



## **Aedes.PCM 2026**

### **PROGETTAZIONE DI COSTRUZIONI IN MURATURA**

Analisi strutturale di costruzioni in muratura secondo la Normativa Tecnica vigente

### **Esempi Applicativi 3/3**

*Ultima revisione di questo documento: 26.01.2026*

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.

© 1997-2026 AEDES Software per Ingegneria Civile

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

Tel.: +39 0571 401073

E-mail: [info@aedes.it](mailto:info@aedes.it) - Internet: [www.aedes.it](http://www.aedes.it)

#### AVVERTENZE E CONDIZIONI D'USO

La AEDES Software si riserva il diritto di apportare miglioramenti o modifiche al programma PCM, 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.

PCM 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 PCM fino a quando non avrà sottoscritto la suddetta licenza d'uso.

L'Utente è responsabile della scelta di PCM 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 PCM sono quelle riportate nella licenza d'uso. La AEDES non garantisce che le funzioni contenute in PCM 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 PCM possono essere marchi di fabbrica o marchi registrati dalle rispettive Società.

## **PIANO DELL'OPERA**

- 1.** Esempi di apprendimento, descritti in dettaglio, volti ad apprendere le modalità di input/modifica dei dati e di consultazione dei risultati ottenuti dall'analisi
- 2.** Esempi applicativi rappresentativi di casi reali, nei quali vengono evidenziate le specificità di ogni caso esaminato
- 3.** Esempi di apprendimento per Elementi Costruttivi Storici e monumentali (edifici storici, chiese, torri)
- 4.** Esempi applicativi per Elementi Costruttivi Storici e monumentali

# INDICE

<b>INTRODUZIONE</b> .....	<b>5</b>
<b>Organizzazione dei file</b> .....	<b>6</b>
<b>Fasi operative e punti principali</b> .....	<b>7</b>
<b>3. Esempi di apprendimento per Elementi Costruttivi Storici e monumentali</b> .....	<b>8</b>
<b>03_001_Arco</b> .....	<b>9</b>
Modellazione architettonica .....	9
Modellazione strutturale.....	12
Risultati delle analisi .....	15
<b>03_002_Archi</b> .....	<b>27</b>
Modellazione architettonica .....	27
Modellazione strutturale.....	30
Risultati delle analisi .....	32
<b>03_003_Archi</b> .....	<b>35</b>
Modellazione architettonica .....	35
Modellazione strutturale.....	39
Risultati delle analisi .....	40
<b>03_004_VoltaCrociera</b> .....	<b>42</b>
Modellazione architettonica .....	42
Modellazione strutturale.....	45
Risultati delle analisi .....	47
<b>03_005_CinematismoArchi</b> .....	<b>51</b>
<b>03_006_EdificioConArchi</b> .....	<b>62</b>
Modellazione architettonica .....	62
Modellazione strutturale.....	65
Risultati delle analisi .....	67
<b>03_007_CostruzioneRurale</b> .....	<b>71</b>
Modellazione architettonica .....	71
Modellazione strutturale.....	72
Risultati delle analisi .....	75
<b>03_008_Torre</b> .....	<b>86</b>
Modellazione architettonica .....	86
Modellazione strutturale.....	89
Risultati delle analisi .....	91

<b>03_009_Ciminiera</b> .....	<b>95</b>
Modellazione architettonica .....	95
Modellazione strutturale.....	104
Risultati delle analisi .....	113
<b>4. Esempi applicativi per Elementi Costruttivi Storici e monumentali</b> .....	<b>119</b>
<b>04_001_Chiesa_SanSilvestro</b> .....	<b>120</b>
Modellazione architettonica .....	123
Modellazione strutturale.....	125
Risultati delle analisi .....	126
Modellazione cinematica .....	127
<b>04_002_Campanile_SantAntonin</b> .....	<b>139</b>
Modellazione architettonica .....	139
Modellazione strutturale.....	143
Risultati delle analisi .....	148
<b>04_003_Chiesa_Cupola</b> .....	<b>155</b>
Modellazione architettonica .....	155
Modellazione strutturale.....	157
Risultati delle analisi .....	160

## INTRODUZIONE

La versione 2023 del software Aedes propone una revisione completa della manualistica dedicata agli Esempi Applicativi di PCM, finalizzati all'apprendimento delle procedure di modellazione ed analisi strutturale. L'opera è organizzata in tre volumi: esempi di apprendimento, esempi applicativi rappresentativi di casi reali, esempi specifici per Elementi Costruttivi Storici e monumentali (edifici storici, chiese, torri).

Come noto, la casistica degli edifici in muratura è estremamente varia: edifici nuovi in muratura ordinaria o in muratura armata, spesso con presenza di telai in calcestruzzo armato; edifici esistenti: storici, monumentali, edilizia residenziale di pregio o ordinaria, edilizia scolastica e più generale destinata ad usi pubblici (caserme, stazioni ferroviarie, ecc.), villette isolate, edifici in aggregato, su piani sfalsati, in pendio, consolidati con varie tecniche, danneggiati dai terremoti...

La grande varietà di queste strutture costituisce un'avvincente sfida per i Progettisti che si occupano di analisi di edifici esistenti, sia nel campo della valutazione di vulnerabilità statica e sismica, sia nell'ambito degli interventi di consolidamento.

Costruire una biblioteca 'universale' di casi è un compito quasi proibitivo: tuttavia, molte procedure sono comuni a tutte le tipologie. Il software Aedes può fare riferimento ad una lunga esperienza, avvalendosi direttamente e indirettamente di tanti contributi: professori universitari, progettisti strutturali, ingegneri programmatori, professionisti del settore e gli stessi Utenti del software.

I casi applicativi sono inoltre un riferimento per studiare le implicazioni di nuove tecniche di indagine, quali i metodi di ottimizzazione strutturale: in tale ambito, Aedes 2023 introduce l'Analisi Parametrica, dedicata alle gestione delle incertezze, sia nella valutazione dell'esistente che nella definizione dello stato di progetto, secondo un percorso originale di Ricerca e proponendo strumenti all'avanguardia.

Nelle pagine che seguono non può esservi alcuna pretesa di proporre un contenuto esaustivo, ma attraverso l'esame di alcuni esempi significativi ma relativamente semplici è possibile conoscere molti aspetti di queste tipologie di edifici, fino a maturare una capacità di sintesi personale con la quale potrà essere affrontato un nuovo, diverso caso professionale.

Consigliamo di affiancare la lettura del Manuale degli Esempi Applicativi all'apertura dei files associati, allegati al software, esplorando le varie proprietà, anche quelle non direttamente descritte in questo documento. Parallelamente, il Manuale di PCM, contenente la descrizione dettagliata dei comandi del software, fornisce una base di riferimento per una piena consapevolezza del significato dei diversi parametri strutturali.

La documentazione prodotta da Aedes Software contiene il fondamentale contributo degli ingegneri ed architetti collaboratori: grazie ad Alessio Francioso, Giuseppe Barbagallo, Giuseppe Basile, Chiara Pampaloni, che con entusiasmo e professionalità svolgono le attività di progettazione e di supporto del software Aedes.

Grazie anche al lettore per l'attenzione, e buon lavoro.

*Ing. Francesco Pugi*  
*AEDES Software*

## Organizzazione dei file

I file degli esempi applicativi forniti a corredo di Aedes.PCM sono organizzati nei seguenti gruppi:

1. Esempi di apprendimento, con descrizione dettagliata dei passi di modellazione e di analisi.
2. Esempi applicativi, riferiti a edifici rappresentativi dei casi reali. Per ogni esempio viene fornita una descrizione sintetica delle varie fasi di modellazione e analisi, con approfondimenti dedicati ai punti caratteristici dell'esempio.
3. Esempi di apprendimento per Elementi Costruttivi Storici e monumentali
4. Esempi applicativi per edifici monumentali.

Nella codifica dei nomi dei file:

- i primi due caratteri indicano il gruppo (01, 02, 03, 04);
- le tre cifre seguenti indicano il numero progressivo dell'esempio (001, 002, ...);
- la parte finale contiene un cenno sintetico alla natura del progetto.

Nella descrizione dell'esempio sono riportati eventuali file di riferimento disponibili nella cartella associata al file di esempio.

In generale la descrizione si articola in tre fasi operative: modellazione architettonica, modellazione strutturale, esecuzione dell'analisi e consultazione dei risultati.

Negli esempi di apprendimento (gruppi 01, 03) le fasi di modellazione e analisi vengono svolte in dettaglio e consentono all'Utente, passo dopo passo, la rigenerazione dell'esempio.

Negli esempi applicativi (gruppi 02, 04) le fasi di modellazione e analisi vengono presentate in modo sintetico, con approfondimenti riguardanti le specificità di ogni singolo esempio.

A seguire sono riportati i punti principali che caratterizzano le tre fasi operative. Alcuni punti sono comuni a tutti i progetti, altri intervengono in dipendenza dalle caratteristiche specifiche del progetto. Dove opportuno, richiami teorici integrano la descrizione dell'esempio.

## **Fasi operative e punti principali**

### **A. Modellazione architettonica**

- definizione piani e dati generali di progetto;
- definizione materiali;
- definizione delle sezioni di elementi non in muratura;
- costruzione del modello: muri con aperture, travi di fondazione, travi e pilastri in c.a., solai piani, solai a falda;
- definizione della stratigrafia e assegnazione del terreno alle travi di fondazione;
- definizione (ove opportuno) dei paramenti.

### **B. Modellazione strutturale**

- generazione del modello strutturale;
- introduzione di eventuali elementi aggiuntivi (aste, nodi);
- definizione dei vincoli interni ed esterni e dei carichi;
- definizione dell'Azione sismica (ubicazione del sito, risposta sismica locale, stati limite, fattori di comportamento) e dei Parametri di calcolo;
- generazione del modello cinematico e definizione dei singoli cinematismi.

### **C. Esecuzione analisi e consultazione risultati**

- esecuzione dell'analisi strutturale;
- consultazione dei risultati (sollecitazioni e deformazioni delle aste, verifiche di sicurezza e indicatori di rischio sismico):
- generazione della relazione di calcolo;
- consultazione dei risultati dell'analisi cinematica;
- esecuzione della classificazione sismica.

### **3. ESEMPI DI APPRENDIMENTO PER ELEMENTI COSTRUTTIVI STORICI E MONUMENTALI**

## 03\_001\_Arco

### File di riferimento:

03\_001\_Arco\_A (ex 101)

03\_001\_Arco\_B (ex 102)

03\_001\_Arco\_C (ex 105)

03\_001\_Arco\_D (ex 106)

03\_001\_Arco\_E (ex 107)

### Parole chiave:

- MODELLAZIONE ARCO
- CINEMATISMO GENERICO

### Canale YouTube AEDES:

*ECS Elementi Costruttivi Storici e monumentali. Introduzione*

<https://www.youtube.com/watch?v=al2baq0cbdw>

*ECS Rinforzi*

<https://www.youtube.com/watch?v=jhkYErJo-f0>

## MODELLAZIONE ARCHITETTONICA

Nell'ambito dell'analisi per Elementi Costruttivi Storici e monumentali, la modellazione di un'apertura ad arco in PCM può essere condotta attraverso la creazione di un oggetto specifico "**Arco**": si ipotizzi pertanto di voler studiare un'apertura ad arco a tutto sesto, avente spessore di 40cm e la cui altezza del riempimento sia pari a 6m dal piano d'imposta, in prima istanza non considerando elementi di appoggio come muri o colonne (file "*03\_001\_Arco\_A.vdml*").

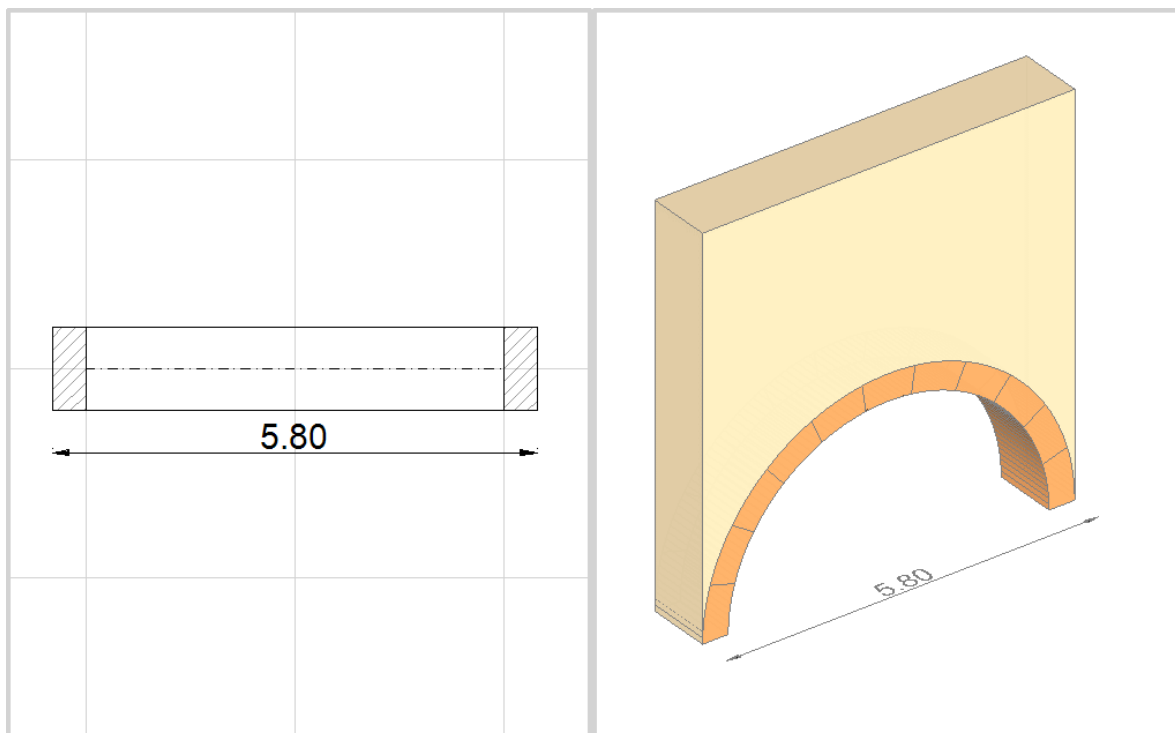


Figura 3-1: Arco a tutto sesto, avente spessore 40cm e luce netta 5m

Per prima cosa occorre impostare l'altezza del Piano, questa definirà la quota orizzontale rappresentativa dell'estradosso dell'impalcato superiore:

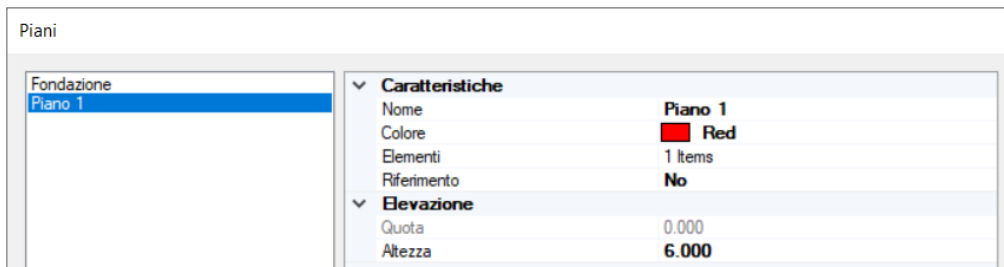


Figura 3-2: "Gestione Piani", inserimento dell'altezza dell'interpiano (quota dell'estradosso del Rinfianco)

Successivamente si crea quindi un oggetto "**Arco**", qualificando innanzitutto le sue caratteristiche dalla finestra delle proprietà, gruppo "Geometria":

- Altezza d'imposta=**0** (in questo primo esempio non ci sono elementi sui quali si imposta l'arco);
- Freccia= **2.50m** (trattandosi di arco a tutto sesto, la freccia è pari alla metà della luce netta=5m);
- Spessore=**0.40m**;
- Profondità=**1.00m**.

L'arco viene definito in ambiente architettonico cliccando col mouse su punto iniziale e punto finale: si ipotizzi in questo esempio che il punto iniziale coincida con l'origine degli assi (0,0), sarà sufficiente digitare (0,5) per determinare il punto finale: una volta creato l'arco, alle estremità di base si noteranno due zone tratteggiate, queste rappresentano l'impronta in pianta delle imposte:

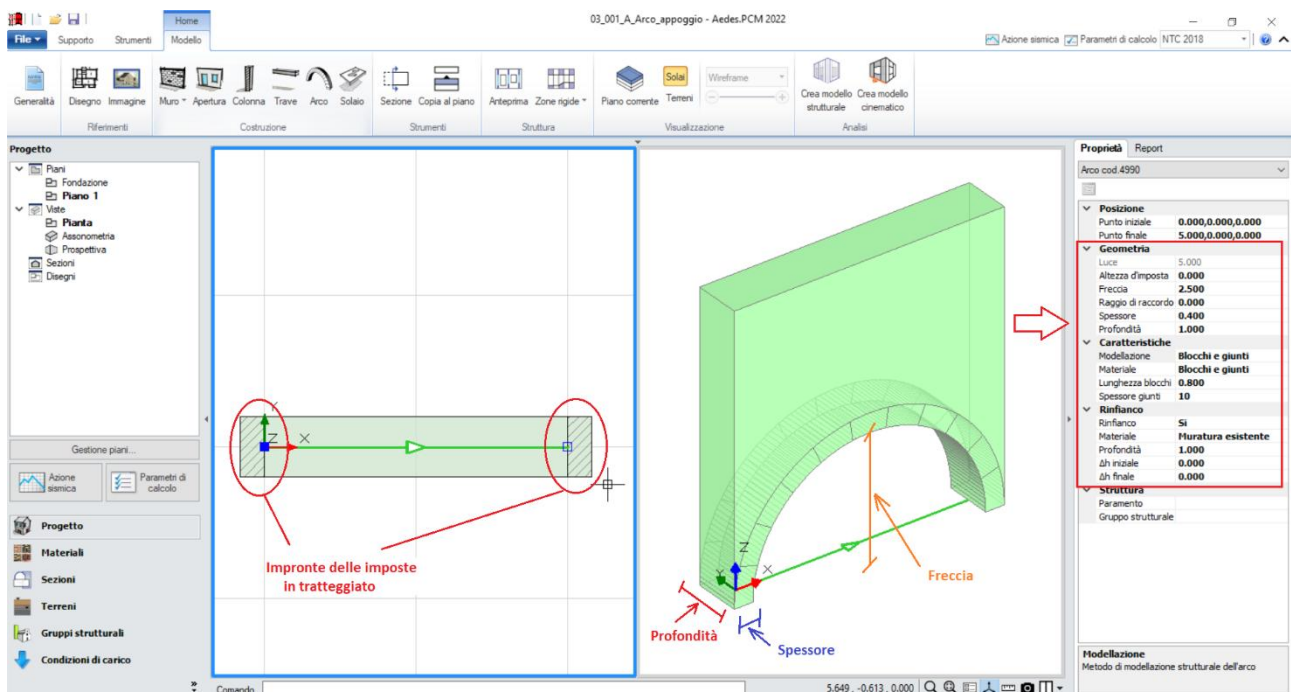


Figura 3-3: Arco a tutto sesto, disegno grafico e definizione delle proprietà

Dal gruppo "Caratteristiche", si imposta quindi "**Modellazione=Blocchi e Giunti**": questo tipo di schematizzazione prevede la traduzione dell'arco in fase strutturale in un sistema composto dai "Blocchi" (beam ad asse curvo avente materiale lunghezza pari a quella definita in Input) e dai "Giunti"

(aste incastro-cerniera che collegano i vertici delle facce di due blocchi consecutivi). Ogni giunto sarà poi ricollegato tramite 4 link rigidi al nodo baricentrico del blocco.

Selezionando questa schematizzazione, in automatico verrà adeguato anche il materiale, accettando unicamente **un materiale del tipo "Blocchi e Giunti"**: dalla finestra "Materiali" si potrà modificare opportunamente questo materiale sulla base delle risultanze della struttura reale; più in specifico, sarà possibile modificare i moduli elastici **E** e **G** sia per i Blocchi che per i Giunti, in questo caso inoltre si adotta per i Blocchi la Resistenza a Compressione  $f_{,m}=35 \text{ MPa}$  e per i Giunti di Malta si considera nulla la resistenza a Trazione  $f_{,tm}=0$ :

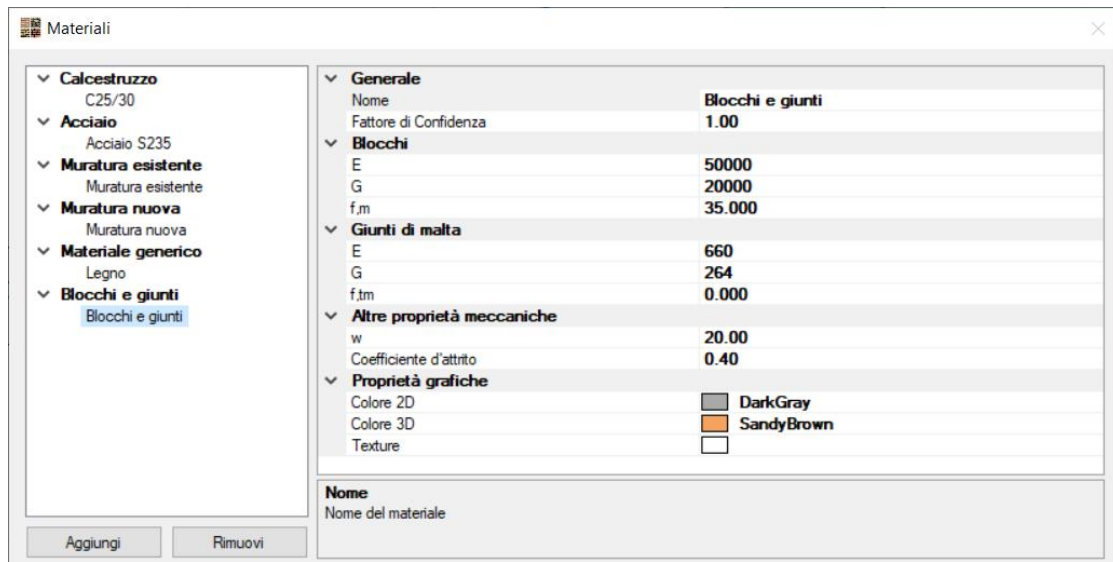


Figura 3-4: Finestra Materiali, caratteristiche del materiale "Blocchi e Giunti"

Una volta impostato il tipo di schematizzazione e di conseguenza il materiale, si potrà impostare la "Lunghezza dei blocchi", ovvero un valore rappresentativo della suddivisione in blocchi.

N.B.: tale valore deve essere valutato in modo ragionevole, sulla base della geometria dell'arco e delle sue caratteristiche costruttive, tenendo comunque conto che non per forza la suddivisione dei blocchi debba corrispondere necessariamente alla reale suddivisione dei blocchi.

In ogni caso, qualsiasi valore si inserisca, PCM adegua in automatico le lunghezze dei blocchi in modo che sia generato sempre un concio in chiave.

Risulta inoltre possibile specificare un opportuno valore per lo "Spessore dei Giunti".

In questo caso, si decide di impostare:

- Lunghezza dei blocchi = 0.80m;
- Spessore dei Giunti = 10mm.

Infine, nel gruppo "Rinfianco" è possibile qualificare la presenza di un "Rinfianco", che definisce l'eventuale orizzontamento superiore, impostandone il Materiale ed eventuale andamento inclinato attraverso opportuna modifica dei valori di  $\Delta h$  iniziale e/o finale; inoltre, è possibile considerare anche una sua diversa profondità rispetto all'arco sottostante.

In tal caso, si imposta la presenza di un Rinfianco in Muratura esistente in Pietrame disordinata, avente profondità pari a quella dell'arco sottostante.

## MODELLAZIONE STRUTTURALE

A questo punto, si può passare alla successiva fase, generando il "Modello Strutturale": a generazione avvenuta, la prima cosa che si nota è l'avvenuta discretizzazione dell'arco in aste curvilinee (i "Blocchi"): rispetto al modello architettonico, ogni Blocco viene ulteriormente suddiviso a metà in due Blocchi. Questa suddivisione serve a creare un nodo baricentrico nel quale poter far confluire sia il peso proprio di ogni blocco, sia il carico trasferito dall'orizzontamento superiore tramite link rigidi verticali:

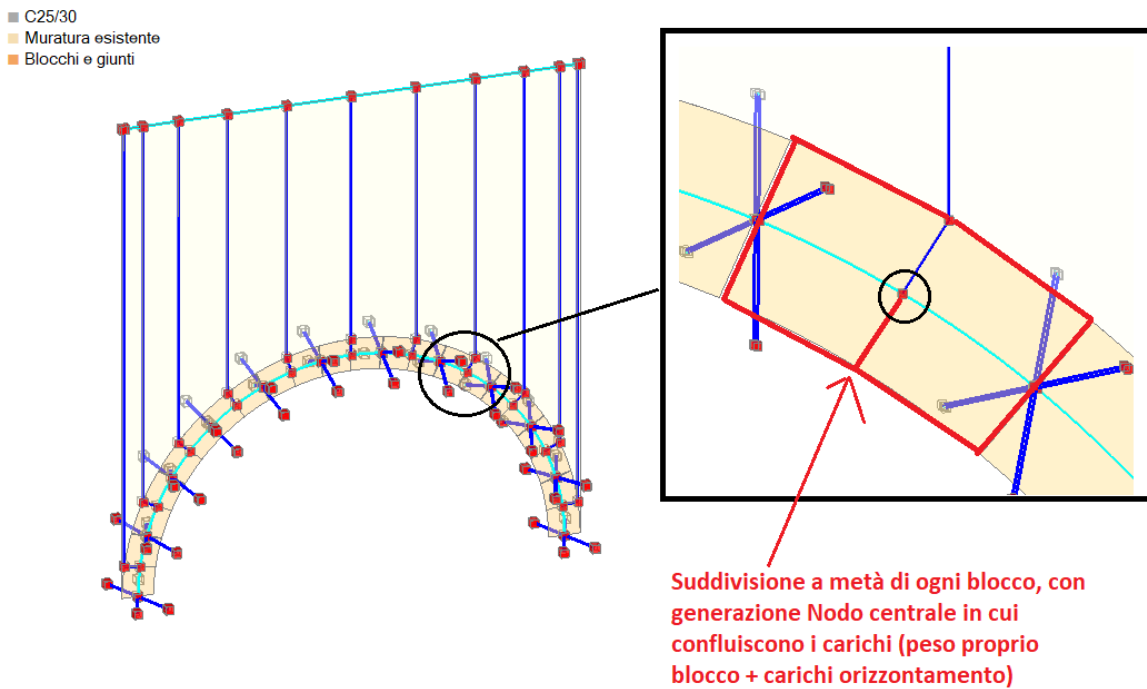


Figura 3-5: Modello Strutturale – Vista per "Materiale" – Suddivisione dei Blocchi

Effettuando uno zoom su un'interfaccia tra due blocchi consecutivi ed attivando la visualizzazione solida (rapidamente con F10 da tastiera), è possibile osservare la generazione di aste (i "Giunti") con vincolamento "Incastro-cerniera", aventi la funzione di trasferire Sforzo Normale e Momento tra un Blocco e l'altro:

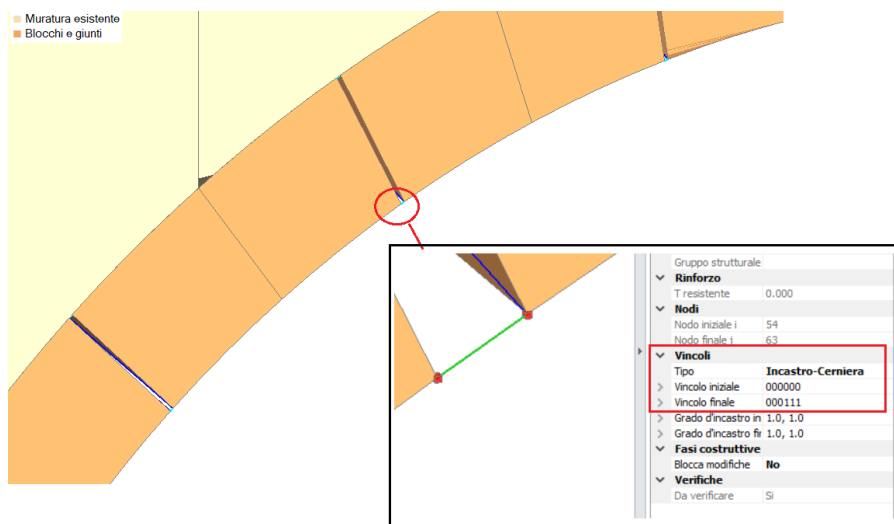


Figura 3-6: Modello Strutturale – Vista per "Materiale" – Visualizzazione dei Giunti

I nodi di estremità dei giunti vengono poi ricollegati ad un nodo centrale di ogni interfaccia tramite Link rigidi con vincolo incastro-incastro:

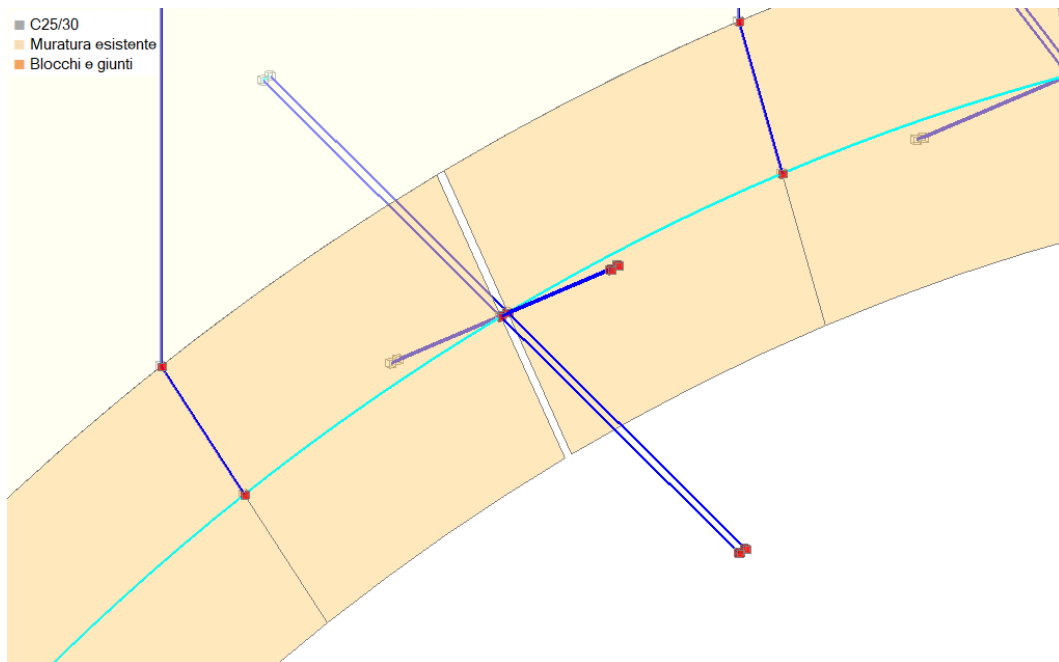


Figura 3-7: Modello Strutturale – Vista per “Materiale” – Visualizzazione Link rigidi tra spigoli e nodo centrale

Poiché l’arco in esame non è dotato di elementi d’imposta, prima di eseguire le successive analisi risulta necessario selezionare manualmente i nodi di base degli ultimi due blocchi alle imposte, applicando loro il vincolo di “Incastro” e ponendoli al “Livello 0”; inoltre, trattandosi di una struttura piana, risulta necessario eliminare la componente di labilità lungo X bloccandone lo spostamento per il primo nodo rappresentativo dell’orizzontamento:

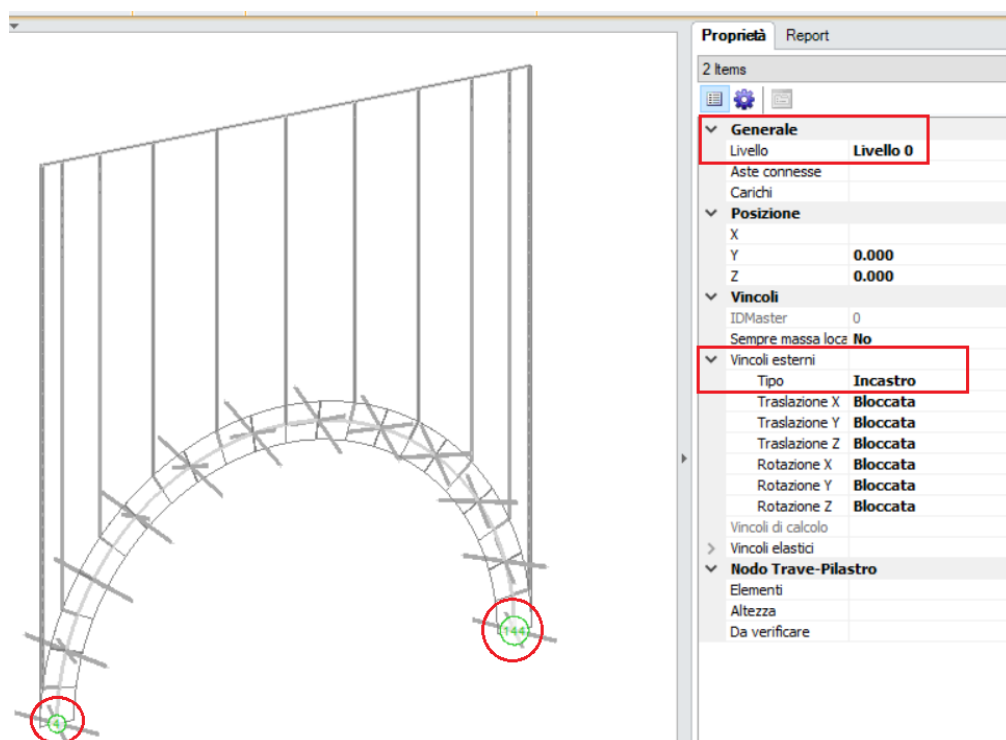


Figura 3-8: Modello Strutturale – Impostazione vincolo di incastro per i nodi di imposta

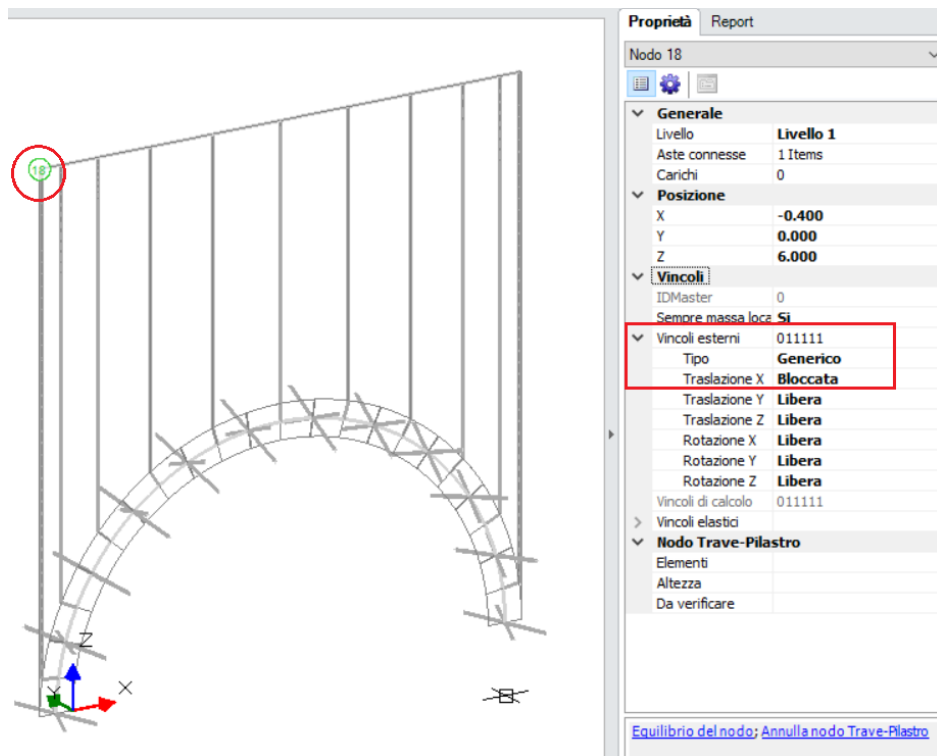


Figura 3-9: Modello Strutturale – Blocco della Traslazione X per il primo nodo dell'orizzontamento

Successivamente, al fine di evitare la creazione di un nodo Master e quindi di relazioni di rigidità del tipo Master-Slave tra nodi, si definisce il Livello come "Non Rigido" dal Navigatore sulla sinistra:

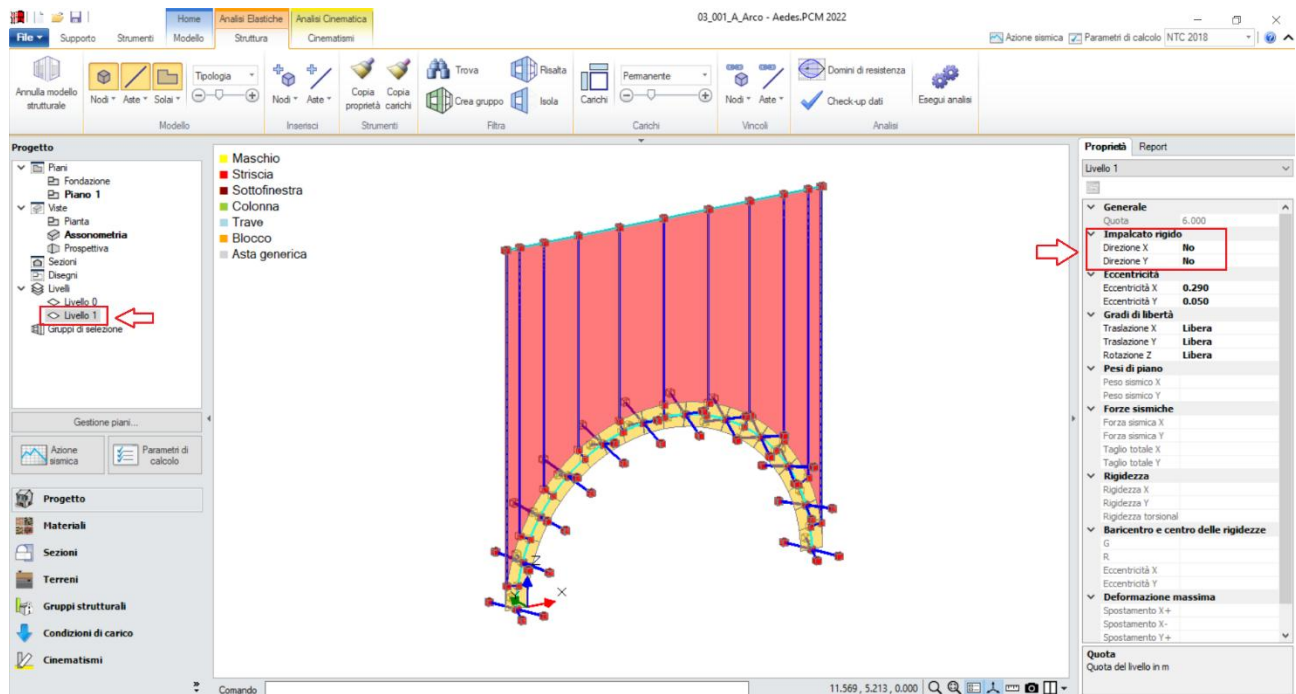


Figura 3-10: Modello Strutturale – Impostazione del Livello "Non rigido"

## RISULTATI DELLE ANALISI

Dopo aver richiesto l'esecuzione delle Analisi dal relativo comando **"Esegui Analisi"**, si consultano i risultati ottenuti, partendo innanzitutto dall'Analisi Modale: in questo caso, il modo principale in X ha un periodo di circa 0.063 sec con una massa partecipante di circa l'80%:

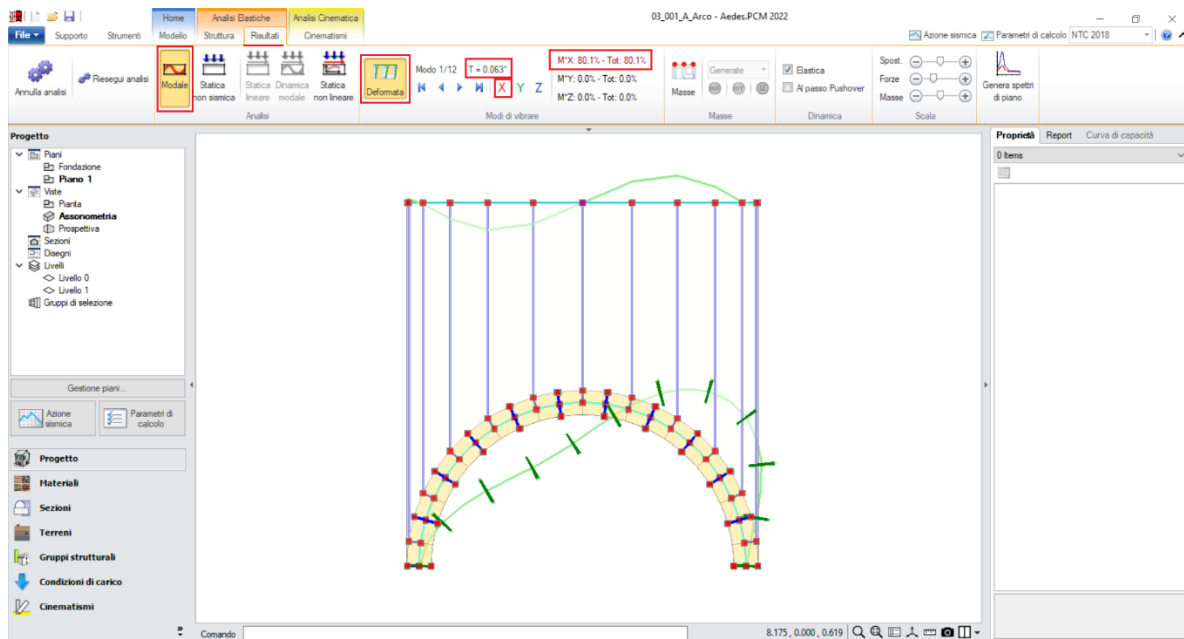


Figura 3-11: Arco a tutto sesto: Modo principale in X: Periodo 0.063 sec e Massa Partecipante 80%

In Analisi Statica Non Sismica è possibile visualizzare l'andamento delle Curva delle Pressioni: si nota che, già sotto carichi permanenti dovuti al peso proprio, la curva delle pressioni fuoriesce in corrispondenza delle due interfacce prossime al concio in chiave. Se i giunti presentano resistenza a trazione nulla dalla finestra Materiali (come in questo caso), nelle zone opposte alla fuoriuscita della curva delle pressioni questi presenteranno "Verifica non soddisfatta". Questa sarà la prima configurazione equilibrata di partenza per la successiva Analisi Pushover.

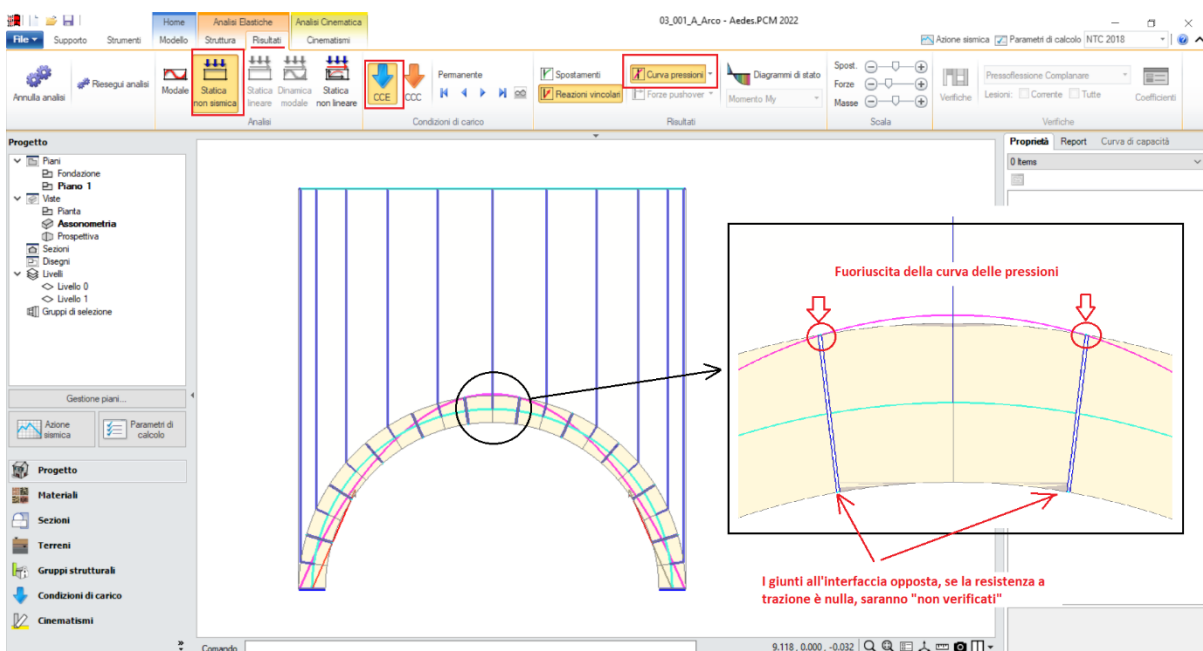


Figura 3-12: Arco a tutto sesto: Analisi Statica Non Sismica: visualizzazione Curva delle Pressioni

In Analisi Pushover, visualizzando verifiche e spostamenti corrispondenti alla configurazione SLU dell'ultimo punto della curva, è possibile apprezzare il meccanismo di collasso dell'arco: l'incremento del taglio agente comporta l'apertura di quattro cerniere alternate tra intradosso ed estradosso, dovute alla fuoriuscita della curva delle pressioni nelle interfacce sotto evidenziate. In queste zone, i giunti non verificati sono indicati in rosso, come i corrispondenti Blocchi per i quali la verifica non è soddisfatta:

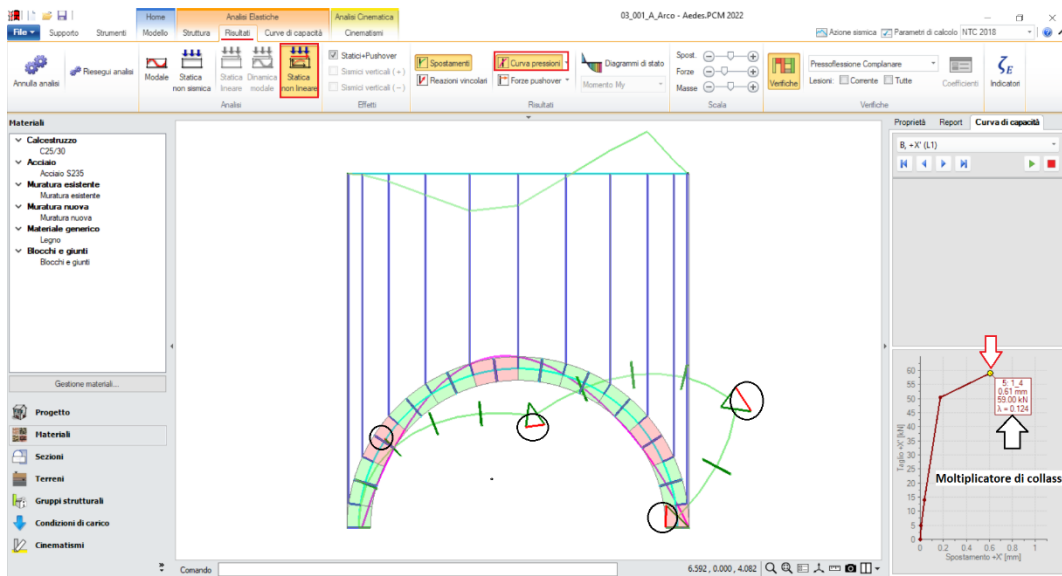


Figura 3-13: Arco a tutto sesto, Pushover: Verifiche, Curva delle Pressioni, Spostamenti ( $f_{tm}=0$  per i Giunti)

Dalla curva Pushover al momento attiva in basso a destra, all'ultimo passo è riportato anche il "Moltiplicatore di collasso  $\lambda$ ", ovvero il minimo valore del moltiplicatore dei carichi in grado di attivare un cinematiso.

Questo dato, assieme al valore della "Massa Partecipante" (ricavabile dal "Report" "Verifiche di Sicurezza") può essere utilizzato per la verifica dell'arco in termini cinematici: si genera quindi il "Modello Cinematico", e si aggiunge un Cinematiso Generico, in cui nelle proprietà inserire i valori di  $\alpha_0$  e  $M^*$  secondo quanto consultato fra i risultati della Pushover:

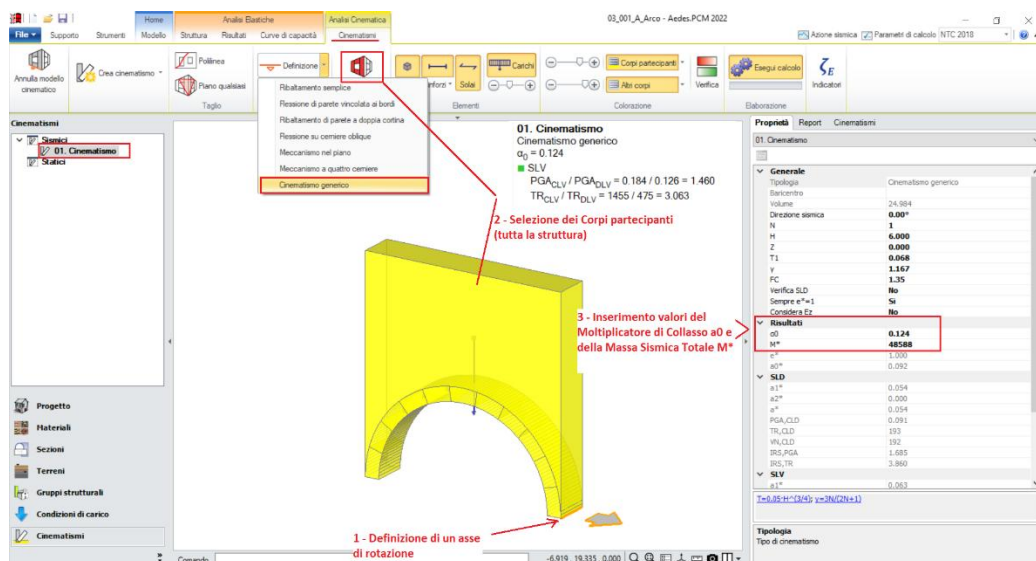


Figura 3-14: Modello Cinematico Arco a Tutto Sesto: impostazione di un Cinematiso Generico

Si supponga adesso di considerare lo stesso modello di Arco utilizzato in precedenza, stavolta tuttavia adottando un valore  $\neq 0$  per la Resistenza a trazione dei Giunti (file "03\_001\_Arco\_B.vdml").

Dalla finestra Materiali si imposta quindi  $f_{tm}=0.05 \text{ MPa}$ :

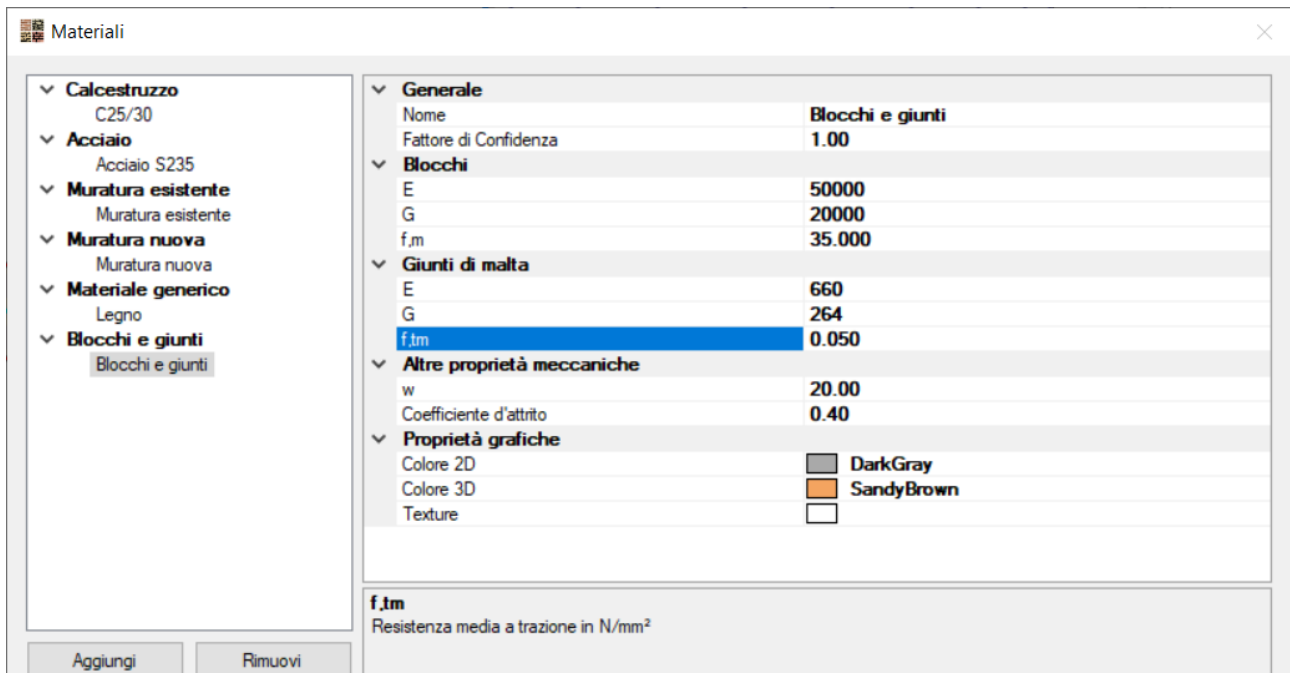


Figura 3-15: Finestra Materiali, inserimento valore  $f_{tm}$  nel materiale "Blocchi e Giunti"

Rieseguendo le analisi, con particolare riferimento all'Analisi Pushover si valutino adesso i risultati rispetto al modello iniziale: in questo caso, in corrispondenza del meccanismo di collasso finale è apprezzabile comunque un miglioramento della risposta dell'arco. Infatti, la configurazione SLU viene adesso raggiunta per uno spostamento pari a 0.66mm (prima 0.61mm), ma soprattutto il moltiplicatore di collasso cresce fino a  $\lambda=0.162$  (prima  $\lambda=0.124$ ).

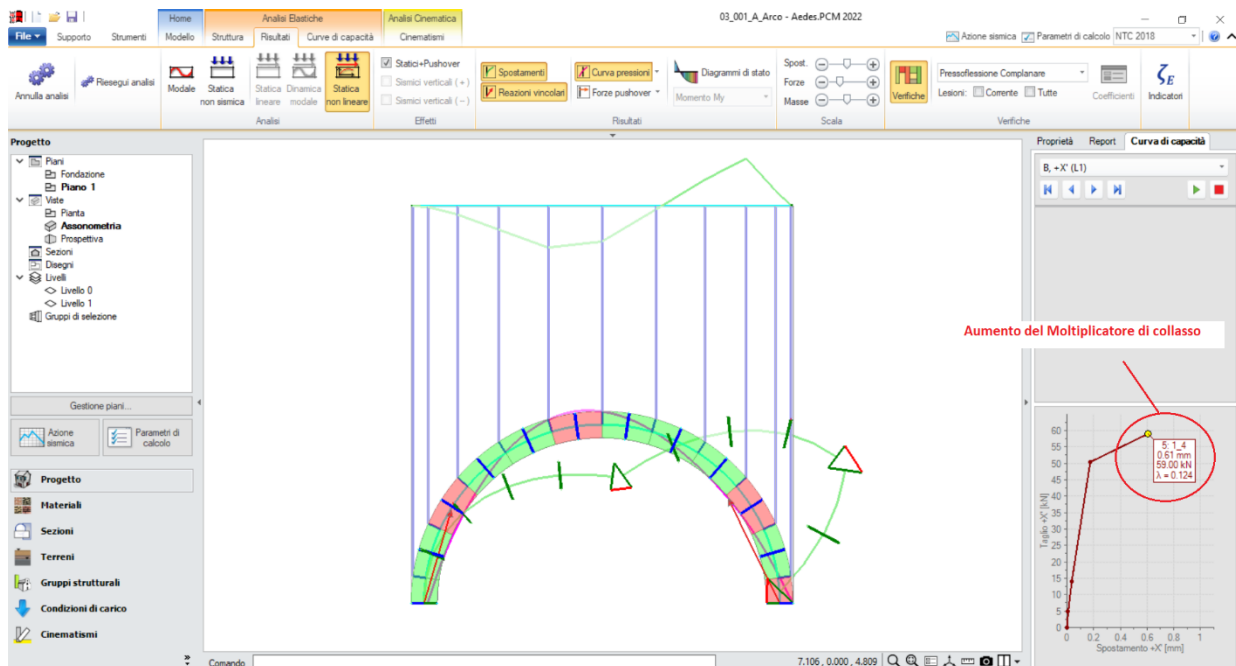


Figura 3-16: Analisi Pushover: Verifiche, Curva delle Pressioni e Spostamenti ( $f_{tm}=0.05 \text{ MPa}$  per i Giunti)

La miglior capacità dell'arco viene evidenziata dall'indicatore di rischio calcolato attraverso il cinematismo generico:

<p><b>01. Cinematismo</b> Cinematismo generico <math>\alpha_0 = 0.124</math> ■ SLV <math>PGA_{CLV} / PGA_{DLV} = 0.184 / 0.126 = 1.460</math> <math>TR_{CLV} / TR_{DLV} = 1455 / 475 = 3.063</math></p> <p><b>File "03_001_A_Arco" (f,tm=0)</b></p>	<p><b>01. Cinematismo</b> Cinematismo generico <math>\alpha_0 = 0.162</math> ■ SLV <math>PGA_{CLV} / PGA_{DLV} = 0.213 / 0.126 = 1.690</math> <math>TR_{CLV} / TR_{DLV} = 2475 / 475 = 5.211</math></p> <p><b>File "03_001_B_Arco" (f,tm=0.05 MPa)</b></p>
---	--

Figura 3-17: Confronto risultati tra modello Arco senza e con Resistenza a trazione nei Giunti

Ripercorrendo i passi del precedente esempio, di seguito si descriverà la modellazione di un Arco a Sesto Acuto, avente spessore di 40cm e la cui altezza del riempimento sia pari a 6m dal piano d'imposta, senza considerare elementi di appoggio come muri o colonne (file "03\_001\_Arco\_C.vdml").

Dopo aver creato un oggetto "Arco", per ricreare la geometria a sesto acuto si modificano opportunamente le sue caratteristiche dalla finestra delle proprietà, gruppo "Geometria":

- Altezza d'imposta=**0** (anche in questo caso non si considerano elementi sui quali si imposta l'arco);
- Freccia= **3.50m** (è a sesto acuto, la freccia è pertanto maggiore della metà della luce netta=5m);
- Spessore=**0.40m**;
- Profondità=**1.00m**;
- Raggio di Raccordo= **0.50m** (poiché l'arco è a sesto acuto, è il raggio di raccordo in sommità).

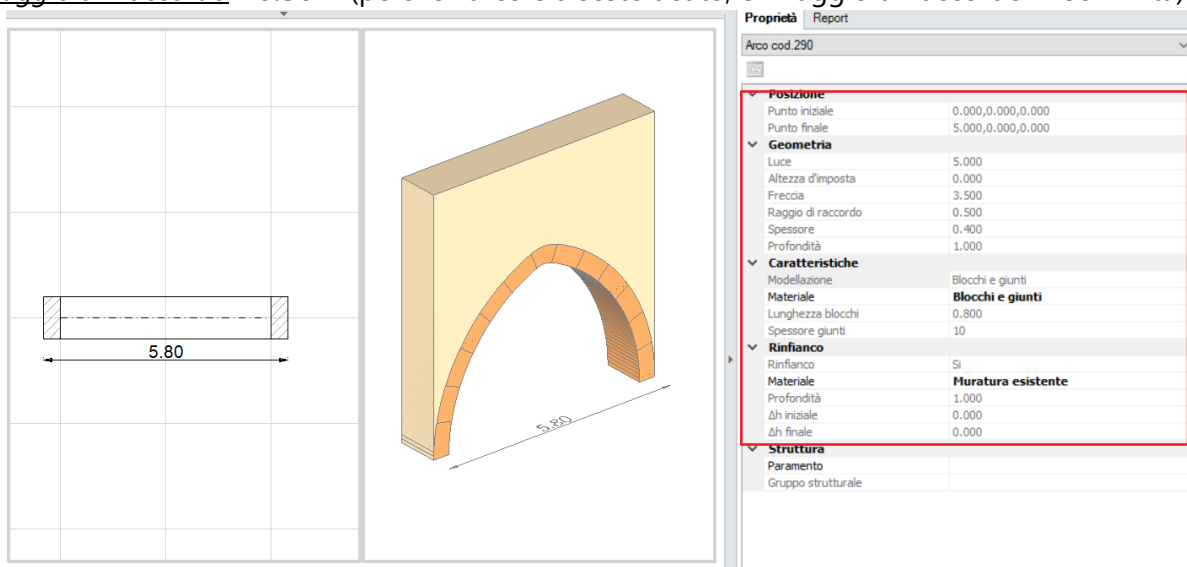


Figura 3-18: Arco sesto acuto, avente spessore 40cm e luce netta 5m

In questo caso, si decide di impostare inoltre:

- Lunghezza dei blocchi =**0.80m**;
- Spessore dei Giunti= **10mm**.

Si considera anche la presenza di un Rinfianco in Muratura esistente in Pietrame disordinata, avente profondità pari a quella dell'arco sottostante.

Per questo esempio, si considera la modellazione a "**Blocchi e Giunti**", considerando  $f_m=35$  MPa per i Blocchi ed  $f_{tm}= 0.05$  MPa per i Giunti.

In ambiente strutturale, anche in questo caso occorre incastrare manualmente i due nodi all'imposta ed impedire la traslazione X nel primo nodo dell'orizzontamento.

I risultati dell'Analisi Modale evidenziano che il modo principale in X ha un periodo di circa 0.075 sec con una massa partecipante di circa l'81%: come si si aspetterebbe, rispetto all'arco a tutto sesto, la maggiore altezza libera della freccia comporta un lieve incremento del periodo proprio di vibrazione.

