

# ANALISI TRIDIMENSIONALE DI PILE DA PONTE A DOPPIA LAMA

**Franco BONTEMPI**

Professore

Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Università di Roma “La Sapienza”.

**Luca SGAMBI**

Diplomato alla Scuola di Specializzazione in Costruzioni in C.A. “F.lli Pesenti”,  
Politecnico di Milano.

## SOMMARIO

La pila da ponte a doppia lama è formata da due parti con caratteristiche geometriche e meccaniche molto diverse tra loro. La prima parte è costituita da un cassone chiuso, molto rigido; la seconda, superiore, è composta da due lame flessibili collegate rigidamente in sommità. Analizzando la struttura nella sua tridimensionalità, si vuole porre in rilievo alcuni comportamenti che un’analisi più semplice non è in grado di cogliere.

## SUMMARY

The two-blades piers are subdivided into two parts with different geometric property and mechanical property. The first part has a box section, much stiffer; the second part is composed by two flexible blades connected at the top. The goal of this work is to show some behaviour alone the three-dimensional analysis is able to put in evidence.

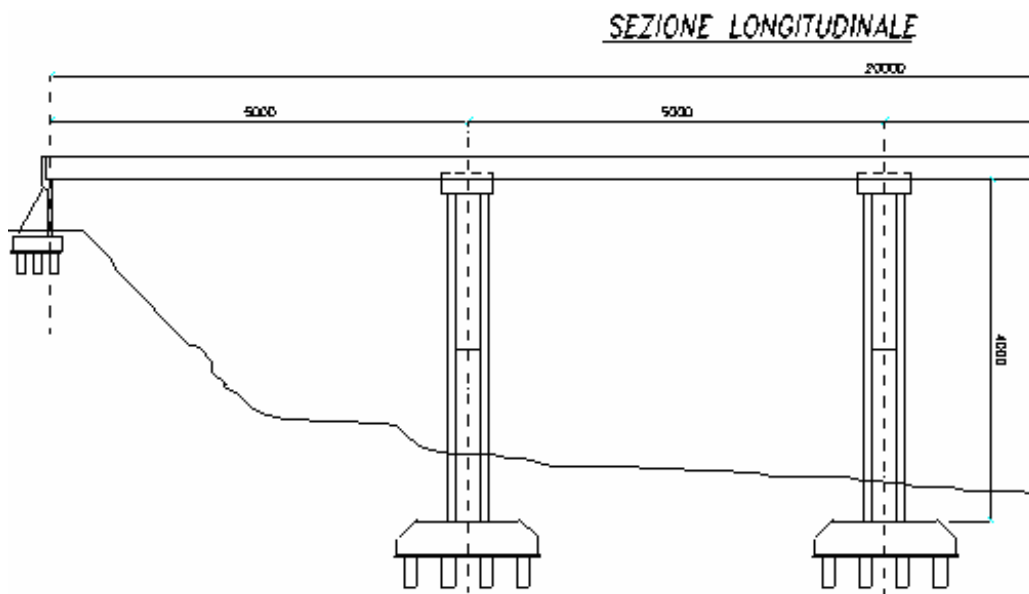
## 1. INTRODUZIONE

La pila da ponte a doppia lama possiede un duplice scopo. Di primaria importanza è la trasmissione dei carichi verticali, trasmessi dall’impalcato e dal peso della pila stessa, alle strutture di fondazione. Grazie alla flessibilità delle lame è poi possibile consentire sensibili spostamenti orizzontali dell’impalcato senza dover ricorrere a cinatismi di appoggi meccanici. Questo consente di eliminare le sezioni di giunto, necessarie con una pila rigida per poter consentire gli spostamenti dell’impalcato dovuti ad effetti differiti, a deformazioni anelastiche (temperatura) e all’azione di carichi radenti.

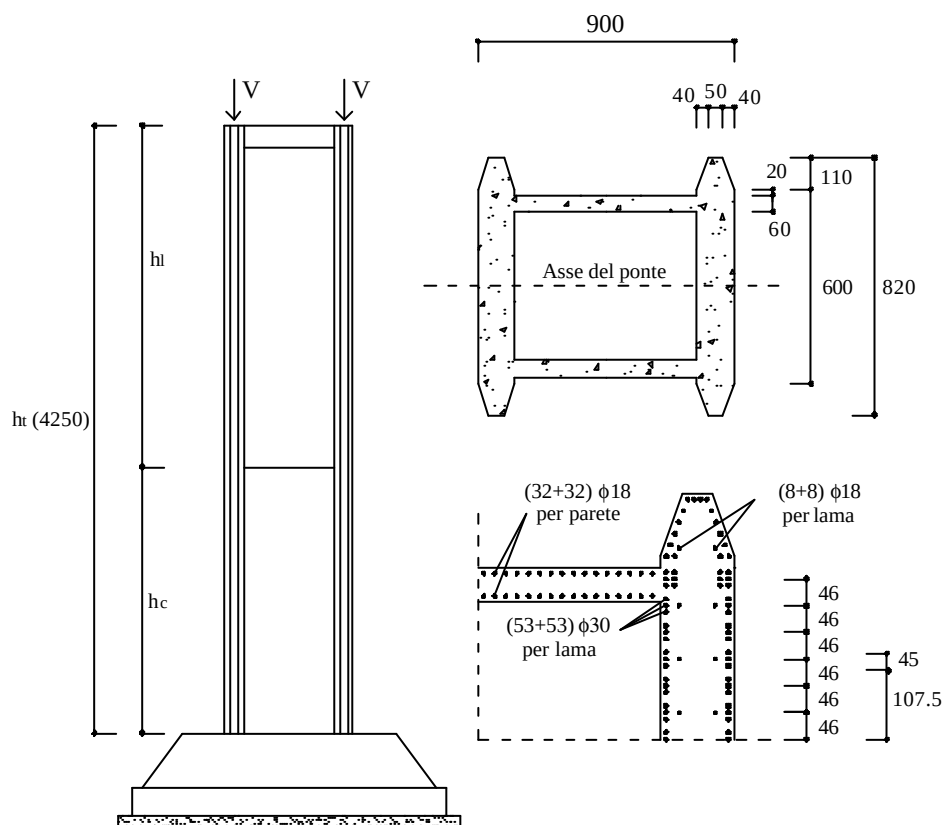
Il comportamento strutturale rispetto a carichi orizzontali, risulta molto influenzato dall’altezza della sezione a cassone rispetto all’altezza totale. Se la parte a cassone possiede un’altezza relativa modesta (o nulla) la pila presenterà un’elevata duttilità a spostamenti orizzontali, ma una scarsa resistenza; al contrario se la parte a cassone è dominante la resistenza della pila a forze orizzontali aumenta notevolmente, mentre la duttilità diminuisce. Di fondamentale importanza è perciò la scelta dell’altezza relativa della sezione a cassone, perché da essa dipende il comportamento meccanico della struttura.

