



AEDES Software



PC.M: PROGETTAZIONE DI COSTRUZIONI IN MMURATURA



PC.E: PROGRAMMA PER IL CALCOLO AGLI EELEMENTI FINITI

Analisi di strutture in muratura

secondo **nuova Normativa Tecnica** (D.M. 14.1.2008)
e **precedenti Norme** (Metodo Por, D.M. 16.1.1996, D.M. 20.11.1987)

Manuale di PC.E 

Volume 6. Edifici monumentali

Manuale di PC.E

Piano dell'opera:

Volume 1. Teoria

Volume 2. Manuale d'uso

Volume 3. Tutorial

(Precedente edizione:

"Edifici in Muratura e nuova Normativa Sismica", ALINEA, 2006)

Volume 4. Esempi applicativi

Volume 5. Manuale di validazione

Questo volume: ► **Volume 6. Edifici monumentali**

Tutti i diritti sono riservati, anche di riproduzione parziale, a norma di legge e delle convenzioni internazionali. Nessuna parte di questo volume può essere riprodotta in qualsiasi forma o mezzo elettronico o meccanico, per alcun uso, senza il permesso scritto della AEDES Software per Ingegneria Civile.

Edizione 2011 (rev. 3.10.2011)



© 1997-2011 **AEDES** Software per Ingegneria Civile

Via F. Aporti 32 - 56028 SAN MINIATO (PI)

Tel.: **0571.401073** - Fax: **0571.401173**

E-mail: **info@aedes.it** - Internet: **www.aedes.it**

AVVERTENZE E CONDIZIONI D'USO

La AEDES Software si riserva il diritto di apportare miglioramenti o modifiche al programma PC.E, descritto nella documentazione ad esso associata, in qualsiasi momento e senza preavviso.

Il software e la documentazione allegata, anche se curati con scrupolosa attenzione, non possono comportare specifiche responsabilità di AEDES per involontari errori o inesattezze: pertanto, l'utilizzatore è tenuto a controllare l'esattezza e la completezza del materiale utilizzato. Le correzioni relative ad eventuali errori tipografici saranno incluse nelle versioni di aggiornamento.

PC.E è di esclusiva proprietà della AEDES e viene concesso in uso non esclusivo secondo i termini e le condizioni riportati nel contratto di licenza d'uso. L'utente non avrà diritto ad utilizzare PC.E fino a quando non avrà sottoscritto la suddetta licenza d'uso.

L'utente è responsabile della scelta di PC.E al fine del raggiungimento dei risultati voluti, nonché dell'installazione, dell'uso dello stesso e dei relativi risultati.

Le sole garanzie fornite dalla AEDES in merito a PC.E sono quelle riportate nella licenza d'uso. La AEDES non garantisce che le funzioni contenute in PC.E soddisfino le esigenze dell'utente o funzionino in tutte le combinazioni che possono essere scelte per l'uso da parte dell'utente.

I nomi dei prodotti citati nella documentazione di PC.E possono essere marchi di fabbrica o marchi registrati dalle rispettive Società.

INDICE

1. INTRODUZIONE

2. LA TEORIA

- 2.1. ARCHI: MODELLO A CONCI MURARI E GIUNTI
- 2.2. PILASTRI IN MURATURA
- 2.3. SEZIONI QUALUNQUE DI TIPO POLIGONALE

3. ESEMPI GUIDATI

- 3.1. ARCO PIANO
 - 3.1.1. INPUT DATI DEGLI ARCHI DA CAD
 - 3.1.2. INPUT DATI DEGLI ARCHI IN PC.E
 - 3.1.3. RISULTATI DELL'ANALISI E CALCOLO DEL MOLTIPLICATORE DI COLLASSO
- 3.2. MODELLO TRIDIMENSIONALE CON ARCHI E PILASTRI
 - 3.2.1. COMPLETAMENTO INPUT MODELLO TRIDIMENSIONALE
 - 3.2.2. RISULTATI

Vol. 6. EDIFICI MONUMENTALI

CONVENZIONI TIPOGRAFICHE

Nella descrizione di alcuni parametri utilizzati in analisi sismica, viene fatto diretto riferimento ai corrispondenti paragrafi del D.M.14.1.2008 (NTC08) attraverso il simbolo **§** seguito dal numero del paragrafo (seguendo l'impostazione delle norme, **§C** indica il corrispondente paragrafo della Circolare applicativa di NTC08: Circ. 617 del 2.2.2009). Esempi:

Murature: PressoFlessione Ortogonale (§7.2.3)

edifici esistenti: §C8.7.1.2

dove §7.2.3 indica il paragrafo 7.2.3 del D.M.14.1.2008 che tratta la PressoFlessione Ortogonale per le pareti in muratura; §C8.7.1.2 indica il paragrafo C8.7.1.2 della Circolare 617 del 2.2.2009.

I riferimenti ai paragrafi del presente Manuale d'uso sono invece realizzati racchiudendo il numero di paragrafo tra parentesi quadre. Ad esempio:

Ulteriori informazioni in [3.2.3]

La numerazione delle figure si compone di due caratteri corrispondenti al capitolo e al paragrafo primario in cui la figura è inserita, e un successivo carattere relativo al numero progressivo. Ad esempio:

Fig. 1.1.4

significa: Fig. 4 del capitolo 1.1.

Gli EuroCodici sono abbreviati con: EC (ad es: EC6 indica EuroCodice 6); nei riferimenti ai paragrafi, il nome dell'EuroCodice è seguito dal paragrafo indicato con il simbolo §. Ad esempio:

EC6-§4.5.3.(6)

cioè il paragrafo 4.5.3.(6) dell'EuroCodice 6 (dedicato alla progettazione di strutture in muratura).

Per quanto riguarda altre norme di riferimento:

C26BBCC02122010 indica la Circolare 26 del 2.12.2010 del Ministero dei Beni Culturali per la valutazione e la riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle norme tecniche per le costruzioni; il riferimento ad un paragrafo è indicato facendo seguire alla sigla della norma il numero del paragrafo preceduto dal simbolo §. Ad esempio:

C26BBCC02122010§5.4.2

indica il paragrafo 5.4.2 della Circolare 26 del 2.12.2010 del Ministero dei Beni Culturali.



Suggerimento

Consigli per ottimizzare l'utilizzo del software.



Nota bene

Osservazioni e note che è opportuno conoscere.



Importante!

Da sapere: informazioni tecniche, approfondimenti, riferimenti normativi.



Attenzione

Da sapere assolutamente: comandi e operazioni particolarmente delicate.

1. INTRODUZIONE

Questo volume è dedicato agli edifici monumentali; in particolare, vengono esaminati due elementi strutturali molto diffusi nelle chiese e nei palazzi storici: archi e pilastri. Sono state studiate metodologie che si pongano in linea con la sensibilità e le conoscenze di chi ha realizzato queste opere nei secoli passati: architetti-ingegneri che avevano acquisito attraverso l'esperienza una grande capacità di comprensione del comportamento strutturale.

Lo studio viene affrontato analizzando un esempio di riferimento: un macroelemento costituito da quattro arcate e quattro pilastri sui cui insiste una volta raccordata da pennacchi sferici.

Seguendo le indicazioni delle Normative dedicate ai Beni Monumentali (Circ.26 BB.CC. del 2.12.2010), lo studio di complessi storici può essere attuato dividendo il problema in parti, in sottostrutture significative. I recenti eventi sismici, infatti, hanno evidenziato come il dissesto delle opere murarie avvenga per distacco e rotazione di macroelement. A questi studi si potranno affiancare ovviamente analisi globali più o meno semplificate.

Nel cap. 2, dopo una descrizione degli elementi concio e giunto utilizzati per modellare gli archi (2.1), saranno trattati gli elementi 'pilastro' (2.2).

Nel cap. 3 saranno proposti l'esempi di un arco piano, guidando passo dopo passo il lettore nell'introduzione dei dati e nell'interpretazione dei risultati, fino alla determinazione del moltiplicatore di collasso.

Sarà infine realizzato il modello costituito dalle quattro arcate e le quattro colonne su cui si imposta la cupola (3.2).

Questi modelli richiedono uno studio preliminare molto accurato, finalizzato alla corretta definizione della geometria, dei vincoli e dei materiali. Per queste particolari strutture, AEDES ha l'obiettivo di proporre strumenti di supporto informatici sufficientemente semplici e al tempo stesso accurati, per consentire un utilizzo professionale consapevole e corretto.

Le linee guida seguite da AEDES si riassumono nei seguenti punti:

1. proporre modelli che rispettano la concezione originaria statico-architettonica delle strutture;
2. scegliere preferibilmente metodologie semplici e ripercorribili in altri luoghi (applicando algoritmi riproducibili senza necessità di un particolare software commerciale) e in altri tempi (l'analisi di un edificio monumentale deve essere comprensibile anche a distanza di molti anni, quando presumibilmente i mezzi informatici si saranno evoluti in nuove forme);
3. mantenere sotto controllo le varie fasi dell'analisi, che devono restare comprensibili in ogni aspetto;
4. dichiarare i limiti operativi dei metodi utilizzati;
5. confrontare costantemente le metodologie teoriche con la sperimentazione e con risultati ottenuti con modellazioni e calcoli alternativi: il confronto fra un modello semplice ed uno avanzato permette di definire concretamente il campo di applicabilità del metodo semplificato.

2. LA TEORIA

2.1. ARCHI: MODELLO A CONCI MURARI E GIUNTI

Il sistema conci murari-giunti si presenta particolarmente idoneo per la modellazione di archi all'interno di strutture complesse.

Secondo l'approccio di analisi limite, l'arco può essere in sé studiato come sistema rigido-fragile, operando a favore di sicurezza (si consulti anche la documentazione del software SAV-SVM © AEDES in cui l'arco semplice incastrato è schematizzato come insieme di conci rigidi collegati in ogni interfaccia da 3 bielle, 2 normali e una a taglio).

Tuttavia la generalizzazione di questo schema al caso di sistemi di archi presenta notevole difficoltà, ed in pratica esso non può essere usato in modo diretto nell'ambito di modelli complessi che, oltre agli archi, tengano conto anche delle strutture adiacenti o di imposta (muri, pilastri, sottostanti e sovrastanti). Nella formulazione originaria degli algoritmi di comportamento rigido-fragile delle strutture ad arco si prescinde dall'elasticità e quindi non è possibile eseguire analisi modali né tener conto della non linearità come variazione di vincolamento interno. In aggiunta, la formulazione piana non consente analisi fuori piano degli archi, causa l'insorgenza di labilità: è indispensabile, a tal fine, la creazione di un maggior numero di bielle d'interfaccia (al minimo, 8) per gestire correttamente gli sforzi normali nei vertici e i tagli nei due piani dell'interfaccia.

Questa serie di problematiche del metodo potrebbe essere superata attraverso una sua generalizzazione; tuttavia, le analisi agli elementi finiti rendono già disponibili tecniche analoghe, semplici nella loro impostazione, altrettanto efficaci e facilmente riproducibili.

In PC.E si utilizzano elementi "conci murari" e "giunti" (giunti di conci murari, o: giunti di malta).

I **conci murari** sono aste (elementi *beam*), di lunghezza pari a quella del concio.

I **giunti** sono aste incastro-cerniera che collegano i vertici dell'interfaccia del concio precedente a quelli corrispondenti del concio successivo, secondo lo schema illustrato in fig. 2.1.1.

L'incastrato fornisce continuità con l'interfaccia del concio precedente; la cerniera consente la trasmissione di taglio e sforzo normale. I giunti sono ricollegati al nodo di vertice del concio attraverso *links* rigidi, come rappresentato in fig. 2.1.1.

Le aste dei conci sono in materiale 'pietra'; quelle dei giunti, in 'malta'.

I conci hanno dimensioni fisiche corrispondenti agli effettivi tratti dell'arco; per ogni interfaccia ci sono 4 giunti, ognuno dei quali rappresenta quindi un quarto di volume (1/4 di area di interfaccia x lo spessore del giunto).

I *links* sono aste senza peso proprio, infinitamente rigide.

Questo sistema trasmette sforzo normale, taglio e momento fra un concio e l'altro.

Sottoposta la struttura ad analisi non lineare, ad ogni passo del procedimento incrementale, ogni elemento giunto viene sottoposto a verifica di sforzo normale: se si manifesta trazione, viene introdotto uno svincolamento interno a deformazione assiale che impedisce la trasmissione di sforzo normale e, contemporaneamente, una cerniera al vertice incastrato, in modo che l'elemento perda ogni rigidità: le azioni interne permangono da questo punto in poi stazionarie sul valore fin qui raggiunto.

Durante il proseguimento della procedura incrementale, il progressivo deterioramento dei giunti condurrà, ad un certo passo, ad una configurazione labile, che segna la fine del diagramma $F-\delta$.

Questa procedura, che presuppone la capacità di mantenere gli sforzi nel giunto dopo la sua degradazione vincolare (comportamento 'ductile'), ha la caratteristica di cogliere agevolmente una soluzione equilibrata e compatibile con le caratteristiche di resistenza del materiale. Essa può essere applicata con resistenza a trazione f_{tk} nulla oppure con resistenza a trazione finita: nel caso di f_{tk} nulla, è possibile un confronto diretto con la procedura rigido-fragile seguita in analisi limite (sono stati eseguiti confronti di verifica tra questa modellazione e i risultati ottenuti con il software SAV-SVM © AEDES). Con $f_{tk} > 0$ si conseguono ovviamente moltiplicatori di collasso superiori.

Le caratteristiche di resistenza del materiale 'malta' evidenziano la possibilità di fare riferimento ad una certa resistenza a trazione, evitando così sottostime della capacità antisismica della struttura.

Il sistema concio-giunto ha il grande vantaggio di essere definito attraverso l'utilizzo di soli elementi monodimensionali, quindi di fatto riproducibili con qualsiasi solutore tradizionale ad elementi finiti.

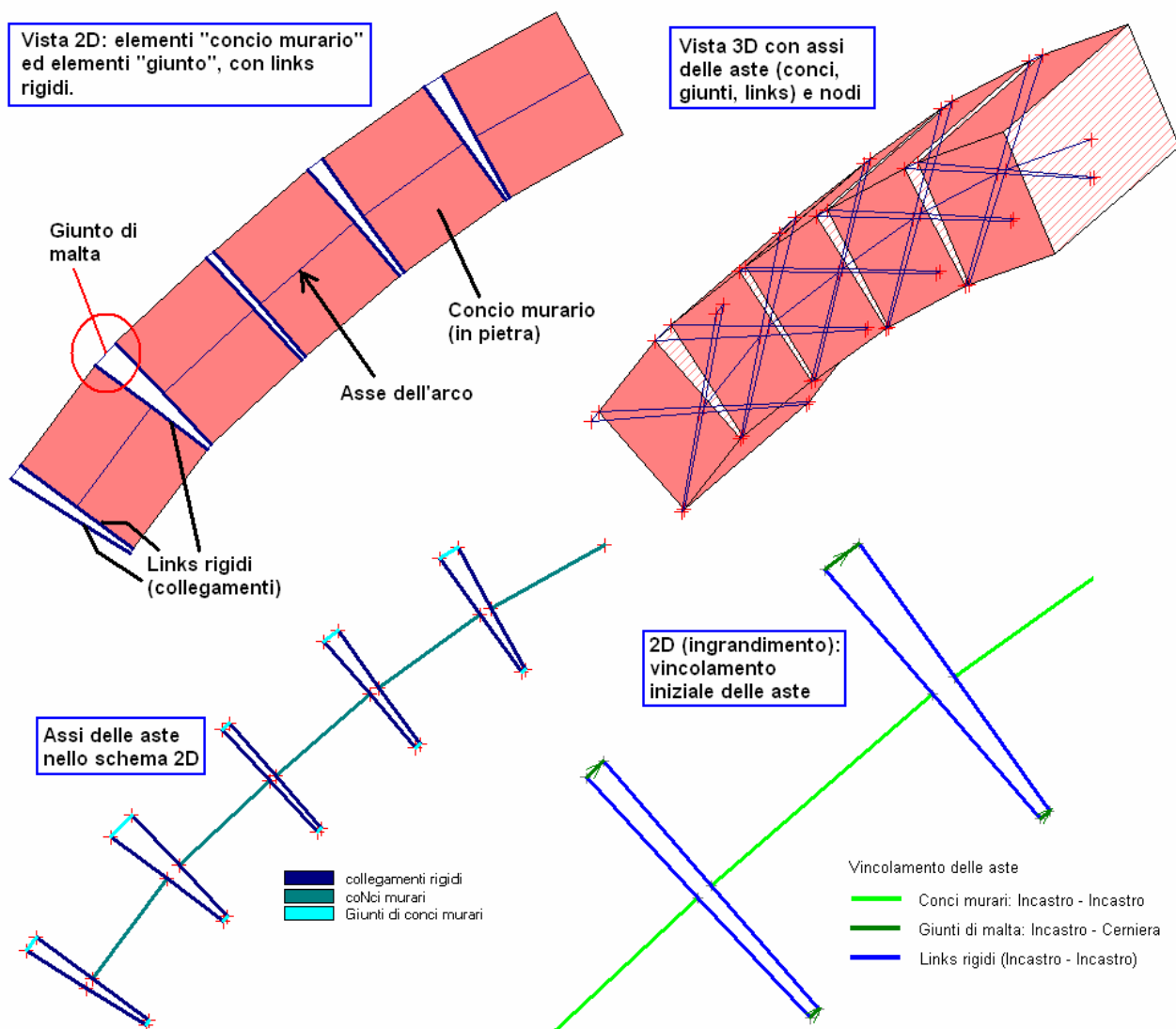


Fig. 2.1.1. Gli elementi finiti 'conci' e 'giunti'

Alcune osservazioni.

I. Se il sistema strutturale presenta giunti in trazione eccessiva, oltre il limite consentito (nullo o >0), sotto l'azione dei soli carichi statici, sarà comunque possibile intervenire direttamente sul modello iniziale modificando il vincolamento interno delle parti tese fin dall'inizio dell'analisi. Per particolari geometrie o sotto particolari carichi, è possibile che non esista una soluzione statica accettabile: evidentemente, ciò corrisponderebbe alla massima vulnerabilità, non essendo sostenibile teoricamente alcuna azione orizzontale sismica. Ma, al di là della situazione sismica, il problema in tal caso è di natura statica: di fronte a ciò, è necessario un intervento immediato anche nei confronti della normale agibilità della struttura.

II. Analogamente a quanto seguito in analisi limite (cfr. SAV-SVM © AEDES), la suddivisione in conci può essere fisica o matematica: le applicazioni dimostrano che la soluzione viene colta in maniera soddisfacente anche senza una suddivisione troppo fitta. La corrispondenza fra mesh e reali dimensioni dei conci potrà quindi essere effettiva o meno a seconda del contesto.

III. L'elevato valore del modulo di elasticità della pietra rispetto alla malta (un esempio: 75 volte superiore, assumendo per la pietra 50 000 MPa e per la malta 660 MPa) determina la concentrazione della deformabilità nei giunti, assimilando di fatto i conci a blocchi rigidi. In tal senso, nell'analisi strutturale i conci di pietra non vengono sottoposti a controllo di compressione. Viene invece eseguita la verifica a trazione, per assicurare valori di sollecitazione compatibili con il materiale. La dilatazione lineare dell'elemento monodimensionale corrispondente al conco è data da:

$$\Delta l = l_s - l_i$$

dove:

l_s = lunghezza sotto sollecitazione, determinata dalla distanza tra i due vertici iniziale e finale dell'asta rappresentativa del concio,

l_i = lunghezza indeformata originaria. La deformazione lineare (adimensionale) è data da:

$$\varepsilon = \Delta l / l_i$$

Qualora sia $\Delta l > 0$, il concio è in fase di allungamento, cui corrisponde una tensione di trazione valutabile con la relazione:

$$\sigma_{\text{traz}} = E \varepsilon$$

essendo E il modulo di elasticità longitudinale. Se la tensione di trazione risulta superiore alla resistenza a trazione della pietra, l'elemento concio subisce un degrado dei vincoli interni in modo analogo all'elemento giunto. Il degrado del concio può contribuire alla formazione del cinematismo, influenzando così sulla massima forza orizzontale F sostenibile dal sistema.

In PC.E gli elementi 'conci murari' e i 'giunti di malta' vengono contraddistinti rispettivamente dalle tipologie **N** e **J**. Agli elementi J appartiene anche la sotto-tipologia J.L relativa ad elementi che simulano i collegamenti delle lunette nelle volte a crociera: in questo caso si tratta di aste aventi pura funzione di collegamento fra gli archi diagonali.

