

Earthquake Engineering

Questa guida

Questa guida si riferisce all'ambiente Earthquake Engineering ed ai metodi di calcolo avanzati destinati all'Ingegneria Antisismica.

Tutti i diritti su questo manuale sono di proprietà della Softing srl.

© 2008-2021 Softing srl. Tutti i diritti riservati.

Ultima revisione: 11 marzo 2021.

Accordo di licenza d'uso del software Softing

1. Licenza. A fronte del pagamento del corrispettivo della licenza, compreso nel prezzo di acquisto di questo prodotto, e all'osservanza dei termini e delle condizioni di questa licenza la Softing s.r.l., nel seguito Softing, cede all'acquirente, nel seguito Licenziatario, un diritto non esclusivo e non trasferibile di utilizzo di questa copia di programma software, nel seguito Software.

2. Proprietà del software. La Softing mantiene la piena proprietà di questa copia di programma Software e della documentazione ad essa allegata. Pertanto la Softing non vende alcun diritto sul Software sul quale mantiene ogni diritto.

3. Utilizzo del software. Questo Software contiene segreti commerciali. È espressamente proibito effettuare copie o modifiche o re-ingegnerizzazioni, sotto qualsiasi forma e con qualsiasi mezzo, anche parziali, del Software e della documentazione a esso allegata. Il Licenziatario è responsabile a tutti i fini legali per qualunque infrazione causata o incoraggiata dalla non osservanza dei termini di questa licenza. È consentito effettuare una sola copia del Software esclusivamente per installazione su un solo disco rigido.

4. Cessione del software. Il software viene ceduto in licenza unicamente al Licenziatario e non può essere ceduto a terzi. In nessun caso è consentito cedere, assegnare, affidare, affittare o disporre in altro modo del Software se non nei termini qui espressamente specificati.

5. Cessazione. Questa licenza ha la durata di anni dieci. Il Licenziatario può porvi termine in ogni momento con la completa distruzione del Software. Questa licenza si intende cessata, senza onere di comunicazione da parte di Softing, qualora vi sia inadempienza da parte del Licenziatario delle condizioni della licenza.

6. Esonero della garanzia del software. Il Licenziatario si fa carico di ogni rischio derivante, dipendente e connesso all'uso del Software. Il Software e la relativa documentazione vengono forniti nello stato in cui si trovano. Softing si esonera espressamente da ogni garanzia espressa o implicita ivi inclusa, ma senza limitazioni, la garanzia implicita di commerciabilità e di idoneità del prodotto a soddisfare particolari scopi. Softing non garantisce che le funzioni contenute nel Software siano idonee a soddisfare le esigenze del Licenziatario né garantisce una operatività ininterrotta o immune da difetti del Software né che i difetti riscontrati nel software vengano corretti. Softing non garantisce l'uso o i risultati derivanti dall'uso del Software e della documentazione né la loro correttezza, affidabilità e accuratezza. Le eventuali informazioni orali o scritte di esponenti o incaricati di Softing non inficiano questo esonero di garanzia.

7. Limitazioni di responsabilità. Softing è espressamente sollevata da ogni responsabilità per qualsiasi danno, diretto o indiretto, di ogni genere e specie, derivante dall'uso o dal non uso del Software e della relativa documentazione. In ogni caso i limiti di responsabilità di Softing nei confronti del Licenziatario per il complesso dei danni, delle perdite, e per ogni altra causa, sarà rappresentato dall'importo dal Licenziatario corrisposto a Softing per il relativo Software.

8. Foro esclusivo. In caso di controversie relative a questo accordo, sarà esclusivamente competente a decidere l'Autorità

Giudiziaria di Roma.

9. Obbligatorietà ed interezza dell'Accordo. Il Licenziatario, avendo letto il testo che precede ed avendo riscontrato che questa Licenza e la Garanzia Limitata che contiene sono accettabili, le accetta senza condizioni e conferma, con l'atto di accettare l'installazione del Software, la sua volontà di vincolarsi alla scrupolosa osservanza di questo Accordo. Il Licenziatario dà altresì atto che quanto precede costituisce la totalità delle intese intercorse e che pertanto esso annulla e sostituisce ogni eventuale precedente accordo o comunicazione tra le parti.

SOFTING NON GARANTISCE CHE LE FUNZIONI CONTENUTE NEL SOFTWARE SIANO IDONEE A SODDISFARE LE ESIGENZE DEL LICENZIATARIO NÉ GARANTISCE UNA OPERATIVITÀ ININTERROTTA O IMMUNE DA DIFETTI DEL SOFTWARE NÉ CHE I DIFETTI RISCONTRATI VENGANO CORRETTI. SOFTING NON GARANTISCE L'USO O I RISULTATI DERIVANTI DALL'USO DEL SOFTWARE E DELLA DOCUMENTAZIONE NÉ LA LORO CORRETTEZZA, AFFIDABILITÀ E ACCURATEZZA.

Le informazioni contenute in questo documento sono soggette a cambiamento senza preavviso e non costituiscono impegno alcuno da parte della Softing s.r.l. Nessuna parte di questo manuale e per nessun motivo può essere utilizzata se non come aiuto all'uso del programma.

Nòlian è registrato presso il Registro Pubblico Speciale per i programmi per Elaboratore in data 14/07/2000 al progressivo 001629, ordinativo D002017; EasyBeam in data 14/05/96 al progressivo 000348, ordinativo D000409; EasySteel in data 14/05/96 al progressivo 000346, ordinativo D000407; EasyWall in data 14/05/96 al progressivo 000347, ordinativo D000408; MacSap in data 23/11/97 al progressivo 000222, ordinativo D000264, ArchiLink in data 14/07/2000 al progressivo 001630, ordinativo D002018.

Softing®, il logo Softing, Nòlian®, il logo Nòlian®, Mac-Sap®, MacBeam®, CADSap®, EasyWall®, EasySteel®, EasyBeam®, EasyFrame®, EasyWorld®, HyperGuide®, Sap-Script®, FreeLite®, inMod®, EasyQuill®, Quilian® sono marchi registrati di Softing s.r.l.

Novità

Novità disponibili alla data nel rilascio EWS 50

- Ampliata la esposizione degli stati critici
- Rappresentazione grafica 3d della trave con Aggregatore sezioni
- Precompressione nella sezione a fibre
- Viscosità nel calcestruzzo
- Migliorata gestione smorzamento modale
- Gestione facilitata associazione isolatori ad elementi boundary
- Generazione accelerogrammi spettro compatibili
- Generazione automatica lista per analisi time history in successione
- Nuovo iteratore di Newton-Krylov

Concetti generali

L'insieme organico delle procedure di EE (Earthquake Engineering) intende assolvere allo scopo di rendere disponibili anche al progettista non specializzato, i metodi non lineari introdotti con la nuova normativa antisismica e comunque indispensabili per una progettazione consapevole.

I metodi di EE sono orientati ai problemi di ingegneria antisismica e sono organizzati in modo da renderne molto intuitivo l'uso.

L'architettura di questo ambiente è molto innovativa e molto ergonomica. Con architettura software si intende il modo in cui sono organizzate le componenti software e il modo in cui esse vengono riflesse nella interfaccia grafica del programma.

Diamo alcuni elementi di tale architettura perché sia più chiaro il modo di impiegarla.

Il modello

Prima dell'analisi viene costruito un intero modello di calcolo "specchiando" la definizione di nodi ed elementi di Nòlian e le loro caratteristiche, in una analoga struttura di dati autonoma finalizzata al modello a elementi finiti, sulla quale opereranno le funzionalità di trattamento del modello. Si tratta di una scelta onerosa sotto il profilo di occupazione della memoria ma che è pagante nelle analisi non lineari, cui EE è dedicato, in termini di memorizzazione locale in memoria centrale degli stati intermedi e per l'aggiornamento iterativo del modello in alternativa alla sua ricostruzione a ogni passo di integrazione.

Gli integratori

Gli integratori operano per passi discreti su variazioni o nello spazio e del tempo (a esempio transitorio con il metodo di Newmark) e dello spazio tridimensionale e dei carichi (a esempio arc length). Questo concetto unificatore ha consentito di unificare non solo concettualmente le procedure, ma di unificarne anche l'impiego.

Le Azioni

Con azioni si intende qualsiasi elemento esterno modificante lo stato del modello. Il concetto di azione ha trovato la sua unificazione nella unificazione degli integratori. Infatti un'azione variabile linearmente, a esempio, può variare sia nello spazio del tempo come in quello dei carichi. Pertanto, a livello di interfaccia utente, le azioni e la loro variabilità, ha una descrizione unica a prescindere dal tipo di analisi che si intende applicare. Ciò consente un più facile apprendimento e minor possibilità di errori di impiego.

I Registratori

I registratori sono un'altra funzionalità di rilievo di EE. Con "registratore" si intende un device di monitoraggio o registrazione di una coppia di variabili. Si possono "applicare" un numero indefinito di registratori durante l'analisi, e i risultati di essi si possono immediatamente visualizzare in forma diagrammatica su un apposito visualizzatore. I registratori, tipicamente, registrano coppie sforzo generalizzato-spostamento generalizzato. Quindi anche cicli isteretici e relazioni nello spazio delle variabili, comprese alcune specifiche come lo spazio p-q per la geotecnica.

Nota bene Il registratore può registrare (e quindi visualizzare) un massimo di 5000 valori, oltre i quali la registrazione non avviene più benché l'analisi continui regolarmente.

I Materiali

Si è introdotto il concetto di "materiale" rendendolo indipendente dall'elemento finito che lo gestisce. Questo sia per un motivo di architettura software (ogni materiale può mantenere il suo "stato" plastico durante la storia delle azioni) sia perché lo stesso materiale può essere impiegato per differenti elementi finiti.

Opzioni di attivazione

Le funzionalità di Earthquake Engineering sono sempre disponibili a livello di interfaccia, per l'uso invece occorrono:

- L'opzione "Analisi elasto-plastica" per l'uso di materiali a comportamento non lineare
- L'opzione "Time history" per effettuare le analisi nel transitorio

- L'opzione Sparse è indispensabile per l'analisi Capacity

Cenni storici

Le analisi non lineari sono la "nuova frontiera" del calcolo strutturale. Praticabili solo da pochi anni, per la complessità computazionale che comportano, sono state sempre un punto di riferimento di Nòlian che ne deriva addirittura il nome: **NO Llinear ANalysis**. Già nel 1986 Nòlian aveva un'ottima analisi non lineare in grandi spostamenti e piccole rotazioni per elementi trave che consentiva con tempi di calcolo brevissimi di valutare gli effetti del secondo ordine, così significativi nelle strutture snelle. Con il tempo questi metodi si sono arricchiti ma sono restati in "sordina" in quanto la gran parte degli utenti vedevano, erroneamente, in questi metodi una "complicazione" invece che una risorsa di certezze in più. Solo la recente normativa antisismica, seppur in modo del tutto discutibile, ha evidenziato l'utilità pratica di questi metodi. Così la Softing, nell'inverno del 2008, ha deciso di far "emergere dall'ombra", più di vent'anni di esperienza in analisi non lineare rendendo chiari, completi e congruenti i metodi di analisi non lineare già esistenti e completandoli con quelli ancora necessari. Uno sforzo enorme che ha portato il numero di linee del codice quasi a raddoppiarsi. Questi metodi sono in natura non lineari ma sono, ai fini della migliore operabilità, finalizzati ai metodi dell'ingegneria antisismica. I concetti, espressi nel seguito, indicheranno meglio lo sforzo che è stato fatto per unificare i concetti e renderli produttivi al massimo.

Le precauzioni

L'ambiente EE è soprattutto finalizzato ad analisi non lineari ed è strutturato per avere la massima produttività in questa mansione. Le analisi non lineari sono sempre iterative e pertanto sono molto dispendiose in termini di tempi di calcolo e di risorse di calcolo richieste. Tali tempi e risorse crescono esponenzialmente con la complessità del modello. Quindi se in analisi dinamica o lineare ci si può anche permettere un modello di calcolo dettagliato e spesso inessenziale, ciò non avviene per le analisi non lineari dove il modello deve essere pensato e semplificato al massimo. Vedere [Le differenze con l'ambiente lineare](#).

Le differenze con l'ambiente lineare

Gli elementi finiti per le soluzioni non lineari hanno una formulazione molto diversa da quelli per analisi lineari. Quindi l'ambiente EE implementa elementi finiti completamente diversi da quelli dell'ambiente lineare di Nòlian. Pertanto, oltre a presentare alcune differenze di prestazioni, possono avere delle differenti limitazioni d'impiego rispetto al tradizionale ambiente lineare di Nòlian. Inoltre si sono implementate funzionalità all'avanguardia per permetterne l'uso per applicazioni controllate ed evolute. Questo non autorizza quindi un uso acritico dei risultati. Qui di seguito ci limitiamo a elencare alcune differenze con il più noto ambiente lineare di Nòlian, non pretendendo di essere esaustivi e lasciando a l'operatore la cura di approfondire l'uso dei metodi e dei limiti dell'ambiente EE prima di impiegarlo per compiti gravosi.

Shell

Non sono supportati elementi a 3 nodi . La formulazione è completamente diversa dal corrispondente elemento lineare. Non ha rigidità per il drilling ma ha un fattore interno di penalità.

Rigel

Sono supportati solo se connessi a elementi Trave

Suolo Winkler

Il modello del suolo è non lineare, nel senso che non reagisce a trazione. I vantaggi sono ovvi ma la formulazione è discreta e non analitica come il modello lineare per cui i risultati possono essere sensibilmente diversi.

Brick

Hanno rigidità solo per le traslazioni, i gradi di libertà rotazionali, se liberi, vanno vincolati.

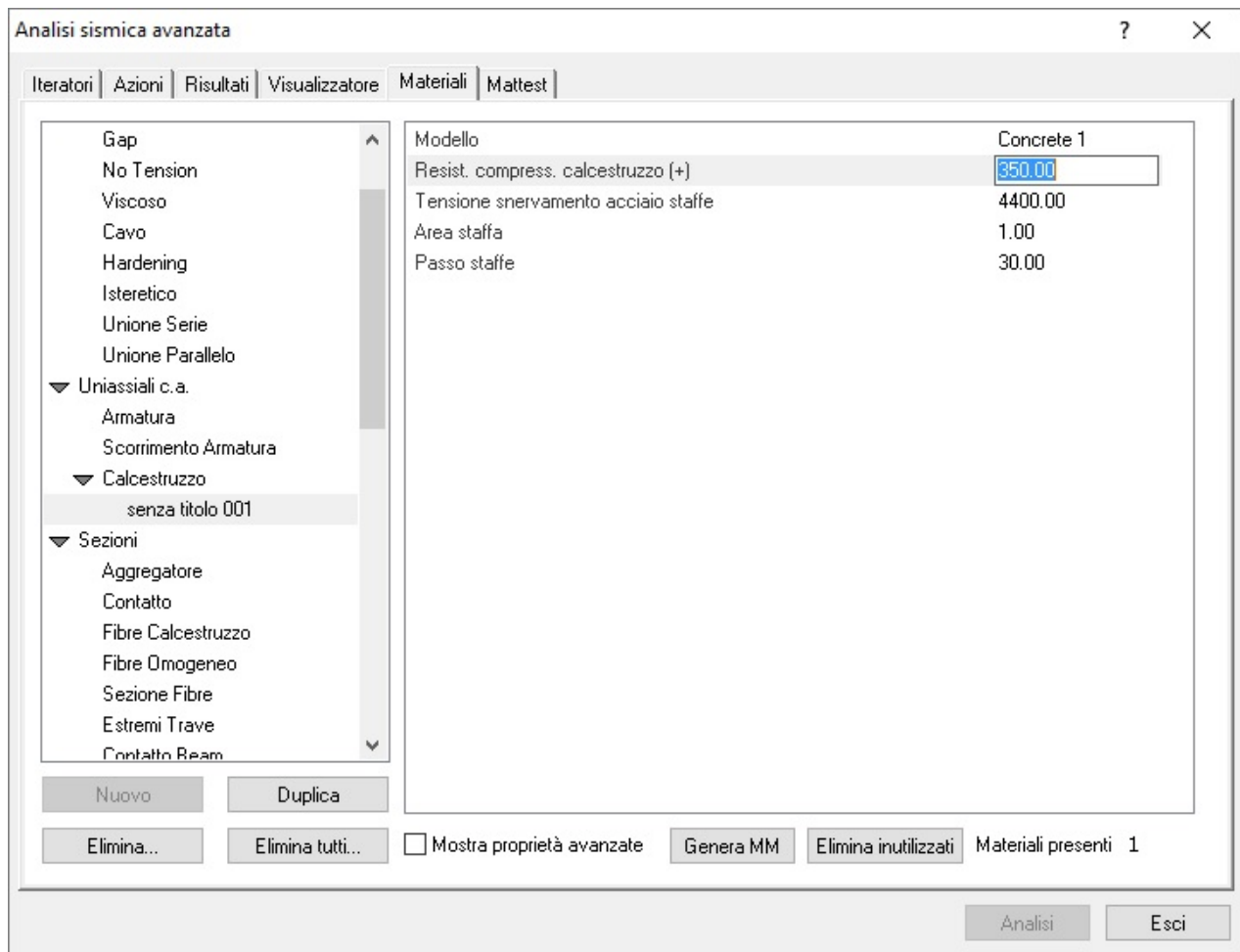
I materiali

Precisiamo subito alcuni concetti. Per “materiale” non si intende una "sostanza" ma un modello matematico che tenta di interpretare al meglio specifici aspetti del materiale impiegato in specifici usi. Quindi non esiste un “materiale”, a esempio, "acciaio" ma vi posso essere diversi modelli matematici per il comportamento dell'acciaio come barre di armatura, come profilato o come barra ancorata nel calcestruzzo. Pertanto il “materiale” va scelto con cura per il modello che interpreta e non confondendone i comportamenti con il solo nominativo di riferimento che gli è stato attribuito.

Nella trattazione dei materiali, a livello di interfaccia grafica, è stato volutamente unificato il concetto di materiale e di sezione, anche se molto diversi. Questo per non complicare l'assegnazione delle caratteristiche agli elementi. Il materiale “acciaio per armatura” è, a esempio, un materiale uniassiale. Tale materiale può essere aggregato in una sezione o può essere assegnato a una fibra di una sezione a fibre. Il “materiale” (così definito solo a livello di interfaccia) di Sezione a Fibre invece non è, strettamente parlando, un materiale ma è costituito da materiali aggregati in modo voluto per formare una sezione. Non si confondano i due concetti anche se si sono unificati, a livello di interfaccia, perché abbiamo ritenuto che sarebbe stato più oneroso l'impiego operativo della differenziazione tra i due concetti.

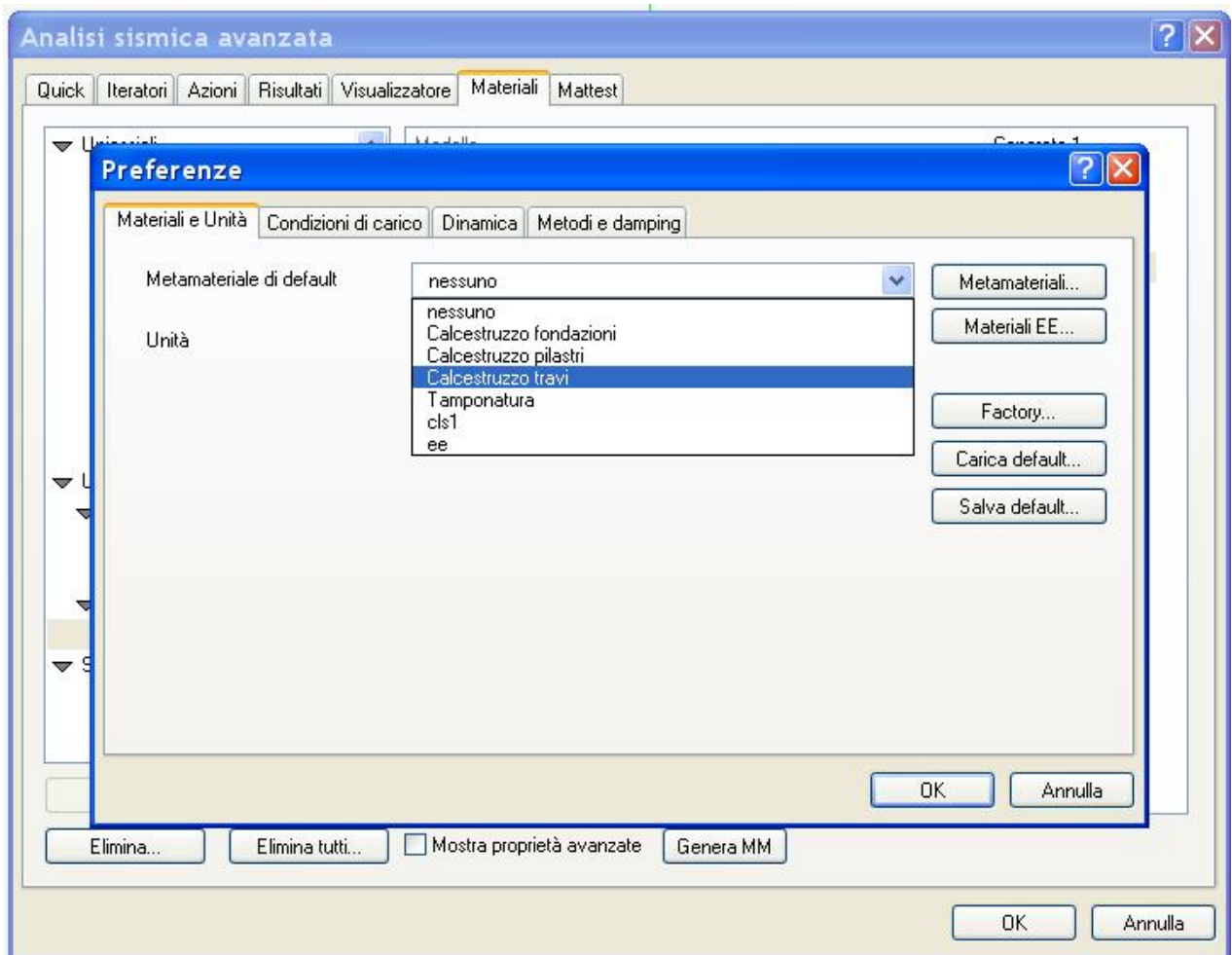
L'assegnazione dei materiali

I materiali possono essere generati tramite un apposito dialogo. Occorre selezionare la famiglia di materiali (a sinistra nel dialogo) e premere il bottone “Genera” e quindi, sul pannello a destra del dialogo, assegnare la caratteristiche numeriche che caratterizzano il modello. Questa operazione può avvenire anche dal dialogo dei tipi di elemento premendo il bottone Materiali EE... Il materiale selezionato in questa funzionalità è quello che sarà associato all'elemento. Il dialogo dei tipi di elementi consente l'accesso ai soli materiali associabili a tale elemento. Se occorresse generare altri materiali, non compatibili con l'elemento e quindi non visibili in questa modalità di accesso, occorre generarli e assemblarli nel dialogo dei materiali ad accesso diretto e quindi, composto in un materiale (o sezione) compatibile con l'elemento, accedere a esso dal dialogo dei tipi di elemento per associarlo all'elemento stesso.



Il bottone Duplica consente di duplicare un materiale già assegnato e selezionato nella lista di sinistra. Questa funzione è particolarmente utile per duplicare le sezioni da usare in stadi diversi del MultiStage alle quali assegnare materiali componenti diversi. Infatti, nel caso frequente di sezioni a fibre, le sezioni non possono variare per contorno o posizione delle armature, ma solo per le caratteristiche dell'acciaio e del calcestruzzo.

In questo dialogo, il bottone "Genera MM" consente di generare un metamateriale di tipo Generico con associato il materiale non lineare che si è appena generato. Tale metamateriale avrà i parametri lineari del materiale di default. Nel caso questo non sia stato assegnato, è sempre possibile, assegnare i valori mancanti in seguito, ma è più comodo avere un materiale di default per poter effettuare le assegnazioni più rapidamente. Se il materiale di default non è stato assegnato un dialogo ne dà avviso consentendo di assegnarlo in questa fase, come illustrato nella figura seguente.



Caratteristiche dei materiali

I materiali sono divisi in due categorie principali ognuna delle quali comprende alcune "famiglie" di materiali e ogni famiglia comprende tutti i materiali di quel tipo con differenti caratteristiche numeriche generati dall'utente. Però si è unificato, com si spiegherà meglio in seguito, il concetto di "sezione" con quello di materiale anche se i significati sono profondamente diversi. Questo per comodità di uso. Infatti si può assegnare a un elemento un'intera sezione già predefinita oltre che il materiale componente, come nei casi più semplici.

Le due categorie principali sono:

- I [materiali uniassiali](#)
- I [materiali n-dimensionali](#).

Materiali uniassiali

I materiali uniassiali hanno un modello che mette in relazione due sole grandezze una di deformazione generalizzata e una di forza generalizzata. Secondo i gradi di libertà cui sono applicate, tali grandezze possono essere forza-spostamento, tensione-deformazione, momento curvatura e così via. La relazione tra queste due grandezze resta valida. Si noti bene che un materiale uniassiale non contiene alcuna relazione con la sezione cui è associato. Vogliamo dire, a esempio, che assegnando a una sezione un materiale elastico uniassiale per la rotazione si assegna un legame momento-curvatura e non una rigidezza che consideri l'inerzia rotazionale della sezione.

Elastico

Materiale a comportamento lineare caratterizzato dal modulo di rigidezza tangente.

Elastico perfettamente plastico

Materiale con due limiti del campo di elasticità, in trazione e compressione, oltre i quali si comporta come un materiale perfettamente plastico. Si può assegnare una deformazione iniziale che di fatto sposta l'origine del legame costitutivo.

Questo materiale può essere a comportamento più complesso scegliendo la modalità "isteretico", illustrata qui di seguito.

Elastico perfettamente plastico con Gap

Essenzialmente come il precedente ma specializzato per modellare un gap iniziale per cui si ha un solo limite del campo plastico e il gap, inteso come deformazione iniziale, il quale deve avere lo stesso segno della forza che delimita il campo limite elastico.

No-tension

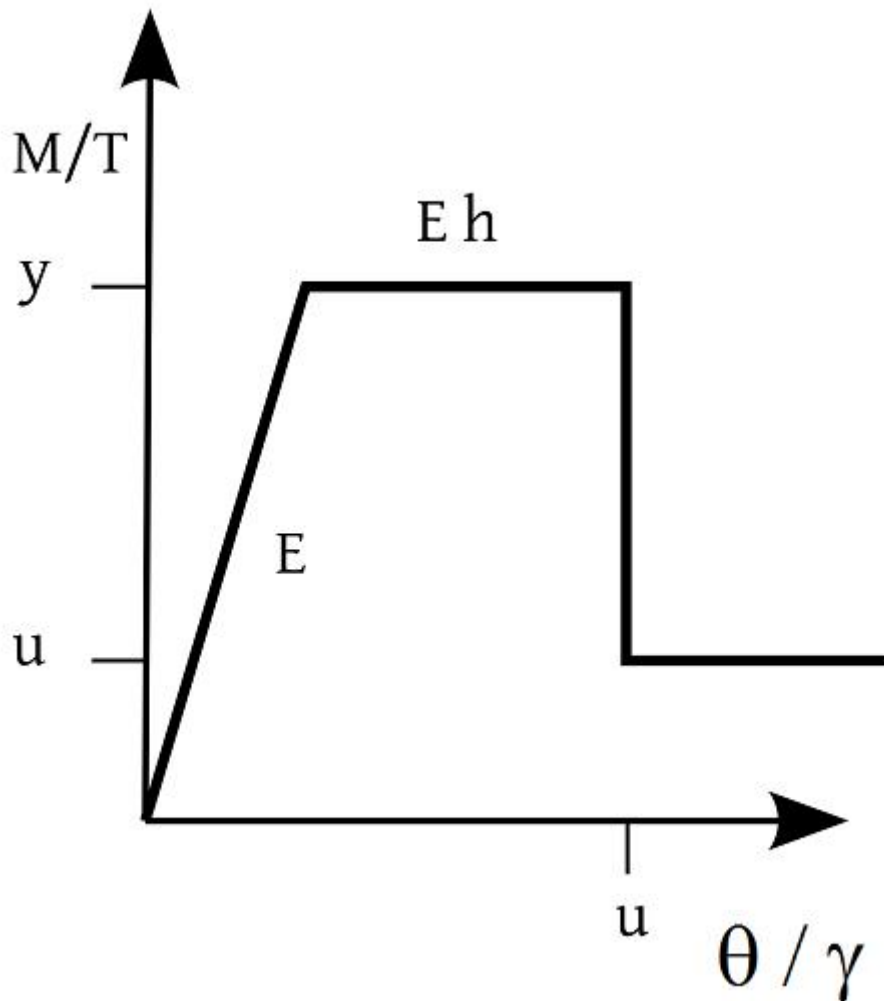
Questo materiale non ha rigidezza a trazione.

Materiale elasto-plastico con limite (isteretico)

Si tratta di un materiale la cui curva costitutiva si può definire tramite tre punti come per il materiale isteretico. Ma, a differenza di questo, i parametri che definiscono la curva tensione-deformazione sono di assegnazione più immediata. Si deve assegnare il modulo di elasticità iniziale, la tensione massima, l'hardening (inteso come moltiplicatore del modulo di elasticità iniziale da impiegarsi nel tratto post-snervamento), ed infine una deformazione massima oltre la quale la tensione scende al valore ultimo assegnato che può anche essere nullo.

A questo materiale si accede dal materiale elasto plastico scegliendo la modalità "isteretico":

La curva è cioè, qualitativamente, come nella figura seguente.



Questo materiale può essere impiegato in un aggregatore e quindi associato ad un elemento trave per modellare cerniere elasto-plastiche di estremità.

Per un più diretto uso in questo senso, si veda l'elemento [Trave con Cerniere](#).

Cavo

Materiale privo di rigidità a compressione. Può essere dotato di pretensione (da assegnarsi come tensione e non come forza), di peso proprio e di un fattore di riduzione della lunghezza. Quest'ultimo fattore può essere utile per impiegare cavi la cui lunghezza sul modello è ottenuta già per deformazione della lunghezza effettiva. Il peso proprio agisce come carico sulla fune in direzione -z ma è indispensabile, a livello di materiale, per la valutazione dello stato di "cavo in bando". Questo materiale non ha storia di carico.

Un elemento assegnato come Asta e dotato di pretensione, anche se non vi è assegnato il materiale "Cavo", impiega tale materiale automaticamente ma assume la lunghezza del cavo pari a quella del modello e non impiega il carico gravitazionale

Hardening

Materiale elasto plastico di rigidità E con incrudimento sia cinematico (H_{cin}) che isotropico (H_{iso}) con rigidità plastica (E_{plast}) data dalla relazione:

$$E_{plast} = E * (H_{iso} + H_{cin}) / (E + H_{iso} + H_{cin})$$

Nel caso in cui si disponga del fattore di incrudimento $b = E_{\text{plas}} t / E$, si può porre $H_{\text{cin}} = 0$ e si ha: $H_{\text{iso}} = E * b / (1.0 - b)$.

È possibile anche assegnare un coefficiente viscoplastico secondo il modello di Perzyna [Perzyna, P.: *Fundamental problems in viscoplasticity, Advances in Applied Mechanics, 9, 347-377, 1966*].

Viscoso

Materiale uniassiale il cui legame tra tensione σ e variazione di deformazione $\dot{\epsilon}_\sigma$ è governata dalla legge non lineare: $\sigma = C \epsilon_\sigma^\alpha$

con segno concorde con quello di $\dot{\epsilon}_\sigma$. E' anche possibile assegnare una rigidezza assiale che agisce in parallelo. Il valore α deve essere positivo.

Isteretico

Modello costitutivo di materiale isteretico uniassiale trilineare con "pinching" sia delle forze che delle deformazioni. Inoltre è possibile assegnare un parametro di danneggiamento in duttilità e uno in energia e infine un parametro di controllo esponenziale b . tale che si abbia $K_u = K_0 m^{-b}$, della degradazione della rigidezza nella fase di scarico basato sulla duttilità. La curva è definita da tre coppie di punti per il ramo in compressione e tre per il ramo in trazione. L'origine non deve essere inclusa.

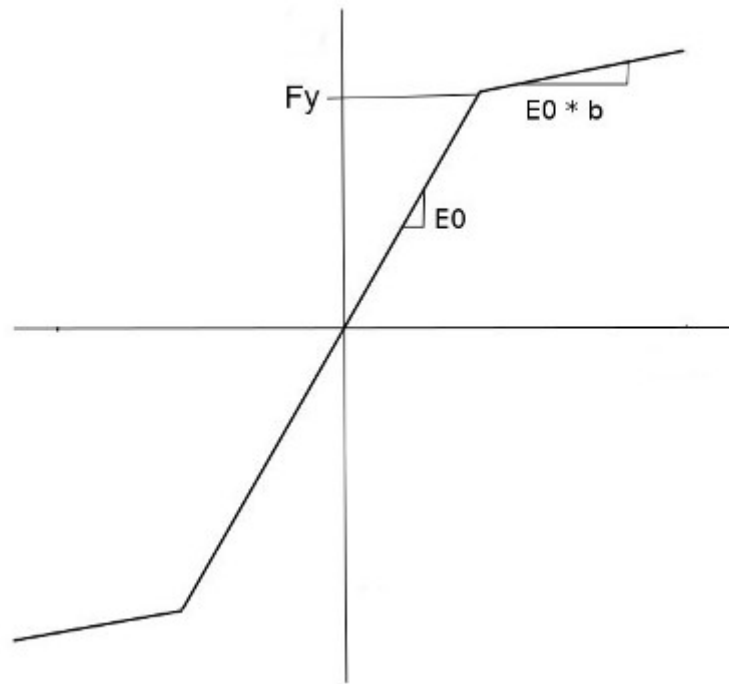
Unione serie

La legge costitutiva di questo materiale è formata dalla unione in serie di un massimo di quattro materiali uniassiali già preventivamente definiti.

Unione parallelo

La legge costitutiva di questo materiale è formata dalla unione in parallelo di un massimo di quattro materiali uniassiali già preventivamente definiti.

Acciaio



Materiale uniaxiale bilineare con indurimento cinematico.

Materiali uniaxiali specializzati per le sezioni in calcestruzzo

Sono materiali particolarmente studiati per l'impiego in una sezione a fibre per modellare travi e pilastri in calcestruzzo.

Armatura

Legge costitutiva di Pinto-Menegotto con incrudimento isotropico. È caratterizzata dai parametri: Modulo tangente iniziale, tensione di snervamento e modulo di hardening. Quest'ultimo va inteso come rapporto tra modulo dopo snervamento e modulo elastico iniziale. Il modello di Pinto-Menegotto è caratterizzato da molti altri parametri che però qui vengono assegnati come costanti e non sono modificabili per rendere più agevole l'uso di questo materiale. I valori assunti sono i seguenti.

Valori di transizione elastico-plastica:

$$r_0 = 15.0;$$

$$r_1 = 0.925;$$

$$r_2 = 0.15;$$

Scorrimento armatura

Materiale uniaxiale per modellare lo slittamento delle armature all'ancoraggio. Questo materiale è tipicamente impiegato all'estremità delle travi per descrivere sia lo scorrimento dell'ancoraggio che gli effetti dello scorrimento modellandoli come concentrati alle estremità di una trave a fibre. La sezione di estremità sarà cioè una sezione a fibre con assegnato l'acciaio di questo materiale.

Si adotta uno scorrimento S all'interfaccia della barra di diametro d sollecitata con tensione di rottura F_y , usando come unità mm e MPa dato dalla relazione:

$$S = 0.34 + ((d * F_y) / (3232 * \text{sqrt}(F_c)))^{**} 2.5$$

Calcestruzzo

Sono disponibili due leggi costitutive per il calcestruzzo:

- Quella dovuta a Kent e Park senza resistenza a trazione (qui denominata Concrete 1)
- Una legge analoga ma con resistenza a trazione (qui denominata Concrete 2)

Legge costitutiva di Kent-Park con diminuzione lineare di rigidità per carico-scarico. È caratterizzata dai parametri:

- Resistenza a compressione calcestruzzo
- Valori di armatura trasversale che contribuiscono all'aumento di resistenza del calcestruzzo per l'eventuale confinamento.

I valori relativi all'armatura trasversale consentono il calcolo della deformazione di crushing per calcestruzzo confinato. Se il calcestruzzo non è confinato questi valori vanno lasciati a zero. I valori, come di consueto, sono assegnati nelle unità di misura del modello. La deformazione corrispondente alla massima resistenza non è assegnabile, a livello di interfaccia, e è assunta -0.002.

Per Concrete 2 i valori della curva devono essere assegnati esplicitamente.

I valori di compressione sono positivi per entrambi i materiali, negativi se di trazione.

L'assegnazione riguarda l'area totale della staffa, se si hanno staffe a più braccia si deve assegnare l'area totale. Non è possibile assegnare aree diverse nelle due direzioni.

Modello	Concrete 2
Resistenza cubica calcestruzzo	4.00
Def. per massima resist. (+)	0.0030
Def. ultima (+)	0.0100
Resist. ultima (+)	0.8000
Resist. trazione (-)	-0.5600
Modulo trazione (-)	280.0000

Le sezioni

Le sezioni non sono, strettamente parlando, dei materiali ma, per motivi di unificazione delle assegnazioni, e quindi di facilità d'uso, sono trattate nello stesso modo dei modelli matematici dei materiali.

Contatto

Il piano di contatto è ortogonale all'asse locale x dell'elemento. La sezione ha un coefficiente di penalità (concettualmente assimilabile a una rigidità) nella direzione normale, tangenziale al piano di contatto e per le tre rotazioni. Inoltre ha un coefficiente di attrito e un valore di coesione relativi allo spostamento del punto di contatto sul piano. In caso questa sezione venga usata come sezione terminale, entrambe le sezioni terminali hanno lo stesso orientamento.

Contatto Beam

Questo materiale ha funzioni analoghe al precedente [Contatto](#) ma può essere impiegato esclusivamente per gli [elementi di contatto](#) tra elementi bidimensionali (tipicamente per modellare il suolo) ed elementi Beam. I valori da assegnare sono intuitivi.

Sezioni a fibre

Le sezioni a fibre consentono una assegnazione specializzata ad una sezione dotata del modello matematico della sezione a fibre. La suddivisione in tre modalità di assegnazione non indica l'accesso a differenti modelli matematici ma, in questo caso solo ad alcune diverse specializzate modalità di assegnazione. Si ricorda che la sezione a fibre è discretizzata in un numero qualsiasi di "celle" ognuna delle quali rappresenta la "sezione" di una fibra che percorre longitudinalmente la trave. Ogni fibra può essere costituita da un materiale uniassiale differente dando la possibilità di descrivere una sezione con la più svariata composizione di materiali. La sezione a fibre di calcestruzzo è molto affidabile e dedicata a travi e pilastri in calcestruzzo.

Sezioni a fibre calcestruzzo

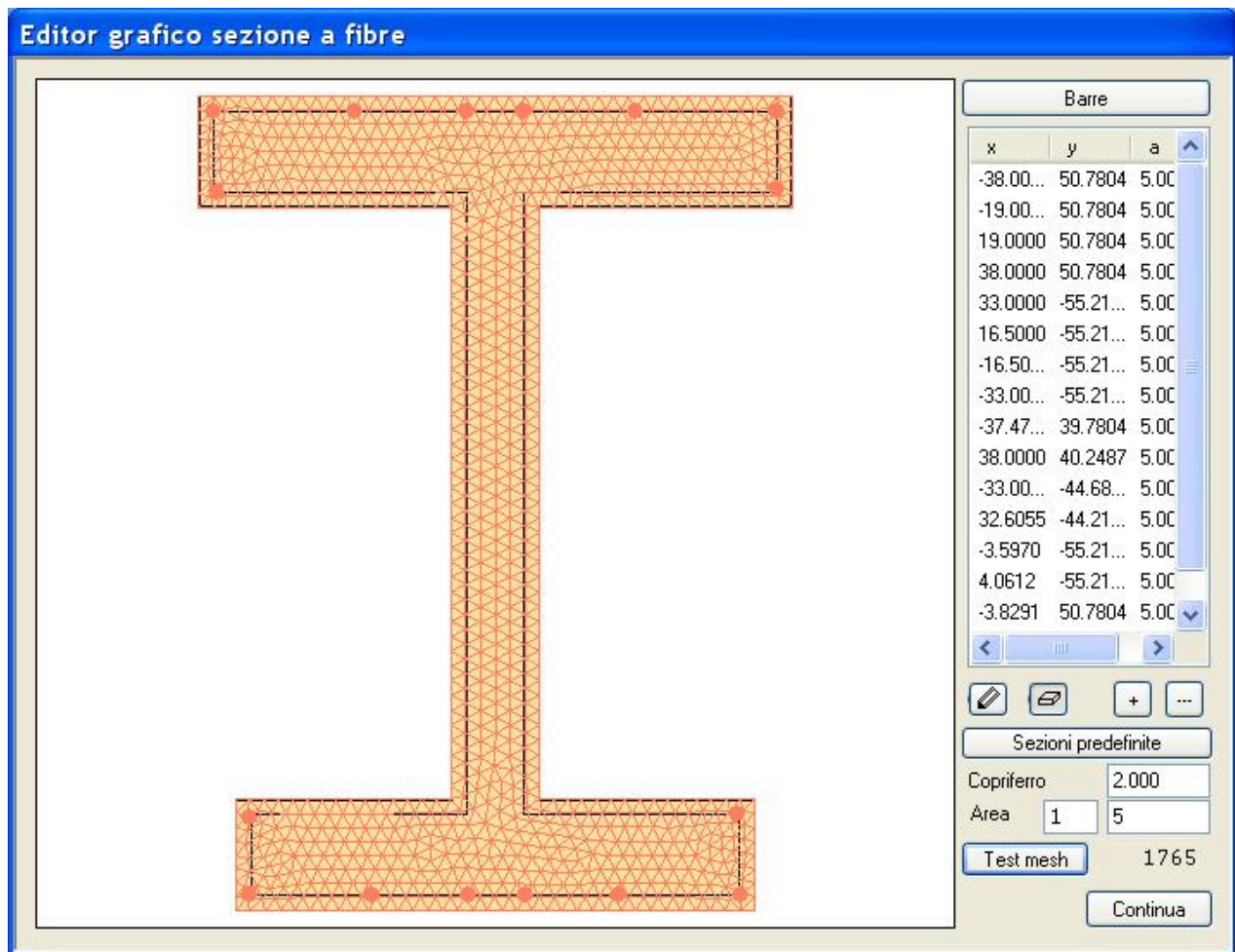
La "Sezione a fibre calcestruzzo" consente di definire in via rapida una sezione in calcestruzzo armato attraverso i materiali uniassiali componenti (calcestruzzo confinato, calcestruzzo non confinato e acciaio), che devono essere già stati preventivamente definiti. (vedi [Materiali uniassiali specializzati per le sezioni in calcestruzzo](#)). Inoltre vanno assegnati i rapporti di armatura (area acciaio/area sezione) superiore e inferiore (secondo l'asse locale Z), l'eventuale rapporto di armatura diffusa sui lati paralleli all'asse Z e infine la misura del copriferro intesa come distanza tra la faccia e l'asse della barra. La sezione a fibre viene automaticamente generata disponendo uno strato di armatura diffusa secondo i rapporti assegnati. La sezione deve essere rettangolare o a doppio T.

ATTENZIONE: nelle sezioni rettangolari per la fascia di spessore di copriferro vengono generate fibre con il calcestruzzo non confinato, nelle sezioni a T o doppio T viene usato solo il calcestruzzo confinato per tutta la sezione.

Sezioni a fibre omogeneo

Consente di definire una sezione a fibre costituita da un unico materiale. Saranno impiegate sempre 50 fibre su tutta la sezione che deve essere rettangolare o a doppio T.

Sezione a fibre per via grafica



Sezione a fibre definita per via grafica

Questo dialogo consente di assegnare una sezione del tipo "a fibre" tramite una efficace ed intuitiva interfaccia grafica. La sezione è definita da un poligono monoconnesso e pertanto si possono trattare sezioni poligonali del tutto generali, anche cave.

Questo dialogo è dedicato a sezioni in calcestruzzo e pertanto possono essere impiegati fino a 4 differenti materiali.

- Calcestruzzo confinato. Costituisce il nucleo della sezione racchiuso dalle staffe.
- Calcestruzzo non confinato. Costituisce il calcestruzzo di ricopimento del nucleo.
- Acciaio di armatura. È il materiale che sarà associato alle fibre di armatura.
- Materiale delle fasce. Con fasce si intendono ricoprimenti dei lati della sezione che sono tipicamente incamiciature in acciaio o FRP.
- Acciaio per cavi di precompressione

Se non si assegna il calcestruzzo non confinato, verrà usato il calcestruzzo confinato per l'intera sezione.

Il materiale delle fasce può essere qualsiasi materiale uniassiale, mentre per il calcestruzzo e le armature i menu presentano

solo materiali specifici.

Nel caso di incamiciatura in acciaio si può usare il materiale Steel, nel caso di rinforzi FRP si può impiegare un materiale hardening per modellare una bilatera discendente come la normativa prevede considerando la resistenza da delaminazione. In questo caso, se si ha una fasciatura, si può tenere conto del confinamento assegnando al calcestruzzo la deformazione limite relativa, anche qui dettata da normativa.

Si accede alla gestione grafica della sezione tramite il bottone Modifica solo se si è assegnato almeno il calcestruzzo confinato.

Nel dialogo successivo la possibilità di editare barre, fasce o copriferro non è abilitata se non si sono assegnati i rispettivi materiali.

Benché questo dialogo sia dedicato alle sezioni in calcestruzzo, è naturalmente possibile impiegarlo per generare sezioni anche di altri materiali.

L'interfaccia di questa funzione si basa sulla interazione tra due controlli: quello grafico basato sul disegno della sezione e quello a lista sulla destra.

Attivando, tramite il bottone posto sopra lista, "Contorno", "Barre" o "Fasce", oltre a visualizzare le differenti liste, si attiveranno le operazioni grafiche sul contorno, sulle barre o sulle fasce.

Le operazioni grafiche sono gestite dai due bottoni ad icona con l'immagine di una matita (disegna) e di una gomma (cancella) posti sotto la lista a sinistra.

Se è attivo il bottone di disegno si può:

per le barre:

- posizionare una barra nella posizione voluta con l'area assegnata nel dialogo
- posizionare una o più barre "snappando" sul contorno di copriferro
- selezionare un barra per evidenziare la riga della tabella ed eventualmente modificarla

Il contorno di copriferro è tracciato alla distanza assegnata ed ha solo lo scopo di facilitare l'assegnazione grafica.

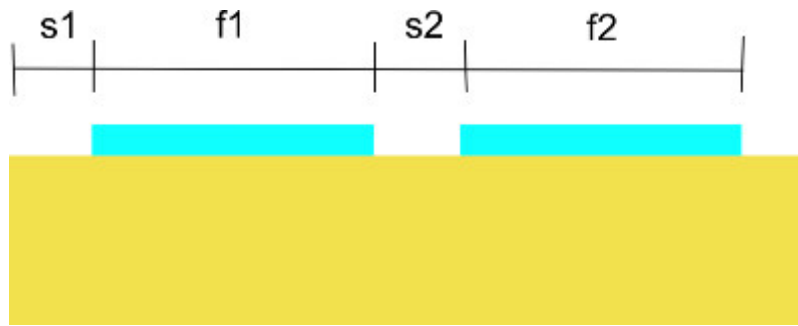
Per i bordi:

- selezionare un vertice per evidenziare la riga della tabella ed eventualmente modificarla
- selezionare un lato per assegnare la fascia sul bordo che assumerà lo spessore di copriferro assegnato

Per le fasce:

le fasce possono essere assegnate graficamente, cliccando sul lato della sezione, oppure inserendo i valori nella tabella. La tabella ha tante righe quanti sono i lati della sezione con valori inizialmente nulli. Assegnando lo spessore come quinto valore, nella colonna designata tk, si attiva la fascia del lato corrispondente alla riga della tabella.

Si hanno 4 valori che corrispondono come nello schema seguente, oltre al quinto che indica lo spessore



Pertanto si possono avere uno o due fasce per ogni lato intervallate come si desidera. Lo spessore è comune alle due fasce. Per cancellare la fascia si può selezionare l'icona della gomma e cliccare il lato oppure mettere a zero lo spessore. Nella figura seguente un esempio di assegnazione di fasce d'angolo.

Editor grafico sezione a fibre

s0	l0	s1	f1	Ik
0.0000	12.0000	6.0000	12.0000	2.000
0.0000	12.0000	6.0000	12.0000	2.000
0.0000	12.0000	6.0000	12.0000	2.000
0.0000	12.0000	6.0000	12.0000	2.000

Coprifino: 2.000
 Spessore: 2.000
 Test mesh: 0
 Continua

Se invece è attiva l'icona di cancellazione:

per le barre, cliccando su una barra se ne otterrà la cancellazione. Per le fasce, cliccando su un lato si otterrà la cancellazione della fascia

Oltre alle operazioni grafiche si potrà agire sulle tabelle: ogni modifica delle tabelle sarà riflessa sulla grafica.

Si potranno aggiungere vertici o barre. Se una riga è selezionata l'inserimento avverrà DOPO la riga selezionata e questo, nel caso del contorno, consente di aggiungere vertici nella sequenza voluta. Il poligono di contorno DEVE essere definito in senso orario e non può essere intrecciato pena una cattiva suddivisione in fibre.

L'aggiunta di vertici consente di generare qualsiasi sezione poligonale.

Nella lista dei contorni, la terza colonna riporta lo spessore della fascia, il cui valore può ovviamente essere modificato. Nella lista delle barre invece la terza colonna rappresenta l'area della barra.

Sezioni predefinite Il bottone "Predefinite" consente di accedere ad un dialogo per la generazione parametrica delle più comuni sezioni: rettangolare a doppio T, poligonale regolare. Se si genera una sezione con questo dialogo, verranno cancellati i dati eventualmente precedentemente assegnati.

Acquisire le sezioni degli elementi Qualora si voglia importare la sezione da elementi ai quali sia stata già assegnata, accedere alla funzione "Sezioni predefinite", selezionare il tipo di sezione che può essere:

- Rettangolare
- a T o doppio T
- Poligonale

Quindi cliccare sull'elemento la cui sezione si vuole importare. Nel caso di sezioni rettangolare o a doppio T, i dati geometrici della sezione verranno importati nel dialogo e, alla chiusura, trasferiti alla sezione del dialogo principale. Nel caso della sezione poligonale, verranno trasferiti direttamente e si potrà chiudere il dialogo della sezione predefinita poligonale per tornare al dialogo principale.

La suddivisione della sezione in fibre è effettuata tramite un algoritmo di triangolarizzazione frontale molto sofisticato. Le dimensioni delle fibre sono assegnate nei parametri del materiale. Una dimensione piccola appesantisce il calcolo, una troppo grezza può portare a risultati inaccurati o a difficoltà di convergenza. Si è notato che circa 20 fibre per lato danno un accettabile comportamento.

Per visualizzare la suddivisione, attivare il bottone "Test mesh". Verrà rappresentata la suddivisione in aree triangolari e sarà riportato il numero di fibre impiegato. Si sconsiglia, in casi normali, di non superare le 400 fibre per sezione per non appesantire troppo l'elaborazione.

La precompressione

Selezionando tramite il bottone sulla destra "Precompresso" si potranno assegnare i cavi di precompressione come si agisce per le barre di armatura. Il materiale per i cavi può essere solo il Cable unidimensionale. I cavi si assegnano come le barre, cliccando nel punto voluto o su un lato per distribuire il numero di cavi assegnato, lungo il lato. La precompressione eventualmente assegnata al materiale Cable non viene considerata e verrà impiegata quella assegnata ai singoli cavi nella gestione grafica della sezione (positiva se di trazione).

Dopo aver posizionato il cavo nella sezione, occorre assegnare la tensione di precompressione. Si sottolinea che il valore assegnato è una tensione e non la forza assegnata al cavo.

Il valore positivo è un valore di precompressione. La precompressione agisce secondo i passi di carico dell'analisi.

In questo modo si ha una precompressione ove l'azione della precompressione agisce su tutta la struttura, non solo sull'elemento precompresso.

Se la precompressione viene applicata su elementi già inseriti nella struttura, come detto, la tensione assegnata si trasferisce inopportuno anche sugli altri elementi. In questo caso è possibile agire in due passi usando la analisi Multistage e assegnando per la prima fase dei rilasci interni dei vincoli dell'elemento precompresso in modo che le azioni di precompressione non agiscano sugli elementi connessi e solo nella seconda fase si rimuovono gli svincoli e si assegnano i carichi. Si deve fare attenzione a che l'elemento precompresso non venga svincolato in modo tale che la struttura risulti labile.

Aggregatore di sezione

L'aggregatore di sezione consente di assegnare un materiale uniassiale a ognuno dei sei gradi di libertà della sezione di una trave. La sezione così ottenuta si potrà assegnare a un elemento Boundary, a un elemento Trave nel suo complesso o come sezioni terminali di un elemento Trave per modellare una plasticizzazione concentrata. In quest'ultimo impiego, si ricorda la possibilità di usare questa "sezione" per modellare cerniere elasto-plastiche di estremità.

Trave con Cerniere agli estremi

La denominazione è riduttiva anche se di uso corrente in quanto le sezioni di estremità possono essere di qualsiasi materiale e non soltanto delle cerniere. E anche qui si nota che non si tratta strettamente di un materiale ma di una caratteristica dell'intera trave. L'assegnazione avviene definendo un materiale per la trave stessa e due materiali per le estremità. Questo "materiale" per essere il più generale possibile ha una serie di possibilità governate dalle assegnazioni. Se il materiale della trave non è assegnato, per default il materiale è scelto elastico lineare con le caratteristiche del tipo di elemento e viene generata una trave elastica con le opportune rigidità. Si noti che se si assegna invece un materiale elastico (o di altro tipo), a gradi di libertà vengono assegnati i legami momento curvatura o forza-spostamento propri di quel materiale senza considerare ovviamente le caratteristiche inerziali della sezione che, con materiali non lineari non avrebbe senso. Se le sezioni terminali non sono assegnate viene a esse esteso il materiale della trave. Si noti bene che quella di assegnare alla trave, o alle sezioni terminali, un materiale nullo è una convenzione molto particolare e atipica, anche se comoda, che non deve generare confusione sull'assegnazione invece standard. Le tipiche sezioni di estremità sono sezioni ottenute per aggregazione (vedi), sezioni a fibre, comprese le sezioni a fibre costituite con armatura con scorrimento per modellare lo scorrimento degli ancoraggi. Se si assegna la lunghezza delle cerniere plastiche terminali, l'integrazione avviene con metodo numerico specifico che tiene opportunamente conto di questi concetti terminali. Se invece si assegna una lunghezza nulla, vengono associati agli estremi della trave degli elementi di lunghezza nulla con le caratteristiche indicate. Eventuali cerniere complete si assegnano (per ogni grado di libertà) come vincoli interni dell'elemento. In questo caso le cerniere però non possono avere delle leggi momento-curvatura come è possibile invece con questo materiale.

Si mette in guardia dall'usare questo metodo per "suddividere" un elemento più lungo, ad esempio con l'intenzione di modellare l'aumento di armatura agli estremi di una trave a fibre. Infatti in questo uso errato si avrebbero agli estremi soltanto delle cerniere elasto-plastiche con il comportamento di una singola sezione a fibre.

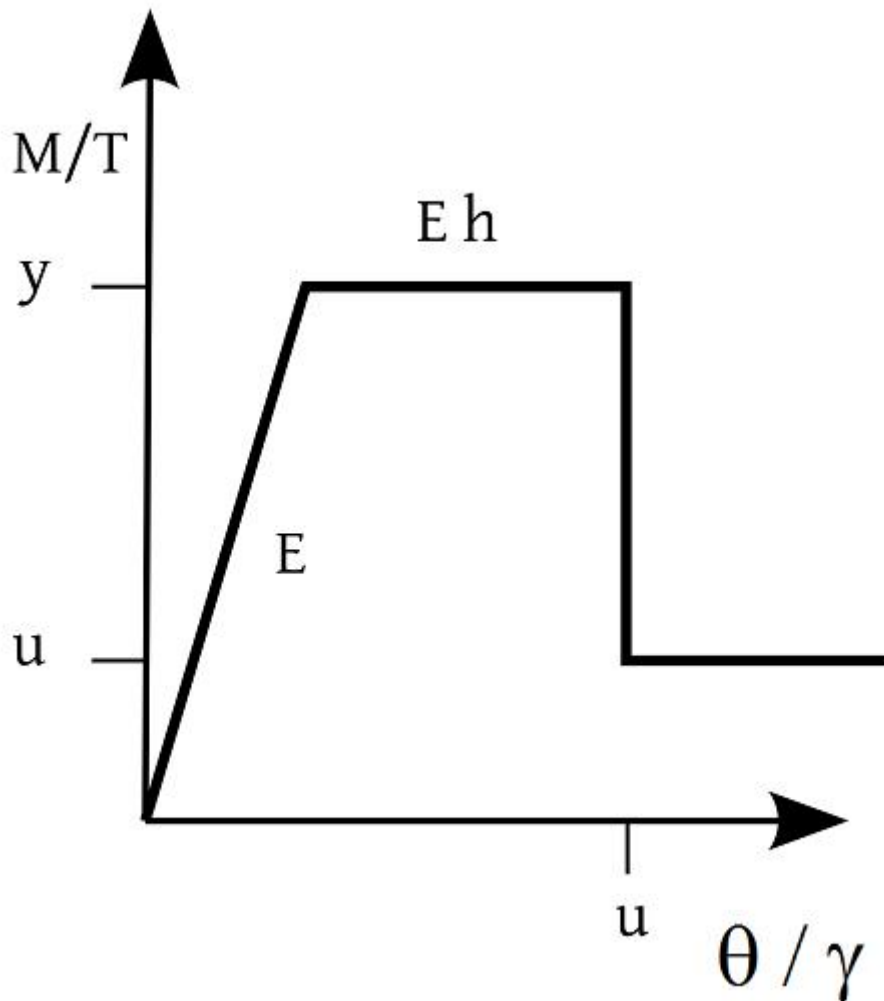
Attenzione. Una estremità dotata di cerniera non può essere connessa ad un elemento rigido.

