



Earthquake Engineering Tutorial 2

© 2015, Softing srl

Riproduzione consentita citando la fonte

rev 150603



Earthquake Engineering (EE)

Tutorial 2

**(Modellazione non lineare di
strutture in muratura con elementi bidimensionali)**

Ing. Francesco Canterini

Ing. Francesco Oliveto

Indice

1. Premessa.....	5
2. Modellazione della muratura per analisi non lineari.....	6
2.1 Materiali non lineari per modellazione di murature con elementi bidimensionali.....	6
3. Esempio di calcolo sismico (Analisi statica non lineare di un ponte ad arco in muratura senza carichi verticali).....	18
3.1 Carichi assegnati.....	19
3.2 Materiali non lineari assegnati.....	20
3.3 Azioni assegnate per analisi non lineare	22
Assegnazione azioni: Analisi sismica avanzata.....	22
3.4 Registratori attivati.....	24
3.5 Iteratori d'analisi.....	26
3.6 Risultati analisi.....	28
4. Esempio di calcolo sismico (Analisi statica non lineare di un ponte ad arco in muratura considerando anche il peso proprio).....	43
4.1 Fase A – Aggiunta del peso proprio.....	43
4.2 Azioni assegnate per analisi non lineare (A).....	43
4.3 Registratori attivati (A).....	44
4.4 Iteratori d'analisi (A).....	44
4.5 Risultati analisi (A).....	45
4.6 Fase B – Aggiunta di un sovraccarico sul piano superiore.....	51
4.7 Carichi assegnati (B).....	51
4.8 Azioni assegnate per analisi non lineare (B).....	52
4.9 Registratori attivati (B).....	53
4.10 Iteratori d'analisi (B).....	53
4.11 Risultati analisi (B).....	55
5. Esempio di calcolo non lineare (Applicazione di cedimenti differenziali di fondazione tra le pile di un ponte ad arco in muratura).....	58
5.1 Carichi assegnati.....	59
5.2 Azioni assegnate per analisi non lineare.....	60
Assegnazione azioni: Analisi sismica avanzata.....	60
5.3 Registratori attivati.....	64
5.4 Iteratori d'analisi.....	67
5.5 Risultati analisi.....	69
6. Esempio di calcolo non lineare (Analisi non lineare eseguita su un ponte ad arco in muratura danneggiato a seguito di cedimenti fondali).....	75
Assegnazione azioni: Analisi sismica avanzata.....	76
6.1 Registratori attivati.....	78
6.2 Iteratori d'analisi.....	79
6.3 Risultati analisi.....	81
7. Conclusioni.....	84

1. Premessa

L'ambiente Earthquake Engineering (EE), è l'ambiente di AllInOne dedicato alle analisi NON

LINEARI.

Per l'introduzione e la descrizione delle funzioni principali dell'ambiente EE si rimanda al tutorial n.1 scaricabile al seguente indirizzo:

http://www.softing.it/sites/softing/files/docs/tutorial_ee.pdf

In questo secondo tutorial verrà descritta la procedura per il calcolo con materiali a comportamento non lineare, di strutture in muratura modellate con elementi bidimensionali, (modellazione adatta per edifici storici con particolari geometrie), illustrando gli strumenti messi a disposizione dal programma per tali tipi di analisi, e l'utilizzo dei risultati restituiti per la Valutazione della sicurezza delle strutture in muratura.

Il presente documento è stato redatto dall'Ing. Francesco Canterini in collaborazione con L'Ing. Francesco Oliveto, (utente dei prodotti Softing da molti anni, con una vasta esperienza nella modellazione agli elementi finiti per analisi non lineare), che ha gentilmente fornito i modelli che saranno presentati nel seguito, ed ha contribuito alla interpretazione e descrizione dei risultati delle analisi.

2. Modellazione della muratura per analisi non lineari

Le prime problematiche da affrontare approcciando alla modellazione della muratura in una analisi non lineare, sono le medesime che il progettista deve risolvere nella modellazione per analisi lineari, ossia la scelta del tipo di modellazione.

Le murature possono essere modellate sia con elementi bidimensionali che descrivono l'effettiva geometria della struttura muraria, sia tramite una discretizzazione degli elementi in modo da ricondurre il paramento murario ad un telaio equivalente.

In questo tutorial saranno descritte le funzioni disponibili all'interno del programma EE per l'esecuzione di analisi non lineari su strutture in muratura modellate con elementi bidimensionali.

2.1 Materiali non lineari per modellazione di murature con elementi bidimensionali

Il materiale a comportamento non lineare implementato in EE che meglio descrive il reale comportamento della muratura quando questa viene modellata con elementi bidimensionali, si trova sotto la categoria materiali **"N-Dimensionali"** alla voce **"No-Tension"**.

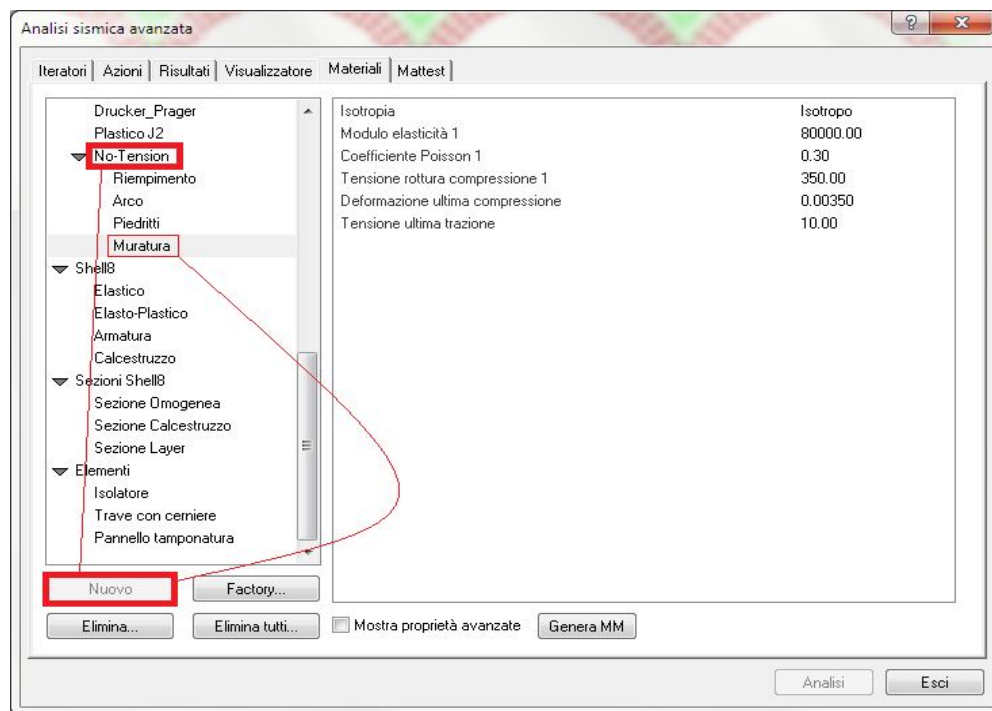
Tale materiale non lineare può essere assegnato ad elementi DegenerateShell, e ad elementi guscio a 4 nodi, nel primo caso potrà essere assegnato come strato che compone l'elemento, nel secondo avrà un comportamento "sforzo piano" per le sollecitazioni nel piano.

Questo materiale, per le sollecitazioni a trazione, usa un modello "smeared crack" (rottura diffusa) in modo da non avere problemi di dipendenza dalla mesh, cosa che avviene invece nei metodi "concentrated crack" (rottura concentrata).

Qualora in un punto della struttura si abbiano tensioni di trazione superiori a quella massima assegnata all'elemento, le tensioni vengono proiettate nel sistema principale delle tensioni, secondo le quali è orientata la fessura e pertanto la resistenza si esplica solo nella direzione parallela alla fessura.

Qualora si formi una doppia fessura su un altro piano rispetto a quello che contiene la prima, la resistenza nel punto si annulla.

Superata la tensione massima di trazione, si innesca un meccanismo di hardening in modo che la resistenza diminuisca rapidamente ma non immediatamente. Ciò interpreta, dal punto di vista fisico, fenomeni di ingranamento, dal punto di vista numerico, favorisce il riequilibrarsi della matrice di rigidezza dopo il venir meno della resistenza in un punto.



Creando un nuovo materiale sotto tale tipologia, il programma va a richiedere i seguenti parametri:



Isotropia: In tale cella deve essere indicato il tipo di comportamento che si desidera conferire alla muratura nel modello di calcolo, a seconda di ciò che l'utente va ad indicare il programma richiederà diversi parametri:

1) Isotropo: Assegnando tale proprietà vengono richiesti i seguenti dati:

- Isotropia;
- Modulo di elasticità;
- Tensione di rottura a compressione;
- Deformazione ultima compressione;
- Tensione ultima trazione;

Il significato di tutti i parametri è intuitivo, una volta assegnati i dati, ciò che si ottiene è un materiale a comportamento non lineare che reagisce principalmente a sforzi di compressione, ed i limiti ammissibili nel comportamento sono nell'intorno dei valori inseriti dall'utente nelle celle "Deformazione ultima compressione", e "Tensione ultima a trazione".

Per quanto riguarda la "Tensione ultima a trazione", tale parametro conferisce all'elemento anche una risposta a trazione, e può essere assunto anche nullo, tuttavia è consigliabile assegnare un valore diverso da zero, per evitare problemi di non convergenza locale, infatti durante il calcolo può accadere che per alcuni passi dell'analisi non lineare, porzioni limitate di muratura possono risultare tese, nel caso la resistenza a trazione sia posta pari a zero, tale circostanza comporta il troncamento dell'analisi, e la mancata convergenza del calcolo, mentre assegnare una minima resistenza a trazione, aiuta a superare eventuali problemi locali, e permette di proseguire nel calcolo fino alla manifestazione di problemi globali.

E' consigliabile assegnare un valore di resistenza a trazione in un range che va da 1/10 ad 1/20 della resistenza assegnata in compressione.

Per meglio comprendere l'effettivo comportamento di tale materiale non lineare mostriamo alcune immagini estrapolate dal "Mattest", (si precisa che per il materiale "No-Tension" nel "Mattest" è disponibile solo la funzione "Dominio"):

prendendo in esame il seguente materiale

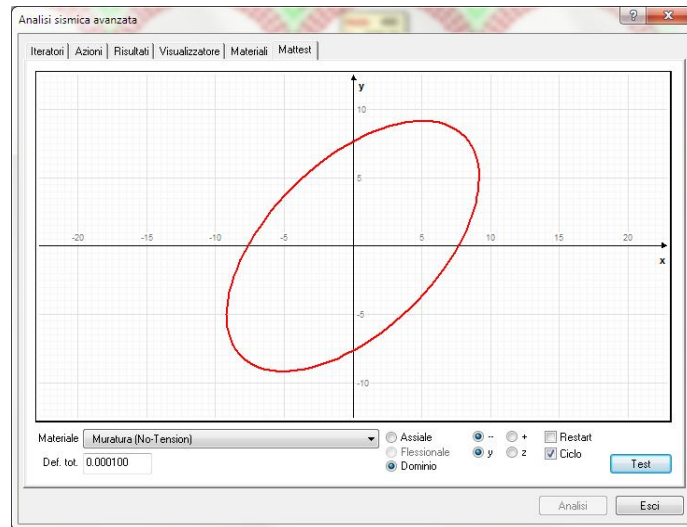
Isotropia	Isotropo
Modulo elasticità 1	80000.00
Coefficiente Poisson 1	0.30
Tensione rottura compressione 1	350.00
Deformazione ultima compressione	0.00350
Tensione ultima trazione	10.00

andando ad operare nel "Mattest", andremo ad assegnare vari valori di deformazione al materiale, e verrà visualizzato il dominio di risposta delle tensioni rispetto alla deformazione indotta.

Il dominio mostrato dal “Mattest” riporta sugli assi la tensione rispetto alle due direzioni principali, (ovviamente per un materiale isotropo tutte le direzioni risultano essere principali).

Il dominio che mostra il “Mattest” riporta sui semiassi negativi le tensioni di compressione, mentre su quelli positivi le trazioni.

- Deformazione **“0,00010”**:



Sotto tale valore di deformazione il “MatteTest” mostra il dominio il cui perimetro unisce tutti i punti rappresentativi dei possibili stati di tensione corrispondenti alla deformazione assegnata.

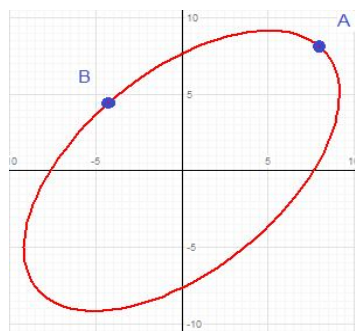
Essendo la deformazione assegnata molto bassa, si ha un'ellisse poiché le tensioni indotte sono inferiori ai limiti assegnati, per valori superiori al limite di trazione assegnato il dominio sarebbe troncato prima.

In sostanza il dominio indica che una deformazione pari a 0,00010 può essere ottenuta, applicando una tensione di trazione in direzione verticale ed orizzontale pari a circa 6,70 kg/cm² (punto A), infatti essendo:

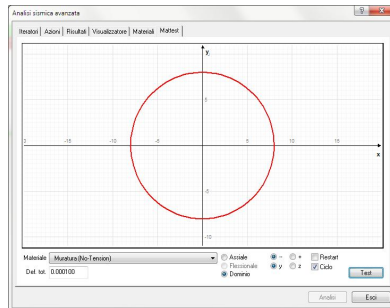
$$\varepsilon_1 = 1/E \times (\sigma_1 - \nu \sigma_2) = 1/80000 \times [6,70 - 0,3 \times (-6,70)] = 0,000108$$

lievi discostamenti sono dovuti ad imprecisioni di lettura del grafico, e ad approssimazioni del calcolo.

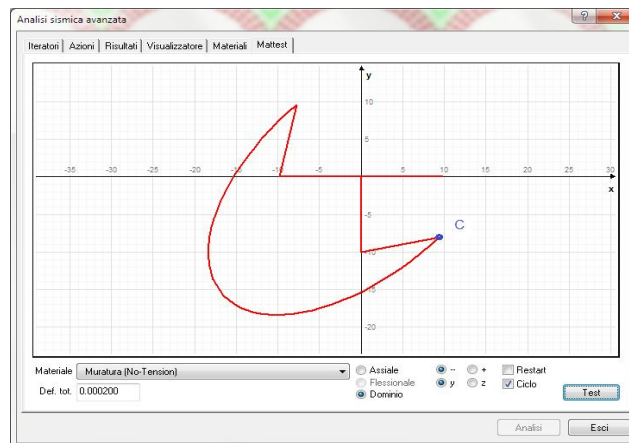
Analogamente la medesima deformazione può essere ottenuta applicando una tensione di trazione in direzione verticale pari a circa 4.90 kg/cm², ed una tensione di compressione in direzione orizzontale sempre pari a circa 4.90 kg/cm² (punto B):



La distorsione ad un ellisse avviene poiché è stato assegnato un valore del coefficiente di Poisson maggiore di 0, nel caso il coefficiente di Poisson fosse stato nullo, il dominio sarebbe stato un cerchio.



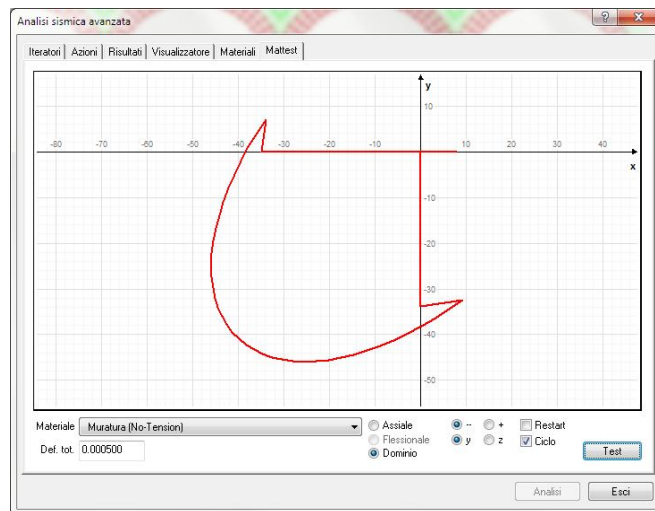
- Deformazione **“0,0002”**



In tal caso viene mostrato il limite che il materiale ha rispetto alle tensioni di trazione, infatti in tale dominio, il quadrante in basso a sinistra segue perfettamente il perimetro di un ellisse (ovviamente dimensionato in funzione della deformazione assegnata 0,0002), mentre in trazione vediamo che il dominio non è più presente, ma in tal caso si riscontra solo nel secondo e quarto quadrante, una sorta di “naso” che mostra i limiti del dominio in tal caso, e sostanzialmente indica che per ottenere una deformazione pari a quella imposta, applicando una tensione di trazione in direzione verticale o orizzontale, la tensione nella direzione perpendicolare deve essere di compressione.

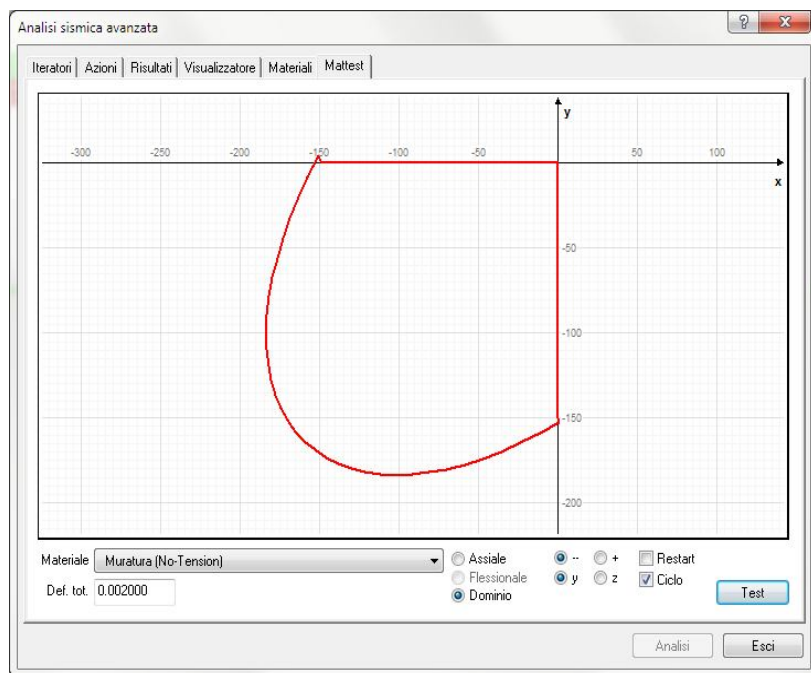
Nel caso specifico se abbiamo una trazione in direzione orizzontale pari a circa 9.00 kg/cm², per avere una deformazione pari a 0,0002, deve essere presente una tensione di compressione pari a circa 8,00 kg/cm², valori differenti comportano che il materiale arriva a rottura, oppure che la deformazione corrispondente sarà minore o maggiore.

- Deformazione **“0,0005”**



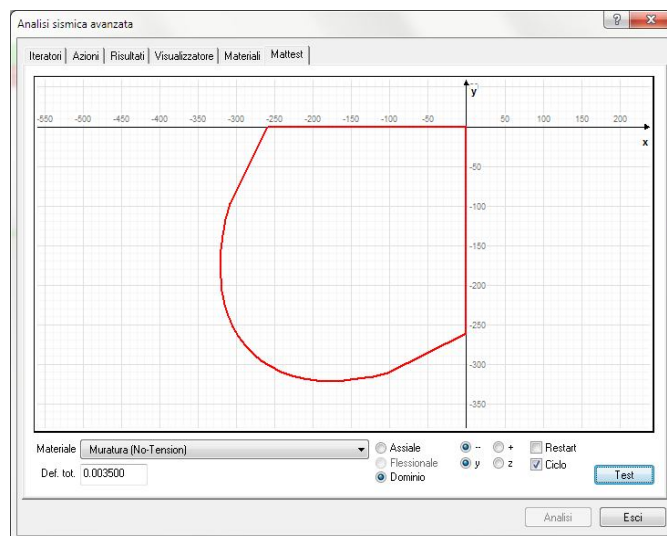
Si riscontra ancora un comportamento simile a quello del passo precedente.

- Deformazione **“0,0020”**



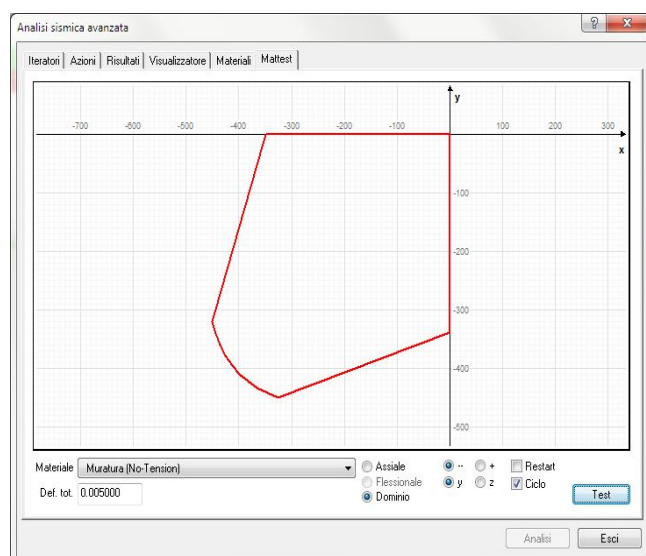
Si riscontra ancora un comportamento simile a quello dei passi precedenti, in tale dominio risulta meno evidente il “naso” nei quadranti delle trazioni poiché aumentando la scala del grafico questi risultano meno visibili, ma sono comunque presenti.

- Deformazione **“0,0035”**



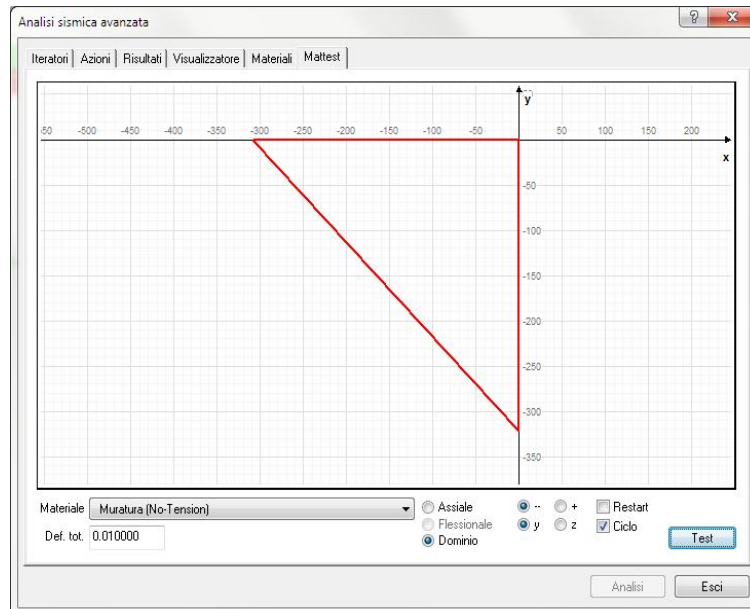
In questo caso è stata assegnata una deformazione pari a quella ultima assegnata al materiale, come visibile dal dominio, per ottenere la deformazione ultima, non è necessario applicare una tensione pari al valore della tensione ultima, ma data la composizione delle tensioni agenti nelle varie direzioni, e l'assegnazione di un valore non nullo del coefficiente di Poisson, la deformazione limite può essere raggiunta anche per valori minori della tensione ultima. I due tratti rettilinei del dominio indicano stati di tensioni per i quali seguendo la legge del materiale si registrerebbe la rottura

- Deformazione **“0,005”**



Assegnando una deformazione di poco maggiore a quella limite vediamo che il materiale ammette ancora un dominio per una limitata zona del grafico, questo è dovuto alle funzioni di hardening e di stabilizzazione implementate nel codice.

- Deformazione **“0,010”**



Assegnando delle deformazioni sensibilmente maggiori di quelle limite del materiale il dominio degenera ad un triangolo indicando che oltre la diagonale non è ammessa soluzione.

2) Anisotropo: Assegnando tale proprietà vengono richiesti i seguenti dati:

Isotropia	Anisotropo
Modulo elasticità 1	30000.00
Modulo elasticità 2	300000.00
Coefficiente Poisson 1	0.30
Coefficiente Poisson 2	0.00
G22	0.00
Tensione rottura compressione 1	20.00
Tensione rottura compressione 2	350.00
Deformazione ultima compressione	0.00350
Tensione ultima trazione	2.00
Angolo asse isotropia (*)	0.00

Per tale materiale vengono richiesti i medesimi parametri richiesti nel caso di materiale isotropo ma in tal caso, bisogna assegnare le caratteristiche meccaniche relative alle due direzioni, a parte la resistenza a trazione che rimane sempre un unico valore, inoltre viene richiesta la direzione rispetto all'asse locale X dell'elemento.

2) Muratura: Assegnando tale proprietà vengono richiesti i seguenti dati:

Selezionando il tipo "Muratura" si andrà a procedere ad una modellazione del materiale omogeneizzando le caratteristiche dei componenti, malta e mattoni rendendo più accurata l'assegnazione. L'omogeneizzazione avviene tramite il tensore di Eshelby che permette di definire i parametri omogenei che caratterizzano meccanicamente il composto formato da vari elementi di un certo materiale, immersi in un altro materiale che viene considerato la Matrice.

Il tensore di Eshelby opera secondo la relazione:

$$A^{\omega} = (C^M - C^{\omega})^{-1} C^M$$

$$C^h = C^M (I - f (A^{\omega} - S^{\omega})^{-1})$$

Dove C è la matrice costitutiva, S il tensore di Eshelby, gli indici M ed ω indicano rispettivamente la matrice e gli inserti.

Alla selezione del tipo "Muratura", viene aperta una nuova finestra di dialogo dove si richiede l'inserimento di tutta una serie di parametri:

Omogeneizzazione muratura

Geometria		Mattoni		Malta	
Altezza mattone	5.5000000	Modulo elasticità	110000.00	Modulo elasticità	22000.000
Lunghezza mattone	25.000000	Modulo elasticità tangenziale	44000.000	Modulo elasticità tangenziale	8800.0000
Spessore malta orizzontale	1.0000000	Resistenza ultima compressione	20.000000	Resistenza ultima compressione	15.000000
Spessore malta verticale	1.0000000	Resistenza ultima taglio	2.0000000	Resistenza ultima taglio	1.0000000

Calcola

Matrice costitutiva D			
	Omogeneizzato	Mattoni	Malta
D11			
D22			
D12			
D21			
D22			

Resistenza ultima omogeneizzata	
Y11	
Y22	
Y12	

Continua

I parametri richiesti sono le dimensioni geometriche dei mattoni e lo spessore degli strati di malta, e ovviamente le caratteristiche meccaniche di malta e mattoni.

Una volta eseguite le corrette assegnazioni, cliccando il bottone "Calcola" il programma mostra i valori

Omogeneizzazione muratura

Geometria		Mattoni		Malta	
Altezza mattone	5.5000000	Modulo elasticità	110000.00	Modulo elasticità	22000.000
Lunghezza mattone	25.000000	Modulo elasticità tangenziale	44000.000	Modulo elasticità tangenziale	8800.0000
Spessore malta orizzontale	1.0000000	Resistenza ultima compressione	20.000000	Resistenza ultima compressione	15.000000
Spessore malta verticale	1.0000000	Resistenza ultima taglio	2.0000000	Resistenza ultima taglio	1.0000000

Calcola

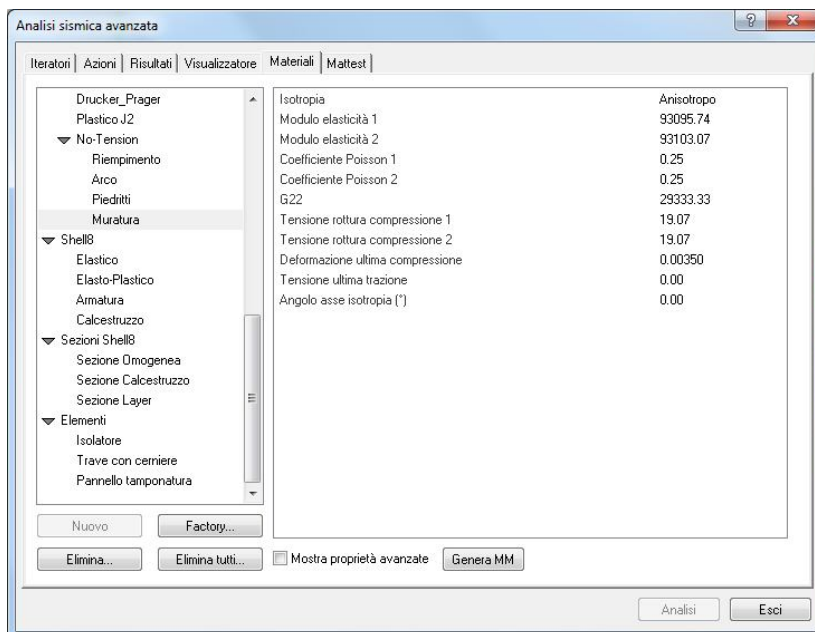
Matrice costitutiva D			
	Omogeneizzato	Mattoni	Malta
D11	99308.603	117333.33	23466.667
D22	99191.559	117333.33	23466.667
D12	24824.650	29333.333	5866.6667
D21	24814.009	29333.333	5866.6667
D22	37332.257	44000.000	8800.0000

Resistenza ultima omogeneizzata	
Y11	19.065700
Y22	19.065126
Y12	1.8128488

Continua

Cliccando poi su "Continua" il programma mostra i parametri del materiale anisotropo omogeneizzato secondo Eshelby.

I valori assegnati dal programma sono editabili in modo che l'utente li possa successivamente modificare:



Una volta che le caratteristiche di un materiale "No-Tension" sono state assegnate, deve essere cliccato il pulsante "Genera MM":



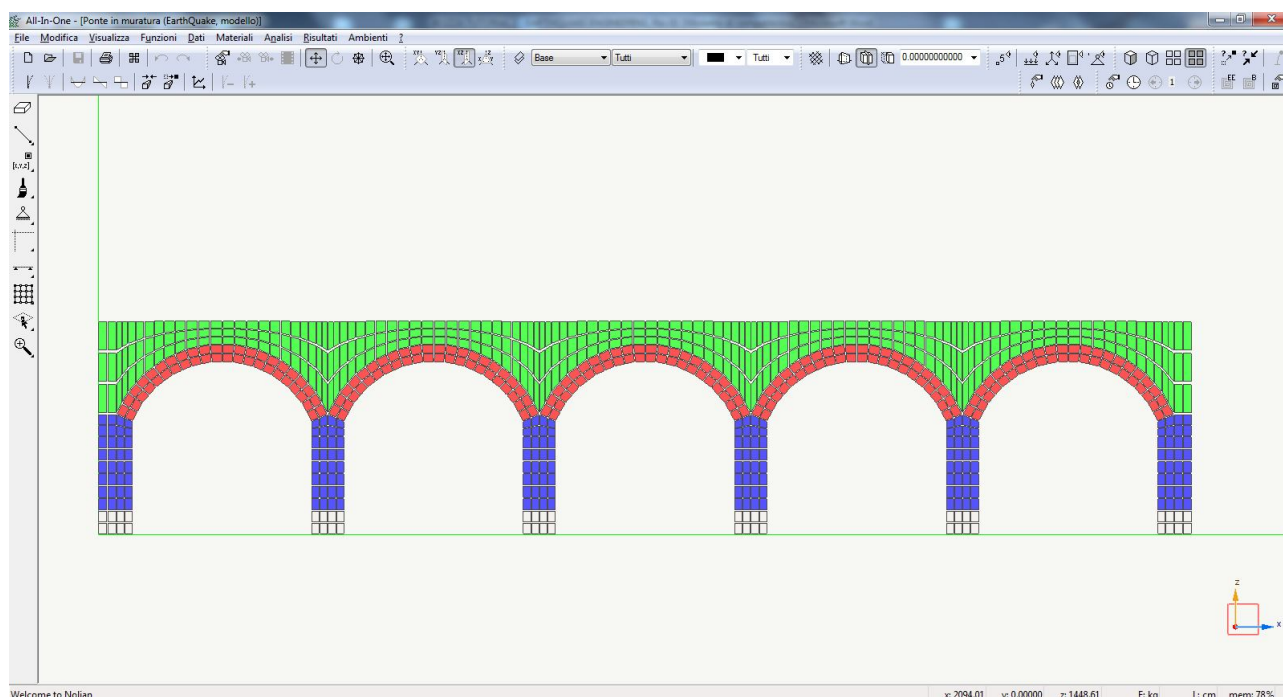
e poi l'assegnazione del materiale agli elementi del modello deve essere eseguita secondo le istruzioni ampiamente descritte nel tutorial base di EE.