L'analisi non lineare applicata ai sistemi giunti-conci consiste nel determinare il moltiplicatore di collasso, seguendo le **metodologie applicate nella verifica delle strutture monumentali**. Quest'analisi svolge lo stesso ruolo dell'analisi cinematica; il moltiplicatore di collasso viene ricercato non come il minimo moltiplicatore cinematico, ma come il massimo moltiplicatore statico.

La seconda fase dell'analisi consisterà nell'applicare alla struttura la procedura di verifica di sicurezza prevista nella circolare 617/2009 attuativa del DM del 14 gennaio 2008 (analisi dei meccanismi locali di collasso in edifici esistenti in muratura).

La modellazione di strutture voltate contenenti elementi N e J viene agevolmente condotta importando dati di nodi e aste da file DXF. La procedura è descritta in [3.1].

2.2. PILASTRI DI MURATURA

I pilastri vengono rappresentati da elementi *beam* corrispondenti ai conci.

Per ogni concio, ad ogni passo si esegue il controllo di compressione, attraverso la posizione della curva delle pressioni. Se essa fuoriesce dalla sagoma della sezione, la configurazione statica non è più accettabile, e si ritiene che sia stato raggiunto il massimo valore di forza orizzontale sostenibile.

Per gli edifici monumentali, questa tipologia può essere applicata ad esempio nelle chiese, a grandi pilastri a sostegno di navate.

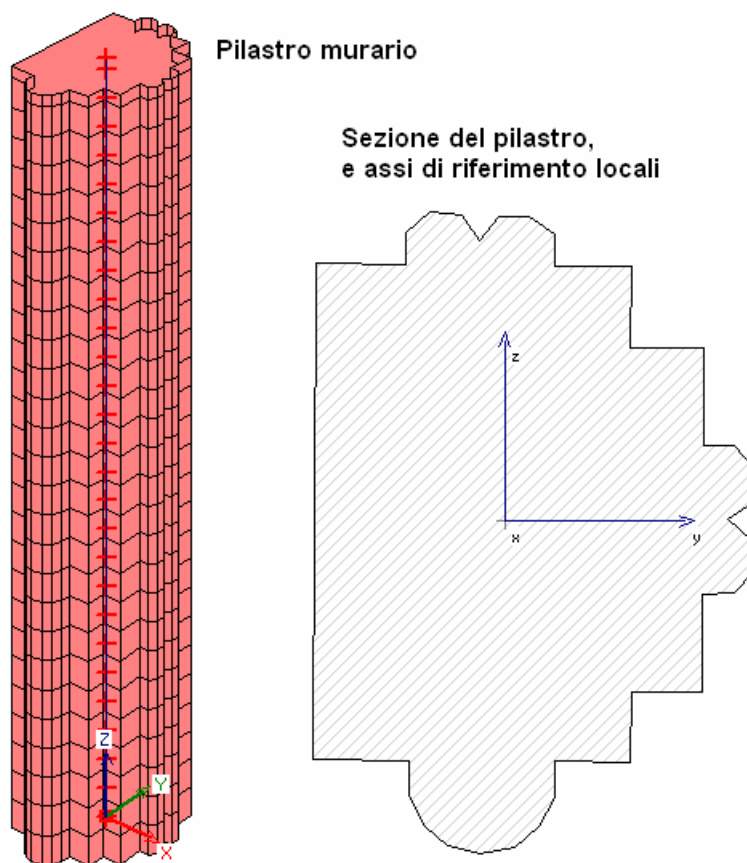


Fig. 2.2.1. L'elemento 'pilastro murario'

Un punto importante riguarda il materiale da considerarsi per questa tipologia: non è idoneo adottare direttamente le proprietà della pietra. A causa della suddivisione in conci, infatti, si forma un comportamento d'insieme simile alla muratura. Tuttavia, spesso si rilevano grandi blocchi di pietra con sottili sigilli di malta di ottima qualità, il che suggerisce che le proprietà siano poco ridotte rispetto quelle della sola pietra.

E' possibile condurre uno studio particolareggiato sul singolo pilastro, considerando elementi "conci murari" e "giunti", in modo da definire un modulo di elasticità appropriato.

Ovviamente, alla stregua degli archi, il pilastro potrebbe essere modellato col sistema conci-giunti: definendo tuttavia gli appositi elementi *beam*, la modellazione si semplifica e resta comunque adeguatamente definita la verifica a pressoflessione del pilastro. La differenza tipologica fra arco e pilastro giustifica la diversa scelta nella modellazione. La verifica dell'elemento 'pilastro murario' può essere arricchita dal controllo a taglio per attrito: definito il coefficiente d'attrito f , il taglio non può superare fN , dove N è lo sforzo normale.

Le sezioni degli elementi *beam* di tipo poligonale, cioè non direttamente riferibile a una geometria semplice (come ad esempio nel caso del pilastro crociato), devono essere studiate preventivamente con la Geometria delle Masse, per calcolarne i corretti parametri statici (area, inerzia, assi principali, ellisse e nocciolo d'inerzia). Conoscendo la posizione del nocciolo d'inerzia, sarebbe possibile anche imporre la completa compressione del pilastro, verificando che la curva delle pressioni sia interna al nocciolo. Tuttavia, nello spirito della teoria di Heyman (cfr. SAV-SVM © AEDES), si prescinde dall'effettiva distribuzione delle tensioni, che non ha interesse dal momento che la crisi è raggiunta per perdita di stabilità e non per superamento della resistenza a compressione. Viene accettata anche l'esistenza di una zona non reagente, purché la curva delle pressioni sia interna al contorno della sezione (e non al nocciolo d'inerzia).

In PC.E l'elemento 'pilastro murario' viene contraddistinto dalla tipologia **P**.

Analogamente alle strutture conci-giunti, l'analisi non lineare consiste nel determinare il moltiplicatore di collasso, seguendo le **metodologie applicate nella verifica delle strutture monumentali**. Quest'analisi svolge lo stesso ruolo dell'analisi cinematica; il moltiplicatore di collasso viene ricercato non come il minimo moltiplicatore cinematico, ma come il massimo moltiplicatore statico.

La seconda fase dell'analisi consisterà nell'applicare alla struttura la procedura di verifica di sicurezza prevista in §C8A.4 (analisi dei meccanismi locali di collasso in edifici esistenti in muratura).

L'analisi incrementale procede verificando la posizione della curva delle pressioni: quando questa diviene esterna alla sezione (ed è per questo che ha importanza fondamentale la gestione di sezioni poligonali qualunque, per accertare appunto la fuoriuscita o meno del poligono funicolare dalla sagoma), nel nodo corrispondente si forma una cerniera di annullamento del momento.

E' possibile che già alla prima cerniera corrisponda l'insorgenza di una labilità.

Il controllo viene eseguito fin dalla risoluzione statica (spinte di volte potrebbero rendere già impossibile risolvere la struttura per soli carichi statici).

Viene sottoposto a verifica ogni elemento a tipologia **P** che sia da verificare (parametro **Verif.:** ☒), e per il quale sia attiva la verifica a pressoflessione complanare (**PressoFl. Compl.:** ☒). Non ha invece alcuna importanza il parametro generale dedicato alla verifica a Pressoflessione Complanare (destinato ai maschi murari degli edifici in muratura: Verifiche di Resistenza, scheda Muratura (2), Parametri di Calcolo). Se per l'elemento **P** è attiva anche la verifica a **taglio per scorrimento**, il pilastro murario viene verificato anche ad attrito: il caso di superamento del limite in attrito comporta lo svincolamento a taglio. Anche per questo, non ha importanza il parametro generale relativo al Taglio per Scorrimento presente nei Parametri di Calcolo (Muratura (2)). Come coefficiente d'attrito, viene usato il corrispondente valore specificato nei materiali (in genere $0.70 = \tan(35^\circ)$; 0.4 è il valore normalmente adottato per le verifiche a taglio per scorrimento per i maschi murari).

La pressoflessione alla Heyman non prevede la differenziazione fra complanare e ortogonale: il punto d'applicazione dello sforzo normale (punto dove passa la curva delle pressioni) è calcolato tenendo conto dei due momenti, sia complanare sia ortogonale.

Pertanto, il fatto che ad un vertice (i o j) la verifica non sia soddisfatta (punto esterno alla sezione) implica che tale sezione venga immediatamente svincolata con una cerniera, e che si riparta con la curva successiva (seguendo la metodologia adottata da PC.E per l'analisi non lineare: cfr. Manuale di PC.E, Vol.1: Teoria).

Tale svincolamento viene anche applicato nel caso che non sia soddisfatta la verifica ad attrito (per non svolgerla, è sufficiente che non sia attivata la Verifica a Taglio per Scorrimento). Anche per la verifica ad attrito non esiste un taglio complanare distinto dall'ortogonale, ma un taglio complessivamente agente dato dalla composizione dei due tagli complanare e ortogonale.

Gli elementi **P** che risultano svincolati ad entrambi gli estremi, sono qualificati come 'collassati'.

I pilastri murari non sempre hanno sezione a geometria notevole (rettangolare o circolare): quando la sezione trasversale è poligonale, occorre definirla attraverso la specifica dei vertici del contorno della sezione stessa, come descritto nel paragrafo seguente. I conci di un pilastro, che sono visti nel modello come singole aste, possono anche avere sezioni diverse in modo da descrivere pilastri con sezione variabile lungo l'altezza: un caso di questo tipo è studiato nell'esempio proposto in [3.2], dove pur avendo il pilastro sezione circolare (che quindi non richiede la definizione di una poligonale) questa cambia lungo l'altezza, allargandosi alla base e in sommità.

2.3. SEZIONI QUALUNQUE DI TIPO POLIGONALE

Per le verifiche a pressoflessione di pilastri murari a tipologia "P", effettuate secondo la teoria di Heyman, può essere necessario definire una **sezione poligonale qualsiasi**.

La retta d'azione dello sforzo normale non deve uscire dal contorno della sezione: è quindi importante studiare il comportamento della struttura specificando le reali dimensioni della sezione (e non per esempio una sezione rettangolare o circolare più o meno 'equivalente').

Il calcolo dei parametri statici corrispondenti è automaticamente eseguito da PC.E.

La sezione viene letta dal corrispondente file di testo (ASCII) *NomeSezione.sez* creato ad esempio con NotePad o BloccoNote e collocato in:

Aedes2012\Pce\Progetti\NomeProgetto

Il file è così organizzato:

nella prima riga è specificato il numero di vertici; ognuna delle righe successive (tante quanti i vertici) è del tipo: *i,Yi,Zi* dove: *i* = numero progressivo del vertice; *Yi, Zi* = coordinate Y e Z del vertice. I vertici sono orientati in senso orario, in un sistema di riferimento YZ destrorso ortogonale (non necessariamente baricentrico) nel piano della sezione (l'asse X si intende sempre coincidente con l'asse longitudinale dell'elemento strutturale, e quindi ortogonale al piano della sezione trasversale). Le coordinate Y e Z riferite al piano di sezione YZ sono separate in ogni riga da una virgola ed espresse in cm.

Affinché PC.E possa rileggere la sezione dal corrispondente file di testo, bisogna inserire una nuova riga nella tabella Dati Sezioni e indicare nella descrizione il nome del file, racchiudendolo tra i caratteri < e > (senza estensione .sez).

L'esempio di fig. 2.3.2 illustra la sezione qualunque poligonale di un pilastro murario di fig. 2.3.1, calcolata con CSE (modulo di PC.S © AEDES). L'utilizzo di CSE è riportato a titolo di esempio per illustrare le convenzioni di definizione della sezione; ai fini di PC.E è sufficiente che esista il file .sez suddetto, che ad esempio in questo caso sarà composto come in fig. 2.3.3.

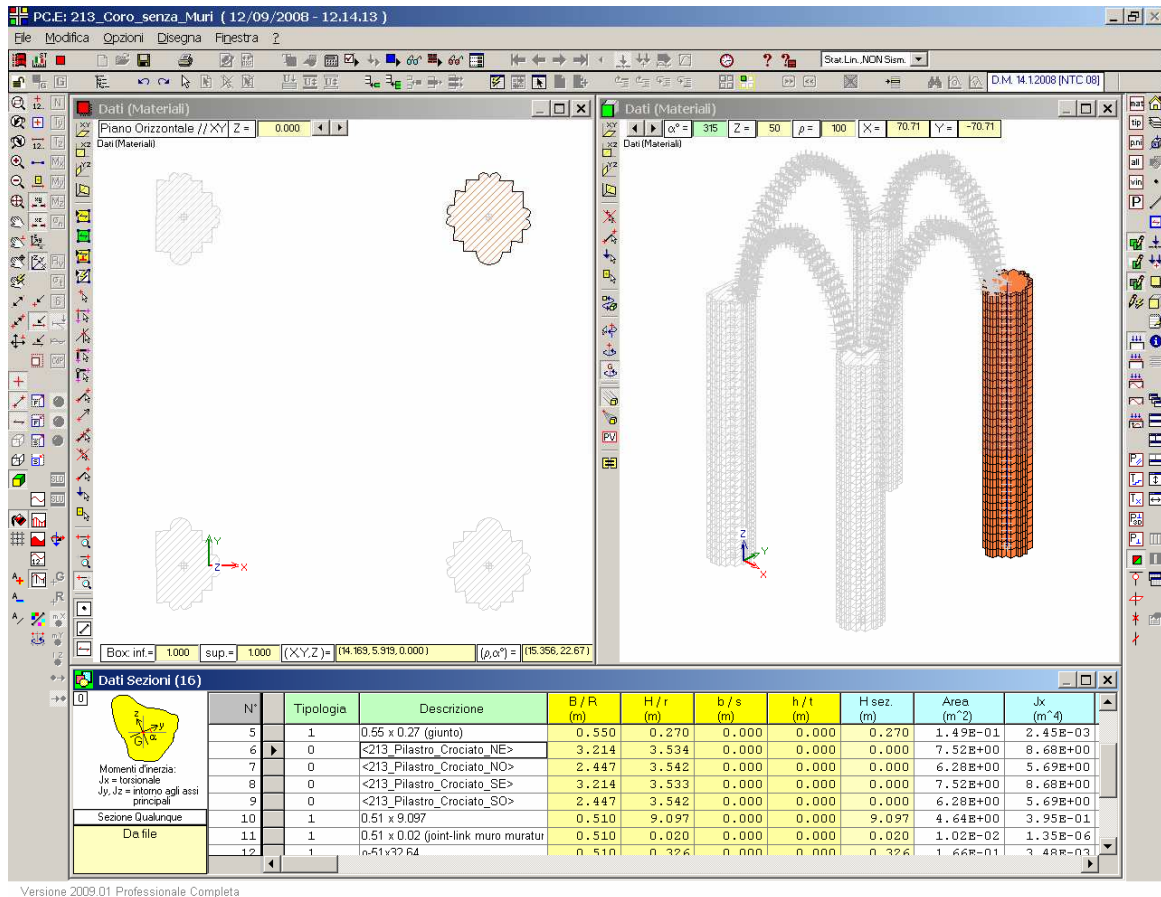


Fig. 2.3.1. Esempio applicativo di sezione poligonale qualsiasi, definita per punti

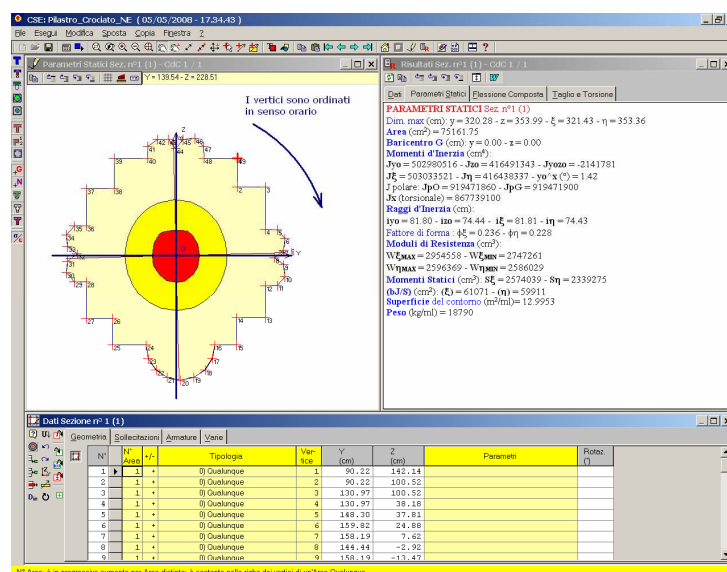



Fig. 2.3.2. Sezione di esempio in CSE (PC.S © AEDES)

```

49
1,90.2223,142.1358
2,90.2223,100.5242
3,130.9731,100.5242
4,130.9731,38.17677
5,148.2969,37.81318
6,159.8231,24.87513
7,158.1914,7.624507
8,144.4437,-2.922875
9,158.1914,-13.47026
10,159.8231,-30.72088
11,148.2969,-43.65894
12,130.9731,-44.02251
13,130.9731,-91.71878
14,88.77827,-91.71878
15,88.77827,-131.8695
16,56.80745,-131.8695
17,53.24312,-151.3672
18,42.41489,-167.9687
19,26.00823,-179.09
20,6.576972,-183
21,-12.85429,-179.09
22,-29.26094,-167.9687
23,-40.6027,-151.7257
24,-43.65351,-131.8695
25,-92.8454,-131.8695
26,-92.8454,-93.09272
27,-131.61,-93.09272
28,-131.61,-38.60241
29,-148.9338,-38.23883
30,-160.46,-25.30077
31,-158.8282,-8.050147
32,-145.0806,2.497235
33,-158.8282,13.04462
34,-160.46,30.29524
35,-148.9338,43.2333
36,-131.61,43.59687
37,-131.61,97.26161
38,-90.88921,97.26161
39,-90.88921,142.1358
40,-41.41808,142.1358
41,-41.05449,159.4597
42,-27.02006,169.4449
43,-10.86582,169.3541
44,-.3184335,155.6064
45,10.22895,169.3541
46,27.47957,170.9859
47,40.41763,159.4597
48,40.78121,142.1358
49,90.2223,142.1358

```

Fig. 2.3.3. Struttura del file ASCII contenente la sezione poligonale

 **Suggerimento** Un file di questo tipo può facilmente essere composto esaminando su CAD la sezione trasversale poligonale dell'elemento strutturale, e rilevando le coordinate della polilinea che la definisce. ■

Mentre per le sezioni qualunque non poligonali i parametri statici sono inseriti in input, per le sezioni qualunque poligonali algoritmi interni di PC.E provvedono all'elaborazione dei calcoli di geometria delle masse, con valutazione automatica dei parametri statici (aree, inerzie, angolo asse principale).

3. ESEMPI GUIDATI

In questo esempio si considera parte del macroelemento riportato in figura. Si tratta di una cupola in muratura con tamburo circolare che si imposta, tramite dei pennacchi sferici, su quattro archi a sesto acuto. Gli archi scaricano su colonne circolari. Per semplicità, si studiano i quattro archi e le colonne, considerando il resto come carico.

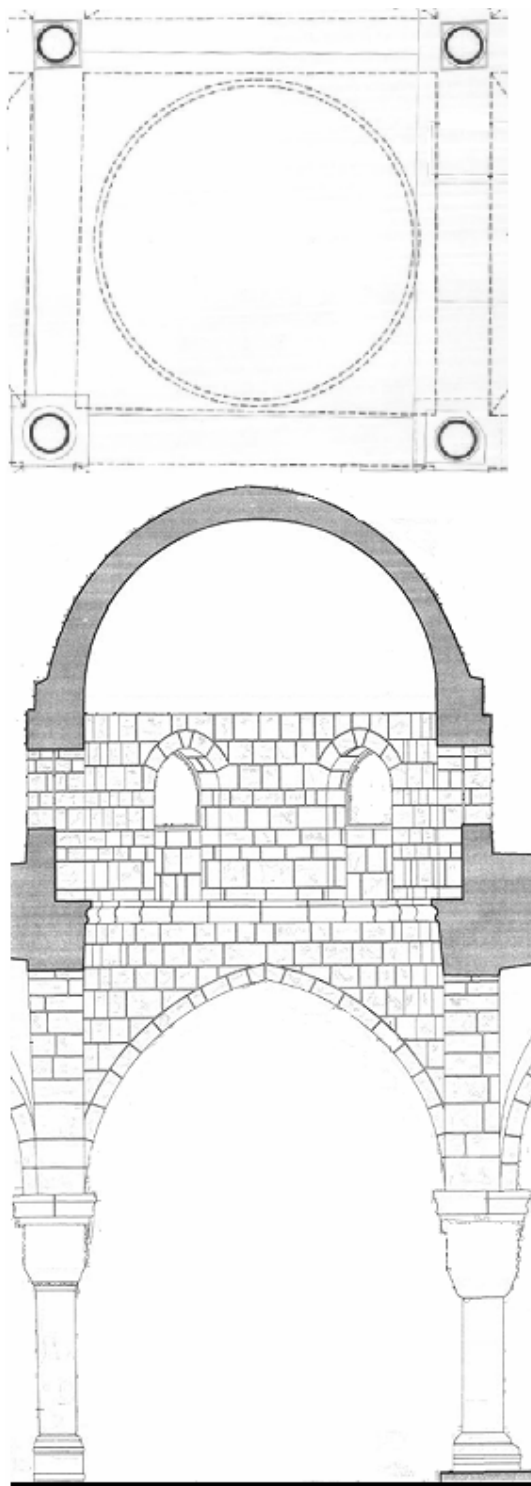


Fig. 3.1. Pianta e sezione

in [3.1] viene descritto l'input dei dati e l'analisi di uno dei singoli archi piani: attraverso l'apprendimento di questo esempio sarà così possibile affrontare casi generici di archi in muratura.

