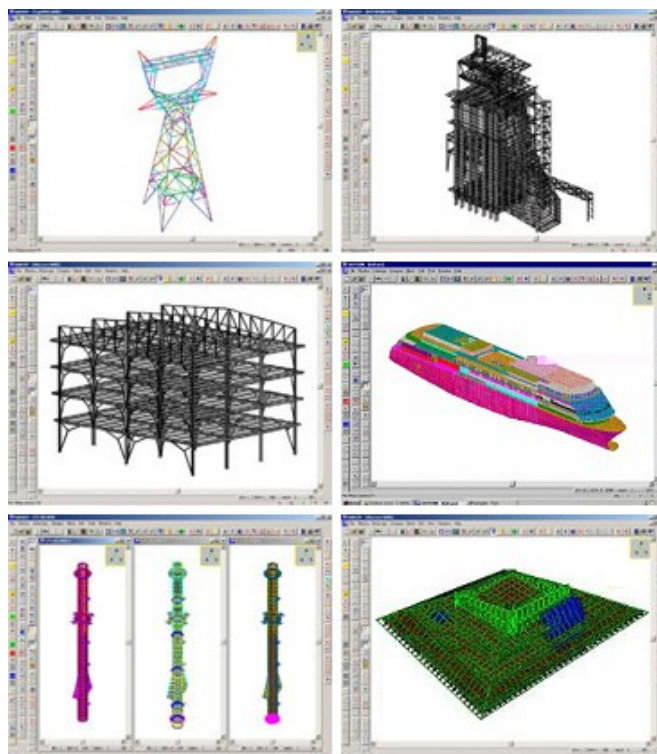


# TUTORIAL DI SARGON

Conoscere il programma in modo guidato



## Tutorial 9

**Analisi nonlineare per nonlinearità di materiale (beam a fibre)**

Gennaio 2014 - Rev. 1



[www.castaliaweb.com](http://www.castaliaweb.com)

[info@castaliaweb.com](mailto:info@castaliaweb.com)

tel. +39 (0)2 266 81 083

fax +39 (0)2 26681876

Via Pinturicchio, 24

20133 Milano, Italy



[www.castaliaweb.com](http://www.castaliaweb.com) [info@castaliaweb.com](mailto:info@castaliaweb.com)

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

<b>PARTE 1: INTRODUZIONE AL TUTORIAL .....</b>	<b>4</b>
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
<b>PARTE 2: IL MODELLO FEM .....</b>	<b>6</b>
<b>PARTE 3: ANALISI STATICA NONLINEARE.....</b>	<b>10</b>
3.1 IMPOSTAZIONE ED ESECUZIONE.....	10
3.2 RISULTATI.....	12

## 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](http://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 per gli elementi beam.
- Impostazione ed esecuzione dell'analisi nonlineare con CURAN.
- Analisi dei risultati: moltiplicatore limite e sforzi nelle fibre.

## 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.

Post – Fibre – Mostra sezione 

– Sezione precedente 

– Sezione successiva 

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.

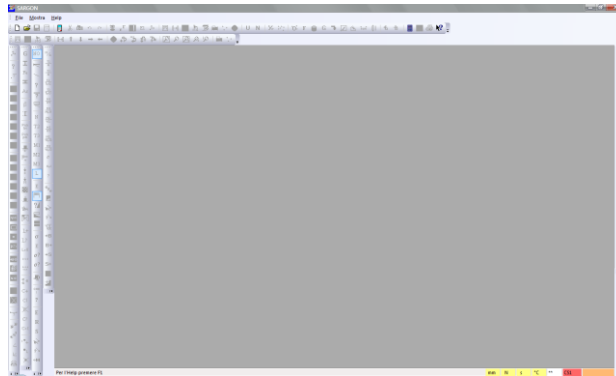
Buon lavoro!

