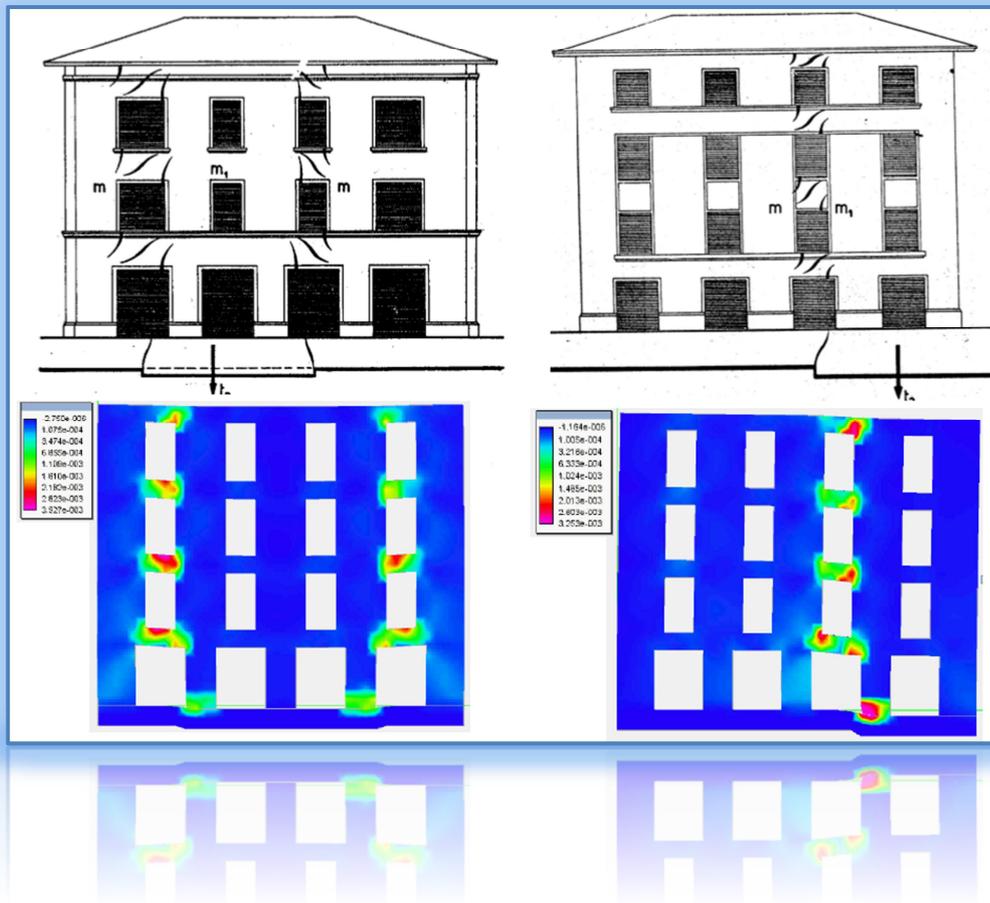


# ANALISI DEI QUADRI FESSURATIVI NELLE STRUTTURE

Applicazione di modelli numerici agli elementi finiti non lineari tramite l'utilizzo dell'ambiente EE di Nolian all-in-one



Francesco Oliveto , Ingegnere – utente Nòlian All-In-One – Softing S.r.l

Francesco Canterini, Ingegnere – collaboratore – Softing S.r.l

## 1. SOMMARIO

Nel presente lavoro si studiano i dissesti statici nelle strutture edilizie in muratura e cemento armato, con riferimento alle manifestazioni fessurative, le lesioni (effetti) e alle cause perturbatrici che le hanno generate (azioni). La conoscenza dello stato di danno strutturale è fondamentale per la stima della capacità portante residua della stessa nei confronti di ulteriori azioni. Partendo da un'attenta disamina della letteratura specialistica sui quadri fessurativi, sulle tipologie di lesioni e cause che le hanno provocate, lo scopo principale è quello di riprodurre il fenomeno (effetto) una volta assegnate le cause (azioni) tramite modelli numerici FEM non lineari e sulla validità dei risultati ottenuti. Lo scopo è quello di validare due elementi finiti non lineari presenti nella libreria software dell'ambiente EE di Nolian All-In-One, quali:

1. L'elemento *NO-TENSION* per elementi finiti tipo guscio, basato sui modelli per materiali fragili quali a fessurazione distribuita (o diffusa) tipo *TOTAL STRAIN CRACK (TSC)*.
2. L'elemento *BEAM-COLUMN* a plasticità diffusa in grandi spostamenti con formulazione *FORCE-BASED* di tipo corotazionale.

Tali elementi sono stati utilizzati per le validazioni e gli esempi proposti nel presente lavoro quali:

- Studio di pareti o strutture tridimensionali in muratura discretizzate con elementi finiti a tre e quattro nodi e materiale fragile tipo *NO-TENSION*;
- Studio di telai piani o spaziali in cemento armato tramite modelli non lineari a plasticità diffusa.

## 2. DISSESTI STATICI, LESIONI E QUADRI FESSURATIVI

### Condizioni di sicurezza strutturali e cause perturbatrici

Le condizioni di sicurezza o efficienza strutturale (*resistenza, stabilità, duttilità e ridondanza*) di una struttura possono essere ridotte o addirittura vanificate da manifestazioni esterne di una crisi (**dissesto**) che investe il complesso o qualche sua parte, e che può avere origine da :

- **Alterazione del piano fondale:** *infiltrazioni, cavità, insufficiente portanza etc.;*
- **Incremento delle azioni:** *per variazione di destinazione d'uso o sopraelevazioni;*
- **Alterazione dell'originario schema strutturale:** *creazione di nuove aperture, soppressione di elementi strutturali etc.;*
- **Anomalie costruttive.**
- **Errati interventi di consolidamento o ripristino funzionale:** *accostamento di nuove tipologie incompatibili con il preesistente;*
- **Azioni di degrado operata dal tempo:** *dagli agenti atmosferici, vegetali e biologici sui materiali di costruzione;*
- **Cause naturali ed azioni eccezionali :** *terremoti, scoppi, incendi, alluvioni etc.*
- **Cause per sollecitazioni oblique:** *con insufficienti o mancanti membrature necessarie a fronteggiarle;*

### Definizioni di dissesto e lesioni

Un **dissesto** si evidenzia attraverso una **manifestazione** (*fratture o lesioni*) d'insieme o isolata, che nasce per effetto di **stati tensionali** che la struttura non è più in grado di sopportare e che ne riducono **la resistenza locale**. Tali manifestazioni vengono classificate a secondo della loro *direzione, larghezza e profondità*. Per quando riguarda la **direzione** si

possono avere manifestazioni: *Longitudinali, verticali (rettilinee o a dente), trasversali, diagonali (rette o a gradini) etc.* In merito alla larghezza e profondità si possono distinguere:

- **Fratture sottili**, distribuite sulla superficie, che si manifestano con *piccoli spostamenti relativi* di punti contigui. *Derivano normalmente da una contrazione di volume del materiale in prossimità della superficie (ritiro) o da una dilatazione di volume del materiale al di sotto della superficie* o entrambe. Normalmente vengono chiamate *cavillature* se lievi, *crinature* o *pelature* lievi e irregolari, *filature capillari* con *ampiezza <0.5 mm (difficili da percepire a occhio nudo)*. Le fratture pur non rappresentando in genere un segno di dissesto, sono nocive alla *durabilità del materiale specie in ambiente aggressivo*, infiltrazioni di acqua vapore etc, e *costituiscono un segno di degradazione*.
- **Lesioni** : soluzioni di continuità, visibili per rottura del tessuto resistente. **Le lesioni sono una manifestazione esterna del difetto di funzionamento della struttura.**

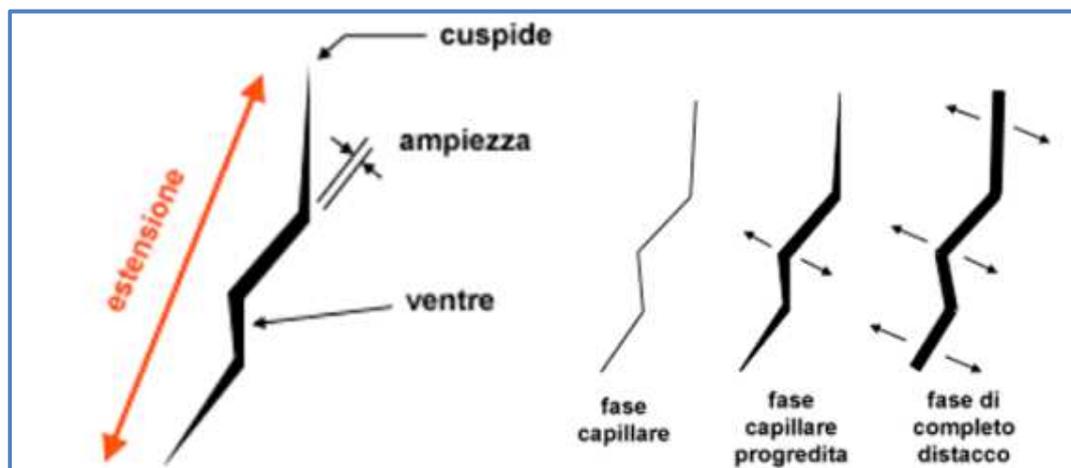


Fig.1 : Definizione dei parametri e fasi evolutive delle lesioni

Gli elementi caratteristici delle lesioni sono (vedi figura.1):

- **Le cuspidi:** *estremità delle diramazioni sottili delle lesioni;*
- **I cigli laterali:** *linee di perimetro delle lesioni che diramano verso le cuspidi;*
- **I ventri :** *sezione di maggiore ampiezza delle lesioni dove più evidente è il distacco dei due cigli;*
- **Estensione:** *distanza tra le due cuspidi*

Se una **lesione** è detta **passante** vuol dire che la manifestazione attraversa completamente lo spessore dell'elemento strutturale presentandosi visibile su entrambe le superfici. Oltre all'osservazione e al rilievo delle lesioni è necessario studiare il loro progredire nel tempo per conoscere le caratteristiche della loro evoluzione. La lesione ha inizio con una *prima fase detta capillare per il suo piccolissimo sviluppo in ampiezza*, prosegue poi in una *seconda fase capillare progredita* e, infine, in una *terza di completo distacco*. (vedi figura.1)

## Tipologie di lesioni e correlazione danno strutturale

Una caratteristica importante nello studio delle lesioni è *la natura più o meno recente delle fessure*. La distinzione tra **lesioni vecchie e nuove** è, in pratica, abbastanza agevole in quanto :

- *Le nuove si presentano con ciglia di frattura a spigoli vivi, con superfici di rottura di tipo cristallino e pulite.*
- *Le vecchie lesioni hanno invece gli spigoli delle ciglia variamente sbeccate o arrotondate e le superfici di rottura non più nette, come all'origine, ma annerite e polverose.*

Alcuni Autori, per strutture in elevazione quantificano *l'entità del danno* in funzione delle lesioni per densità, ampiezza, sollecitazione, in:

- **GRADO A**, *lesioni lievi*: lesioni semplici isolate di piccola ampiezza (<5mm) dovute a flessione/o cause secondarie:
- **GRADO B**, *lesioni serie*: molte lesioni flessionali, o lesioni da taglio isolate ma di piccola ampiezza (<2.5mm);
- **GRADO C**, *danni gravi* : lesioni di rilevante ampiezza (>10 mm se verticali o 5 mm se inclinate ), con disorganizzazione del tessuto murario, danni ad architravi, cordoli etc.

I dissesti di un organismo strutturale, per quanto attiene alla loro estensione possono avere carattere:

- **Locale**: *se interessano un elemento strutturale e non si ripetono per quelli tipologicamente analoghi*, ad esempio se è lesionato un solo rampante di una scala, il dissesto è locale;
- **Globale**: *se interessano il complesso degli elementi strutturali*, ad esempio se tutti i rampanti di una scala sono lesionati il dissesto è globale.
- **Limitati**: *se interessano da 1/3 fino a 2/3 degli elementi strutturali*;

Possono essere di tipo:

- **Diretto**: *quando coinvolgono gli elementi portanti e si manifestano generalmente con moti rigidi, deformazioni e fessurazioni. Incidono sulla sicurezza dell'edificio diminuendone la capacità portante.*
- **Indiretto**: *quando relativo ad elementi costruttivi secondari: quelli portati (tompagni, tramezzi etc.). Questi dissesti anche se non incidono sulla sicurezza del complesso strutturale costituiscono fonte di pericolo (per la loro caduta, etc.)*

Circa la natura delle manifestazioni fessurative, si possono avere lesioni di **trazione** o di **schacciamento**.

La differente *frequenza e pericolosità* dipendono nei *materiali fragili* dal *maggior valore della resistenza a compressione rispetto alla resistenza a trazione nonché dei criteri di progettazione.*

Nella statica del calcestruzzo ordinario e muratura si fa affidamento solo sulla *resistenza a compressione*, per cui se *questa viene a mancare può aversi il collasso dell'intera costruzione*, mentre *il superamento della resistenza a trazione avviene facilmente senza che alteri il comportamento d'insieme della struttura.*

Le lesioni di trazione creano soluzioni della continuità preesistente nella configurazione della struttura *lasciando con le proprie caratteristiche meccaniche le parti che vengono separate*, quindi *se il processo fessurativo non si estende e l'ampiezza rimane contenuta il fenomeno si ritiene circoscritto e non vi è alterazione dello schema strutturale comunque trascurabile.*

Nel caso in cui si riscontrasse *un aumento dell'ampiezza ed estensione della lesione*, si ha un *atto di moto con inizio di un processo evolutivo* quale ad esempio *un cedimento fondale o lo schiacciamento di un elemento murario.*

Le lesioni di trazione *sono meno insidiose di quelle a schiacciamento*, sia per *la maggiore evidenza* sia perché *segmentando la struttura in più elementi consentono l'instaurarsi di nuove condizioni di equilibrio.* In un materiale *poco resistente a trazione*, le prime manifestazioni *si evidenziano nelle zone tese.*

### Fasi evolutive delle lesioni e Quadro fessurativo

Per individuare la direzione in cui si sviluppano le lesioni *occorre tener conto delle linee isostatiche*, il cui andamento nella *fase iniziale non si discosta da quelle in regime elastico pur essendo in fase non lineare.*

- La lesione nella fase iniziale, si innescherà *normalmente alle isostatiche corrispondenti alle tensioni principali di trazione.*
- Alla formazione della prima lesione *si ha una redistribuzione delle tensioni principali e quindi una variazione delle linee isostatiche.*
- Nel successivo stadio, *una lesione può stabilizzarsi o continuare ad evolvere senza seguire l'isostatica originaria* in quanto a seguito *della modifica dello schema resistente per la lesione, le isostatiche si modificano.*
- Possono quindi formarsi *nuove lesioni ed in zone anche diverse.* Il raggiungimento *dei valori di rottura in più zone non fa collassare l'elemento*, ma una *modifica continua allo schema resistente che chiama a collaborare le zone integre.*

- Lo **stadio estremo** è chiamato **fase delle grandi lesioni** dove si verifica **all'estendersi il congiungersi delle prime lesioni**. Sono ancora possibili **equilibri stabili** se i movimenti delle varie parti, in cui le lesioni decompongono l'intera struttura **risultano efficacemente contrastati**.

L'esame della *forma, l'andamento e ampiezza delle lesioni*, l'analisi dei *spostamenti della parte del materiale tralata rispetto alla parte contigua in posizione originaria*, ossia al moto delle due parti, *possono far risalire alle cause di un dissesto* classificandolo secondo tipologia (**distacco, rotazione, scorrimento, spostamento fuori piano, etc.**).

Si rende allora necessaria una visione d'insieme delle lesioni riportandole sui prospetti del manufatto. Tale rappresentazione grafica delle lesioni è chiamato **Quadro Fessurativo** (vedi figura.2).



Fig.2 : Quadro fessurativo da fotogrammetria architettonica

### 3. QUADRI FESSURATIVI PER CEDIMENTI FONDALI

#### Parametri per la definizione dei cedimenti in fondazione

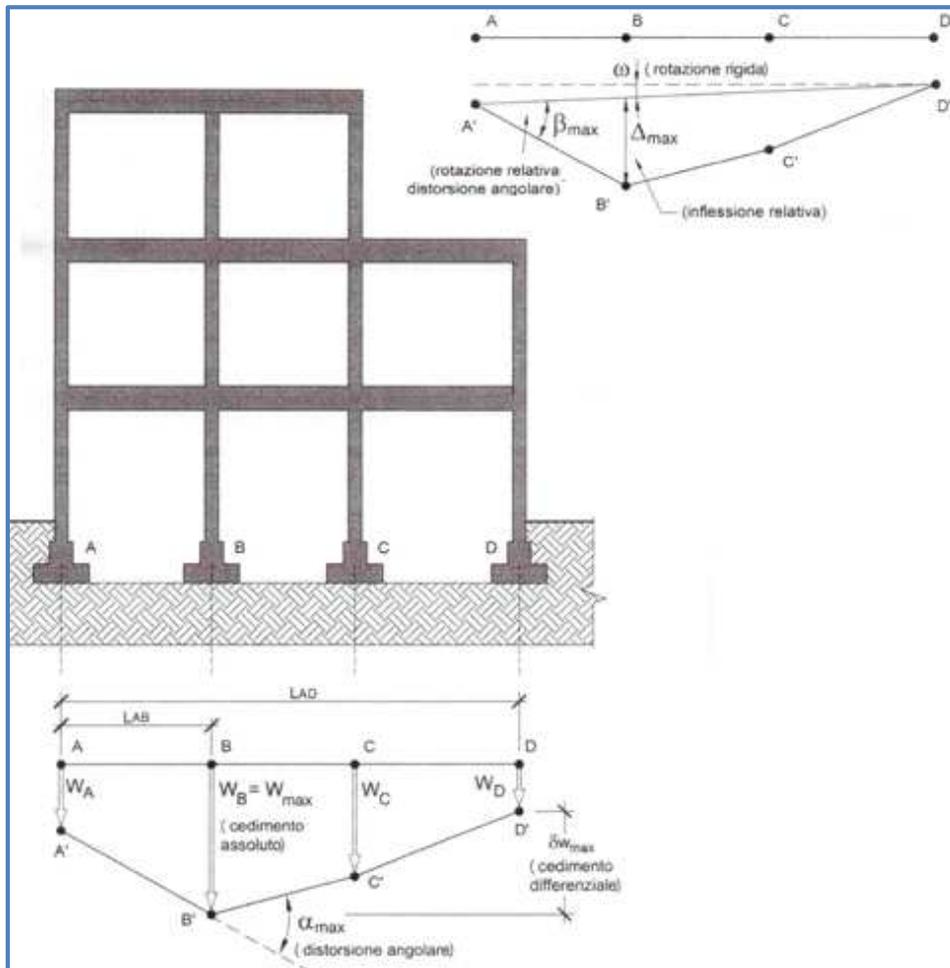


Fig.3 : Principali parametri per la definizione dei cedimenti fondali

Con riferimento alla fig.3, si indicano i principali parametri per la definizione dei cedimenti :

- $W_{MAX}=W_B$  : il valore del massimo cedimento assoluto;
- $W_A, W_C, W_D$  : cedimenti assoluti alla base delle fondazioni A,C,D;
- $\delta W_{ij}$  : il cedimento differenziale fra due punti della fondazione i e j;
- $\delta W_{MAX}= W_B - W_D$ : il valore massimo di  $\delta$  per l'intera costruzione ;
- $\omega$ : rotazione rigida rispetto all'orizzontale;
- $\theta = \delta / l$  : distorsione angolare o rotazione relativa di una campata;
- $\theta_{MAX} = (\delta / l)_{MAX}$  : il valore massimo della distorsione angolare per l'intera costruzione  
 $\theta_{MAX} = \theta_{AB} = \arctan(\delta W_{A-B} / L_{A-B} )$
- $\Delta$ : inflessione relativa, distanza del punto i alla retta congiungente i due punti di estremità;
- $\Delta_{MAX}$ : inflessione relativa massima ( $\Delta_{MAX} = \Delta_B$ );  $\Delta / L$ : rapporto d'inflessione.