Anche le altre operazioni di assegnazione delle azioni, definizione dei registratori, e settaggio dei parametri e metodi di analisi, sono analoghi a quanto già descritto nel tutorial base, pertanto ora si procederà direttamente ad illustrare un esempio di analisi non lineare di strutture in muratura con il materiale "No-Tension".

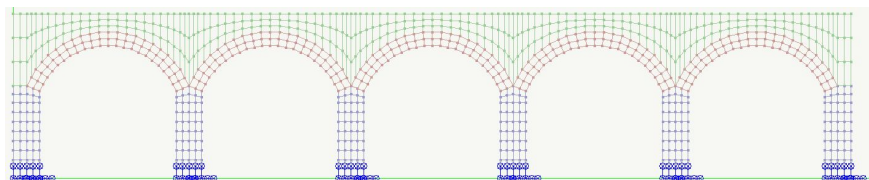
3. Esempio di calcolo sismico (Analisi statica non lineare di un ponte ad arco in muratura senza carichi verticali)

Verrà ora mostrato un esempio di calcolo non lineare di strutture in muratura con modellazione ad elementi bidimensionali e materiale non lineare "No-Tension".

Avendo la seguente struttura:



Il modello preso in esame è costituito da un ponte con 5 arcate, ed è stato vincolato al piede tramite incastri:



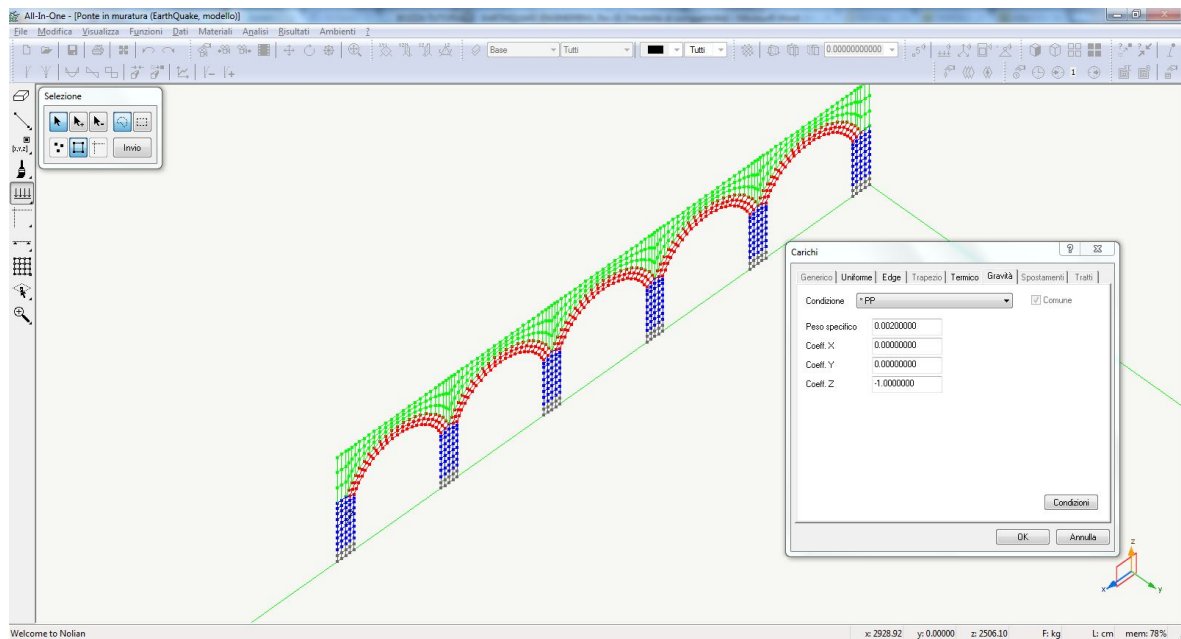
lo spessore trasversale preso in riferimento è una striscia pari ad 1.00, ma noi andando ad analizzare esclusivamente il comportamento degli elementi nel proprio piano, possiamo estendere i risultati ottenuti all'intera larghezza del ponte.

La differenziazione del colore degli elementi guscio, indica la diversa assegnazione del materiale non-lineare, lo vedremo nel dettaglio più avanti.

3.1 Carichi assegnati

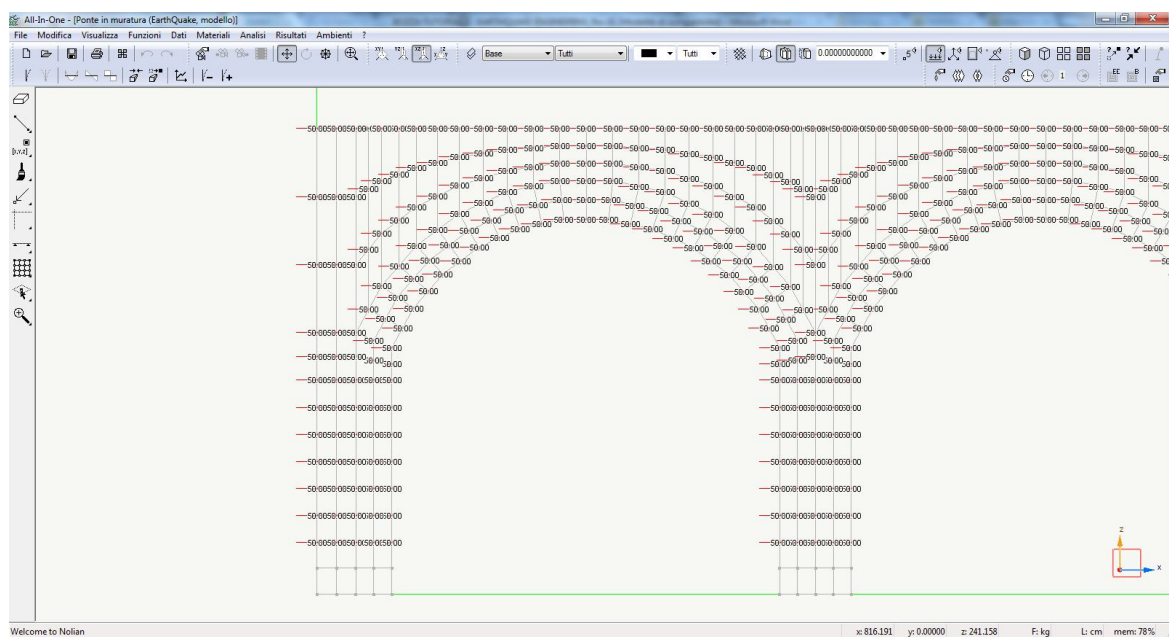
Come carichi statici verticali sono state assegnate le seguenti condizioni di carico:

PP



Peso proprio degli elementi (Peso specifico = 0.0020 kg/cm^3)

PUSHOVER



Ad ogni nodo della struttura è stata assegnata una forza orizzontale pari a 50 kg, che sarà utilizzata come azione variabile in maniera crescente durante l'analisi

3.2 Materiali non lineari assegnati

I materiali non lineari assegnati nel modello sono i seguenti:

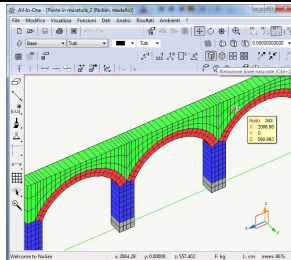
“No-Tension”

Sono stati creati 3 tipi di materiali "No-Tension":

Riempimento (Assegnato ai gusci di colore Verde nel modello)

Arco (Assegnato ai gusci di colore Rosso nel modello)

Piedritti (Assegnato ai gusci di colore Blu nel modello)



Agli elementi guscio di base (di colore Grigio) non sono stati assegnati materiali non lineari, pertanto per tali elementi si considera un comportamento lineare per tutta l'analisi, poichè essendo il modello vincolato tramite incastri posti alla base di tali elementi, assegnare caratteristiche non lineari anche ai nodi di vincolo e quelli vicini, renderebbe il modello non lineare suscettibile di instabilità locali dovute alla presenza dei vincoli che generando picchi di tensione puntuali potrebbero portare a snervamento o rottura prematura tali elementi troncando il calcolo per non raggiungimento della convergenza.

In tal modo la zona soggetta a picchi di tensione, mantenendo un comportamento elastico lineare per tutta l'analisi permetterà di determinare le capacità globali della struttura nel suo complesso, senza essere influenzata da problemi matematici locali, dato che le tensioni elevate che matematicamente si riscontrano nei nodi vincolati, avranno la possibilità di diffondersi a tutta la sezione del piedritto, e non creare problemi agli elementi a cui è stato assegnato un comportamento non lineare.

Tornando ai materiali non lineari creati nel modello, ad essi sono stati assegnati i parametri meccanici mostrati in figura:

Isotropia	Isotropo
Modulo elasticità 1	30000.00
Coefficiente Poisson 1	0.30
Tensione rottura compressione 1	20.00
Deformazione ultima compressione	0.00350
Tensione ultima trazione	2.00

Isotropia	Isotropo
Modulo elasticità 1	60000.00
Coefficiente Poisson 1	0.30
Tensione rottura compressione 1	40.00
Deformazione ultima compressione	0.00350
Tensione ultima trazione	5.00

Isotropia	Isotropo
Modulo elasticità 1	80000.00
Coefficiente Poisson 1	0.30
Tensione rottura compressione 1	60.00
Deformazione ultima compressione	0.00350
Tensione ultima trazione	5.00

Le differenze tra un materiale ed un altro sono nei valori dei moduli di elasticità, e nei valori delle tensioni di rottura sia a compressione che a trazione.

Nel particolare abbiamo il materiale migliore assegnato ai piedritti poichè nella realtà tali elementi presentano una qualità della pietra migliore ed una posa precisa con i giunti allineati e ben ammorsati, con una esigua quantità di malta, pertanto le sue caratteristiche sono migliori;

il materiale con caratteristiche intermedie è stato assegnato agli archi, poichè anche qui la qualità delle pietre è buona e la tessitura è impeccabile, ma nelle arcate aumenta la quantità di malta utilizzata per la realizzazione;

Il materiale con caratteristiche più scadenti è stato assegnato agli elementi di riempimento delle arcate, poichè in tale zona si ha per lo più un materiale disomogeneo spesso posato sciolto, e che garantisce un contributo molto esiguo alla resistenza della struttura.

Tutto questo per cercare di cogliere nel modello un risultato il più possibile attendibile e vicino al comportamento reale.

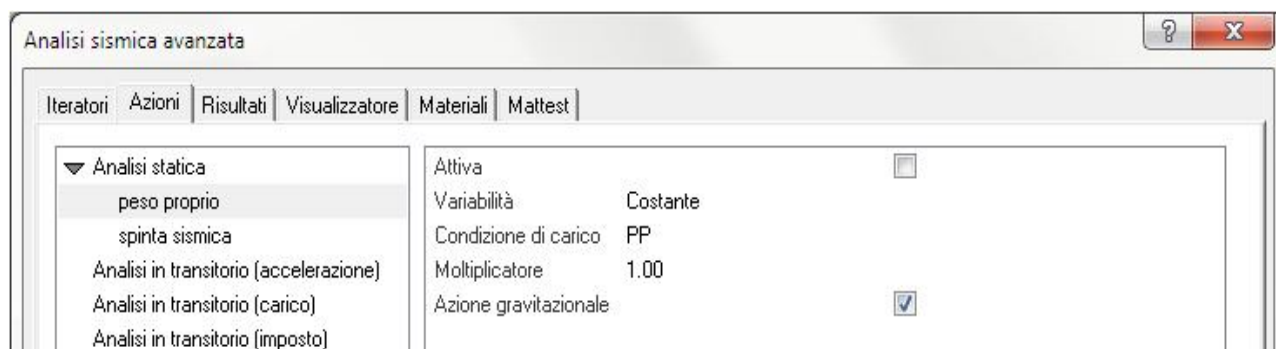
3.3 Azioni assegnate per analisi non lineare

L'assegnazione delle azioni per eseguire l'analisi non lineare è stata eseguita tramite la procedura che prevede l'utilizzo dell'interfaccia attivabile tramite il comando "Analisi sismica avanzata" (Vedere "Tutorial base")

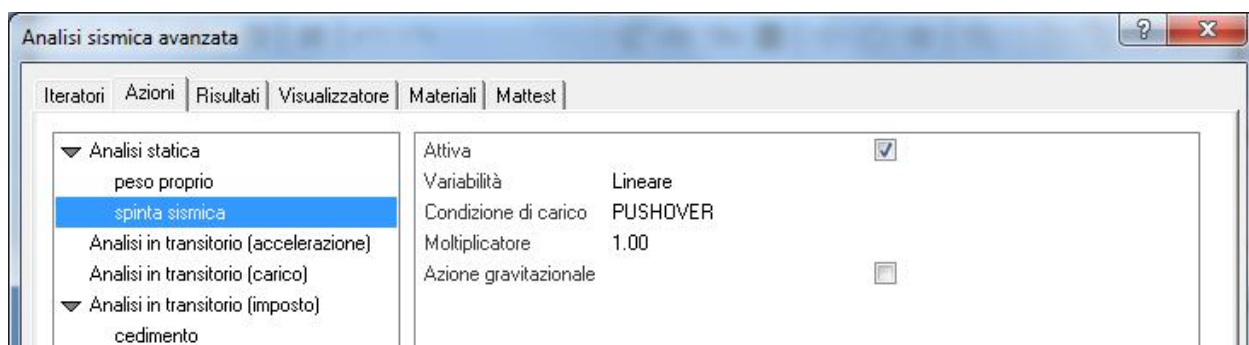
Assegnazione azioni: Analisi sismica avanzata

Come visto precedentemente sono stati assegnati al modello tutti i carichi statici verticali e l'azione orizzontale sotto la quale ci si propone di eseguire l'analisi non lineare.

In EE sono state quindi create due azioni sotto "Analisi statica" ove il peso proprio è stato definito costante, assegnando un moltiplicatore pari a 1.00, ma in questa prima analisi non lo attiveremo, (sarà attivata successivamente):



mentre la spinta sismica è stata definita variabile linearmente, assegnando anche qui un moltiplicatore pari a 1.00:

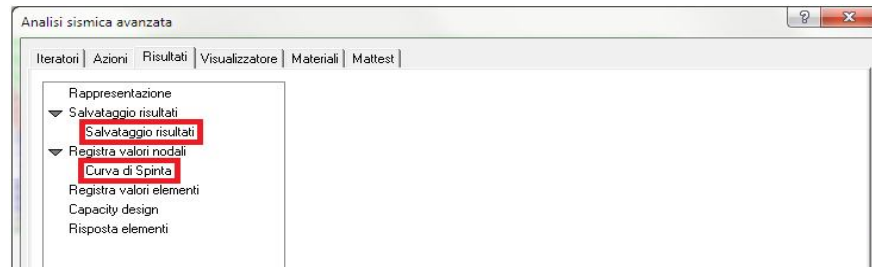


NOTA: E' importante sottolineare che è possibile eseguire l'analisi anche senza assegnare un carico verticale alla struttura, poiché al materiale No-Tension è stata assegnata una resistenza a trazione (anche se minima), questo permette che all'applicazione della spinta orizzontale, le tensioni di trazione che immancabilmente si registrerebbero in alcuni punti della struttura, siano equilibrate. Se non avessimo as-

segnato un minimo di resistenza a trazione, all'avvio dell'analisi, dopo i primi passi, si sarebbe verificata la Non convergenza per mancato equilibrio della struttura, ed il calcolo sarebbe stato interrotto.

3.4 Registratori attivati

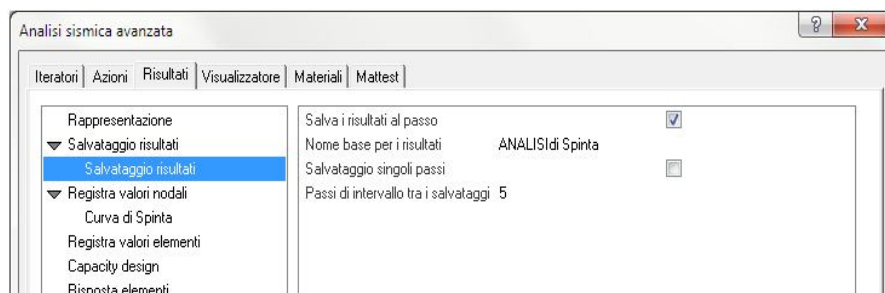
Per poter elaborare i risultati di analisi, sono stati attivati i seguenti *Registratori di risultati*:



Sono attivi due "Registratori" appartenenti alle seguenti Famiglie:

- **Salvataggio risultati**: imposta nel programma la registrazione di tutte le grandezze che interessano la struttura (sollecitazioni, spostamenti, ecc.) per ogni passo di calcolo dell'analisi non lineare.

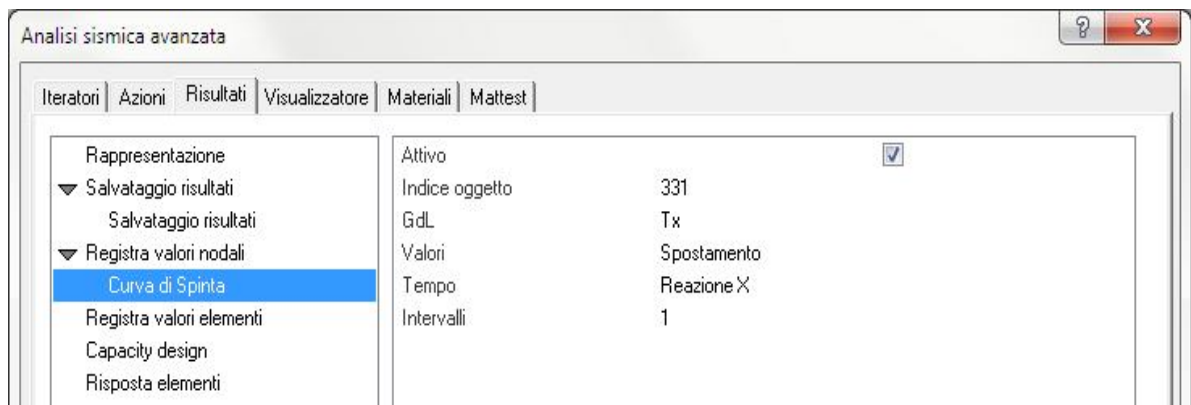
I parametri da inseriti sotto tale "Registratore" sono:



- **Salvataggio dei risultati al passo**: spuntando tale opzione si attiva il registratore di salvataggio dei risultati ed il programma salverà i risultati dell'analisi non lineare che ci si appresta ad eseguire, per ogni passo od ogni tot passi a seconda delle impostazioni che vengono date successivamente;
- **Nome base per i risultati**: in tale tendina si può specificare un nome diverso da quello assegnato di default dal programma, per facilitare l'utente al ritrovamento di tale set di risultati. Tale comando è utile nel caso si intendono eseguire diverse analisi non lineari, e delle quali di ognuna occorre registrare i risultati, infatti modificando il nome il programma non sovrascrive il set di risultati registrato nell'analisi precedente;
- **Salvataggio singoli passi**: spuntando tale opzione il programma salverà i risultati dell'analisi non lineare che ci si appresta ad eseguire, ad ogni singolo passo che verrà elencato nella cella sottostante che all'apposizione della spunta cambierà il proprio nome in "Passi dove effettuare il salvataggio", se si desidera salvare i risultati per più passi, deve essere indicato il numero degli stessi, separato da una virgola;

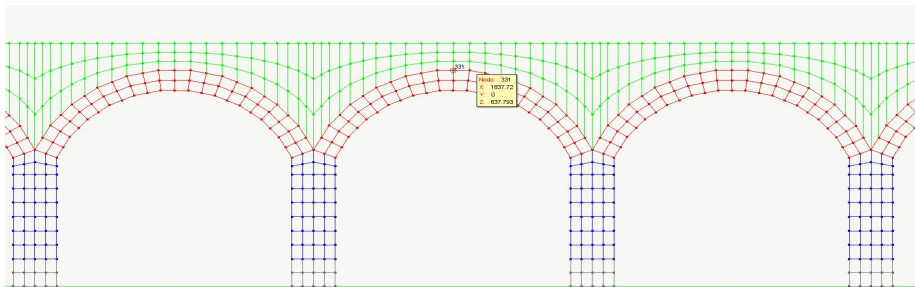
- Passi di intervallo tra i salvataggi: specificando un numero in tale casella, per esempio 5, il programma salverà i risultati dell'analisi non lineare che ci si appresta ad eseguire, ogni 5 passi. Inserire il numero 1 in tale tendina, farà sì che i risultati saranno salvati ad ogni passo;
- **Registra valori nodali**: attiva una entità che durante l'analisi monitora e scrive su un file esterno (in formato .txt), per un certo nodo del modello, come varia una grandezza in relazione ad un'altra grandezza; con tale "Registratore" otterremo la curva di capacità della struttura.

I parametri da inseriti sotto tale "Registratore" sono:



- Attivo: spuntando tale opzione si attiva il registratore;

- Indice oggetto: è stato inserito l'indice di un nodo di sommità dell'arcata centrale:



- GdL: in tale tendina è stato specificato quale tipo di "Grado di Libertà" si vuole andare a monitorare per il nodo associato al registratore, nel nostro caso è stato assegnato il taglio in direzione X;

- Valori: in tale tendina è stata inserita una delle due grandezze che il registratore dovrà monitorare, e nel caso specifico è stato assegnato lo "Spostamento";

- Tempo: in tale tendina è stata inserita l'altra grandezza che il registratore dovrà monitorare, e nel caso specifico è stata assegnata la "Reazione X" alla base della struttura;

- Intervalli: specificando un numero in tale casella, per esempio 1, il programma registrerà i valori delle grandezze da registrare, ad ogni passo.

3.5 Iteratori d'analisi

Nel dialogo di impostazione dell'analisi non lineare, sono state settate le seguenti opzioni:

Analisi sismica avanzata

Iteratori | Azioni | Risultati | Visualizzatore | Materiali | Mattest

Metodi

- ☐ Lineare
- ☒ Newton-Raphson
- ☐ Newton-Raphson con Line Search

Test di convergenza

- ☒ Equilibrio
- ☐ Spostamenti
- ☐ Energia

Massimo numero iterazioni: 100
Tolleranza: 0.0100000

Smorzamento di Rayleigh

Massa: 0.000000 Rigidezza: 0.050000

Modale

☒ Modale N. autovalori: 3

Solutori

- ☒ Matrici sparse simmetriche
- ☐ Matrici sparse non simmetriche

Integratori statici

- ☐ Controllo di carico
- ☒ Controllo di spostamento
- ☐ ArcLength

Integratori transitorio

- ☐ Newmark

Parametri numerici

Numero di passi: 300
Incremento: 0.0200000
Variabilità di passo: 0.0010000
☐ Usa lista Lista
Nodo di riferimento: 331
Gdl: Tx
Lunghezza arco: 10.000000
Alfa: 1.0000000
Intervallo temporale: 0.0100000

☒ Apri questo dialogo prima di ogni analisi ☐ Inizia analisi dallo stato di quella precedente ☒ Applica azioni gravitazionali prima

Analisi Esci

Metodi di iterazione

- Newton-Raphson;

Solutori

- Matrici sparse simmetriche;

Integratori statici

Metodo di integrazione statica:

- Controllo di spostamento:

Nel caso di una integrazione a “Controllo di spostamento” il programma considera le forze assegnate sotto le condizioni di carico che nella tendina “Azioni” sono state definite con variabilità “Lineare”, e scala tali sistemi di forze in modo che ad ogni passo, il “Nodo di riferimento” impostato nella sessione “Parametri numerici” subisca uno spostamento pari al valore assegnato come “Incremento”. Spiegheremo

ta poco perchè è stato scelto di applicare il controllo di spostamento invece che il controllo di carico.

Test di convergenza

"Equilibrio" scegliendo il massimo numero di iterazioni e la relativa tolleranza di convergenza

Parametri numerici

Numero di passi: 300

Incremento: 0.02

Variabilità di passo: 0.001

Nodo di riferimento

E' stato assegnato lo stesso nodo da monitorare con il "Registratore" "Curva di Spinta".

GdL

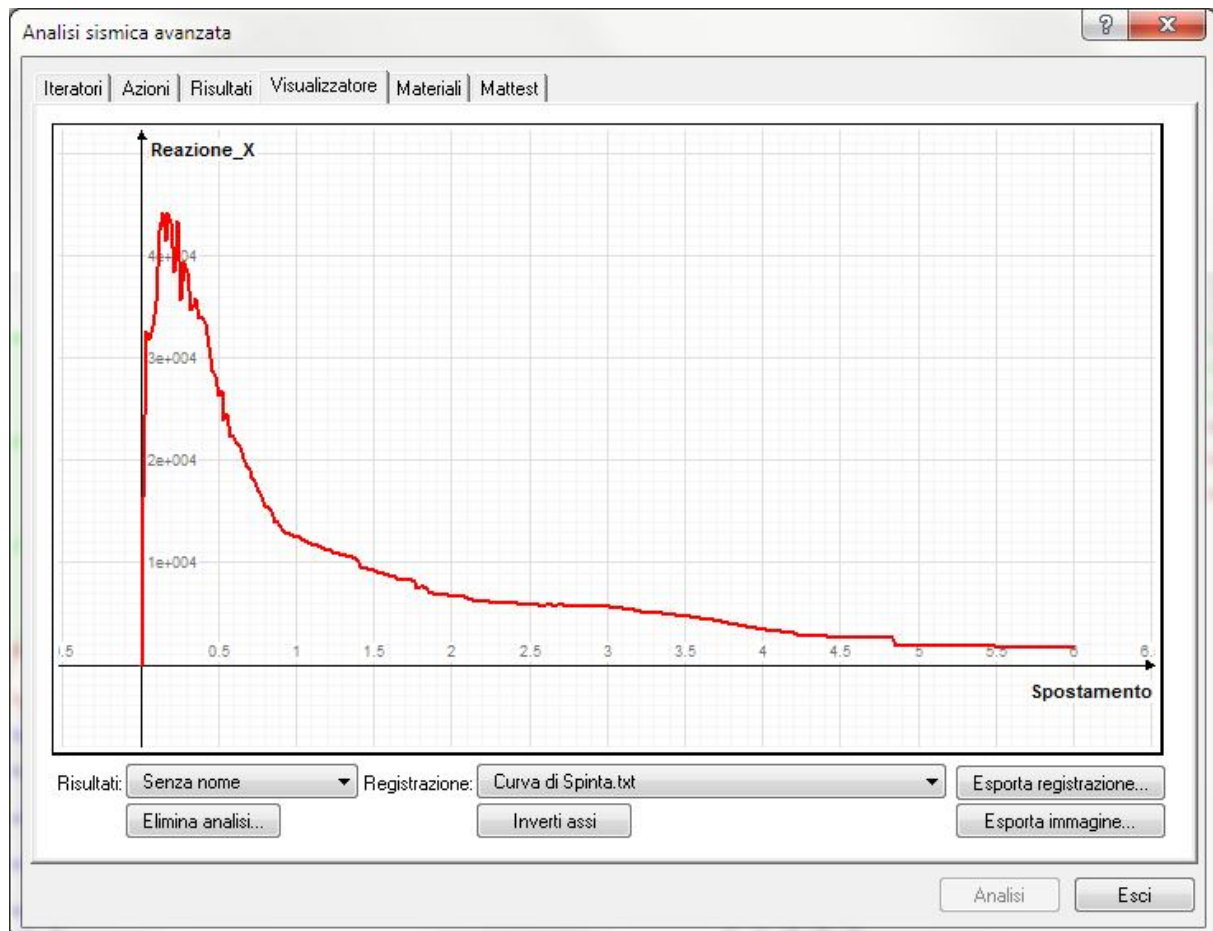
E' stato assegnato il Taglio alla base della struttura in direzione X.

Si può procedere ora, con l'analisi della struttura.

3.6 Risultati analisi

A seguito dell'esecuzione dell'analisi, è possibile andare a visualizzare la curva di capacità della struttura.

Aprendo il visualizzatore:



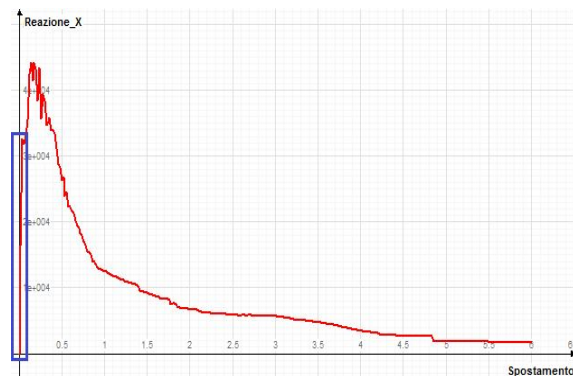
Questa è la curva di capacità che rappresenta il comportamento non lineare del ponte in muratura (privo di peso proprio) quando è sollecitato da una azione orizzontale crescente nel tempo.

Considerazioni sulla curva di capacità ottenuta:

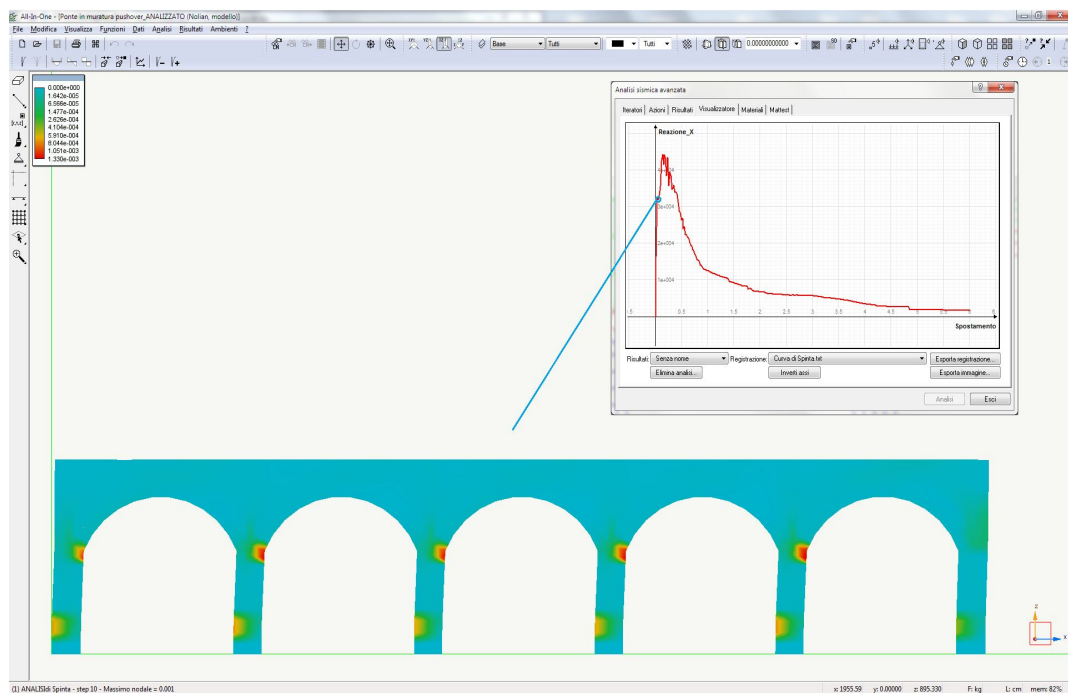
La variazione dello spostamento orizzontale del Nodo di riferimento in relazione alla forza orizzontale applicata alla struttura mostrata dal grafico, è rappresentativa con accettabile approssimazione, del comportamento che ci si dovrebbe aspettare nella realtà dalla struttura.

