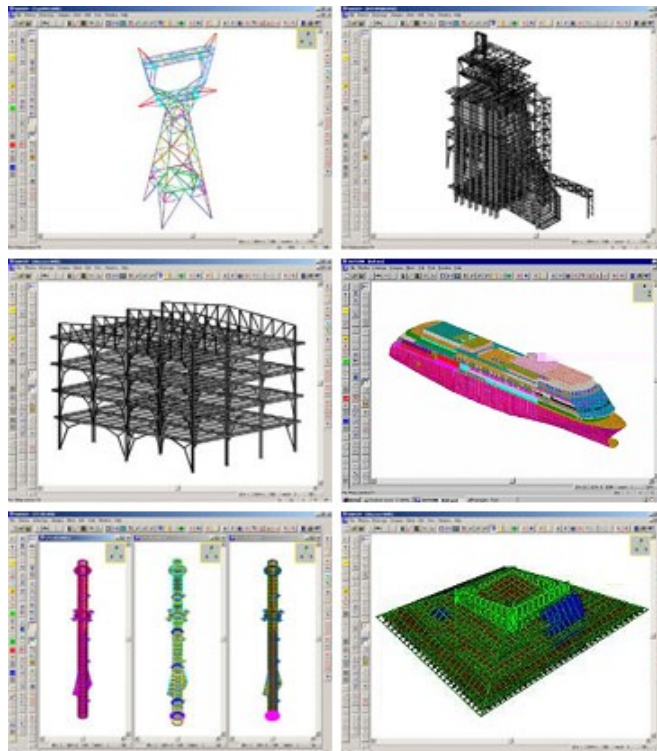


TUTORIAL DI SARGON

Conoscere il programma in modo guidato



Tutorial 8

Analisi nonlineare per nonlinearity di materiale (truss)

Gennaio 2014 - Rev. 1



www.castaliaweb.com

info@castaliaweb.com

tel. +39 (0)2 266 81 083

fax +39 (0)2 26681876

Via Pinturicchio, 24

20133 Milano, Italy



www.castaliaweb.com info@castaliaweb.com

© 2014 – Castalia s.r.l. – All rights reserved

PARTE 1: INTRODUZIONE AL TUTORIAL	4
1.1 SCOPO DEI TUTORIAL DI SARGON	4
1.2 LIMITAZIONI.....	4
1.3 IL CONTENUTO DI QUESTO TUTORIAL	4
1.4 I PRINCIPALI COMANDI UTILIZZATI IN QUESTO TUTORIAL	5
PARTE 2: IL MODELLO FEM	6
2.1 GENERALITÀ.....	6
2.2 DEFINIZIONE DI BIELLE NONLINEARI (NO TENSION).....	7
2.3 PREPARAZIONE DEI CASI PER L'ANALISI NONLINEARE CON CURAN	10
PARTE 3: ANALISI STATICA NONLINEARE.....	14
3.1 IMPOSTAZIONE ED ESECUZIONE.....	14
3.2 RISULTATI.....	16

PARTE 1: INTRODUZIONE AL TUTORIAL

1.1 Scopo dei tutorial di Sargon

Lo scopo dei tutorial di Sargon è di **aiutare l'utente a familiarizzare con il programma** attraverso un **percorso guidato**.

La sequenza delle operazioni segue un filo logico chiaro e lineare, che l'utente è invitato a seguire passo per passo. **Suggeriamo quindi di eseguire in tempo reale** ciò che viene spiegato, in modo da prendere dimestichezza con i comandi principali e con le operazioni più frequenti. In questo modo, sarà poi più facile approfondire gli aspetti ritenuti più rilevanti sulla base delle proprie esigenze progettuali, grazie alle informazioni dettagliate presenti nella **guida** del programma e nelle **videolezioni** gratuite presenti sul nostro sito web (www.castaliaweb.com, nell'area dedicata alla *Validazione*).

Nota: nel testo sono presenti note e suggerimenti, evidenziati in riquadri come questo. Si tratta di piccoli approfondimenti che il lettore può anche tralasciare in una prima lettura, oppure leggere senza eseguire le operazioni eventualmente indicate.

1.2 Limitazioni

Poiché l'obiettivo è fornire una **panoramica generale** delle operazioni necessarie alla creazione, all'analisi e alla verifica dei modelli, in questo contesto non si affrontano nel dettaglio aspetti legati a funzionalità o comandi specifici, per i quali si rimanda alle **videolezioni** o alla **guida** del programma. Nei tutorial sono comunque presenti note di approfondimento e suggerimenti, quando necessario.

Per ragioni di semplicità e chiarezza, i modelli utilizzati in questi tutorial non hanno lo scopo di essere realistici da un punto di vista progettuale, bensì quello di esemplificare le procedure e le modalità di lavoro con il programma.

1.3 Il contenuto di questo tutorial

In questo tutorial vengono affrontati i seguenti temi:

- Definizione di un materiale nonlineare (di tipo no tension) per le bielle.
- Preparazione dei casi di carico per l'analisi nonlineare con CURAN.
- Impostazione ed esecuzione dell'analisi nonlineare.
- Analisi dei risultati

1.4 I principali comandi utilizzati in questo tutorial

Nel presente testo, quando si fa riferimento a un comando del programma, lo si indica nel seguente formato: **[menu] – [eventuale sottomenu] – [comando]**. Inoltre, se il comando ha un bottone, viene riportata la sua immagine. I principali comandi illustrati in questo tutorial sono i seguenti.

