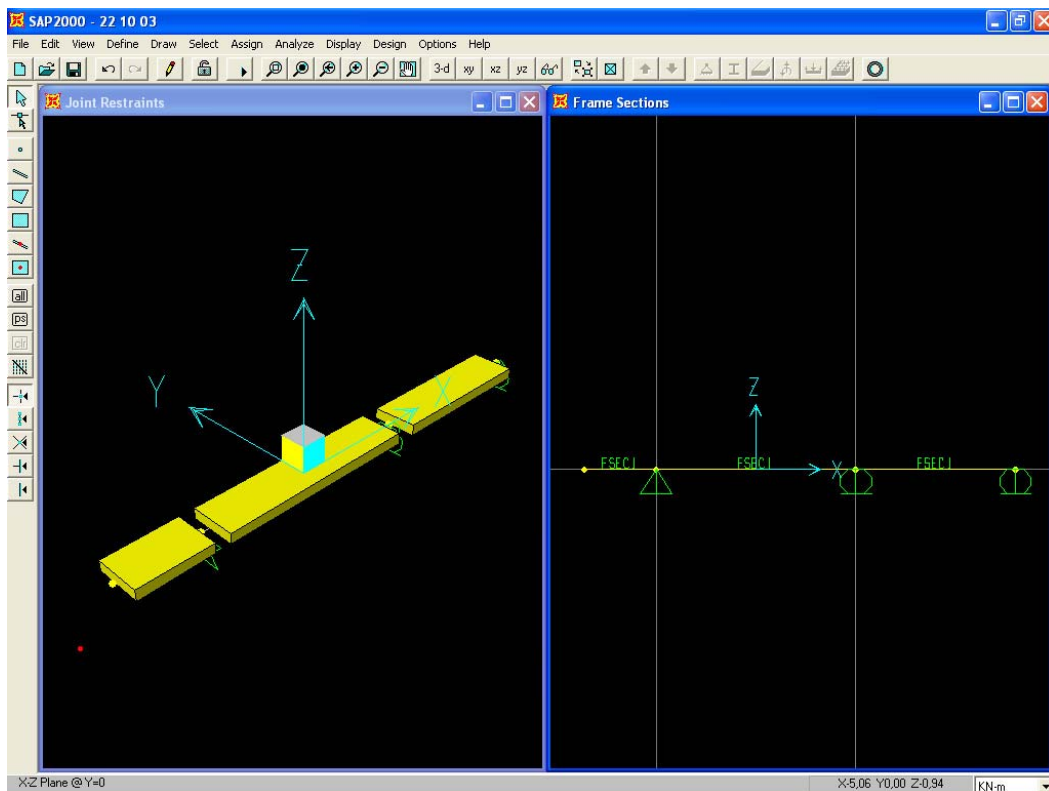
Attenzione: Ai fini dell'analisi del solaio, assegnare una sezione è un'operazione superflua, poichè le sezioni delle varie campate sono tutte uguali tra loro e quindi la soluzione dello schema iperstatico non dipenderà dalle loro caratteristiche geometriche né dalle caratteristiche meccaniche del materiale.

In secondo luogo, il SAP è in grado di calcolare autonomamente il peso degli elementi strutturali aggiungendolo ai carichi assegnati. Nel caso del solaio, tuttavia, il peso della sezione, che non è in calcestruzzo pieno, ma mista in

latero-cemento, è già stata calcolata e inclusa nei carichi che bisogna andare ad assegnare.