## Cause predisponenti ed innescanti i cedimenti

I cedimenti differenziali che possono causare danni alle strutture sono quelli che avvengono **fra elementi della stessa struttura**. Il cedimento più pericoloso è quello che causa **la massima distorsione angolare in una parte della costruzione soltanto**. L'entità dei cedimenti differenziali dipende:

- **Da fattori geologici:** *natura del terreno, stato e grado di addensamento;*
- **Da fattori di sito:** *disposizione relativa delle strutture di fondazione e degli strati;*
- **Da fattori di natura idraulica:** *presenza o meno di falde acquifere in condizioni non stazionarie;*
- **Dalle caratteristiche della struttura di fondazione:** *tipologia, rigidità etc.;*
- **Dall'entità e distribuzione dei carichi;**
- **Dalla tipologia ed entità di movimenti franosi in atto;**

## Influenza della storia di carico sulla formazione dei cedimenti differenziali

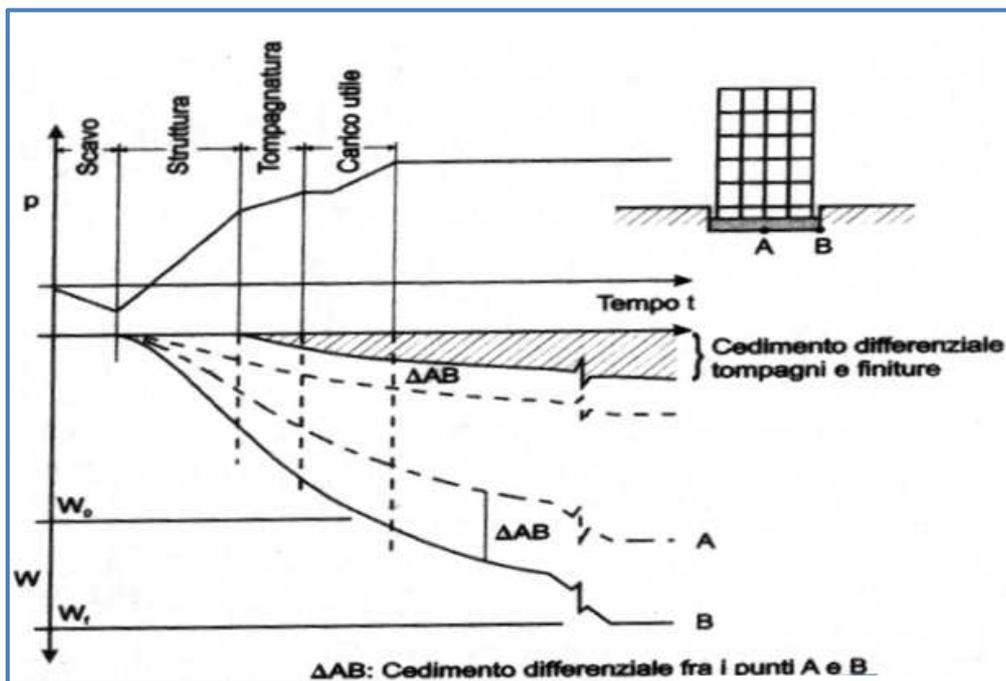


Fig.4 : Cedimenti durante e dopo la costruzione di un edificio.

In figura.4 si evidenzia come il cedimento differenziale che abbia effettive conseguenze sulle parti strutturali e non dell'edificio sia un' aliquota di quello osservato e dipenda da:

1. Storia della costruzione;
2. Dal rapporto tra azioni permanenti e variabili;
3. Dal rapporto dei cedimenti istantanei e totali;
4. Dalle caratteristiche del sottosuolo;
5. Dal sistema di fondazione e dalla sovrastruttura;

Nella figura.5 viene mostrato i risultati in termini di cedimento di una struttura a più livelli realizzata per fasi costruttive , in presenza di falda e di terreni poco permeabili, con modellazione al continuo non lineare sia del terreno che della struttura. Dalla figura si evincono la storia temporale dei cedimenti estremi della fondazione come aliquota di cedimento di rigonfiamento, immediato e di consolidazione.

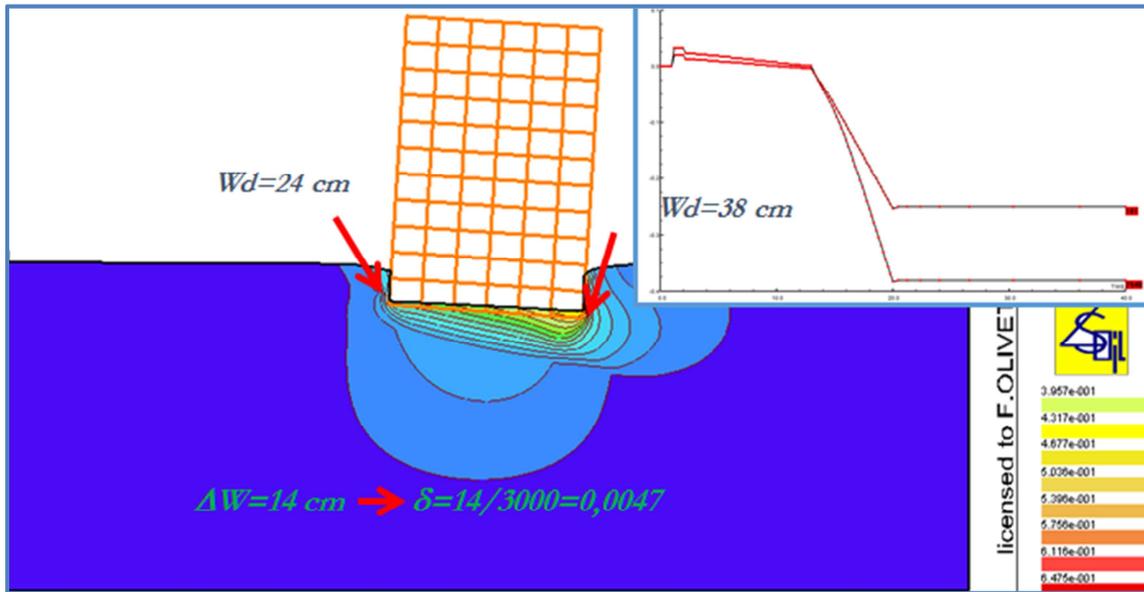


Fig.5 : Costruzioni per fasi di una struttura multilivello in presenza di falda

## Valori ammissibili dei cedimenti in funzione del danno alla sovrastruttura

Distorsioni angolari limite secondo Bjerrum (1963)	
Categoria di danno potenziale	Distorsione angolare $\tan\beta$
Limite oltre il quale possono sorgere problemi in macchinari sensibili ai cedimenti	1/750
Limite di pericolo per strutture reticolari	1/600
Limite di sicurezza per edifici in cui non si ammettono fessurazioni	1/500
Limite oltre il quale possono apparire le prime fessure nei muri di tamponamento e difficoltà nell'uso dei carri ponte	1/300
Limite oltre il quale possono essere visibili inclinazioni di edifici alti	1/250
Notevoli fessure in muri di tamponamento e muri portanti in laterizio	
Limite di sicurezza per muri portanti in laterizio con $h/L < 1/4$	1/150
Limite oltre il quale si devono temere danni strutturali negli edifici	

Valori ammissibili di rapporto di curvatura $\Delta/L$ (riferiti al tipo di cinematismo)				
Struttura	Cinematismo	Valori ammissibili di $\Delta/L$		
		Meyerhof (1974)	Polshine-Tokar (1957)	Burland e Wroth (1975)
Murature portanti non armate	Deformata con concavità verso l'alto	$0,4 \cdot 10^{-3}$	$0,3 \div 0,4 \cdot 10^{-3}$ ( $L/H \leq 3$ )	$0,4 \cdot 10^{-3}$ ( $L/H = 1$ )
	Deformata con concavità verso il basso			$0,8 \cdot 10^{-3}$ ( $L/H = 5$ )
				$0,2 \cdot 10^{-3}$ ( $L/H = 1$ )
				$0,4 \cdot 10^{-3}$ ( $L/H = 5$ )

Valori ammissibili della distorsione angolare $\beta$ riferiti a tipologie strutturali e di danno					
Struttura	Tipo di danno	Valori ammissibili di $\beta$ (distorsione angolare)			
		Skempton e McDonald (1956)	Meyerhof (1974)	Polshin e Tokar (1957)	Bjerrum (1973)
Strutture intelaiate e murature armate	Alle strutture	1/150	1/250	1/200	1/150
	Ai tompagni	1/300	1/500	1/500	1/500

Tipo di movimento	Fattore di limitazione	Valore ammissibile di cedimento, inclinazione, rotazione relativa
Inclinazione $\delta/L$	Stabilità al ribaltamento Rotazione di ciminiere e torri Drenaggio di superfici pavimentate	Da verificare $\delta/H \leq 0,04$ 0,01÷0,02
	Operatività macchine: Macchine tessili Turbogeneratori Gru a ponte	0,003 0,0002 0,003
Rotazione relativa $\beta$	Murature portanti multipiano	0,0005÷0,001
	Murature portanti ad un piano	0,001÷0,02
	Lesione intonaci	0,001
	Telai in c. a.	0,0025÷0,004
	Pareti di strutture a telaio in c.a.	0,003
	Telai in acciaio	0,002
Strutture semplici di acciaio	0,005	

*L* = distanza tra pilastri adiacenti, *H* = altezza di ciminiere e torri  
Valori ammissibili più elevati → strutture flessibili, sottosuoli uniformi  
Valori ammissibili più ridotti → strutture rigide, sottosuoli irregolari

Come si può osservare dalle tabelle precedenti gli autori limitano due parametri fondamentali che non è il cedimento assoluto ma bensì quello differenziale insieme alla distorsione quali indicatori di danno sulla sovrastruttura. I valori ammissibili sono tanto più limitativi per strutture fragili a più piani (murature), strutture alte (ciminiere, serbatoi, etc.), strutture sensibili (esempio solai con macchinari ad alta precisione), etc. . Ad esempio per strutture in c.a con tamponature interagenti con il telaio Meyerhof (1974) suggerisce i seguenti limiti alla distorsione angolare:

- $\delta < 1/250$  per non avere danni alle strutture portanti del telaio;
- $\delta < 1/500$  per non avere danni alle tamponature;

#### 4. CLASSIFICAZIONE DEI CEDIMENTI IN RELAZIONE AI TIPI DI LESIONE

Secondo la letteratura tecnica consolidata “ Dissesti Statici delle Strutture edilizie “ Sisto Mastrodicasa Hoepli Editore, i cedimenti fondali sono classificati in relazione :

**a) Alla localizzazione**

- Cedimenti intermedi ;
- Cedimenti terminali ;

**b) Alla lunghezza del tronco ceduto in rapporto all'altezza**

- Cedimenti lunghi ;
- Cedimenti intermedi;
- Cedimenti corti.

Nel **cedimento intermedio** la parte ceduta è compresa fra le due in posto ad essa contigue.

Nel **cedimento terminale** la parte ceduta interessa l'estremità del tronco murario.

La distinzione di cedimenti lunghi, medi e corti è basata sul rapporto delle tensioni tangenziali e normali nei cedimenti di traslazione verticale intermedi e terminali quando le strutture murarie vengono assimilate in via sommaria a solidi astiformi.

#### Cedimenti intermedi

Consideriamo un muro  $m$  rettilineo indefinito di sezione rettangolare costante  $a$  e di altezza  $h$  appoggiato sul terreno per tutta la sua lunghezza meno che nel tronco intermedio **A-B** di lunghezza  $l$ . Nelle sezioni A-B supposte incastrate si stabiliscono le tensioni massime rispettivamente normali e tangenziali :

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max} \cdot h}{2 \cdot I} \quad \tau_{max} = \frac{T_{max}}{\frac{2}{3} \cdot A}$$

con  $M_{max}$  e  $T_{max}$  rispettivamente massimo momento flettente e taglio nella sezione di incastro e valgono in funzione dello schema vincolare:

$$M_{MAX} = \frac{1}{12} \cdot \gamma \cdot h \cdot a \cdot l^2 \quad T_{MAX} = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot a \cdot h \cdot l$$

dove  $\gamma$  è il peso specifico della muratura ed  $I$  e  $A$  sono rispettivamente il momento d'inerzia e l'area della sezione trasversale del muro e valgono:

$$I = \frac{1}{12} \cdot a \cdot h^3 \quad A = a \cdot h$$

Si da dunque effettuando le relative sostituzioni :

$$\sigma_{MAX} = \frac{\gamma \cdot l^2}{2 \cdot h} \quad \tau_{MAX} = \frac{3}{4} \cdot \gamma \cdot l$$

Quindi le condizioni in cui le tensioni normali sono maggiori, minori o uguali di quelle normali si traducono nei seguenti casi:

$$\sigma_{max} \gtrless \tau_{max} \rightarrow l \gtrless \frac{3}{2}h$$

Chiameremo **lunghi, medi e corti** i cedimenti **intermedi** nei quali, rispettivamente la **lunghezza del cedimento è maggiore, uguale o minore** di una **volta e mezza l'altezza del solido murario**.

Nel **caso a** di **cedimenti intermedi lunghi** essendo il valore della tensione massima normale maggiore di quella tangenziale  $\sigma_{max} > \tau_{max}$  si forma una frattura iniziale nelle due sezioni terminali del cedimento ed è di tipo verticale estradossale con ampiezza massima in sommità (vedi figura.6).

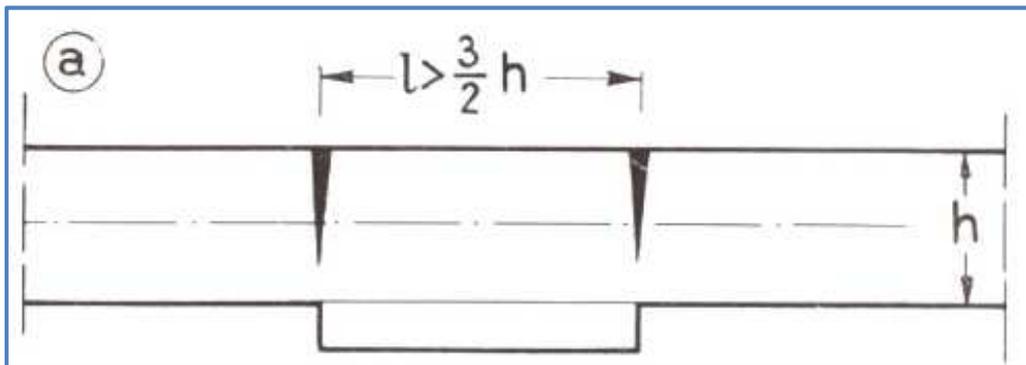


Fig.6 : Quadro fessurativo solido murario – Cedimenti intermedi lunghi

Nel **caso b** **cedimenti intermedi corti** essendo il valore della tensione massima normale minore di quella tangenziale  $\sigma_{max} < \tau_{max}$ , si forma una frattura iniziale nelle due sezioni terminali inclinate di 45° dalla parte della mezzeria ed è ubicata a metà altezza del solido murario (vedi figura.7).

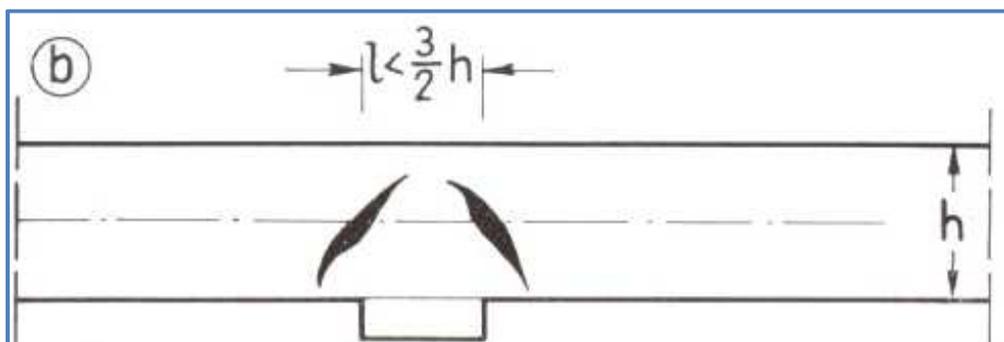


Fig.7 : Quadro fessurativo solido murario – Cedimenti intermedi corti

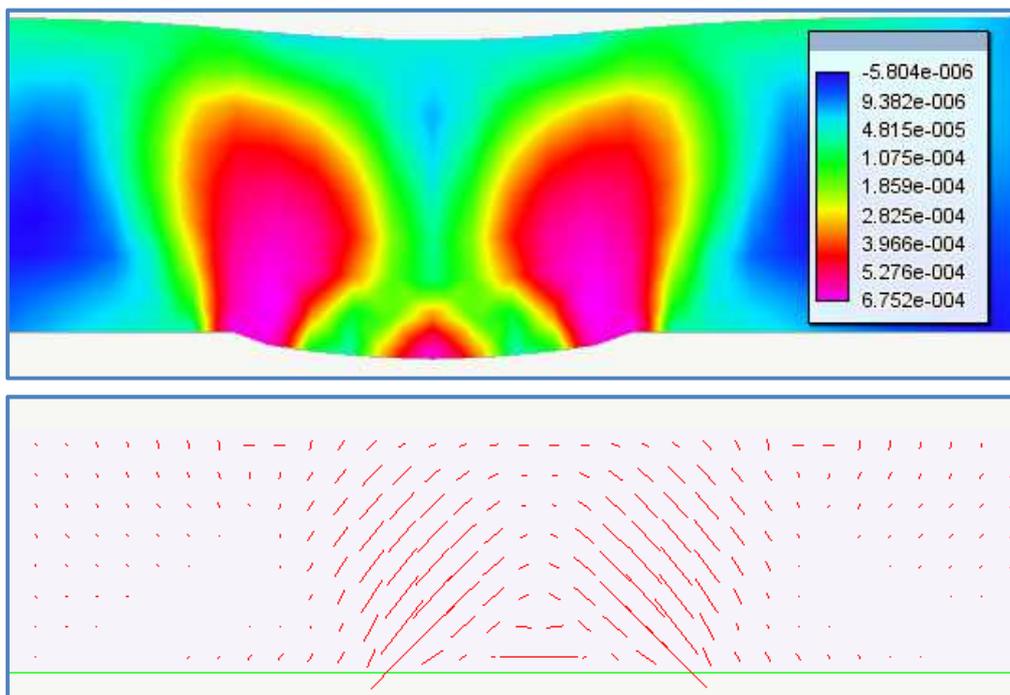
Queste problematiche strutturali appena illustrate, possono essere riprodotte disponendo degli opportuni elementi finiti che consentano l'opportuna modellazione del comportamento non lineare della muratura, nel particolare è necessario avere un elemento che modifichi la propria matrice di rigidità per ogni punto della mesh, in funzione dello stato di tensione agente negli elementi. Per fare questo si utilizza l'elemento No-Tension (che verrà illustrato in maniera più approfondita più avanti), tale tipo di elementi finiti consente l'assegnazione di un comportamento differente tra gli sforzi di compressione e trazione arrivando a poter

annullare quest'ultima. In tal modo è possibile simulare la formazione di fessure che si vengano a formare sul paramento murario in funzione dell'andamento degli sforzi di trazione. Oltre al tipo di elemento finito che consenta la modellazione del comportamento della muratura, deve essere possibile l'assegnazione di spostamenti imposti tramite time history, la time History è necessaria per assegnare gli spostamenti indotti in piccoli step, dato che l'assegnazione istantanea del cedimento finale comporterebbe una variazione di stato del materiale troppo repentina che non consentirebbe la redistribuzione delle tensioni all'intorno della zona fessurata e denuncerebbe una non convergenza nel calcolo, che avrebbe senso da un punto di vista matematico ma non coglierebbe ciò che avviene nel fenomeno fisico reale, all'interno del materiale.