Edit – Casi – Combina

Si assume che i comandi già trattati nei precedenti tutorial siano ormai familiari al lettore.

Di seguito vengono fornite alcune linee guida generali (ma non esaustive) sulla posizione dei bottoni nell'interfaccia di Sargon.

Nella parte **sinistra** dell'interfaccia ci sono i bottoni dei comandi per la creazione del modello, per la gestione di casi, azioni e combinazioni e per la visualizzazione dei risultati.

In **alto**, subito sotto ai menu, ci sono i comandi per la gestione dei modelli (apertura, salvataggio, ecc.) per la gestione delle viste (zoom, pan, opzioni di visualizzazione, ecc.) e per la selezione degli elementi.

A **destra** ci sono i bottoni relativi ai comandi di interrogazione.

Buon lavoro!

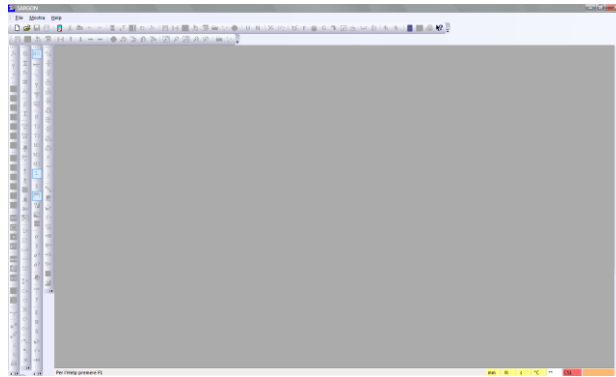
Importante! Si ribadisce che in questo contesto l'obiettivo NON è creare modelli progettualmente significativi, bensì di spiegare in modo chiaro le procedure che si possono utilizzare e le problematiche correlate che si possono riscontrare. **Per questa ragione, la modellazione può risultare incompleta o non ottimale da un punto di vista ingegneristico, al fine di evitare la ripetizione di cose già spiegate e concentrarsi su determinati temi.**

PARTE 2: IL MODELLO FEM

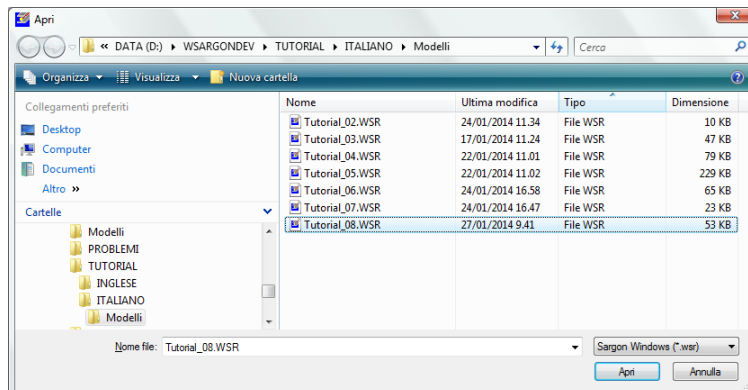
2.1 Generalità

In questo tutorial non partiremo da zero, bensì dal modello di una struttura in acciaio già realizzato, scaricabile assieme ai tutorial stessi (il file è *Tutorial_08.WSR*).

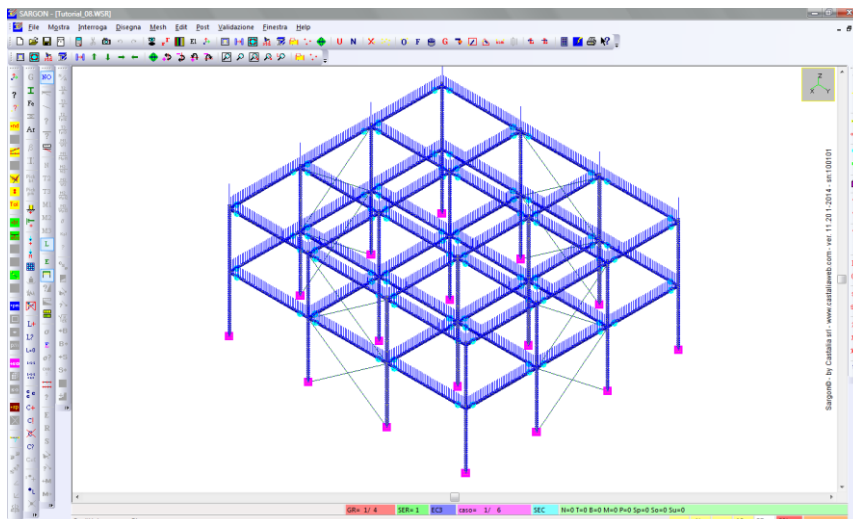
Avviamo Sargon.



Eseguiamo il comando **File – Apri** per aprire un modello presente su disco.




Scegliamo la cartella dove abbiamo salvato *Tutorial_08.WSR* e apriamo il modello.