Se tutto è andato come previsto si otterrà lo schema riportato in figura, grazie al quale è possibile valutare visivamente che la larghezza e l'altezza delle sezioni siano state assegnate in maniera corretta. In caso contrario, bisogna intervenire o correggendo la sezione o ridefinendo gli assi locali dei singoli elementi attraverso i comandi **Assign, Frame, Local Axes...**

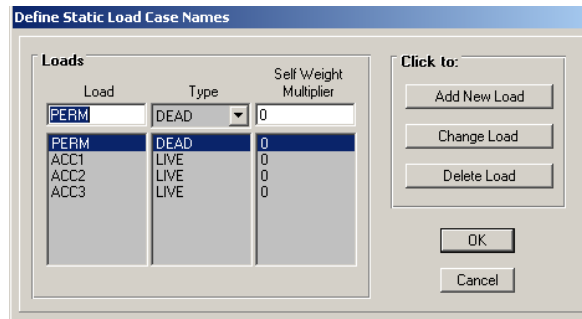


Attenzione: Non bisogna confondere il sistema di riferimento globale della struttura (**X,Y,Z**) con gli assi locali di ogni elemento che la compone (**1,2,3**): l'asse **1** è sempre parallelo all'asse dell'elemento, mentre gli assi **2** e **3** sono tangenti alla sua sezione. Per visualizzarli sullo schermo si può dare il comando **View, Set Elements... Show Local Axes**.

Una volta definiti gli elementi e controllato che il loro orientamento sia corretto è il caso di ripristinare la modalità di visualizzazione senza estrusione. Come già illustrato in precedenza, il comando è: **View, Set Elements...** Bisognerà, quindi, deselezionare la casella **Show Extrusion**.

DEFINIZIONE DEI CARICHI

Per definire i carichi occorre utilizzare il comando **Define, Static Load Case...** dove è possibile specificare per ogni singolo carico il nome (**Load**) ed il tipo (**Type**).



Attenzione: dal momento che il carico permanente che si andrà ad applicare sul modello include anche il peso proprio della struttura, è opportuno imporre che il moltiplicatore di peso proprio (**Self Weight Multiplier**) sia sempre zero.

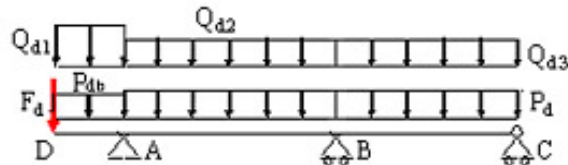
Per il caso in esame, possono essere definite 4 forme di carico:

PERMANENTE

ACC1 (variabile 1° campata)

ACC2 (variabile 2° campata)

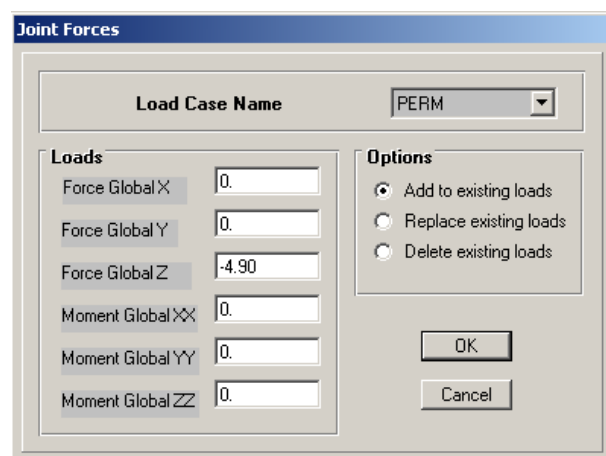
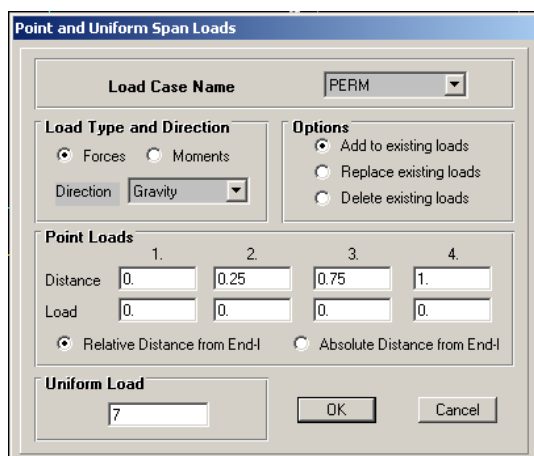
ACC3 (variabile 3° campata)