Un’analisi elastica permette di cogliere solo delle indicazioni di massima in termini di rigidezza e deformabilità per poter cogliere la risposta di un simile sistema strutturale è necessaria un’analisi di tipo generale [1], [2].

In questo lavoro viene eseguita l’analisi di una pila da ponte a doppia lama in campo non lineare di materiale, modellando la struttura nella sua tridimensionalità. Come si mostrerà in seguito, una modellazione tridimensionale, rispetto ad una più semplice modellazione “a trave”, mette in luce comportamenti a taglio che possono causare riduzioni sensibili della resistenza ultima della pila. Un’adeguata scelta dell’altezza relativa della sezione a cassone non può non tener conto di fenomeni di diffusione che si verificano nel passaggio tra la sezione a doppia lama e la sezione a cassone e che, soprattutto in campo non lineare, possono influire notevolmente sulla risposta della struttura.



**Figura 1.** Sezione longitudinale di un impalcato da ponte sostenuto da pile a doppia lama.



**Figura 2.** Pila da ponte a doppia lama, particolare della sezione a cassone e disposizione delle armature.

## 2. DEFINIZIONE DEL PROBLEMA

Nelle figure 1 e 2 viene data una rappresentazione della struttura che si intende analizzare [5]. La pila è suddivisa lungo l'altezza in due parti: una prima parte di altezza  $h_c$  costituita da una sezione a cassone chiuso di notevole rigidità ed una seconda parte, di altezza  $h_l$  composta da due lame flessibili. Si caratterizza l'estensione del tratto rigido rispetto all'altezza totale tramite il rapporto adimensionale  $\alpha = h_c / h_t$ .

La pila viene modellata utilizzando elementi finiti esaedrici 8 nodi, alla base il modello viene incastrato rigidamente, mentre in sommità vengono inseriti degli elementi rigidi in modo da imporre gli stessi spostamenti alle due estremità della lama.

Mediante un'analisi non lineare si ricava la risposta strutturale dello schema di pila a doppia lama, ora descritto, al variare dell'altezza relativa del tratto rigido ( $\alpha = h_c / h_t = 0/3, 1/3, 2/3, 3/3$ ).

Come legame costitutivo per il calcestruzzo si assume una generalizzazione in tre dimensioni dei legami uniassiali utilizzati nelle teorie di analisi di stati di sforzo in regime membranale (CFT, MCFT, RA-STM); ne risulta un legame a fessura rotante e diffusa all'interno dell'elemento finito [6], [7]. Il procedimento seguito per il calcolo della matrice di rigidità del materiale nel sistema di riferimento globale è il seguente:

? Dalla soluzione elastica lineare ottenuta dall'analisi per elementi finiti, si ricavano le 3 deformazioni principali e le 3 direzioni principali.

? Si forma la matrice di rigidità del materiale nel sistema di riferimento principale, associando ad ogni direzione principale una legge costitutiva uniassiale. Il modulo di Poisson viene assunto nullo, per cui la matrice del materiale in questo sistema di riferimento risulta diagonale. I legami costitutivi considerati per il calcestruzzo in compressione sono:

$$s_d = z \cdot f'_c \left[ 2 \left( \frac{e_d}{z \cdot e_0} \right) - \left( \frac{e_d}{z \cdot e_0} \right)^2 \right] \text{ se } (e_d \leq z \cdot e_0)$$

$$s_d = z \cdot f'_c \left[ 1 - \left( \frac{\frac{e_d}{z \cdot e_0} - 1}{\frac{2}{z} - 1} \right)^2 \right] \text{ se } (e_d > z \cdot e_0)$$

Il parametro  $z = \frac{1}{\sqrt{1+400 \cdot e_{eq}}}$  viene detto parametro di

softened e serve a ridurre la resistenza a compressione del calcestruzzo qual'ora siano presenti delle deformazioni trasversali di trazione. La deformazione equivalente di trazione viene assunta pari a

$e_{eq} = \sqrt{\langle e_1 \rangle^2 + \langle e_2 \rangle^2 + \langle e_3 \rangle^2}$ , dove  $\langle e_i \rangle$  vale 0 se la deformazione è di compressione,  $e_i$  se è di trazione.