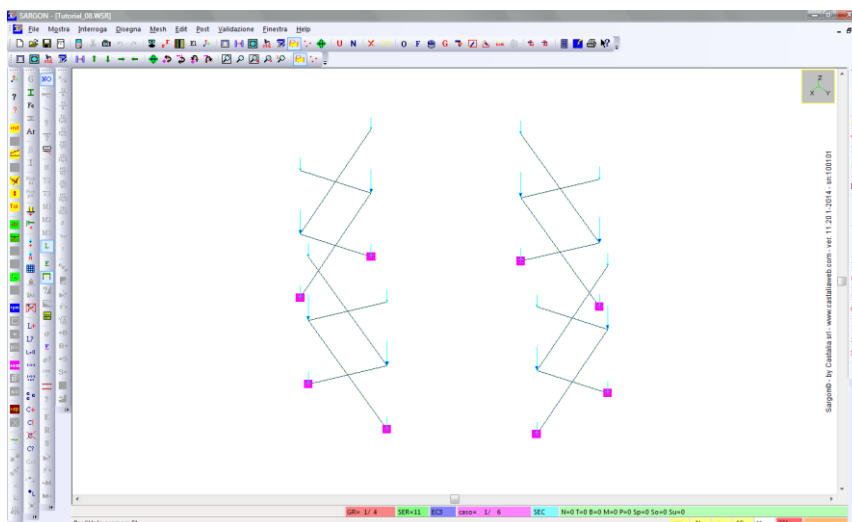
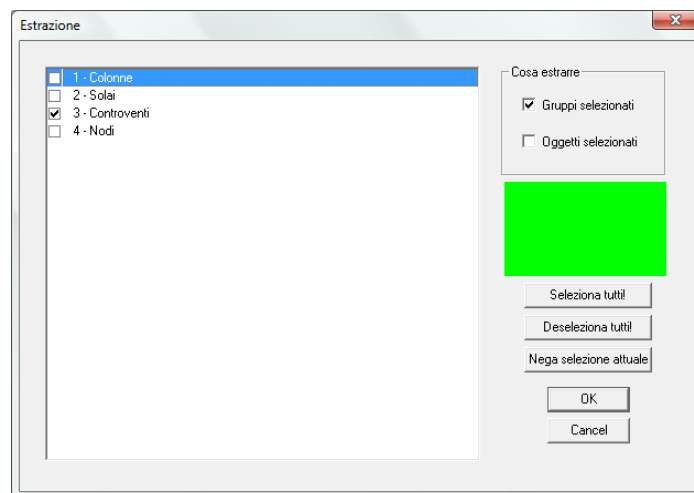




Il modello è composto da beam e da elementi elementi truss; sono presenti sei casi di carico e sette combinazioni. Il numero dei casi e di combinazioni non ha la pretesa di essere esaustivo. Anche il valore delle azioni definite è indicativo. L'obiettivo è di avere un **esempio semplice per spiegare in modo chiaro** le funzionalità del programma.

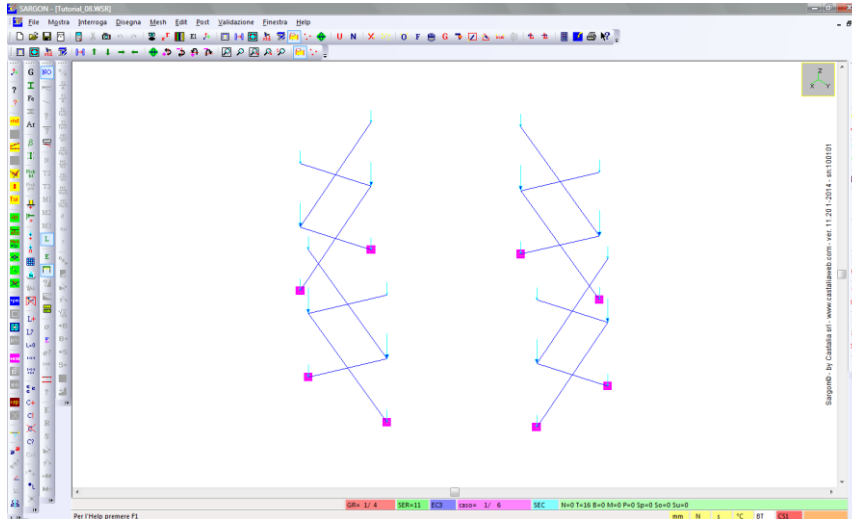
2.2 Definizione di bielle nonlineari (no tension)

Al momento tutti gli elementi finiti (sia beam che truss) hanno come materiale l'S235. Assegneremo alle bielle un materiale con legge costitutiva di tipo no compression, in modo che questi elementi lavorino solo in trazione.

Per maggiore chiarezza, eseguiamo il comando **Disegna – Estrai** , spuntiamo il gruppo *Controventi* (già definito nel modello), spuntiamo *Gruppi selezionati* e clicchiamo OK.



Attiviamo la selezione degli elementi *Travi e Bielle* (**Edit – Seleziona – Oggetti**  o click sulla relativa casella in basso a destra nell'interfaccia). Selezioniamo tutte le bielle .