Suggerimenti pratici sull'impiego delle cerniere di estremità

E' possibile assegnare delle cerniere modellate con materiali a diverso comportamento. Ciò è possibile in vari modi. Il metodo più generale è il seguente.

Si definisce il materiale che compone la cerniera, generalmente [elastico-perfettamente plastico o isteretico](#). Si genera il materiale uniassiale assegnando i valori voluti.

Nella figura seguente il comportamento isteretico che si può assegnare al materiale elasto-plastico.



E' opportuno notare che la rigidezza di una cerniera rotazionale non va confusa con il modulo elastico del materiale che forma l'elemento.

Infatti la relazione, nel caso della flessione, è $1/r = M / EJ$ e pertanto la rigidezza della trave è EJ e non E . E' un errore frequente che fa sì che si abbia nella cerniera una rigidezza molto bassa che costituisce pressoché una cerniera libera.

Definiti i materiali che caratterizzano il comportamento delle cerniere, occorre assemblarle secondo i gradi di libertà di competenza, per far ciò si usa il materiale [Aggregatore](#) che consente di aggregare in un unico materiale i materiali assegnati ad ogni grado di libertà. Se per alcuni gradi di libertà non si desidera un comportamento elasto-plastico, si può generare un materiale elastico ed assegnarlo ai gradi di libertà voluti. Anche in questo caso occorre ricordare che il materiale elastico è caratterizzato da una rigidezza e non da un modulo di elasticità. Valori elevati di rigidezza costituiscono una continuità di tipo rigido. Se però i valori sono troppo elevati si può avere un mal condizionamento della matrice e quindi dei problemi di convergenza.

Una volta generato il materiale aggregato, lo si può associare alle estremità di un elemento monodimensionale tramite l'impiego del pseudo-materiale Estremi trave. Questo materiale non è a rigore un materiale ma viene gestito come i materiali e cioè può essere associato ad un elemento e pertanto viene gestito come i materiali. Questo pseudo-materiale accetta due materiali Aggregatore, uno per ciascun estremo.

Se vi è una cerniera in un solo estremo, è sufficiente non assegnare il materiale.

Questo pseudo-materiale (Estremi trave) ha una caratteristica interessante che occorre conoscere. E' infatti possibile assegnare la lunghezza della cerniera. Si hanno due differenti modelli secondo tale lunghezza sia nulla o diversa da zero. Se è nulla, verrà realizzato un modello con due elementi di lunghezza nulla agli estremi dell'elemento, dotati della caratteristiche associate al materiale aggregatore. Se invece la lunghezza è non nulla, verrà generato un elemento dotato di 12 sezioni

formate con il materiale dell'elemento e due sezioni di estremità della lunghezza assegnata e con le caratteristiche assegnate all'aggregatore. Questo tipo di elemento viene risolto per integrazione numerica secondo Lobatto sulle sezioni componenti.

E' possibile assegnare un valore molto piccolo alla lunghezza per avere cerniere puntiformi con l'integrazione per sezioni. Si noti che il comportamento dei due modelli non conduce a risultati identici perché i modelli sono sensibilmente diversi.

Come ulteriori suggerimenti, si desidera ricordare che quando si associa una cerniera di rigidezza K_r alla estremità di una trave di rigidezza K_t si hanno due rigidezze in serie per cui la rigidezza risultante K_s è: $1/K_s = 1/K_r + 1/K_t$. Se si desidera determinare una rigidezza della cerniera tale che la rigidezza delle due molle in serie sia la stessa della trave, non si può fare altro che porre $K_r = \infty$. La cerniera sarà posta, ad esempio, ad un estremo incastrato, un valore alto della rigidezza della cerniera assicurerà il mantenimento della rotazione impedita.

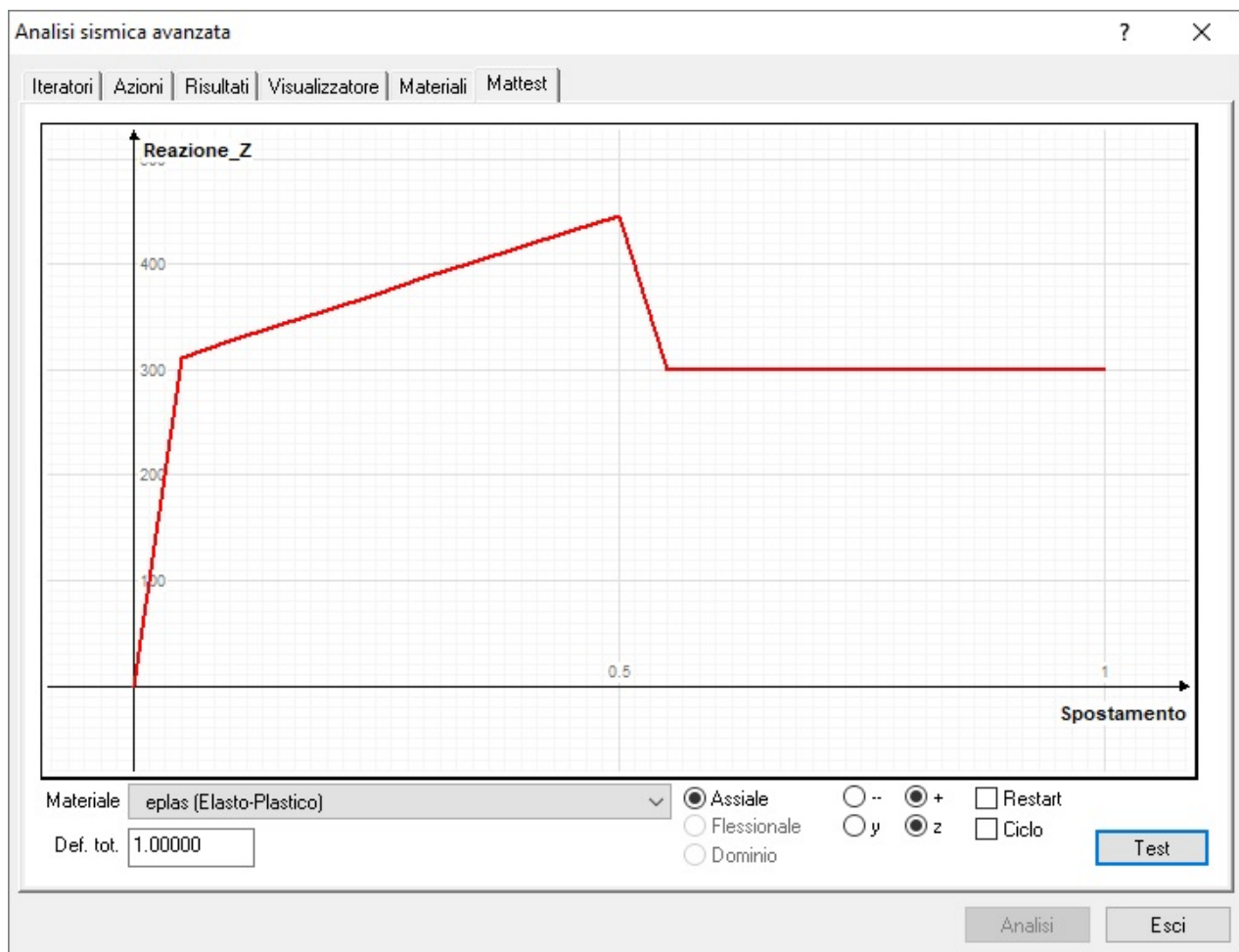
Va notato che se si usano valori alti è possibile generare nella matrice di rigidezza degli squilibri numerici, cosa alla quale spesso non si pone attenzione, per cui il risultato sarà denunciato da una mancata convergenza.

E' facile fare delle prove per impadronirsi dei meccanismi legati all'uso delle cerniere. Uno, semplicissimo è quello di usare una trave incastrata agli estremi, con un nodo centrale per misurare gli spostamenti, ed assegnare diversi valori alle cerniere di estremità per vedere come variano i momenti di estremità e la deflessione. Assegnando valori molto alti il risultato sarà lo stesso di quello che si ottiene con l'analisi di una trave senza cerniere. E' infatti opportuno avere questi valori di confronto facendo una semplice analisi statica allo stesso modello.

Sull'uso dell'aggregatore, è opportuno ricordare che l'assegnazione di "Nessuno", cioè di nessun materiale, non vuol dire che si stabilisca una continuità priva di cerniera, ma che la cerniera per quel grado di libertà è libera e quindi, se ciò non è voluto, si potrà incorrere in una labilità denunciata da una mancata convergenza. Per gli amanti della precisione, sulla valutazione delle deflessioni, occorre fare caso alla differenza tra modelli con deformabilità a la taglio e senza di essa.

Se si usa un materiale elasto-plastico, l'uso più comune di una cerniera, si dovrà assegnare una rigidezza tale da rispettare, se richiesto, il punto di momento-curvatura di snervamento. Se ciò non è necessario, sarà sufficiente assegnare il momento di snervamento ed una rigidezza elevata qualsiasi. Se la rigidezza è bassa, e non si raggiunge il punto di snervamento, ovviamente la trave si comporterà come avesse un vincolo elastico, fare attenzione a non incorrere senza volerlo in questa possibilità

Se si hanno dei dubbi sulle assegnazioni relative ad un materiale, si può usare il MatTest. Qui di seguito un materiale elasto-plastico isteretico visionato con il MatTest.



Un altro pseudo materiale che è propriamente un macro elemento, consente di effettuare tutte queste operazioni con una sola assegnazione, si tratta del macro elemento [Trave con cerniere](#). Questo macro elemento consente di assegnare un comportamento elastico-plastico come visto precedentemente per la rotazione e per il taglio assegnano però direttamente i valori come già illustrato, senza dover effettuare le aggregazioni passo per passo.

Questo ultimo elemento è più diretto nella gestione, il procedimento prima descritto consente invece la massima flessibilità. L'elemento Trave con cerniere consente di assegnare una cerniera che può essere impiegata per modellare elementi murari con la tecnica del telaio equivalente. Questa possibilità è descritta nel paragrafo [Trave con cerniere](#).

Materiali n-dimensionali

Si tratta di modelli di materiali per i quali lo stato deformativo e tensionale non può essere descritto disaccoppiando i comportamenti per ogni direzione e quindi il comportamento coinvolge gli stati in più dimensioni.

Elastico

Materiale elastico caratterizzato dal modulo di elasticità e dal coefficiente di Poisson.

Elasto-plastico Drucker-Prager

Oltre al modulo elastico volumetrico e al coefficiente di Poisson occorre assegnare la Resistenza frizionale.

Il comportamento è elasto-plastico isotropico e si potrà avere una evoluzione scalare dell'hardening lineare. In questo caso occorre anche assegnare i parametri di softning e di hardening

La funzione di snervamento di Drucker-Prager è data da:

$$f = a I_1 + (0.5 (s_{ij} - p_{a,ij})(s_{ij} - p_{a,ij}))^{0.5} - k = 0.$$

In caso si disponga dell'angolo di attrito ϕ e della coesione c , si ricordano le formule seguenti:

$$\text{Tensione di snervamento} = 6 c \cos(\phi) / 3^{0.5} (3 - \sin(\phi))$$

$$\text{Resistenza frizionale} = 2 \sin(\phi) / 3^{0.5} (3 - \sin(\phi))$$

Elasto-Plastico J2

Questo materiale si basa sulla teoria classica della plasticità J2. J2, si ricorda, indica la componente deviatorica del tensore d sforzo per cui il criterio risulta semplicemente $J2 - k^2 = 0$ dove k è la tensione di plasticizzazione. La tensione di plasticizzazione è a meno della tensione di plasticizzazione all'infinito, o di saturazione. Questo materiale ha anche due funzioni di incrudimento. Una esponenziale, governata dal parametro d , e una lineare governata dal parametro h le quali possono anche agire contemporaneamente nella forma: $q(s) = s_0 + (s_\infty - s_0) * e^{(-d*s)} + h*s$. Questo materiale è particolarmente studiato per l'elemento a 4 nodi a deformazione piana per problemi di geotecnica.

No-tension

Si tratta di un materiale che può essere impiegato nell'elemento DegenerateShell o in un elemento a 4 nodi.

Nel primo caso potrà costituire i layer dell'elemento (vedi), nel secondo avrà un comportamento "sforzo piano" per le sollecitazioni nel piano.

Sempre nel secondo caso l'elemento avrà comportamento elastico per sollecitazioni fuori del piano con caratteristiche meccaniche dell'elemento assegnato in Nòlian e quindi non associato ad un materiale EE.

Questo materiale, per le sollecitazioni a trazione, usa un modello "smeared crack" il quale evita i problemi di dipendenza dalla mesh dei metodi "concentrated crack". Qualora in un punto di Gauss si sviluppi una trazione superiore a quella massima assegnata, 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 vi sia una doppia fessura ortogonale, 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, da quello numerico favorisce il riequilibrarsi della matrice di rigidezza dopo il venir meno della resistenza in un punto.

Per lo stato di compressione si impiega un criterio elasto-plastico di tipo isotropo o anisotropo.

Nel caso del comportamento isotropo il criterio plastico in compressione è formulato tramite i noti invarianti I_1 e J_2 come segue:

$$\beta \sqrt{3 J_2} + \alpha I_1 = \sigma_0.$$

I Parametri α e β sono introdotti per correlare la resistenza monoassiale, che caratterizza usualmente il materiale, alla resistenza biassiale assumendo un rapporto pari ad 1.6 tra di esse.

Il comportamento del materiale avviene secondo una legge costitutiva parabolica che raggiunge il massimo al raggiungimento della deformazione massima assegnata.

Nel caso di materiale anisotropo invece il criterio plastico è quello di von Mises.

Questo criterio non è il migliore per materiali fragili ma ha il vantaggio di essere numericamente molto robusto.

Le caratteristiche anisotropiche del materiale si possono anche assegnare, per la muratura, tramite omogeneizzazione delle caratteristiche dei componenti, malta e mattoni rendendo più accurata l'assegnazione e consentendo di migliorare il fattore di confidenza. L'omogeneizzazione avviene tramite il tensore di Eshelby secondo la relazione:

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

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

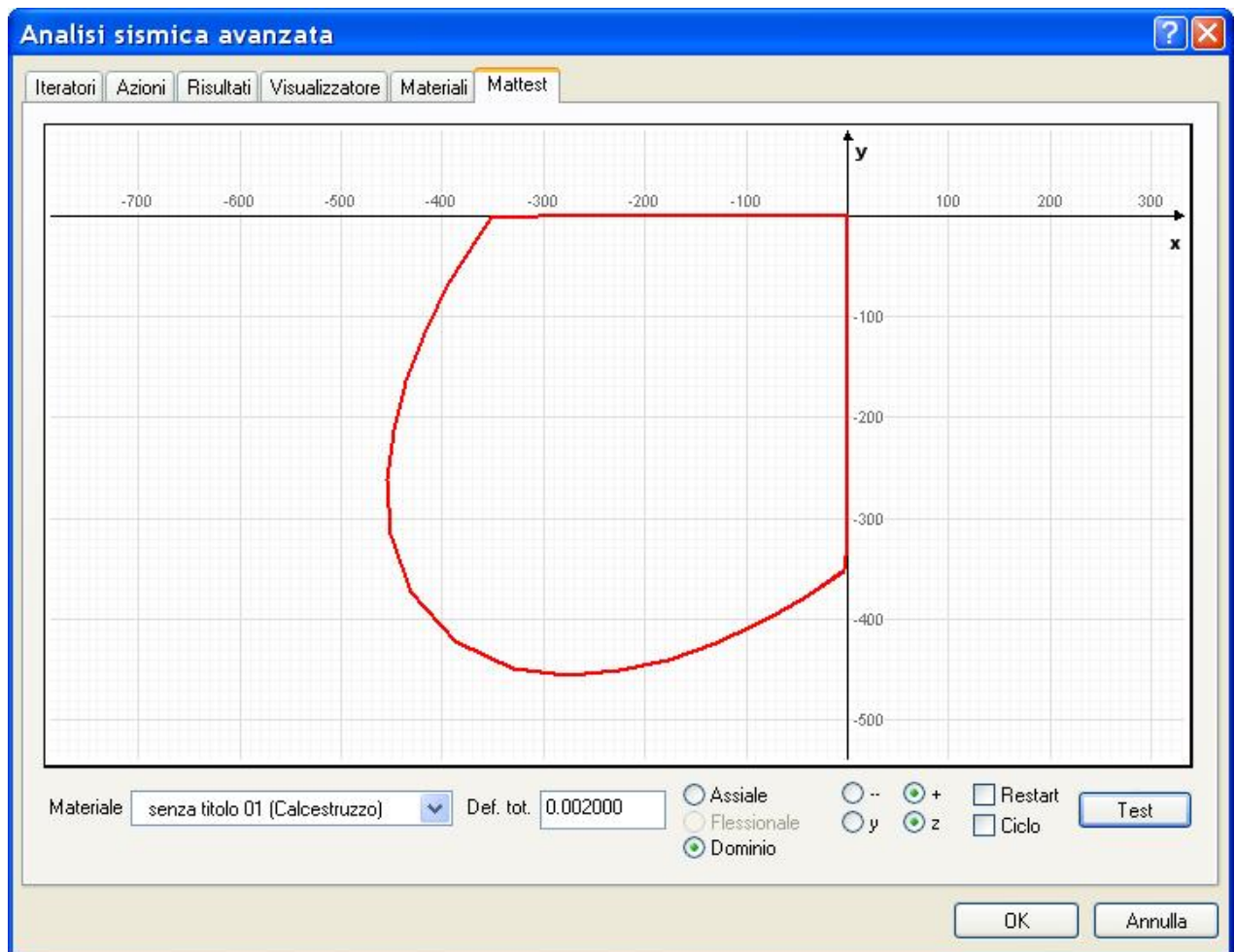
Dove C è la matrice costitutiva, S il tensore di Eshelby, gli indici M ed ω indicano rispettivamente la matrice e gli inserti.

Se i valori sono assegnati come muratura, essi vengono convertiti nei valori del materiale anisotropo ad esso assegnati. Si possono pertanto controllare ed eventualmente modificare.

E' possibile anche assegnare l'angolo di anisotropia rispetto all'asse locale x .

E' inoltre possibile assegnare un valore di tensione tangenziale limite. Questo valore non contribuisce allo stato plastico del materiale ma viene esclusivamente impiegato per le verifiche richieste per la determinazione dagli stati critici.

Per la versione isotropa di questo materiale si possono assegnare ulteriori parametri che caratterizzano il comportamento del materiale. Tali parametri sono definiti "Avanzati" in quanto non strettamente necessari nell'uso più comune. Ad essi si accede attivando il check-box "Avanzati". Questi parametri sono descritti nella [Appendice](#) di questo manuale.



Sezione della superficie di snervamento del materiale nell'ambiente [Matteest](#).

Materiali per Shell 8 nodi a layer

Questi materiali possono esclusivamente essere impiegati nell'elemento Shell 8 nodi a layer. Ogni materiale può essere assegnato ad un diverso layer dell'elemento. L'utilizzo di questi materiali avviene nella assegnazione delle Sezioni per Shell a Layer.

Elastico

Il materiale elastico può essere isotropo o anisotropo. In caso di isotropia, è sufficiente assegnare il modulo di elasticità (E1) il coefficiente di Poisson (V12). In caso invece di anisotropia devono essere assegnati i 6 coefficienti che caratterizzano il comportamento anisotropo.

Elastoplastico

Si tratta di un materiale elasto-plastico secondo il criterio di Huber-von Mises a comportamento isotropo o anisotropo. Se isotropo, devono essere assegnati, oltre a coefficienti elastici, la tensione di snervamento e il modulo di hardening. Se il materiale è anisotropo, devono essere assegnati i 6 coefficienti elastici e i 6 corrispondenti valori di snervamento.

Armatura

Le armature sono considerate come strati di acciaio di spessore equivalente. Ogni strato ha comportamento uniassiale per resistenza assiale nella direzione delle barre. Una funzione bilineare è impiegata per descrivere la relazione elasto-plastica di tensione-deformazione. Qualora si indichi un rapporto di armatura ortogonale, verranno modellati due layer coincidenti di armature tra loro ortogonali. Il rapporto indica la quantità di armatura nella direzione ortogonale a quella di riferimento. A esempio, un rapporto unitario indica che le quantità di armatura sono eguale in entrambe le direzioni.

Calcestruzzo

Il comportamento in compressione del calcestruzzo è modellato tramite una elasto-plasticità perfetta insieme ad un approccio di incrudimento deformativo. Si è adottato un doppio criterio per la rottura e per lo snervamento in termini sia di sforzo che di deformazione. Tale criterio è completato da un cut-off delle tensioni. Il modello adottato è ampiamente illustrato in: E. Hinton, D.R.J. Owen; "*Finite Element Software for Plate e Shell*". Pineridge Press, Swansea, 1984.

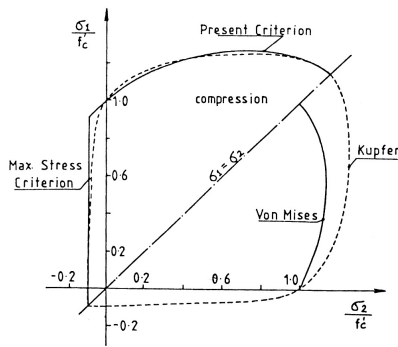


Fig. 2 One-dimensional representation of the concrete constitutive model.

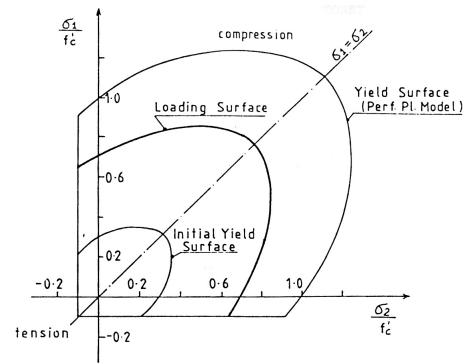


Fig. 3 Two-dimensional stress space representation of the concrete constitutive model.

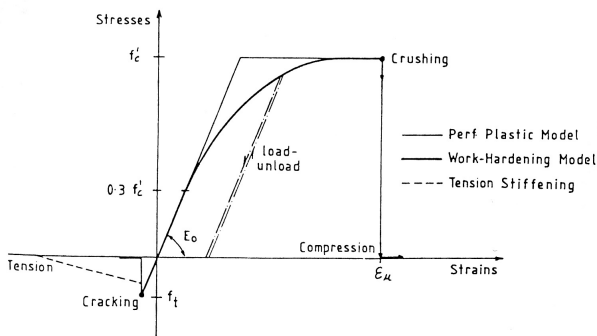


Fig. 4 Loading and unloading behaviour of cracked concrete illustrating tension stiffening behaviour.

Alcune immagini che illustrano il modello costitutivo del calcestruzzo, tratte dal volume citato.

Sezioni per Shell 8 nodi a layer

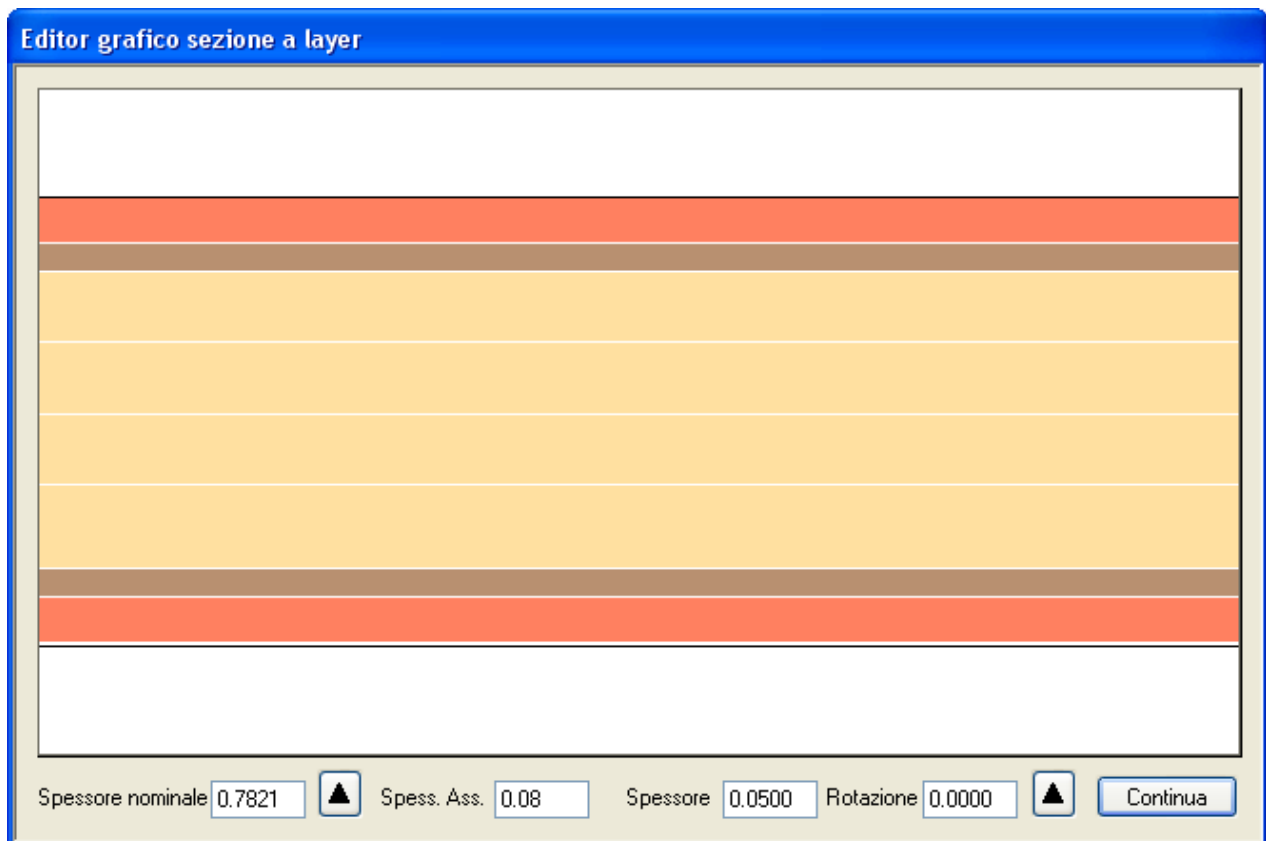
Omogenea

Il materiale è omogeneo. Occorre selezionare il tipo di materiale voluto che deve essere stato prima definito tra i materiali per Shell a 8 nodi (altri materiali non sono gestiti anche se accettati a livello di interfaccia). Se il materiale è anisotropo, occorre indicare la direzione di definizione rispetto al sistema di riferimento locale. È possibile assegnare il numero di layer. Si ricorda che maggiore è il numero di layer maggiore sarà l'impegno di calcolo.

Calcestruzzo

Questa sezione prevede due layer di armatura, uno superiore e uno inferiore, e il materiale componente può essere solo il calcestruzzo. Questi materiali devono essere stati predefiniti tra i materiali specifici per l'elemento a 8 nodi a layer. Altri materiali, anche se fossero accettati a livello di interfaccia, non sono gestiti. L'armatura, si ricorda, può essere anche stata definita come due layer coincidenti in direzioni tra loro ortogonali. Per ogni lato di armatura va indicata la direzione nel riferimento locale, la distanza dalla faccia dell'elemento al piano medio dello strato di armatura e la quantità di armatura intesa come spessore del layer. Si ricorda che lo spessore si ottiene dividendo l'area di una barra per la distanza tra le barre. A esempio, un $\varnothing 16/20$ cm corrisponde a uno strato di spessore equivalente di $2.01/20 = 0.1$ cm.

Gestione grafica (Sezione layer)



Gestione grafica della sezione di elemento 8 nodi a layer

Questa funzione di interfaccia consente di definire graficamente i layer di una sezione. I layer possono essere costituiti fino a tre materiali diversi, preventivamente assegnati tra quelli disponibili per l'elemento shell a 8 nodi. È possibile anche assegnare il numero di layer voluti. Si ricorda che maggiore è il numero di layer, maggiore sarà l'impegno di calcolo. Definiti almeno due materiali si attiva la possibilità di accedere alla gestione grafica che viene attivata premendo il pulsante "Modifica...". Se si è definito un solo materiale, la sezione si comporterà come omogenea.

I materiali si assegnano ai layer cliccando su di essi. I materiali cambiano a rotazione.

Nella gestione grafica è importante capire come vengono definiti gli spessori dei layer. Si ha uno "spessore nominale" di tutto il pacchetto dei layer. Tale spessore nominale è solo utile per eseguire assegnazioni con un riferimento nominale ad uno spessore totale voluto. Ma lo spessore del pacchetto di layer verrà scalato allo spessore dell'elemento. Se, a esempio, si opera con uno spessore nominale unitario, ogni layer avrà, salvo diversa assegnazione che vedremo dopo, uno spessore di 0.125. Se questa sezione verrà assegnata ad un elemento di spessore, poniamo, di 20 cm, il singolo layer avrà lo spessore di $0.125 * 20 = 2.5$. Pertanto, se non si ha variabilità degli spessori degli elementi cui saranno assegnate le sezioni, è più comodo assegnare uno spessore nominale pari allo spessore dell'elemento.

Notare che lo spessore nominale viene modificato assegnando singoli spessori ai layer, questo per consentire un'eventuale costruzione additiva degli spessori. Si ricorda ancora una volta che gli spessori sono nominali e quindi saranno scalati allo spessore dell'elemento.

Il campo Spessore da Assegnare (Spes. Ass.) consente di assegnare uno spessore voluto al layer (sempre in rapporto allo spessore nominale). Basta indicare lo spessore voluto e fare clic su un layer. Se il valore di questo campo è zero, lo spessore del layer non viene modificato.

Qualora si desideri cambiare lo spessore o l'orientamento del layer senza cambiare il materiale, si può selezionare il layer voluto tenendo premuto il tasto delle maiuscole. Si attiveranno i campi editabili "Spessore" e "Rotazione" nei quali si potranno assegnare i valori voluti. Agendo poi sul bottone freccia (enter) si assegneranno i dati all'elemento selezionato.

4 nodi layer

Non si tratta propriamente di un materiale in senso stretto, ma di un "wrapper" che consente di assegnare le caratteristiche di un elemento a 8 nodi ad un elemento piano a 4 nodi. Definito il materiale dell'elemento ad 8 nodi, lo si assegna a questo materiale. Assegnandolo poi ad un elemento a 4 nodi piano, tale elemento si comporterà come l'elemento a layer. Vedere anche [l'elemento a 8 nodi a layer](#).

Nota sull'uso degli elementi Guscio

Gli elementi Guscio (shell) possono avere 8, 4 o 3 nodi. Il tipo di elemento finito che verrà impiegato è legato al numero di nodi ed al tipo di materiale associato.

Se l'elemento ha 3 o 4 nodi ed ha materiali definiti per "8 Nodi" compreso il No-tension è un elemento a componente membranale associata ai materiali suddetti ma a comportamento flessionale elastico. Si tratta dell'elemento a comportamento membranale con associato un comportamento flessionale elastico. Lo definiremo per chiarezza "lastra-piastra". Che chiameremo LP.

Se non sono assegnati i materiali suddetti "8 nodi" ma altri materiali ND, si ha un elemento shell "classico" isoparametrico a 8 nodi o eventualmente a 3 nodi ottenuto per collasso di un lato. Che chiameremo SH.

Gli altri casi, descritti qui di seguito, generano un elemento "degenerate shell" che chiameremo DS.

Gli elementi ad 8 nodi sono esclusivamente invece elementi del tipo avanzatissimo "Degenerate Shell" e sono pertanto degli elementi a strati, solidi, con lati curvi e spessore variabile, anche se per motivi di praticità di interfaccia tali spessori non possono essere assegnati per ogni nodo. Questi elementi supportano tutti i materiali "8 Nodi" ed il materiale No-tension. Gli strati possono essere realizzati anche con materiali diversi: ad esempio mettendo strati di armature.

Dell'elemento Degenerate shell si può avere un elemento a 4 nodi incorporando il materiale della sezione dell'8 nodi in un materiale "contenitore" detto "4 nodi layer". Se non si attua questa "incorporazione" l'elemento generato è uno shell classic (SH).

Poiché il Degenerate Shell a strati (layer) è molto potente, ne tratteggiamo l'assegnazione con un esempio.

- Definire un materiale 8 nodi Armatura, chiamiamolo arm
- Definire un materiale 8 nodi calcestruzzo, chiamiamolo cls.
- Definire una sezione calcestruzzo assegnando i materiali cls e stl.
- Assegniamo all'elemento di Nòlian il materiale EE sezione calcestruzzo.
- Se vogliamo usare un elemento a 4 nodi, generiamo un materiale "4 nodi layer" ed assegniamo ad esso la sezione ottenuta per l'8 nodi, quindi assegniamo questo materiale all'elemento di Nòlian.

Le rappresentazioni dello stato plastico e dello stato fessurativo sono possibili solo con l'elemento Degenerate shell e

lastra-piastra.

Sostanzialmente per i gusci (shell) abbiamo tre tipi di elementi:

- DS: Degenerate shell a layer a 8 o 4 nodi con materiali apposti (8 nodi) e con il materiale No-tension
- LP: Lastra-piastra con comportamento a lastra come un solo strato del DS e comportamento flessionale elastico. Questo elemento può essere anche un elemento PlaneStress.
- SH: elemento shell classico con comportamento lastra e piastra accoppiati. Supporta i materiali ND ma non i materiali 8 nodi o No-Tension

Materiali geotecnici

Il materiale GeoMat è implementato secondo il modello proposto dall'Università di San Diego. Si rimanda alla trattazione teorica di questa università per informazioni sui criteri con cui è formulato il materiale.

Vanno distinti due tipi di comportamento del suolo qui trattato: dipendente o indipendente dalla pressione. Pertanto si hanno due materiali a comportamento diverso che però vengono in Earthquake Engineering implementati come un unico materiale scegliendo la modalità voluta.

Poiché il comportamento dipendente dalla pressione è tipico delle sabbie e quello indipendente dalla pressione invece delle argille, abbiamo preferito, a livello di interfaccia, usare questa terminologia più consueta. Pertanto, dal dialogo dei materiali, generato un nuovo materiale GeoMat, si può scegliere se è sabbia (dipendente dalla pressione) o argilla (indipendente).

Il materiale, se dipendente dalla pressione, è un materiale elasto-plastico che simula la risposta dei materiali sensibili alla pressione sotto condizioni generali di carico come lo scorrimento indotto dalla contrazione o dilatazione del volume e dalla liquefazione.

Il comportamento plastico è simulato tramite la tecnica delle multi-superfici di scorrimento con scorrimento non associativo. Le superfici di scorrimento sono formulate secondo il criterio di Drucker-Prager.

Il materiale indipendente dalla pressione è un materiale elasto-plastico con risposta plastica solo per la tensione-deformazione deviatorica. La tensione-deformazione volumetrica invece è elastica-lineare ed indipendente dalle componenti deviatoriche. Questo materiale è modellato per la risposta anche ciclica di materiali insensibili allo scorrimento per cambiamenti di confinamento, come appunto l'argilla in condizioni non drenate.

Il criterio plastico adottato è anche qui quello della multi-superficie di scorrimento, ma qui con regola di flusso associativa. La superficie di scorrimento è secondo il modello di von Mises.

Sempre per facilitare l'uso di questo complesso elemento, abbiamo predefinito alcuni tipi di materiali. Ad esempio Sabbia 35-65%. Se però si desidera assegnare i singoli valori, si può scegliere dal menu la voce Utente. Tutte le volte che si seleziona un materiale diverso dalla voce Utente, i dati utente vengono assegnati secondo il materiale prescelto per cui, se si assegnano dati personalizzati Utente, si ricordi che, scegliendo un materiale, i dati assegnati verranno sostituiti.

Per modellare la risposta di un mezzo poroso saturo sotto condizioni completamente non drenate, si può accoppiare la risposta di due fasi: fluida e solida. La risposta fluida è volumetrica ed elastica lineare, la fase solida è quella del materiale prescelto. E' necessario assegnare il modulo combinato non drenato di compressibilità (bulk) B_c che relaziona i cambiamenti nella pressione nei pori e la deformazione volumetrica che può essere approssimata dalla relazione $B_c = B_f / n$ dove B_f il modulo di compressibilità della fase fluida (per l'acqua è tipicamente 2.2×10^6 kPa) ed n è la porosità iniziale.

Questo materiale può essere associato all'elemento deformazione piana o all'elemento brick.

Qualora si attivi l'opzione di analisi con azioni gravitazionali prima dell'analisi, verrà eseguita una analisi con le azioni gravitazionali considerando automaticamente i materiali a comportamento elastico, nelle fasi successive il materiale avrà comportamento elasto-plastico.

Il materiale viene inizializzato con il comportamento assegnato dall'utente. Se si esegue un'analisi con azioni gravitazionali, il comportamento viene sempre assunto elastico. Il comportamento per azioni non gravitazionali può essere di due tipi: con moduli G e B considerati elastici ma assunti in relazione dello stato di confinamento (elasticità aggiornata) oppure elasto-plastico. Questa scelta può essere assegnata dall'utente.

I parametri da assegnare per un materiale dipendente dalla pressione sono i seguenti:

- Modulo di taglio (G): è dato da $E/(2(1+\nu))$ con E modulo di elasticità e ν coefficiente di Poisson. Il valore è alla

pressione di riferimento assunta pari a 80 kPa.

- Modulo di compressibilità (B): dato da $E/(3(1-2\nu))$
- Angolo attrito: angolo di attrito interno in gradi
- Angolo transizione di fase: in gradi.
- Parametro di contrazione 1: rapporto di scorrimento dovuto alla contrazione
- Parametro di contrazione 2: come sopra
- Parametro di dilatazione 1: come sopra, ma per la dilatazione
- Parametro di dilatazione 2: come sopra
- Rapporto iniziale dei vuoti: o indice di porosità iniziale, ` il rapporto tra volume dei vuoti e volume totale, tipicamente il valore è 0.6.

Per questo materiale, può essere associato ad un elemento PlaneStrain, oppure ad un elemento Brick. SE è associato ad un elemento PlaneStrain, è possibile rappresentare lo stato plastico, inteso come rapporto tra tensione tangenziale (deviatorica) e resistenza tangenziale di picco allo stato di confinamento corrente.

Elementi e Macroelementi

In questa famiglia sono raccolti quei gruppi di dati che generano un oggetto EE direttamente assegnabile ad un elemento finito. Si tratta in genera di "macro elementi", elementi cioè ottenuti per aggregazione di più elementi.

Isolatori

Gli isolatori sono elementi e devono essere associati esclusivamente ad elementi Boundary. Per questi isolatori si devono assegnare materiali uniassiali per i gradi di libertà diversi da quelli dello scorrimento. Se non si assegnano tali materiali, vengono generati materiali elastici con la rigidezza assegnate all'elemento Boundary.

Occorre precisare che i materiali uniassiali non sono i materiali che costituiscono l'isolatore, ma sono rappresentativi della legge forza-spostamento e pertanto, con un esempio, in un isolatore elastomerico di area A e di modulo di elasticità tangenziale G, la rigidezza da assegnare è $K = A * G$.

Isolatore elastomerico

Questo elemento è dotato di due nodi e la distanza tra i nodi è considerata sia per l'orientamento che per la distribuzione dei momenti derivanti dall'effetto P-Delta. Il supporto ha proprietà plastiche per la deformazione di taglio e ha le caratteristiche di forza-deformazione dei materiali uniassiali assegnati per i gradi di libertà assiale, torsionale e di rotazione secondo gli assi locali y e z.

I parametri che caratterizzano questo elemento, oltre ai materiali suddetti, sono:

- Rigidezza iniziale elastica
- Forza di snervamento
- Moltiplicatore di rigidezza post-elastica

Isolatore piano a frizione

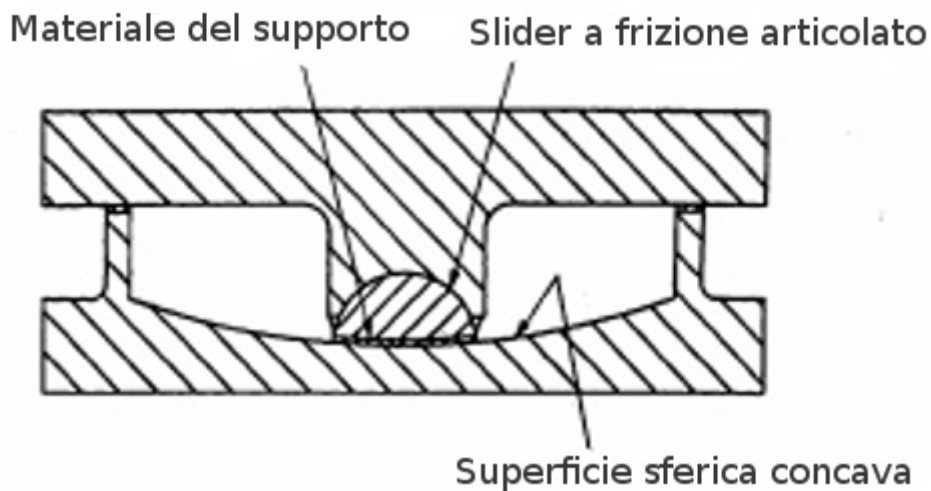
Questo elemento è dotato di due nodi dove il primo nodo rappresenta il piano di scorrimento. L'elemento ha caratteristiche

frizionali accoppiate per la deformazione da taglio e comportamento forza-deformazione data dai materiali uniassiali assegnati per i gradi di libertà assiale, torsionale e flessionale secondo gli assi locali y e z. Il comportamento associato alla deformazione assiale è modificato in modo che non abbia resistenza a trazione. I momenti derivanti dall'effetto P_Delta sono trasferiti alla superficie di scorrimento. Questo elemento tiene conto degli effetti della rotazione della superficie di scorrimento sulle caratteristiche di scorrimento.

I parametri che caratterizzano questo elemento, oltre ai materiali suddetti, sono:

- Coefficiente di attrito secondo Coulomb
- Rigidezza iniziale

Isolatore e frizione a pendolo semplice



Questo elemento è dotato di due nodi dove il primo nodo rappresenta la superficie concava di scorrimento e l'altro l'articolazione di attrito. L'elemento, per le forze di taglio, ha proprietà di attrito con incrudimento dovuto alla concavità della superficie di attrito. Ha invece le caratteristiche forza-deformazione degli altri quattro materiali uniassiali assegnati. Il comportamento associato alla deformazione assiale è modificato in modo che non abbia resistenza a trazione. I momenti derivanti dall'effetto P_Delta sono trasferiti alla superficie di scorrimento concava. Questo elemento tiene conto degli effetti della rotazione della superficie di scorrimento sulle caratteristiche di scorrimento.

I parametri che caratterizzano questo elemento, oltre ai materiali suddetti, sono:

- Coefficiente di attrito secondo Coulomb
- Raggio della superficie concava di scorrimento

Vedere anche [Generazione assistita isolatori](#).

Generazione assistita isolatori

Materiale			
Tipo di elemento:	Pendolo		
Rigidezza Assiale	1e+009	Rigidezza Iniziale	1e+009
Rigidezza Torsionale	1e+009	Raggio	0.000000
Rigidezza flessionale	1e+009	Attrito	0.000000
		OK	Annulla

Gli isolatori sismici nell'ambiente Earthquake Engineering si possono modellare tramite elementi finiti specifici. Per modellare tali elementi si deve generare un materiale non lineare, detto in breve materiale EE, del tipo Isolatore. Generato tale materiale assegnando le necessarie informazioni, si deve selezionare uno o più elementi Boundary già generati.

Per rendere più speditiva questa operazione, si può generare in automatico il materiale EE che viene assegnato, sempre in automatico, all'elemento boundary. Per accedere a questa funzione speditiva, selezionare gli elementi boundary voluti, premere il bottone Isolatore EE. Si apre un dialogo che consente la scelta tra tre tipi di isolatore: frizione (detto altrove anche "slitta"), elastomerico anche a nucleo di piombo, a scorrimento (detto anche a pendolo). I valori da assegnare sono quelli reperibili nei cataloghi dei produttori. Si deve assegnare anche la rigidezza assiale, tale rigidezza è in genere molto elevata per cui si può assegnare anche un valore molto elevato (ad esempio 1.0e9) ma si invita a fare attenzione a valori troppo elevati che potrebbero influire sul condizionamento della matrice di rigidezza.

Se si vuole consultare o modificare un isolatore già assegnato si può premere di nuovo sul bottone Isolatore EE del dialogo dell'elemento di tipo Boundary.

Per ulteriori informazioni sui valori da assegnare, guardare anche [Isolatori](#)

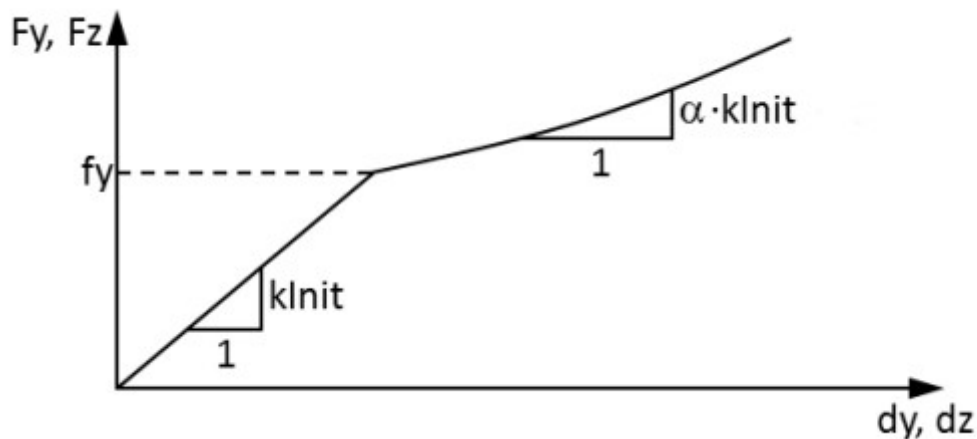
L'analisi che si deve effettuare su una struttura isolata, è l'analisi in transitorio. La normativa richiede l'uso di sette accelerogrammi spettro-compatibili. Per facilitare questo tipo di procedura è possibile [generare accelerogrammi spettro-compatibili](#) e la procedura di [analisi dinamica non lineare assistita](#) consente di generare la lista di analisi in transitorio necessarie. Quest'ultima procedura può attivare il registratore degli [stati critici](#) per una valutazione speditiva dei risultati delle analisi.

Alcuni suggerimenti per la assegnazione dai cataloghi dei produttori

Per una guida alla individuazione sui cataloghi delle caratteristiche da assegnare, prendiamo come esempio i cataloghi delle FIP-Industriale.

Isolatore a nucleo di piombo

Questo tipo di isolatore richiede l'assegnazione della rigidezza iniziale, della forza di snervamento e del coefficiente di hardening ovvero il coefficiente che modifica l'elasticità in fase plastica. Il significato di questi parametri è chiaro della figura seguente.



Facendo riferimento ai cataloghi FIP, non si verifica un hardening per cui tale parametro deve essere assegnato unitario. I valori dei parametri riportati nel catalogo che hanno rilevanza con il modello sono: rigidezza verticale K_v , rigidezza equivalente orizzontale K_e che nel dialogo è definita "Rigidezza iniziale".

La forza di snervamento è definita nei cataloghi F_1 , forza al limite elastico. A differenza dell'isolatore a pendolo (vedi sotto) la rigidezza verticale qui è definita e deve essere assegnata.

In genere per questi isolatori è un valore molto alto, occorre ricordare che valori eccessivamente alti possono squilibrare la matrice di rigidezza.

SPOSTAMENTO 100 mm

Pagina 90

LRB-S	V	F_{zd}	K_e	ξ_e	F_2	F_1	d_1	K_v	D_g	t_e	h	H	Z
	kN	kN	kN/mm	%	KN	KN	mm	kN/mm	mm	mm	mm	mm	mm
			per $d_2^{SLV} = 83 \text{ mm}$										
LRB-S 500/100-110	2700	3630	1.94	35	162	106	8	1164	500	100	197	247	550
LRB-S 550/100-120	4170	5430	2.33	35	194	126	8	1579	550	100	197	247	600
LRB-S 600/102-120	4830	6500	2.49	33	207	128	8	1715	600	102	190	240	650
LRB-S 650/102-120	6440	9190	2.68	30	223	129	8	2235	650	102	200	260	700
LRB-S 700/105-115	7250	10570	2.74	27	228	121	8	2374	700	105	197	257	750
LRB-S 750/112-125	9240	12530	3.08	28	257	143	9	2754	750	112	207	267	800
LRB-S 800/128-130	10310	13190	3.20	29	267	155	10	2577	800	128	223	283	850
LRB-S 850/128-130	12660	17040	3.40	27	284	157	10	3130	850	128	223	283	900
LRB-S 900/126-140	13490	19250	3.91	28	326	182	10	3359	900	126	228	288	950
LRB-S 1000/135-150	19280	26760	4.50	27	375	210	11	4344	1000	135	251	331	1050
LRB-S 1100/150-160	24050	32410	5.01	27	418	241	12	4725	1100	150	266	346	1150
LRB-S 1200/154-160	29180	38760	5.42	25	452	247	12	5498	1200	154	266	346	1250

Prendendo come esempio l'isolatore della prima riga dell'immagine riportata, avremo le seguenti assegnazioni.

Materiale

Tipo di elemento:

Rigidezza Assiale	<input type="text" value="1164.00"/>	Rigidezza Iniziale	<input type="text" value="1.94000"/>
Rigidezza Torsionale	<input type="text" value="1e+009"/>	Forza snervamento	<input type="text" value="106.000"/>
Rigidezza flessionale	<input type="text" value="1e+009"/>	Hardening (0-1)	<input type="text" value="1.00000"/>

Isolatore a pendolo

Il progettista decide il raggio di curvatura R dell'isolatore e lo spostamento di progetto. In base a questi valori sceglie l'isolatore che ritiene più opportuno. Nel caso della FIP la sigla dell'isolatore contiene le informazioni necessarie alla modellazione.

L'isolatore, ad esempio, denominato FIP-D L 250/200(2500) ci dice che lo spostamento è di 100 mm (200 è l'intervallo nelle due direzioni), ed ha un raggio di 2500 mm (numero tra parentesi).

Nei cataloghi FIP, come anche altrove, si usano due simboli che può tornare utile ricordare, N_{sd} è il carico quasi permanente e N_{Ed} è il carico allo SLC, cioè comprendente l'azione sismica.

I dati da inserire nel modello dell'isolatore a pendolo sono: le due rigidezze del dispositivo che chiameremo K_v e K_h che in questo caso devono essere molto rigide perché non sono queste a determinare il comportamento dell'isolatore. Poi occorre il raggio di curvatura, la rigidezza iniziale o "di richiamo" K_r , e il coefficiente di attrito. Il coefficiente di attrito è generalmente espresso nei cataloghi in percentuale, nel caso dei dati richiesti da EE deve essere assegnato invece come valore effettivo. Gli isolatori FIP a pendolo hanno due tipi di attrito "L" (basso) e "M" (medio) assumendo per L: $\mu=2.5\%$ e per M $\mu=5.5\%$. L'attrito effettivo è funzione del carico e FIP consiglia di assumere, per M: $\mu=5.5 \cdot (N_{sd}/N_{Ed})^{-0.563}$ e per L: $\mu=2.5 \cdot (N_{sd}/N_{Ed})^{-0.834}$. La rigidezza iniziale o di richiamo non va confusa con la rigidezza secante usata nel modello lineare ed è data da N_{sd}/R , con R raggio di curvatura del dispositivo.

Con il tipo di isolatore dell'esempio avremmo la seguente assegnazione.

Materiale

Tipo di elemento:

Rigidezza Assiale	<input type="text" value="1e+009"/>	Rigidezza Iniziale	<input type="text" value="800.000"/>
Rigidezza Torsionale	<input type="text" value="1e+009"/>	Raggio	<input type="text" value="250.000"/>
Rigidezza flessionale	<input type="text" value="1e+009"/>	Attrito	<input type="text" value="0.025000"/>

Fare attenzione alle unità di misura che devono essere quelle del modello e devono essere congruenti.

Trave con cerniere

Questo elemento può essere associato ad una Trave generica o rettangolare.

Esso consente di generare due cerniere di estremità, di identiche caratteristiche, generate per aggregazione di materiale Elasto-plastico con limitazione.

Questo "macro elemento" si potrebbe con più flessibilità ottenere per aggregazione dei componenti. Infatti non va confuso con la [Trave a cerniere di estremità](#) la quale appunto consente di aggregare ad una trave due cerniere di estremità preventivamente definite.

In questo caso invece è sufficiente assegnare la rigidezza, il momento e il taglio ultimo, l'hardening e la deformazione ultima dopo la quale la cerniera assumerà lo sforzo determinato dal momento e taglio ultimo assegnati.

Questa cerniera è del tipo di quella suggerita dal codice FEMA ed è anche impiegabile in un'analisi pushover secondo normativa DM2018.

Questa cerniera non ha valori di snervamento dipendenti dalla forza assiale, come necessario nel caso della muratura. In questo caso, questo stesso elemento consente siano assegnare le caratteristiche meccaniche della murature.

In questo caso la curva sforzo-deformazione è determinata anche dalla forza assiale presente nella cerniera secondo le formulazioni più diffuse e recipe anche dalla normativa DM2018.

In caso di impiego di questo elemento è indispensabile un preventivo passo di analisi con le condizioni di carico gravitazionali altrimenti la cerniera ha resistenza nulla.

Le caratteristiche dell'elemento Trave al quale sono associate le due cerniere, sono quelle dell'elemento definito in Nòlian.

Si noti che le cerniere sono elasto-plastiche, con i valori assegnati, nel piano di maggior dimensione della sezione e sono invece elastiche nella direzione secondo il "lato corto".

All'elemento si possono assegnare carichi e masse come si desidera.

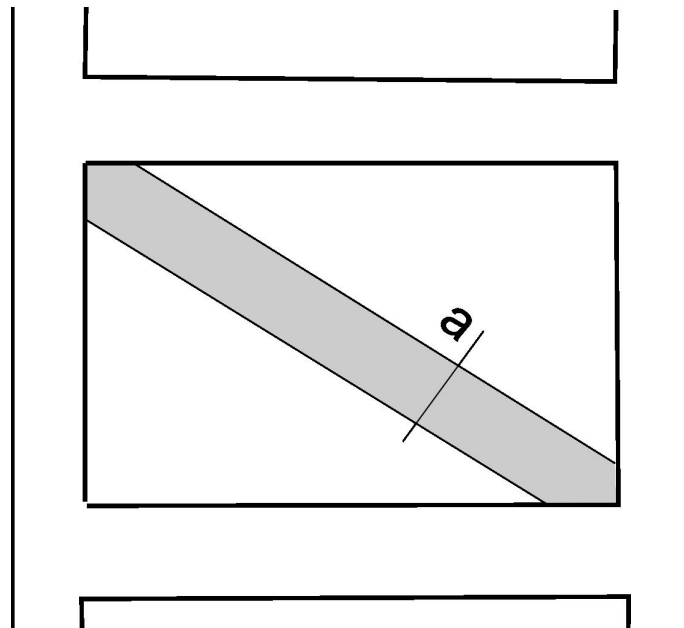
Tipicamente l'elemento trave ha comportamento non lineare anche geometrico per cui tiene conto degli effetti "P-delta".

Questo elemento differisce dall'elemento [Trave con Cerniere agli estremi](#) in quanto in questo elemento l'assegnazione è più mirata ma meno flessibile.

Pannello di tamponatura

Questa assegnazione consente di generare un macro-elemento da associare ad un elemento a 4 nodi. Esso è costituito da due elementi asta posti lungo le diagonali dell'elemento a 4 nodi. Le caratteristiche geometriche (larghezza della banda equivalente in muratura) sono calcolate secondo le indicazioni FEMA 273 formula 7-14. Le aste sono costituite di materiale elastico-perfettamente plastico non resistente a trazione con resistenza massima a compressione assegnata. Lo spessore della tamponatura è quella assegnata all'elemento piano a 4 nodi. I parametri della formula FEMA vengono automaticamente desunti all'atto della generazione del macro-elemento e pertanto l'assegnazione è molto semplice. Il riferimento locale dell'elemento è ininfluente come ininfluente sono i parametri meccanici ad esso assegnati.

Nella figura seguente viene rappresentata solo una delle due aste per indicare il metodo della larghezza equivalente (a).