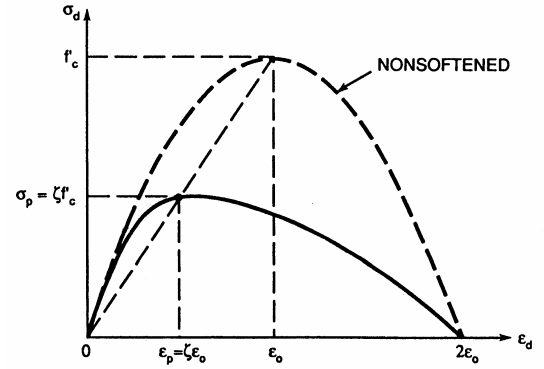


Figura 3. Legame uniassiale in compressione per il calcestruzzo.

Per il calcestruzzo in trazione si utilizza il seguente legame:

$$s_r = E_c \cdot e_r \text{ se } (e_r \leq e_{cr})$$

$$s_r = f_{cr} \left( \frac{e_{cr}}{e_r} \right)^{0.4} \text{ se } (e_r > e_{cr})$$

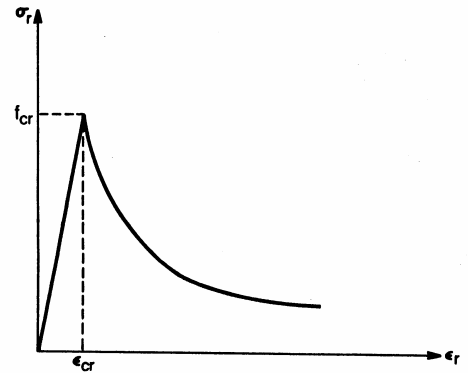


Figura 4. Legame uniassiale in trazione per il calcestruzzo.

Si assume inoltre  $E_c = 9500 \cdot \sqrt[3]{f'_c}$  [MPa] (Modulo elastico del calcestruzzo),  $f_{cr} = 0.25 \cdot \sqrt[3]{f_c^2}$  [MPa] (Tensione di fessurazione).

Il generico modulo G, viene formato come:

$$G_{ij} = \frac{E_i \cdot E_j}{E_i + E_j}$$

Formata la matrice  $\underline{\underline{D}}$  nel sistema di riferimento principale, si ricavano le proprietà del materiale nel sistema globale tramite la relazione  $\underline{\underline{D}}_{XYZ} = \underline{\underline{T}}^T \cdot \underline{\underline{D}}_{123} \cdot \underline{\underline{T}}$  dove  $\underline{\underline{T}}$  è una matrice di rotazione [6].

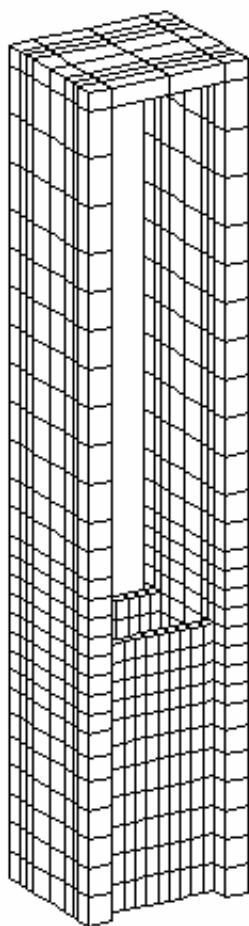
Per l'acciaio di armatura il legame utilizzato è quello bilatero simmetrico, di tipo elastico perfettamente plastico. Si assume quindi:

$$s_s = E_s \cdot e_s \quad \text{se } e_s < e_y$$

$$s_s = f_y \quad \text{se } e_s \geq e_y$$

Si assume un'altezza totale della pila di 42.50 m ed un carico verticale sulla singola lama pari a  $V = 30$  MN. Per i materiali si considerano le seguenti caratteristiche. Calcestruzzo:  $f_c = -33.2$  MPa. Acciaio  $f_y = 430$  MPa,  $E_s = 210$  Gpa,  $\epsilon_{su} = 1\%$ .

Nel seguito si riportano i risultati ottenuti mediante l'analisi all'elaboratore, imponendo delle forze orizzontali crescenti alla sommità della pila.



**Figura 5.** Modello ad elementi finiti solidi.

I modelli utilizzati nell'elaborazione possiedono da 3000 a 6000 gradi di libertà. Il tempo totale di calcolo delle analisi effettuate varia dalle 2 alle 7 ore a seconda del modello utilizzato (Pentium III<sup>®</sup> 533 MHz).

Lo studio è stato eseguito imponendo le forze sia in direzione parallela al piano delle lame, sia in direzione ad esso perpendicolare. Nel primo caso, come si mostrerà nel seguito, l'altezza della parte con sezione a cassone ( $h_c$ ) non influisce in modo significativo sul comportamento globale della struttura che rimane essenzialmente quello di una trave (lama) inflessa; se la flessione avviene in senso perpendicolare al piano della lama, il comportamento della parte a cassone è sostanzialmente diverso (più rigido) di quello della struttura sovrastante e ciò causa una notevole variazione della risposta strutturale al variare dell'altezza  $h_c$ .

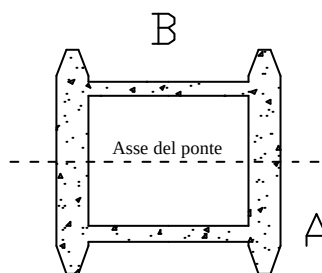
### 3. PRESENTAZIONE DEI RISULTATI

Nelle pagine successive vengono riportati i risultati delle analisi effettuate. La figura 6 riporta le curve Forza orizzontale – Spostamento orizzontale (rilevato in sommità della pila) per flessione nel piano delle lame. Le figure 7, 8 e 9 riportano i risultati in termini di deformata, quadro fessurativo ed entità del danno, per il caso  $\alpha = 1/3$ .