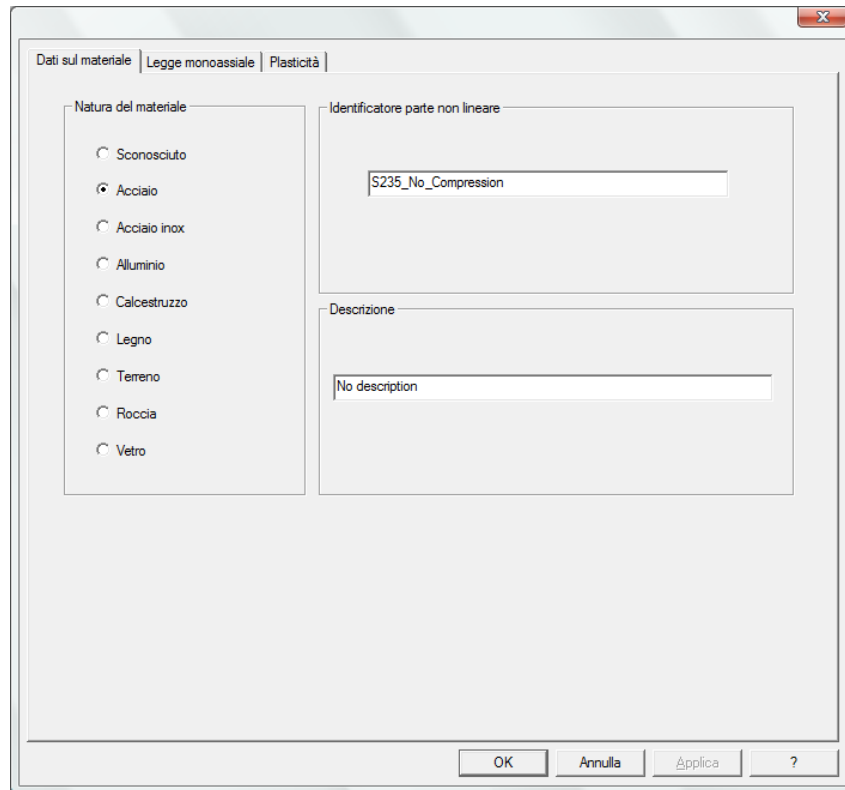


Eseguiamo **Edit – Proprietà – Materiale** Fe e rispondiamo NO quando ci viene chiesto se vogliamo scorrere gli archivi. In questo modo definiremo un nuovo materiale. Definiamo un materiale chiamato “S235_NC” (che sta per no compression) avente le proprietà mostrate nell’immagine seguente. Definiti i vari dati, clicchiamo *Non linearità*.

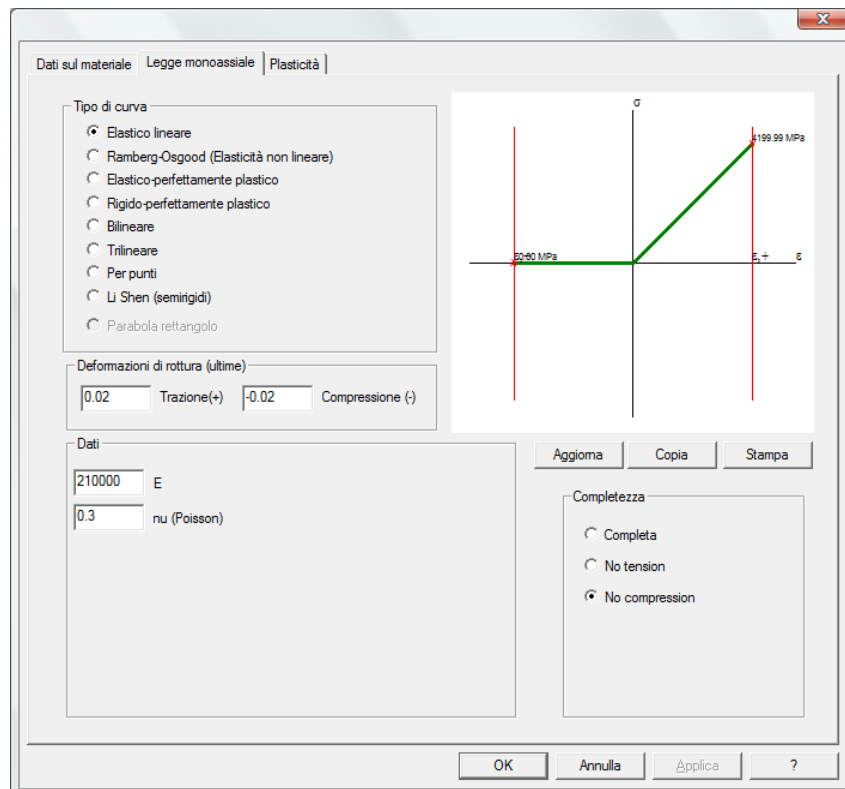
Nome	Valore	Descrizione
S235_NC		Nome
7.701e-005		g (peso per unità di volume)
210000		E (modulo di Young)
0.3		nu (coefficiente di Poisson)
235		Fy (tensione di snervamento)
360		Ft (tensione di rottura)
1.2e-005		alpha (coefficiente di dilatazione termica)
Non linearità...		mm, N Unità

OK Cancel

Nella prima sezione, chiamata *Dati sul materiale*, possiamo definire la natura del materiale, un identificatore per la parte nonlineare e una breve descrizione. Questi dati sono opzionali.



Nella sezione *Legge monoassiale* possiamo scegliere tra diversi tipi di legge costitutiva (box a sinistra), definendo i necessari parametri e indicando se la legge è completa oppure se c'è solo il ramo positivo (quindi una legge no compression) oppure solo quello negativo (legge no tension).



Nel nostro caso scegliamo una legge di tipo *Elastico lineare*, con $E=210000[\text{N}/\text{mm}^2]$ e coefficiente di Poisson di 0.3. Specifichiamo che si tratta di una legge *no compression*.

L'ultima sezione (*Plasticità*) in questo caso non è rilevante. Premiamo OK. Tornati nel dialogo precedente, premiamo nuovamente OK per assegnare il materiale alle bielle selezionate.

Note: nell'archivio sono già presenti alcuni materiali con leggi costitutive nonlineari. Inoltre, l'utente può aggiungere permanentemente all'archivio di Sargon nuovi materiali, anche nonlineari, con il modulo Samba.

Eseguiamo nuovamente **Disegna – Estrai**  per tornare alla vista completa del modello.