Le aste hanno il modulo di elasticità della temponatura e lo stesso spessore, la larghezza "a" è secondo FEMA 273:

$$a = 0.175 (\lambda h_{col})^{-0.4} r_t$$

$$\text{dove } \lambda = ((E_t r_t \sin 2\theta) / (4 f_f I_{col} h_t))^{0.25}$$

dove:

- h_{col} altezza media dei pilastri
- h_t altezza della tamponatura
- E_f modulo di elasticità del materiale del telaio
- E_m modulo di elasticità del materiale della muratura
- I_{col} momento d'inerzia medio delle colonne
- r_m lunghezza della diagonale del pannello

- t_m spessore della muratura (e spessore dell'asta equivalente)
- θ angolo la cui tangente è data dal rapporto tra altezza e larghezza del pannello

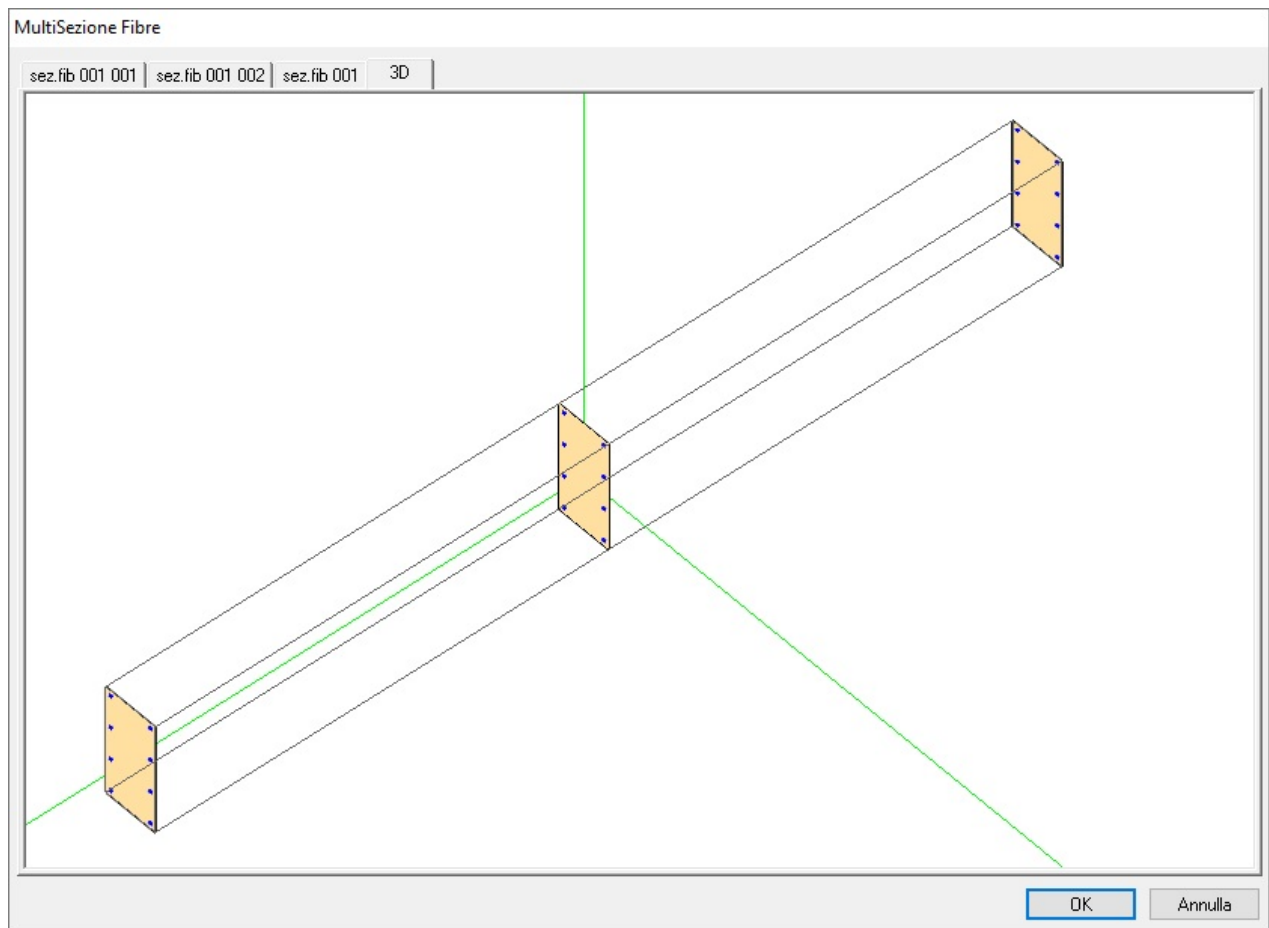
Tutti i dati sono desumibili dalla geometria della mesh e dalle assegnazioni effettuate agli elementi del telaio. Si assume che la altezza della tamponatura sia quella dei pilastri di confine. Lo spessore della muratura è quella assegnata all'elemento finito. Pertanto occorre solo assegnare la resistenza del materiale della tamponatura, gli altri dati vengono desunti automaticamente.

Aggregatore sezioni

Questo materiale non va confuso con l'Aggregatore di sezione. Questo materiale è sostanzialmente un macroelemento che consente di generare un elemento trave assegnando fino a 7 sezioni a fibre diverse che devono essere costituite da materiali di tipo Sezione a fibre. Questo macroelemento è molto utile, ad esempio, qualora si voglia definire un elemento a fibre che descriva una trave in calcestruzzo armato, dove l'armatura sia diversa nelle diverse sezioni.

L'elemento sarà dotato sempre di 7 sezioni, ma esse saranno distribuite il più uniformemente possibile secondo il numero di sezioni assegnate. Nel caso, abbastanza comune, di 3 sezioni assegnate su 7, si avrà ad esempio il seguente schema: 1 1 2 2 2 3 3. E così via;

Tramite il bottone "Modifica" si accede ad un dialogo che consente di visualizzare e modificare le sezioni a fibre assegnate. Se le sezioni hanno contorno eguale, è possibile visualizzare nella pagina "3D" del dialogo, la trave con le sezioni assegnate. All'apertura di questo dialogo, vengono verificate le sezioni: le sezioni eguali vengono duplicate assegnando ad esse un nuovo nome. Ciò consente di modificare la singola sezione senza riportare le modifiche sulle sezioni originariamente identiche. All'uscita del dialogo, le sezioni che restano eguali o che non sono state modificate, vengono di nuovo unificate. Nel dialogo 3d vengono posizionate e rappresentate, per maggior chiarezza, solo le sezioni assegnate e non viene rappresentata la interpolazione su 7 sezioni che avverrà nel formare la trave a fibre. A questo proposito, si precisa che la integrazione delle sezioni lungo la trave viene, in questo caso, effettuata con il metodo di Lobatto e non di Gauss per poter includere con esattezza le sezioni di estremità



Dissipatore

Il macroelemento dissipatore è costituito da un elemento di lunghezza nulla che può essere associato esclusivamente agli elementi Asta per modellare un dissipatore viscoso o isteretico posto in asse con l'elemento asta.

È impiegabile per modellare controventi dissipativi con facilità invece di associare materiali uniassiali viscosi o isteretici all'elemento.

Dissipatore viscoso

La relazione per la viscosità adottata è $F = C v^\alpha$

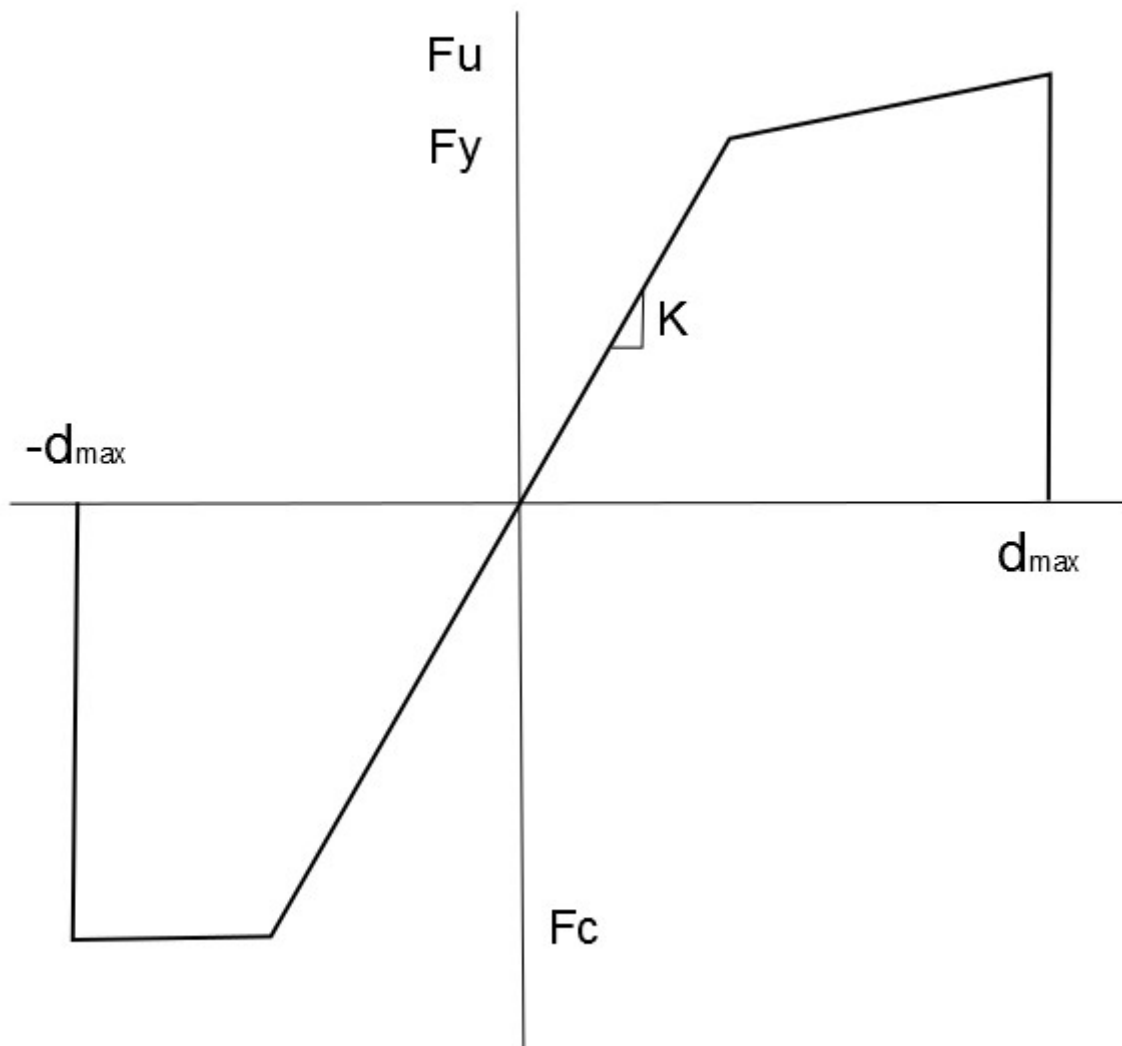
Con F forza di reazione, C costante di smorzamento, v velocità, α tipicamente 0.15.

Assegnando forza e velocità massime, viene ricavata la costante di smorzamento.

La rigidità che viene assegnata allo smorzatore (la rigidità della molla in asse del modello di Maxwell) è quella dell'asta alla quale è associato il dissipatore.

Dissipatore isteretico

Il dissipatore isteretico viene modellato tramite un materiale lineare isteretico definendo i punti caratteristici della curva forza-deformazione tramite i parametri seguenti.



Rigidezza (K in figura)

Forza snervamento (F_y) (segno positivo)

Forza massima (F_u) allo spostamento massimo (d_{max})

Forza massima di compressione (F_c) allo spostamento massimo (d_{max}) (assegnare con segno positivo).

L'eventuale registratore associato all'elemento Asta dotato di dissipatore, fornirà i risultati del dissipatore e non dell'elemento Asta.

I valori che possono essere registrati sono: Forza assiale/Tempo oppure Forza assiale_Deformazione. Se si seleziona un altro tipo di valore da registrare, il registratore selezionerà uno dei due registratori suddetti.

Membrana

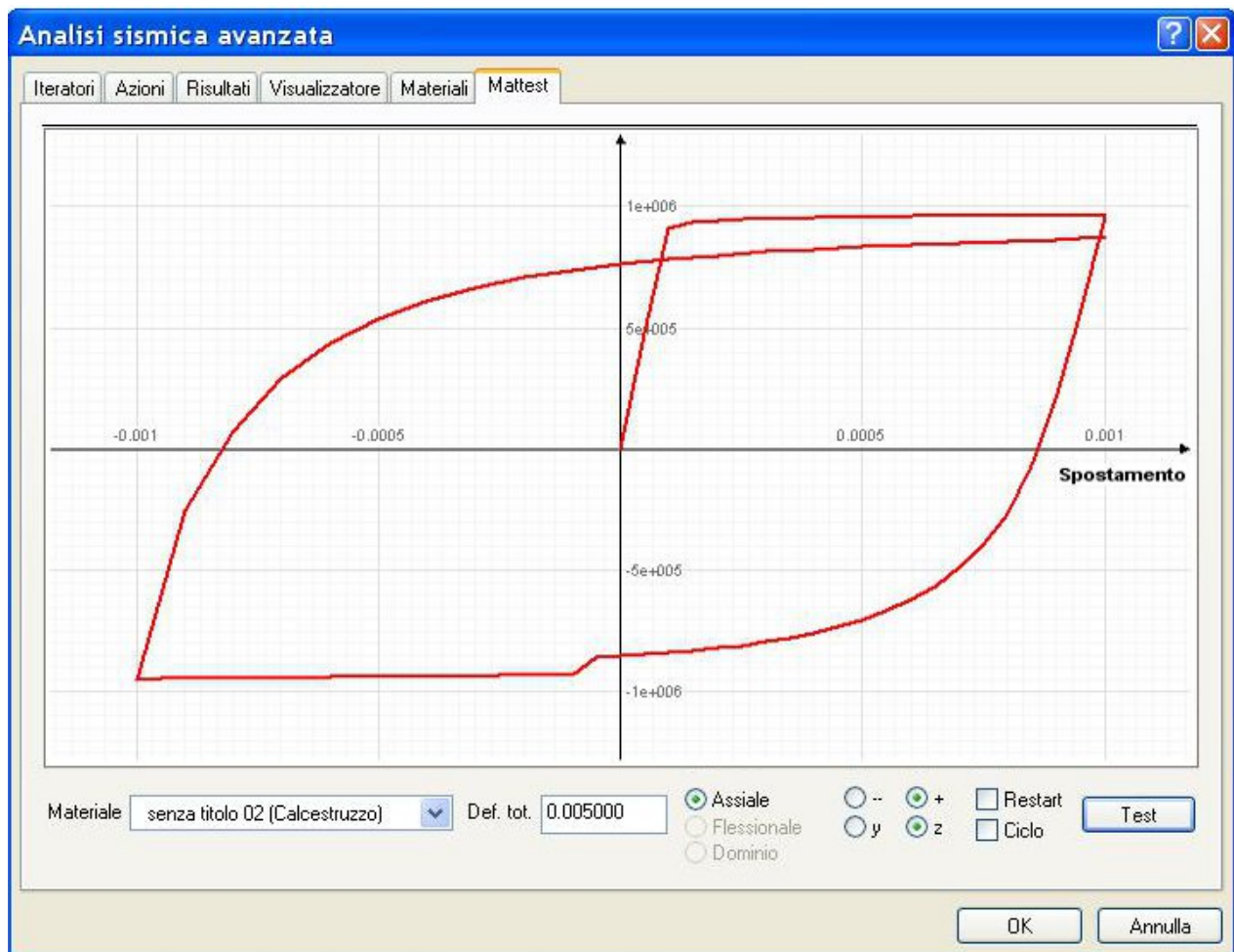
Elemento a 4 nodi con comportamento a sforzo piano (membrana) particolarmente adatto per analisi in grandi spostamenti come strutture pneumatiche. Non ha rigidezza flessionale e pertanto occorre vincolare i gradi di libertà rotazionali. Supporta i materiali elastico ed elasto-plastico per l'8Nodi e il materiale no-tension. E' possibile assegnare tensioni di pretensione (positive se di trazione).

Trave 2° ordine

Il modello di questo elemento riproduce in maniera esatta il comportamento, con effetti del secondo ordine, di una trave prismatica di lunghezza qualunque sottoposta a carico trasversale uniforme. Quando ricorrono queste condizioni, la discretizzazione di un sistema di travi ha come nodi quelli "natural" della struttura (giunzioni trave-pilastro, punti di cambiamento di sezione, di proprietà meccaniche, di diagramma di carico). Pertanto consente con pochissime iterazioni di ottenere la configurazione in termini di deformazioni e di sforzi della trave tenendo conto degli effetti del secondo ordine. Pertanto questi risultati sono i più rappresentativi di elementi snelli ove tali fenomeni possono amplificare sensibilmente sforzi e deformazioni. Se attivato nelle opzioni dei materiali, in caso di instabilizzazione euleriana di un elemento, ne viene dato avviso e il procedimento si arresta.

La convergenza dell'elemento è molto rapida e pertanto non è generalmente necessario procedere per passi di carico. Il controllo in spostamento è poco efficace, vista la natura della formulazione, e se ne sconsiglia l'impiego.

Il laboratorio MatTest



Ciclo di sezione in calcestruzzo fibre con MatTest

Il "laboratorio MatTest" è una "esclusiva" dell'ambiente EE. Spesso, assegnate le caratteristiche numeriche a un materiale, ci si chiede se si sono esattamente compresi i significati dei parametri e se i valori assegnati sono quelli che intendevamo. Il laboratorio MatTest consente di visualizzare un completo ciclo tensione-deformazione che permette di verificare la validità

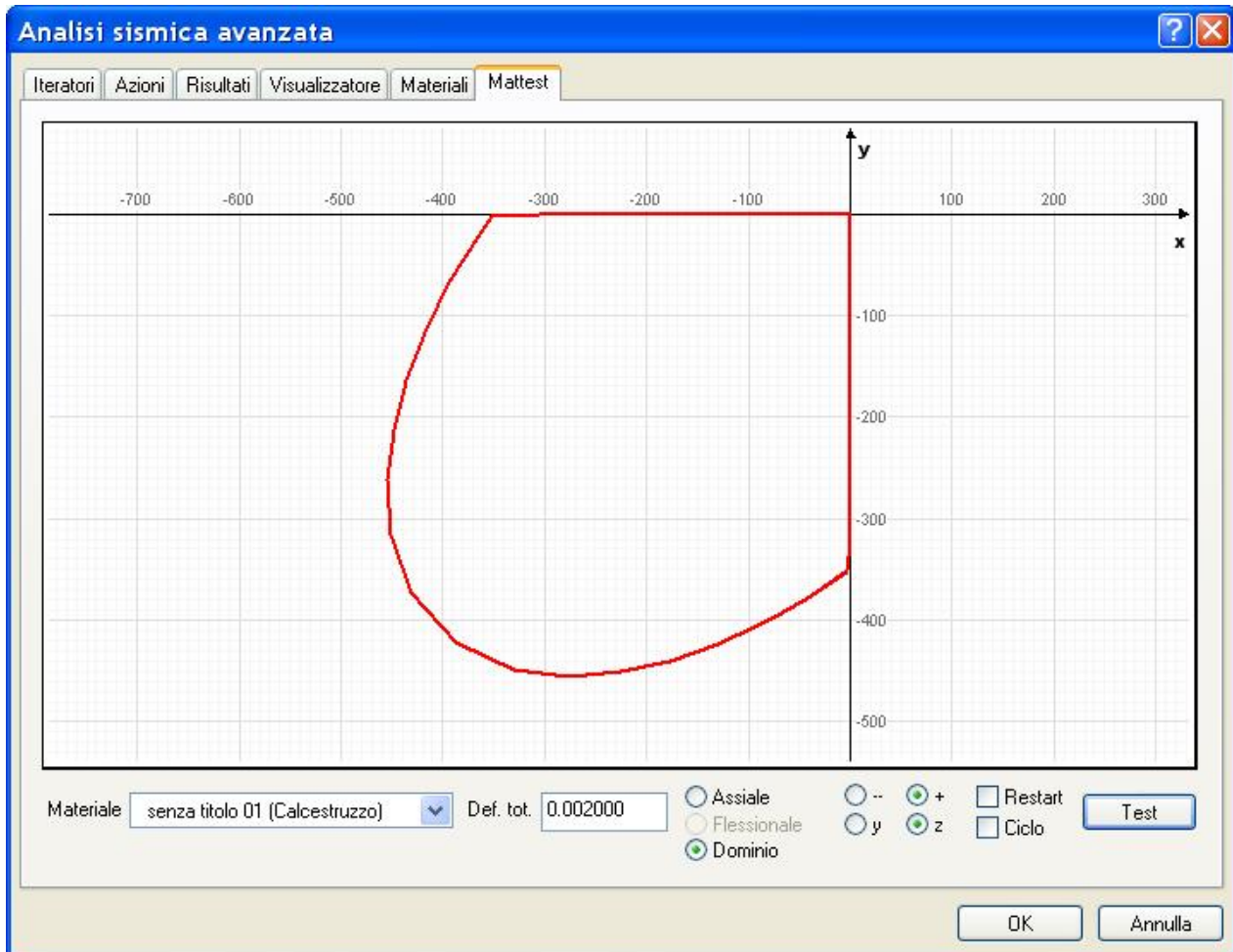
delle assegnazioni. Tale diagramma non è costituito con metodi semplificati e solo illustrativi, ma assemblando un modello di calcolo e risolvendolo in modo incrementale in controllo di spostamento con i metodi stessi dell'ambiente EE. Ciò consente di avere una gamma di variabilità nella verifica delle assegnazioni che consente di far vedere MatTest come un vero "laboratorio" per la definizione dei materiali.

L'uso di MatTest è molto semplice. Si sceglie il materiale da testare, si assegna la deformazione totale che si vuole raggiungere e se è di trazione (+) o compressione (-). Quindi, premendo il tasto "Test", si ottiene il diagramma voluto. Se poi si attiva il check-box "Restart" la successiva analisi riparte dall'ultimo punto raggiunto e si possono descrivere cicli carico-scarico a piacere (limite: 5000 punti nel diagramma). Se si attiva l'opzione "Ciclo" viene in effettuato un ciclo carico-scarico-carico con i limiti di deformazione assegnati. Assegnando una deformazione nulla, il laboratorio cerca quella che ritiene ottimale per illustrare quel tipo di problema.

Nel caso si selezioni un materiale che consenta anche un test flessionale, il bottone di selezione tra azione assiale o flessionale si attiva per consentire la scelta. Nel caso di sezioni a fibre definite graficamente, questa funzionalità consente di ottenere i diagrammi momento-curvatura della sezione. In questo caso si possono sempre usare i bottoni + e - per indicare il verso di rotazione e si può scegliere l'asse locale (y o z) di rotazione.

Per i materiali "Shell 8 nodi a layer" e per il materiale "No-tension" è possibile rappresentare la risposta biassiale attivando l'opzione "Dominio" ed assegnando la deformazione voluta. Verrà rappresentata la funzione di sforzo (in regime di sforzo piano) tracciato al variare dei valori ϵ_x ed ϵ_y assumendo che la loro risultante sia pari alla deformazione assegnata. La tensione tangenziale è sempre nulla e pertanto le deformazioni assegnate coincidono sempre con le direzioni delle tensioni principali del materiale. Non confondere questo diagramma con il dominio di snervamento.

Il materiale "Calcestruzzo 1", che implementa il legame di Kent e Park, viene rappresentato sempre come **non confinato** in quanto il confinamento necessita delle dimensioni della sezione che, per il solo materiale, non sono disponibili.



Viscosità

E' possibile associare al materiale calcestruzzo un "coefficiente di viscosità" $f(t_0, t)$ che rappresenta la variazione della deformazione ϵ al tempo t a partire dal tempo iniziale t_0 .

Tale funzione deve essere dapprima generata tramite l'apposito dialogo accessibile dalla voce "EDipendenza temporale" del manu Materiali. La funzione può essere assegnata con valori voluti oppure secondo le prescrizioni dell'EC8. In questo caso, vanno assegnati i parametri previsti dalla norma e quindi premere il bottone "Genera".

Nella versione attuale non è prevista una variazione di carico durante l'applicazione dei passi di viscosità. Il carico deve esser assegnato ed agire in modo costante dal momento in cui inizia l'analisi di viscosità.

E' pertanto necessario applicare un carico, determinare la tensione all'istante t_0 e quindi applicare la funzione di viscosità per il tempo voluto.

La procedura quindi si svolge in almeno due tempi e va applicata tramite la funzione MultiStage assegnando la opzione di dipendenza temporale per la fase voluta: il tempo iniziale e quello finale, se si hanno applicazioni successive di carico, si possono usare più fasi.

La deformazione del materiale sarà dunque data da:

$$\epsilon_{cr}(t_0) = \epsilon_c(t_0) f(t_0, t)$$

che si riferisce alla deformazione al tempo t per la tensione costante applicata al tempo t_0 . Ovvero, in forma incrementale:

$$\epsilon_{cr}(t_0, t_{i+1}) = \epsilon_{cr}(t_0, t_i) f(t_0, t_{i+1}) / f(t_0, t_i)$$

Degrado del calcestruzzo

Questa funzione è opzionale

Degrado

Degrado | Cloruri | Diagramma

Base dati degrado: Senza nome

Salva Rinomina Elimina

Umidità (%) 60.0000

Classe esposizione XC2 Icorr 0.400000

Tempo (anni) 100

Fessurazione iniziale (mm) 0.300000

Dati da indagare Corrosione armatura 0.000000

Test

Diametro barra 16.0000 Distanza barre (mm) 100.000

Copriferro 30.0000 f_c (MPa) 30.0000

Tempo inizio corrosione 77.4774

Profondità diffusione 34.0827 Raggio 151.307

Profondità corrosione acciaio 0.104505

Stato copriferro Spalling Fessure 0.765269

Decremento resistenza acciaio 0.987022

Decremento resistenza cls 0.735553

Decremento eps ultimo 0.981085

Calcola

da 0.000000 a 120.000

Sezione senza titolo 005

OK

Alle sezioni a fibre è possibile associare un modello di degrado del calcestruzzo. I parametri che definiscono tale modello sono organizzati in un archivio dove ogni insieme di parametri viene identificato da una denominazione scelta dall'operatore. Il modello di degrado agisce su tutta la sezione e, allo stato attuale dell'implementazione, non viene associato ad un singolo lato, la trave a fibre è formata da più sezioni e pertanto è possibile avere una trave con sezioni affette da differenti condizioni di degrado. Si ricorda, tra i materiali, l'Aggregatore di sezioni, che consente di assegnare ad una trave a fibre differenti sezioni.

Il modello di degrado può essere definito con riferimento alla barra di armatura. Si hanno i seguenti fenomeni descritti da differenti modelli numerici. Il fenomeno di degrado del calcestruzzo è ampiamente descritto in letteratura, ai fini del modello computazionale è pertinente la logica della concatenazione dei fenomeni e dei modelli che li descrivono.

I fenomeni di corrosione considerati sono la carbonatazione e la clorurazione considerando questi fenomeni distinti e non sovrapponibili: è l'operatore che decide il tipo di aggressione che desidera considerare.

Il processo si può descrivere nei seguenti passi ai quali corrispondono modelli numerici diversi. I modelli adottati sono documentati in letteratura e le modalità di implementazione sono descritte nella Appendice.

Diffusione

Avanzamento degli aggressivi all'interno della sezione, il fenomeno avviene nel tempo. Un modello numerico consente di determinare la profondità raggiunta dall'aggressivo nel tempo.

Corrosione della barra

Inizia quando l'aggressivo si è diffuso fino a raggiungere la barra con una concentrazione tale da consentirne la corrosione. Si definisce questo accadimento come la terminazione dello stato di "passivazione" della barra. Il modello consente di

determinare, nel tempo a partire dal termine della passivazione, l'entità della corrosione, la corrosione può essere omogenea o localizzata.

Nel caso dei cloruri è localizzata e si formano delle intacche e il fenomeno in letteratura viene detto di "pitting". La corrosione della barra, oltre alla riduzione del diametro, determina un decadimento della resistenza e della deformazione ultima.

Fessurazione interna

La formazione di ossidi intorno alla barra genera delle pressioni che fessurano il calcestruzzo intorno alla barra. Si assume che questa fessurazione sia omogenea intorno alla barra e il raggio è funzione della profondità di corrosione della barra. In questa area la resistenza di calcestruzzo a compressione diminuisce.

Fessurazione del copriferro

Quando la fessurazione interna raggiunge la superficie si formano delle fessure nel copriferro. Questo accadimento viene considerato nel modello numerico.

Espulsione del copriferro Quando le fessure nel copriferro raggiungono un valore limite, il copriferro viene espulso. In questo caso il materiale che forma il copriferro non viene più considerato nella formazione della sezione a fibre.

Nella formazione del modello di calcolo, quando viene definita la sezione che poi sarà associata all'elemento finito a fibre, le caratteristiche dei materiali assegnati dall'operatore vengono modificate secondo il modello di degrado assegnato tenendo conto della localizzazione del deterioramento, pertanto l'operatore non è chiamato a definire la zonizzazione del degrado nelle sezioni né il decadimento di resistenza dei materiali.

La formazione dell'archivio dei parametri di degrado, avviene tramite uno specifico dialogo. Tale dialogo è formato da tre pagine. La prima è dedicata alla carbonatazione, la seconda alla clorurazione, la terza consente di ottenere il diagramma momento-rotazione sia della sezione in esame integra che deteriorata, ciò consente all'operatore di valutare l'entità delle prestazioni della sezione a seguito del degrado.

I modelli matematici proposti in letteratura sono in genere affetti da molti parametri perché il fenomeno è complicato, più che complesso, in quanto i modelli sono derivati più da collezioni statistiche di dati che non sulla base di modelli di fenomeni fisici. Si è eseguita un'attenta valutazione per predefinire i parametri tipici in modo da dare all'operatore il minimo onere possibile nella definizione dei parametri.

In entrambi i fenomeni (carbonatazione e clorurazione) si sono definiti dei panorami di esposizione tipici che consentono di ottenere i parametri di degrado consolidati in letteratura, tali valori però possono essere assegnati numericamente dall'operatore che così non è limitato ai valori proposti.

Vi sono due tipologie di interesse per il degrado: uno di previsione, l'altro di analisi in seguito alla rilevazione di danni tramite indagini. Le indagini in genere si basano sulla profondità di corrosione della barra che è un valore che determina tutte le successive azioni del degrado. Pertanto nei dialoghi è possibile assegnare una profondità di corrosione della barra in alternativa alla determinazione di essa in funzione del tempo di diffusione.

Il dialogo in Earthquake Engineering consente, oltre all'assegnazione, la valutazione dell'effetto del degrado su una sezione precedentemente assegnata in modo standard o su una singola barra di tale sezione. Per poter valutare l'andamento del degrado, il dialogo consente il calcolo su parametri assegnati e la visualizzazione dei risultati in forma grafica sulla rappresentazione della sezione prescelta. I parametri della barra possono anche essere assegnati per il calcolo numerico cliccando su una barra della sezione rappresentata.

I parametri da assegnare sono piuttosto intuitivi e si è tentato di renderli auto-esplicativi nei dialoghi. Per quanto riguarda le unità di misura, salvo dove diversamente indicato, i parametri della sezione sono nelle unità di misura assegnate dall'utente, per i dati di calcolo numerico di verifica, le misure di lunghezza sono in millimetri. L'intensità di corrente i_{corr} è in $\mu A/cm^2$.

La terza pagina del dialogo consente di ottenere un diagrammi momento/rotazione delle sezioni: integra e danneggiata. Si sono impiegate le funzionalità di MatTest. Per avere un grafico più puntuale si è usato come metodo di integrazione lo

"arclength" e pertanto come passo di calcolo deve essere assegnata la lunghezza d'arco totale che in questo caso è dell'ordine di grandezza del momento ultimo della sezione. Se si ottiene il messaggio di "Convergenza non raggiunta" ciò indica quasi certamente che si è raggiunta la rotazione di rottura della sezione (rotazione ultima).

Una volta definita la lista di scenari di degrado relativi alle sezioni interessate, si associa il nome assegnato a questi gruppi di dati alla sezione a fibre che si desidera sia interessata da tale degrado. Si ricorda l'aggregatore di sezioni a fibre che consente di avere un elemento trave con sezioni diverse e, nel caso specifico, sezioni con diverso scenario di degrado.

Gli elementi finiti

Elementi finiti monodimensionali

Rigel

Non si tratta propriamente di un elemento finito ma di un vincolo cinematico. L'uso è ammesso solo per gli estremi degli elementi Trave.

Boundary

Elemento a due nodi di lunghezza nulla. I due nodi servono solo a determinarne la direzione. Se non viene assegnato alcun materiale, agisce secondo le rigidità assegnate a dialogo altrimenti supporta tutti i [materiali uniassiali](#). Il materiale uniassiale assegnato viene così associato a tutti i gradi di libertà del boundary. Se si usa un [Aggregatore di sezione](#), si può comporre una sezione con tanti differenti materiali quanti sono i gradi di libertà del Boundary. Si ricorda che i materiali uniassiali descrivono un legame, in questo caso, forza-spostamento o momento-curvatura se applicati ai gradi di libertà rotazionali.

Asta

Elemento a due nodi e tre gradi di libertà traslazionali per ciascun nodo. Non accetta carichi. Non può essere connesso a elementi rigel. Ha un sistema di trasformazione di coordinate corotazionale e quindi può essere usato anche in grandi spostamenti. Supporta tutti i [materiali uniassiali](#). Nel modo stesso dell'elemento Boundary.

Trave

Elemento a due nodi e sei gradi di libertà per nodo. Accetta la rimozione di "vincoli interni" per modellare i vincoli di estremità interni diversi dall'incastro. Ha un sistema di trasformazione di coordinate corotazionale e quindi può essere usato anche in grandi spostamenti. Accetta i Rigel. Supporta esclusivamente il carico uniformemente distribuito nei riferimenti standard. Supporta i materiali elastici e Hardening, e le sezioni a Fibre, Aggregatore. La trave può avere cerniere agli estremi tramite l'apposita sezione [Trave con Cerniere agli estremi](#). Se la lunghezza assegnata agli estremi (nella definizione della sezione nei materiali) è nulla, vengono costruiti due elementi di lunghezza nulla altrimenti viene condotta una integrazione che comprende gli estremi con la lunghezza assegnata.

L'elemento è a non linearità distribuita nel quale il comportamento dell'elemento è ottenuto per integrazione pesata della risposta di un certo numero di sezioni poste nei punti di integrazione numerica. Spostamenti e forze nelle sezioni sono ottenuti per interpolazione degli spostamenti o delle forze globali sull'elemento.

Il comportamento costitutivo di ogni sezione può essere derivato dalla teoria della plasticità o ottenuto per integrazione numerica su un certo numero di fibre discrete.

Si assume che le sezioni piane si conservino piane in modo che le deformazioni della sezione siano linearmente distribuite. L'elemento è basato sulla flessibilità anzi che sulla rigidità e ciò consente un migliore controllo delle forze nell'elemento. Ci offre il grande vantaggio che qualsiasi non linearità insorga, a livello di sezione, nell'elemento, anche quando questo sia in fase di softening, l'equilibrio interno dell'elemento è esattamente soddisfatto.

Non accetta il carico definito a tratti. Qualora sia assegnato un carico distribuito, non viene supportato il sistema di trasformazione coorotazionale di coordinate, per cui l'elemento in questo caso, non può essere usato per analisi in grandi spostamenti.

Trave Winkler

Elemento a due nodi e sei gradi di libertà per nodo dotato di molle non lineari per simulare un suolo secondo il modello di Winkler. Il modello del suolo fornisce rigidità solo per i gradi di libertà T_x e R_y . Poiché il modello del suolo è non lineare, nel senso che non ha rigidità per le trazioni, le funzioni di forma di questo elemento sono totalmente diverse dall'analogo elemento per analisi lineare e quindi la reazione del suolo ne risultano sensibilmente diverse.

Elementi finiti bidimensionali

Elemento a deformazione piana

Elemento a deformazione piana per problemi getecnici

Elemento shell a 3 o 4 nodi

Elemento shell 8 nodi

Elemento membrana a 4 nodi

Elemento a deformazione piana

Elemento isoparametrico a 3 o 4 nodi a deformazione piana. Supporta i materiali:

- Elastico
- elasto-plastico Drucker-Prager
- Elasto plastico J2
- GeoMat

Si faccia attenzione che se si assegna una densità di massa al materiale, questa viene sommata alla eventuale densità assegnata all'elemento.

Elemento shell 3 o 4 nodi

Elemento isoparametrico a interpolazione bilineare a lamina con integrazione ridotta e deformazioni tangenziali mediate a livello di lamina per eliminare lo shear-lock e per ridurre i modi a energia nulla. La rigidità per il drilling è fornita da un coefficiente di penalità valutato sull'autovalore minimo della matrice di rigidità.

Questo elemento può essere costituito da qualsiasi materiale n-dimensionale ma non dai materiali per shell 8 nodi a layer. E più: precisamente:

- Elastico
- Elasto plastico
- Acciaio
- Concrete

- No-tension

Data la natura laminare, come risultati non vengono esposte le tensioni membranali ma la forza agente su tutta la sezione trasversale, diversamente dagli analoghi elementi a comportamento lineare.

Per il materiale [No-tension](#). Vedere le indicazioni riportate nella descrizione del materiale.

Nel caso si impieghi questo materiale, allo stato attuale, l'elemento non accetta né massa né carico sull'elemento.

Per l'elemento a 4 nodi a layer si veda [Elemento shell 8 nodi](#)

Elemento shell 8 nodi

È un elemento ottenuto per discretizzazione diretta di un elemento tridimensionale, nel quale le condizioni tridimensionali di deformazione e di tensione vengono degenerate nel comportamento di un guscio. È un elemento guscio curvo ad otto nodi *serendipity*, estremamente potente e versatile. Viene adottata un'integrazione ridotta per prevenire sia lo shear che il membrane locking in caso di piccoli spessori. L'elemento è a layer (strati) per cui può tenere conto di un comportamento elasto-plastico e può essere formato da strati di caratteristiche diverse (materiali compositi): ogni layer può essere descritto con caratteristiche specifiche e con una rotazione del sistema del materiale arbitraria. Questo elemento richiede una laboriosissima elaborazione e pertanto i tempi di calcolo non sono brevi. Usare mesh ragionevoli e impiegarlo nei casi in cui sia effettivamente necessario.

Geometria dell'elemento

L'elemento è a tutti gli effetti un elemento solido: pertanto gli spigoli "laterali" possono essere del tutto diversi l'uno dall'altro per spessore e per orientamento. Per ovviare all'inconveniente di assegnare tutti questi dati per ogni elemento, si assume che lo spessore sia costante e che gli spigoli laterali siano ortogonali al piano medio dell'elemento. Poiché la descrizione del piano medio dell'elemento avviene in Nòlian tramite un elemento curvo ad otto nodi, la superficie non descrive esattamente curve quali la sfera o il cilindro: in questo caso anche gli spigoli laterali non sarebbero esattamente orientati lungo i raggi.

Materiali supportati

Questo elemento può essere costituito esclusivamente dalle sezioni per shell 8 nodi a layer e più precisamente:

- Elastico
- Omogeneo
- Concrete
- No-Tension
- Assegnazione grafica dei layer costituiti da materiali N-d

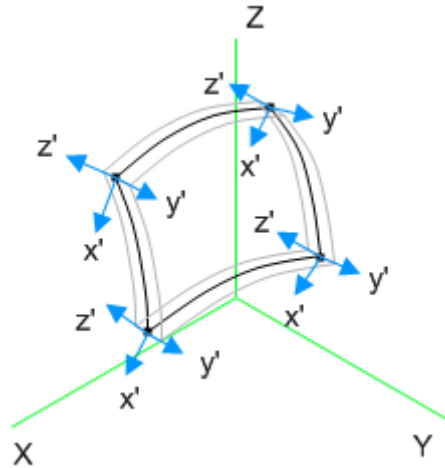
Carichi supportati

I carichi supportati sono i seguenti:

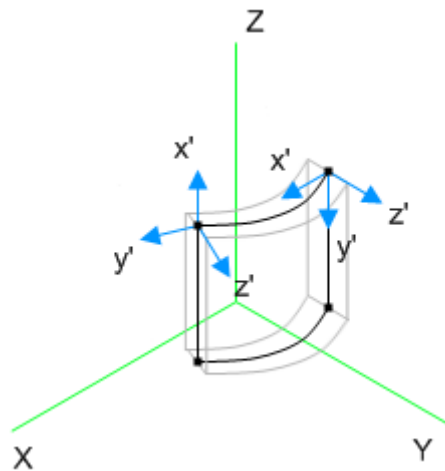
Carico uniforme	È inteso come pressione uniformemente distribuita nel riferimento locale e può essere applicato al piano medio, alla faccia superiore o a quella inferiore.
Carico di bordo	Può essere assegnato per un solo lato nelle sole componenti locali x ed y.
Carico da peso proprio	Si può assegnare un peso specifico diverso per ogni strato o utilizzare per tutti quello impostato nell'assegnazione del carico.

Il sistema di riferimento locale

Poiché l'elemento è curvo, non si può utilizzare un sistema di riferimento unico per tutto l'elemento: è più conveniente, in questo caso, spostare il concetto di sistema di riferimento locale sui nodi di estremità, assumendo una continuità di superficie tra elementi concorrenti in uno stesso nodo:



Il sistema di riferimento locale di ogni nodo di un elemento ha asse Z locale normale alla superficie del guscio: passa quindi per i corrispondenti estremi sulla faccia inferiore e sulla faccia superiore. L'asse X locale è parallelo al piano globale XZ e ortogonale a Z locale. Se Z locale è parallelo a Y globale, X locale viene posto parallelo a X globale. L'asse Y locale viene calcolato in base agli altri due, con la regola della mano destra. Si fa notare che in alcuni casi, per le modalità di scelta dell'asse X locale, nodi dello stesso elemento possono avere sistemi di riferimento completamente diversi: se per uno di essi Z locale risulta parallelo a Y globale e per gli altri no, i loro sistemi di riferimento possono risultare molto diversi:



Grandi spostamenti

L'elemento è adatto anche ad analisi per grandi spostamenti e moderate rotazioni (secondo l'ipotesi di von Karman). Nell'analisi non lineare in grandi spostamenti viene utilizzato un metodo "Lagrangiano totale" per cui si impiegano le deformazioni di Green-Lagrange e gli sforzi di Piola-Kirchhoff.

Nota: per grandi deformazioni gli sforzi di Piola-Kirchhoff si allontanano dagli sforzi ingegneristici.

Il Drilling

Questo elemento non ha rigidità per le rotazioni intorno a un asse perpendicolare al proprio piano (drilling). Si usa un valore di penalità per evitare che la matrice non sia definita positiva e per evitare di dover assegnare vincoli ausiliari. Tale rigidità "fittizia" è calcolata relativamente al minimo degli autovalori della matrice di rigidità e ciò non dovrebbe alterare significativamente la soluzione.

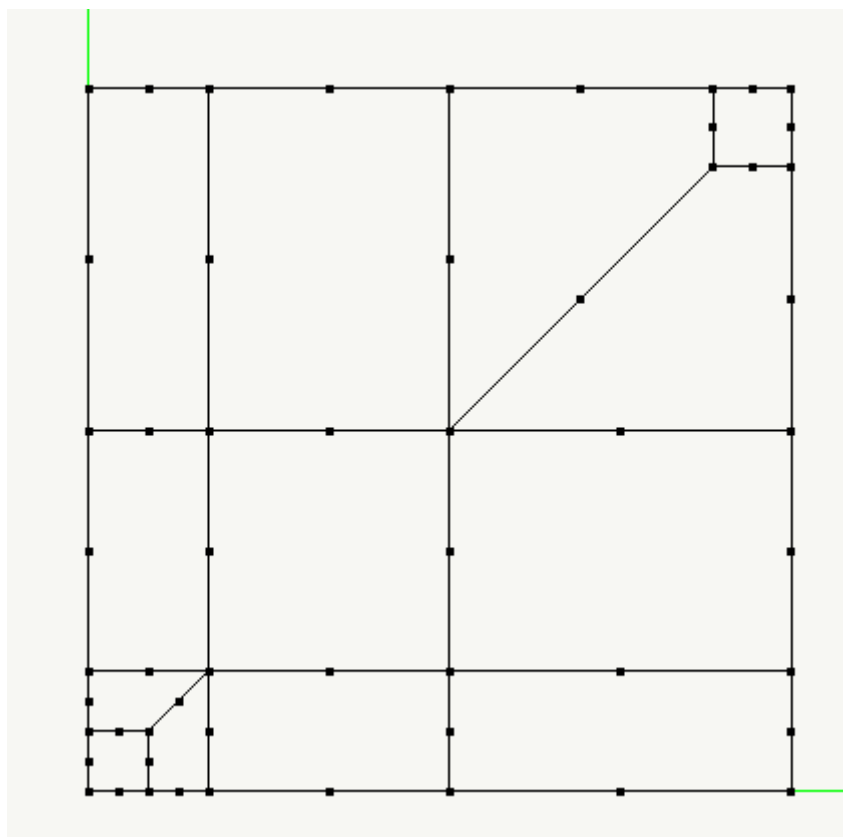
Nel caso però di elementi "scatolari", tale rigidità fittizia può alterare, anche se si ritiene non significativamente, la soluzione.

È anche possibile accedere alle opzioni Avanzate della sezione ed assegnare un moltiplicatore del valore di drilling. Zero indica che non si avrà alcun valore fittizio aggiunto alla matrice. Se poi lo si desidera, si può attivare la ricerca della situazione di planarità. Dove l'assemblaggio degli elementi concorrenti nel nodo è quasi-piano, si impiegherà il coefficiente fittizio alterato dal moltiplicatore assegnato, dove vi sono elementi concorrenti non complanari non verrà assegnato alcun valore aggiuntivo.

Nota sulla rappresentazione delle tensioni

La tensione dovuta alla flessione, valutata sulle fibre più esterne, è calcolata in Nòlian in generale - per le rappresentazioni - assumendo un comportamento lineare delle tensioni (regime elastico). Trattandosi di una rappresentazione e non essendo noto il regime di distribuzione in questa fase, il procedimento è più che accettabile. Va notato però che per questo elemento se si raggiunge una distribuzione plastica delle tensioni, che coinvolga tutta la sezione, la differenza tra i valori ottenuti con le due distribuzioni differisce di $4/3$ essendo maggiore la tensione che si ottiene, a parità di momento, con la distribuzione elastica. Quindi non desti meraviglia se la tensione di snervamento, nelle rappresentazioni appaia maggiore di quella prevista. Il valore numerico invece non è affetto da questa differenza puramente rappresentativa. Va inoltre ricordato che il criterio plastico ha forma ellittica e pertanto in caso di tensioni biassiali la tensione ultima è superiore a quella monoassiale. Si esamini, a questo proposito, il dominio del materiale nell'ambiente MatTest.

Test di validazione

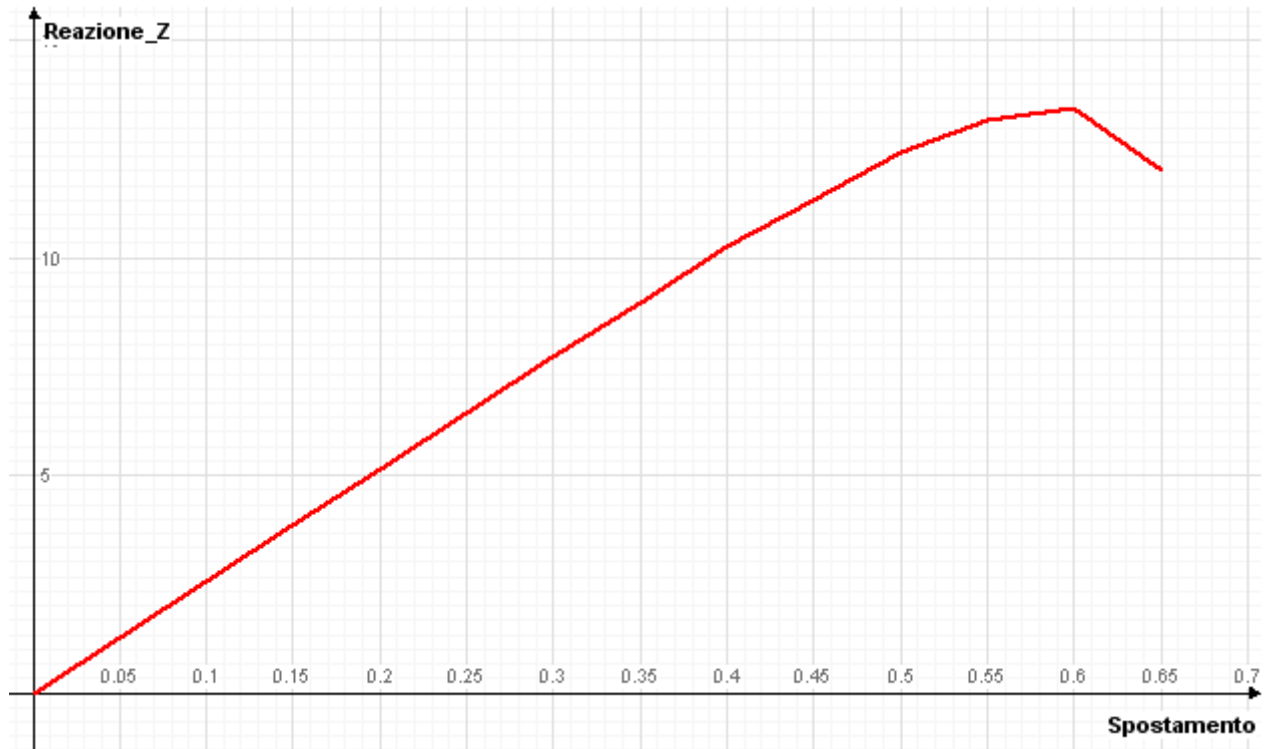


Mesh di un quarto della piastra usata per il test

Dai dati sperimentali di Duddek et al.: "Preliminary report IASS Symposium held in Darmstad, Werner-Verlag Dusseldorf, July

1978., citati anche da E. Hinton; D. R. J. Owen: "Finite Element Software for Plates and Shell", Pineridge Press, Swansea 1984

Una piastra in calcestruzzo, quadrata, di lato 177.0 cm, di spessore 6.5 cm armata con una rete superiore costituita in entrambe le direzioni da armatura per 1.93 cm²/m e inferiore di 3.97 cm²/m a distanza di 0.9 cm dalle facce, con forza concentrata in centro e appoggiata agli angoli. Il calcestruzzo ha Modulo di Elasticità 1640.0 kN/cm², coefficiente di Poisson 0.0, resistenza ultima 4.30 kN/cm² e l'acciaio con Modulo di elasticità 20100.0 kN/cm², tensione di snervamento 60.0 kN/cm² e modulo plastico di 700.0 kN/cm². Il carico di rottura sperimentale risulta di 54.0 kN. Nel test con l'elemento 8 nod con 8 layer di calcestruzzo e 4 per le armature, si è ottenuto un carico limite di 53.2 kN. Nella figura del diagramma si noti che, avendo modellato solo un quarto di piastra, il carico ultimo risulta 13.47 kN.



Curva forza-spostamento della piastra in calcestruzzo

Questo elemento può anche essere a 4 nodi. Per impiegare questo tipo di elemento invece che l'Elemento shell 3 o 4 nodi è necessario impiegare un "wrapper" che associ all'elemento 4 nodi le caratteristiche già descritte per l'8 nodi. Una volta definite tali caratteristiche, è sufficiente attivare il materiale "4 Nodi Layer" e ad esso assegnare il materiale predisposto per l'8 nodi.

Nota sugli elementi guscio disponibili

Shell4

Se non si assegna un materiale non lineare, viene impiegato un elemento shell a 3 o 4 nodi con le caratteristiche elastiche assegnate in Nòlian.

PlaneStress

Se viene impiegato un materiale ND su un elemento a 3 o 4 nodi, viene impiegato un elemento lastra-piastra con comportamento membranale secondo il materiale non lineare assegnato, e a comportamento elastico lineare per la componente flessionale.

DagShell

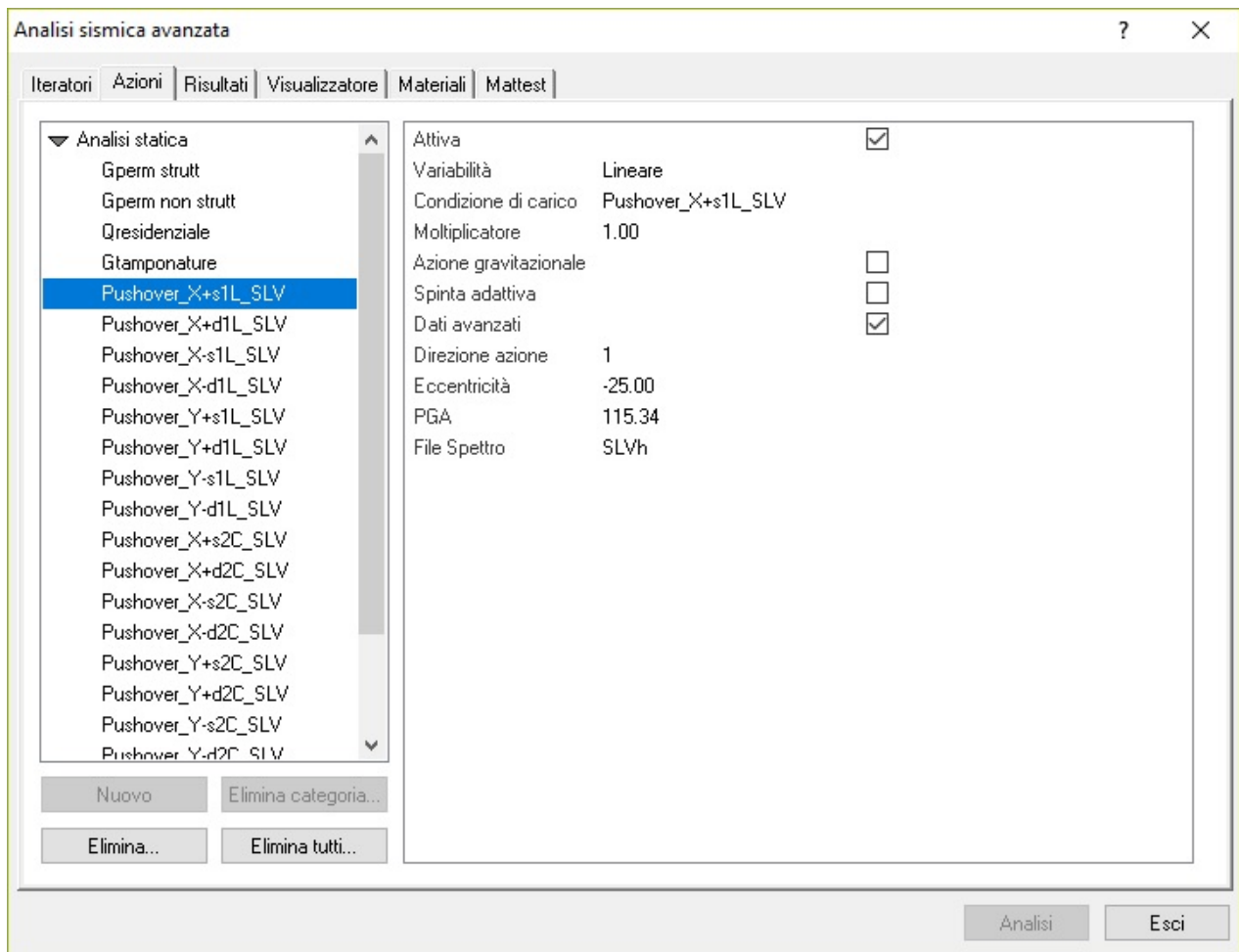
Se viene impiegato un materiale per 8 nodi o No-Tension, viene impiegato l'elemento a layer ad 8 nodi oppure l'elemento a layer a 4 nodi se si è impiegato il wrapper "4 nodi layer".

Elementi finiti Solidi

Brick 8 nodi

Elemento isoparametrico a 8 nodi può essere costituito dai materiali non lineari Elastico, Elastoplastico secondo i criteri di von Mises e Drucker-Prager e il materiale Geo. Non supporta il materiale Elastoplastico J2. Non ha rigidità per le rotazioni e pertanto tali gradi di libertà, se privi di rigidità derivante da altri elementi connessi, devono essere eliminati con dei vincoli. Questo elemento differisce profondamente da quello impiegato in analisi lineare e presenta minore velocità di convergenza.

Le azioni



Il dialogo delle "Azioni" consente di definire un numero qualsiasi di azioni di carichi, spostamenti etc. contemporaneamente variabili nel tempo con leggi diverse

Le azioni governano i fattori esterni agenti sulla struttura che possono essere forze, spostamenti, accelerazioni, velocità. Le azioni hanno significato simile, se non identico, sia nell'analisi per passi che nell'analisi nel transitorio. Un'azione, sostanzialmente, specifica il tipo di variabilità delle azioni esterne a essa associate. A esempio, per un'analisi pushover si vorrà che una condizione di carico vari linearmente nello spazio della storia di carico. Si noti che si possono avere più azioni agenti contemporaneamente e quindi con legge di variazione diversa. Le azioni sono state divise in quattro famiglie per consentire un'assegnazione più agevole benché concettualmente rispondano a un concetto unico.

Le azioni statiche

Sono azioni di variabilità costante o lineare, secondo un moltiplicatore assegnato, che sono associate a una condizione di carico.

Questo tipo di azioni possono essere definite "gravitazionali" o meno. Questa definizione viene usata ESCLUSIVAMENTE per i metodi automatici di analisi in due fasi: una con le azioni definite gravitazionali, ed una seconda con le altre. È un uso tipico per l'analisi di spinta.

Variabilità delle azioni in transitorio

Nel transitorio si hanno le seguenti leggi di variazione nel tempo:

1. Costante

2. Lineare
3. Rettangolare
4. Triangolare
5. Sinusoidale
6. Forzante

Quest'ultima legge di variazione viene affidata a una delle forzanti presenti nel relativo [archivio](#).

Il formato del file è un file ASCII su due colonne: la prima il tempo, la seconda il valore di accelerazione. Fare attenzione a che le unità di misura siano compatibili;

L'azione statica come forzante

L'azione statica a variazione lineare è impiegata per l'analisi di spinta (pushover) affidando da essa l'azione statica equivalente.

Tale azione è in genere invariata per il corso dell'analisi incrementale di spinta. Se però si desidera effettuare una analisi pushover adattiva ([vedi](#)) occorre che l'azione sia caratterizzata anche dai parametri che la hanno determinata ed essi sono: spettro di risposta, accelerazione spettrale, direzione ed eccentricità dei punti di applicazione (come distanza e non come percentuale). Questi valori possono essere assegnati direttamente o vengono assegnati con la procedura specifica di generazione delle azioni pushover ([vedi](#)). L'analisi pushover adattiva viene effettuata solo se l'analisi avviene attraverso la lista delle azioni ([vedi](#)) ed è attivo il flag Spinta adattiva.

Azioni di accelerazione in transitorio

Si tratta dell'accelerazione applicata a tutte le masse della struttura tramite un variazione descritta con le modalità sopra indicate, agente in una direzione coordinata globale indicata e con un tempo di inizio e di fine. Poiché si possono assegnare più Azioni, si possono applicare anche accelerogrammi affidati a diverse Azioni agenti secondo diverse direzioni contemporaneamente.

Azione di condizione di carico in transitorio

Si tratta della variazione nel tempo di una determinata condizione di carico secondo le leggi di variabilità sopra indicate. Poiché si possono assegnare più Azioni, si possono avere anche differenti condizioni di carico applicate in diversi punti della struttura con variazioni temporali diverse.