Si possono riscontrare 4 differenti tratti:

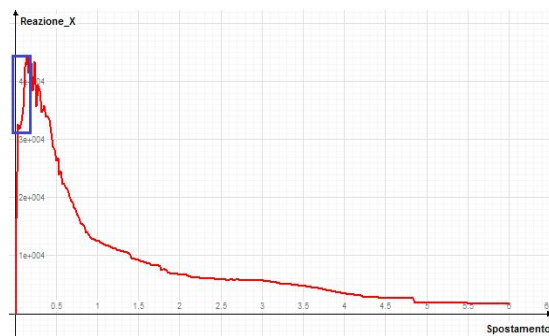
1) Primo tratto:



si riscontra un comportamento elastico lineare, al crescere della forza orizzontale, la struttura subisce uno spostamento proporzionale alle forze applicate secondo una legge lineare, quando il valore dello spostamento raggiunge il limite massimo accettabile per la muratura (parte alta del tratto 1 spostamento del nodo di riferimento pari a circa 1.0 mm), iniziano a formarsi le prime fessure nei punti più sollecitati della struttura, da qui inizia una variazione di comportamento.



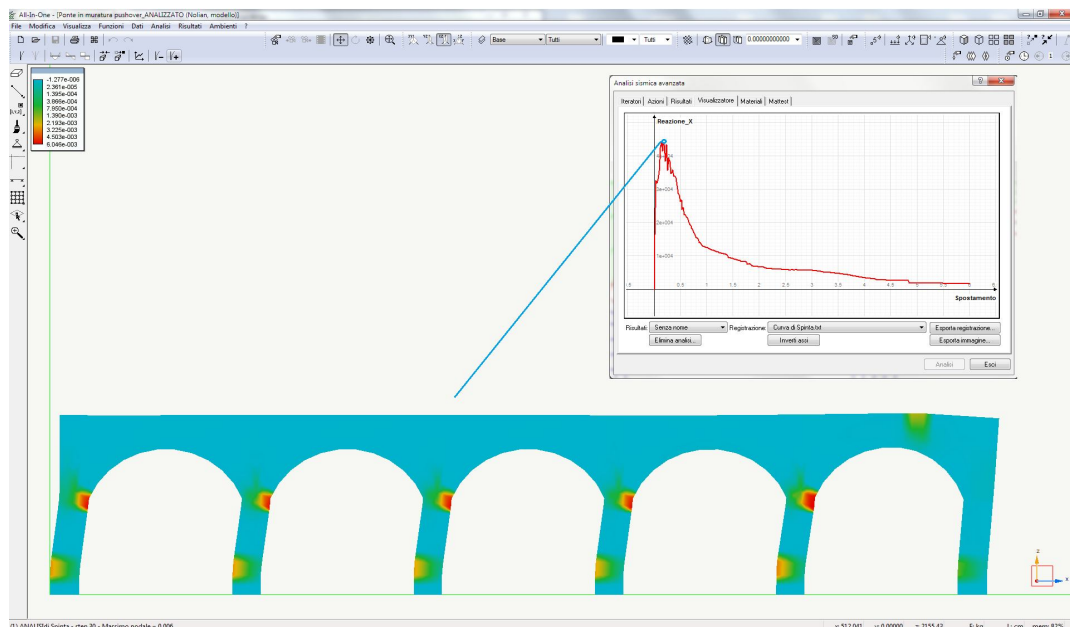
2) Secondo tratto:



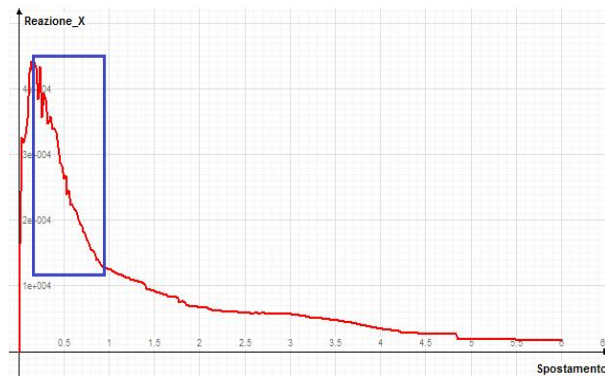
Qui la curva subisce una variazione di comportamento, e lo spostamento del nodo di riferimento, aumenta oltre il doppio del suo valore al limite elastico, (circa 2.50 mm), mentre la forza orizzontale applicata aumenta ma di una quantità pari a circa 1/4 della forza corrispondente al limite elastico.

La perdita di linearità e di proporzionalità tra le variazioni delle due grandezze è dovuta alla formazione delle prime fessure, che comportano una riduzione della rigidezza, all'apertura di ogni fessura, avviene nella struttura una redistribuzione degli sforzi secondo la nuova configurazione del quadro fessurativo, ed in tale situazione, per aumentare lo spostamento di una certa quantità (l'incremento di passo assegnato nell'analisi), la forza deve crescere meno rispetto a quanto avveniva nel primo tratto.

Arrivati al valore di spostamento pari a circa 2.50 mm, si ha una nuova variazione del comportamento.



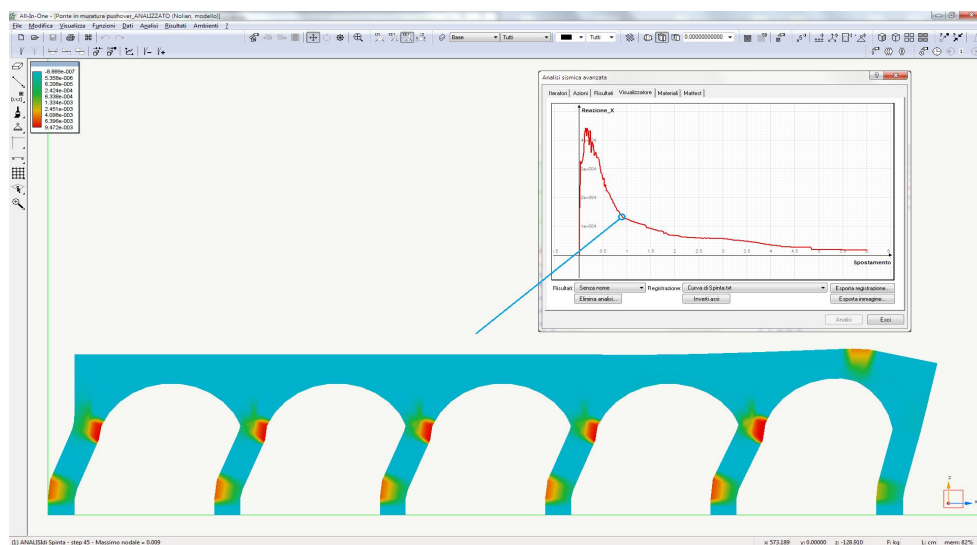
3) Terzo tratto:



In tale tratto si è raggiunto lo spostamento massimo oltre il quale la struttura inizia a perdere significativamente la sua resistenza, gli elementi, nei punti più sollecitati, sono tutti fessurati, e la fessura comporta il non equilibrio delle tensioni di trazione all'interno delle sezioni, che quindi si vanno a parzializzare per equilibrare i momenti tramite l'eccentricità tra la risultante delle tensioni di compressione, ed il baricentro geometrico della sezione.

Al crescere dei momenti la zona fessurata aumenta sempre più, poiché deve aumentare l'eccentricità che permette di equilibrare il momento, al contempo crescono anche le tensioni di compressione.

In uno scenario del genere la struttura è fortemente indebolita, poiché essendo danneggiate tutte le sezioni più sollecitate, la rigidità della struttura è diminuita sensibilmente, ed infatti dallo spostamento finale del tratto 2, per ottenere ulteriori spostamenti la forza da applicare deve diminuire rapidamente ad un valore di molto inferiore rispetto a quello massimo del tratto 2.

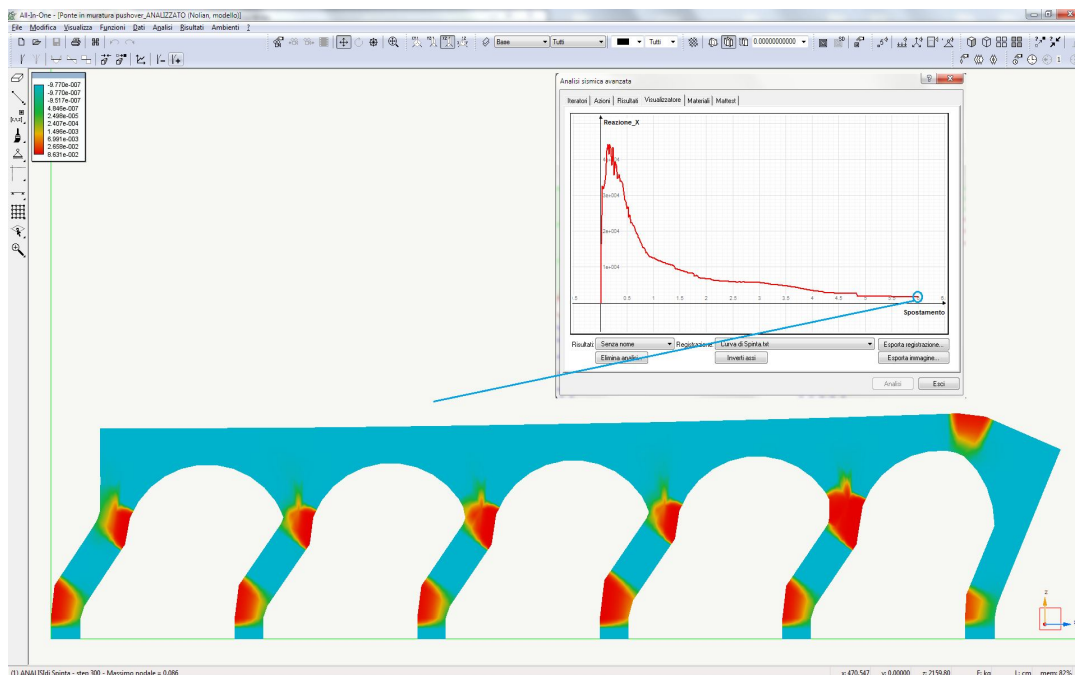


4) Quarto tratto



La struttura è ormai totalmente danneggiata, ha perso gran parte della propria rigidità, le sezioni ormai hanno davvero una porzione minima che ancora assorbe i carichi esterni.

In tale scenario la forza deve continuare a diminuire, mentre lo spostamento cresce esponenzialmente, fino ad un valore limite in corrispondenza del quale non si ottiene più la convergenza del calcolo, al quale nella realtà corrisponde il collasso della struttura.

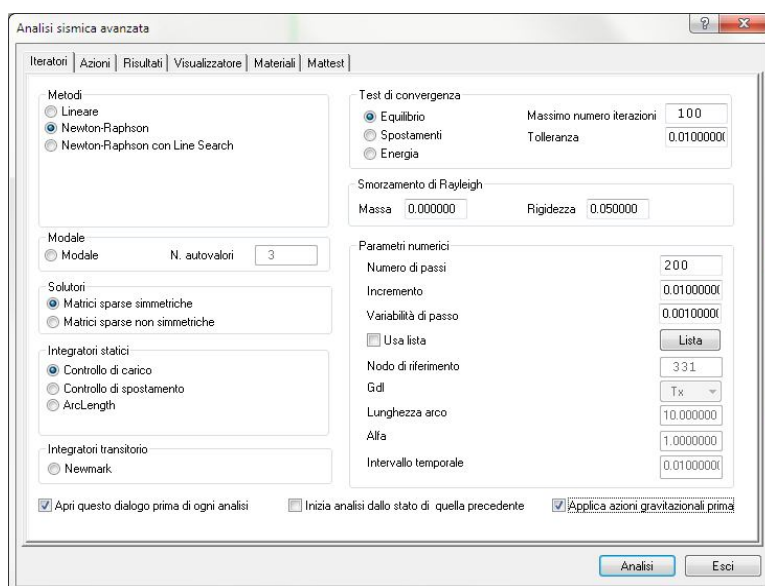


E' importante sottolineare che il fenomeno di "Softening", (ossia il comportamento della struttura a cui corrisponde un incremento di spostamento anche se la forza applicata diminuisce), è stato possibile valutarlo grazie all'analisi condotta in "Controllo di spostamento", che permette di scalare il sistema di forze applicato, anche decrementandolo, in modo di poter proseguire nell'analisi sino a valutare lo spostamento ultimo, e quindi intrinsecamente le effettive capacità di dissipazione di energia da parte della struttura.

In una analisi eseguita in controllo di forza, essendo il sistema di forze incrementato in maniera lineare secondo le impostazioni assegnate dall'utente, seppure si ottiene la convergenza del calcolo fino al punto equivalente alla fine del "Secondo Tratto", non si potrebbe comunque proseguire molto oltre tale valore di spostamento, pertanto l'informazione principale che si ottiene da un tale tipo di analisi è la forza ultima che può assoggettare la struttura (lievi variazioni sono dovute alla differenza tra i due metodi di controllo), mentre in controllo di spostamento è possibile cogliere la effettiva capacità di spostamento in campo duttile tramite il "Softening".

La curva di capacità ottenuta nell'analisi riporta uno spostamento ultimo della struttura pari a circa 6,00 cm, ma l'andamento della curva mostra che gran parte della resistenza della struttura è già persa con uno spostamento pari a circa 0,50 cm, e tutto il tratto finale del ramo discendente diviene sostanzialmente inutile dato che nella realtà le azioni sismiche non diminuiranno mai al punto di riuscire a raggiungere lo spostamento di 6.00 cm, pertanto è possibile andare a modificare i parametri dell'analisi, al fine di calibrare lo spostamento ultimo ottenuto nell'analisi, ed ottenere una curva più dettagliata.

Nel particolare andremo a diminuire il numero di passi totali dell'analisi e l'incremento di spostamento tra un passo ed il successivo:



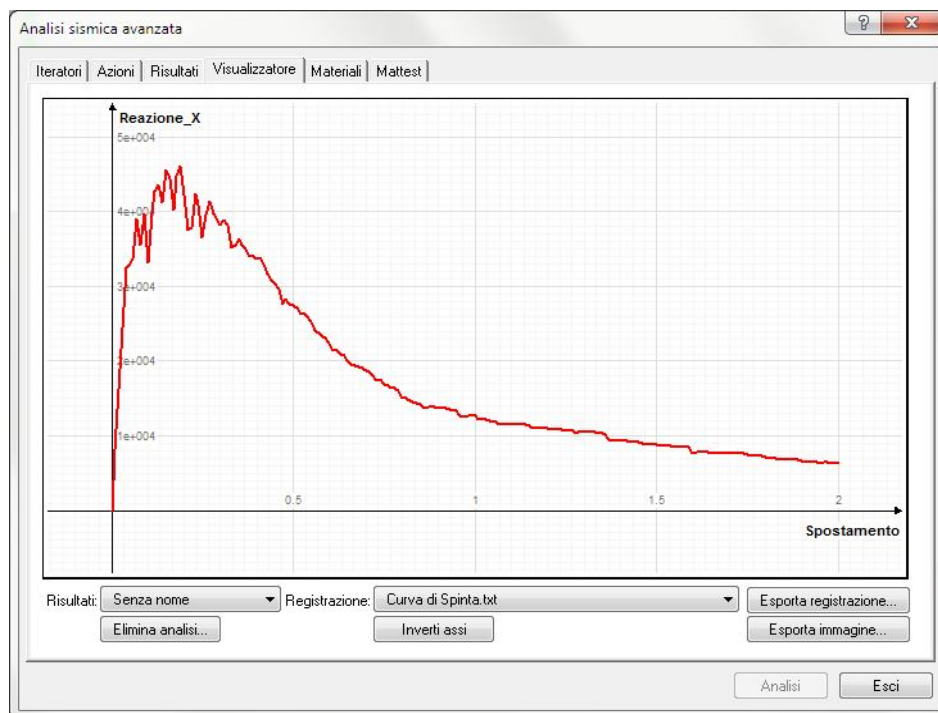
Parametri modificati

Numero di passi: 200

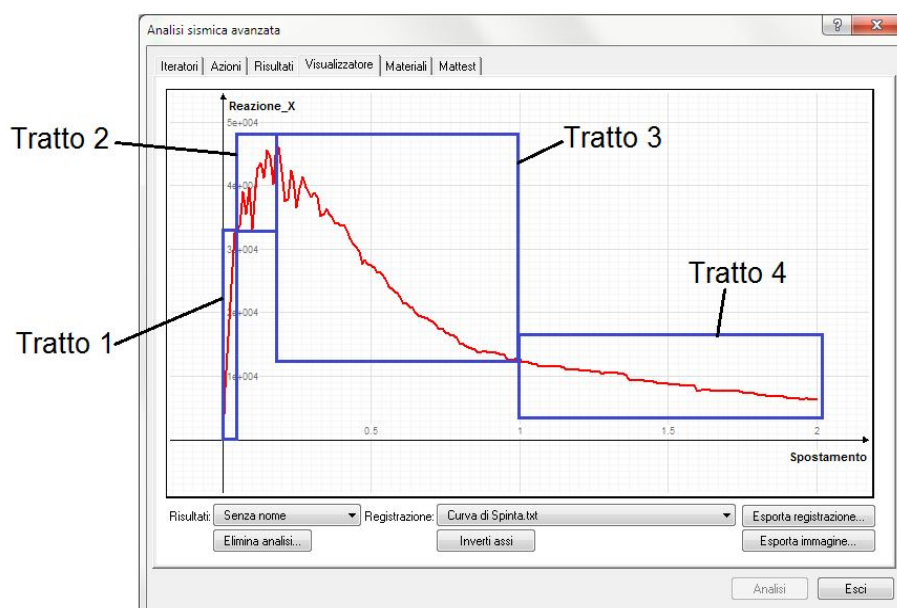
Incremento: 0.01

In tal modo lo spostamento finale subito dalla struttura nel nodo di controllo, sarà pari a 2.00 cm, (valore che permette di cogliere appieno i 4 tratti descritti sopra) ma la diminuzione dell'incremento permette anche di “attenuare” parzialmente le perturbazioni locali della curva di capacità ottenuta, senza togliere informazioni sulla valutazione delle capacità della struttura.

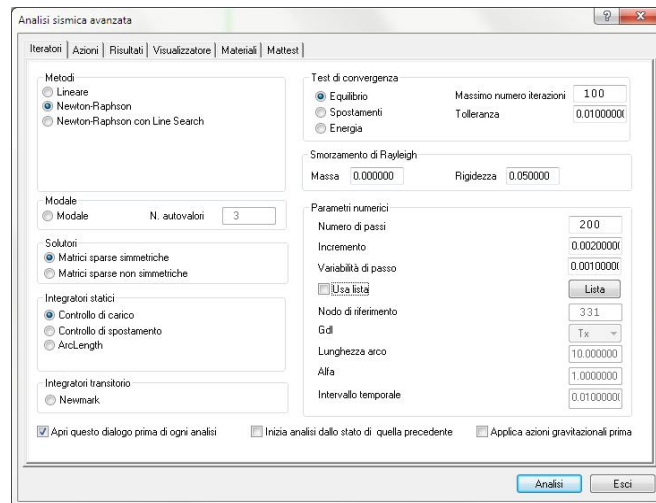
Rieseguendo l'analisi si ottiene la seguente curva:



Nella quale si riconoscono i 4 tratti individuati precedentemente:



Volendo dettagliare ulteriormente la curva di capacità ottenuta troncando il ramo decrescente, ad uno spostamento corrispondente ad una riduzione del sistema di forze pari a circa l'85% della forza massima registrata nell'analisi, manterremo costante il numero di passi totali dell'analisi, ma diminuiremo in maniera sostanziale l'incremento di spostamento tra un passo ed il successivo:



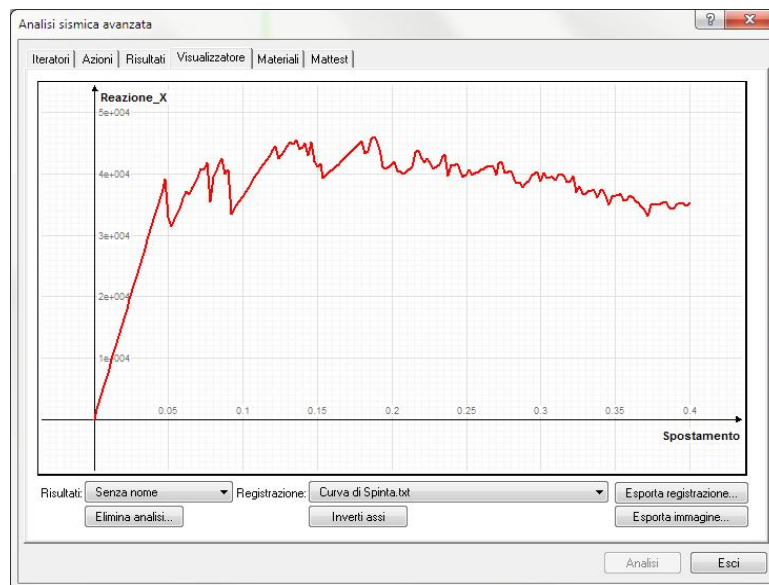
Parametri modificati

Numero di passi: 200

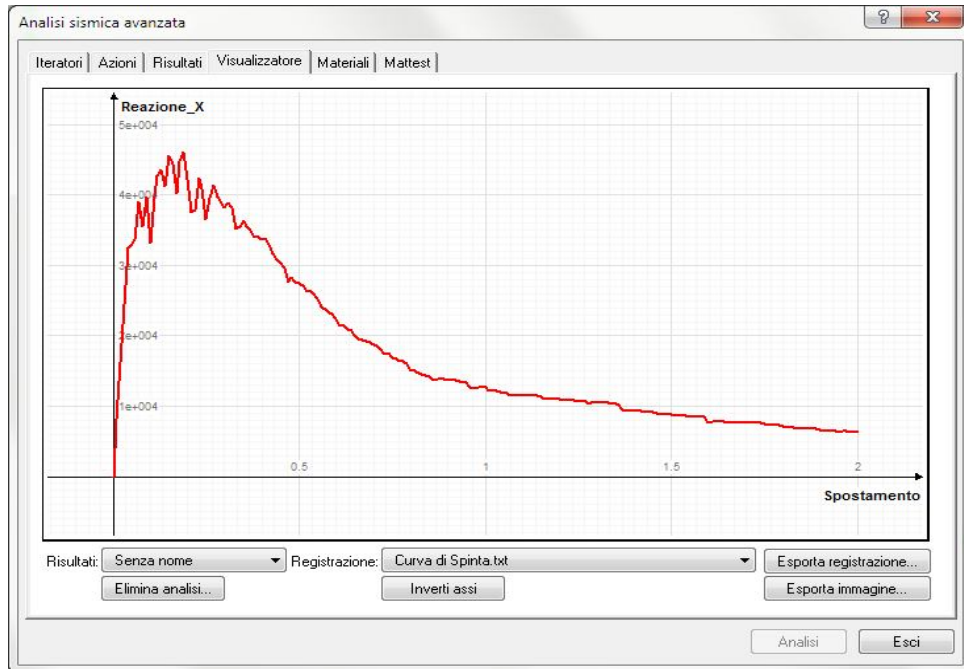
Incremento: 0.002

In tal modo lo spostamento finale subito dalla struttura nel nodo di controllo, sarà pari a 0.40 cm, (valore che permette di cogliere i primi 2 tratti descritti prima) ma la nuova diminuzione dell'incremento permette anche di “attenuare” ancor di più le perturbazioni locali della curva di capacità ottenuta.

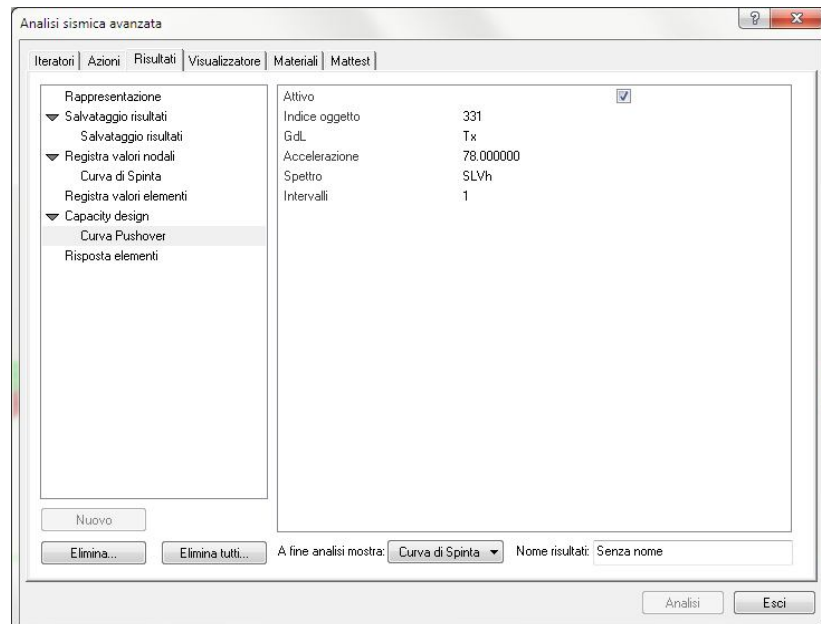
Rieseguendo l'analisi si ottiene la seguente curva:



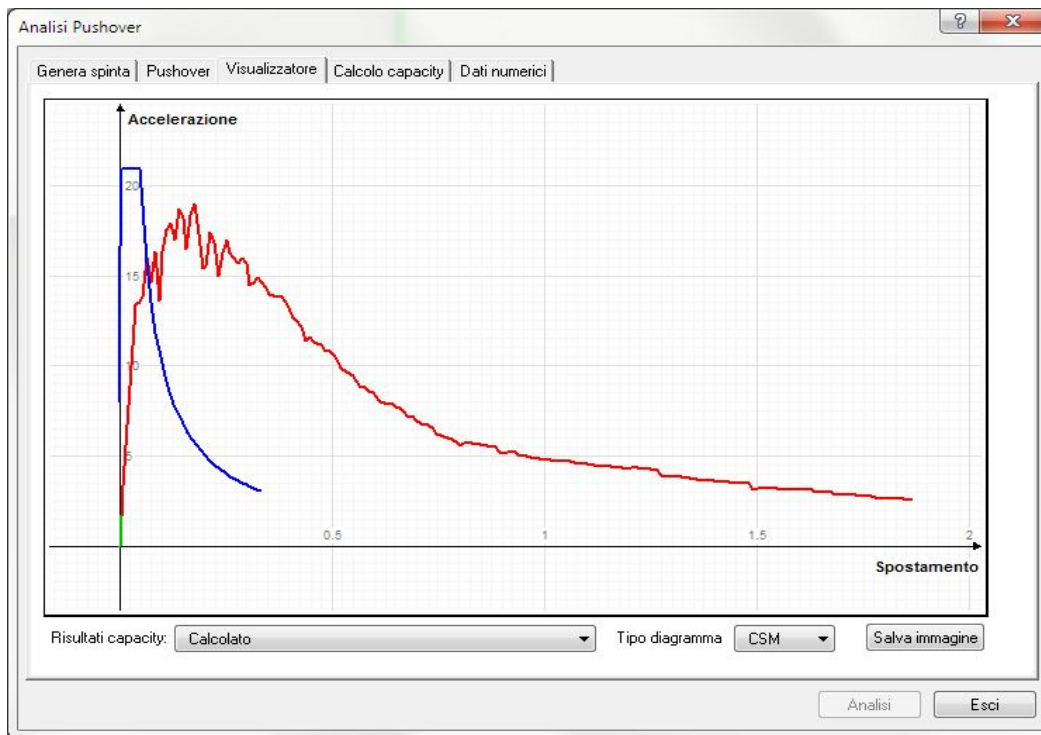
Riprendendo ora in riferimento l'analisi eseguita in cui ottenevamo una curva di capacità con 4 tratti



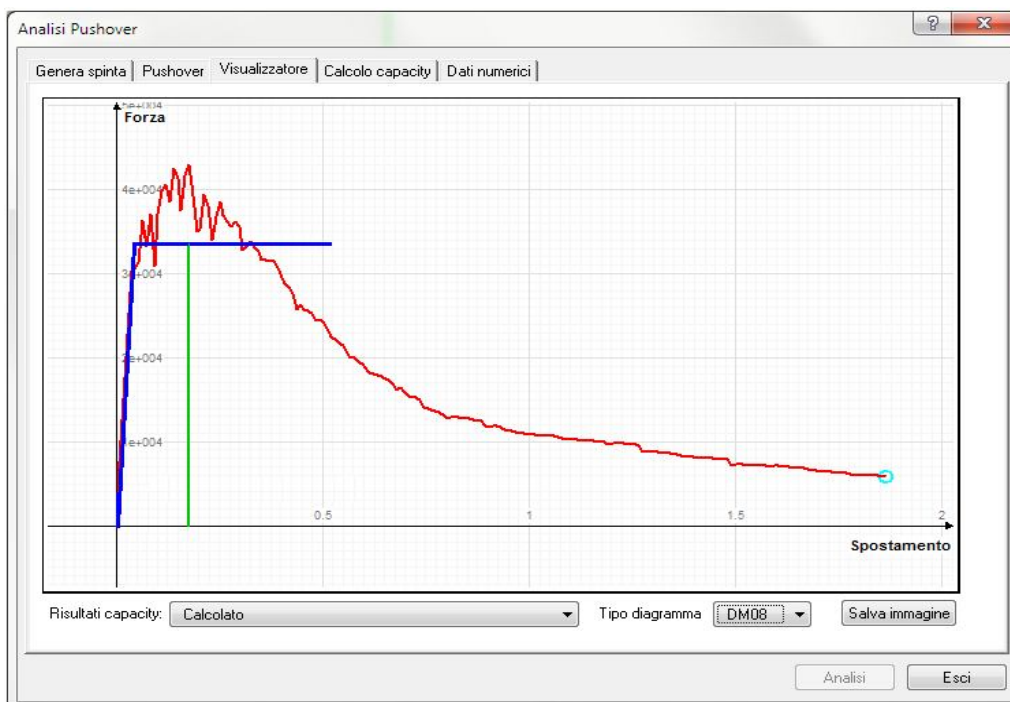
Una volta eseguita l'analisi, se avessimo attivato un registratore "Capacity Design" (che permetteva di andare a manipolare la curva di capacità per eseguire le verifiche):



Una volta eseguita l'analisi lineare si potrebbe banalmente procedere con una verifica in termini di spostamento ultimo, tramite il dialogo "Pushover" o con il metodo CSM:



o con il metodo del DM 2008:

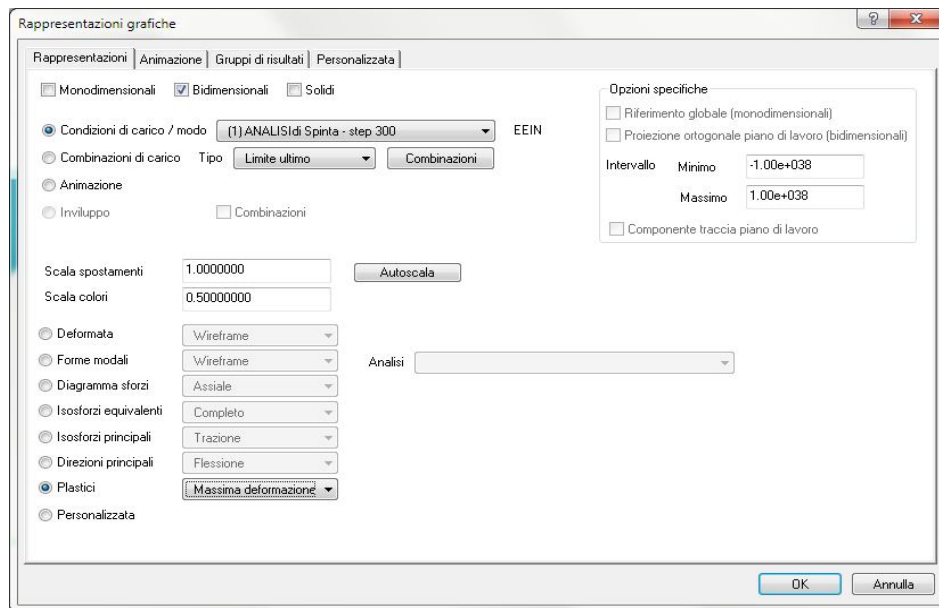


Ma questo tipo di approccio alla verifica per il tipo di modellazione ed analisi eseguita, risulterebbe poco significativa, poiché la modellazione della muratura con elementi bidimensionali e soprattutto con un materiale non lineare caratterizzato da un comportamento a “fibre”, fornisce informazioni molto significative che meritano approfondimenti sul reale comportamento della struttura, mentre eseguire una verifica confrontando semplicemente la domanda di spostamento con la capacità di spostamento ultimo della struttura, è un risultato al quale si sarebbe potuto pervenire anche modellando le pile del ponte come elementi trave con cerniera, che però non avrebbero fornito informazioni sulla distribuzione delle fessure, e dei punti che si trovano in condizioni critiche.