2.3 Preparazione dei casi per l'analisi nonlineare con CURAN

Nell'analisi statica lineare, dopo che sono stati calcolati i risultati dei casi di carico, i risultati nelle combinazioni sono ottenuti sommando linearmente i vari casi di carico, opportunamente fattorizzati.

Nel caso di un'analisi nonlineare, poiché la risposta della struttura viene calcolata iterativamente, applicando il carico in vari step, è necessario un approccio diverso. La definizione di combinazioni lineari come è comunque possibile, ma sono generalmente utilizzabili queste due strategie di calcolo:

1. la prima consiste nel definire dei casi di carico che corrispondano alle combinazioni che si vogliono calcolare; in pratica, le combinazioni di verifica devono essere "trasformate" in casi di carico. Poiché ciò può essere un lavoro lungo, Sargon dispone di un comando che esegue la trasformazione in modo automatico, come vedremo a breve.
2. la seconda consiste nel definire opportuni casi di carico che verranno applicati in sequenza, uno dopo l'altro (load path). In questo modo si possono trattare, ad esempio, condizioni di carico e scarico con incrudimento del materiale.

Vedremo ora la prima strategia di calcolo. Come detto, il modello ha 6 casi di carico e 7 combinazioni di verifica. Le combinazioni sono di tipo lineare additivo ($a \cdot \text{caso 1} + b \cdot \text{caso 2} + c \cdot \text{caso 3}$, ecc.); questo è un requisito necessario per poter utilizzare la procedura di trasformazione automatica. Tale procedura eliminerà i casi di carico attuali e creerà dei nuovi casi di carico il cui numero sarà pari al numero di combinazioni correnti. Ciascun nuovo caso di carico conterrà le azioni, fattorizzate, previste dalla corrispondente combinazione. Vediamo uno schema elementare, con due casi e una combinazione.

Situazione iniziale

Caso 1 originale - Forze verticali – Risultante = 1000N

Caso 2 originale – Forze orizzontali – Risultante = 1000N

Combinazione 1 originale = 1 * Caso 1 + 1.5 * Caso 2

La procedura automatica produrrà un unico caso di carico contenente sia forze verticali (la cui risultante sarà pari a $1 \cdot 1000N = 1000N$) sia forze orizzontali (la cui risultante sarà pari a $1.5 \cdot 1000N = 1500N$). Inoltre verranno generate n combinazioni pari al numero di casi finali (in questo caso uno solo). Ogni combinazione corrisponde a un caso (caso i con moltiplicatore unitario, casi j con moltiplicatore nullo). Ciò è utile per poter utilizzare gli involucri dei risultati. L'utente può comunque modificare, cancellare o sostituire le combinazioni.

Situazione finale

Caso 1 finale – Forze verticali risultante 1000N e Forze orizzontali risultante 1500N

Combinazione 1 finale – 1 * Caso 1

Nel nostro modello abbiamo 6 casi di carico...

Casi di Carico		
caso=	1	: GRAVITA' Peso proprio
caso=	2	: PERMANENTI Pemanenti
caso=	3	: VARIABILI Variabili
caso=	4	: NEVE Neve
caso=	5	: VENTO Vento X
caso=	6	: VENTO Vento Y

Casi originali

... e le seguenti 7 combinazioni.

1	1.30	1.30	0.00	0.00	0.00	0.00
2	1.30	1.30	1.50	0.75	0.00	0.90
3	1.30	1.30	1.50	0.75	0.90	0.00
4	1.30	1.30	1.05	1.50	0.00	0.90
5	1.30	1.30	1.05	1.50	0.90	0.00
6	1.30	1.30	1.05	0.75	1.50	0.00
7	1.30	1.30	1.05	0.75	0.00	1.50

Combinazioni originali

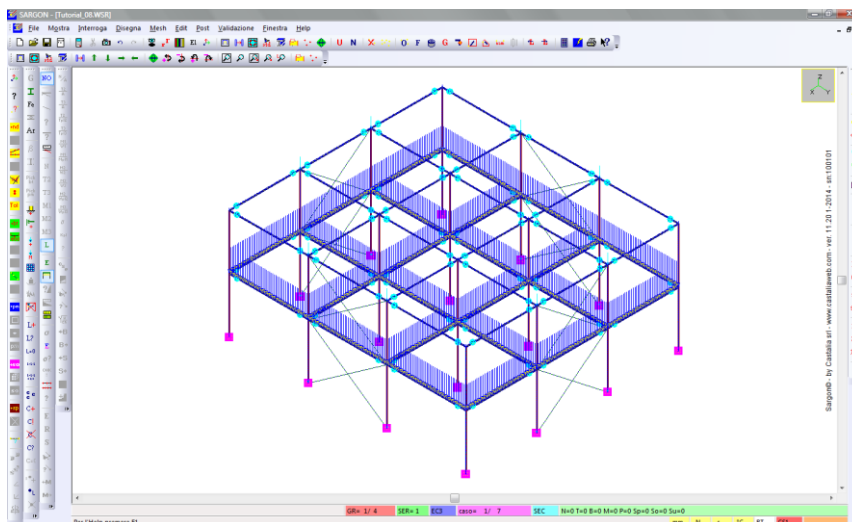
Eseguiamo il comando **Edit – Casi – Combina** e rispondiamo SI alla successiva domanda. Se eseguiamo **Interroga – Casi L?**, vediamo che ora abbiamo 7 casi di carico.