La figura 10 riporta i casi studiati per flessione nel piano perpendicolare alle lame, nella stessa figura sono presenti anche i risultati ottenuti da una modellazione con elementi finiti di trave, in modo da poter eseguire un confronto tra le due diverse modellazioni.

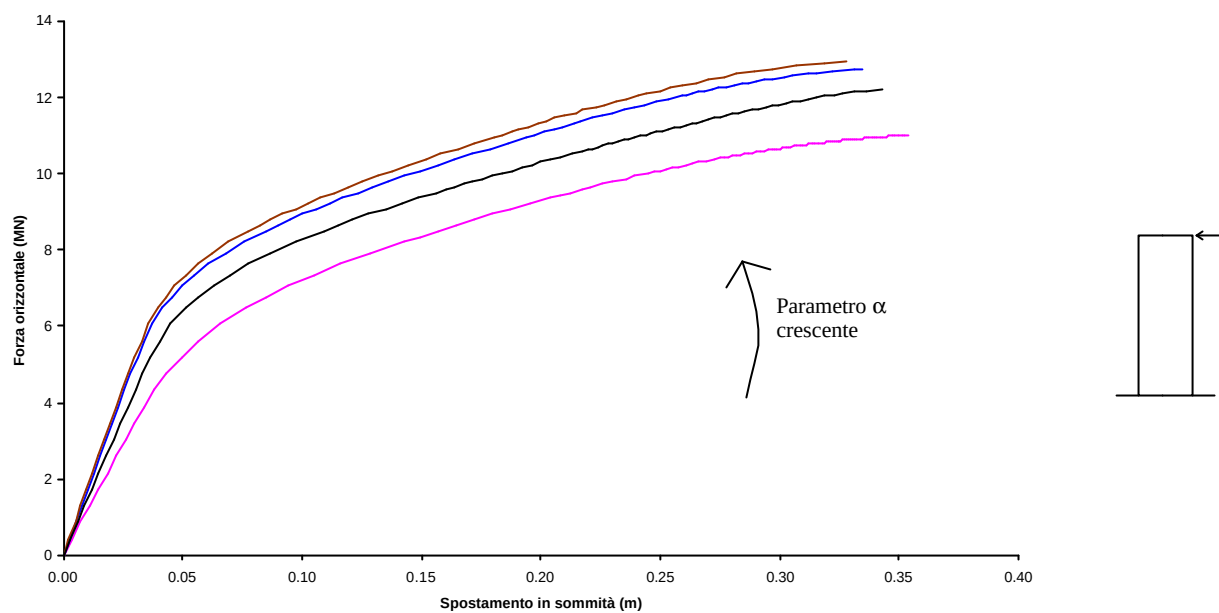
Le figure 11, 12 e 13 riportano i risultati in termini di deformata, quadro fessurativo ed entità del danno, per il caso  $\alpha = 2/3$ .

Allo scopo di migliorare la comprensione dei quadri fessurativi riportati, verrà indicata con A la proiezione della pila su di un piano parallelo alle lame, e con B la proiezione su un piano ad esse perpendicolare.