Azione di assegnazione diretta in transitorio

Consente di assegnare a una lista di nodi un valore di accelerazione, spostamento o velocità con le variazioni sopra descritte. Pertanto, a esempio, si potrà avere un andamento di spostamento su una parte di fondazione di una struttura e un andamento di spostamento diverso (tramite un'altra Azione) su un'altra parte di essa. I nodi ai quali è assegnata questa azione, non devono essere vincolati.

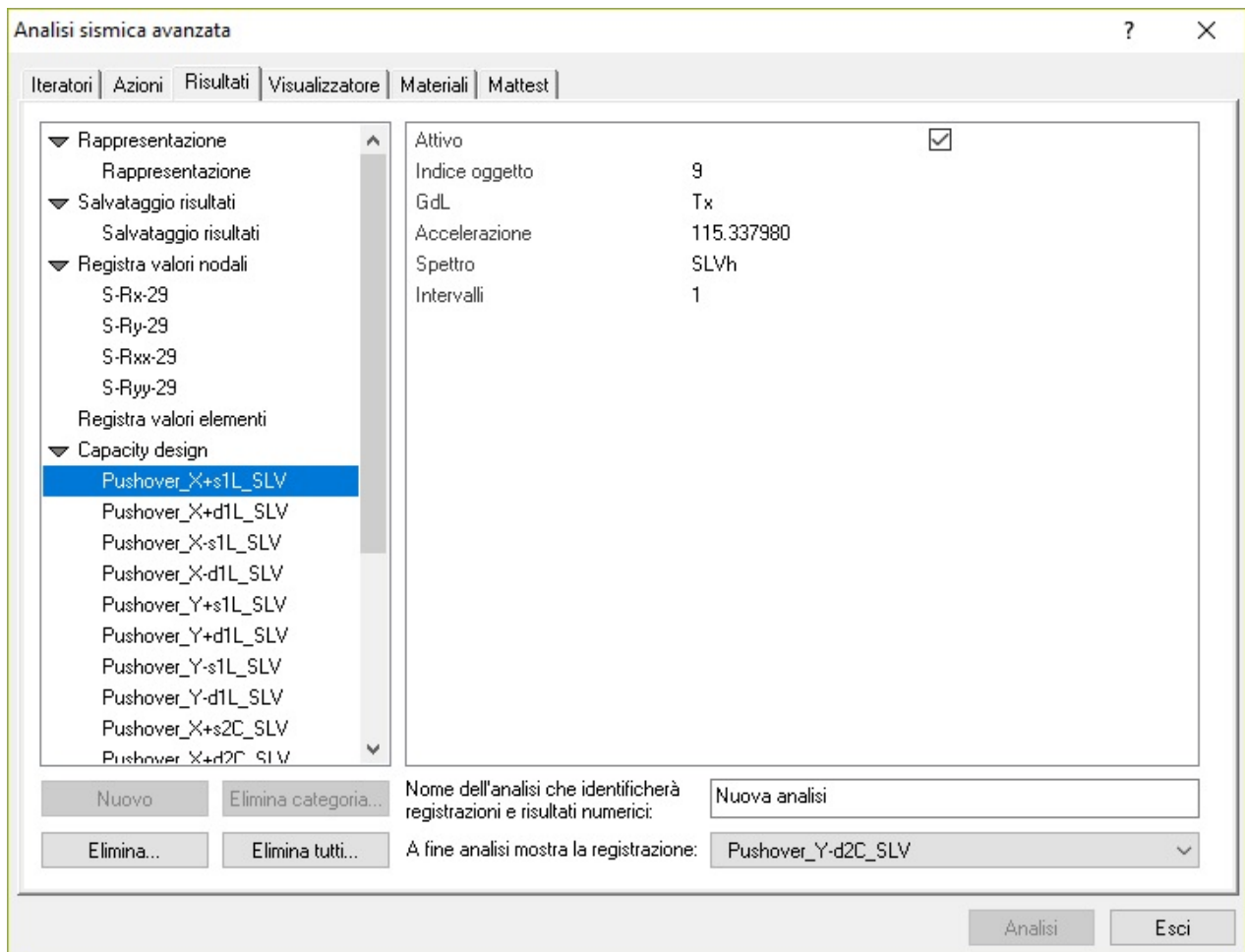
Questa azione opera sullo spostamento e pertanto si consiglia di assegnare spostamenti imposti in quanto, se si assegna la velocità o l'accelerazione, lo spostamento viene calcolato per integrazione della accelerazione o della velocità e ciò comporta una perdita di accuratezza.

I risultati

In questo capitolo vengono descritti i seguenti registratori:

- [Registratore dei valori nodali](#)
- [Registratore dei valori degli elementi](#)
- [Rappresentazione dei valori dei registratori durante l'analisi](#)
- [Registratore Capacity](#)
- [Registratore stati critici](#)
- [Monitoraggio sezione a fibre](#)
- [Registratore dei massimi](#)
- [Registratore Energia](#)
- [Rappresentazione](#)
- [Salvataggio risultati al passo](#)

Il registratore del [Monitoraggio sezione a fibre](#) è descritto nell'apposito capitolo,



Il dialogo dei risultati consente di attivare più "registratori" che monitorizzano l'andamento della soluzione

I "registratori" propriamente detti formano un file di testo con una coppia di variabili. Questo file di testo può essere immediatamente visualizzato alla fine dell'analisi, visualizzato quando lo si desidera oppure impiegato per ulteriori elaborazioni personali. I file dei registratori vengono messi nella cartella EE delle preferenze di Nòlian.

A questi si aggiungono due registratori "atipici" in quanto anch'essi operano sulla gestione dei risultati ma non formano un file di coppie di valori. Si tratta del registratore **Rappresentazione** e del registratore **Salvataggio Risultati**. Il primo consente la rappresentazione animata per passi di carico o temporali, il secondo abilita il salvataggio dei risultati, sempre per passi di carico o temporali.

Di questi due ultimi tipi di registratori si può avere una sola istanza per ogni analisi. Per i registratori tipici invece se ne possono avere in numero indefinito per monitorare contemporaneamente più coppie di variabili.

Per aprire il [Visualizzatore](#) alla fine dell'analisi con i dati del registratore voluto, selezionarne il nome dal pop-up: "Alla fine dell'analisi mostra:".

In questo dialogo si può assegnare il nome che verrà dato allo stream dei risultati e che sarà presentato nella lettura di tali risultati a dialogo o nelle rappresentazioni.

Registratore dei valori nodali

Assegnato l'indice di un nodo e un grado di libertà, registra i valori del nodo rispetto all'intervallo temporale o alle risultanti delle forze applicate ai piani coordinati. Nel caso della registrazione Tempo-Spostamento viene mostrato il moltiplicatore delle forze. Si possono registrare:

- Spostamento (rotazione)
- Accelerazione
- Velocità
- Reazione
- Equilibrio
- Drift
- Reazione alla base

Nel caso si selezioni il Drift, (spostamento relativo tra due nodi), vengono presentati altri campi e si deve assegnare il secondo nodo e, se si attiva l'opzione "Relativo", viene calcolato il rapporto tra spostamento relativo e distanza tra i due nodi.

Poiché il drift è spesso usato come valore per valutare il rischio sismico, è opportuno precisare che il drift viene calcolato nella direzione assegnata per lo spostamento nodale e, se relativo, sulla distanza complessiva tra i due nodi in configurazione indeformata.

L'opzione "Piano XY" consente invece di considerare solo lo spostamento relativo tra i nodi su un piano parallelo al piano globale xy e la lunghezza per il "drifting relativo" (relativo si intende in questo caso relativo alla lunghezza) è la distanza dei nodi lungo l'asse globale Z. Questa è la situazione più frequente dell'uso del drifting relativo di interpiano.

Se si seleziona Reazione alla base, viene registrata la reazione totale della struttura che rappresenta la risultante, a meno del segno, delle forze applicate. In questo caso non vengono rappresentati gli altri campi del dialogo in quanto questa particolare rappresentazione attiene all'intera struttura e non ad un particolare nodo e può essere effettuata solo relativamente al tempo. Questo valore può essere impiegato nel registratore dei massimi nodali (vedi).

Registratore dei valori degli elementi

Assegnato l'indice di un elemento e l'indice di uno dei suoi nodi, registra i valori di sforzo, tensione o deformazione nell'elemento.

I comandi disponibili sono i seguenti:

- Forza Assiale
- Taglio Y
- Taglio X
- Momento Torsionale
- Momento Y
- Momento Z
- Sforzo-Deformazione Assiale
- Momento-Rotazione Y
- Momento-Rotazione Y
- e-q
- p-q
- Forza-Spostamento Assiale
- Taglio-Spostamento Y
- Taglio-Spostamento Y

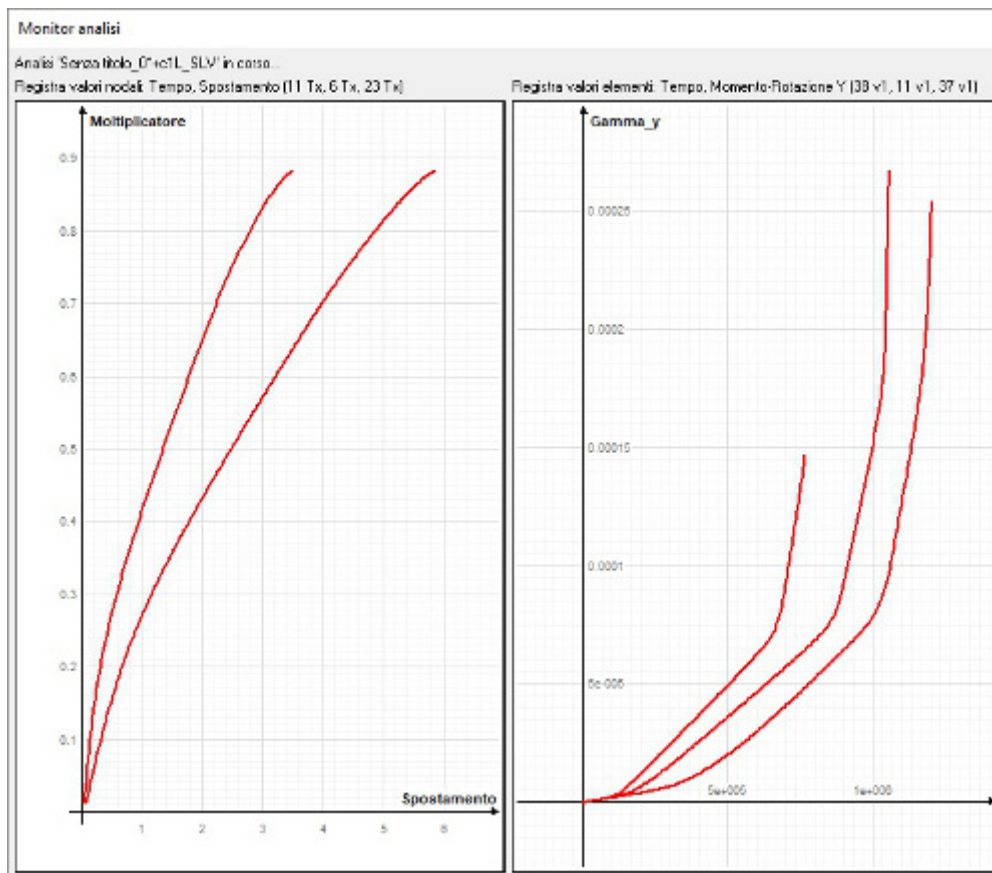
I primi sei (da Forza assiale a Momento Z a M_z) servono a diagrammare le quantità indicate rispetto alla scala temporale o di reazione alla base.

I comandi seguenti (che riguardano sforzi-deformazioni consentono di avere diagrammi di coppie deformazione-tensione in un sezione, ove l'elemento lo consenta (tipicamente elementi trave con sezioni) oppure elemento con materiali uniassiali

I comandi e-q e p-q sono relativi alle variabili nello spazio p-q dei modelli del suolo, ovvero le componenti isostatiche e deviatoriche dei tensori di sforzo e di deformazione (tipicamente negli elementi Brick).

I comandi Forza-Spostamento sono invece i valori forza-spostamento e sono disponibili per gli isolatori.

Monitor analisi

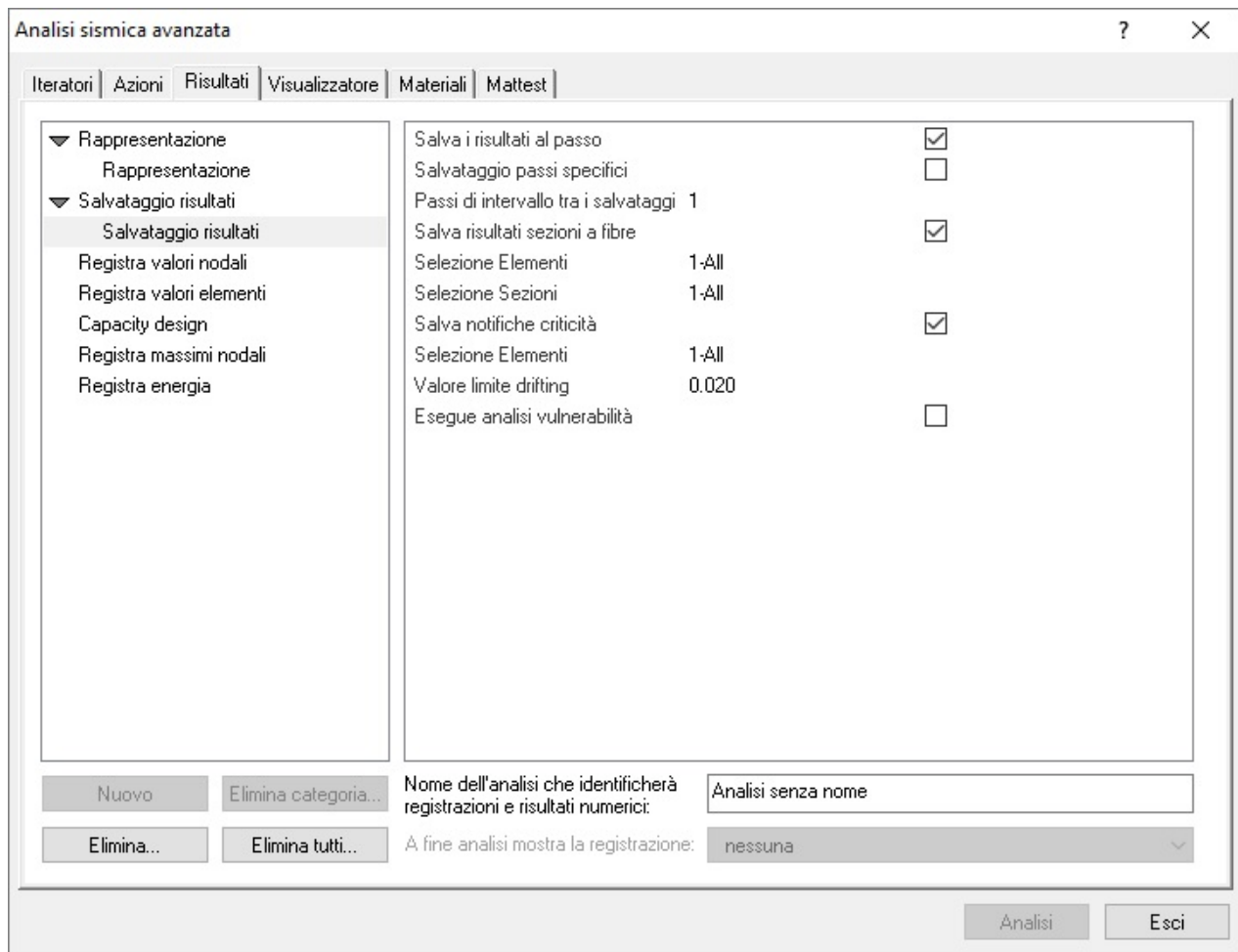


Questo registratore consente di rappresentare durante l'analisi i valori di altri registratori già assegnati. Assegnati i registratori voluti (Nodale, Elemento, Energia, Massimi, ma non Capacità) questi possono essere selezionati da una apposita lista del registratore del Monitor Analisi. Possono essere rappresentate contemporaneamente le tracce di più registratori della stessa famiglia. Per evitare incongruenze, scelto un registratore, i nomi dei registratori con esso non compatibili saranno esclusi dalla lista e non potranno essere selezionati. E' possibile attivare fino a 4 finestre che opereranno contemporaneamente. Questa funzione è utilissima per seguire durante l'analisi il procedere della esecuzione anche di più nodi o elementi ed anche in più finestre.

Nel caso il Monitor Analisi sia assegnato ed attivo, esso opererà automaticamente e non sarà necessario assegnarlo alla analisi per lista.

Terminata l'analisi, la finestra del dialogo non viene chiusa: si ha un avviso che l'analisi è terminata e quindi si potrà, se lo si desidera, chiudere i dialoghi premendo ESC o RETURN.

Salvataggio risultati al passo



Questo registratore consente di attivare la registrazione dei risultati dell'analisi passo per passo o a intervalli di un numero di passi assegnato o a dei passi indicati. Ad esempio ogni 10 passi oppure ai passi 10,12,15. Le due possibilità sono governate dal check-box *Salva passi specifici*. Se non è vistato, si può assegnare il numero di *Passi di intervallo tra i salvataggi*. Se invece è vistato, si possono assegnare i *Passi ove effettuare i salvataggi* assegnando i passi voluti separati da una virgola. Ovviamente il salvataggio dei risultati al passo aumenta il tempo di elaborazione e rende più grande il file del progetto.

L'opzione *Salva sezione a fibre* consente di salvare i risultati inerenti lo stato tensionale e deformativo delle fibre degli elementi Trave a Fibre. Si veda il capitolo [Monitoraggio sezione a fibre](#).

L'opzione *Salva notifiche criticità* consente di salvare le informazioni relative al raggiungimento di stati critici (stati limite, tipicamente) di elementi trave a fibre. Questa funzionalità è descritta nel capitolo [Registratore stati critici](#).

Registratore Capacity

Si tratta di un registratore di valori nodali specializzato per registrare la coppia di valori spostamento-forza alla base della struttura per formare un classico diagramma pushover. Inoltre esso elabora i dati così ottenuti per avere tutti i risultati previsti dal Metodo N2 oltre che per una più sofisticata analisi con lo spettro di Capacità (CSM).

Inoltre riporta i valori limite e calcola i PGA associati. Le curve ottenute possono essere visualizzate nel Visualizzatore dove è possibile anche leggere i risultati numerici.

Metodo N2

Gamma	1.3627517	Tc	0.31731822	d*	6.3361742
m*	16.557392	Se(T*)	164.23118	d*u	12.885693
Fy*	2163.5761	q*	1.2568266	F max	3077.5700
dy*	5.0414067				6.34 <= 12.89
T*	1.2341434				

Metodo CSM

Teq	1.3359067	Nieq	5.0618206	PPd	4.4572409	PPa	98.599691
-----	-----------	------	-----------	-----	-----------	-----	-----------

Stato plastico

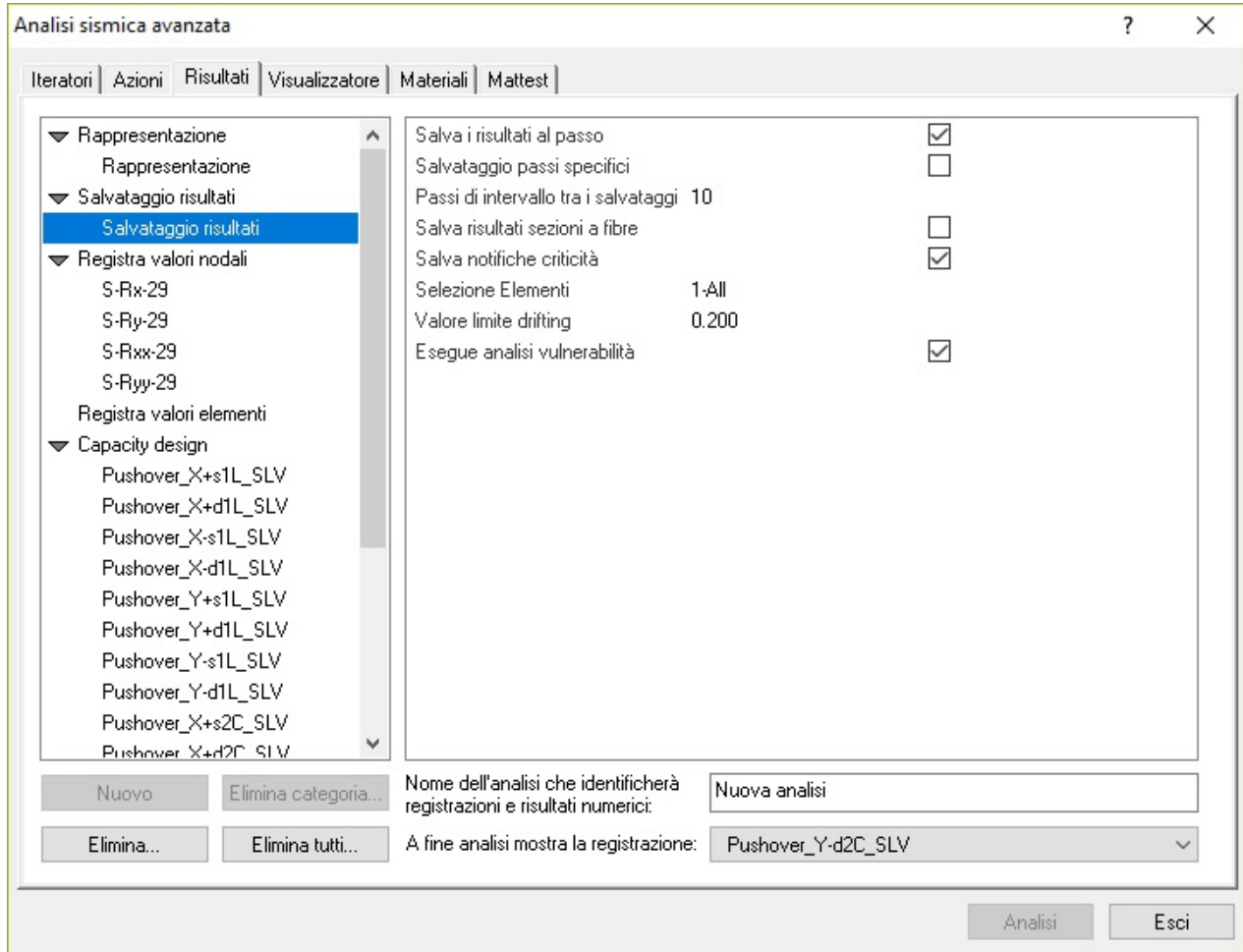
	Prima plasticizzazione	Danno severo	Prima rottura
Spostamento	8.8800000	n.d.	n.d.
PGA	173.12157	n.d.	n.d.

I risultati dei registratori Capacity vengono salvati sul file della struttura e sono disponibili a ogni riapertura del file. Si possono attivare più registratori capacity per monitorare contemporaneamente più nodi o usare parametri di elaborazione diversi.

Oltre alle assegnazioni già viste per il registratore nodale, deve essere assegnato uno spettro elastico già costruito e l'accelerazione spettrale.

Per il Capacity Design è l'analisi Pushover si veda: [Analisi Pushover](#)

Registratore stati critici

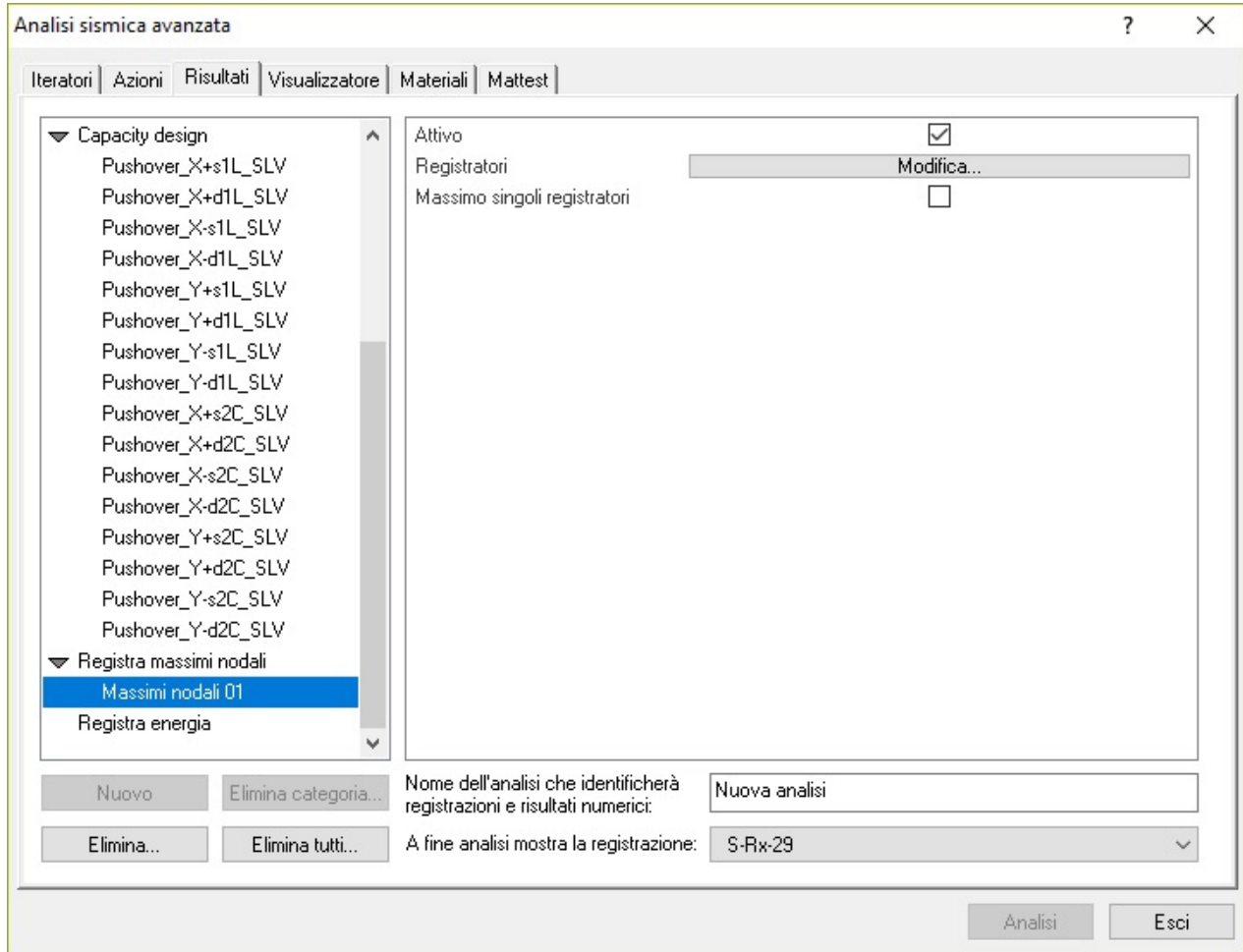


Con il termine "stati critici" si intendono degli stati che si verificano negli elementi nei quali vengono raggiunti dei valori limite.

Per maggiori dettagli si veda [Analisi di vulnerabilità](#).

Questa funzionalità si attiva dal registratore di Registrazione risultati contrassegnando l'opzione "Analisi di vulnerabilità". Vengono registrati, a intervalli di passi indicati, gli eventi critici meglio descritti nel citato capitolo dell'analisi di vulnerabilità. Le verifiche e la registrazione richiede un consistente onere computazionale per cui si raccomanda di limitarla agli intervalli ed agli elementi necessari. Questa funzionalità si attiva ESCLUSIVAMENTE per le analisi effettuate tramite la lista di analisi. Anche se si desidera effettuare una sola analisi, occorre includerla in tale lista. Se si sta effettuando un'analisi di spinta (tipicamente con un solutore di Newton-Raphson) viene richiesta la presenza di un registratore di capacità per la post-elaborazione delle analisi di vulnerabilità. Se si effettua un'analisi in transitorio, il registratore di capacità, non è necessario. Gli stati critici possono essere rappresentati attivandone la rappresentazione dal dialogo delle Rappresentazioni. Se si attiva anche il Navigatore, si può "esplorare" l'evoluzione degli stati critici durante i passi di analisi. In questo caso è necessario che siano presenti almeno due passi di registrazione. Nel caso di analisi di vulnerabilità con la analisi pushover e il registratore di capacità, accedendo alla voce Vulnerabilità dei risultati si potranno visionare i risultati di vulnerabilità secondo normativa e secondo il "SismaBonus", se invece si eseguono più analisi in transitorio, si avrà la lista degli stati critici.

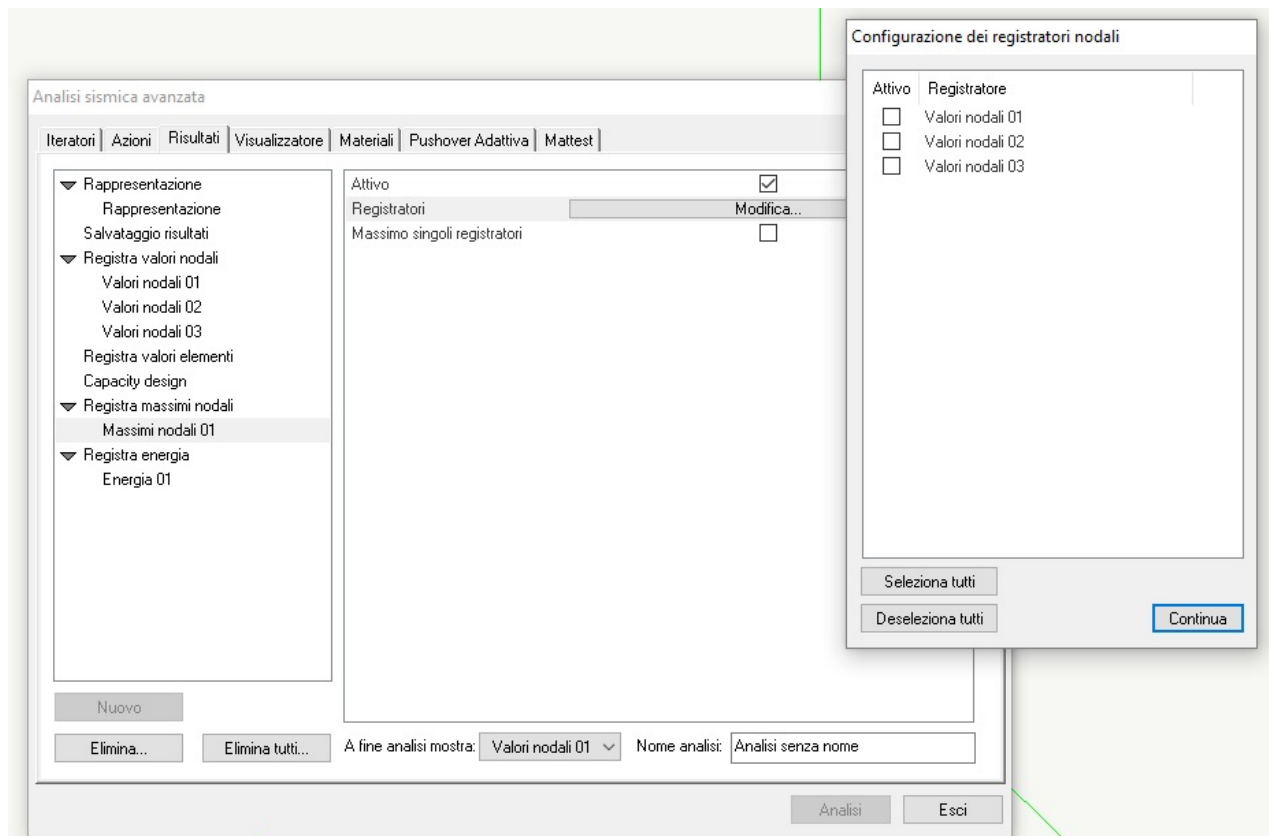
Registratore dei massimi



Introduciamo questo registratore con un esempio. Vogliamo monitorare il massimo spostamento relativo interpiano (drifting) per tutti i piani di un edificio. Con il registratore nodale possiamo registrare l'andamento del drifting di ciascun piano indicando al registratore i nodi di riferimento dei due piani. Otterremo tanti registratori quanti sono i piani. Per ottenere poi il valore massimo, dovremmo consultare tutti questi registratori e estrarre il valore massimo. Con il Registratore dei massimi si possono selezionare i registratori nodali voluti e quindi il Registratore di Massimo ad ogni passo valuterà il valore massimo di tutti i registratori scelti e si otterrà un unico grafico con tali valori. Questo è solo un esempio perché questo concetto aggregativo è molto potente e si può applicare a molti altri casi.

Vi è un'ulteriore possibilità. Attivando l'opzione massimo singoli registratori, invece di calcolare il massimo tra i registratori assegnati per ogni singolo passo, verrà calcolato il massimo valore raggiunto da ogni singolo registratore in tutti i passi. Tornando all'esempio del drifting di piano si avranno i massimi spostamenti relativi raggiunti in tutti i passi piano per piano. Questa possibilità si ha anche per una analisi dinamica non lineare e pertanto si potranno avere gli spostamenti relativi di piano massimi correlati ad una analisi con un accelerogramma.

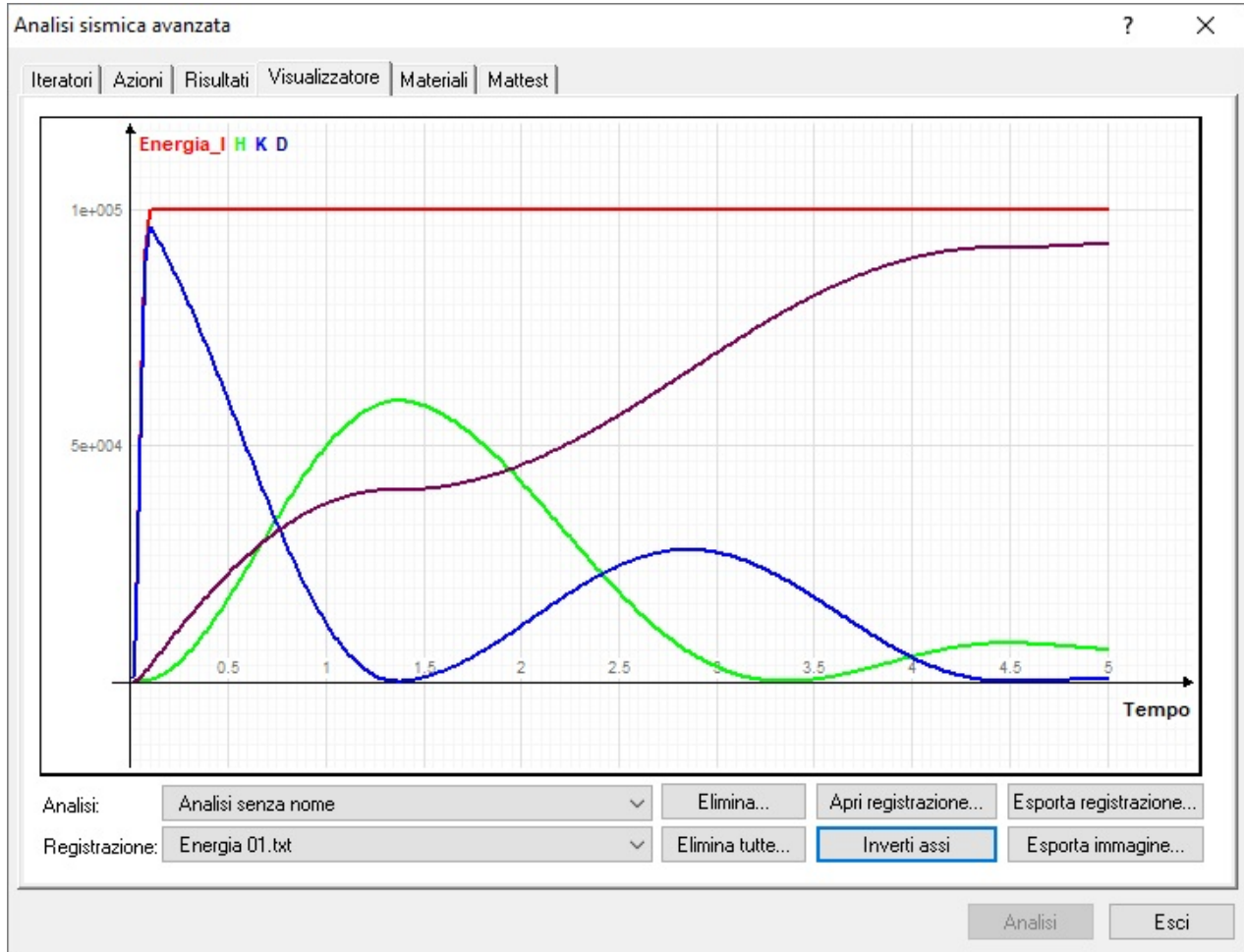
In questo ultimo caso, i valori dei singoli registratori verranno graficizzati associando i valori raggiunto all'ordinata 1, 2, 3... per individuarli. Può essere opportuno quindi ordinare i registra nel modo voluto. Tramite i comandi Ordina spostando su oppure giù, il nome del registratore nel menu dei registratori abilitati verrà spostato nella posizione voluta.



Per attivare i registratori che partecipano al calcolo del massimo, si apre una lista, tramite il bottone Modifica, e si "spuntano" i registratori nodali voluti.

I registratori nodali prescelti devono essere omogenei e cioè, non ha senso cercare il massimo tra grandezze diverse come velocità e spostamento o drifting. Pertanto quando si seleziona un registratore, i registratori nella lista che non siano omogenei al registratore già selezionato, non vengono rimossi dalla lista.

Registratore Energia



Questo registratore consente di registrare il bilancio energetico della struttura monitorando l'energia di input, di deformazione, di smorzamento e cinetica. Poiché l'energia è ottenuta per integrazione delle equazioni del moto, questo registratore produce risultati solo se si effettua una analisi in transitorio. Non tutti gli elementi dissipativi sono supportati e pertanto, se è richiesta una particolare attenzione per questi dispositivi, occorre tener presente questa circostanza.

Le quattro espressioni dell'energia vengano integrate contemporaneamente, il visualizzatore consente di visualizzare una singola traccia o tutte le quattro tracce (in colori diversi) contemporaneamente. Quest'ultima possibilità si ottiene selezionando la voce "Tutte". Selezionando la voce "Bilanciamento" si ottiene il bilanciamento energetico che, in caso di totale dissipazione dell'energia, presenta tutti valori prossimi allo zero.

Segue un appunto sulla teoria sottostante questo registratore.

Dalla equazione del moto:

$$M y_t'' + C y' + K y = 0$$

y è lo spostamento relativo della struttura rispetto al suolo mentre y_t è lo spostamento totale e cioè $y_t = y_g + y$ dove y_g è lo spostamento del suolo. Sostituendo:

$$M y_t'' + C y' + K y = - M y_g''$$

I termini rappresentano forze e, nell'ordine, sono: forza cinetica, di smorzamento, di deformazione (elastica + isteretica).

Integrando rispetto a y si ha il bilancio energetico.

$$\int M \ddot{y} dy + \int C \dot{y} dy + \int K y dy = - \int M \ddot{y}_g dy$$

Volendo integrare rispetto al tempo si sostituisce $dy = \dot{y} dt$.

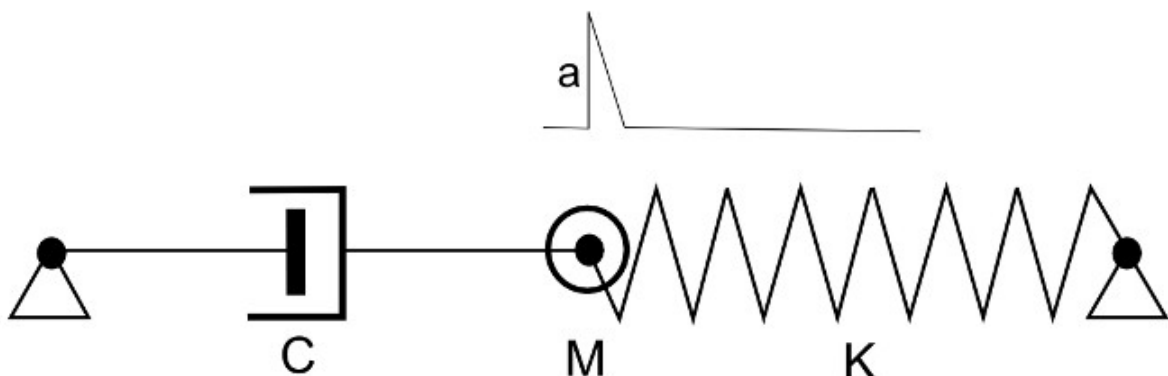
$$E_k + E_d + E_h = - E_i$$

Dove i pedici k, d, h, i indicano, nell'ordine, energia cinetica, di smorzamento, di deformazione, di ingresso (input).

L'integrazione numerica, impiegando una banale regola del trapezio, per il primo termine diviene:

$$\frac{1}{2} M \sum (\ddot{y}_0 + \ddot{y}_1) (d_1 - d_0)$$

Un esempio illustrativo dei risultati del registratore energia



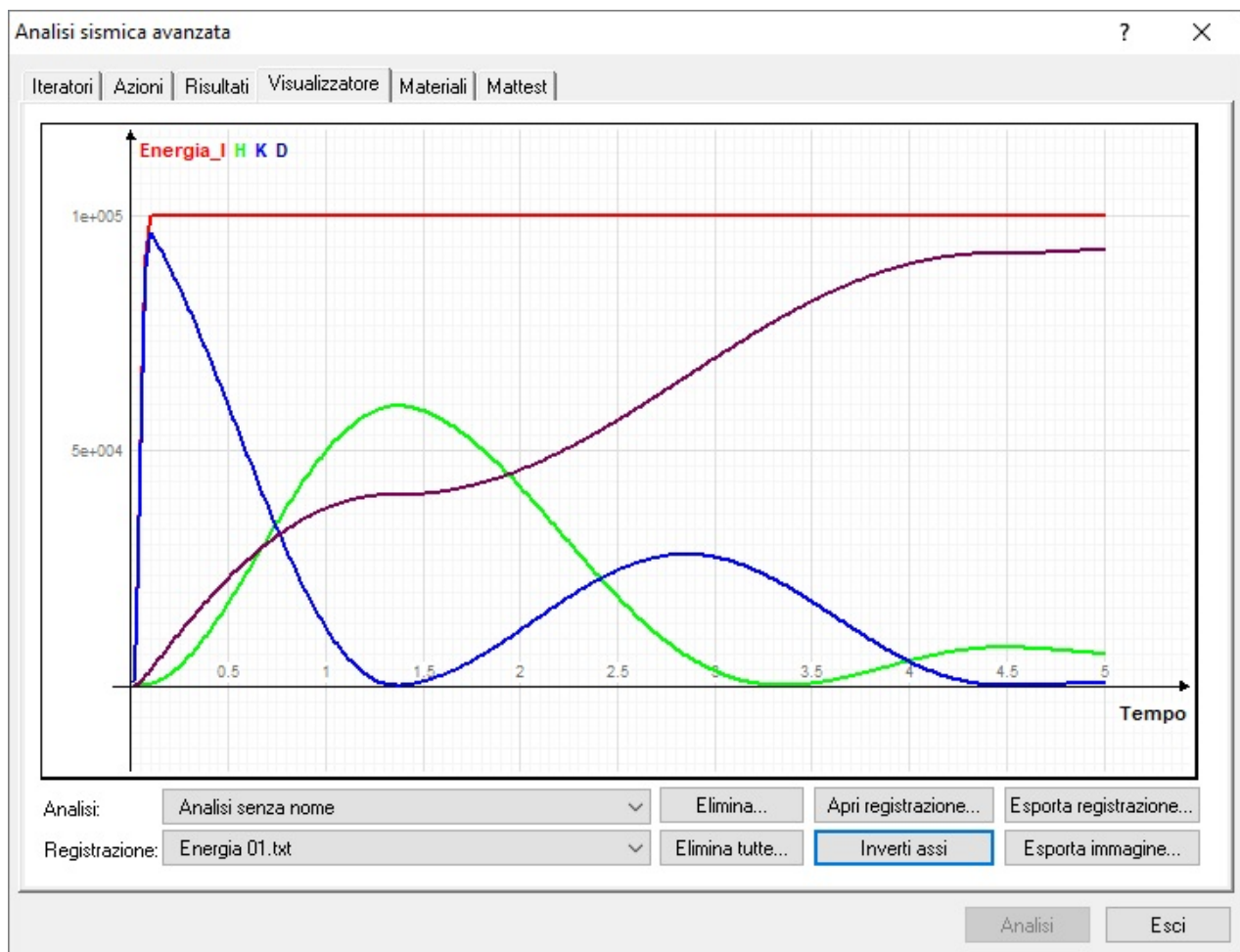
Usiamo a titolo illustrativo un modello molto semplice costituito da una molla e da un elemento dissipatore viscoso, posti in serie. Al nodo tra i due elementi abbiamo assegnato una massa nodale pari a 100.

Nel nostro esempio abbiamo usato per la molla un elemento Boundary di rigidezza assiale 100 e per il dissipatore un elemento Asta con modulo di elasticità del materiale 10000 ed area 100. All'elemento Asta abbiamo associato un macro elemento dissipatore con velocità massima 10, forza massima 1000 e esponente del coefficiente di smorzamento 0.15. Infine abbiamo assegnato come azione un'accelerazione ad impulso triangolare di ampiezza 1000 e durata 0.1.

Come si vede, non abbiamo specificato le unità di misura adottate in quanto è sufficiente che siano congruenti.

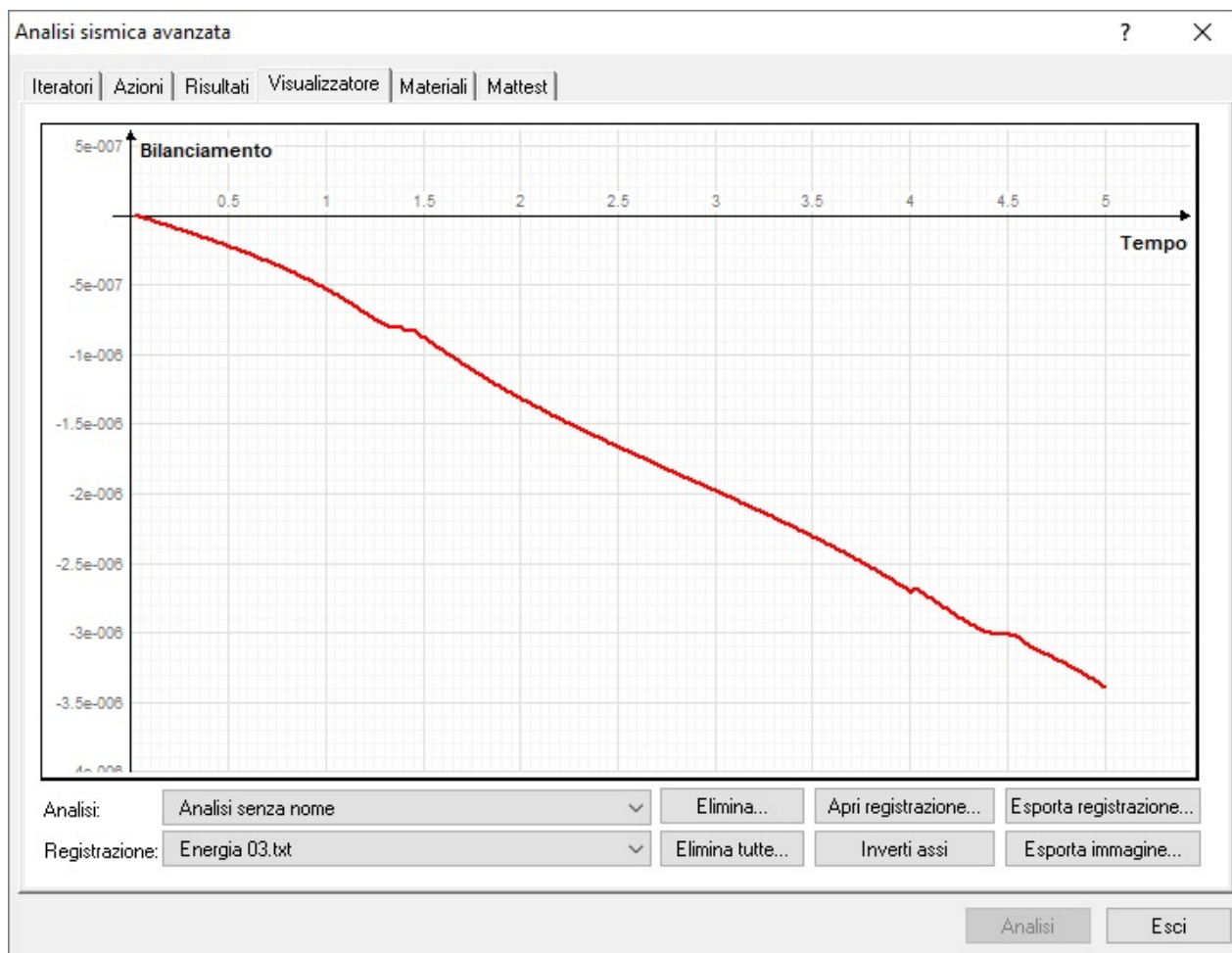
Abbiamo quindi effettuato un'analisi in transitorio con il metodo di Newmark con 500 passi della durata di 0.01 ciascuno.

Abbiamo attivato poi due registratori energia, uno con l'insieme dei quattro valori (input: rosso, cinetica: blu, isteretica: verde, smorzamento: marrone) ed uno di bilanciamento (immagine seguente).

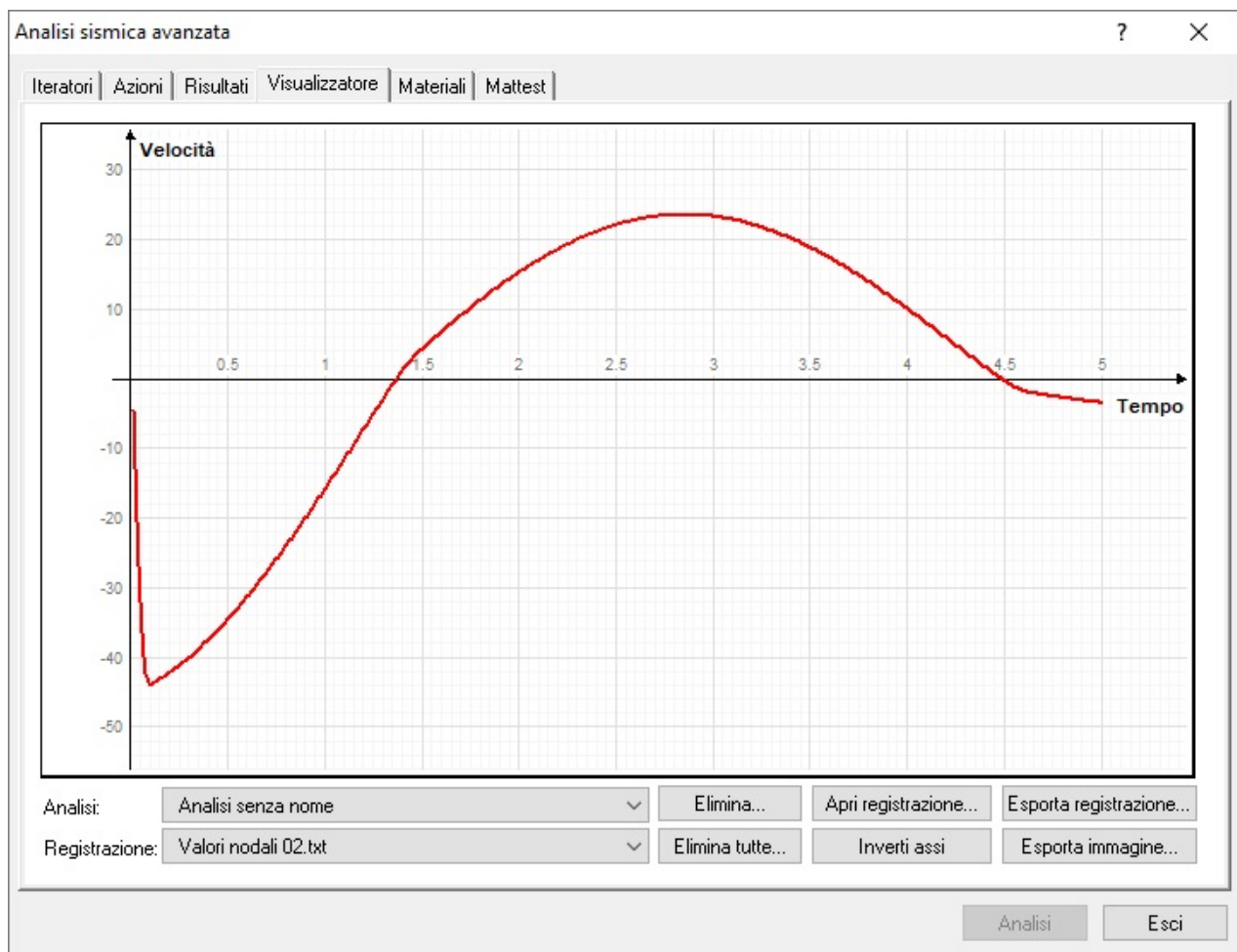


Si vede come l'energia di input resti costante, l'energia cinetica, dopo l'impennata iniziale, sia quasi in controfase con quella isteretica (di deformazione della molla) e l'attenuazione sia dovuta al crescere dell'energia di smorzamento del damper. L'energia di input è ovviamente $E_i = M a = 100 \times 1000 = 1.0e5$

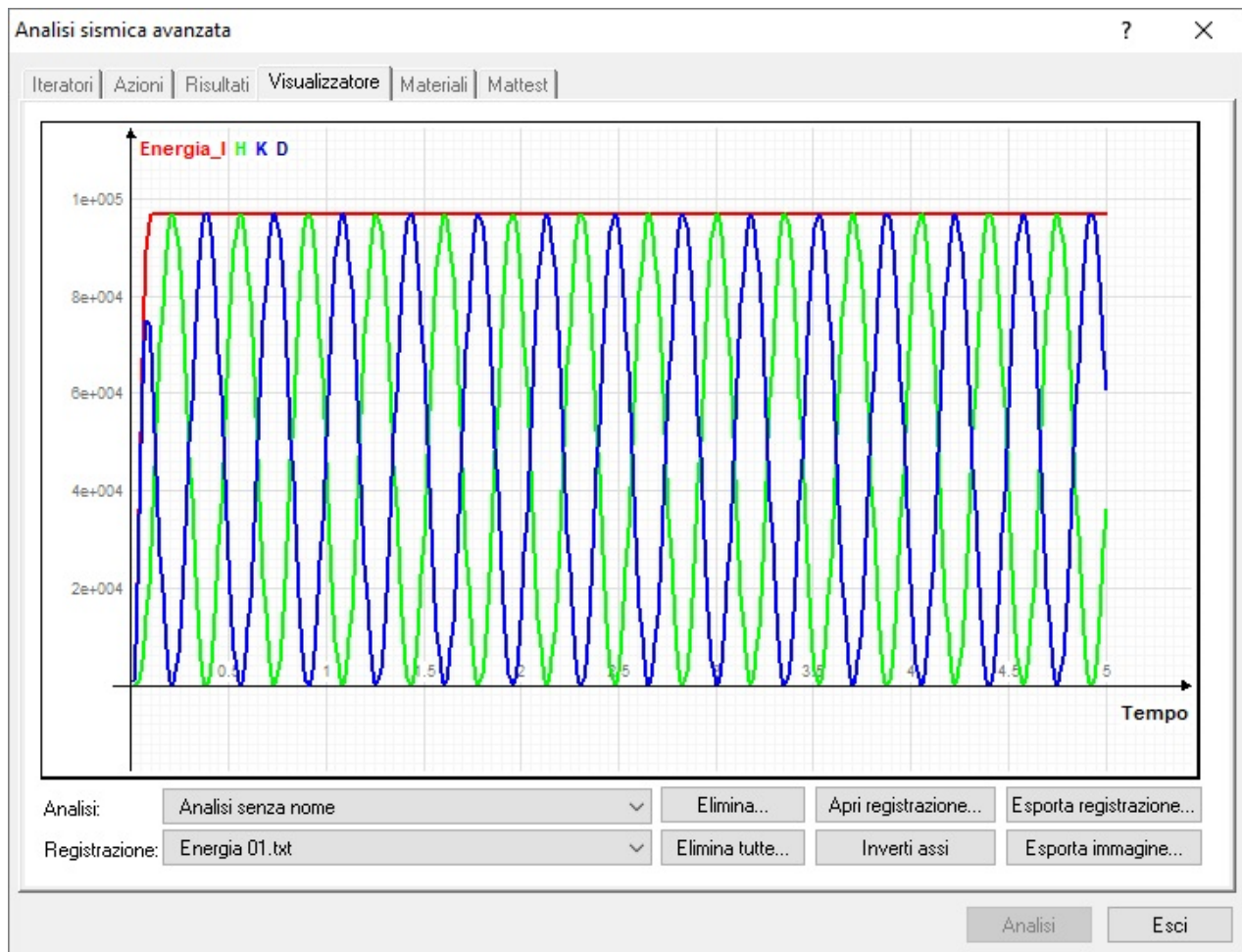
L'immagine seguente mostra come il bilancio energetico sia ben rispettato, questo perché non in tutti gli elementi è implementato il supporto del registratore di energia e questo registratore ci consente di valutare la completezza dell'operazione.



Si possono attivare altri registratori, ad esempio della velocità nodale (figura seguente).