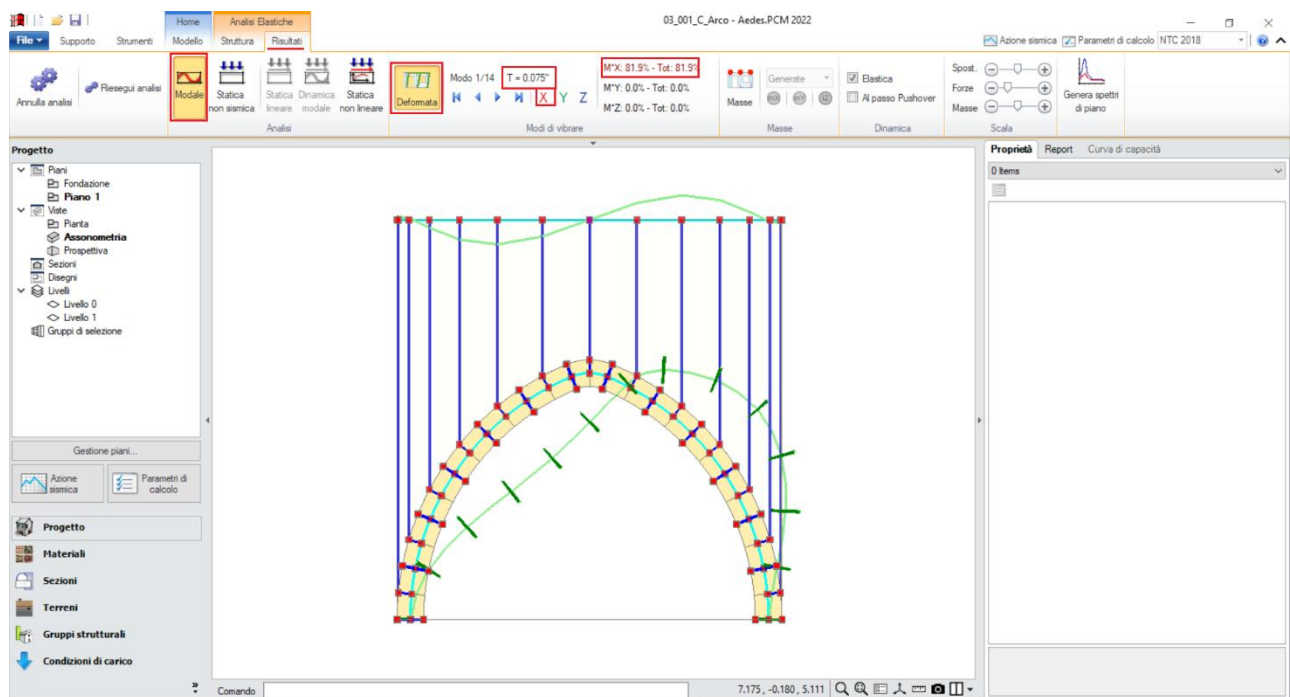


Figura 3-19: Arco a sesto acuto: Modo principale in X: Periodo 0.075 sec e Massa Partecipante 81%

In Analisi Statica Non Sismica, la curva delle pressioni è adesso interamente contenuta all'interno dello spessore dell'arco, senza presentare fuoriuscite.

Anche tale aspetto è coerente con la diversa forma: sotto carichi statici, più si innalza la freccia più la curva delle pressioni tende ad essere ricentrata in sommità:

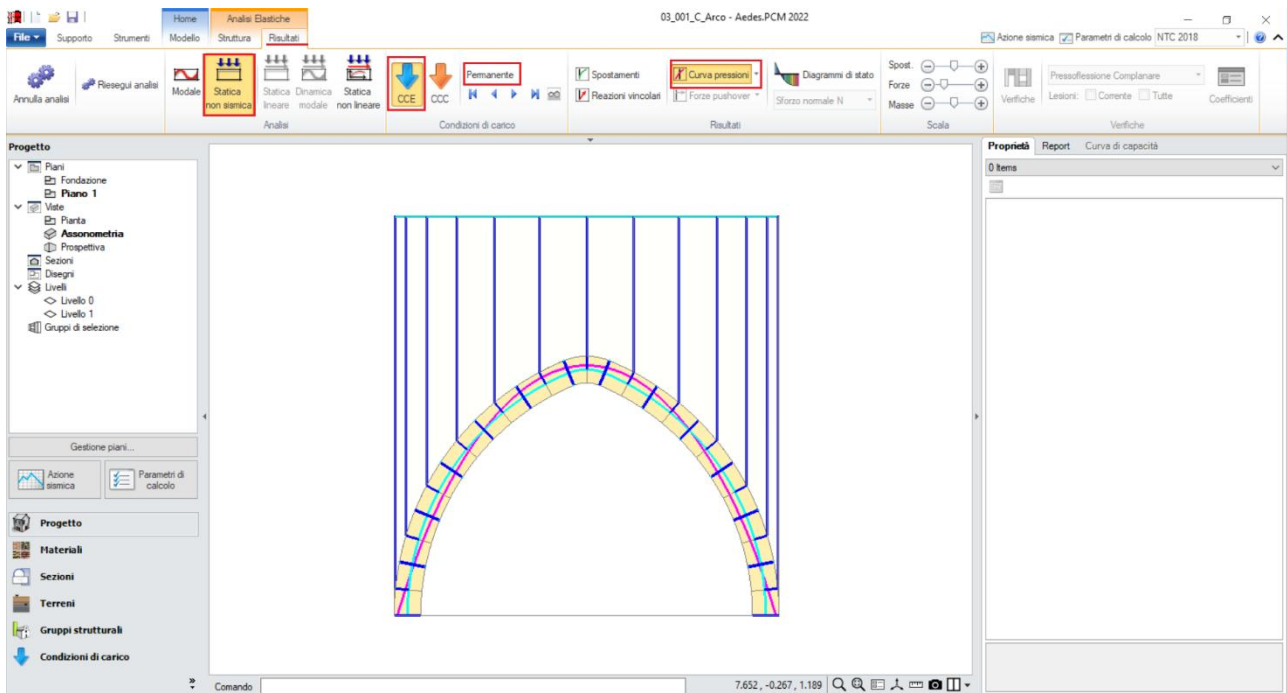


Figura 3-20: Arco a sesto acuto: Analisi Statica Non Sismica: visualizzazione Curva delle Pressioni

In Analisi Pushover, al pari degli esempi precedenti è apprezzabile il meccanismo di collasso dell'arco, con la conseguente apertura di quattro cerniere alternate tra intradosso ed estradosso, dovute alla fuoriuscita della curva delle pressioni nelle interfacce sotto evidenziate. In queste zone, i giunti non verificati sono indicati in rosso, come i corrispondenti Blocchi per i quali la verifica non è soddisfatta:

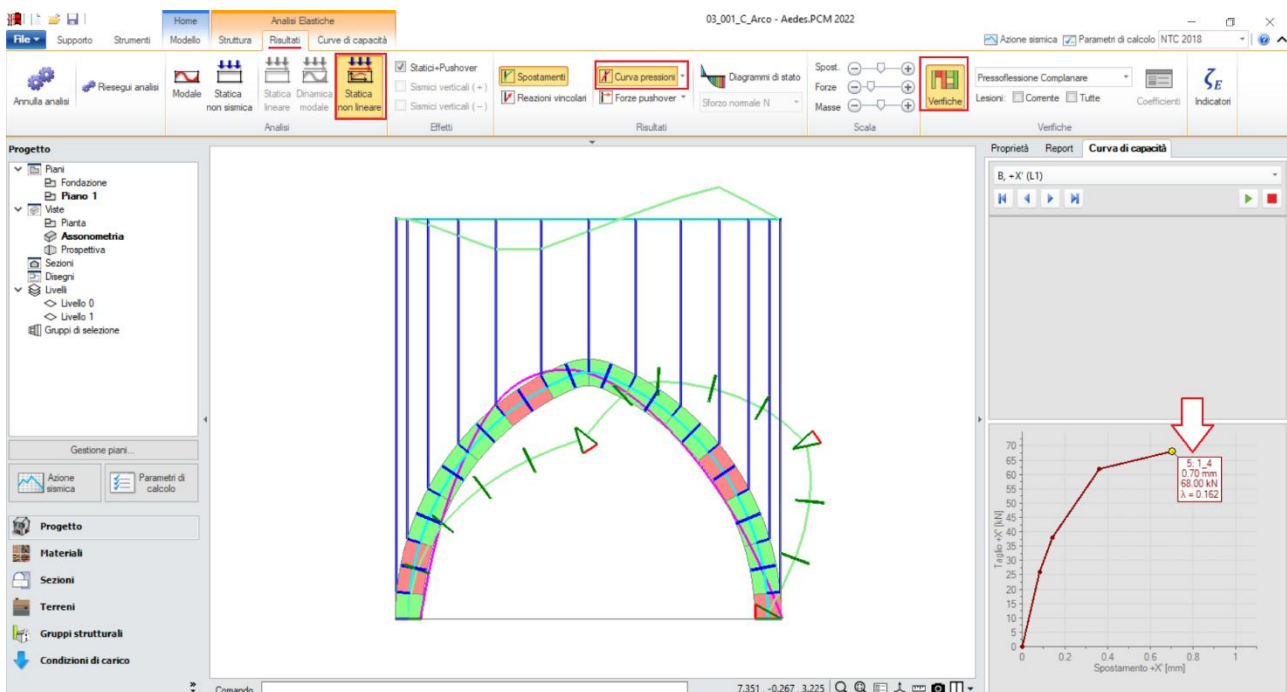


Figura 3-21: Arco a sesto acuto, Pushover: Verifiche, Curva delle Pressioni, Spostamenti ( $f_{tm}=0.05$  per i Giunti)

Il moltiplicatore di collasso vale  $\lambda=0.162$ , tuttavia l'indicatore di rischio in Pushover ( $\zeta \approx 0.7$ ) è lievemente inferiore al caso di arco a tutto sesto ( $\zeta \approx 0.6$ ), mentre il Cinematismo generico esprime un livello di sicurezza simile:

N° curva	Corrente	Vista	Distr.	Direz.	Direz.2	Mt	Ez	Control	$\zeta_{PGA(SLV)}$	$\zeta_{TR(SLV)}$	VN.CLV
1		<input checked="" type="checkbox"/>	B	+X'				L1	0.603	0.251	13
2		<input type="checkbox"/>	E	+X'				L1	0.675	0.328	16

#### 01. Cinematismo

Cinematismo generico

$\alpha_0 = 0.162$

■ SLV

$PGA_{CLV} / PGA_{DLV} = 0.213 / 0.126 = 1.690$

$TR_{CLV} / TR_{DLV} = 2475 / 475 = 5.211$

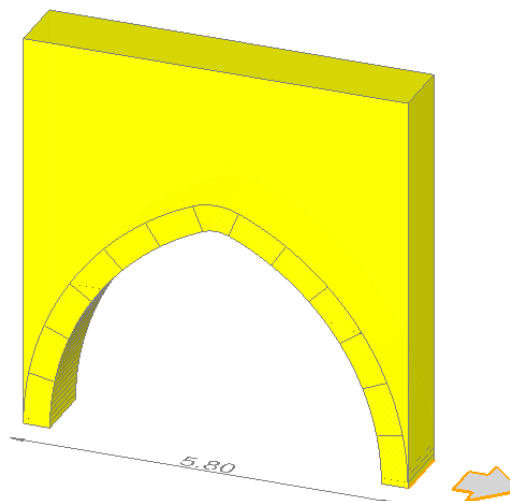


Figura 3-22: Risultati del modello Arco a sesto acuto, con Resistenza a trazione nei Giunti

Si riprenda adesso il caso dell'Arco a tutto sesto come modellato inizialmente (con  $f_{tm}=0$  nei Giunti), considerando adesso un intervento di "**Rinforzo Passivo**" da applicare in Intradosso ([file "03\\_001\\_Arco\\_D.vdml"](#)).

In PCM è possibile considerare due tipi di rinforzo, denominati rispettivamente "Rinforzo Passivo" e "Rinforzo Attivo".

Il Rinforzo Passivo consiste nell'applicare un sistema di elementi resistenti a trazione (in intradosso e/o estradosso) quali ad esempio Nastri in FRP, FRCM o Reti in Acciaio: l'applicazione di questi sistemi consente di incrementare la resistenza a trazione offerta dai Giunti che, specialmente in fase di Pushover, subiscono dilatazioni date dall'apertura delle cerniere del meccanismo di collasso, quindi aumentare la loro resistenza consente di "ritardare" l'apertura delle cerniere stesse contribuendo ad una miglior risposta dell'arco-

Il Rinforzo Attivo invece si basa sui lavori di Lorenzo Iurina del Politecnico di Milano, e consiste nell'applicare elementi di rinforzo in grado di indurre uno stato di "precompressione" nell'arco, con conseguente ricentraggio della curva delle pressioni e relativo "ritardo" nella progressione dell'apertura delle cerniere.

Per poter applicare un "Rinforzo Passivo", in ambiente strutturale si selezionano i blocchi oggetto del rinforzo e, dalla finestra delle proprietà, si inserisce un valore per la "Resistenza a trazione" (in kN) offerta dagli elementi di rinforzo, specificando inoltre se si tratta di Rinforzo "Passivo" o "Attivo".

Per l'esempio in esame, si selezionano quindi tutti i blocchi dell'arco (risulta utile il comando "Trova", filtrando per tipologia "Blocco" in modo da selezionare tutti e soli i Blocchi) e si imposta **l'applicazione di un Rinforzo passivo in Intradosso, con Resistenza a Trazione di 25 kN:**

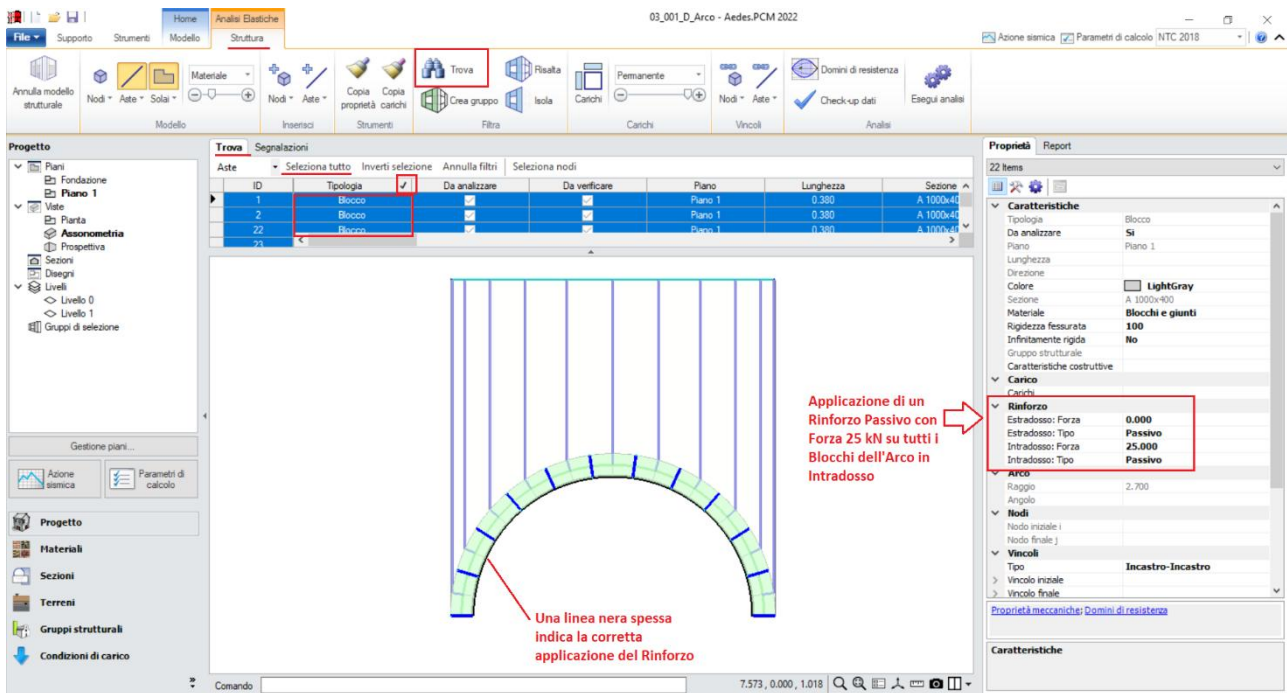


Figura 3-23: Arco a tutto sesto, con Rinforzi passivi su tutto l'Arco in Intradosso

La corretta applicazione del rinforzo è confermata per via grafica attraverso il disegno di una linea spessa in nero sulle zone effettivamente oggetto di rinforzo.

N.B.: poiché per ogni interfaccia sono presenti due giunti, il valore inserito si divide a metà su ogni giunto: per averne contezza, selezionando un generico giunto in intradosso, dalla finestra delle proprietà è possibile vedere, in sola lettura, il reale valore della Trazione considerata in quel giunto (in questo caso, si ottiene  $T_{resistente} = 12.50 \text{ kN}$ ):

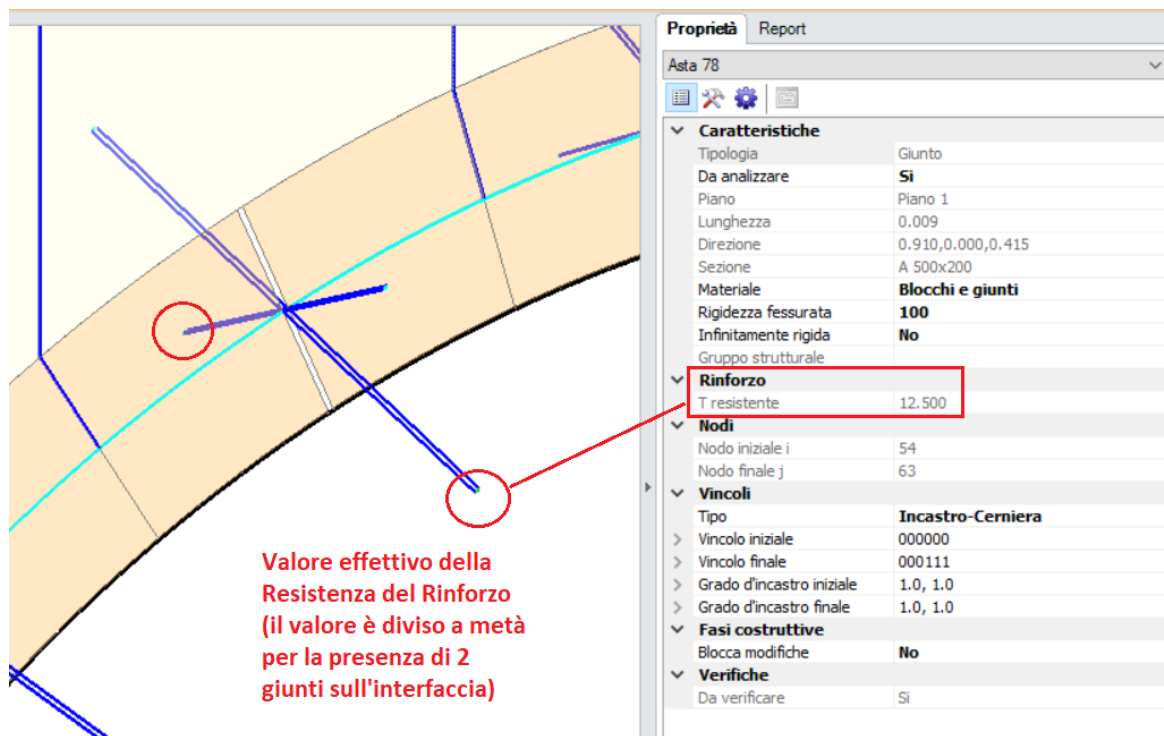
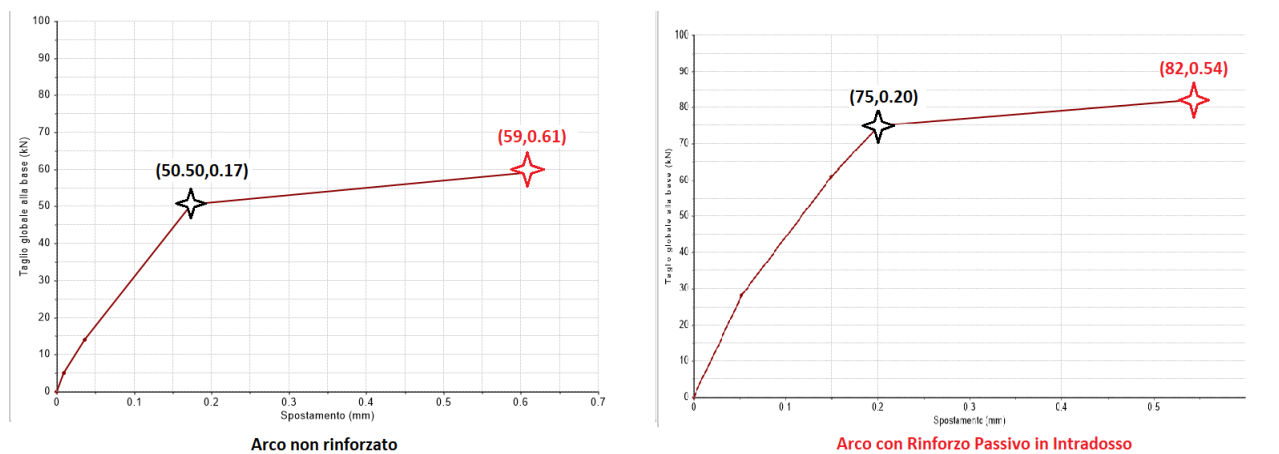


Figura 3-24: Arco a tutto sesto, controllo della Resistenza a Trazione su un generico giunto

Una volta applicato l'intervento, è possibile rieseguire le analisi per valutare l'efficacia del rinforzo sui risultati. Per un immediato riscontro del miglioramento ottenuto, poiché il generico andamento delle curve Pushover è sostanzialmente bilineare, è possibile confrontare la risposta dell'arco prima e dopo l'applicazione del rinforzo confrontando alcuni parametri caratteristici delle curve, quali la coppia di valori Forza-Spostamento in corrispondenza sia del limite elastico che dell'ultimo passo, nonché il moltiplicatore di collasso.

Raccogliendo i dati ottenuti in una tabella, per le diverse curve e distribuzioni calcolate, è apprezzabile il miglioramento ottenuto a seguito dell'applicazione del rinforzo in quanto aumentano sia i valori di spostamento che di forza ultima, con conseguente aumento anche del moltiplicatore di collasso. Si può inoltre dedurre che i valori di Forza, Spostamento e Moltiplicatore di collasso crescono in modo direttamente proporzionale all'entità della Resistenza a Trazione considerata per il rinforzo:



Limite Elastico	B			E		
	d (mm)	F (kN)	$\lambda$	d (mm)	F (kN)	$\lambda$
Arco Non Rinforzato	0.17	50.5	0.106	0.11	52.5	0.11
Arco con Rinforzo attivo in Intradosso	0.2	75	0.157	0.2	81	0.17
Ultimo Passo	B			E		
	d (mm)	F (kN)	$\lambda$	d (mm)	F (kN)	$\lambda$
Arco Non Rinforzato	0.61	59	0.124	0.6	61.5	0.129
Arco con Rinforzo attivo in Intradosso	0.54	82	0.172	0.56	89	0.187

Figura 3-25: Arco a tutto sesto, confronto Pushover tra Arco non Rinforzato e con Rinforzo Passivo in Intradosso

I risultati sono migliori anche se si ipotizza l'utilizzo di un "Rinforzo Attivo" ((file "03\_001\_E\_Arco.vdml"): in questo caso, si prevede l'applicazione di cavi metallici sull'intradosso adeguatamente connessi all'arco tramite connettori. Questi cavi, una volta installati, vengono poi messi in tensione in modo da indurre una precompressione nell'arco.

In modo simile a quanto già condotto per l'intervento precedente, in questo caso per l'applicazione di un Rinforzo Attivo è sufficiente selezionare tutti i blocchi interessati dall'intervento, impostando dalla finestra delle proprietà l'applicazione di un Rinforzo attivo in Intradosso, con Resistenza a Trazione di 25 kN:

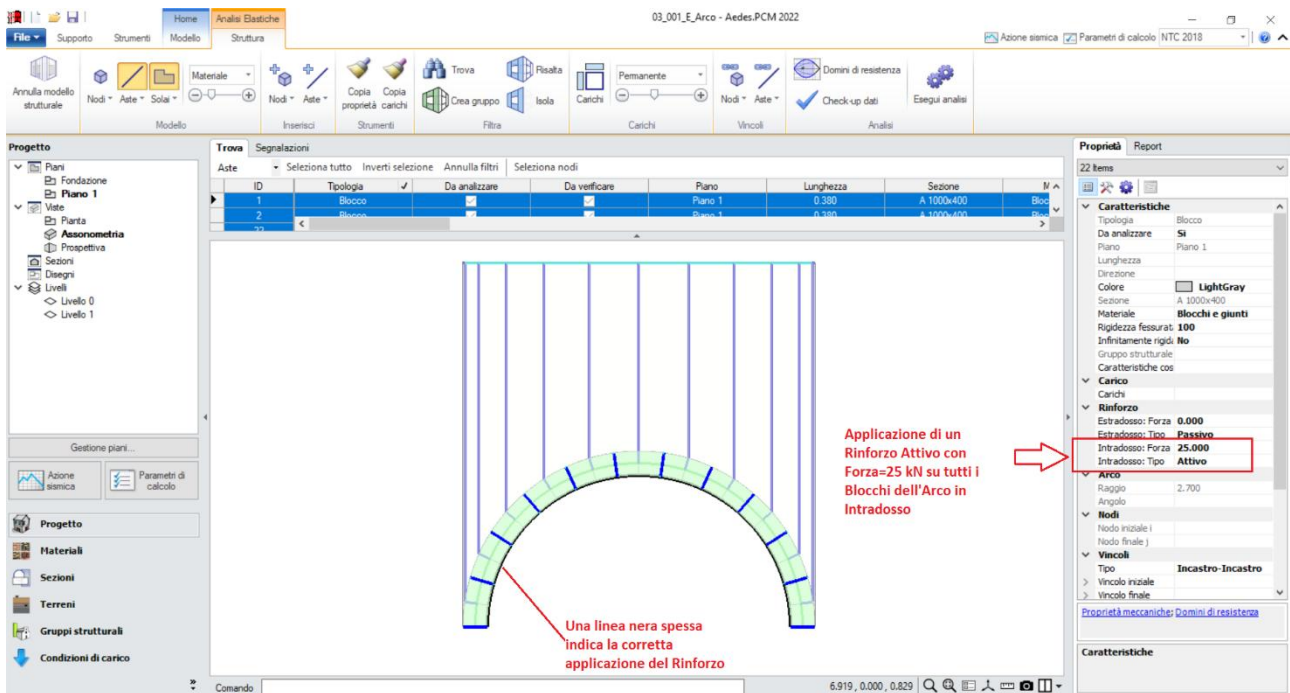


Figura 3-26: Arco a tutto sesto, con Rinforzi attivi su tutto l'Arco in Intradosso

In questo caso, l'adozione del Rinforzo Attivo induce uno stato di precompressione sull'intero arco che si traduce nell'applicazione di Forze Radiali applicate nel nodo baricentrico di ogni blocco: per visualizzarle, è possibile attivare la vista per "Carichi", selezionando la CCE "Precompressione"; passando col mouse sopra una generica forza, a video saranno mostrati i valori delle sue componenti:

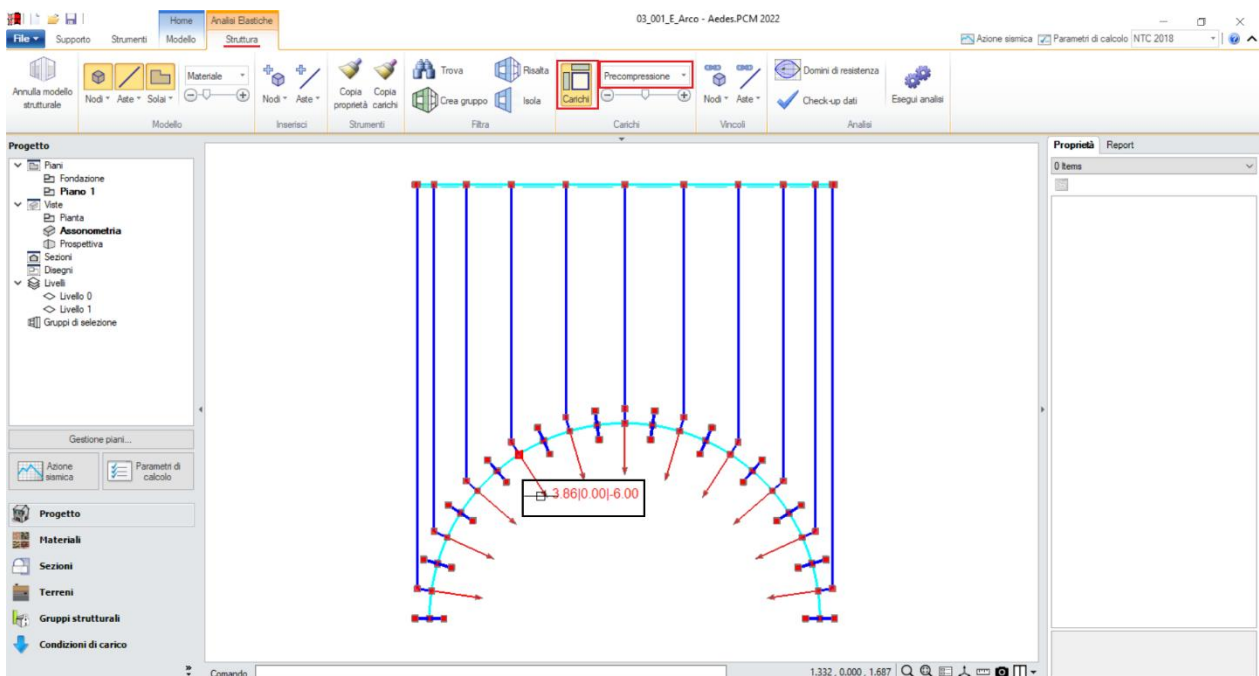


Figura 3-27: Arco a tutto sesto, vista Forze da Precompressione dovute ai Rinforzi attivi su tutto l'Intradosso

Dopo aver eseguito le Analisi, in Analisi Statica Non Sismica, visualizzando le sollecitazioni di Sforzo Normale in CCE "Precompressione", è possibile verificare che l'intero arco risulta adesso soggetto a uno sforzo normale esattamente corrispondente alla forza di precompressione inserita in Input (25 kN):

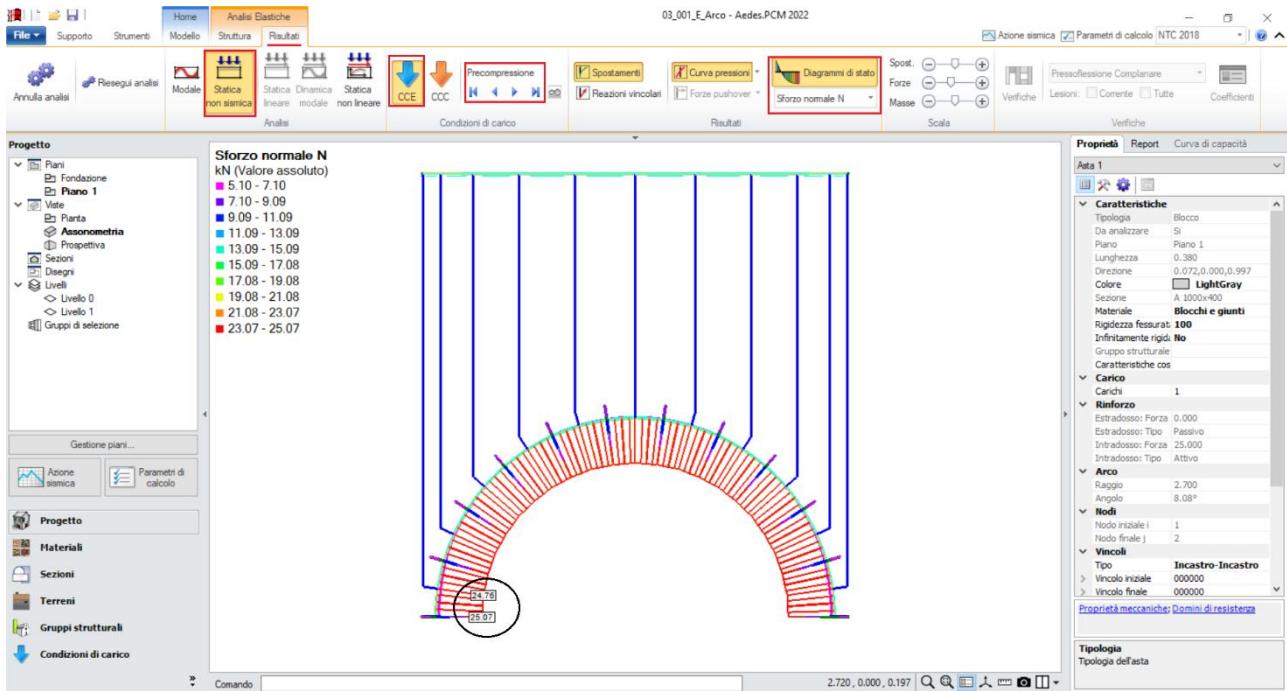


Figura 3-28: Arco a tutto sesto, Analisi Statica Non Sismica, Sforzo Normale da Precompressione

Visualizzando inoltre la curva delle pressioni in CCE Permanente, si nota una lieve fuoriuscita in corrispondenza delle sezioni in chiave; tuttavia, attivando la vista di una generica CCC che tenga conto invece anche degli effetti della Precompressione, si può notare come l'effetto del rinforzo sia un ricentraggio della curva delle pressioni verso l'interno dello spessore:

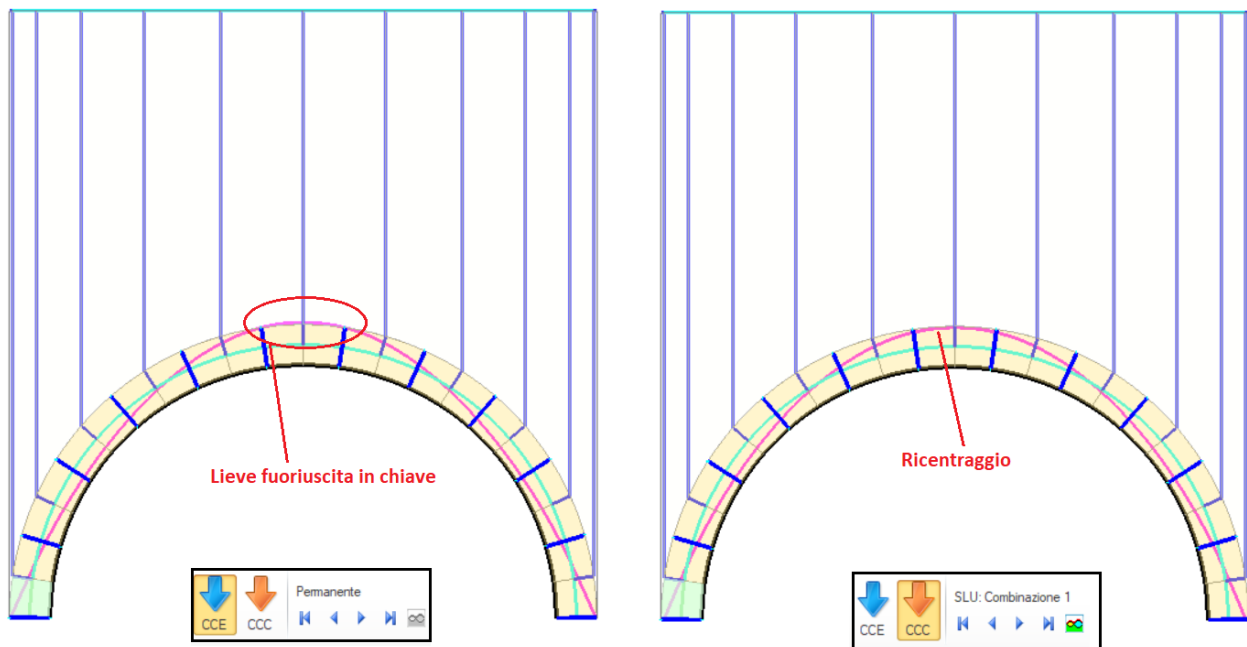
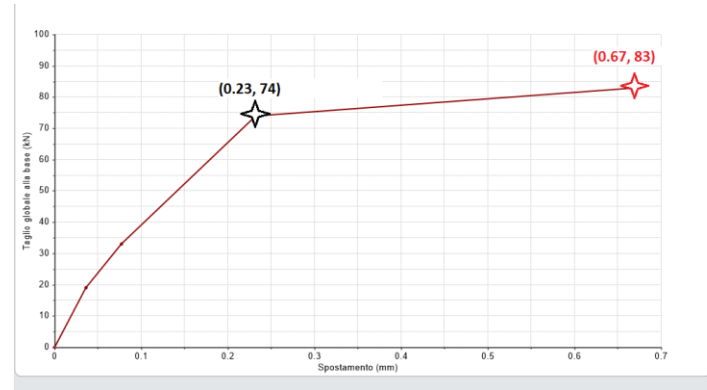
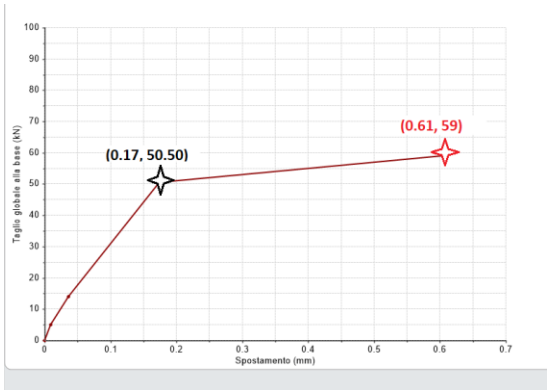


Figura 3-29: Arco a tutto sesto, Analisi Statica, Curva delle Pressioni in CCE Permanente e in CCC SLU n.1

Procedendo in analogia al caso precedente, per valutare gli effetti del rinforzo in termini di Analisi Pushover si confrontano le curve ed i loro parametri rappresentativi, dai quali emerge chiaramente un miglioramento della risposta dell'arco dovuto all'aumento dello Spostamento, della Forza Massima e del Moltiplicatore di Collasso:



Limite Elastico	B			E		
	d (mm)	F (kN)	$\lambda$	d (mm)	F (kN)	$\lambda$
<b>Arco Non Rinforzato</b>	0.17	50.5	0.106	0.11	52.5	0.11
<b>Arco con Rinforzo attivo in Intradosso</b>	0.23	74	0.155	0.23	80	0.168
Ultimo Passo	B			E		
	d (mm)	F (kN)	$\lambda$	d (mm)	F (kN)	$\lambda$
<b>Arco Non Rinforzato</b>	0.61	59	0.124	0.6	61.5	0.129
<b>Arco con Rinforzo attivo in Intradosso</b>	0.67	83	0.174	0.68	90	0.189

Figura 3-30: Arco a tutto sesto, confronto Pushover tra Arco non Rinforzato e con Rinforzo Attivo in Intradosso

## 03\_002\_Archi

File di riferimento:

03\_002\_Archi (ex 201)

Parole chiave:

- MODELLAZIONE ARCHI SU COLONNE

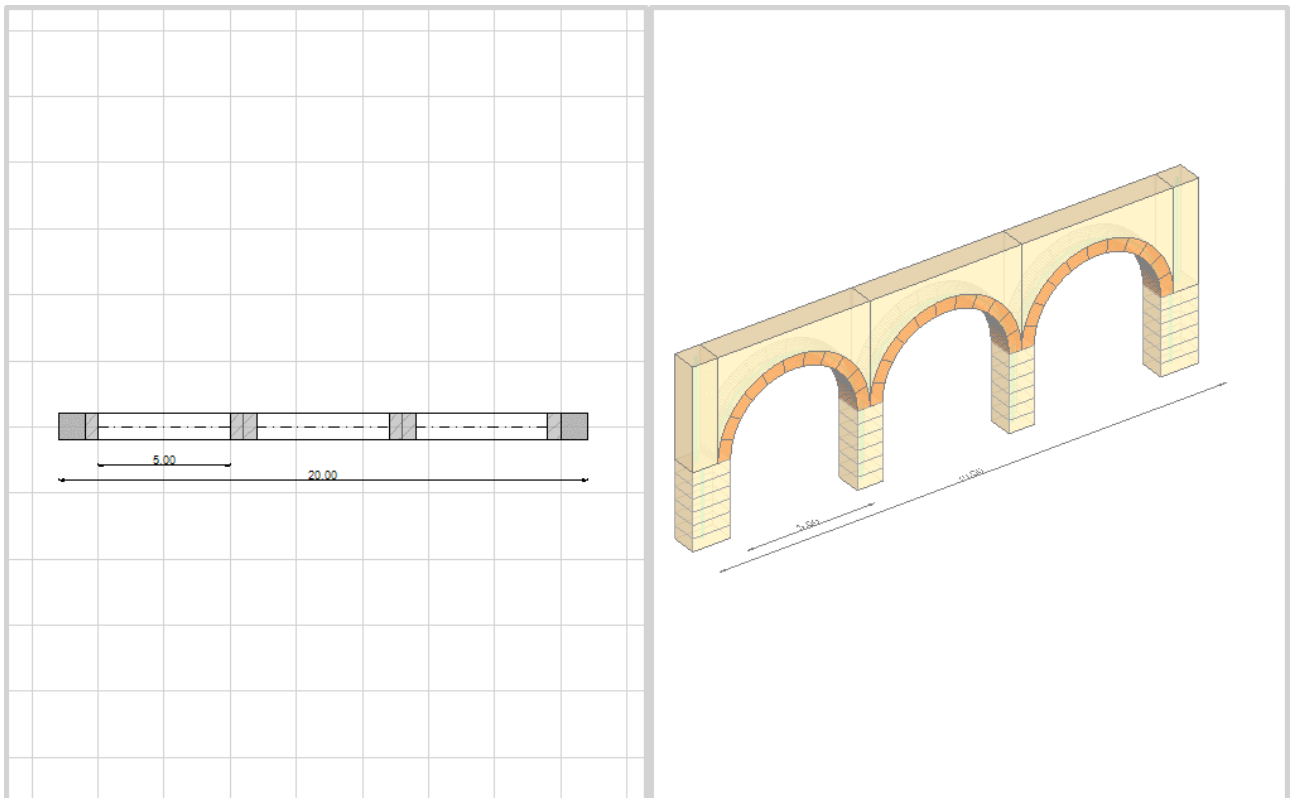
Canale YouTube AEDES:

ECS Archi e Colonne

<https://www.youtube.com/watch?v=DUFshdRoRbA>

### MODELLAZIONE ARCHITETTONICA

Nel presente esempio si descriverà la modellazione di un allineamento contenente più archi affiancati poggianti su colonne con sezione rettangolare. Per ottenere una schematizzazione di questo tipo, si utilizzeranno gli oggetti "**Arco**" e "**Colonna**" del Modello Architettonico.



*Figura 3-31: Allineamento con tre Archi a tutto sesto impostati su Colonne con sezione Rettangolare*

Per prima cosa occorre impostare l'altezza del Piano, questa definirà la quota orizzontale rappresentativa dell'estradosso dell'impalcato superiore: in questo caso, si inserisce un'altezza del piano pari a 7m.

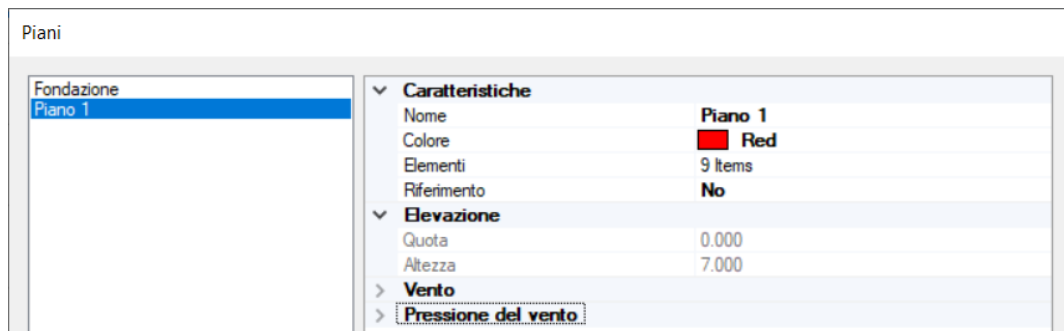


Figura 3-32: "Gestione Piani", inserimento dell'altezza del piano (quota di estradosso del Rinfianco)

Successivamente, si creano le sezioni delle colonne: in questo caso, si ipotizzano due Sezioni Rettangolari aventi dimensioni 1500x1000 e 1000x1000; la sezione più grande sarà assegnata alle colonne di estremità, mentre la più piccola alle colonne intermedie:

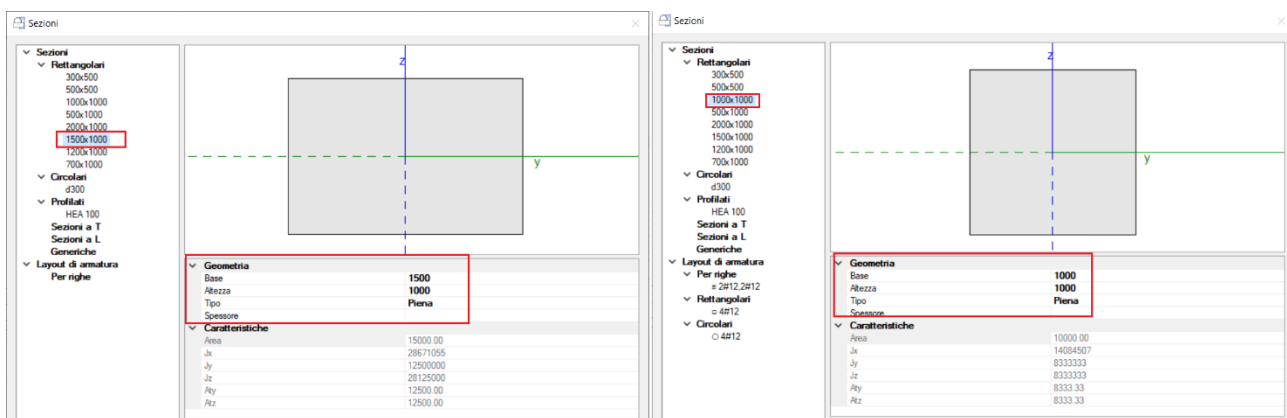


Figura 3-33: "Gestione Sezioni", aggiunta di due sezioni rettangolari, 1500x1000 e 1000x1000

Si disegnano quindi gli oggetti Colonna e gli Archi fra queste definite, qualificando opportunamente le proprietà degli oggetti in modo che nel complesso le arcate abbiano una luce netta pari a 5.00m: se le arcate sono simmetriche, può risultare utile definire la prima arcata e poi tramite il comando "Copia" della scheda "Strumenti" copiare in sequenza gli oggetti per definire l'arcata successiva.

Per gli oggetti "Arco", si imposteranno le seguenti caratteristiche dalla finestra delle proprietà:

- gruppo "Geometria":
  - Altezza d'imposta=**3m** (pari all'altezza della colonna sulla quale si impostano gli archi);
  - Freccia= **2.50m** (trattandosi di archi a tutto sesto, la freccia è pari alla metà delle luci nette=5m);
  - Spessore=**0.40m**;
  - Profondità=**1.00m**.
- gruppo "Caratteristiche":
  - Modellazione = **Blocchi e Giunti**;
  - Materiale = **Blocchi e Giunti**;
  - Lunghezza dei blocchi = **0.80m**;
  - Spessore dei Giunti= **20mm**.
- gruppo "Rinfianco":
  - Rinfianco = **Si**
  - Materiale = **Muratura esistente in Blocchi Lapidei Squadrati**
  - $\Delta h$  iniziale e finale =**0**

Per gli oggetti "Colonna", oltre ad adeguare correttamente la sezione ed il Materiale, si dovrà avere cura di impostare le seguenti caratteristiche:

- $\Delta h = -4m$  (per poter considerare la corretta quota d'imposta rispetto al piano di altezza  $H=7m$ );
- gruppo "Discretizzazione":
  - Suddivisione in conci=**Si** (per considerare la traduzione dell'unica colonna in singoli conci in ambiente strutturale);
  - Lunghezza conci=**0.50m** (permette di definire l'altezza di ogni concio in cui sarà suddivisa la colonna).

In questo caso, sia le Colonne che il Riempimento degli Archi sono costruiti in "Muratura di Blocchi Lapidei squadrate", adottando un Livello di Conoscenza LC1:

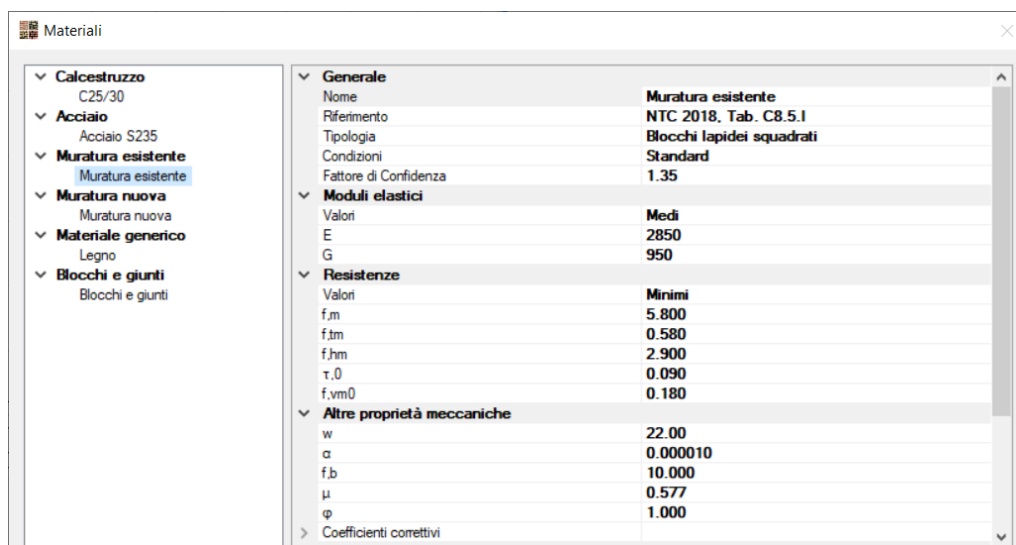


Figura 3-34: Finestra Materiali, caratteristiche del materiale "Muratura esistente"

Per gli archi invece si considera il materiale "Blocchi e Giunti", adottando  $f_m=35$  MPa per i Blocchi ed  $f_{tm}=0$  per i Giunti (resistenza a trazione nulla):

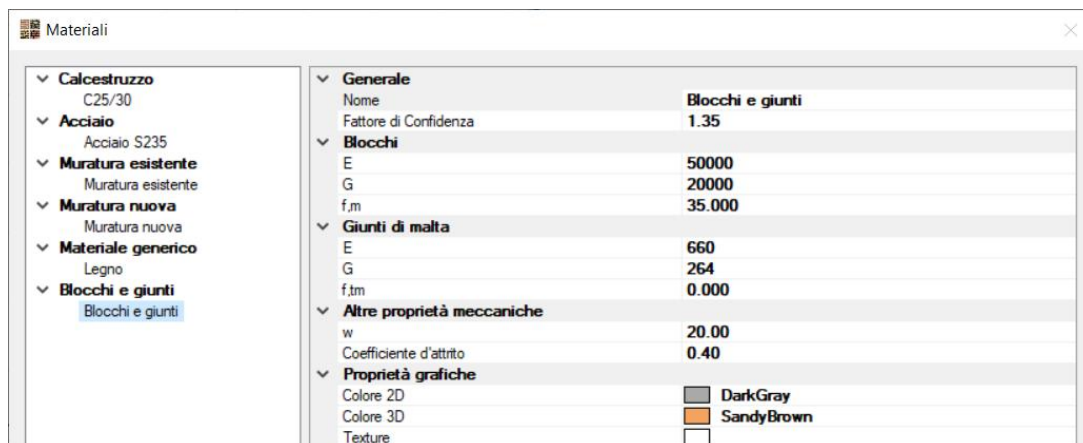


Figura 3-35: Finestra Materiali, caratteristiche del materiale "Blocchi e Giunti"

La parte finale del riempimento (in corrispondenza delle due estremità) può essere tenuta in conto aggiungendo altre due colonne, alle quali assegnare la proprietà "Quota=3m" dalla finestra delle proprietà, in modo da adeguarne l'altezza, in sintesi la modellazione sarà completata come segue:

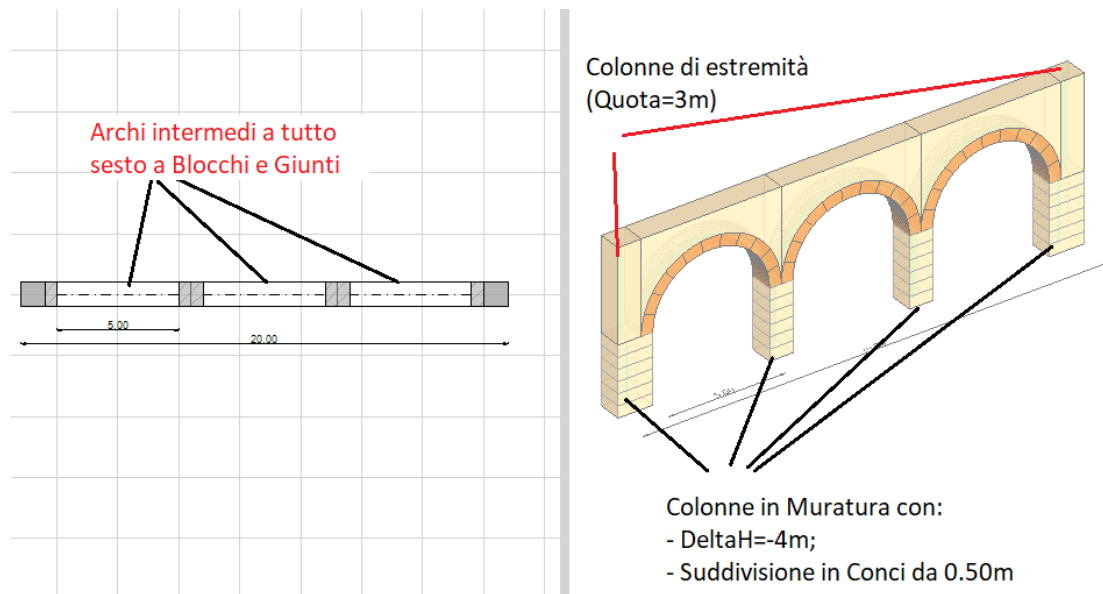


Figura 3-36: Completamento modellazione dell'allineamento con tre Archi a tutto sesto impostati su Colonne

## MODELLAZIONE STRUTTURALE

A questo punto, si può passare alla successiva fase, generando il "Modello Strutturale": a generazione avvenuta, è possibile approfondire come avvenga il collegamento tra gli archi e le colonne. Effettuando uno zoom sulla zona dell'Imposta di estremità, si nota come tramite dei link rigidi orizzontali siano state effettuate le seguenti connessioni tra:

- nodo di sommità della colonna inferiore e nodo di base dell'imposta dell'arco;
- nodo di sommità della colonna inferiore e nodo di base della colonna superiore (d'estremità);
- nodo di sommità della colonna superiore (d'estremità) e nodo iniziale dell'orizzontamento.

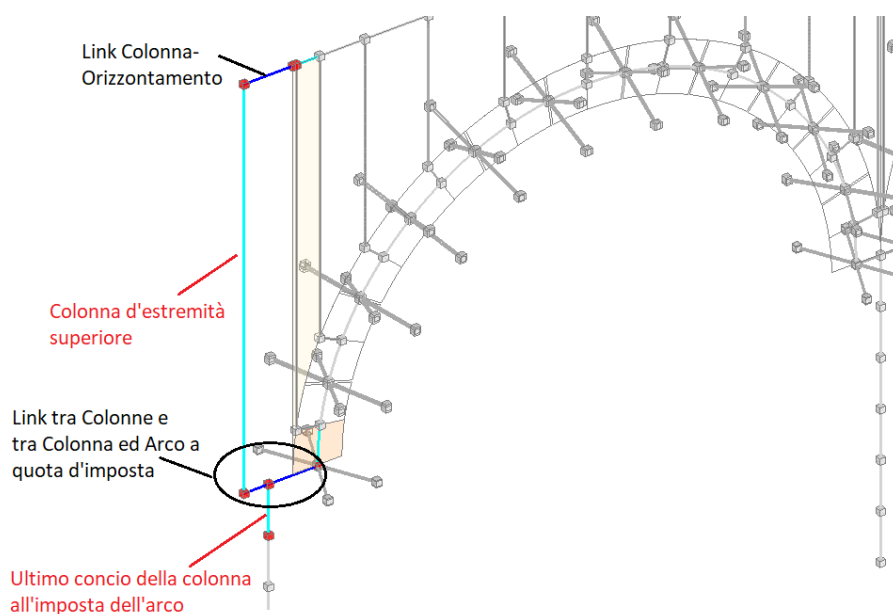


Figura 3-37: Particolare delle connessioni tramite Link tra Colonne ed Archi nel Modello Strutturale

Poiché le colonne inferiori hanno un valore di  $\Delta h = -4\text{m}$ , nelle zone centrali dove confluiscono due arcate e in cui tali colonne non proseguono in altezza ma si fermano all'imposta, in fase strutturale verrà creato un link rigido verticale di collegamento con l'orizzontamento: questo link va rimosso manualmente, quindi per le colonne centrali, con un adeguato livello di zoom, si selezionano questi link e si cancellano:

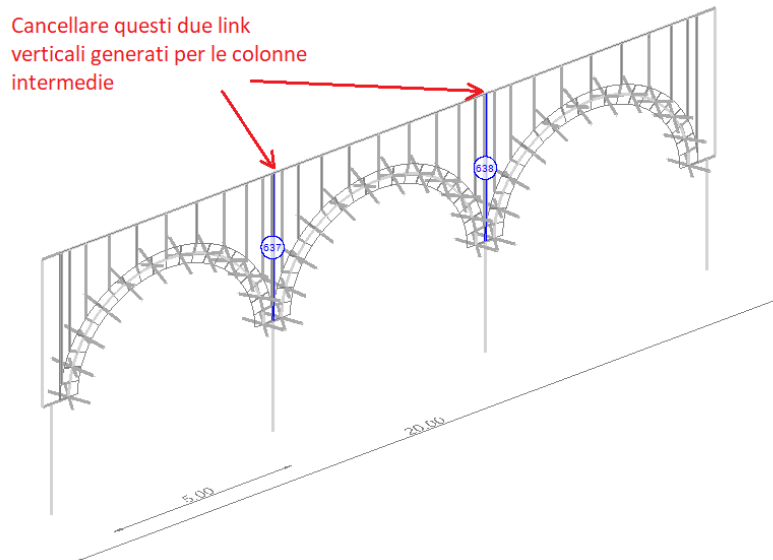


Figura 3-38: Rimozione Link Rigidi Verticali tra impalcato e colonne d'imposta

Successivamente, al fine di evitare la creazione di un nodo Master e quindi di relazioni di rigidità del tipo Master-Slave tra nodi, si definisce il Livello come "Non Rigido" dal Navigatore sulla sinistra:

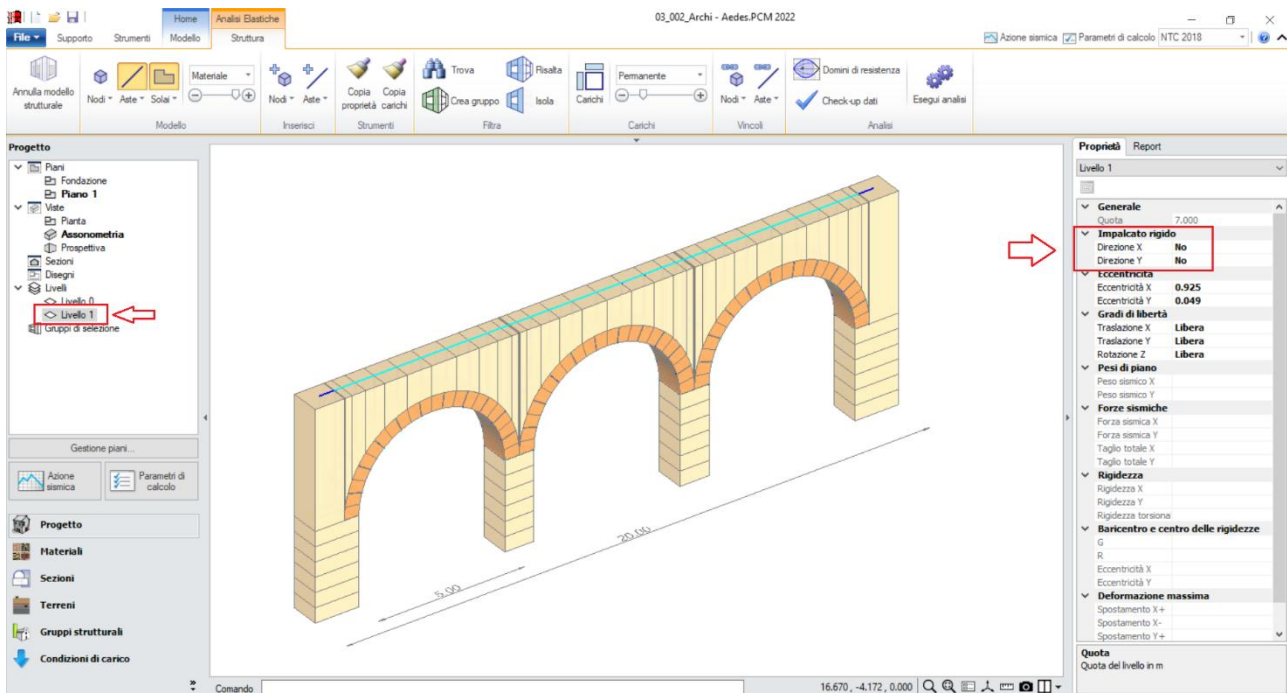


Figura 3-39: Modello Strutturale – Impostazione del Livello "Non rigido"

Infine, per definire compiutamente la modellazione strutturale, dal comando "Trova" filtrando per tipologia "Concio", si selezionano tutti i conci delle colonne e si disattiva la verifica "A Taglio", dando

così prevalenza alla sola verifica a pressoflessione, che si sceglie in questo caso di condurre "Con controllo geometrico", ovvero sulla base della Curva delle Pressioni:

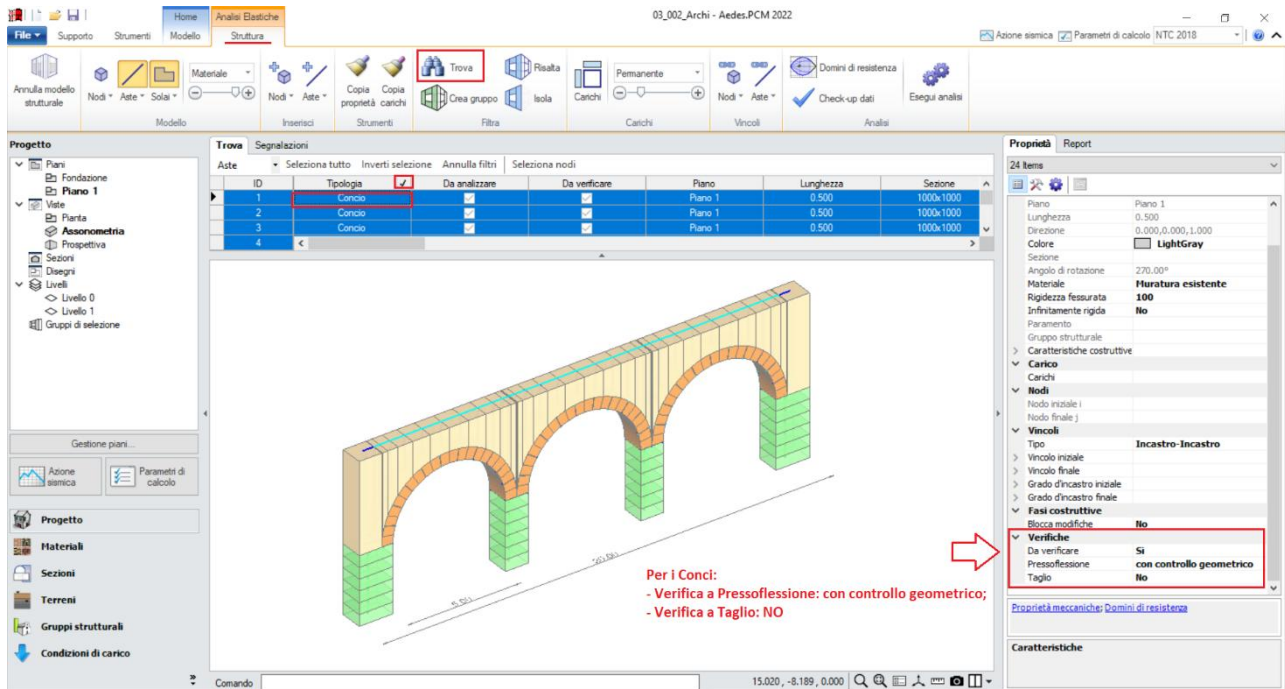


Figura 3-40: Modello Strutturale – Impostazione Verifiche per i Conci delle Colonne

## RISULTATI DELLE ANALISI

Dopo aver richiesto l'esecuzione delle Analisi dal relativo comando "**Esegui Analisi**", si consultano i risultati ottenuti, partendo innanzitutto dall'Analisi Modale: attivando la Deformata Modale ed anche le Masse Partecipanti è possibile verificare la congruenza degli spostamenti ottenuti. Il modo principale in X ha un periodo di circa 0.193 sec con una massa partecipante di circa il 60%:

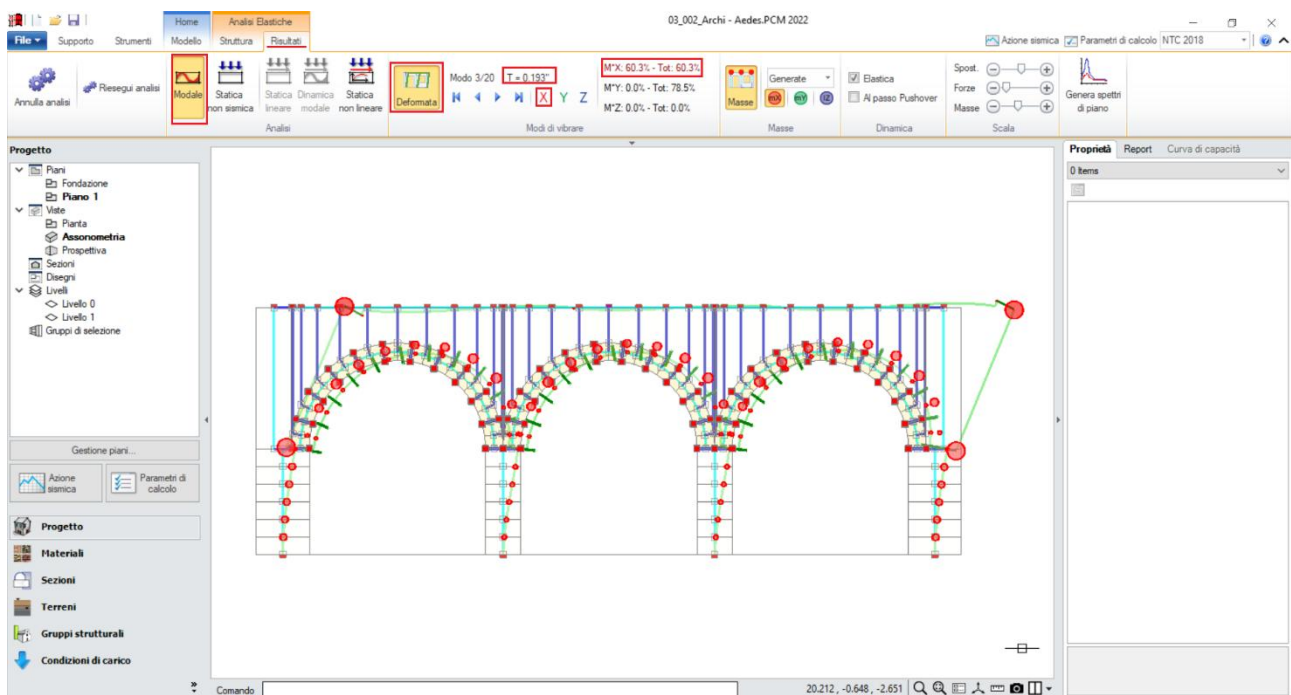


Figura 3-41: Archi a tutto sesto con Colonne: Modo principale in X: Periodo 0.193 sec e Massa Partecipante 60%

Passando ai risultati dell'Analisi Statica Non Sismica, si nota che la Curva delle Pressioni fuoriesce in corrispondenza di alcune interfacce sui Blocchi in chiave: poiché in questo caso è stata considerata una resistenza a trazione nulla per i giunti, questo comporta una loro crisi dovuta alla dilatazione eccessiva e alla conseguente impossibilità di verifica. Tale aspetto è ulteriormente confermato dal Check-Up Dati, che segnala la presenza di "Elementi in trazione", se si selezionano verranno evidenziati proprio i giunti corrispondenti all'intradosso delle interfacce opposte a dove la curva delle pressioni fuoriesce:

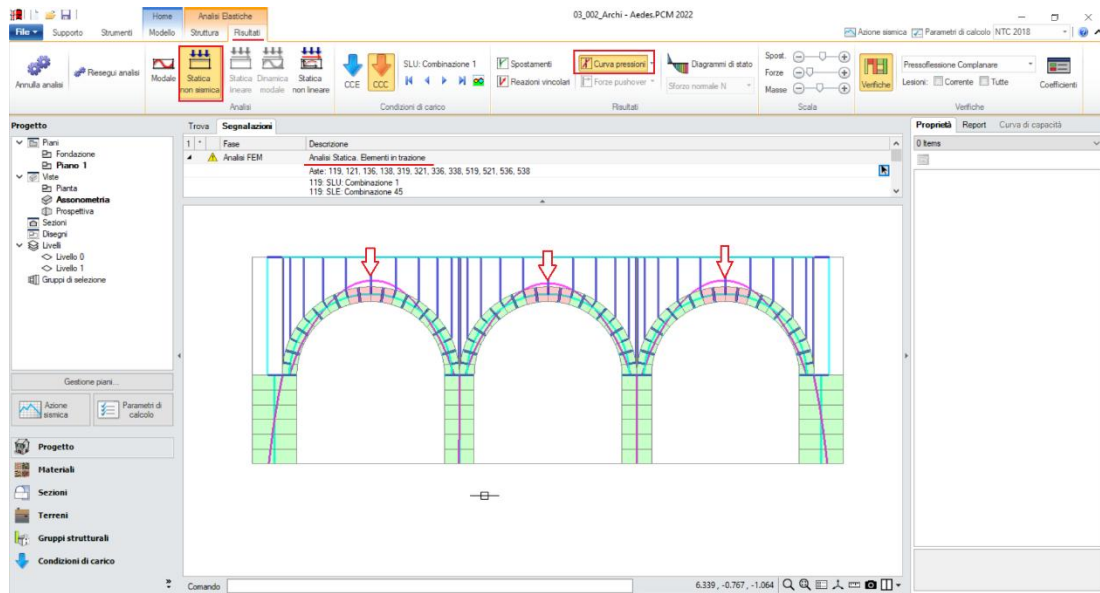


Figura 3-42: Archi a tutto sesto con Colonne: Analisi Statica Non Sismica: visualizzazione Curva delle Pressioni

Osservando infine i risultati dell'Analisi Pushover, è interessante osservare la situazione della struttura sia al passo "zero" (iniziale) che ai vari step successivi incrementali.