In [3.2] viene studiato complessivamente il macroelemento formato dalle quattro colonne e dai quattro archi che scaricano su di esse.

3.1. ARCO PIANO

3.1.1. INPUT DATI DEGLI ARCHI DA CAD

Come primo passo in ambiente CAD si importa il file immagine e si imposta come sfondo su cui costruire le linee di costruzione. Scegliamo come unità di misura il metro.

Partendo dall'imposta dell'arco si disegnano delle linee parallele ad interasse costante, ad esempio 0.50 m. Si tratta delle linee magenta in figura.

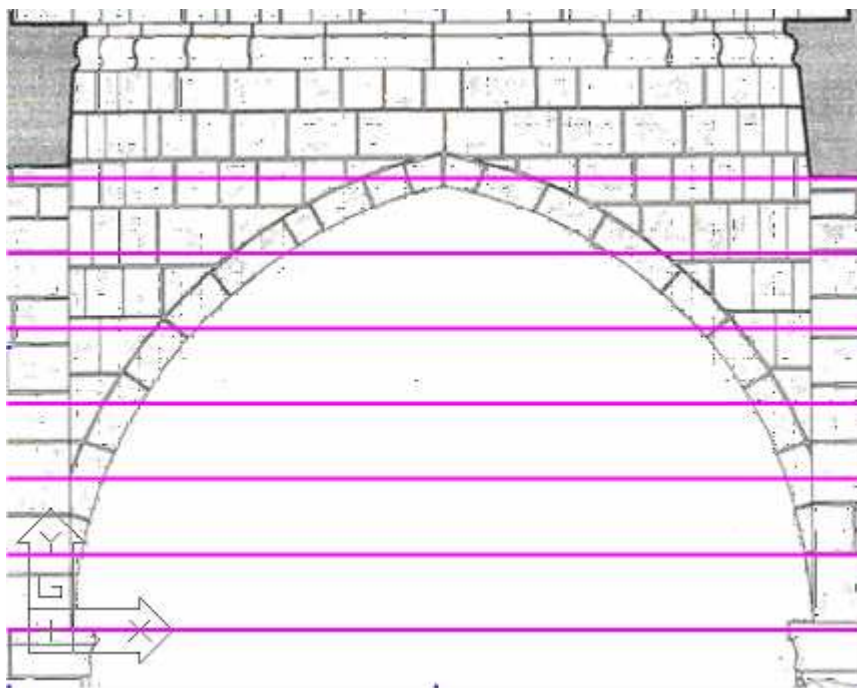


Fig. 3.1.1.

Si disegna l'intradosso dell'arco, tramite una linea spezzata che unisce i punti di intersezione tra la linea di intradosso dell'arco e le linee parallele.

Mediante offset si realizzano due archi paralleli a quello di intradosso: quello dell'asse dell'arco e quello di intradosso. In questo caso lo spessore dell'arco è di 22 cm e quindi i tre archi distano l'uno dall'altro 11 cm. L'asse dell'arco, in blu in figura, sarà posizionato sul layer ASTE, i profili di intradosso e di estradosso devono essere posti su un layer qualsiasi purché diverso dai layer ASTE e NODI che useremo in seguito.

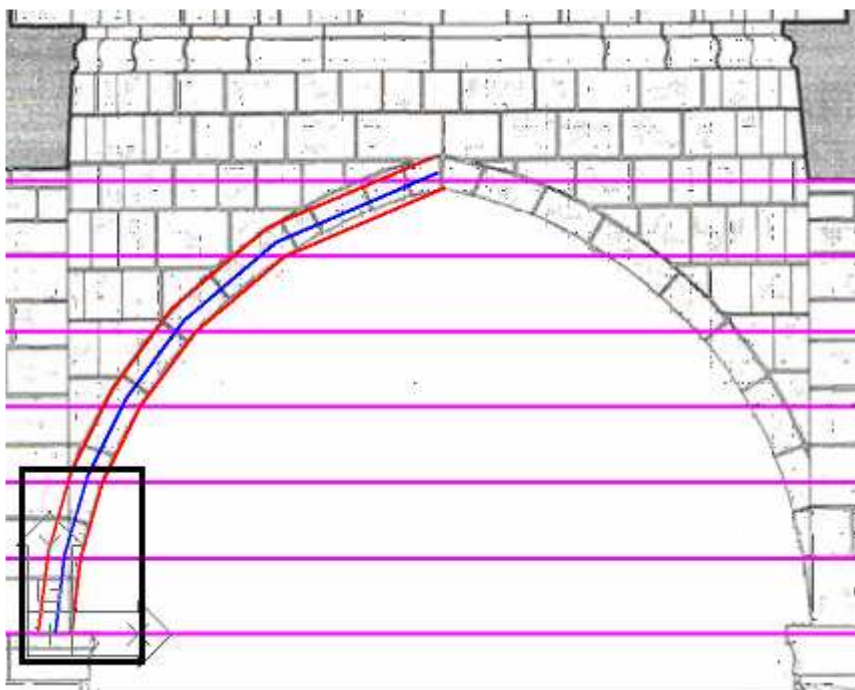


Fig. 3.1.2.

In ogni punto di intersezione tra la spezzata dell'intradosso e le linee orizzontali di costruzione, si disegna una circonferenza di raggio pari ad 1 cm.

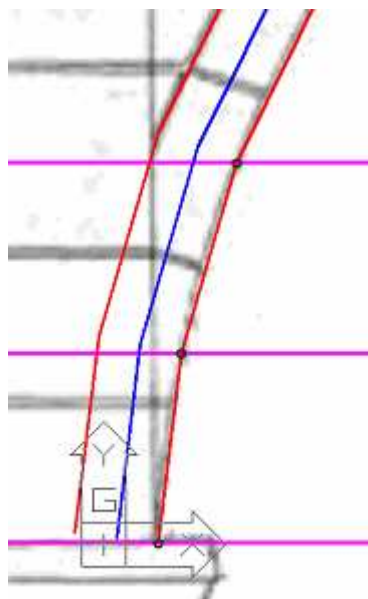


Fig. 3.1.3.

Dai due punti di intersezione di ogni cerchio con la linea di intradosso si disegnano due linee ortogonali alla linea d'asse dell'arco.

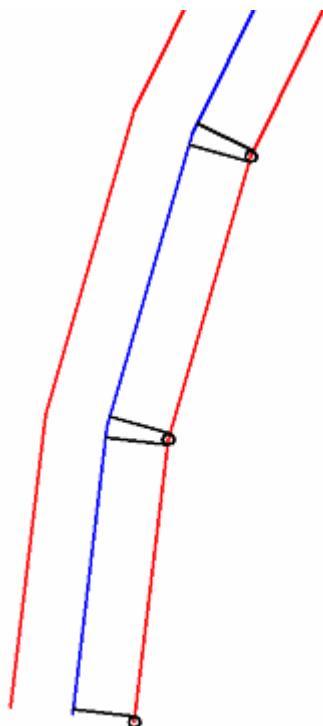


Fig. 3.1.4.

Si eliminano i tratti della linea d'asse individuati dalle linee appena tracciate, così che la linea d'asse venga suddivisa in tanti segmenti.

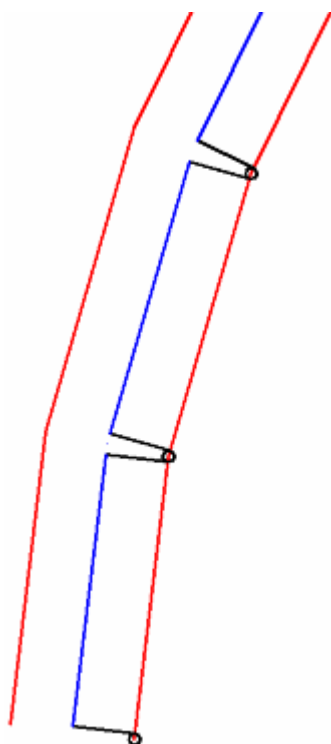
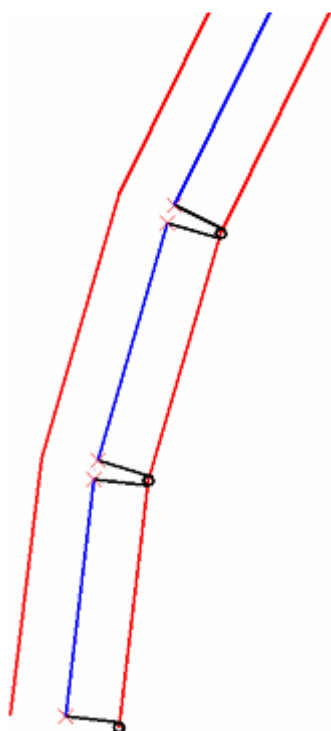
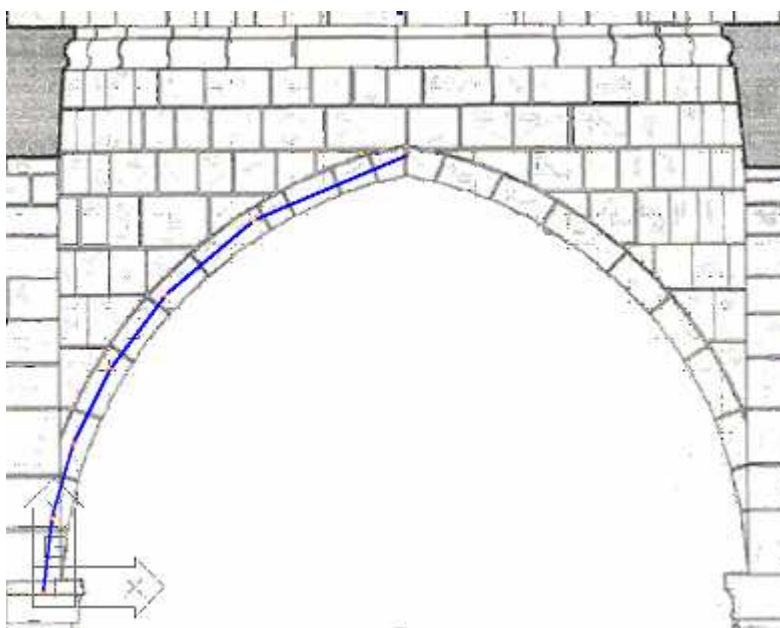


Fig. 3.1.5.

All'estremità dei segmenti si disegnano dei nodi, che devono appartenere al layer NODI. È importante partire dal punto più in basso all'imposta per salire in ordine fino alla chiave dell'arco.

**Fig. 3.1.6.**

L'arco deve avere il punto più in basso all'imposta coincidente con la vera origine degli assi. Bisogna assicurarsi di lavorare nelle coordinate globali. Se così non fosse, si deve traslare opportunamente l'arco.

**Fig. 3.1.7.**

A questo punto la fase preparatoria in CAD è terminata. Abbiamo tutti gli elementi per eseguire l'importazione in PCE: i segmenti dell'asse dell'arco (in blu) appartengono al layer ASTE, i nodi di estremità appartengono al layer NODI (in rosso). Il file deve essere salvato in formato dxf; l'esempio ha nome: TM_ARCO.dxf.

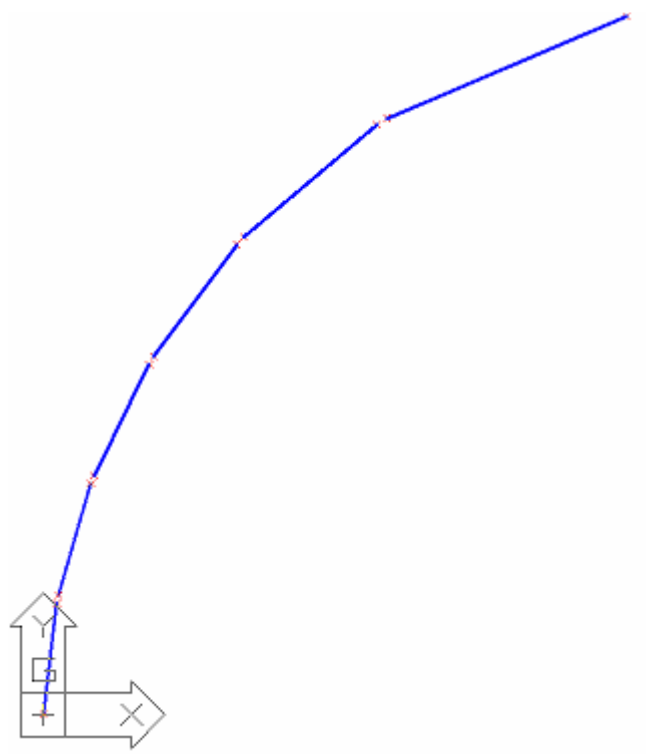


Fig. 3.1.8.

3.1.2 INPUT DATI DEGLI ARCHI IN PC.E

Il file "TM_ARCO.dxf" deve essere inserito nella cartella Progetti di PC.E.

Aperto PC.E: menu Esegui, Importazioni..., Importa Nodi e Aste da DXF: su piano verticale XZ". Se si è utilizzata come unità di misura il metro alla richiesta del moltiplicatore delle unità di misura possiamo confermare il coefficiente proposto, pari ad 1 m, altrimenti si introdurrà il fattore di scala opportuno.

È stato creato un arco con la divisione in conci indicata. Utilizzando il comando "Disegna superfici" della barra strumenti laterale sinistra, è possibile vedere come la struttura ricalchi esattamente quanto introdotto in CAD: sono presenti 12 nodi e 6 aste. Ai conci deve essere assegnata la tipologia N nei Dati Aste. Per questo è sufficiente selezionarli graficamente, cambiare tipologia ad uno di essi nei Dati Aste e utilizzare il comando di Unifica Selezione della barra degli strumenti orizzontale.

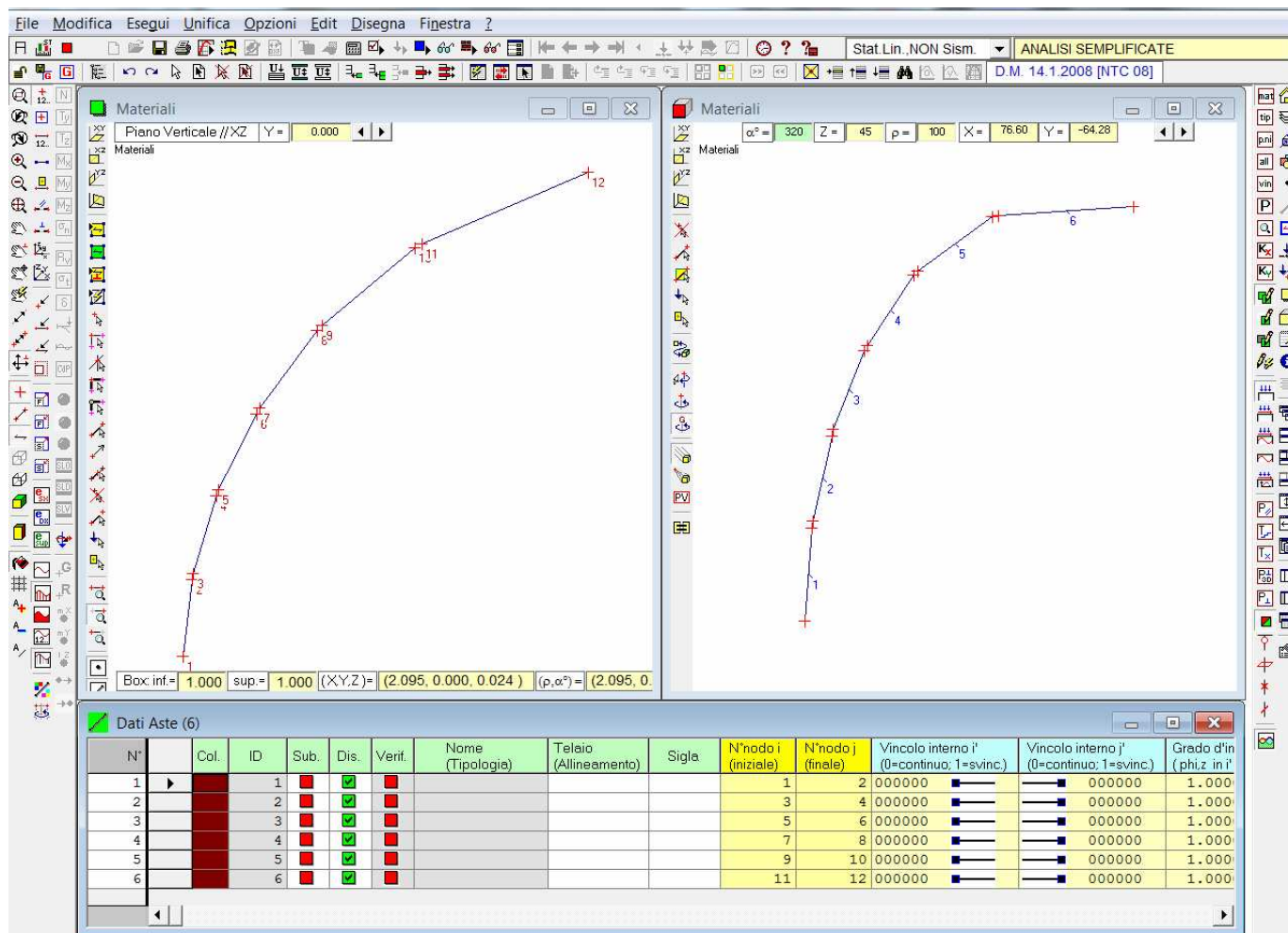


Fig. 3.1.9.

Fra i comandi della finestra grafica 2D, ricordiamo che cambiando i valori di Box inf. e sup. è possibile selezionare la parte del modello visibile in sezione.

Le **sezioni** dei conci sono state introdotte dal programma con dimensioni preimpostate, pertanto devono essere cambiate. Aprendo la finestra Dati Sezioni, possiamo modificare le dimensioni e la descrizione. Nel nostro caso ci sono sezioni 80x22 cm, aventi cioè larghezza in pianta $B = 0.80$ m e altezza $H = 0.22$ m.