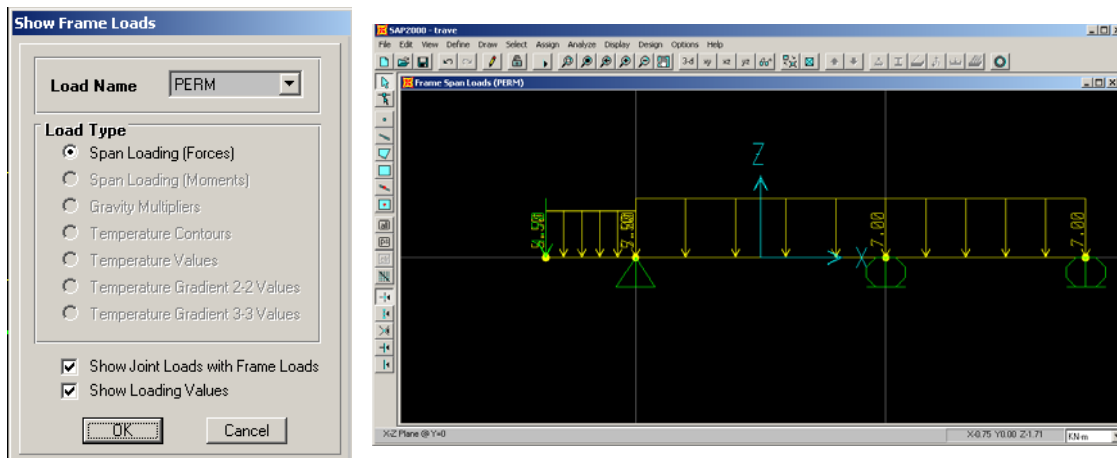
Per applicare i carichi bisogna selezionare gli elementi di solaio su cui i singoli carichi insistono ed eseguire il comando **Assign, Frame Static Load..., Point and Uniform**

Ad esempio, per assegnare il carico permanente bisogna selezionare le 3 campate, scegliere PERM in **Load Case Name**, la sottostante opzione Gravity, inserire il valore desiderato nella casella **Uniform Load** e dare l'OK. La mensola, essendo soggetta ad un carico diverso, deve essere selezionata a parte, sebbene l'operazione da compiere sia esattamente la stessa.

Per assegnare il carico puntiforme sull'estremità libera della mensola, invece, bisogna selezionare il nodo ed eseguire il comando **Assign, Joint Static Load..., Forces** e procedere come illustrato in figura.



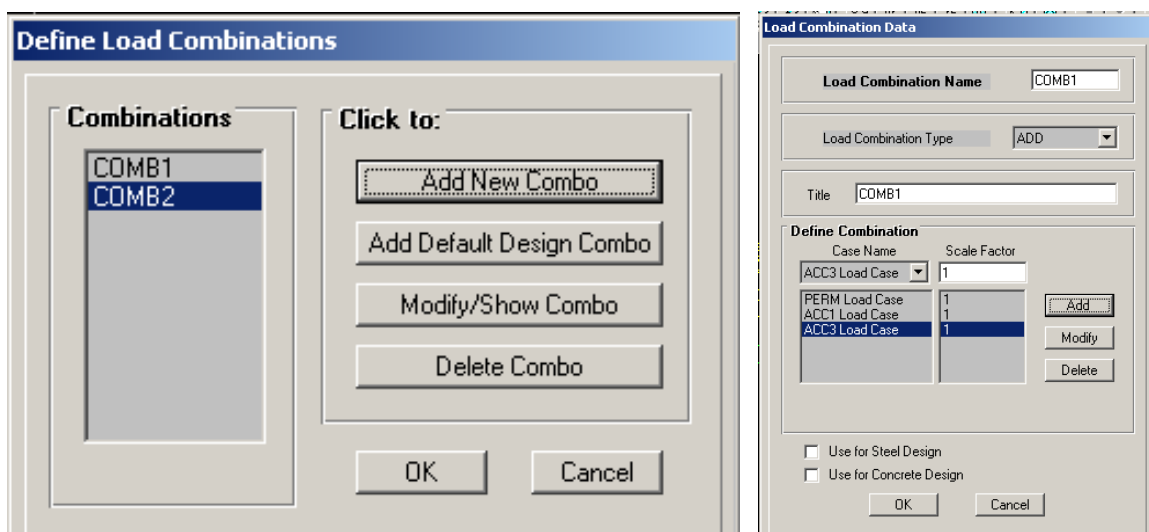
Una volta completata l'operazione, tutti i carichi permanenti possono essere visualizzati assieme selezionando Display, Show Loads, Frame come indicato nella figura seguente:



In maniera analoga si può procedere per assegnare i carichi accidentali, facendo attenzione a selezionare ACC1, ACC2 ecc... a seconda dei casi.

Fatto questo, possono essere definite le diverse combinazioni di carico (indicate con le sigle COMB1, COMB2, COMB3, COMB4 ecc...): il comando è **Define, Load Combination...**

Per aggiungere una nuova combinazione bisogna selezionare **Add New Combo**; è possibile definire il nome della combinazione (**Load Combination Name**), i carichi che devono essere combinati assieme (**Case Name**) ed i rispettivi moltiplicatori (**Scale Factor**). Dal momento che i moltiplicatori di combinazione (responsabili della trasformazione da carico caratteristico a carico di progetto) sono già stati inclusi nei valori del carico base, i moltiplicatori devono avere valore unitario. In caso contrario, se sono stati inseriti i valori caratteristici, è possibile inserire qui i coefficienti di sicurezza ($P_d=1,4 \times P_k$; $Q_d=1,5 \times Q_k$).



Per quanto riguarda l'esempio, le combinazioni di carico sono cinque:

- COMB1= PERM +ACC2
- COMB2= PERM +ACC1+ACC3 (Modalità ADD)
- COMB3= PERM +ACC2+ACC3 (Modalità ADD)
- COMB4= PERM +ACC1+ACC2 (Modalità ADD)
- ENVE= COMB1+ COMB2+ COMB3+ COMB4 (Modalità ENVE)

Le prime quattro corrispondono agli schemi delle combinazioni di carico (modalità ADD, cioè i carichi vengono sommati), mentre l'ultima fornisce il diagramma di involuppo delle quattro combinazioni.

Completato il modello, può essere eseguita l'analisi, non prima però di aver salvato il file di input. Selezionando il comando **Analyze, Run**, il SAP dovrebbe fornire molto velocemente i risultati.