Nel proseguo saranno riportate le immagini dei risultati ottenuti a seguito di varie modellazioni, in cui viene utilizzato il No-Tension ed in cui vengono di volta in volta assegnati gli spostamenti indotti nelle zone opportune, in modo da simulare gli schemi di cedimento illustrati.

Tutte le modellazioni riportate nel presente articolo sono state operate con l'ambiente di calcolo non lineare Earthquake Engineering della suite di Nòlian All-In-One.

Nella figura 7.a viene mostrata lo stato di massima deformazione subito dal paramento murario ottenuta modellando il caso **b** di *cedimenti intermedi corti*, ed a seguire lo stato di fessurazione corrispondente in termini di direzioni principali delle tensioni.



*Fig.7a : Stato di Fessurazione con direzioni principali di tensione modello NO-TENSION Cedimenti intermedi corti – Riproduzione dello stato fessurativo operato tramite modellazione ad elementi finiti non lineari con l'ambiente di calcolo non lineare Earthquake Engineering della suite di Nòlian All-In-One*

Nel **caso c** di **cedimenti intermedi medi** essendo il valore della tensione massima normale uguale a quella tangenziale max  $\sigma_{max} = \tau_{max}$ , le fratture iniziali a flessione e taglio si formano contemporaneamente con andamento simile ai casi *a* e *b* ma con ampiezze ed estensioni minori (vedi figura.8).

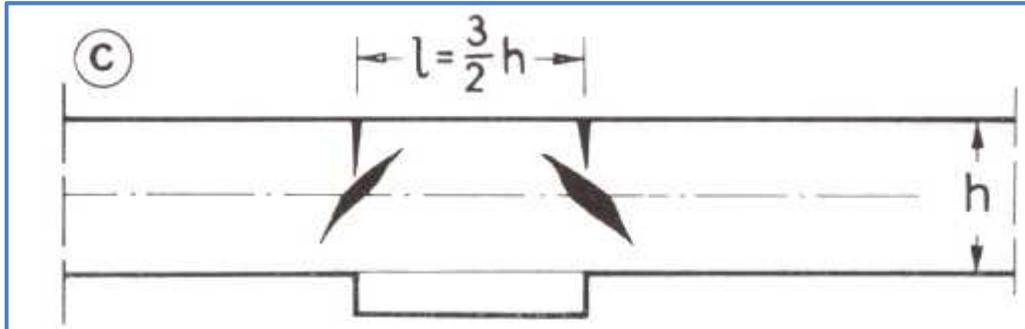


Fig.8 : Quadro fessurativo solido murario – Cedimenti intermedi medi

Se le condizioni precedenti rimangono validi, nel caso dei cedimenti lunghi è notevole il rapporto fra *l* ed *h*, risulta importante esaminare anche la tensione di trazione intradossale nella mezzeria ove è pari a meta luce di quella che si stabilisce all'estradosso dell'appoggio. Abbiamo quindi in mezzeria un valore della tensione normale massima :

$$\sigma = \frac{\gamma \cdot l^2}{4 \cdot h}$$

che confrontata con la tensione tangenziale massima di incastro  $\tau_{MAX} = \frac{3}{4} \cdot \gamma \cdot l$  consente di stabilire che in mezzeria si ha :

$$\sigma > \tau \text{ quando } l > 3 \cdot h$$

In questo caso le fessurazioni sono tutte a flessione ma con disposizione alternata ossia estradossale – intradossale – estradossale passando dall'incastro alla mezzeria e di nuovo all'incastro (vedi figura.9).

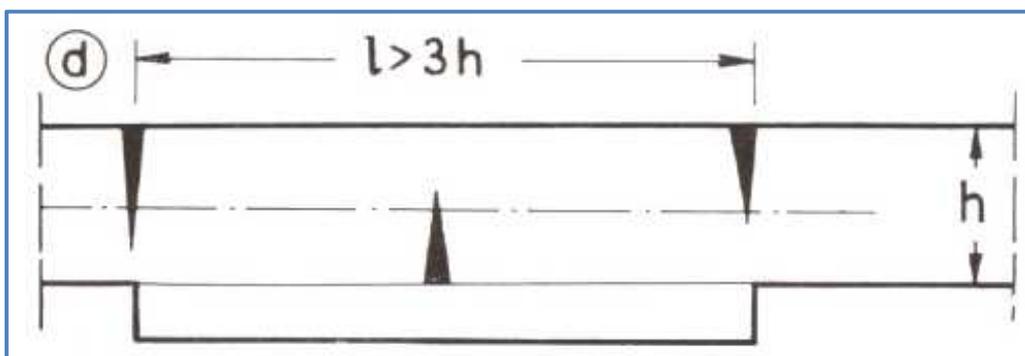


Fig.9 : Quadro fessurativo solido murario – Cedimenti intermedi lunghi

Riportando i risultati ottenuti dalla modellazione ad elementi finiti di questo schema di cedimento:

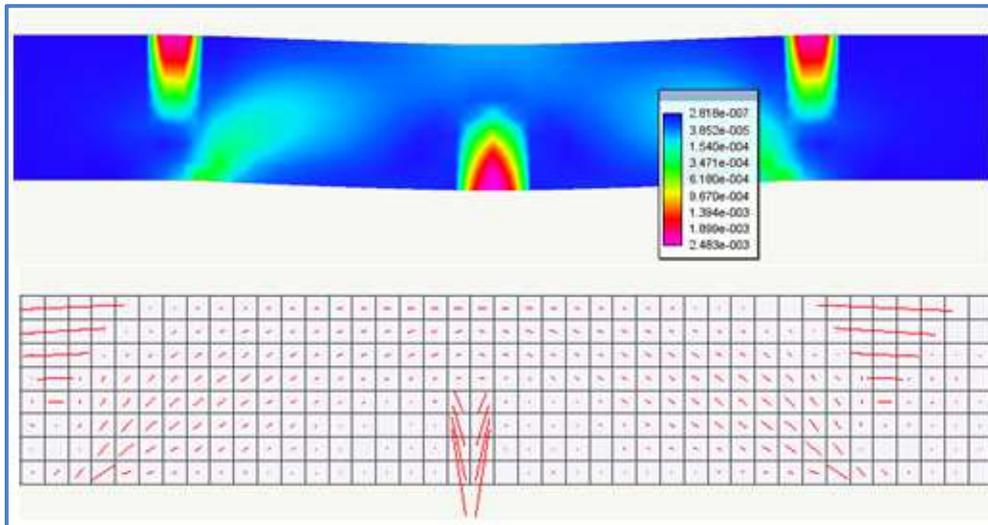


Fig.9a : Stato di Fessurazione con direzioni principali di tensione modello NO-TENSION  
Cedimenti intermedi lunghi - Riproduzione dello stato fessurativo operato tramite modellazione ad elementi finiti non lineari con l'ambiente di calcolo non lineare Earthquake Engineering della suite di Nòlian All In One

**Quadri isostatici nei cedimenti intermedi (vedi figura.10):** Nel caso di cedimento intermedio si individuano quattro famiglie fessurative:

- **TIPO  $\alpha$ :** caratteristico delle regioni di trave rimaste insensibili al cedimento;
- **TIPO a:** caratteristico dei cedimenti lunghi. In quelli molto lunghi affiora anche la fessurazione d. ;
- **TIPO b:** caratteristico dei cedimenti medi;
- **TIPO c:** caratteristico dei cedimenti corti, riproduce la classica fessurazione parabolica;

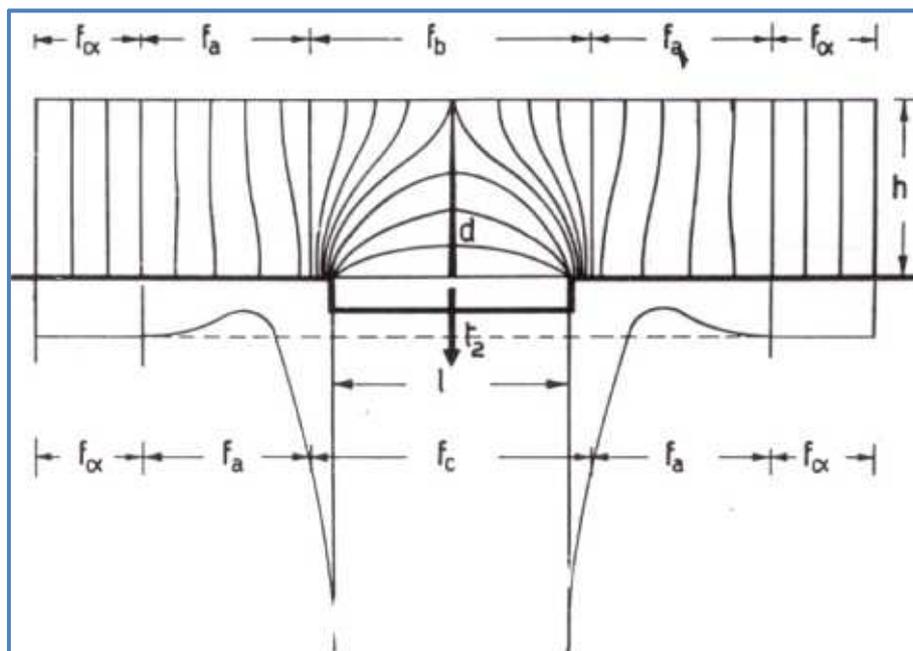
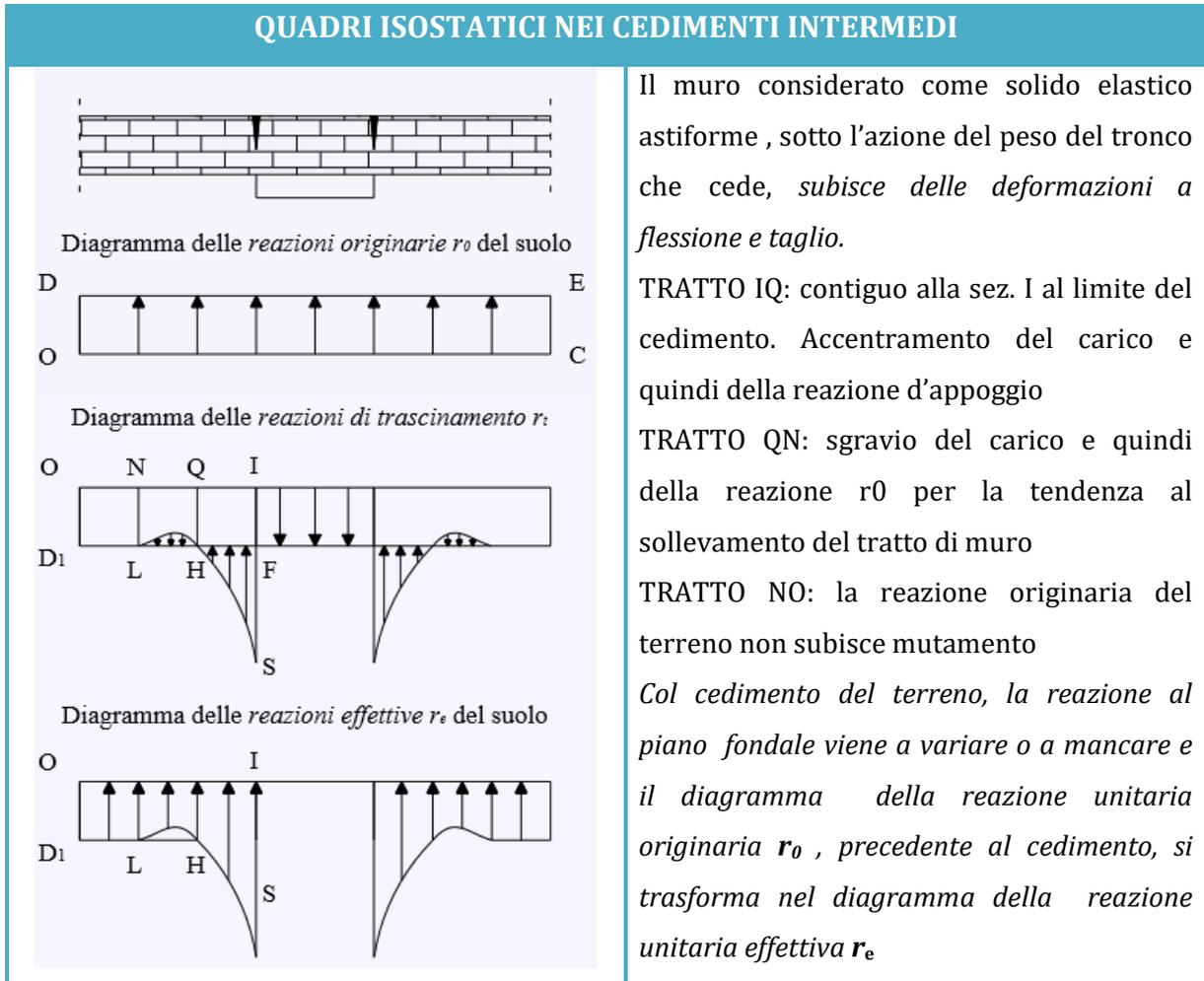


Fig.10 : Linee isostatiche – Cedimenti intermedi

Nel cedimento di muri isolati i tipi fessurativi più frequenti sono quelli **a** mentre **d** lo è per i cedimenti lunghi; **b** per i cedimenti medi; **c** per i cedimenti corti. Il reciproco impedimento alla rotazione, facendo prevalere il taglio nella costituzione della fessurazione iniziale del materiale, rende frequente il tipo **fessurativo b anche nei cedimenti lunghi**.



La fessurazione parabolica è dovuta al dissesto per traslazione verticale intermedia. I rami si trovano molto prossimi alla loro unificazione in una fessurazione parabolica di tipo **c**. In figura 11 si nota anche una fessurazione di tipo **a**.

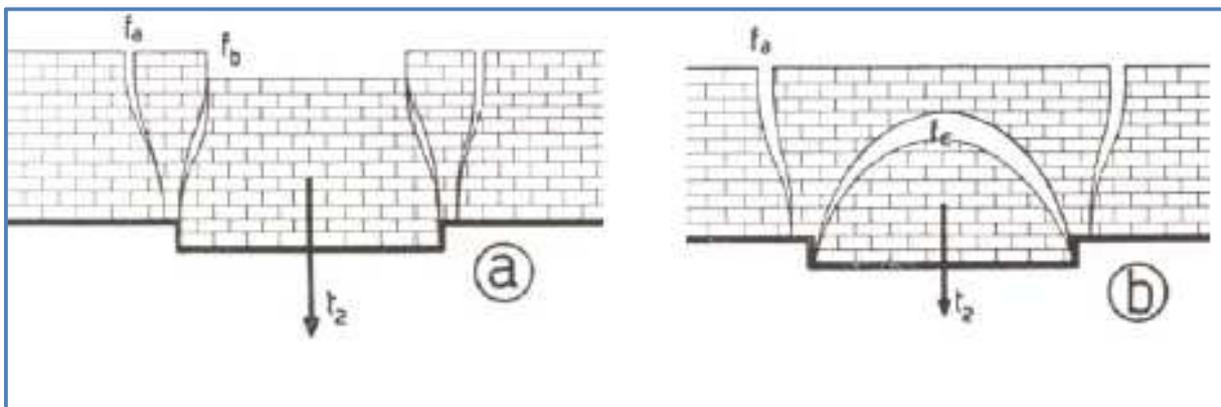


Fig.11 : Fessurazione parabolica- Cedimenti intermedi

## Cedimenti terminali

Con analogo procedimento del caso precedente, nel caso dei cedimenti terminali la trave puo essere vista come una mensola incastrata nella sezione limite del cedimento e libera all'estremo finale per una lunghezza  $l$ . Nelle sezioni di incastro si stabiliscono le tensioni massime rispettivamente normali e tangenziali pari a:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max} \cdot h}{2 \cdot I} \quad \tau_{max} = \frac{T_{max}}{\frac{2}{3} A}$$

con le sollecitazioni flettenti e taglianti in funzione dello schema statico pari a:

$$M_{MAX} = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot h \cdot a \cdot l^2 \quad T_{MAX} = \gamma \cdot a \cdot h \cdot l$$

quindi abbiamo:

$$\sigma_{MAX} = 3 \cdot \frac{\gamma \cdot l^2}{h} \quad \tau_{MAX} = \frac{3}{2} \cdot \gamma \cdot l$$

Ne deriva che le tensioni normali sono maggiori, uguali o minori di quelle tangenziali se l'ampiezza della zona soggetta a cedimento è maggiore, uguale o minore della semi-altezza del solido murario

$$\sigma_{max} \gtrless \tau_{max} \rightarrow l \gtrless \frac{1}{2} h$$

Classificheremo i cedimenti terminali in **lunghi, medi e corti**, rispettivamente se la **lunghezza del cedimento è maggiore, uguale o minore** di metà **altezza del solido murario**.

Nel **caso a** di **cedimenti terminali lunghi** essendo il valore della tensione massima normale maggiore di quella tangenziale  $\sigma_{max} > \tau_{max}$  si formerà una frattura iniziale nella sezione di incastro al limite del cedimento di tipo verticale estradossale con ampiezza massima in sommità e decrescente con la profondità (vedi figura.12).