3. Esempi guidati

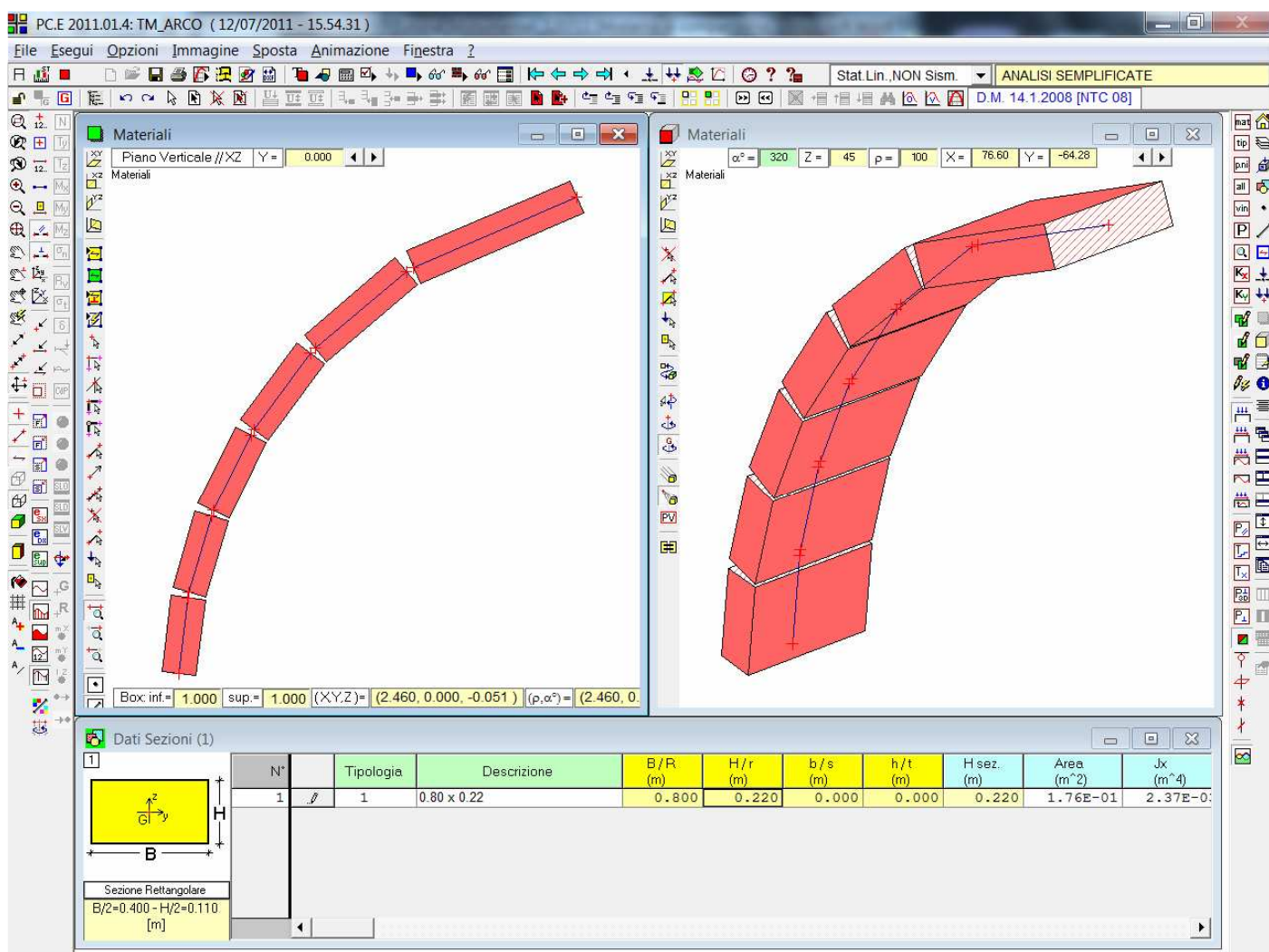




Fig. 3.1.10

Anche il materiale presente è preimpostato. Si apre quindi la finestra Dati Materiali . Al posto del materiale n. 3 "Muratura in mattoni pieni e malta di calce" inseriamo: "Muratura: blocchi di pietra". Basta cambiare la descrizione e introdurre i valori e le caratteristiche riportate qui di seguito (unità di misura utilizzate nell'esempio: kgf/cm², Sistema Tecnico):



Dati Materiali (3)															
N°	Col.	Tip	Descrizione [parametri meccanici in:]	Tipol	E	G	f.m	fvm (mur.nuove)	f.td malta	f.td muratura: fessuraz diag.	f.hm	Duttilità (du / de)	Coeff. attrito	Coeff. dilataz. termica (°-1)	Peso sp. (kgf/m³)
3		3	Muratura: blocchi di pietra	5	500000	200000	350.0	35.00	0.00	35.00	350.0	1.50	0.40	0.000006	2600

Fig. 3.1.11

Inoltre si deve definire un nuovo materiale, quello relativo ai giunti di malta. Per crearlo si utilizza il comando Aggiungi Materiale  (barra strumenti superiore) e si introducono i valori mostrati in tabella di figura seguente:

Dati Materiali (4) - Edificio Esistente: Livello di Conoscenza: LC2															
N°	Col.	Tipol.	Descrizione [parametri meccanici in:]	Tipo	E	G	f,m	f,vmo (mur.nuov)	f,td malta	f,td muratura: fessuraz.diag	t,hm	Duttilità (du / de)	Coeff. attrito	Coeff. dilataz. termica (°C-1)	Peso sp. (kg/m³)
4		3	Muratura: giunti di malta	6	6600	2640	25.0	2.50	2.50	0.00	12.5	1.50	0.40	0.000006	1800

Fig. 3.1.12

Adesso dobbiamo occuparci dei **collegamenti**: per crearli è sufficiente aprire la finestra Dati Progetto  e dal menu Esegui scegliere il comando "Creazione Giunti di collegamento...". In questa schematizzazione il collegamento viene realizzato tramite 4 elementi J (giunti di conci murari) vincolati con un incastro ad un estremo (000000) e una cerniera all'altro (000111). Tale tipologia di vincolamento è evidenziata in verde scuro nella visualizzazione vincolamenti "vin"  (barra strumenti laterale destra). I 4 elementi J sono collegati ai nodi del concio tramite 4 aste rigide disposte a croce di Sant'Andrea. Le aste rigide, incastrate ad entrambe gli estremi sono blu scuro. Le aste del concio sono anch'esse incastrate alle estremità, sono colorate in verde chiaro per evidenziare il fatto che non sono semplici link (collegamenti), ma aste con una sezione geometrica definita. La legenda riassume il significato dei colori (la legenda è apribile tramite la prima colonna da destra, al centro).

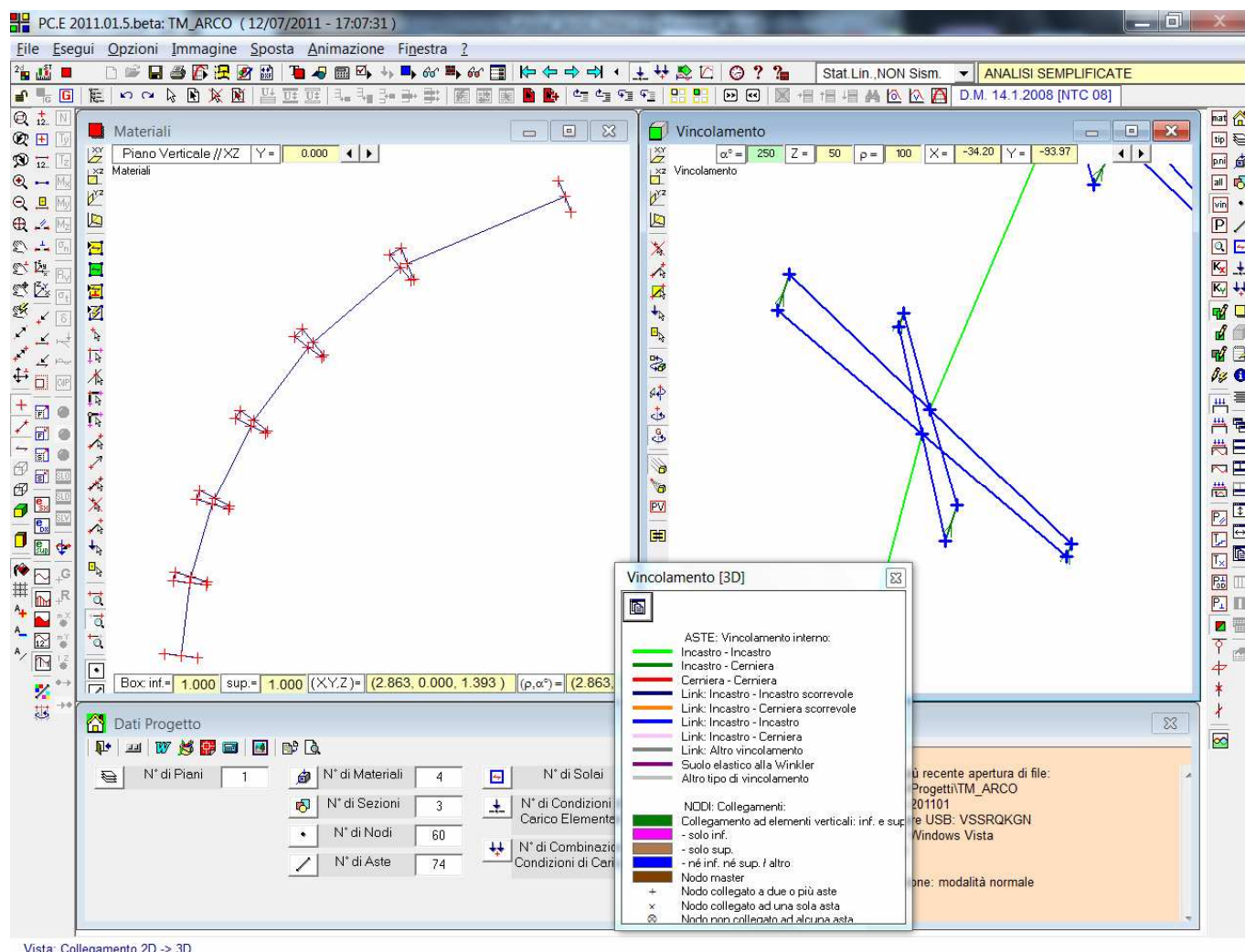



Fig. 3.1.13

Nei Dati Aste fissiamo l'attenzione sugli elementi giunto (J): sono gli ultimi elementi aggiunti. Agli elementi J, deve essere assegnato il materiale 4, relativo ai giunti di malta. Si procede nel seguente modo:

- nei Dati Aste selezionare una riga di un elemento J
- menu Modifica, comando Seleziona/Deseleziona...  nella barra strumenti superiore)
- selezionare: Tipologia corrente: così tutti e soli gli elementi J sono selezionati.

- modificare il materiale di uno di essi, nei dati aste, specificando il 4
- premere il comando unifica selezione.

Si può constatare che la sezione degli elementi J è la dimensione del giunto 0.400 x 0.110 m (pari ad un quarto della sezione).

I **pesi** propri dei conci e dei giunti vengono computati direttamente dal software: Dati CCE (condizioni di carico elementari); menu Carichi; comando "Pesi propri: aggiungi Condizione di Carico".

Oltre il peso proprio dobbiamo considerare:

- *Il peso proprio del muro sovrastante l'arco*: sull'arco insiste direttamente un muro dello stesso spessore dell'arco. Per ogni concio dobbiamo inserire la quota parte del carico spettante a ciascuno.
- *Il peso proprio dei pennacchi sferici* su cui si imposta la cupola: per ogni concio dobbiamo mettere in conto la parte di peso proprio dei pennacchi sferici che insiste su ogni concio.
- *Il peso proprio della cupola*.

Conviene fare uno schema dove per ogni condizione di carico si riporta il carico al metro lineare da assegnare ad ogni concio (il concio n. 1 è il più basso, il n. 6 quello in chiave):

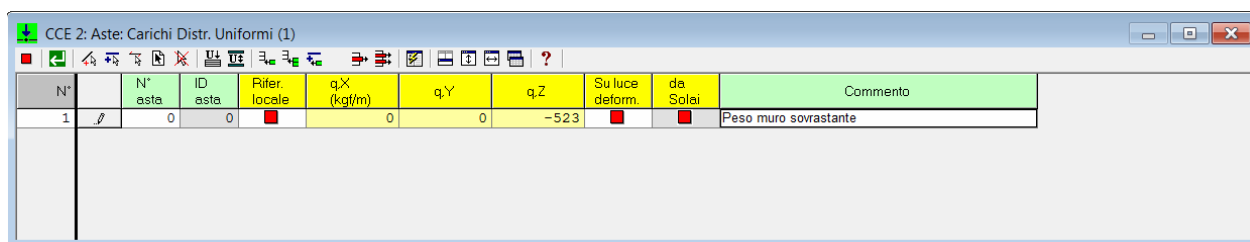
TM_ARCO			
Concio n°	Peso muro sovrastante	Peso pennacchi e tamburo	Peso cupola
1	523	0	5280
2	3109	83	5280
3	2808	1505	5280
4	2943	2931	5280
5	2730	1163	5280
6	2240	510	5280

Fig. 3.1.14

Adesso in PC.E selezioniamo i sei elementi concio (1,2,..) che costituiscono l'asse.

Apriamo le condizioni di carico elementari (CCE), aggiungiamo 3 righe (☚ nella barra strumenti superiore), e attribuiamo i seguenti nomi alle nuove CCE: "Peso muro sovrastante" (CCE 2), "Peso pennacchi e tamburo" (CCE 3); "Peso cupola" (CCE 4).

Si selezionino adesso i 6 elementi concio (attenzione a selezionare solo essi e non i giunti); nei Dati CCE, in corrispondenza della seconda riga (CCE 2, relativa al riempimento) si faccia doppio clic sulla casella "Aste: Carichi Distr. Uniformi". Si apre una nuova tabella, in corrispondenza di qZ introduciamo il valore del carico lineare del primo concio -523 kgf/m, aggiungendo come Commento: "Peso muro sovrastante".



N°	N° asta	ID asta	Rifer. locale	qX (kgf/m)	qY	qZ	Su luce deform.	da Solai	Commento
1	0	0		0	0	-523			Peso muro sovrastante

Fig. 3.1.15

Clic su "aggiungi carico ad elementi selezionati" (☚ nella barra strumenti); confermare con clic sulla freccia bianca in campo verde (☚).

A questo punto per ogni concio introduciamo il valore presente in tabella relativo al peso del muro sovrastante. Alla fine confermiamo di nuovo (☚) e chiudiamo la finestra Carichi.

Con i comandi "Mostra tutti i carichi" (☚) e "Diagrammi: Mostra valori" (☚) (barra strumenti laterale sinistra) è possibile controllare i carichi immessi.

3. Esempi guidati

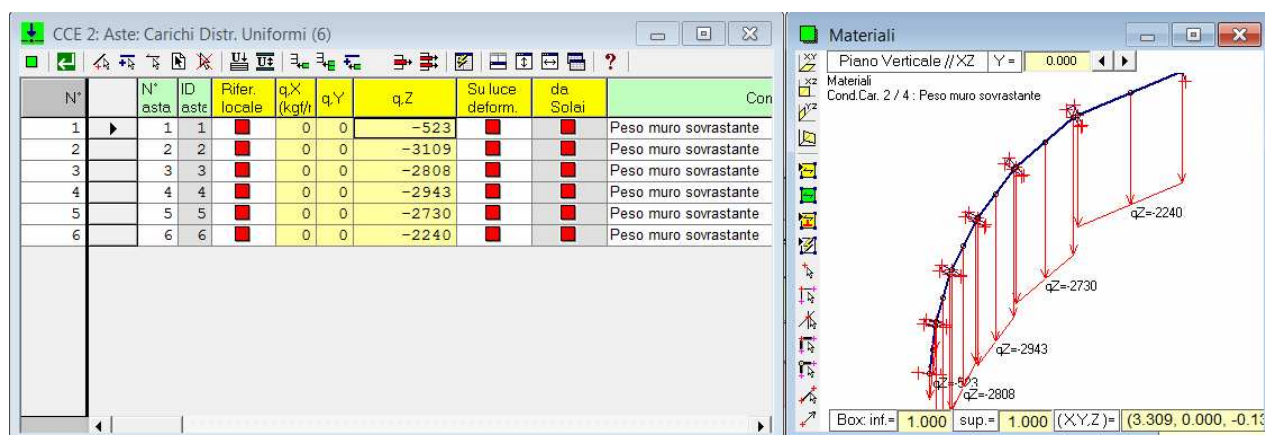


Fig. 3.1.16

Si seguirà una procedura analoga per i carichi da pennacchi e tamburo e per quelli della cupola. Nelle viste 2D e 3D, si scorrono le 3 Condizioni di carico elementari mediante le frecce azzurre poste nella barra orizzontale in alto (cfr. figura seguente).

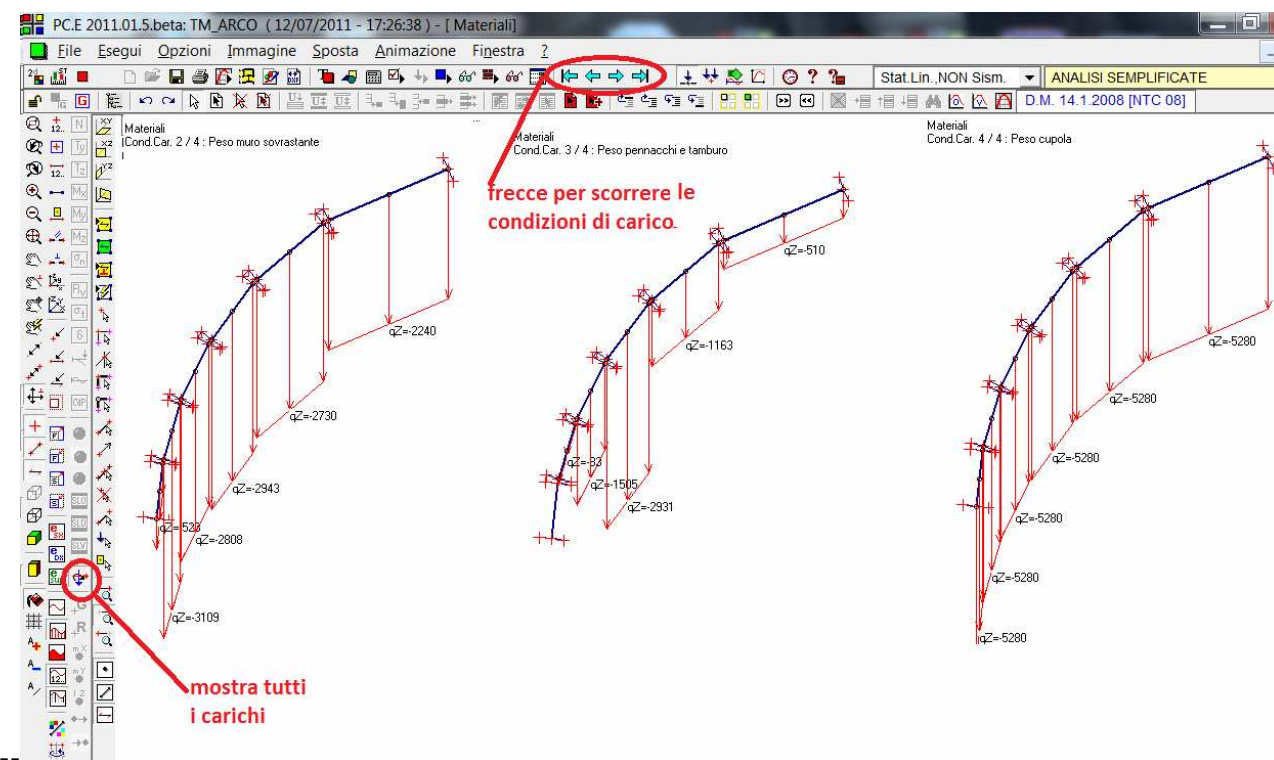


Fig. 3.1.17

A questo punto si deve completare l'arco con la generazione della parte simmetrica. L'arco si trova sul piano XZ, dobbiamo considerare la coordinata X dei nodi più bassi tra quelli del concio in chiave, i nodi 54 e 60. Nei dati nodi vediamo che la loro coordinata X è 2.571 m. L'asse di simmetria per effettuare il ribaltamento viene preso a 2 cm da questo punto ($X = 2.573$ m), così da considerare la presenza del giunto in malta.

Selezioniamo graficamente tutti i nodi e le aste, oppure utilizziamo il comando Seleziona tutto (barra strumenti superiore) e andiamo nei Dati Aste, menu Edit, comando: "Specchio con asse Y..."; digitiamo il valore 2.573 nella finestra di immissione dati che si apre nella tabella in basso. Come si può vedere facilmente con il comando "Mostra tutti i carichi", sono stati copiati anche i carichi.