Al passo iniziale, la curva delle pressioni è contenuta all'interno dello spessore senza fuoriuscite, questo è dovuto alla ricerca di una configurazione equilibrata agendo sui vincoli dei giunti, condizione necessaria per poter proseguire con un'analisi di spinta: in questo caso, esiste una soluzione equilibrata quindi l'analisi può continuare:

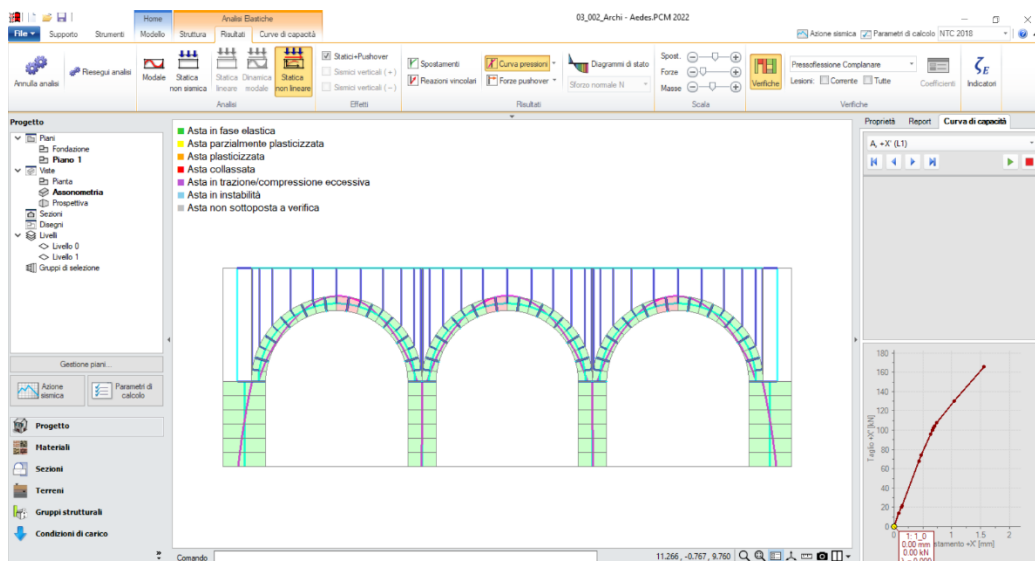


Figura 3-43: Archi a tutto sesto con Colonne: Pushover: visualizzazione Curva delle Pressioni al Passo "zero"

Aumentando la forza incrementale, si osserva man mano l'apertura delle diverse cerniere in intradosso/estradosso negli archi, con la curva delle pressioni che tende sempre più ad avvicinarsi ai bordi delle colonne.

La Pushover si interromperà in corrispondenza del passo in cui la curva delle pressioni fuoriesce dal concio di base delle colonne, creando quindi un'ulteriore cerniera e l'attivazione del meccanismo di collasso globale:

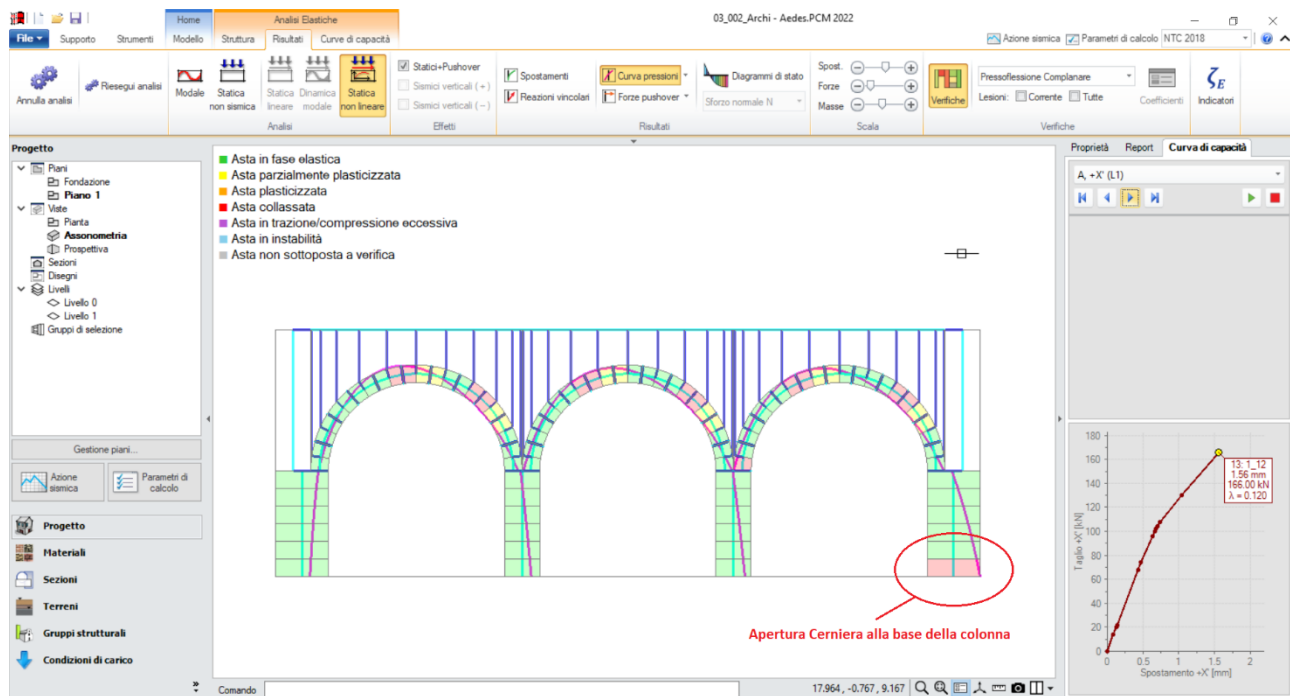


Figura 3-44: Archi a tutto sesto con Colonne: Pushover, configurazione all'ultimo passo

### 03\_003\_Archi

File di riferimento:

03\_003\_Archi (ex 301)

Parole chiave:

- SEZIONI GENERICHE

Canale YouTube AEDES:

ECS Sezioni Generiche

<https://www.youtube.com/watch?v=sDoqhFVUULc>

### MODELLAZIONE ARCHITETTONICA

Poiché la casistica di modellazione del complesso archi-colonne può risultare spesso parecchio articolata negli edifici storici e monumentali esistenti, nel presente capitolo si descriverà la modellazione di un allineamento composto da due archi poggianti su tre colonne aventi sezione complessa. Per ottenere una schematizzazione di questo tipo, si utilizzeranno gli oggetti "**Arco**" e "**Colonna**" del Modello Architettonico, sfruttando in tal caso le "Sezioni Generiche" per una corretta definizione dell'area di impronta delle colonne.

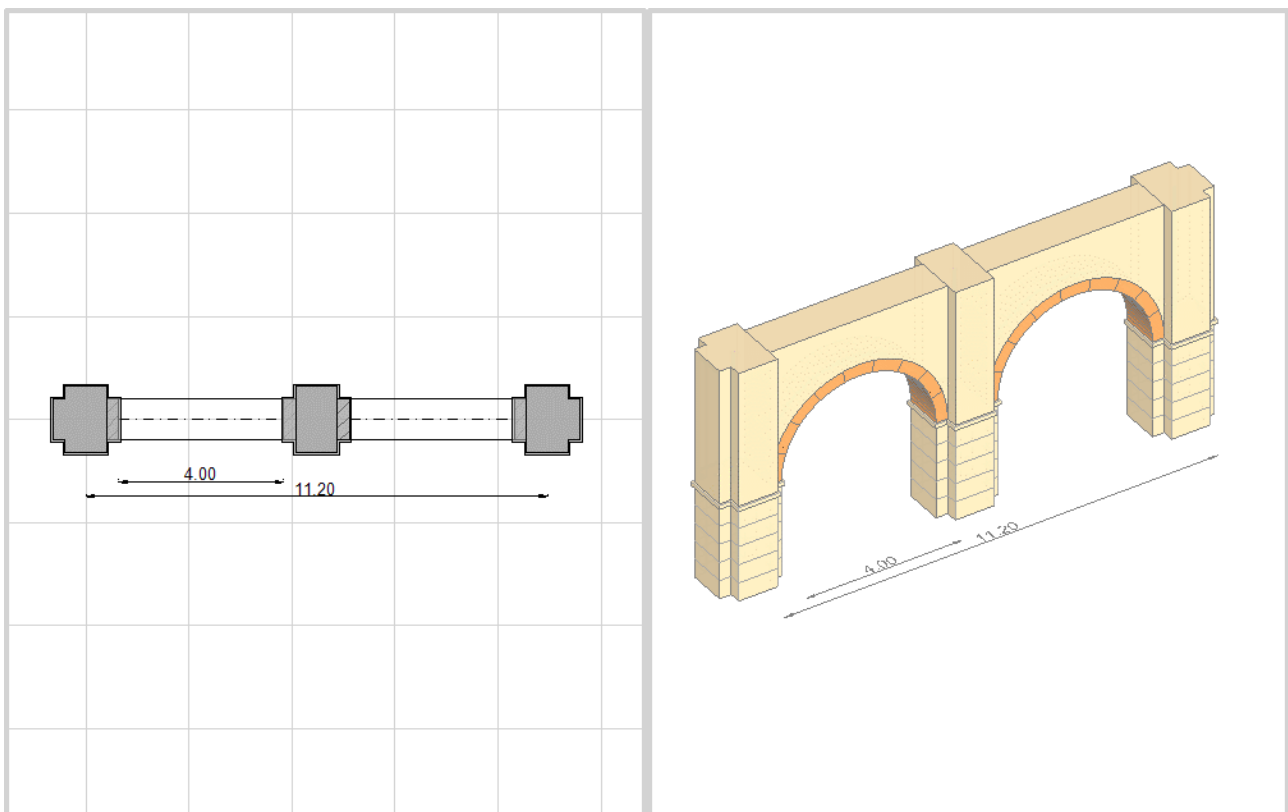


Figura 3-45: Allineamento con due Archi a tutto sesto impostati su Colonne con Sezione Generica

Per prima cosa anche in questo esempio si definisce l'altezza del Piano, che definirà la quota orizzontale rappresentativa dell'estradosso dell'impalcato superiore: in questo caso, si inserisce un'altezza del piano pari a 6m.

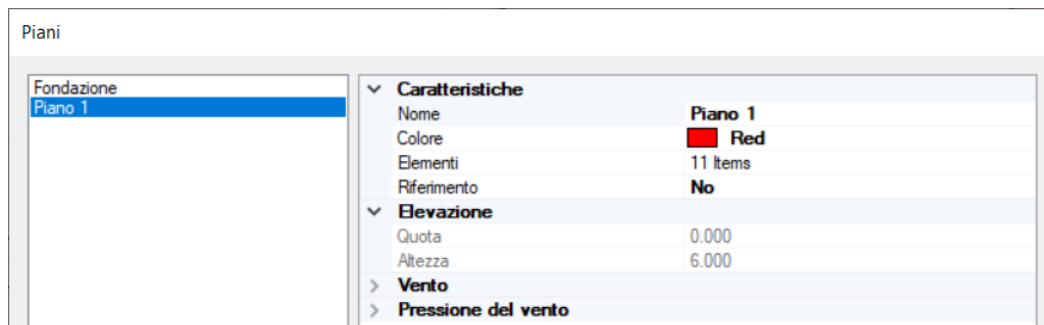


Figura 3-46: "Gestione Piani", inserimento dell'altezza del piano (quota di estradosso del Rinfianco)

A questo punto, si creano le sezioni delle colonne: in questo caso, si ipotizzano poiché la forma delle sezioni è complessa (poligonale, diversa dalla Rettangolare) risulta necessario utilizzare la tipologia "Sezione Generica": si aggiungono pertanto tante sezioni generiche quante sono le sezioni da assegnare alle colonne. Sarà necessario quindi esaminare quante variazioni di sezione si hanno in altezza, ed in base a ciò creare diverse colonne in continuità in altezza, alle quali applicare le diverse sezioni. In questo caso, la sezione centrale rappresenta un aumento di spessore dato da un capitello.

In questo caso, si riscontrano tre variazioni di profilo tra le sezioni: per prima cosa si disegnano quindi tre "Polilinee" diverse, risultano utili in tal senso i comandi "Cad" della scheda "Strumenti":

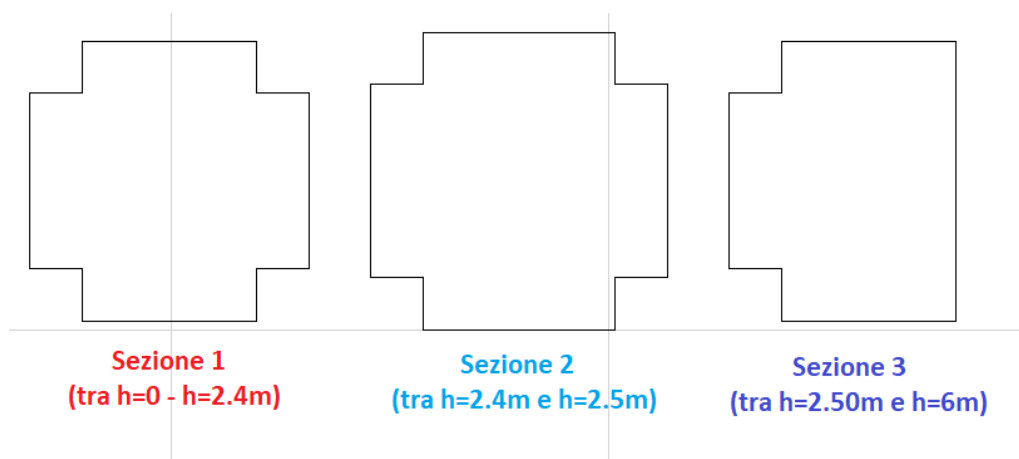


Figura 3-47: Disegno dei profili delle tre sezioni generiche (comando "Polilinea" della scheda "Strumenti")

Si apre quindi la finestra "Sezioni", aggiungendo tre "Sezioni Generiche"; per definirne la forma, dopo aver cliccato sull'apposita funzione "Seleziona profilo", è possibile selezionare il profilo creato in forma chiusa (ad es. tramite polilinea) oppure fare click col tasto destro del mouse all'interno del perimetro della sezione da creare (ad es. nel caso di profili complessi con linee ed archi). Qualora presenti, possono anche essere considerate delle cavità interne.

In automatico, verrà ricreata la forma della sezione selezionata, con conseguente calcolo delle sue caratteristiche geometrico-inerziali.

In questo caso, tale operazione va ripetuta tre volte per la creazione delle tre sezioni "Colonna01", "Colonna02" e "Colonna03". Per comodità, al fine di avere tutte le sezioni delle colonne raggruppate, si crea anche una quarta sezione "Colonna04" come generica anche se ha sezione rettangolare:

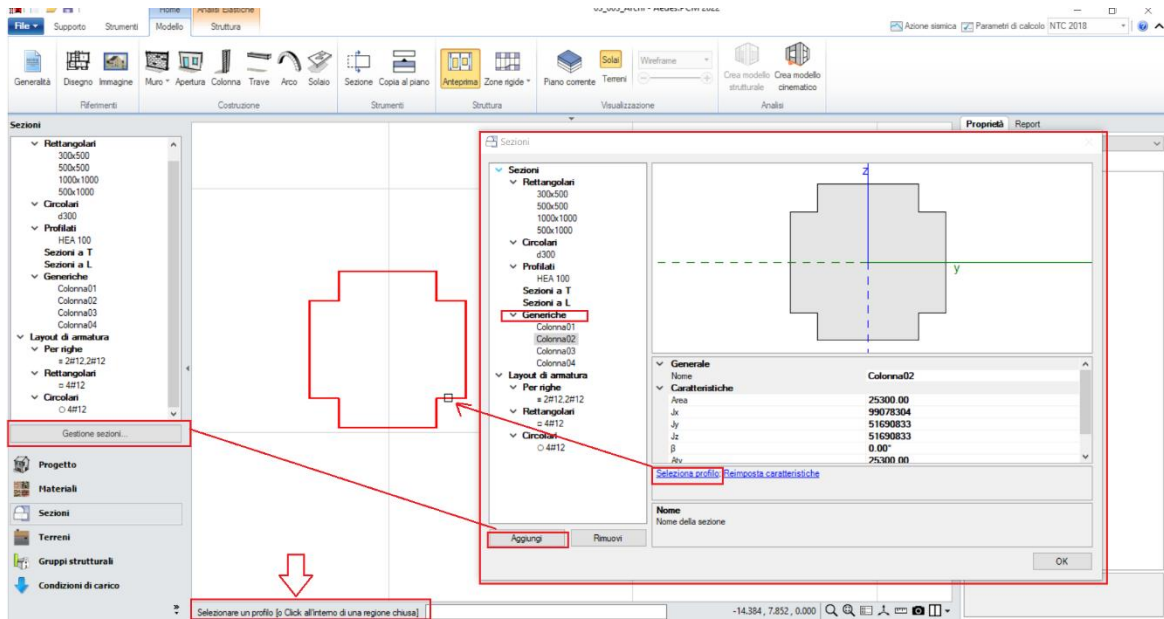


Figura 3-48: Sezioni Generiche: procedura per la selezione della forma

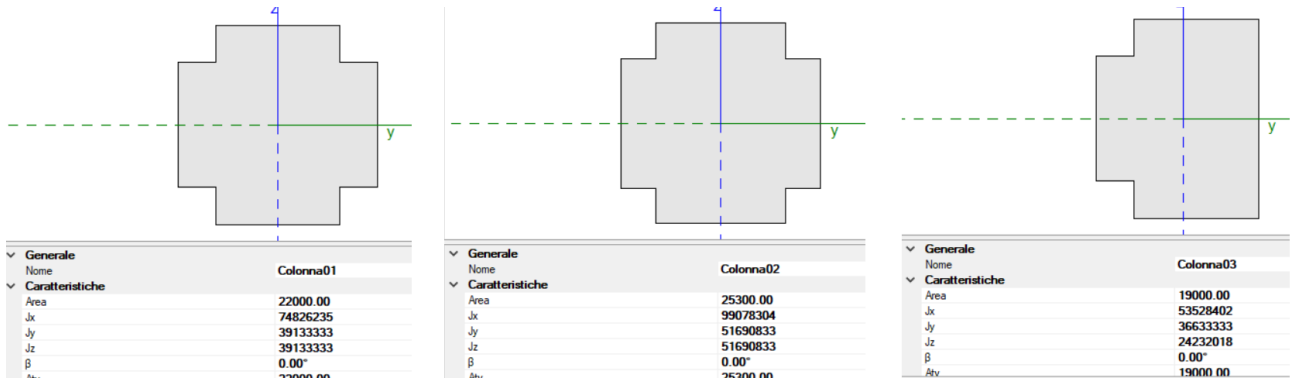


Figura 3-49: Sezioni Generiche create per l'esempio in esame

Una volta generate le sezioni, si creano le Colonne attraverso l'apposito comando in architettonico, e si assegnano loro le varie sezioni, adeguando correttamente i valori di  $\Delta h$  per garantirne continuità in altezza:

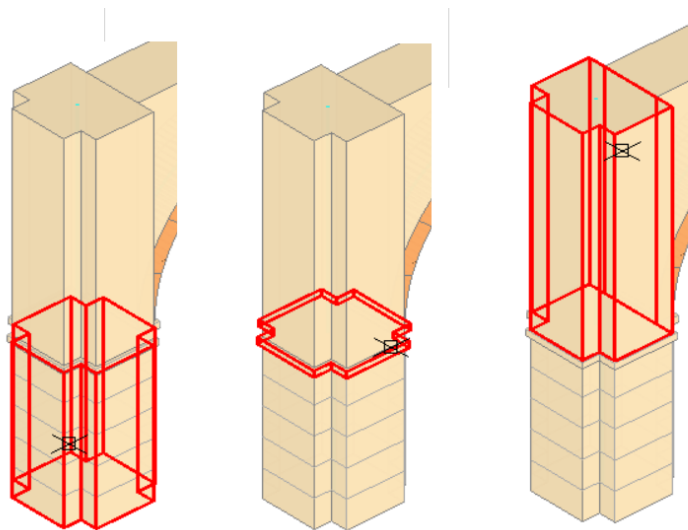


Figura 3-50: Assegnazione Sezioni Generiche alle colonne in altezza

Si disegnano quindi gli oggetti Colonna e gli Archi fra queste definite, qualificando opportunamente le proprietà degli oggetti in modo che nel complesso le arcate abbiano una luce netta pari a 4.00m: se le arcate sono simmetriche, può risultare utile definire la prima arcata e poi tramite il comando "Copia" della scheda "Strumenti" copiare in sequenza gli oggetti per definire l'arcata successiva, così come eventualmente utilizzare il comando "Specchia".

Per gli oggetti "Arco", si imposteranno le seguenti caratteristiche dalla finestra delle proprietà:

- gruppo "Geometria":
  - Altezza d'imposta=**2.50m** (pari all'altezza della colonna sulla quale si impostano gli archi);
  - Freccia= **2.00m** (trattandosi di archi a tutto sesto, la freccia è pari alla metà delle luci nette=4m);
  - Spessore=**0.30m**;
  - Profondità=**1.00m**.
- gruppo "Caratteristiche":
  - Modellazione = **Blocchi e Giunti**;
  - Materiale = **Blocchi e Giunti**;
  - Lunghezza dei blocchi =**0.80m**;
  - Spessore dei Giunti= **20mm**.
- gruppo "Rinfianco":
  - Rinfianco = **Si**
  - Materiale = **Muratura esistente in Pietrame disordinata**
  - $\Delta h$  iniziale e finale =**0**

Per gli oggetti "Colonna", oltre ad adeguare correttamente la sezione ed il Materiale, si dovrà avere cura di impostare le seguenti caratteristiche:

- $\Delta h$  =**-3.60m** (per la colonna più bassa con Sezione="Colonna01")
- $\Delta h$  =**-3.50m** e Quota=**2.40m** (per la colonna intermedia rappresentativa del capitello con Sezione="Colonna02");
- $\Delta h$  = **0** e Quota=**2.50m** (per la colonna più alta con Sezione="Colonna03");
- gruppo "Discretizzazione":
  - Suddivisione in conci=**Si** (per considerare la traduzione delle colonne in singoli conci in ambiente strutturale);
  - Lunghezza conci=**0.50m** (permette di definire l'altezza di ogni concio in cui saranno suddivise le colonne).

## MODELLAZIONE STRUTTURALE

In modo simile a quanto già descritto per gli esempi precedenti, in ambiente strutturale si imposta il Livello come "Non rigido" dal Navigatore sulla sinistra:

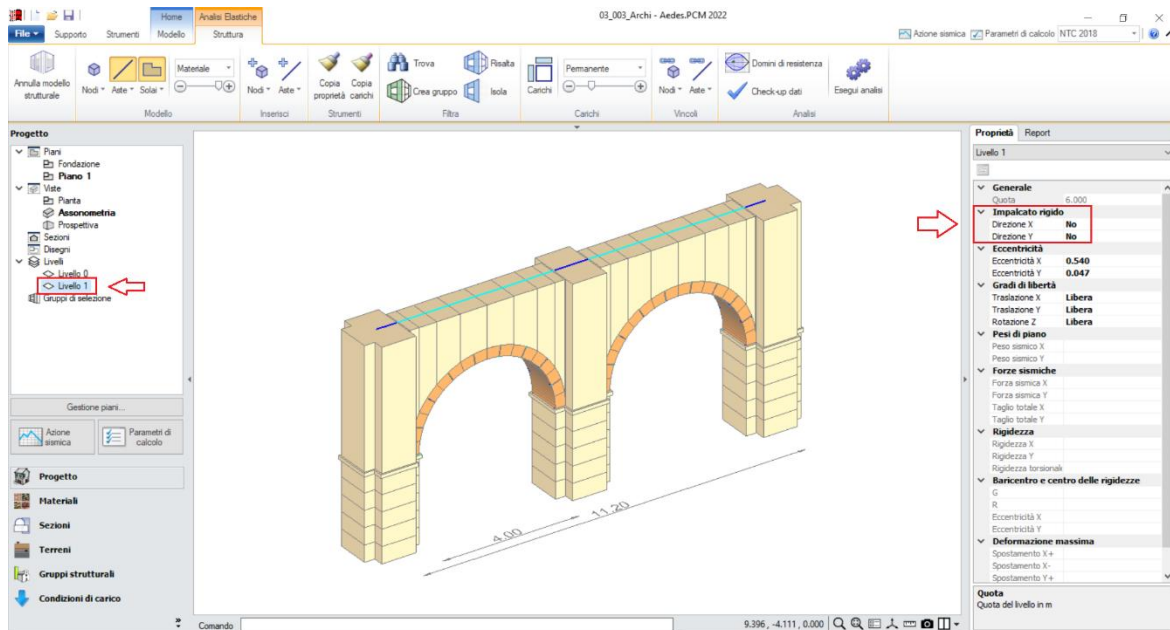


Figura 3-51: Modello Strutturale – Impostazione del Livello "Non rigido"

Successivamente, si disattivano le verifiche a taglio per i conci delle colonne: trattandosi infatti di sezioni generiche, sarà maggiormente interessante studiare come varia la risposta della curva delle pressioni rispetto alla loro impronta. Dal comando "Trova", filtrando per tipologia "Concio", si selezionano quindi tutti i conci mantenendo attiva la sola verifica a pressoflessione "con controllo geometrico":

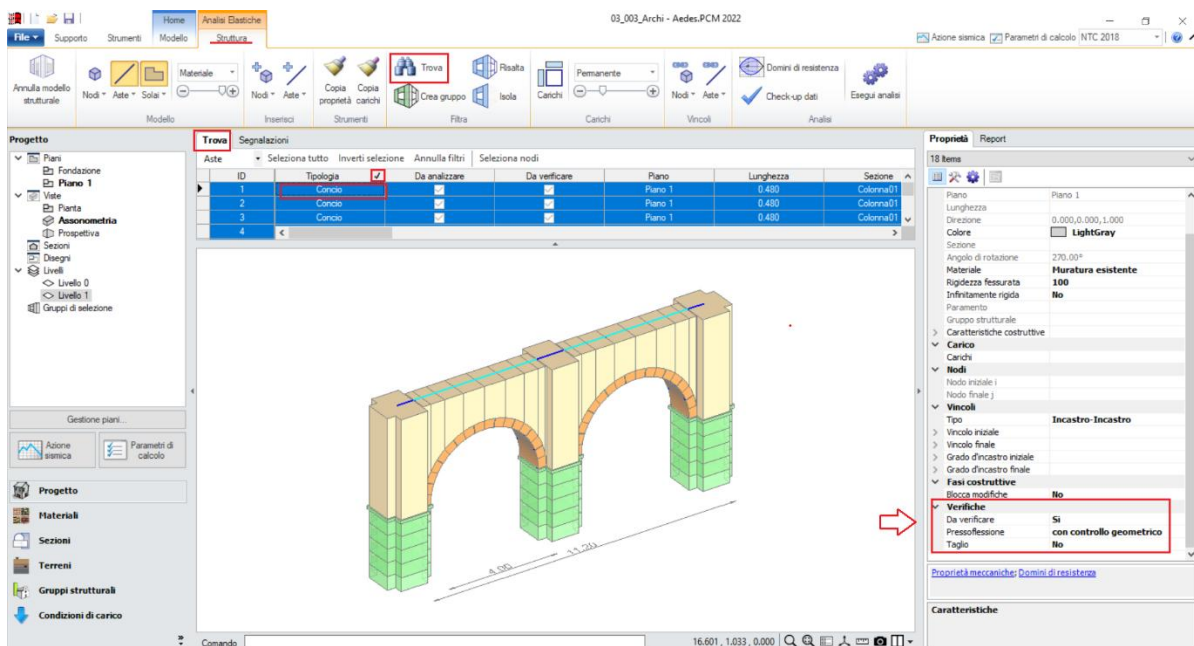


Figura 3-52: Modello Strutturale – Impostazione Verifiche per i Conci delle Colonne

## RISULTATI DELLE ANALISI

Dopo aver richiesto l'esecuzione delle Analisi dal relativo comando **"Esegui Analisi"**, si consultano i risultati ottenuti: in Analisi Modale, il modo principale in X ha un periodo di circa 0.240 sec con una massa partecipante di circa il 53%:

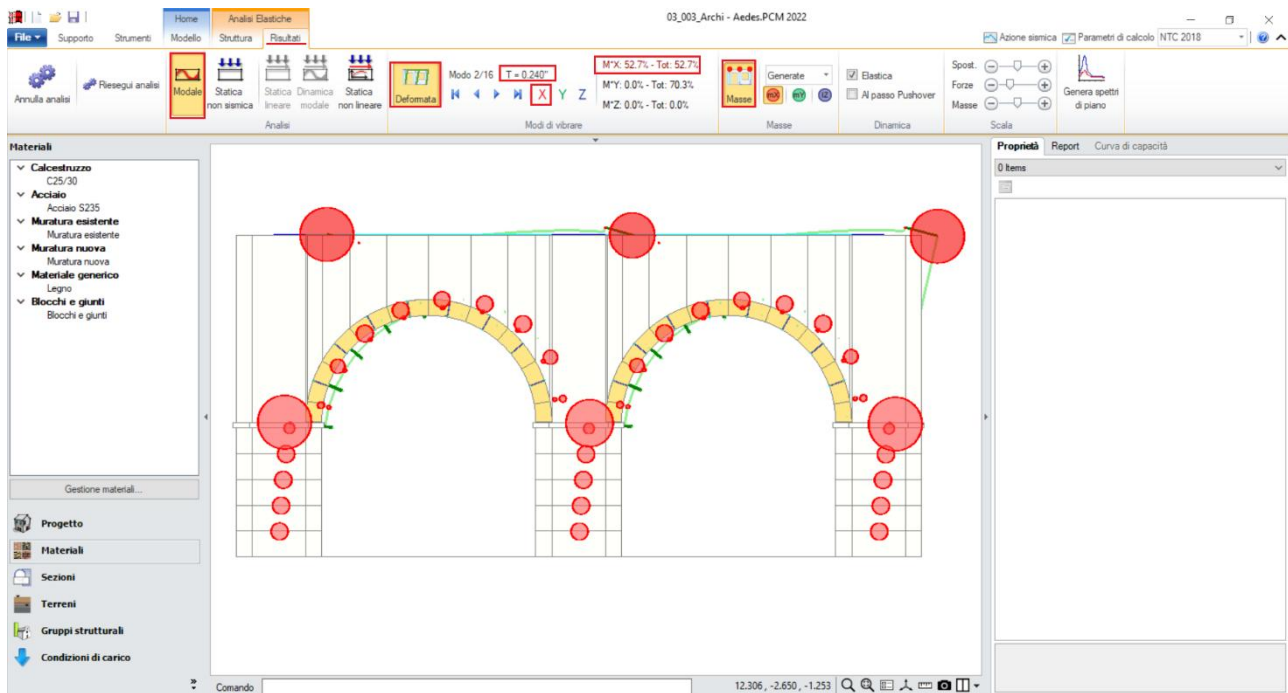


Figura 3-53: Archi a tutto sesto con Colonne a sez. generica: Modo in X: Periodo 0.193 sec e Massa 60%

In Analisi Statica Non Sismica, si nota che la Curva delle Pressioni fuoriesce in corrispondenza di alcune interfacce sui Blocchi in chiave, in questo caso è stata comunque considerata una resistenza a trazione per i giunti quindi comunque una parte di questa può essere affrontata con tale resistenza:

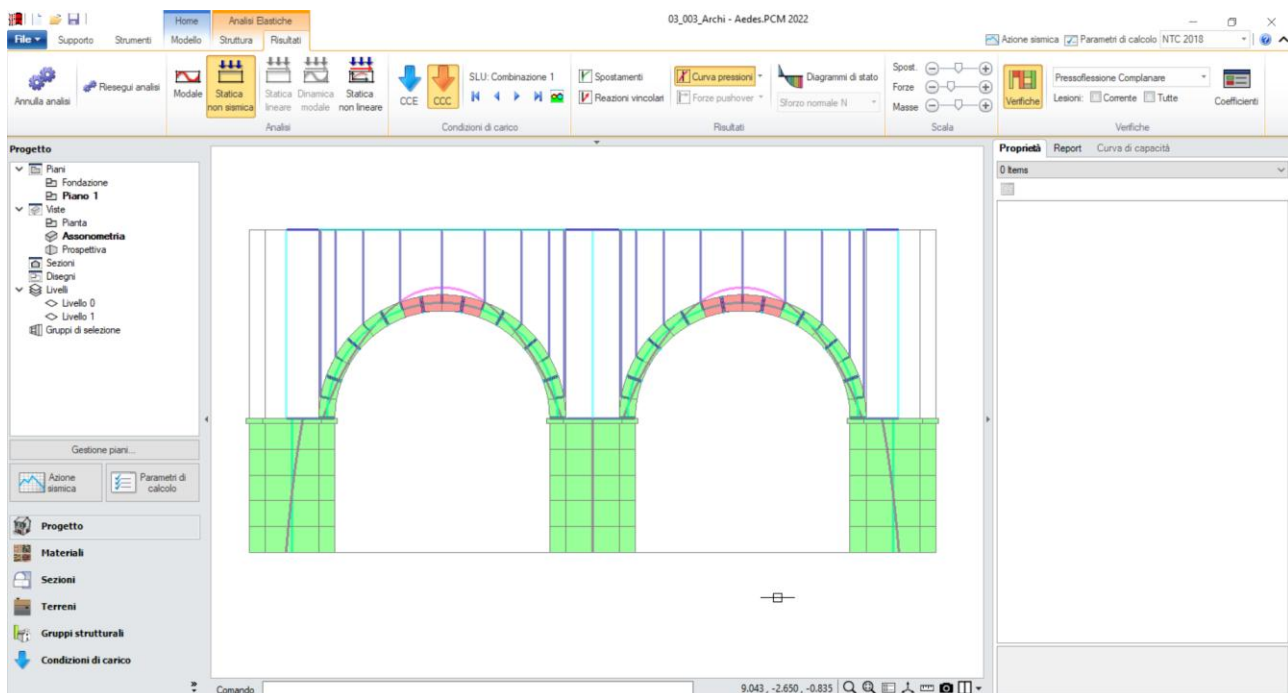


Figura 3-54: Archi a tutto sesto con Colonne sez. generica: Analisi Statica: visualizzazione Curva delle Pressioni

In Analisi Pushover, in questo caso il meccanismo di collasso degli archi governa la risposta dell'intera struttura, condizionandone l'interruzione prematura: la curva delle pressioni resta all'interno della sezione delle colonne, quindi il collasso è causato unicamente dalle quattro cerniere che si aprono negli archi:

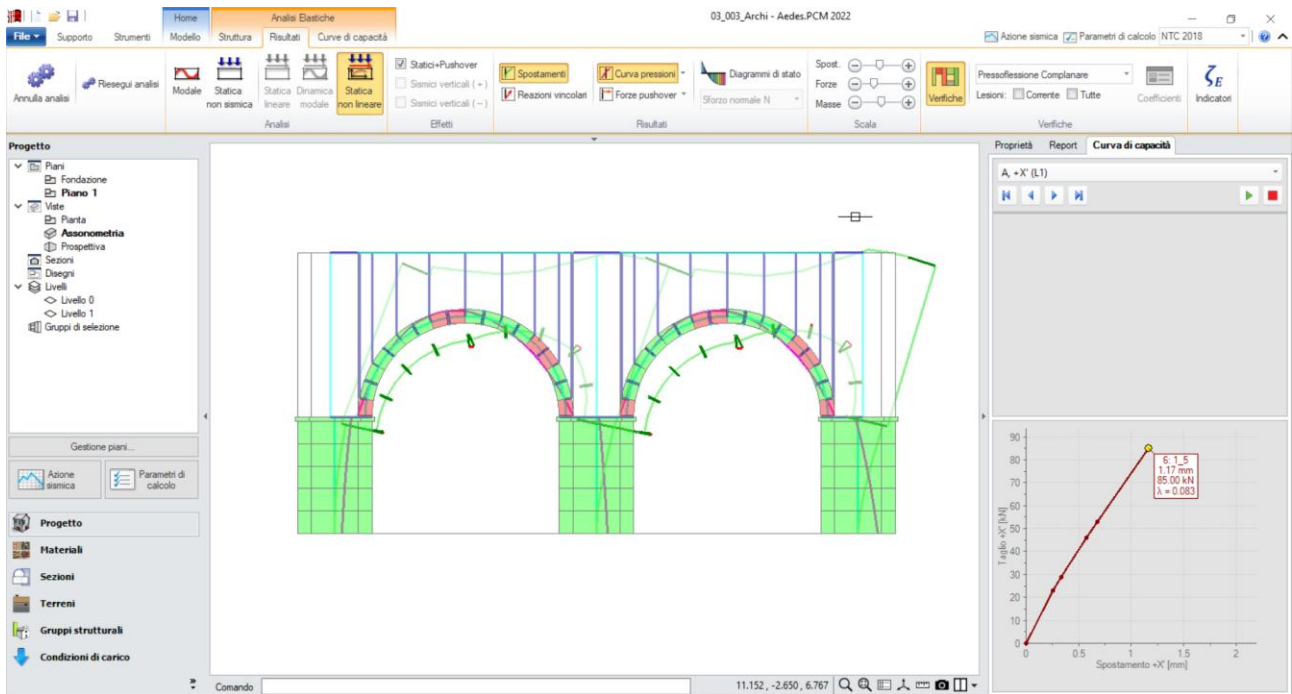


Figura 3-55: Archi a tutto sesto con Colonne a sezione generica: Pushover, configurazione all'ultimo passo

## 03\_004\_VoltaCrociera

File di riferimento:

03\_004\_VoltaCrociera (ex 401)

Parole chiave:

- MODELLAZIONE VOLTA A CROCIERA

Canale YouTube AEDES:

ECS Volta a Crociera

<https://www.youtube.com/watch?v=HZDufUx6oll&t=199s>

### MODELLAZIONE ARCHITETTONICA

Attraverso l'utilizzo degli oggetti "Arco" e delle aperture "ad arco", è possibile anche studiare il comportamento di solai voltati in modo separato dal resto della struttura di cui fanno parte.

Nel presente esempio, si descriverà la modellazione di una "Volta a crociera", impostata su un ambiente di forma rettangolare con dimensioni 12m x 9.50m, delimitato da muri perimetrali con spessore di 1m: nei muri appartenenti ai lati lunghi (direzione X) risultano inoltre presenti due aperture rettangolari con altezza 4m, sui lati corti invece (direzione Y) sono presenti due grandi archi a tutto sesto con altezza in chiave di 6m.

La volta a crociera viene modellata dall'insieme dei due archi diagonali e di solai piani definiti al livello dell'impalcato, aventi la funzione di distribuire i carichi dovuti al peso proprio dell'orizzontamento superiore e delle velette costituenti gli spicchi della volta a crociera stessi.

Gli oggetti "Arco" e le "Aperture ad arco" verranno modellati come "Blocchi e Giunti" nel file "03\_004 A VoltaCrociera.vdml", mentre come solo "Blocchi" nel file "03\_004 B VoltaCrociera.vdml"

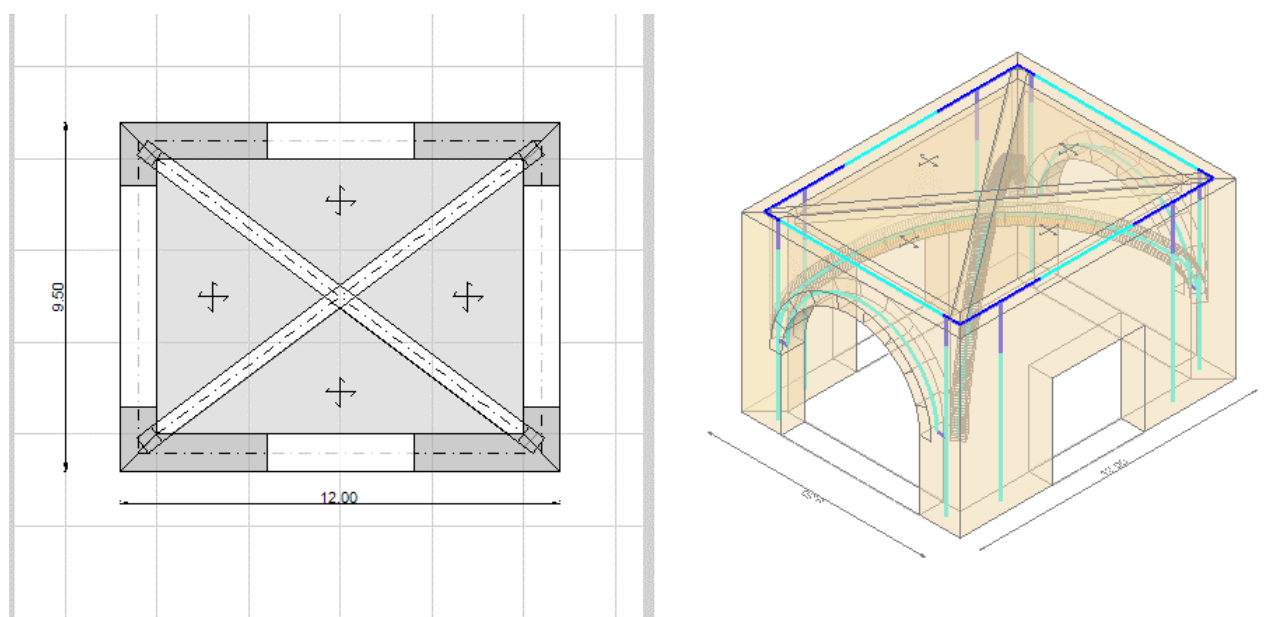


Figura 3-56: Volta a crociera su pianta rettangolare

Per prima cosa occorre impostare l'altezza del Piano: in questo caso, si inserisce un'altezza del piano pari a 7.50m. Questa definirà la quota alla quale saranno inseriti gli oggetti "Solaio".

Contestualmente, dalla stessa finestra "Gestione Piani, si procede disattivando l'azione del Vento per ogni direzione:

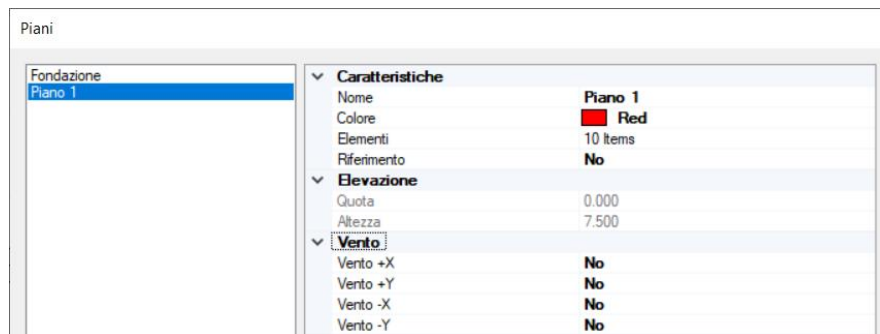


Figura 3-57: "Gestione Piani", inserimento dell'altezza del piano (quota di estradosso del Rinfianco e dei Solai)

La creazione dei muri può essere condotta agevolmente sulla base di un dxf di riferimento, attraverso il comando "Muro Rapido" si può creare il perimetro dell'ambiente: successivamente, si inseriranno le quattro aperture sui diversi lati.

Sui lati lunghi, si selezioneranno le aperture e si imposteranno semplicemente le proprietà "Distanza da base=0" e "Altezza=4m"

Sui lati corti, poiché si vuole considerare la presenza di aperture "ad arco", si modificheranno le seguenti proprietà:

- Forma= Arco;
- Altezza= 6m (rappresenta l'altezza complessiva dell'apertura, misurata in chiave);
- Freccia= 3m (arco a sesto acuto, con freccia pari alla metà dell'altezza);
- Modellazione= Blocchi e Giunti;
- Materiale= Blocchi e Giunti;
- Lunghezza blocchi= 1.10m (nello scegliere questo valore, bisogna sempre assicurarsi che in chiave sia presente un blocco unico; in questo caso, se si scegliesse ad es. 1m, si noterebbe la generazione di un giunto di malta in chiave, situazione non possibile, quindi sempre da evitare);
- Spessore dei giunti= 10mm

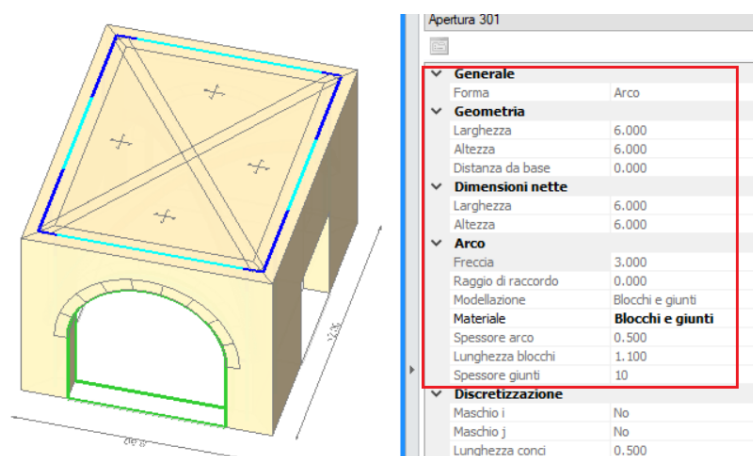


Figura 3-58: Proprietà delle aperture "ad arco" sui lati corti

Per quanto riguarda i materiali, in questo caso si adotta una muratura esistente in **"Blocchi Lapidei squadrate"** per i Muri, scegliendo di adottare i valori "Medi" sia per le resistenze che per i Moduli Elastici, senza considerazione di uno specifico Livello di Conoscenza (da cui FC=1):

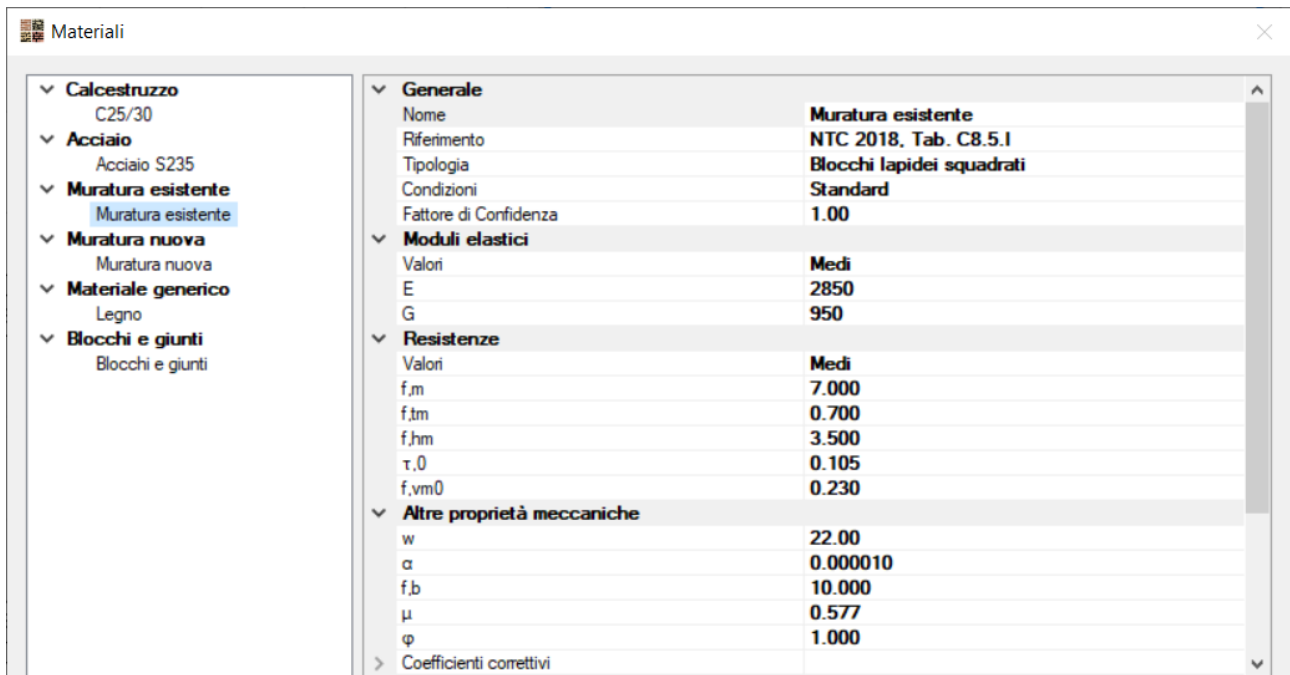


Figura 3-59: Finestra Materiali, caratteristiche del materiale muratura esistente in "Blocchi lapidei squadrate"

Anche per il **materiale del tipo "Blocchi e Giunti"** si considera FC=1, inoltre si adotta per i Blocchi la Resistenza a Compressione  $f_{,m}=35 \text{ MPa}$  e per i Giunti di Malta si considera la resistenza a Trazione  $f_{,tm}=0.20 \text{ MPa}$ :

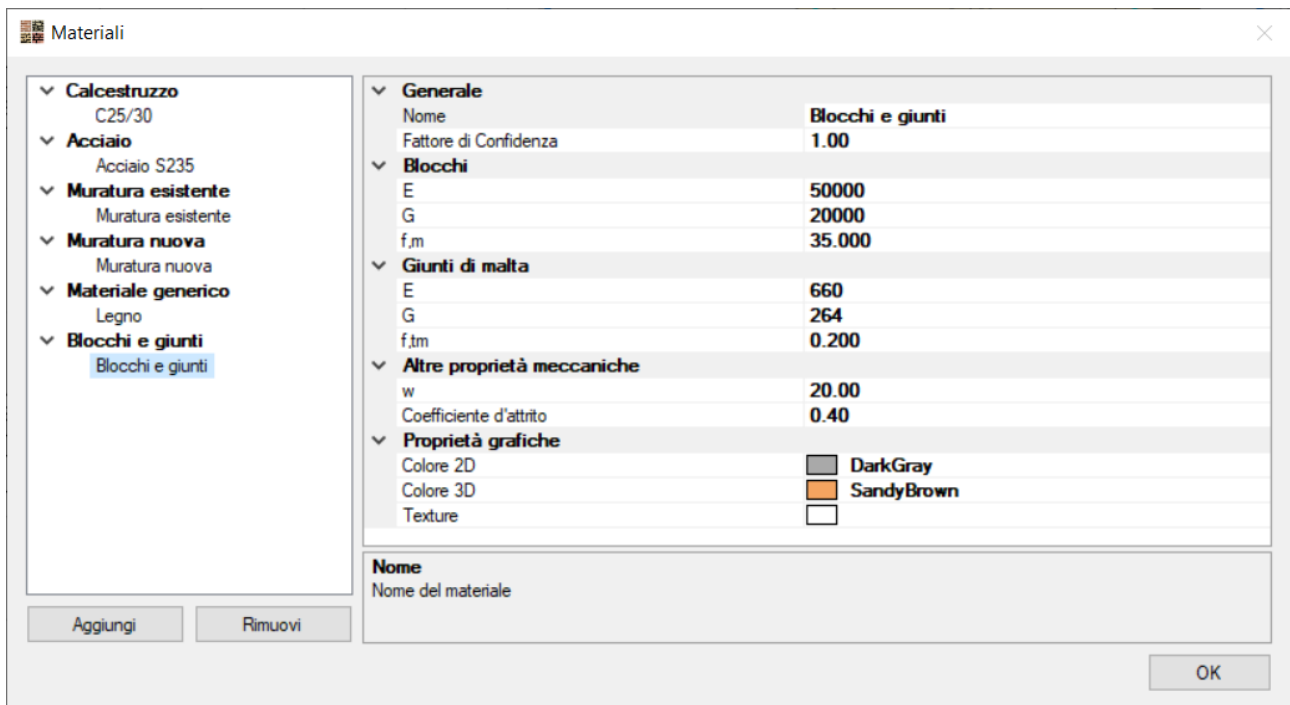


Figura 3-60: Finestra Materiali, caratteristiche del materiale "Blocchi e Giunti"

A questo punto, si creano i due archi diagonali, tramite l'oggetto "Arco": da tenere presente che, per la definizione della corretta luce netta (corrispondente ai nodi iniziale e finale) andranno selezionati esattamente i punti di incrocio interni delle diagonali.

**Per gli archi diagonali**, si imposteranno le seguenti caratteristiche dalla finestra delle proprietà:

- gruppo "Geometria":
  - Altezza d'imposta=**3m** (pari all'altezza d'imposta delle altre aperture ad arco sulle pareti corte);
  - Freccia= **3.50m** (lievemente superiore rispetto alle aperture ad arco sulle pareti corte);
  - Spessore=**0.50m**;
  - Profondità=**0.50m**;
  - Raggio di Raccordo= **2m** (poiché sono archi ribassati, è il raggio di raccordo alle imposte).
- gruppo "Caratteristiche":
  - Modellazione = **Blocchi e Giunti**;
  - Materiale = **Blocchi e Giunti**;
  - Lunghezza dei blocchi = **1.00m**;
  - Spessore dei Giunti= **20mm**.
- gruppo "Rinfianco":
  - Rinfianco = **Si**
  - Materiale = **Muratura esistente in Blocchi Lapidei Squadrati**
  - Profondità=**0.50m**
  - $\Delta h$  iniziale e finale =**0**

**N.B.:** la presenza di un Rinfianco è necessaria per la definizione di eventuali solai a livello dell'orizzontamento.

Per completare la modellazione, si inseriscono quindi i solai cliccando nei punti interni degli spicchi delimitati da archi diagonali e muri perimetrali: per tali solai, si decide di non voler impostare una direzione di orditura univoca, pertanto si considerano "Solai a piastra", aventi le seguenti caratteristiche:

- Tipologia: **Solaio Piano**
- Comportamento a Piastra: **Si**
- Carichi: si considera **4 kN/m<sup>2</sup>** per i Carichi Permanenti Strutturali (**Carico 1**), **1 kN/m<sup>2</sup>** per i Carichi Permanenti Non Strutturali (**Carico 2**), e **2.00 kN/m<sup>2</sup>** per i Carichi Permanenti Variabili (**Carico 3**), scegliendo "**Variabile Cat.A**" come successiva tipologia di carico variabile dalla tendina all'interno della proprietà Carico 3 (CCE).

## MODELLAZIONE STRUTTURALE

Generando il successivo modello strutturale, è interessante valutare come avviene la creazione dei collegamenti tra gli archi diagonali e le pareti perimetrali.