Casi di Carico		
caso=	1	: PERMANENTI Generated by Sargon
caso=	2	: PERMANENTI Generated by Sargon
caso=	3	: PERMANENTI Generated by Sargon
caso=	4	: PERMANENTI Generated by Sargon
caso=	5	: PERMANENTI Generated by Sargon
caso=	6	: PERMANENTI Generated by Sargon
caso=	7	: PERMANENTI Generated by Sargon

Casi finali

Nota: i casi di carico generati con questo comando sono tutti di tipo Permanenti. L'utente, se necessario, può modificare il tipo.

Nota: poiché i casi e le combinazioni originali vengono sovrascritti e non possono essere recuperati, si consiglia di salvare il modello con un altro nome (**File – Salva con nome**) in modo da mantenerne una versione con la situazione originale.



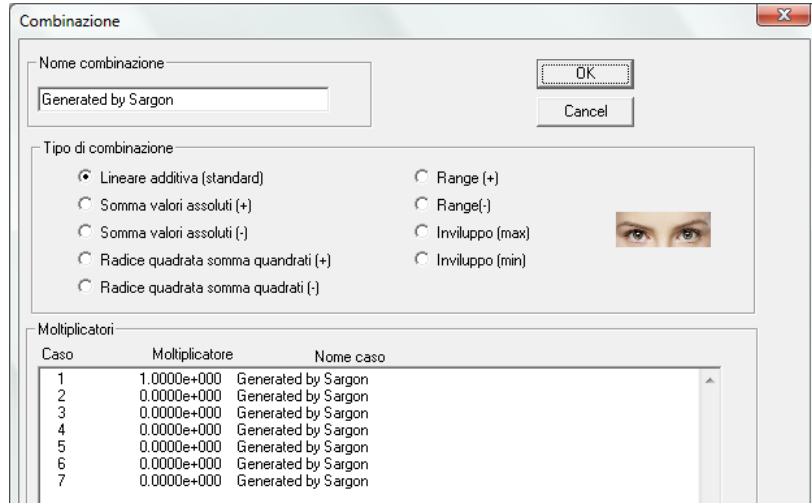
Il caso 1 finale contiene le forze del caso 1 originale amplificate di 1.30 e le forze del caso 2 originale, anch'esse amplificate di 1.30, in accordo alla combinazione 1 originale. I casi finali successivi hanno anche le forze dei casi originali relativi alla neve e al vento, in accordo al prospetto delle combinazioni originali.

Ciascuna delle combinazioni finali corrisponde, come detto in precedenza, a un caso di carico, secondo il prospetto seguente.

1	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00
6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00
7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00

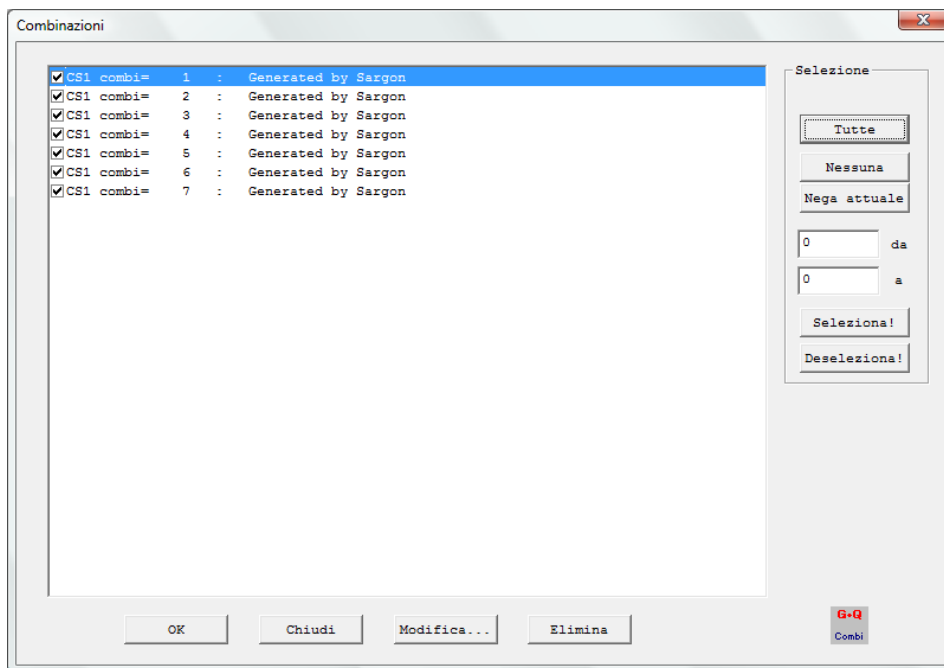
Combinazioni finali

Eseguiamo **Interroga – Combinazioni L?**. Clicchiamo *Modifica* per visualizzare i dettagli della prima combinazione, quella correntemente evidenziata in blu.



Il tipo è lineare additivo, il moltiplicatore del primo caso è pari all'unità e gli altri sono nulli.

Chiudiamo il dialogo della combinazione; in quello principale clicchiamo *Tutte* per selezionare tutte le combinazioni, quindi clicchiamo OK.



Possiamo ora impostare ed eseguire l'analisi nonlineare.


PARTE 3: ANALISI STATICA NONLINEARE

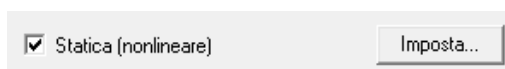
Sargon dispone di diversi solutori interni ed è interfacciato con solutori esterni. Per quanto concerne il secondo aspetto si rimanda alla documentazione del programma. I solutori interni disponibili sono:

- Analisi statica lineare
- Analisi nonlineare per nonlinearità geometrica
- Analisi nonlineare per nonlinearità di materiale
- Analisi modale
- Analisi a spettro di risposta
- Analisi di risposta in frequenza
- Analisi di buckling

Sul sito internet di Castalia (www.castaliaweb.com) sono disponibili centinaia di schede di validazione dei solutori, che includono confronti con risultati teorici e cross-check con altri programmi agli elementi finiti, quali NASTRAN e SAP2000.