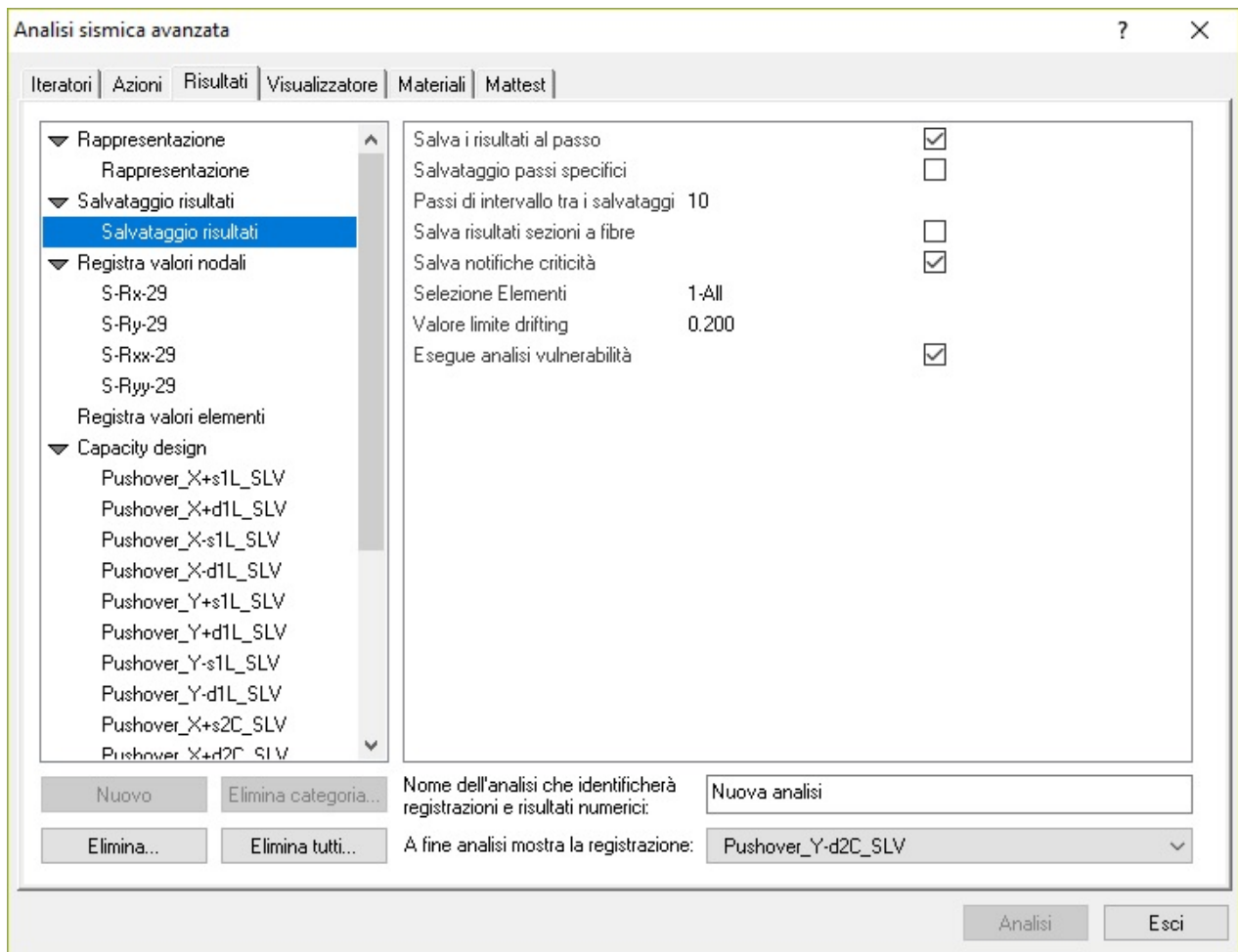


Infine, per vedere l'effetto del dissipatore, si può disassociare il materiale Dissipatore dall'elemento trave e si ottiene il bilancio energetico del modello senza smorzamento.



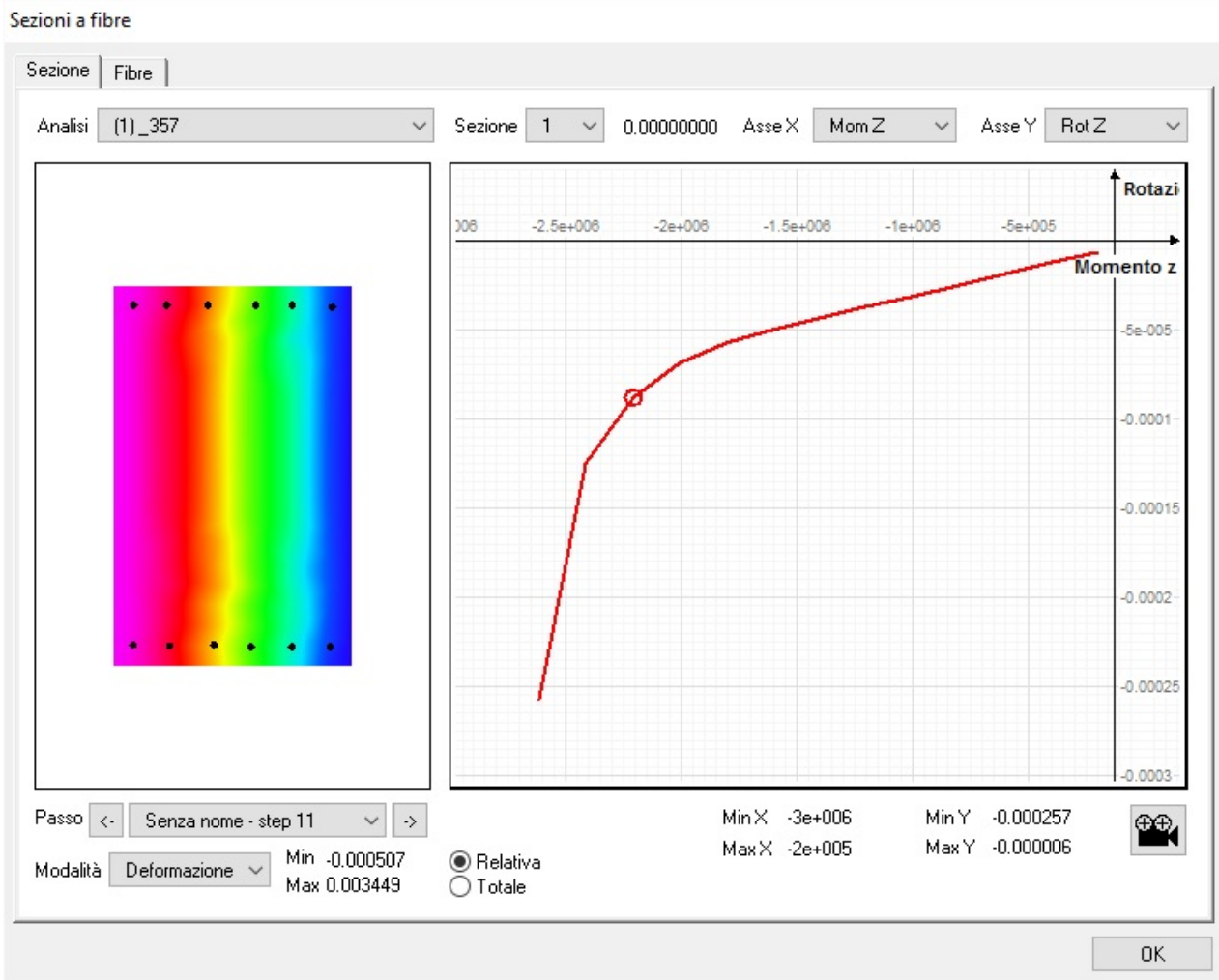
Lo stesso smorzamento potremmo ottenerlo con il materiale Viscoso, assegnandolo però ad un elemento Boundary in quanto all'elemento Asta non può essere associato un materiale Viscoso. In questo caso occorre assegnare il coefficiente di smorzamento C ricavandolo dalle precedenti assegnazioni tramite la relazione $F = C v^\alpha$, dove, assegnando forza e velocità massima prima assegnate al Damper, si ottiene $C = 708$. La rigidità deve essere quella dell'asta e ciò $E A$. Con queste assegnazioni si ottiene un identico quadro energetico.

Monitoraggio sezione a fibre



Il registratore *Salvataggio risultati* attivando il check-box *Salva risultati sezioni a fibre* consente di assegnare i parametri per la registrazione della storia momento/curvatura delle sezioni volute negli elementi voluti e, se si attiva il check-box *Salva risultati singolo fibre*, anche della storia dello sforzo/deformazione di ogni fibra. Questa operazione è consentita solo per le *Sezioni a fibre* e non per altre sezioni e nemmeno per i materiali *Fibre calcestruzzo*.

Terminata con successo l'analisi, si può accedere al dialogo per la visualizzazione della storia delle sezioni a fibre dal menu *Risultati* alla voce *Sezioni a fibre*. A questo punto si può selezionare l'elemento voluto e si aprirà il dialogo. Occorre scegliere l'analisi e la sezione desiderata. Nel dialogo si hanno due pannelli.



Nel pannello di sinistra viene rappresentata la sezione sulla quale possono essere rappresentati, a mappa di colori, i seguenti risultati:

- Stato (elastico, snervato, rottura)
- Deformazione
- Tensione

Agendo sul menu sottostante, o sulle frecce ai lati di questo, si può scegliere il passo di analisi. Attivando l'icona che rappresenta, sulla destra, una macchina cinematografica, si avrà la rappresentazione in successione di tutti i passi. Spostando il mouse sulla sezione, un tooltip mostrerà i valori numerici nel punto voluto.

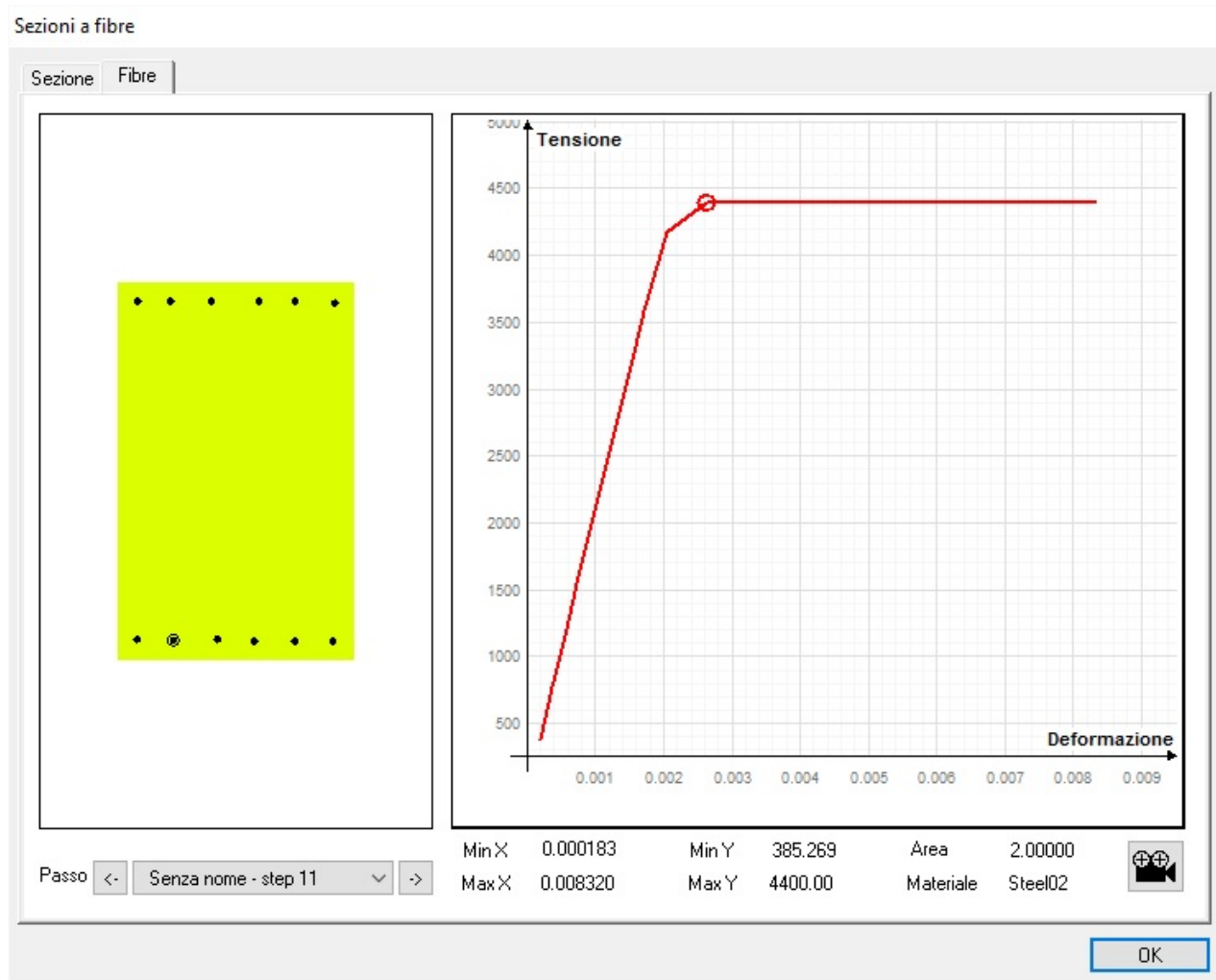
Le opzioni *Relativo* ed *Assoluto* consentono di mappare i colori sui minimi-massimi del singolo passo (relativo) o sui quelli della intera storia (Assoluto). Impiegando quest'ultima possibilità la storia delle variazioni passo per passo sarà più evidente. Vengono riportati anche i valori massimi e minimi su tutta la sezione.

Nel pannello di destra si possono rappresentare i grafici di una coppia di variabili a scelta relative alla sezione. Questi valori sono:

- Forza assiale
- Momento Y
- Momento Z
- Deformazione assiale

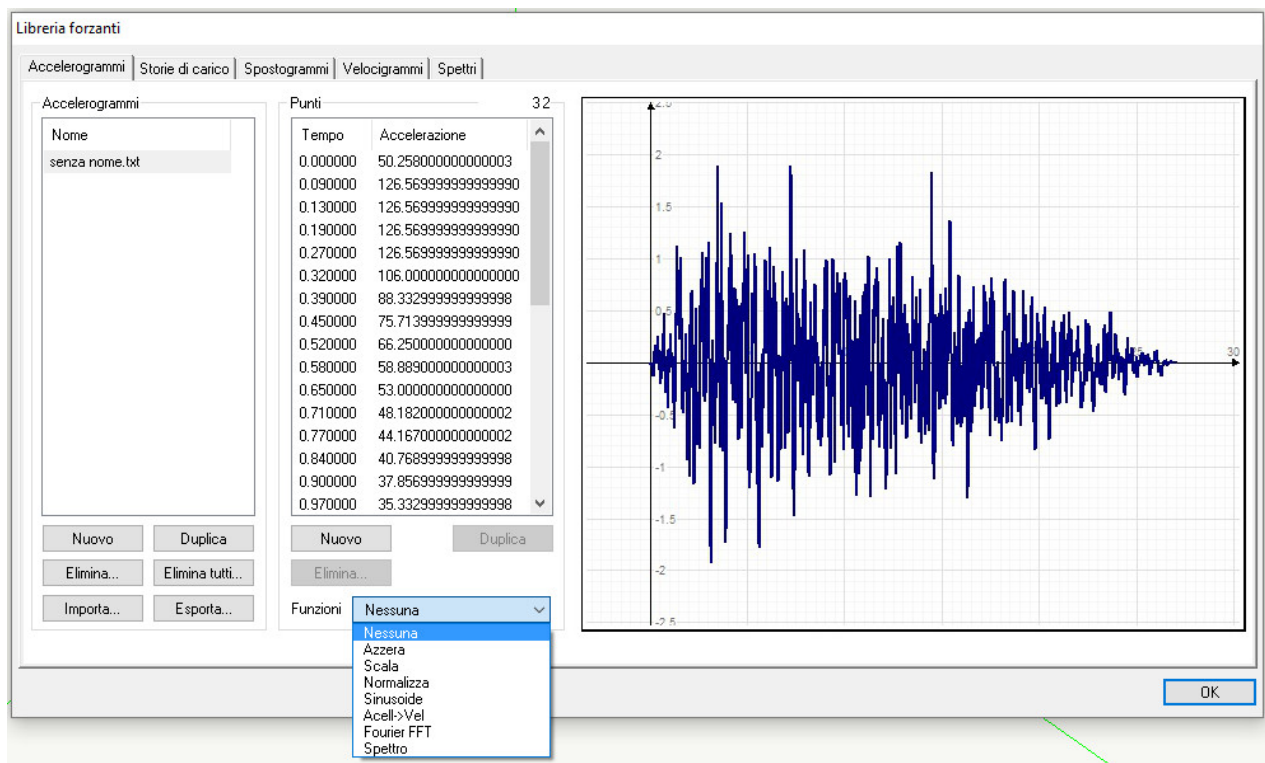
- Rotazione Y
- Rotazione Z

La coppia di valori relativa al passo selezionato è indicata da un cerchietto sul grafico.



Accedendo alla seconda pagina del dialogo si può esaminare il comportamento di ogni fibra della sezione. Occorre selezionare sulla immagine della sezione sulla sinistra la fibra voluta e sul pannello di destra verrà rappresentato il diagramma sforzo-deformazione della fibra. Sotto il pannello di destra sono riportati i valori massimi e minimi e altre informazioni sulla fibra selezionata.

Archivio delle forzanti



Questo dialogo consente la gestione centralizzata delle forzanti utilizzate dalle [azioni in transitorio](#) o dalla [analisi dinamica incrementale](#). Le forzanti vengono archiviate con il file di progetto e sono divise per tipologia tra accelerogrammi, storie di carico, spostogrammi, velocigrammi e spettri. È possibile crearle, duplicarle, rinominarle o eliminarle.

È possibile creare una forzante anche importando un file esterno. I formati supportati sono:

- **2 colonne tempo-valore:** un semplice file di testo formato da due colonne con il numero voluto di righe. Ogni riga contiene una coppia di numeri tempo-valore separati da uno spazio. Questo formato è utilizzabile per importare qualsiasi tipo di forzante.
- **SIMQKE-1:** il formato utilizzato dall'omonimo programma e dai suoi derivati come [SIMQKE_GR](#). Questo formato è utilizzabile per importare accelerogrammi.
- **ITACA Vers. 2.1 (Dyna 1.2):** il formato corrente utilizzato dall'archivio [ITACA](#). Questo formato è utilizzabile per importare accelerogrammi, spostogrammi e velocigrammi.
- **SAC Alphanumeric Vers. 6:** il formato utilizzato da [Seismic Analysis Code](#). Questo formato è utilizzabile per importare accelerogrammi, spostogrammi e velocigrammi.

È possibile esportare qualsiasi forzante come file di testo nel formato **2 colonne tempo-valore**.

È possibile modificare individualmente i singoli punti di una forzante, crearne di nuovi o eliminarli. È anche possibile applicare un fattore di scala complessivo a tutti i valori oppure normalizzarli relativamente al massimo valore assoluto.

L'archivio degli spettri consente di importare gli spettri generati con le apposite funzioni in [Nòlian](#) le quali consentono di generare spettri secondo la vigente normativa. Una delle funzioni, descritte in seguito, disponibili per gli spettri, è la generazione di accelerogrammi spettro-compatibili.

Sono disponibili alcune funzioni di trasformazione da applicare ad accelerogrammi o spettri. Per funzioni che operano su più spettri, o più accelerogrammi è possibile una selezione multipla.

Per gli accelerogrammi:

- Azzera: pone valore nullo tutti i valori dello spettro
- Scala: scala le ordinate dello accelerogramma secondo un fattore assegnato
- Normalizza: normalizza l'accelerogramma ad un valore assegnato, tipicamente l'accelerazione di gravità
- Sinusoide: Forma un accelerogramma di forma sinusoidale con ampiezza e frequenza assegnate
- Acell->Vel: Forma uno spettri in velocità da uno spettri in accelerazione
- Furier FFT: forma una trasformata di Fourier sullo spettro
- Spettro: genera lo spettro dell'accelerogramma

Per gli spettri:

- Merge: esegue la fusione di più spettri eseguendo la media delle ordinate
- SpettroCompatibili: genera accelerogrammi spettro compatibili

Generazione accelerogrammi spettro-compatibili

Il sistema che gestisce spettri e forzanti consente di accedere ad una funzione per generare gli accelerogramma compatibili con uno spettro assegnato. Al sistema di gestione di spettri e forzanti si accede dal menu Dati, voce Forzanti.

Accedere alla pagina degli spettri e importare lo spettro desiderato. Lo spettro può essere prelevato anche dall'Archivio degli Spettri di Normativa o da un file esterno. Occorre quindi selezionare lo spettro voluto e quindi la funzione Spettrocompatibil

Generazione accelerogrammi spettro compatibili

Smorzamento %

Tipo spettro in ingresso Accelerazione Velocità

Numero accelerogrammi richiesti

Numero intervalli

Passo di integrazione

Numero cicli di smoothing

Prenome risultati

Genera spettro di confronto

Esegui test di validazione

Periodo minimo (se 0 usa valori di default)

Periodo massimo (se 0 usa valori di default)

Ampiezza finestra (se 0 usa valori di default)

Massima accelerazione al suolo (se 0 usa valori di default)

Stampe di test

Il metodo di generazione degli spettri è quello ormai "classico" implementato nel programma SIMQKE della NISEE alla documentazione teorica del quale si rimanda. Il programma implementato in Earthquake Engineering è scritto in C++ e non è una trascrizione di SIMQKE ma è una implementazione autonoma della metodologia "classica" sulla quale esso è implementato.

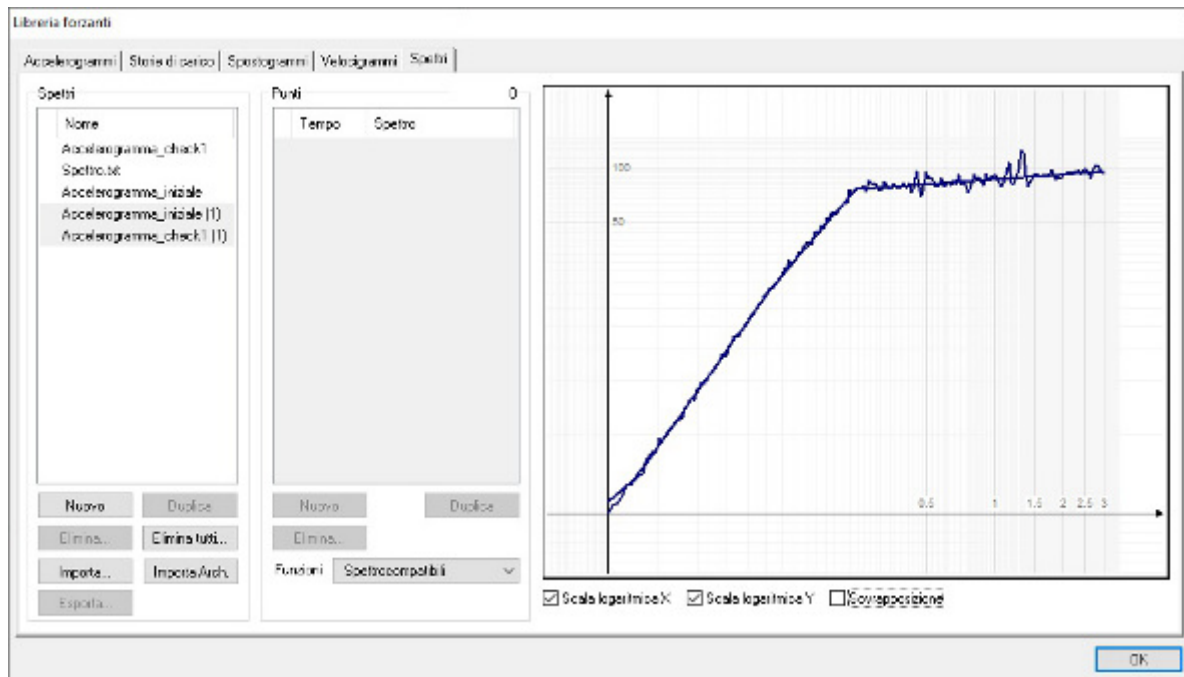
Attivata la funzione, si apre un dialogo che consente di assegnare i parametri di generazione necessari. Si possono generare più accelerogrammi compatibili con lo spettro prescelto. Lo spettro può essere in accelerazione o in velocità. Queste informazioni vanno assegnate. Si deve assegnare anche il passo di integrazione ed il numero di punti dell'accelerogramma da generare. Si deve assegnare lo smorzamento (damping) che può essere diverso da quello dello spettro prescelto. Inoltre è possibile generare uno spettro ottenuto dall'accelerogramma appena generato: ciò consente di verificare la compatibilità dell'accelerogramma con lo spettro assegnato. Se si è assegnato uno smorzamento diverso da quello dello spettro in ingresso, le curve ovviamente non si sovrappongono. Per questa verifica si può usare la funzione di rappresentazione degli spettri per sovrapposizione.

Se si assegna uno spettro in accelerazione, vengono generati gli spettri di controllo in scala logaritmica. Non ci si deve aspettare una corrispondenza esatta e un andamento "liscio" e ciò è legato alla metodologia basata sulla analisi di Fourier su un numero finito di periodi. Altri parametri che si possono assegnare influiscono sulla metodologia di generazione. Si usa infatti una analisi di Fourier a finestre (window Fourier analysis). Fare riferimento a tale metodologia per maggiori informazioni. La finestra adottata è di forma trapezoidale con un fronte di ascesa, una durata costante ed un tratto di discesa.

Questi valori si possono assegnare. Assegnando però ai fronti il valore 0, vengono assunti dei valori di default, la durata della finestra deve essere assegnata. In genere si assegna una durata di un decimo della durata totale dell'accelerogramma. Si consiglia l'impiego di parametri diversi da quelli di default solo se si è a conoscenza della metodologia adottata, ad esempio la massima accelerazione di picco NON è uno scalamento dell'accelerogramma ma la forzatura del picco massimo a valore assegnato, ciò può, essere utile solo in casi molto particolari.

Se si attiva l'opzione "Test" vengono impiegati i dati di un test di validazione di SIMQKE che può essere impiegato per

testimoniare, ove necessario, la qualità dell'implementazione. (vedi figura seguente)



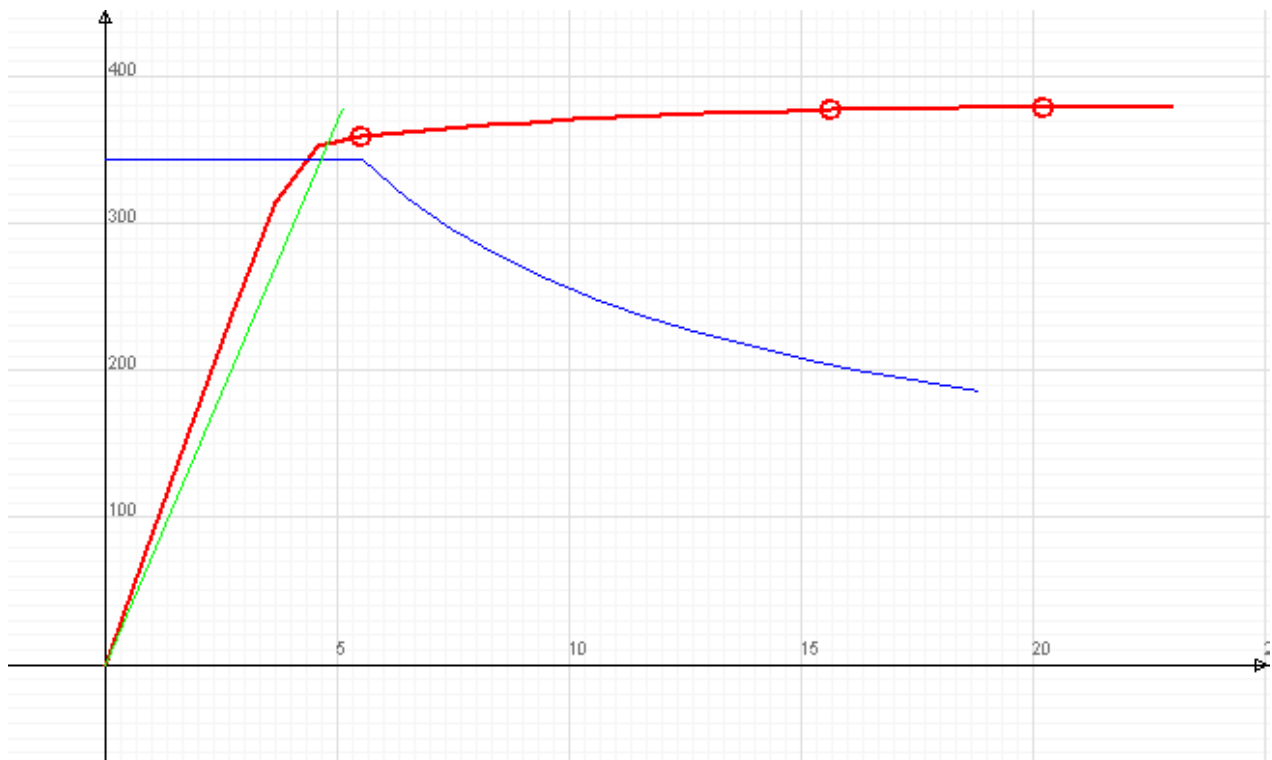
Gli accelerogrammi generati vengono archiviati nella pagina dell'archivio degli accelerogrammi. Se si generano spettri di controllo, vengono archiviati nella pagina degli spettri con il nome assegnato al problema e pertanto si potrebbe avere come default il nome "accelerogramma_1" per uno spettro. Si è mantenuta questa univocità per evitare dubbi sulle denominazioni.

Regolarizzazione

La procedura di Regularizzazione dello spettro permette di trasformare uno spettro elastico di risposta in uno spettro con forma standard secondo NTC 2018, costituito da un ramo con accelerazione crescente lineare, un ramo ad accelerazione costante, ed un ramo in cui l'accelerazione decresce con $1/T$ e quindi con velocità costante. La procedura segue i dettami dell'allegato 1 all'Ordinanza 55 del 24 aprile 2018. Si rimanda a tale allegato per la metodologia impiegata.

Analisi Pushover

La base del metodo è la formazione di della curva forza-spostamento prodotta da un'analisi elasto-plastica sequenziale di un struttura soggetta ad azione laterale rappresentativa di un'azione sismica. In figura un esempio di curva forza-spostamento.



Per la costruzione della curva forza-spostamento, viene scelto un nodo del modello come punto di controllo e se ne monitorizza lo spostamento sotto l'insieme di laterali forze, linearmente crescenti che rappresentano l'azione sismica. Gli spostamenti del nodo sono calcolati tenendo conto del comportamento non lineare degli elementi allo scopo di valutare il comportamento e le riserve anelastiche della struttura, superata la fase elastica.

L'analisi basata su una curva forza-spostamento è comune a vari metodi per determinare la rispondenza di una struttura ad un requisito sismico. Il metodo implementato nell'ambiente Earthquake Engineering è ovviamente quello descritto nella normativa del DM2018 e consente di determinare lo spostamento in corrispondenza del quale devono essere determinate le sollecitazioni per le verifiche delle membrature. Poiché tale metodo è dettagliatamente descritto dal decreto citato, benché non sia stato dato a tale metodo una denominazione specifica, ma la denominazione generica di "pushover", i dettagli del metodo non vengono qui riportati rimandando appunto alla normativa citata.

Una rappresentazione efficace, però, dei valori ottenuti non è quella della curva forza-spostamento soltanto, pertanto nella rappresentazione del diagramma, al termine dell'analisi, si è preferito impiegare la rappresentazione che è alla base del Capacity Spectrum Method o CSM.

In questo metodo si trasforma la curva forza-spostamento in una curva accelerazione-spostamento e lo spettro di risposta viene egualmente espresso in forma analoga (ADSR ovvero Acceleration Displacement Response Spectrum). In tal modo si hanno due curve espresse in quantità omogenee e pertanto confrontabili.

In questo spazio, il periodo è rappresentato da rette uscenti dall'origine. Nella rappresentazione usata in Earthquake Engineering lo spettro di risposta è rappresentato in colore blu, la curva da capacità in colore rosso, il periodo proprio della struttura tramite una retta in colore giallo.

Il CSM prevede inoltre la determinazione del Performance Point, PP. La normativa italiana non prevede tale valutazione ma il metodo è generalmente più diffuso e significativo ed inoltre fornisce maggiori informazioni sul comportamento della struttura anche in una sintesi grafica molto utile. Pertanto in questo ambiente si usa questa rappresentazione e si calcola il PP che viene rappresentato con un cerchio di colore ciano. I valori numerici relativi vengono anche riportati tra i valori numerici risultati di quest'analisi. Se il punto non esiste (è determinato dall'intersezione tra lo spettro capacity e demand in forma ADRS riducendo lo spettro demand dell'opportuno smorzamento) il punto non è rappresentato ed i valori numerici riportano la dicitura n.d (non determinato).

Si sottolinea quindi che il metodo impiegato opera secondo normativa DM2018 ma la rappresentazione, è basata sugli spetti omogenei ASDR in quanto tale rappresentazione è molto efficace.

Note sulla modellazione della struttura

Per essere adatto all'analisi pushover, il modello della struttura dovrebbe essere il più possibile idealizzato e simile ai tradizionali modelli statici. Le analisi non lineari sono particolarmente sensibili all'aggiunta di dettagli del modello non essenziali: non solo essi aumentano inutilmente i tempi di calcolo, ma spesso riducono le possibilità di raggiungere la soluzione e l'accuratezza dei risultati.

Dialogo di assegnazione dati specializzato

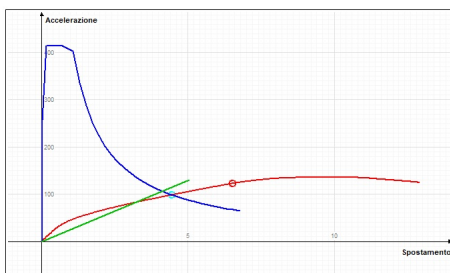
Dal menu Analisi è possibile accedere al dialogo Pushover che consente una configurazione specifica per tale tipo di analisi. Vedere [La configurazione specializzata per l'analisi Pushover](#)

Risultati dell'analisi di capacità

I risultati sono esposti, sia in forma numerica che grafica, nella finestra "Risultati Capacità".

Valutazione grafica dei risultati

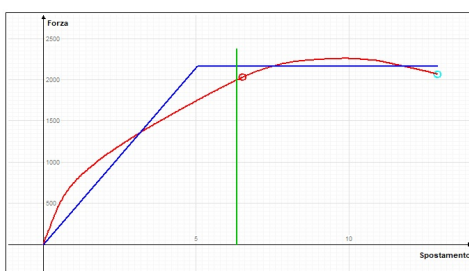
Nel pannello **Diagramma**, il grafico che si ottiene selezionando il metodo **CSM** riporta lo spostamento sulle ascisse e l'accelerazione sulle ordinate e mostra le seguenti curve:



- la curva *capacity*, in rosso
- la curva *demand*, in blu
- una retta uscente dall'origine la cui tangente è il periodo elastico, in verde

La retta che rappresenta il periodo proprio permette la **valutazione immediata del soddisfacimento del requisito in spostamento** della struttura.

Viceversa, selezionando il metodo **N2**, il grafico riporta lo spostamento sulle ascisse e la forza sulle ordinate e mostra le seguenti curve:



- la curva di capacità del sistema equivalente SDOF, in rosso
- la curva bilinearizzata del sistema equivalente SDOF, in blu
- una retta che rappresenta lo spostamento di domanda d^* nel modello SDOF, in verde

Valutazione numerica dei risultati

Il pannello **Dati numerici** consente di consultare i valori numerici calcolati dall'analisi di capacità, alcuni direttamente associabili ai grafici mostrati nel diagramma:

Metodo N2							
Gamma	1.3627517	Tc	0.31731822	d*	6.3361742		
m*	16.557392	Se(T*)	164.23118	d*u	12.885693		
Fy*	2163.5761	q*	1.2568266	F max	3077.5700		
dy*	5.0414067						
T*	1.2341434						6.34 <= 12.89

Metodo CSM							
Teq	1.3359067	Nieq	5.0618206	PPd	4.4572409	PPa	98.599691

Stato plastico			
	Prima plasticizzazione	Danno severo	Prima rottura
Spostamento	8.8800000	n.d.	n.d.
PGA	173.12157	n.d.	n.d.

Nella parte superiore sono mostrati i seguenti dati, dove l'asterisco indica che un dato si riferisce al modello equivalente ad un solo grado di libertà (SDOF):

- Gamma** Gamma, (Γ) fattore di correlazione tra il modello a più gradi di libertà (MDOF) e quello ad un singolo grado di libertà (SDOF)

- m*** massa equivalente del modello SDOF

- Fy*** forza di snervamento del modello SDOF, calcolato sulla curva bilatera equivalente

- dy*** spostamento di snervamento del modello SDOF, calcolato sulla curva bilatera equivalente

- T*** periodo proprio del modello SDOF

- Tc** periodo corrispondente alla fine della soglia dello spettro elastico

- Se(T*)** risposta spettrale in accelerazione per il periodo T*

- q*** fattore di struttura ovvero rapporto di duttilità

- d*** spostamento demand nel modello SDOF

- d*u** spostamento massimo sulla curva di capacità (capacity) nel modello SDOF

F max taglio massimo alla base nel modello MDOF

Generalmente deve verificarsi:

$$d^*u > d^*$$

perché la struttura possa subire uno spostamento senza collasso maggiore di quello demand.

Nel caso dell'analisi CSM, (Capacity Spectrum Method, detto metodo B dal NTC 2018) vengono riportati:

- **Teq**, periodo proprio equivalente
- **Nieq**, smorzamento in percentuale equivalente
- **PPa**, accelerazione del PP
- **PPd**, spostamento del PP

I dati nella parte bassa del pannello riguardano tre punti notevoli della curva pushover: il punto in cui si raggiunge la rotazione di prima plasticizzazione; il punto in cui si raggiunge la rotazione di rottura; il punto dove si raggiunge una rotazione pari al 75% di quella di rottura. Questi tre punti sono identificati dalla normativa come stati limite DL (danno lieve), CO (collasso) e DS (danno severo) caratterizzato da una rotazione che sia 0.75 quella ultima (vedi: Calcolo delle capacità di rotazione).

I dati hanno, per i tre punti, i seguenti significati:

Spostamento spostamento del sistema MDOF per cui si raggiunge la rotazione indicata

PGA PGA relativa al detto spostamento per la duttilità indicata, calcolata con il metodo N2

Fattore di struttura

Il fattore di struttura è un fattore che adegua lo spettro elastico a quello inelastico di progetto che tenga conto appunto delle riserve inelastiche della struttura. Quindi la valutazione dello spostamento al primo snervamento e lo spostamento ultimo consentono di ottenere il fattore di struttura.

Accelerazioni di picco

Le accelerazioni di picco (PGA — *peak ground acceleration*) sono facilmente ottenute per ogni spostamento. Si deve cioè scalare lo spettro demand in modo che "passi" per il punto accelerazione-spostamento voluto e l'accelerazione di picco di tale spettro è il valore cercato di PGA. Queste accelerazioni sono confrontabili con le accelerazioni di requisito prescritte dalla norma.

Rotazioni

Calcolando le rotazioni si può attuare un facile confronto tra rotazione della struttura e rotazione di requisito. I punti per cui si calcolano questi valori sono in genere il primo snervamento e il primo punto in cui una sezione arriva a rottura. Per il metodo di calcolo di queste rotazioni con Nòlian si rimanda alla sezione Calcolo delle capacità di rotazione. Per questi punti si forniscono anche le PGA che sono anch'esse confrontabili con i valori di normativa. Questi ultimi valori sono essenziali per la valutazione del rischio in strutture esistenti. Questi punti sono definiti dalla normativa italiana come stati limite di Danno Lieve (DL), Danno severo (DS) e Collasso (CO).

Nota: le rotazioni vengono calcolate solo per l'elemento trave a fibre.

Nota: per il metodo di integrazione numerica adottato, la lunghezza della cerniera plastica può essere valutata solo se l'analisi raggiunge il punto di rotazione ultima. Se ciò non avviene, i valori relativi agli altri punti significativi non vengono esposti anche se l'analisi ha portato l'elemento oltre tali punti.

Durante l'analisi di capacità, le rotazioni vengono calcolate solo per l'elemento trave a fibre.

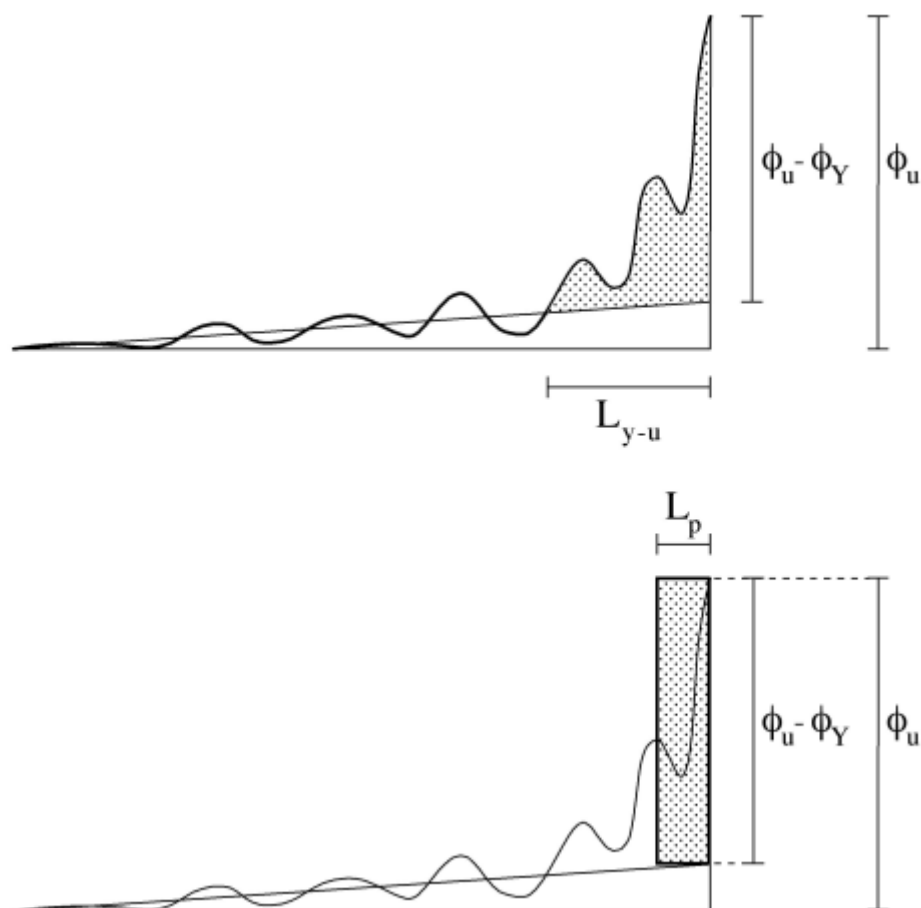
Calcolo della capacità di rotazione:

I metodi di calcolo della capacità di rotazione risalgono a molti anni fa e si basavano soprattutto su formulazioni derivanti da interpolazioni di risultati sperimentali. Da questo la presenza in queste formule di molti parametri di aggiustamento con poca relazione immediata con i fenomeni fisici. Per dare una idea, già tra il 1960 e il 1965 una commissione C.E.B. commissionò una serie di prove sperimentali su travi in cemento armato al fine di valutare i parametri fondamentali che influenzano la capacità di rotazione plastica. Per la loro natura empirica tali formule sono anche poco adatte a una implementazione in codici di calcolo evoluti.

Ad esempio, e questa è una nota negativa che percorre tutta la normativa, si ignora sistematicamente la potenza e la generale affermazione del metodo degli elementi finiti. Tale metodo ha il pregio concettuale di ridurre la complessità demandandola a piccole regioni dove può essere maneggiata con accuratezza e generalità. La normativa invece si concentra sull'elemento strutturale. Ora è chiaro che un concetto come "punto di taglio" ha senso (e non sempre) se si considera un elemento strutturale, non ne ha affatto nell'ambito di una formulazione a elementi finiti dove è VOLUTA la indipendenza dell'elemento dal contesto.

La normativa consente che la capacità di rotazione rispetto alla corda in condizioni di collasso possa essere valutata anche mediante modellazione numerica considerando il contributo di calcestruzzo, acciaio ed aderenza.

In Nòlian si segue quest'ultima via. Ad ogni passo di carico dell'analisi incrementale pushover si calcola la rotazione nelle sezioni di calcolo e ove questa sia rappresentativa di uno dei valori significativi (primo snervamento (DL) o collasso (CO)) essa viene esplicitata.

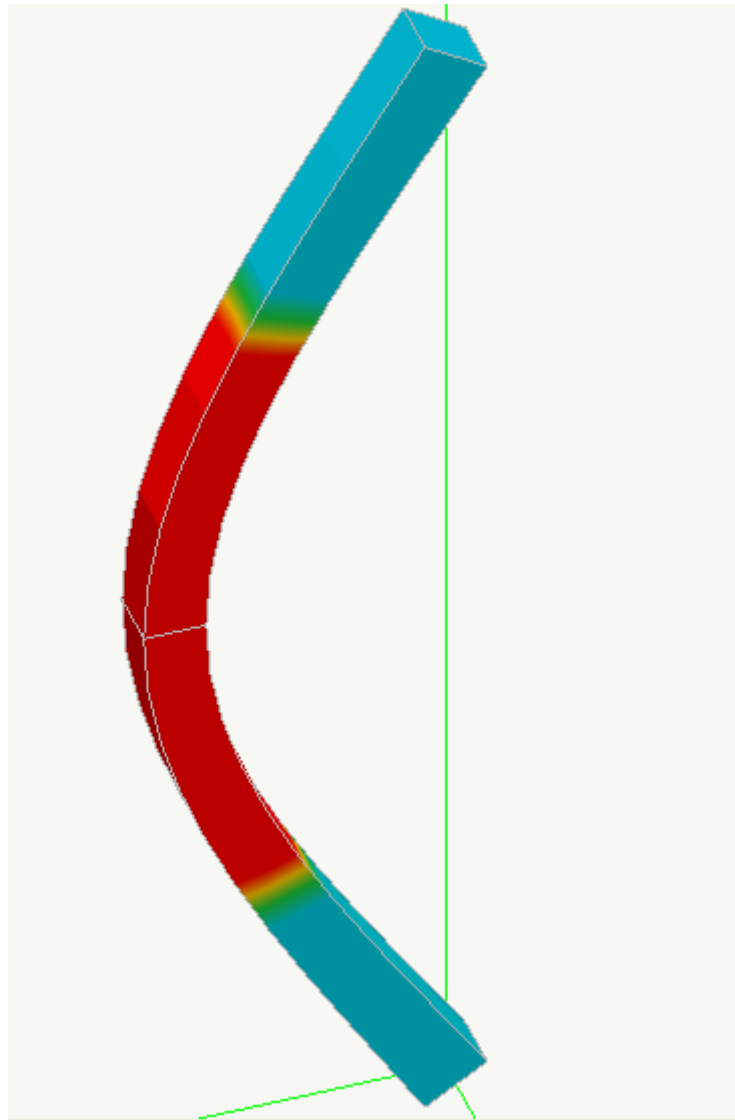


Raggiunta la curvatura di rottura (ϕ_u), tramite integrazione numerica si calcola l'area campita nella figura superiore che costituisce immediatamente la rotazione plastica. Ciò evita alcuni problemi di fondo: la valutazione empirica della "lunghezza della cerniera plastica" (L_p), la impossibilità di applicare formule empiriche nel problema della flessione deviata, la difficoltà di calcolare a monte (con procedura apposita) un valore di curvatura ultima quando invece è un risultato immediato del calcolo incrementale, la impossibilità di ricondurre il problema nell'ambito del metodo agli elementi finiti. Unico inconveniente è che, proprio volendo restare nell'ambito della elaborazione circoscritta nel singolo elemento finito, la integrazione per il calcolo della rotazione avviene nell'ambito dello stesso e quindi se la lunghezza L_{y-u} fosse maggiore della lunghezza dell'elemento, la curvatura verrebbe sottostimata. Ma questo accade abbastanza raramente.

Per le condizioni di rottura dell'acciaio, per la valutazione delle rotazioni, si considera un allungamento del 4% Per il calcestruzzo un accorciamento dello 0.35%.

La lunghezza della cerniera plastica è del tutto convenzionale ed è pari alla lunghezza che fornisce un'area equivalente alla rotazione. Sostanzialmente è un valore di comodo tale che il prodotto $L_p (f_u - f_y)$ fornisca immediatamente il valore di rotazione. I vantaggi, oltre a quelli di correttezza organizzativa computazionale, sono quelli di non richiedere valutazioni preventive all'operatore.

Nella figura seguente la parte in rosso indica la zona plasticizzata di un pilastro. Si noti come la lunghezza della parte plasticizzata sia maggiore della lunghezza della cerniera plastica, poiché quest'ultima è un valore convenzionale:

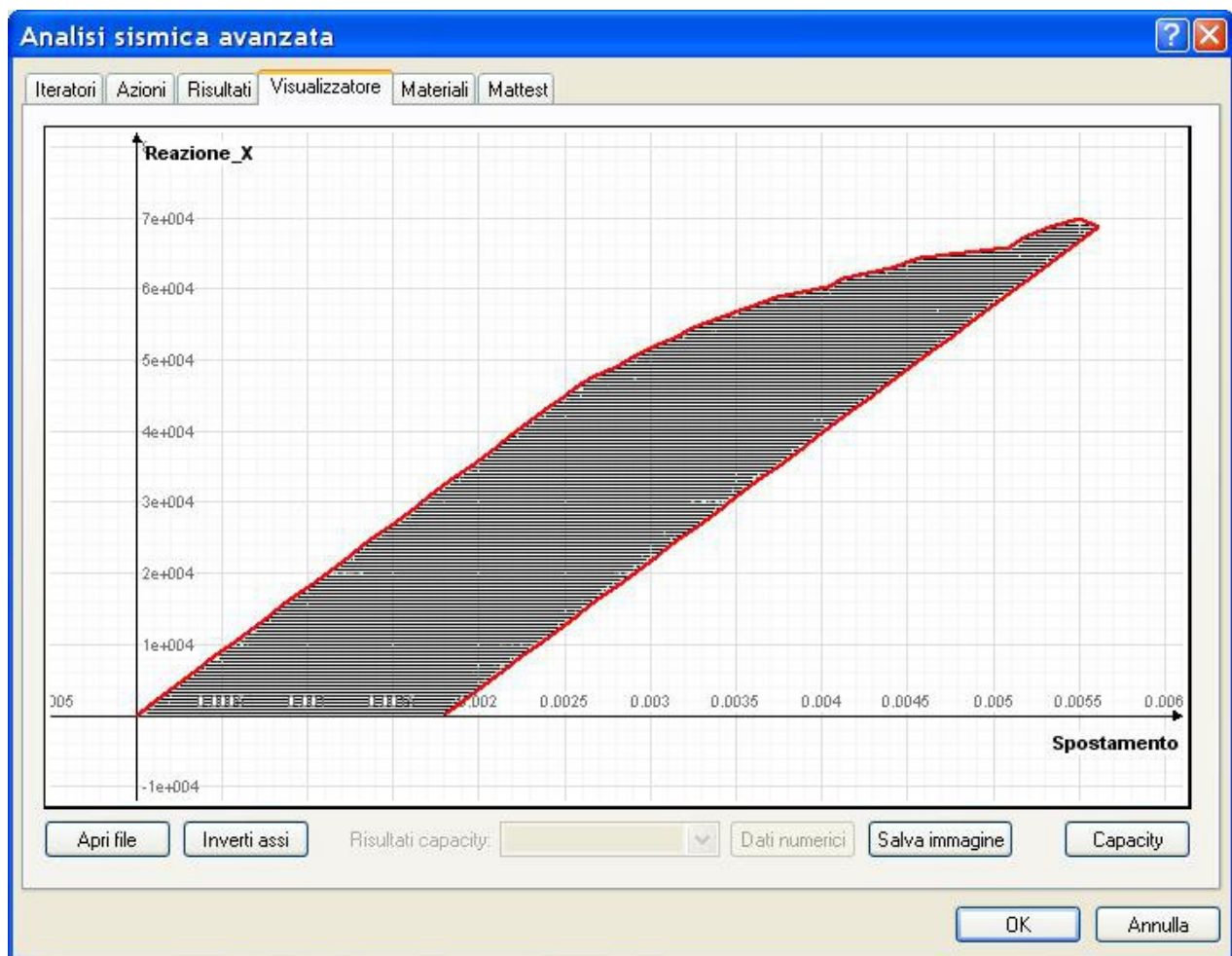


Analisi pushover e CSM

La "analisi pushover" o "analisi statica non-lineare" nasce in effetti come Capacity Spectrum method. Sul Capacity Spectrum Method (CSM) è interessante leggere l'articolo di Sigmund A. Freeman che ne fu l'ideatore. L'articolo si intitola The Capacity Spectrum Method as a Tool for Seismic Design ed è reperibile su internet. Non solo l'articolo introduce con semplicità e completezza il metodo, ma ne delinea la storia e le controversie che hanno sempre accompagnato questo metodo. Importante è anche fare riferimento alla ATC 40 (Applied Technology Council) al capitolo 8.

Il metodo nasce come un "rapido" mezzo di verifica della sicurezza delle strutture sottoposte ad azione sismica e poi, con il tempo, entra nei dettagli e cerca di dare una risposta più completa e complessa anche di strutture importanti. Il metodo diviene noto in Italia con l'entrata in vigore della normativa antisismica del DM08 sotto il nome di "analisi pushover". In italiano viene spesso usato il termine di "analisi di spinta" o più tecnicamente: analisi statica non lineare.

L'idea che è alla base del metodo è intrigante. Eseguendo un'analisi non lineare di una struttura è possibile valutare la duttilità della struttura e quindi le capacità dissipative. Un diagramma del genere è una curva forza-spostamento. Se, portata la struttura in campo plastico, si rilascia la forza che ha agito, il diagramma racchiude un'area che rappresenta l'energia dissipata (smorzamento isteretico). Si veda la figura seguente.

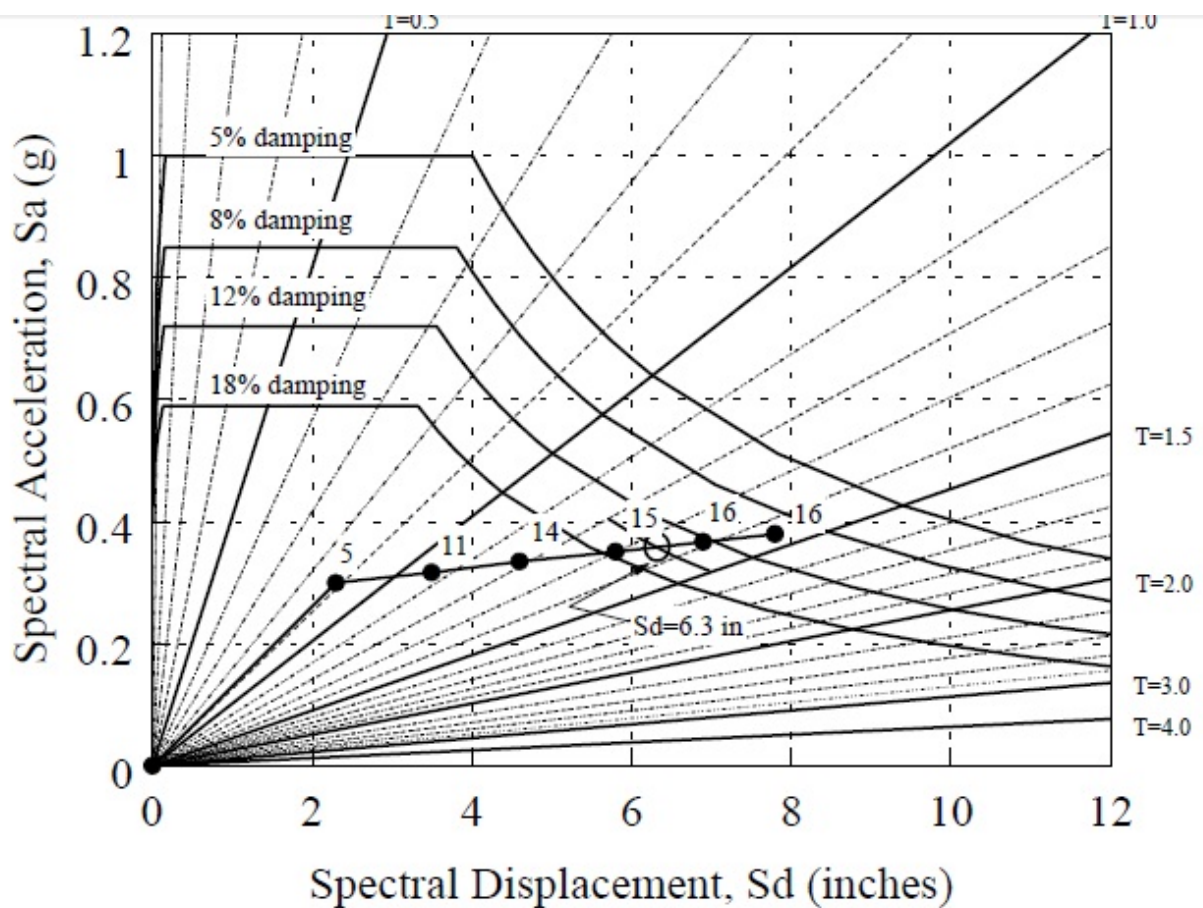


Se la forza impiegata è equivalente a quella che si ha applicando un'accelerazione alla massa della struttura, sarà, nel diagramma, immediato ottenere un diagramma accelerazione-spostamento dividendo semplicemente la forza per la massa della struttura.

Questo ragionamento è intuitivo per un oscillatore elementare. Una struttura non ha certo un solo grado di libertà. Esistono però dei metodi per costruire un diagramma equivalente ad un oscillatore elementare benché si stia operando su una struttura a molti gradi di libertà. I metodi relativi sono notissimi e pubblicati in ogni dove per cui è inutile riportare le formule relative. E' più importante invece fare una semplice constatazione: un diagramma accelerazione-spostamento è confrontabile con uno spettro di risposta sempre espresso come accelerazione-spostamento. Ciò consente di confrontare immediatamente i due spettri che prendono il nome di "domanda" e "capacità", da cui il nome del metodo.

Lo spettro di risposta è diverso per ogni valore di smorzamento viscoso e la struttura, deformata dall'azione sismica, è in grado di produrre smorzamenti isteretici inelastici diversi. Ad ogni punto della curva di capacità (in effetti resa bilineare) è possibile associare uno smorzamento isteretico trasformato in smorzamento viscoso equivalente. Cioè più la struttura è in grado di deformarsi plasticamente, maggiore è lo smorzamento che presenta. E' ovvio allora che vi sarà un punto sulla curva di capacità il cui smorzamento coincida con quello di uno spettro di risposta con lo stesso smorzamento viscoso. Questo punto è detto "performance point" e caratterizza il comportamento della struttura identificando una accelerazione ed uno spostamento.