Un modello composto da elementi guscio con plasticità diffusa, a seguito di una analisi non lineare si presta a tutta una serie di valutazioni da parte del progettista che sono il punto di partenza per l'esecuzione di analisi più approfondite, e soprattutto volte a valutare comportamenti locali della struttura, oltre che quelli globali.

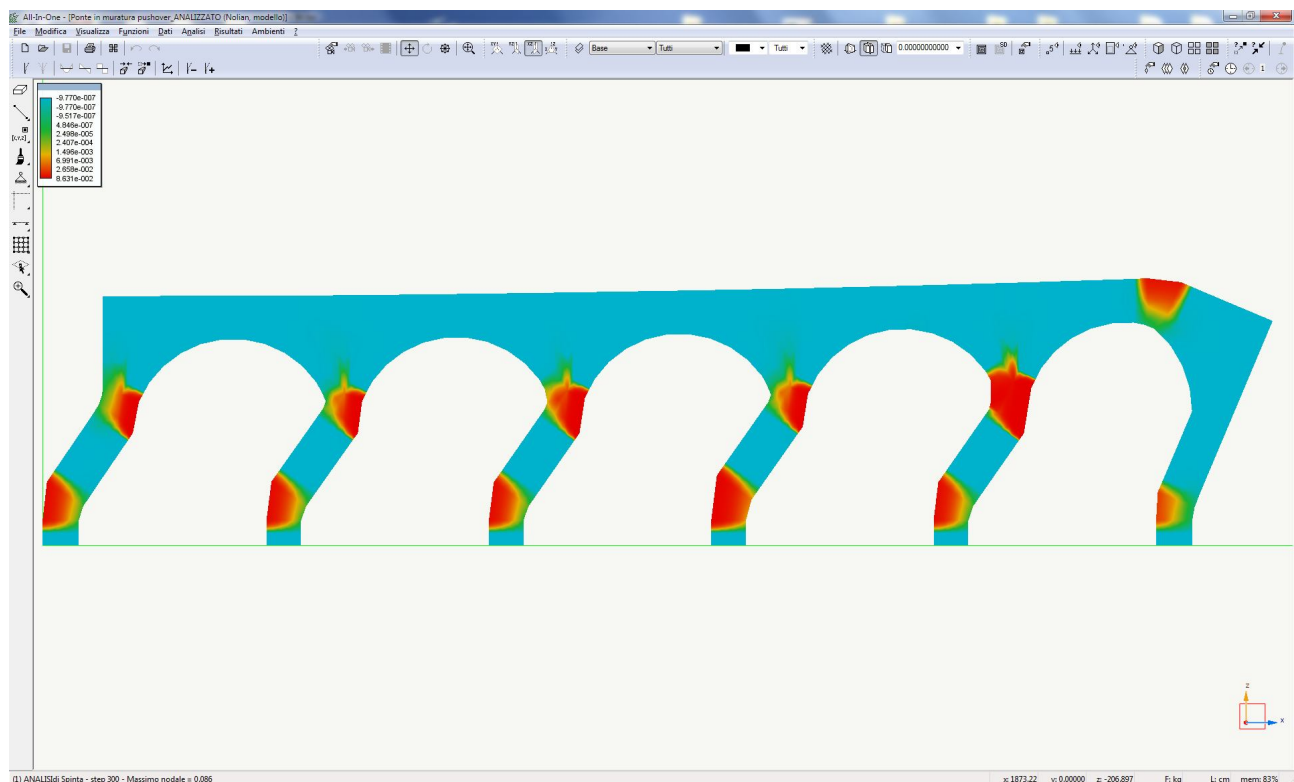
A seguito dell'analisi, grazie al registratore “Salvataggio risultati” è possibile visualizzare l'entità delle sollecitazioni, ma soprattutto il quadro fessurativo, l'eventuale stato di plasticizzazione degli elementi, e le massime deformazioni subite dalla struttura per ogni passo dell'analisi non lineare.

Aprendo la finestra di dialogo delle rappresentazioni grafiche, impostando la visualizzazione relativa all'ultimo passo di analisi (300), impostata nella finestra di dialogo delle “Rappresentazioni grafiche”:

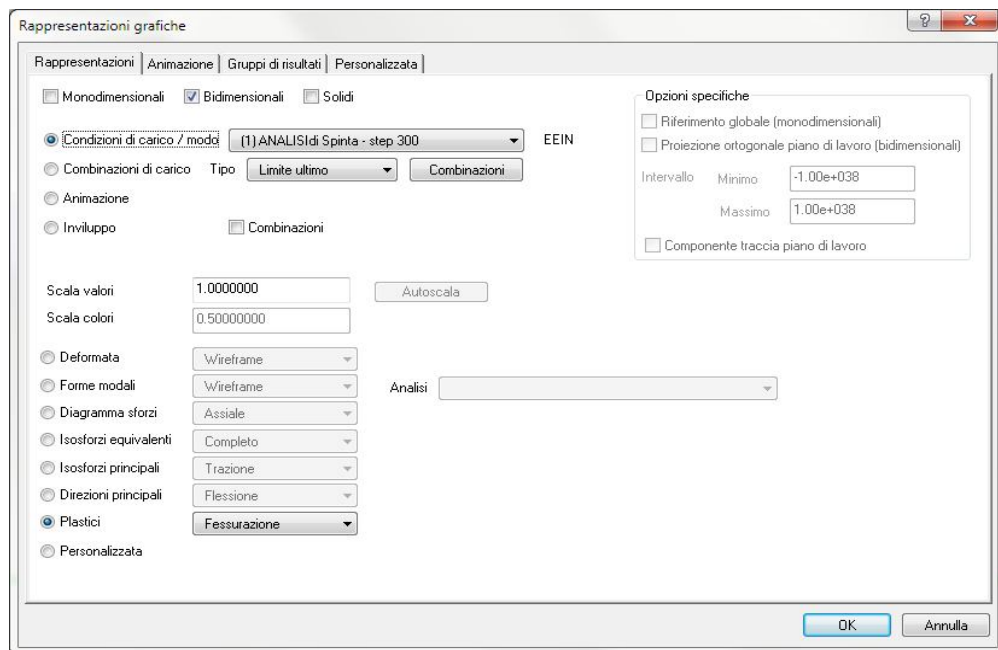


e settando la vista degli stati “Plastici” → “Massima deformazione”

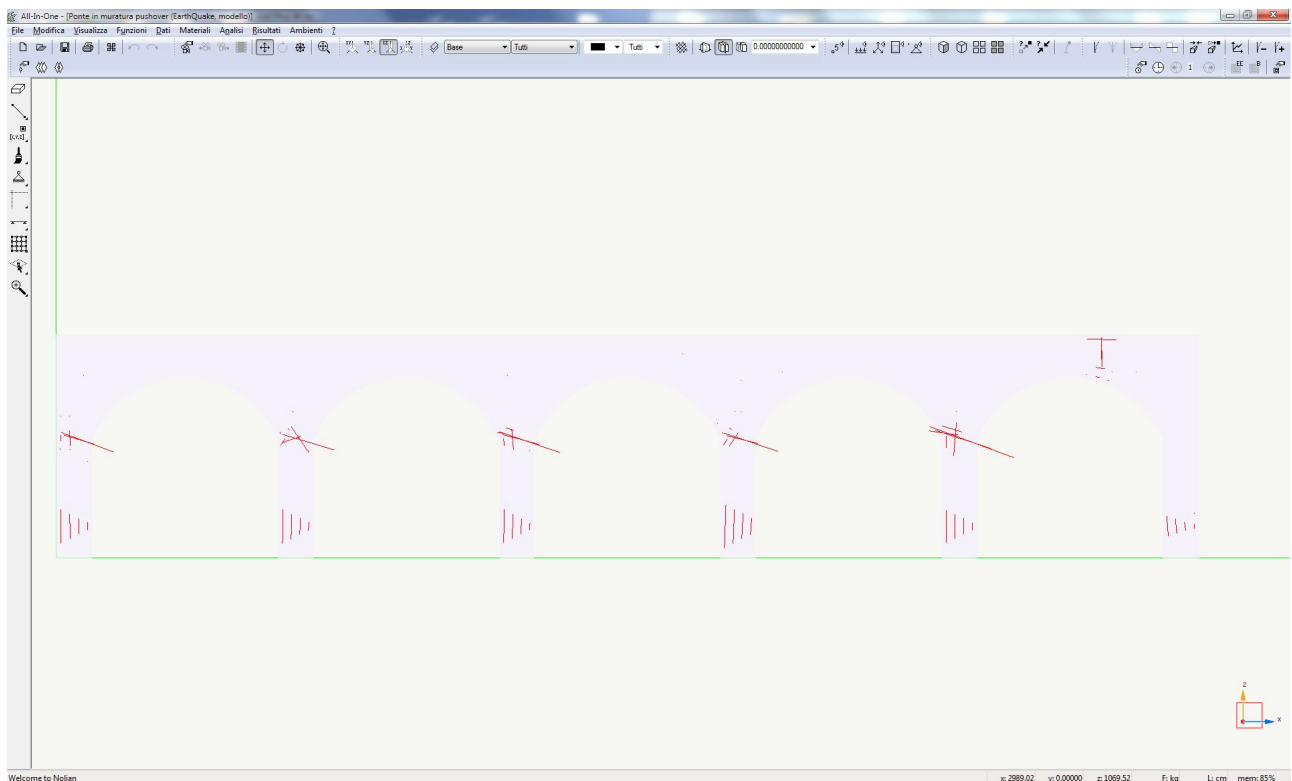
si ottiene il seguente quadro deformativo (il quadro delle epsilon subite del materiale):



Allo stesso modo, visualizzando la “Fessurazione” relativa all'ultimo passo di analisi (300), impostata sempre nella finestra di dialogo delle “Rappresentazioni grafiche”:



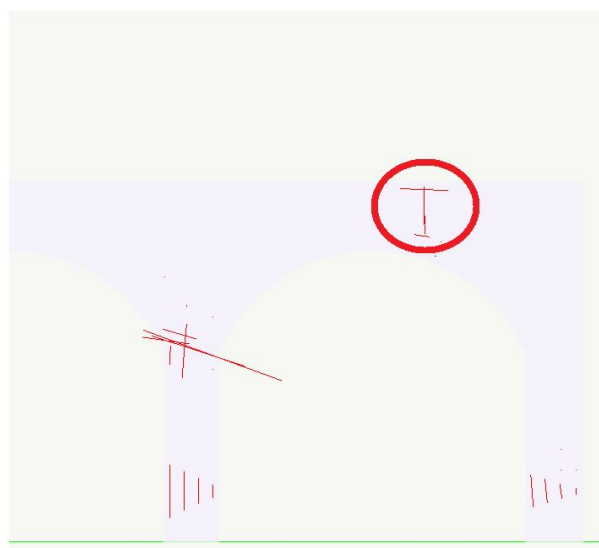
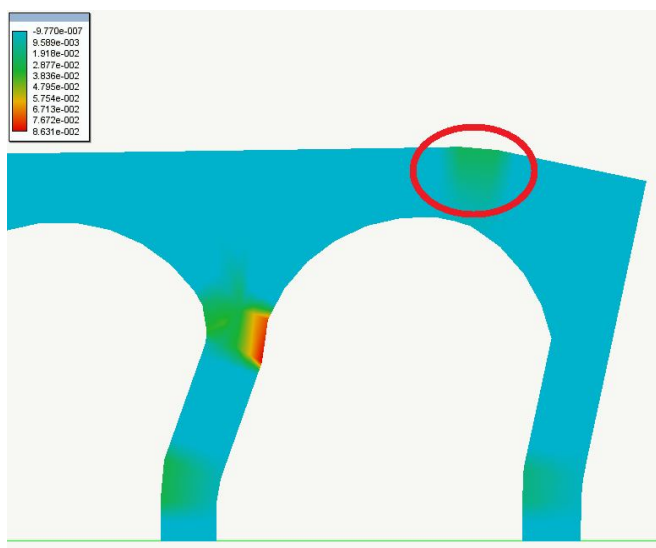
si ottiene il seguente quadro fessurativo:



Considerazioni sul quadro delle “Massime deformazioni” e del quadro fessurativo ottenuti:

Sulla base di tali risultati, il progettista può in prima fase valutare se il comportamento del modello è in linea con il comportamento atteso, e in questo caso si può affermare che il risultato è attendibile dato che i punti maggiormente sollecitati sono le sezioni al piede ed in testa alle pile, (comportamento simile a quello di un telaio con trave molto più rigida dei pilastri), ad eccezione dell'ultima arcata a destra, ove le zone critiche sono al piede della pila, e sulla parte superiore dell'arcata, a circa 2/3 della luce.

Tale comportamento è dovuta all'assenza di un'ulteriore arcata a destra, che non garantisce un'opportuna controspinta orizzontale sull'ultima pila, che quindi mostra un comportamento molto più simile ad una mensola verticale, che non ad un elemento di un telaio, portando a fessurarsi la zona di sommità.



Il modello studiato sul quale è stata eseguita una analisi statica non lineare, è stato analizzato assegnando un sistema di forze orizzontali, decontestualizzato rispetto a qualunque azione sismica, infatti le forze orizzontali assegnate erano uguali per tutti i nodi, questo perchè tale sistema di forze è servito come base di partenza, infatti l'analisi in controllo di spostamento permette di andare a avanti nell'analisi incrementando senza limiti il valore delle forze assegnate in partenza, purchè sia rispettato lo spostamento che deve subire il nodo di controllo e che si raggiunga la convergenza nel calcolo.

Ottenere valutazioni di vulnerabilità sismica da tale modello non è possibile in maniera diretta, però tale approccio deve essere visto come metodo di valutazione per situazioni complesse, in cui una analisi con metodi ordinari non è possibile per vari motivi (geometria della struttura, presenza di lesioni su parti strutturali, edifici con solai deformabili in cui non si ha una risposta strutturale globale, ecc.).

In tutti questi casi può risultare utile un approccio come quello adottato in questo modello, in cui viene eseguita una analisi non lineare con un sistema di forze scelto dal progettista, e dalle conseguenti valutazioni è possibile individuare le modalità di collasso

della struttura, e quindi procedere impostando una analisi del cinematismo che si può innescare, valutando un moltiplicatore del carico di collasso, e rapportando poi questo con le accelerazioni spettrali per vari stati limite e per vari tempi di ritorno, ottenendo così un versatile parametro di valutazione dell'indice di rischio sismico.

Ovviamente modellazioni come quella appena vista, (peraltro condotta su una struttura particolare, ma non così complessa) risultano laboriose, poiché richiedono all'utente profonde conoscenze sia di modellazione non lineare, sia di comportamento delle murature, ma tali modellazioni divengono indispensabili quando si opera su strutture storiche in muratura, che presentano una geometria particolare, (palazzi storici, chiese, cupole, ecc.), dove quindi una "ordinaria" analisi pushover cade in difetto per la valutazione dell'effettivo comportamento sismico della struttura, e soprattutto dove è difficile cogliere tutti i potenziali cinematismi locali che si possono innescare durante un sisma.

Sulla base dell'approccio appena illustrato, mostreremo ora un altro tipo di analisi, sempre sulla medesima struttura, ove verranno valutati gli effetti indotti da un cedimento di fondazione di una pila.

4. Esempio di calcolo sismico (Analisi statica non lineare di un ponte ad arco in muratura considerando anche il peso proprio)

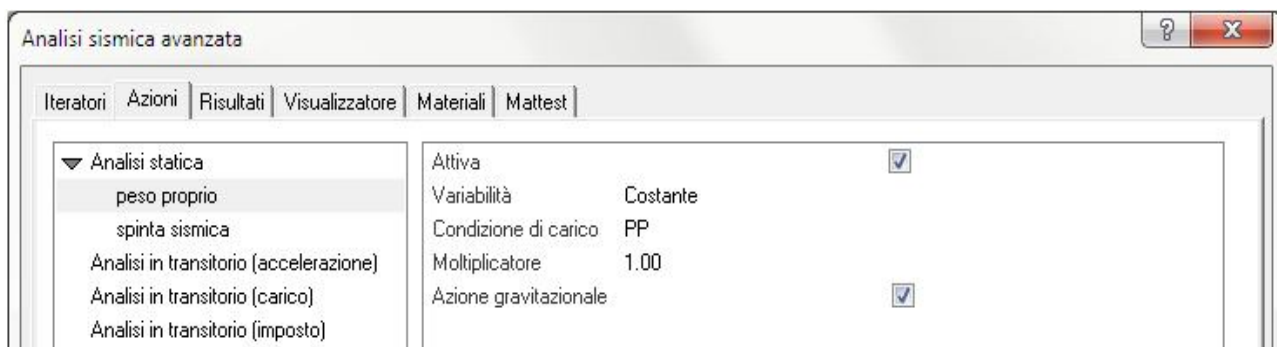
4.1 Fase A - Aggiunta del peso proprio

In questa seconda fase procederemo ad analizzare lo stesso modello appena visto, ma attivando anche il peso proprio, in modo da vedere le differenze indotte dalla presenza di un carico verticale.

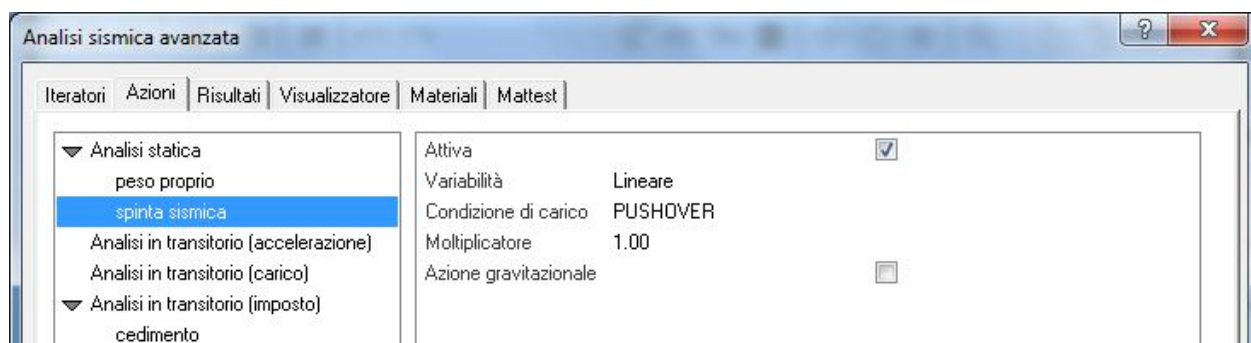
4.2 Azioni assegnate per analisi non lineare (A)

In questa seconda fase andremo ad attivare anche la condizione di carico relativa al peso proprio della struttura.

Per fare questo nel solito dialogo mostrato anche prima spunteremo il check-box “Attiva” alla “Azione” precedentemente creata → “Peso proprio”:



mentre la spinta sismica come fatto prima rimarrà attiva con la definizione di variabile linearmente, assegnando anche sempre un moltiplicatore pari a 1.00:



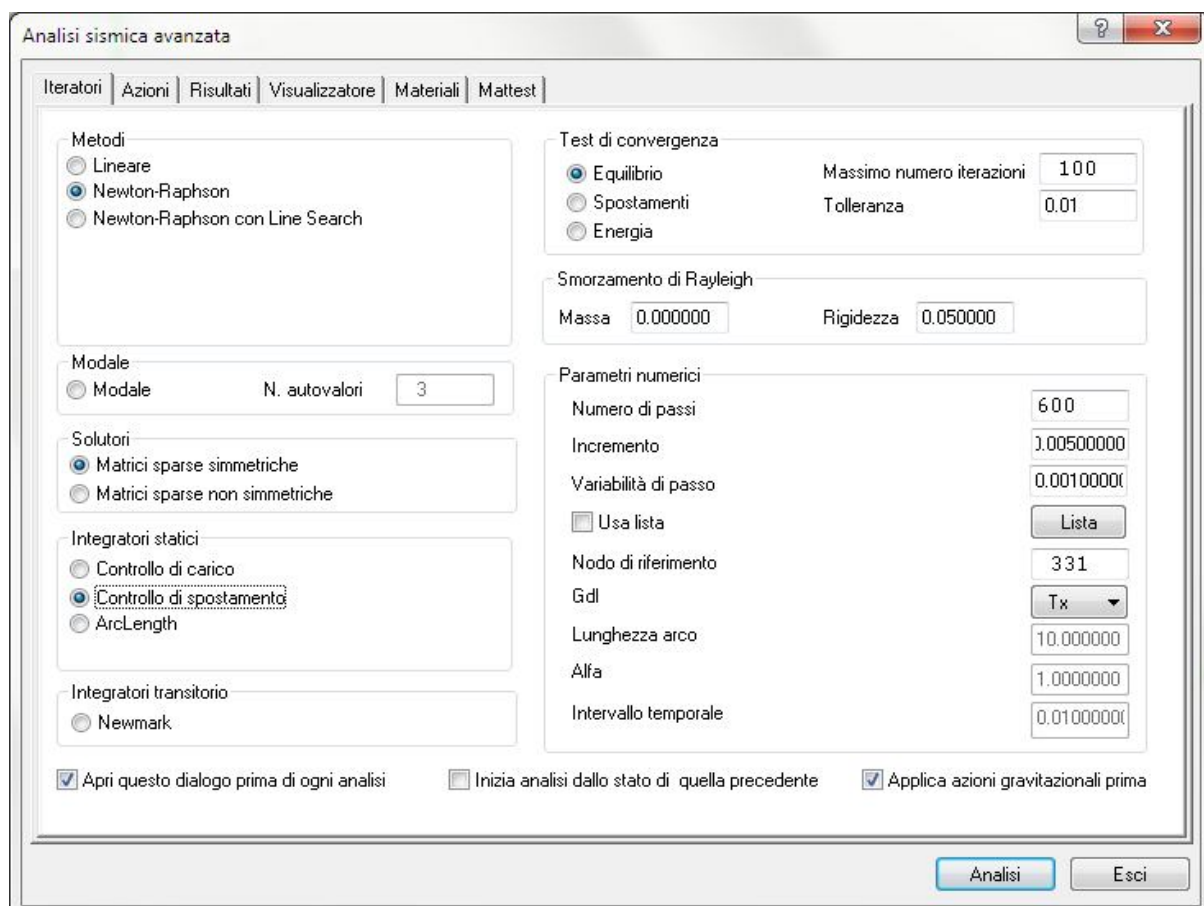
4.3 Registratori attivati (A)

I registratori attivati sono i medesimi della analisi precedente pertanto non ci ripeteremo nella descrizione.



4.4 Iteratori d'analisi (A)

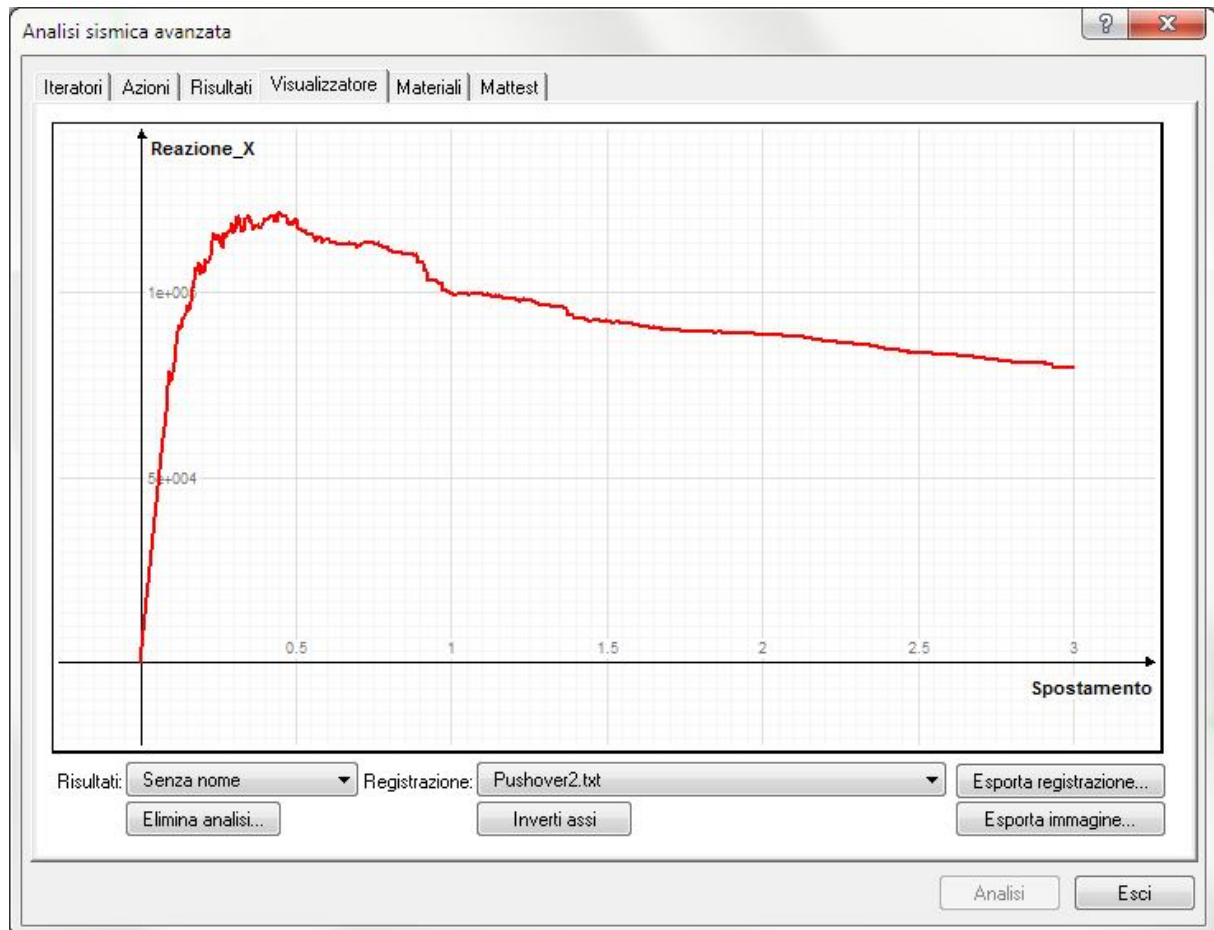
Nel dialogo di impostazione dell'analisi non lineare, impostiamo i medesimi parametri dell'analisi precedente in cui consideravamo anche il peso proprio:



Si può procedere ora, con l'analisi della struttura.

4.5 Risultati analisi (A)

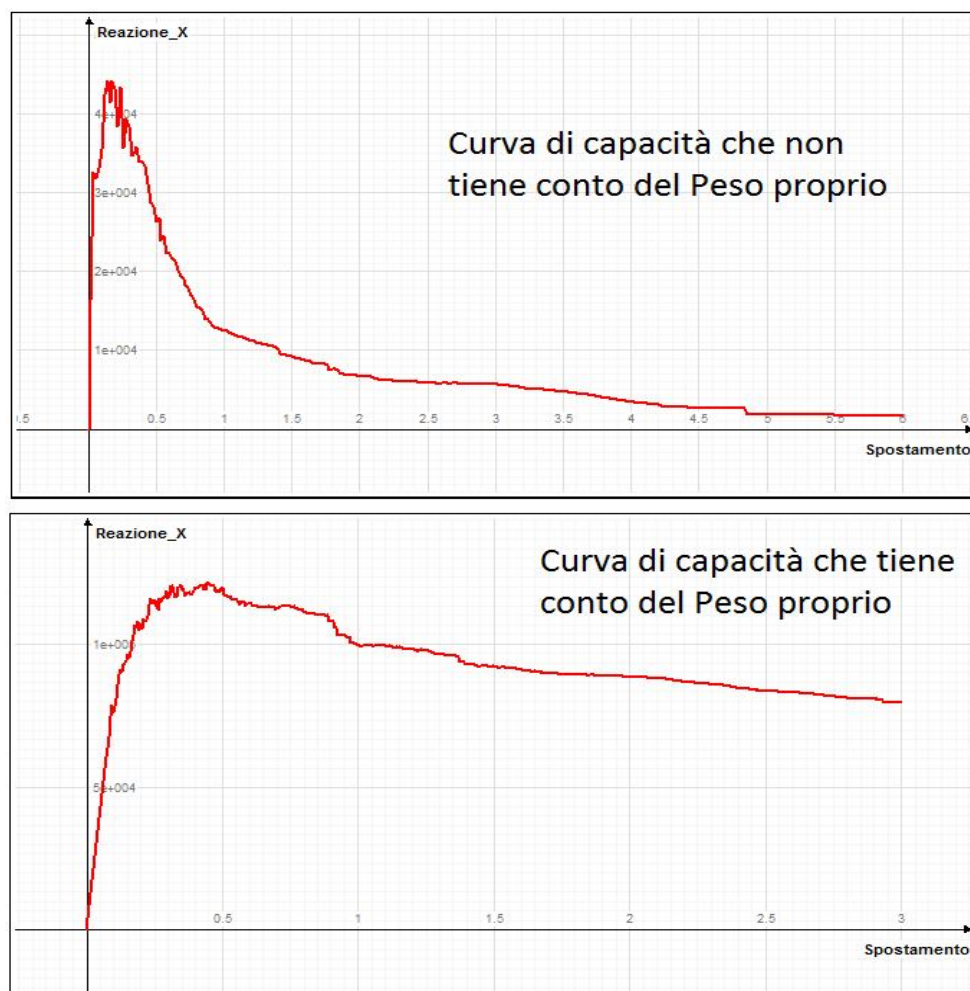
A seguito dell'esecuzione dell'analisi, visualizzando la curva di capacità della struttura, abbiamo:



Questa è la curva di capacità che rappresenta il comportamento non lineare del ponte in muratura con peso proprio, quando è sollecitato da una azione orizzontale crescente nel tempo.

Considerazioni sulla curva di capacità ottenuta:

Salta immediatamente all'occhio la differenza con la curva di capacità ottenuta precedentemente:



In questo caso sono ancora distinguibili i primi due tratti nella curva, ossia quello elastico lineare con struttura integra, e quello in cui si inizia a perdere la linearità e la struttura si danneggia, anche se in questo caso il secondo tratto è leggermente più “sporco”.

Una volta raggiunta la massima forza, come prima inizia il ramo discendente, vediamo che a differenza del caso precedente, il “Softening” in questo caso è riconducibile ad un unico tratto in cui mediamente la forza all'aumentare dello spostamento diminuisce in maniera quasi lineare (trascurando le piccole discontinuità che rappresentano il danneggiamento della struttura).

A parte il comportamento tra i vari tratti in questo caso, la più grossa differenza che si ha rispetto all'analisi precedente, è il valore della forza che fa registrare il passaggio tra le varie fasi di danneggiamento progressivo.