È consigliabile attivare la vista delle aste come "Superfici", disattivando la vista dei "Nodi" e dei "Link di archi", in modo da non complicare troppo la visualizzazione: effettuando uno zoom su una zona d'imposta, è possibile notare che il nodo d'imposta dell'arco diagonale è stato collegato tramite due link rigidi alle sommità sia del maschio sul lato corto (spezzato a causa della presenza dell'apertura ad arco attigua) sia al maschio sul lato lungo (con apertura rettangolare attigua e non spezzato):

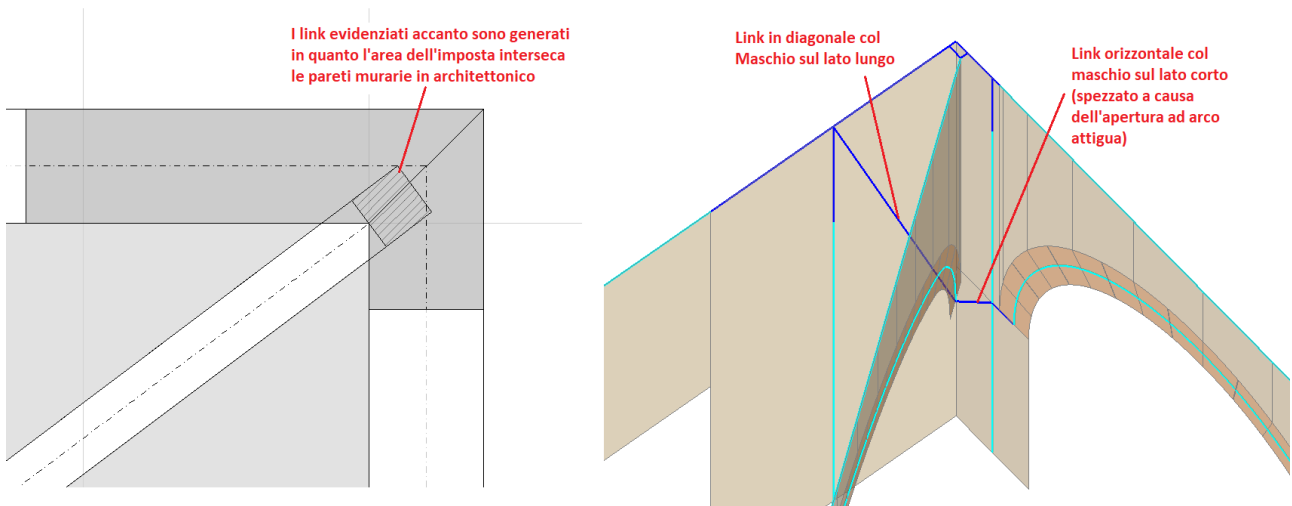


Figura 3-61: Modello Strutturale – Particolare sul collegamento dei nodi d'imposta degli archi diagonali

I link come sopra generati sono in ogni caso editabili in ambiente strutturale, in questo caso non costituiscono una problematica in quanto si tratta di un modello semplice. In casi più complessi, potrebbe essere necessario rivedere tali collegamenti, cancellandoli e modificandoli secondo una diversa distribuzione maggiormente opportuna.

Prima di passare alle analisi, è bene impostare il Livello come "Non rigido" dal Navigatore sulla sinistra in modo da non avere relazioni del tipo Master-Slave:

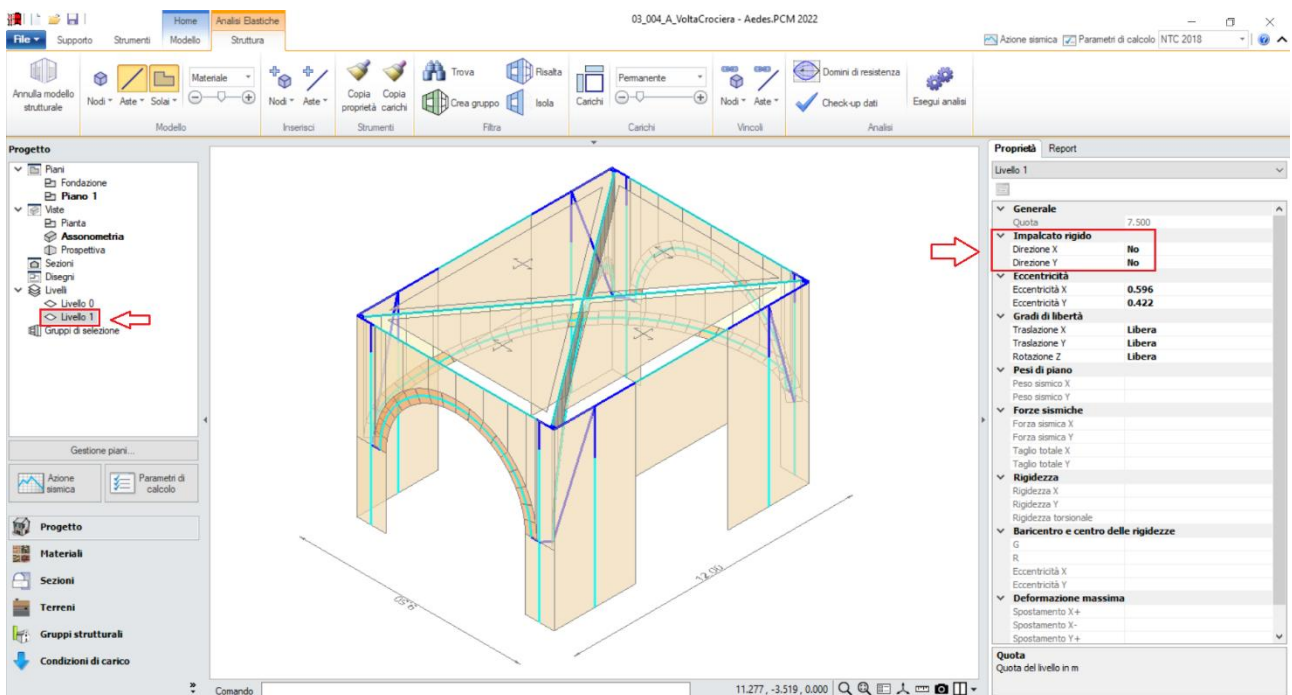


Figura 3-62: Modello Strutturale – Impostazione del Livello "Non rigido"

## RISULTATI DELLE ANALISI

In Analisi Modale, il primo modo principale è in Y con periodo di circa 0.302 e massa partecipante di circa il 91%, mentre il modo principale in X è il n.3 con un periodo di circa 0.123 sec e massa partecipante di circa il 91%. La struttura risulta quindi più rigida lungo la direzione X.

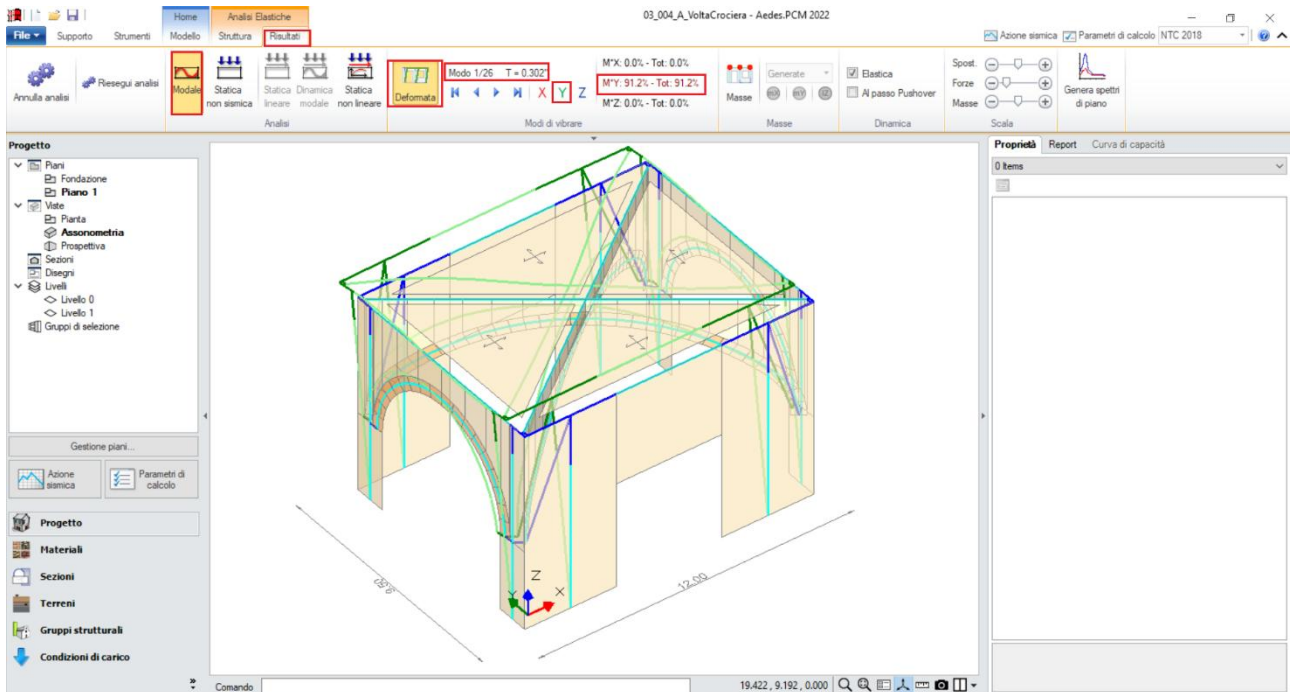


Figura 3-63: Volta a Crociera: Modo principale in Y: Periodo 0.302 sec e Massa Partecipante 91%

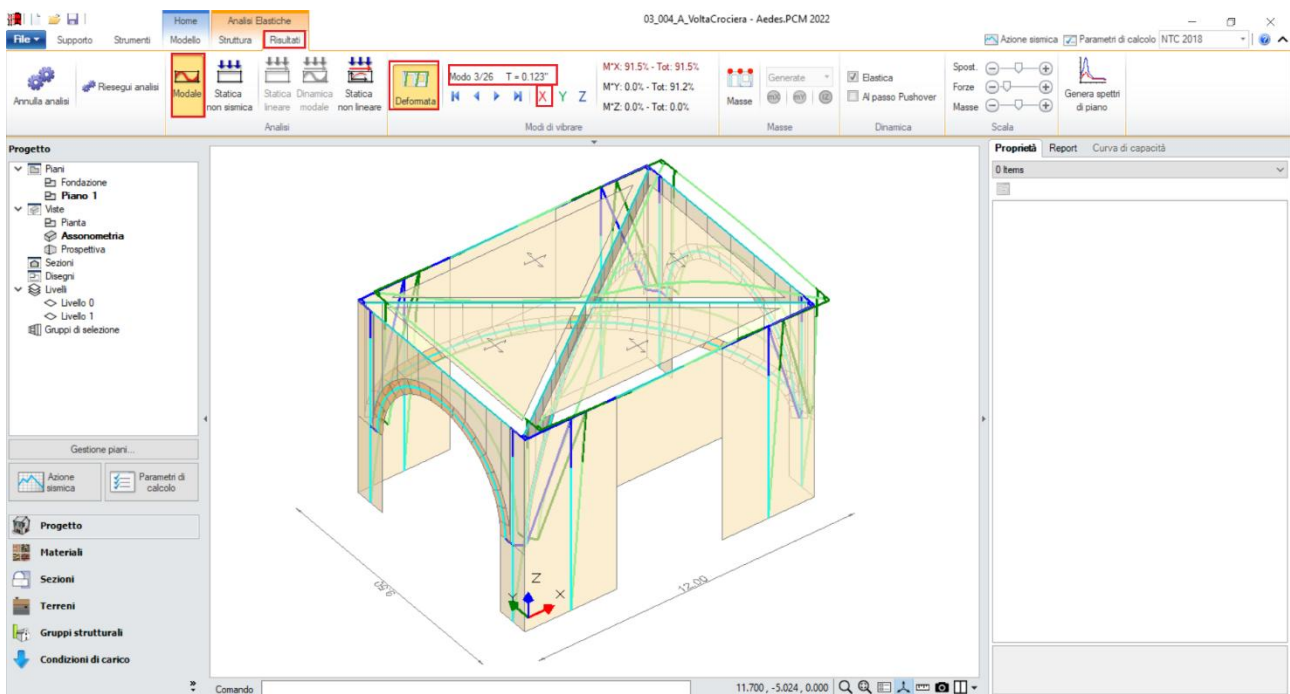


Figura 3-64: Volta a Crociera: Modo principale in X: Periodo 0.123 sec e Massa Partecipante 91%

In Analisi Statica Non Sismica, la curva delle pressioni negli archi diagonali risulta interamente contenuta all'interno del loro spessore, mentre per le aperture ad arco sui lati corti si nota la sua fuoriuscita in prossimità dei blocchi più vicini alla chiave:

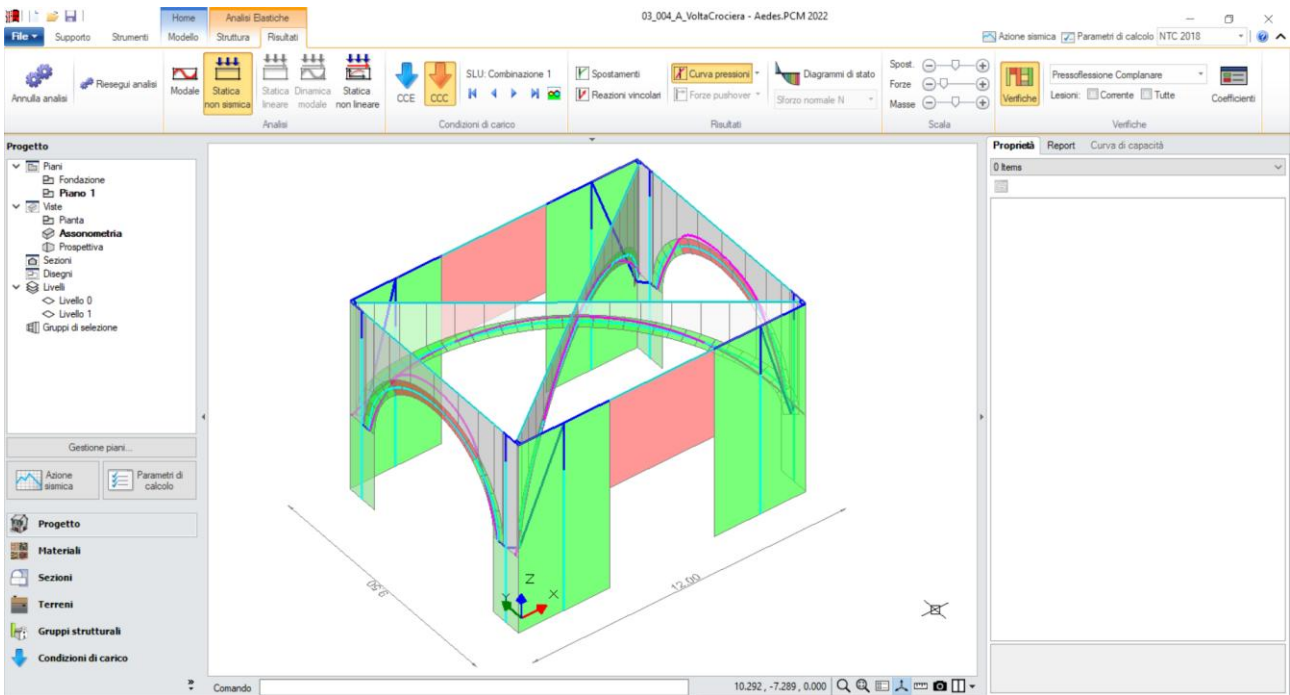


Figura 3-65: Volta a Crociera, Analisi Statica Non Sismica, visualizzazione curva delle pressioni

In Analisi Pushover, al passo iniziale la configurazione equilibrata di partenza prevede la fuoriuscita della curva delle pressioni solo per l'apertura ad arco sul lato sinistro:

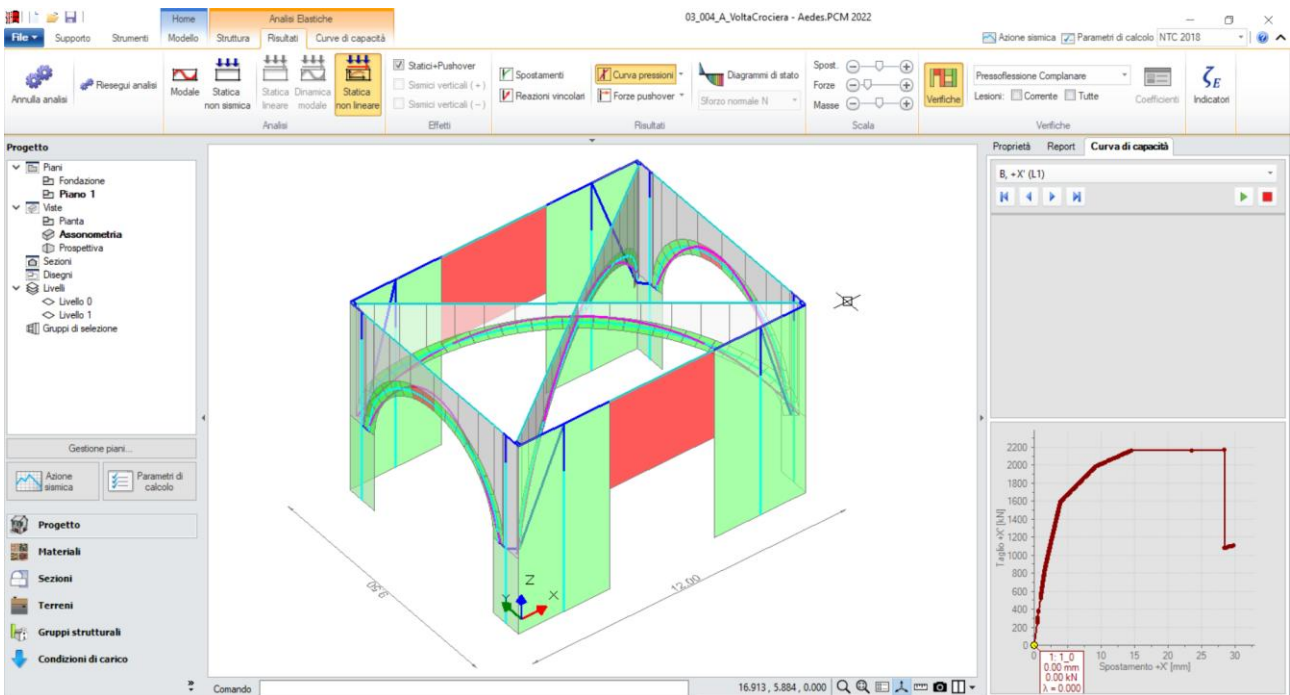


Figura 3-66: Volta a crociera: Pushover, configurazione al passo iniziale

Seguendo l'evoluzione della curva passo per passo, è possibile apprezzare i vari meccanismi di collasso dei singoli archi.

Più in specifico, tralasciando la progressione delle plasticizzazioni anche delle murature, nei confronti degli archi si osserva che:

- per la direzione X, la curva arriva ad una forza massima molto alta pari a circa 2200kN, inoltre:
  - negli archi perimetrali si aprono cerniere in corrispondenza delle interfacce in intradosso dei blocchi in chiave; questi quindi risultano "meno sollecitati";
  - negli archi diagonali, si aprono cerniere in estradosso in corrispondenza dei blocchi alle reni, mentre si aprono cerniere anche all'intradosso in prossimità dei blocchi in chiave. Questi risultano quindi maggiormente sollecitati:

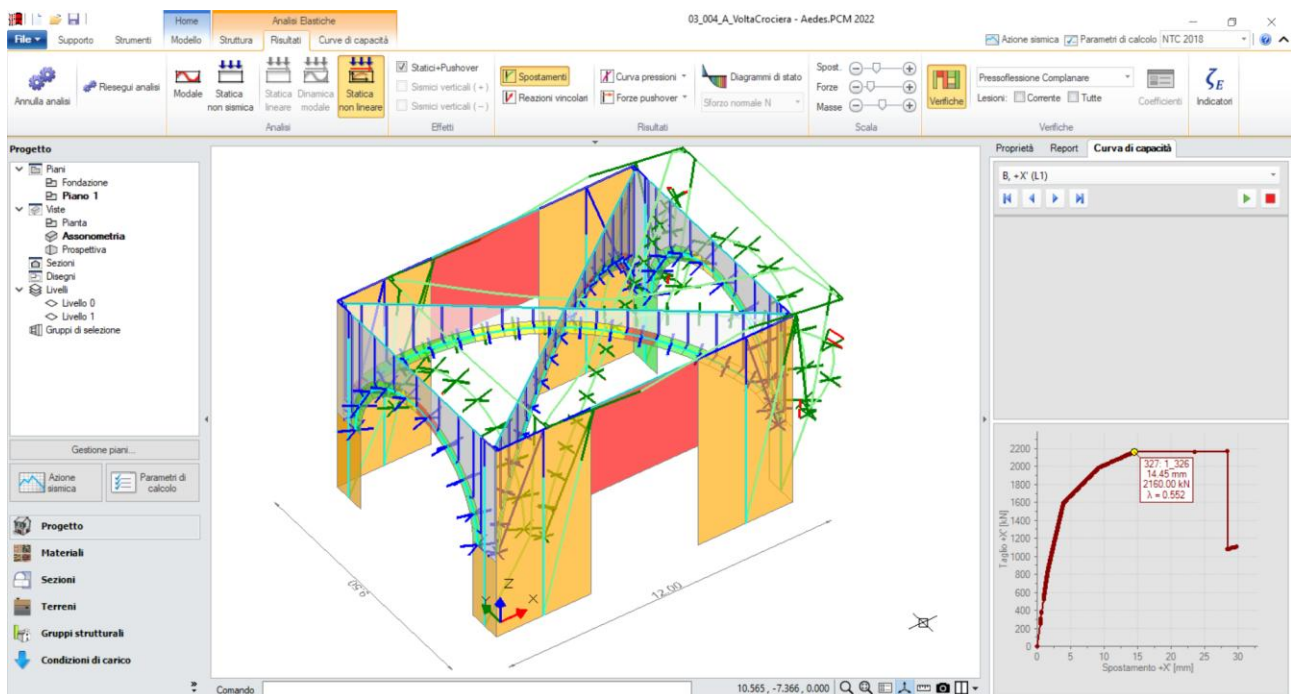


Figura 3-67: Volta a crociera: Pushover, configurazione all'ultimo passo, curva B +X

- per la direzione Y, si osserva un valore molto più basso della forza massima pari a circa 700kN, inoltre sia gli archi diagonali che quelli perimetrali meccanismi di collasso a quattro cerniere con alternanza intradosso/estradosso, tuttavia con impegno maggiore su questi ultimi perimetrali.

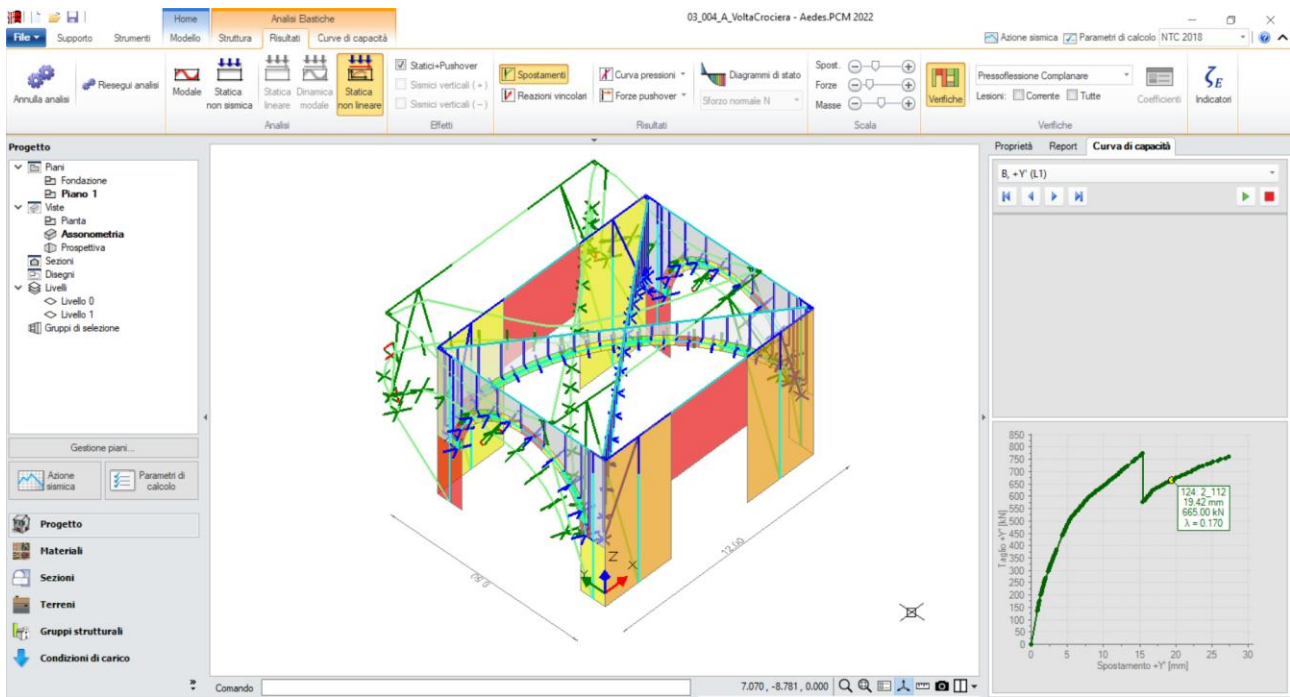


Figura 3-68: Volta a crociera: Pushover, configurazione all'ultimo passo, curva B +Y

### 03\_005\_CinematismoArchi

File di riferimento:

03\_005\_CinematismoArchi (ex 501)

Parole chiave:

- MECCANISMO A 4 CERNIERE

Canale YouTube AEDES:

ECS Meccanismo 4 cerniere

<https://www.youtube.com/watch?v=YIT-dgSViHo>

Nel presente capitolo, si descriverà lo studio del cinematismo tipico del collasso di un arco, ovvero il cosiddetto "**Meccanismo a 4 cerniere**". Per capire i possibili utilizzi di tale cinematismo, si ipotizzando tre situazioni diverse:

- 1) Una semplice cella rettangolare di dimensioni 7.50m x 5m, in cui è presente un'apertura di altezza 3.50m ad arco ribassato, impostato su muri perimetrali, avente luce di 4m e freccia 1.50m;
- 2) Due archi consecutivi a tutto sesto, aventi luce di 5m e spessore 50cm, impostati a 2.50m su tre colonne a sezione rettangolare 1000x1000;
- 3) Un singolo arco a tutto sesto, con luce di 5m e spessore 50cm, dotato di Rinfianco, impostato su due colonne.

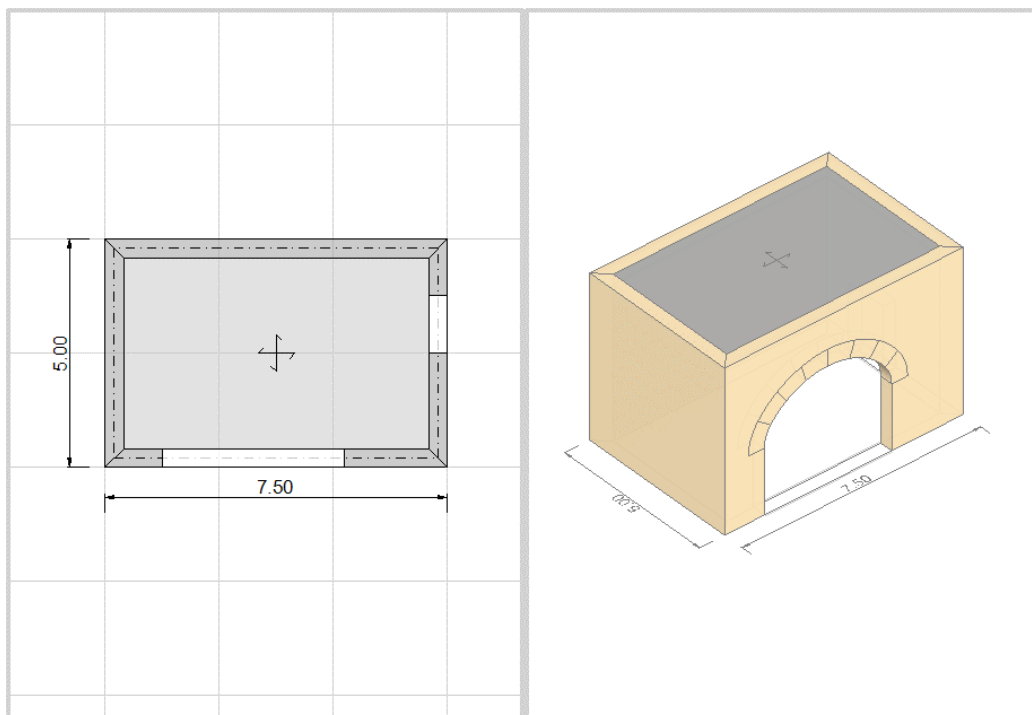


Figura 3-69: Meccanismo a quattro cerniere: Caso 1)

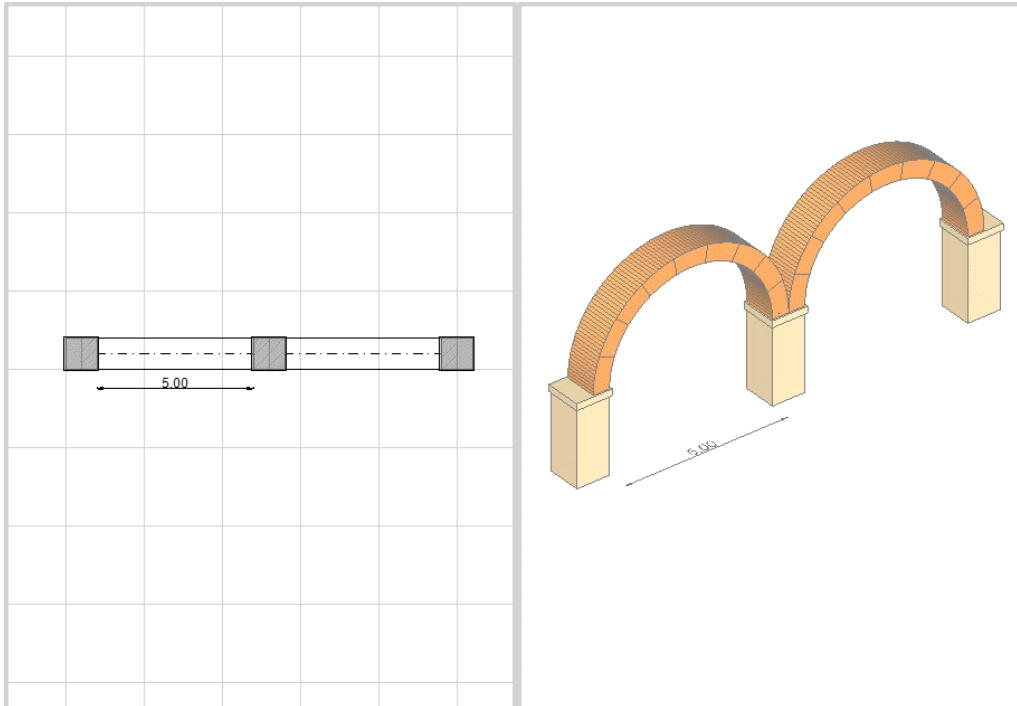


Figura 3-70: Meccanismo a quattro cerniere: Caso 2)

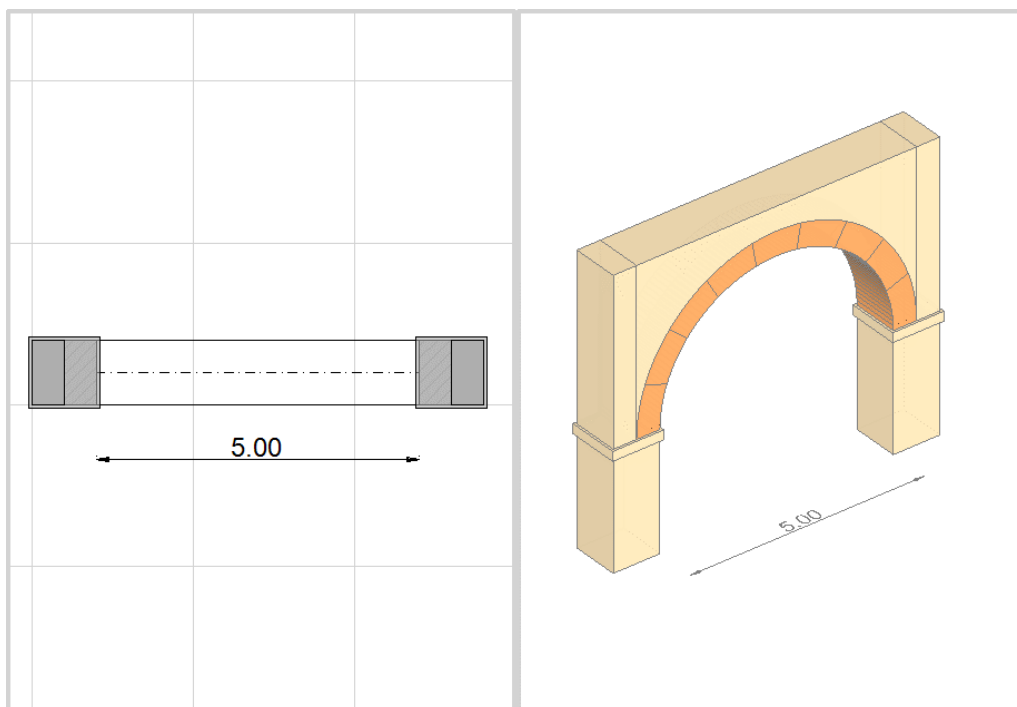


Figura 3-71: Meccanismo a quattro cerniere: Caso 3)

Per tutti i modelli sopra riportati, il piano di definizione in Architettura è alto 5m.

Per le pareti, è stata considerata una muratura esistente in "Pietrame disordinata" (LC1, da cui  $FC=1.35$ ), mentre per il materiale "Blocchi e Giunti" si è adottato per i Blocchi la Resistenza a Compressione  $f_m=35\text{ MPa}$  e per i Giunti di Malta si considera nulla la resistenza a Trazione  $f_{tm}=0.25\text{ MPa}$  ed un peso  $w=20\text{ kN/m}^3$ .

Generando il Modello Cinematico, in base alle diverse strutture come sopra identificate sarà necessario operare diversamente per la definizione del Meccanismo a quattro cerniere.

### Caso 1)

Per la struttura in esame, al fine di definire un Meccanismo a quattro cerniere, è necessario condurre tre tagli in successione, può risultare utile in questo caso il comando "Polilinea":

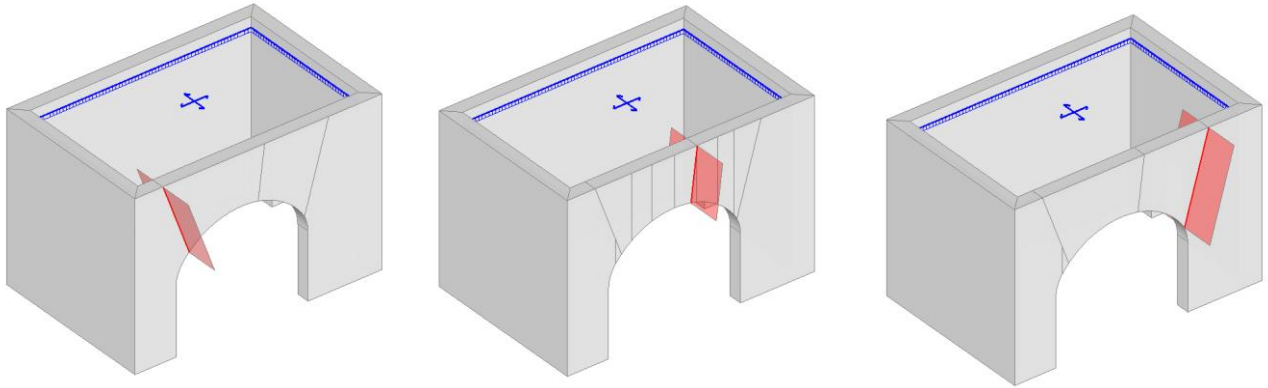


Figura 3-72: Meccanismo a quattro cerniere: Caso 1) Da sinistra a destra, Tagli da effettuare

Dopo aver effettuato i tagli, è necessario qualificare opportunamente le cerniere, scegliendo "Meccanismo a quattro cerniere" dal comando "Definizione": in tal caso, occorre selezionare dapprima la cerniera di base, e poi in sequenza tre punti rappresentativi delle altre cerniere, che saranno parallele a quella di base inserita. Il meccanismo prevede l'alternanza di intradosso/estradosso, quindi nella selezione dei punti rappresentativi andrà posta particolare attenzione a questo aspetto:

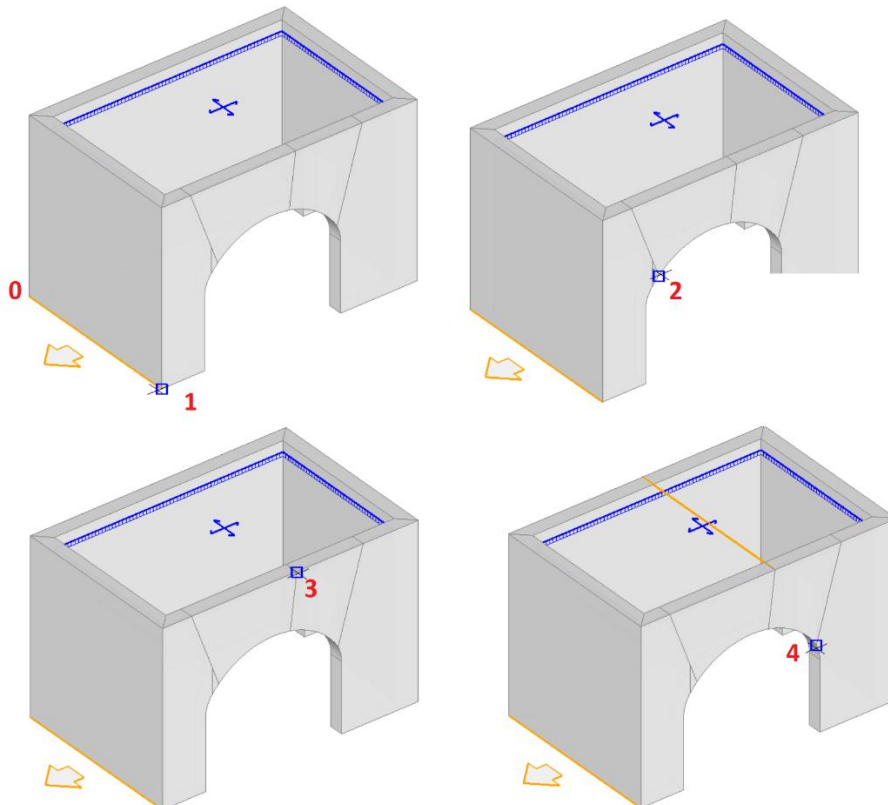


Figura 3-73: Meccanismo a quattro cerniere: Caso 1) Definizione delle cerniere

In definitiva, verranno create quattro cerniere, identificate con le lettere A, B, C e D:

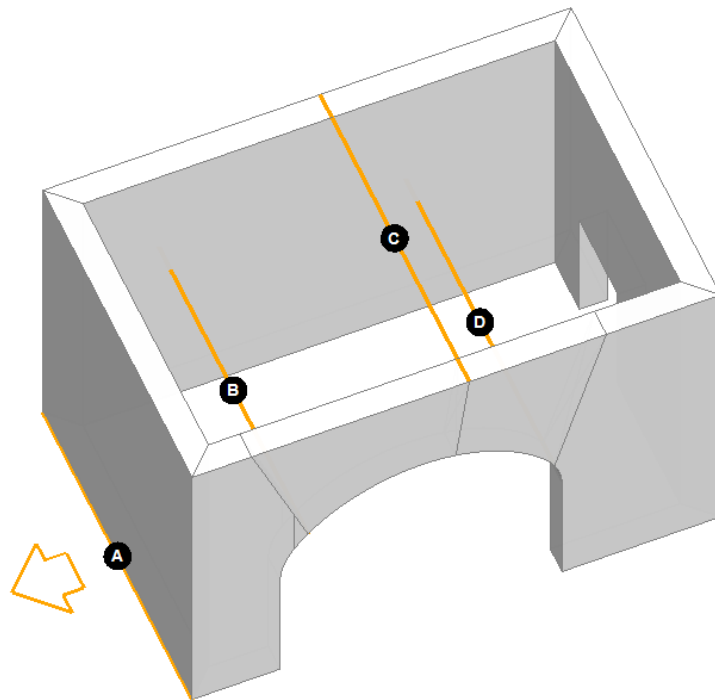


Figura 3-74: Meccanismo a quattro cerniere: Caso 1) Assonometria con vista delle quattro cerniere

Il passo successivo è quindi la definizione dei Corpi Partecipanti: in base ai tagli condotti inizialmente, bisognerà selezionare il corpo partecipante e indicare (tramite successivi click del mouse) a quale cerniera ruoterà attorno:

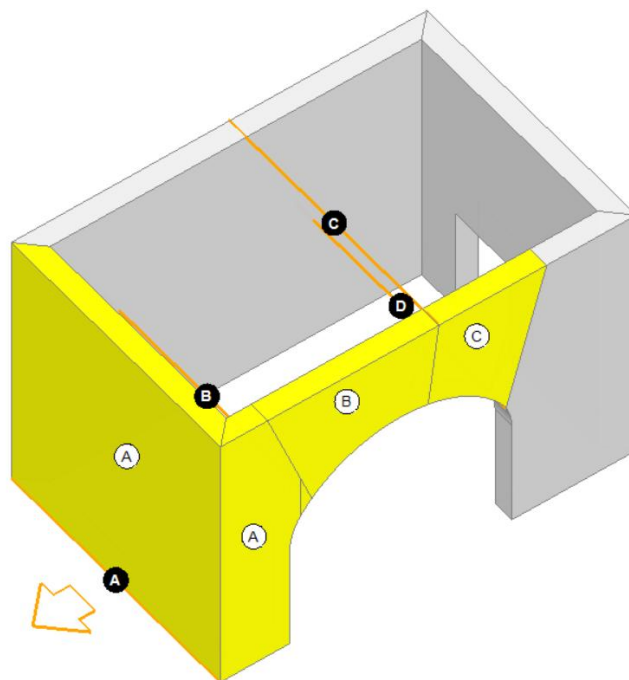


Figura 3-75: Meccanismo a quattro cerniere: Caso 1) Assegnazione dei Corpi Partecipanti

Amplificando la scala di visualizzazione dell'anteprima del cinematismo, si potrà avere conferma del corretto andamento. Il cinematismo è stato correttamente inserito in quanto i corpi ruotano ognuno secondo il proprio asse di definizione, inoltre è da notare che i tagli condotti sui corpi hanno avuto effetto anche sulle linee di scarico dei solai: queste risultano spezzate, in tal modo consentendo di considerar l'effettivo carico intercettato dal taglio sulle singole porzioni in movimento.

Attivando inoltre a Legende (F4 da tastiera) si ha un immediato riscontro anche dell'esito della verifica: in questo caso, la verifica del cinematismo risulta soddisfatta:

**01. Cinematismo**  
Meccanismo a quattro cerniere  
 $\alpha_0 = 0.154$   
■ SLV  
 $PGA_{CLV} / PGA_{DLV} = 0.213 / 0.126 = 1.690$   
 $TR_{CLV} / TR_{DLV} = 2475 / 475 = 5.211$

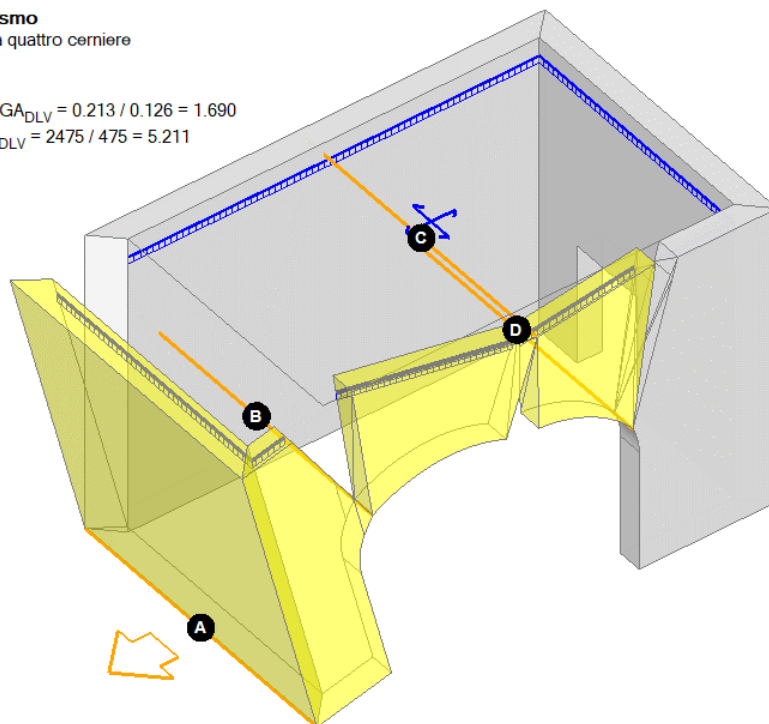


Figura 3-76: Meccanismo a quattro cerniere: Caso 1) Verifica soddisfatta

### **Caso 2)**

In questo caso, poiché nel Modello Architettonico gli archi sono già stati modellati come oggetti "indipendenti", nel Modello Cinematico si conserva questa caratteristica ed ogni elemento "Arco" risulta già scomposto in singoli "Blocchi". Non risulta quindi necessario condurre ulteriori tagli in questo caso.

Si può quindi passare direttamente alla definizione delle cerniere, con la sequenza mostrata qui sotto:

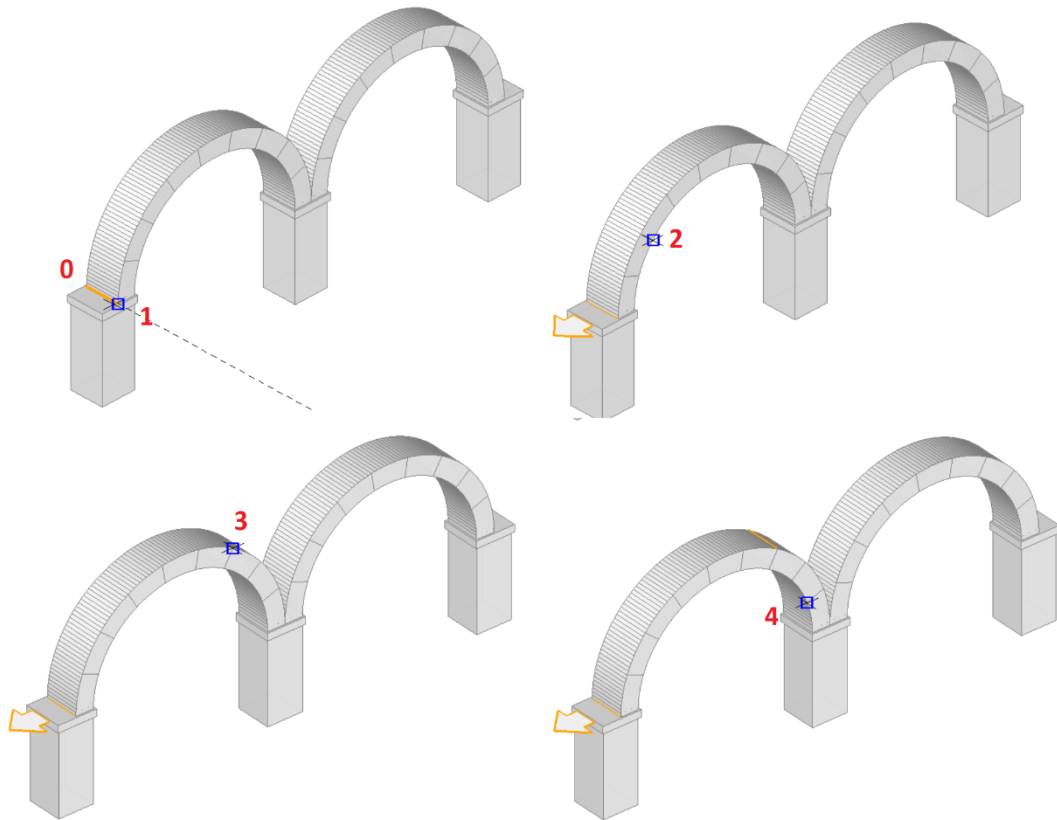


Figura 3-77: Meccanismo a quattro cerniere: Caso 2) Definizione delle cerniere

Successivamente si definiscono i Corpi Partecipanti: in questo caso, sarà sufficiente selezionare singolarmente i blocchi, cliccando più volte col mouse per cambiare la definizione della rispettiva cerniera attorno alla quale far ruotare il blocco:

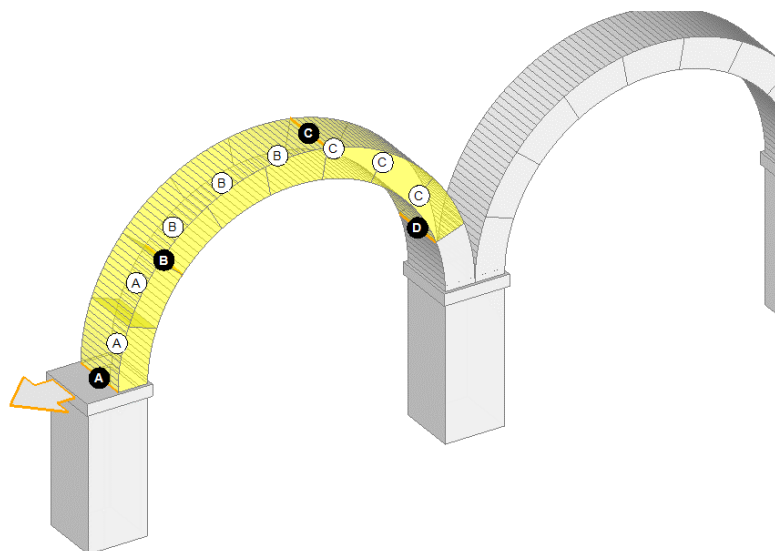


Figura 3-78: Meccanismo a quattro cerniere: Caso 2) Assegnazione dei Corpi Partecipanti

Amplificando la scala di visualizzazione dell'anteprima del cinematismo, si nota il suo corretto andamento. Anche in questo caso, la verifica del cinematismo risulta soddisfatta:

## 02. Cinematismo

Meccanismo a quattro cerniere

$\alpha_0 = 0.239$

■ SLV

$PGA_{CLV} / PGA_{DLV} = 0.213 / 0.126 = 1.690$

$TR_{CLV} / TR_{DLV} = 2475 / 475 = 5.211$

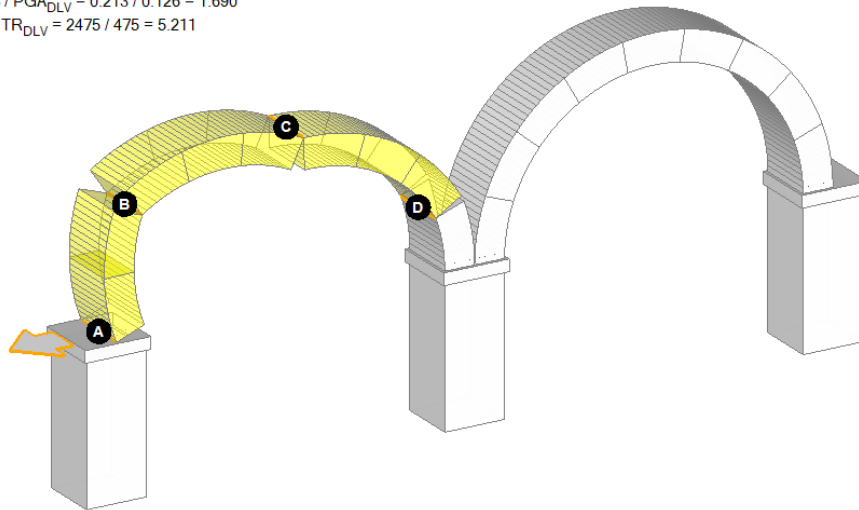


Figura 3-79: Meccanismo a quattro cerniere: Caso 2) Verifica soddisfatta

Il meccanismo a quattro cerniere tuttavia potrebbe interessare anche la colonna dove gli archi si impostano. Si ipotizzi ad esempio di studiare questa configurazione coinvolgendo il secondo arco a destra: in modo simile a quanto fatto sopra, si definiscono le quattro cerniere, in questo caso però partendo dalla base della colonna come cerniera iniziale, e successivamente selezionando in modo alternato le cerniere sull'arco coinvolgendo le sezioni di imposta:

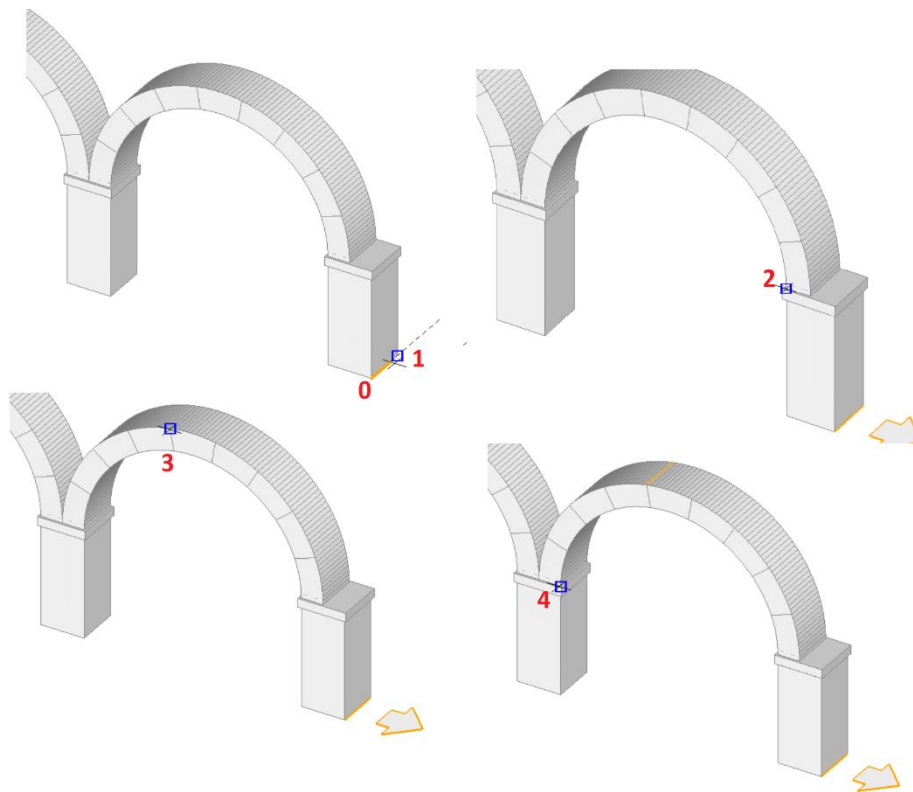


Figura 3-80: Meccanismo a quattro cerniere: Caso 2) con colonna, Definizione delle cerniere

Definendo quindi i corpi partecipanti ed amplificando la visualizzazione dell'anteprima del cinematismo, si può avere conferma del corretto andamento che in questo caso coinvolge anche la colonna d'imposta destra. La verifica anche in questo caso risulta soddisfatta:

Meccanismo a quattro cerniere  
 $\alpha_0 = 0.268$   
 ■ SLV  
 $PGA_{CLV} / PGA_{DLV} = 0.213 / 0.126 = 1.690$   
 $TR_{CLV} / TR_{DLV} = 2475 / 475 = 5.211$

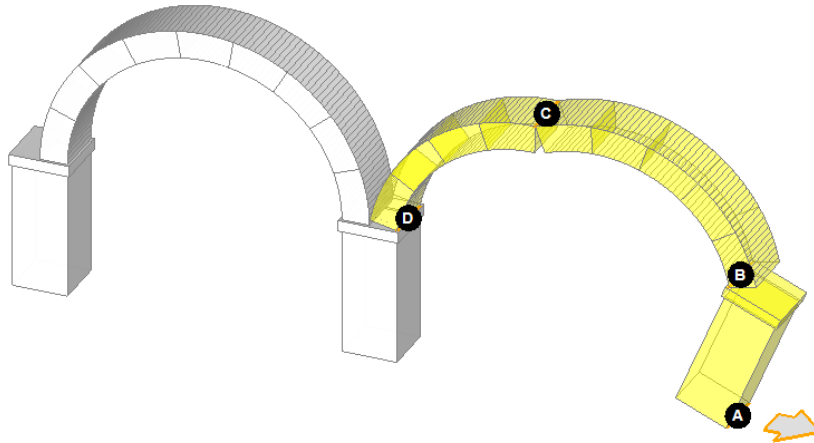


Figura 3-81: Meccanismo a quattro cerniere: Caso 2) con colonna, Verifica soddisfatta

Con riferimento all'ultima configurazione sopra descritta, è interessante approfondire i risultati che si otterrebbero a seguito dell'applicazione di un rinforzo quale una Catena: dal comando "Rinforzi" si sceglie quindi "Catena", da definire tra i nodi di mezzeria delle colonne d'imposta sull'arcata destra. Per poter considerare il contributo della Catena, successivamente andrà selezionata inserendo nella finestra delle proprietà il valore di calcolo per la Trazione: in questo caso, adottando una catena di diametro  $d=10\text{mm}$  con acciaio avente  $f_{yd}=200\text{MPa}$ , la minima trazione è data dal meccanismo di penetrazione offrendo un valore  $T=4.63\text{ kN}$ : rispetto alla configurazione iniziale senza rinforzi, l'utilizzo di una catena determina un aumento del Moltiplicatore di Collasso da  $\alpha_0=0.268$  ad  $\alpha_0=0.344$ :

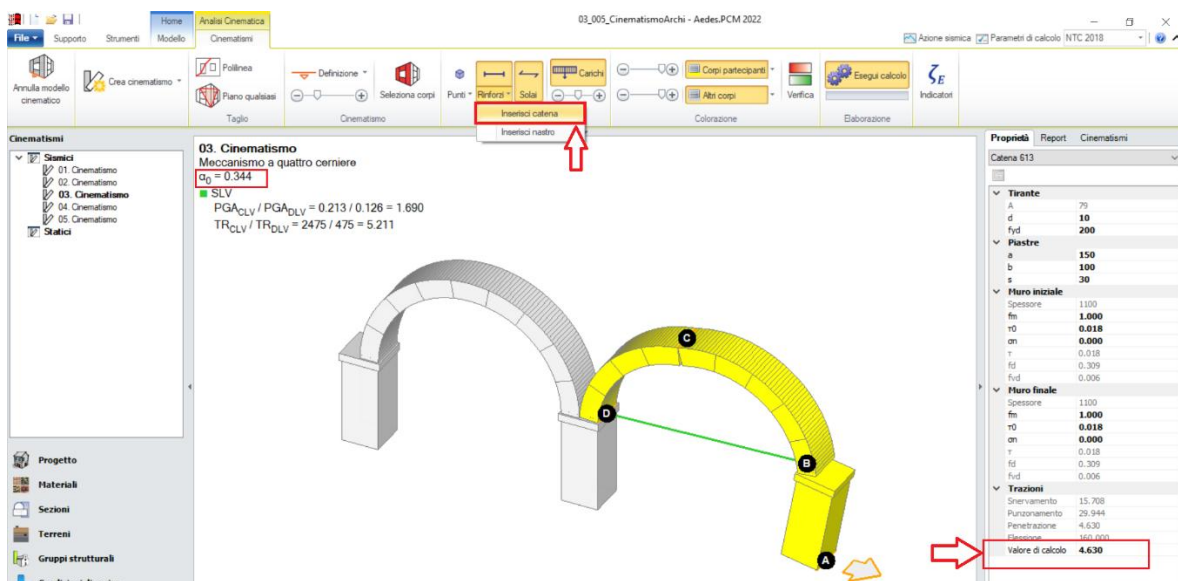


Figura 3-82: Meccanismo a quattro cerniere: Caso 2) con colonna e Catena, Aumento moltiplicatore di collasso

### Caso 3)

In questo caso, poiché nel Modello Architettonico l'arco è stato definito con presenza di Rinfiaco superiore, per considerare il meccanismo è necessario condurre tre tagli in successione; in modo analogo al primo caso, risulta agevole l'utilizzo del comando "Polilinea":

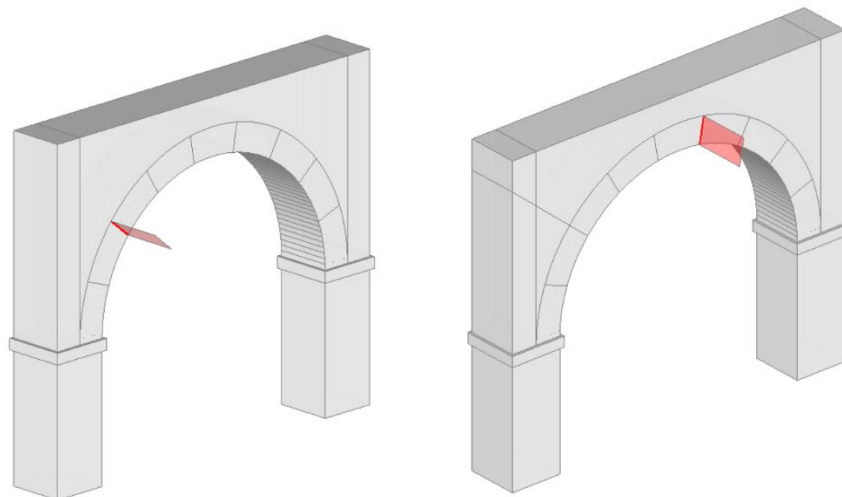


Figura 3-83: Meccanismo a quattro cerniere: Caso 3) Da sinistra a destra, Tagli da effettuare

Dopo aver effettuato i tagli, è necessario qualificare opportunamente le cerniere, scegliendo "Meccanismo a quattro cerniere" dal comando "Definizione": in prima istanza, considerando che il cinematismo coinvolga solo l'arco, occorre selezionare dapprima la cerniera di base all'imposta, e poi in sequenza tre punti rappresentativi delle altre cerniere, che saranno parallele a quella di base inserita. Il meccanismo prevede l'alternanza di intradosso/estradosso, quindi nella selezione dei punti rappresentativi andrà posta particolare attenzione a questo aspetto:

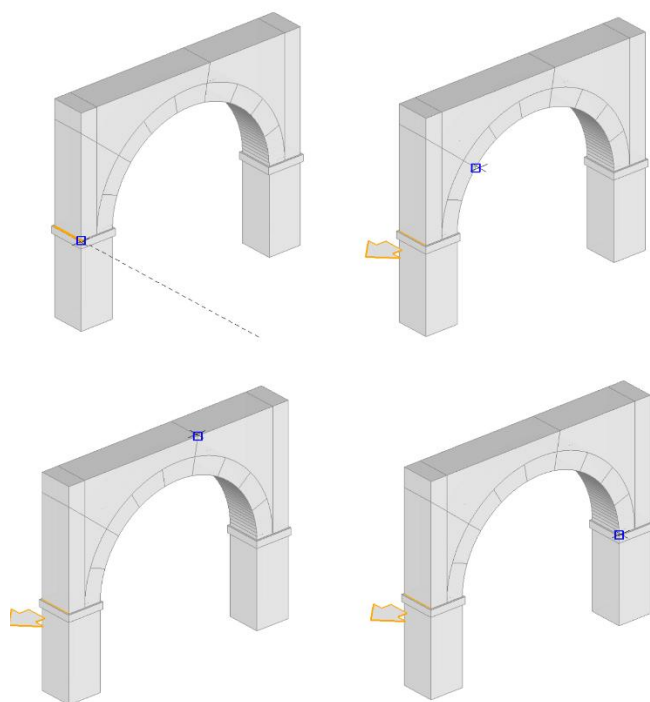


Figura 3-84: Meccanismo a quattro cerniere: Caso 3) Definizione delle cerniere

Anche in questo caso, verranno create quattro cerniere, identificate con le lettere A, B, C e D:

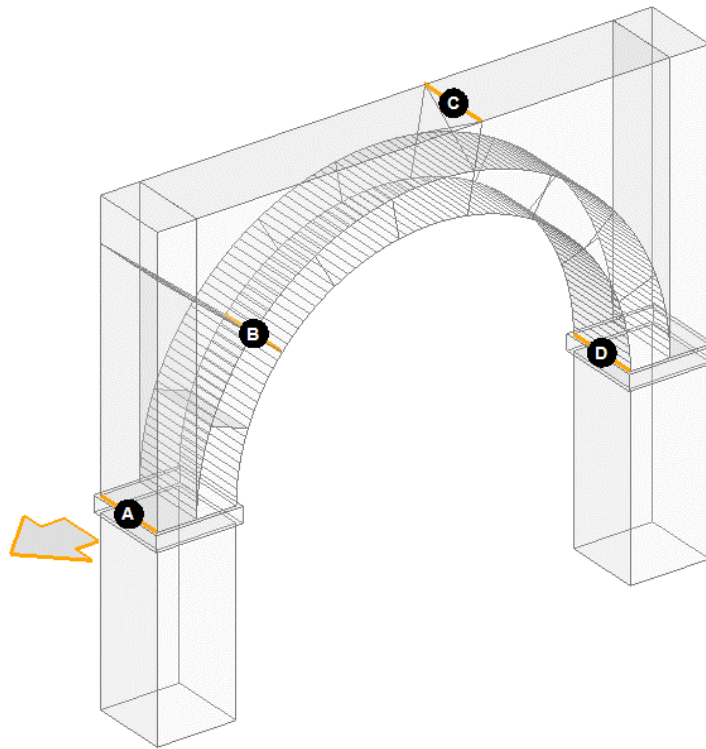


Figura 3-85: Meccanismo a quattro cerniere: Caso 3) Assonometria con vista delle quattro cerniere

Il passo successivo è quindi la definizione dei Corpi Partecipanti: in base ai tagli condotti inizialmente, bisognerà selezionare il corpo partecipante e indicare (tramite successivi click del mouse) a quale cerniera ruoterà attorno:

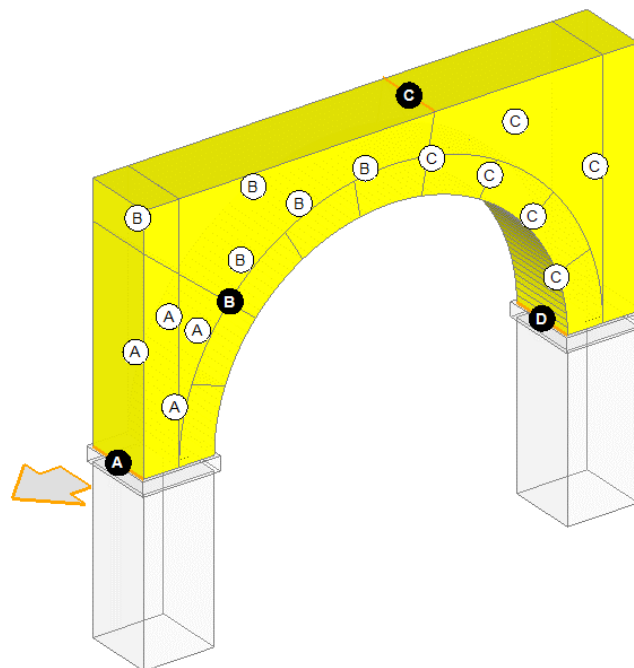


Figura 3-86: Meccanismo a quattro cerniere: Caso 3) Assegnazione dei Corpi Partecipanti

Amplificando la scala di visualizzazione dell'anteprima del cinematismo, si potrà avere conferma del corretto andamento. Il cinematismo è stato correttamente inserito in quanto i corpi ruotano ognuno secondo il proprio asse di definizione.