**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.**

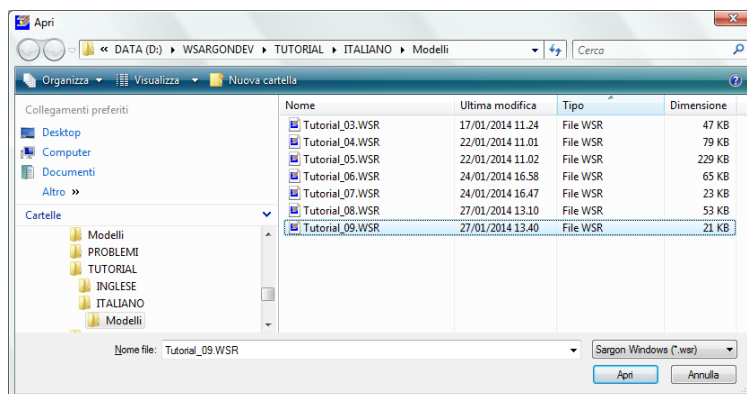
## PARTE 2: IL MODELLO FEM

In questo tutorial non partiremo da zero, bensì dal modello di una semplice struttura in acciaio già realizzato, scaricabile assieme ai tutorial stessi (il file è *Tutorial\_09.WSR*).

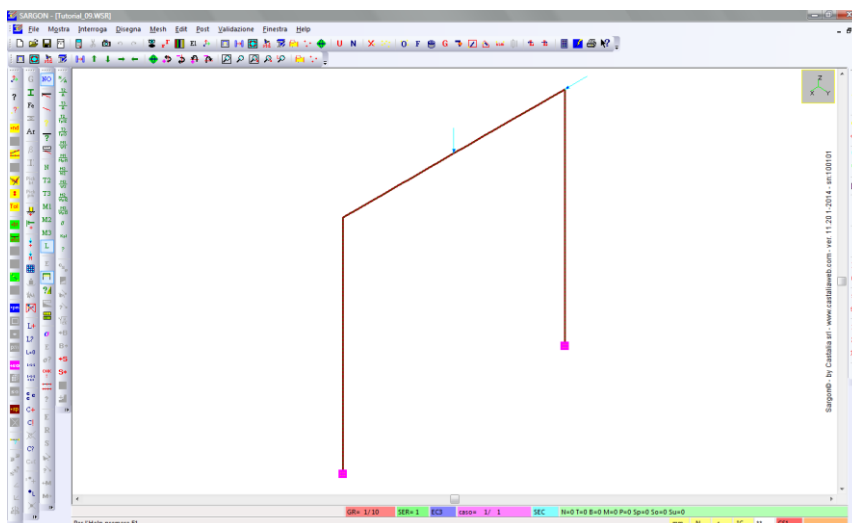
Avviamo Sargon.



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



Scegliamo la cartella dove abbiamo salvato *Tutorial\_09.WSR* e apriamo il modello.



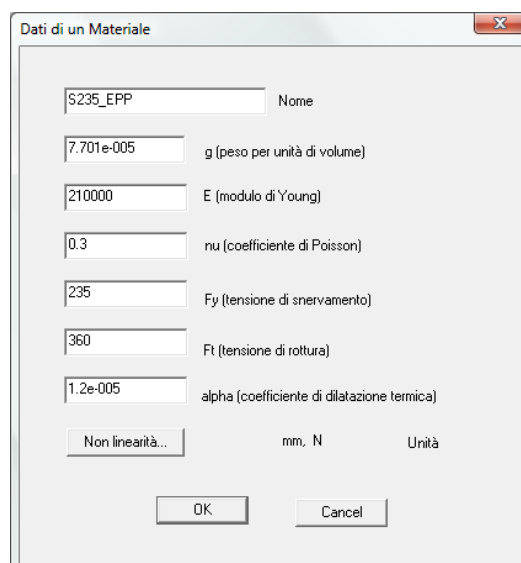
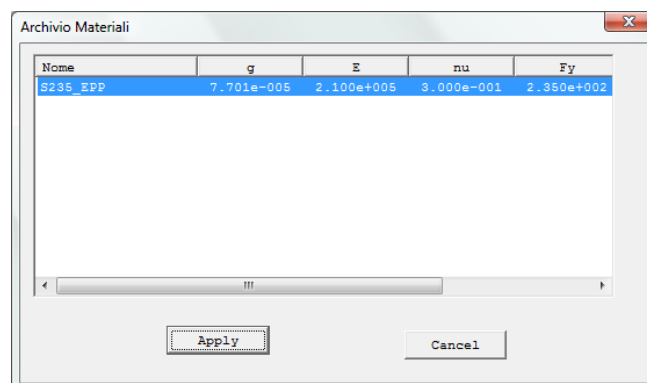
Il modello è un semplice telaio piano composto da elementi beam. C'è un solo caso di carico, costituito da una forza verso il basso nel punto medio del traverso e da una forza laterale in cima a un montante. L'obiettivo è di avere un **esempio semplice** per **spiegare in modo chiaro** le funzionalità del programma.