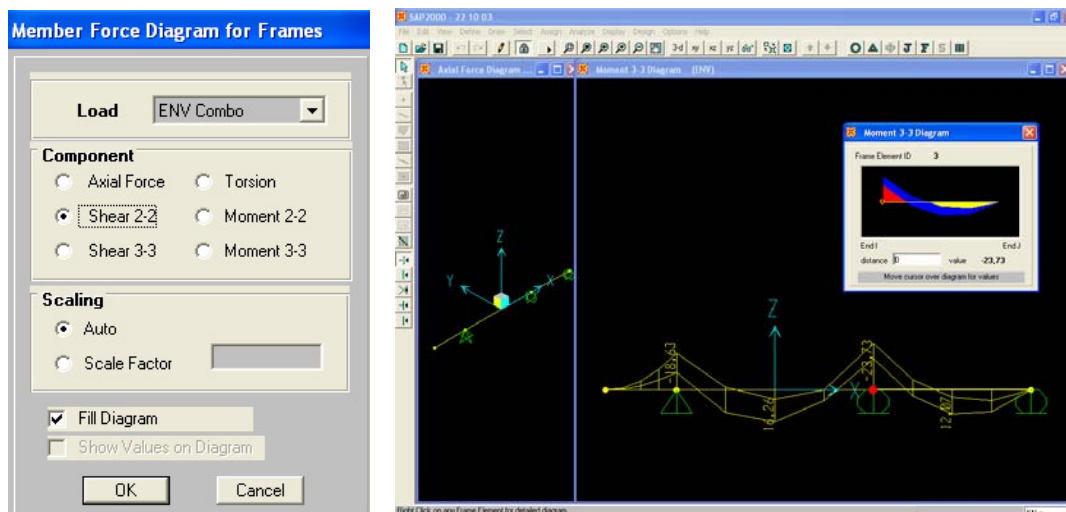


Di default il SAP riporta, al termine dell'esecuzione la deformata del primo carico definito (nel nostro caso PERM).

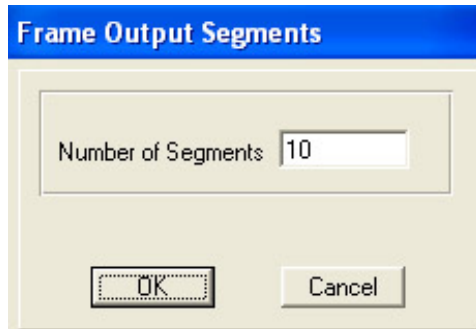
I valori degli spostamenti nodali possono essere visualizzati selezionando il nodo di cui si vuole conoscere lo spostamento e quindi cliccando il tasto destro del mouse.

Per la visualizzazione di tutti gli altri risultati occorre selezionare il comando **Display** e scegliere l'opzione desiderata; in particolare per visualizzare i diagrammi relativi alle varie combinazioni di carico occorre selezionare **Display, Show Element Forces/Stresses, Frame**.

Definita la combinazione di interesse (**Load**), posso ottenere il diagramma del taglio selezionando **Shear 2-2** (componente di taglio parallela all'asse locale 2), oppure il diagramma del momento selezionando **Moment 3-3** (momento intorno all'asse locale 3). L'opzione **Show Values on Diagramm** permette di visualizzare i valori principali, mentre tutti gli altri valori del grafico possono essere visualizzati cliccando col tasto destro del mouse sul tratto di interesse.



Nella figura è riportato il diagramma di involuppo delle varie combinazioni di carico, così come fornito dal SAP. Si tratta di uno strumento progettuale molto utile dal momento che rappresenta i valori massimi e minimi di sollecitazione che devono essere presi in considerazione al momento del dimensionamento e della verifica della struttura.



Attenzione: possono essere ottenuti grafici migliori selezionando, in fase di modellazione, i vari elementi e utilizzando il comando **Assign, Frame, Output Segments...**

Occorre, infatti, aumentare il numero dei segmenti in cui si considera suddiviso l'elemento (10 potrebbe essere un valore adeguato).

Se, una volta fatta l'analisi, si desidera apportare una modifica al modello iniziale (come, per esempio, gli output segments) bisogna cliccare sull'icona sulla quale è riportato un lucchetto. In questo modo si perdono i risultati dell'analisi appena eseguita, si possono fare le modifiche per far nuovamente correre il programma.

VERIFICA DEI RISULTATI

È importante non dare per scontato che i diagrammi delle sollecitazioni forniti dal SAP siano necessariamente esatti, poiché siamo noi ad inserire i dati ed il modello e quest'operazione non è esente da errori. Per essere sicuri dell'attendibilità del risultato, quindi, occorrerà eseguire alcuni semplici controlli come:

- verificare che i diagrammi di taglio e momento siano congruenti con il modello della trave continua;
- verificare che i diagrammi di taglio e momento siano congruenti con i carichi applicati.

Ad esempio, con riferimento alla figura sottostante, controllare che:

- $(T_A'' + T_B') / L_{AB} = (P_{d1} + Q_{d1})$, ecc... (in valori assoluti)
- $T_D = F_d$ (in valori assoluti)
- $M_A = F_d \times L_{DA} + P_{d2} \times L_{da}^2 / 2$ (in valori assoluti)