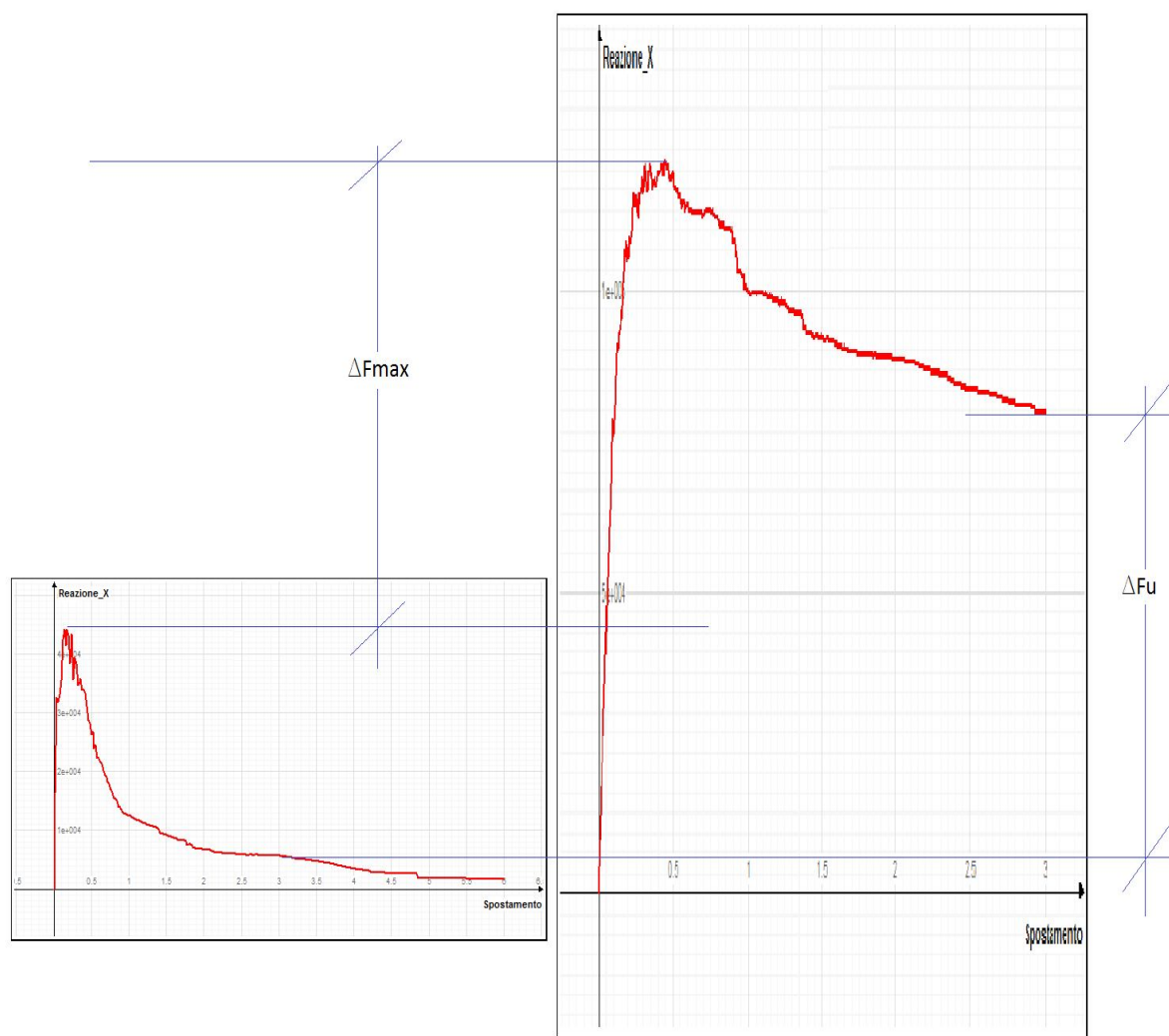
Nella precedente analisi (senza peso proprio) avevamo una forza massima orizzontale pari a circa 40000,00 kg, ed in corrispondenza di uno spostamento orizzontale del punto

di controllo pari a 3,0 cm, una forza orizzontale pari a 5000,00 kg, con una diminuzione pari a circa 35000,00 kg.

Nella seconda analisi (con peso proprio) abbiamo una forza massima orizzontale pari a circa 140000,00 kg, ed in corrispondenza di uno spostamento orizzontale del punto di controllo pari a 3,0 cm, una forza orizzontale pari a 65000,00 kg.

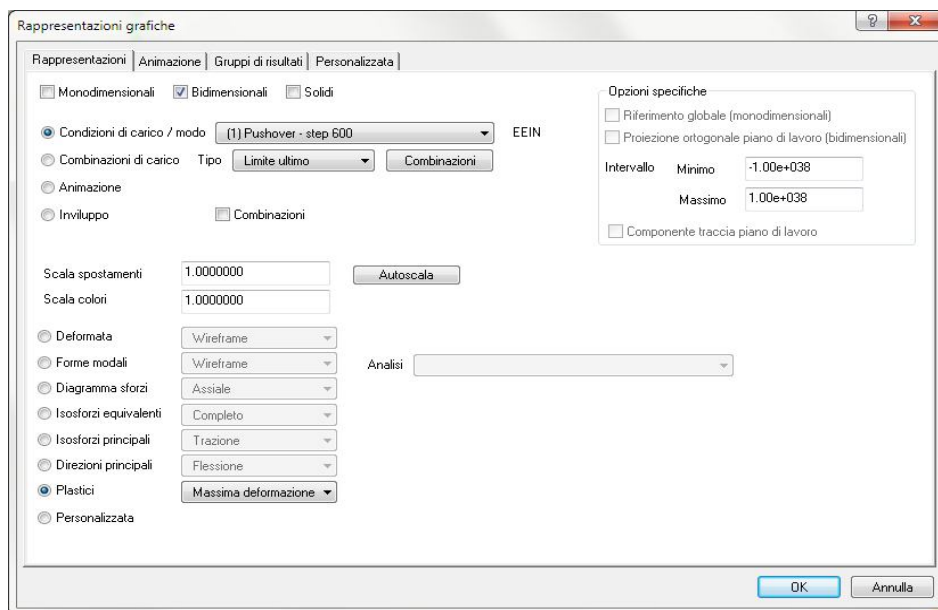
Tutte queste differenze sono dovute all'effetto benefico che la presenza di un carico verticale induce su una struttura in muratura, soprattutto se sono presenti archi, dato che la compressione che genera il carico permette di limitare le tensioni di trazione, e quindi immancabilmente incrementa i carichi orizzontali sopportabili dalla struttura.

La differenza di scala sull'asse delle ordinate dei grafici precedenti non permette di apprezzare graficamente le differenze, riportiamo sotto un'immagine dove la curva di capacità tracciata considerando il peso proprio, viene distorta in modo da poter rapportare le curve anche graficamente:



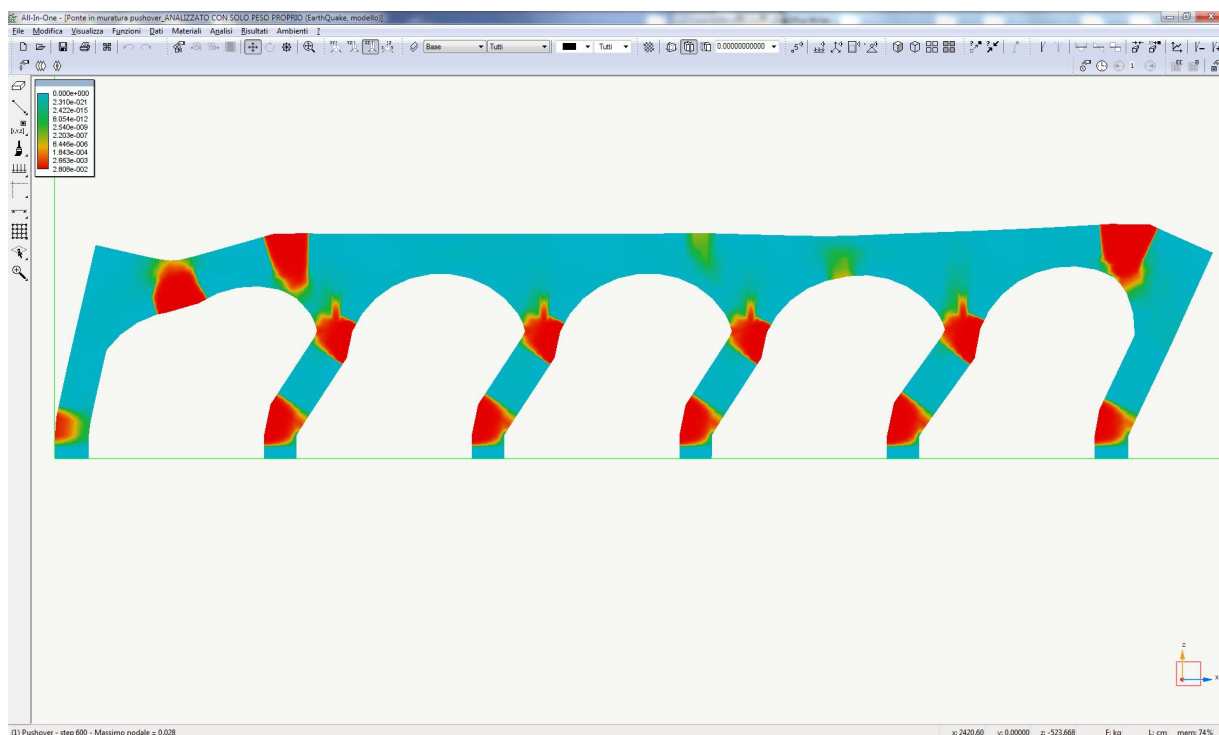
In tale immagine è evidente la differenza di capacità di resistenza alle azioni orizzontale che la presenza del solo peso proprio induce alla muratura.

Anche in questo caso aprendo la finestra di dialogo delle rappresentazioni grafiche, impostando la visualizzazione relativa all'ultimo passo di analisi (600), impostata nella finestra di dialogo delle “Rappresentazioni grafiche”:

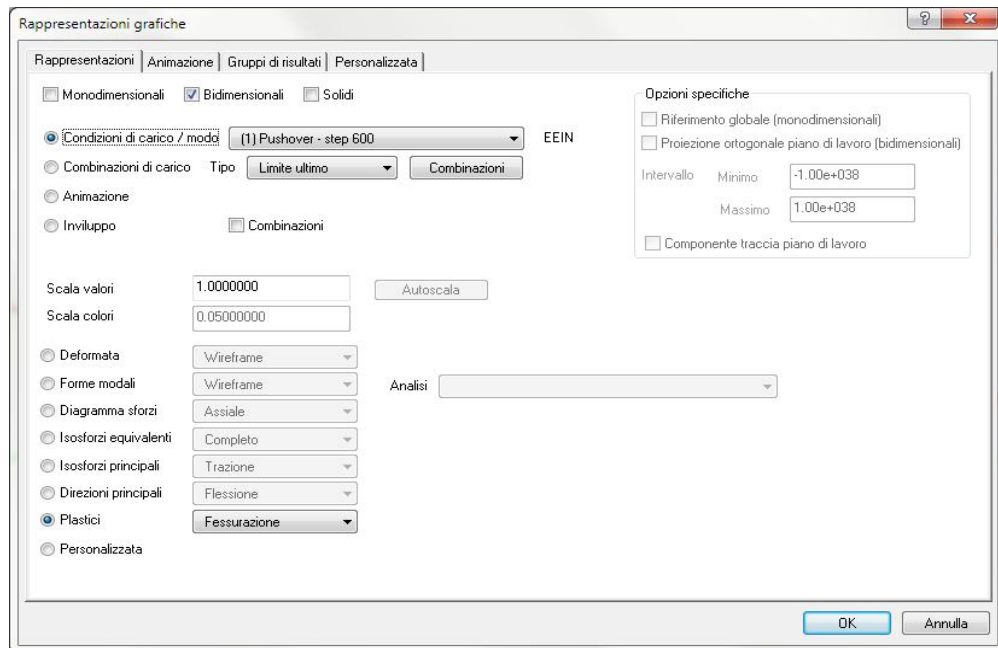


e settando la vista degli stati “Plastici” → “Massima deformazione”

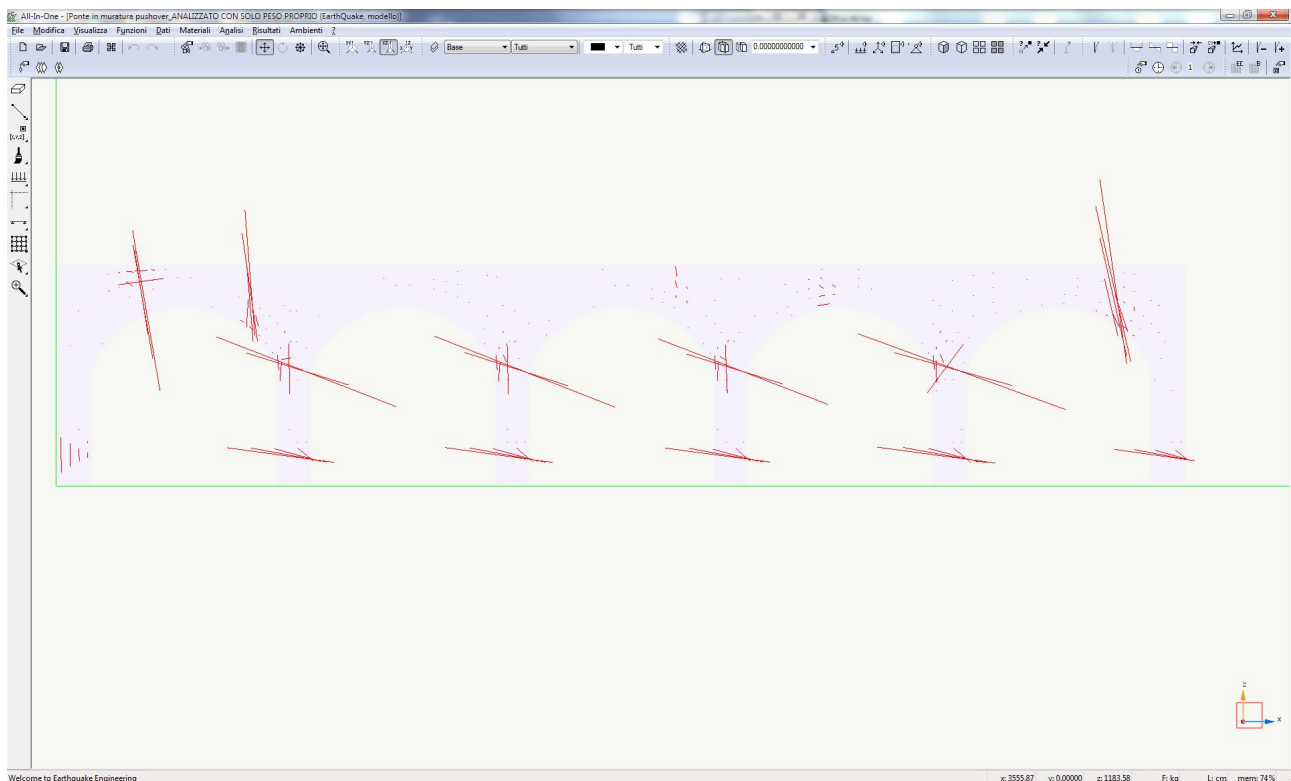
si ottiene il seguente quadro deformativo (il quadro delle epsilon subite del materiale):



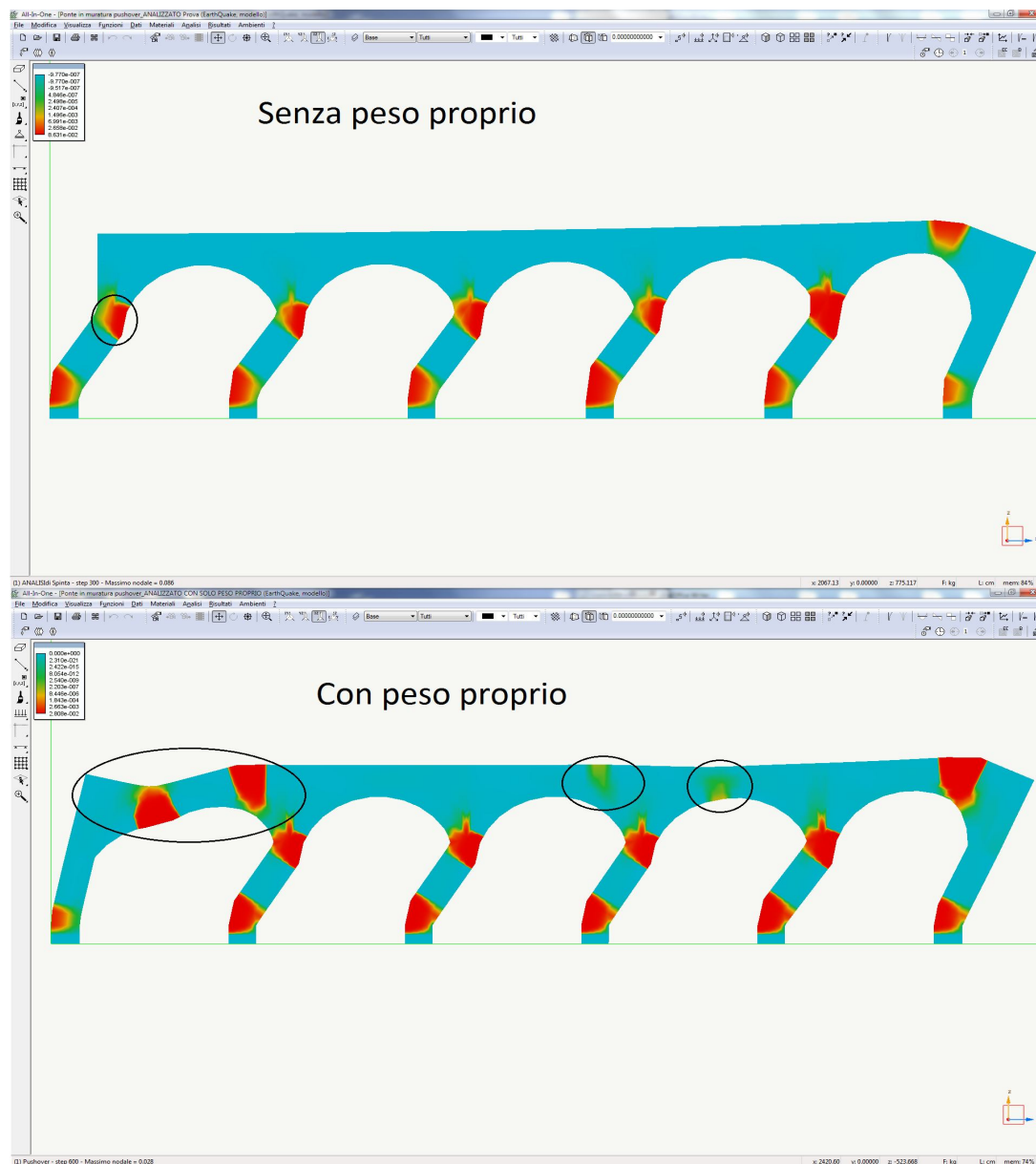
Allo stesso modo, visualizzando la “Fessurazione” relativa all'ultimo passo di analisi (600), impostata sempre nella finestra di dialogo delle “Rappresentazioni grafiche”:



si ottiene il seguente quadro fessurativo:



Operando un confronto tra i quadri di “Massima deformazione” ottenuti nelle due analisi, abbiamo le seguenti differenze, segnate nell'immagine.



La presenza del carico verticale instaura la formazione di alcune zone di fessurazione, e quindi potenziali cerniere plastiche, anche sulle arcate della struttura, pertanto in questo caso se volessimo andare ad analizzare il meccanismo cinematico corrispondente a tale quadro, avremmo un meccanismo più duttile e nel quale il maggior numero di cerniere plastiche porterebbe ad un maggior moltiplicatore del carico che determina il collasso del ponte, e quindi ad una riduzione della vulnerabilità sismica della struttura.

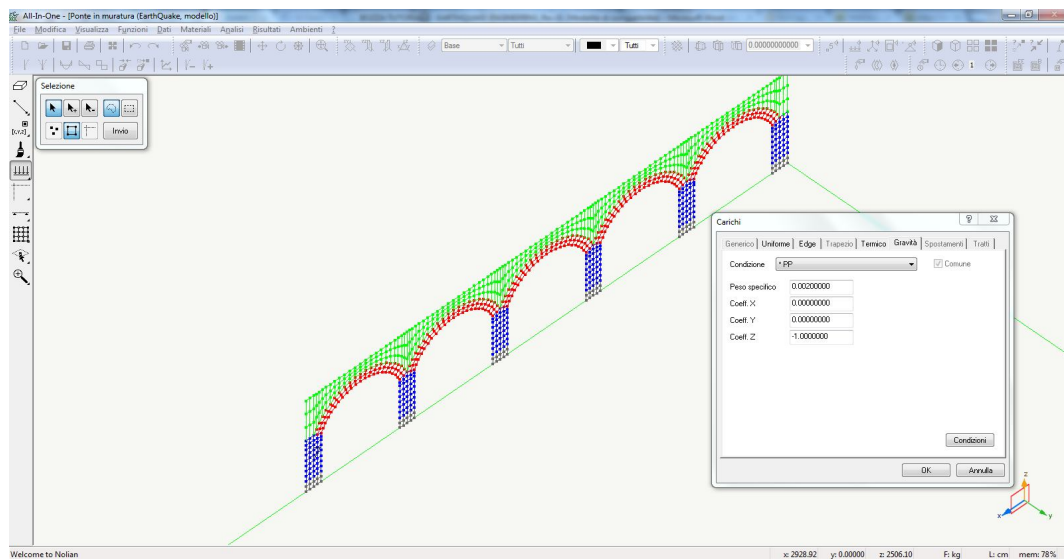
4.6 Fase B - Aggiunta di un sovraccarico sul piano superiore

In questa altra fase procederemo ad analizzare lo stesso modello appena visto, ma attivando come carichi verticali oltre che il peso proprio, anche un ulteriore carico derivante dal sovraccarico agente sul piano superiore del ponte.

4.7 Carichi assegnati (B)

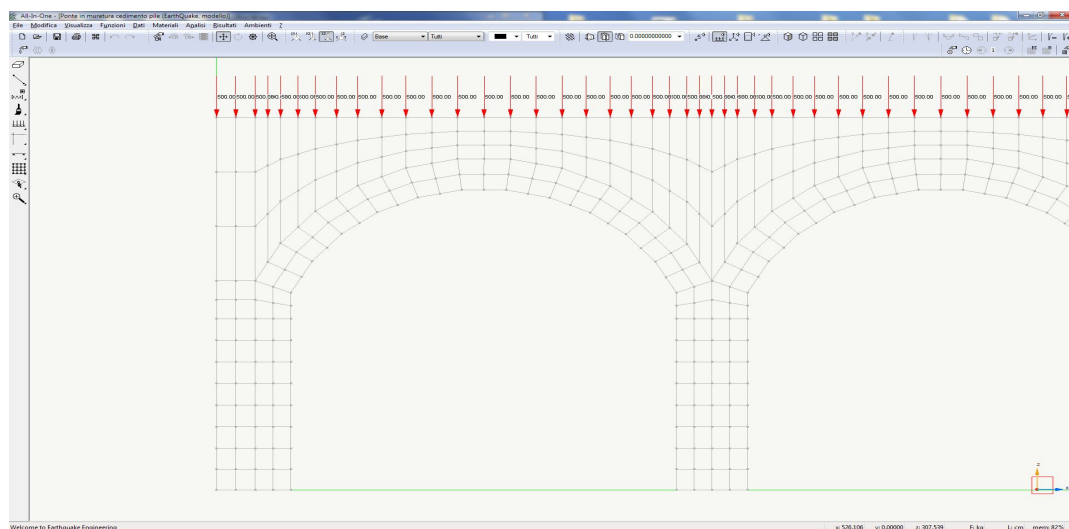
Come carichi statici verticali sono state assegnate le seguenti condizioni di carico:

PP



Peso proprio degli elementi (Peso specifico = 0.0020 kg/cm^3)

SOVRACCARICO STRADALE

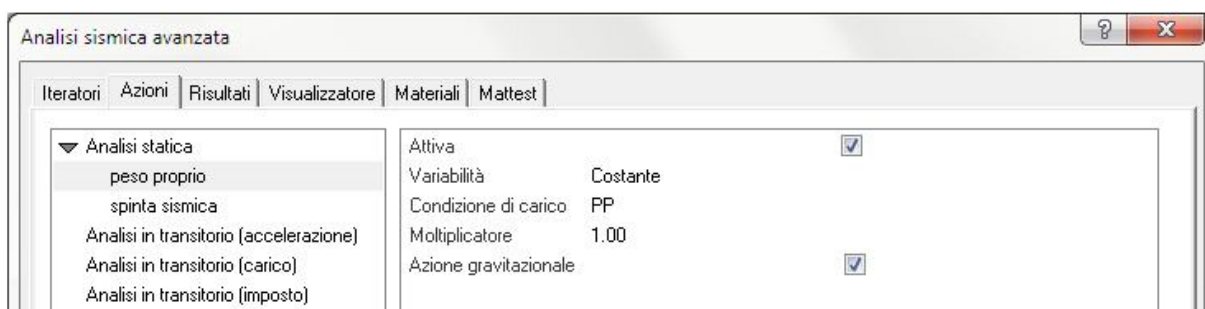


Ad ogni nodo superiore della struttura è stata assegnata una forza verticale pari a 500,00 kg.

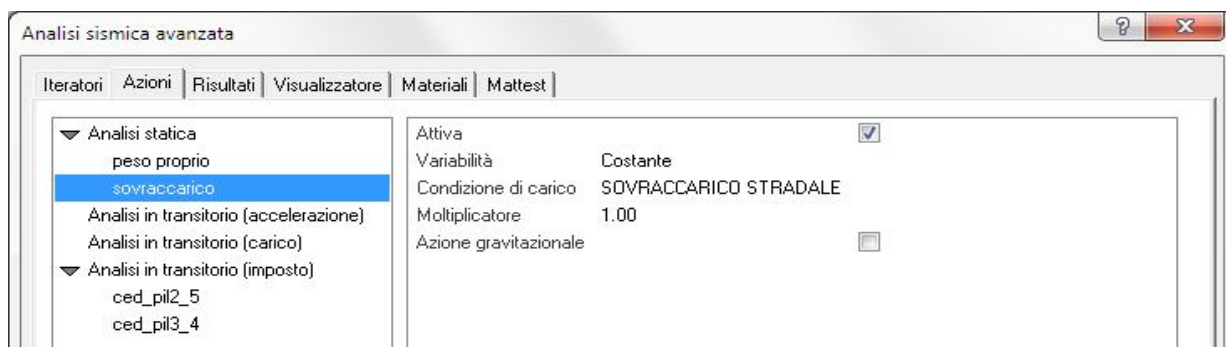
4.8 Azioni assegnate per analisi non lineare (B)

In questa altra fase avremo attive sia la condizione di carico relativa al peso proprio della struttura, che una nuova “Azione” appena creata per inserire anche il sovraccarico stradale.

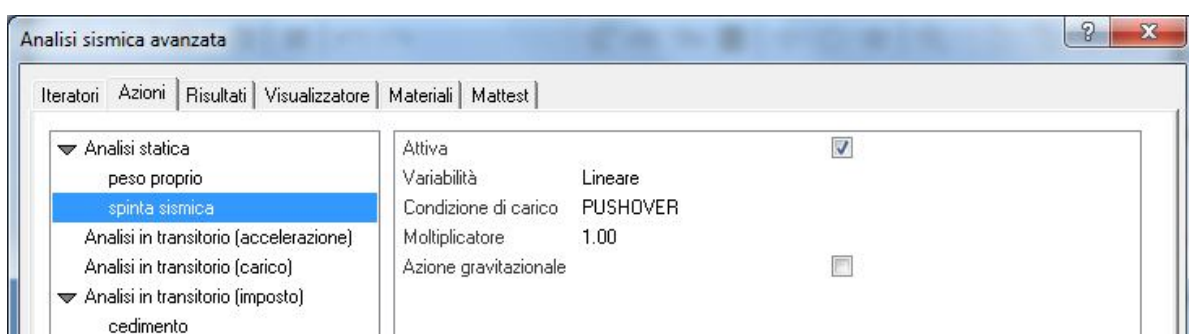
Nel solito dialogo mostrato anche prima spunteremo il check-box “Attiva” alla “Azione” precedentemente creata → “Peso proprio”:



anche il sovraccarico stradale è stato definito costante, ed anche ad esso è stato assegnato un moltiplicatore pari a 1.00



mentre la spinta sismica come fatto prima rimarrà attiva con la definizione di variabile linearmente, assegnando anche sempre un moltiplicatore pari a 1.00:



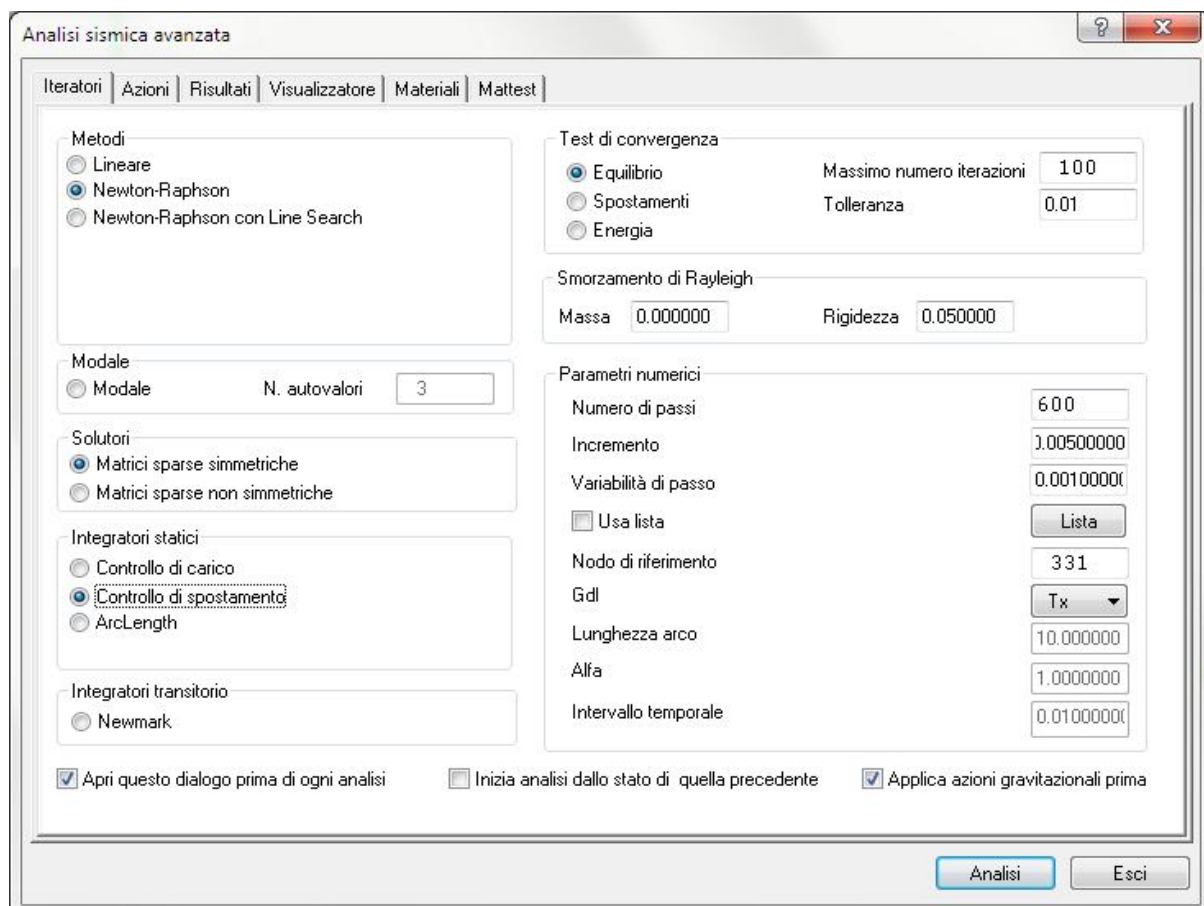
4.9 Registratori attivati (B)

I registratori attivati sono i medesimi della analisi precedente pertanto non ci ripeteremo nella descrizione.