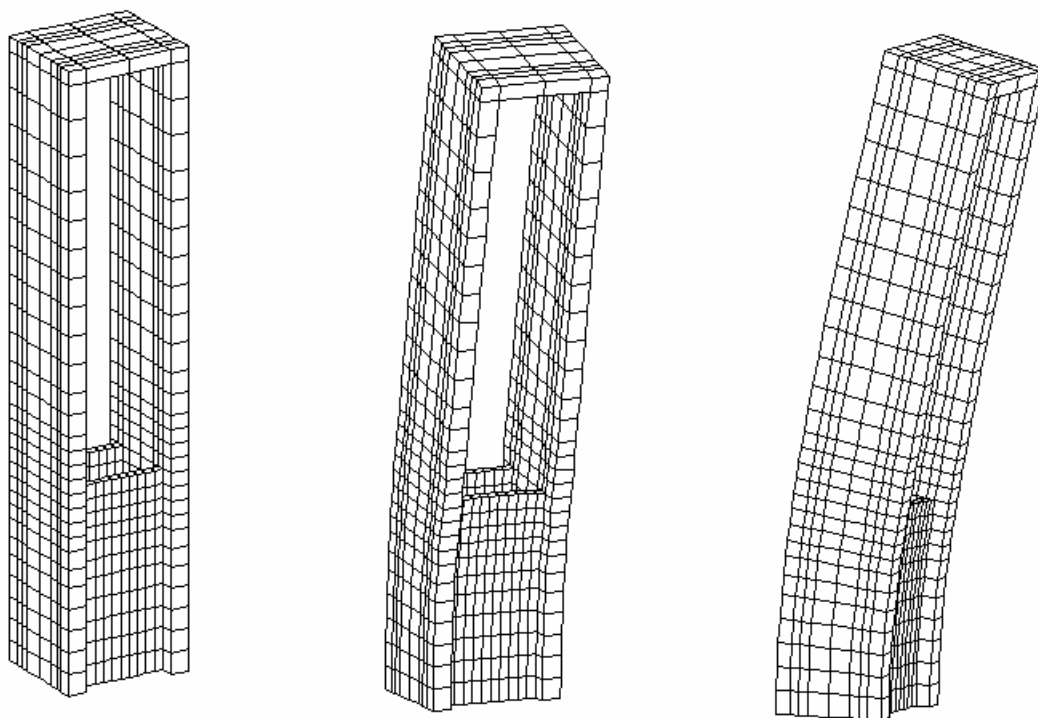


**Figura 6.** Sezione della pila nella parte a cassone.

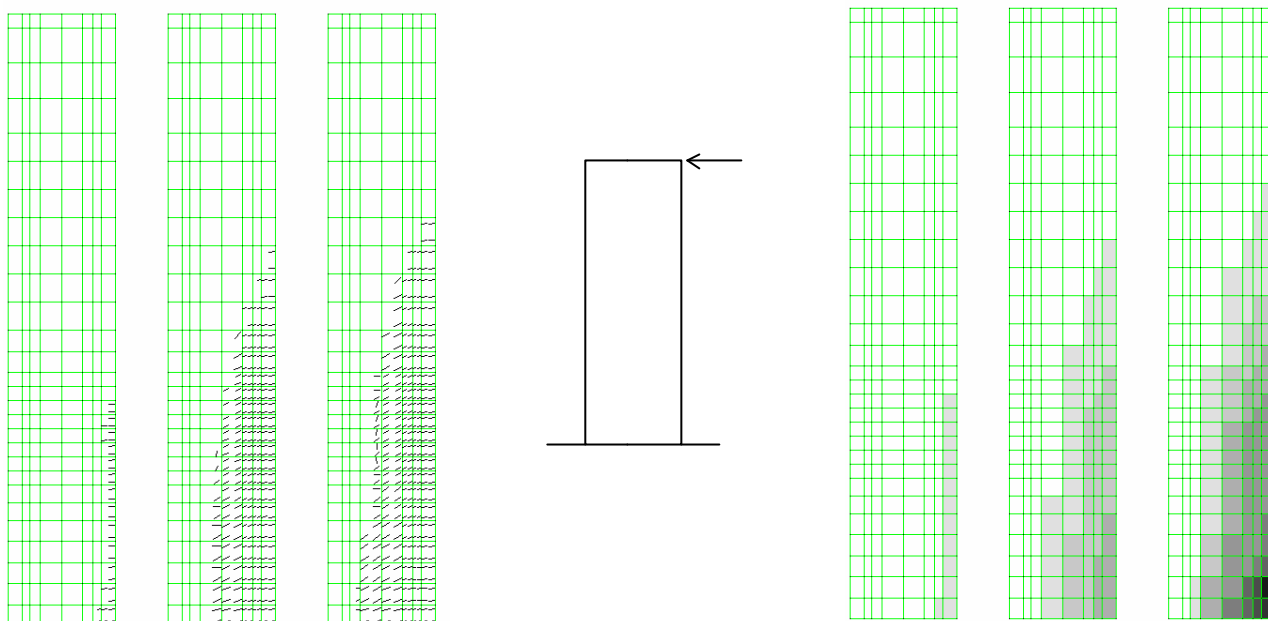
I quadri fessurativi riportati evidenziano l'inclinazione della fessura principale nei vari elementi finiti, mentre il quadro di danneggiamento indica le zone dove la deformazione principale di trazione è maggiore.



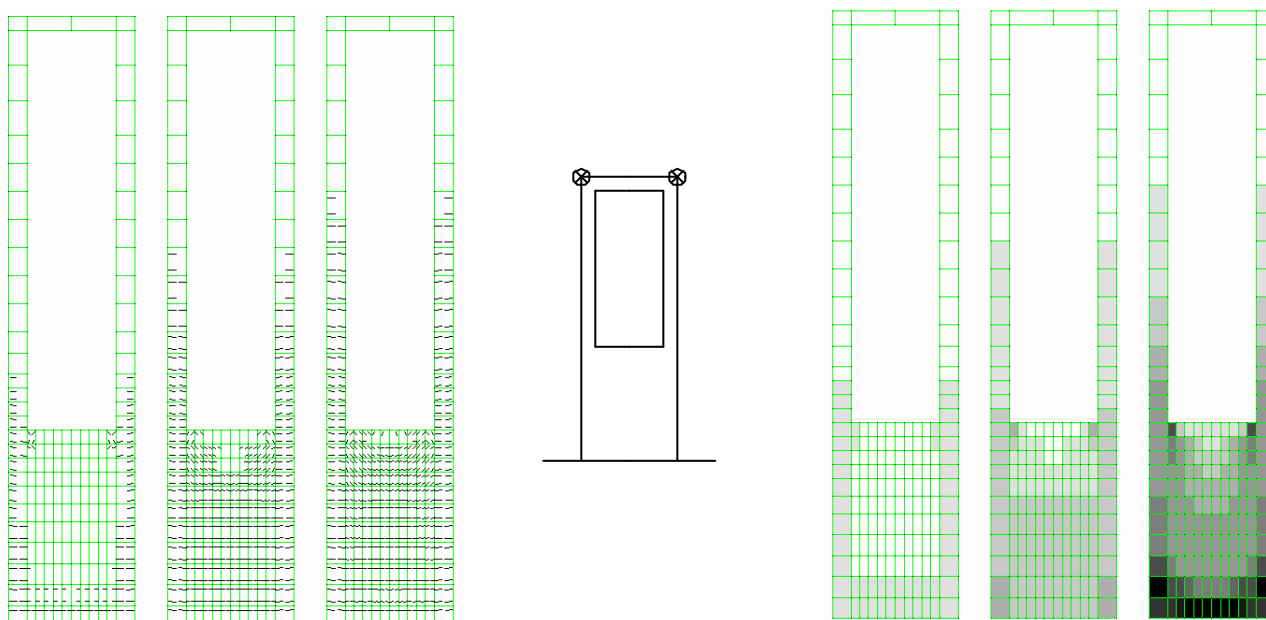
**Figura 7.** Curve Forza - Spostamento per flessione nel piano della lama al variare del parametro  $\alpha = h_c/h_t$ .