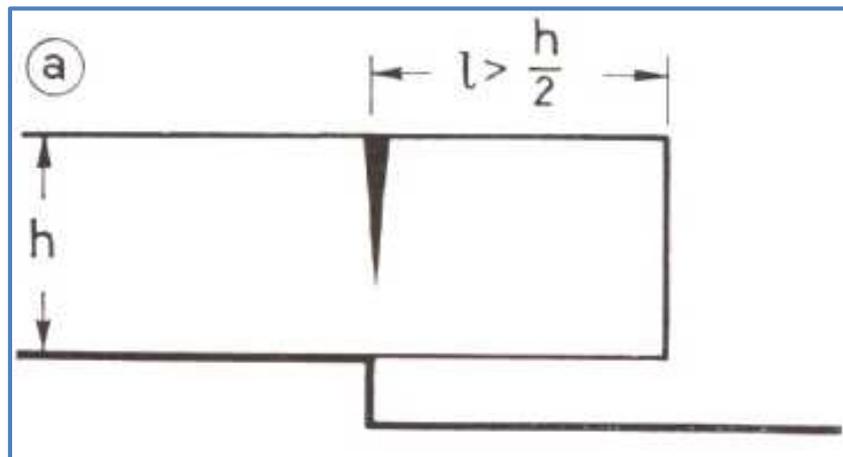
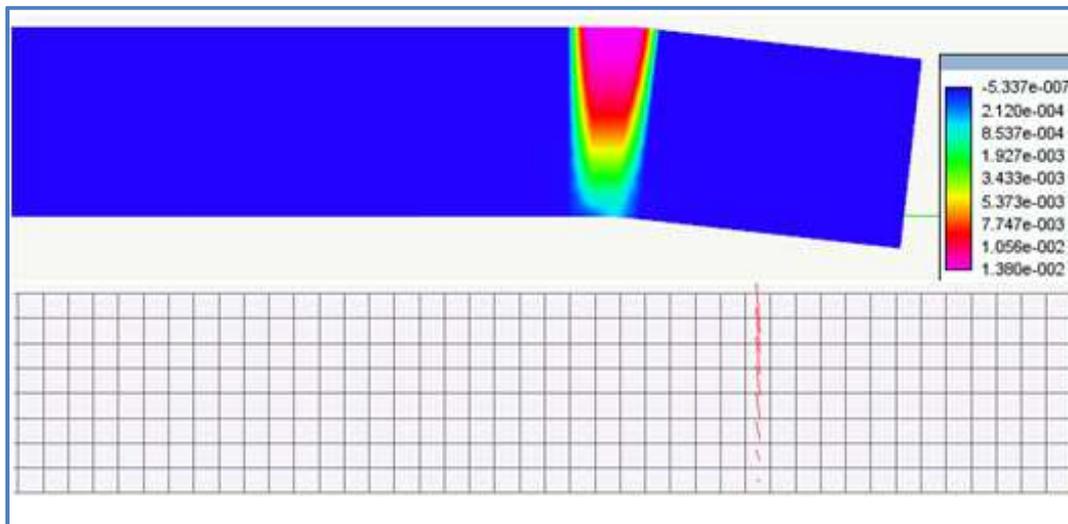


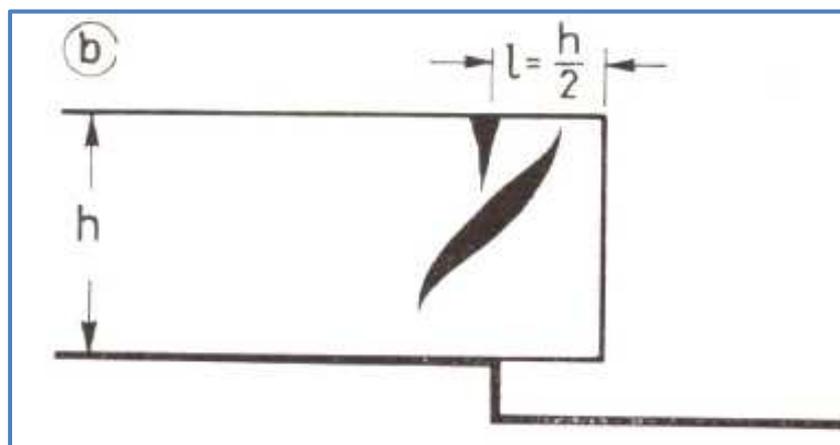
Fig.12 : Quadro fessurativo solido murario – Cedimenti terminali lunghi

Riportando i risultati ottenuti dalla modellazione ad elementi finiti di questo schema di cedimento:



*Fig.12a : Stato di Fessurazione con direzioni principali di tensione modello NO-TENSION  
Cedimenti terminali lunghi - Riproduzione dello stato fessurativo operato tramite modellazione ad elementi finiti non lineari con l'ambiente di calcolo non lineare Earthquake Engineering della suite di Nòlian All In One*

Nel **caso b** di **cedimenti terminali medi** essendo il valore della tensione massima normale all'incastro uguale a quella tangenziale  $\sigma_{max} = \tau_{max}$ , le fratture iniziali a flessione e taglio si formano contemporaneamente con andamento simile ai casi a e c ma con ampiezze ed estensioni diverse (vedi figura.13).



*Fig.13 : Quadro fessurativo solido murario - Cedimenti terminali medi*

Nel **caso c** di **cedimenti terminali corti** essendo il valore della tensione massima normale massima minore di quella tangenziale  $\sigma_{max} < \tau_{max}$ , si forma una frattura iniziale nella sezione terminale di incastro al limite di cedimento inclinata di 45° dalla parte della mezzeria ed è ubicata a metà altezza del solido murario (vedi figura.14).

Riportando i risultati ottenuti dalla modellazione ad elementi finiti di questo schema di cedimento:

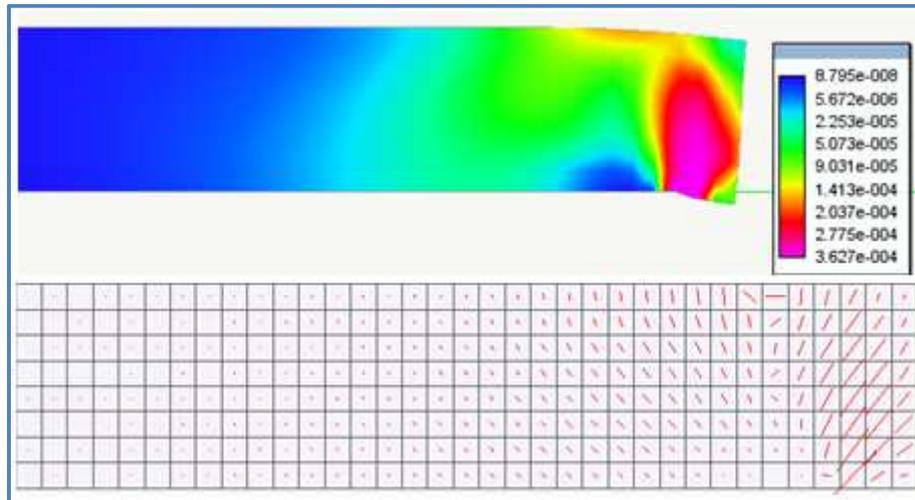


Fig.14a : Stato di Fessurazione con direzioni principali di tensione modello NO-TENSION

Cedimenti terminali corti - Riproduzione dello stato fessurativo operato tramite modellazione ad elementi finiti non lineari con l'ambiente di calcolo non lineare Earthquake Engineering della suite di Nòlian All In One

Dall'analisi dei **quadri isostatici nei cedimenti terminali** si individuano quattro famiglie fessurative (vedi figura.15):

- **tipo  $\alpha$** : caratteristica fessurativa del tronco di muro insensibile al cedimento;
- **tipo  $a$** : investe il tronco in posto fino alla sezione al limite del cedimento, ha la conformazione a gola rovescia inclinata dalla parte della sede in posto. *Caratteristico dei cedimenti terminali lunghi.*
- **tipo  $b$** : investe il tronco del muro in sede di cedimento e il breve tronco contiguo in posto, è caratterizzato dalla forma a gola rovescia estesa fino al ciglio superiore del muro con inclinazione verso il cedimento. *Caratteristico dei cedimenti terminali medi.*
- **tipo  $c$** : investe la parte in sede di cedimento, è caratterizzato da una forma semiparabolica e si estende fino al ciglio inferiore in sede di cedimento. *Caratteristico dei cedimenti terminali corti.*

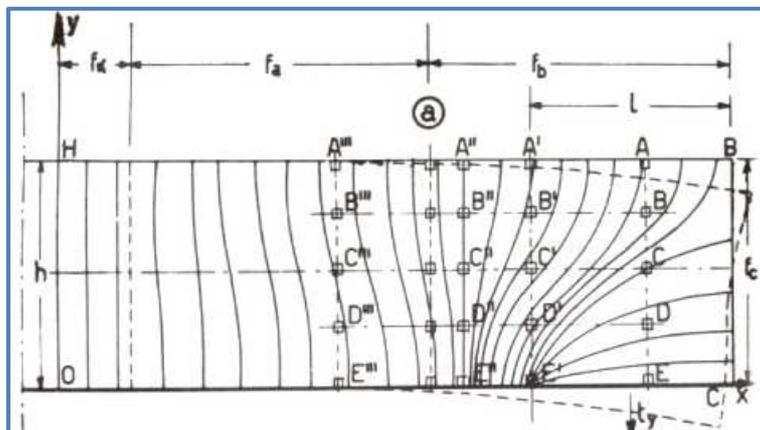
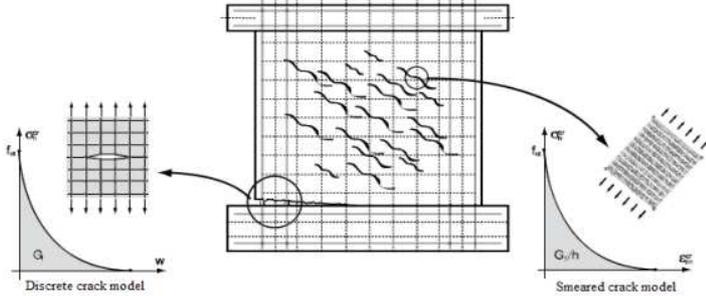


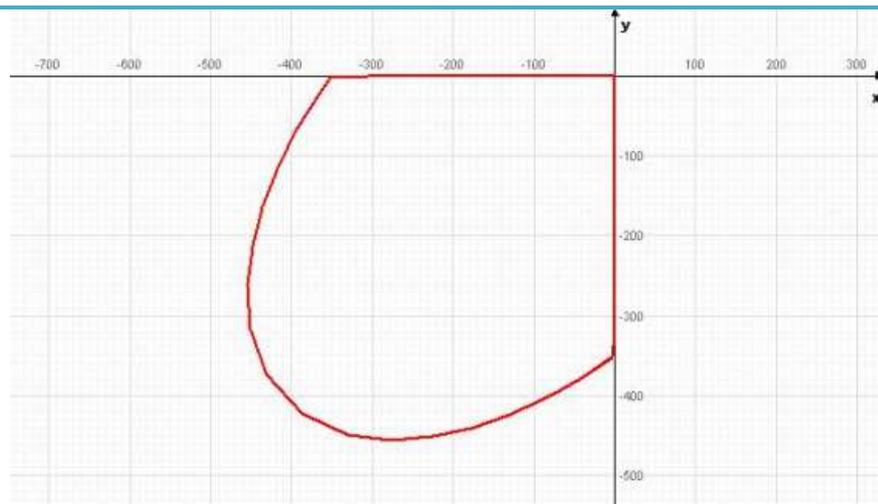
Fig.15: Linee isostatiche - Cedimenti intermedi

## 5. ELEMENTI FINITI NON LINEARI DELL'AMBIENTE EE DI NOLIAN ALL IN ONE

### ELEMENTO TIPO NO-TENSION A FESSURAZIONE DIFFUSA (TSC)

<b>NO TENSION - SMEARED CRACKED</b>	
<b>DESCRIZIONE</b>	<p>Si tratta di un materiale che può essere impiegato negli elementi Degenerate Shell o in elementi a 4 nodi. Nel primo caso potrà costituire i layer dell'elemento, 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.</p> 
<b>COMPORTAMENTO</b>	<p>Questo materiale, per le sollecitazioni a trazione, usa un modello "smeared crack", il quale evita i problemi di dipendenza dalla mesh dei metodi "concentrad crack".</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 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.</li> <li>• Qualora vi sia una doppia fessura ortogonale, la resistenza nel punto si annulla. Superata le tensione massima di trazione, si innesca un meccanismo di hardening in modo che la resistenza diminuisca rapidamente ma non immediatamente.</li> <li>• 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.</li> <li>• Per lo stato di compressione si impiega un criterio elasto-plastico di tipo isotropo o anisotropo</li> <li>• Nel caso del comportamento isotropo il criterio plastico in compressione è formulato tramite i noti invarianti <math>I_1</math> e <math>J_2</math> come segue:             <math display="block">\beta 3 J_2 + \alpha I_1 = \sigma_0</math> </li> <li>• I Parametri <math>\alpha</math> e <math>\beta</math> 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.</li> <li>• Il comportamento del materiale avviene secondo una legge costitutiva parabolica che raggiunge il massimo al raggiungimento della deformazione massima assegnata.</li> </ul>

## DOMINIO BIASSIALE

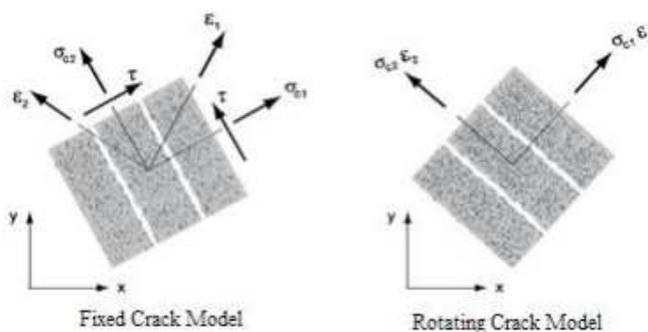


## TIPO DI FESSURAZIONE

Il modello "Total Strain Crack" (TSC) è di tipo distribuito, ortogonale e si distingue in "Fixed" e "Rotating";

In entrambe i modelli, la prima fessura è calcolata nei punti d'integrazione ed inizia sempre solidale alle direzioni delle deformazioni principali (1 e 2);

Il modello tratta le proprietà del materiale prima della fessurazione, come isotrope, e successivamente come ortotrope.



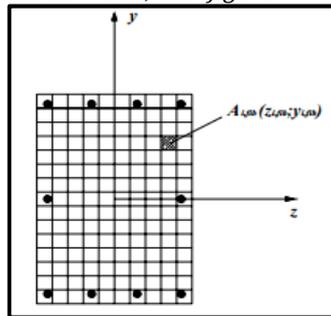
- Col modello a fessurazione "Fixed" si assume che una volta definite, le direzioni della fessura iniziali rimangano invariate. Per sua concezione, questo modello considera lo sviluppo delle fessure precedenti nel calcolo di quelle successive riflettendo più realisticamente le caratteristiche fisiche del fenomeno
- Col modello a fessurazione "Rotating", invece, le direzioni delle fessure si assumono in continua rotazione a seconda delle variazioni degli assi delle deformazioni principali.
- Questa assunzione implica allora l'esistenza di sole tensioni normali calcolate sulle superfici della fessura. Lo sviluppo delle fessure però può avvenire solo secondo le nuove direzioni delle deformazioni principali trascurando quelle sviluppate precedentemente.

## MODELLO DI TRAVE NON LINEARE A PLASTICITA' DIFFUSA IN GRANDI SPOSTAMENTI con formulazione (Force Based -Corotazionale)

### MODELLO DI TRAVE NON LINEARE A PLASTICITA' DIFFUSA IN GRANDI SPOSTAMENTI

#### DESCRIZIONE

*Nell'approccio di un modello a plasticità diffusa ogni sezione viene suddivisa in un numero discreto di parti, chiamate appunto fibre e lo stato tenso-deformativo degli elementi si ottiene attraverso l'integrazione della risposta non-lineare, monoassiale delle singole fibre in cui la sezione è stata discretizzata, vedi figura.*



*Se il numero delle fibre è sufficientemente elevato, la distribuzione delle non linearità meccaniche dovute ai materiali sulla superficie della sezione risulta accuratamente modellata, anche in campo fortemente inelastico, a differenza di un modello a plasticità concentrata.*

#### APPROCCI

*Esistono due possibili versioni alternative per una modellazione "a fibre" degli elementi finiti, basate su una formulazione in rigidità o in flessibilità. La prima rappresenta la metodologia più comunemente utilizzata, in cui il campo delle deformazioni sull'elemento viene ottenuto dagli spostamenti dei nodi di estremità attraverso opportune funzioni interpolanti.*

#### DISPLACEMENT BASED ELEMENT

*In questo tipo di elemento finito, che in letteratura viene chiamato Displacement-based element, la compatibilità delle deformazioni è dunque assicurata, mentre l'equilibrio delle forze lungo di esso è soddisfatto soltanto quando viene discretizzato in un numero adeguato di elementi finiti. La limitazione fondamentale di un tale approccio è legata alla scarsa precisione nel descrivere comportamenti altamente non-lineari a causa dell'inadeguatezza nella rappresentazione dell'andamento delle curvature lungo l'elemento.*

#### FORCE BASED ELEMENT

*Nella formulazione in flessibilità, le funzioni di forma vengono utilizzate per descrivere in modo esatto l'andamento delle sollecitazioni sull'elemento in base alle forze nodali e le funzioni, che riproducono il campo di spostamenti, si modificano nel corso delle analisi in base al diffondersi delle deformazioni inelastiche sulla sua lunghezza. Vale a dire che, mentre l'equilibrio delle forze è sempre soddisfatto, la compatibilità delle deformazioni viene soddisfatta per via integrale. Questo tipo di formulazione dell'elemento finito, pur richiedendo un aumento del costo computazionale, assicura, anche nel caso di comportamenti fortemente inelastici, previsioni accurate utilizzando un ridotto numero di elementi finiti.*

#### LOCALIZZAZIONE

*Nel caso si adottano materiali con comportamento degradante dopo il picco di resistenza può dar luogo a risultati estremamente sensibili alla discretizzazione adottata ed in particolare al numero di punti di integrazione disposti sugli elementi. E' bene precisare che il fenomeno della "localizzazione delle deformazioni" si manifesta sia sugli elementi formulati "in rigidità" che su quelli "in flessibilità" anche se i maggiori effetti sembrano trovarsi in questi ultimi. Da quanto detto si comprende l'importanza di un'oculata scelta della mesh, la quale deve essere sufficientemente fitta per descrivere i comportamenti fortemente non-lineari, ma neanche troppo per evitare il fenomeno della localizzazione delle deformazioni.*