4.10 Iteratori d'analisi (B)

Nel dialogo di impostazione dell'analisi non lineare, rispetto all'analisi precedente abbiamo modificato soltanto due fattori nella sezione "Parametri numerici", che sono il "Numero di passi" e "L'Incremento" di spostamento :



Parametri numerici

Numero di passi: 600

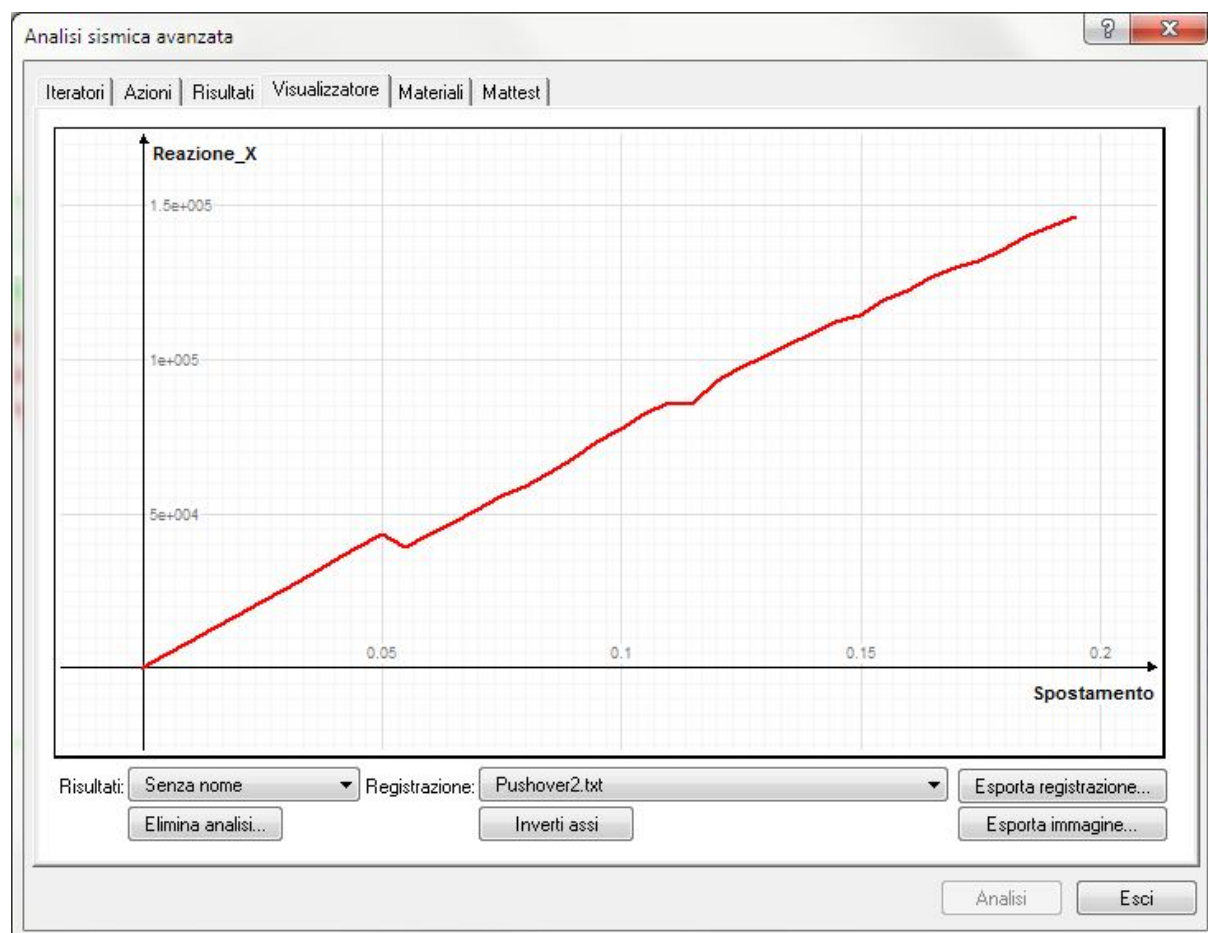
Incremento: 0.005

La riduzione dell'Incremento è stata operata perchè minore è la variazione tra un passo ed il successivo, più facile diviene il raggiungimento della convergenza nell'analisi, di conseguenza per ottenere comunque uno spostamento significativo, è stato incrementato il numero di passi totale.

Si può procedere ora, con l'analisi della struttura.

4.11 Risultati analisi (B)

A seguito dell'esecuzione dell'analisi, visualizzando la curva di capacità della struttura, abbiamo:



In questo caso la mancata convergenza si riscontra dopo 40 passi di analisi.

Considerazioni sulla curva di capacità ottenuta:

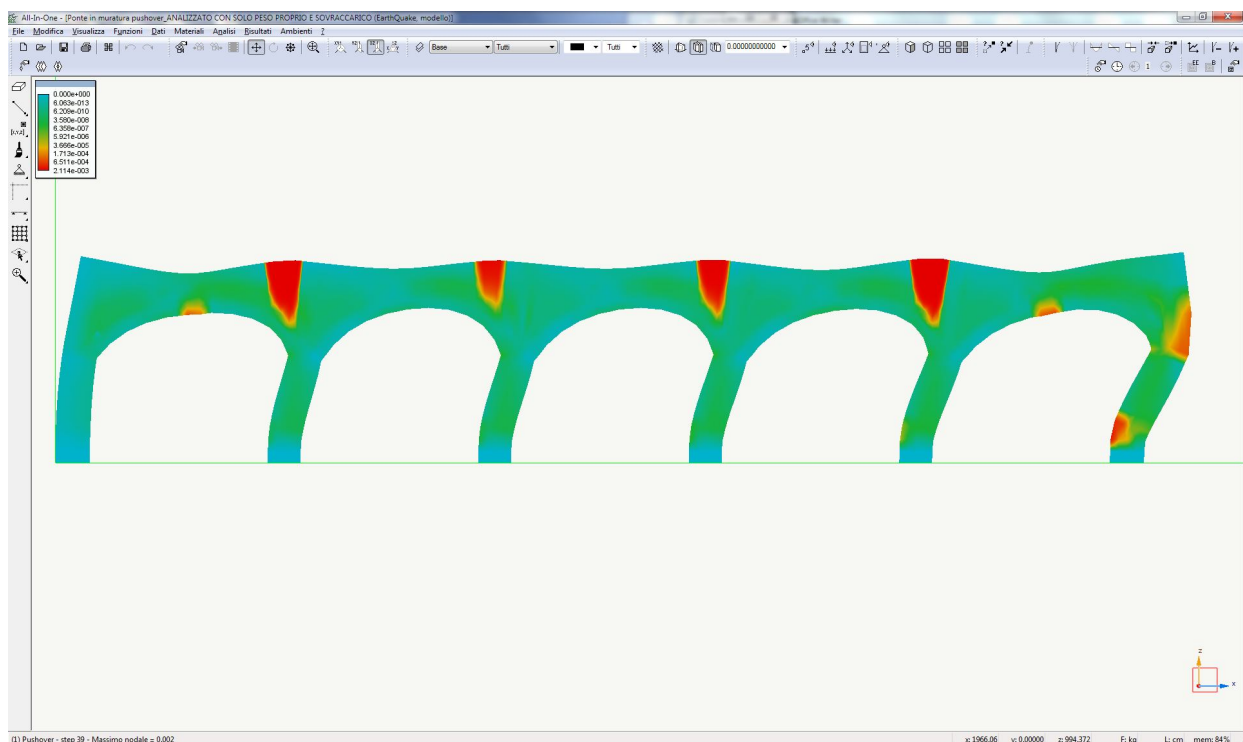
Come visibile dal grafico ottenuto, da questa analisi abbiamo ottenuto un unico tratto pressochè lineare, a parte due piccoli tratti in cui vi è una lieve riduzione della forza applicata a fronte di un “cospicuo” spostamento corrispondente, che evidenzia probabilmente il verificarsi in alcune zone della struttura di fessure rilevanti.

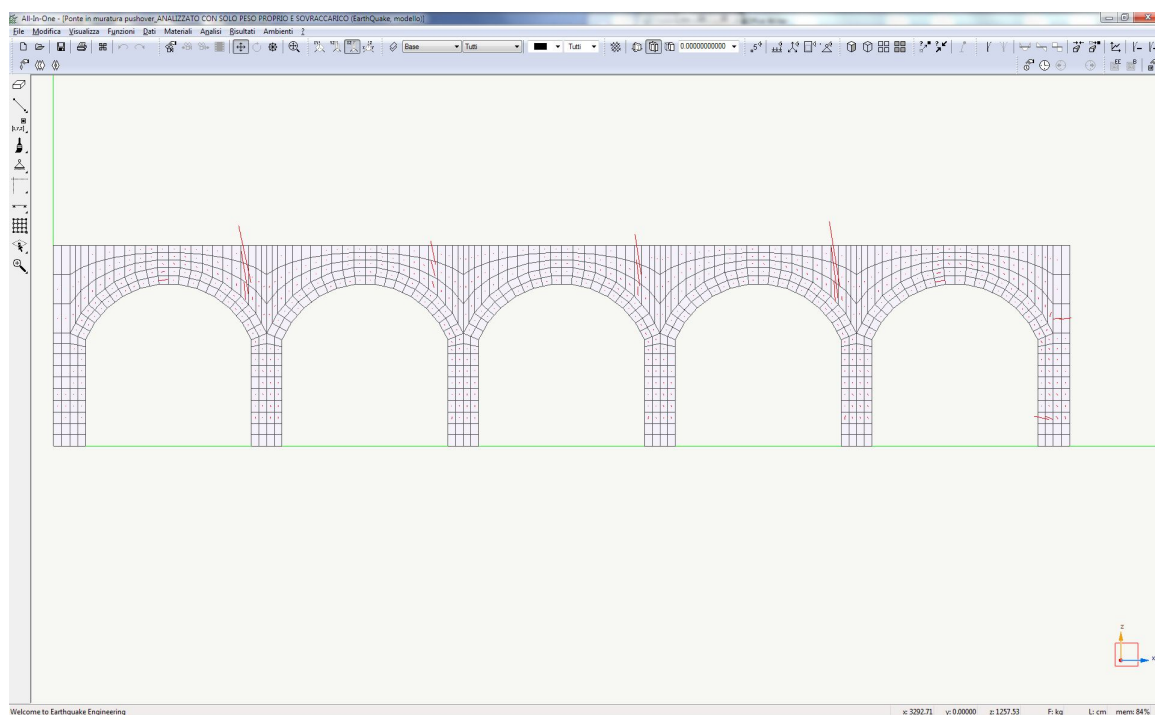
Il fatto che a differenza del caso precedente dove la struttura beneficiava in maniera evidente dell'effetto indotto dalla presenza dei carichi verticali, l'incremento del carico apportato in questa altra fase, è evidentemente eccessivo, tanto da lasciare al materiale poco margine rispetto alla sua massima resistenza, tanto che all'avvio dell'analisi di spinta orizzontale, il calcolo non converge più dopo soli 40 passi di analisi, per collasso della struttura.

Se guardiamo il valore della forza massima alla quale si registra il collasso notiamo un valore pari a circa 150000,00 kg, che è anche maggiore rispetto al caso precedente, purtroppo però in questo caso la rottura avviene in modo fragile, poiché è assente un ramo orizzontale o obliquo che evidenzi in qualche modo una certa duttilità e quindi una certa risposta in campo duttile.

In tali circostanze, l'analisi di un cinematisma non avrebbe senso, poiché la struttura non ha capacità di deformazione tali da garantire la formazione delle cerniere plastiche, pertanto in questo caso il moltiplicatore del carico orizzontale che porterebbe al collasso la struttura è minore del caso precedente.

Andiamo a visualizzare ora come al solito il quadro delle “Massime deformazioni” e quello “Fessurativo” relativi all'ultimo passo di calcolo:



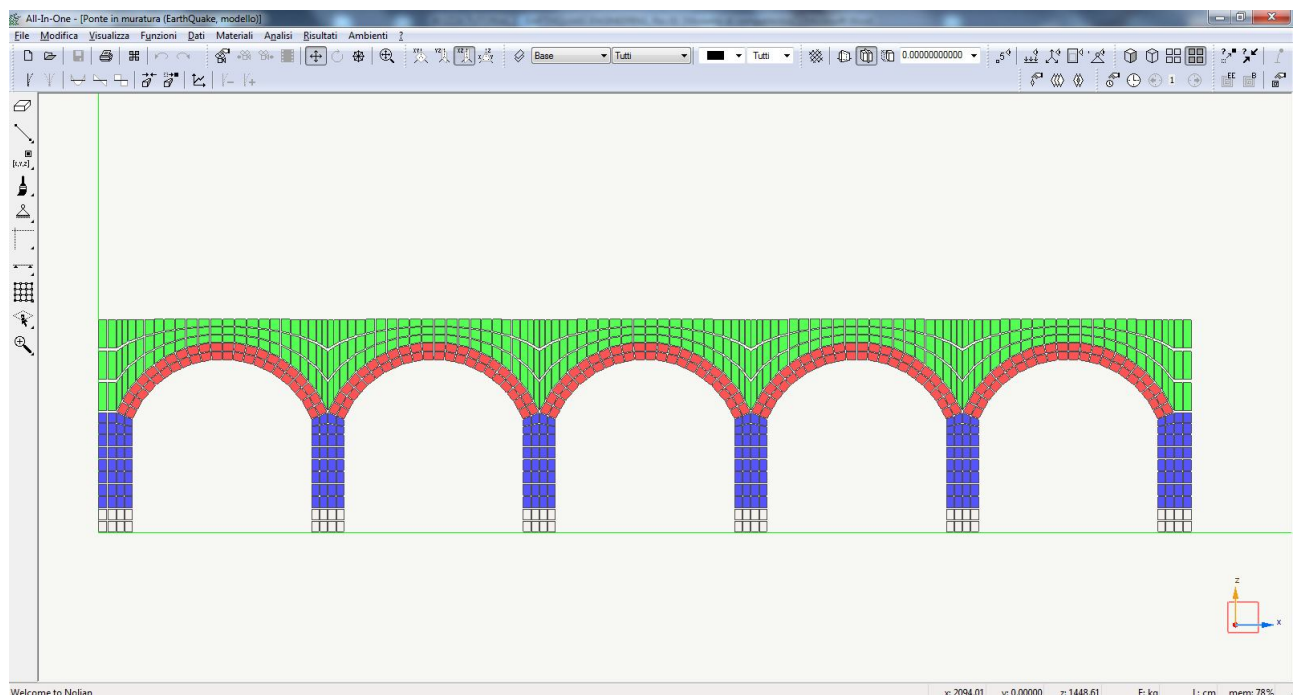


Anche da queste immagini che mostrano i risultati di analisi (ottenute impostando gli stessi parametri di rappresentazione) si evince che la capacità di deformazione della struttura in questa fase è molto ridotta rispetto ai casi precedenti.

5. Esempio di calcolo non lineare (Applicazione di cedimenti differenziali di fondazione tra le pile di un ponte ad arco in muratura)

Verrà ora mostrato un altro esempio di calcolo non lineare di strutture in muratura con modellazione ad elementi bidimensionali e materiale non lineare "No-Tension".

Prendendo la struttura di prima:



Saranno applicati alle pile interne dei cedimenti di fondazione.

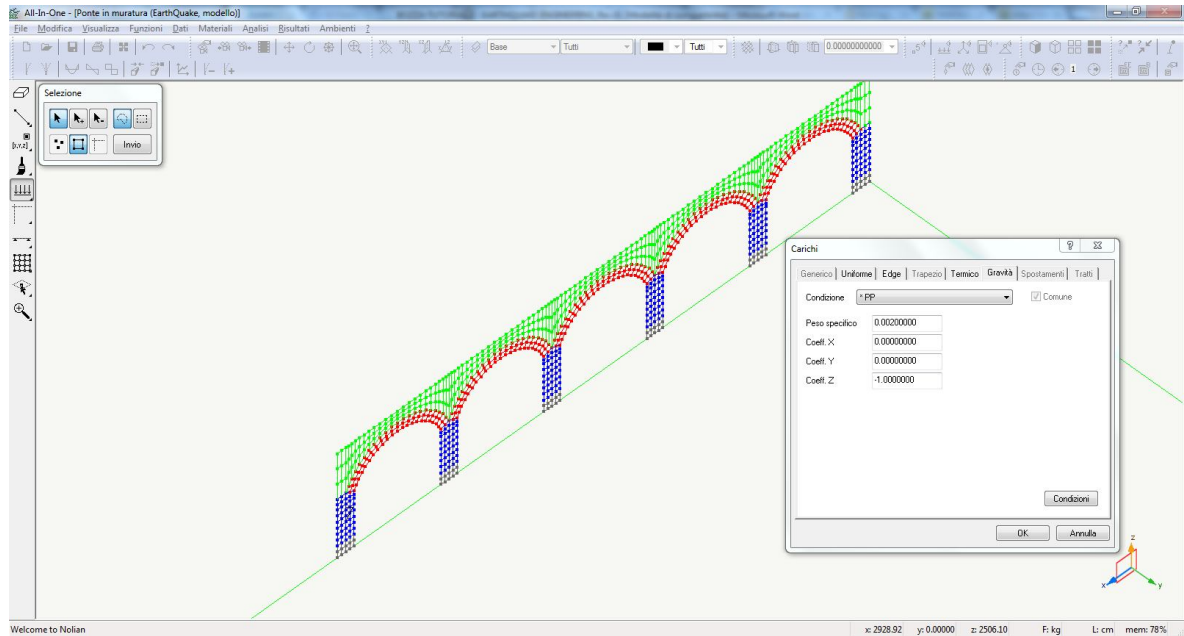
Procederemo ora allo stesso modo di quanto fatto precedentemente, a descrivere le modalità di applicazione delle azioni, di impostazione dell'analisi, ed infine ad analizzare i risultati ottenuti.

Per quanto riguarda la geometria, le caratteristiche dei materiali, le assegnazioni fatte sono le medesime del modello mostrato precedentemente, una lieve differenza è stata apportata invece alle condizioni di carico assegnate, pertanto procederemo ad andarle a descrivere e poi procederemo direttamente ad illustrare le assegnazioni fatte per simulare il cedimento di fondazione in analisi non lineare.

5.1 Carichi assegnati

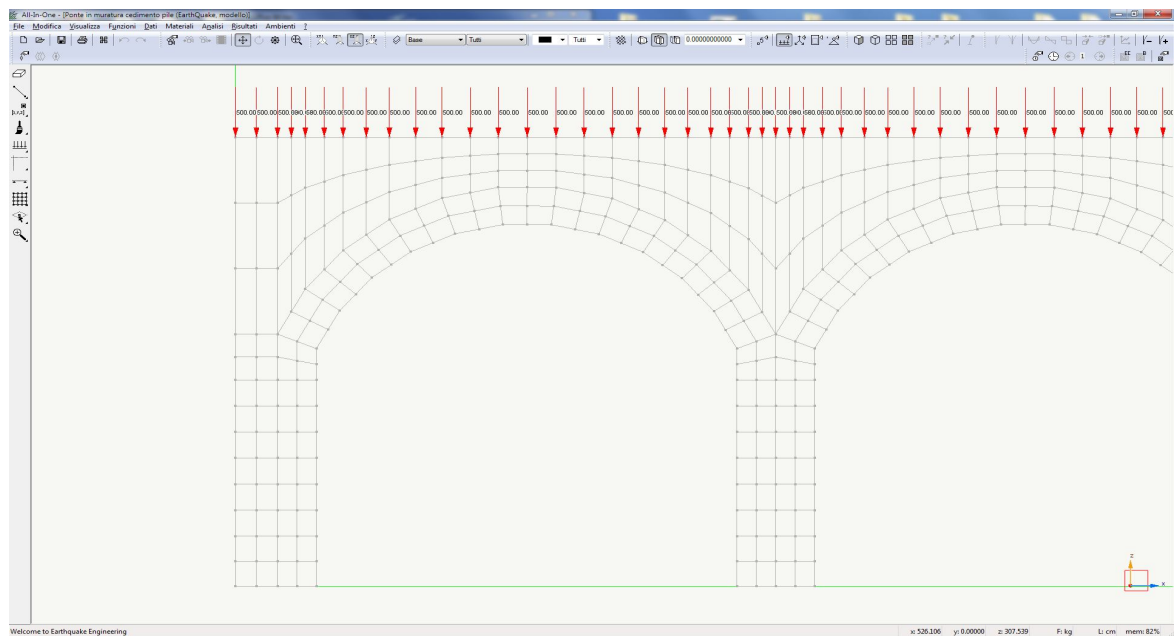
Come carichi statici verticali sono state assegnate le seguenti condizioni di carico:

PP



Peso proprio degli elementi (Peso specifico = 0.0020 kg/cm^3)

SOVRACCARICO STRADALE



Ad ogni nodo superiore della struttura è stata assegnata una forza verticale pari a 500,00 kg.

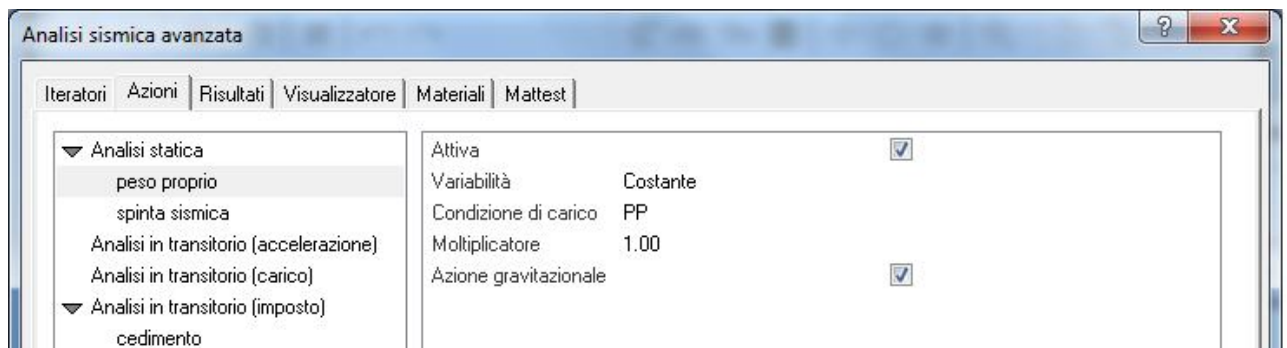
5.2 Azioni assegnate per analisi non lineare

L'assegnazione delle azioni per eseguire l'analisi non lineare è stata eseguita tramite la procedura che prevede l'utilizzo dell'interfaccia attivabile tramite il comando "Analisi sismica avanzata" (Vedere "Tutorial base")

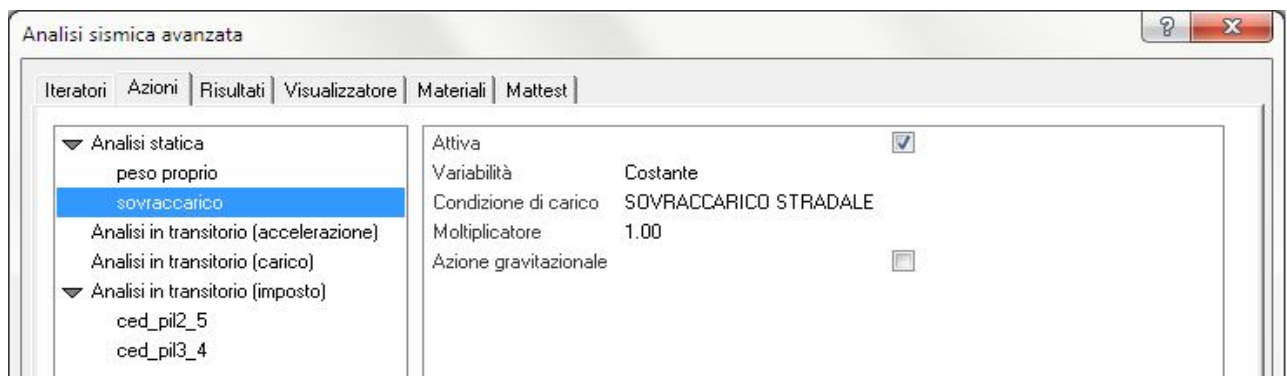
Assegnazione azioni: Analisi sismica avanzata

Come visto precedentemente sono stati assegnati al modello tutti i carichi statici verticali.

In EE sono state quindi create due azioni sotto "Analisi statica" ove il peso proprio è stato definito costante, assegnando un moltiplicatore pari a 1.00:



anche il sovraccarico stradale è stato definito costante, ed anche ad esso è stato assegnato un moltiplicatore pari a 1.00

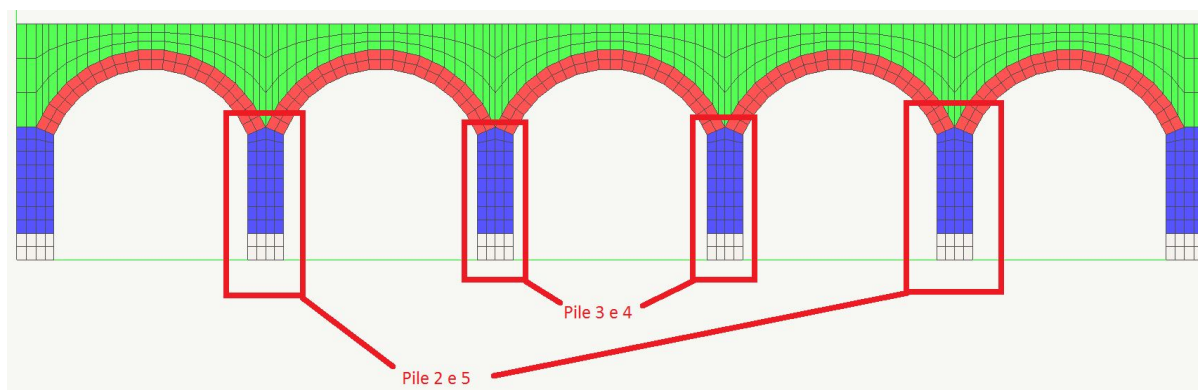


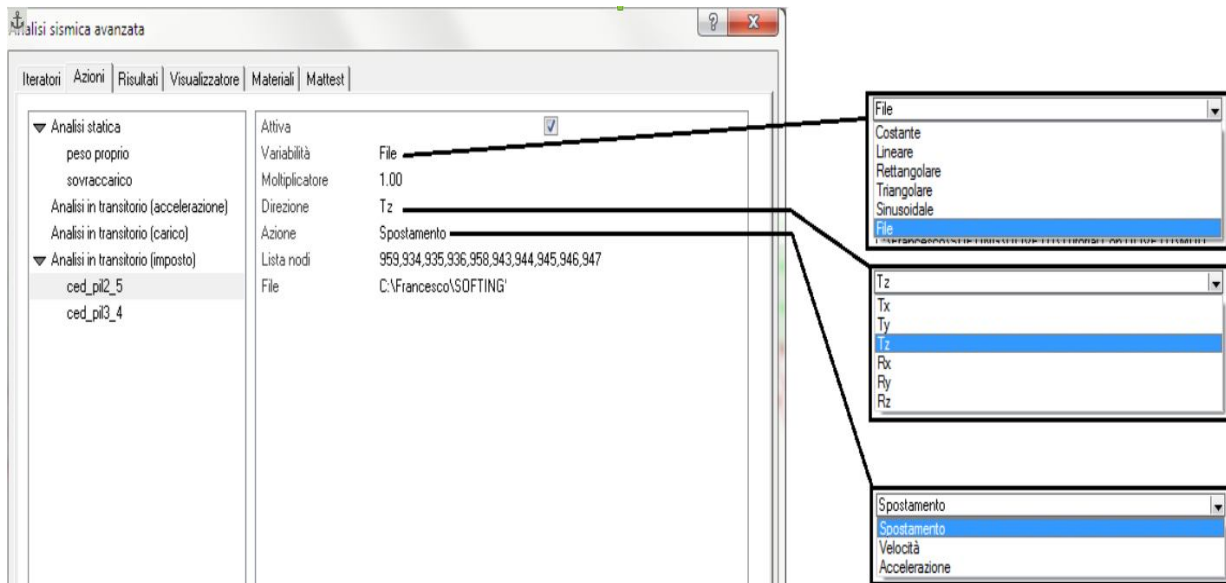
Quelle mostrate sopra sono le condizioni di carichi verticali, bisogna però assegnare anche l'azione volta ad indurre il cedimento di fondazione, per fare questo, è stato dapprima creato un file in formato “.txt” in cui in 500 passi, viene assegnato un cedimento massimo di 5.0 cm verso il basso.

Passi	Cedimento
4.76	-4.76
4.77	-4.77
4.78	-4.78
4.79	-4.79
4.8	-4.8
4.81	-4.81
4.82	-4.82
4.83	-4.83
4.84	-4.84
4.85	-4.85
4.86	-4.86
4.87	-4.87
4.88	-4.88
4.89	-4.89
4.9	-4.9
4.91	-4.91
4.92	-4.92
4.93	-4.93
4.94	-4.94
4.95	-4.95
4.96	-4.96
4.97	-4.97
4.98	-4.98
4.99	-4.99
5	-5

Immagine delle ultime righe del file .txt che simula il cedimento

A questo punto andremo a creare due condizioni di “Azioni” sotto la tipologia “Analisi in transitorio (imposto)”, che chiameremo “ced_pil2_5” e “ced_pil3_4” dato che ciò che ci proponiamo di fare è di simulare un cedimento per le 4 pile interne, ma differenziandolo tra le due centrali e quelle prossime a quelle esterne:





Le azioni create sono le seguenti



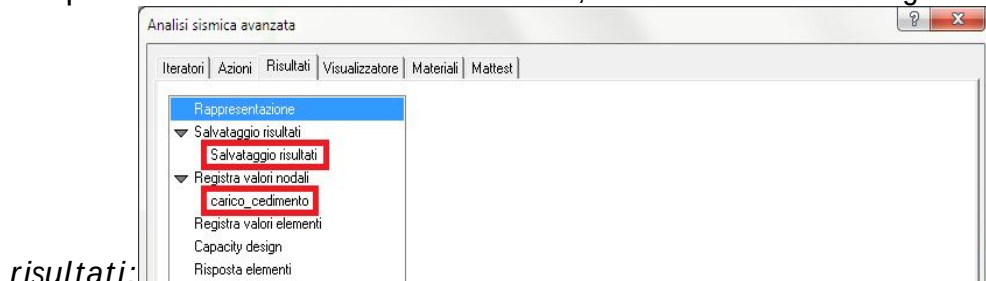
I parametri da impostare sono i seguenti:

- **Attiva**: tale check-box deve essere spuntato affinché l'azione venga applicata;

- Variabilità: In questo caso selezioneremo la voce "File" dato che abbiamo impostato un apposito file .txt, ma va considerato che può essere assegnata una qualsiasi delle variabilità riportate nella tendina mostrata a pagina precedente;
- Moltiplicatore: sarà assegnato alla condizione delle pile interne ("ced_pil3_4") un moltiplicatore pari a 0.5, mentre a quella delle pile vicine a quelle esterne ("ced_pil2_5") un moltiplicatore pari a 1.0 in tal modo si otterrà per le pile interne un cedimento massimo pari a 2,50 cm, mentre per le seconde di 5,0;
- Direzione: deve essere specificata la direzione di azione, nel nostro caso volendo modellare gli effetti di un cedimento fondale verticale, assegneremo "Tz";
- Azione: deve essere specificata il tipo di azione, nel nostro caso volendo modellare gli effetti di un cedimento fondale, assegneremo "Spostamento";
- Lista nodi: in questa cella devono essere elencati (separandoli con un virgola) tutti gli indici dei nodi ai quali si vuole applicare l'azione;
- File: deve essere indicato il percorso della cartella in cui si trova il .txt con i valori del cedimento da applicare;

5.3 Registratori attivati

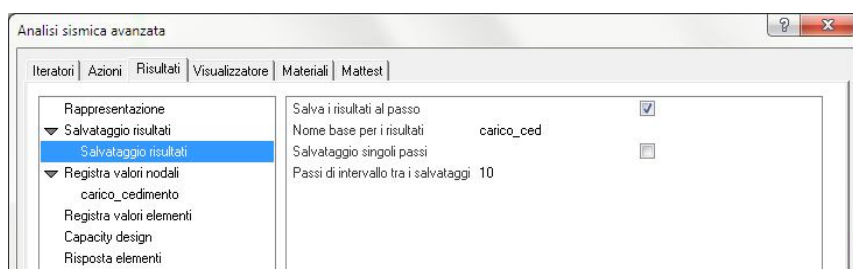
Per poter elaborare i risultati di analisi, sono stati attivati i seguenti *Registratori di*



Sono attivi due "Registratori" appartenenti alle seguenti Famiglie:

- **Salvataggio risultati:** imposta nel programma la registrazione di tutte le grandezze che interessano la struttura (sollecitazioni, spostamenti, ecc.) per ogni passo di calcolo dell'analisi non lineare.