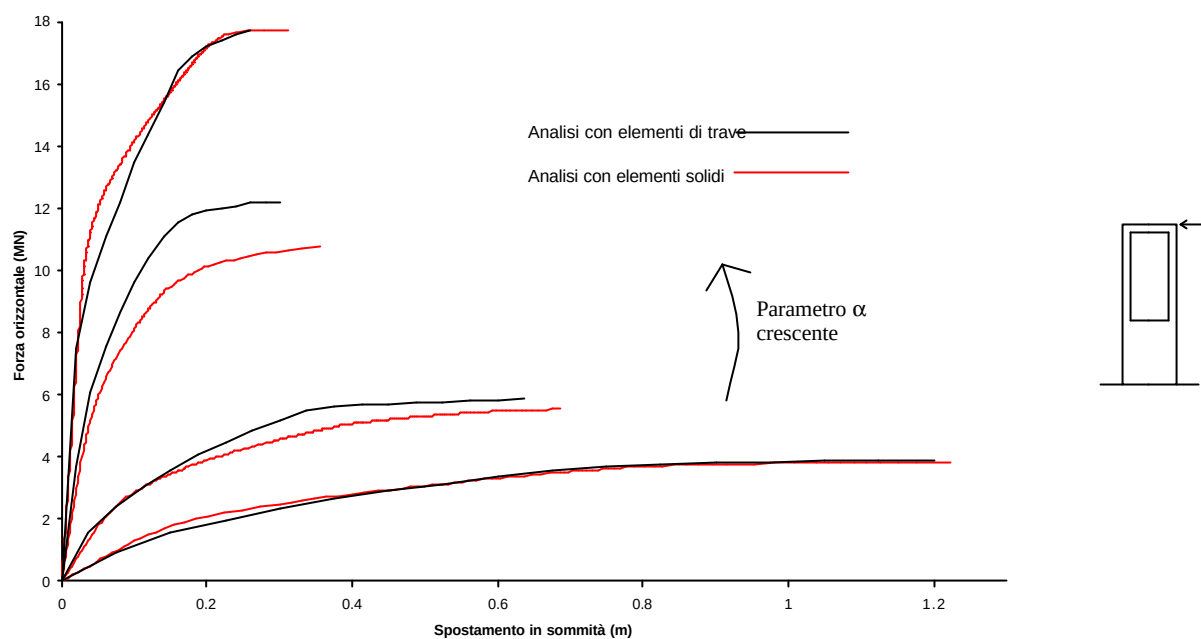
**Figura 8.** Mesh indeformata, e visione assonometrica della deformata per la pila inflessa nel piano della lama con altezza della sezione a cassone ad 1/3 dell'altezza totale ( $\alpha = 1/3$ ).



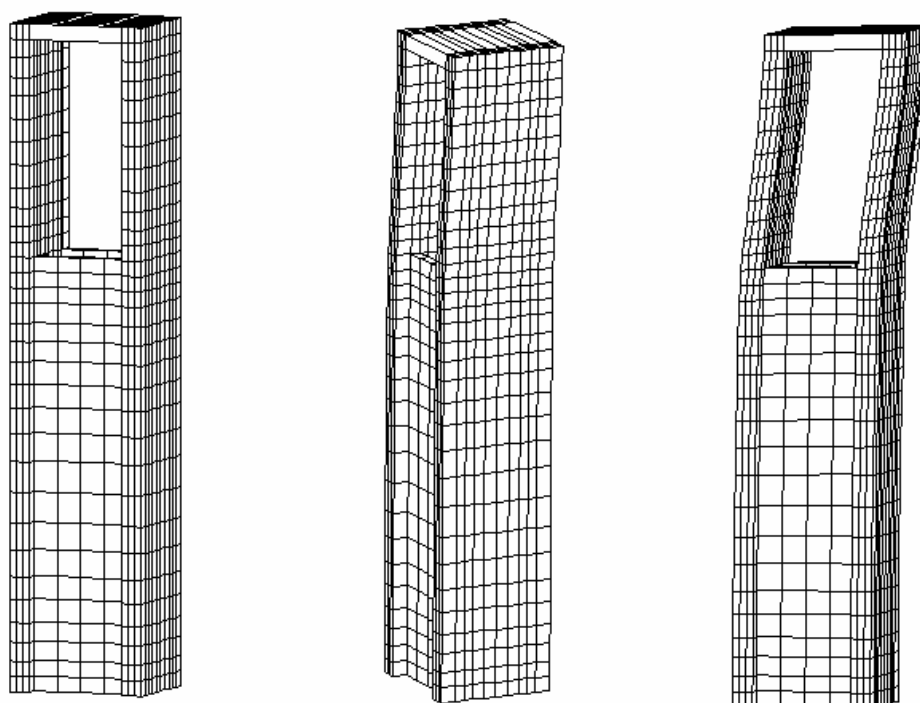
**Figura 9.** Quadro fessurativo e danneggiamento per la vista dal lato A. Situazioni al 50%, 75% e 100% del carico ultimo.