La modellazione delle non-linearità sugli elementi finiti è di tipo distribuito e discende dunque da quella sezionale per mezzo delle fibre, vedi figura precedente attraverso una classica formulazione in rigidità. Poiché gli elementi adottati sono di tipo trave (beam-column), forze e deformazioni sezionali sono descritte dai vettori:

$$\underline{s}(x) = \{N(x) \ M(x)\}^T$$

$$\underline{e}(x) = \{\varepsilon(x) \ \phi(x)\}^T$$

Si è già detto che, nel caso di formulazione in rigidità le funzioni di forma, indicate con  $N_U(x)$ , assicurano la compatibilità delle deformazioni sezionali  $e(x)$  e degli spostamenti nodali  $U$  attraverso la relazione:

$$\underline{e}(x) = \tilde{N}_U(x) \cdot \underline{U}$$

Un problema non-lineare richiede una legge costitutiva a livello delle sezioni di tipo incrementale, linearizzata dalla seguente:

$$\underline{\Delta s}(x) = \tilde{k}(x) \cdot \underline{\Delta e}(x)$$

dove  $k(x)$  ovviamente, rappresenta la matrice di rigidità sezionale. Globalmente, per ogni elemento finito, indicando con  $Q$  il vettore delle forze nodali e sostituendo si può ricavare la relazione:

$$\tilde{K} \cdot \underline{\Delta U} = \underline{\Delta Q}$$

in cui con  $K$  si è indicata la matrice di rigidità dell'intero elemento, che può scriversi come:

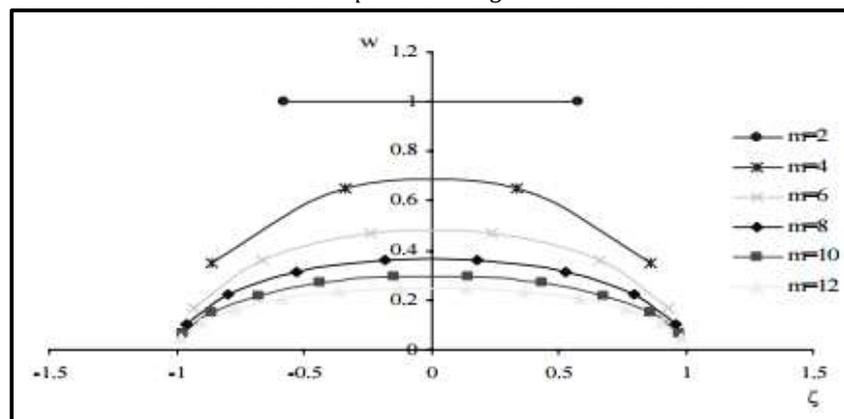
$$\tilde{K} = \int_0^L \tilde{N}_U^T(x) \cdot \tilde{k}(x) \cdot \tilde{N}_U \cdot dx$$

## FORMULAZIONE

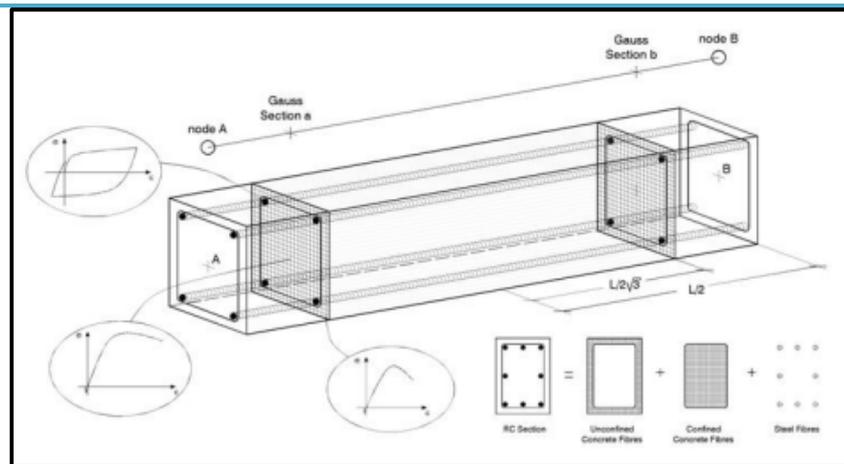
La valutazione dell'integrale precedente è valutata numericamente attraverso lo schema di Gauss, in base alla relazione

$$\tilde{K} = \sum_{IP=1}^{NIP} w_{IP} \cdot L \cdot \tilde{N}_U^T(x_{IP}) \cdot \tilde{k}(x_{IP}) \cdot \tilde{N}_U(x_{IP})$$

dove  $w_{IP}$  ed  $x_{IP}$  indicano rispettivamente il peso e la posizione del punto di integrazione  $IP$ , mentre  $NIP$  indica il numero di tali punti di integrazione sull'elemento.



Come si vede, in questo metodo di quadratura, lo stato dell'intero elemento è derivato dalla somma pesata dello stato sezionale in corrispondenza dei punti di integrazione disposti lungo l'elemento. In figura sono riportati i fattori di peso e di posizione al variare del numero dei punti di integrazione per lo schema di Gauss. Si può osservare che le sezioni di estremità non rappresentano punti di integrazione e che a quelli prossimi ai margini dell'elemento sono assegnati pesi minori. Si può osservare che le sezioni di estremità non rappresentano punti di integrazione e che a quelli prossimi ai margini dell'elemento sono assegnati pesi minori.



È il caso di osservare che in alcuni software gli spostamenti vengono approssimati con funzioni di forma di tipo cubico, come descritto da Izzudin [1991], vale a dire attraverso polinomi di Hermite di terzo grado. Ciò significa che l'andamento della curvatura può essere al massimo lineare e che, quindi, per ritenere la modellazione della risposta non-lineare sufficientemente accurata e completa, gli elementi utilizzati devono avere una lunghezza limitata, vincolando l'utente all'impiego di più elementi finiti per ogni trave o pilastro. In questo modo è possibile rifittire la discretizzazione in corrispondenza dei punti in cui si concentreranno le deformazioni inelastiche, garantendo un grado di accuratezza maggiore.

Per quanto riguarda le non-linearità di tipo geometrico, vengono considerate sia quelle derivanti da effetti locali (comportamento trave-colonna), che quelle prodotte globalmente dai grandi spostamenti, attraverso l'utilizzo di una formulazione corrotazionale, nella quale, gli spostamenti locali e le forze interne all'elemento sono riferite ad un sistema mobile di corde.

## 6. CASI DI STUDIO STRUTTURE IN MURATURA

Nel presente capitolo vengono analizzati alcuni schemi piani tratti dal noto testo sui dissesti strutturali Sisto Mastrodicasa [1]. I casi considerati esaminano alcuni tra i quadri fessurativi più ricorrenti e riportano gli scenari di danno al confronto con quelli ottenuti attraverso la modellazione agli elementi finiti non lineare tipo NO-TENSION proposta con riferimento a un profilo di cedimento assegnato, crescente proporzionalmente. Gli esempi trattati sono:

- CASO 1: Parete multipiano a quattro elevazioni con cedimento terminale;
- CASO 2: Parete multipiano a quattro elevazioni con cedimento intermedio;
- CASO 3: Parete monopiano con cedimento verticale del maschio di bordo;
- CASO 4: Parete monopiano con cedimento/traslazione orizzontale del maschio di bordo;
- CASO 5: Parete monopiano con cedimento per rocking del maschio di bordo;
- CASO 6: Parete monopiano cieca con cedimento intermedio e distacco parabolico;

Scopo delle analisi effettuate è quella di confrontare qualitativamente la risposta della parete in relazione allo stato di fessurazione ed al quadro delle isostatiche o direzioni principali con quello osservato realmente. Dall'esito possiamo capire se l'elemento finito non lineare riesce a cogliere gli aspetti fondamentali della risposta e quindi efficace per lo studio di casi generali.

### CASO 1: Parete multipiano con cedimento terminale

Nei casi 1 e 2 esaminati, sono stati assunti i parametri caratteristici dei materiali riportati in tabella 1 :

**TAB.1: CARATTERISTICHE FISICO MECCANICHE DELLA MURATURA**

<b>E</b> [MPa]	<b>G</b> [MPa]	<b>fc</b> [kg/cm <sup>2</sup> ]	<b>τ<sub>0</sub></b> [kg/cm <sup>2</sup> ]	<b>W</b> [KN/m <sup>3</sup> ]
<b>1200</b>	<b>400</b>	<b>24</b>	<b>0.75</b>	<b>18</b>

I carichi di linea distribuiti al livello di piano i cui valori sono indicati in tabella 2.

**TAB.2: CARICHI DI LINEA A LIVELLO DI IMPALCATO**

<b>Livelli intermedi</b>	<b>q =800 [kg/m]</b>
<b>Copertura</b>	<b>q =600 [kg/m]</b>

Il CASO 1, riguarda lo schema piano di un edificio a quattro elevazioni fuori terra soggetto ad un cedimento periferico ed uniforme. In figura 16 è riportato il layout della facciata dell'edificio insieme al profilo del cedimento imposto e il quadro fessurativo atteso.

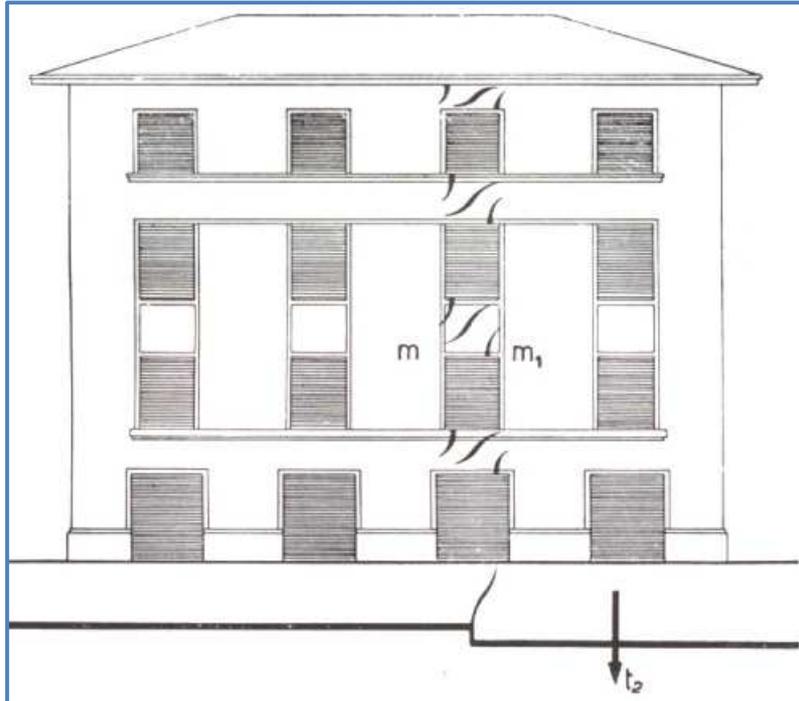


Figura 16: quadro fessurativo tipico di un cedimento periferico ed uniforme in edificio in muratura con aperture allineate

Riportando i risultati ottenuti dalla modellazione ad elementi finiti di questo schema di cedimento:

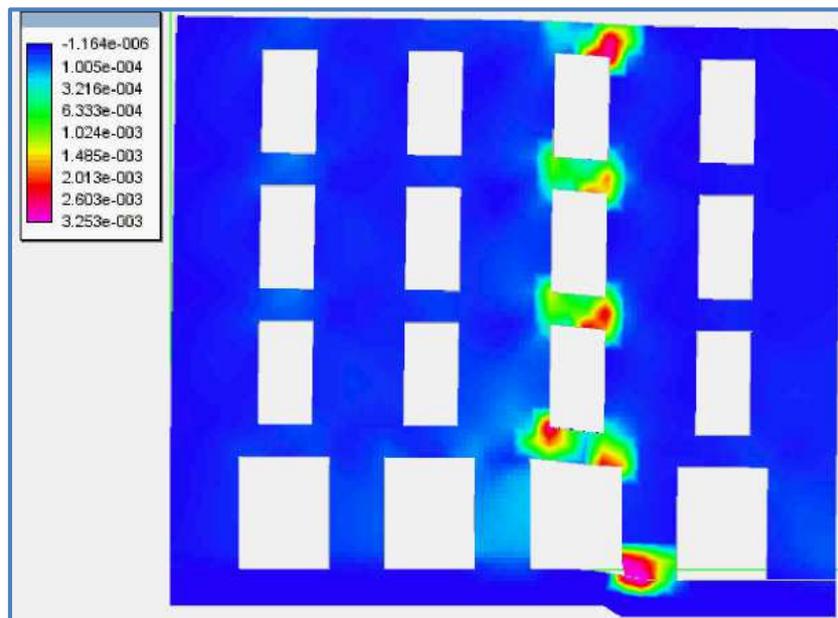


Figura 17: scenario di danno ottenuto da una modellazione ad elementi finiti non lineari No-Tension con l'ambiente di calcolo non lineare Earthquake Engineering della suite di Nòlian All In One

In figura 17 si riporta lo scenario di danno ottenuto dalla modellazione FEM. Si può osservare come la risposta del modello numerico riesce a cogliere **il danneggiamento nelle fasce di piano per fessurazione diagonale e flessionale** in assoluta coerenza con i quadri fessurativi attesi.

## CASO 2: Parete multipiano con cedimento intermedio

Il secondo esempio CASO 2 considerato è relativo alla stessa parete analizzata ma soggetta ad un cedimento intermedio uniforme il cui quadro fessurativo atteso è riportato in figura 18.

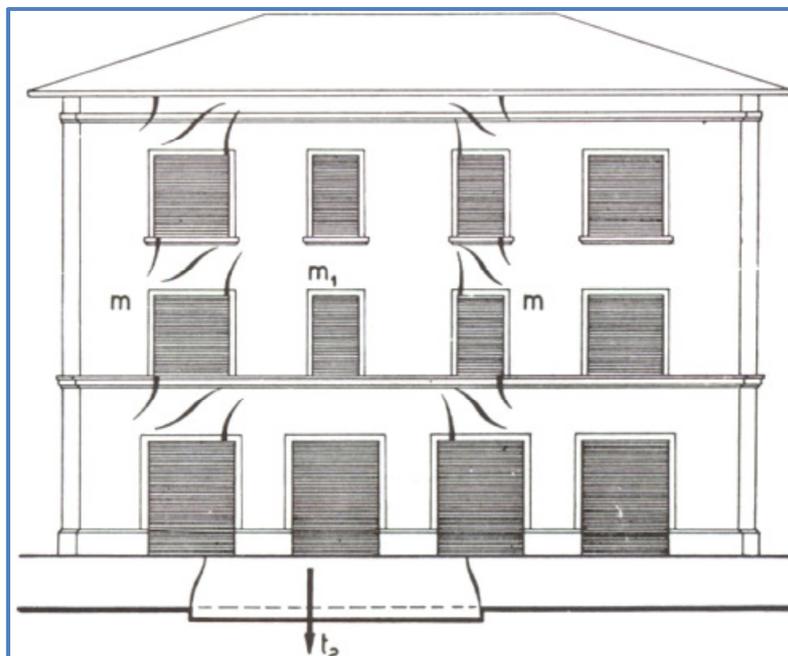


Figura 18: Quadro fessurativo tipico di un cedimento intermedio ed uniforme in edificio in muratura con aperture allineate.

Riportando i risultati ottenuti dalla modellazione ad elementi finiti di questo schema di cedimento:

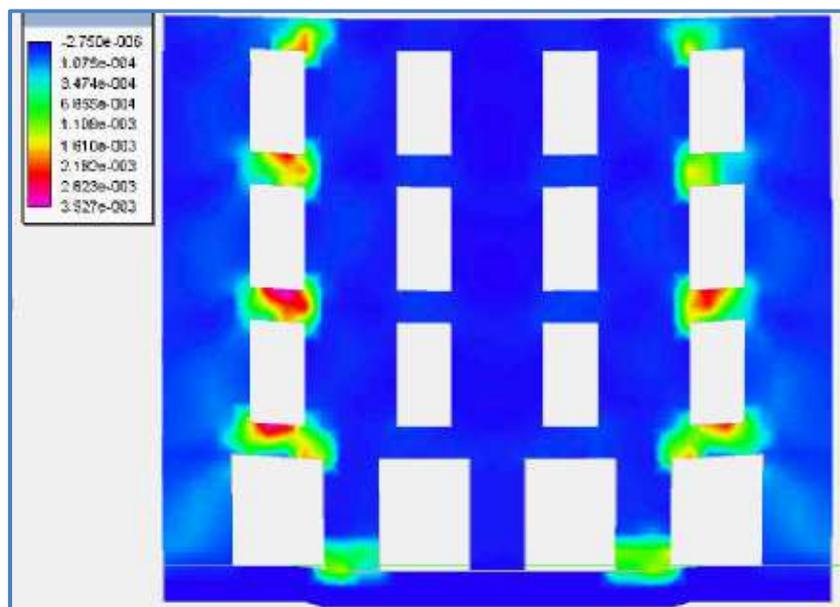


Figura 19: scenario di danno ottenuto da una modellazione ad elementi finiti non lineari No-Tension con l'ambiente di calcolo non lineare Earthquake Engineering della suite di Nòlian All In One

In figura 19 è riportato lo scenario di danno ottenuto dalla modellazione FEM, anche in questo caso **il modello numerico restituisce una corretta previsione del quadro fessurativo atteso.**

### CASO 3: Parete monopiano con cedimento verticale del maschio di bordo;

Il caso 3 prevede su una parete monopiano il cedimento del piedritto 1 di estremità. A seguito del cedimento il maschio 1 subisce uno spostamento relativo rispetto al resto della struttura (2+3). La generica sezione A-B viene interessata da una distribuzione di tensioni tangenziali  $\tau_{xy}$  che si oppone a tale movimento relativo.

Il cerchio di Mohr evidenzia tensioni principali di trazione agenti normalmente ai piani inclinati di  $45^\circ$  rispetto al piano su cui agisce la tensione la  $\tau_{xy}$ .

La tensione principale di trazione  $\sigma_{p1}$  provoca delle fratture in un piano normale alla direzione principale  $p_1$ .