3. Esempi guidati

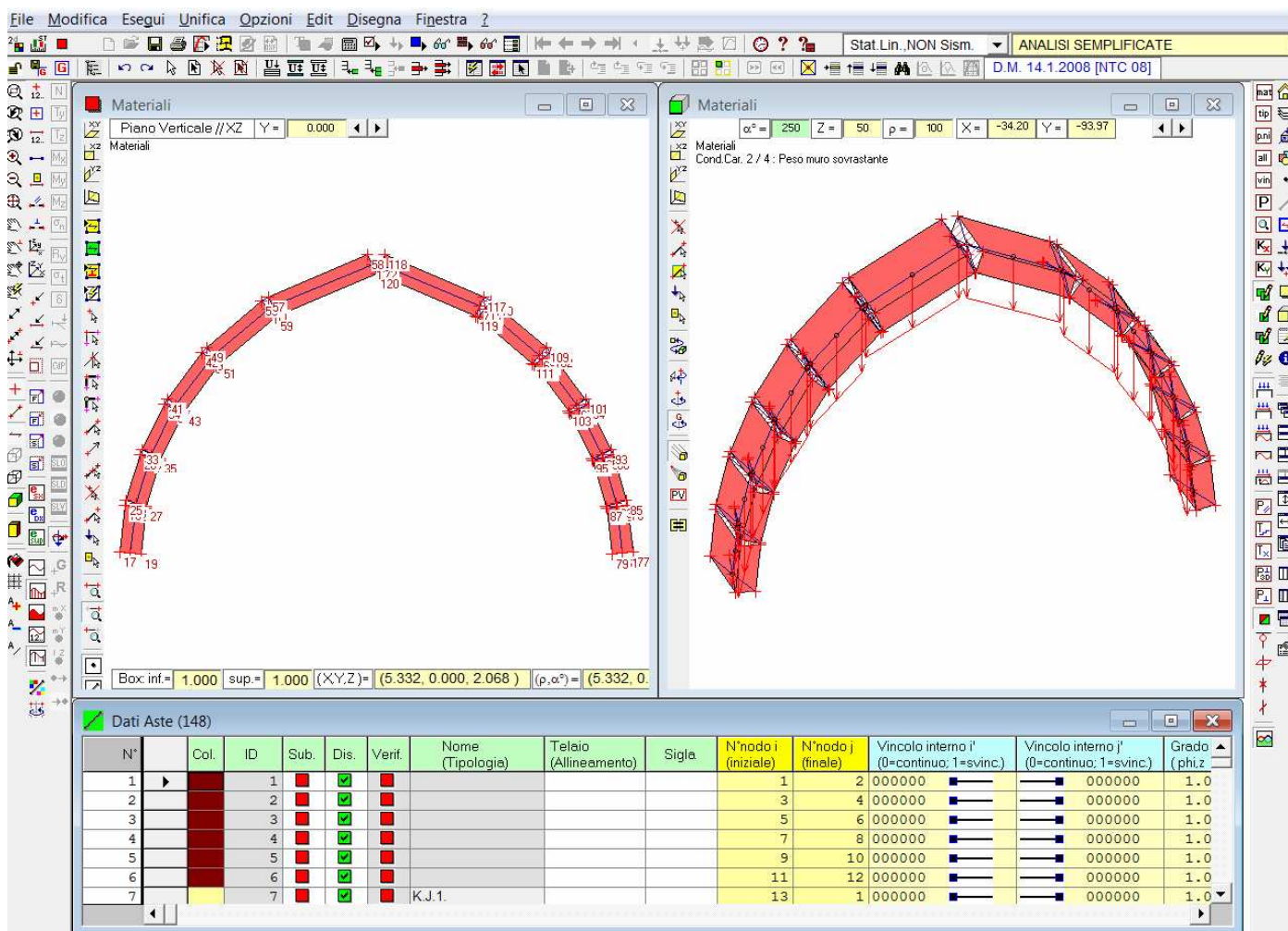


Fig. 3.1.18

Per completare il modello, infine, deve essere definito il collegamento in chiave mediante quattro elementi aventi tipologia 'giunto'.

Si esegua uno zoom nella vista 3D della chiave, si selezioni il comando "Definisci Asta" presente nella colonna di comandi della grafica 3D (🔍) e si colleghino i corrispondenti nodi con aste orizzontali (il 56 con il 116; il 54 con il 114; il 58 con il 118, il 60 con il 120).

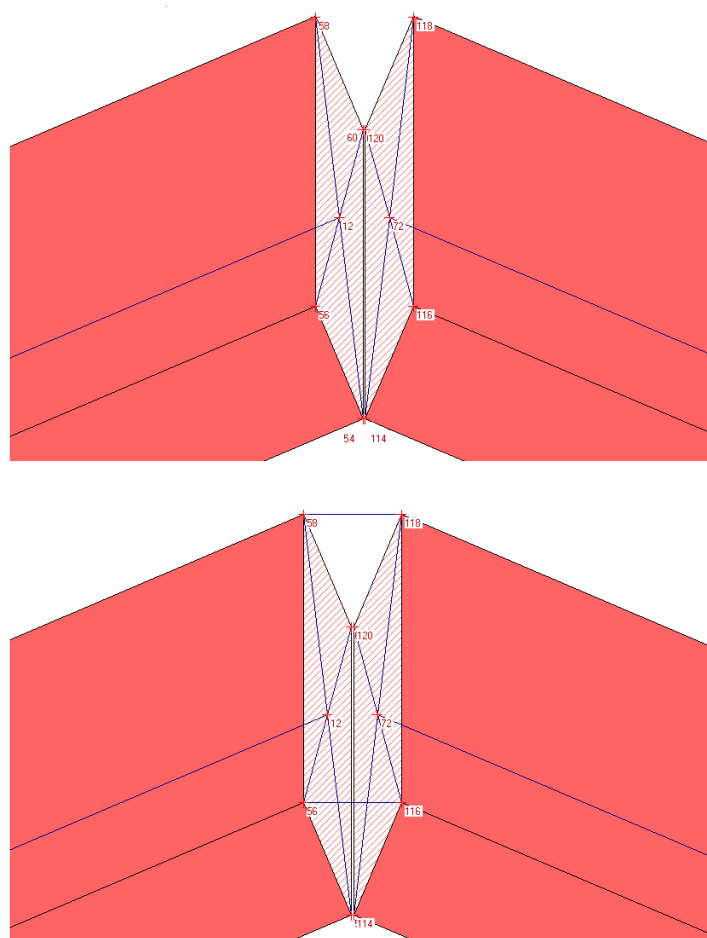




Fig. 3.1.19.

Scorrendo la tabella Dati Aste fino in fondo, si troveranno gli ultimi elementi introdotti: le 4 aste 149, 150, 151, 152.

Si avrà cura di assegnare a queste 4 aste la tipologia giunto (J), il vincolamento 000000 – 000111, la sezione giunto di malta (n. 3), il materiale 'giunto di malta'. Si possono introdurre le nuove caratteristiche da tastiera nelle varie caselle oppure per svolgere velocemente queste operazioni è sufficiente posizionarsi sulla riga dell'ultimo elemento giunto, il 148, posizionarsi di volta in volta sulle caratteristiche menzionate e premere il comando "Unifica seguenti" presente nella barra strumenti superiore: .

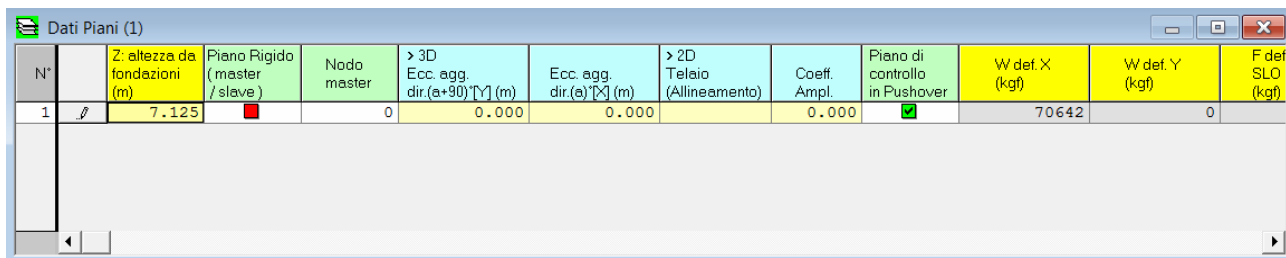
3.1.3 RISULTATI DELL'ANALISI E CALCOLO DEL MOLTIPLICATORE DI COLLASSO

Questo arco verrà successivamente inserito nella struttura completa costituita da quattro archi e quattro pilastri e studiata in [3.2]. Ci proponiamo ora di analizzare il singolo arco.

Finestra Dati Piani : si immette il valore di altezza totale $Z=7.125$ m. Si toglie inoltre l'opzione di Piano rigido/nodi master-slave.

In analisi statica non lineare (pushover), il 'punto di controllo' sarà dato dal baricentro delle masse nodali, e lo spostamento del punto di controllo coinciderà con la distanza fra il baricentro delle masse spostate ed il baricentro delle masse nella configurazione indeformata.

In figura si nota anche il valore della massa sismica: $W_{def,x} = 70642$ kgf, che utilizzeremo in seguito nei calcoli.




N°	Z: altezza da fondazioni (m)	Piano Rigido (master / slave)	Nodo master	> 3D Ecc. agg. dir.(a+90)° [Y] (m)	Ecc. agg. dir.(a)° [X] (m)	> 2D Telaio (Allineamento)	Coeff. Ampl.	Piano di controllo in Pushover	W def. X (kgf)	W def. Y (kgf)	F def SLO (kgf)
1	7.125		0	0.000	0.000		0.000	<input checked="" type="checkbox"/>	70642	0	

Fig. 3.1.20.

DATI NODI

Apriamo la tabella dei dati nodi, dobbiamo operare con i comandi di unifica selezione con i seguenti criteri:

- vincolamento dei nodi: tutti i nodi dell'arco, tranne i due nodi di imposta devono avere vincolamento 111110. I nodi di imposta (1 e 57) devono avere vincolamento incastro (000000) vedi visualizzazione "nodi: vincolo esterno" (comando  barra strumenti laterale sinistra)

- tutti i nodi dell'arco appartengono al piano 1, tranne i due nodi di imposta che appartengono al piano 0; togliere la vista superfici e attivare la legenda.

Si avrà cura anche di eliminare i nodi 13, 15, 17, 19 e 69, 71, 73, 75 posti in basso negli ultimi due conci che sostanzialmente sono inutili. Eliminarli ci consentirà di facilitare i collegamenti del modello tridimensionale.

DATI ASTE

Nella tabella dati aste dobbiamo operare con i seguenti criteri:

- aste: i collegamenti rigidi K e i conci N sono incastrati ai due estremi; i giunti J sono vincolati con incastro ad un estremo (000000) e cerniera all'altro (000111);

- si sottopongono a verifica a trazione sia i conci N che i giunti J: devono avere le relative caselle selezionate nei dati aste, sia quella di verifica generale "Verif.", la terza da sinistra nei Dati Aste, sia quella relativa allo sforzo normale (scorrere sulla destra: colonna Sf.Norm.Trazione).

Per porre l'arco con l'imposta a 4 metri di altezza selezioniamo tutte le aste, menu Edit, comando Sposta, digitiamo il valore (0,0,4).

ALTRI DATI

Finestra CCE (condizioni di carico elementari):

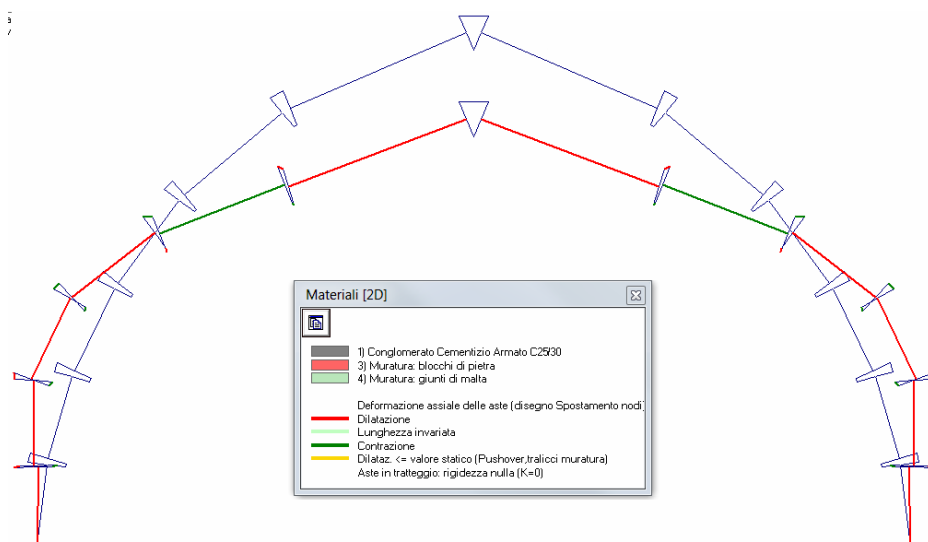
- moltiplicatori masse nelle CCE: 100000; struttura piana, solo direzione X.

Parametri di Calcolo: si eseguono le analisi statica non sismica, modale (per verificare la correttezza del comportamento elastico) e non lineare (per determinare, per via statica, il moltiplicatore di collasso).

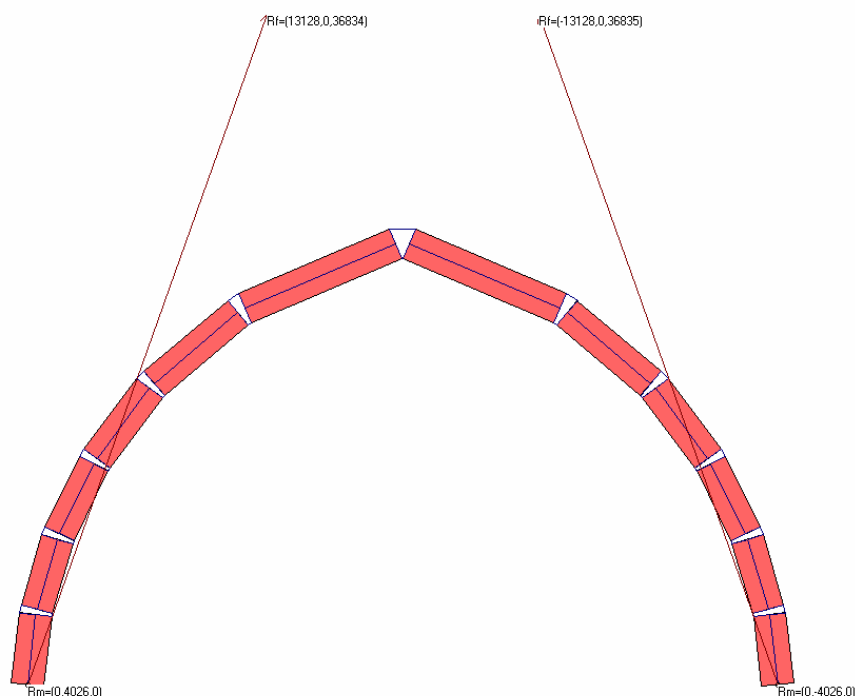
Eseguite le analisi, si giunge alla consultazione dei risultati.

ANALISI STATICA NON SIMICA



Per visualizzare la deformata statica attraverso lo spostamento nodi si utilizza il comando  della barra strumenti laterale sinistra.

**Fig. 3.1.21.**

Si possono leggere i valori delle reazioni vincolari alla base per verificare la simmetria dei risultati. Ad ogni imposta risulta una spinta statica di componente X orizzontale pari a 13128 kgf e di componente verticale Z pari a 36834 kgf. Inoltre c'è un momento di incastro pari a 4026 kgf*m.

**Fig. 3.1.22.**

ANALISI MODALE

Per visualizzare la deformata modale si utilizza il comando  della barra strumenti laterale sinistra. Per quanto riguarda le masse movimentate, il comando  ne consente la visualizzazione.

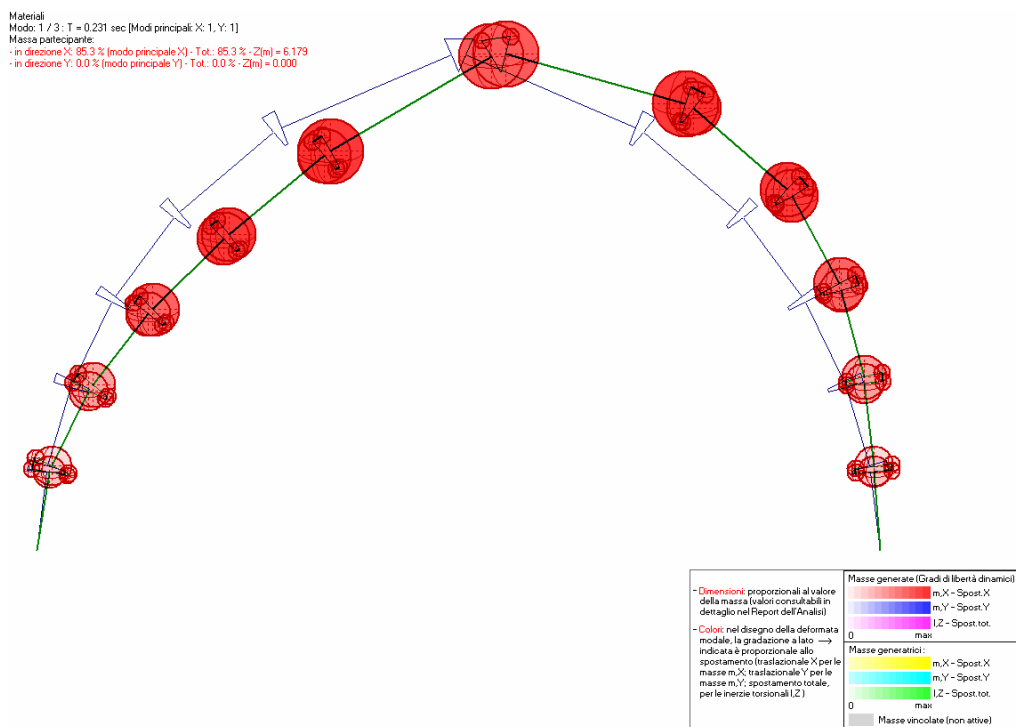


Fig. 3.1.23.

In figura, oltre al periodo e alla massa partecipante è riportata l'altezza del baricentro delle masse sismiche $Z=6.179$ m, che sarà utilizzata in calcoli successivi.

ANALISI SIMICA NON LINEARE – CALCOLO MOLTIPLICATORE DI COLLASSO

Per quanto riguarda l'analisi sismica non lineare nei parametri di calcolo della pushover (scheda Pushover (1)) introduciamo un incremento di taglio di 500 kgf. Ricordiamo che tale valore è importante che non sia troppo basso per evitare fenomeni di instabilità numerica. Valori consigliati si attestano tra 1/50 e 1/20 del taglio massimo stimato. A maggior ragione in questi modelli dove sono presenti molte masse di valore anche piccolo, si deve prestare attenzione alla valutazione dell'incremento di taglio e non scendere a valori troppo bassi per avere incrementi troppo piccoli.

Sempre nella scheda Pushover (1) dei parametri di calcolo scegliamo le curve A ed E e la sola direzione +X. Nella scheda Pushover (2) dei parametri di calcolo bisogna aver cura di controllare che sia selezionata l'opzione di verifica allo sforzo normale di trazione.

Eseguita l'analisi, del diagramma pushover interessa il valore della forza ultima, mentre possono essere trascurate tutte le altre informazioni: lo scopo dell'analisi è infatti non il calcolo dell'oscillatore bilineare equivalente, come nelle analisi 2D o 3D delle pareti murarie, ma il calcolo per via statica del moltiplicatore di collasso.

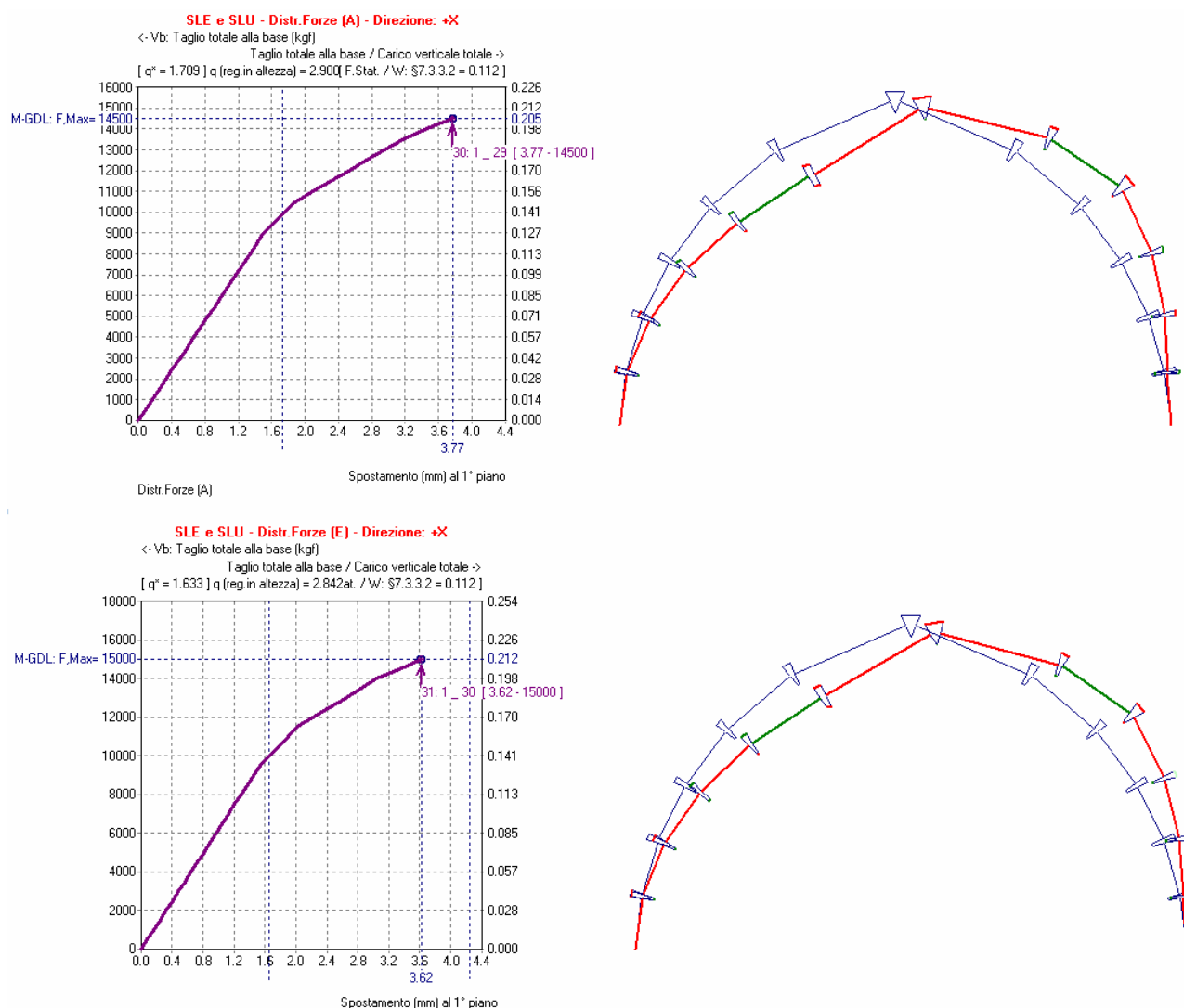


Fig. 3.1.24.