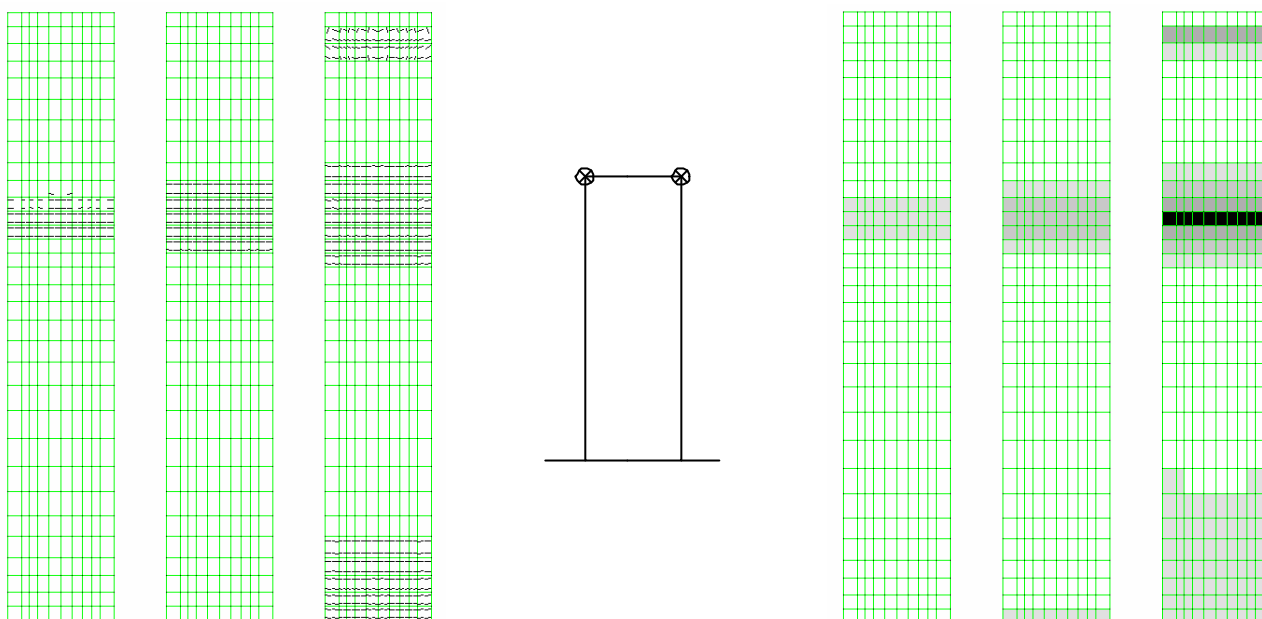
**Figura 10.** Quadro fessurativo e danneggiamento per la vista dal lato B. Situazioni al 50%, 75% e 100% del carico ultimo



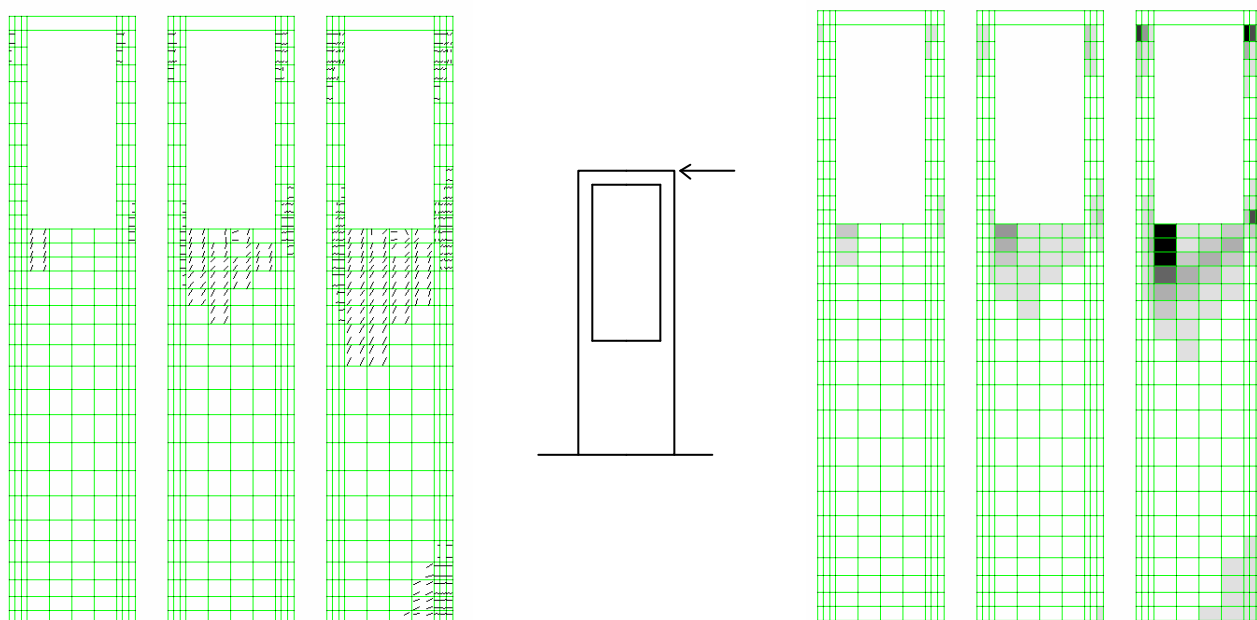
**Figura 11.** Curve Forza - Spostamento per flessione nel piano perpendicolare alle lame al variare del parametro  $\alpha = hc/ht$ .



**Figura 12.** Mesh indeformata, e visione assonometrica della deformata per la pila inflessa nel piano perpendicolare alle lame con altezza della sezione a cassone a 2/3 dell'altezza totale ( $\alpha = 2/3$ ).



**Figura 13.** Quadro fessurativo e danneggiamento per la vista dal lato A. Situazioni al 50%, 75% e 100% del carico ultimo.



**Figura 14.** Quadro fessurativo e danneggiamento per la vista dal lato B. Situazioni al 50%, 75% e 100% del carico ultimo.