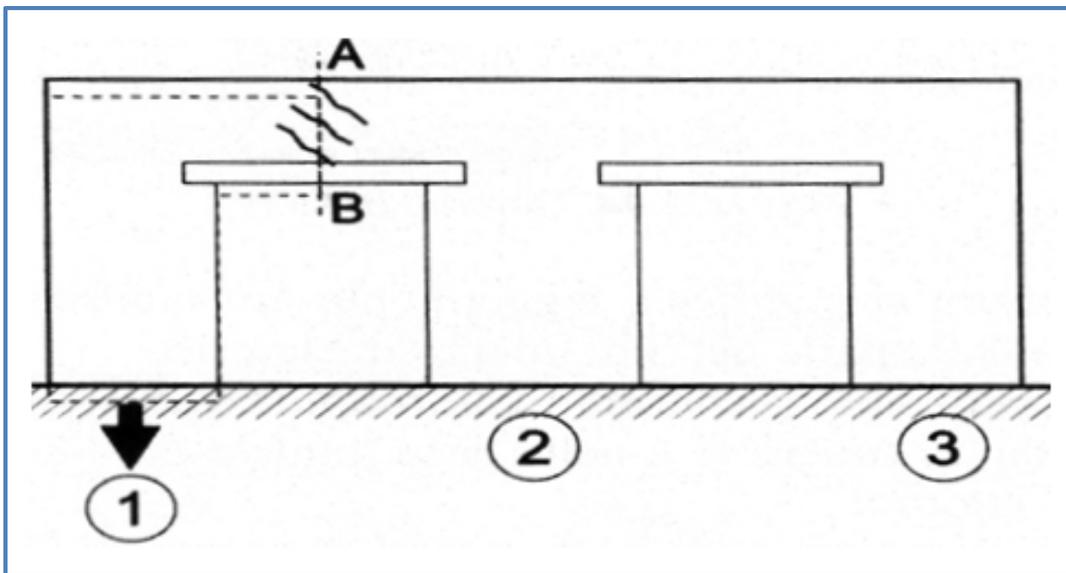


Fig 20: Meccanismo qualitativo: traslazione verticale di un maschio di bordo con lesione a taglio della fascia di piano

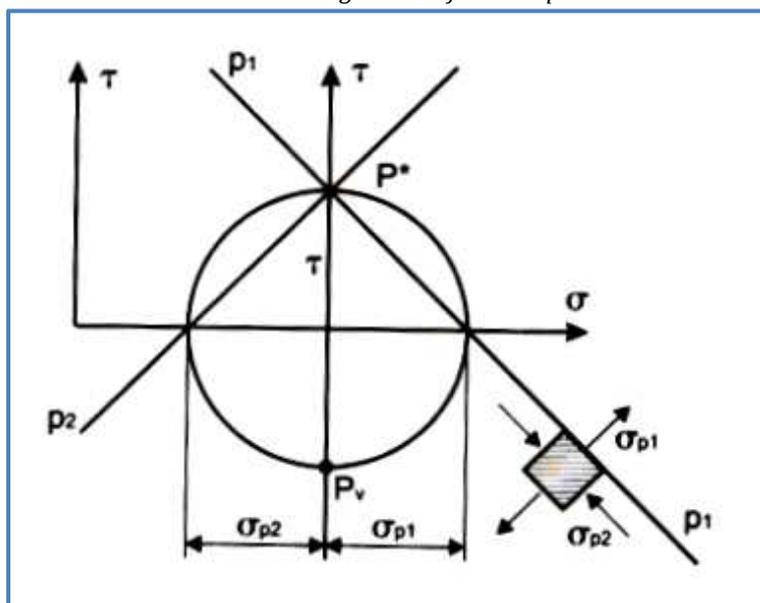


Fig 21: Cerchio di Mohr nel punto centrale della sezione A-B

Riportando i risultati ottenuti dalla modellazione ad elementi finiti di questo schema di cedimento:

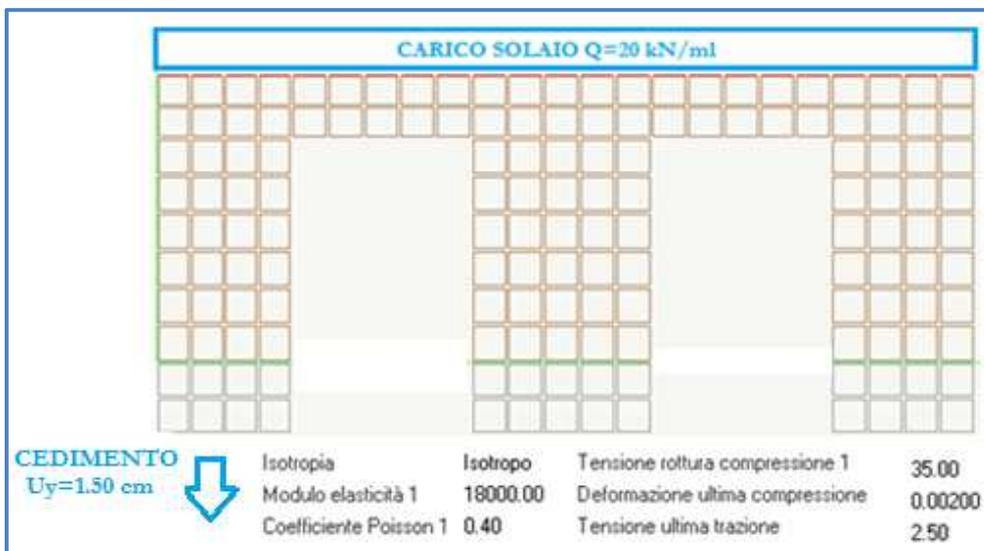


Fig 22: Modello FEM non lineare in EE con caratteristiche dei materiali ed azione di cedimento

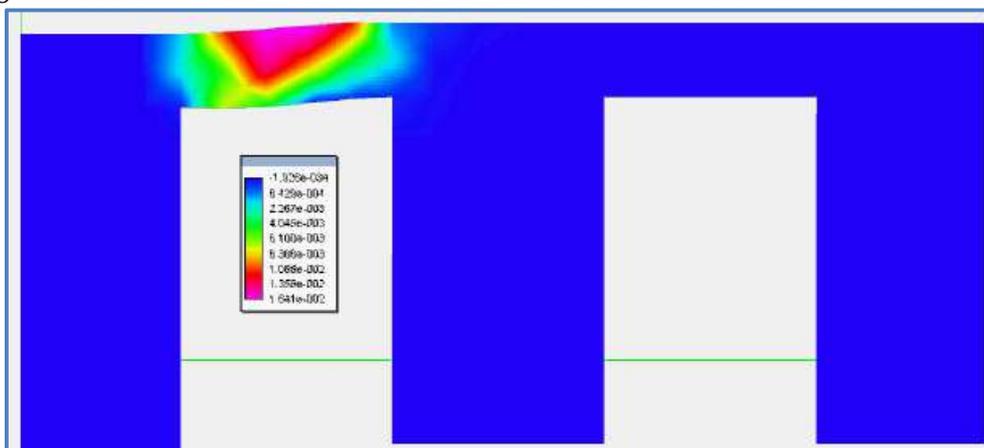


Fig 23: Modello FEM non lineare in EE con caratteristiche dei materiali ed azione di traslazione

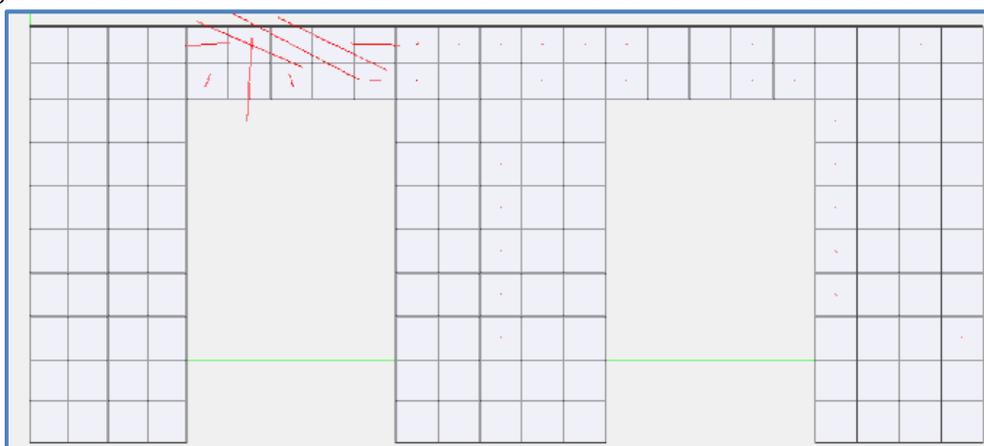


Fig 24: Modello FEM non lineare in EE con caratteristiche dei materiali ed azione di traslazione

Anche in questo caso dall'osservazione dello stato di fessurazione e direzioni principali vedi (figura 23-24) inclinate quasi a  $45^\circ$  ci permette di asserire come l'elemento finito non lineare NO-Tension tende a riprodurre il quadro di danno osservato in figura 20.

#### CASO 4: Parete monopiano con traslazione orizzontale del maschio di bordo;

Nel caso di cedimento traslativo fondale di cui alla figura.25, consegue uno spostamento relativo tra le parti 1 e 2+3 del parete muraria, creando sulla fascia muraria un stato tensionale di pura trazione orizzontale con lesioni pressoché uniformi facendo collassare la stessa e creando una separazione fisica della parete.

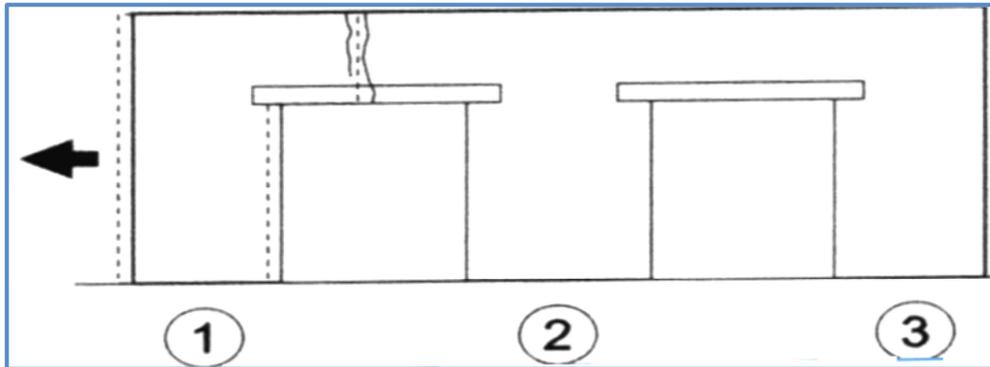


Fig.25: Meccanismo qualitativo: traslazione orizzontale del maschio di bordo con rottura a trazione della fascia si piano.

Riportando i risultati ottenuti dalla modellazione ad elementi finiti di questo schema di cedimento:

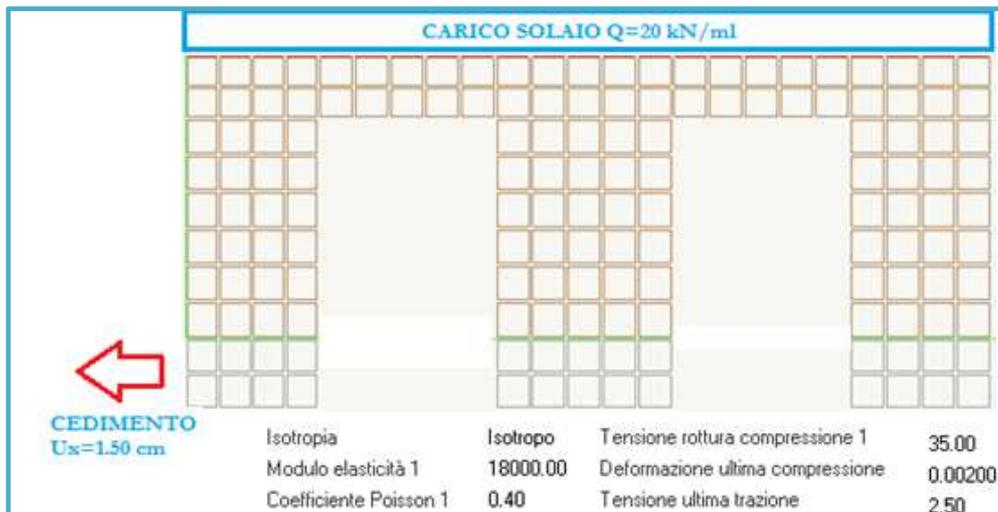


Fig 26: Modello FEM non lineare in EE con caratteristiche dei materiali ed azione di traslazione

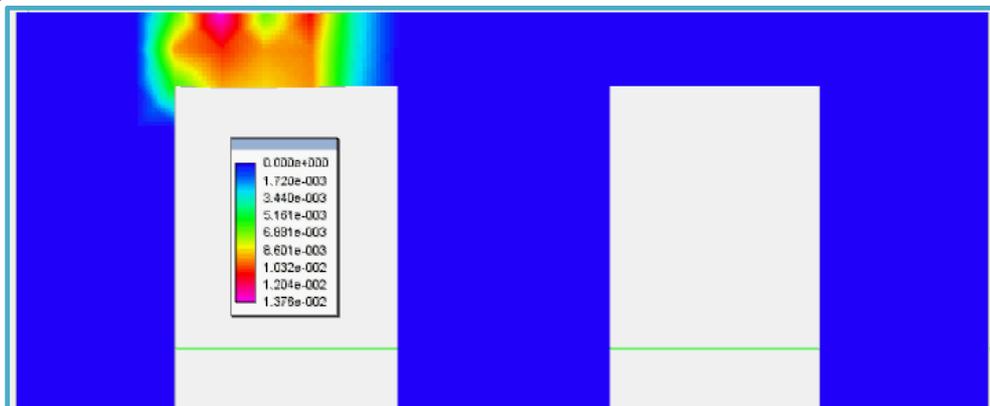
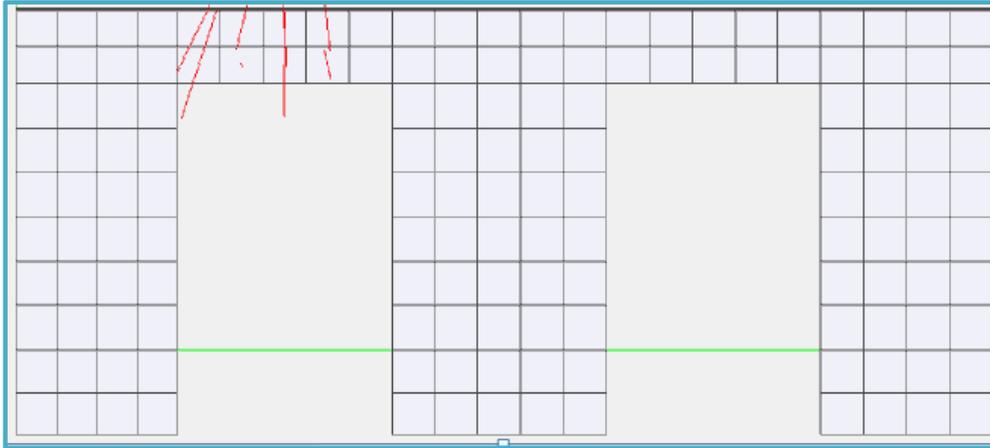


Fig 27: Modello FEM non lineare in EE con caratteristiche dei materiali ed azione di traslazione



*Fig 28: Modello FEM non lineare in EE con caratteristiche dei materiali ed azione di traslazione*

La riproduzione del semplice modello di parete monopiano, conferma dall'osservazione dello stato fessurativo e dalle isostatiche o direzioni principali pressoché verticali (vedi fig.27-28), il riscontro con quanto osservato realmente in figura 25.

## CASO 5: Parete monopiano con cedimento per rocking del maschio di bordo;

Il caso 5 prevede su una parete monopiano il cedimento del piedritto 1 di estremità ma di tipo rotazionale (vedi figura 29).

In questo caso anche per un cedimento rotazionale che puo aversi a causa di cedimenti differenziali sul maschio 1, lo stato di tensione indotto produce tensioni e lesioni di trazione che tendono a separare il maschio 1 rispetto al resto della struttura (2+3).

Rispetto al caso di cedimento verticale nel caso in oggetto si ha la rottura della fascia trazione ma con ampiezza variabile con l'altezza della stessa e assumendo valore massimo in sommità.

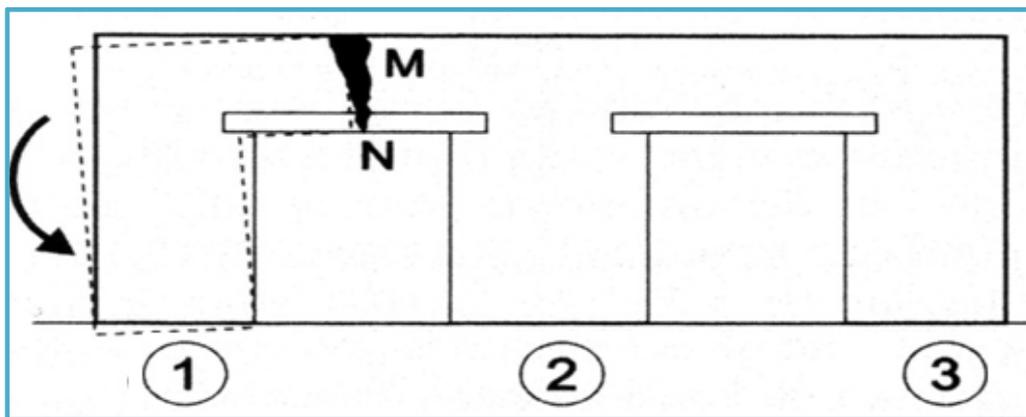


Fig.29: Meccanismo qualitativo: Rotazione del maschio di bordo con rottura a trazione della fascia di piano

Nelle figure seguenti (30-31-32), si riportano il modello numerico FEM con il cedimento rotazionale impresso, lo stato fessurativo e le direzioni principali di trazione. **Anche in questo caso il modello numerico riesce a cogliere qualitativamente la risposta della parete rispetto all'osservazione reale del fenomeno di fessurazione.**