Attivando inoltre a Legende (F4 da tastiera) si ha un immediato riscontro anche dell'esito della verifica: in questo caso, la verifica del cinematismo risulta soddisfatta, con moltiplicatore di collasso parecchio elevato ( $\alpha_0=0.919$ ):

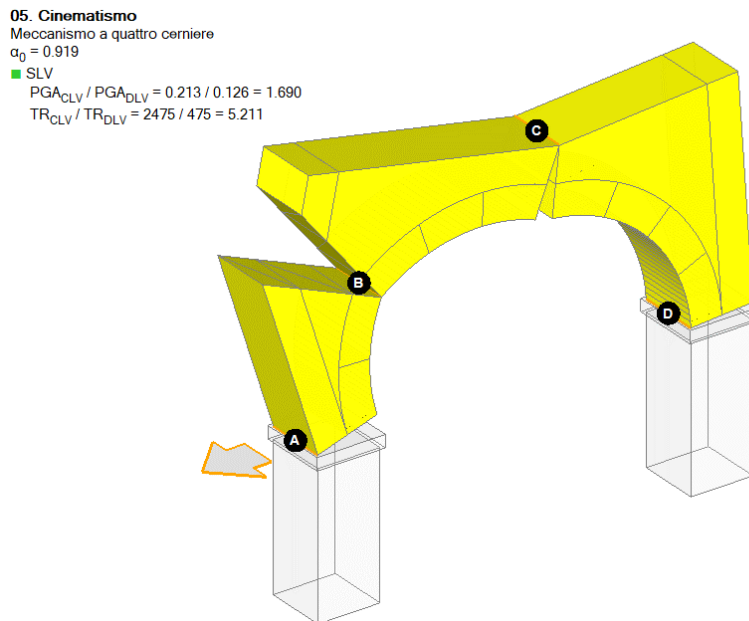


Figura 3-87: Meccanismo a quattro cerniere: Caso 3) Solo Arco - Verifica soddisfatta

Qualora si voglia considerare anche il coinvolgimento della colonna sinistra nel meccanismo, è possibile duplicare il cinematismo ridefinendo la posizione delle quattro cerniere, in tal caso selezionando i nodi di base della colonna per spostare su questa la cerniera A: dai risultati, emerge un netto abbassamento del moltiplicatore di collasso, che in questa configurazione vale  $\alpha_0=0.218$ :

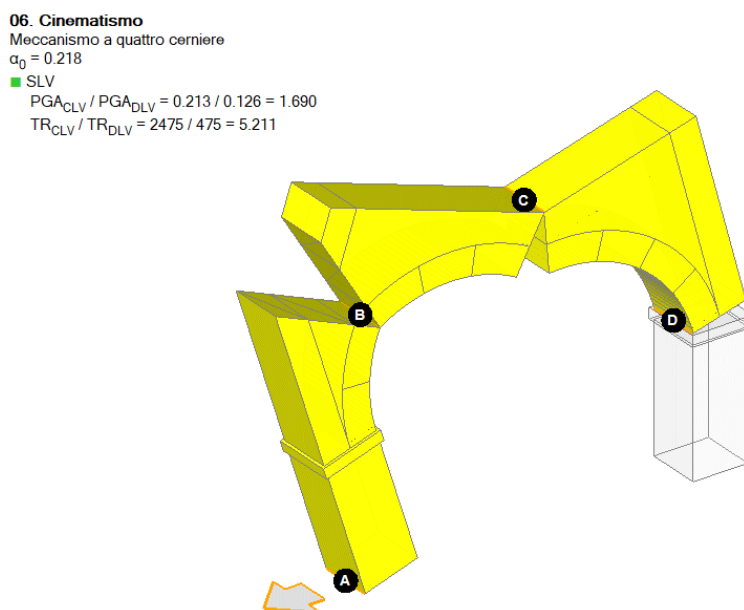


Figura 3-88: Meccanismo a quattro cerniere: Caso 3) Arco e Colonna - Verifica soddisfatta

## 03\_006\_EdificioConArchi

### File di riferimento:

03\_006\_EdificioConArchi\_A (ex 601)

03\_006\_EdificioConArchi\_B (ex 602)

### Parole chiave:

- MODELLAZIONE ARCHI AD ASTA
- MODELLAZIONE ARCHI A BLOCCHI

### Riferimenti utili:

Articolo Ingenio

<https://www.ingenio-web.it/22185-sisma-verticale-modellazione-e-analisi-in-ambito-professionale-sugli-edifici-esistenti-in-muratura>

### Canale YouTube AEDES:

ECS Esempio Edificio

<https://www.youtube.com/watch?v=pwnV12yuD2Y>

## MODELLAZIONE ARCHITETTONICA

L'esempio che si descrive di seguito è relativo alla modellazione di un edificio a due piani interamente in muratura in blocchi lapidei squadrati, abbastanza regolare, con pianta rettangolare di circa 26m x 16m, pareti perimetrali di spessore significativo pari a 50cm e copertura a padiglione. In questo caso, l'edificio rappresenta una costruzione esistente sita in zona montana, caratterizzata dalla presenza di alcune aperture ad arco in prossimità degli angoli Sud-Ovest e Nord-Est.



*Figura 3-89: Edificio in muratura di blocchi lapidei situato in zona montana, con aperture ad arco*

Per la modellazione di questo edificio in PCM si seguono i passaggi tipici della modellazione architettonica ad oggetti: inizialmente si definiscono le altezze dei Piani nella finestra "Gestione Piani", per il caso in esame si inseriscono le seguenti altezze, prescindendo inoltre dall'azione del Vento:

- Piano 1 = 5m;
- Piano 2 = 4m;
- Piano 3 = 0.50m.

L'altezza di 50cm al Piano 3 serve unicamente per creare le murature a quota di gronda per la definizione delle quattro falde: trattandosi di murature "fittizie" tozze, queste saranno escluse dalle verifiche.

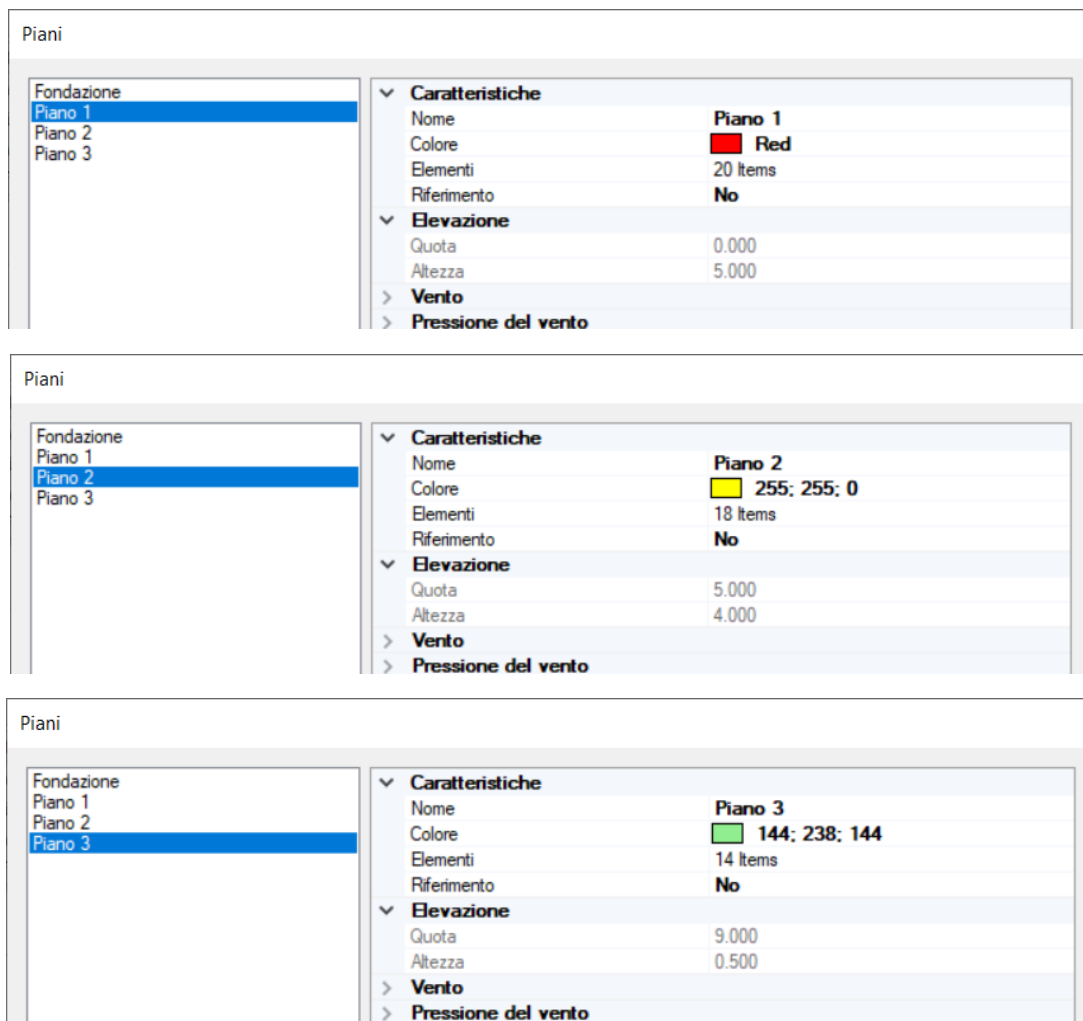


Figura 3-90: "Gestione Piani", inserimento dell'altezza per ogni piano

Si considera inoltre una muratura esistente in "**Blocchi Lapedei Squadrati**" adottando un Livello di Conoscenza LC2, da cui un Fattore di confidenza  $FC=1.20$  (valori Medi sia per le Resistenze che per i Moduli Elastici):

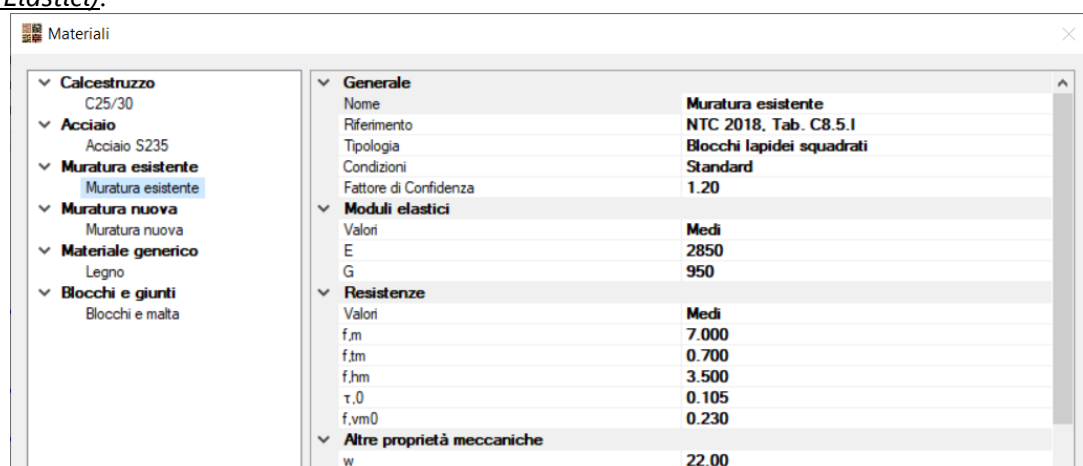


Figura 3-91: Finestra Materiali, caratteristiche del materiale "Blocchi lapidei squadrati"

Nel primo modello relativo al file *"03\_006\_EdificioConArchi\_A.vdml"* le aperture ad arco verranno gestite con la *"Modellazione ad Asta"*.

Invece, nel secondo modello relativo al file *"03\_006\_EdificioConArchi\_B.vdml"* le aperture ad arco verranno gestite con la *"Modellazione a Blocchi"*.

Nel seguito si illustreranno le principali differenze tra le due tipologie di schematizzazione relativamente alle aperture ad arco nell'ambito della modellazione di un edificio con PCM.

Nel Modello Architettonico, dopo aver compiutamente inserito e qualificato le Aperture ad Arco tramite modifica delle proprietà geometriche, è possibile decidere quale tipo di schematizzazione usare in fase strutturale per tale apertura, modificando la proprietà *"Modellazione"*:

- impostando *"Modellazione=Asta"*, la generica apertura ad arco sarà definita attraverso la creazione di una *"Striscia"* avente la forma ad arco così come impostata in architettonico: per default, la verifica a pressoflessione di questi elementi è disattivata;
- impostando *"Modellazione=Blocchi"*, l'arco sarà discretizzato in una serie di blocchi, aventi una *"Lunghezza"* pari a quella specificata nella finestra delle proprietà e Materiale *"Blocchi e Malta"*:

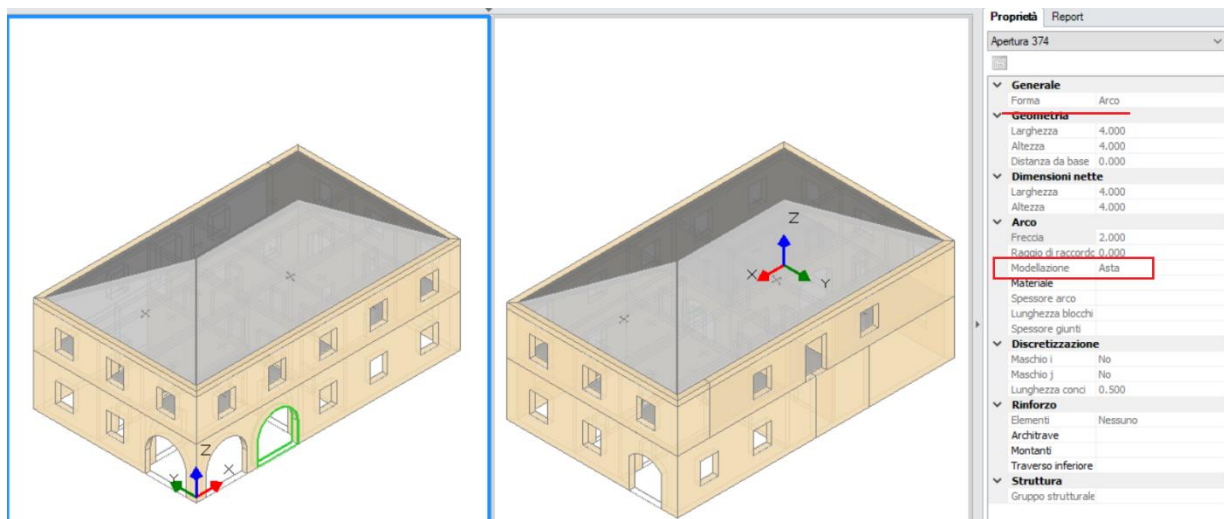


Figura 3-92: Assonometrie Sud-Ovest e Nord-Est dell'edificio – Proprietà archi secondo Modellazione "ad Asta"

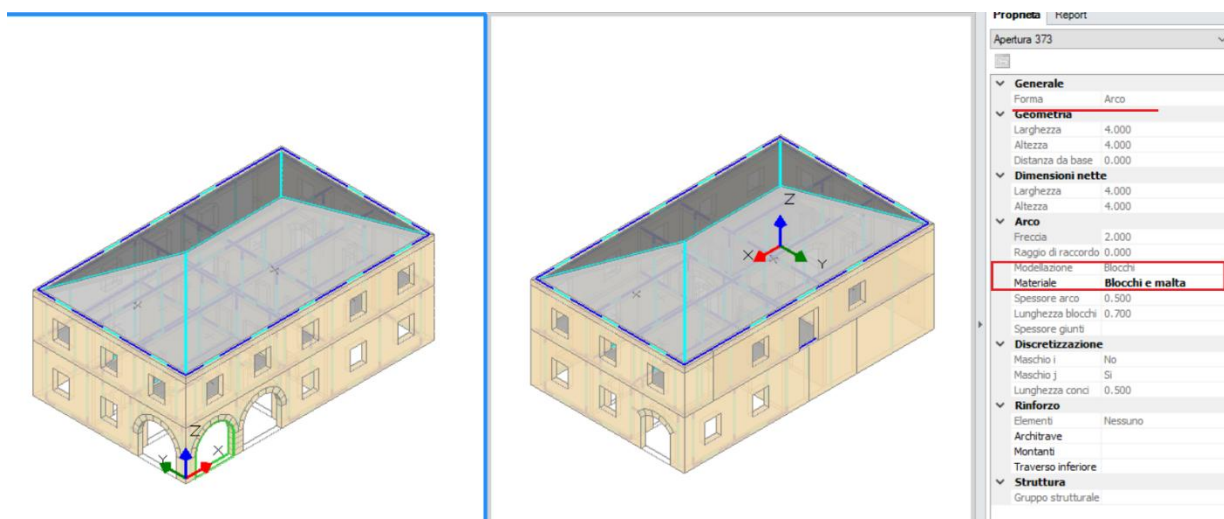


Figura 3-93: Assonometrie Sud-Ovest e Nord-Est dell'edificio – Proprietà archi secondo Modellazione "a Blocchi"

## MODELLAZIONE STRUTTURALE

Generando il successivo modello strutturale, è interessante valutare come si gestiscono gli elementi ad arco nelle due diverse schematizzazioni.

Se l'apertura ad arco è modellata con lo schema "ad asta", l'arco come detto è equiparato ad una striscia muraria, avente la forma dell'apertura ad arco per consentire un corretto calcolo del peso proprio: si può avere conferma di questo visualizzando la struttura "per tipologia" ed attivando la Legenda (F11 da tastiera):

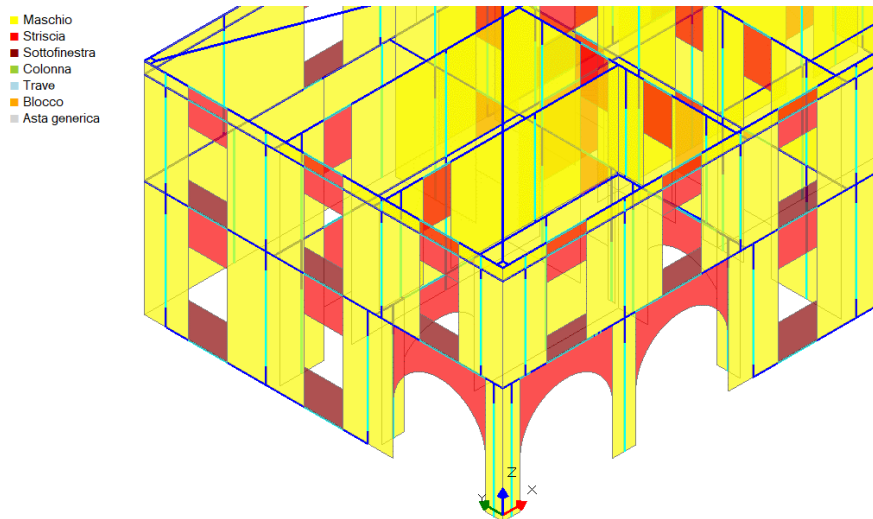


Figura 3-94: Modello Strutturale – Vista per Tipologia - Aperture ad arco con schema "ad Asta"

Adottando invece la modellazione a "Blocchi", ogni arco è discretizzato in Blocchi secondo la Lunghezza definita in architettonico: seguendo la schematizzazione degli archi, ogni Blocco è ulteriormente suddiviso a metà in modo da ottenere il nodo baricentrico dove far confluire i carichi, questo viene quindi ricollegato all'orizzontamento soprastante tramite link rigidi. Si nota inoltre come, in presenza di più archi consecutivi generati nell'ambito di un oggetto Muro, in automatico venga creata una "Colonna" fra i due archi e anche questa venga suddivisa in Conci secondo la stessa discretizzazione impostata per gli archi:

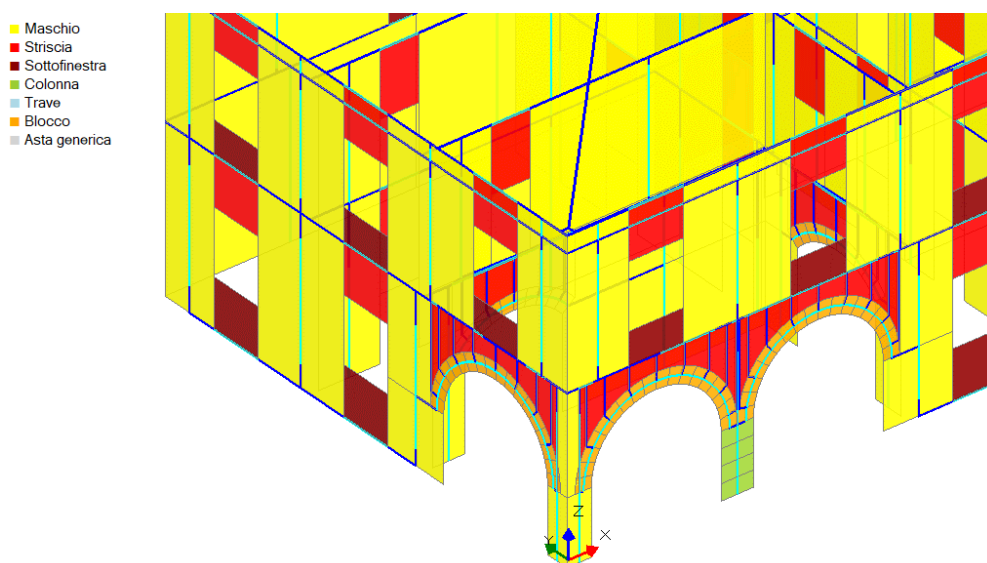


Figura 3-95: Modello Strutturale – Vista per Tipologia - Aperture ad arco con schema "a Blocchi"

Ai Blocchi costituenti gli archi viene assegnato un materiale apposito rinominato come "Blocchi e Malta" dalla finestra Materiali (in tal caso infatti non sono presenti giunti modellati come oggetti specifici tipici dell'apposita schematizzazione alternativa "Blocchi e Giunti"):

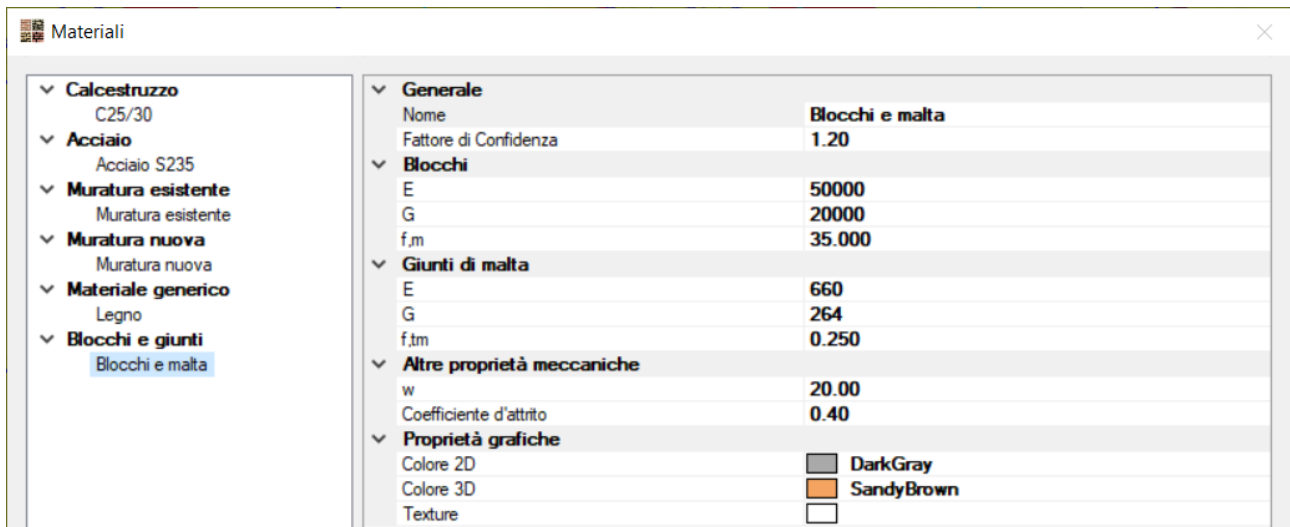


Figura 3-96: Finestra Materiali, caratteristiche del materiale "Blocchi e Malta"

Di seguito si elencano altre scelte di modellazione condotte in ambiente strutturale comuni ad entrambi i modelli:

- 1) Comportamento delle fasce: "Fasce: collaboranti", con vincolo incastro-incastro e minimo valore di resistenza a trazione per simulare la presenza di un cordolo;
- 2) Vincolamento travi di copertura: la trave di colmo viene considerata "Infinitamente rigida", mentre i puntoni diagonali come "Cerniera-Incastro" (in base al nodo iniziale e/o finale sulla muratura perimetrale);
- 3) Maschi tozzi di sottotetto: esclusi dalle verifiche;
- 4) Rigidità degli elementi: in condizioni di Rigidità Fessurata;
- 5) Livelli: Non Rigidi.

## RISULTATI DELLE ANALISI

Dopo aver richiesto l'esecuzione delle Analisi dal relativo comando **"Esegui Analisi"**, si consultano i risultati ottenuti:

- per il Modello con archi ad "Asta", in Analisi Modale il modo principale in Y ha un periodo di circa 0.276 sec con una massa partecipante di circa il 93%, mentre il modo principale in X ha un periodo di circa 0.202 sec e una massa partecipante di circa il 72%. Emerge quindi come la struttura sia più flessibile lungo Y, caratteristica dovuta alla minor dimensione proprio lungo Y:

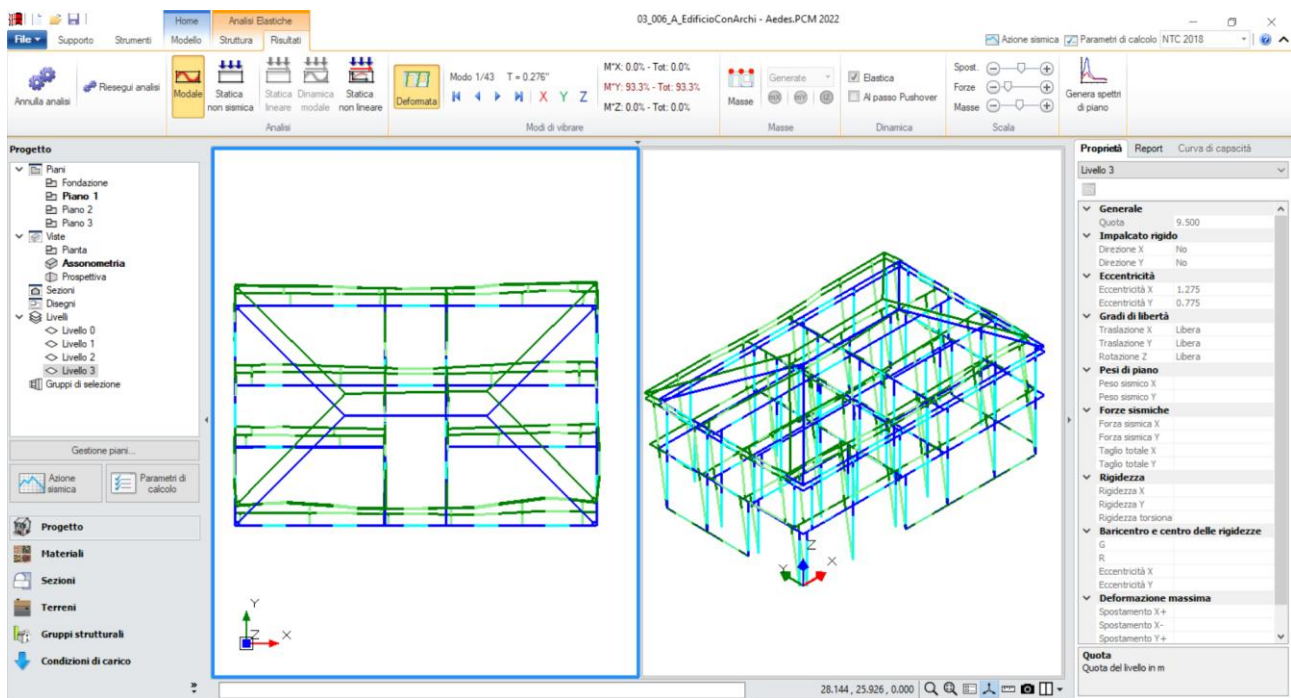


Figura 3-97: Modello con Archi "ad asta": Modo principale in Y: Periodo 0.276 sec e Massa Partecipante 93%

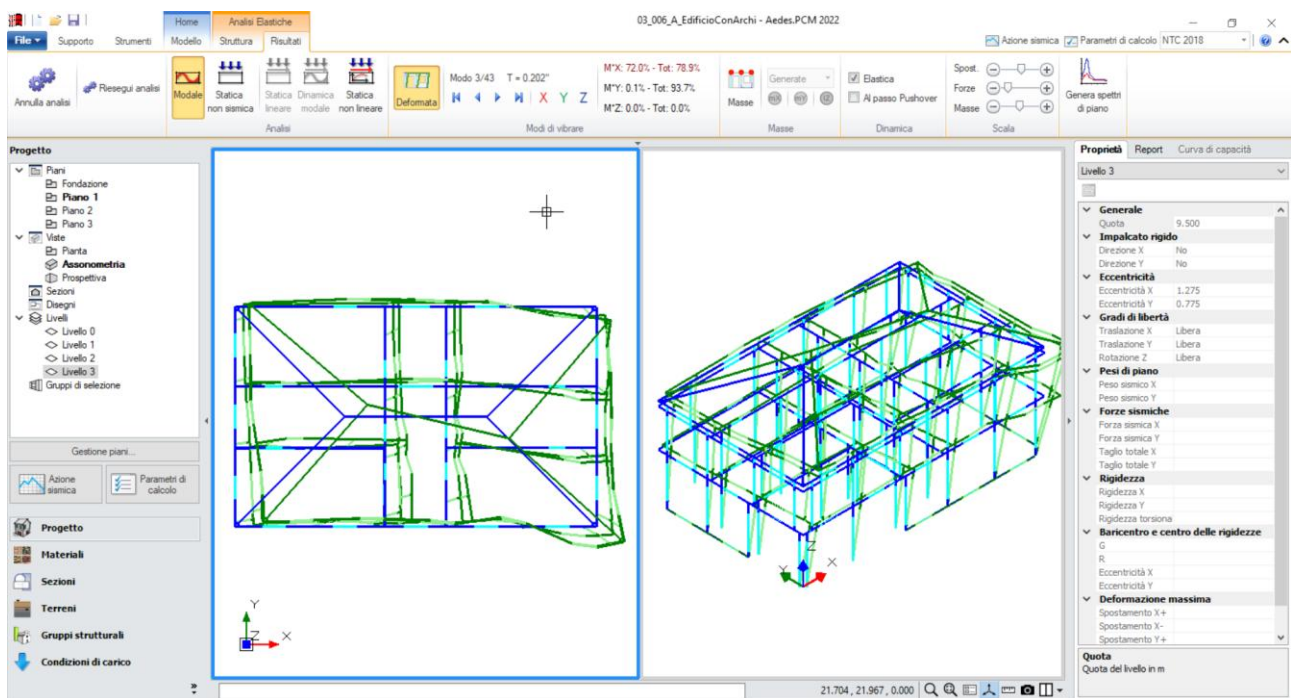


Figura 3-98: Modello con Archi "ad asta": Modo principale in X: Periodo 0.202 sec e Massa Partecipante 72%

Passando ai risultati della modellazione "a Blocchi", si nota come non vi siano grosse differenze: già a partire dall'Analisi Modale, il modo principale in Y ha un periodo di circa 0.259 sec con una massa partecipante di circa il 92%, mentre il modo principale in X ha un periodo di circa 0.190 sec e una massa partecipante di circa il 77%:

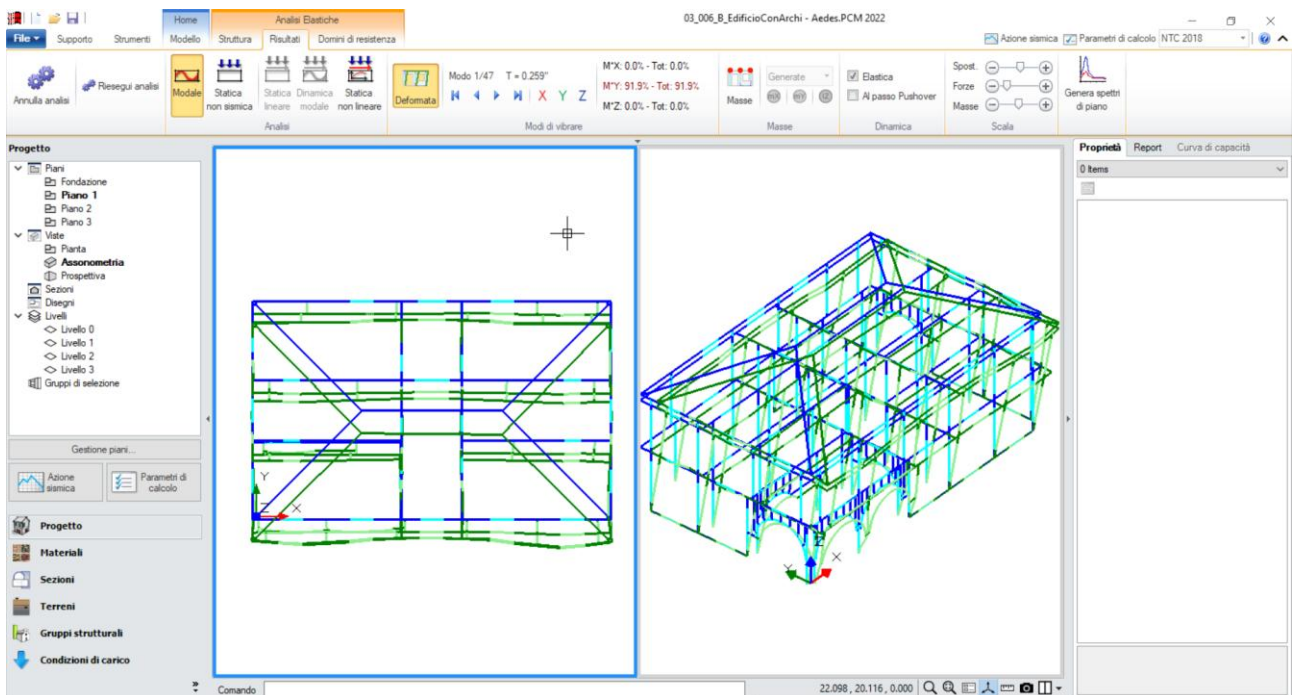


Figura 3-99: Modello con Archi "a Blocchi": Modo principale in Y: Periodo 0.259 sec e Massa Partecipante 92%

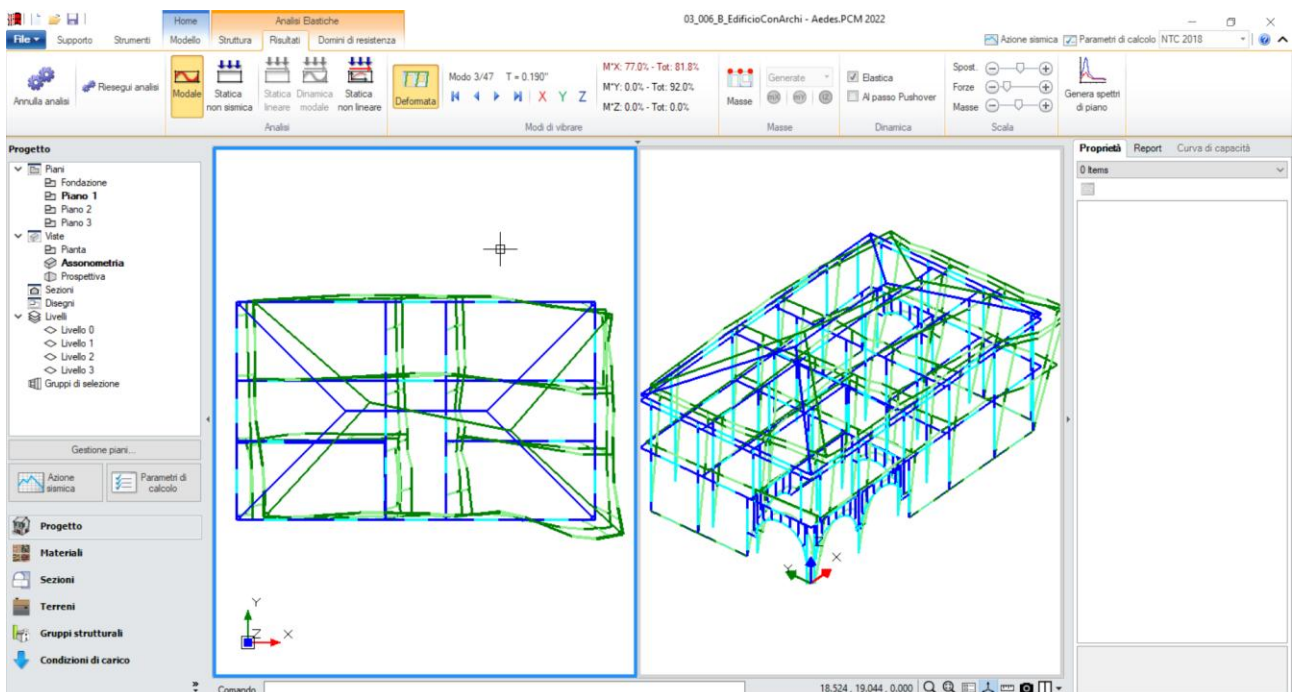


Figura 3-100: Modello con Archi "a Blocchi": Modo principale in X: Periodo 0.190 sec e Massa Partecipante 77%

In Analisi Pushover, è utile visualizzare l'insieme del fascio di curve calcolate, in modo da avere un'idea dei tagli massimi raggiunti nelle due direzioni e dell'entità degli spostamenti registrati all'ultimo passo SLU, saranno infatti queste informazioni a poter essere utili nel confronto tra le due diverse schematizzazioni degli archi:

- nel caso di Modellazione ad "Asta", come ci si aspettava in base alla diversa conformazione della struttura tra X e Y, si evidenzia intanto una netta differenza in termini di taglio massimo tra le due direzioni (X in rosso, pari a circa 5000kN in media; Y in verde, pari a circa 3000kN). Lo spostamento in condizioni SLU per le curve in X è di circa 15mm, mentre per le curve in Y è pari a circa 22.5mm:

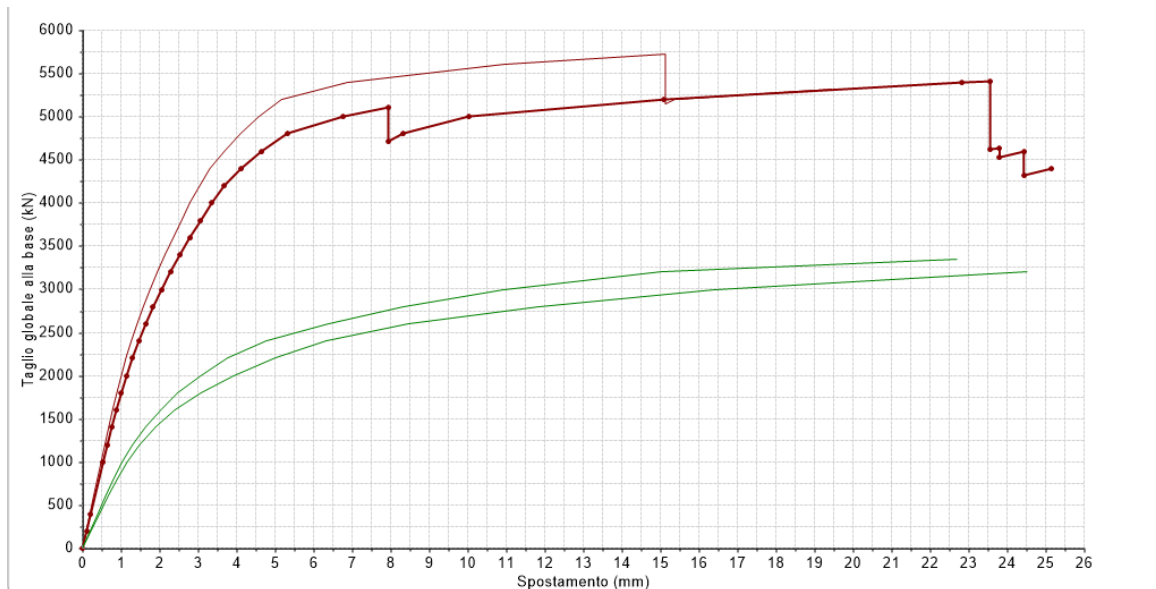


Figura 3-101: Analisi Pushover, fascio di curve calcolate per Modello con Archi "ad Asta"

- nel caso di Modellazione a "Blocchi", si nota un lieve incremento del Taglio Massimo e degli spostamenti in condizioni di SLU, gli ordini di grandezza comunque sono simili:

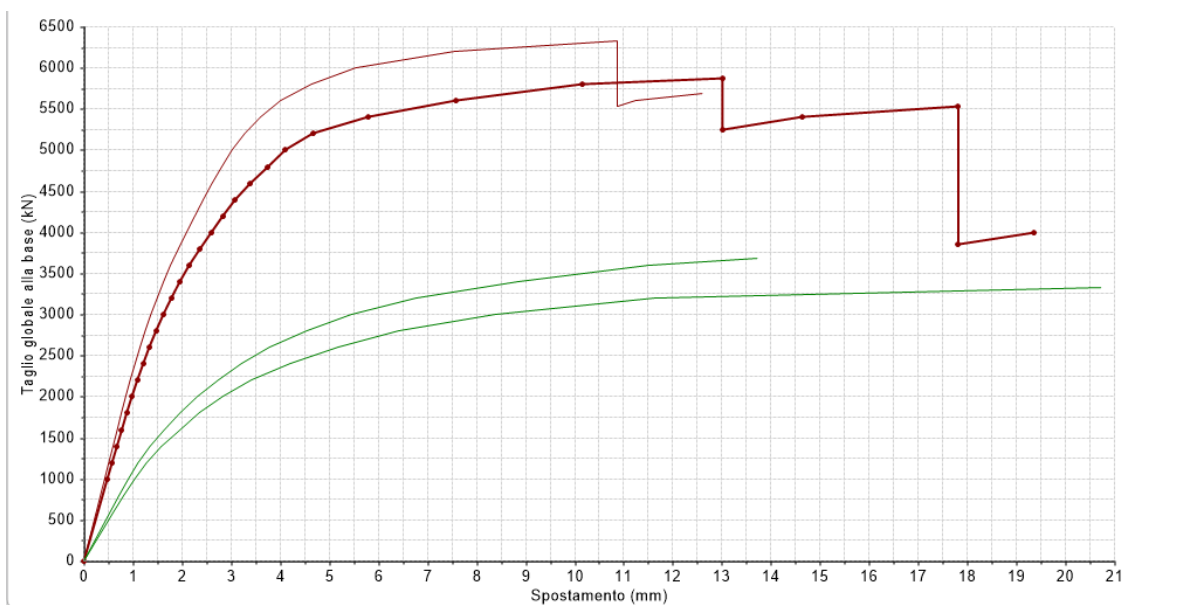


Figura 3-102: Analisi Pushover, fascio di curve calcolate per Modello con Archi "a Blocchi"

In termini di Indicatori di Rischio, il modello "a Blocchi" risulta più cautelativo fornendo minori Indicatori di Rischio per qualche curva:

Modello con archi "ad asta"											
N°curva	Corrente	Vista	Distr.	Direz.	Direz.2	Mt	Ez	Control	$\zeta,PGA(SLV)$	$\zeta,TR(SLV)$	VN,CLV
4	○	☑	E	+Y'				L2	1.018	1.055	53
2	○	☑	A	+Y'				L2	1.123	1.434	72
1	●	☑	A	+X'				L2	1.526	5.211	261
3	○	☑	E	+X'				L2	1.526	5.211	261

Modello con archi "a Blocchi"											
N°curva	Corrente	Vista	Distr.	Direz.	Direz.2	Mt	Ez	Control	$\zeta,PGA(SLV)$	$\zeta,TR(SLV)$	VN,CLV
4	○	☑	E	+Y'				L2	0.846	0.621	31
2	○	☑	A	+Y'				L2	1.057	1.192	60
1	●	☑	A	+X'				L2	1.526	5.211	261
3	○	☑	E	+X'				L2	1.526	5.211	261

Figura 3-103: Analisi Pushover, confronto fra i modelli in termini di Indicatori di Rischio

Emerge quindi come, a livello di risultati globali, i due modelli possano considerarsi equivalenti: il modello con archi "a Blocchi" aggiunge tuttavia qualche dettaglio maggiore sull'effettiva costituzione degli archi, considerando, attraverso la gestione dei Blocchi, una spinta alle imposte più aderente alla realtà, e di poter eventualmente osservare l'andamento della curva delle pressioni in corrispondenza soprattutto delle colonne d'imposta consentendo, qualora effettivamente in fase di analisi si notassero concetti non verificati, di tenerne conto applicando gli svincolamenti necessari:

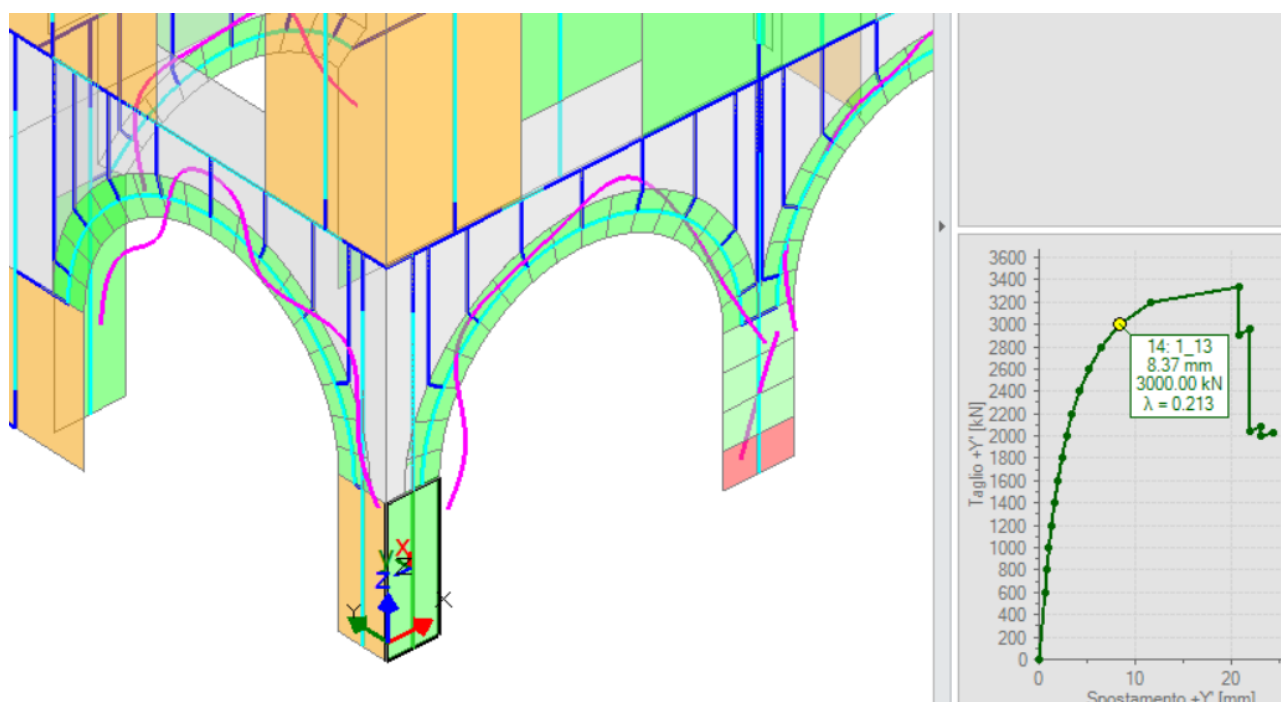


Figura 3-104: Pushover, Modello "a Blocchi", Curva delle Pressioni fuori dal concio di base colonna centrale

Risulta quindi apprezzabile il comportamento degli archi anche tramite la sola modellazione "a Blocchi" che, nell'ambito di edifici spesso parecchi complessi, semplifica la gestione consentendo di considerare un numero di aste molto ridotto rispetto a modellazioni più raffinate come quelle a "Blocchi e Giunti", alle quali si potrà ricorrere per approfondimenti su singoli archi, qualora si voglia indagare meglio sul loro meccanismo di collasso e relativo moltiplicatore dei carichi effettivo.

## 03\_007\_CostruzioneRurale

### File di riferimento:

03\_007\_CostruzioneRurale\_A (ex 701)

03\_007\_CostruzioneRurale\_B (ex 702)

### Parole chiave:

- MODELLAZIONE COLONNE
- COLONNE RINFORZATE CON FRP

### Canale YouTube AEDES:

ECS Colonne Muratura

<https://www.youtube.com/watch?v=xQRXJrVx6tE&t=57s>

## MODELLAZIONE ARCHITETTONICA

In questo capitolo si riprende la modellazione di un fienile in muratura composto da pareti e pilastri già utilizzato come esempio al §2.10 della seconda parte del presente Manuale". Nell'ambito delle strutture storiche e monumentali quali le Colonne in Muratura da analizzare con ECS, ci si concentrerà in questa fase maggiormente sui risultati delle colonne e sui loro rinforzi.

Il fienile analizzato è una struttura ad un piano, composto da 9 pilastri e 4 pareti, con copertura a due falde (altezza di gronda 4.00m e altezza di colmo 5.50m).

Sia le pareti che le Colonne sono costruite in "Mattoni pieni e malta di calce", adottando un LC2, da cui un  $FC=1.20$  (valori medi sia per le resistenze, che per i Moduli Elastici).

Le falde inclinate sono costruite con struttura in legno, per la quale si ipotizza di non considerare elementi diagonali atti a simularne una rigidezza.

Per i solai di copertura, si suppone di considerare  $2.00 \text{ kN/m}^2$  per i Permanenti Strutturali,  $1 \text{ kN/m}^2$  per i Permanenti Non Strutturali, e  $0.8 \text{ kN/m}^2$  per i Variabili ("Cat.Neve");

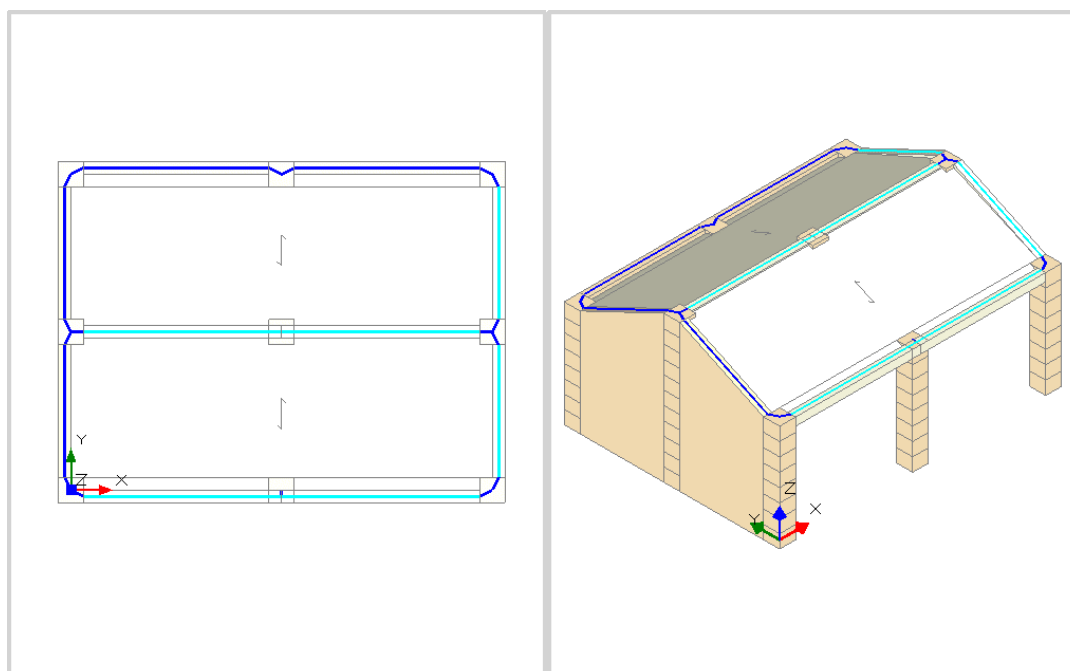


Figura 3-105: Costruzione Rurale in Muratura: Vista in Pianta e in Assonometria

## MODELLAZIONE STRUTTURALE

L'elemento Colonna in muratura (in presenza del Modulo "ECS" attivo) va considerato suddiviso in conci già a partire dal Modello Architettonico: in questo caso, si considera attiva la suddivisione in conci da 50cm. In ambiente strutturale, attivando quindi la vista per "Tipologia", si potranno notare le colonne (in verde) suddivise in singoli conci secondo quanto definito:

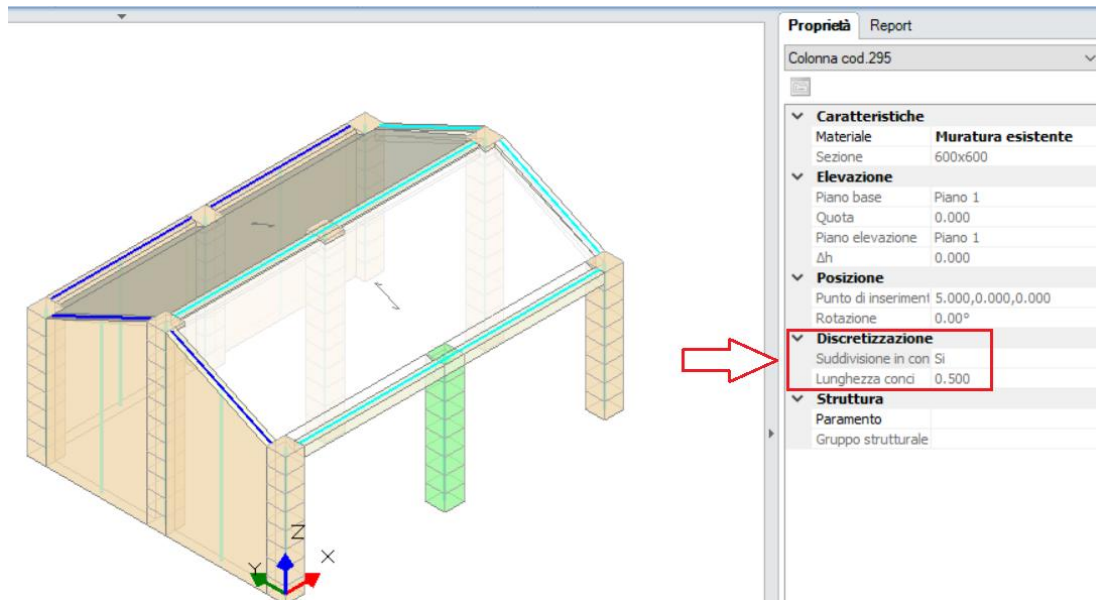


Figura 3-106: Costruzione Rurale in Muratura: Discretizzazione delle Colonne in Muratura

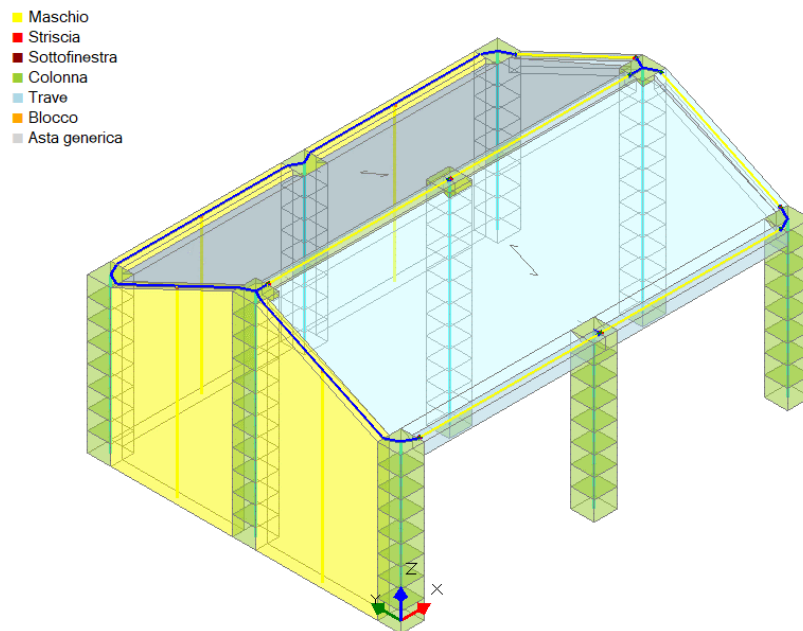


Figura 3-107: Costruzione Rurale in Muratura: Modello Strutturale, vista per Tipologia

Le travi in legno si considerano vincolate come "Cerniera-Cerniera" per simulare un vincolo di appoggio ad entrambi gli estremi.

Per quanto riguarda le colonne intervallate alle pareti, possono essere percorse due strade:

- 1) Non si considerano resistenti al sisma le Colonne: in tal caso, la resistenza al sisma è affidata alle pareti contigue in muratura, si dovranno quindi selezionare i nodi iniziale e finale delle colonne ed impostare il vincolo di Cerniera per poterle considerare bielle, successivamente escludendole dalle verifiche;
- 2) Si considerano resistenti al sisma le Colonne: in questa configurazione, è verosimile ritenere che i maschi murari adiacenti non risultino collaboranti nei confronti dei carichi verticali. Per ottenere questa schematizzazione, si selezionano quindi le pareti e si libera in sommità la prima componente di vincolo lungo X locale (codice 100000 nel nodo finale): in questo modo, i maschi murari non sono soggetti a carichi gravitazionali da solai, i quali confluiranno interamente verso le colonne:

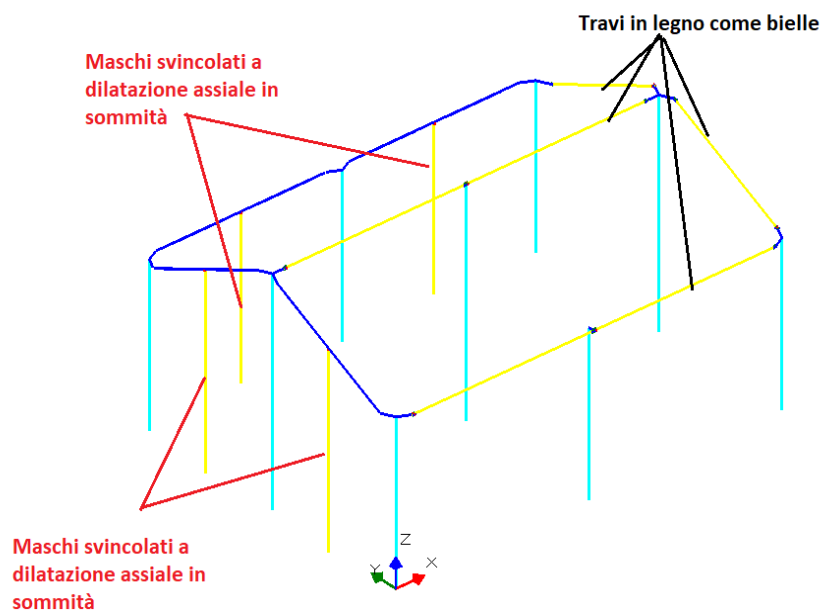


Figura 3-108: Costruzione Rurale in Muratura: Modello Strutturale, vista per Vincolamenti

La verifica dei singoli Conci delle colonne a pressoflessione può essere "con controllo di resistenza" oppure "con controllo geometrico": nel primo caso, la verifica è condotta in termini di Dominio di Resistenza, controllando che i punti di sollecitazione siano interni o esterni al Dominio di Resistenza (che è spaziale, 3D); nel secondo caso, la verifica è legata alla posizione della curva delle pressioni, e consisterà nel controllare se questa risulti interna o esterna alla sezione della colonna.