3.1 Impostazione ed esecuzione

Eseguiamo **File – Analizza** , spuntiamo solo la casella *Statica (nonlineare)* e clicchiamo il relativo bottone *Imposta*.



Nel successivo dialogo dobbiamo definire i parametri che regolano l'analisi di nonlineare.

Modalità gestione casi di carico: spuntando la casella si attiverebbe il load path, ricorrendo quindi alla seconda strategia di analisi descritta in precedenza. Non mettiamo la spunta.

Strategia di analisi: si stabiliscono il numero massimo di iterazioni desiderato e la modalità di applicazione del carico totale (passi predefiniti o controllo automatico dell'ampiezza del passo a ogni iterazione, con i relativi parametri).

Si possono scegliere il criterio di *convergenza* e il *metodo di analisi*.

Sono poi disponibili parametri per il calcolo di travi e piastre (nel modello corrente gli unici elementi nonlineari sono le bielle) e ulteriori parametri che stabiliscono la precisione del moltiplicatore limite, la tolleranza per il ritorno sul luogo plastico, ecc.

In questa sede manterremo le impostazioni di default. Si rimanda alla guida per una trattazione approfondita del tema.

Guida: “Come preparare ed eseguire il solving” → “Analisi nonlineare con CURAN”.

Acquisizione dati per analisi nonlineare

Modalità gestione casi di carico (stazioni)

Attiva stazioni (load path)

Se non attivate le stazioni, allora casi distinti

Convergenza

Norma errore

SRSS

Norma infinito (max abs, per ogni gdl)

Indicatore

Spostamento 0.001 Tolleranza

Residuo 0.001 Tolleranza

Lavoro 0.001 Tolleranza

Divergenza 50 Tolleranza

Metodo analisi

Newton-Raphson completo

Newton-Raphson modificato

Quasi Newton-Raphson

Numero punti di integrazione Lobatto

10 Piastre (da 3 a 12 o 20)

5 Travi (da 3 a 12 o 20)

Altri parametri

0.0001 Minimo modulo pivot non nulli

0.005 Precisione moltiplicatore limite

Strategia analisi

Iterazioni

20 Massimo numero di iterazioni per passo

Ampiezza passi

Numero passi predefinito

10 Numero di passi per ogni stazione

Controllo automatico ampiezza passo

3 Numero desiderato di iterazioni

0.5 Esponente per la scelta incremento

0.5 Massimo incremento (dlambda, max)

0.01 Minimo incremento (dlambda, min)

Diminuzione automatica ampiezza passo (se no convergenza)

Nonlinearità geometrica

Escludi rigidezza geometrica

Includi rigidezza geometrica

Altri

Stampa messaggi

Interpolazione sforzi ai nodi

Numero fibre (elementi trave)

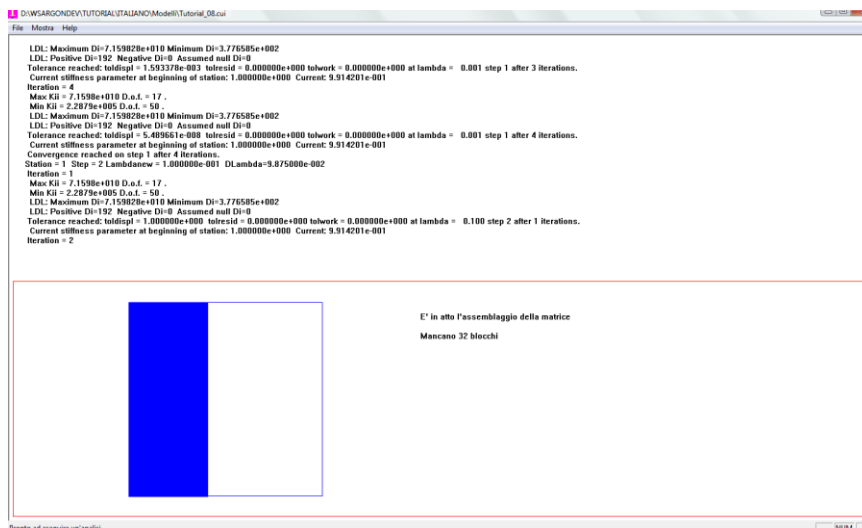
250 Numero fibre

Ritorno sul luogo plastico

1e-005 Tolleranza

100 Max n° iterazioni

Tornati nel dialogo principale delle analisi, con la sola *Statica (nonlineare)* spuntata clicchiamo OK.



Ricordiamo che gli elementi beam di questo modello non hanno un materiale nonlineare. Gli elementi truss, invece, hanno un materiale con legge costitutiva lineare solo nel ramo in trazione, mentre non lavorano in compressione.

Nota: in questo caso l'analisi procederà fino in fondo, con l'applicazione di tutto il carico in tutti i casi. Qualora il modello fosse incoerente, l'analisi potrebbe essere interrotta immediatamente; ad esempio, si pensi a un portale incernierato con croce di S.Andrea sottoposto a carico laterale, con una biella no tension e l'altra biella no compression: con la forza in una direzione lavoreranno entrambe, mentre con la forza nell'altra direzione non lavorerà nessuna delle due, rendendo di fatto il modello labile. Qualora, invece, ci sia un materiale con un tratto perfettamente plastico oppure si superi il limite di rottura, l'analisi può restituire un **moltiplicatore limite**, cioè una frazione del carico totale oltre la quale la struttura (o una sua parte significativa) collassa, non consentendo un incremento del carico.