Al fine di avere una risposta strutturale attendibile, i montanti e il traverso sono modellati con 16 elementi finiti ciascuno (**Interroga – Dati generali**, oppure selezione di tutti i nodi).

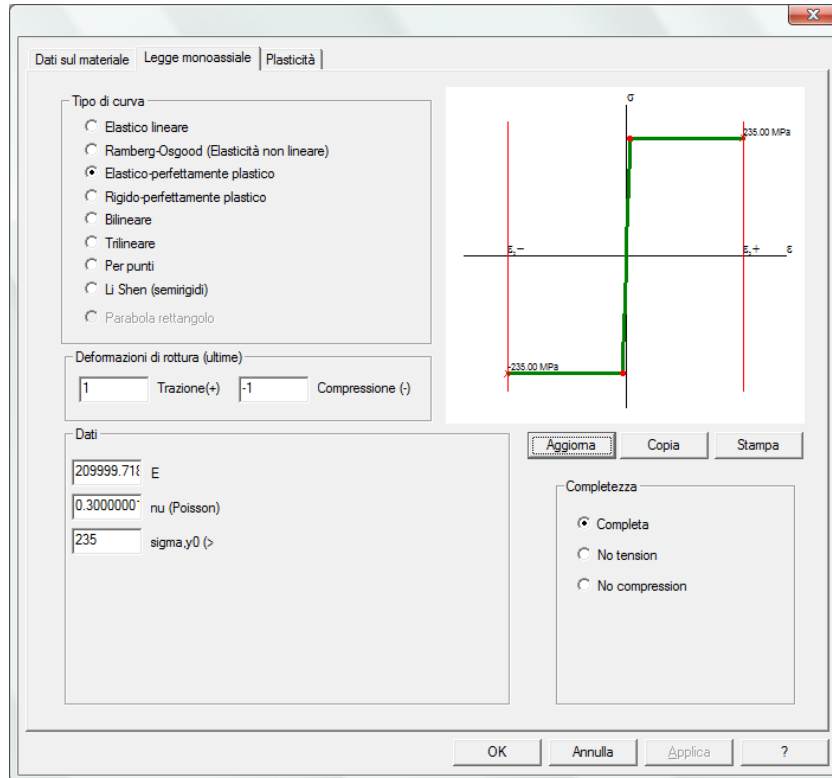
Come vedremo tra poco, il materiale di cui è costituito il portale è un acciaio con legge costitutiva elastica-perfettamente plastica. Ciò significa che, raggiunta la tensione di snervamento, non è in grado di opporre resistenza a un ulteriore incremento del carico.

Il modello, come detto, ha un solo caso di carico. Ci interessa calcolare se la struttura è in grado di sopportare i carichi applicati e, se non è in grado di farlo, di conoscere il moltiplicatore limite.

Eseguiamo **Edit – Proprietà – Modifica Materiale**. Doppio click sull'unico materiale presente, oppure bottone *Applica*.

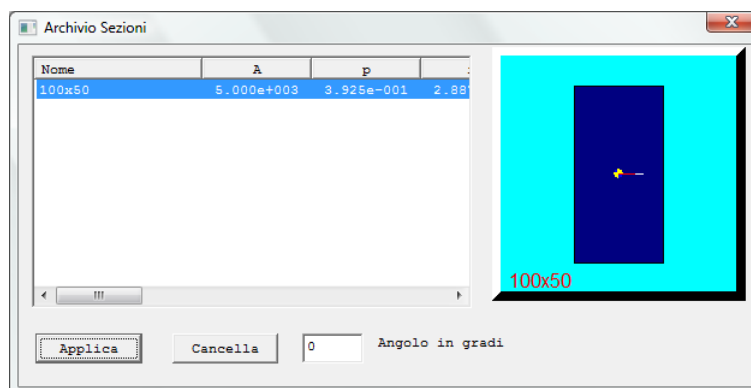


Clicchiamo il bottone *Non linearità*. Nel successivo dialogo andiamo nella sezione *Legge monoassiale*. Tra i vari tipi di curva per definire la legge costitutiva del materiale, in questo modello è stata impostata una legge elastica-perfettamente plastica, definita dai seguenti parametri:  $E=210000[\text{N}/\text{mm}^2]$ ,  $\nu=0.3$  e  $\sigma_{y,0}=235[\text{N}/\text{mm}^2]$ .