In questo caso, si decide di eseguire la verifica dei conci "con controllo di resistenza", inoltre per concentrarsi più sui risultati da pressoflessione si disattiva contestualmente la verifica a Taglio. Per impostare queste scelte su tutti i conci, risulta utile il comando "Trova", filtrando per tipologia "Concio" ed infine modificandone le proprietà sulla destra:

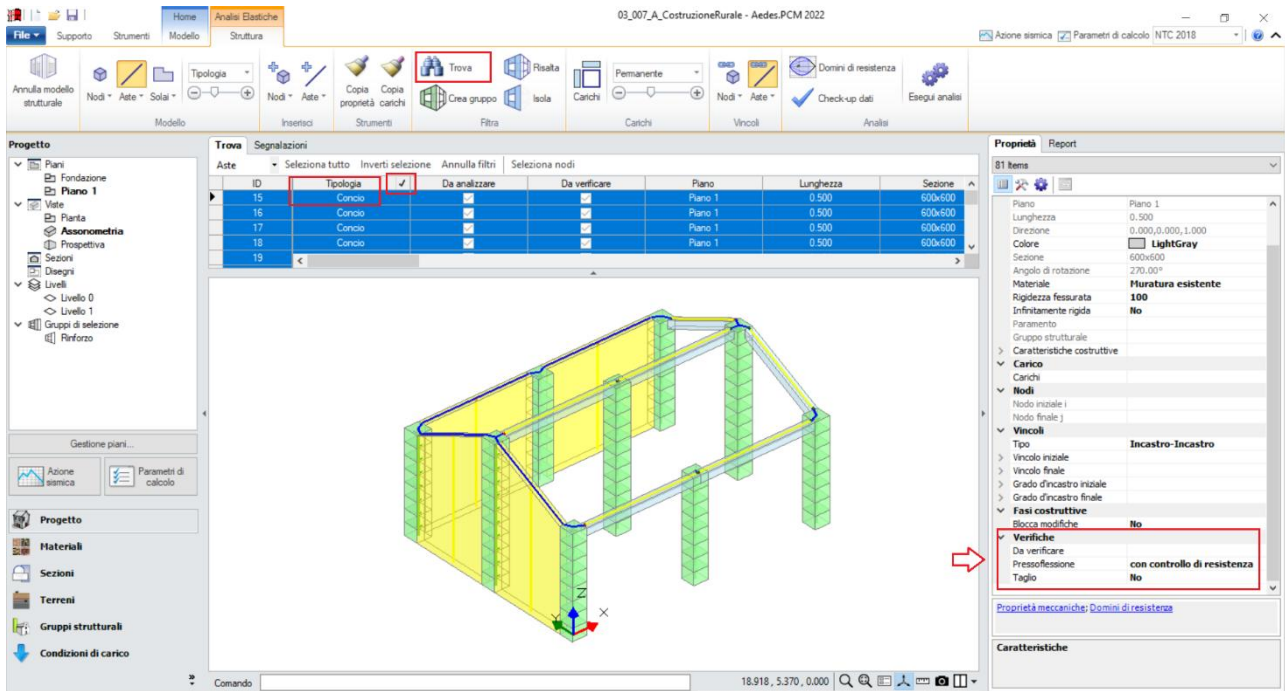


Figura 3-109: Costruzione Rurale in Muratura: Modello Strutturale, gestione Verifiche dei conci

Si decide inoltre di non condurre verifiche su tutti i conci di sommità delle colonne, ritenendo che la sovrapposizione con gli appoggi delle travi in legno e con le zone rigide delle murature sia sufficiente ad impedire crisi locali:

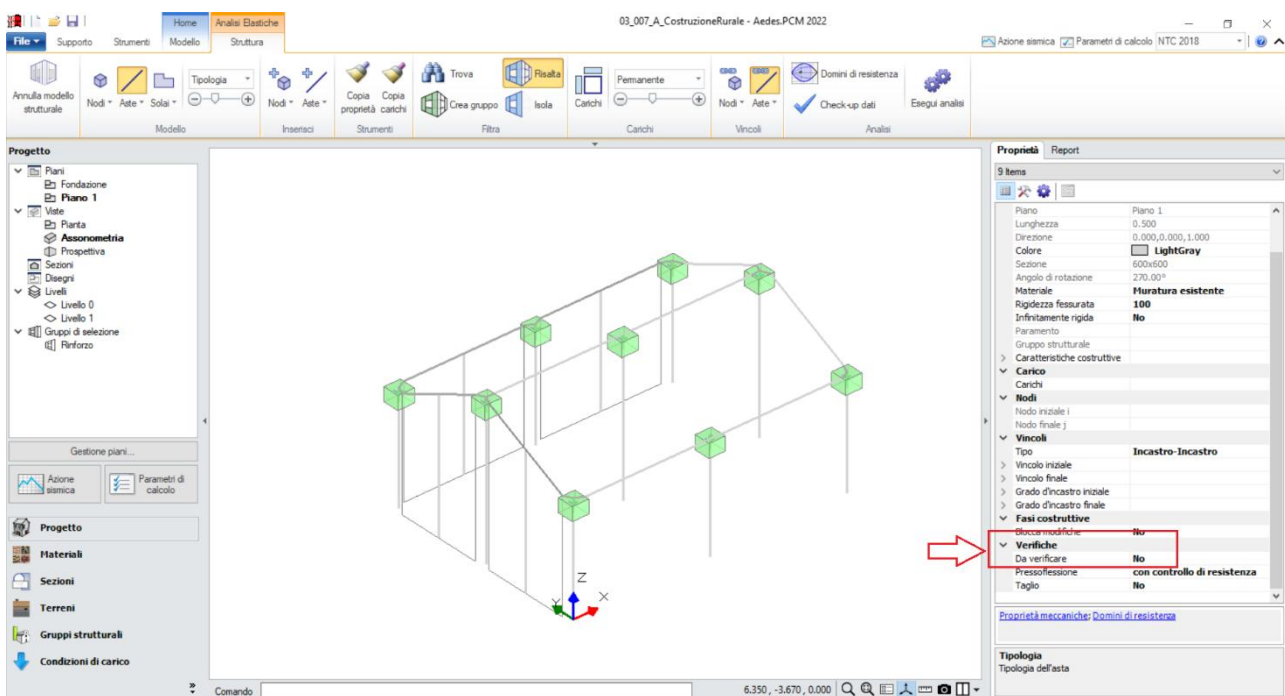


Figura 3-110: Costruzione Rurale in Muratura: Modello Strutturale, esclusione verifiche sui conci in sommità

## RISULTATI DELLE ANALISI

Dai risultati dell'Analisi Statica Non Sismica, tutti gli elementi sono verificati (si nota inoltre come la curva delle pressioni sia interna alla sezione, la verifica sarebbe quindi soddisfatta anche se si adottasse il criterio di verifica in base al "controllo geometrico").

Selezionando un generico concio, in basso a destra della finestra delle proprietà si può cliccare sul comando "Domini di resistenza", che riporta all'ambiente dedicato ai domini di resistenza, nello specifico visualizzando il dominio del concio selezionato:

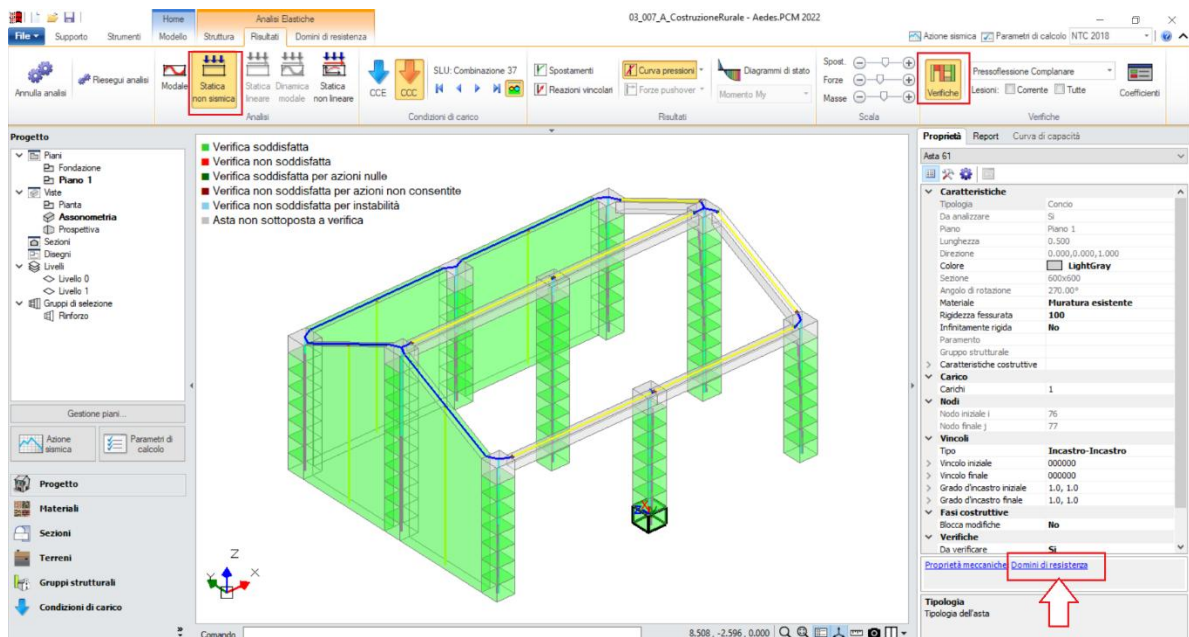


Figura 3-111: Costruzione Rurale in Muratura: Analisi Statica, Verifiche soddisfatte

Il dominio di resistenza, trattandosi di una Colonna, è tridimensionale e può essere ruotato con la combinazione Alt+Tasto SN del mouse; oppure, tramite apposite funzioni poste nella barra dei comandi orizzontale, si possono vedere in sezione diversi piani Sforzo Normale-Momento:



Figura 3-112: Costruzione Rurale in Muratura: Analisi Statica, Consultazione Dominio di Resistenza

Ad esempio, passando ad una vista "dall'alto" (piano N-My) si può notare come il dominio di resistenza di sviluppi nel semispazio caratterizzato da valori di sforzo normale in compressione (positivi): la sezione infatti non è resistente a trazione. Avendo attivato anche il pulsante per la vista delle "Sollecitazioni", nel dominio vengono indicate le coppie di punti N-M rappresentative delle sollecitazioni: per il concio preso come esempio, si notano quattro punti:

- due punti "in verde", che indicano la completa verifica in quanto ricadono "all'interno" del dominio spaziale;
- due punti "in blu", che indicano i punti in corrispondenza della frontiera a parità di sforzo normale.

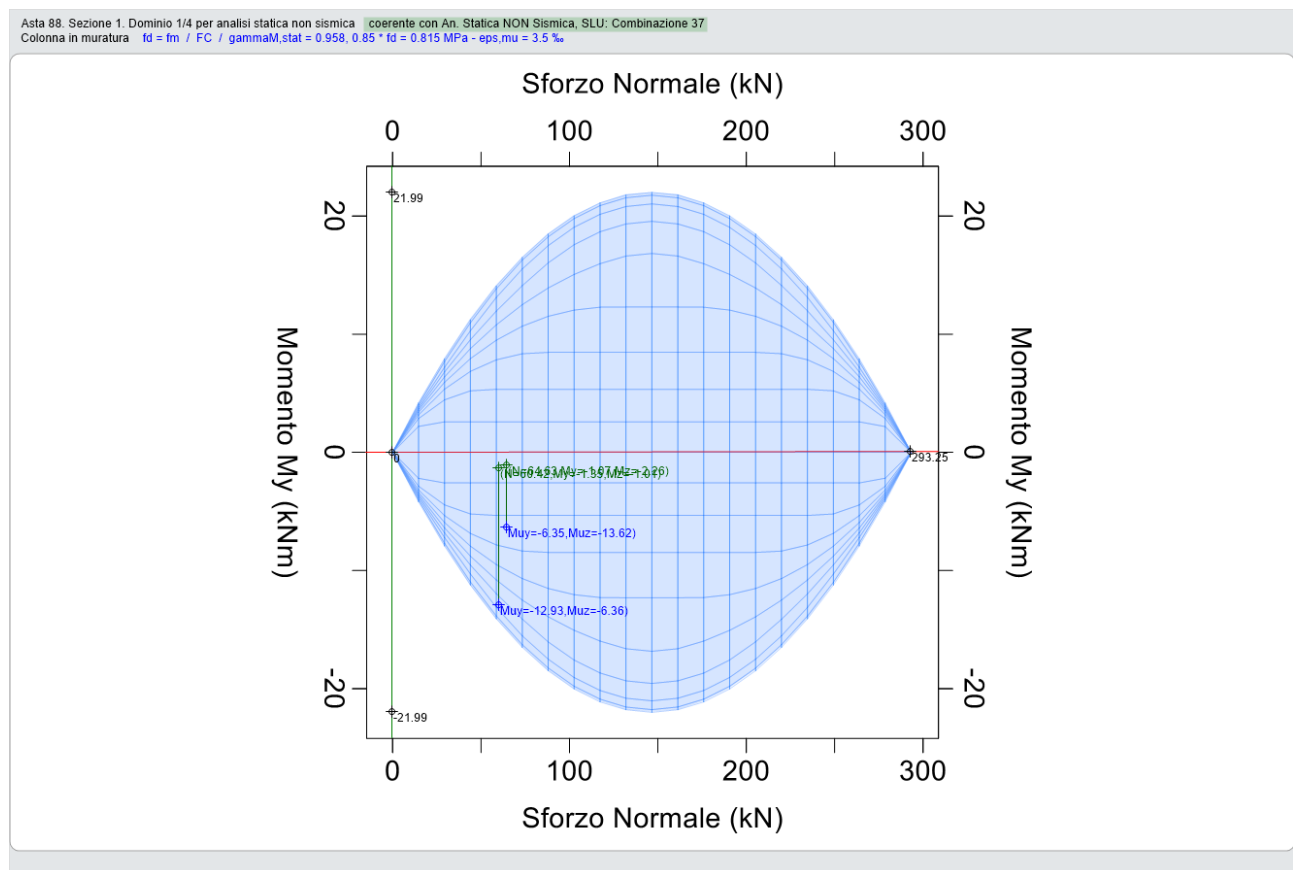


Figura 3-113: Costruzione Rurale in Muratura: Analisi Statica, Consultazione Dominio Resistenza – Piano N-My

In Analisi Pushover, già visualizzando l'andamento di tutto il fascio di curve calcolate, ci si può rendere conto del raggiungimento di un livello di sicurezza molto basso; le curve infatti si arrestano dopo pochi mm di spostamento, a seguito del quale la struttura diventa labile.

Tale comportamento è espresso anche in termini di Indicatori di Rischio:

N° curva	Corrente	Vista	Distr.	Direz.	Direz.2	Mt	Ez	Control	$\zeta_{PG\dot{A}}(SLV)$	$\zeta_{TR}(SLV)$	VN,CLV
2	●	☑	A	+Y'				L1	0.270	0.034	2
4	●	☑	E	+Y'				L1	0.317	0.051	3
3	●	☑	E	+X'				L1	0.365	0.069	4
1	●	☑	A	+X'				L1	0.516	0.166	8

Figura 3-114: Costruzione Rurale in Muratura: Pushover, Sintesi degli Indicatori di Rischio

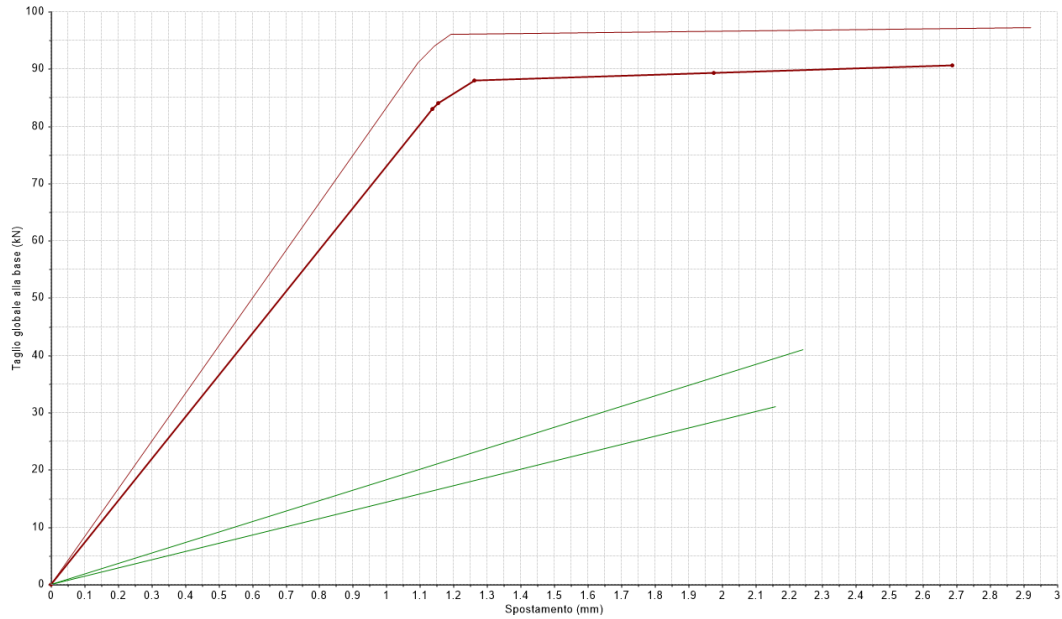


Figura 3-115: Costruzione Rurale in Muratura: Pushover, Fascio di curve calcolato

Osservando la configurazione delle verifiche al passo finale per le curve peggiori nelle due direzioni, si può valutare quali siano gli elementi in crisi:

- per la curva A +X, tre conci di base delle colonne collassano per pressoflessione:

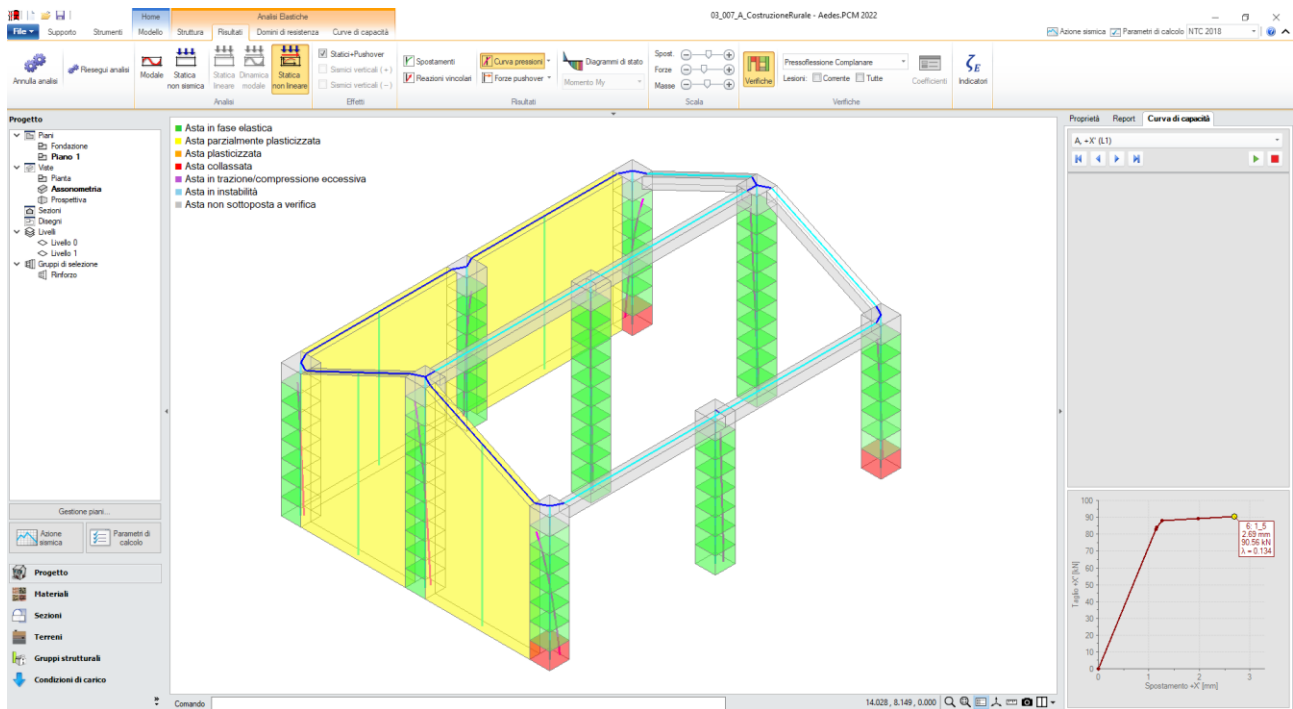


Figura 3-116: Costruzione Rurale in Muratura: Pushover, Verifiche al passo, Curva A +X

- per la curva A +Y invece viene segnalata una crisi per il concio di base della colonna centrale:

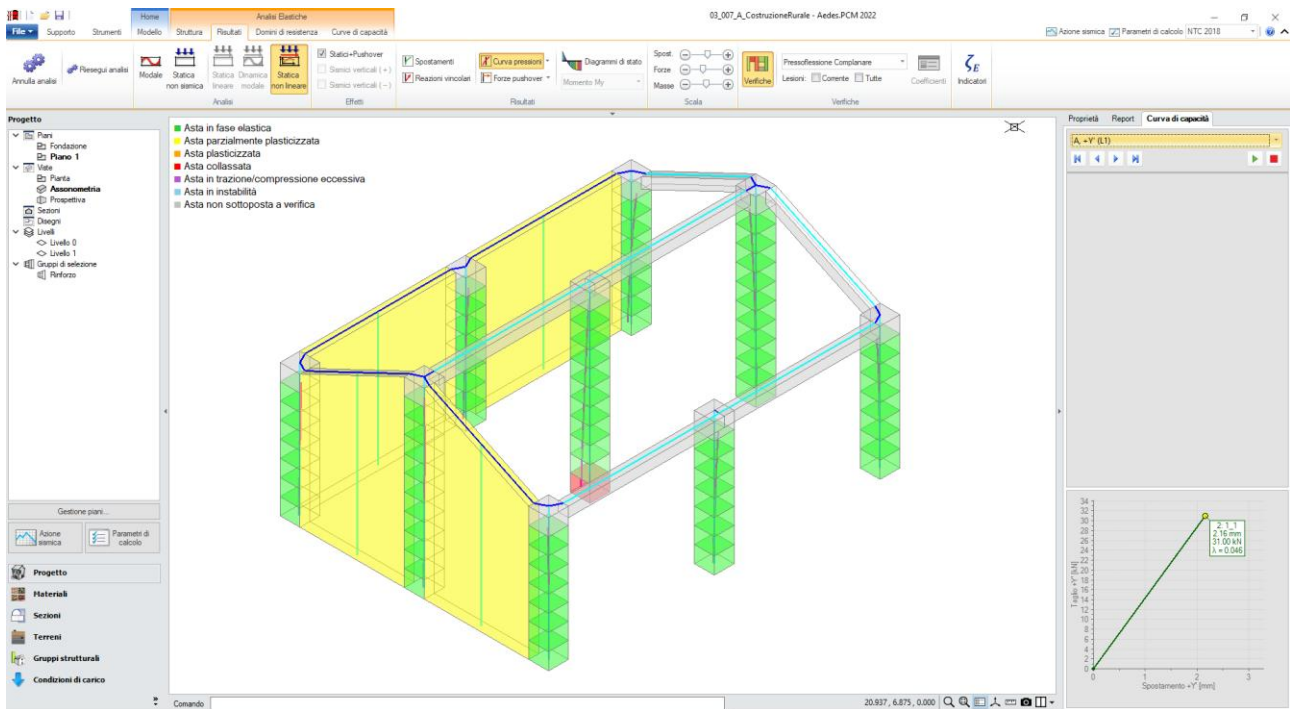


Figura 3-117: Costruzione Rurale in Muratura: Pushover, Verifiche al passo, Curva A +Y

Con riferimento ad es. alla curva A+X, conducendo uno zoom sulla zona del concio di base più esterno (il n.88 analizzato in precedenza), è interessante notare che la curva delle pressioni è ancora interna alla sezione, tuttavia il concio risulta collassato (anche da quanto indicato nella finestra delle proprietà) in quanto per la verifica è stato scelto l'altro criterio alternativo "con controllo di resistenza"; selezionando tale concio e visualizzando il suo dominio di resistenza, si nota come, al progredire dell'incremento di taglio nell'analisi, le sollecitazioni si avvicinino sempre più alla frontiera fino poi ad oltrepassarla (coppie di sollecitazioni N-M indicate in rosso):

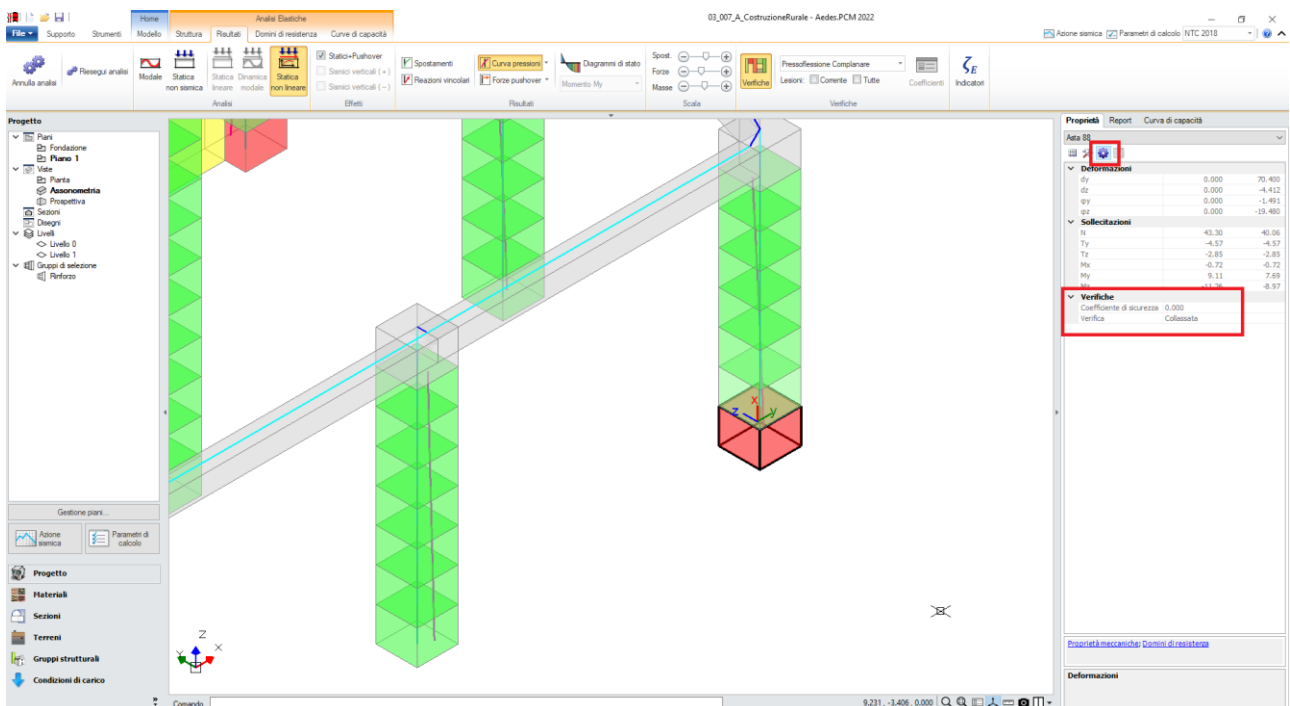


Figura 3-118: Costruzione Rurale in Muratura: Pushover, Zoom su concio n.88, Curva A +X all'ultimo passo

Nel piano N-My è possibile notare infatti la progressione delle sollecitazioni ai diversi passi dell'analisi Pushover: l'ultimo punto in rosso potrebbe ingannare in quanto "apparentemente" interno al dominio, tuttavia è da ricordare che il dominio è tridimensionale, quindi vuol dire che fuoriesce dalla frontiera nella parte di dominio non visualizzata in 2D. In questi casi, per confermare la correttezza si consiglia di ruotare il dominio con il comando Orbita 3D (Alt+tasto SN del mouse):

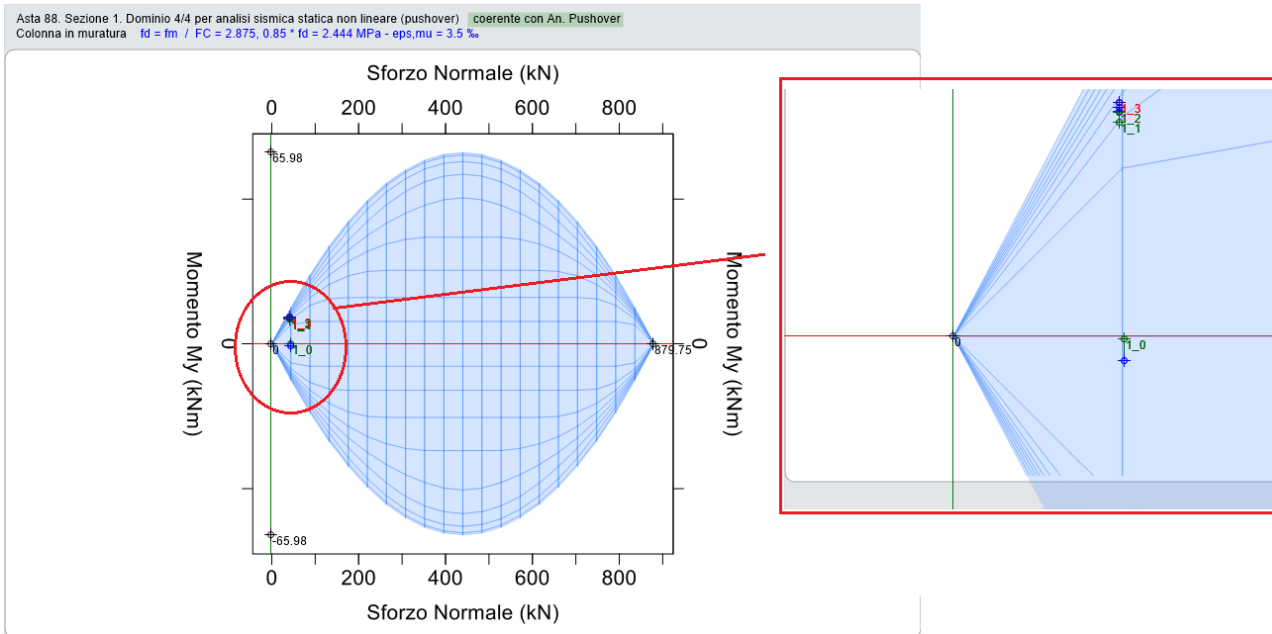


Figura 3-119: Costruzione Rurale in Muratura: Pushover, Dominio per concio n.88, Curva A +X

Si ipotizza adesso di voler rinforzare la struttura con opportuni interventi in grado di migliorarne la risposta (file "03\_007 CostruzioneRurale B.vdml"). In tale configurazione, si progetta un intervento di "Cerchiatura" tramite fibre in FRP.

Le caratteristiche generali del sistema di rinforzo con FRP in PCM si impostano nei "Parametri di Calcolo", scheda "Interventi": qui è possibile inserire i dati reperibili tipicamente dalle schede tecniche del produttore:

**Parametri di Calcolo**

OK Annulla Reimposta Importa

Generale Sismica Modale Muratura Valutazione Verifiche Pushover (1) Pushover (2) Muratura armata Calcestruzzo armato **Interventi**

**Rinforzi a Taglio**

**FRP**

Composito FRP: modello elastico lineare fino a rottura (tensioni in N/mm<sup>2</sup>, deformazioni in ‰)

Tipo di applicazione [LG 2009, §2.4.1]:  A  B = Coefficienti parziali [DT200, §3.4.1]: SLU del materiale FRP:  $\gamma_f =$   distacco dal supporto:  $\gamma_{fd} =$

Modulo di elasticità normale nella direzione delle fibre  $E_f =$   Deformazione caratteristica a rottura per trazione  $\epsilon_{fk} =$

Fattore di conversione ambientale  $\eta_a$  [DT200, §3.5.1] =  = Deformazione di calcolo a rottura per trazione ( $\eta_a \epsilon_{fk} / \gamma_f$ ) = 15.11

Spessore del singolo nastro  $t_f$  (mm) =

---

**Per strutture in muratura**

Raggio di curvatura degli spigoli R (mm) =  Angolo d'attrito dei corsi di malta  $\phi$  [DT200, §5.4.1.2.2] (\*) =

**FRCM**

**CAM**

**Reticolatus**

**Acciaio per rinforzo pilastri**

Figura 3-120: "Parametri di Calcolo", scheda "Interventi", "FRP"

Mentre le altre informazioni riguardanti le caratteristiche geometriche del rinforzo ai fini della loro disposizione lungo le colonne vengono impostate all'interno della finestra "Interventi", dopo aver selezionato le colonne oggetto di rinforzo ed attivato dalla proprietà "Altri Interventi", "FRP": in questo caso, si adottano nastri con larghezza=100mm, disponendo due nastri "longitudinali" sia nel piano "xz" (complanare) che nel piano "xy" (ortogonale), accompagnati da uno strato di nastri "trasversali" con passo di 500mm.

Questa configurazione consente di "fasciare" tutta la colonna, in modo tale che tutti gli spigoli siano rinforzati (dai nastri longitudinali) e che venga disposta una fasciatura anche in mezzeria ad ogni concio (a causa del passo dei nastri trasversali).

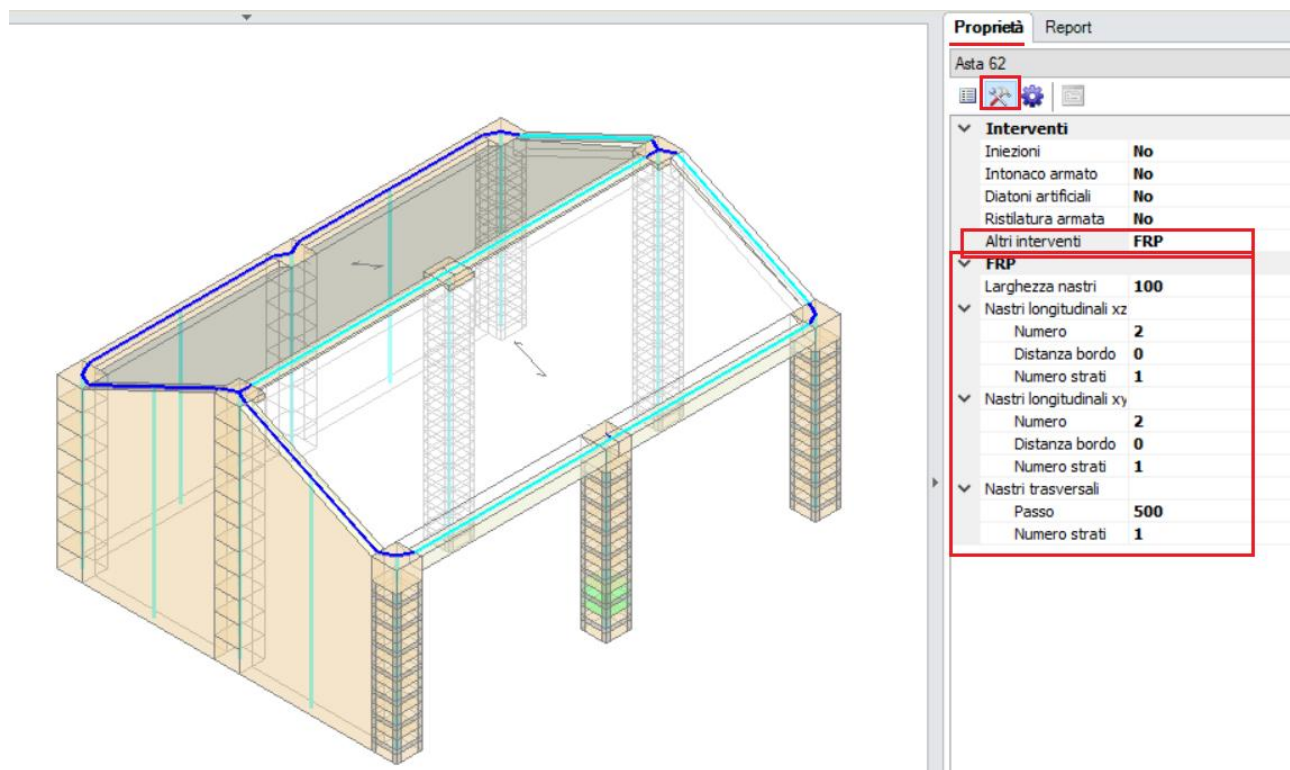


Figura 3-121: Applicazione di rinforzi FRP alle Colonne dalla finestra "Interventi"

In sostanza, questo intervento di rinforzo aumenta la resistenza della muratura a causa dell'incremento della pressione di confinamento efficace, determinata secondo le formulazioni previste nelle norme CNR DT200\_R1\_2013 e altre similari.

Si può avere conferma della validità dell'intervento generando i Domini di Resistenza, funzione richiedibile anche prima di eseguire le analisi: si noti che, qualora l'intervento di rinforzo avesse previsto solo i "Nastri trasversali" in FRP, l'incremento offerto dal dominio di resistenza avrebbe comportato solo un'espansione verso le zone di "alta compressione"; in questo caso invece le sollecitazioni maggiori ricadono nella zona più "a sinistra del diagramma" ovvero con compressione bassa: questo indica che, per avere un'espansione anche verso la zona degli sforzi normali di trazione, è necessario abbinare sia nastri trasversali che longitudinali.

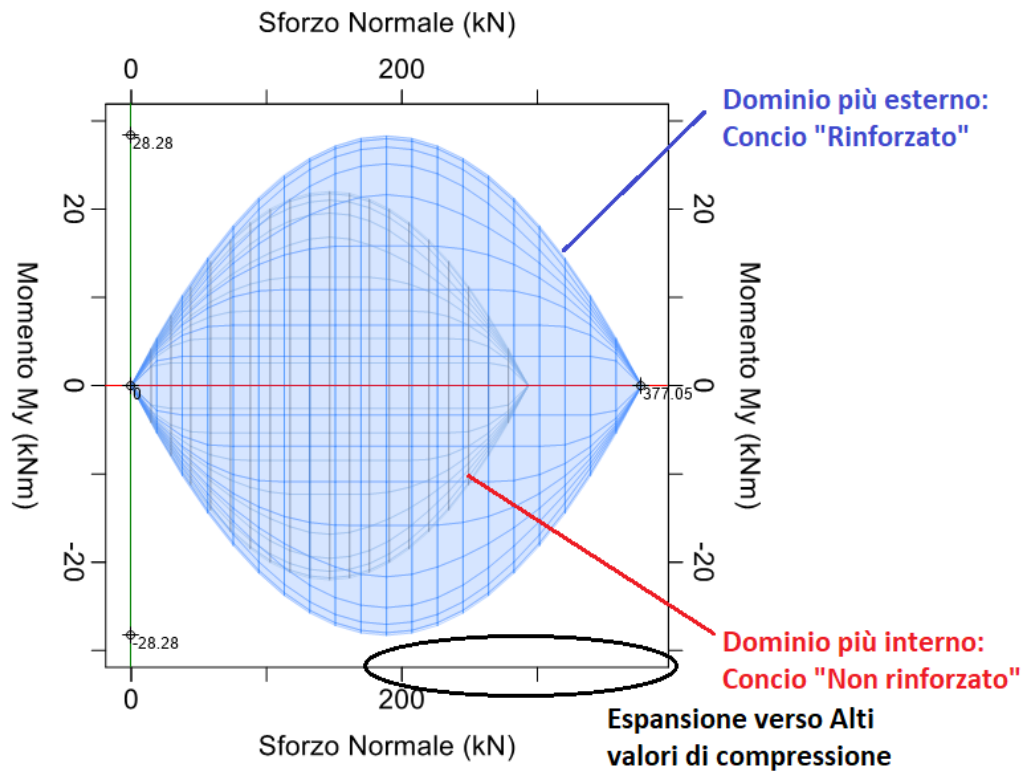


Figura 3-122: Costruzione Rurale in Muratura, con Rinforzi FRP: Pushover, Dominio per concio n.88, Curva A +X (Rinforzi FRP solo trasversali)

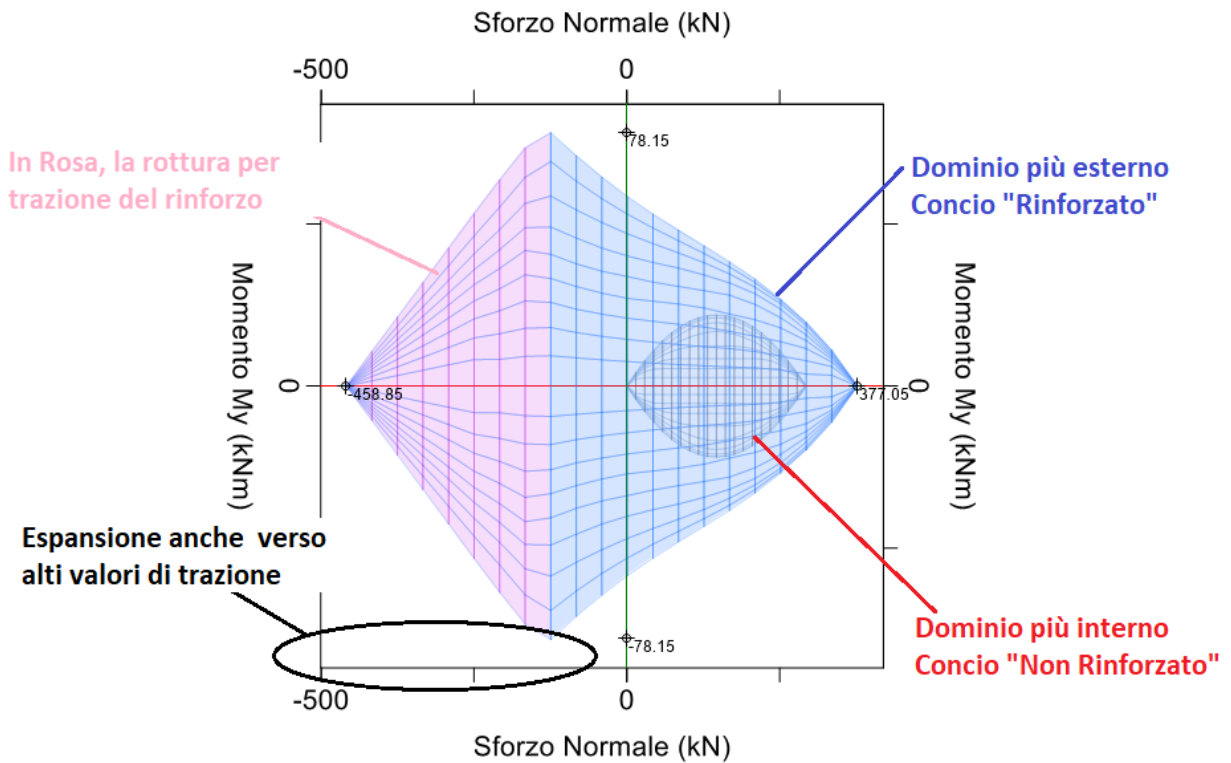


Figura 3-123: Costruzione Rurale in Muratura, con Rinforzi FRP: Pushover, Dominio per concio n.88, Curva A +X (Rinforzi FRP sia longitudinali che trasversali)

Rieseguendo quindi l'Analisi Pushover, già dalla sintesi degli Indicatori di Rischio emerge un netto miglioramento rispetto alla situazione "ante-operam":

N° curva	Corrente	Vista	Distr.	Direz.	Direz.2	Mt	Ez	Control	$\zeta, \text{PGA}^*(\text{SLV})$	$\zeta, \text{TR}(\text{SLV})$	VN, CLV
3	<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	E	+X'				L1	0.579	0.225	11
2	<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	A	+Y'				L1	0.690	0.349	18
1	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	A	+X'				L1	0.738	0.417	21
4	<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	E	+Y'				L1	0.841	0.621	31

Figura 3-124: Costruzione Rurale in Muratura, con Rinforzi in FRP: Pushover, Sintesi degli Indicatori di Rischio

Visualizzando il fascio delle curve calcolate, emerge come queste si interrompano per valori più alti di spostamento:

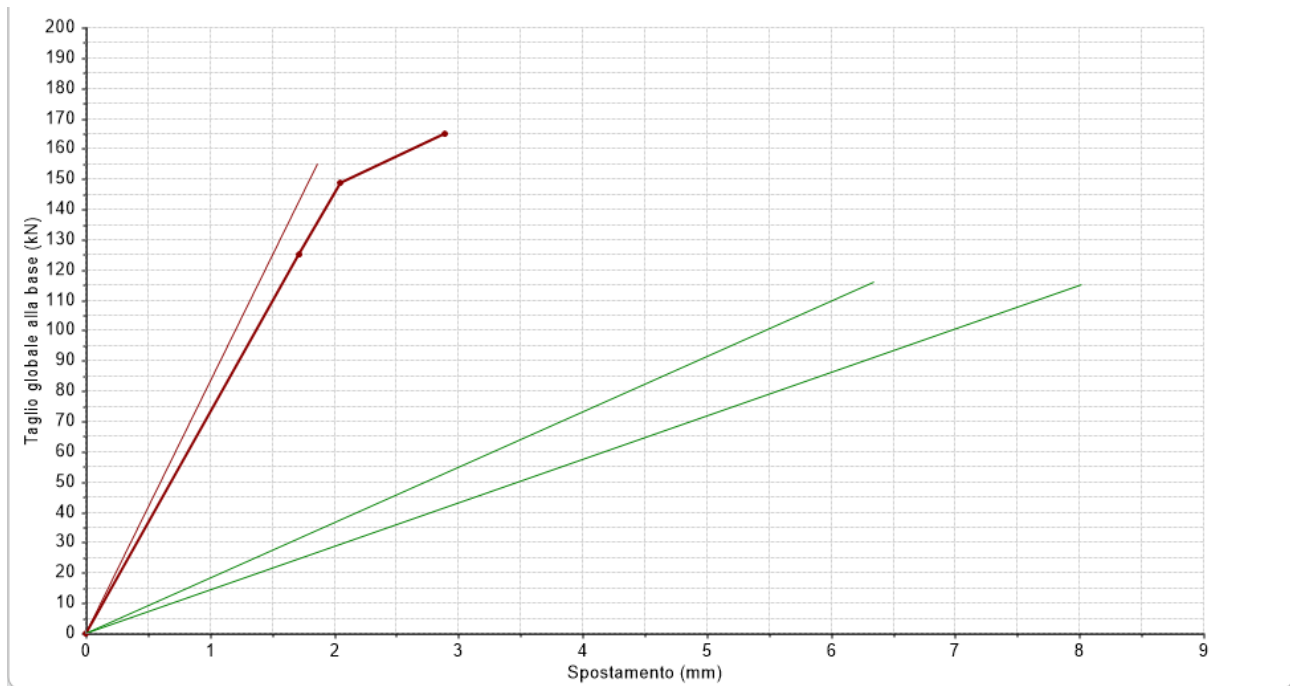


Figura 3-125: Costruzione Rurale in Muratura: Pushover, Fascio di curve calcolato

Osservando la configurazione delle verifiche al passo finale per le curve peggiori nelle due direzioni, si può valutare quali siano gli elementi in crisi:

- per la curva E +X, le colonne libere risultano adesso verificate, mentre si evidenziano alcune crisi nei conci di sommità e alla base della colonna intermedia tra le pareti corte;
- anche per la curva A +Y tutte le colonne libere perimetrali sono adesso verificate, mentre la crisi si sposta sul concio di base della colonna centrale: selezionando questo concio, è possibile come indicato sopra valutarne il dominio di resistenza, notando che le sollecitazioni arrivano alla frontiera del dominio rinforzato causando la non verifica, tuttavia se il concio non fosse stato rinforzato questa crisi sarebbe avvenuta molto prima per livelli di sollecitazione parecchio inferiori:

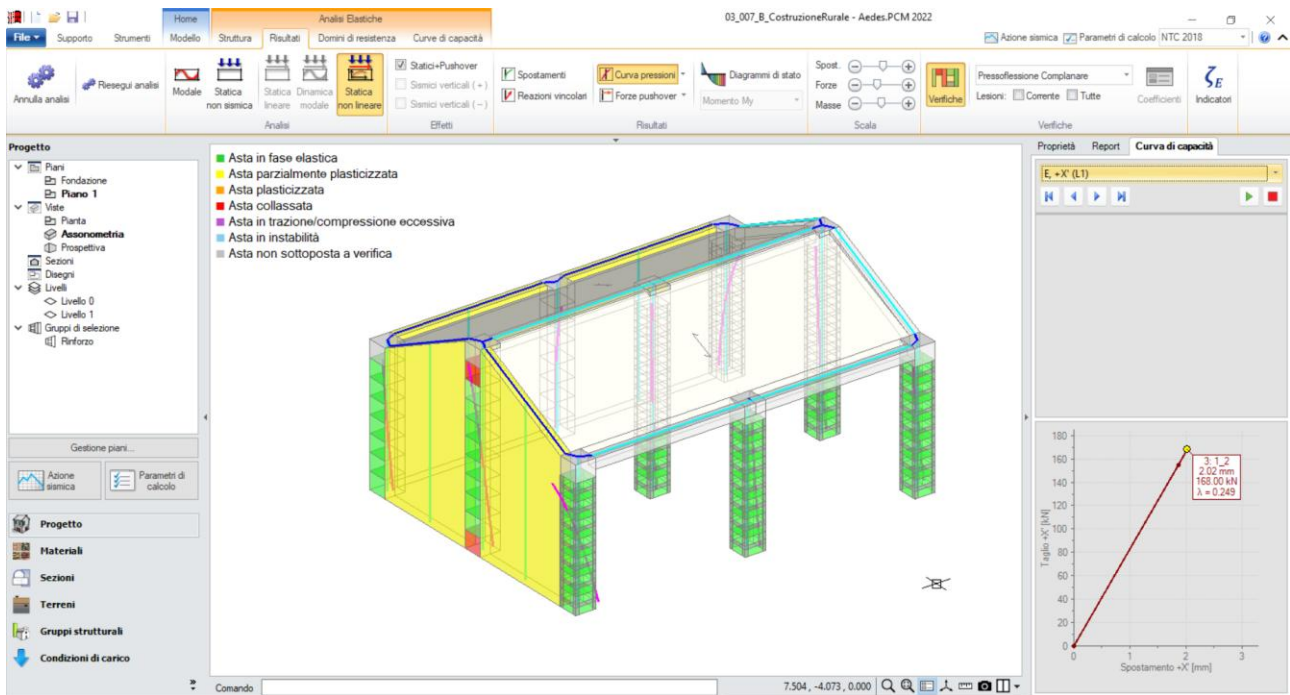


Figura 3-126: Costruzione Rurale in Muratura: Pushover, Verifiche al passo, Curva E +X

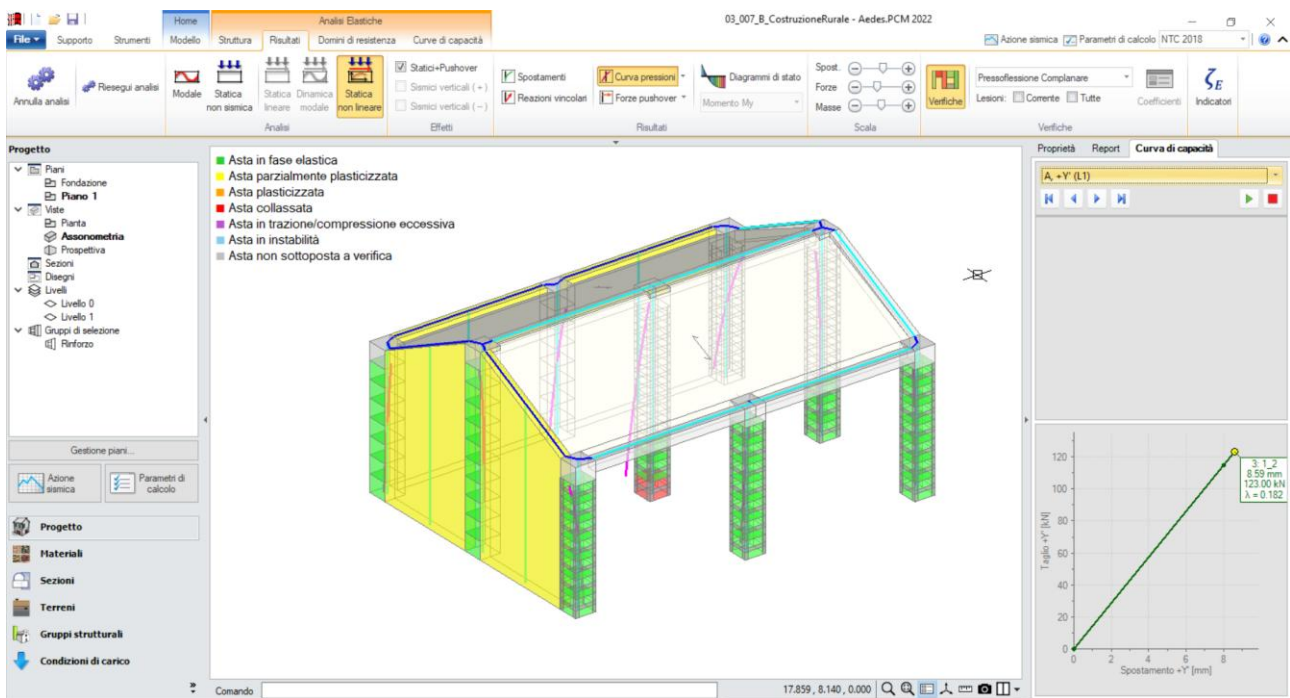


Figura 3-127: Costruzione Rurale in Muratura: Pushover, Verifiche al passo, Curva A +Y

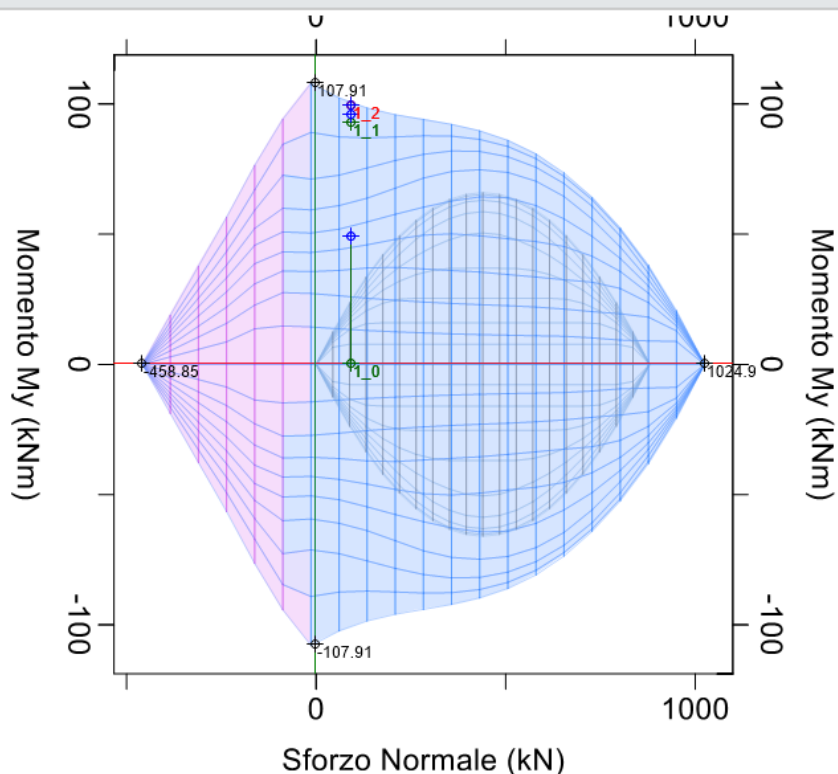


Figura 3-128: Costruzione Rurale in Muratura, con Rinforzi FRP: Pushover, Dominio per concio n.50, Curva A +Y (Rinforzi FRP sia longitudinali che trasversali): si evidenzia il maggior livello di resistenza rispetto al dominio non rinforzato

Si ricorda infine che in PCM è possibile rinforzare le Colonne in Muratura anche tramite *interventi di Cerchiatura con elementi in Acciaio*: in tale metodologia di intervento si prevedono profili "*Angolari*" da applicare sugli spigoli e "*Calastrelli*" orizzontali per collegarli fra loro in modo da ottenere una "cerchiatura" efficace la cui trattazione segue gli stessi principi finora descritti orientati al calcolo di una pressione di confinamento in grado di aumentare la resistenza a compressione delle colonne.

Al pari dell'intervento precedente, per la corretta applicazione le caratteristiche generali si ritrovano nei "Parametri di Calcolo", scheda "Interventi", mentre le specifiche locali di applicazione si impostano selezionando le colonne oggetto di intervento e qualificando opportunamente il rinforzo dalla finestra delle proprietà:

Parametri di Calcolo

OK Annulla Reimposta Importa

Generale Sismica Modale Muratura Valutazione Verifiche Pushover (1) Pushover (2) Muratura armata Calcestruzzo armato **Interventi**

Rinforzi a Taglio

FRP

FRCM

CAM

Reticolatus

**Acciaio per rinforzo pilastri**

Acciaio strutturale per cerchiatura e rinforzo longitudinale di pilastri in muratura (tensioni in N/mm<sup>2</sup>, deformazioni in ‰)

Tensione caratteristica di snervamento  $f_{yk} = 235$

Limite per la deformazione ultima  $\epsilon_{ud} = 10.00$  Modulo di elasticità  $E_s = 210000$

**Per cerchiatura (fasce, o calastrelli)**

Sezione della singola fascia (mm): spessore  $t_f = 2.0$  larghezza  $b_f = 50.0$

Eventuale raggio di curvatura degli spigoli R (mm) = 40 (per angolare di lato l e spessore t:  $R = \min\{l, 5t\}$ )

**Per rinforzo longitudinale (angolari agli spigoli)**

Larghezza dell'ala (mm): l = 100.0 spessore s = 8.0

Figura 3-129: "Parametri di Calcolo", scheda "Interventi", "Acciaio per rinforzo pilastri"

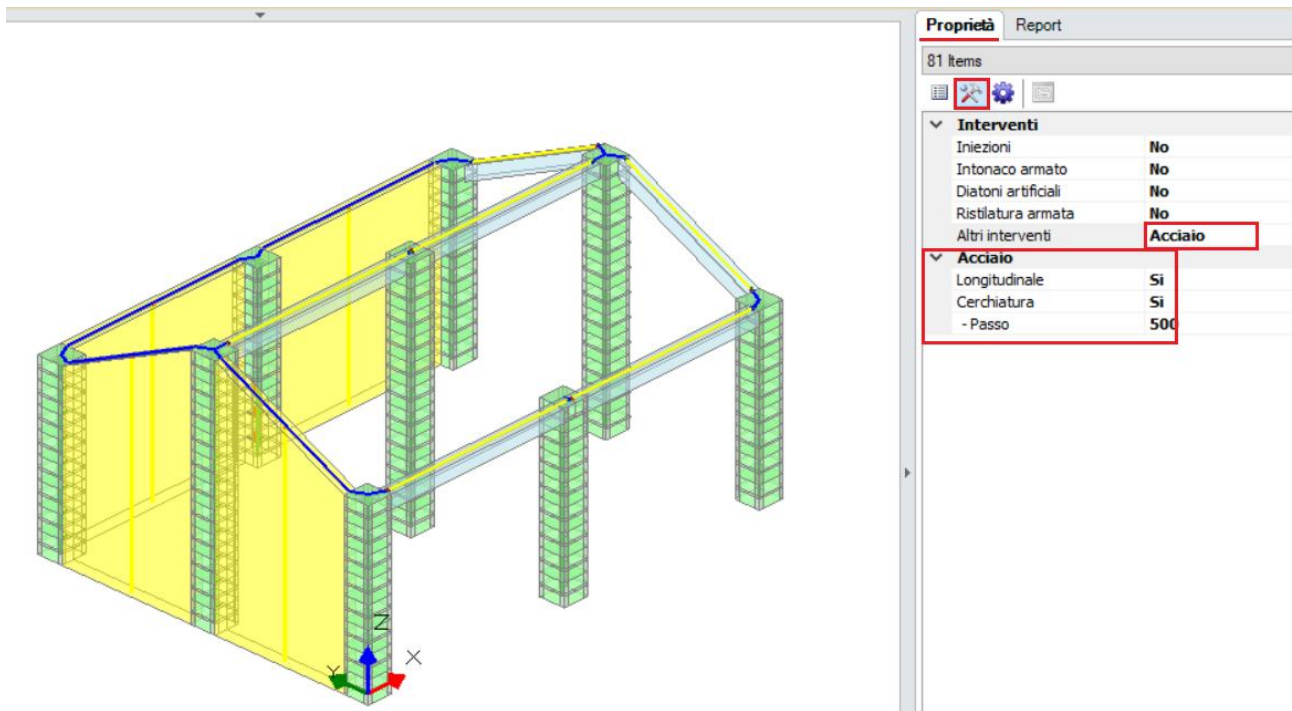


Figura 3-130: Applicazione di rinforzi in acciaio alle Colonne dalla finestra "Interventi"

## 03\_008\_Torre

File di riferimento:

03\_008\_Torre

Parole chiave:

- GRUPPO STRUTTURALE

Riferimenti utili:

Manuale di ECS, paragrafo 6.2.1

### MODELLAZIONE ARCHITETTONICA

Nell'ambito della modellazione degli edifici storici e monumentali, le strutture a prevalente sviluppo verticale quali torri e campanili rivestono sicuramente un'importanza significativa. Alcuni fattori costruttivi possono influire parecchio sulla modellazione, fra questi: la snellezza delle pareti, il grado di ammorsamento, eventuale presenza di edifici più bassi adiacenti, guglie e campane in sommità, fessurazioni prodotte da oscillazioni, cedimenti, danneggiamenti per eventi accidentali (fulmini).

La normativa consente di "semplificarne" lo studio rispetto ad altre tipologie storiche quali ville, palazzi, chiese, seppur "con le dovute cautele".

In PCM è possibile schematizzare strutture di questo tipo attraverso una gestione apposita orientata allo studio attraverso analisi lineari e non lineari, prevedendo la discretizzazione in conci della torre considerata quale elemento a mensola, che sottoposto ai carichi gravitazionali e sismici può raggiungere la crisi a pressoflessione, con schiacciamento delle zone compresse e parzializzazione delle sezioni dovuta alla non resistenza a trazione.

Per ulteriori approfondimenti teorici su tale schematizzazione si rimanda alla "Guida di ECS", §3.