I parametri da inseriti sotto tale "Registratore" sono:



- **Salvataggio dei risultati al passo:** spuntando tale opzione si attiva il registratore di salvataggio dei risultati ed il programma salverà i risultati dell'analisi non lineare che ci si appresta ad eseguire, per ogni passo od ogni tot passi a seconda delle impostazioni che vengono date successivamente;
- **Nome base per i risultati:** in tale tendina si può specificare un nome diverso da quello assegnato di default dal programma, per facilitare l'utente al ritrovamento di tale set di risultati. Tale comando è utile nel caso si intendono eseguire diverse analisi non lineari, e delle quali di ognuna occorre registrare i risultati, infatti modificando il nome il programma non sovrascrive il set di risultati registrato nell'analisi precedente;
- **Salvataggio singoli passi:** spuntando tale opzione il programma salverà i risultati dell'analisi non lineare che ci si appresta ad eseguire, ad ogni singolo passo che verrà elencato nella cella sottostante che all'apposizione della spunta cambierà il proprio nome in "Passi dove effettuare il salvataggio", se si desidera salvare i risultati per più passi, deve essere indicato il numero degli stessi, separato da una virgola;
- **Passi di intervallo tra i salvataggi:** specificando un numero in tale casella, per esempio 10, il programma salverà i risultati dell'analisi non lineare che ci si ap-

presta ad eseguire, ogni 10 passi. Inserire il numero 1 in tale tendina, farà sì che i risultati saranno salvati ad ogni passo;

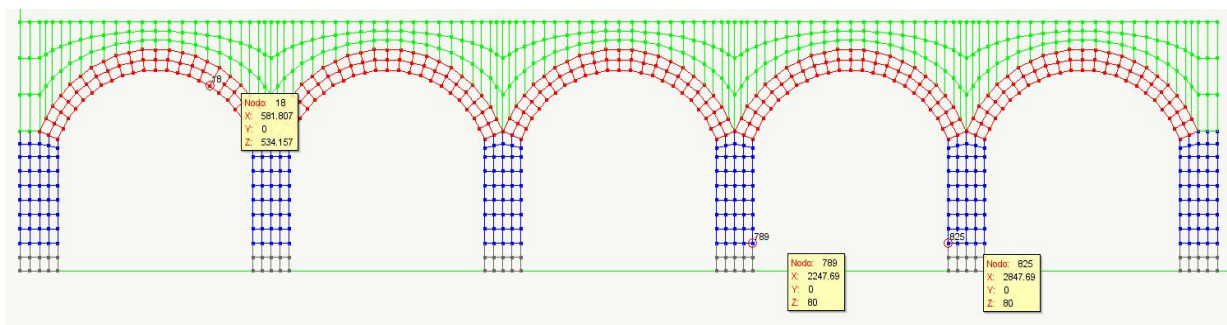
- Registra valori nodali: attiva una entità che durante l'analisi monitora e scrive su un file esterno (in formato .txt), per un certo nodo del modello, come varia una grandezza in relazione ad un'altra grandezza; nel nostro caso sono stati attivati tre registratori nodali per monitorare l'andamento del cedimento nel tempo per tre diversi nodi della struttura, due nodi sono appartenenti a due diverse pile, alle quali come detto precedentemente viene assegnato un cedimento differente, mentre il terzo nodo appartiene:

I parametri inseriti per tutti e tre i “Registratori” sono:



- Attivo: spuntando tale opzione si attiva il registratore;

- Indice oggetto: è stato inserito l'indice di un nodo di base di un piedritto soggetto a cedimento:



- GdL: in tale tendina è stato specificato quale tipo di “Grado di Libertà” si vuole andare a monitorare per il nodo associato al registratore, nel nostro caso è stato assegnato il taglio in direzione Z dato che stiamo analizzando un cedimento fondale;

- Valori: in tale tendina è stata inserita una delle due grandezze che il registratore dovrà monitorare, e nel caso specifico è stato assegnato lo "Spostamento";

- Tempo: in tale tendina è stata inserita l'altra grandezza che il registratore dovrà monitorare, e nel caso specifico è stato assegnato il "Tempo";
- Intervalli: specificando un numero in tale casella, per esempio 1, il programma registrerà i valori delle grandezze da registrare, ad ogni passo.

5.4 Iteratori d'analisi

Nel dialogo di impostazione dell'analisi non lineare, sono state settate le seguenti opzioni:

The screenshot shows the 'Analisi sismica avanzata' dialog box with the following settings:

- Iteratori** (selected tab):
 - Metodi**:
 - ☐ Lineare
 - ☒ Newton-Raphson
 - ☐ Newton-Raphson con Line Search
 - Modale**:
 - ☐ Modale
 - N. autovalori:
 - Solutori**:
 - ☒ Matrici sparse simmetriche
 - ☐ Matrici sparse non simmetriche
 - Integratori statici**:
 - ☐ Controllo di carico
 - ☐ Controllo di spostamento
 - ☐ ArcLength
 - Integratori transitorio**:
 - ☒ Newmark
- Test di convergenza**:
 - ☒ Equilibrio
 - ☐ Spostamenti
 - ☐ Energia
 - Massimo numero iterazioni:
 - Tolleranza:
- Smorzamento di Rayleigh**:
 - Massa:
 - Rigidezza:
- Parametri numerici**:
 - Numero di passi:
 - Incremento:
 - Variabilità di passo:
 - ☐ Usa lista
 - Lista:
 - Nodo di riferimento:
 - Gdl:
 - Lunghezza arco:
 - Alfa:
 - Intervallo temporale:
- Options**:
 - ☒ Apri questo dialogo prima di ogni analisi
 - ☐ Inizia analisi dallo stato di quella precedente
 - ☒ Applica azioni gravitazionali prima

Buttons:

Metodi di iterazione

- Newton-Raphson;

Solutori

- Matrici sparse simmetriche;

Integratori statici

Non viene selezionata alcuna voce poiché stiamo eseguendo una analisi in transitorio

Integratori transitorio

- Newmark;

Test di convergenza

"Equilibrio" scegliendo il massimo numero di iterazioni e la relativa tolleranza di convergenza

Parametri numerici

Numero di passi: 500 devono essere indicati il numero di passi previsto dal file .txt che abbiamo caricato come azione

Incremento: non attivo dato che l'azione è determinata da file

Nodo di riferimento

Non viene attivato alcun nodo poiché l'azione è applicata da file ai nodi elencati nella cella dell'azione assegnata;

GdL

Non viene attivato alcun gradi di libertà poiché l'azione è applicata da file ed il GdL è stato assegnato nell'opportuna cella dell'azione assegnata;

Si noti che è apposta la spunta sul check-box: "Applica azioni gravitazionali prima", ciò significa che il calcolo sarà eseguito in due fasi, il primo in cui saranno applicati alla struttura esclusivamente i carichi verticali, e successivamente assumendo il quadro di sollecitazioni indotto dai carichi verticali come punto di partenza, si procederà ad applicare il cedimento di fondazione alle pile.

Si può procedere ora, con l'analisi della struttura.

NOTA: nel caso di analisi in transitorio EE viene adottato il Metodo di Newmark.

Newmark ha sviluppato una famiglia di metodi numerici al passo. Tali metodi ricadono in quelli che in matematica sono definiti come "Metodi impliciti", ossia nei quali ad esempio in un certo istante $t+Dt$ il vettore spostamento è funzione degli spostamenti calcolati all'istante precedente t (quindi noti) e delle velocità ed accelerazioni all'istante $t+Dt$ (che sono incognite e che vengono calcolate).

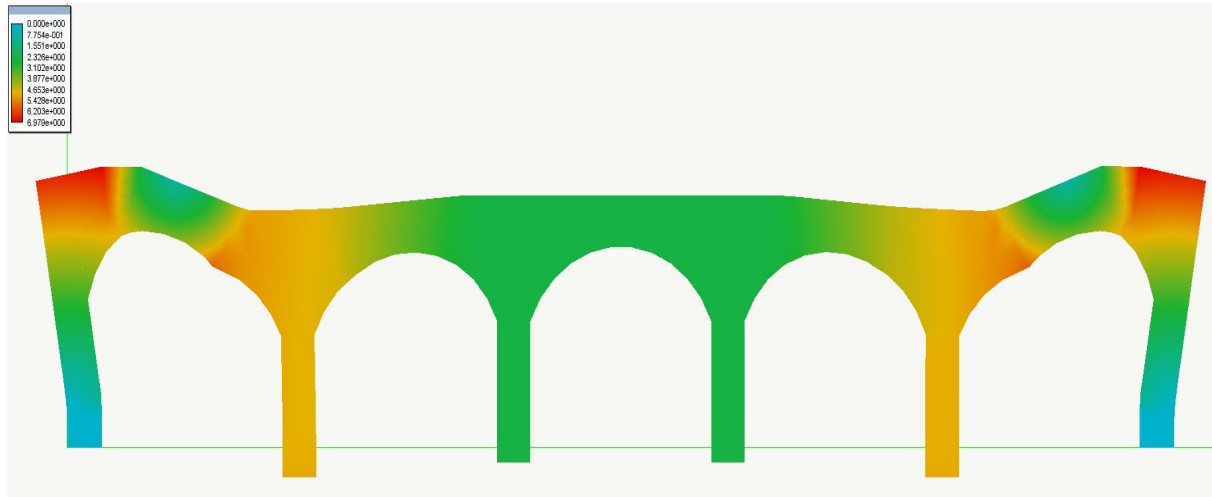
Il metodo è di tipo iterativo, in pratica viene fissato un valore di "tentativo" dell'accelerazione all'istante $t+Dt$, si calcolano poi velocità e spostamento, e si ricava un nuovo valore dell'accelerazione, da qui si itera il procedimento fin quando la differenza tra due valori successivi non risulta minore della quantità tollerata.

Il ricavare il valore dell'accelerazione dall'equazione rappresentativa dell'equilibrio dinamico al tempo $t+Dt$, in ciascuna iterazione, è uno dei vantaggi del metodo di Newmark rispetto a metodi simili, infatti in questo modo si monitora costantemente ad ogni iterazioni, l'approssimazione che si sta operando.

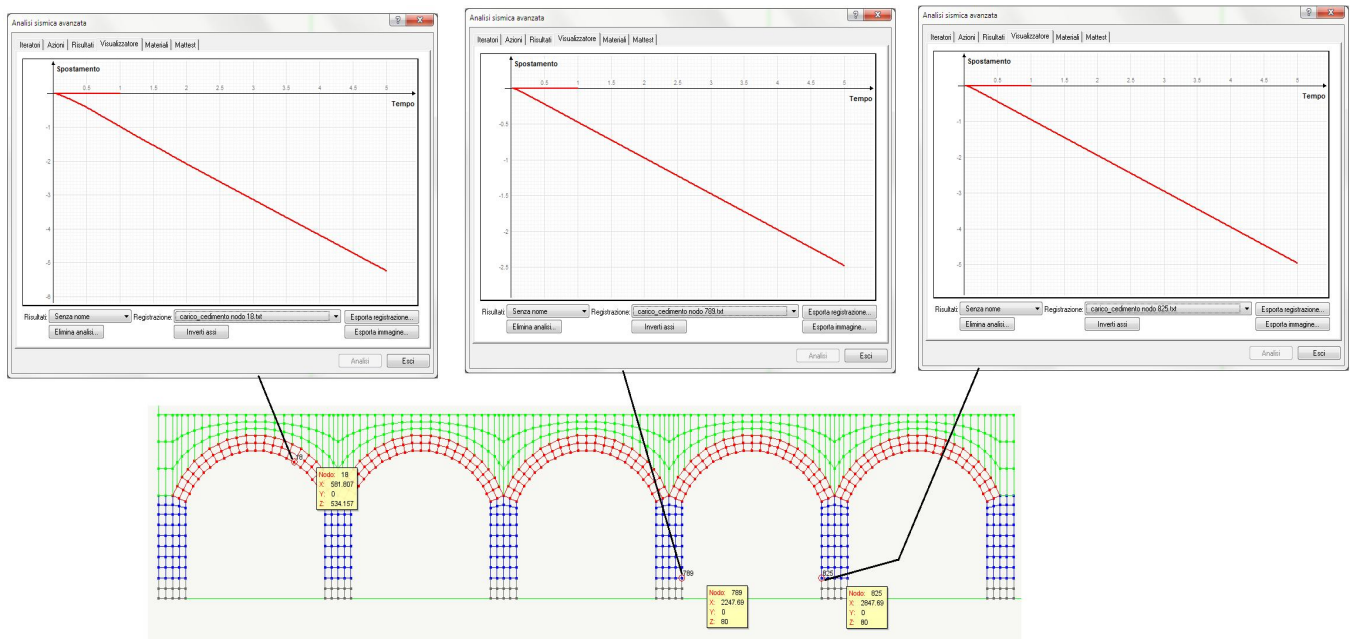
Tali metodi impliciti si dicono "Incondizionatamente stabili", per questi il passo Dt deve essere scelto sulla base della precisione ottenibile, dato che quando si integra con non linearità occorre ricordare che dato che nel sistema cambiano le matrici, Dt può e deve cambiare.

5.5 Risultati analisi

A seguito dell'esecuzione dell'analisi, si ottiene la seguente deformata finale:

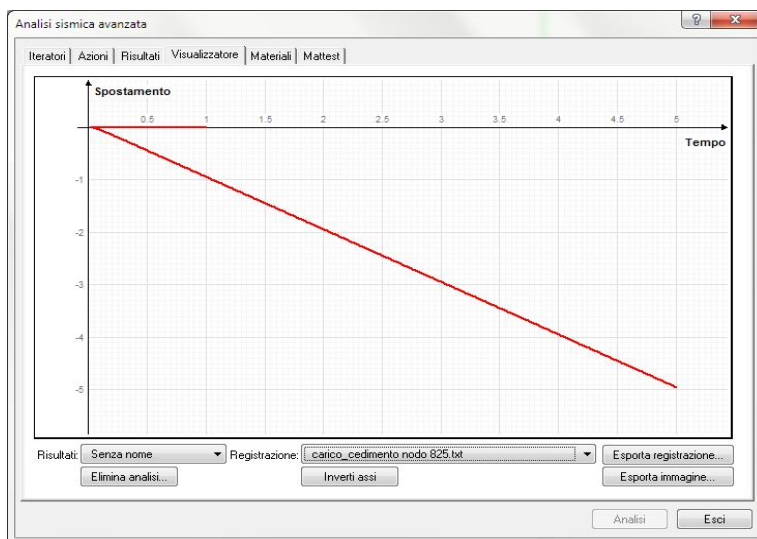


E' possibile andare a visualizzare l'andamento del cedimento nel tempo per tutti i punti monitorati:



Considerazioni sulla curve cedimento-tempo ottenute:

NODO 825

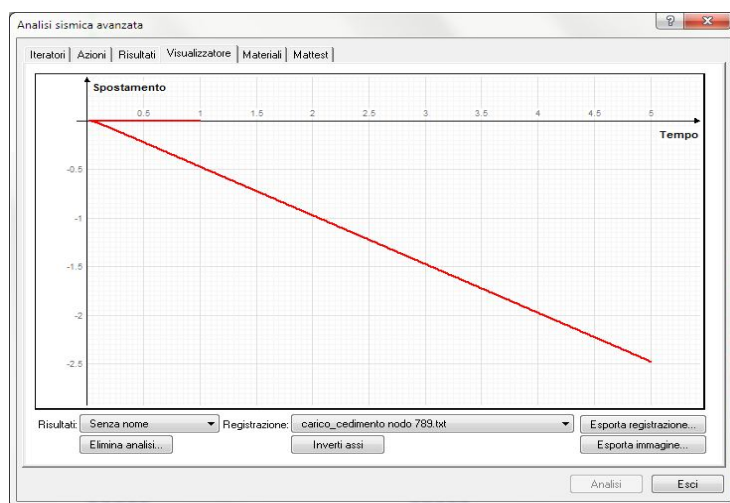


Il nodo 825 appartiene alla pila più esterna (alla quale era stato applicato il cedimento di 5.0 cm).

Dato che il calcolo è stato eseguito in due fasi in cui prima sono stati applicati i carichi verticali, e dopo il cedimento fondale, si deve notare che il primo tratto rosso, praticamente coincidente fino al secondo 1.0, con l'asse del tempo, rappresenta lo spostamento verticale del nodo di riferimento, in relazione ai carichi verticali (che risulta comunque infinitesimo rispetto all'entità dei cedimenti applicati successivamente).

La prima cosa che si nota è che più che una curva, ciò che abbiamo ottenuto è una retta, dato che la progressione del cedimento assegnata con il file esterno, era lineare, (ma è possibile anche applicare progressioni non lineari), il cedimento parte dal valore di spostamento dovuto ai carichi verticali, e procede fino al valore massimo di 5.0 cm.

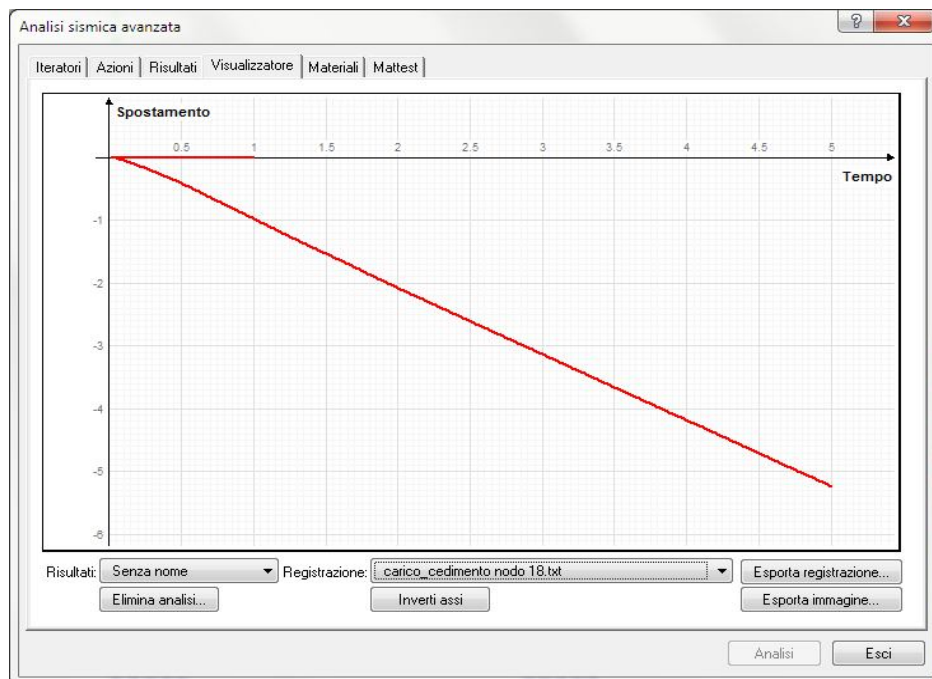
NODO 789



Il nodo 789 appartiene alla pila più interna (alla quale era stato applicato il cedimento di 2.5 cm).

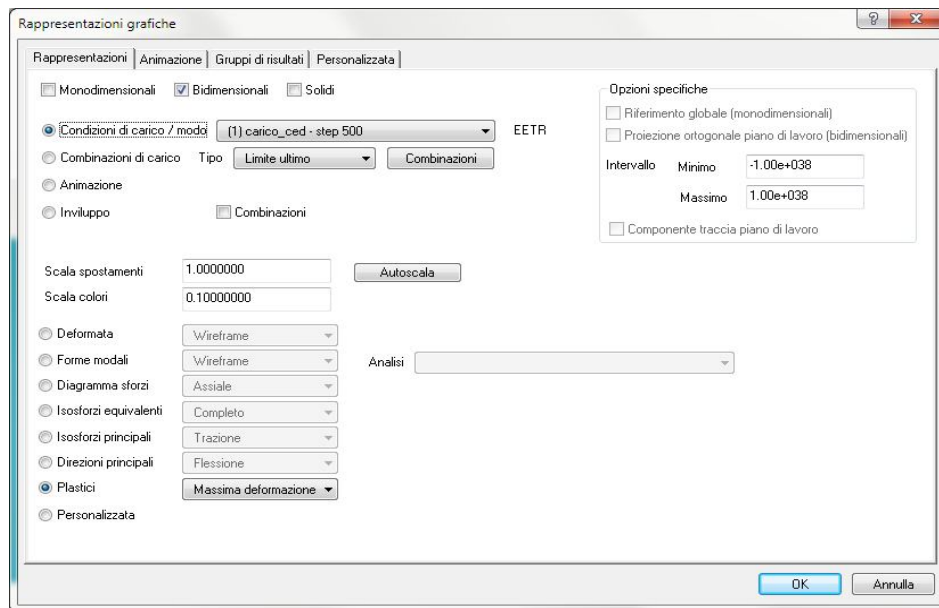
Le considerazioni che si possono fare sono le medesime fatte per il nodo 825.

NODO 18

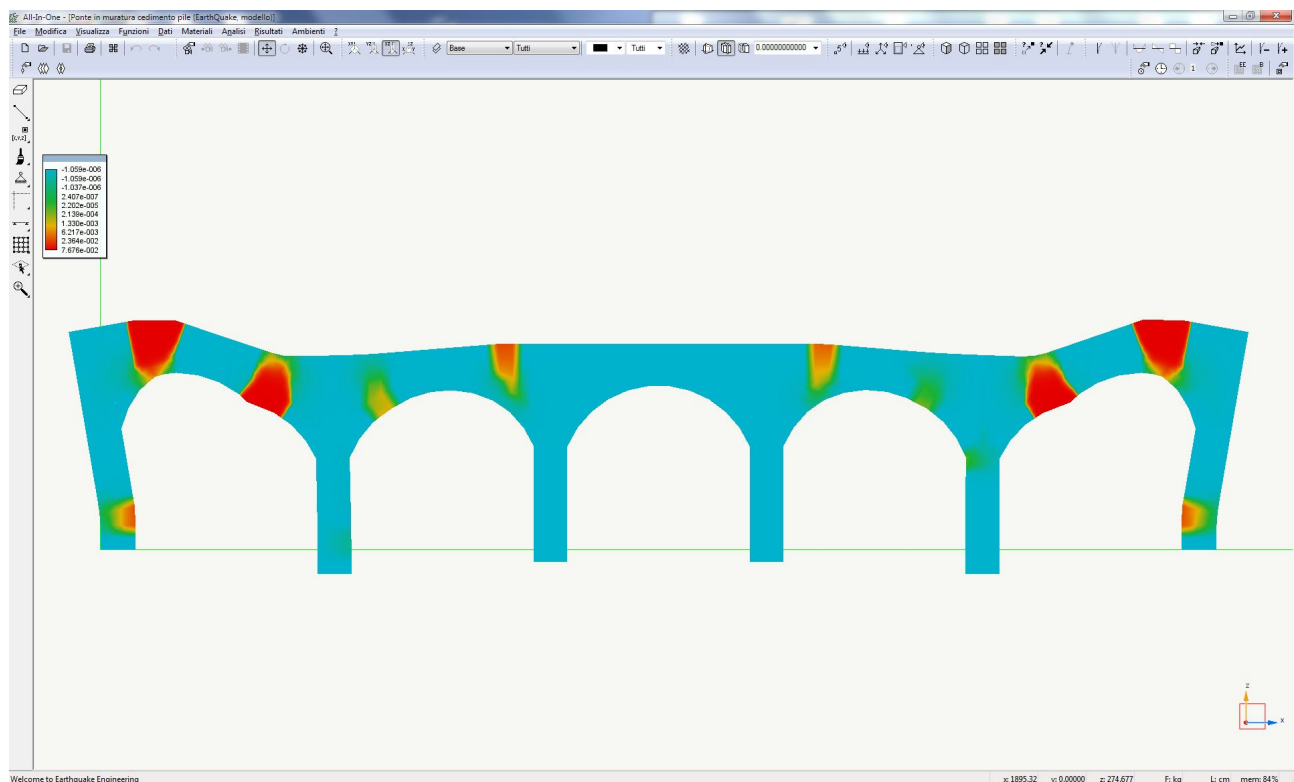


Il nodo 18 appartiene all'arco, in prossimità della pila alla quale è stato applicato un cedimento di 5.0 cm; come ci si può aspettare lo spostamento verticale per tale nodo è diverso, e nello specifico è maggiore di 5.0 cm, dato che oltre all'abbassamento applicato in fondazione, si avrà un ulteriore spostamento dovuto all'assestamento della struttura che asseconda i cedimenti fondali.

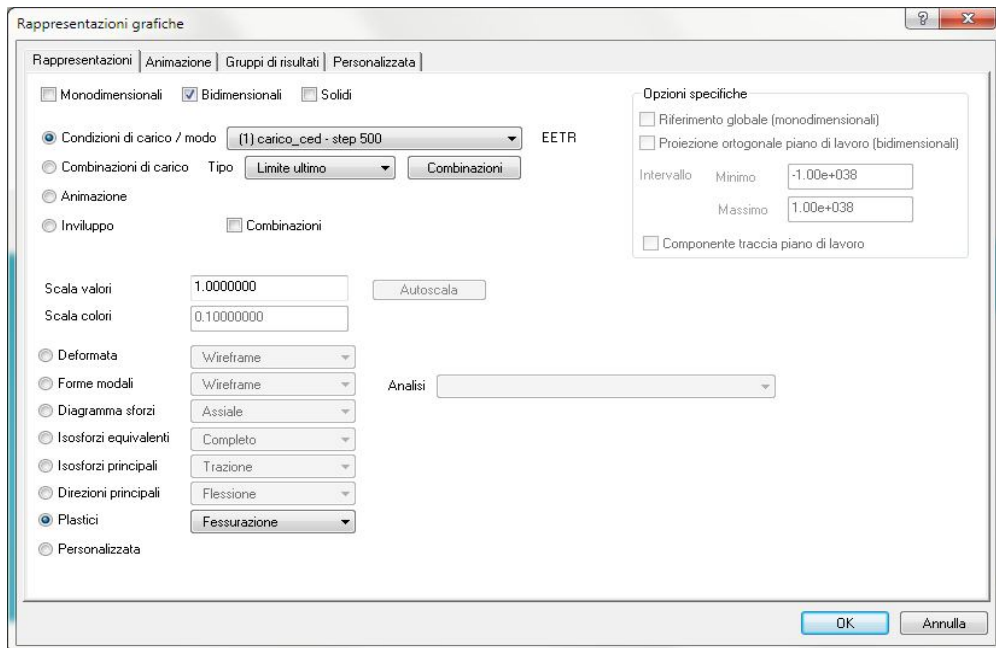
Aprendo la finestra di dialogo delle rappresentazioni grafiche, impostando la visualizzazione relativa all'ultimo passo di analisi (500), impostata nella finestra di dialogo delle “Rappresentazioni grafiche”:



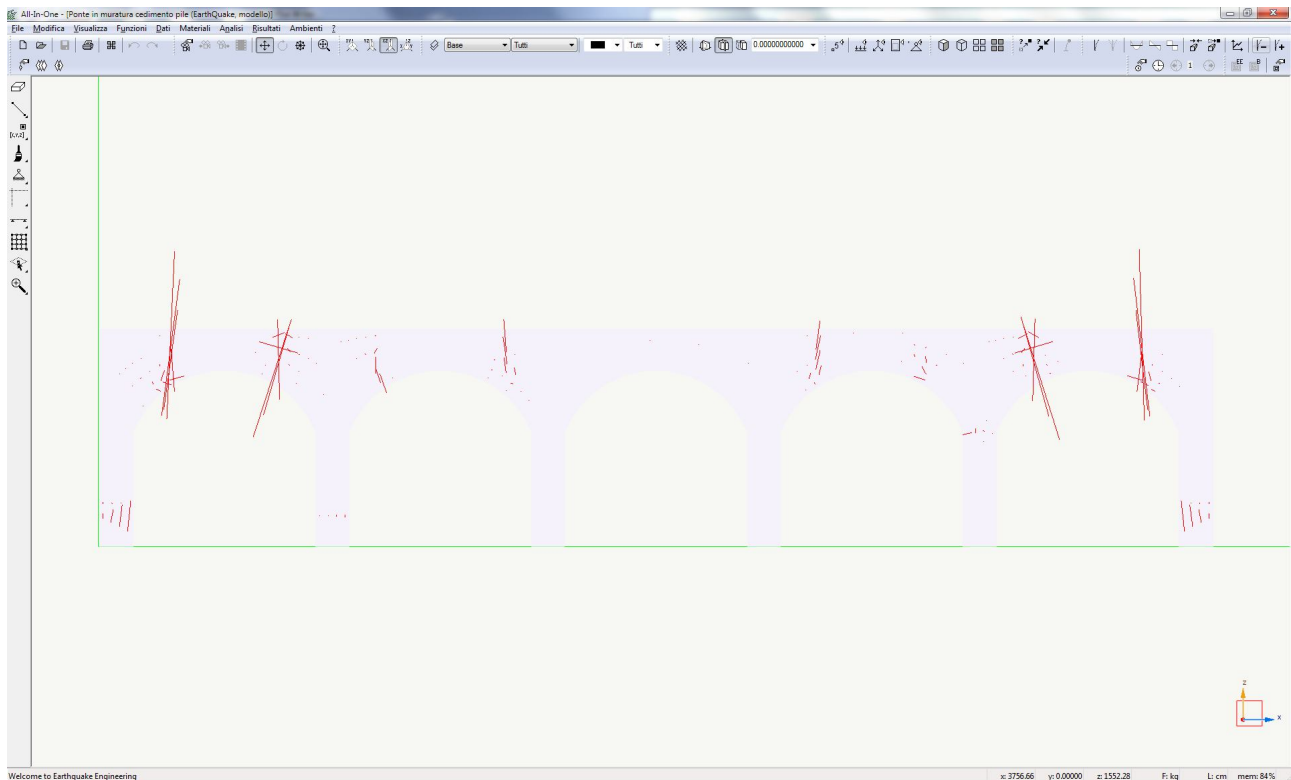
e settando la vista degli stati “Plastici” → “Massima deformazione” si ottiene il seguente quadro deformativo:



Allo stesso modo, visualizzando la “Fessurazione” relativa all'ultimo passo di analisi (500), impostata sempre nella finestra di dialogo delle “Rappresentazioni grafiche”:



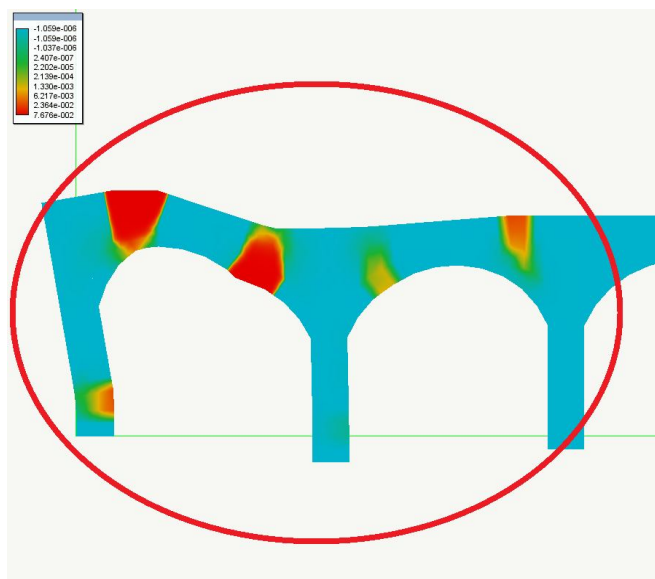
si ottiene il seguente quadro fessurativo:



Considerazioni sul quadro delle “Massime deformazioni” e del quadro fessurativo ottenuti:

Anche in questo caso, il progettista può in prima fase valutare se il comportamento del modello è in linea con il comportamento atteso. Dal quadro di massime deformazioni si riscontra una analogia con le strutture a telaio in cui, nelle campate adiacenti alla pila che subisce il massimo cedimento, si formano deformazioni e delle fessure che indicano una cerniera plastica in corrispondenza delle sezioni di estremità dell'arcata.