#### 4. DISCUSSIONE DEI RISULTATI

Dalle analisi eseguite si può evidenziare che:

- Il caso di flessione nel piano della lama (figura 7) non suscita particolare interesse. Per la pila studiata, la variazione del parametro  $\alpha$  causa un incremento massimo della resistenza di solo un 25% mentre la duttilità rimane invariata. Il quadro di fessurazione riportato in figura 9 (caso  $\alpha = 1/3$ ) ed il quadro di danneggiamento, evidenziano il comportamento tipico di una trave inflessa, con fessure parallele all'asse della trave ai margini della sezione ed inclinate al suo interno per la presenza di deformazioni taglianti. Anche il quadro di danneggiamento è tipico di una trave inflessa, con un danno molto elevato in corrispondenza della zona di massimo momento. Il passaggio tra la parte a doppia lama e la parte a cassone inserisce nella struttura una sezione di discontinuità. Per flessione in questa direzione il comportamento flessionale delle due parti risulta simile, e la sezione di discontinuità provoca solamente la nascita di una zona di diffusione, localizzata nella costolatura del cassone che unisce le 2 lame. Sia il quadro fessurativo, sia il quadro di danneggiamento di figura 10 evidenziano questo comportamento.

- Per flessione nel piano perpendicolare alle lame, il comportamento strutturale cambia radicalmente al variare del parametro  $\alpha$ . I valori di resistenza ottenuti con  $\alpha = 1$  sono 4 volte superiori di quelli ottenuti con  $\alpha = 0$ , mentre la duttilità diminuisce della stessa misura. Questo comportamento è dovuto alle diverse risposte strutturali che possiedono le singole parti (parte a cassone e parte a doppia lama); si noti dalla figura 12, come l'elevata deformabilità della parte a doppia lama porti a concentrare lo spostamento orizzontale nella parte superiore della pila.

- In figura 11 oltre alle curve Forza – Spostamento ricavate da un'analisi tridimensionale, sono riportate anche le curve ricavate da un'analisi a trave [1], [2]. Si noti come per  $\alpha = 0$  e per  $\alpha = 1$  (sezione uniforme lungo l'altezza della pila) le curve ottenute dalle due diverse modellazioni vengano a coincidere, mentre per  $\alpha = 1/3$  ed a maggior ragione per  $\alpha = 2/3$ , un'analisi con elementi di trave porti a sovrastimare la resistenza della struttura (nel caso considerato di un 20%)

- In questo caso è interessante indagare anche il quadro fessurativo ed il danneggiamento della struttura. Come si può notare dalle figure 13 e 14 vi sono varie zone fessurate. La parte a doppia lama avente in sommità un collegamento rigido, si comporta come un telaio flessibile incastrato nella parte sottostante a cassone. La fessurazione ed il danneggiamento all'interno delle due lame è tipico delle travi inflesse (fessurazione nelle zone di momento massimo). Si nota poi una piccola zona danneggiata alla base della pila, nella sezione a cassone, ed un danneggiamento molto accentuato al di sotto della sezione di discontinuità doppia lama – cassone. Questo danneggiamento è provocato sia da fenomeni diffusivi derivanti dall'espandersi delle tensioni dalla zona a doppia lama alla zona a cassone, sia (e soprattutto) dall'instaurarsi di un meccanismo

puntoni e tiranti (quadro fessurativo di figura 14) atto al trasporto delle forze di scorrimento da una lama all'altra. Un'analisi eseguita con elementi di trave non riesce a cogliere quest'aspetto del comportamento della struttura e sovrastima perciò la resistenza. L'errore risulterà tanto maggiore quanto più tozza risulterà essere la pila.

#### 5. CONCLUSIONI

Si è esaminata la risposta strutturale di pile da ponte a doppia lama, mettendo in evidenza l'importanza di un'analisi tridimensionale atta a cogliere in maniera opportuna sia la deformabilità sia il danneggiamento

della struttura. In particolare i confronti eseguiti tra una modellazione tridimensionale ed una con elementi di trave di una pila a profilo misto mostrano che quest'ultima tende a sovrastimare la capacità portante a flessione poiché non è in grado di cogliere il danneggiamento dovuto alla trasmissione delle forze di scorrimento tra le due lame.

#### 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] BIONDINI F. – 2000, “*Strutture da ponte soggette ad azioni di tipo sismico. Modellazione ed ottimizzazione*”, **Tesi di Dottorato**, Politecnico di Milano.
- [2] BIONDINI F., BONTEMPI F., MALERBA P.G., MARTINEZ Y CABRERA F. – [\*\* ], “*Analisi non lineare di pile da ponte a doppia lama*” [\*\* ]
- [3] BONTEMPI F., MALERBA P.G., ROMANO L. – 1995, “*Formulazione diretta secante dell'analisi non lineare di telai in C.A./C.A.P.*”, **Studi e Ricerche**, Scuola di Specializzazione in Costruzioni in Cemento Armato, Politecnico di Milano, 16, 351-386.
- [4] MALERBA P.G., (Ed.) – 1998, “*Analisi limite e non lineare di strutture in cemento armato*”, **CISM** Udine.
- [5] MANCINI G., MARTINEZ Y CABRERA F., PISANI M.A., RECUPERO A. – 1998, “*Behavior of Nonlinearly Restrained Slender Bridge Piers*”, **ASCE Journal of Bridge Engineering**, 3(3), 126-131.
- [6] SGAMBI L., - 2001, “*Modellazione tridimensionale di strutture in C.A. e C.A.P. in campo non lineare*”, **Tesi di Specializzazione**, Scuola “F.lli Pesenti”, Politecnico di Milano.
- [7] Vecchio, - 1989, “*Non linear finite element analysis of reinforced concrete membranes*”, **ACI Structural Journal**.