Questa introduzione è volutamente discorsiva. I dettagli si possono trovare, e molto chiari, nella citata ATC 40.

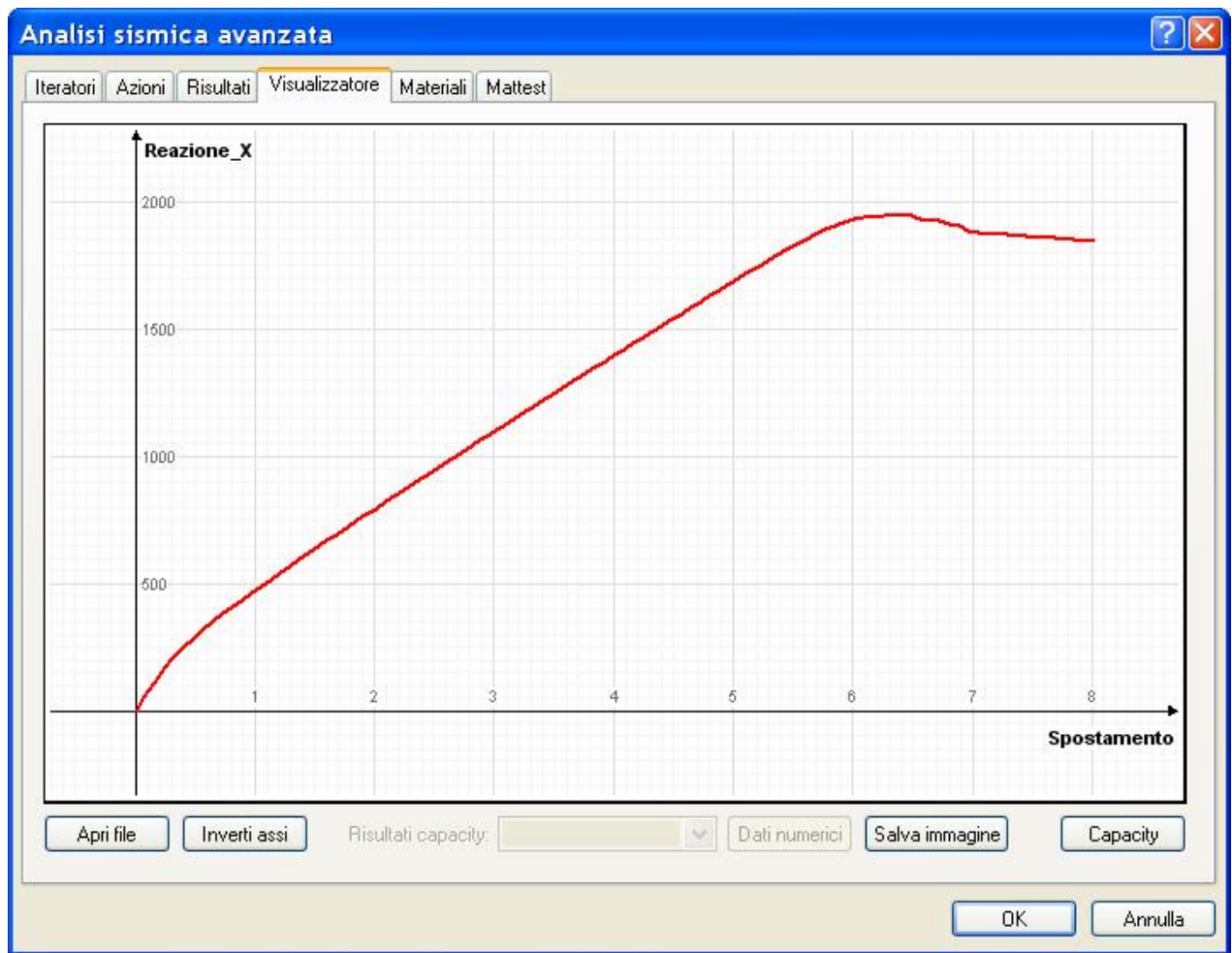


La figura precedente, tratta dal citato articolo di Freeman, illustra molto bene questo metodo. Infatti il punto cerchiato è quello per il quale lo smorzamento viscoso equivalente, il cui valore è indicato sul lato della curva di capacità, incontra la curva dello spettro di domanda di pari smorzamento viscoso.

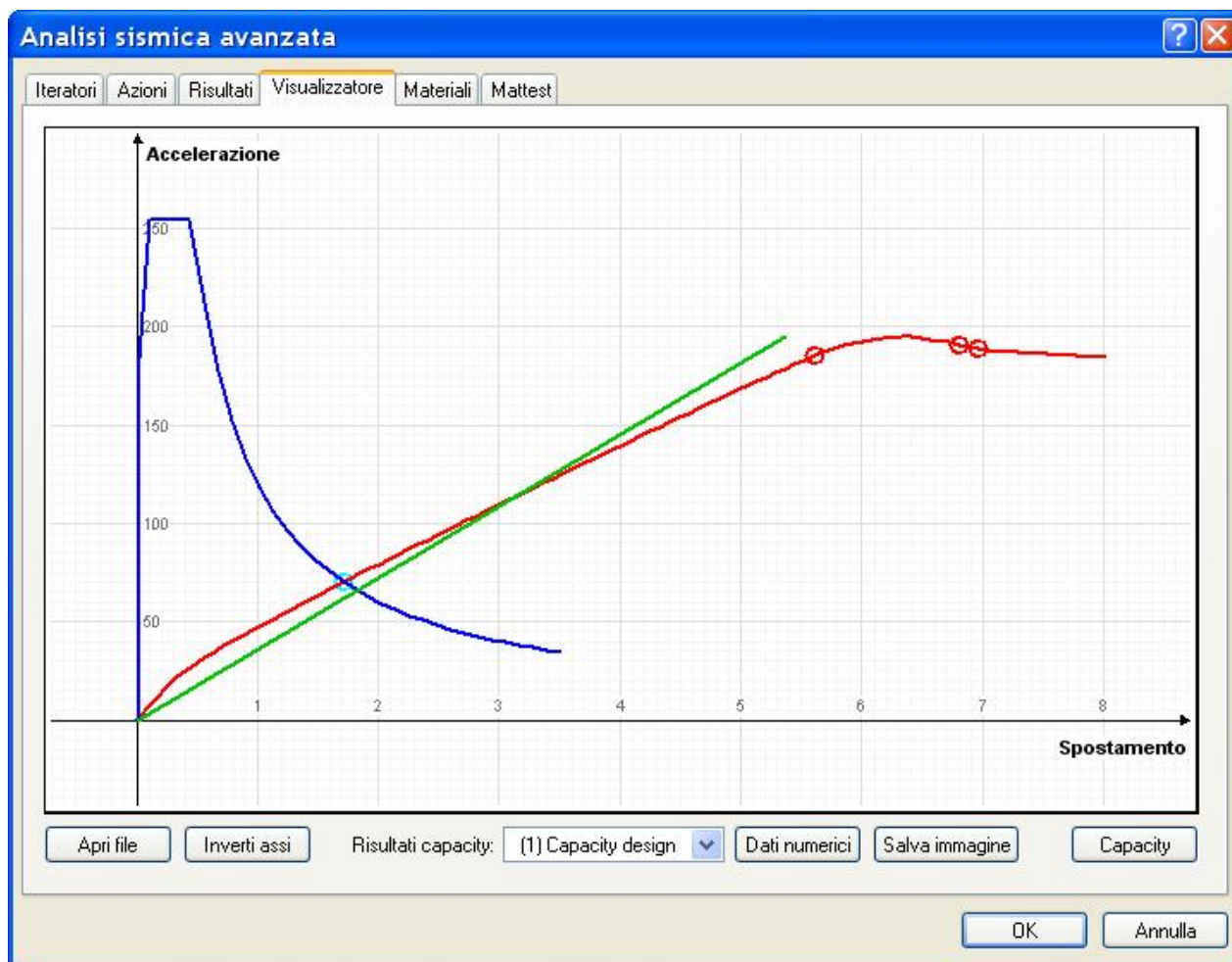
La normativa italiana impiega un differente metodo. Definisce uno smorzamento come rapporto tra la forza elastica di domanda e quella di snervamento ed in base a tale valore ed al periodo proprio equivalente determina, in pratica in funzione di uno spettro di domanda implicito, uno spostamento massimo.

In corrispondenza dello spostamento massimo, in entrambi i metodi, si deve verificare il grado di danneggiamento prescritto per ogni stato limite.

L'analisi "pushover" in EE si effettua come un'analisi nella quale alla struttura si applicano le forze statiche equivalenti incrementate linearmente in modo da poter ottenere un diagramma forza-spostamento.



Ottenuto questo, vengono eseguite automaticamente tutte le operazioni previste dal metodo per ottenere uno diagramma accelerazione-spostamento. Viene, in EE, rappresentato anche lo spettro di domanda opportunamente scalato come richiesto dal CPM ed il "performance point" viene evidenziato con un cerchio di colore verde.



I valori numerici sono disponibili sia a dialogo che ovviamente nei tabulati e sono i seguenti:

Metodo N2					
Gamma	1.3627517	Tc	0.31731822	d*	6.3361742
m*	16.557392	Se(T*)	164.23118	d* _u	12.885693
Fy*	2163.5761	q*	1.2568266	F max	3077.5700
dy*	5.0414067				6.34 ≤ 12.89
T*	1.2341434				

Metodo CSM					
Teq	1.3359067	Nieq	5.0618206	PPd	4.4572409
				PPa	98.599691

Stato plastico			
	Prima plasticizzazione	Danno severo	Prima rottura
Spostamento	8.8800000	n.d.	n.d.
PGA	173.12157	n.d.	n.d.

Nella parte superiore del dialogo si hanno i valori richiesti dal metodo N2 (recepito dalla normativa italiana). In quella centrale i valori del CSM. Infine in quella inferiore i valori relativi ai tre stati di plasticizzazione caratteristici che nella figura del grafico sono rappresentati con cerchietti di colore rosso. Sono indicati anche gli elementi ove si è verificata la condizione e i parametri caratteristici per individuare il comportamento (rotazione, curvatura, PGA etc.). Si ha così un quadro sintetico

della analisi.

Si noti come lo smorzamento viscoso equivalente (Nief) dell'analisi CSM è prossima al 5% e pertanto lo spettro viene scalato modestamente. Nel caso del metodo N2, il valore $d_{c,u}$ (spostamento in corrispondenza del valore massimo di accelerazione della curva capacity, assimilabile alla risposta massima della struttura prima di decadere) è maggiore dello spostamento di domanda nella struttura a più gradi di libertà (d_{MAX}) e pertanto la struttura presenta una capacità in spostamento maggiore di quella di domanda.

Pushover adattiva

Durante una analisi di spinta (pushover), nella quale le forze vengono assunte come rappresentative dell'azione del sisma, una struttura capace di un comportamento duttile muta di caratteristiche e pertanto il sistema di forze, che era valutato per la struttura non sollecitata, non rappresenta più adeguatamente lo stato della struttura. Le forze agenti vengono valutate in base ai modi di vibrare della struttura, generalmente se ne impiega più di uno per avere una rappresentazione più completa dell'azione sismica. Si rende pertanto necessario aggiornare tale sistema di forze periodicamente durante i passi dell'analisi pushover.

L'ambiente Earthquake Engineering consente di impiegare una sofisticata procedura che interrompe l'analisi di spinta "congelandone" lo stato, esegue una analisi multimodale e, in base a questa, determina le forze statiche equivalenti ed aggiorna il modello per poi riprendere l'analisi.

Il metodo di calcolo della spinta è sempre multimodale.

Nota bene.

Questa analisi viene effettuata solo se si opera attraverso la Lista delle azioni ([vedi](#)). I parametri necessari sono memorizzati nelle azioni statiche e, se si impiega il configuratore per le analisi pushover, tali parametri vengono assegnati alle azioni statiche in modo automatico.

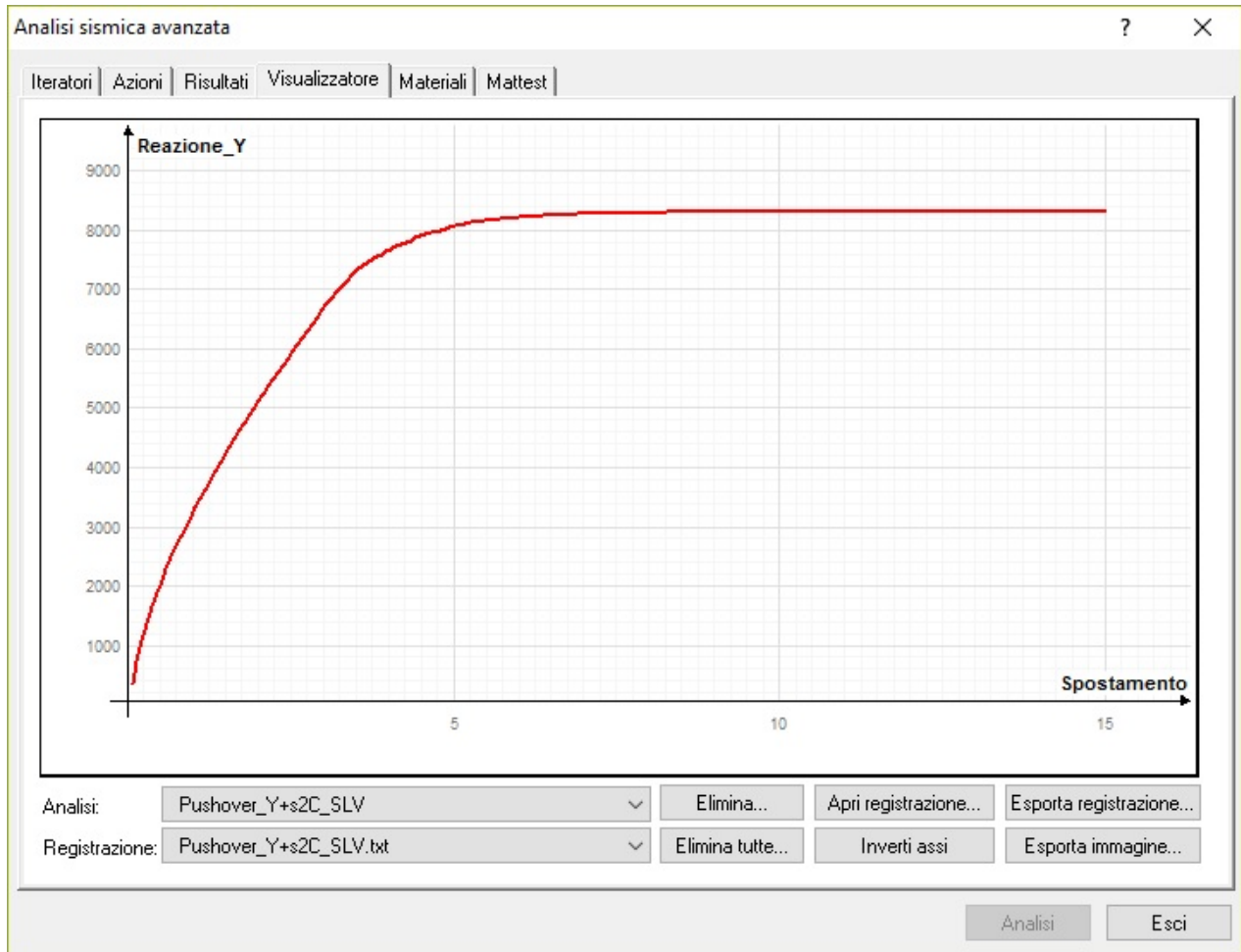
Il metodo di aggiornare la spinta dell'analisi pushover in funzione delle modificate caratteristiche della struttura sotto sforzo è detto "analisi pushover adattiva". Su tale metodo la ricerca scientifica non ha ancora raggiunto una posizione unanime. Il metodo qui adottato è basato sulla analisi modale della struttura deformata e sul calcolo della spinta equivalente considerando il numero di modi indicato dall'utente (metodo multimodale). Poiché il periodo proprio aumenta con l'aumentare del livello di danneggiamento, può decrescere anche l'accelerazione spettrale e pertanto si raccomanda un uso controllato e consapevole di questo metodo.

Per attuare l'analisi adattiva è possibile assegnare i parametri caratteristici dell'azione di spinta ad una azione statica ed impiegare tale azione statica nella lista delle analisi in successione. Vengono impiegati, nell'analisi, i passi e l'intervallo assegnati nella riga della lista e, per il calcolo delle forze equivalenti, i parametri assegnati all'azione statica. E' necessario anche stabilire il numero di autovalori che si vogliono considerare nel calcolo multimodale della spinta e ciò va fatto esclusivamente nel dialogo di configurazione delle analisi pushover. Un altro parametro indispensabile che va assegnato anch'esso nel dialogo di configurazione delle analisi pushover è il numero di adeguamenti che si desidera vengano effettuati. Gli adeguamenti verranno ripartiti nei passi di analisi assegnati e se il divisore non è intero, i passi in più vengono assegnati al primo adeguamento. Con un esempio, se si assegnano 10 passi e 3 adeguamenti, si avranno $4+3+3=10$ passi incrementali per i tre adeguamenti. Si ricorda che se il numero di autovalori è troppo elevato rispetto alla natura del problema, è possibile che l'analisi modale fallisca.

Selezionando dal menu del dialogo di [configurazione delle analisi pushover](#) la voce "Modale adattiva", si otterrà seguendo le procedure standard previste da questo dialogo, la configurazione automatica dell'analisi adattiva assegnata alle righe della lista delle analisi e alle azioni statiche corrispondenti.

Usando il registratore nodale della reazione di base, si avrà una rappresentazione della variazione della spinta totale nel tempo a causa dell'adattamento.

Il visualizzatore



Il visualizzatore mostra alla fine dell'analisi il richiesto diagramma dei risultati.

Questo dialogo consente di visualizzare i diagrammi corrispondenti alle serie di coppie di valori affidate ai file di testo dai Registratori (vedi [I Risultati](#)).

La visualizzazione può essere immediata, alla fine dell'analisi, se il registratore da visualizzare è stato prescelto prima dell'analisi, altrimenti si può leggere qualsiasi file già prodotto dai registratori premendo il bottone "Apri file".

I constraint

I constraint dell'ambiente Nòlian

Viene supportato un solo tipo di constraint dell'ambiente Nòlian: il "master-slave", inteso come impalcato orizzontale infinitamente rigido nel suo piano.

Per questo constraint - e solo per questo - è ammesso l'uso della analisi di capacità **ATTENZIONE**: a differenza di Nòlian, il nodo master deve essere connesso alla struttura tramite un elemento fittizio di rigidità ininfluente.

Un nodo slave non può essere slave di più master così come un master non può essere slave di un altro master. Non è possibile, per tale motivo, avere piani inclinati connessi che abbiano un master per ogni piano (es. falde di tetti connesse).

Per altri constraint si ricorra ai constraint propri di questo ambiente di seguito descritti.

Introduzione

Questa funzione consente di assegnare delle dipendenze cinematiche tra gradi di libertà in forma numerica e quindi nel modo più generale possibile. Si tratta di una potenzialità molto sofisticata e quindi se ne raccomanda un uso consapevole.

ATTENZIONE questi constraint numerici non sono compatibili con l'analisi di capacità

I constraint sono espressi nella forma:

$$D_m u_m + D_s u_s + u_0 = u_s$$

Dove D è la matrice di trasformazione, u sono gli spostamenti nodali e i pedici m ed s indicano rispettivamente il nodo master ed il nodo slave che da esso dipende.

Con un esempio, il classico "impalcato rigido", cioè una dipendenza cinematica che lega uno o più nodi dell'impalcato alle traslazioni x ed y e alla rotazione intorno z di un nodo master comune e lasciando liberi dal legame gli altri spostamenti dei nodi slave, è caratterizzato dalle seguenti matrici, dove dx e dy sono le componenti delle distanze dei nodi.

$$D_m =$$

1 0 0 0 0 dy

0 1 0 0 0 dx

0 0 0 0 0

0 0 0 0 0

0 0 0 0 0

0 0 0 0 1

$$D_s =$$

0 0 0 0 0

0 0 0 0 0

```

001000
000100
000010
000000

```

Poiché nella quasi totalità dei casi pratici, la matrice slave riflette quella master, si assume che essa abbia valori diagonali unitari ove siano nulle le righe della matrice slave ed abbia valori nulli altrimenti. Pertanto nel dialogo di interfaccia, si assegna SOLO la matrice slave provvedendo il programma a generare ed eventualmente trasformare quella slave nel sistema di riferimento locale del sistema master-slave.

Vediamo il caso di uno spostamento (nell'esempio x) del nodo s che si vuole sia due volte quello di un nodo m. Come detto, s riporta solo al matrice D_m in quanto la D_s si intende implicitamente definita con le regole già dette.

$D_m =$

```

200000
000000
000000
000000
000000
000000

```

Inoltre nel dialogo può essere assegnato il valore che rappresenta sostanzialmente un valore di spostamento generalizzato imposto. Con un esempio derivato dal precedente, se volessimo che lo spostamento del nodo s non solo sia il doppio di quello m ma aumentato del valore 3, scriveremmo la matrice D_m come segue:

$D_m =$

```

2000003
0000000
0000000
0000000
0000000
0000000

```

dove si vede come sulla destra si sia aggiunta la colonna degli spostamenti assegnati. Si può anche assegnare lo spostamento voluto ad un nodo avendo l'accortezza, per impiegare le convenzioni di interfaccia, di assegnare un nodo master vincolato.

Terminiamo questa introduzione, facendo notare che entrambe le matrici possono essere ruotate in qualsiasi riferimento locale. Il dialogo di interfaccia consente di effettuare una trasformazione automatica delle matrici nel riferimento locale definito dal piano (se esiste) formato dai nodi slave. Ciò consente di generare piani rigidi inclinati con molta facilità.

Facciamo ora un cenno ai constraint qui definiti "multi master". Qualora lo spostamento di un nodo slave sia determinato

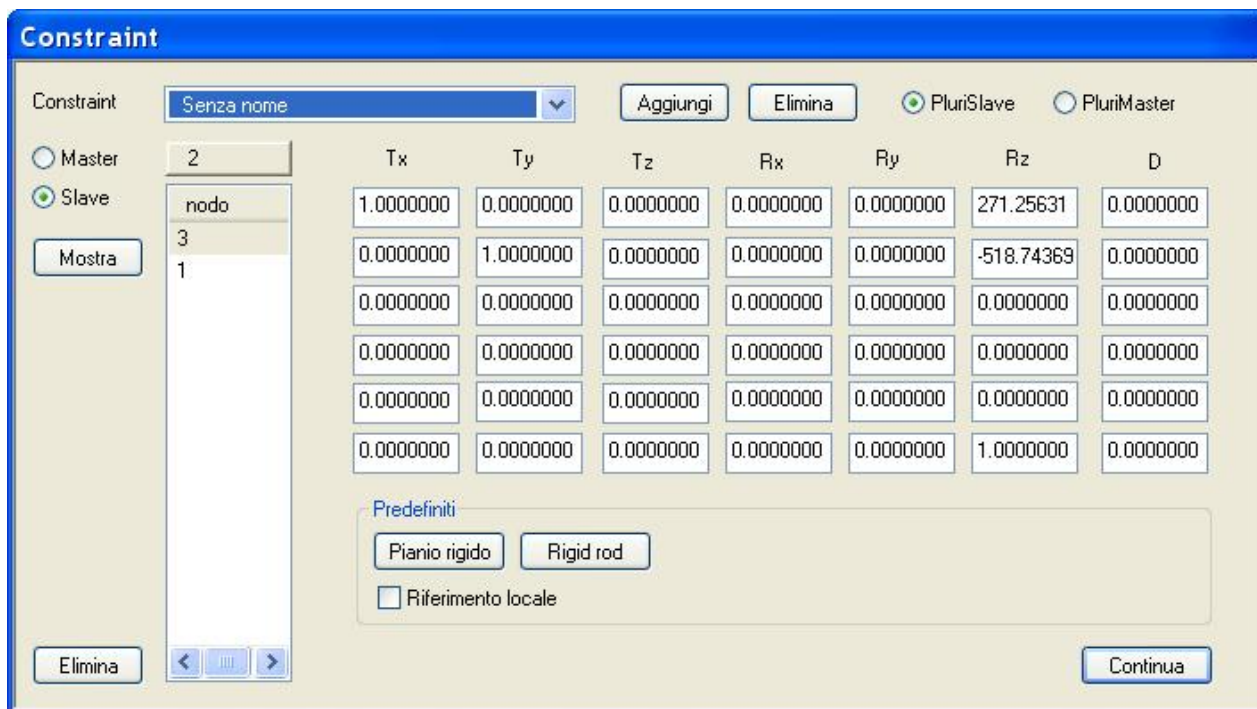
dalla posizione di più nodi master, si ha un constraint "multi master". Nel dialogo, una volta attivato questo tipo di constraint si invertirà semplicemente il contenuto della lista e si potrà avere un solo nodo slave e più nodi master.

Un esempio tipico è il constraint "weld" che viene usato per "saldare" due mesh con orditura diversa imponendo che un nodo che si trovi non a coincidere con un altro nodo ma posto tra due nodi ne condivida gli spostamenti. Se, ad esempio, si volesse che un nodo che si trova a metà del segmento che unisce due nodi continui a restare su tale segmento e nella metà di esso anche dopo la deformazione, si assegnerà un a matrice di questo tipo per le matrici master di entrambi i nodi.

$D_m =$

0.5	0	0	0	0	0	0	0
0	0.5	0	0	0	0	0	0
0	0	0.5	0	0	0	0	0
0	0	0	0.5	0	0	0	0
0	0	0	0	0.5	0	0	0
0	0	0	0	0	0.5	0	0
0	0	0	0	0	0	0.5	0

Il dialogo di gestione dei constraint



Illustriamo le funzioni del dialogo con un esempio d'uso.

Premere Aggiungi ed assegnare il nome del constraint. Scegliere se è PluriSlave (più comune) o PluriMaster. Assegnare numericamente il master (o lo slave) oppure cliccando il nodo voluto fuori del dialogo. Selezionare l'opzione Slave (o master) che generalmente si attiva automaticamente dopo la prima assegnazione del master. Operare similmente per assegnare i

nodi slave. Selezionare il nodo slave voluto dalla lista e assegnare i coefficienti alla matrice. Il bottone elimina consente di eliminare lo slave selezionato dalla lista. Il bottone mostra evidenza sul modello della struttura i nodi di quel constraint: a tratto più spesso i master.

I bottoni Piano rigido e Rigid rod generano i constraint relativi automaticamente. Se è attivo l'opzione Riferimento locale, il constraint del piano rigido viene proiettato nel piano formato dai nodi slave (se definito)

Nel caso di nodi vincolati, i vincoli possono essere assegnati solo al nodo master.

Elementi di contatto

Questa funzionalità consente di inserire un vincolo di contatto tra un lato di un elemento bidimensionale e gli elementi che gli sono connessi. Il vincolo è realizzato tramite due elementi di lunghezza nulla con le caratteristiche assegnate per modellare il contatto, posti tra i nodi dei lati dei due elementi piani connessi. Per realizzare questo tipo di unione vengono duplicati i nodi di contatto e quindi gli elementi non sono più connessi dai gradi di libertà dei nodi comuni, ma dagli elementi di lunghezza nulla che connettono uno dei nodi esistenti con il nodo coincidente associato all'altro elemento. Questa operazione genera quindi una modificazione topologica del modello ed è presente solo nel modello della struttura impiegato nell'ambiente Earthquake Engineering.

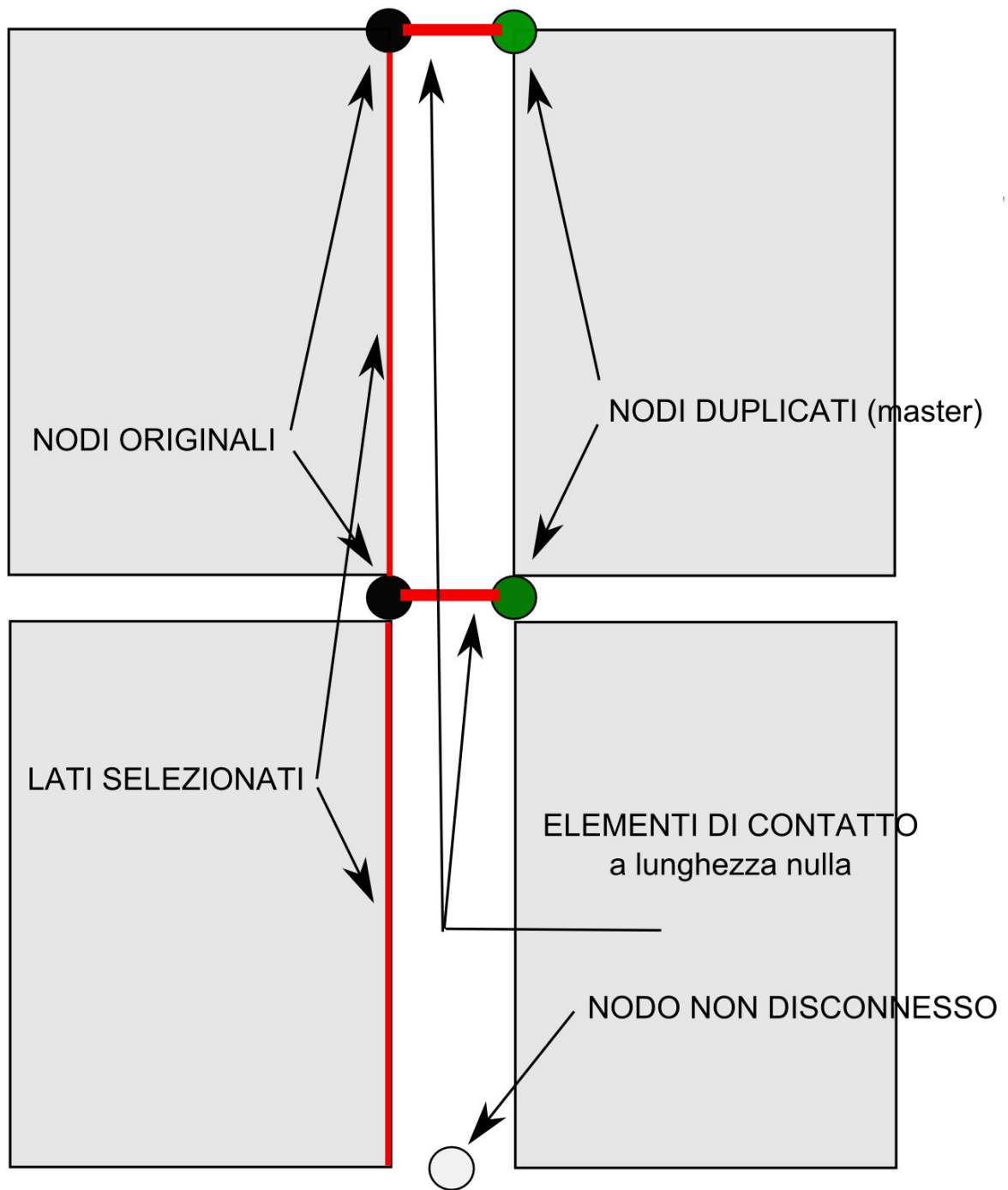
L'interfaccia molto immediata che è stata realizzata, consente di selezionare semplicemente il lato voluto di uno dei due elementi da sconnettere. Il "prompt" di selezione dell'elemento è standard (il triangolino sul lato 1) ma il lato interessato alla sconnessione è rappresentato con una linea di maggior spessore. Usiamo il termine "sconnessione" per indicare la sostituzione della continuità con l'inserimento degli elementi di contatto.

Vi sono delle limitazioni logiche al contatto che vengono gestite in modo automatico e trasparente.

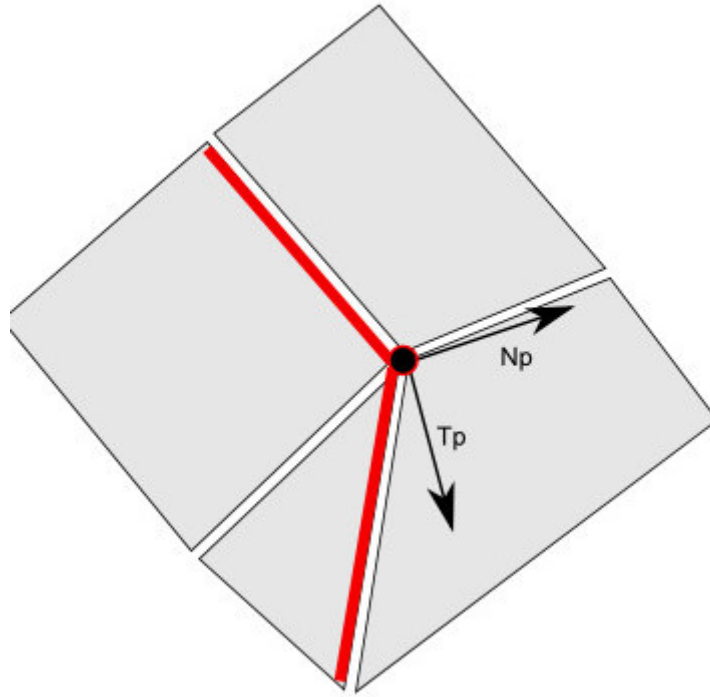
- Non si può operare su elementi a 8 nodi
- Si può operare solo su elementi piani che possono anche essere connessi ad elementi monodimensionali
- Non si possono connettere lati che siano in comune con più di due elementi
- I vincoli originali del nodo vengono copiati sul nodo coincidente generato
- Qualora si selezionino il lato comune di due elementi, viene considerato automaticamente un solo vincolo di contatto
- Vengono generati i nodi duplicati di contatto solo se il nodo è comune a due lati selezionati, ciò per evitare, operando in modo facile ed intuitivo, di sconnettere lati secondo linee non desiderate.
- Vengono considerati i nodi con grado di connessione 2 cioè posti all'estremità della linea di sconnessione
- Non vengono considerati nodi che non siano comuni ad altri elementi.

Nel materiale di contatto è possibile assegnare una penalità rotazionale che serve a non avere una matrice non definita qualora si connettano elementi che non hanno rigidità per le rotazioni intorno ad un asse perpendicolare al loro piano, come gli elementi a sforzo piano. Se invece l'elemento di contatto connette un elemento trave, è opportuno assegnare un valore molto basso che consenta la rotazione delle sezioni della trave.

La figura sottostante intende chiarire la modalità con cui viene generata la linea di sconnessione operando una semplice selezione dei lati.



La direzione dell'elemento di contatto è posta sulla bisettrice dei due lati contigui sconnessi ovvero ortogonale al lato se si tratta di un nodo di estremità.

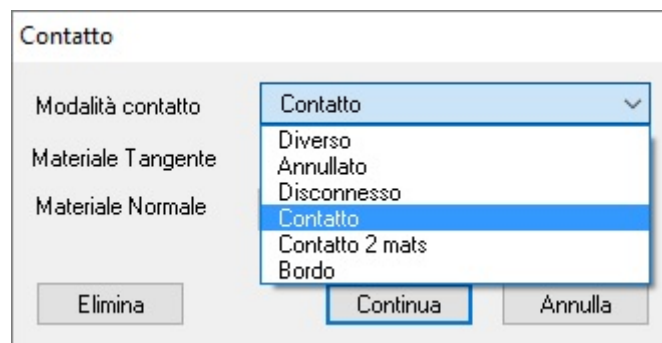


Questa funzionalità è piuttosto flessibile e consente di avere delle "sconnessioni" di vario tipo:

- Sconnessione totale del lato prescelto dagli altri elementi
- contatto con eventuale frizione
- condizione di bordo.

Per avere la massima versatilità, queste funzionalità vengono ottenute associando dei materiali agli elementi di lunghezza nulla. Nel caso del contatto semplice, si può associare un solo materiale di Contatto, negli altri casi è possibile assegnare due materiali (generalmente elastici) con smorzamento per modellare, ad esempio, il comportamento di un bordo che simuli una prosecuzione indefinita del mezzo. Vengono smorzate in tal modo anche le vibrazioni che non vengono riflesse da un bordo finito.

Per ottenere questa versatilità tramite una interfaccia grafica molto intuitiva, si possono assegnare al contatto le modalità di funzionamento selezionandole dall'apposito menu.



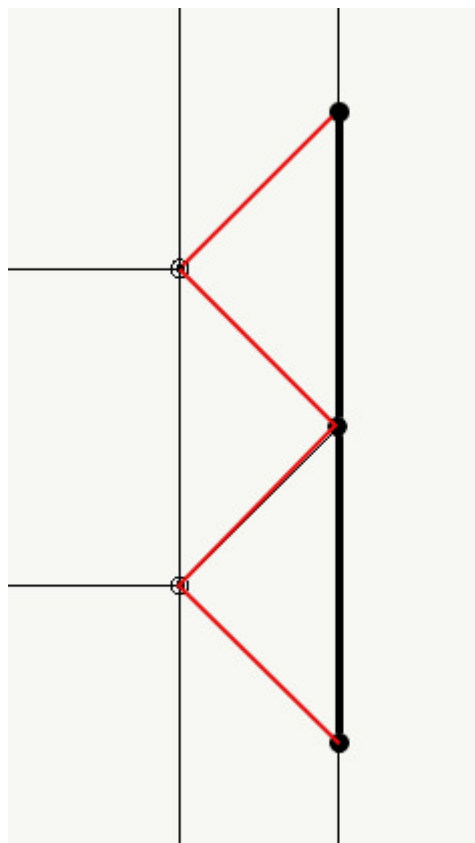
- Annullato - elimina l'elemento di contatto
- Sconnessione - modella la sconnessione del lato dell'elemento dai nodi cui è connesso.

- Bordo - consente di modellare le condizioni di bordo generando due nodi vincolati ai quali sono connessi gli elementi di lunghezza nulla ai quali saranno assegnati i materiali voluti
- Contatto - si tratta dell'uso più tipico e richiede l'assegnazione di un solo materiale che tipicamente è il materiale **Contatto**
- Contatto 2 mat - come sopra, ma è possibile assegnare due materiali che agiscono tangenzialmente ed ortogonalmente al piano di contatto.
- **Contatto Beam** Contatto Beam - viene impiegato esclusivamente per connettere i due nodi di un elemento Beam ad un nodo generalmente di un elemento piano. Supporta esclusivamente il materiale Contatto Beam
- Cerniera - genera una connessione a cerniera cilindrica tra i due lati degli elementi piani in contatto. Il comportamento della cerniera è dato dai materiali uniassiali aggregati associati al contatto. La cerniera in effetti è concentrata nei nodi per cui la rigidezza del materiale associato non è relativa al segmento ma è concentrata nei due nodi

Il bottone Elimina, assegna il valore Annullato al combo-box per cui il contatto viene eliminato.

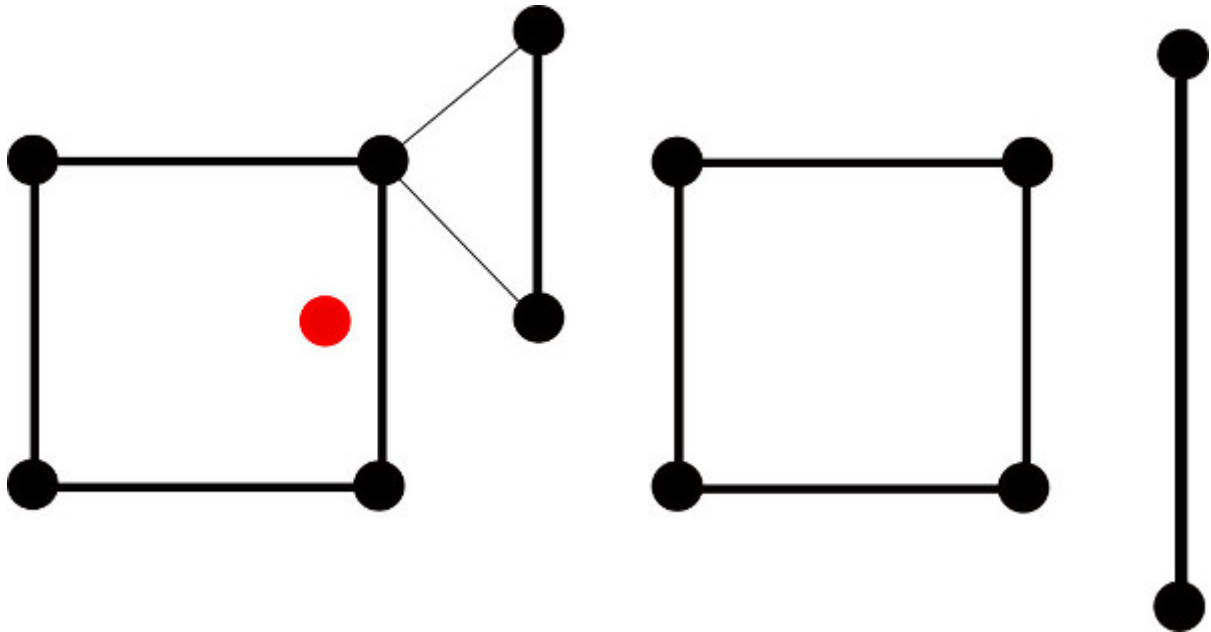
Quanto precedentemente esposto è di carattere generale ma nasce soprattutto per l'esigenza di generare un contatto lineare tra elementi piani complanari, tipico comportamento di una palancola nel terreno. Nel dialogo è definito **Contatto**

L'elemento di **Contatto Beam** si assegna come gli altri elementi di contatto, selezionando un lato di un elemento piano. Viene eseguita la ricerca di un elemento Beam attiguo, non coincidente con il lato, e viene generato l'elemento di contatto. E' consigliabile che i nodi siano sfalsati come nella figura sottostante. In figura l'elemento di contatto è raffigurato in rosso per evidenziarlo (nel programma non è colorato).



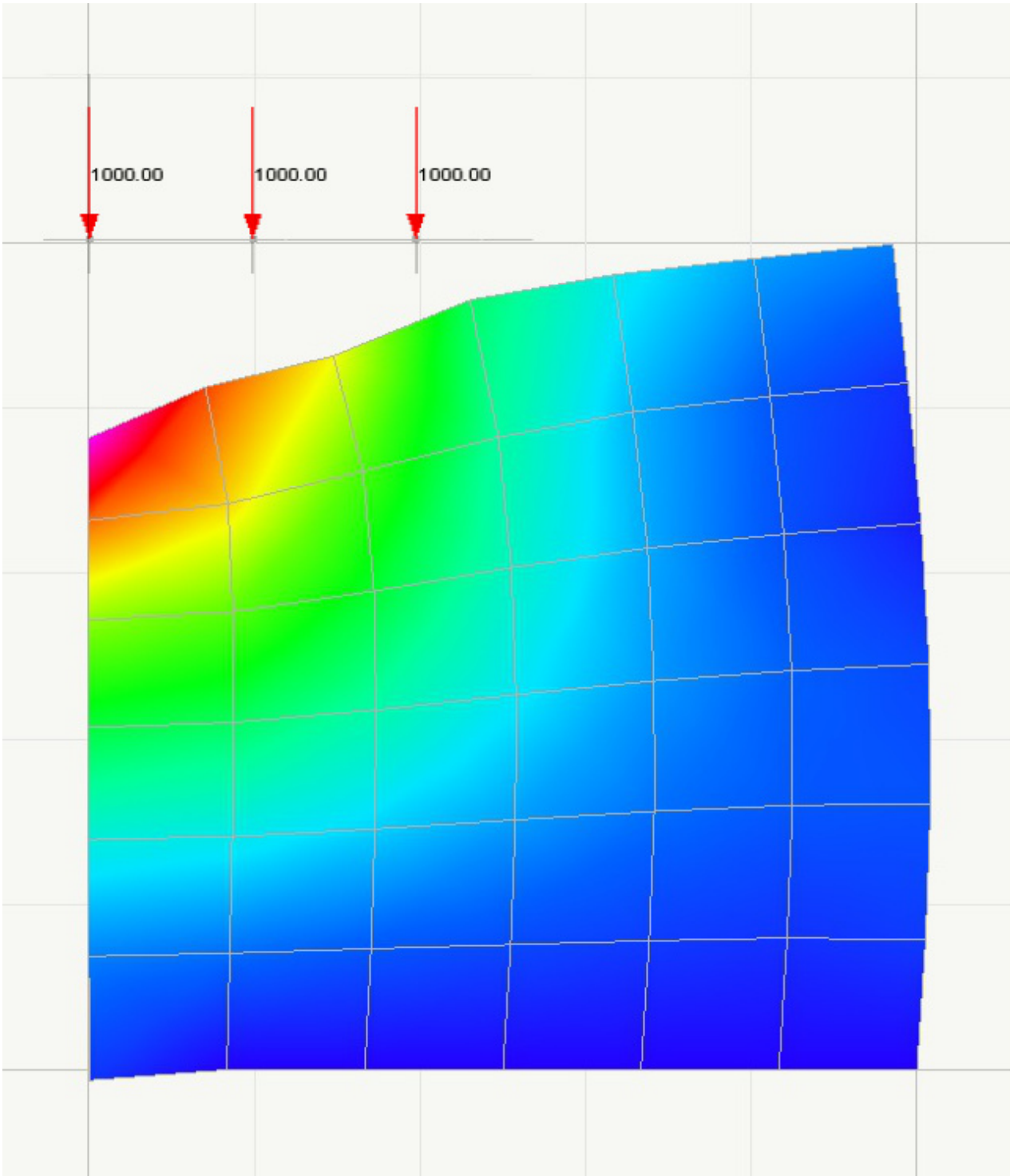
La figura seguente illustra le condizioni di assegnazione del Contatto Beam. A sinistra la disposizione corretta nella quale un nodo dell'elemento Beam è nell'intervallo del lato dell'elemento. A destra la disposizione non ammessa. Se si esegue questa

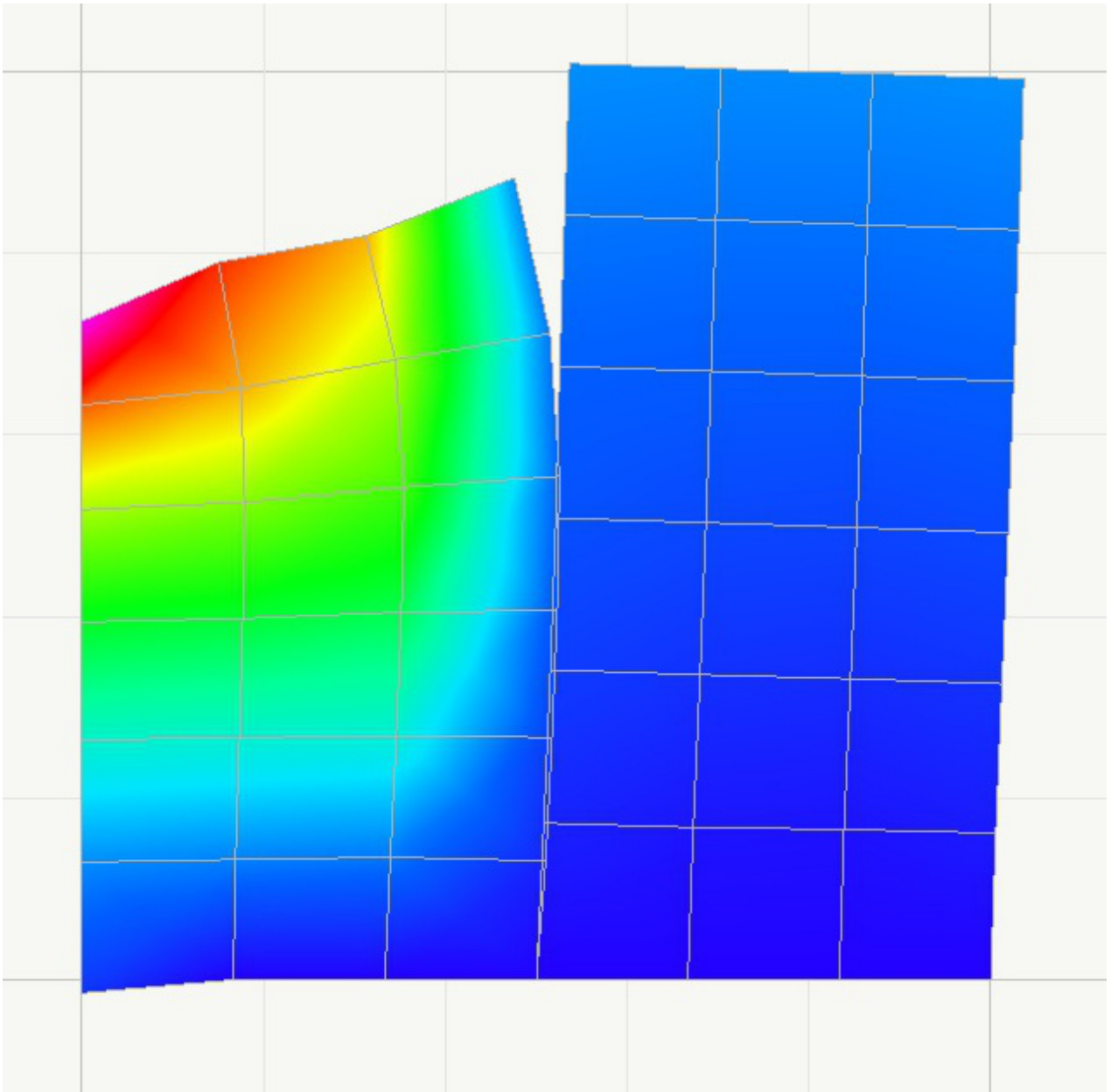
selezione l'elemento di contatto non viene accettato. Nella figura di sinistra, il punto rosso indica la zona in cui si deve cliccare con il mouse per effettuare la selezione del lato voluto.

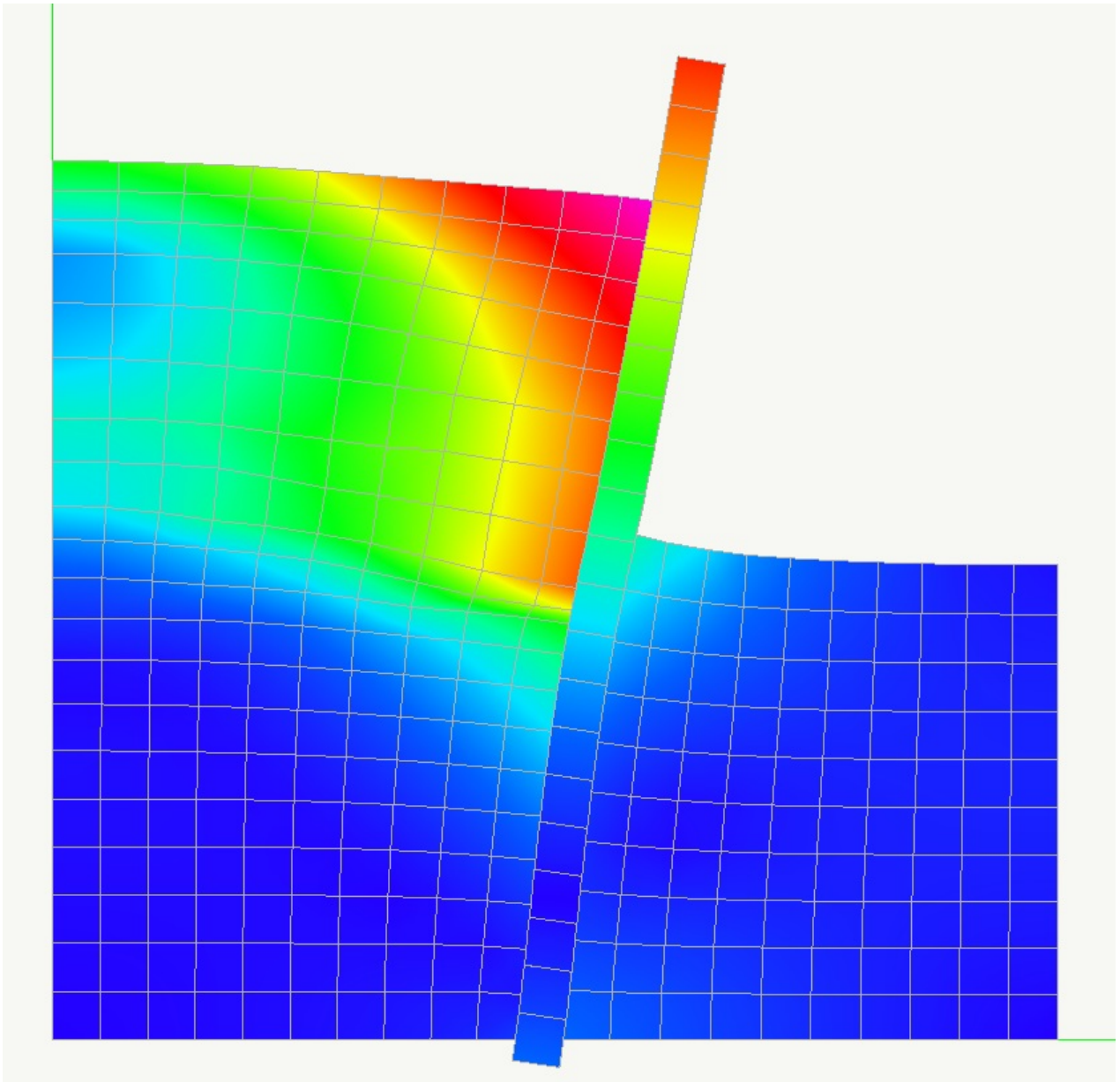


La matrice generata da questo elemento può, essere non simmetrica per cui si consiglia di impiegare i metodi di fattorizzazione per matrici non simmetriche.

Per illustrare le potenzialità d'impiego di questa funzionalità, si riportano tre immagini. Nelle prime due si è caricato un elemento elastico asimmetricamente e si vedono le differenti deformate con e senza la disconnessione e l'unione di contatti che, in questo, caso presenta solo penalità normale, cioè capacità di trasmettere forze ortogonali al lato di contatto. La terza figura rappresenta una palancola dopo lo sbancamento del lato a valle. In questo caso il materiale è del tipo Geo.

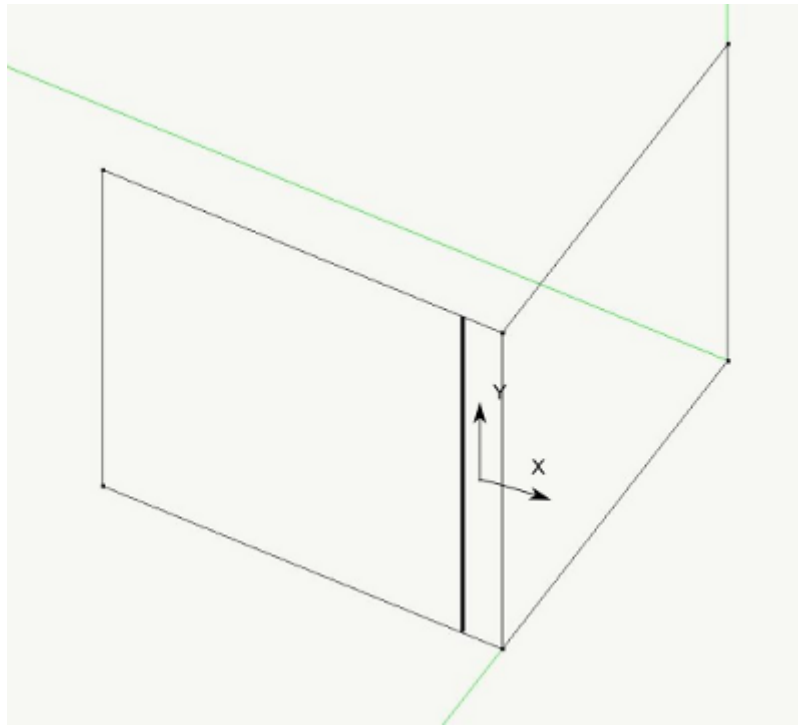






E' evidente l'impiego di questa funzionalità in geotecnica per modellare la spinta del terreno che agisca su una palancola o altra superficie solo con una azione di attrito.

Il tipo di connessione definito **Cerniera** può essere associato al lato di un elemento bidimensionale connesso ad altro elemento sempre bidimensionale. Consente di generare una connessione tra i lati degli elementi governata dai materiali assegnati per ogni grado di libertà della connessione. Anche qui la connessione si ottiene tramite duplicazione ed i nodi e connessione di essi tramite elementi di lunghezza nulla. La figura che segue, indica il sistema di riferimento e la modalità di assegnazione.



Configurazione per l'analisi Pushover

La terminologia

Dobbiamo tentare di chiarire la terminologia che adotteremo. Alcune variabili nella norma sono indicate solo con un simbolo per cui è impossibile indicarle in modo esatto in un testo. Così è per l'analisi statica non lineare altrove, nella norma "analisi pushover". Entrambi termini fuorvianti.

L'analisi statica non lineare è uno strumento numerico che può essere impiegato per molteplici finalità ed il modo in cui lo impiega l'analisi descritta in normativa è appunto un metodo che dovrebbe avere un suo nome identificativo, e non il nome identificativo tratto da uno strumento in esso impiegato.

Anche il termine "pushover" è scorretto. Pushover vuol dire "ribaltamento", in italiano si potrebbe egregiamente dire "analisi di spinta". Ma questa analisi non caratterizza il metodo nella sua totalità. L'analisi di spinta prevede di far crescere una spinta laterale e di tracciare la relazione forza spostamento.

Su questa idea negli Stati Uniti nacque l'idea brillante di costruire dalla curva di spinta, con una semplice conversione di forze in accelerazione, una curva di "capacità" che si ponesse nello stesso spazio dimensionale dello spettro di domanda in termini di spostamento. Si ha con questo metodo geniale la possibilità di confrontare due curve: una di domanda, l'altra di risposta e le informazioni che si ottengono sono sintetiche e molto utili. La nostra normativa ha scelto una strada meno esplicita, ma in sostanza adotta lo stesso criterio. Pertanto in genere useremo "spinta" o "pushover" per l'analisi o la curva di spinta e il termine "capacity" per indicare il metodo nel suo insieme ANCHE se condotto con le modalità richieste dalla normativa italiana.