In questo esempio si descriverà la modellazione di una Torre a sezione costante, con pianta rettangolare di dimensioni 5.00m x 4.00m, spessore delle murature perimetrali di 50cm ed altezza pari a 20m. Non sono presenti aperture e non si considerano presenti solai (sezione cava):

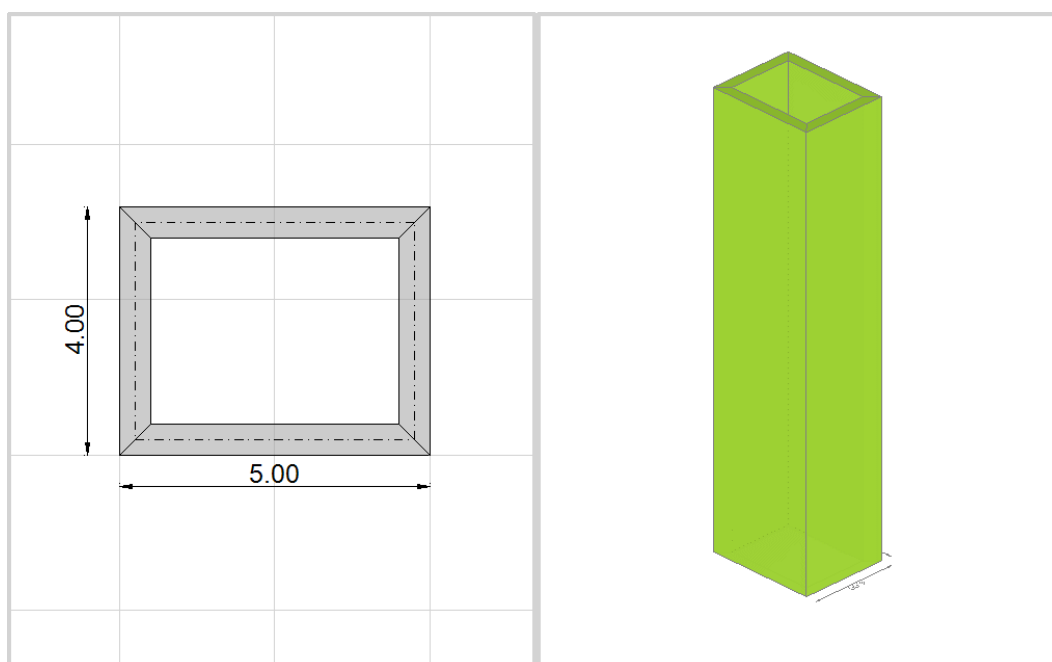


Figura 3-131: Torre a sezione costante

Le pareti vengono considerate in modo continuo dalla base alla sommità, pertanto si definisce un unico piano con altezza pari a 20m dalla finestra "Gestione Piani":

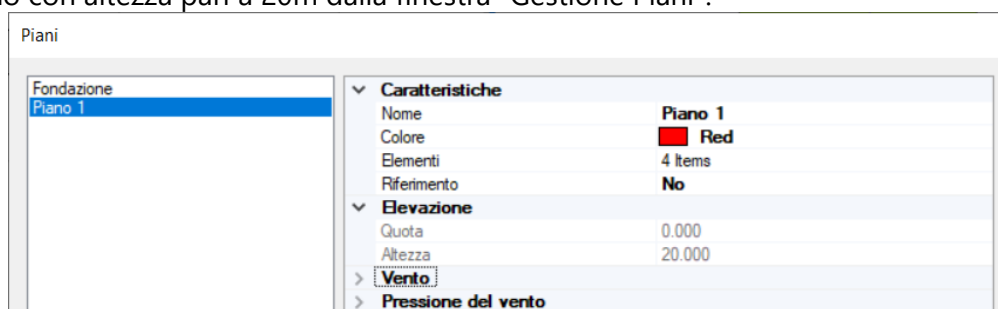


Figura 3-132: "Gestione Piani", inserimento dell'altezza del piano

Le pareti della torre si considerano in "**Mattoni pieni e malta di calce**": dalla finestra "Materiali" si imposta pertanto una muratura esistente di questa tipologia, adottando un Livello di Conoscenza **LC1** (a cui corrisponde un  $FC=1.35$ ).

Per le resistenze si adottano i valori minimi, mentre per i Moduli Elastici si aumenta il modulo secante  $G$  (amplificandolo per un ordine di grandezza di  $E \times 10^4$ ) in modo da rendere trascurabile la deformabilità a taglio, allineando così la modellazione a quanto condotto in letteratura tecnica la quale fa riferimento unicamente al modulo longitudinale  $E$ :

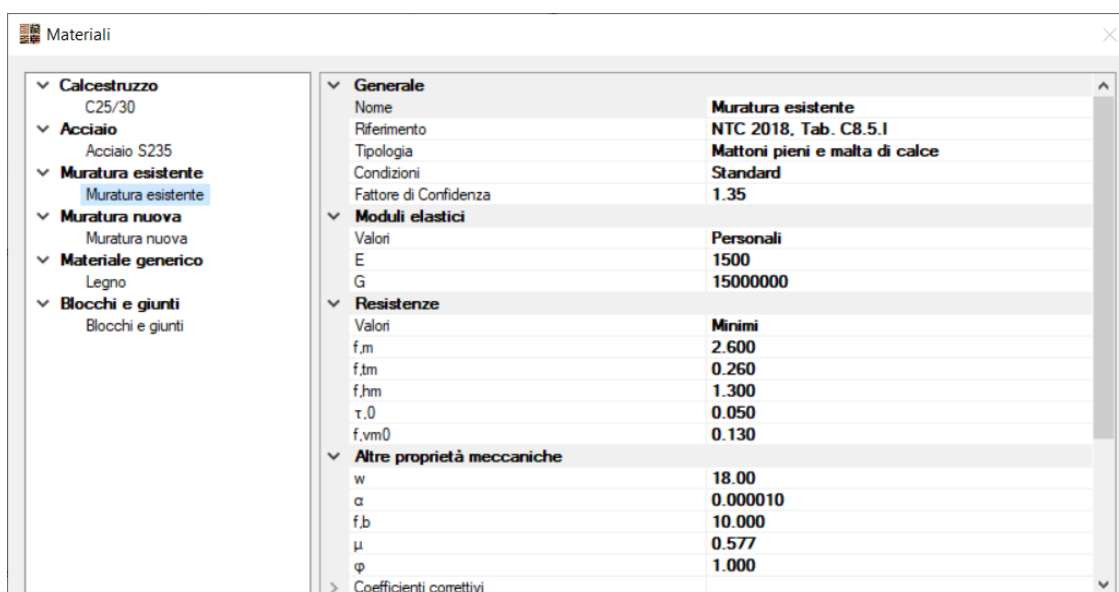


Figura 3-133: Finestra Materiali, caratteristiche del materiale muratura in "Mattoni pieni e malta di calce"

Per definire tale struttura come "**Torre**" è necessario aggiungere un apposito "**Gruppo Strutturale**": si aggiunge quindi un nuovo gruppo dall'apposita finestra, nominandolo "**Torre**": fra le proprietà sulla destra, si sceglie di considerare in ambiente Strutturale la suddivisione dei Muri in conci di Lunghezza 0.40m:

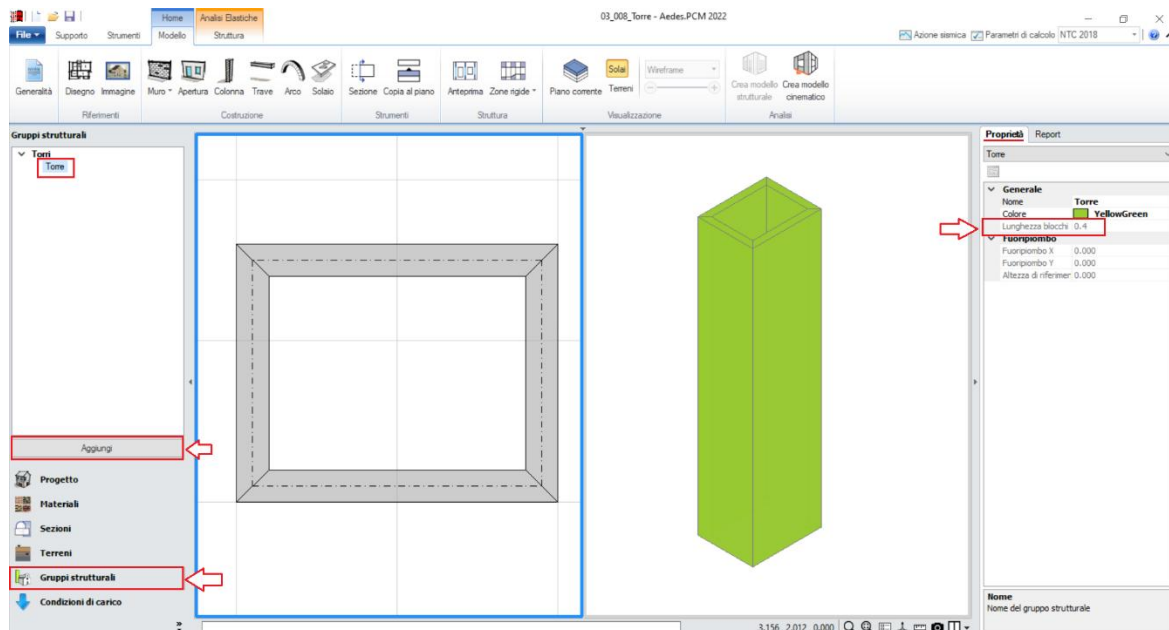


Figura 3-134: Modello Architettonico, aggiunta gruppo strutturale "Torre"

Sempre dalla finestra delle proprietà, è eventualmente possibile impostare la presenza di un "fuori piombo": per la sua definizione, occorre inserire l'altezza alla quale è stato misurato e i valori delle misurazioni condotte in direzione X o Y.

Nel presente modello, si trascura la presenza di fuori piombo al fine di condurre un confronto con i modelli semplificati presenti in letteratura.

Successivamente, si selezionano tutti i muri presenti e, dalla finestra delle proprietà, si imposta la loro appartenenza al gruppo Torre appena creato:

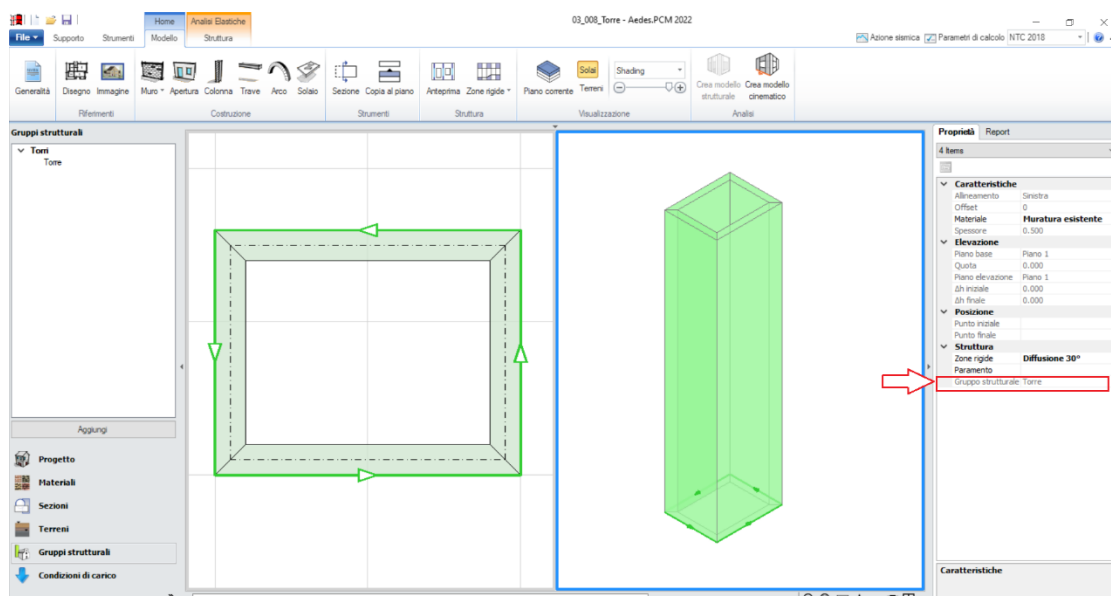


Figura 3-135: Modello Architettonico, applicazione del gruppo strutturale ai Muri

## MODELLAZIONE STRUTTURALE

Dopo aver impostato quanto sopra detto, è possibile generare il modello strutturale: attivando la visualizzazione per "Tipologia" e attivando anche la vista dei "Solidi" (F10 da tastiera) è possibile avere conferma dell'avvenuta discretizzazione della Torre in singoli conci avente altezza di 40cm per come impostato nel modello architettonico, e sezione corrispondente a quella dell'intera struttura.

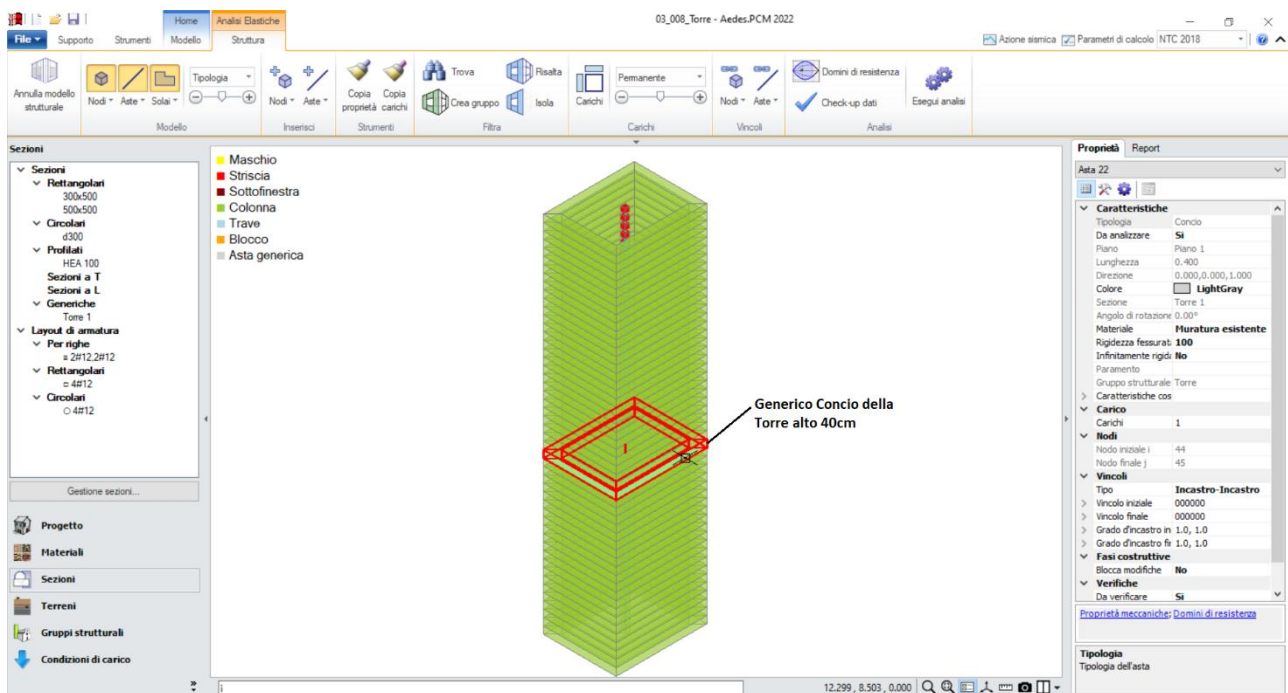


Figura 3-136: Modello Strutturale, vista per "Tipologia" ed Aste come "Solidi"

In fase di generazione del modello strutturale, la finestra "Gestione Sezioni" viene popolata con una famiglia di "Sezioni Generiche", rappresentative delle aree dei muri in pianta ai vari piani: in questo caso, poiché è presente solo un piano, sarà presente solo una "Sezione Generica" rettangolare cava, in automatico sono calcolate le relative proprietà geometrico-inerziali:

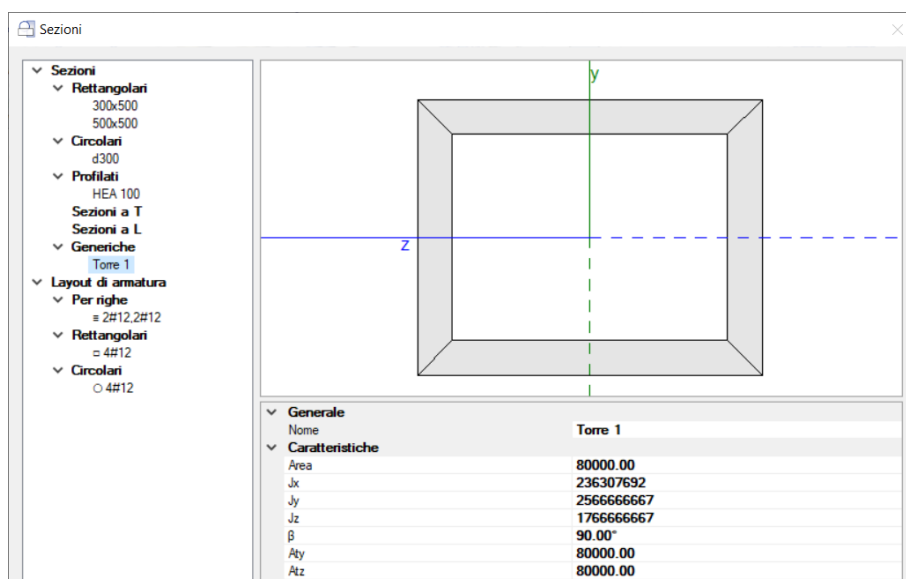


Figura 3-137: Finestra "Gestione Sezioni", sezione generica "Torre1" e sue proprietà

Isolando un generico concio, è possibile notare in sottofondo la visualizzazione unifilare: ogni concio è infatti un'asta beam i cui nodi di definizione sono sempre baricentrici. In questo caso, poiché la sezione è costante in altezza, non si notano discostamenti tra i diversi conci: selezionando la zona di interconnessione in sommità, dalla finestra delle proprietà si nota come siano presenti due nodi sovrapposti (uno è il nodo finale del concio inferiore, l'altro è il nodo iniziale del concio superiore). Per garantire la continuità della struttura è previsto un legame di tipo master-slave tra questi due nodi; con riferimento ad es. alla zona sotto indicata, il nodo 43 è il nodo finale del concio inferiore ed assume il ruolo di nodo master; il nodo 44 è invece il nodo iniziale del concio superiore ed è il nodo Slave che segue il master:

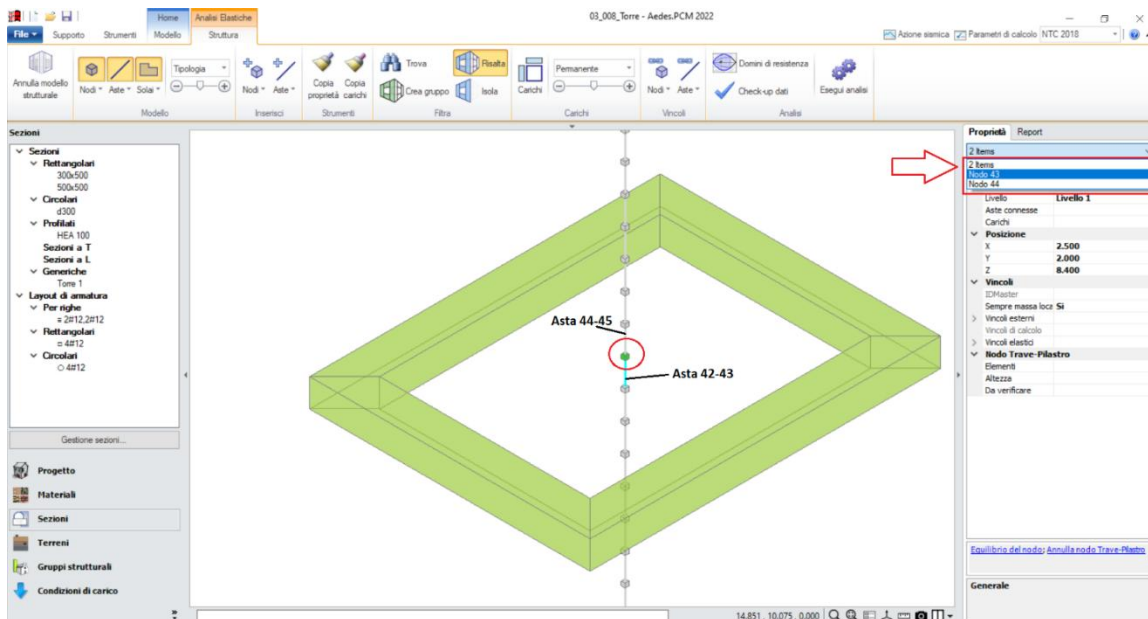


Figura 3-138: Modello Strutturale, esempio legame Master-Slave tra nodi dei conci in elevazione

N.B.: la relazione master-slave tra i nodi dei conci non ha alcun legame con le relazioni di tipo master-slave riguardanti i piani rigidi. Nel caso di torre, poiché tutti i nodi sono considerati sede di massa locale, la relazione master-slave tipica dei piani rigidi non si attiva.

Prima di eseguire le analisi, è conveniente appuntarsi l'ID dell'ultimo nodo di sommità, ed inserendo questo dato nei "Parametri di Calcolo", scheda "Pushover(1)" per considerare questo determinato nodo come punto di controllo ai fini della Pushover:

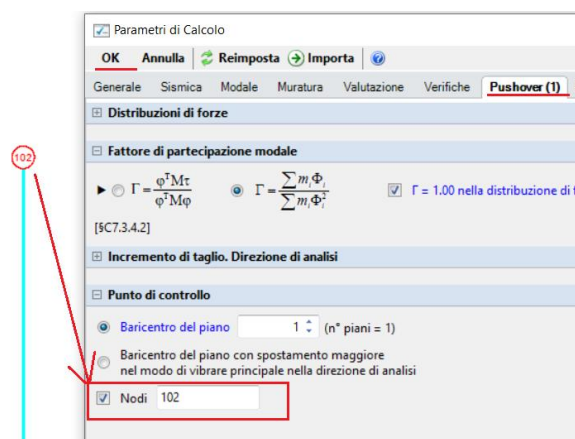


Figura 3-139: Parametri di Calcolo, Pushover(1), impostazione ID ultimo nodo come punto di controllo

## RISULTATI DELLE ANALISI

Dalla visualizzazione delle deformate modali si ha un immediato riscontro delle le deformazioni tipiche di una struttura a mensola, inoltre il confronto dei risultati ottenuti con quelli derivanti da formule analitiche derivate per strutture a mensola evidenzia un'ottima corrispondenza: il modo principale in direzione Y ha periodo 0.532 sec e massa partecipante 62%, mentre il modo principale in direzione X ha periodo 0.442sec e uguale massa partecipante del 62%. Per strutture snelle come questa, è bene tenere conto anche dei modi superiori anche se con minor massa partecipante, in quanto portano a deformate modali di cui è importante valutare l'andamento ai fini della determinazione delle zone maggiormente sollecitate:

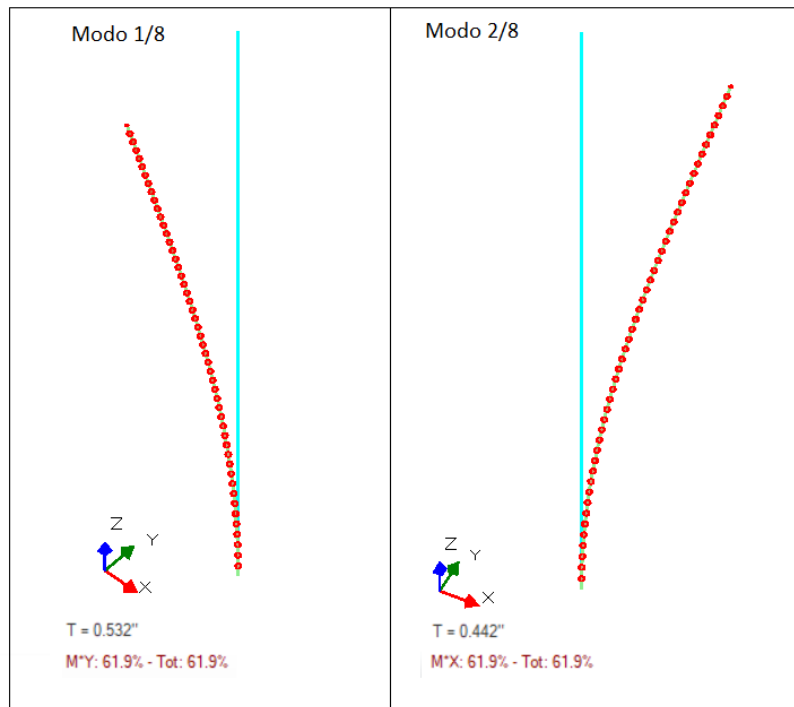


Figura 3-140: Torre a sezione costante: Modi principali, Periodi 0.532 sec e 0.442 sec, Massa Partecipante 62%

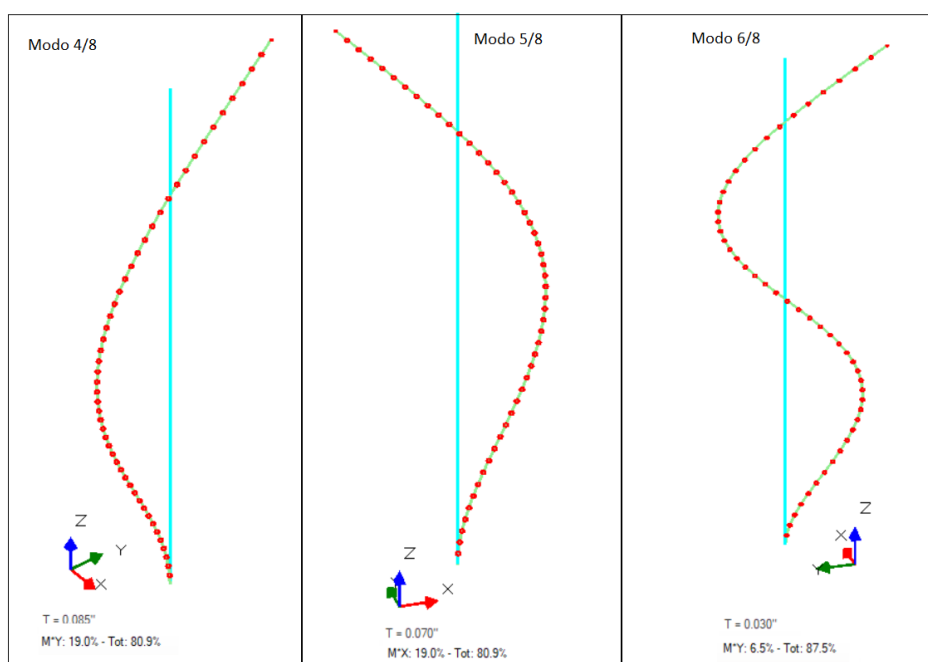


Figura 3-141: Torre a sezione costante: Modi superiori, Periodi 0.532 sec e 0.442 sec, Massa Partecipante 62%

N.B.: per ottenere risultati congruenti con lo schema a mensola senza discostarsene eccessivamente è sempre opportuno mantenere un'altezza limitata per i conci (in questo caso, i conci hanno infatti un'altezza di 0.40m, paragonabile allo spessore delle pareti di 0.50m).

In Analisi Pushover, se non si tenesse conto della variazione di rigidezza dovuta alla parzializzazione della sezione, si otterrebbe un andamento delle curve perfettamente rettilineo, la cui inclinazione rimarrebbe costante e pari alla rigidezza elastica iniziale, fino alla crisi per resistenza.

Considerando invece la parzializzazione, si ottiene un andamento tipico di una curva Pushover, con conseguente riduzione della rigidezza dovuta alla variazione della zona reagente durante l'analisi, consentendo quindi un'adeguata rappresentazione del comportamento non lineare con relativo passaggio all'oscillatore monodimensionale equivalente e relativa verifica di sicurezza finale.

Per questo esempio, sono state eseguite Analisi Pushover secondo le seguenti distribuzioni:

- Distribuzione A: in cui le forze incrementali sono proporzionali a quelle utilizzate per l'analisi sismica lineare;
- Distribuzione E: in cui le forze sono proporzionali alle masse;
- Distribuzione F (unimodale adattiva): nella quale le forze sono proporzionali alla forma del primo modo di vibrare e vengono aggiornate ad ogni variazione di rigidezza aggiornando l'analisi modale (ne consegue un aumento del periodo proprio).

Da approfondimenti legati alla distribuzione E è stato possibile derivare la rigidezza della struttura, la quale mostra un valore in ottimo accordo con la rigidezza analitica di una mensola sottoposta a carico uniforme distribuito  $q$ , confermando ulteriormente le ipotesi a premessa della modellazione.

In merito ai risultati, è interessante approfondire quanto mostrato dalle curve con distribuzione F, ad es. in direzione +X: all'ultimo passo, è possibile apprezzare la parzializzazione delle diverse sezioni del conico. In grigio sono indicate le parti di sezione in trazione, in verde le parti con verifica soddisfatta mentre in rosso alla base i conci con verifica non soddisfatta per eccessiva compressione.

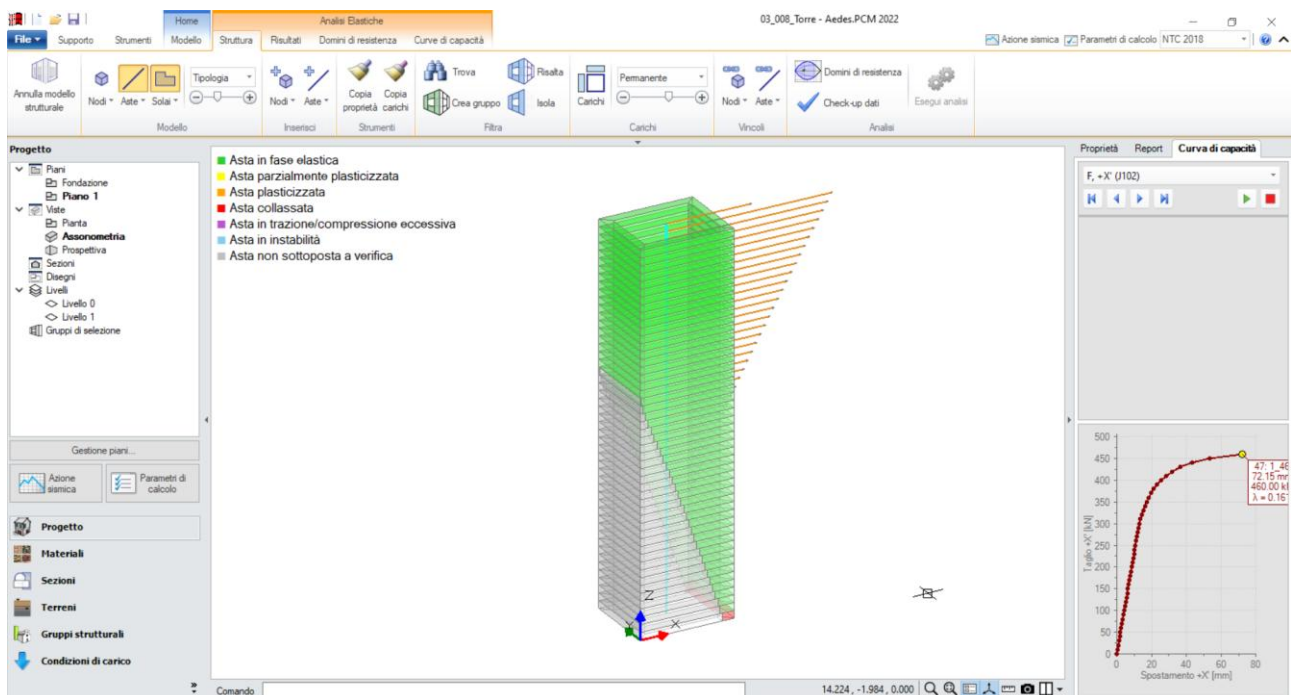


Figura 3-142: Analisi Pushover, curva per Distribuzione F, +X: in grigio le parti parzializzate

Selezionando la parte del concio alla base non verificata, è possibile visualizzare il suo Dominio di Resistenza, nel quale è possibile seguire la progressione delle sollecitazioni ai vari passi dell'analisi, con l'ultimo punto (in rosso) che arriva alla frontiera del dominio, portando quindi a verifica non soddisfatta: queste informazioni possono essere contemporaneamente confrontate anche con quanto riportato sia nella "Storia Evolutiva" che nella "finestra delle proprietà", scheda "Risultati":

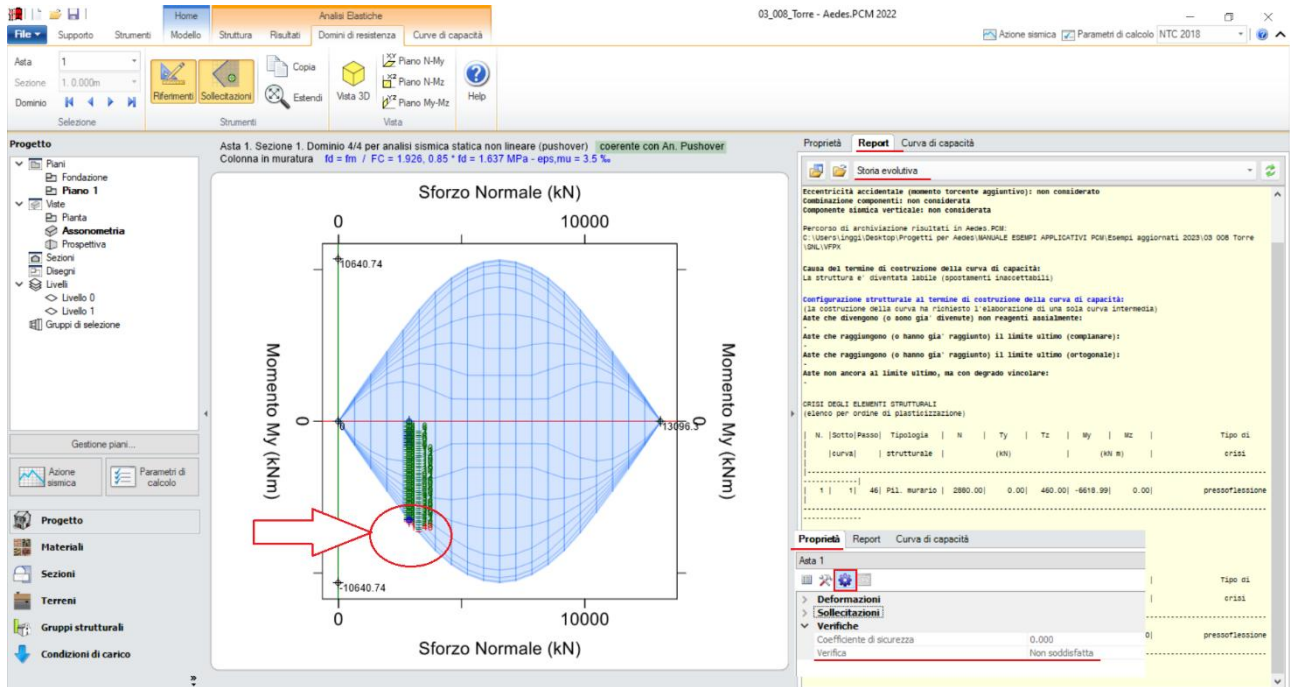


Figura 3-143: Analisi Pushover, curva per Distribuzione F, +X: in grigio le parti parzializzate

Visualizzando l'intero fascio di curve calcolato, è possibile confrontare i valori caratterizzanti di ogni curva Pushover fra le diverse distribuzioni: emerge come la distribuzione F comporti uno spostamento comparabile col massimo (riscontrato per la distribuzione A) ma con il minimo Taglio:

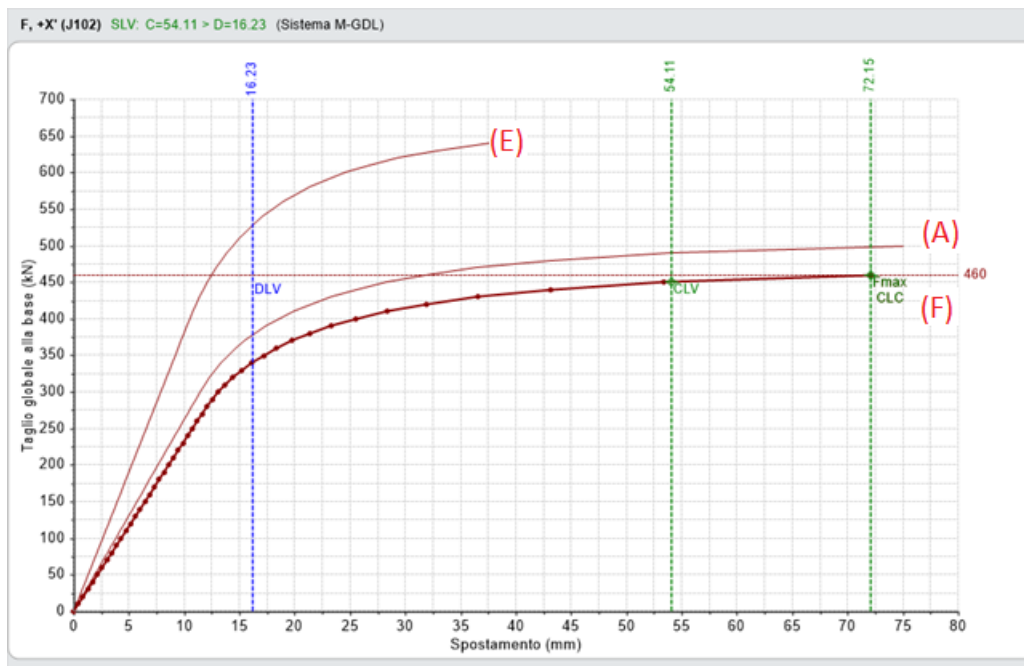


Figura 3-144: Analisi Pushover, fascio delle curve calcolate per la Direzione +X

Risulta inoltre interessante approfondire il valore del periodo calcolato dall'analisi modale "al passo Pushover": riattivando la finestra dei risultati per l'Analisi Modale, ed attivando la relativa opzione avendo cura di selezionare l'ultimo passo della Pushover con distribuzione F, si nota che da un periodo iniziale  $T=0.442$  sec si arriva a  $T=3.203$  sec a causa della variazione di rigidità dovuta alle parti parzializzate:

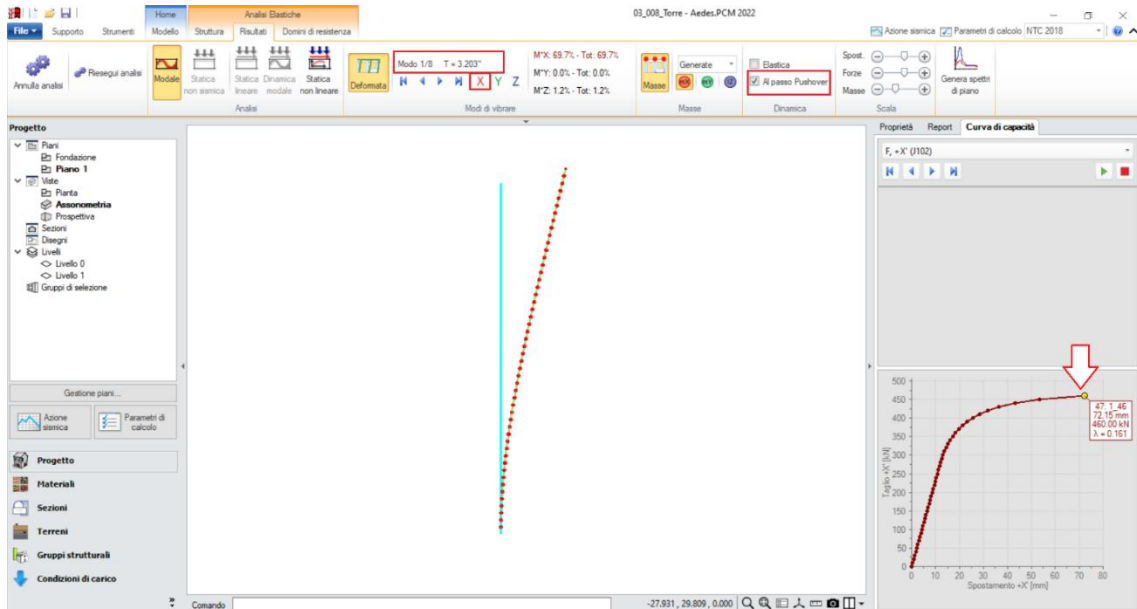


Figura 3-145: Analisi Modale "al passo Pushover": periodo  $T=3.203$  sec all'ultimo passo Curva +X, Distrib. F

Nei test normativi, per ottenere il periodo in corrispondenza del primo stato di fessurazione viene indicato di amplificare il periodo per un coefficiente pari a 1.75, da cui si otterrebbe:  $T=0.442 \cdot 1.5=0.773$  sec, molto maggiore del periodo ottenuto in PCM sopra indicato.

Tuttavia, il passo della Pushover che più si avvicina al valore del periodo da norma corrisponde ad un taglio pari a circa 360kN, con una configurazione comunque fessurata data dalla parzializzazione:

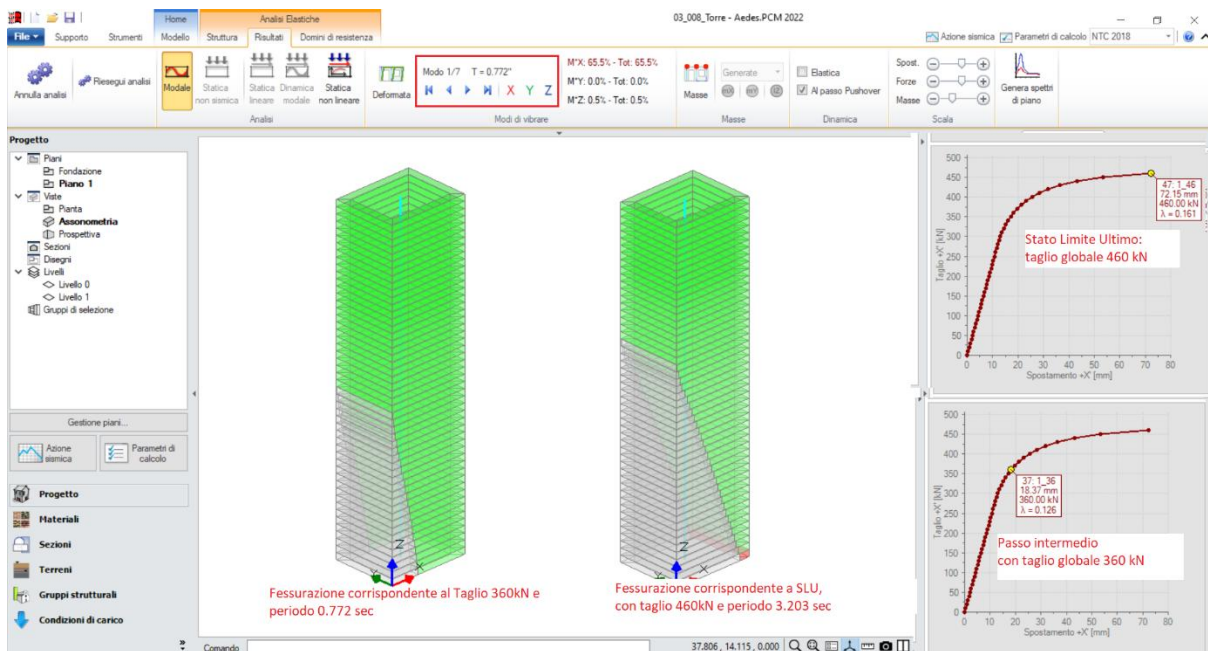


Figura 3-146: Analisi Pushover: confronto configurazioni di fessurazione tra periodo di norma e di calcolo

## 03\_009\_Ciminiera

File di riferimento:

03\_009\_Ciminiera

Parole chiave:

- GRUPPO STRUTTURALE
- DISTACCO DEI VORTICI PER AZIONE DA VENTO

### MODELLAZIONE ARCHITETTONICA

Sulla base di quanto sviluppato nel paragrafo precedente, tra le strutture a prevalente sviluppo verticale alle quali dedicare una modellazione specifica rientrano anche le ciminiere. Queste strutture possono risultare isolate, oppure spesso facenti parte di edifici a destinazione artigianale-industriale, molto soggette all'influenza dell'elevata snellezza e per le quali spesso l'azione del vento può comportare valutazioni più approfondite in merito al distacco dei vortici.

Dal punto di vista operativo, la modellazione di una ciminiera può svolgersi sempre nell'ambito delle **"Strutture monumentali"**, in quanto richiede degli accorgimenti specifici orientati ad una determinata classe di strutture.

In questo caso, si ritiene applicabile la procedura utilizzata per lo studio di "Torri e campanili", disponibile per gli utenti in possesso anche della licenza del modulo ECS.

Rimangono validi i riferimenti riportati nel documento *"Guida ECS", §3 "Torri e campanili" (parte teorica) e §6.2 (parte applicativa)*.

Nel presente esempio, si descriverà la modellazione di una ciminiera costituita da un basamento quadrato con lato pari a 4.70m ed altezza di 8.37m, nel quale è ricavata un'apertura ed un tunnel che portano alla canna fumaria centrale, la quale si estende in elevazione attraverso una struttura troncoconica con una doppia fodera di mattoni pieni e malta di calce, con sezione circolare rastremata a partire dall'estradosso del basamento fino alla sommità per un'estensione di circa 40m:

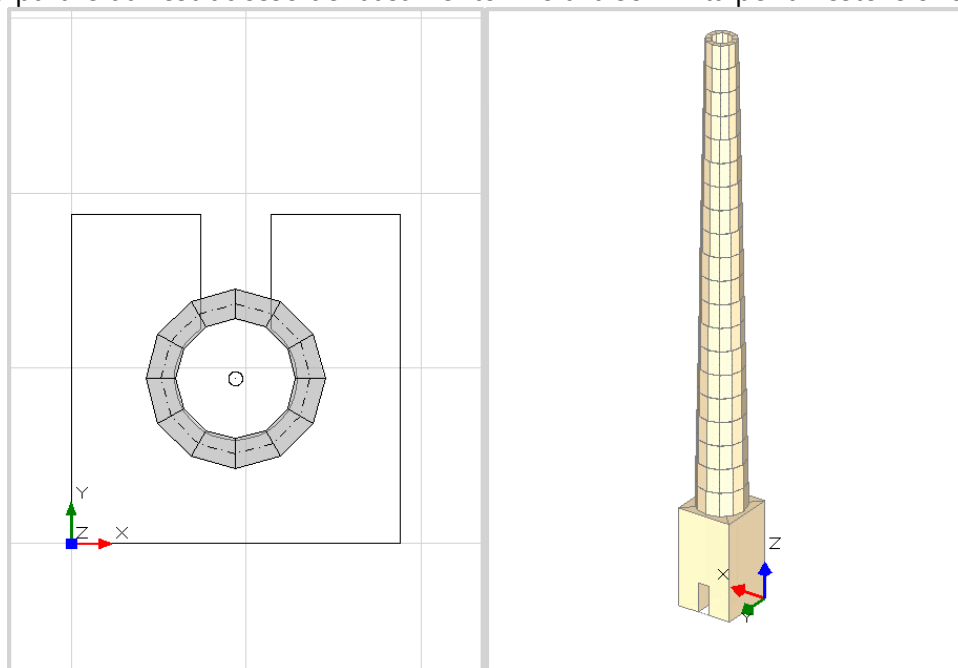


Figura 3-147: Ciminiera: vista in Pianta ed Assonometria

La ciminiera può essere considerata composta da due "macrostrutture", diverse per forma:

- 1) Il basamento: avente pianta quadrata con Lato di 4.7m, altezza 8.37m, in muratura piena con foro centrale di diametro 1.75m;
- 2) La ciminiera: avente sezione circolare rastremata, che parte da un diametro comparabile con il basamento ed arriva in sommità ad un diametro di circa 2.80m, con muratura "a doppia fodera" almeno fino a circa 32m di altezza.

Per prima cosa, occorre ragionare sulla definizione dei "Piani": è utile definire un piano per il Basamento, e diversi piani in elevazione che identificano in modo ragionevole la rastremazione delle sezioni circolari della reale canna fumaria della ciminiera in altezza.

Può risultare utile in questo senso disegnare separatamente su Cad la ciminiera, e condurre delle sezioni alle varie quote in modo da scegliere opportunamente i diametri intercettati dalle sezioni.

Di seguito viene indicata una possibile discretizzazione in ambiente Cad: la fodera interna di fatto ha sempre spessore costante (ipotizzato di 30cm), mentre si considera la rastremazione solo della fodera esterna, anch'essa con spessore costante (ipotizzato di 24cm). Tutto questo fino alla quota di 32m, dove di fatto le due fodere vanno a toccarsi: a partire da questa quota fino in sommità, si considera la rastremazione con fodera a spessore variabile in modo da mantenere un unico filo sulla canna fumaria interna.

**N.b.** qualora l'effettivo spessore dai 32m in su sia invece minore, sarà ovviamente possibile impostare il diametro rilevato.

Anche per non appesantire eccessivamente il modello, è ragionevole considerare piani con altezza di 2m, in modo nel complesso da gestire n.20piani=40m/2m.

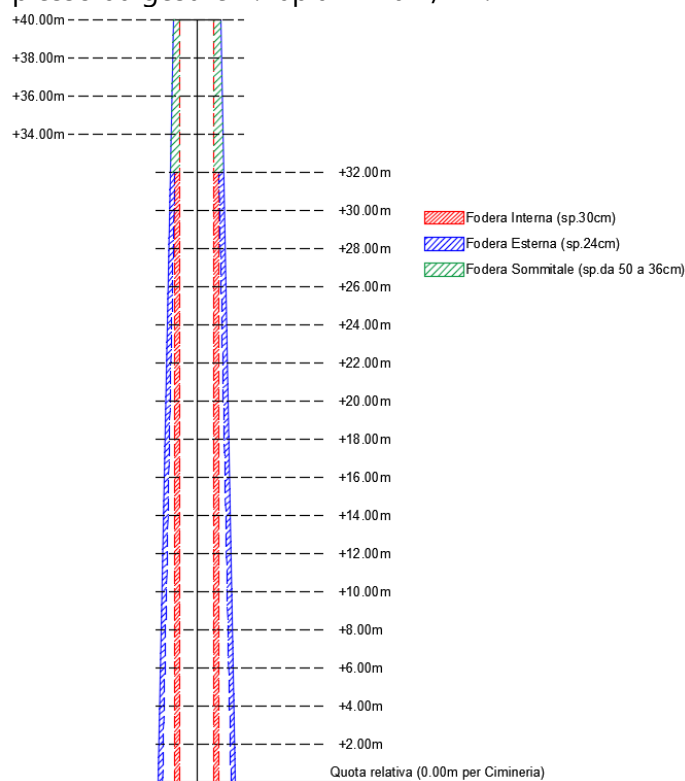


Figura 3-148: Ciminiera: identificazione sezioni di riferimento in ambiente CAD

Aperto la finestra "*Gestione Piani*", si modificheranno quindi i piani come di seguito indicato (adottando come simbologia per la canna fumaria una descrizione del tipo "Cim\_H(h)" con h=Altezza della sezione dalla quota dello spiccato del basamento):

- Piano 1= "Basamento": H= 8.37m;
- Piano 2= "Cim\_H2": H= 2m (Quota=8.37m)
- Piano 3= "Cim\_H4": H= 2m (Quota=8.37m+2m=10.37m)
- Piano 4= "Cim\_H6": H= 2m (Quota=10.37m+2m=12.37m)
- Piano 5= "Cim\_H8": H= 2m (Quota=12.37m+2m=14.37m)
- Piano 6= "Cim\_H10": H= 2m (Quota=14.37m+2m=16.37m)

ecc..., fino a:

- Piano 2= "Cim\_H40": H= 2m (Quota=46.37m+2m=48.37m).

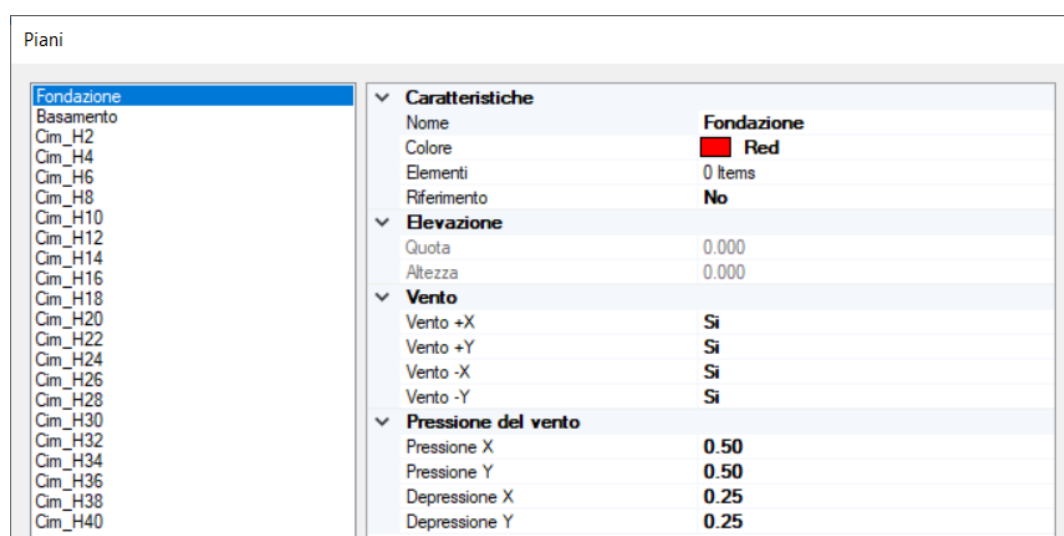


Figura 3-149: Finestra "Gestione Piani": identificazione dei piani in cui suddividere la ciminiera

**Nota:** i valori di pressione/depressione del Vento sono ininfluenti in questa finestra, poiché il modello è trattato come "Torre". Nessun carico verrà quindi impostato sulle aste strutturali a partire da questa finestra, si indicherà nel seguito più in dettaglio come poterlo considerare.

La gestione dei muri a sezione curva può essere ragionevolmente rappresentata attraverso una discretizzazione di sezioni rettangolari contigue.

Una volta definiti i piani, si iniziano a creare le due "forme" delle diverse sezioni. Più in specifico:

- 1) **Per il basamento:** risulta utile disegnare direttamente in PCM (attraverso i comandi CAD della scheda "Strumenti", " Rettangolo", "Cerchio", "Linea") il profilo della sezione quadrata esterna e l'apertura del tunnel: poiché la gestione architettonica avverrà attraverso oggetti di tipo Muro, anche il foro centrale circolare andrà "regolarizzato"; in tal senso, è ragionevole disegnare un quadrato che lo circoscriva (a favore di sicurezza quindi si considera una sezione minore) e disegnare i quattro muri di contorno. Per i successivi elementi, disegnare inoltre un oggetto "Punto" al centro, in modo da mantenere un riferimento fisso. Inoltre, è sempre consigliabile attivare gli assi locali, tramite F4 da tastiera, e creare la struttura con spigoli coincidenti o in vicinanza dell'origine degli assi:

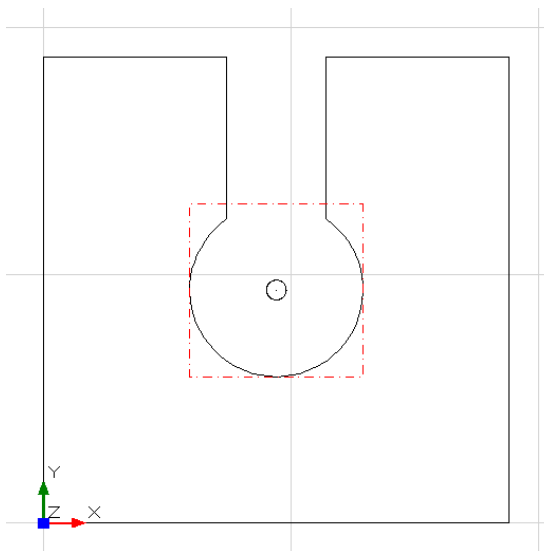


Figura 3-150: Disegno della sezione del basamento (attraverso i comandi CAD della scheda "Strumenti")

Una volta creato il profilo, dal comando "Muro" → "Muro Rapido", tracciando una linea che intersechi gli spessori di definiscono le murature di base; successivamente, si inserirà la porta (ipotizzata ad es. di altezza 2.50m) tramite l'oggetto "Apertura":

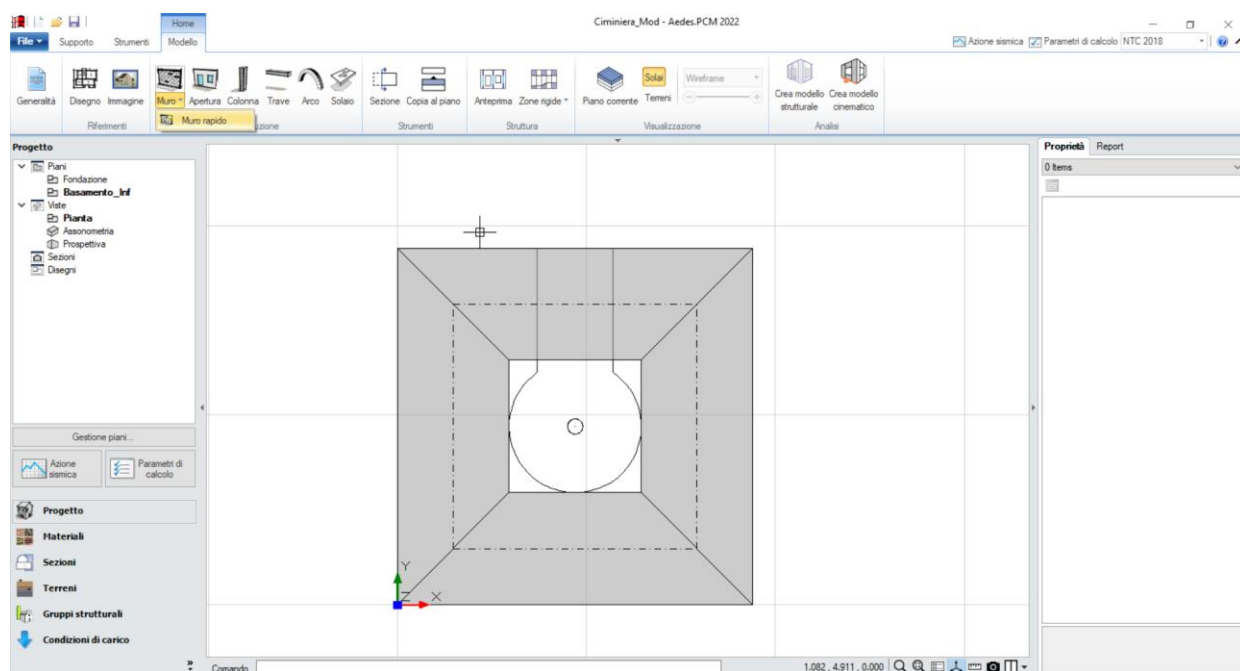


Figura 3-151: Modello Architettonico: Disegno dei Muri del Basamento

- 2) **Per la ciminiera:** spostandosi al piano direttamente superiore (Cim\_H2), sempre attraverso i comandi Cad della scheda "Strumenti", risulta utile disegnare dapprima la "fodera interna" e successivamente la "fodera esterna". Come premesso, poiché la fodera interna si assume con spessore costante fino ai 32m, è utile disegnare i muri del suo "Piano base" e tramite il comando "Copia al Piano" ricopiarli esattamente in altezza ripetendo il comando tra le diverse quote. La fodera interna ha diametro esterno pari a 2.35m e spessore di 30cm, quindi si disegna un cerchio con tale diametro, tramite una linea si riporta il raggio e con il comando "Serie polare" si ruota tale linea per dividere la circonferenza ad es. in 12 parti:

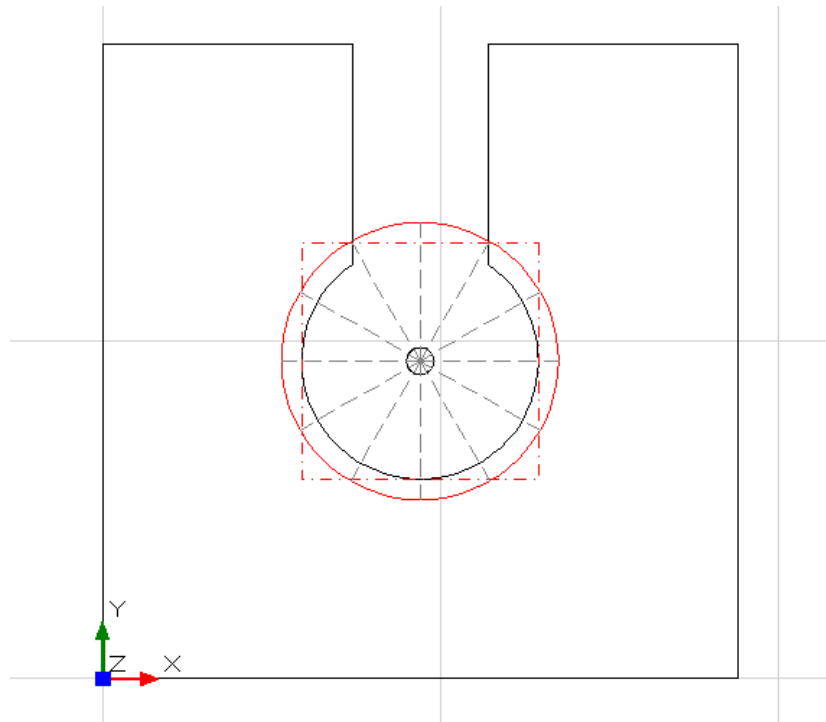


Figura 3-152: Disegno della sezione della fodera interna (attraverso i comandi CAD della scheda "Strumenti")

Dopo aver creato tale geometria, tramite il comando "Muro" si disegna una serie di muri in sequenza (con spessore 30cm): disegnando i muri in sequenza, in automatico avviene anche il raccordo negli angoli; diversamente, se si disegnano singolarmente andrà utilizzato anche il comando "Raccorda" della scheda Strumenti.

**N.B.:** nella scelta del diametro e quindi del punto di aggancio, rimane una libera scelta per la definizione dei Muri seguire l'Allineamento "A destra", "A sinistra" o "Centro", in base a tale scelta si disegnerà il cerchio di sottofondo.