Nelle immagini di fig. 3.1.24 si affiancano alle curve la deformata (barra strumenti laterale sinistra); utilizzando i pulsanti della barra strumenti superiore: Passo iniziale, Passo precedente, Passo successivo, Ultimo passo, si scorrono i vari passi dell'analisi. Con il tasto Informazioni presente nella barra dei comandi a fianco della curva è possibile visualizzare il report dell'analisi (riportiamo quello relativo alla curva A):

Analisi Pushover VAPX_ :

Stati limite SLV, SLO e SLD - Distr.Forze (A) - Direzione: +X
percorso di archiviazione risultati:
C:\Aedes2011\Pce\Progetti\TM_1_Arco_Piano\SNL\VAPX_

Causa del termine di costruzione della curva di capacità:

La struttura è diventata labile (spostamenti inaccettabili)

Configurazione strutturale al termine di costruzione della curva di capacità:

(la costruzione della curva ha richiesto l'elaborazione di una sola curva intermedia)

Aste che divengono (o sono già divenute) non reagenti per deformazione assiale (trazione per muratura, compressione per controventi):

52,J.
53,J.
67,J.
70,J.
121,J.:1.
124,J.:1.
134,J.:1.
135,J.:1.

Aste che raggiungono (o hanno già raggiunto) lo spostamento ultimo (complanare):

-

Aste che raggiungono (o hanno già raggiunto) lo spostamento ultimo (ortogonale):

-

Aste non ancora collassate, con svincolamenti interni per verifiche non soddisfatte:

La forza minima corrisponde alla distribuzione A: $F = 14500 \text{ kgf}$

Dai dati Piani si rileva il valore della massa sismica: $W_{\text{def},x} = 70642 \text{ kgf}$

Ne deriva il moltiplicatore di collasso:

$$\lambda = \alpha_0 = 14500/70642 = 0.205$$

Seguendo ora §C8A.4, si ha che l'accelerazione sismica di attivazione del meccanismo è (C8A.4.9):

$$a_0^* = \alpha_0 g / (e^* FC)$$


A favore di sicurezza si assume una frazione di massa partecipante unitaria: $e^*=1$ (valori minori di 1 condurrebbero ad una accelerazione spettrale di attivazione del meccanismo superiore).

Consideriamo $FC=1.35$; si ottiene:

$$a_0^* = (0.205 / 1.35) g = 0.152 g$$

A) Con l'ipotesi di struttura sottostante l'arco **rigida**, dalla formula (C8A.4.9) della Circolare si ricava l'accelerazione spettrale richiesta SLV su sottostante corpo rigido:

$$a^*,\text{rig} = \text{PGA} * S / q$$

$\text{PGA} = a_g(P_{VR})$ è la accelerazione al suolo sostenibile per SLV, definita a partire dai dati del reticolo sismico del D.M.14.1.2008. Nei Parametri di Calcolo si introducono i valori che servono per la definizione dello spettro nelle schede Generali e Sismica (1): i parametri necessari vengono evidenziati dalle cornici contrassegnate dal simbolo  (riguardante i parametri necessari per eseguire analisi cinematiche, cioè analisi di meccanismi di collasso). Si assumono i seguenti dati: $V,N = 50$, Classe d'uso II, Coordinate (ED50): longitudine 10.851111; latitudine 43.681667.

Nella tabella della scheda Sismica (1) si rileva PGA per SLV con periodo di ritorno 475, anni pari a 0.126 g. con $q=2.0$ e $S =$ fattore di suolo $= S_s^* S_T$ che ipotizziamo pari a 1 (suolo A) segue:

$$a^*,\text{rig} = \text{PGA} * S / q = 0.126 * 1 / 2 = 0.063 g$$

B) Con l'ipotesi di struttura sottostante l'arco **deformabile**, dalla formula (C8A.4.10) si ricava l'accelerazione spettrale richiesta SLV su sottostante corpo deformabile:

$$a^*,\text{def} = S_d(T_1) (Z/H) \gamma = [S_e(T_1) / q] (Z/H) \gamma$$

Dove $Z = 6.179 \text{ m}$ è l'altezza del baricentro delle masse sismiche che abbiamo ricavato dall'analisi modale.

$H = 7.125$ è l'altezza totale del macroelemento che possiamo leggere dai dati nodi, dalla coordinata Z del nodo più in alto in chiave.

$\gamma = 3N / (2N + 1)$; utilizzando $N = 2$ in via semplificata ricaviamo $\gamma = 1.2$. È interessante confrontare tale valore con il coefficiente di partecipazione modale ricavato dall'analisi, pari a 1.184.

$Se(T1)$ è lo spettro di risposta elastico SLV definito in §3.2.3.2.1 (NTC08).

$T1$: è il primo periodo della struttura nella direzione considerata, che si può ricavare dalla formula semplificata di normativa $T1 = 0.050 H^{0.75} = 0.050 * 7.125^{0.75} = 0.218$ sec. Anche in questo caso è interessante confrontare tale valore con il periodo dell'arco ricavato dall'analisi modale: 0.231 sec.

A questo punto si confronta $T1$ con i valori di TC , TB , TD , per vedere quale formula dello spettro adottare per calcolare $Se(T1)$. Nella scheda Sismica (1) si trovano già tabellati i valori dei periodi caratteristici dello spettro. $T1 = 0.218$ sec è compreso tra TB e TC , quindi la formula da usare è quella relativa al tratto orizzontale dello spettro:

$Se(0.231) = a_g S F_o$; anche F_o si trova nella tabella della scheda sismica 1 è pari a 2.527.

Pertanto si ricava:

$$a^*,_{def} = [Se(T1) / q] (Z/H) \gamma = [PGA S F_o / q] (Z/H) \gamma = [0.126 * 1 * 2.527 / 2] * (6.179 / 7.125) * 1.2 = 0.166 \text{ g}$$

Pertanto l'accelerazione spettrale richiesta allo Stato Limite Ultimo SLV è pari a:

$$a^* = \max(a^*,_{rig}; a^*,_{def}) = \max(0.063; 0.166) = 0.166 \text{ g}.$$

Poiché l'accelerazione spettrale di attivazione del meccanismo $a_0^* = 0.152$ g (capacità) è minore dell'accelerazione spettrale SLV pari $a^* = 0.166$ g (domanda), la verifica non risulta soddisfatta.

In termini di Indicatore di Rischio si ha:

$$a_0^* / a^* = 0.152 / 0.166 = 0.916 < 1$$

Le stesse considerazioni possono essere svolte in termini di accelerazione al suolo.

Le accelerazioni al suolo di attivazione nei due casi sono rispettivamente:

$$PGA,_{CLV \text{ rig}} = a_0^* q / S = 0.152 * 2 / 1 = 0.304 \text{ g}$$

$$PGA,_{CLV \text{ def}} = (a_0^* q) / [S F_o (Z/H) \gamma] = (0.152 * 2) / [1 * 2.527 * (6.179 / 7.125) * 1.2] = 0.116 \text{ g}$$

Quindi $PGA,_{CLV} = 0.116$ g, che essendo minore dell'accelerazione attesa per quel sito $PGA,_{DLV} = 0.126$, indica ancora l'insufficienza della struttura.

Possiamo ricavare di nuovo l'indicatore di rischio (in termini di PGA =accelerazione al suolo) come rapporto: $IRS,_{PGA} = PGA,_{CLV} / PGA,_{DLV} = 0.116 / 0.126 = 0.920$

Si ottiene lo stesso risultato (a meno di arrotondamenti) a causa della linearità delle relazioni che legano le accelerazioni al suolo a quelle in quota.

Il file PC.E relativo all'analisi fin qui effettuata è il: "TM_1_Arco_Piano.pce".

3.2. MODELLO TRIDIMENSIONALE CON ARCHI E PILASTRI

3.2.1. COMPLETAMENTO INPUT MODELLO TRIDIMENSIONALE

Ci proponiamo di studiare il macroelemento tridimensionale formato da quattro archi e quattro colonne.

Per prima cosa dobbiamo copiare l'arco così da avere le quattro arcate.

Poiché vogliamo mettere la prima colonna con l'asse nell'origine dobbiamo spostare l'arco appena realizzato di 43 cm verso destra (direzione +X). Quindi selezioniamo tutto, apriamo la finestra Dati Aste, menu Edit, comando Sposta con valori (0.43, 0, 0).

Possiamo valutare l'esattezza dello spostamento nella vista 3D e anche in pianta 2D. Nella finestra 2D eseguiamo una sezione orizzontale a livello dell'imposta dell'arco con il comando apposito (piano orizzontale XY, il primo dall'alto della colonna di comandi della vista 2D). Adesso in pianta si vedono due porzioni degli archi; per vederli nella loro interezza dobbiamo cambiare il box di visualizzazione della finestra 2D e aumentare il box superiore portandolo a 4m.

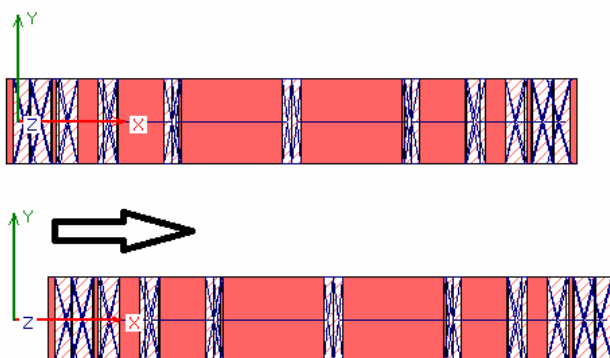


Fig. 3.2.1.

Adesso dobbiamo fare una copia di questo arco, in direzione Y, così da creare il simmetrico posto a distanza 6 m. Pertanto selezioniamo tutto, Dati Aste, menu Copia, digitiamo (0, 6, 0).

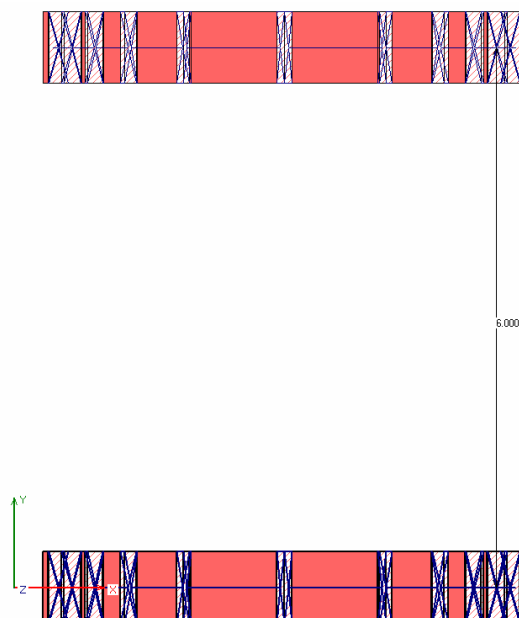


Fig. 3.2.2.

Adesso sempre con il solo primo arco selezionato, facciamo una copia ruotata. Menu Edit, Copia polare e inseriamo i valori (0,0,90) che rispettivamente significano le coordinate dell'asse di rotazione e l'angolo: così si realizza l'arco di sinistra appartenente al piano ZY.

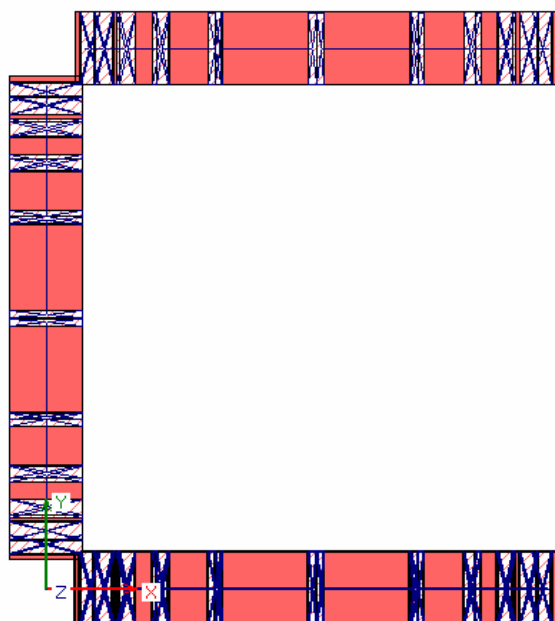


Fig. 3.2.3.

Sempre con il solo primo arco selezionato, facciamo un'ultima copia ruotata. Menu Edit, Copia polare e inseriamo i valori (6,0,-90). Così si realizza anche l'ultimo arco, quello di destra nella vista in pianta, appartenente al piano ZY.

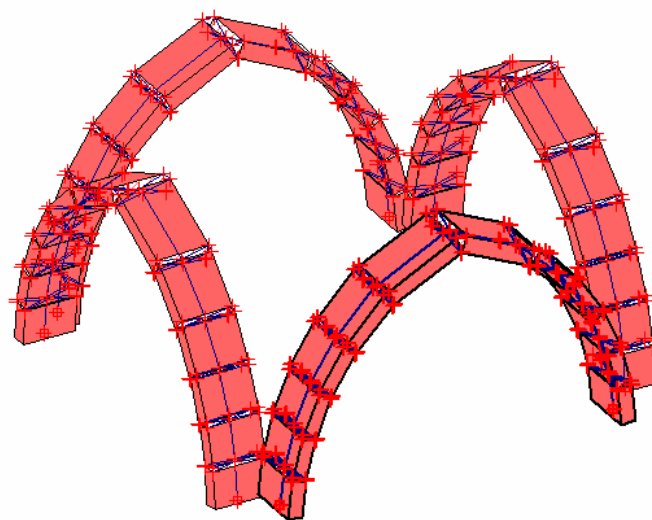
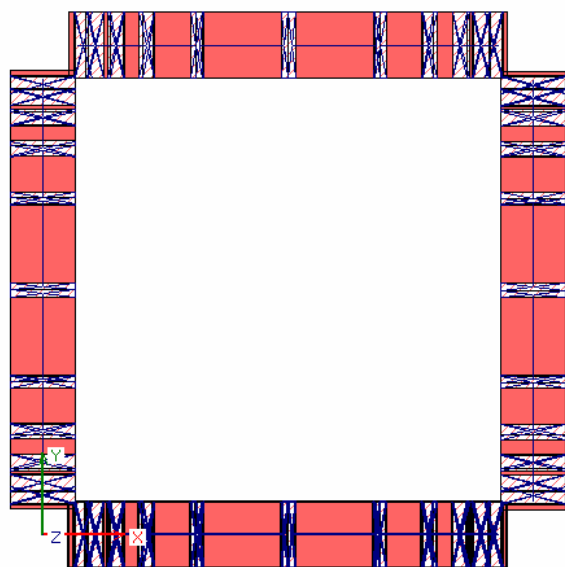


Fig. 3.2.4.

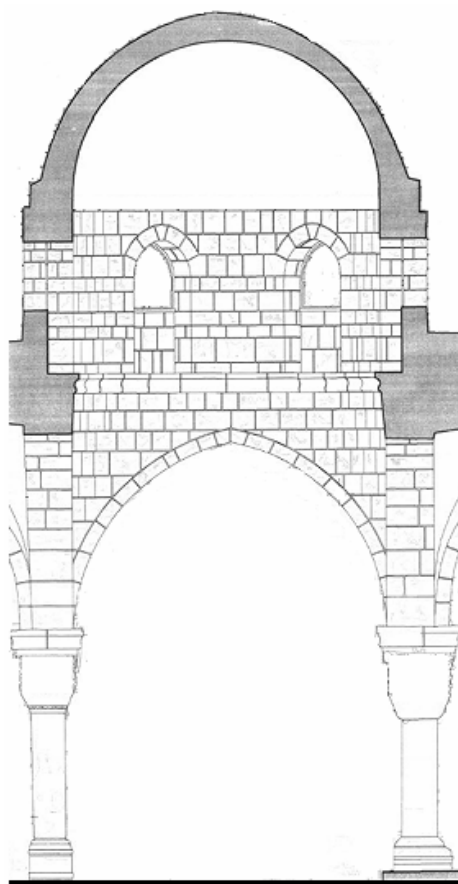


Fig. 3.2.5.

Rimangono da definire le colonne. Con gli elementi pilastro è possibile modellarne anche la rastremazione. Definiamo innanzitutto la colonna che ha l'asse posto nell'origine. Facciamo una sezione verticale nel piano XZ alla $Y = 0$, con il comando posto nella colonna dei comandi della vista 2D, il secondo dall'alto. Conviene ridurre il box inf. e sup. a 0.1 così da vedere solo i nodi del piano medio dell'arco. Apriamo i dati nodi e utilizziamo il comando aggiungi riga. In automatico viene aggiunto un nodo nell'origine (coordinate 0, 0, 0). La colonna è alta 4 m. Scegliamo di dividerla in 8 conci, alti 0.50 m. Per fare questo selezioniamo il nodo posto in origine, menu Edit, comando Copia e indichiamo come componenti dello spostamento (0, 0, 0.50).

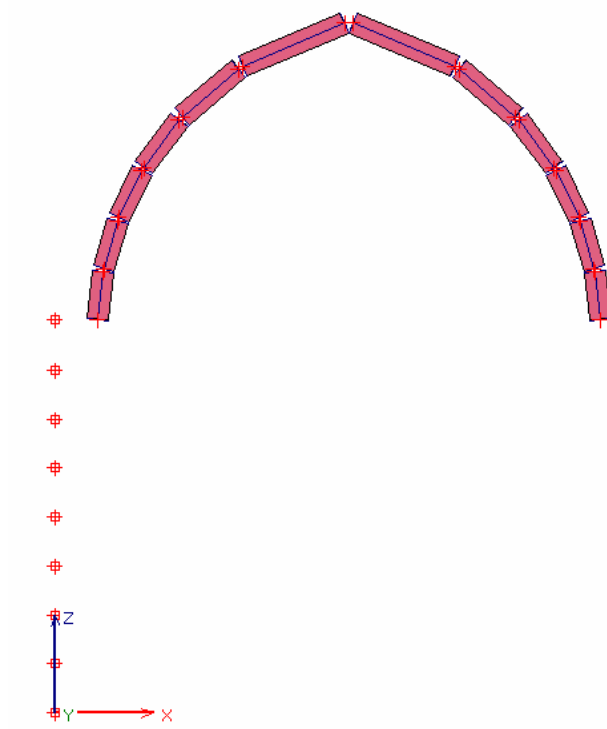


Fig. 3.2.6.

Si avrà cura nei dati nodi di imporre a tutti i nodi il vincolamento 111110, anche a quelli di imposta. Il nodo alla base posto nell'origine e solo esso dovrà essere incastrato (000000). Inoltre i nodi dall'imposta alla chiave appartengono al piano 1, gli altri al piano 0. È utile la vista piani p.ni (barra strumenti laterale destra) per controllare l'esattezza di questo inserimento (seconda colonna da destra, il terzo comando dall'alto).