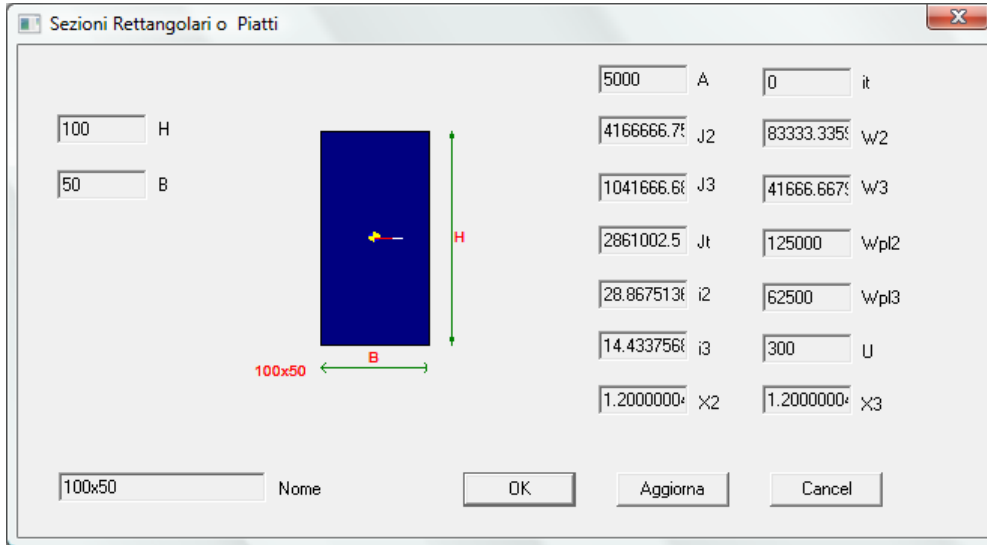
Premiamo OK per tornare al dialogo principale del materiale, quindi nuovamente OK.

Eseguiamo **Edit – Proprietà – Modifica sezione**, quindi clicchiamo sull'immagine a destra per accedere al dialogo dettagliato con le caratteristiche sezionali.



Si tratta di una sezione rettangolare di 100mm x 50mm.

**Nota:** la flessione attorno all'asse forte della sezione è quella nel piano del telaio, come si può vedere eseguendo Mostra – Orientazione e scegliendo, ad esempio, la rappresentazione *dettagliata*.

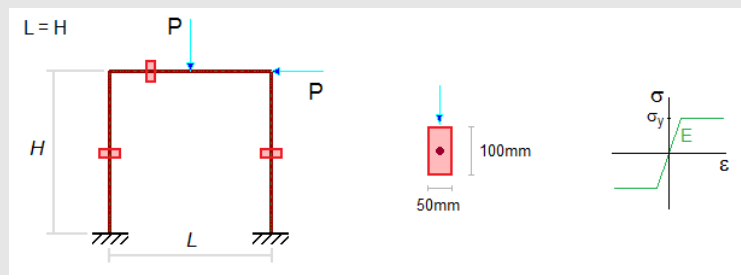


**Nota:** l'altezza e la larghezza del telaio sono pari a 3000mm (**Interroga – Geometria** ?) per conoscere le distanze).

**Nota:** entrambe le forze applicate hanno un modulo di 78330N, come si può vedere grazie al comando **Interroga – Azioni** ?↓.