Precisiamo subito che, per dare al progettista il massimo delle informazioni, daremo i risultati numerici delle analisi sia "capacity" dell'ATC 40 sia del DM08 ma poiché la rappresentazione della sola curva è priva di informazioni utili, come rappresentazione a dialogo useremo sempre la rappresentazione capacity del ATC 40. Ripetiamo che i dati numerici e le relative elaborazioni sono però condotte ANCHE per la normativa italiana.

Per maggiori dettagli sull'analisi pushover si veda: [Analisi Pushover](#)

Nota sulla distribuzione accidentale delle masse

La forza laterale deve essere assegnata, secondo normativa, con una eccentricità tale da rappresentare un'eventuale

distribuzione irregolare delle masse di piano. Il metodo di controllo di spostamento di Earthquake Engineering si basa sullo scalamento lineare della forza agente fino ad ottenere lo spostamento richiesto, pertanto se si assegnano, insieme alle forze laterali, degli opportuni momenti torcenti, si otterrà lo spostamento e la rotazione richieste dalla normativa. Questo metodo semplifica molto il problema in quanto non costringe a modificare il modello di calcolo.

I passi che occorrono per eseguire un'analisi di capacità.

Occorre determinare il modo in cui viene generata l'azione di spinta che, secondo normativa italiana ed anche suggerimenti internazionali può essere effettuata secondo vari metodi assegnando tali metodi a due gruppi di analisi, detti Gruppo 1 e Gruppo 2, per ognuno dei quali possono essere impiegati alcuni di questi metodi.

- costante (gruppo 2)
- lineare (gruppo 1)
- monomodale (gruppo 1)
- multimodale (gruppi 1 e 2)
- multimodale adattiva (gruppo 2)

Nel caso della spinta multimodale, si usa la seguente formulazione:

$$F_i = \sqrt{\sum_{m=1}^{m=N} (\Gamma_m m_i \phi_i^m S(t)_m)^2}$$

dove si effettua la media quadratica dei contributi modali ottenuti tramite il coefficiente di partecipazione modale Γ , la risposta modale S al periodo t , la massa i -esima ed il componente i -esimo dell'autovettore ϕ del modo m ,

Per la spinta multimodale, si deve assegnare il numero di modi da considerare. Verrà riportata la percentuale di masse partecipanti.

Generalmente si impiegano le prime due modalità definite da DM08: gruppo 1b e gruppo 2a.

L'ambiente EE nel dialogo dedicato Pushover consente la generazione automatica delle spinte e, non solo, eventualmente delle 16 azioni di spinta richieste dalla normativa.

Poi occorre eseguire l'analisi statica non lineare. L'ambiente EE richiede che le condizioni di carico di spinta appena generate vengano impiegate in "Azioni" dell'ambiente EE appositamente deputate a raccogliere le modalità di impiego delle condizioni di carico.

In genere l'azione di spinta va applicata alla struttura già caricata con carichi gravitazionali (pesi propri, permanenti etc.). pertanto occorre fare prima un'analisi con i carichi gravitazionali, "congelare" lo stato ottenuto e quindi applicare l'azione di spinta. Questo lo si può fare con facilità usando la ["lista di analisi"](#).

Poiché la curva di spinta si ottiene registrando al passo gli spostamenti nodali, per ogni analisi occorre attivare un registratore capacity. Terminata l'analisi, il registratore capacity provvede ad eseguire le elaborazioni richieste per l'analisi capacity e i risultati possono essere esaminati a dialogo.

Questa strutturazione per singoli passi consente un uso estremamente flessibile del programma. Sono infatti non rari i casi in cui si desidera eseguire un'analisi di spinta con scopi e modalità diverse da quella generale proposta dalla normativa.

D'altro canto la predisposizione di tante operazioni potrebbe essere disagiata. Pertanto il dialogo Pushover consente di

automatizzare l'intera procedura in modo che all'utilizzatore non resti altro che rapidamente esaminare i dati ottenuti ed eventualmente passare ad ExSys per le verifiche delle membrature.

In pratica, il dialogo dedicato Pushover è dedicato a generare le azioni di spinta e le righe della lista delle analisi, due per ogni spinta (un'analisi per le azioni gravitazionali, una per la spinta). Vediamo i passi necessari.

Se si seleziona la modalità "Modale adattiva", il dialogo consente di configurare le azioni e la lista delle analisi in modo da eseguire una analisi pushover con il metodo adattivo ([vedi](#)).

Generazione delle forze di spinta

The screenshot shows the 'Configurazione Pushover' dialog box with the following settings:

- Nome azione: Senza titolo
- Suffisso automatico
- Gruppo1: _X+c1L_SLD
- Gruppo2: _X+c2C_SLD
- Spettro: SLDh
- Accelerazione: 50.258346
- Tipo spettro: SLD
- Tipologia Gruppo 1: Lineare
- Tipologia Gruppo 2: Costante
- Numero modi: 3
- Masse partecipanti %: 0.0
- Aggiornamenti: 1
- Direzione spinta: +X
- Direzione (*):
- Eccentricità: e = 0
- %: 5.0000000
- Lunghezza: 0.0000000
-
- Sostituisci azioni
-
-
-
-
-
- Passi: 12
- G1 G2
-

La prima pagina del dialogo, Azioni di spinta, consente di definire:

- direzione della spinta
- verso della spinta
- spettro di progetto qualora la spinta sia unimodale o multimodale
- l'accelerazione di progetto
- l'eccentricità eventuale del baricentro delle masse
- la posizione del baricentro decentrato rispetto al baricentro geometrico

Queste informazioni sono sufficienti a generare in Nòlian una nuova condizione di carico con il nome assegnato. Qualora si voglia meglio identificare questa azione, si può aggiungere un suffisso automatico così costruito:

+Xd1U

Il primo carattere può essere + o meno ed indica il verso della spinta. Il secondo carattere può essere X o Y ed indica la direzione. Il terzo carattere può essere d, c o s ed indica se il baricentro delle masse è a (d)estra, (c)entro o (s)inistra del baricentro geometrico guardando nel verso di applicazione dell'azione. L'ultimo carattere infine può essere 2C, 1L, 1U, 1M e indica, rispettivamente se l'azione ha un andamento costante, lineare, basata sul primo modo o su più modi. Il numero che precede il carattere, indica il gruppo in cui il DM18 include questi tipi di azioni.

I bottoni "Genera singola spinta", consentono di generare l'azione di gruppo 1 o 2 con i valori che sono stati impostati. Qualora si impieghi invece il bottone Genera 16 azioni, vengono generate automaticamente le 16 azioni previste dalla normativa secondo le metodologie assegnate per ciascun gruppo.

Qualora si desideri che l'azione non agisca secondo gli assi globali coordinati, ma in una qualsiasi direzione sul piano XY, si deve selezionare la voce Dir dal menu dei gradi di libertà e quindi assegnare l'angolo voluto in gradi sessadecimali.

Il bottone "Genera scansione angolare" consente di generare in automatico le azioni di spinta per un numero voluto di intervalli sull'angolo giro, sul piano xy. Si assegnano il numero di intervalli e si seleziona il gruppo di azioni da generare come descritto in precedenza.

Questa pagina del dialogo ha consentito di generare le condizioni di carico di spinta, non ha in alcun modo agito sulla configurazione dell'ambiente EE. E va ricordato che le azioni (condizioni di carico, più esattamente) generate possono essere eliminate o modificate solo con i consueti strumenti di Nòlian.

Generazione delle azioni di spinta

Analisi di Capacità ? X

Genera spinta | Attiva azioni

Attivazione azioni di spinta

Visualizza fine passo analisi

Azione	Abilitata
Pushover_X+s1L_SLV	<input checked="" type="checkbox"/>
Pushover_X+d1L_SLV	<input checked="" type="checkbox"/>
Pushover_X-s1L_SLV	<input checked="" type="checkbox"/>
Pushover_X-d1L_SLV	<input checked="" type="checkbox"/>
Pushover_Y+s1L_SLV	<input checked="" type="checkbox"/>
Pushover_Y+d1L_SLV	<input checked="" type="checkbox"/>
Pushover_Y-s1L_SLV	<input checked="" type="checkbox"/>
Pushover_Y-d1L_SLV	<input checked="" type="checkbox"/>

Analisi

Nodo di controllo:

Passi per azione gravitazionale:

Passi per analisi di spinta:

Spostamento massimo nodo di controllo:

Tolleranza sull'equilibrio:

Iterazioni sull'equilibrio:

Forma file risultati per verifiche

Vulnerabilità

Esegue analisi di vulnerabilità

Valuta stati limite di danno con azioni SLV

Nome spettro SLD:

Passi di intervallo tra i salvataggi:

Valore limite drifting:

La seconda pagina di questo dialogo consente di generare le linee della lista di analisi con tutte le informazioni necessarie per eseguire le analisi che si desidera in automatico.

Ogni analisi consta, come già detto, di due analisi distinte: una applicando le azioni gravitazionali, quella successiva applicando l'azione di spinta. Pertanto è necessario, per automatizzare la procedura, distinguere le condizioni di carico gravitazionali dalle altre. Le condizioni di carico gravitazionali non possono ovviamente essere generate automaticamente in quanto dipendono dalle scelte progettuali. Pertanto è necessario che il progettista generi una o più condizioni di carico gravitazionali e che associ ad esse un tipo di carico definito gravitazionale, come ad esempio il tipo Permanente.

In questa pagina di dialogo si possono, sulla base di questa distinzione, generare le azioni - questa volta le azioni in senso stretto di azioni dell'ambiente EE - di tipo gravitazionale. Ciò si può ottenere con un semplice comando. Le condizioni di carico non gravitazionali, e tra queste quelle di spinta che abbiamo generato usando la prima pagina del dialogo, vengono elencate in una tabella. Selezionando una o più di queste condizioni di carico assunte come carico di spinta, verrà generata una coppia di linee nella lista delle analisi: la prima dedicata all'analisi per carichi gravitazionali, la seconda per l'analisi con il carico di spinta.

Avendo generato in precedenza le 16 condizioni di carico previste dalla normativa, sarà sufficiente premere **Seleziona tutto** e quindi **Genera lista** perché il compito sia eseguito. Nelle linee della lista verranno riportati, tipo di analisi e parametri di analisi che sono quelli abituali (tolleranza di convergenza, passo totale, passi di carico etc.).

A questo punto, se non si intende raffinare le linee della lista, è sufficiente premere il bottone **OK** con il quale si chiude il dialogo e iniziano tutte le analisi programmate.

Vi sono infine due opzioni che possono essere attivate prima di procedere con l'analisi: chiedere che vengano salvati i risultati non solo delle analisi di capacità, ma anche spostamenti e sforzi per le successive verifiche. Inoltre è possibile chiedere che il procedimento si arresti ogni qualvolta termini una analisi in modo da visualizzarne volta per volta i risultati.

Per le opzioni relative alla [analisi di vulnerabilità](#), consultare il capitolo relativo;

Quindi, ricapitolando:

- Generare una o più condizioni di carico definendole gravitazionali ed assegnare i carichi gravitazionali. Le condizioni possono essere anche più di una, verranno assunte agire contemporaneamente.
- Aprire la prima pagina del dialogo pushover, assegnare valore di eccentricità, spettro, accelerazione.
- Premere il bottone Genera sedici azioni
- Andare nella seconda pagina del dialogo ed assegnare i parametri di analisi oltre all'indice del nodo di controllo
- Premere Genera azioni gravitazionali
- Premere Seleziona tutto
- Premere Genera sedici azioni
- Procedere con l'analisi.

Dinamica non lineare assistita

Tramite la voce "Time History..." del menu "Analisi", si accede alle funzionalità necessarie per configurare il programma la fine di eseguire una analisi dinamica non lineare in modo speditivo,

L'analisi nel "dominio del tempo" o "time history" o anche "analisi dinamica non lineare" è un'analisi basata sulla integrazione nel tempo della risposta di una struttura appunto nel tempo. Generalmente si hanno accelerogrammi registrati o derivati dallo spettro di normativa (vedi [accelerogrammi spettro compatibili](#)). La normativa richiede che si usino sette accelerogrammi spettro compatibili.

Nell'ambiente Earthquake Engineering di Nolian All-In-One (nel seguito EE) si può effettuare un'analisi nel dominio del tempo accedendo al dialogo delle analisi e settando i parametri opportuni. Per facilitare, però le analisi multiple richieste dalla normativa, in EE è stato introdotto uno strumento molto efficace: la ["lista di analisi"](#), dove si possono programmare più analisi che verranno eseguite automaticamente in sequenza.

Per facilitare il lavoro del progettista, si è predisposta una funzione che genera la lista di analisi per un'analisi nel dominio de tempo con più accelerogrammi. Questa funzione predispose la lista.

Accedendo al dialogo tramite il comando "Time History..." del menu Analisi, si ha l'elenco degli accelerogrammi predisposti nel dialogo "Forzanti". Se non si sono resi disponibili gli accelerogrammi, essi si possono generare da uno spettro di progetto dalla funzionalità "Forzanti" come già detto.

Dal dialogo di gestione delle time history, si possono selezionare gli accelerogrammi voluti e assegnare la direzione in cui agiscono.

E' necessario che le azioni gravitazionali predispongano la struttura a ricevere le sollecitazioni sismiche e pertanto nella lista di analisi ad ogni azione nel dominio del tempo viene premessa una azione con le forze gravitazionali con un "restart" alla fine che congela lo stato tensionale e deformativo.

Si possono assegnare il numero di passi di analisi per l'azione gravitazionale, i passi e l'intervallo temporale per l'analisi nel dominio del tempo, e i passi per ciascuna analisi non lineare in ognuno dei passi temporali e la tolleranza sull'energia per terminare il processo.

Inoltre è possibile generare automaticamente un registratore di [stati critici](#) attivando il check e assegnando l'intervallo di passi tra i salvataggi e il limite di drifting di piano.

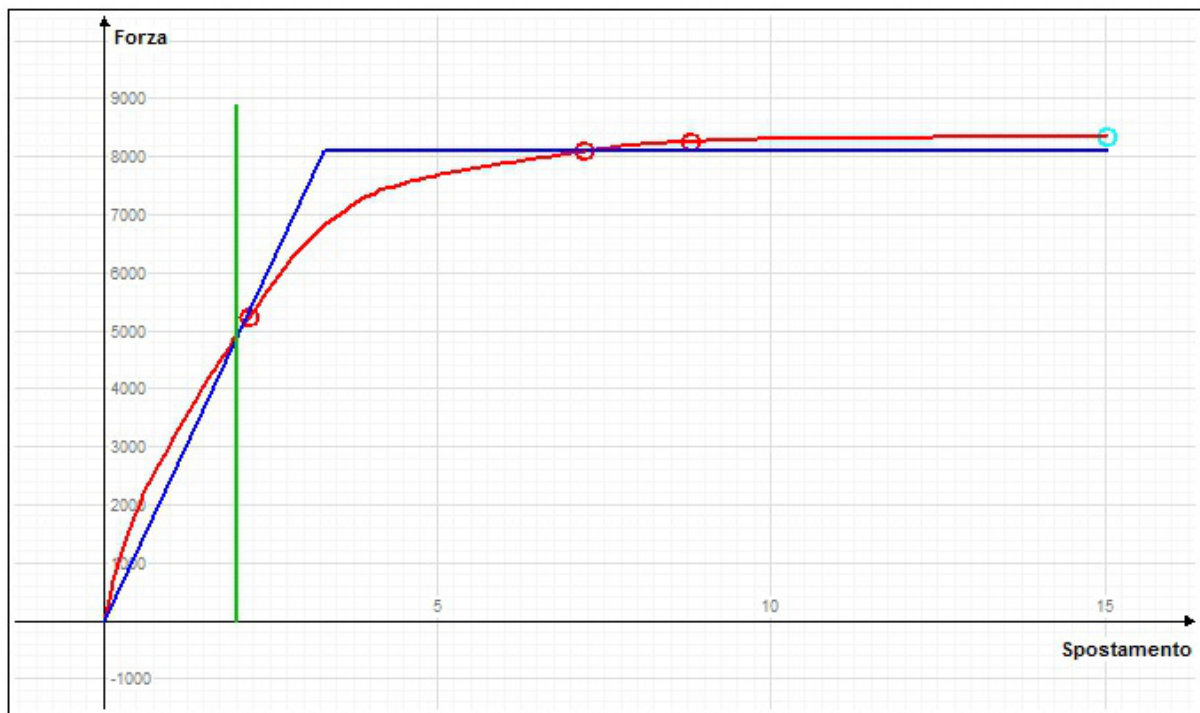
Questa funzione genera, quindi, sia le azioni che le righe della lista.

Se si è assegnato un registratore al passo e si è attivata l'opzione di salvataggio degli stati critici, avvedendo alla voce del menu "Vulnerabilità" si può esaminare la lista degli stati critici con la PGA "capacity" per poter valutare la vulnerabilità Oltre all'elenco degli stati critici, si può avere una tabella di sintesi che riporta i valori degli stati critici che hanno presentato la PGA/capacity minore tra tutte le occorrenze. Viene riportato il minimo anche tra tutte le analisi (e non la media). La PGA capacity è la accelerazione di picco riscontrata prima che si verifichi lo stato critico. Attualmente il configuratore non consente la assegnazione automatica di più accelerogrammi contemporanei in differenti direzioni. Occorre generare le azioni relative assegnando la direzione e quindi attivare le azioni relative nella tabella.

Visualizzazione dei risultati dell'analisi di Capacità (pushover)

I risultati vengono visualizzati tramite un dialogo multi pagina al quale si accede dal menu Risultati.

Visualizzatore | Dati numerici

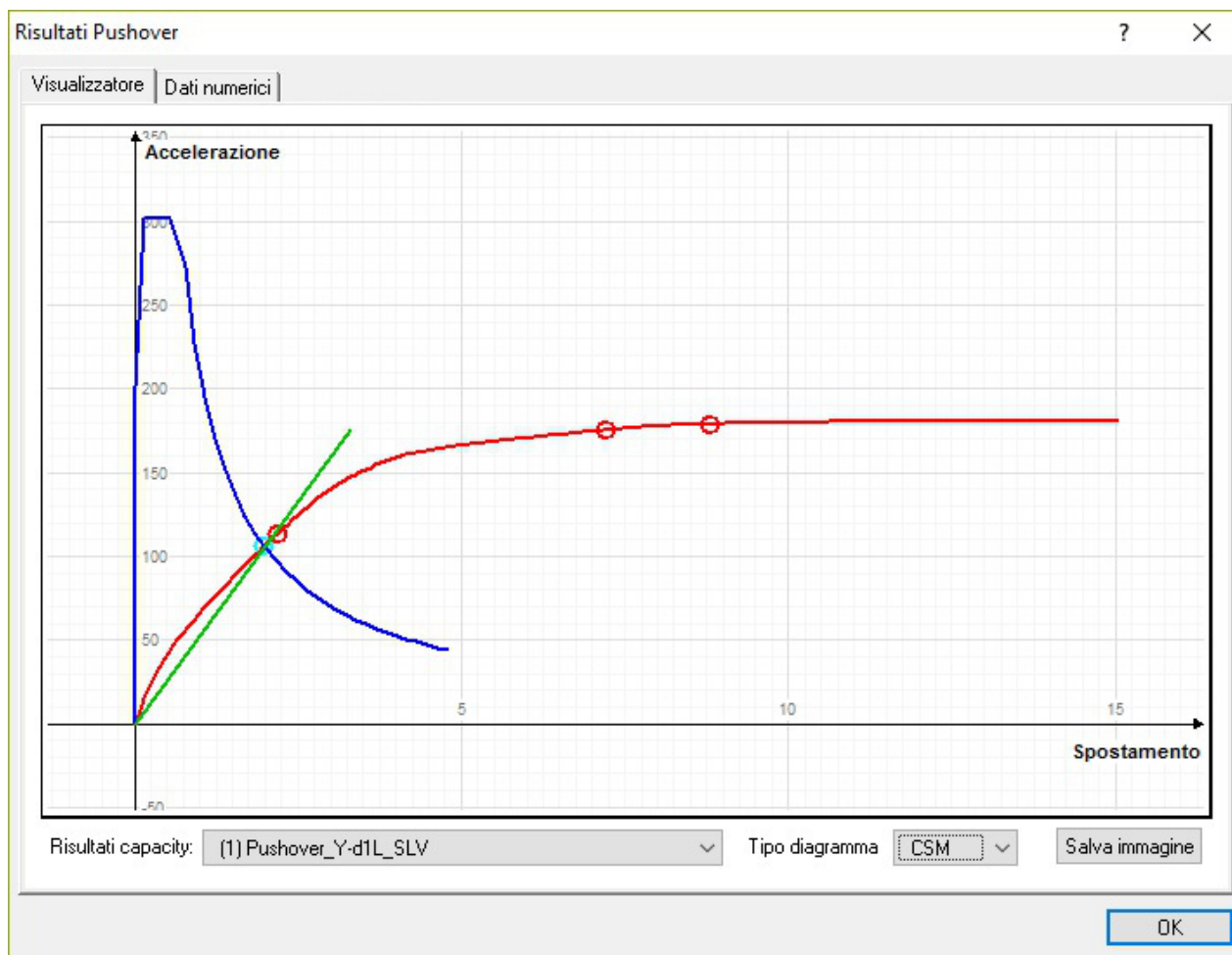


Risultati capacity: (1) Pushover_Y-d1L_SLV

Tipo diagramma DM08

Salva immagine

OK



I risultati di questa analisi, sono visualizzabili nella pagina del dialogo Pushover in due forme: secondo N2 oppure CSM. La modalità è selezionabile nel dialogo.

Nel caso della visualizzazione secondo il N2, oltre al curva di spinta SDOF (singolo grado di libertà) si ha la rappresentazione della bilatera equivalente, un segmento verticale indica il valore di d^*_{max} ed un punto verde sulla curva il valore di d^*_u . Se $d^*_u < d^*_{max}$, il segmento rappresentativo di d^*_{max} è in colore rosso per evidenziare che la verifica sullo spostamento non è soddisfatta. Nel caso si selezioni la modalità CSM (Capacity Spectrum Method) si ha la rappresentazione degli spettri deman capacity secondo la [analisi di capacità](#), descritti in altra sezione di questo manuale.

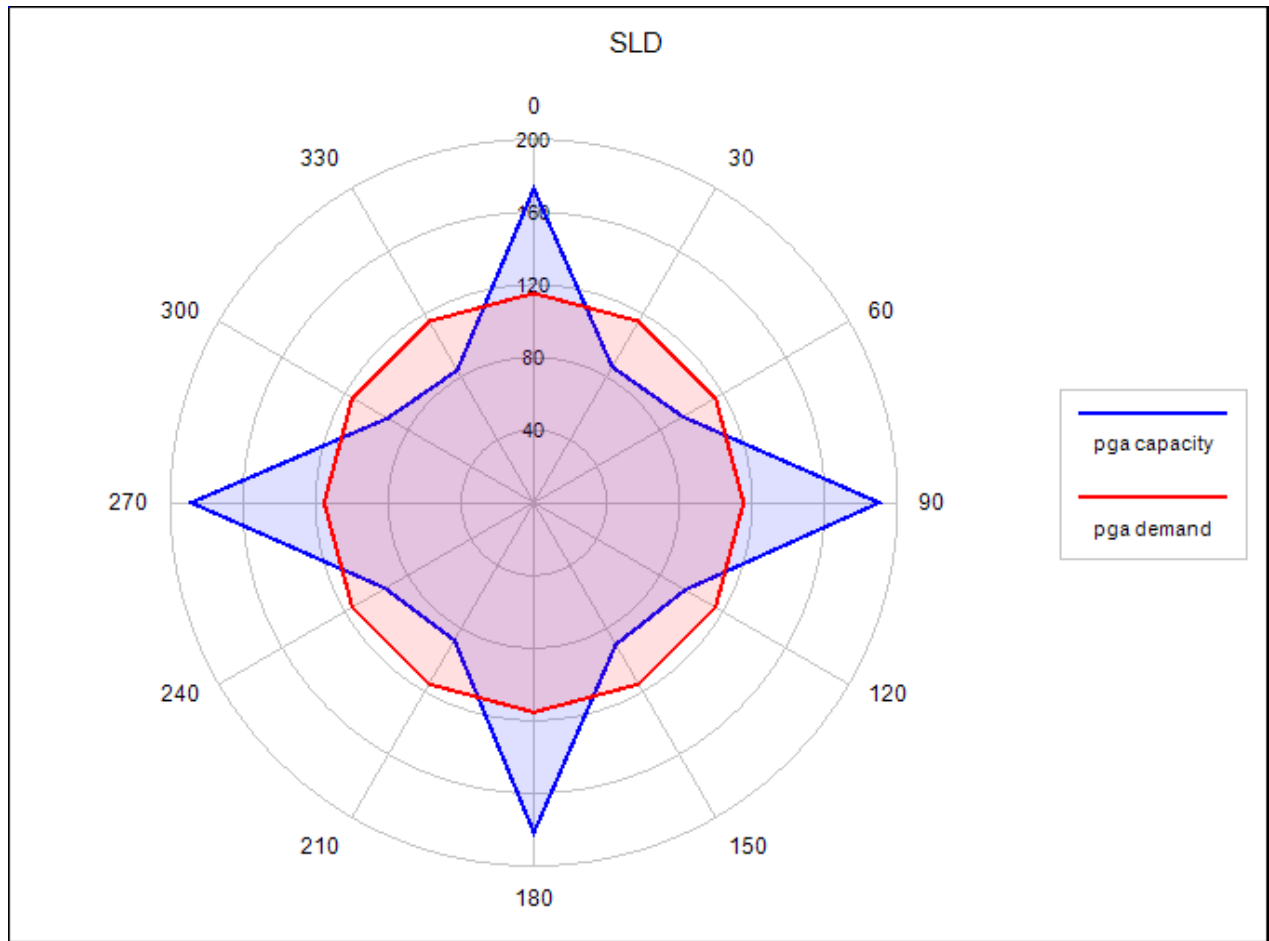
Nel visualizzatore del dialogo a pagine Analisi avanzate si ha la visualizzazione della curva forza-spostamento e non della curva elaborata secondo i metodi "pushover".

Quello che viene poi richiesto dalla normativa è che per ogni analisi la struttura sia in grado di superare lo spostamento limit calcolato.

Richiede poi che gli elementi vengano tutti verificati impiegando i risultato di tutte le analisi. Per questo compito si veda il manuale di ExSys.

Per ulteriori dettagli si veda anche [Analisi pushover](#)

Sintesi analisi di capacità



Dal menu Risultati, dalla voce Capacità, si può accedere al dialogo multi pagina "Sintesi analisi" che contiene delle tabelle che sintetizzano i dati numerici dell'analisi di capacità e degli stati critici.

La terza pagina di questo dialogo consente, qualora si sia eseguita con successo un'analisi a scansione angolare, di ottenere i diagrammi polari dei valori calcolati. I valori desiderati si possono selezionare da un combo-box.

Nota sulla mancata convergenza

Uno dei più frequenti ed irritanti problemi delle analisi non lineari è la "mancata convergenza". Per informazioni sulle tecniche di soluzione di sistemi non lineari, si rimanda alla brochure di Roberto Spagnuolo "Invito all'analisi non lineare". Qui ci limitiamo ad alcune informazioni essenziali. La mancata convergenza può, sinteticamente, essere causata da una raggiunta labilità della struttura o da una difficoltà di carattere numerico di superare un punto di difficile soluzione. Purtroppo scoprire se la causa è dovuta alla prima o alla seconda causa non è una informazione insita nel processo: numericamente le due situazioni sono identiche. Se si ha una mancata convergenza al primo passo, vi è la fondata ipotesi che la struttura sia già labile e non che divenga labile per l'innescarsi di un meccanismo. pertanto è consigliabile eseguire un'analisi lineare per controllare di non aver per caso dimenticato qualche vincolo. Altra informazione utile è che la difficoltà numerica o l'instabilizzarsi di una parte è indistinguibile dall'instabilizzarsi del tutto. Se cioè. ad esempio, si è assegnata una forza concentrata su un vertice esterno, si può avere una non convergenza della soluzione locale (non dimenticare mai il principio di de Saint Venant). Pertanto è opportuno evitare situazioni di plasticizzazione "concentrata". Si deve inoltre sottolineare che nell'analisi non lineare è indispensabile avere un modello che sia uno "schema statico" e non una descrizione "architettonica" della struttura. Alcuni credono che più il modello è dettagliato, più è rappresentativo del comportamento "reale" della struttura. Ciò non è quasi mai corretto in quanto all'aumentare della complessità del modello, aumenta la possibile "sovraesposizione" di fenomeni locali inessenziali su quelli globali più significativi. Ovviamente più il modello è semplice e più sono semplici le modellazioni non lineari, più è facile che la soluzione converga. Tra un modello che impieghi cerniere elastiche-perfettamente plastiche ed uno che impieghi travi a fibre, è piuttosto ovvio che la raffinatezza del secondo mette in luce fenomeni invisibili al primo modello e pertanto è più sensibile all'insorgere di problemi. Ovviamente una mancata convergenza non è necessariamente una carenza del metodo numerico impiegato, ma denuncia una situazione che andrebbe approfondita. Lo scopo del progettista e cioè di voler essere maggiormente consapevole o meno consapevolmente produttivo, è fatto individuale legata a fatti caratteriali ed anche all'importanza dell'opera.

In ogni caso, i problemi numerici sono più facilmente superati aumentando i passi di carico. in questo modo la soluzione è più lenta ma più regolare. In modelli semplici, una mancata convergenza indica quasi sempre il raggiungimento di un carico o un deformazione limite. Pertanto, se la curva ottenuta per carichi o spostamenti inferiori a quelli assegnati, risulta sufficiente ai fini dell'analisi, si può tranquillamente ritenere valida la soluzione.

La raccomandazione finale è dunque: modelli più semplici possibili. Non impiegare elementi finiti o materiali più complessi di quanto la situazione non richieda e che, magari, non conosciamo a fondo. Se è necessario si aumenti la definizione gradualmente. Usare più passi di carico possibile. Evitare di "mirare" a spostamenti o livelli di carico irrealistici. Eventualmente approcciarli gradatamente. L'analisi "pushover" della normativa è una brutta bestia che viene presentata come fosse un gioco. Va presa con le molle. La normativa prevede ben 16 differenti analisi. E' vero che si possono "automatizzare" ma ciò non toglie che il problema di individuare eventuali problemi si moltiplichi per 16! Un buon consiglio può quindi essere quello di eseguire con calma e semplicità una sola analisi, capire il comportamento della struttura, rilevare eventuali carenze nel modello, e solo dopo lanciarsi nel putiferio delle 16 analisi.

Analisi di vulnerabilità

Con questo termine intendiamo una analisi generale che comprende la Classificazione del rischio sismico come previsto anche dal provvedimento previsto nella Legge di Bilancio di 2017.

L'analisi vulnerabilità viene eseguita nell'ambiente Earthquake Engineering tramite una o più analisi di spinta (pushover). Durante queste analisi vengono monitorati alcuni eventi definiti "stati critici" che nella terminologia corrente rappresentano il raggiungimento di stati limite. Gli stati critici monitorati sono i seguenti:

Per il calcestruzzo modellato tramite elemento Trave a Fibre ad assegnazione grafica, con aggregatore di sezioni a fibre o con la sezione semplice in calcestruzzo, vengono monitorati i seguenti stati critici:

- Rottura calcestruzzo per compressione
- Rottura acciaio per trazione

- Rottura per taglio
- Superamento rotazione limite
- Rottura del nodo
- Superamento spostamento relativo di piano (drifting)
- Raggiungimento spostamento massimo

Nel caso della verifica a taglio deve essere assegnata l'armatura a taglio nel materiale calcestruzzo. In assenza di queste, nel report finale si avrà la dicitura "Non impiegato".

La verifica a taglio viene effettuata per integrazione numerica delle tensioni tangenziali e tale valore viene poi applicato secondo le modalità della normativa vigente.

Per la trave a fibre in calcestruzzo armato nella quale si sia impiegato il materiale Acciaio, Acciaio modellato tramite trave a fibre generica con materiale uniassiale Acciaio, vengono monitorati i seguenti stati critici:

- Snervamento acciaio
- Capacità di curvatura
- Rottura a taglio

Si ricorda che l'elemento finito a fibre impiegato per queste sezioni è in "grandi spostamenti" per cui vengono considerati gli effetti di non linearità geometrica e di instabilità.

Per la verifica della resistenza di nodi in calcestruzzo si impiegano le prescrizioni della vigente normativa derivando staffature e armatura longitudinale dagli elementi assegnati.

Per la muratura, modellata con elemento shell a 3 o 4 nodi e materiale No-Tension, vengono monitorati i seguenti stati critici:

- Rottura per compressione
- Rottura a taglio

Per questi elementi piani, il drifting di piano può essere monitorato tramite il registratore nodale di drifting tra due nodi qualsiasi.

Il materiale indica, per le travi a fibre se in calcestruzzo (CLS) o in acciaio (ACC). Se si usano elementi piani come il "NoTension" si ha la generica indicazione "PLN" (elemento piano).

Questi stati critici possono essere:

- Visualizzati sulla struttura passo per passo anche con l'ausilio di un "navigatore" che consente di selezionare sulla curva pushover il passo desiderato
- Visionati nei valori numerici a dialogo
- Stampati

Queste possibilità consentono di effettuare una completa indagine approfondita sul comportamento della struttura.

Ai fini della valutazione della vulnerabilità e della classificazione del rischio, questi dati vengono sunteggiati e si ha pertanto un valore unico massimo per ogni stato limite anche tra più analisi pushover (tipicamente ne sono previste 16 che vengono eseguite in automatico).

Per ognuno degli stati critici viene valutato il minore valore di sicurezza tra tutti gli stati critici afferenti alla salvaguardia della vita (SLV) e del danno (SLD).

Per questi stati limite vengono calcolate le PGA demand e capacity. La PGA capacity viene calcolata con il metodo della normativa italiana detto N2 negli Eurocodici che prevede la valutazione del fattore di riduzione in base alla formazione di una curva bilaterale di pari energia.

Con questi valori si calcolano i parametri richiesti dalla Classificazione del Rischio Sismico e cioè tempi di ritorno e il Costo di Ricostruzione. I valori di $1/TDR$ degli stati limite SLC e SLO vengono determinati come indicato nelle linee guida della suddetta Legge di Bilancio tramite coefficienti moltiplicativi.

Questa analisi si basa sulle seguenti funzioni elementari attivabili dal programma, ma la cui formazione può essere automatizzata tramite il "[!#dialogo gestione analisi di capacità](#)".

- Generazione della spinta
- Attivazione di un registratore di capacità
- Attivazione di un registratore di salvataggio al passo con opzione "Vulnerabilità"

Queste operazioni possono essere, come detto, effettuate in automatico per il numero di azioni volute tramite l'apposito dialogo Analisi capacità ed attivando l'opzione Vulnerabilità.

Secondo le esigenze del progettista, possono essere generate azioni di spinta e usati spettri di risposta diversi per ogni analisi pushover, ma nell'uso pratico, è possibile eseguire un'analisi con le azioni di spinta ottenute dallo spettro di risposta SLV e usare i valori ottenuti per gli stati critici afferenti al Danno per valutare gli stati limite SLD che verranno poi elaborati con lo spettro di Danno indicato dal progettista. Per attivare questa opzione, nel dialogo di Capacità, attivare il checkBox "Valutare stati limite di danno con azioni SLV". Ovviamente questa modalità dimezza il numero di analisi pushover da effettuare.

La funzione si attiva dal Registratore risultati tramite il menu Salva notifiche criticità.

Questo registratore esegue un monitoraggio ad ogni passo degli elementi e registra i valori relativi ad ogni stato per ognuna delle sezioni dell'elemento. Vengono però evidenziati solo gli stati critici. Nelle stampe vengono riportati i dati relativi agli elementi che sono in stato critico e anche nella rappresentazione vengono indicate con un simbolo le sezioni che sono in tale stato.

Gli esiti dell'analisi di vulnerabilità ovvero la storia degli stati critici, viene presentata in tre pagine di dialogo.

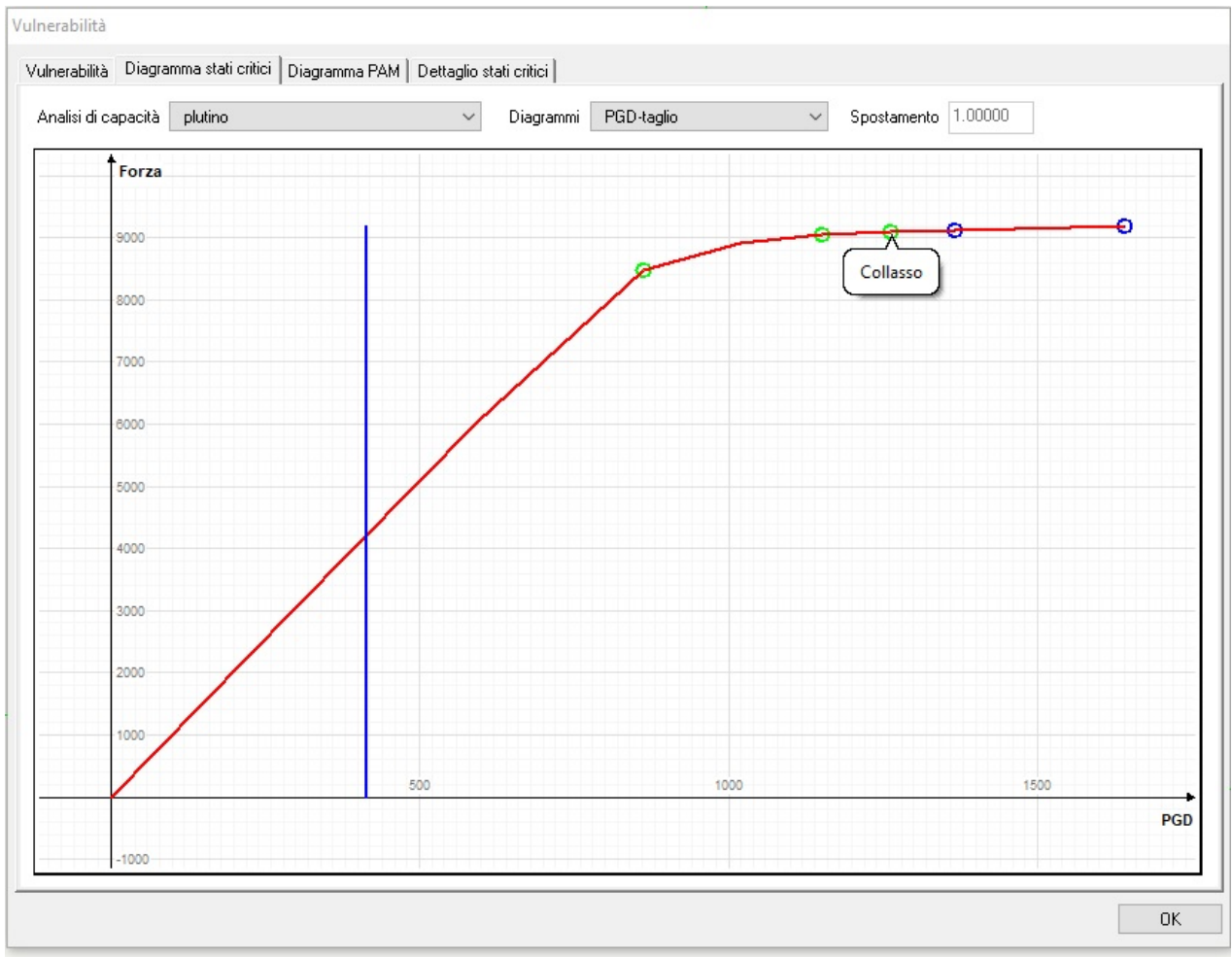
La prima reca i valori numerici riassuntivi di tutti gli elementi e di tutti i nodi, riportando i valori più gravosi.

Vulnerabilità								
Vulnerabilità Diagramma stati critici Diagramma PAM Dettaglio stati critici								
Analisi di vulnerabilità (1)_1000								
SLV	Materiali	PGAd	PGAc	I-SV	Spostamento	Azione/Stato	Elemento/nodi	Stati critici Ascissa/nodo
<input checked="" type="checkbox"/>	Rottura per compressione	CLS				Non raggiunto		
<input checked="" type="checkbox"/>	Rottura per trazione o buckling	CLS				Non raggiunto		
<input type="checkbox"/>	Snervamento armatura	CLS	343.000	1127.90	3.28834	14.0000	2	14 0.000000
<input checked="" type="checkbox"/>	Rottura per taglio	CLS	343.000	1354.27	3.94831	20.0000	2	16 0.000000
<input checked="" type="checkbox"/>	Rottura nodo	CLS				Non raggiunto		
SLD								
<input checked="" type="checkbox"/>	Superata rotazione limite					Non raggiunto		
<input checked="" type="checkbox"/>	Superato spostamento limite di piano					Non raggiunto		
Capacità di spostamento								
Spostamento riferimento d*MAX		343.000	343.137	1.00040	2.79876	2		
Capacità spostamento SLC		104.756	658.777	6.28867	6.00000			
Capacità spostamento SLV		104.756	866.969	8.27607	10.0000			
Capacità spostamento SLE		104.756	951.601	9.08397	12.0000			
Capacità spostamento 80% FMax		343.000	1230.60	3.58776	16.5968			
Sommaro								
SLV		PGAd	PGAc	I-SV (%)	TDRd	TDRc	Lambda	
		343.000	1354.27	394.831	474.561	13518.8	0.000074	
SLD		n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	
I_SV minimo (%)	100.040	Classe	A+					
PAM (%)	0.526150	Classe	A					

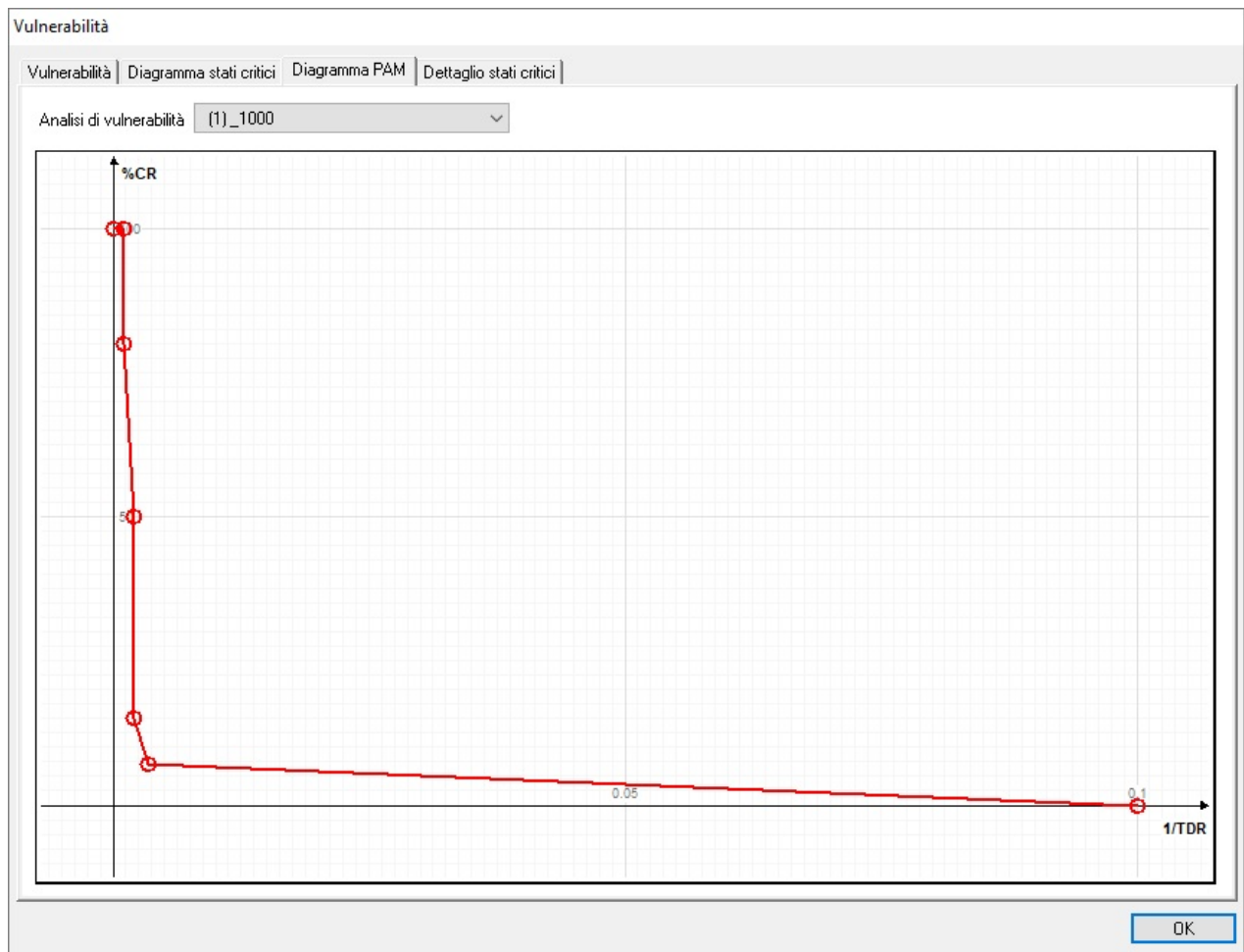
I simboli sono piuttosto autoesplicativi. La colonna Materiali riporta indicazioni che consentono di meglio definire a quale situazione si riferisce lo stato critico. Poiché non vi è in EE la definizione del nome del materiale ma solo delle sue caratteristiche, il nome del materiale non è una indicazione tipica. Salvo per la trave a fibre in calcestruzzo o in acciaio vi è una identificazione esplicita di materiale. Pertanto le definizioni sono le seguenti:

- CLS: elemento a fibre specifico per calcestruzzo
- FBR: elemento a fibre di materiale generico
- STL: elemento a fibre di materiale acciaio
- PLN: generico elemento piano
- LAY: elemento a layer Degenerate Shell di materiale generico, anche di calcestruzzo
- N.D.: non determinato

La seconda riporta la curva di capacità con i punti ove si sono verificati gli stati critici. Cliccando su tali punti si hanno le informazioni relative. Se si sono condotte più analisi, si può scegliere l'analisi voluta.



La terza pagina del dialogo riporta il diagramma PAM richiesto dal SismaBonus per le valutazioni economiche degli interventi



L'ultima pagina del dialogo riporta l'elenco degli stati critici. Questo elenco non è legato alla analisi di capacità, cioè non riporta i valori di PGA, e quindi può essere impiegato anche in analisi in transitorio o in qualsiasi altra analisi ove la valutazione della curva di capacità non sia richiesta.

Vulnerabilità

Vulnerabilità | Diagramma stati critici | Diagramma PAM | Dettaglio stati critici

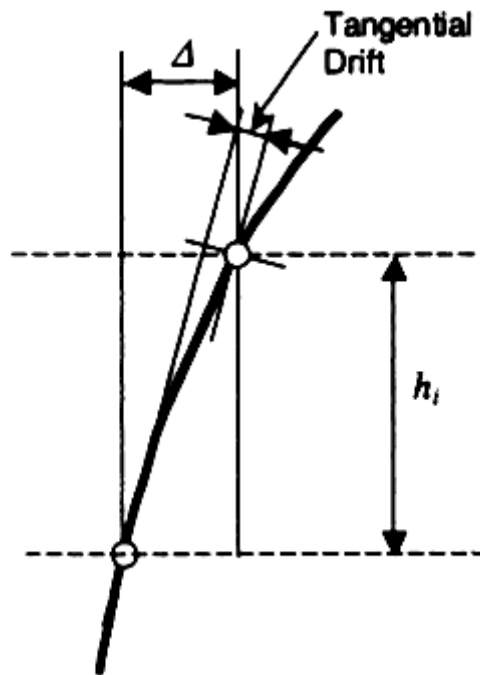
Analisi (1) plutino

Tempo	Spostamento	Elemento	Ascissa/Nodo	Cls cmpr.	Shr fail.	Rot fail.	Drift fail.	Node fail.	Stl break.
10.00	20.00	15	0.000000		×				
10.00	20.00	16	0.000000		×				

OK

Nota sul drifting

Nel caso del drifting si deve assegnare un valore limite, negli altri casi il valore limite è connesso al materiale. Normalmente il drifting è calcolato come spostamento tra i due nodi dell'elemento ("drifting di piano"), se però si assegna un valore limite negativo verrà calcolato il drifting "tangente" illustrato nel seguito. Per non appesantire l'interfaccia, si è preferito usare il valore negativo come indicatore della scelta poiché il drifting tangente viene usato solo per valutazioni specialistiche essendo molto più complesso ed oneroso come valutazione, benché sia più significativo del precedente. Va da sé che il valore limite viene considerato sempre positivo.



La figura illustra il drifting tangente che è: diverso dal più noto "drifting di piano".

Qualora si sia assegnato un [registratore nodale](#) per registrare il drifting, questo registratore viene considerato per la valutazione degli stati critici per cui si può avere anche una valutazione del drifting relativo a qualsiasi coppia di nodi.

Nota sulle verifiche a valle di un'analisi pushover

A valle dell'analisi pushover viene eseguita una "analisi di capacità" basata sulla curva forza-spostamento ottenuta. Da tale curva si ottengono le "capacità di spostamento" intese come rotazione alla corda valutata su tutti gli elementi monodimensionali. In funzione degli stati limite (collasso, salvaguardia della vita, esercizio) si ottengono degli spostamenti ovvero delle "capacità di spostamento". Viene anche valutato uno "spostamento di riferimento" (detto dMAX) che è lo spostamento al limite elastico eventualmente incrementato per tener conto degli effetti anelastici. Ciò viene ottenuto tramite bilinearizzazione della curva di capacità come da normativa (primo metodo della NTC 2018).

Non riportiamo le formule perché notissime e in questo contesto avrebbero solo il difetto di appesantire i concetti.

Per la valutazione della rotazione limite vi sono formule semplificate offerte dalla normativa e modificate secondo le edizioni della stessa. Poiché Nòlian impiega prevalentemente elementi a fibre, la rotazione limite è ottenuta, più accuratamente e come la normativa consente, tramite integrazione numerica.

Ovviamente lo spostamento di riferimento deve essere inferiore allo spostamento ultimo ma ciò non accade spesso per cui questa verifica non è esaustiva. Il programma comunque ne dà avviso. La rotazione alla corda è il principio di base previsto dalla normativa per la capacità di spostamento di elementi monodimensionali.

Tutti i valori relativi alla capacità di spostamento sono calcolati per ogni analisi e vengono poi valutati i valori il cui rapporto tra PGA di capacità e di domanda risultino inferiori. Pertanto il progettista ottiene immediatamente i valori critici più gravosi senza dover esaminare i risultati di ogni analisi.

Ovviamente, disponendo dei valori di PGA sia di capacità che di domanda, si conosce subito la PGA massima supportata dalla struttura per questi criteri inerenti la capacità di spostamento.

Questi valori sono esposti nel dialogo "Vulnerabilità" nella sezione Capacità di spostamento.

Per gli elementi fragili di strutture esistenti è necessaria una verifica a taglio che viene eseguita come in seguito specificato.

Pertanto, a nostro avviso, una analisi pushover condotta con questi criteri è esaustiva. Se si considera poi che Nòlian consente analisi di sezioni rinforzate, anche questo problema riteniamo sia esaurito con questa modalità di analisi.

Per avere un quadro più esaustivo del comportamento della struttura, richiesto per altro dalle verifiche di Vulnerabilità e dal Sismabonus, durante ogni analisi di capacità e per ogni passo, vengono eseguite le verifiche degli elementi (rotazione alla corda, drifting di piano, presso-flessione, taglio) e vengono calcolate le PGA di capacità e di domanda più gravose fornendo un quadro sintetico del comportamento della struttura. Questi valori vengono esposti nella sezione "Stati critici" del dialogo

di vulnerabilità.

I valori di tutti gli stati critici vengono sintetizzati determinando i valori più gravosi. Non vengono inclusi i valori degli spostamenti di Capacità in questo sommario dei valori più gravosi perché non pare congruente con gli stati critici ma le interpretazioni della normativa sono in corso e potrebbe ritenersi opportuno includerli.

Per le murature, la norma impone due spostamenti di capacità: il primo di drifting ed è standardizzato tra gli stati critici avendo cura di assegnare il valore massimo richiesto da normativa. Il secondo spostamento è di carattere globale e richiede di stabilire uno spostamento limite corrispondente ad una diminuzione di forza del 20%. Questo spostamento rientra nel novero delle verifiche di capacità globali di spostamento. Questo ultimo requisito non è legato ad uno specifico stato limite e nel dialogo di vulnerabilità è definito: Spostamento riduzione spinta.

Risposta sismica locale

La funzione "Colonna suolo" consente di generare un modello per ottenere gli effetti locali del sisma dovuti allo strato di terreno tra il letto di rocce e il piano di costruzione (anche "microzonizzazione"). Questa funzione consente di generare automaticamente una colonna di elementi a quattro nodi a sforzo piano dotati di materiale geotecnico con un numero qualsiasi di strati di differente materiale.

La colonna è generata sul piano xy. I nodi sui lati orizzontali degli elementi sono collegati con un constraint rigido per gli spostamenti orizzontali ed alla base della colonna uno smorzatore viscoso assolve al compito di elemento di confine.

Applicando un velocigramma alla base, si può registrare, attivando un registratore opportuno, l'accelerazione al livello del suolo. Da questo accelerogramma si può ottenere, tramite le funzioni di trasformazione reperibili nel gestore degli accelerogrammi, uno spettro di progetto.

Colonna Suolo

Strato: 1 + ... Spessore: 40.0000

Materiale: senza titolo 001 Colore: [Red]

Lunghezza d'onda da risolvere: 2.50000

Elementi per lunghezza d'onda: 10

Velocità strato roccia: 760.000

Densità roccia: 2.40000

Velocigramma strato roccia: velocigramma.txt

Nome accelerogramma risultato: SoilAccelerogram.txt

Genera modello

Analisi

Chiudi

Occorre preventivamente generare i materiali geotecnici dei vari strati e il velocigramma applicato a livello dello strato di roccia. Avendo un accelerogramma di progetto, si ottiene il velocigramma tramite una delle funzioni di trasformazione presenti nel gestore delle Forzanti.

Accedendo al dialogo della funzione Colonna suolo, si possono assegnare il numero voluto di strati, di altezza assegnabile, e i diversi materiali a ciascuno associati. Per meglio distinguere la stratificazione, si può assegnare un colore agli elementi di ogni strato.

Si assegna anche il velocigramma al suolo e il nome del registratore, che viene generato automaticamente.

Il modello è generato automaticamente insieme alle azioni ed al registratore.

L'analisi viene eseguita automaticamente in tre fasi: azione gravità elastica, azione di gravità; inelastica, azione del velocigramma.

Eseguita l'analisi, si può utilizzare lo accelerogramma registrato per ottenere lo spettro di progetto tramite una delle funzioni reperibili nel gestore delle Forzanti.

Tale accelerogramma, oltre ad essere visualizzato sul visualizzatore del registratore e da esso eventualmente esportato, viene copiato nella cartella degli accelerogrammi del gestore delle Forzanti.

E' possibile ripetere l'operazione per quanti velocigrammi si desidera e quindi involuppare il risultato.

Gli altri parametri da assegnare sono i seguenti:

- lunghezza d'onda da risolvere
- elementi per lunghezza d'onda
- velocità strato roccia
- densità roccia

La geometria della mesh è determinata dalla necessità di cogliere la propagazione delle onde di taglio con una frequenza inferiore ad un determinato valore. E' pertanto opportuno che un certo numero di elementi - tipicamente 8 o 10 - siano compresi in tale lunghezza.

La lunghezza d'onda si ottiene in genere dividendo la minima velocità delle onde di taglio al suolo (non allo strato di roccia) per la frequenza desiderata.

La frequenza tipica è 100 Hz.

E' poi necessario modellare la rigidità finita del semispazio, ciò si ottiene tramite uno smorzatore viscoso alla base della colonna.

Il fattore di smorzamento è dato dal prodotto della densità di massa dello strato di roccia per la velocità delle onde di taglio sullo strato di roccia. Pertanto sono necessari i quattro parametri sopra elencati per una corretta modellazione della colonna. Per un esempio e per maggiori dettagli si rimanda alla documentazione reperibile sul sito della Softing.

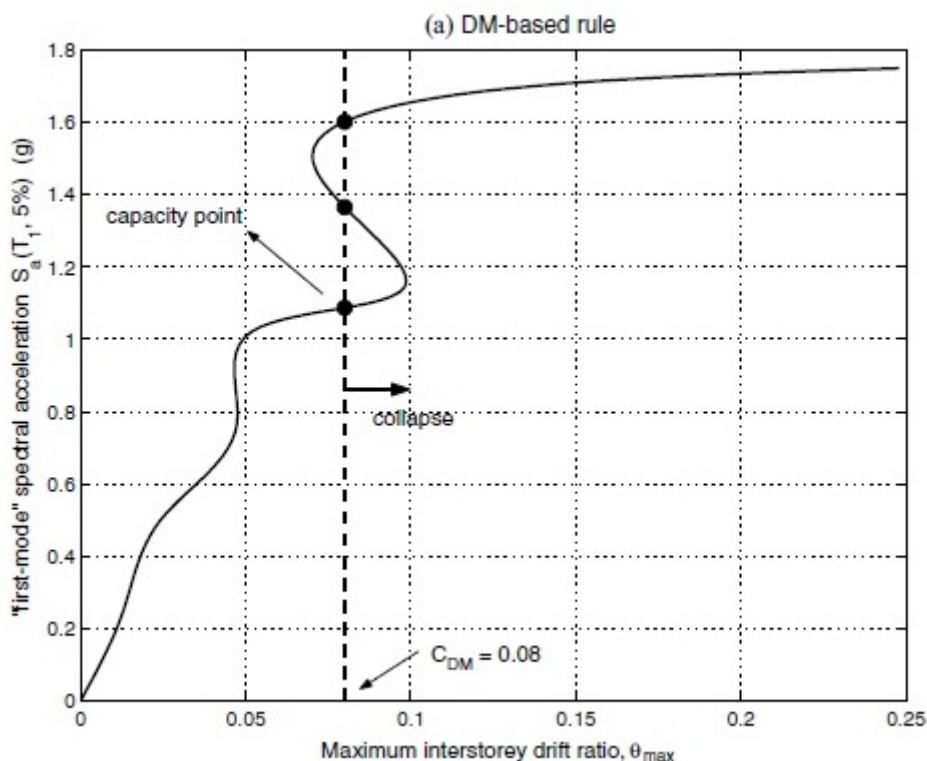
Definiti i parametri del modello e assegnati gli strati, il bottone "Genera modello" consente la generazione automatica del modello. A questo punto il bottone Analisi è attivo e si può eseguire l'analisi.