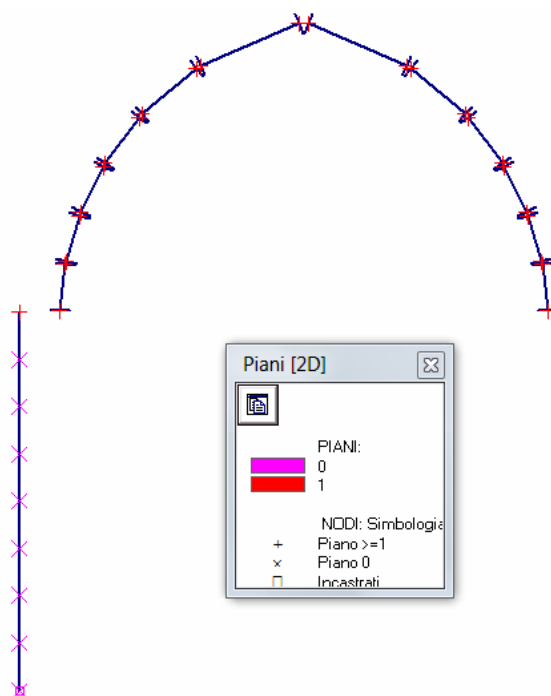


Fig. 3.2.7.

Adesso dobbiamo definire i conci. Apriamo la finestra sezioni. Scegliamo la tipologia 3, sezione circolare, definiamo la sezione come "Colonne R 27" e introduciamo nella casella apposita il valore del raggio $R = 0.27$ m. Selezioniamo questa riga che apparirà colorata in viola.


3		N°		Tipologia	Descrizione	B/R (m)	H/r (m)	b/s (m)	h/t (m)	H sez. (m)	Area (m²)	Jx (m⁴)	Jy (m⁴)
		1		1	0.80 x 0.22	0.800	0.220	0.000	0.000	0.220	1.76E-01	2.37E-03	7.10E-04
		2		0	Sez. Rigida	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
		3		1	0.400 X 0.110 (giunto)	0.400	0.110	0.000	0.000	0.110	4.40E-02	1.48E-04	4.44E-05
		4	▶	3	Colonne R 27	0.270	0.000	0.000	0.000	0.270	2.29E-01	8.35E-03	4.17E-03
	Sezione Circolare D=0.540 [m]												

Fig. 3.2.8.

Andiamo nella finestra 2D, apriamola a tutto schermo e nella barra degli strumenti selezioniamo "assegna sezione" . Utilizziamo il comando definisci asta così da realizzare l'asse del pilastro unendo i vari nodi l'uno all'altro.

Adesso selezioniamo gli otto conci appena realizzati, andiamo nei dati aste, scegliamo per uno di essi la tipologia P, pilastri in muratura e unifichiamo la selezione. Assegniamo a questi elementi il materiale muratura blocchi di pietra. Attiviamo la verifica in questi elementi e selezioniamo la sola verifica a pressoflessione complanare nei dati aste. Adesso scegliamo il concio di base e nei dati aste, cambiamo il dato raggio (che si trova nel campo B), da 0.27 m a 0.35 m. Così facciamo per le due parti del capitello. Il concio superiore del capitello avrà raggio 0.40 m, il concio inferiore avrà raggio 0.50 m.

Materiali

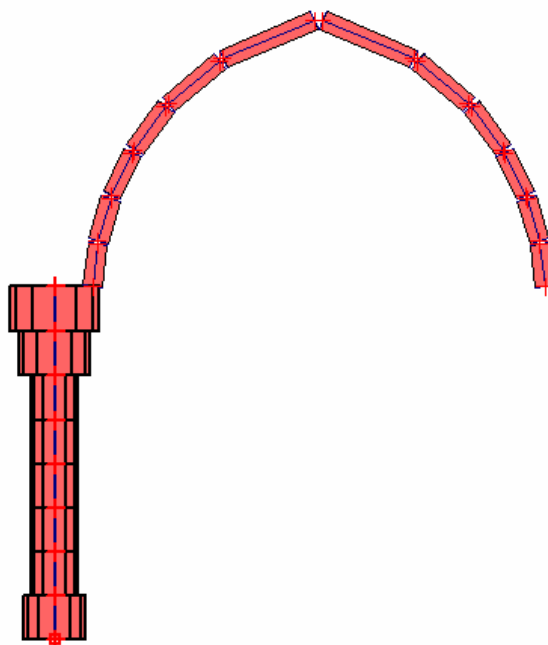


Fig. 3.2.9.

Adesso selezioniamo l'intera colonna, con tutti i suoi nodi, per farne tre copie. Apriamo i Dati Aste, menu Edit, Copia, coordinate di spostamento 6, 0, 0.

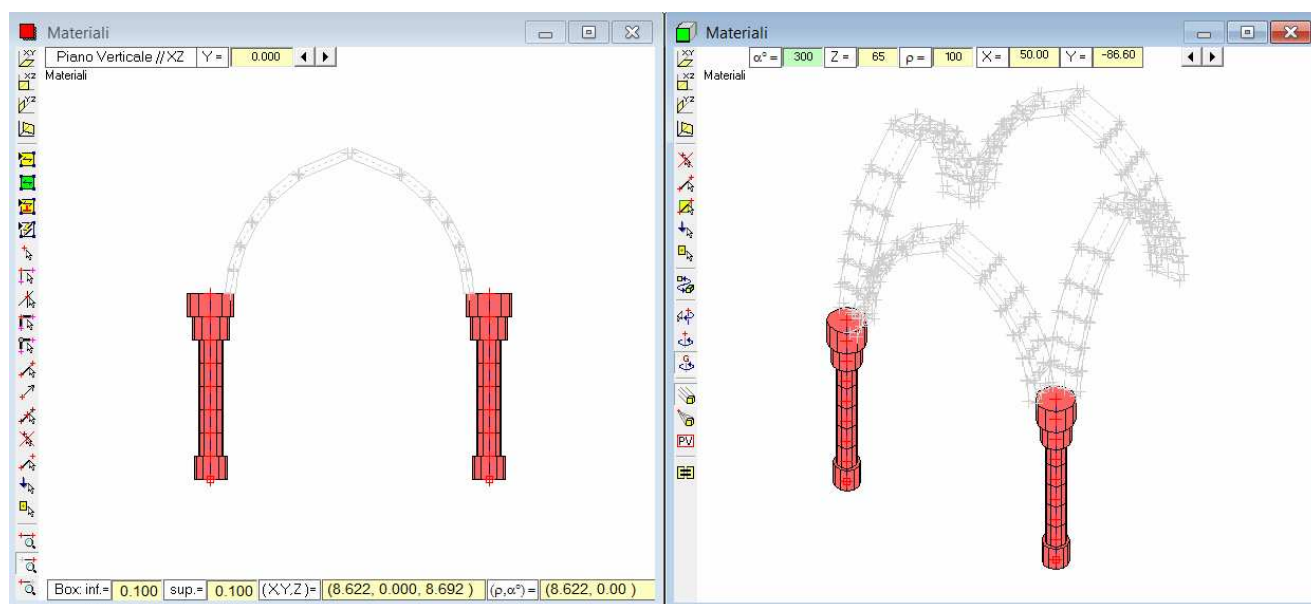


Fig. 3.2.10.

Ancora con la sola prima colonna selezionata facciamo una nuova copia: Dati Aste, menu Edit, Copia, coordinate di spostamento 0, 6, 0.

Infine l'ultima copia con lo stesso procedimento, coordinate 6,6,0

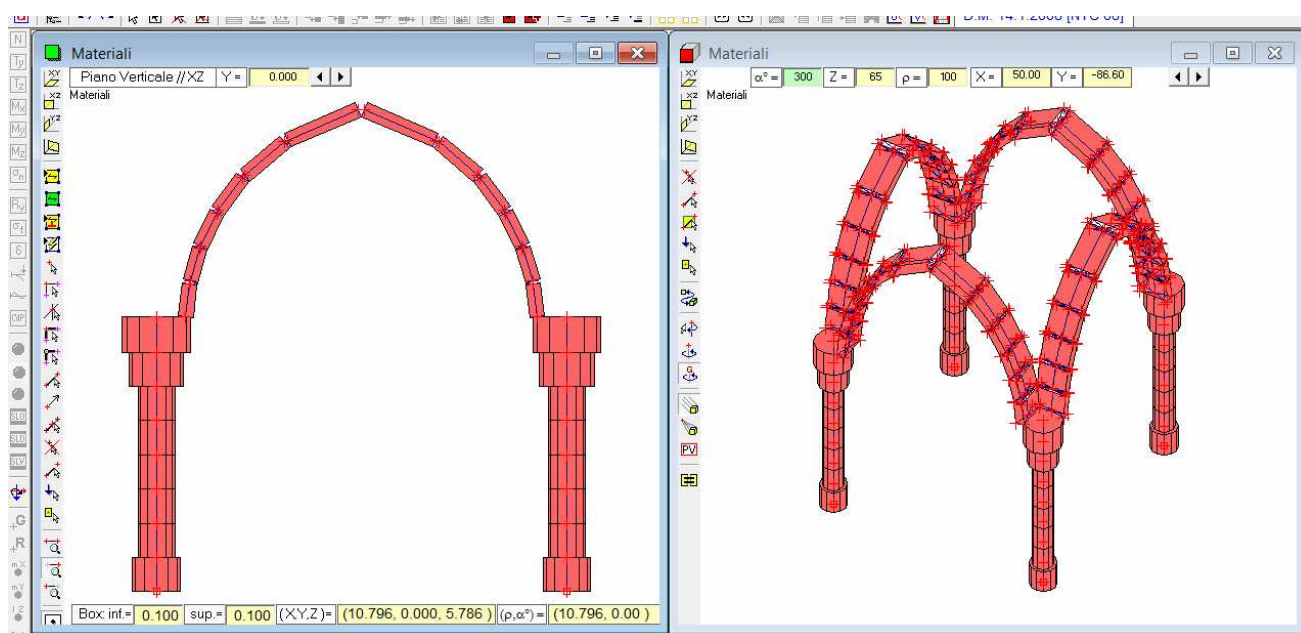


Fig. 3.2.11.

Adesso dobbiamo collegare le imposte degli archi alle sommità delle colonne. Per fare questo apriamo i dati aste, selezioniamo la sezione rigida (n.2) caratteristica dei link. Selezioniamo la finestra 2D, colonna dei comandi ad essa relativa, comando assegna sezione. Nella stessa colonna scegliamo il comando definisci asta. Adesso definiamo i collegamenti.

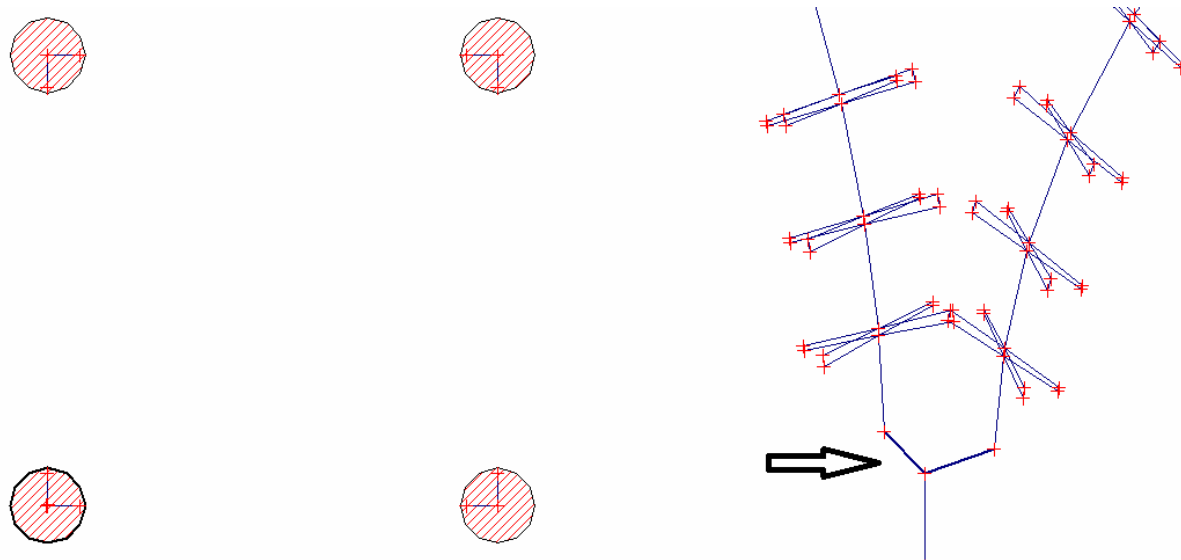


Fig. 3.2.12.


A questo punto il modello geometrico è concluso. In questo caso dalle strutture adiacenti provengono su ogni colonna, un carico verticale di 33000 kgf e una forza orizzontale inclinata diretta verso il centro della cupola di componenti lungo X e lungo Y pari a 13128 kgf (vedi analisi singolo arco).

Pertanto scegliamo il nodo 457 di sommità della colonna in basso a sinistra. Apriamo le CCE, definiamo una nuova condizione elementare "carichi da strutture adiacenti". Si tratta di **carichi concentrati**, pertanto si deve cliccare sulla casella "nodi: carichi concentrati". Si apre l'apposita tabella.

Dati CCE (5) - 5: Carichi da strutture adiacenti

N°	Commento	Tipol.	Tipo di azione	Psi,0 (raro)	Psi,1 (freq.)	Psi,2 (quasi perm.)	Moltip. masse	Nodi: Carichi Concentrati	Nodi: Cedimenti Vincolari	Nc Co
3	Peso pennacchi e tamburo	1	1. G1, Perm. strutt.	1.0	1.0	1.0	100000			
4	Peso cupola	1	1. G1, Perm. strutt.	1.0	1.0	1.0	100000			
5	Carichi da strutture adiacenti	1	1. G1, Perm. strutt.	1.0	1.0	1.0	110001			

Fig. 3.2.13.

Dobbiamo aggiungere 1 riga col comando apposito, posto all'interno della tabella che si è appena aperta. Digitiamo nella prima riga il carico verticale P_z pari a -33000 kgf. Nella seconda riga si introducono le componenti orizzontali della risultante della forza proveniente dalle strutture adiacenti: $+13128$ lungo X nella colonna P_x e $+13128$ lungo Y nella colonna P_y . Selezioniamo il comando aggiungi carichi ad elementi selezionati. Alla fine fare clic sulla freccia di conferma () . Con il comando mostra tutti i carichi possiamo verificare l'esattezza dell'inserimento nelle finestre grafiche.

Ci comportiamo in modo analogo con gli altri nodi, immettendo carichi verticali di -33000 kgf e le forze orizzontali che hanno uguale valore assoluto e i segni in base al sistema di riferimento: la spinta è sempre verso il centro. La situazione finale è la seguente.

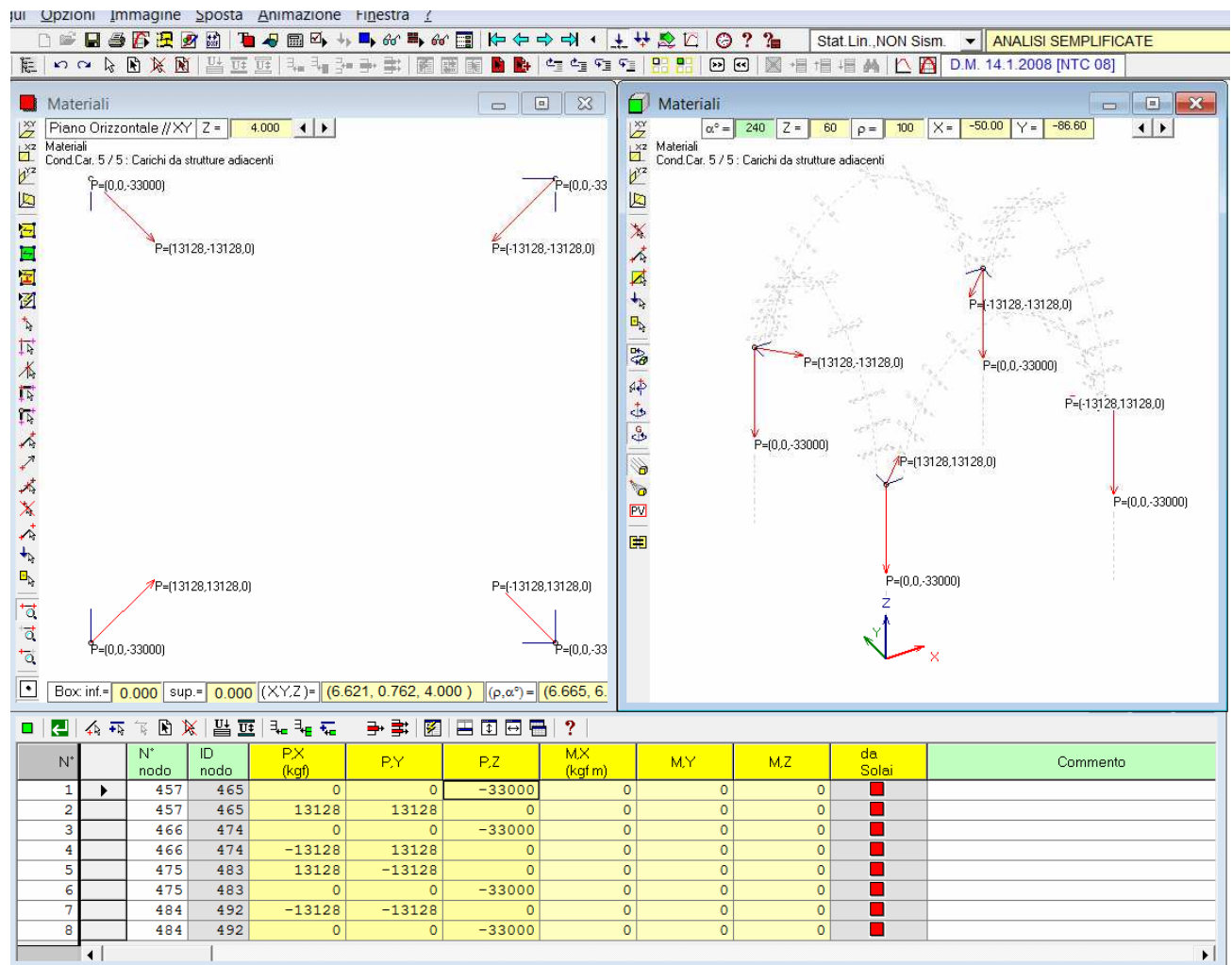


Fig. 3.2.14.

Un metodo alternativo per l'introduzione dei carichi è di aggiungere le colonne necessarie nella tabella della CCE 5 appena aperta e di digitare a mano sia i numeri dei nodi che tutti i valori che si vedono in figura.

Tipologia
Cond.Car. 5 / 5 : Carichi provenienti dalle strutture adiacenti

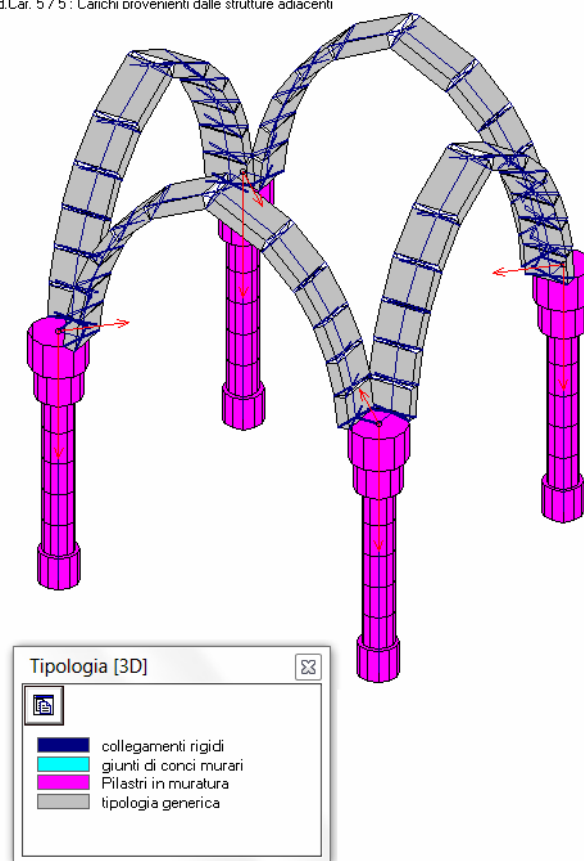


Fig. 3.2.15.

A questo punto il modello è concluso: si tratta del file TM_2_Completo.

Nell'immagine precedente possiamo vedere le varie tipologie di elementi utilizzati: la vista è attivabile tramite l'apposito comando della barra degli strumenti laterale destra: **tip**.