**Calcolo indipendente del moltiplicatore limite**

Le forze applicate sono esattamente pari al doppio del carico limite ottenuto in accordo alle formule riportate in *Calcul Plastique des Constructions*, Ch. Massonnet, M. Save, traduzione italiana di AA.VV. dell'Istituto di Scienza e Tecnica delle Costruzioni del Politecnico di Milano, Clup Milano, 1982. Tale carico limite comporta l'insorgere di almeno **4 cerniere plastiche**, che implicano la labilità del sistema. Essendo il carico applicato pari al doppio di quello limite, **il moltiplicatore limite atteso è pari a 0.5**. Per  $L/H=1$ ,  $P_{lim}=4M_{pl}/L$  con  $M_{pl}=W_{pl} \cdot \sigma_y = 125000 \text{mm}^3 \cdot 235 \text{N/mm}^2 = 2.938 \text{E}+07 \text{Nmm}$ . Risulta quindi  $P_{lim} = 4 \cdot 2.938 \text{E}+07 \text{Nmm} / 3000 \text{mm} = 39167 \text{N}$ , che è la metà delle forze applicate. Il valore di  $W_{pl}$  è desumibile dall'immagine precedente, relativa alla sezione ( $W_{pl2}$ ).




## PARTE 3: ANALISI STATICA NONLINEARE

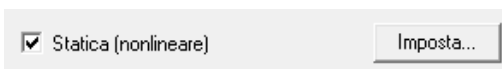
Sargon dispone di diversi solutori interni ed è interfacciato con solutori esterni. Per quanto concerne il secondo aspetto si rimanda alla documentazione del programma. I solutori interni disponibili sono:

- 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](http://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. Nel modello, i parametri sono già stati impostati; vediamo cosa è stato modificato rispetto ai default.

- In *Strategia di analisi*, il numero massimo di iterazioni è stato aumentato a 100.
- L'indicatore per la *convergenza* scelto è il residuo.
- Il numero di fibre è stato aumentato a 1000 (il default è 250).

Tali scelte sono state fatte per migliorare la convergenza e la precisione del calcolo. La scelta di non usare lo spostamento come indicatore per la convergenza è dovuta al fatto che il meccanismo di collasso del portale porta a una labilità dell'intera struttura. Trattandosi di un calcolo iterativo, con una convergenza nell'intorno del moltiplicatore esatto, ed essendoci una discontinuità netta nel comportamento della struttura non appena intervengono – pressoché simultaneamente – almeno 4 cerniere plastiche, lo spostamento non sembra essere un criterio adatto per stabilire la convergenza del metodo.

Manterremo le impostazioni di default per tutti gli altri parametri. In particolare, i punti di Lobatto richiesti sono 5. 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

Strategia analisi

Iterazioni

100 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)

Metodo analisi

Newton-Raphson completo

Newton-Raphson modificato

Quasi Newton-Raphson

Nonlinearità geometrica

Escludi rigidezza geometrica

Includi rigidezza geometrica

Altri

Stampa messaggi

Interpolazione sforzi ai nodi

Numero punti di integrazione Lobatto

10 Piastre (da 3 a 12 o 20)

5 Travi (da 3 a 12 o 20)

Numero fibre (elementi trave)