Ovviamente tali deformazioni sono maggiori nella campata più esterna, dato che le pile di estremità non hanno subito alcun cedimento, mentre sono più attenuate, ma sempre presenti nella campata comune alla pila che subisce la metà del cedimento massimo:



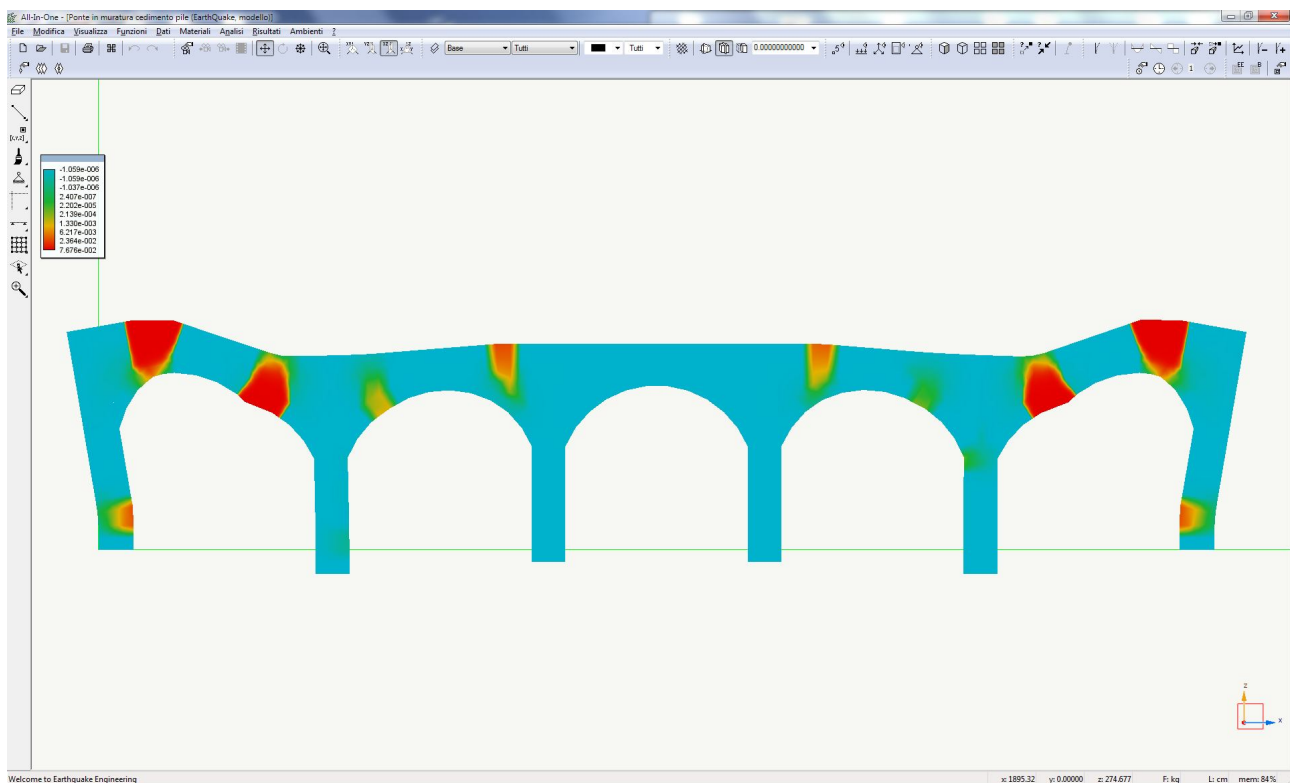
La deformazione e l'apertura delle campate di estremità comporta poi anche la formazione di una cerniera plastica sul lato interno, al piede della pila di estremità, dato che l'apertura delle ampie fessure sull'arcata comporta immancabilmente una inclinazione verso l'esterno della pila di estremità.

Anche in questo caso è possibile individuare le modalità di collasso della struttura, e quindi procedere impostando una analisi del cinematismo che si può innescare, e valutando un moltiplicatore del carico di collasso delle azioni verticali che possono assoggettare la struttura a seguito di un cedimento fondale come quello studiato.

6. Esempio di calcolo non lineare (Analisi non lineare eseguita su un ponte ad arco in muratura danneggiato a seguito di cedimenti fondali)

Sulla base dei due modelli visti precedentemente, è possibile fare un passo successivo, concatenando le due modellazioni. Nel primo modello abbiamo assegnato una analisi di spinta, e sul secondo modello in cui sostanzialmente alla fine arrivavamo a dedurre un meccanismo di collasso cinematicamente ammissibile, studiando il quale è possibile determinare nel primo modello uno stato limite di collasso in riferimento al sisma, e nel secondo uno stato limite di collasso per carichi verticali a seguito della manifestazione di cedimenti di fondazione.

Ci proponiamo ora di eseguire una analisi uguale a quella eseguita sul primo modello, ma partendo dalla base dei risultati del secondo, ossia eseguiremo una analisi di spinta sul modello che avrà uno stato di danneggiamento di default corrispondente al quadro finale del modello a cui abbiamo applicato i cedimenti:

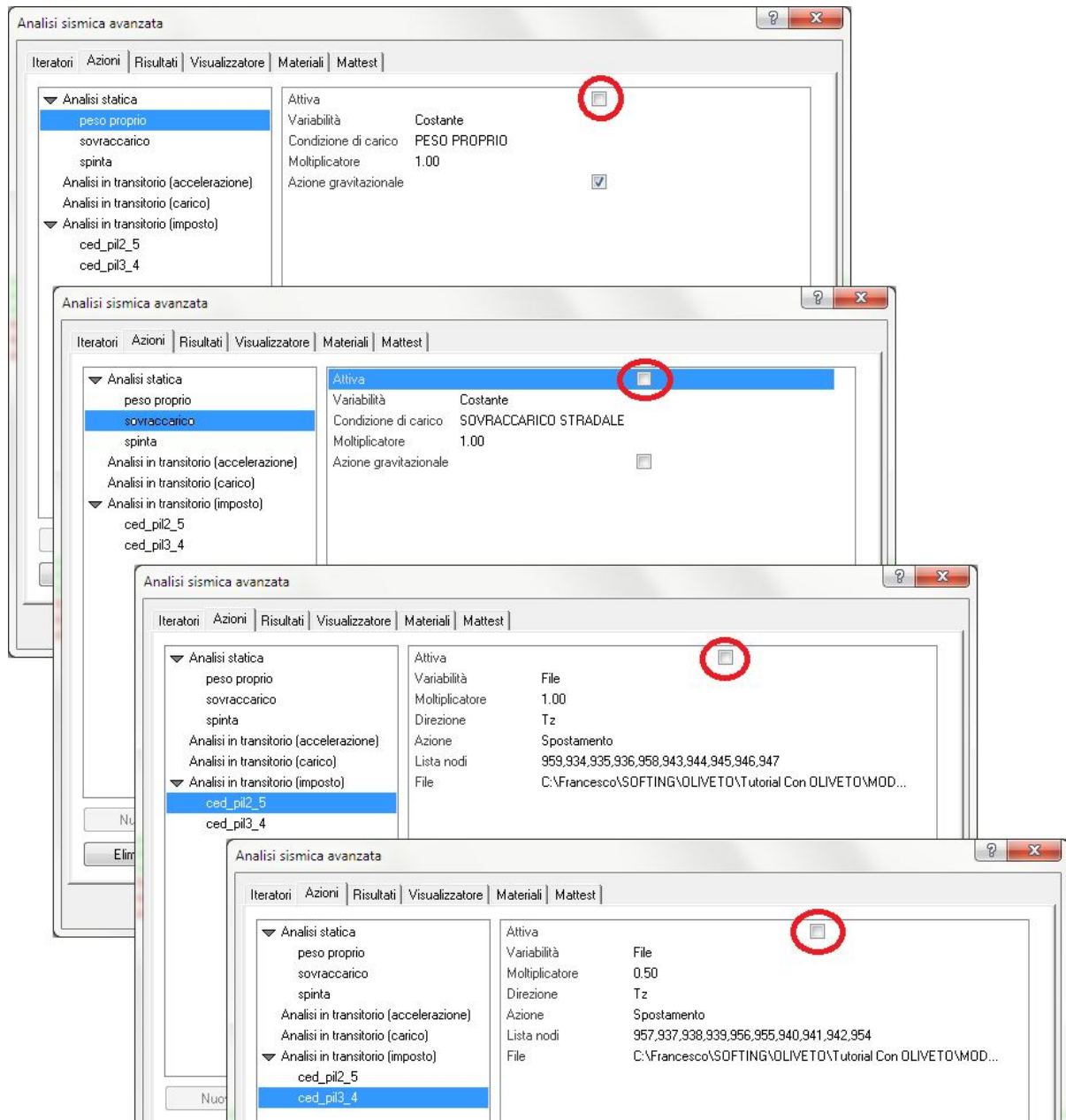


Vediamo la procedura per eseguire tale analisi.

NOTA: il procedimento che verrà descritto richiede di aver eseguito l'analisi nei confronti dei cedimenti così come descritta al capitolo precedente, e successivamente operare come mostrato nel seguito. Azioni assegnate per analisi non lineare

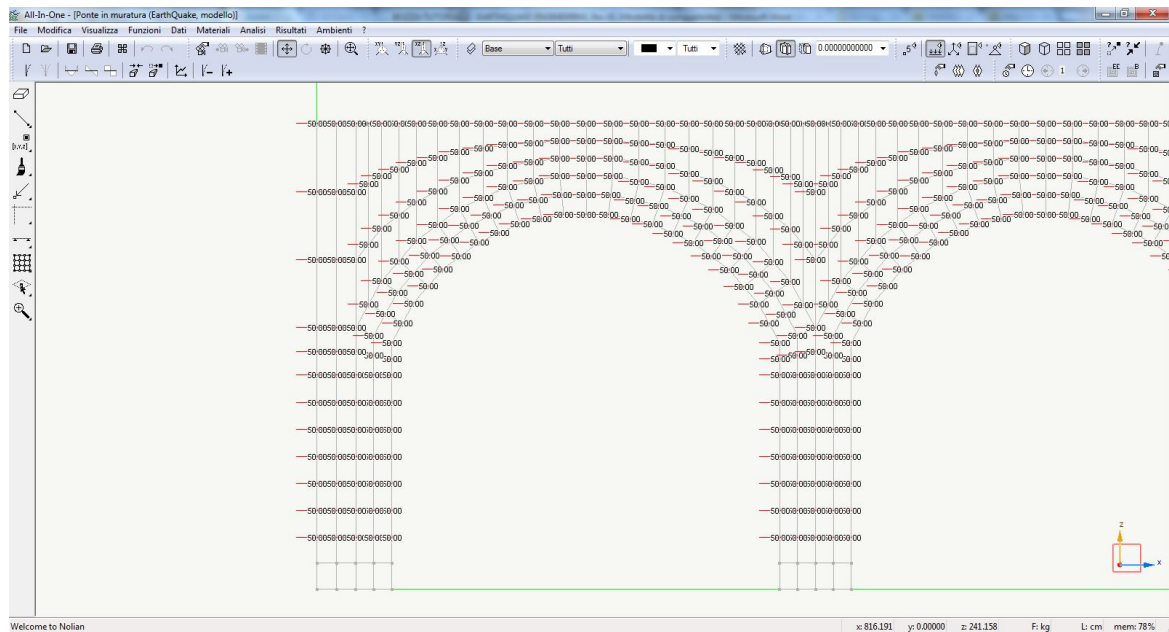
Assegnazione azioni: Analisi sismica avanzata

Le altre azioni assegnate al modello devono essere tutte disattivate:

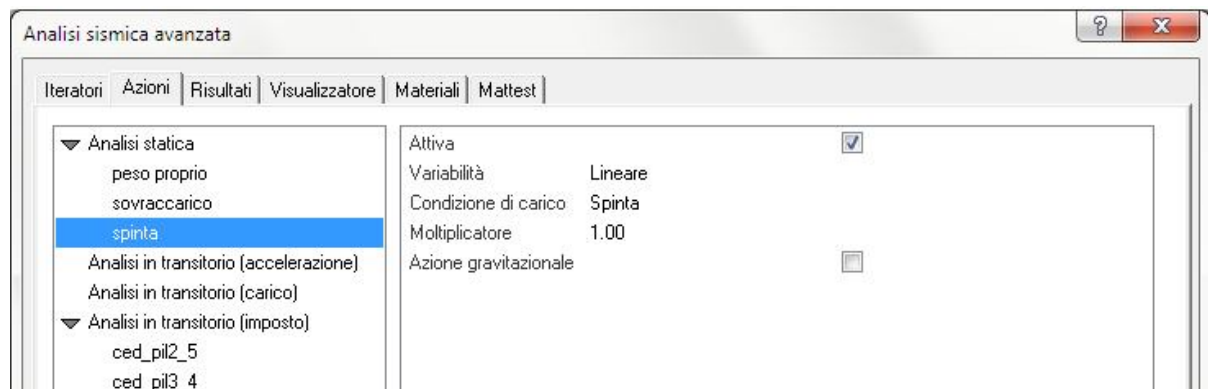


Fatto questo si deve aggiungere l'azione relativa alla spinta orizzontale:

Abbiamo già nel modello assegnato il sistema di forze orizzontali mostrato prima:



A questo punto bisogna soltanto assegnare talle condizione di carico come azione per eseguire l'analisi non lineare:

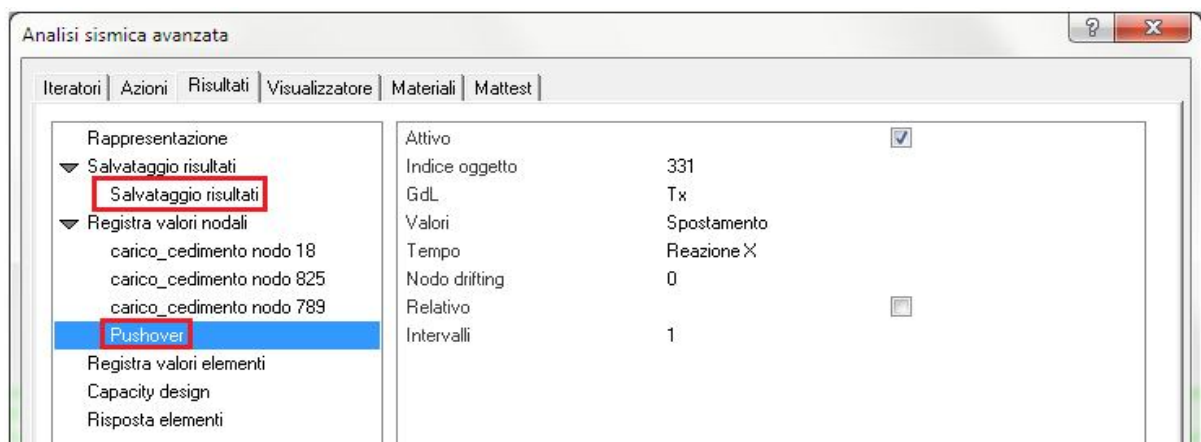


6.1 Registratori attivati

Per poter elaborare i risultati di analisi, sono stati attivati i seguenti *Registratori di risultati*:

Come al solito è attivo il "Registratore": **Salvataggio risultati**

sul quale non ci soffermiamo ulteriormente, e poi è stato riattivato lo stesso registratore che avevamo attivato nella prima analisi precedentemente vista in questo tutorial:



Registra valori nodali: è ormai chiaro che tale registratore permette di andare a tracciare la curva di capacità della struttura, prendendo come nodo di riferimento il nodo 331.

6.2 Iteratori d'analisi

Nel dialogo di impostazione dell'analisi non lineare, sono state settate le seguenti opzioni:

The screenshot shows the 'Analisi sismica avanzata' dialog box with the 'Iteratori' tab selected. The dialog is organized into several sections:

- Metodi:** Three radio buttons are present: 'Lineare' (unselected), 'Newton-Raphson' (selected), and 'Newton-Raphson con Line Search' (unselected).
- Test di convergenza:** Three radio buttons: 'Equilibrio' (selected), 'Spostamenti' (unselected), and 'Energia' (unselected). To the right, there are two input fields: 'Massimo numero iterazioni' set to '100' and 'Tolleranza' set to '0.0100000'.
- Smorzamento di Rayleigh:** Two input fields: 'Massa' set to '0.000000' and 'Rigidezza' set to '0.050000'.
- Modale:** A radio button 'Modale' (selected) and an input field 'N. autovalori' set to '3'.
- Solutori:** Two radio buttons: 'Matrici sparse simmetriche' (selected) and 'Matrici sparse non simmetriche' (unselected).
- Integratori statici:** Three radio buttons: 'Controllo di carico' (unselected), 'Controllo di spostamento' (selected), and 'ArcLength' (unselected).
- Integratori transitorio:** One radio button 'Newmark' (unselected).
- Parametri numerici:** A collection of input fields and a button: 'Numero di passi' (300), 'Incremento' (0.0050000), 'Variabilità di passo' (0.0010000), 'Usa lista' (checkbox, unselected) with a 'Lista' button, 'Nodo di riferimento' (331), 'Gdl' (Tx dropdown), 'Lunghezza arco' (10.000000), 'Alfa' (1.0000000), and 'Intervallo temporale' (0.0100000).
- Checkboxes at the bottom:** Three checked options: 'Apri questo dialogo prima di ogni analisi', 'Inizia analisi dallo stato di quella precedente', and 'Applica azioni gravitazionali prima'.

At the bottom right, there are two buttons: 'Analisi' and 'Esci'.

Metodi di iterazione

- Newton-Raphson;

Solutori

- Matrici sparse simmetriche;

Integratori statici

Controllo di spostamento

Test di convergenza

"Equilibrio" scegliendo il massimo numero di iterazioni e la relativa tolleranza di convergenza

Parametri numerici

Numero di passi: 300

Incremento: 0,005

Nodo di riferimento

331

GdL

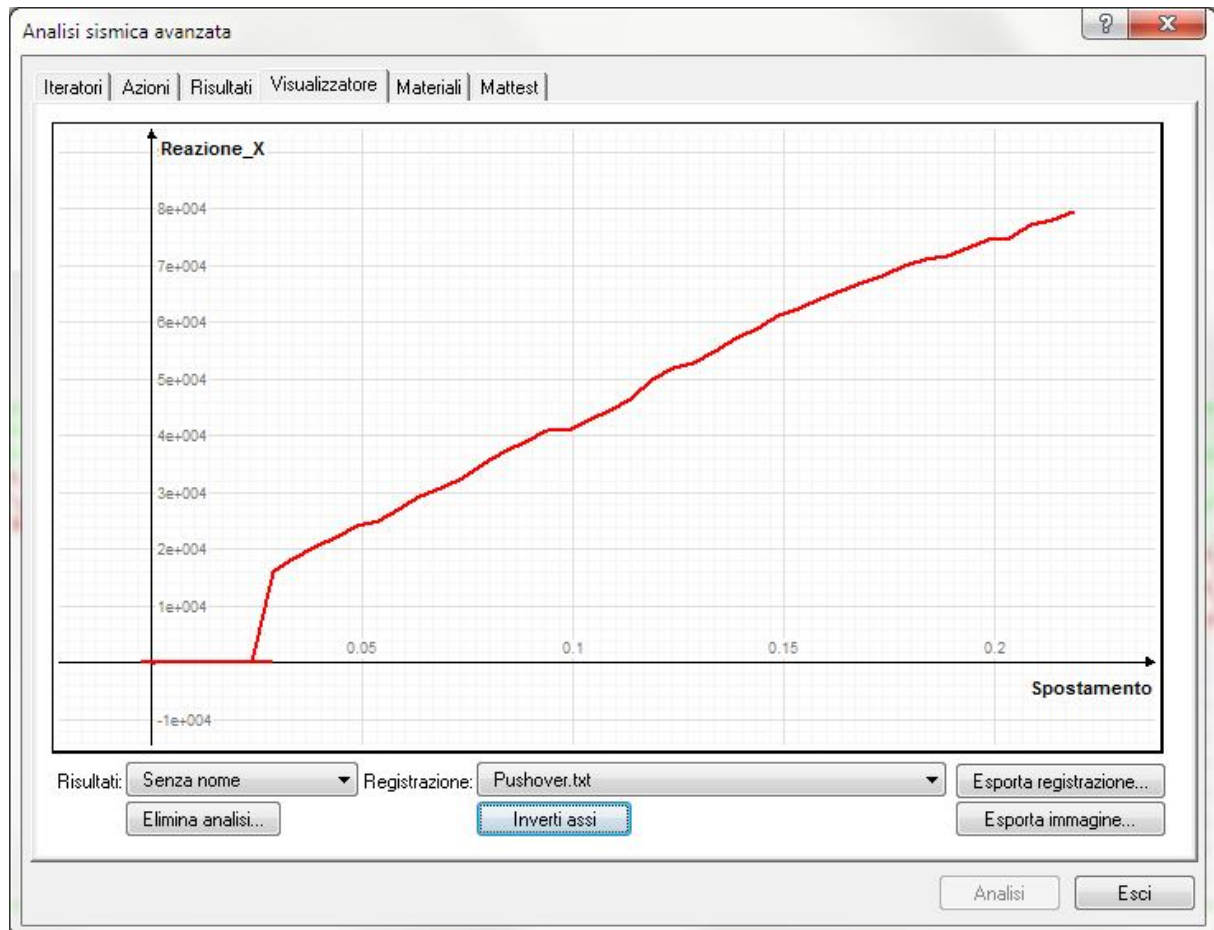
Tx

Si noti che è apposta la spunta sul check-box: "Inizia analisi dallo stato di quella precedente", è l'utilizzo di tale opzione che ci permette di concatenare l'analisi dei cedimenti eseguita precedentemente, con l'analisi di spinta che ci si appresta ad eseguire.

Si può procedere ora, con l'analisi della struttura.

6.3 Risultati analisi

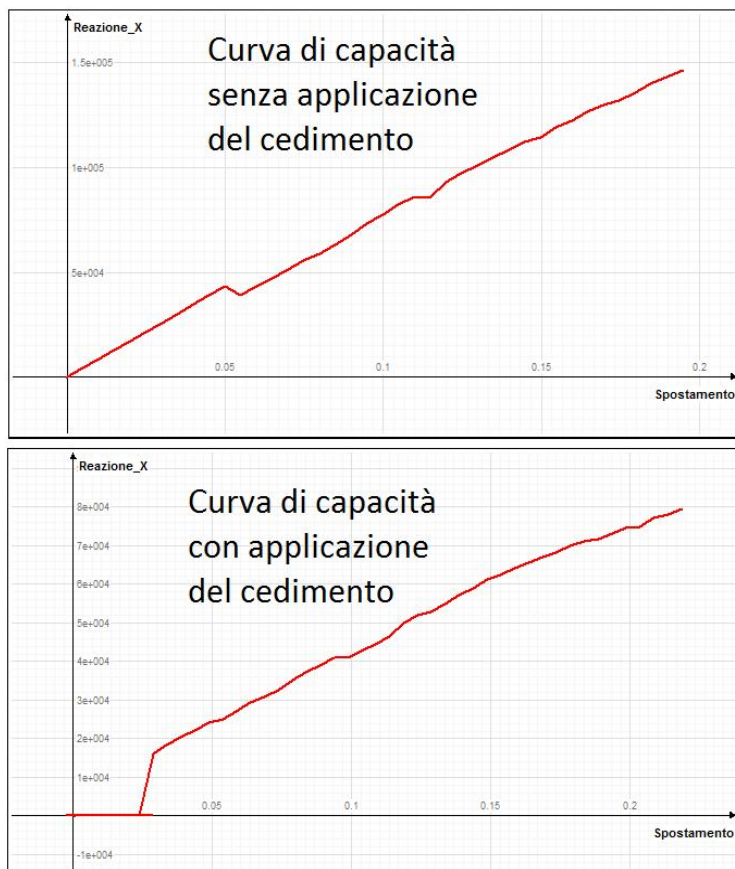
A seguito dell'esecuzione dell'analisi, visualizzando la curva di capacità della struttura, abbiamo:



Anche in questo caso, come nel caso dell'analisi di spinta in cui avevamo assegnato il sovraccarico stradale, la mancata convergenza si riscontra dopo circa 40 passi di analisi.

Considerazioni sulla curva di capacità ottenuta:

Anche in questo caso se eseguiamo un paragone tra la curva di capacità ottenuta dall'analisi di spinta senza la preventiva applicazione del cedimento, e quella ottenuta ora dopo l'applicazione del cedimento, abbiamo:

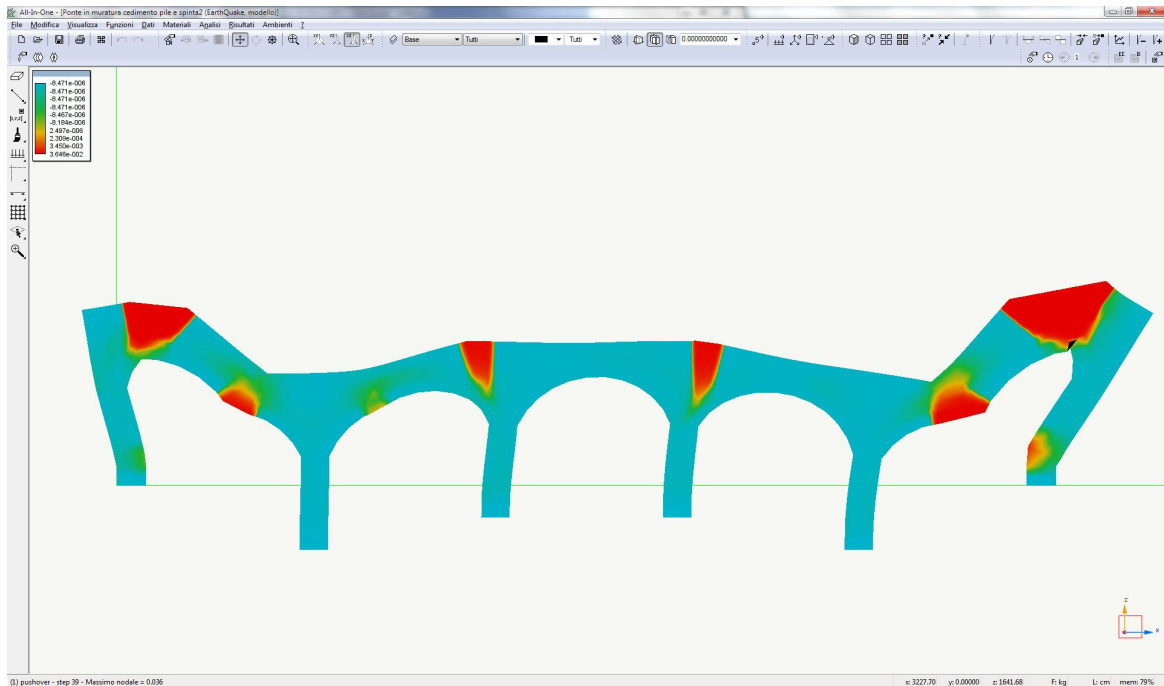


Dal confronto si nota che a parte il primo tratto iniziale, le due curve ottenute sono molto simili, , un andamento approssimabile ad una retta, e la totale assenza di un tratto duttile.

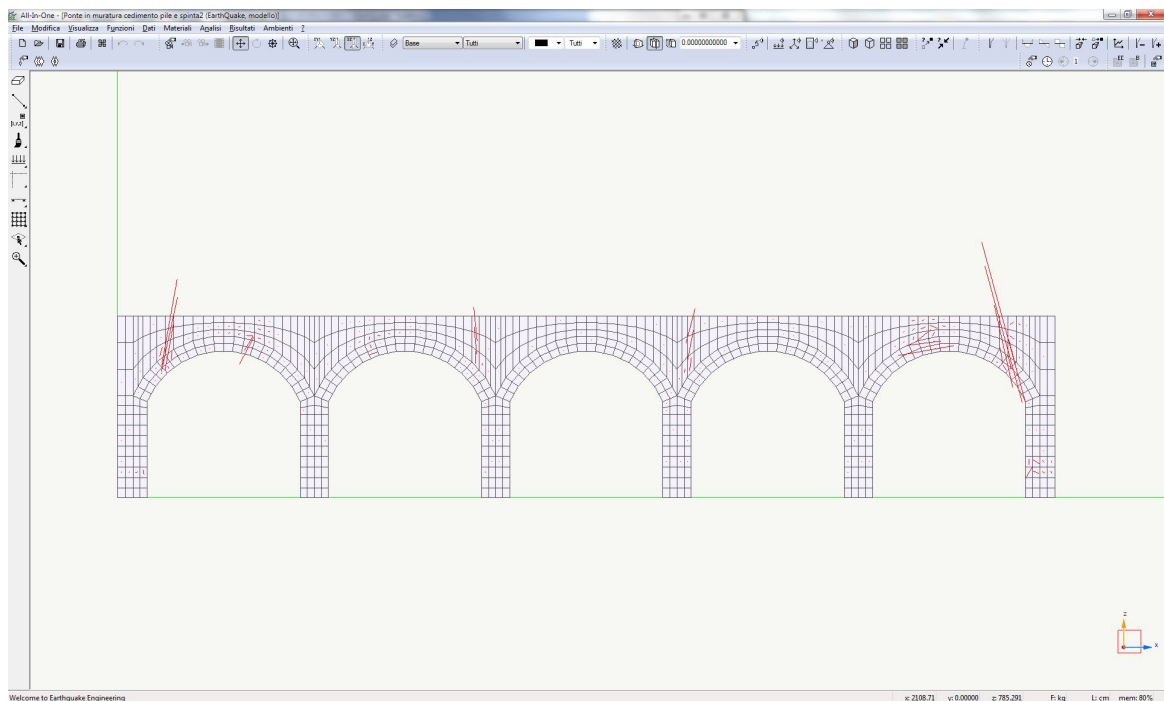
Lo spostamento ultimo ottenuto in questo caso è pari a circa 2,4 mm, di cui però 0.3 mm circa sono lo spostamento orizzontale subito inizialmente dal nodo di controllo a causa del cedimento di fondazione precedentemente applicato.

La sostanziale differenza tra le due analisi, sta nel valore della forza ultima che si ottiene dalla analisi, infatti nella prima abbiamo una F_{max} di circa 150000,00 kg, mentre ora tale valore è sceso a circa 80000,00 kg, quasi la metà, segno che il danneggiamento indotto dal cedimento di fondazione riduce le capacità residue di risposta alle azioni orizzontali.

Andando a visionare il quadro di “Massima deformazione ” abbiamo:



A cui corrisponde il seguente quadro fessurativo:



Anche in questo caso rispetto alle due analisi mostrate all'inizio del tutorial, si riscontra una ridotta capacità di deformazione in campo plastico e quindi una riduzione del moltiplicatore del carico che porta al collasso la struttura.

7. Conclusioni

Le modellazioni presentate in questo tutorial cercano di fornire all'utente una dimostrazione dell'utilizzo di alcune funzioni particolari dell'ambiente EarthQuake Engineering, (Materiale No-Tension, Analisi in Transitorio, Concatenamento di risultati di analisi), dare una visione più generale sulle potenzialità del suo utilizzo, e cerca al contempo di fornire spunti per utilizzare il programma come ausilio ad approcci differenti dagli ordinari metodi di verifica (Metodo dell'oscillatore elastoplastico equivalente - N2) previste dalla normativa in sede di analisi non lineare.