3.2.2. RISULTATI

Prima di lanciare l'analisi bisogna aver cura di cambiare il moltiplicatore delle masse nei dati CCE ed introdurre per tutte le condizioni il valore 110001, perché si tratta di un'analisi spaziale.

ANALISI STATICA NON SIMICA

Riportiamo la deformata statica. Naturalmente è possibile la consultazione delle reazioni vincolari e di tutti i vari parametri di sollecitazione e di deformazione.

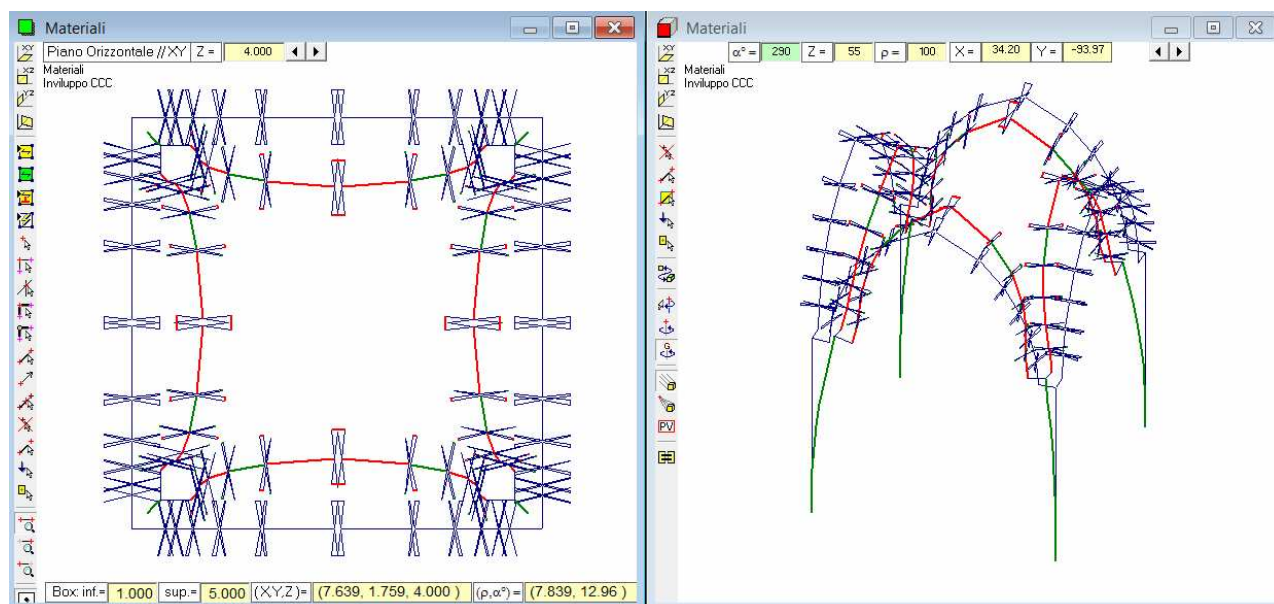


Fig. 3.2.16.

ANALISI MODALE

Le deformate modali evidenziano la simmetria del modello, sia per quanto riguarda le forme, che il periodo, che la percentuale di masse movimentate per i due modi principali nelle due direzioni ortogonali.

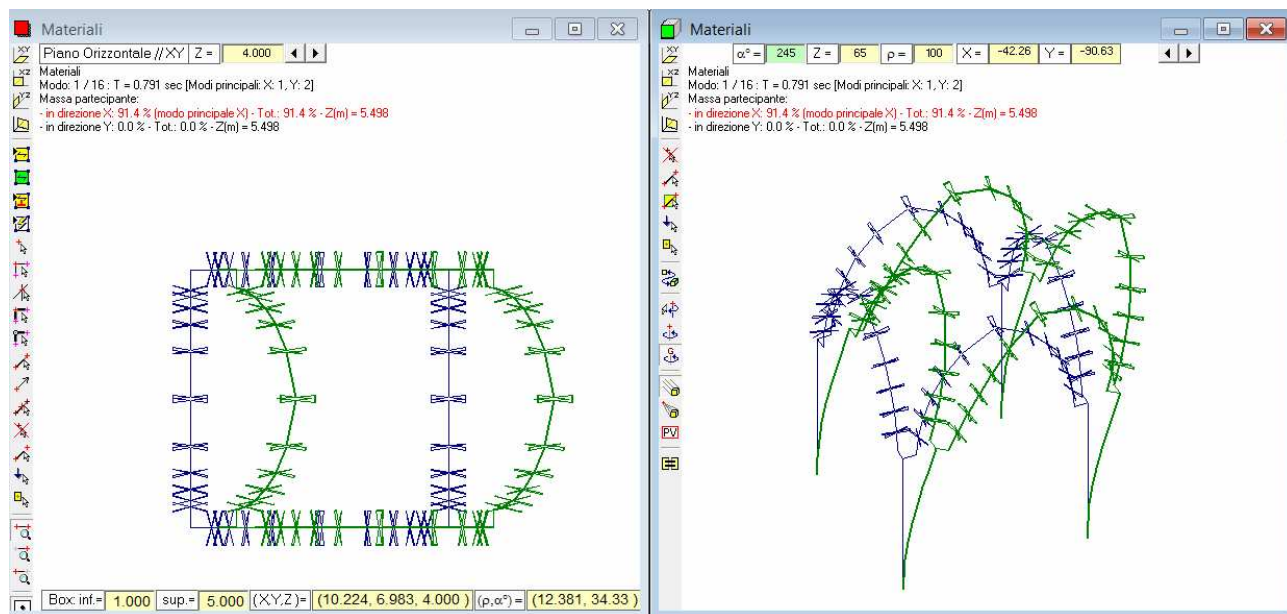


Fig. 3.2.17.

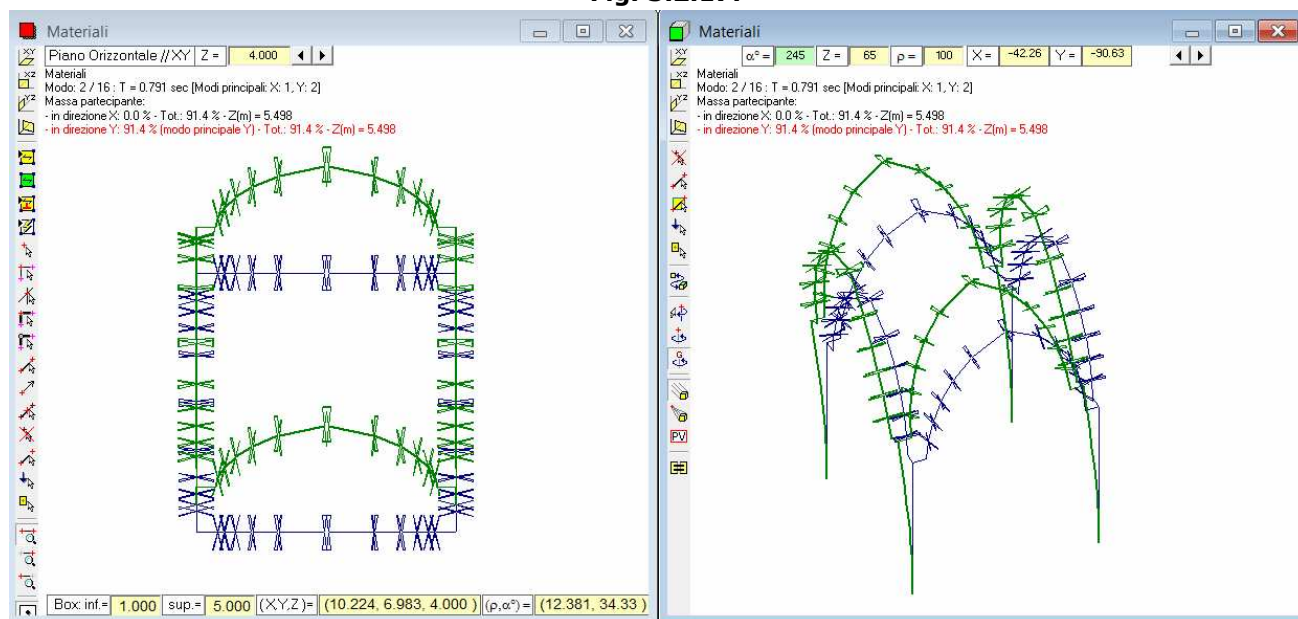


Fig. 3.2.18.

ANALISI SIMICA NON LINEARE – CALCOLO MOLTIPLICATORE DI COLLASSO

Nei parametri di calcolo della pushover (scheda pushover 1) introduciamo un incremento di taglio di 1500 kgf. Scegliamo ancora le curve A ed E, ma stavolta selezioniamo sia la direzione +X che la +Y. In figura riportiamo le quattro curve che si ricavano.

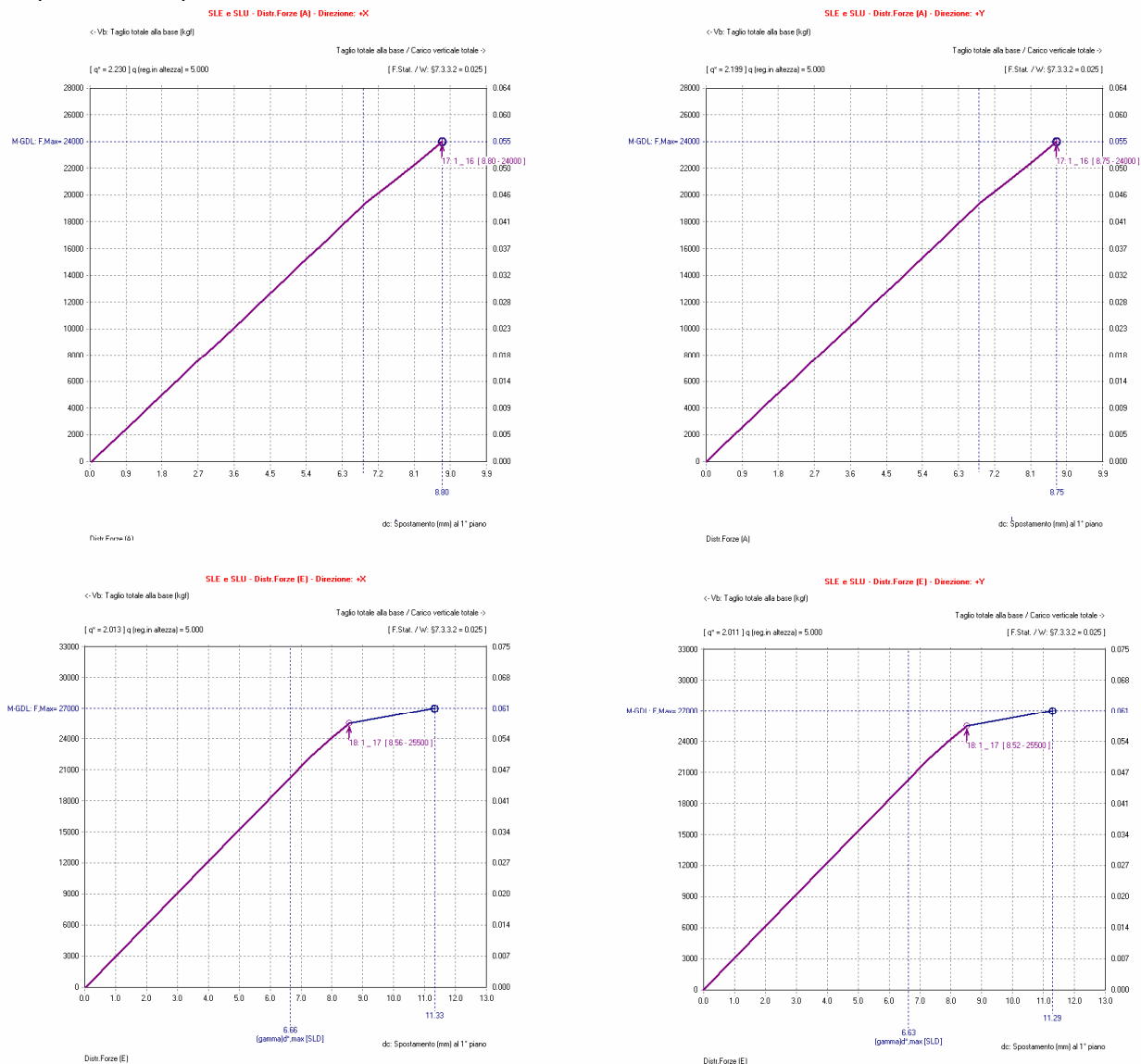


Fig. 3.2.19.

Come possiamo vedere dalle immagini riportate ritroviamo nei risultati una simmetria quasi perfetta tra le due direzioni. Il piccolo scarto presente riguardante lo spostamento è dovuto alla presenza, in questi modelli, di una grande quantità di masse di piccole dimensioni. Quindi si hanno fenomeni di piccoli arrotondamenti pressoché inevitabili, ma non tali da condizionare in modo significativo la qualità dell'analisi.

Rileviamo anche nelle curve di tipo E la presenza di un tratto quasi orizzontale. Anche questo fatto è dovuto alla presenza di questi arrotondamenti che fanno sì che queste curve vadano avanti di qualche passo. È da ritenere che il picco evidenziato in figura precedente al punto angoloso fissi l'ultimo passo dell'analisi.

Pertanto il valore minimo da considerare come forza ultimo, dalle curve A, è pari a 24000 kgf.

Dai dati Piani si rileva il valore della massa sismica: $W_{def,x} = 428716$ kgf

Ne deriva il moltiplicatore di collasso:

$$\lambda = \alpha_0 = 24000 / 428716 = 0.056$$

Seguendo ancora §C8A.4 e considerando $e^*=1$ e $FC = 1.35$ si ha

$$a_0^* = (0.056 / 1.35) g = 0.0415 g$$

In questo caso la struttura è studiata a partire dal suolo, quindi abbiamo il solo caso della struttura sottostante **rigida**, pertanto utilizziamo solo la formulazione C8A.4.9 della Circolare:

$$a^*,rig = PGA * S / q = 0.126 * 1 / 2 = 0.063 g$$

Poiché l'accelerazione accelerazione spettrale di attivazione del meccanismo $a_0^* = 0.0415$ g è minore dell'accelerazione spettrale SLV pari $a^* = 0.063$ g; la verifica non è soddisfatta.

In termini di indicatore di rischio si ha:

$$IRS, PGA = a_0^* / a^* = 0.0415 / 0.063 = 0.659 < 1$$

In termini di accelerazione al suolo di attivazione si ha:

$$PGA, CLV_{rig} = a_0^* \cdot q / S = 0.0415 \cdot 2 / 1 = 0.083 \text{ g}$$

chiaramente minore dell'accelerazione attesa per quel sito $PGA, DLV = 0.126$.

Per controllo, si calcola nuovamente l'indicatore di rischio:

$$IRS, PGA = PGA, CLV / PGA, DLV = 0.083 / 0.126 = 0.659.$$

Dalle informazioni sull'analisi, vediamo come il collasso si manifesti con l'uscita della curva delle pressioni dalla sezione dei pilastri (elementi 578 e 594):

Analisi Pushover VAPX_ :

Stati limite SLV, SLO e SLD - Distr.Forze (A) - Direzione: +X

percorso di archiviazione risultati:

C:\Aedes2011\Pce\Progetti\TM_2_Completo_2\SNL\VAPX_

Causa del termine di costruzione della curva di capacità:

La struttura è diventata labile (spostamenti inaccettabili)

Configurazione strutturale al termine di costruzione della curva di capacità:

(la costruzione della curva ha richiesto l'elaborazione di una sola curva intermedia)

Aste che divengono (o sono già divenute) non reagenti per deformazione assiale (trazione per muratura, compressione per controventi):

134,J.:1.

135,J.:1.

141,J.:1.

143,J.:1.

278,J.:1.:1.

279,J.:1.:1.

285,J.:1.:1.

287,J.:1.:1.

429,J.:1.:1.

431,J.:1.:1.

573,J.:1.:1.

575,J.:1.:1.

Aste che raggiungono (o hanno già raggiunto) lo spostamento ultimo (complanare):

578,P.


594,P.

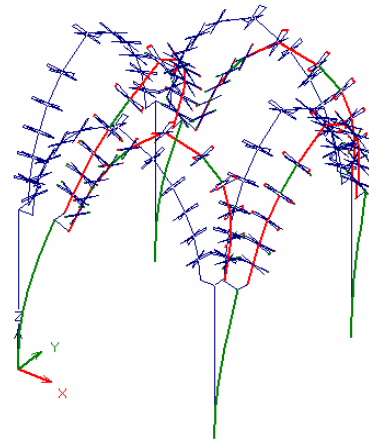
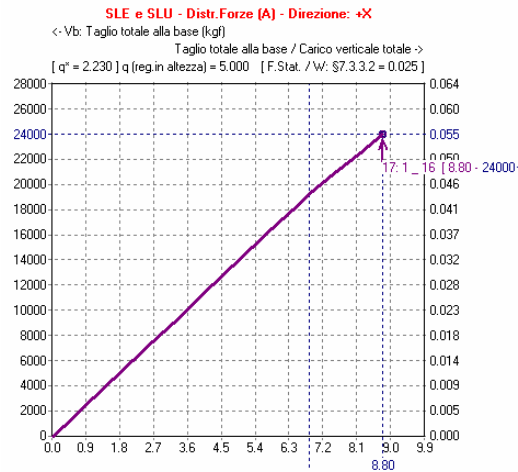
Aste che raggiungono (o hanno già raggiunto) lo spostamento ultimo (ortogonale):

-

Aste non ancora collassate, con svincolamenti interni per verifiche non soddisfatte:

-

Oltre alla visualizzazione della deformata, tramite l'apposito comando "curva delle pressioni" della barra strumenti laterale sinistra , è possibile visualizzare ad ogni passo dell'analisi non lineare la posizione della curva delle pressioni (figura seguente).



**Deformata
all'ultimo
passo dell'analisi
non lineare**

Curva delle pressioni

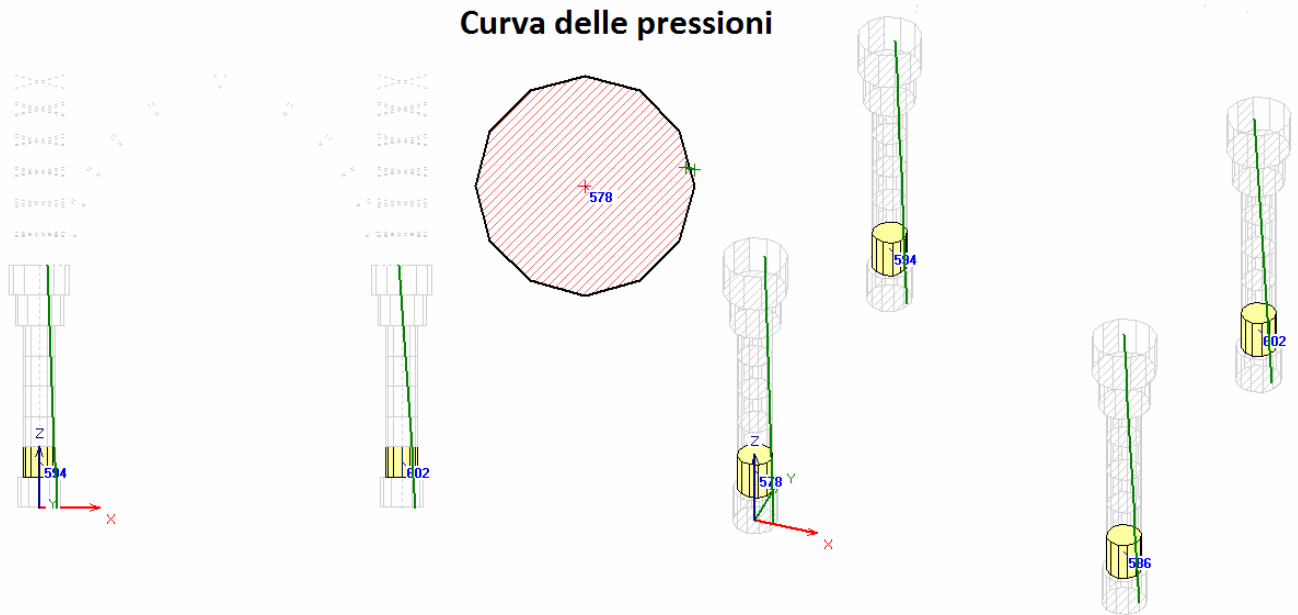


Fig. 3.2.20.