1000 Numero fibre

Ritorno sul luogo plastico

1e-005 Tolleranza

100 Max n° iterazioni

Altri parametri

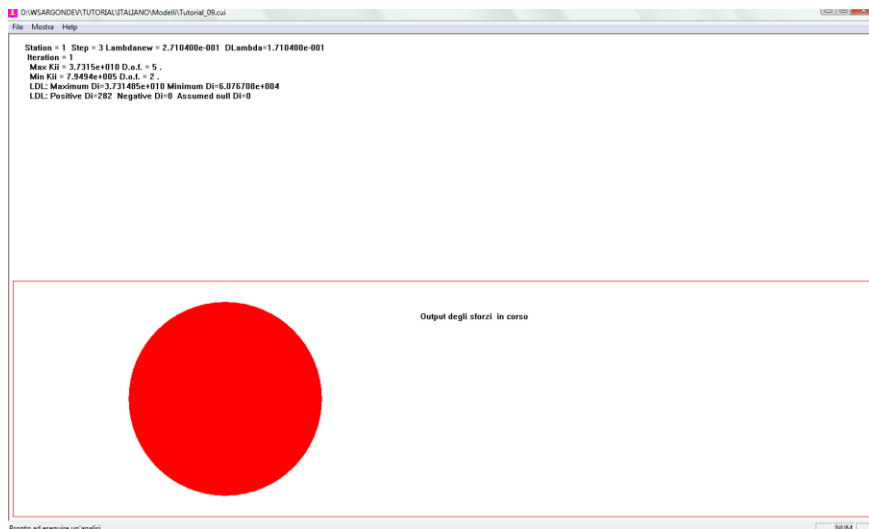
0.0001 Minimo modulo pivot non nulli

0.005 Precisione moltiplicatore limite

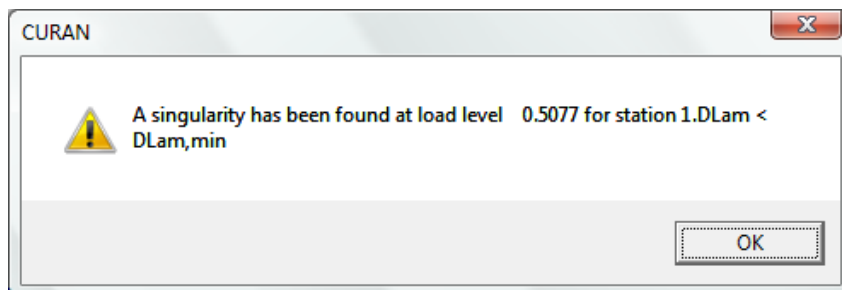
Stampa spostamenti in ogni iterazione

OK Annulla Applica ?

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



Se compare un messaggio di rottura di una fibra, premiamo OK. A un certo livello di carico, CURAN trova una **singularità** ad un livello di carico pari a **0.5077**. Significa che per tale livello di carico la struttura diventa labile. Questo valore si discosta dell'1.5% dal moltiplicatore teorico calcolato in precedenza (0.5).

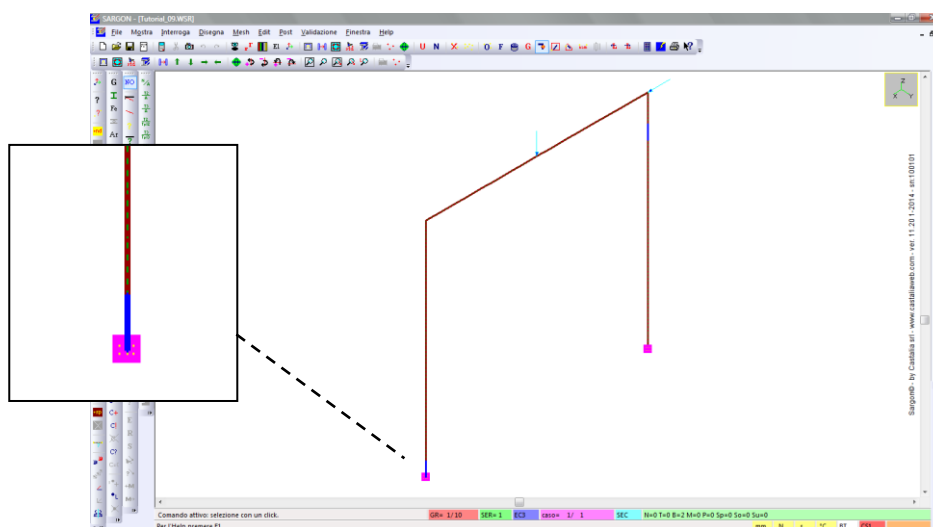


Clicchiamo OK per concludere l'analisi.