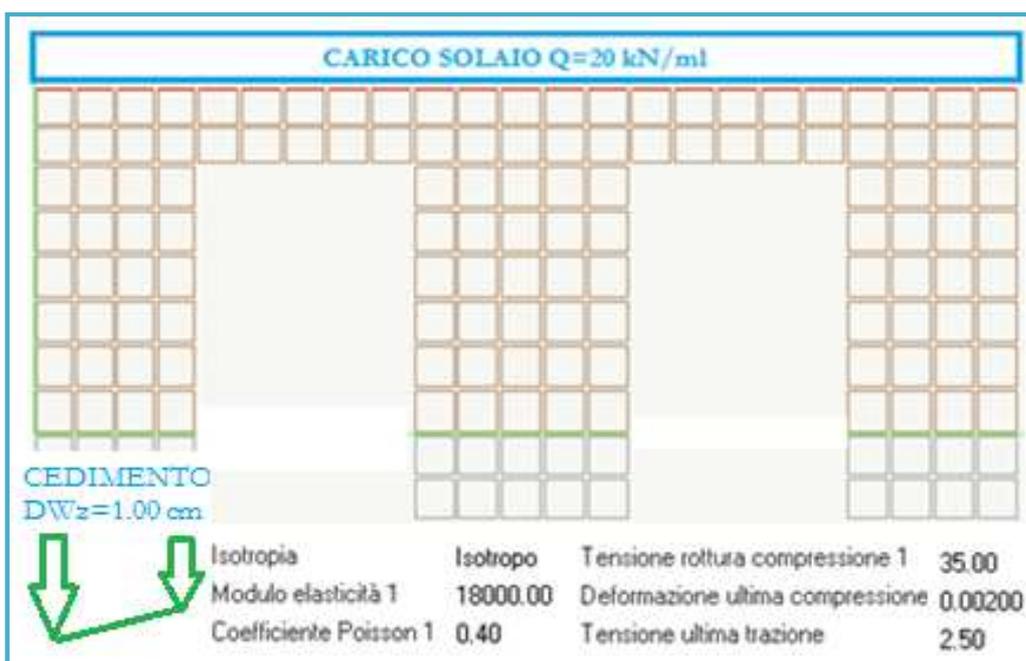
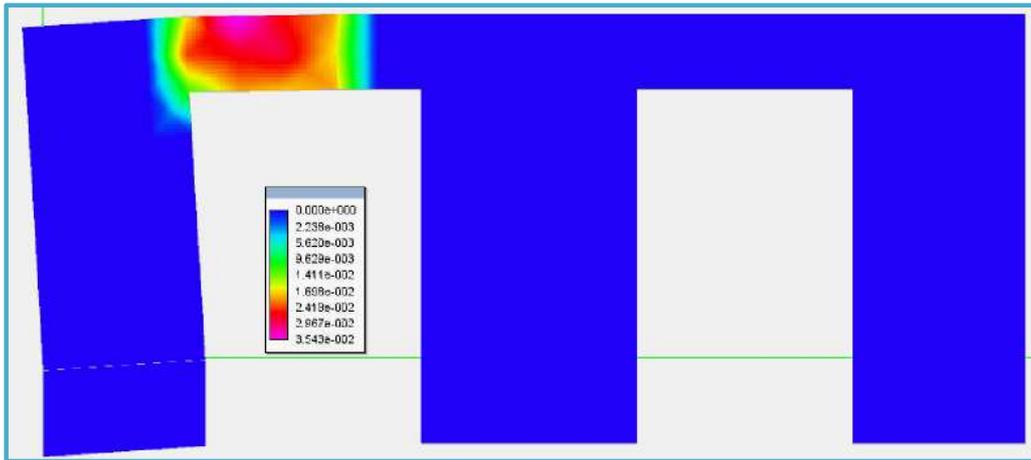
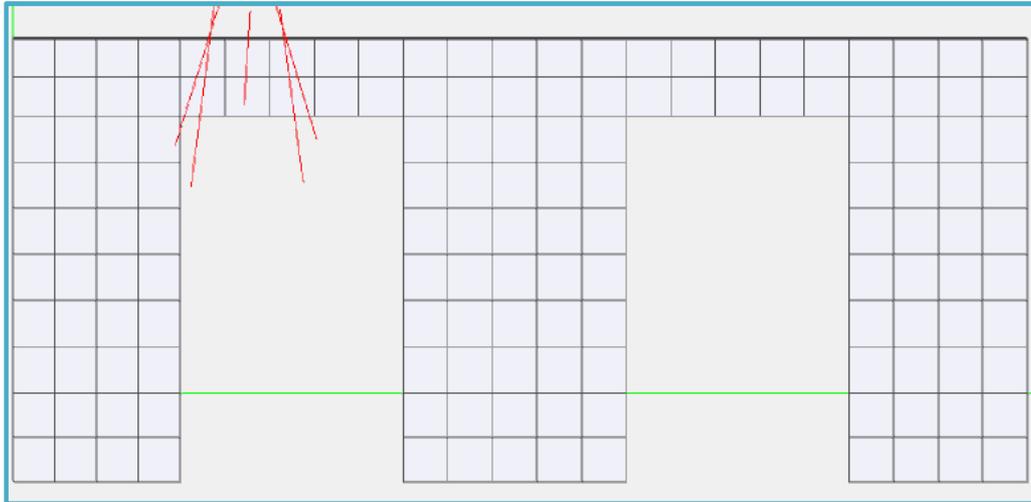


Fig 30: Modello FEM non lineare in EE con caratteristiche dei materiali ed azione di traslazione



*Fig 31: Modello FEM non lineare in EE con caratteristiche dei materiali ed azione di traslazione*



*Fig 32: Modello FEM non lineare in EE con caratteristiche dei materiali ed azione di traslazione*

## CASO 6: Parete monopiano cieca con cedimento intermedio e fessurazione parabolica

In fig.33 è rappresentato il quadro fessurativo su un muro isolato con cedimento centrale, il quale crea un distacco tipo arco parabolico (effetto arco).

L'asse della parabola è in posizione centrale del dissesto, la base ampia quanto il cedimento e l'altezza e forma della parabola, indipendentemente da quella dell'edificio, sono legati all'entità del cedimento, qualità della muratura e spessore (rapporto  $L/H$ ). Per valori  $L/H > 3$  compaiono alla base del centro del muro lesioni verticali.

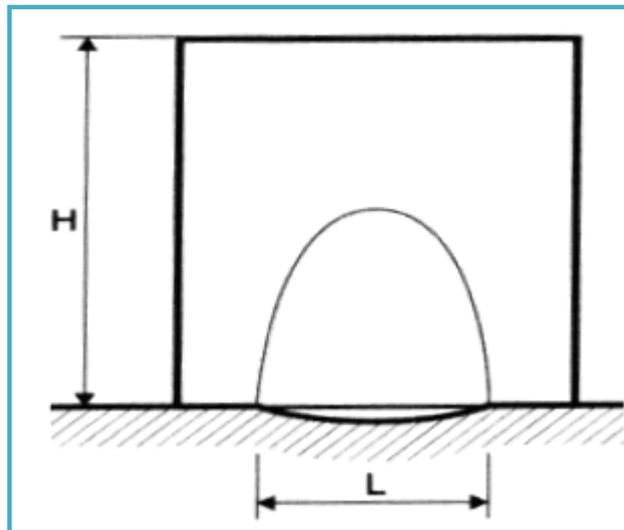


Figura 33 : Quadro fessurativo in muri isolati o ciechi-effetto arco.

In figura 34 sono rappresentati le tracce dei piani di rottura e i cerchi di Mohr nei punti A,B,C della parete, puro taglio in A-C e pura trazione in B.

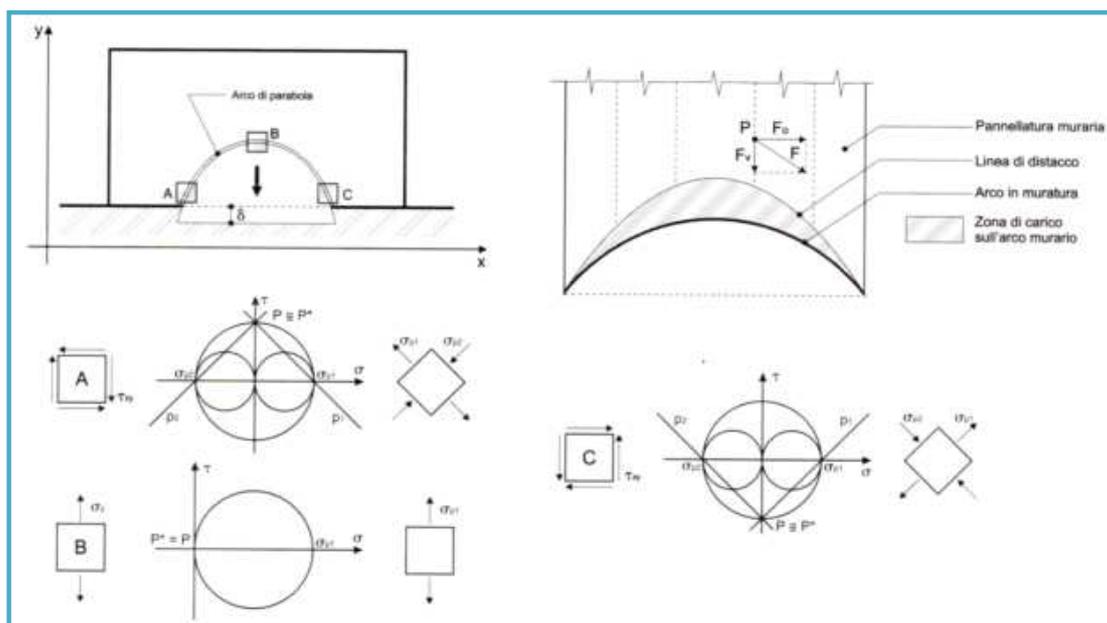


Figura 34: Involuppo delle tracce dei piani di crisi

Riportando i risultati ottenuti dalla modellazione ad elementi finiti di questo schema di cedimento:

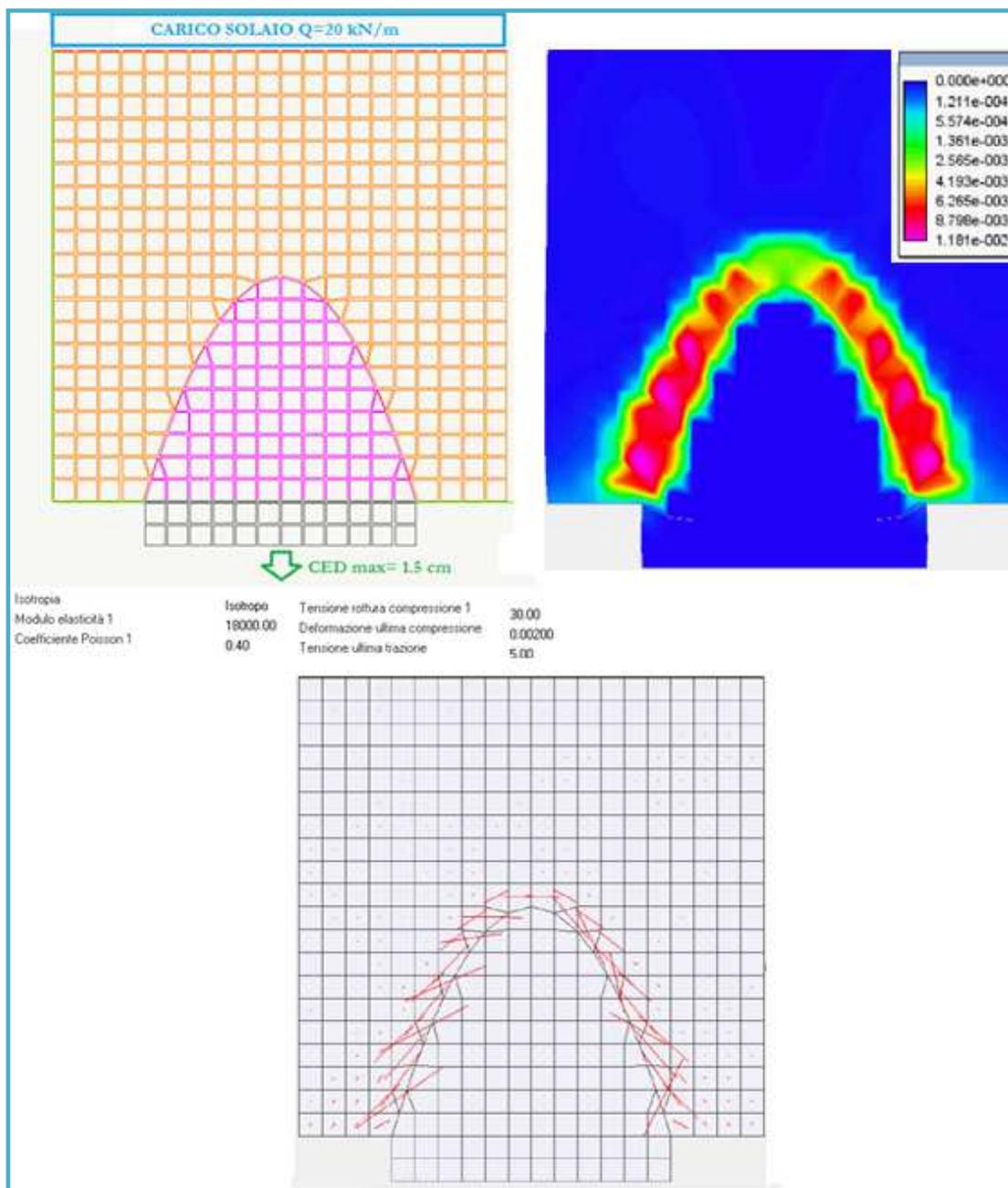


Figura 35: Risposta del modello FEM non lineare in EE con indicazione del cedimento massimo, lo stato di fessurazione e le direzioni principali di tensione

Come è possibile osservare dai risultati riportati nella figura 35, inerente il cedimento centrale di una parete muraria con cedimento intermedio costante pari ad 1.5 cm, la risposta numerica risulta fedele a quella riscontrata sia in termini di localizzazione della parabola di distacco che di quadro delle isostatiche o tensioni principali di trazione. **Si può quindi asserire come questo modello se ben calibrato riesce a seguire oltre a fessurazioni diffuse anche distacchi di tipo lineare concentrati con rottura progressiva nella formazione della linea di fessura.**

## 7. CASI DI STUDIO STRUTTURE IN CEMENTO ARMATO

Nel presente capitolo vengono analizzati alcuni schemi di strutture a telaio in c.a. che subiscono cedimenti di fondazione al piede di una pilastrata. e si riportano gli scenari di danno ottenuti nella modellazione.

I modelli realizzati utilizzano elementi monodimensionali a fibre che simulano il comportamento delle sezioni in c.a. con la parte in calcestruzzo che prevede la zona del nucleo interno alle staffe (calcestruzzo confinato), la zona esterna di copriferro (calcestruzzo non confinato), e le barre di armatura disposte all'interno degli elementi.

Gli esempi trattati sono:

- CASO 1: Telaio *multipiano a quattro elevazioni, tre campate con cedimento terminale*;
- CASO 2: Telaio *multipiano a quattro elevazioni, tre campate con cedimento intermedio*;

Scopo delle analisi effettuate è quella di valutare qualitativamente la risposta della struttura, e nel particolare di valutare lo stato di danneggiamento della struttura (plasticizzazione delle sezioni), ed il suo eventuale collasso.

### CASO 1: Telaio in c.a. multipiano con cedimento terminale

In entrambi i modelli sono stati assunti i parametri caratteristici dei materiali riportati in tabella 3 :

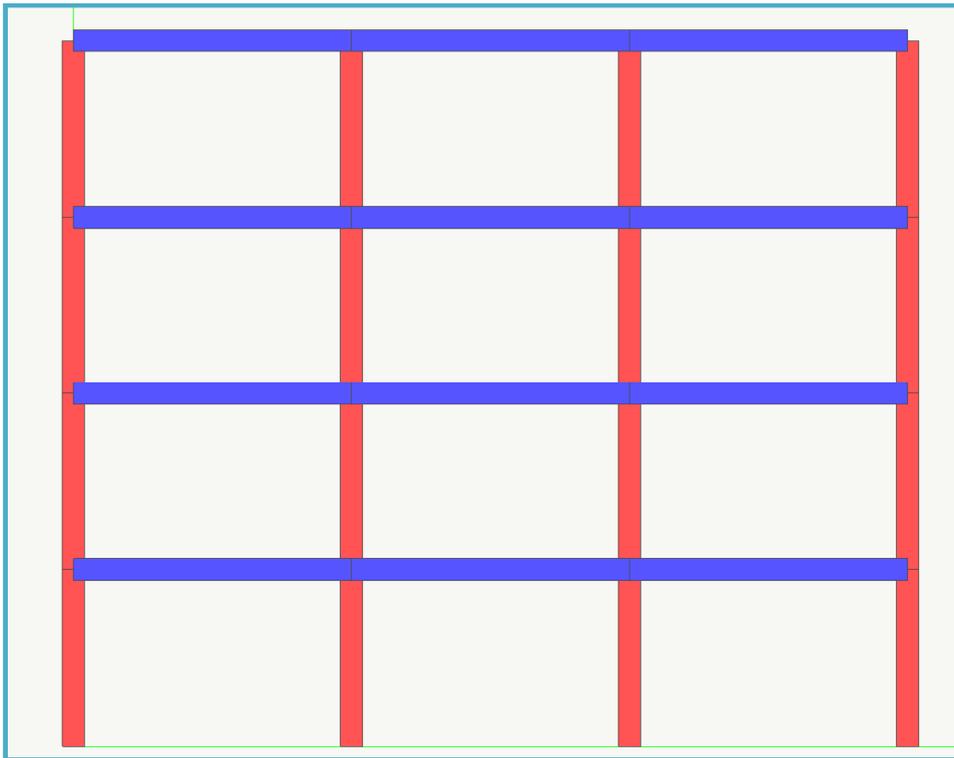
TAB.3: CARATTERISTICHE FISICO MECCANICHE DELLA MURATURA				
<b>E</b> [MPa]	<b>G</b> [MPa]	<b>Rck</b> [kg/cm <sup>2</sup> ]	<b>fyk</b> [kg/cm <sup>2</sup> ]	<b>W</b> [KN/m <sup>3</sup> ]
<b>30000</b>	<b>15000</b>	<b>250</b>	<b>4400</b>	<b>25</b>

I carichi di linea distribuiti al livello di piano i cui valori sono indicati in tabella 2.

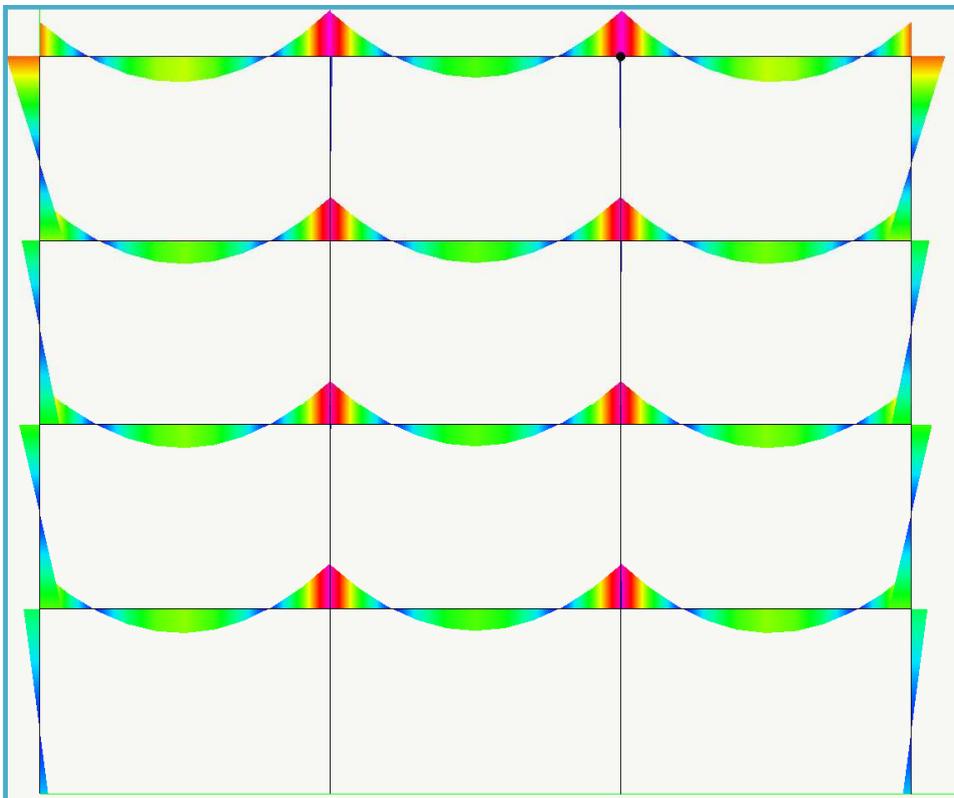
TAB.4: CARARICHI DISTRIBUITI ASSEGNATI ALLE TRAVI	
Carichi permanenti strutturali	q =1500 [kg/m]
Carichi permanenti non strutturali solai	q =1000 [kg/m]
Carichi permanenti tamponature	q =1000 [kg/m]
Carichi variabili	q =800 [kg/m]

La struttura è stata considerata incastrata alla base, ed al vincolo terminale di destra è stato applicato un cedimento progressivo.