3.2 Risultati

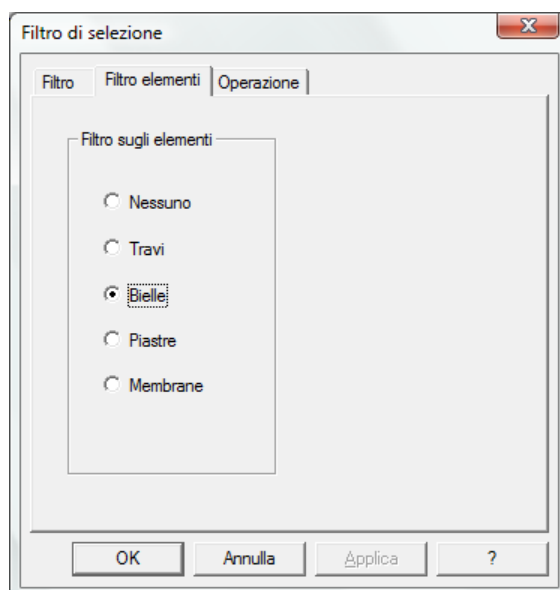
L'eventuale calcolo di un **moltiplicatore limite** evidenzia il fatto che la struttura non è in grado di portare i carichi applicati.

Nel caso in esame, dove la nonlinearietà consiste solo nel fatto che le bielle non reagiscono a compressione, l'impossibilità di procedere con la soluzione sarebbe stata indice di una possibile definizione errata delle leggi costitutive dei materiali o di una loro errata assegnazione agli elementi.

In sostanza, il calcolo che abbiamo eseguito in questo contesto non si discosta molto da un'analisi lineare, eccezione fatta – appunto – per le bielle che reagiscono solo in trazione. Dopo l'analisi nonlineare, i risultati sono visualizzabili con gli stessi comandi già visti per l'analisi statica (spostamenti, azioni interne, reazioni vincolari, trattati nei tutorial 1, 2 e 3, ai quali si rimanda).

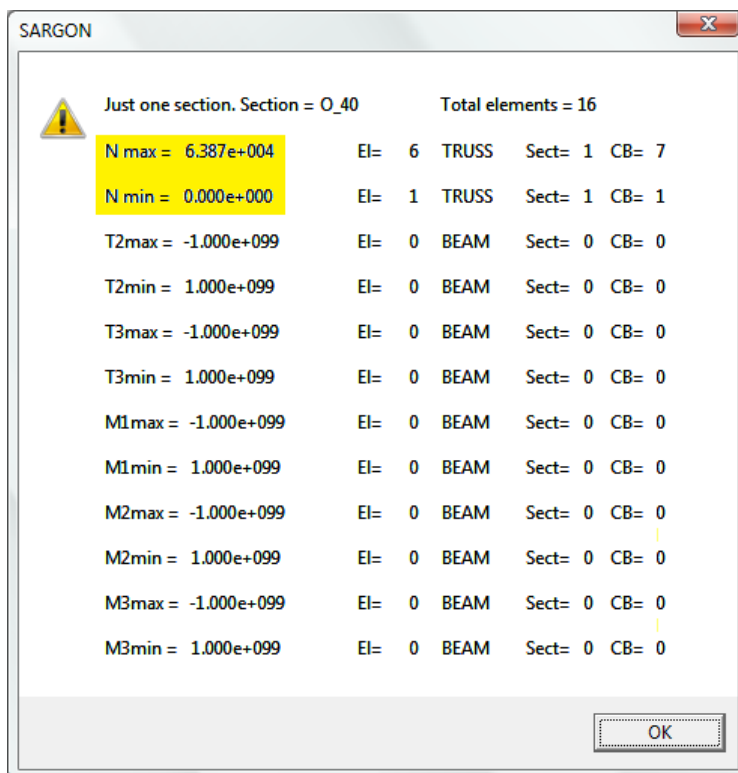
Vediamo ora il riepilogo delle azioni interne negli elementi biella.

Eseguiamo **Edit – Seleziona – Filtro F**, andiamo nella sezione *Filtro elementi* e impostiamo *Bielle*.



Con filtro *Travi e bielle* attivo (se non lo fosse, attiviamolo), selezioniamo tutte 🌟 le bielle (le travi non verranno selezionate, avendo impostato il filtro sulle sole bielle).

Eseguiamo ora **Post – Sforzi BT – Involuppo dell’involuppo**. Nel dialogo sono riportati il valore massimo e il valore minimo per ciascuna componente di azione interna, al variare di tutti gli elementi selezionati e di tutte le combinazioni. Nel caso delle bielle, l’unica azione presente è quella assiale. In questo modello, trattandosi di bielle no compression, l’azione assiale non può essere negativa ($N_{min}=0$).



Nota: previa selezione di opportuni elementi prima dell’analisi, è possibile ottenere curve di sforzo o di spostamento in funzione del livello di carico. Se si usa un numero di passi *predefinito* sufficientemente grande, a fronte di un maggior tempo di calcolo si possono ottenere curve più dettagliate (si veda la seconda immagine). Nel caso di elementi beam calcolati con modelli a fibre, è possibile visualizzare i risultati nelle varie sezioni a fibre.