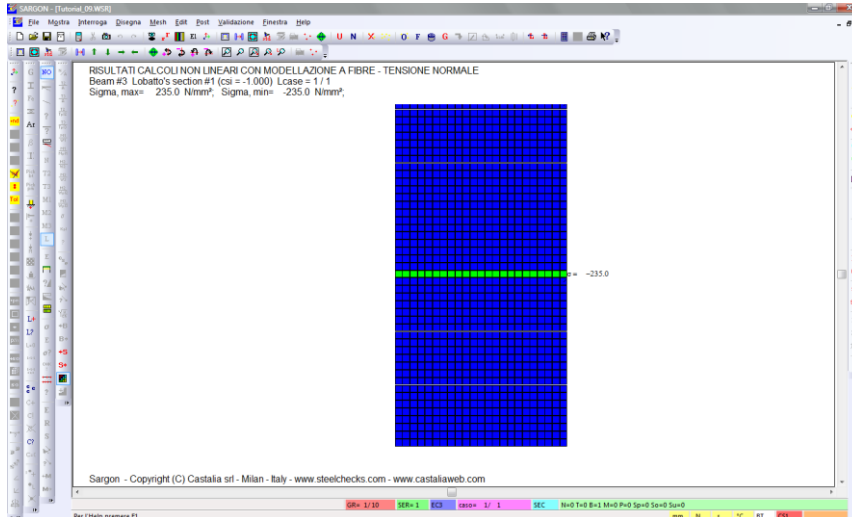
### 3.2 Risultati

Sappiamo che la struttura non è in grado di portare tutto il carico applicato, poiché è stato calcolato un **moltiplicatore limite**. Sono disponibili i comandi per visualizzare spostamenti, azioni interne e reazioni vincolari già visti nei tutorial 1, 2 e 3, ma ora può essere più interessante andare a vedere lo stato tensionale nelle sezioni a fibre degli elementi in corrispondenza delle zone sedi di potenziali cerniere plastiche.

Selezioniamo con un click un elemento beam al piede del portale (se necessario, prima attiviamo la selezione degli oggetti di tipo trave e biella). Assicuriamoci che sia selezionato solo quell'elemento.



Eseguiamo il comando **Post – Fibre – Mostra sezione** . Se richiesto, interrompiamo tutti i comandi. Si passa a una vista bidimensionale della prima sezione dell'elemento scelto. Se necessario, usiamo i comandi di zoom (menu **Disegna**) o la rotella del mouse.

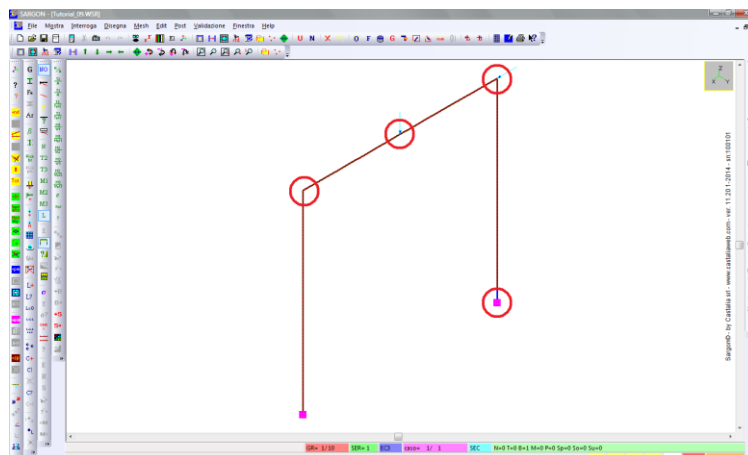


Nell'intestazione della vista sono riportati i dettagli relativi alla sezione: numero dell'elemento, numero della sezione di Lobatto, ascissa dimensionale della sezione lungo l'asse dell'elemento (da -1 a +1), caso di carico, tensione normale massima e minima. In questo caso tutta la sezione è elasticizzata.

RISULTATI CALCOLI NON LINEARI CON MODELLAZIONE A FIBRE - TENSIONE NORMALE  
 Beam #3 Lobatto's section #1 (csi = -1.000) Lcase = 1 / 1  
 Sigma, max= 235.0 N/mm<sup>2</sup>; Sigma, min= -235.0 N/mm<sup>2</sup>;

Con i comandi **Post - Fibre – Sezione precedente** e **Sezione successiva** possiamo scorrere tra le varie sezioni di Lobatto (5 in questo caso) dell'elemento selezionato.

Torniamo alla vista del modello, eseguendo nuovamente **Post – Fibre – Mostra sezione** oppure **Post – No post** . Deselezioniamo l'elemento correntemente selezionato e al suo posto selezioniamone un altro, in corrispondenza di un'altra possibile cerniera plastica (un solo elemento alla volta). Se andiamo a visualizzare i risultati delle fibre nelle altre 4 zone mostrate nell'immagine seguente, troveremo altre sezioni completamente elasticizzate (almeno una delle 5 di ogni elemento). Ciò è coerente con il collasso della struttura.



**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). Si rimanda alla guida del programma, nella parte relativa all'analisi nonlineare citata in precedenza.