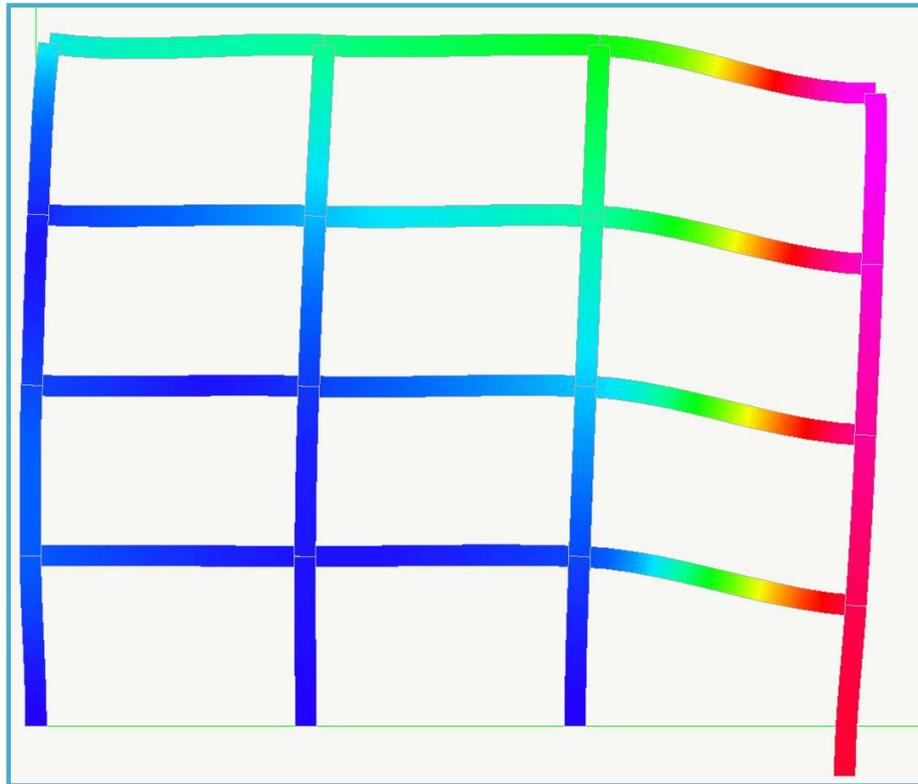
Vista della struttura:



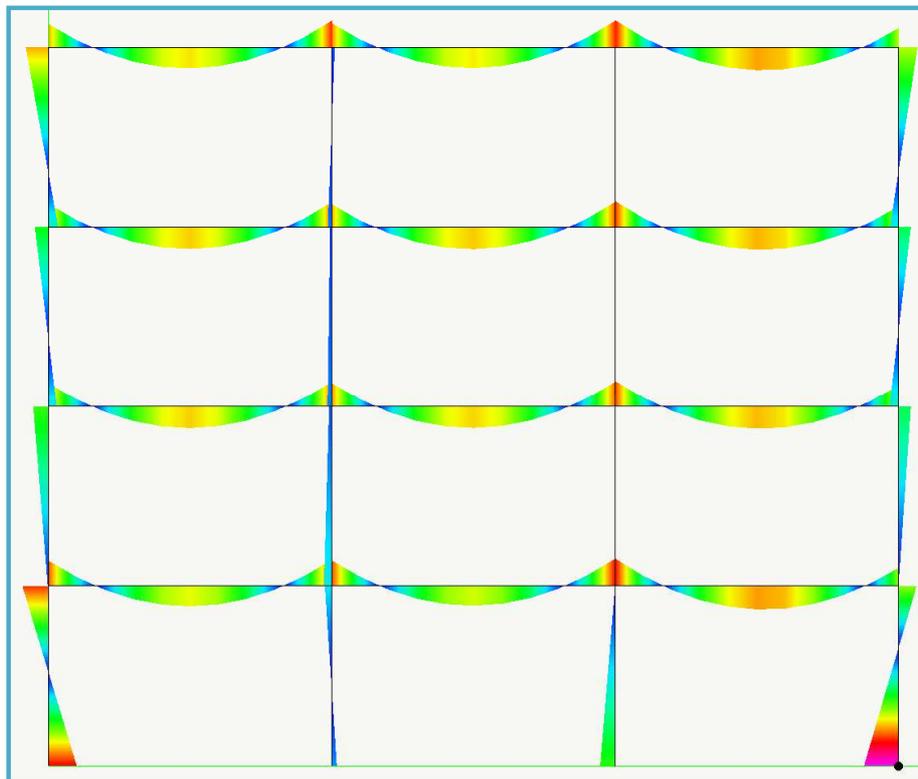
Visualizzando l'andamento delle sollecitazioni derivanti dai soli carichi verticali abbiamo la seguente distribuzione del momento flettente:



Applicando su tale configurazione il cedimento fondale della pilastrata più a destra secondo la seguente deformata:

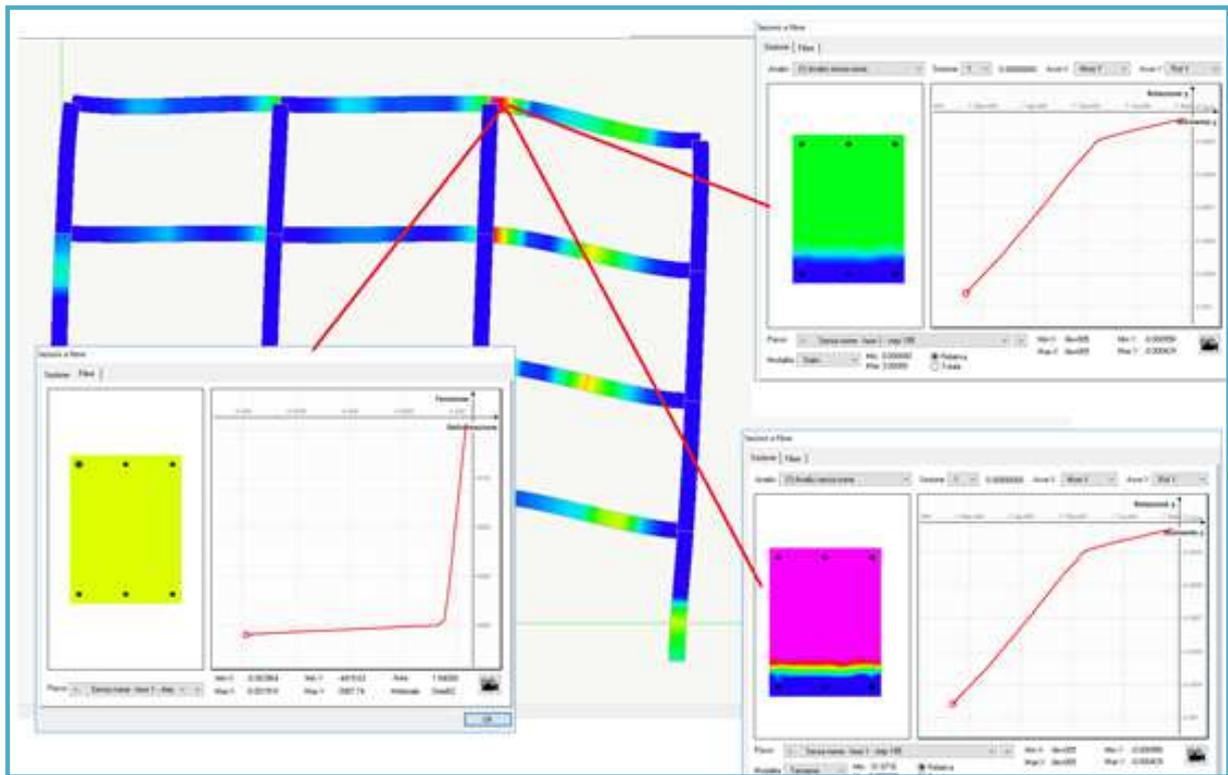


abbiamo la modifica dello stato di sollecitazione flessionale mostrata nel seguito:



in cui risulta evidente l'incremento di momento dato ai pilastri di estremità e lo scarico nella sezione delle travi all'attacco della pilastrata soggetta al cedimento, questo perché la perdita di rigidità del vincolo comporta la redistribuzione del carico portando ad incrementare la sollecitazione sulla sezione di attacco alla terza pilastrata e quella della sezione in campata.

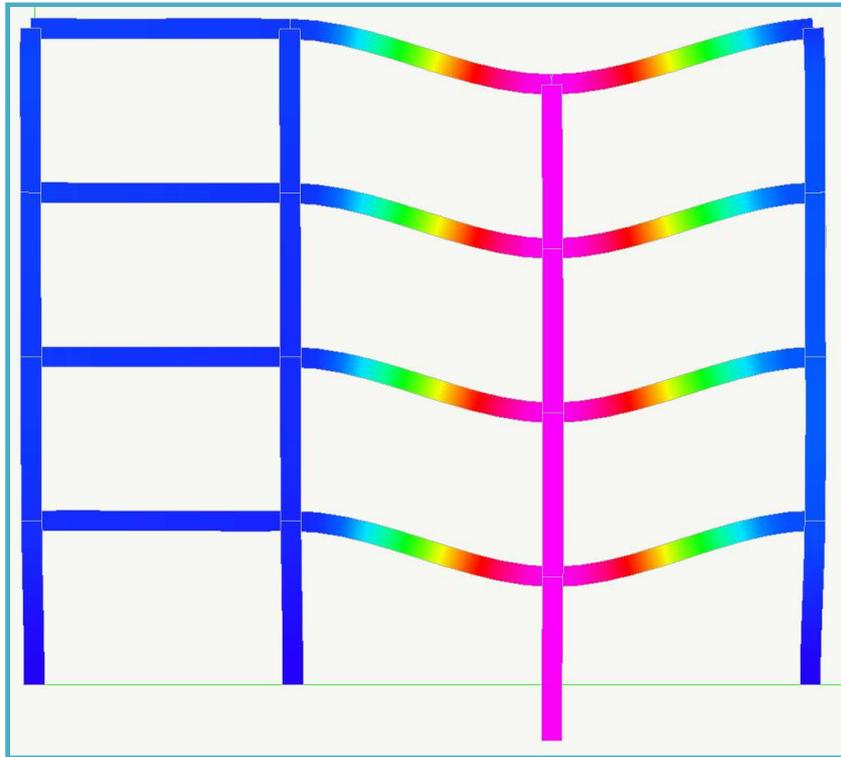
Visualizzando lo stato di plasticizzazione e lo stato delle fibre dell'elemento nella sezione di attacco a sinistra, corrispondente a tale schema di azioni, abbiamo:



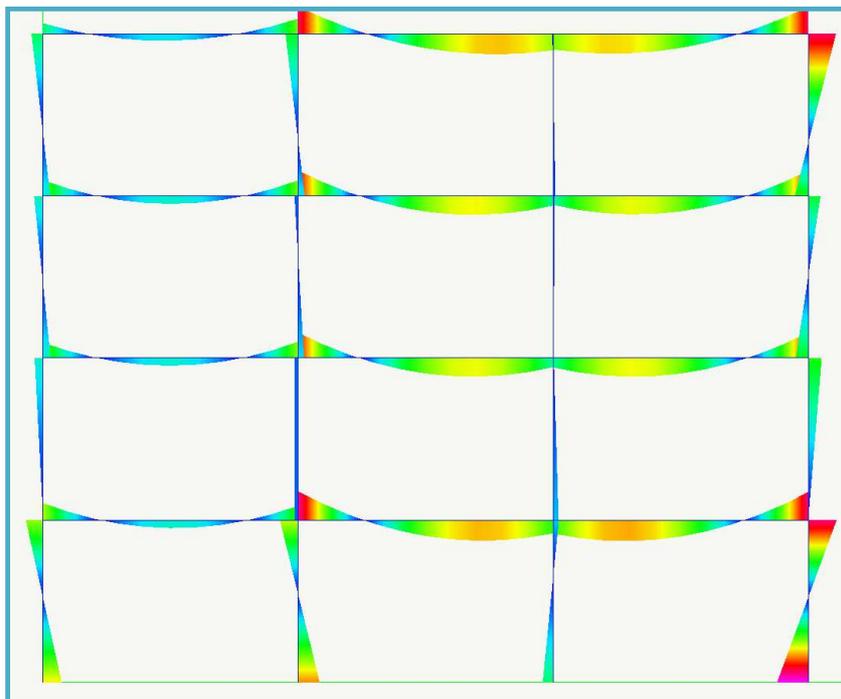
Si evince la plasticizzazione delle sezioni opposte al nodo che cede, in cui ovviamente risultano tese le fibre superiori e compresse le fibre inferiori, mentre come preannunciato nell'analisi della distribuzione del momento flettente, non si riscontra la plasticizzazione della sezione in corrispondenza della pilastrata soggetta a cedimento dato che lo spostamento in tale punto, porta il funzionamento delle travi dell'ultima campata a destra ad essere molto simile a quello di mensole, piuttosto che a travi di un telaio.

## CASO 2: Telaio in c.a. multipiano con cedimento intermedio

Riprendendo lo stesso modello del caso precedente, si procederà ad applicare il cedimento di fondazione alla pilastrata intermedia, ottenendo in questo modo la seguente:

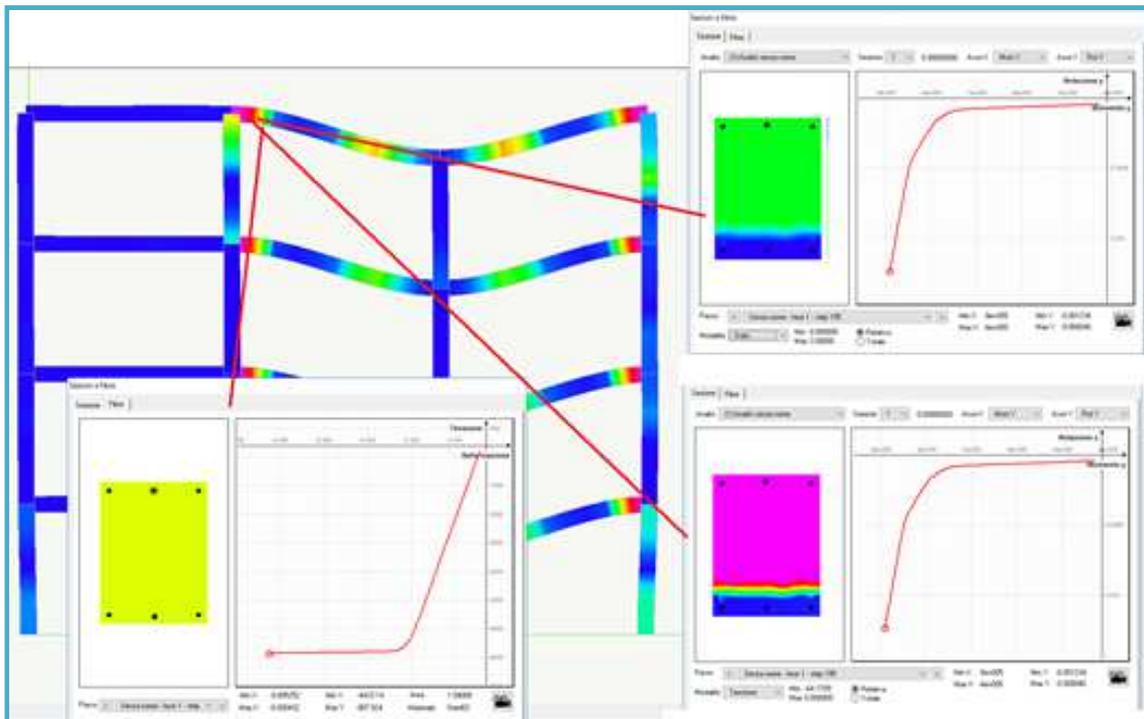


anche in questo caso risulta interessante analizzare la modifica dello stato di sollecitazione flessionale conferito dallo spostamento imposto alla base della pilastrata:



In questo caso risulta molto più evidente, rispetto al caso precedente, lo scarico subito dalle sezioni delle travi all'attacco con la pilastrata soggetta a cedimento.

Visualizzando anche in questo caso, lo stato di plasticizzazione e lo stato delle fibre dell'elemento nella sezione di attacco a sinistra, corrispondente a tale schema di azioni, abbiamo:



Anche in questo caso si evince *la plasticizzazione delle sezioni opposte al nodo che cede* in cui ovviamente risultano *tese le fibre superiori e compresse le fibre inferiori*, mentre come preannunciato *nell'analisi della distribuzione del momento flettente*, non si riscontra la plasticizzazione della sezione in corrispondenza della pilastrata soggetta a cedimento dato che lo spostamento in tale punto, porta le travi della seconda e terza campata ad avere un comportamento *che si avvicina molto di più a quello di una trave doppiamente incastrata ma con luce doppia rispetto a quella prima del cedimento*.

I modelli qui studiati risultano interessanti *perché consentono di valutare lo stato di danneggiamento indotto da cedimenti fondali*, ma oltre questo possono divenire uno strumento *altamente significativo*, perché partendo da questo stato è possibile proseguire lo studio della *struttura applicando un'azione sismica e valutandone la vulnerabilità tenendo in conto gli effetti derivanti da uno stato di danneggiamento preesistente*, che ne riduce sensibilmente *la capacità di prestazione rispetto ad una situazione di struttura integra*.

## BIBLIOGRAFIA

- S. Mastrodicasa, "Dissesti statici delle strutture edilizie", edito dalla Hoepli, IX Edizione, 1993.
- R.Di Francesco, " Le lesioni nelle strutture ", edito dalla Hoepli, II Edizione 2007.
- G.Menditto, " Fessurazioni nelle strutture ", edito Dario Flaccovio Editore, I Edizione, 2010.
- Aveta, S. Casiello, F. La Regina, R. Picone, (a cura di), "Restauro e consolidamento", Atti del convegno "Restauro e consolidamento dei beni architettonici e ambientali. Problematiche attuali", Napoli 2003. edito da Mancosu Editore, 2005.
- A. Pasta, "Restauro conservativo e antisismico", edito da Dario Flaccovio Editore, II Edizione, marzo 2006.
- L. Baruchello, G. Assenza, "Diagnosi dei dissesti e consolidamento delle costruzioni", edito da DEI Tipografia del Genio Civile, III Edizione, 2004.
- P.G. Malerba, "I Segnali Del Dissesto. Riconoscimento Delle Patologie Strutturali", Atti della Conferenza dell'Ordine degli Ingegneri del Verbano Cusio Ossola.
- Leone Corradi Dell'Acqua (2010) : Meccanica delle Strutture 3 Volume: La valutazione della capacità portante. McGraw-Hill (Milano).
- Marco Andrea Pisani " Consolidamento delle strutture " , ed. HOEPLI