Se si modificano i parametri del dialogo, il bottone Analisi si disattiva per indicare che occorre ricostruire di nuovo il modello congruente con i parametri modificati.

Analisi dinamica incrementale

Questo tipo di analisi noto come Incremental Dynamic Analysis (IDA) è raccomandato dal FEMA (Federal Emergency Management Agency) e costituisce un metodo molto valido per effettuare una completa indagine sul comportamento di una struttura.

Il metodo consiste nello scegliere un certo numero di accelerogrammi normalizzati che siano compatibili con lo spettro di risposta previsto nella località in esame e per ciascuno di essi effettuare più analisi dinamiche non lineari scalando per ciascuna il livello di accelerazione. L'accelerazione di riferimento può essere la PGA o l'accelerazione spettrale per il primo periodo della struttura con smorzamento 5%. Per ogni accelerogramma e per ogni valore di accelerazione scalato si determina un valore che caratterizza il comportamento della struttura (demand, da cui questo valore è detto DM). In genere si assume come DM lo spostamento relativo interpiano (drift). Per comprendere meglio: per un accelerogramma analizzato con 10 passi di scalamento dell'accelerazione di riferimento, si otterranno 10 valori di massimo drift. Il FEMA e la normativa italiana definiscono un livello di drifting massimo che caratterizza ogni stato limite. Ad esempio il FEMA, per le strutture in calcestruzzo, prevede un drifting massimo dell' 1% per l'immediata occupancy, il 2% per il life safety level e il 4% per il collapse prevention. Pertanto per ogni accelerogramma si otterrà un valore di accelerazione massimo cui corrisponde il livello di DM previsto. Dall'accelerazione limite per quello stato, si può facilmente risalire al tempo di ritorno, se lo si desidera, e confrontarlo con quello nominale per avere una probabilità di accadimento dell'evento o un livello di sicurezza. Un altro criterio DM molto usato, e piuttosto significativo, è la diminuzione della tangente della curva, fatto che denota con la curva IDA sia prossima ad "appiattirsi" anche questo criterio è implementato in questo dialogo e denominato Tangente.



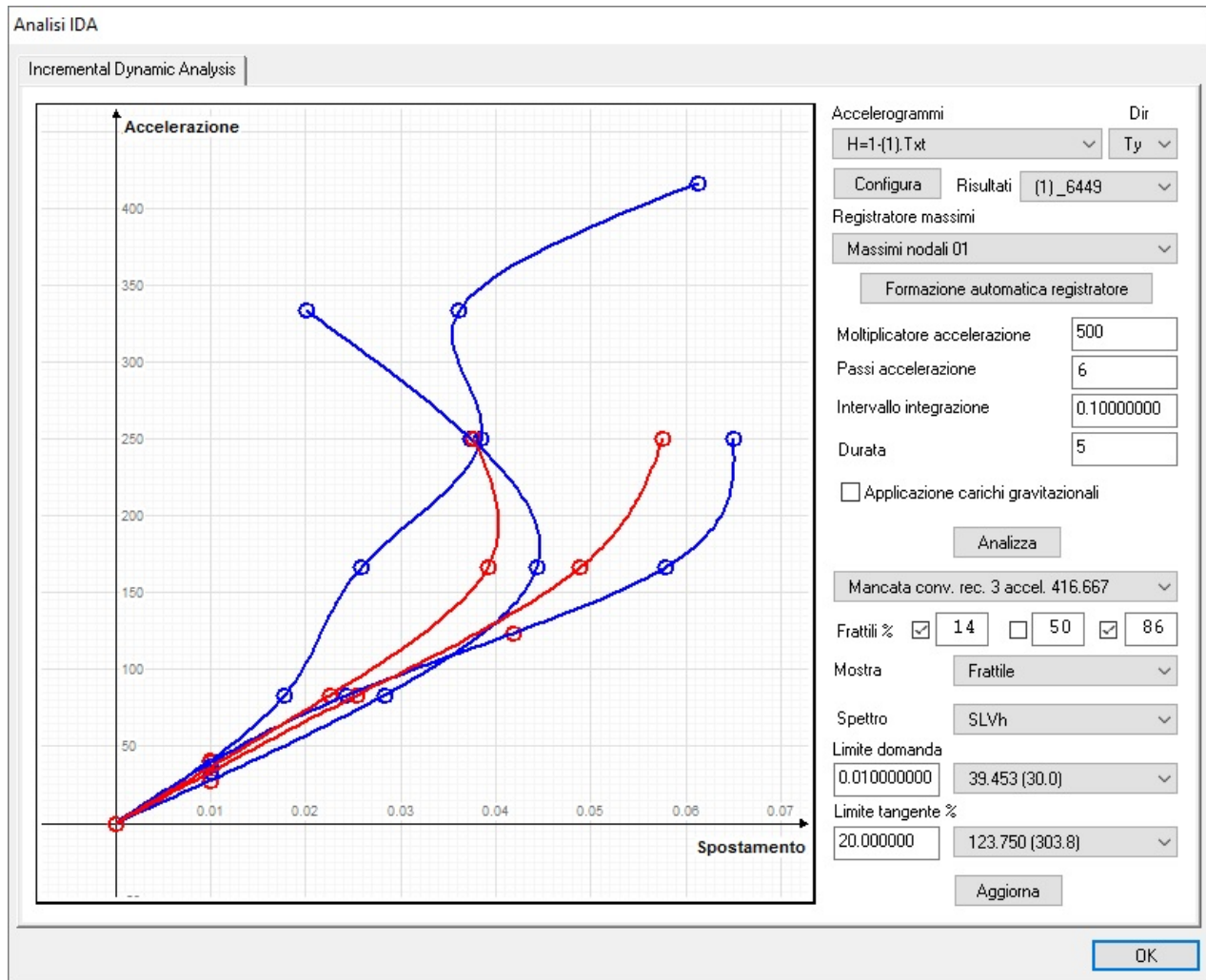
Nella figura precedente, tratta dall'articolo di Cornell e Vamvatsikos citato nei riferimenti, è chiaro il concetto adottato.

Come si è detto all'inizio, il metodo prevede di usare più accelerogrammi in modo da avere una panoramica esaustiva del comportamento della struttura. Si avranno così dei dati piuttosto abbondanti che vanno trattati con metodi statistici. In

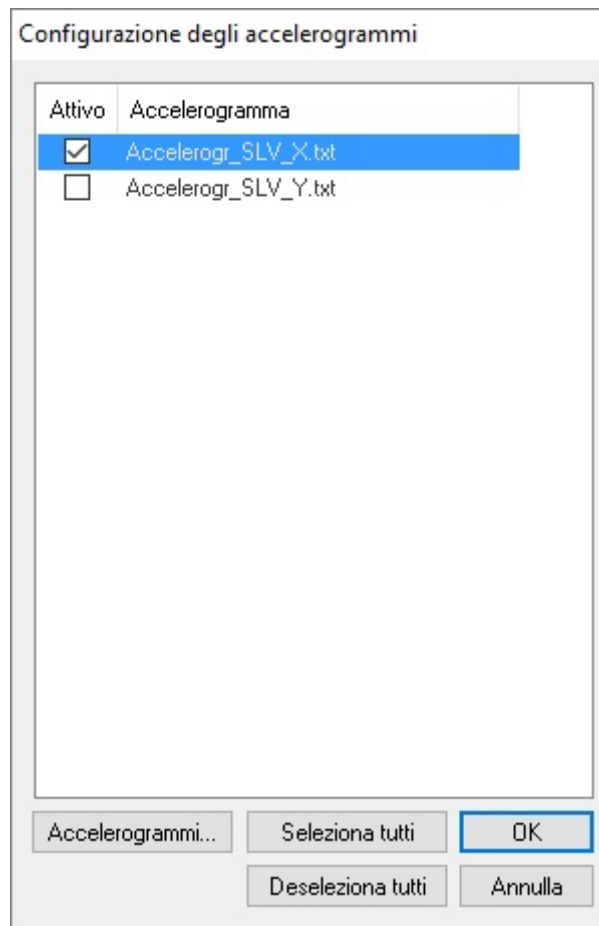
genere si usano i frattili 16%, 50% e 84% dei dati ottenuti.

Queste operazioni complesse e che impegnano molto il tempo di calcolo, nell'ambiente Earthquake Engineering di Nòlian All In One sono tutte governate in un singolo dialogo al quale si accede dal menu analisi.

Prima di attivare questa analisi è necessario generare un registratore di Massimi che monitorizzi i valori massimi di eventuali molteplici registratori che a loro volta registrano i valori voluti, come il già detto drifting di piano. Si attiva un registratore di spostamento nodale scegliendo la modalità drifting e quindi si genera un registratore di massimi che raccoglie il massimo dei valori registrati. In caso di strutture con nodi master, il bottone "Genera registratore" costruisce automaticamente il sistema di registratori.



Le operazioni da fare nel dialogo sono quindi le seguenti:



- Scegliere con il bottone "Configura" tutti gli accelerogrammi voluti cliccando sulla check-box della lista che verrà presentata. Gli accelerogrammi, selezionabili tra quelli definiti nel relativo [archivio](#), vengono aggiunti ad un menu per poterli eventualmente selezionare o rimuovere. La lista è rappresentata nella figura precedente.
- Assegnare la direzione che può essere Tx, Ty, Tz.
- Assegnare il registratore di massimo.
- Assegnare l'accelerazione massima ed il numero di passi in cui sarà suddivisa. Naturalmente l'analisi dinamica non lineare è molto impegnativa in termini di tempo per cui si consiglia di scegliere un numero ragionevole di passi di scalamento.
- Si devono assegnare i parametri per l'analisi in transitorio che sono l'intervallo temporale e la durata totale del tempo di integrazione. Gli altri parametri che governano l'analisi, quale il criterio di convergenza, devono essere assegnati nel dialogo standard delle analisi non lineari. L'analisi in transitorio invece viene attivata automaticamente.
- Assegnare, se lo si desidera, l'analisi preliminare con le azioni gravitazionali che induce lo stato di tensione e sforzo nella struttura dovuto a tali azioni.
- Avviare l'analisi con il bottone "Analisi".

Durante l'analisi, se si è verificata una mancata convergenza, non si hanno ulteriori incrementi dell'accelerazione e questo accadimento è segnalato aggiungendo un messaggio in un menu immediatamente sottostante il bottone di Analisi. Vi è una voce nel menu per ogni mancata convergenza verificatasi. Si ricorda che la mancata convergenza indica una perdita delle condizioni d'equilibrio o per perdita di resistenza o per instabilità, non è, in genere, un problema numerico anche se i parametri di analisi possono influire su questo fenomeno,

Al termine dell'analisi, nella parte sinistra del dialogo vengono mostrati i diagrammi IDA. I punti di calcolo vengono

rappresentati con un segno circolare, la curva è invece interpolata tramite una spline, ciò per consentire di operare su una funzione continua per il calcolo dei valori limite. I valori limite vengono rappresentati sul grafico come segni circolari di colore rosso. I valori vengono riportati nei menu attigui ai valori limite assegnabili e possono essere consultati per ogni curva IDA. Lì dove il valore non si è potuto calcolare, viene riportata la dicitura "n.c."

E' possibile tracciare e monitorare tre curve frattili assegnando la percentuale del frattile ed abilitando la curva tramite il check box.

L'evidenziamento dei valori critici, il calcolo della accelerazione relativa a tali punti e il tempo di ritorno,(tra parentesi dopo l'accelerazione) possono essere modificati al termine dell'analisi senza richiedere una nuova analisi. I nuovi valori verranno mostrati premendo il bottone "Aggiorna". Il salvataggio avviene al termine dell'analisi per cui eventuali nuovi valori assegnati alle curve frattili o ai minimi da monitorare non verranno salvati di nuovo.

Un menu consente la visualizzazione dei diagrammi in tre modalità.

- Tutte le curve IDA
- Tutte le curve IDA e le curve relative ai frattili assegnati
- Soltanto la curva selezionata dal menu degli accelerogrammi

Insieme ai valori di accelerazione ottenuti per ogni criterio, è riportato il tempo di ritorno (TDR) relativo allo spettro già definito nel programma e selezionato dal menu sottostante. Infine il bottone Aggiorna, aggiorna il post-processing delle curve IDA (valori limite, periodi di ritorno, curve frattile) senza dover ripetere l'analisi.

Riferimenti Il testo "classico" sull'argomento è l'articolo seguente, reperibile su internet: C.Allin Cornell, Dimitrios Vamvatsiko, Incremental Dynamic Analysis, Earthquake Engng. Struct. Dyn. 2002.

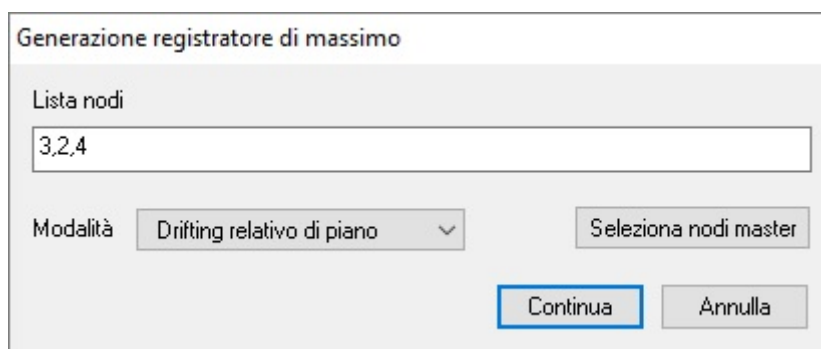
Riferimenti FEMA sono i seguenti:

Report No. FEMA-273, NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings

Report No. FEMA-274, NEHRP Commentary of the Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings

Report No. FEMA 222A, NEHPR Recommended Provisions for the Seismic Regulations for the New Buildings

Generazione automatica del registratore di massimo



Generazione registratore di massimo

Lista nodi
3,2,4

Modalità Drifting relativo di piano

Seleziona nodi master

Continua Annulla

L'analisi dinamica incrementale opera estraendo i risultati delle analisi tramite un "registrarore dei massimi". Tale registrarore è molto pratico in quanto consente di impiegare più registratori nodali standard estraendo i massimi sia tra più registratori che lungo tutto il percorso di analisi. Nel caso di una analisi nel dominio del tempo, più registratori nodali possono monitorare, ad esempio, ognuno un drifting di piano. Il registrarore dei massimi estrarrà il valore massimo tra tutti i drifting di piano per tutta la durata, ad esempio, di una analisi nel dominio del tempo. Si avrà così, al termine dell'analisi, un solo valore che è il massimo riscontrato.

Ovviamente i registratori possono essere assegnati singolarmente, ma può essere comodo, ove possibile, generarli

automaticamente. Il bottone "Genera registratore di massimo" nel dialogo dell'analisi dinamica incrementale, consente di accedere ad un dialogo per la generazione di un registratore di massimo. Si selezionano i nodi voluti (tipicamente uno rappresentativo per piano) e ciò mentre il dialogo è aperto. L'indice del nodo viene riportato in una riga del dialogo e si può modificare facilmente come testo. I numeri degli indici dei nodi devono essere separati da una virgola.

Si può scegliere quale risultato i registratori nodali devono registrare: spostamento, drifting relativo di piano etc. E' anche possibile una selezione automatica dei nodi master, se presenti. I registratori generati, se in seguito non sono più necessari o se si desidera modificarli, la cancellazione o la modifica deve essere fatta dal pannello della gestione dei registratori.

I risultati vengono registrati nel file del progetto. Per accedere a risultati già registrati, si deve operare sul menu contestuale posto accanto al bottone di analisi.

Se vi sono dati registrati il menu non è dimmato e si può scegliere tra le eventuali differenti analisi registrate scegliendone il nome dal menu.

Analisi non lineare multistage

The image shows a software dialog box titled "Analisi MultiFase". It contains several input fields and checkboxes. At the top, there are two dropdown menus for "Fase iniziale" (set to 1) and "Fase finale" (set to 11), followed by an unchecked checkbox labeled "Inverti ordine". Below this is a section titled "Opzioni analisi" containing a dropdown menu (set to 1), a text input field for "Numero di passi" (set to 20), and another text input field for "Incremento" (set to 0.05000000). A "Uniforma" button is located to the right of the "Incremento" field. Underneath is a section titled "Opzioni prima fase" with two checkboxes: "Wrapper" (unchecked) and "Azioni gravitazionali all'inizio" (checked). At the bottom of the dialog are two buttons: "Analisi" and "Annulla".

Nòlian consente di descrivere la variazione di geometria, topologia, carichi, condizioni al contorno di una struttura e ciò in "stadi" o "fasi" discreti distinti. Il programma memorizza le variazioni tra gli stadi e pertanto la memorizzazione è molto efficace.

Nell'ambiente Earthquake Engineering è possibile eseguire analisi non lineari sugli stadi successivi mantenendo lo stato deformativo e di sforzo dello stadio precedente.

Sostanzialmente lo stato deformativo e tensionale viene "congelato" alla fine dell'analisi di uno stadio in modo che l'analisi che verrà effettuata sul modello dello stadio successivo sarà effettuata sul modello deformato e con lo stato di sforzo dello stato precedente.

Per quanto riguarda i carichi, va notato, anche se appare ovvio, che i carichi sono incrementali. Cioè se una forza di agisce su un nodo allo stadio 1 con una certa intensità, e nello stadio 2 tale intensità non varia, allo stadio 2 si avranno deformazioni a sforzi dovuti alla intensità della forza dello stadio 1 e tale forza viene "congelata" e pertanto nello stadio 2 la forza applicata nel modello modificato sarà nulla perché la variazione tra i due stadi è appunto nulla. Non si deve pensare che allo stadio 2 la forza venga nuovamente applicata perché ogni stadio descrive lo stato di fatto e non l'incremento di questo.

Se, ad esempio, si assegna una forza 1000 alla prima fase e di nuovo 1000 alla seconda, i risultati di spostamento per la seconda fase saranno nulli in quanto riferiti allo stadio 1000 (prima fase) - 1000 (seconda fase), cioè carico immutato, quindi spostamenti nulli per tale fase.

Ad ogni passaggio di fase vengono verificate le variazioni di:

- generazione, cancellazione di elementi
- cambiamento della posizione dei nodi
- cambiamento dei vincoli
- cambiamento dei carichi su elementi mono- e bi- dimensionali
- variazione delle forze sui nodi
- variazione delle masse nodali
- variazione delle masse degli elementi

Per la variazione delle masse degli elementi, poiché esse vengono gestite in modi molto diversi sui vari elementi, si prega, nei casi più complessi, di verificare se la variazione è effettivamente supportata.

Per i tipi di elementi vi sono delle restrizioni.

- non si può cambiare il tipo: ad esempio da trave ad asta
- non si può cambiare la sezione degli elementi monodimensionali
- non si possono cambiare gli spessori degli elementi piani
- i materiali non lineari (EE) invece possono cambiare. Si noti che si devono in questo caso, generare due materiali EE diversi da assegnare nelle diverse fasi. Non si può però cambiare famiglia di materiale. Poiché si possono modificare solo materiali i EE, se si hanno materiali elastici, occorre egualmente assegnarli come materiali EE elastici.

Non tutti i cambiamenti delle caratteristiche dei materiali sono attualmente supportati. Sono supportati i cambiamenti dei materiali come segue;

Uniassiali

- Elastico: tutti i parametri
- Fibre calcestruzzo: solo alcune caratteristiche dei materiali (Fibre generico, non ammesso)
- Steel2: tutti i parametri
- Concrete1: solo Rbk
- Elasto-plastico: tutti i parametri eccetto il modello elastoplastico
- Hardening: tutti i parametri

Pluriassiali

- Elastico3d: tutti i parametri
- Drucker-Prager: tutti i parametri sia 3D che plane-strain

- Elasto-plastico J2: tutti i parametri sia 3D che plane-strain

La funzione si attiva dal menu Analisi, voce Multistage. Si apre un dialogo che consente di assegnare la prima e l'ultima fase della serie consecutiva di fasi che si vogliono analizzare. Allo stato attuale è possibile soltanto variare il numero di passi e l'ampiezza di passo delle analisi assegnate nel dialogo di configurazione delle analisi. Le opzioni di automazione del dialogo di configurazione non vengono considerate (lista di analisi, ad esempio).

L'opzione wrapping agisce sulla prima fase. Essa si applica solo ai materiali non lineari n-dimensionali. Questa modalità consente di mantenere lo stato tensionale ma di ripristinare all'origine gli spostamenti consentendo di mantenere la geometria iniziale. Si tratta di una opzione impiegata soprattutto nelle analisi geotecniche per applicare le condizioni iniziali del terreno.

Le caratteristiche assegnate alle linee di contatto non sono attualmente modificabili da stadio a stadio.

La risoluzione numerica

I solutori del sistema di equazioni

Il solutore del sistema di equazioni è per matrici sparse sia simmetriche che asimmetriche. Il solutore per matrici simmetriche è ovviamente più efficiente. Essi operano in memoria centrale. L'ottimizzazione di semibanda è quella impiegata nei metodi

di analisi lineari (Kuthill-MacKee).

Si dispone di due solutori:

- Solutore per matrici sparse simmetriche
- Solutore per matrici sparse non-simmetriche

Il secondo è obbligatorio per l'analisi modale e viene attivato automaticamente in tale caso. Il primo è più veloce ed è consigliato in tutti gli altri casi.

Gli iteratori

Quelli che vengono qui definiti "integratori" sono metodi iterativi di soluzione di sistemi non lineari. Si appoggiano quindi ai solutori del sistema di equazioni e vengono chiamati dagli integratori che eseguono una integrazione nel tempo o nei passi di carico.

Gli iteratori attualmente disponibili sono i seguenti:

- Lineare
- Newton-Raphson
- Newton-Raphson con ricerca lineare di passo
- Newton-Krylov

Si può definire il numero di iterazioni massime consentite. Le iterazioni terminano se è soddisfatto uno dei test di convergenza o se sono terminate le iterazioni consentite.

L'iteratore di Newton-Krylov si basa su una modifica del metodo di Newton-Raphson ed impiega delle strategie per accelerare e migliorare la convergenza di tale metodo. L'algoritmo usa un'analisi ai minimi quadrati ed un calcolo di Newton modificato ad ogni iterazione. L'analisi ai minimi quadrati cerca l'equilibrio per quei gradi di libertà dove si verifica la maggiore risposta non lineare mentre il metodo di Newton procede dove la soluzione è relativamente lineare. L'algoritmo di Krylov converge meglio anche nel caso di una matrice di rigidità mal condizionata e consente di seguire meglio del metodo di Newton le situazioni di collasso.

Integratori statici

Gli integratori statici integrano la soluzione su un percorso determinato da:

- una storia di carico
- una storia di spostamento
- dalla lunghezza d'arco nello spazio carico-spostamento

Gli integratori statici sono guidati dal numero di passi e dall'ampiezza di ogni singolo passo.

Nel caso di una integrazione a controllo di spostamento va indicato il nodo e il grado di libertà il cui lo spostamento è stato assegnato. Qualora si desideri che il controllo di spostamento avvenga, sempre per il nodo indicato, ma in una direzione sul piano XY, occorre selezionare dal menu dei gradi di libertà la dicitura Dir ed assegnare l'angolo, in gradi, dall'asse globale X in verso antiorario.

Nel caso del controllo della lunghezza d'arco, oltre alla lunghezza d'arco, va assegnato un parametro (alfa) che scala lo spazio dimetrico di carico-spostamento.

Si può assegnare un intervallo di variabilità di passo. In caso si assegni un valore diverso da zero, l'integratore tenterà di determinare il passo ottimale (quindi diverso per ogni ciclo) limitandolo nell'intervallo assegnato. Se, ad esempio, si assegna 0.5, il passo s potrà, variare tra 0.5 s e 1.5 s . La variabilità di passo consente di ottenere una più agevole convergenza. Va per

considerato che poiché il numero di passi è fisso e il passo è variabile, lo spostamento o il livello di carico assegnato come valore massimo da raggiungere non sarà di norma raggiunto.

Analisi modale

Viene eseguita la analisi modale usando gli elementi assegnati in questo ambiente. Non viene eseguita un'analisi con il metodo dello spettro di risposta che viene eseguita nell'ambiente Nòlian. Viene impiegato il solutore per matrici sparse asimmetriche. Se il numero di autovalori richiesto supera quello che l'algoritmo può calcolare, viene emesso un errore generico in analisi modale.

Integratori nel transitorio

Gli integratori nel transitorio integrano le equazioni non lineari del moto nel dominio del tempo. L'integratore disponibile è quello di Newmark. Va assegnato il passo temporale di integrazione. L'integrazione comprende i termini di smorzamento che deve essere assegnato come smorzamento di Rayleigh.

Smorzamento di Rayleigh

Lo smorzamento di Rayleigh **si applica a tutti gli elementi** e opera sulla matrice consistente delle masse M e sulla matrice di rigidità K tramite un parametro α per la matrice delle masse e un parametro β per la matrice di rigidità.

Opera quindi sulla matrice di smorzamento D come segue: $D = \alpha M + \beta K$.

Questi valori si sommano ai termini di smorzamento eventualmente assegnati agli elementi.

I test di convergenza

Le iterazioni per la soluzione del sistema non lineare operata dagli iteratori si arrestano quando risulta soddisfatto un test.

Tale test può essere fatto sull'equilibrio, sullo spostamento tra due iterazioni o sull'energia. Si faccia attenzione a quanto segue: se il ramo della funzione è prevalentemente verticale, è più efficace un controllo sulle forze (equilibrio), se è suborizzontale, è più efficace un controllo sullo spostamento. Il controllo in energia, rappresentando un'area, è meno sensibile alla forma della curva.

L'opzione Applica azioni gravitazionali prima

Se si attiva questa opzione, l'analisi viene eseguita in due fasi. Nella prima vengono disabilitate tutte le azioni definite "gravitazionali" e viene eseguita una analisi statica in un solo passo. Nella seconda fase si disabilitano le azioni definite "gravitazionali", si attivano quelle non definite "gravitazionali" e si esegue una seconda l'analisi con le impostazioni assegnate a dialogo.

La lista delle analisi in successione

La "lista" è in effetti un metodo "tabellare" di programmazione di analisi in successione. Nella filosofia di Nòlian, non vi sono procedure obbligate, ma strumento base che possono essere articolati, se necessario, nel modo voluto per aumentare la produttività individuale.

La lista consente di definire più "passi" per ognuno dei quali viene eseguita una analisi, ed al passo successivo si può avere una analisi "concatenata" alla precedente (nel senso che stato tensionale e deformativo viene "congelato") (restart) oppure un nuovo inizio (reset).

Per ogni passo si possono definire:

- Tipo di analisi
- Tipo di controllo
- Iterazioni
- Passo totale
- Nodi di riferimento
- Grado di libertà di riferimento
- Azioni
- Registratori
- Nome file di salvataggio
- Metodi di ripresa della prossima analisi

Tipo di analisi

Può essere Lineare, Nonlineare ass., Transitorio.

Se si assegna "Nonlineare ass," viene attivato il metodo nonlineare attivato nel dialogo e pertanto la scelta del metodo, per altro piuttosto ampia, è con facilità definibile nel dialogo.

Tipo di controllo

Si può avere il controllo sullo spostamento, sul carico, sulla lunghezza d'arco.

Iterazioni

Numero di iterazioni per quel passo

Passo totale

Valore di spostamento o moltiplicatore di carico da raggiungere con quel passo. Nel caso dell'analisi in transitorio il campo Passo totale ha il significato di tempo totale.

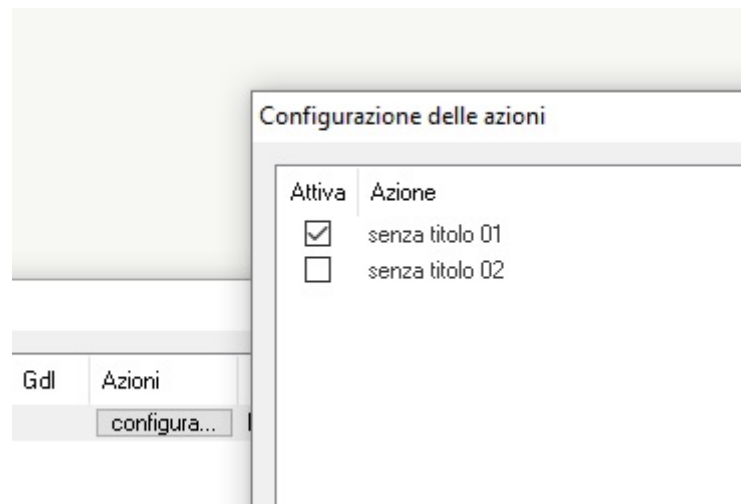
Nodo e grado di libertà

Usati in controllo di spostamento (non impiegati per controllo di carico o arclength)

Azioni

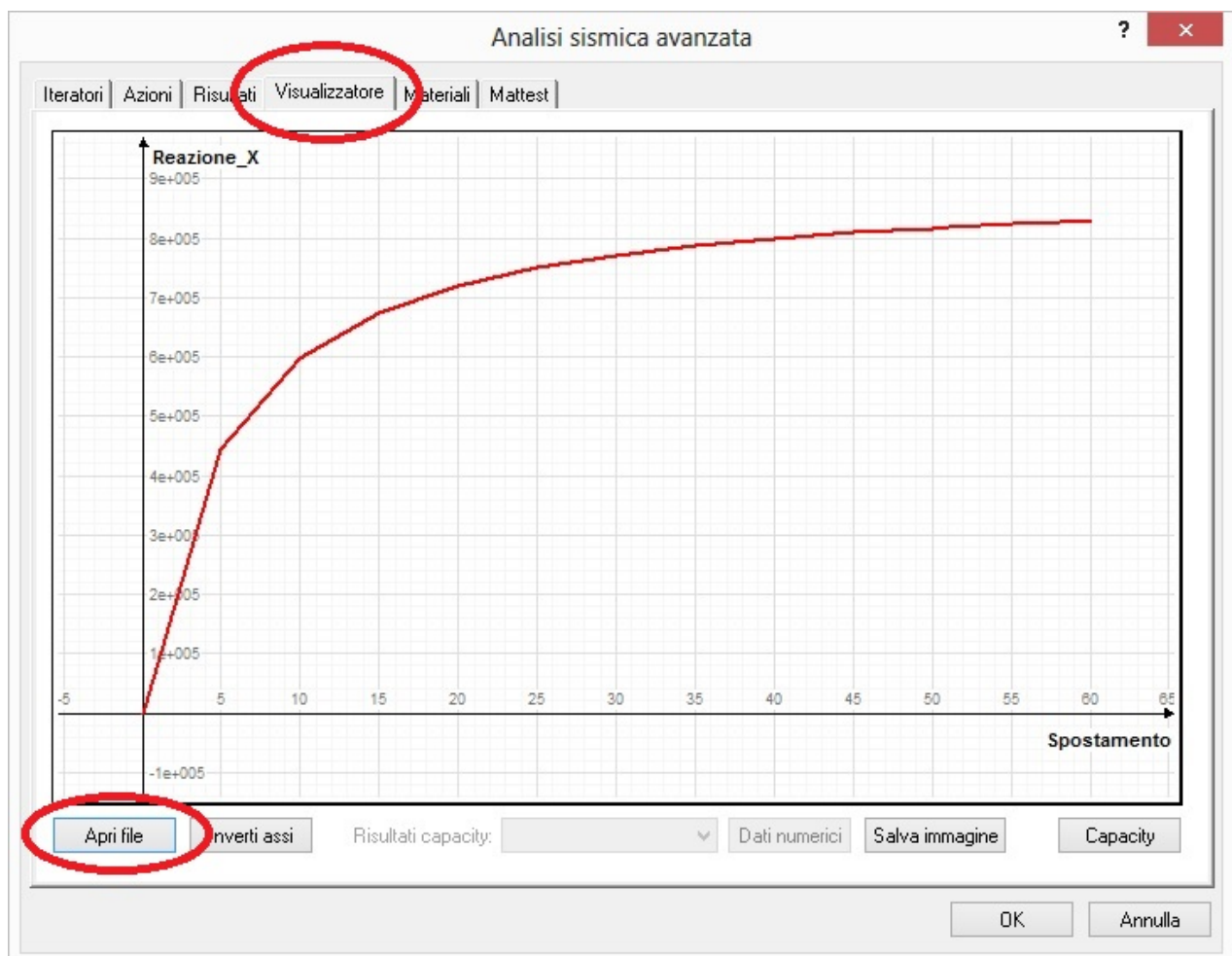
Si possono abilitare le azioni volute. Si seleziona dal bottone "Configura" sotto la voce Azioni il dialogo di assegnazione. Verrà mostrato un dialogo con tutte le azioni già definite. Spuntando le azioni volute, esse parteciperanno contemporaneamente all'analisi per quel passo della lista.

I bottoni nella parte inferiore del dialogo consentono delle selezioni immediate delle azioni.



Registratori

Si può associare un registratore (ed uno solo) al passo. Esso registrerà fino al raggiungimento di un comando Reset. Se vi sono più passi con registratori diversi assegnati ai diversi passi, essi opereranno fino all'attivazione del registratore successivo. Per comodità dell'operatore, se si assegna una attività a fine passo del tipo "Restart e pausa" verrà mostrato il dialogo con i risultati grafici dell'ultimo registratore assegnato. Per visualizzare i risultati di eventuali altri registratori, si può scegliere il nome del registratore dal dialogo del visualizzatore.



Salva come

Consente di assegnare un nome che verrà attribuito all'insieme di risultati salvati. Se non si assegna alcun nome, non vi sarà registrazione. La registrazione avviene alla fine del passo al qual è stato assegnato il nome del file di risultati.

Ripresa

Con il termine "Ripresa" si intende la modalità con cui il programma si predispose per riprendere al passo successivo. Si può avere la possibilità Restart che attua una ripresa al passo successivo conservando lo stato tensionale e deformativo ottenuto al passo precedente. L'opzione Restart invece reinizializza per riprendere da una situazione iniziale consentendo di attuare più analisi del tutto indipendenti in maniera automatica: è il caso dell'analisi pushover con più azioni di spinta. Infine l'opzione "Restart e pausa" consente di fermare l'esecuzione per visualizzare i risultati grafici dell'ultimo registratore assegnato. Dopo la visualizzazione, saranno eseguiti i passi successivi.

Nella immagine che segue, una tipica assegnazione di un'analisi di spinta (pushover). Nel primo passo si applicano le azioni gravitazionali che determineranno uno stato tensionale e deformativo necessario per la successiva applicazione della spinta, nel secondo si applicano le azioni di spinta. Si registrano i valori dell'analisi di capacità per il secondo passo e si registrano infine i risultati. Il registratore "capacity" assegnato al primo passo registrerà i valori relativi all'azione gravitazionale, generalmente non necessario in questo caso, ma che illustra la possibilità di avere più registratori. Questo registratore non sarà aperto al restart, ma si dovrà aprire dal dialogo del visualizzatore come già in precedenza illustrato.

Storia di carico											
Analisi	Controllo	Iterazioni	Passo totale	Nodo	Gdl	Azione	Attiva	Registratore	Salva come	Ripresa	
Newton-Raphson	Carico	10	1.000000			Tutte	<input type="checkbox"/>	capacity		Restart	
Newton-Raphson	Spostamento	10	100.000000	9	Tx	Tutte	<input type="checkbox"/>	capacity 2	capacità	Reset e pausa	

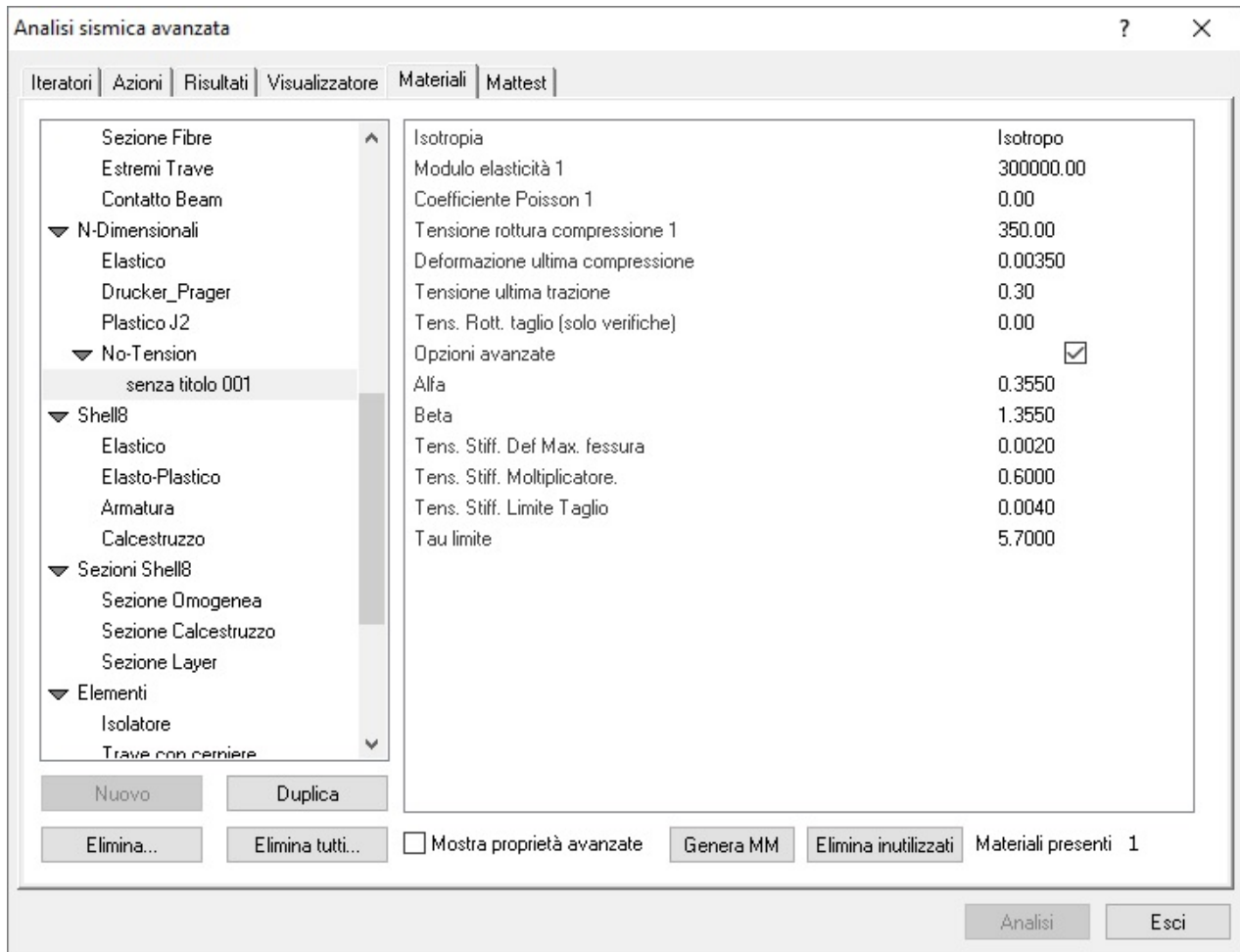
Nella seconda immagine, l'esempio di due analisi distinte per le quali i risultati vengono registrati su differenti registratori e salvati indipendentemente e con nomi diversi alla fine delle due distinte analisi. E' un esempio che potrebbe riferirsi a due analisi di capacità distinte impiegando azioni di spinta differenti per ottenere i risultati complessivi in una sola volta.

Storia di carico											
Analisi	Controllo	Iterazioni	Passo totale	Nodo	Gdl	Azione	Attiva	Registratore	Salva come	Ripresa	
Newton-Raphson	Carico	10	1.000000			Gravità	<input checked="" type="checkbox"/>	capacity		Restart	
Newton-Raphson	Spostamento	10	100.000000	9	Tx	Non gravità	<input checked="" type="checkbox"/>	capacity 2	capacità	Reset e pausa	
Newton-Raphson	Carico	10	1.000000			Azione gravitazionale	<input checked="" type="checkbox"/>	Nessuno		Restart	
Newton-Raphson	Spostamento	10	100.000000	9	Tx	Azione Capacity	<input checked="" type="checkbox"/>	capacity 2	capacità 2a fase	Reset e pausa	

Appendici teoriche

- [Materiale no-tension: cenni teorici](#)
- [Degrado del calcestruzzo, cenni teorici](#)

Materiale no-tension: cenni teorici



Quanto qui esposto è riferibile sia al materiale no-tension che al materiale calcestruzzo da impiegarsi nell'elemento DegenerateShell. Questo materiale è impiegato in elementi piastra e guscio spessi e pertanto gli effetti del taglio trasversale devono essere tenuti in conto. Il criterio plastico adottato è basato sui primi due invarianti di sforzo impiegando due coefficienti che caratterizzano il materiale.

Condizione di snervamento

$$f(I_1, I_2) = \{\beta (3.0 \cdot J_2) + \alpha I_1\}^{1/2} = \sigma_0 \quad [1]$$

dove α e β sono parametri del materiale e σ_0 è lo sforzo effettivo equivalente. In termini di sforzi principali, il criterio si può scrivere come segue.

$$\beta [(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2) - (\sigma_1\sigma_2 + \sigma_1\sigma_3 + \sigma_2\sigma_3) + \alpha (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)] = \sigma_0^2 \quad [2]$$

Ponendo $\alpha=0$ e $\beta=1$ si ottiene il criterio di Huber-Mises.

Nelle piastre e nei gusci spessi si ha un comportamento prevalentemente biassiale e pertanto la componente z è trascurabile. È quindi ragionevole ottenere i parametri α e β da un test di compressione biassiale. In questo caso si può assumere che $\sigma_1 = \sigma_2 = k \sigma_0$. Dove k è il parametro che relaziona lo sforzo biassiale con lo sforzo limite uniassiale. Per il

calcestruzzo si sono assunti i valori ottenuti da Kupfer: [H. Kupfer, K. H. Hildsdorf, H. Bush, *Behaviour of concrete under biaxial stress*].

con tale valore dalla [2] si ottiene $\alpha=0.355 \sigma_0$ e $\beta 1.355$ e pertanto la [1] può essere scritta nei termini delle componenti di sforzo.

$$f(\sigma) = \{\beta (\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y) + 3.0 (\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2)\} + \alpha(\sigma_x + \sigma_y) \}^{1/2} = \sigma_0$$

Nel dialogo di assegnazione dei parametri "Avanzati" questi due valori sono denominati Alfa e Beta.

Flow rule

Nel costruire la relazione sforzo-deformazione in campo plastico, si assume normalmente che il vettore della variazione della deformazione plastica sia ortogonale alla superficie di snervamento. Tale assunzione viene detta "flusso associativo" ed è accettabile per il calcestruzzo e per la muratura soprattutto per ragioni di praticità. L'incremento di deformazione plastica è dunque definito come:

$$d^p_{ij} = d \lambda (\delta f(\sigma)) / (\delta \sigma_{ij})$$

La trattazione successiva è standard e si rimanda ai testi specializzati. Non è necessaria alcuna assegnazione di parametri che governano questo fenomeno.

Hardening rule

La hardening rule definisce lo spostamento delle superficie di snervamento durante la deformazione plastica. Essa determina la relazione tra lo "sforzo efficace" e la deformazione plastica accumulata o "deformazione effettiva". Il concetto di sforzo e deformazione effettivi rendono possibile estrapolare da un comportamento monoassiale il comportamento triassiale. Qui si è adottata la così detta "parabola di Madrid" per tale relazione, ovvero:

$$\sigma = E_0 \epsilon - 0.5 \epsilon_0 E_0 / \epsilon_0$$

dove E_0 è il modulo elastico iniziale, ϵ è la deformazione totale ed ϵ_0 è la deformazione allo sforzo di picco σ_0 . Nessun parametro deve essere assegnato per governare questo aspetto.

Condizione di crushing

Il crushing è la rottura per compressione. Per i materiali qui esaminati (calcestruzzo, muratura) la rottura per compressione è un fenomeno controllato dalla deformazione. La mancanza di una appropriata formulazione in termini di deformazione conduce ad adottare la semplice conversione del criterio di snervamento in termini di sforzo nel criterio in termini di deformazione e cioè:

$$\beta(3 J'_2) + \alpha I'_1 = \epsilon_u^2$$

dove ϵ_u è la deformazione ultima per compressione.

Il parametro ϵ_u deve essere assegnato nel dialogo del materiale ed è definito "Deformazione ultima compressione".

Comportamento a trazione

La risposta del materiale allo sforzo di trazione è assunto elastico lineare fino al raggiungimento della superficie di frattura. Tale limite è espresso in termini di sforzo. Quando si raggiunge il limite, il modulo elastico e il coefficiente di Poisson vengono

assunti pari a zero nella direzione ortogonale al piano di frattura e si impiega un modulo di taglio ridotto. Poiché la frattura porta alla anisotropia del materiale, le relazioni suddette, nel piano della frattura, vanno proiettate nel sistema di riferimenti dell'elemento. La resistenza a trazione è, in questi materiali, modesta ed inaffidabile e pertanto non è molto significativa, mentre è significativo il comportamento indotto nelle zone circostanti, pertanto si impiega un metodo di mediazione, si assume cioè una rappresentazione diffusa (smeared) del materiale fessurato. Ciò vuol dire che le fessure non sono discrete ma distribuite in una regione dell'elemento. Ciò evita anche la dipendenza della soluzione dalla fittezza della mesh. Lo sforzo massimo di trazione deve essere assegnato nel dialogo del materiale ed è definito "Tensione ultima trazione".

Tension stiffening

il fenomeno del tension stiffening è legato al fatto che l'allontanamento delle superfici della frattura non è sempre immediatamente completo e restano delle forze di trazione ortogonali al piano di frattura. Si adotta quindi una graduale diminuzione di tali forze. Il carico e lo scarico del materiale fessurato è governato da una relazione lineare governata da un modulo elastico fittizio E_i ovvero dalla relazione:

$$E_i = k f'_t (1 - \varepsilon_i / \varepsilon_m) / \varepsilon_i$$

dove k e ε_m sono parametri che governano il fenomeno. Se la frattura si richiude, il materiale viene considerato non fessurato ma la direzione della fessura ed il massimo valore della deformazione vengono memorizzati. Il valore k determina il fenomeno ed è definito "Tens. Stiff. Moltiplicatore" e può essere assegnato nel dialogo. Se non si ha un tension stiffening, si può assumere nullo il parametro k . Il valore di default per il calcestruzzo è in genere 0.6. Il parametro ε_m è la deformazione massima oltre la quale non vi è più una tensione di trazione nella fessura. Questo parametro è assunto per default pari a 0.002 e può essere assegnato nel dialogo con il nome di "Tens. Stiff. Def. Max. Fessura".

Modulo di taglio fessurato

Una consistente tensione di taglio può essere trasmessa tra le superfici della fessura. Il metodo qui adottato per tener conto di questo fenomeno è quello di adottare un modulo di taglio G_c . Tale modulo si assume sia funzione della deformazione di frattura. Per il materiale fessurato nella direzione 1 si ha, ad esempio:

$$G_{12}^c = 0.25 G (1 - \varepsilon_1 / 0.04); G_{12}^c = 0 \text{ se } \varepsilon_1 \geq 0.004$$

Analogamente per le altre direzioni. Se la deformazione supera il valore limite ε_{lim} il modulo di taglio si assume nullo. Il valore ε_{lim} può essere assegnato nel dialogo è indicato come "Tens. Stiff. Limite Taglio". Il valore di default, tipicamente usato per il conglomerato cementizio è 0.004.

Parametrizzazione

Oltre ai parametri standard, i parametri che consentono di governare tutto il modello sono definiti "Avanzati" nel dialogo e sono i seguenti.

α definito Alfa, parametro che determina la forma della superficie di snervamento, valore di default 0.355

β definito Beta, come sopra, default $1.355 \sigma_0$.

Gli altri parametri governano il tension stiffening e sono:

k definito Tens. Stiff. Moltiplicatore. Default=0.6.

ε_m definito Tens. Stiff. Max. Def. Fessura. Default=0.002.

ε_i definito Tens. Stiff. Limite taglio. Default=0.004.

Il parametro Tau Limite è impiegato nel modello di snervamento e può essere diverso dal valore di "Tau Rott. Taglio (solo verifiche)" che è impiegato solo per le verifiche di norma per gli stati critici.

Degrado del calcestruzzo, cenni teorici

Generalità

La teoria qui esposta si riferisce ad una singola barra di armatura e alla diffusione del degrado relativa a tale barra per quanto riguarda il suo copriferro ed interferro e ovviamente diametro e resistenza.

Carbonatazione e cloruri

Si considerano i due fenomeni non contemporanei e la trattazione considera separatamente uno o l'altro dei due fenomeni.

Carbonatazione

Diffusione della carbonatazione

Per la diffusione della carbonatazione si è adottato il modello di Papadakis e Tsimas [1]. In tale modello, alcuni dei numerosi parametri coinvolti possono essere considerati tipici e pertanto, per ottenere la massima facilità di impiego, nel programma vengono considerati predefiniti.

I parametri predefiniti sono i seguenti:

contenuto tipico acqua kg/m^3 120

tipica densità cemento kg/m^3 3150

contenuto in cemento kg/m^3 300

tipico contenuto CO_2 $3.6 \cdot 10^{-4}$

I parametri che restano da assegnare sono:

tempo dalla sezione integra per il quale si vuole conoscere lo stato

percentuale di umidità

resistenza a compressione del calcestruzzo

Se si assegna la corrosione della barra ottenuta da indagine, la diffusione viene ignorata e non è necessario che i parametri siano assegnati.

Corrosione della barra

La corrosione si assume omogenea. Si adotta la relazione, praticamente universalmente riconosciuta: $x_s = i_{\text{corr}} t$, dove x_s è la profondità della corrosione omogenea, t è il tempo trascorso dall'inizio della corrosione della barra e i_{corr} è un valore dipendente dalle condizioni ambientali.

Si è preferito assumere i valori consigliati da Rodriguez et al. [2] in funzione delle classi di esposizione per facilitare l'uso, ma valore di i_{corr} può essere assegnato. Si ricorda che l'unità di misura adottata per la corrente di corrosione è il $\mu\text{A/cm}^2$. Si noti che tutti i successivi fenomeni di degrado sono funzione della corrosione della barra e pertanto, se è nota questa da indagini è possibile inserire questo valore per ottenere i relativi parametri di resistenza.

Cloruri

Diffusione

Per la diffusione si adotta il modello di DuraCrete [3]. formula 8.1 e seg. Tale modello mette in relazione la quantità di cloruri sulla superficie con la quantità critica che comporta la corrosione della barra, alla distanza dalla superficie. Tali valori dipendono dalle condizioni di esposizione. È possibile ottenere i valori suggeriti da DuraCrete dalle condizioni di esposizione, oppure assegnare numericamente i valori voluti. La concentrazione dei cloruri in superficie è relativa alla composizione del calcestruzzo, ovvero dal rapporto w/b , acqua-cemento. Il modello coinvolge altri parametri:

$k_{\text{cc,cl}}$ legato al tempo di maturazione, si assume il valore 0.79 relativo a 28 giorni di maturazione

$k_{cec,cl}$ legato all'esposizione. Tale valore viene desunto dalla classe di esposizione assegnata, non può essere assegnato numericamente.

N fattore di esposizione, per l'assegnazione vedi $k_{cec,cl}$

w/b rapporto acqua/cemento: si assume il valore tipico 0.3.

I coefficienti di incertezza, generalmente simboleggiati con γ , non vengono contemplati nella formulazione e quindi i valori vanno assegnati già affetti da tali coefficienti.

Corrosione della barra Si adotta il modello di Liu e Weier [4] per determinare l'intensità di corrente i_{corr} che è assunto relativo alla concentrazione di cloruri sulla barra, tale valore viene desunto dalla diffusione vista al punto precedente. La relazione tra corrente e corrosione della barra è $x_s = i_{corr} t R$. Il tempo t è relativo all'inizio della corrosione, R è il fattore di pitting.

Poiché nel caso di pitting la corrosione non è omogenea, l'area della barra per successive elaborazioni viene determinata tramite la geometria suggerita da Val e Melchers [5] e comunemente adottata. Il fattore di pitting deve essere assegnato. Alcuni valori suggeriti si trovano in Sritewart [6]. Ad esempio per una barra di diametro 27 mm $R=7.1$. Il valore i_{corr} non può essere assegnato dall'operatore.

Corrosione da indagini

E' possibile assegnare la profondità di corrosione ottenuta da indagini.

Corrosione non localizzata

Nel caso di corrosione da cloruri si ha una corrosione non localizzata a "pozzo" (pitting). Per la riduzione di area in questo caso si usa il modello suggerito da Val ed altri [5][6].

Fenomeni conseguenti la corrosione della barra

Questi fenomeni sono indipendenti dal tipo di aggressione e sono legati all'aumento di volume della barra causato dalla corrosione.

Area di fessurazione e fessurazione del copriferro

Il modello più diffuso è quello citato da DuraCrete [3], formula 10.1 Tale formula mette in relazione la fessurazione del copriferro con la corrosione della barra Ricavando da questa formula il raggio dell'area di fessurazione, è possibile avere una visualizzazione del processo di degrado del calcestruzzo anche prima che inizi la fessurazione del copriferro.

Espulsione del copriferro

Si assume che la espulsione (spalling) avvenga quando l'ampiezza delle fessure calcolate come sopra, raggiunga il valore caratteristico di 1 mm.

Degrado delle resistenze

Viene considerato il degrado di resistenza dell'acciaio, la deformazione ultima che influenza la duttilità, la diminuita resistenza del calcestruzzo, la perdita del confinamento in caso di spalling.

I fenomeni non considerati sono l'instabilità delle barre per rottura delle staffe e la perdita di resistenza a taglio sempre per perdita delle staffe. Per tali fenomeni non sono disponibili modelli adeguati.

Per il degrado della resistenza delle barre dovuto alla perdita di aderenza, si adotta il modello di Chang [7] che prevede un coefficiente k_t funzione del grado di corrosione che riduce la tensione di aderenza e consente di valutare lo slittamento.

Riferimenti

[1] Papadakis V, G., Tsimas S., *Supplementary Cementing Materials in Concrete*. Cement and Cement Research, 32.

[2] J. Rodriguez, L.M. Ortega et al., *Structural Assessment Methodology for residual life calculation of concrete structures affected by reinforcement corrosion*.

- [3] DuraCrete, *Final Technical Report*, Doc BE95-1347/R17, 2000
- [4] Liu Y, Weyers R.E., *Modeling the Dynamic Corrosion Process in Chloride Contaminated Concrete Structures*, Cement and Concrete Research, 28(3), 365-367, 1998.
- [5] Melchers, R.E., Li, C.Q., Lawanwisut, W., *Probabilistic modeling of structural deterioration of reinforced concrete beams under saline environment corrosion*, Structural Safety, 30, 2008, 447-460
- [6] Val D.V., Stewart M.G. and Melchers R.E. (1998), *Effect of Reinforce Corrosion on Reliability of Highway Bridges*, Engineering Structures, Vol. 20, No. 11, pp. 1010-1019.
- [7] Chung. L, Jay JH, Yi ST, *Bond Strength Prediction for reinforced concrete members with high corroded reinforcing bars*, Proc. Of 7th European Conference on Earthquake Engineering, 4 69-80.

Procedure in sintesi

- [Analisi struttura isolata](#)

Analisi struttura isolata

L'ambiente Nòlian dispone di una procedura per il dimensionamento, la generazione e l'assegnazione ad elementi boundary del materiale EE "Isolatore". Qui descriviamo la procedura di assegnazione nell'ambiente Earthquake Engineering (EE). Procedere secondo i punti seguenti.

Nell'ambiente Nòlian, generare nel modello della struttura gli elementi Boundary ai quali assegnare gli isolatori

Selezionare gli elementi Boundary già predisposti

Premere il bottone "Isolatori" nel dialogo dei dati che si apre con la selezione.

Si aprirà un dialogo descritto in questo manuale alla voce [Isolatori](#)

Assegnare le caratteristiche desunte da un catalogo del produttore degli isolatori desiderati.

Per l'analisi, occorre eseguire un'analisi dinamica non lineare impiegando per normativa sette accelerogrammi spettro-compatibili.

Per la generazione degli accelerogrammi occorre:

Accedere all'ambiente Nòlian

Fare un doppio clic sull'icona della palette delle assegnazioni del tipo di elementi

Selezionare dal dialogo che si apre la pagina Dinamica

Selezionare "Genera spettri" ed assegnare i parametri di località, stratigrafia etc, e generare gli spettri

Entrare nell'ambiente EE ed accedere al dialogo "[Forzanti](#)" dal menu Dati.

Entrare nella pagina degli spettri, importare lo spettro voluto dall'archivio degli spettri appena generati e selezionarlo,

Attivare la funzione "Spettro compatibili" ed assegnare i valori richiesti,

Devono essere generate anche le azioni gravitazionali (i carichi gravitazionali devono essere già stati assegnati in Nòlian) e devono essere generate le azioni in transitorio. Questa operazione viene automatizzata tramite un dialogo al quale si accede dal menu Analisi alla voce [Time History](#).

Verrà generata una lista con coppie di analisi gravitazionale e in transitorio.

L'analisi deve essere avviata dall'operatore dopo aver attivato la lista.

L'analisi che si deve effettuare su una struttura isolata, è l'analisi in transitorio. La normativa richiede l'uso di sette accelerogrammi spettro-compatibili. Per facilitare questo tipo di procedura è possibile [generare accelerogrammi spettro-compatibili](#) e la procedura di [analisi dinamica non lineare assistita](#) consente di generare la lista di analisi in transitorio necessarie. Quest'ultima procedura può attivare il registratore degli [stati critici](#) per una valutazione speditiva dei risultati delle analisi.

Se si desidera, si possono generare altri registratori ed associarli ad ognuna delle righe di analisi volute.