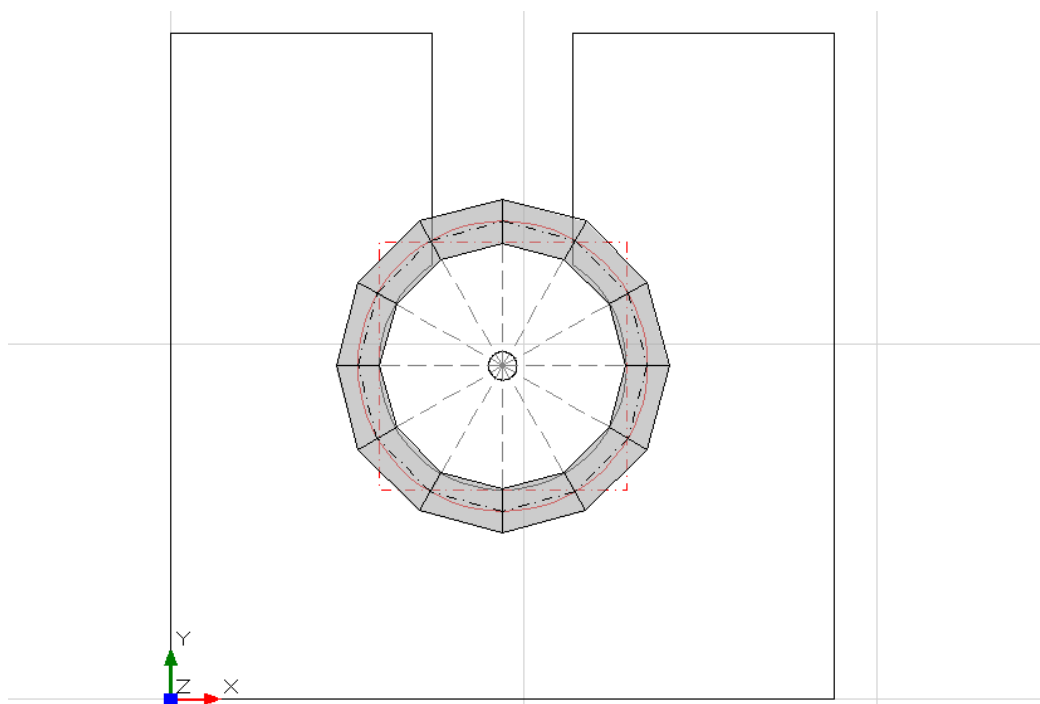


Figura 3-153: Modello Architettonico: Disegno dei Muri della fodera interna, sezione di base

Si procede quindi in modo analogo per la "fodera esterna", partendo dal diametro al piano più basso, suddividendolo con la serie polare sul raggio e creando i muri al contorno. Questa volta tale operazione andrà ripetuta per ogni singolo piano della suddivisione, in quanto la sezione della ciminiera man mano va rastremandosi in altezza:

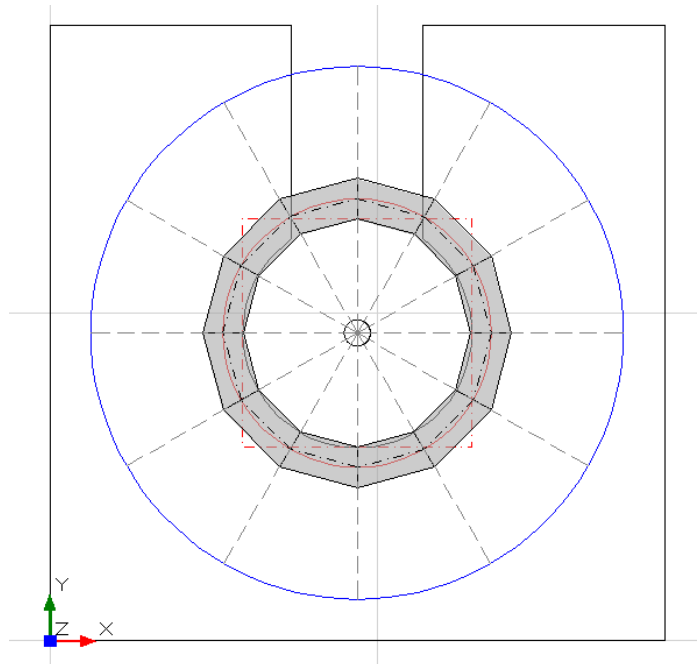


Figura 3-154: Disegno della sezione della fodera esterna (attraverso i comandi CAD della scheda "Strumenti")

Quindi in definitiva, guardando in Pianta, si può avere conferma della coerenza adottata:  
Sezione a quota +8.3m (spiccato del basamento):

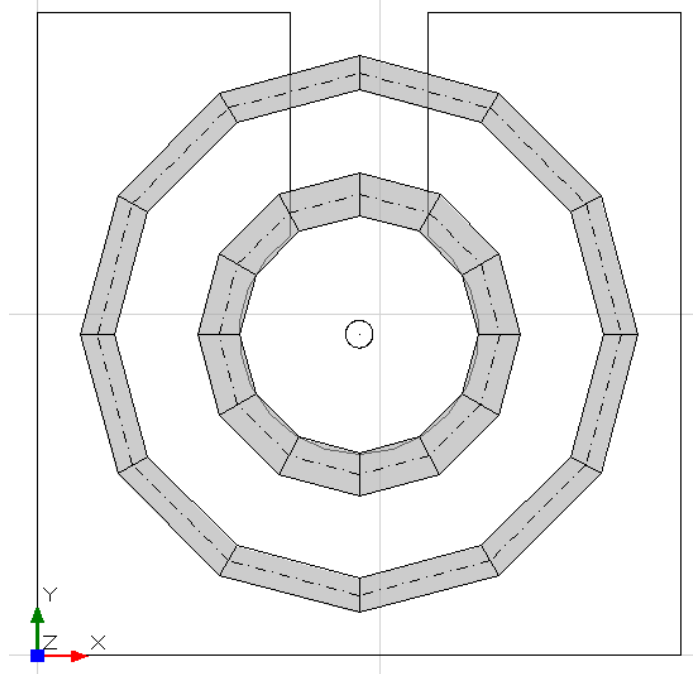


Figura 3-155: Sezione a quota +8.3m (spiccato del basamento)

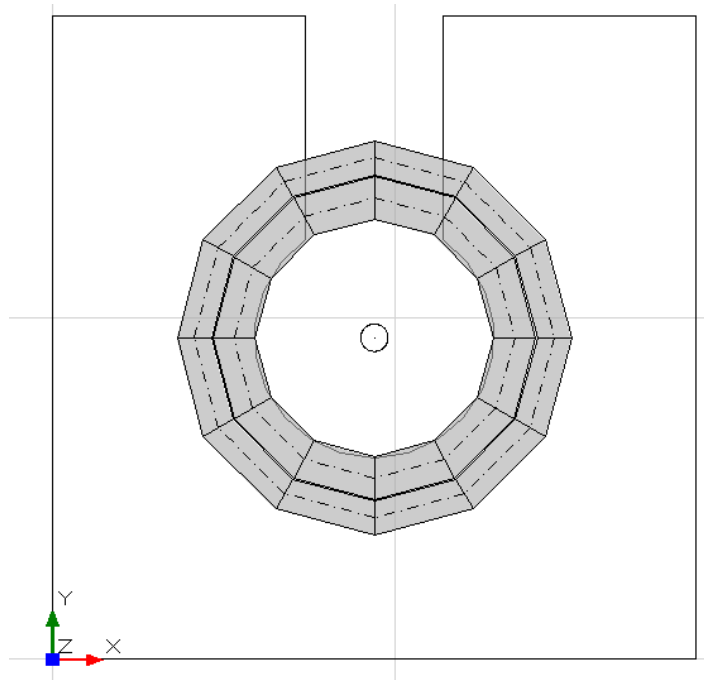


Figura 3-156: Sezione a quota +32m (dallo spiccato del basamento): ultima quota con due fodere distinte

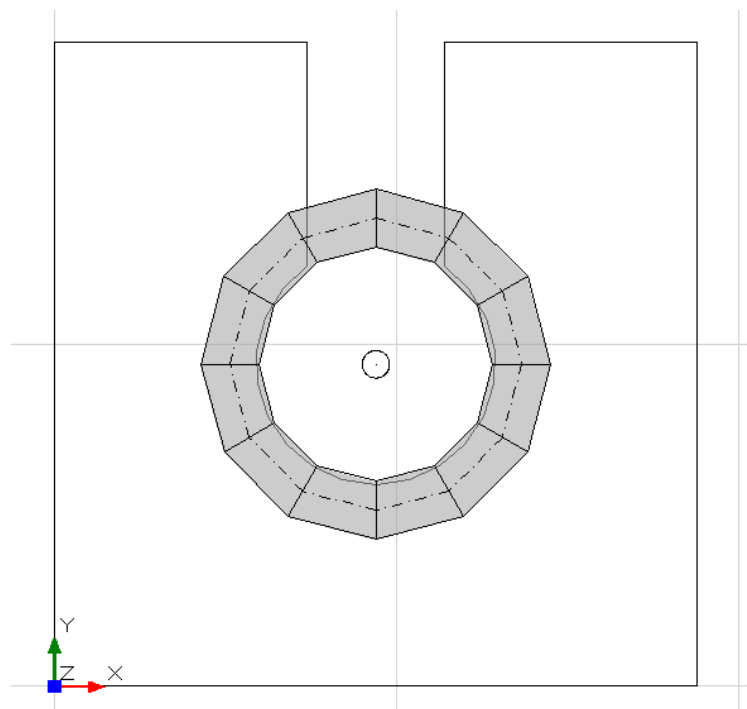


Figura 3-157: Sezione a quota massima (H=+40m dallo spiccato del basamento)

La presenza di eventuali "razze" di collegamento tra le due fodere può essere considerata disegnando altri oggetti "Muro" aventi questa volta direzione "radiale". Ad esempio, ipotizzando che fino alla quota di 32m siano presenti sei razze di collegamento da 20cm disposte simmetricamente e connesse fra i punti medi dei singoli muri interessati, la sezione di base diventa la seguente:

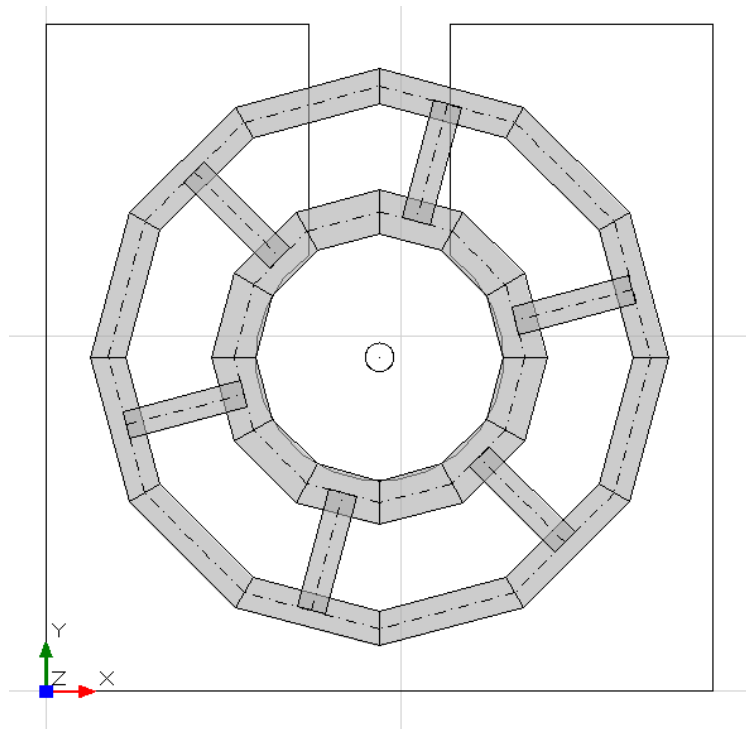


Figura 3-158: Sezione a quota +8.3m (spiccato del basamento) con razze di collegamento tra le due fodere

In definitiva, visualizzando la doppia finestra grafica (F3 da tastiera), si può avere conferma della corretta modellazione sia in pianta che in Assonometria:

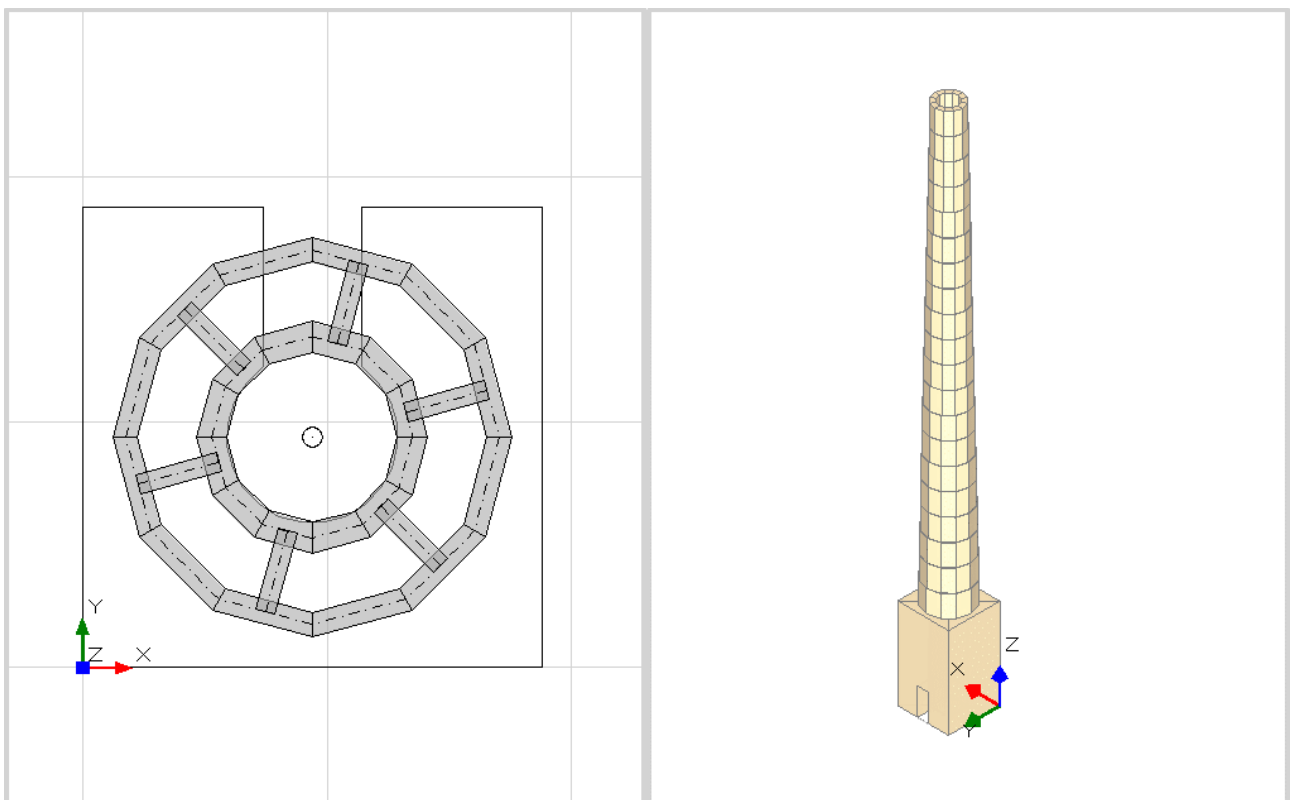


Figura 3-159: Modello Architettonico completo della ciminiera

A questo punto, prima di generare il modello strutturale, dalla scheda **"Gruppi Strutturali"** si aggiunge un nuovo gruppo strutturale, che ad es. può chiamarsi **"Ciminiera"** dalla finestra delle proprietà: da questa finestra delle proprietà si imposta anche la **"Lunghezza blocchi"**: in questo caso, poiché inoltre ad interasse di 1m sono presenti degli anelli di rinforzo, è conveniente impostare Lunghezza Blocchi=1 in modo da ottenere una suddivisione dei conci con altezze di 1m in ambiente strutturale (si imposta in realtà 1.01m per evitare che, a causa di approssimazioni numeriche, ogni maschio sia suddiviso in tre conci anziché due).

**N.b.:** qualora si riscontri la presenza di materiali diversi lungo l'altezza della ciminiera, se ne potrà tener conto creando opportuni materiali distinti nella finestra "Materiali", ed assegnandoli ai relativi conci conto in ambiente strutturale. Si pensi ad es. ad una diversa distribuzione dei mattoni pieni tra due conci consecutivi, con elementi disposti di taglio rispetto a elementi disposti orizzontalmente. Oppure a situazioni di materiali misti, oppure a zone particolarmente degradate alle quali assegnare doverose differenze in termini di resistenza.

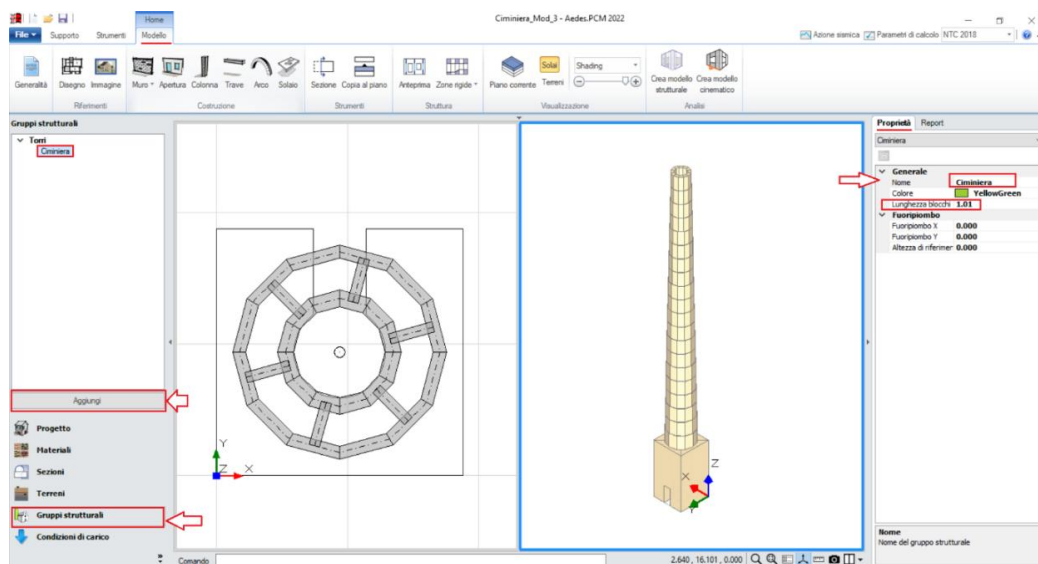


Figura 3-160: Modello Architettonico: creazione Gruppo Strutturale "Ciminiera"

Quindi si selezionano tutti gli oggetti presenti, e si imposta loro l'appartenenza a tale gruppo strutturale, selezionando l'apposito nome dalla relativa finestra delle proprietà:

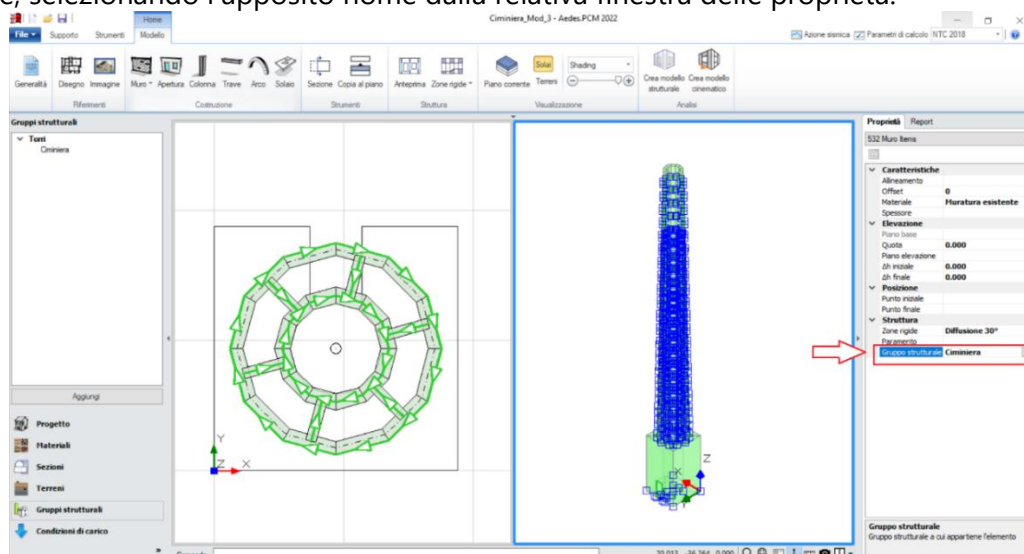


Figura 3-161: Modello Architettonico: assegnazione Gruppo Strutturale "Ciminiera" ai Muri

**N.B.:** l'eventuale presenza di anelli metallici di rinforzo ha generalmente effetto migliorativo in quanto comporta un confinamento della sezione di interesse. In PCM tuttavia si segue quanto indicato nelle linee guida sui rinforzi FRP o CAM, che prevedono gli effetti del confinamento per sezioni "piene"; nel caso di sezioni "cave" come queste, la letteratura tecnica riporta studi ancora a carattere sperimentale.

Al momento pertanto è consigliabile agire sulla definizione del Materiale, creando un nuovo materiale al quale aumentare la resistenza a compressione in modo plausibile a seguito del confinamento e poi applicarlo al concio interessato dalla presenza dell'anello di rinforzo.

In generale, dai risultati delle prove sperimentali condotte negli approfondimenti di letteratura disponibili fino ad oggi è emerso (come ordine di grandezza) un incremento minimo del 15% della resistenza complessiva.

Di seguito si riportano alcuni link da cui consultare le ricerche disponibili al momento:

[https://www.researchgate.net/publication/262493051\\_Comportamento\\_teorico\\_sperimentale\\_di\\_colonne\\_cave\\_in\\_ca\\_confinite\\_con\\_CFRP](https://www.researchgate.net/publication/262493051_Comportamento_teorico_sperimentale_di_colonne_cave_in_ca_confinite_con_CFRP)

[https://www.researchgate.net/publication/49596234\\_Analysis\\_of\\_Reinforced\\_Concrete\\_Hollow\\_Piers\\_BeBehavi\\_Benefits\\_of\\_FRP\\_Confinement](https://www.researchgate.net/publication/49596234_Analysis_of_Reinforced_Concrete_Hollow_Piers_BeBehavi_Benefits_of_FRP_Confinement)

## MODELLAZIONE STRUTTURALE

Dopo aver impostato il modello architettonico secondo quanto sopra indicato, è possibile generare quindi il "Modello Strutturale".

A seguito della generazione del Modello Strutturale, la finestra "Sezioni" è stata popolata con diverse famiglie di "Sezioni generiche", corrispondenti alla forma derivata dalla sezione dei muri alla quota del nodo iniziale di ogni asta: ogni concio sarà quindi rappresentato da una sezione poligonale che collega tutti i punti rappresentativi del contorno; la presenza delle razze interne di collegamento tra le fodere influirà sui parametri geometrico-inerziali di ogni sezione:

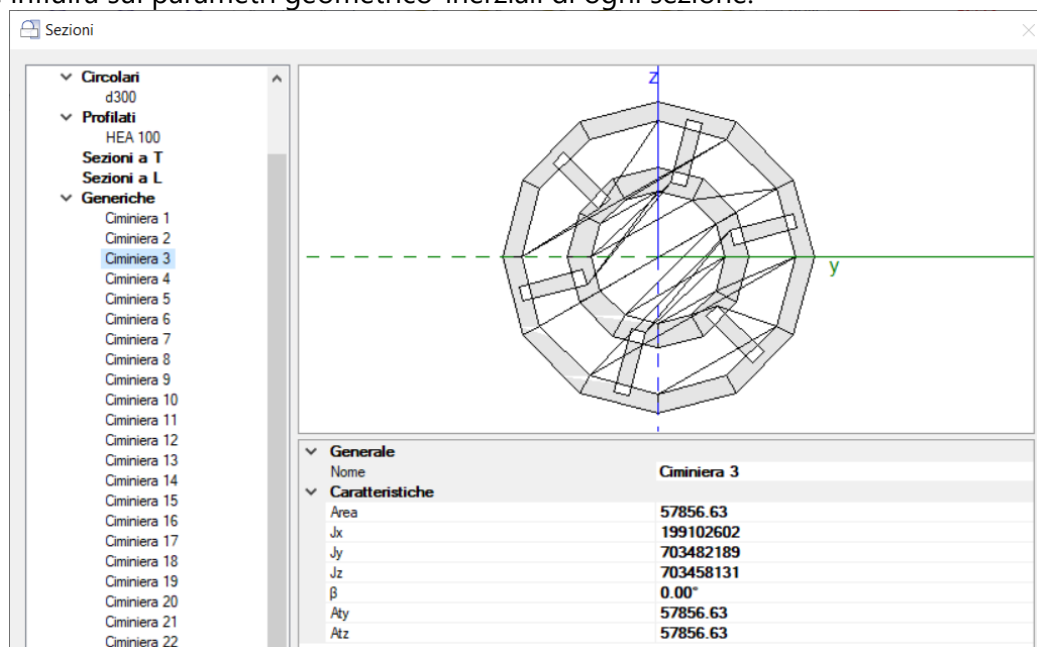


Figura 3-162: Finestra "Sezioni": proprietà di una sezione generica a una quota intermedia della canna fumaria

- ad una qualunque quota, selezionando una zona di incrocio tra due conci, si notano due nodi coincidenti: come già indicato anche per il modello della Torre, uno è il nodo finale del concio inferiore, l'altro è il nodo iniziale del concio superiore. Fra di essi è in automatico instaurata una relazione di rigidità del tipo "master-slave", che garantisce la connessione fra i conci e la continuità

strutturale. Il nodo "master" è per definizione il nodo finale del concio inferiore, il nodo che "lo segue" è quello iniziale del concio superiore (con riferimento ad es. all'asta selezionata nell'immagine seguente, il nodo 11 è il Master, il 12 è il nodo "slave" ad esso collegato)

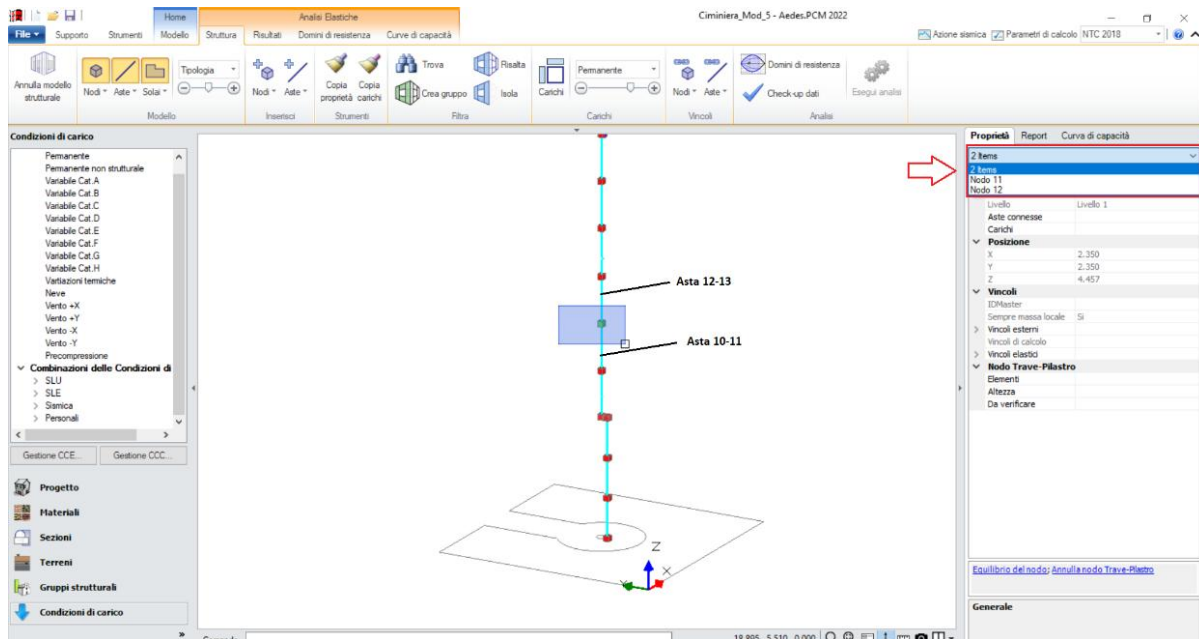


Figura 3-163: Modello Strutturale, esempio legame Master-Slave tra nodi dei conci in elevazione

Lo stesso tipo di relazione vale anche nel caso gli assi baricentrici fra le diverse sezioni dei conci non coincidano: è il caso ad es. della variazione di sezione tra basamento e canna fumaria, dove i due nodi (tra finale del concio inferiore e iniziale del concio superiore) non coincidono; il legame master-slave ne garantisce la connessione, inoltre qualora in fase di analisi dovesse accadere una parzializzazione in qualcuna delle loro sezioni, in automatico il baricentro verrà aggiornato tenendo conto dell'esclusione della parte di sezione parzializzata, adeguando quindi la reale posizione delle loro sezioni:

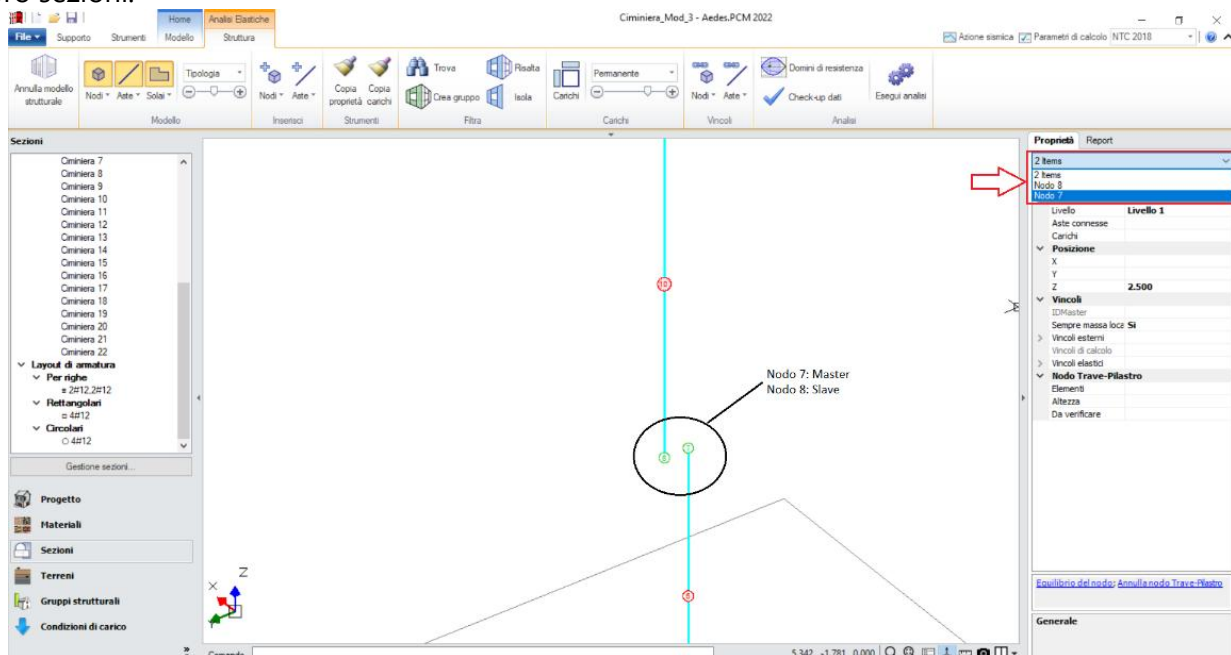


Figura 3-164: Modello Strutturale, legame Master-Slave tra nodi dei conci in elevazione con sezioni diverse

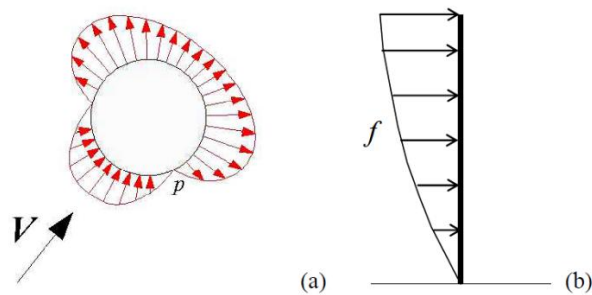
- poiché quindi ogni nodo è gestito con relazioni Master-Slave rispetto ai nodi vicini, l'impostazione della rigidità dei "Livelli" dal Navigatore è di fatto ininfluenza.

In precedenza è stato già anticipato come l'Azione del Vento, anche qualora impostata dalla finestra "Gestione Piani", non abbia influenza sulle aste strutturali (conci) in quanto non applicata per questo tipo di schematizzazione.

In questo caso quindi l'Azione del vento andrà considerata tramite inserimento di carichi aggiuntivi direttamente in ambiente strutturale.

Per quanto riguarda lo studio dell'Azione del Vento sulle Ciminiere, si consiglia di riferirsi alle procedure indicate nelle norme CNR-DT 207/2008: questa normativa infatti costituisce un autorevole documento di comprovata validità che approfondisce in dettaglio le formulazioni per lo studio sotto azione del vento di strutture anche a forma particolare come le ciminiere.

Nello specifico, si riassume la procedura prevista da tali norme; l'azione del vento su una ciminiera a sezione circolare è espressa a partire dalla Fig. 3.1:



L'azione del vento, vista in pianta come agente lungo una generica direzione, investe la ciminiera creando una zona di "Pressioni radiali", alle quali corrispondono dal lato opposto "Depressioni radiali" (p).

Vista invece lungo l'asse di sviluppo verticale, l'azione è rappresentata da forze crescenti (f) dalla base alla sommità.

L'appendice "O" di tali norme descrive inoltre la problematica dei distacchi di vortici: un corpo immerso in un flusso di corrente fluida infatti genera una scia di vortici che si distaccano dal corpo stesso, generando in modo alternato pressioni istantanee sulla superficie del corpo, che sostanzialmente si traducono in forze "Longitudinali" (D), sia "Trasversali" (L) (che torsionali (M) talvolta), rappresentate secondo lo schema seguente:

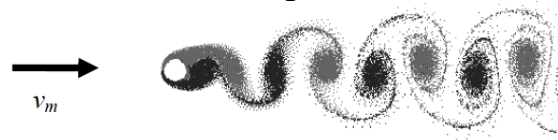


Figura O.1 – Scia di von Kármán per una sezione circolare.

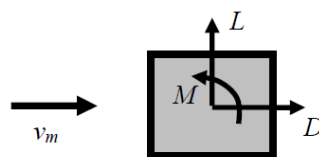


Figura O.2 – Forze globali oscillanti agenti sul piano della sezione.

Viene indicato che è importante tenerne conto quando la frequenza di distacco dei vortici ( $n_s$ ) assume valore molto vicino alla frequenza fondamentale del generico modo di vibrare.

La frequenza di distacco dei vortici può ottenersi dalla seguente formulazione:

$$n_s = \frac{St \cdot v_m}{b} \quad (O.1)$$

dove:

- $St$  è un parametro adimensionale, detto numero di Strouhal (paragrafo O.2), che dipende, principalmente, dalla forma della sezione del corpo;
- $v_m$  è la velocità media del vento (paragrafo 3.2.5);
- $b$  è la dimensione di riferimento della sezione trasversale (paragrafo O.2).

Invertendo l'espressione di cui sopra, si può conoscere la velocità critica, ovvero quel valore di velocità del vento oltre il quale si determina la "condizione di risonanza":

$$v_{cr,i} = \frac{n_{L,i} \cdot b}{St}$$

Poiché gli effetti massimi dei distacchi possono verificarsi a quote diverse in dipendenza del modo di vibrare, la velocità di cui sopra andrebbe calcolata per ogni modo di vibrare adeguando di volta in volta sia il valore della velocità media che quello della sezione trasversale ( $n_{L,i}$  è la frequenza in Hertz del generico modo di vibrare):

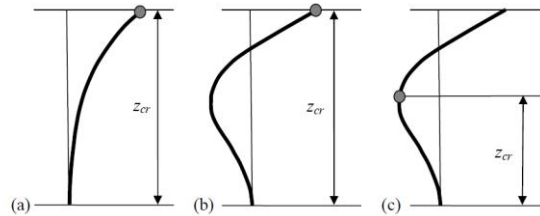


Figura O.3 – Posizione più sfavorevole del distacco critico dei vortici per diverse forme modali.

Si raccomanda inoltre di valutare gli effetti del distacco dei vortici per tutte le velocità critiche che soddisfano la seguente relazione:

$$v_{cr,i} < v_{m,l} \quad (O.3)$$

dove:

- $v_{cr,i}$  è la velocità critica di distacco dei vortici per il modo  $i$ -esimo, nella posizione più sfavorevole Eq. (O.2);
- $v_{m,l}$  è la velocità media del vento (paragrafo 3.2.5), valutata alla quota in cui si attua la velocità critica, per un periodo di ritorno  $T_R$  pari a 10 volte il periodo di riferimento  $T_{R,0}$  (Appendice A),  $T_R = 10 \cdot T_{R,0}$ .

Se è vera la disuguaglianza sopra indicata, occorrerà quindi tenere conto degli effetti dei distacchi dei vortici, calcolando una forza statica equivalente (per unità di lunghezza) ortogonale alla direzione media del vento e all'asse della struttura, calcolata come:

$$F_{L,i}(s) = m(s) \cdot (2\pi \cdot n_{L,i})^2 \cdot \Phi_{L,i}(s) \cdot y_{pL,i} \cdot C_{TR,i} \quad (O.5)$$

dove:

- $s$  è la coordinata strutturale corrente;
- $m(s)$  è la massa della struttura per unità di lunghezza;
- $n_{L,i}$  è la frequenza naturale dell' $i$ -esimo modo di vibrazione in direzione trasversale;
- $\Phi_{L,i}(s)$  è la forma modale dell' $i$ -esimo modo di vibrazione in direzione trasversale, normalizzata a 1 nella coordinata  $\bar{s}$  di massimo spostamento,  $\Phi_{L,i}(\bar{s})=1$ ;
- $y_{pL,i}$  è il valore di picco dello spostamento trasversale della struttura, valutato in corrispondenza della coordinata  $\bar{s}$  (paragrafi O.4.1, O.5 e O.6);
- $C_{TR,i}$  è un parametro adimensionale legato all'accadimento di valori critici della velocità media del vento per elevati periodi di ritorno  $T_R$  (paragrafo O.4.2).

Esprimendo la massa in kg/m, la frequenza in Hz e il valore di picco dello spostamento trasversale in m, la forza  $f_{L,i}$  è ottenuta in N/m (essendo adimensionale la forma modale della struttura).

In definitiva, in PCM per l'azione del Vento si potranno inserire dei Carichi lineari distribuiti aggiuntivi sui singoli conci, andando a definire contemporaneamente per ogni concio:

- un valore per la forza "*longitudinale*", ad es. agente lungo X (cfr. DM2018, §3.3 e CNR-DT 207/08)
- un valore per la forza "*trasversale*" ad es. agente lungo Y (cfr. CNR-DT 207/08) (per distacchi vortici), se effettivamente da considerare, cfr. esempio di calcolo di seguito descritto.

#### **Esempio di calcolo dell'azione del Vento:**

si supponga che la ciminiera sia situata in provincia di Perugia, in un sito avente altitudine s.l.m.  $a_s=465$ m.

La pressione cinetica di picco assume valore pari a:

$$q_p(z) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_r^2 \cdot c_e(z)$$

dove:

- $\rho$ = densità dell'aria (1.25 kg/m<sup>3</sup>);
- $v_r$ = velocità di riferimento di progetto;
- $c_e$ = coefficiente di esposizione, che può essere calcolato come:

$$c_e(z) = k_r^2 \cdot \ln\left(\frac{z_{\min}}{z_0}\right) \cdot c_t(z_{\min}) \cdot \left[ \ln\left(\frac{z_{\min}}{z_0}\right) \cdot c_t(z_{\min}) + 7 \right] \quad \text{per } z \leq z_{\min}$$

$$c_e(z) = k_r^2 \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \cdot c_t(z) \cdot \left[ \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \cdot c_t(z) + 7 \right] \quad \text{per } z > z_{\min}$$

dove:

$k_r, z_0, z_{\min}$  sono, rispettivamente, il fattore di terreno, la lunghezza di rugosità e l'altezza minima, forniti al paragrafo 3.2.3 in funzione della categoria di esposizione del sito;

$c_t$  è il coefficiente di topografia, fornito al paragrafo 3.2.4 in funzione delle caratteristiche topografiche e orografiche del sito.

Esprimendo  $\rho$  in kg/m<sup>3</sup> e  $v_r$  in m/s,  $q_p$  risulta espresso in N/m<sup>2</sup>.

Assumendo inoltre che il sito in esame abbia:

- Distanza dalla costa >30km;
- Classe di Rugosità del terreno: C;
- Coefficiente di topografia  $c_t=1$ .

si calcola che:

- $v_r=27.02$  m/s;
- $k_r=0.2$ ;  $z_0=0.1$ ;  $z_{\min}=5$ .

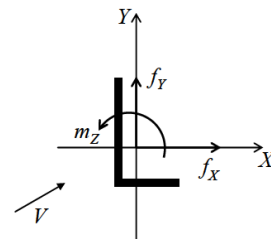
La pressione cinetica di picco è quindi variabile lungo l'altezza a causa della variabilità del coefficiente di esposizione. Considerando che la ciminiera viene suddivisa in ambiente strutturale in conci di altezza 1m, si ricava quindi il profilo della pressione di picco lungo l'altezza calcolando  $c_e(z)$  e di conseguenza  $q_p(z)$ .

Secondo quanto indicato in CNR-DT 207/08 §3.3.4, per edifici snelli come quello in esame (ciminiera, avente rapporto tra altezza e base  $h/b > 5$ ), assumendo nullo sia il valore contemporaneo "in pressione" dell'azione in direzione ortogonale sia quello del momento torcente, l'azione aerodinamica del vento (ad es. in direzione +X) può essere rappresentate da una forza calcolata come:

$$f_X(z) = q_p(z) \cdot l \cdot c_{fX}$$

dove:

- $q_p(z)$  è la pressione cinetica di picco;
- $l$  è la dimensione di riferimento associata al coefficiente  $c_{fX}$ ;
- $c_{fX}$  è il coefficiente di forza.



Il coefficiente di forza  $c_{fX}$  può essere calcolato secondo le seguenti formulazioni (CNR-DT 207/08, §G.10.6):

$$c_{fX_0} = \frac{0,11}{(Re/10^6)^{1,4}} \leq 1,2 \quad (G.22a)$$

$$c_{fX_0} = 1,2 + \frac{0,18 \cdot \log_{10}(10 \cdot k/b)}{1 + 0,4 \cdot \log_{10}(Re/10^6)} \geq 0,4 \quad (k/b \geq 10^{-5}) \quad (G.22b)$$

Tale coefficiente dipende quindi dal numero di Reynolds e da  $k$ , questi ultimi sono parametri collegati alla scabrezza della superficie. In particolare, dalla successiva tab. G.XVII  $\rightarrow k=3$  per Murature.

Il numero di Reynolds invece è calcolato con la seguente formula (CNR-DT 207/08, §3.3.7):

$$Re(z) = \frac{l \cdot v_m(z)}{\nu} \quad (3.16)$$

dove:

- $l$  è una dimensione caratteristica della costruzione o dell'elemento considerato;
- $v_m$  è la velocità media del vento (paragrafo 3.2.5);
- $\nu$  è la viscosità cinematica dell'aria. Di norma, in mancanza di stime precise legate alle condizioni locali del sito ove sorge la costruzione,  $\nu = 15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Esprimendo  $l$  in m e  $v_m$  in m/s,  $Re$  risulta correttamente una grandezza adimensionale.

Risulta quindi possibile calcolare l'azione del vento sui vari conci in altezza.

N.b.: il profilo non è esattamente crescente dal basso verso l'alto, a causa della contemporanea variazione logaritmica di  $c_e(z)$  e rastremazione della sezione.

Altezza z (m)	$c_e(z)$	$q_p(z)$ [N/m <sup>2</sup> ]	b	Re(z)	k/b	$c_{rx}$	$f_x(z)$ [kN/m]
1	1.708	779.14	4.7	8.47E+06	6.38E-04	0.912	3.34
2	1.708	779.14	4.7	8.47E+06	6.38E-04	0.912	3.34
3	1.708	779.14	4.7	8.47E+06	6.38E-04	0.912	3.34
4	1.708	779.14	4.7	8.47E+06	6.38E-04	0.912	3.34
5	1.708	779.14	4.7	8.47E+06	6.38E-04	0.912	3.34
6	1.817	829.08	4.7	8.47E+06	6.38E-04	0.912	3.55
7	1.912	872.25	4.7	8.47E+06	6.38E-04	0.912	3.74
8	1.995	910.34	4.7	8.47E+06	6.38E-04	0.912	3.90
9	2.070	944.49	4.07	7.33E+06	7.37E-04	0.915	3.52
10	2.138	975.46	4.07	7.33E+06	7.37E-04	0.915	3.63
11	2.200	1003.82	4	7.21E+06	7.50E-04	0.915	3.67
12	2.257	1030.01	4	7.21E+06	7.50E-04	0.915	3.77
13	2.311	1054.34	3.91	7.04E+06	7.67E-04	0.916	3.77
14	2.360	1077.08	3.91	7.04E+06	7.67E-04	0.916	3.86
15	2.407	1098.42	3.83	6.90E+06	7.83E-04	0.916	3.85
16	2.451	1118.55	3.83	6.90E+06	7.83E-04	0.916	3.92
17	2.493	1137.59	3.75	6.76E+06	8.00E-04	0.917	3.91
18	2.533	1155.67	3.75	6.76E+06	8.00E-04	0.917	3.97
19	2.570	1172.88	3.67	6.61E+06	8.17E-04	0.917	3.95
20	2.606	1189.31	3.67	6.61E+06	8.17E-04	0.917	4.00
21	2.641	1205.02	3.59	6.47E+06	8.36E-04	0.918	3.97
22	2.674	1220.09	3.59	6.47E+06	8.36E-04	0.918	4.02
23	2.706	1234.55	3.51	6.32E+06	8.55E-04	0.918	3.98
24	2.736	1248.47	3.51	6.32E+06	8.55E-04	0.918	4.02
25	2.765	1261.88	3.43	6.18E+06	8.75E-04	0.919	3.98
26	2.794	1274.83	3.43	6.18E+06	8.75E-04	0.919	4.02
27	2.821	1287.34	3.36	6.05E+06	8.93E-04	0.919	3.98
28	2.848	1299.44	3.36	6.05E+06	8.93E-04	0.919	4.01
29	2.873	1311.16	3.28	5.91E+06	9.15E-04	0.920	3.95
30	2.898	1322.53	3.28	5.91E+06	9.15E-04	0.920	3.99
31	2.923	1333.57	3.2	5.76E+06	9.38E-04	0.920	3.93
32	2.946	1344.29	3.2	5.76E+06	9.38E-04	0.920	3.96
33	2.969	1354.72	3.12	5.62E+06	9.62E-04	0.921	3.89
34	2.991	1364.87	3.12	5.62E+06	9.62E-04	0.921	3.92
35	3.013	1374.76	3.04	5.48E+06	9.87E-04	0.921	3.85
36	3.034	1384.40	3.04	5.48E+06	9.87E-04	0.921	3.88
37	3.055	1393.80	2.96	5.33E+06	1.01E-03	0.922	3.80
38	3.075	1402.97	2.96	5.33E+06	1.01E-03	0.922	3.83
39	3.094	1411.94	2.88	5.19E+06	1.04E-03	0.923	3.75
40	3.114	1420.70	2.88	5.19E+06	1.04E-03	0.923	3.77
41	3.132	1429.26	2.8	5.04E+06	1.07E-03	0.923	3.69
42	3.151	1437.65	2.8	5.04E+06	1.07E-03	0.923	3.72
43	3.169	1445.85	2.72	4.90E+06	1.10E-03	0.924	3.63
44	3.186	1453.89	2.72	4.90E+06	1.10E-03	0.924	3.65
45	3.204	1461.76	2.64	4.76E+06	1.14E-03	0.925	3.57
46	3.220	1469.48	2.64	4.76E+06	1.14E-03	0.925	3.59
47	3.237	1477.05	2.56	4.61E+06	1.17E-03	0.925	3.50
48	3.253	1484.47	2.56	4.61E+06	1.17E-03	0.925	3.52

L'azione longitudinale del Vento ad es. in Direzione X può essere inserita selezionando ogni singolo concio, ed aggiungendo di volta in volta il relativo "Carico Uniforme", da assegnare alla CCE Vento+X o CCE Vento+Y secondo i valori sopra indicati; ne consegue una distribuzione dei carichi simile a quella mostrata di seguito:

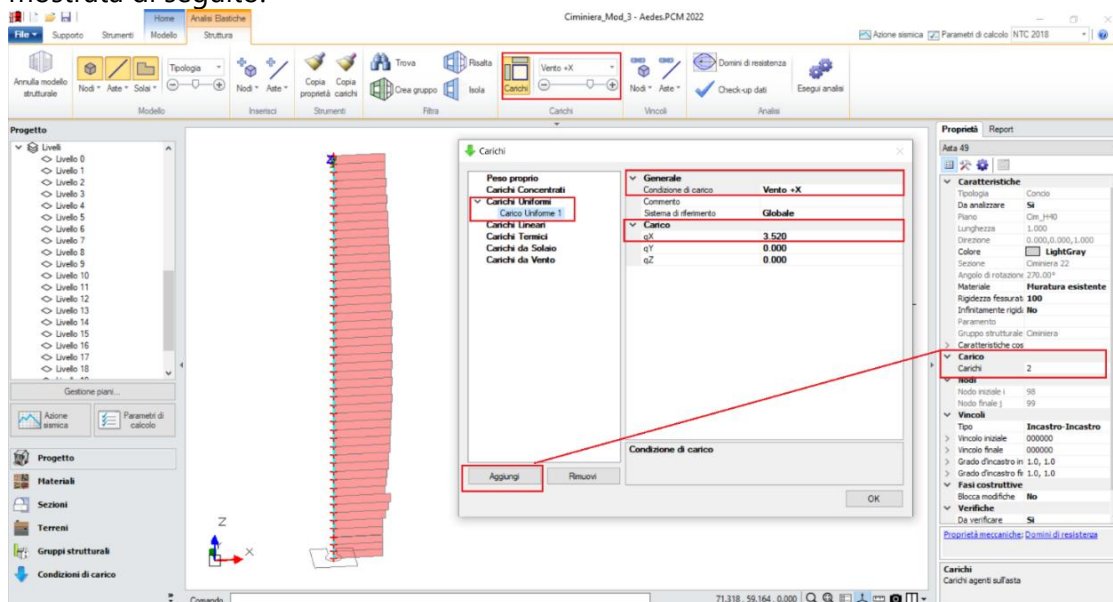


Figura 3-165: Modello Strutturale, inserimento Carichi Lineari uniformi aggiuntivi per Azione da Vento

Quanto sopra riguarda l'Azione del Vento "Longitudinale" (che parimenti andrebbe applicata anche considerando il Vento agente longitudinalmente in direzione Y).

Tuttavia, accanto alla spinta "longitudinale", per strutture molto snelle come questa potrebbero innescarsi fenomeni connessi al "distacco di vortici": questo comporta il dover aggiungere, contemporaneamente, un'azione "Trasversale" (in dir. Y quindi) rappresentativa dei vortici, agente ad una certa quota e solo per una certa parte di struttura in dipendenza dal modo di vibrare.

Dal punto di vista dell'azione trasversale, si avrebbe che: con riferimento al primo modo di vibrare, la cui deformazione massima è in sommità, la frequenza di distacco dei vortici vale:

$$n_s = S_t \cdot v_m / b = 0.2 \cdot 27 / 2.56 = 2.11$$

Dall'analisi modale, il primo modo di vibrare ha frequenza  $F = n_{L,i} = 0.36$  Hertz.

Si ricava quindi la velocità critica:

$$v_{cr,i} = n_{L,i} \cdot b / S_t = 0.36 \cdot 2.56 / 0.2 \approx 4.61 \text{ m/s}$$

Poiché  $v_{cr,i} = 4.61 \text{ m/s} < v_m = 32.59 \text{ m/s}$ , la verifica per distacco dei vortici si rende necessaria.

Più precisamente, andando a controllare i primi modi di vibrare, si evidenzia che la verifica per distacco dei vortici si renderebbe necessaria per i primi cinque modi, dal sesto modo in poi, la velocità critica supera quella media, pertanto non si distaccheranno vortici:

N° Modo	Frequenza [Hertz]	b	$v_{cr,i}$ [m/s]	$v_m$ [m/s]	Verifica distacco vortici
1	0.360	2.56	4.608	32.59	Necessaria
2	0.360	2.56	4.608	32.59	Necessaria
3	1.700	3.43	29.155	32.59	Necessaria
4	1.800	3.43	30.870	32.59	Necessaria
5	4.200	3.75	78.750	32.59	Non Necessaria

Nei casi in cui è vera la disuguaglianza sopra indicata, si calcolerà una forza statica equivalente (per unità di lunghezza) ortogonale alla direzione media del vento e all'asse della struttura, definita come:

$$F_{L,i}(s) = m(s) \cdot (2\pi \cdot n_{L,i})^2 \cdot \Phi_{L,i}(s) \cdot y_{pL,i} \cdot C_{TR,i} \quad (O.5)$$

dove:

$s$  è la coordinata strutturale corrente;

$m(s)$  è la massa della struttura per unità di lunghezza;

$n_{L,i}$  è la frequenza naturale dell' $i$ -esimo modo di vibrazione in direzione trasversale;

$\Phi_{L,i}(s)$  è la forma modale dell' $i$ -esimo modo di vibrazione in direzione trasversale, normalizzata a 1 nella coordinata  $\bar{s}$  di massimo spostamento,  $\Phi_{L,i}(\bar{s})=1$ ;

$y_{pL,i}$  è il valore di picco dello spostamento trasversale della struttura, valutato in corrispondenza della coordinata  $\bar{s}$  (paragrafi O.4.1, O.5 e O.6);

$C_{TR,i}$  è un parametro adimensionale legato all'accadimento di valori critici della velocità media del vento per elevati periodi di ritorno  $T_R$  (paragrafo O.4.2).

Esprimendo la massa in kg/m, la frequenza in Hz e il valore di picco dello spostamento trasversale in m, la forza  $f_{L,i}$  è ottenuta in N/m (essendo adimensionale la forma modale della struttura).

A questo punto, per esaminare i quattro casi dei modi di vibrare sopra evidenziati, potrebbe risultare utile analizzare due modelli separati con l'obiettivo della valutazione "Statica":

- in un primo modello si analizzeranno le azioni da Vento longitudinali in X e Y e quelle da Vento trasversali legate alle forme modali del primo e secondo modo di vibrare (quindi con andamento a mensola in X o Y);

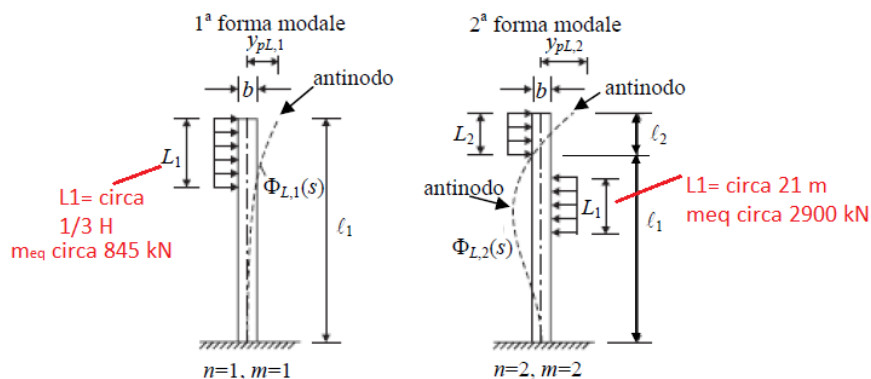
- in un secondo modello invece alle azioni longitudinali in X e Y saranno accompagnate quelle trasversali legate alla forma modale del terzo e quarto modo di vibrare (ovvero con il doppio flessa relativo in altezza).

Per quanto riguarda la prima forma modale di vibrazione (andamento a mensola):

- la norma indica che è ragionevole considerare come "massa coinvolta" dal distacco dei vortici quella corrispondente al "terzo in altezza" (CNR-DT 207/08, §Appendice I.4), ovvero quella massa di struttura corrispondente ad  $H/3$ , con  $H$ = altezza canna fumaria.

Nel caso in esame, la canna fumaria è alta 40m e quindi  $H=40m/3 \approx 13m$  a partire dalla sommità: dallo sforzo normale a questa quota si ottiene una massa di circa 845 kN.

In merito invece alla successiva forma modale di vibrazione, si può correlare la lunghezza di calcolo delle masse allo spostamento massimo in sommità: se il rapporto spostamento/diametro  $< 0.1$ , allora le lunghezze di riferimento possono assumersi come  $L \approx 6 \cdot b$  (con  $b$ = diametro nella sezione interessata): per la deformata in sommità  $L_2=15m$ , per quella intermedia  $L_1 \approx 21m$ , cui corrispondono le seguenti masse:  $m_1=1006kN$ ,  $m_2=2924$  kN.



Tuttavia, arrivati a questo livello, le formulazioni dei singoli sotto-parametri che intervengono nell'equazione O.8 diventano decisamente molto complesse, al punto probabilmente da richiedere un approfondimento molto oneroso rispetto all'obiettivo globale.

Un parametro decisivo in tal senso è il "Numero di Scruton"  $S_c$  (CNR-DT 207/08 §O.3): questo è un parametro adimensionale che, in base al suo valore, può già dare un'idea al progettista sulle reali necessità o meno di ulteriori approfondimenti:

$$S_{c_i} = \frac{4\pi \cdot m_{e,i} \cdot \xi_i}{\rho \cdot b^2}$$

- $m_{e,i}$  è la massa equivalente per unità di lunghezza relativa all' $i$ -esimo modo di vibrazione trasversale (Appendice I.4);
- $\xi_i$  è il rapporto di smorzamento relativo al critico dell' $i$ -esimo modo, avendo escluso il contributo dello smorzamento aerodinamico (Appendice I.6);
- $\rho$  è la densità dell'aria, il cui valore raccomandato è  $1.25 \text{ kg/m}^3$  (paragrafo 3.2.7);
- $b$  è la dimensione di riferimento della sezione trasversale, valutata nella posizione in cui avviene il fenomeno critico di distacco dei vortici.

- se  $S_c > 30$ , il rischio di sincronizzazione (ovvero di risonanza) è molto ridotto ed il fenomeno dei distacchi dei vortici in genere non è talmente rilevante da diventare "pericoloso" per la struttura;
- se  $5 < S_c < 30$ , il fenomeno del distacco dei vortici diviene abbastanza rilevante, in quanto sensibile alla variazione di diversi parametri;
- se  $S_c < 5$ , il distacco dei vortici assume molta rilevanza e quindi diviene molto pericoloso.

Nel caso in esempio, per ognuno dei quattro modi di vibrare indicati, adottando i valori delle masse equivalenti come sopra indicato,  **$S_c > 30$  quindi è ragionevole aspettarsi che il distacco dei vortici sia un fenomeno trascurabile.**

## RISULTATI DELLE ANALISI

Il modello così generato può essere analizzato: per prima cosa si osserva l'analisi modale ed i suoi risultati.

Vengono calcolati 22 modi, di cui il principale in direzione Y ha periodo  $T=2.756$  sec e massa partecipante circa 34%; il secondo è il modo principale in direzione X, con simile massa partecipante e periodo  $T=2.747$  sec. I periodi parecchio alti si ritengono coerenti con la struttura anch'essa particolarmente alta.

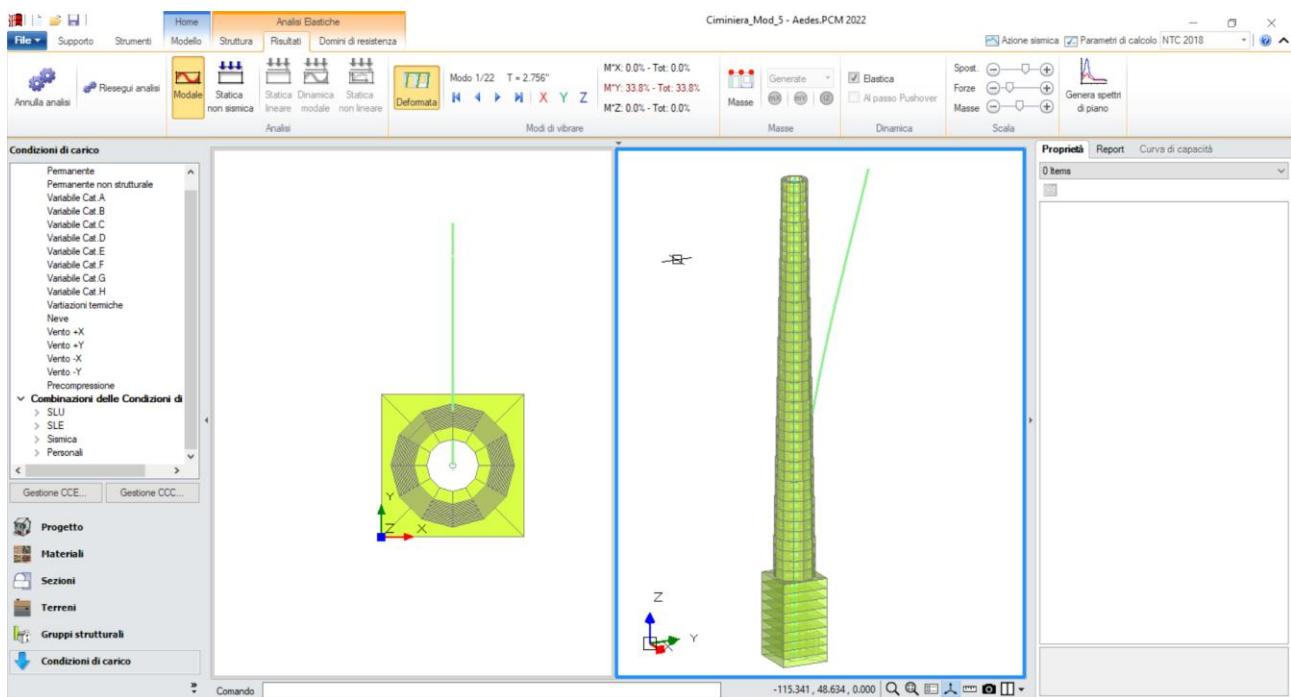


Figura 3-166: Ciminiera: Modi principali, Periodi 2.756 sec e 2.747 sec, Massa Partecipante 34%

È importante anche tener conto dei modi superiori, questi infatti possono dare informazioni anche in merito ad eventuali cinematismi che possono interessare ad esempio solo le parti alte superiori della ciminiera; ad esempio possono studiarsi cinematismi di distacco o ribaltamento su singole porzioni in ambiente cinematico (di seguito le deformate modali dei primi sei modi di vibrare):

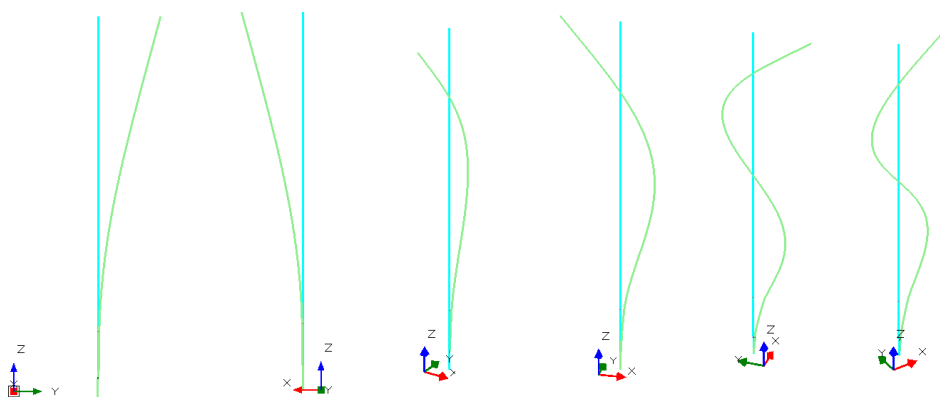


Figura 3-167: Ciminiera: Deformate modali dei modi superiori

Anche l'Analisi Statica è coerente: il diagramma dello sforzo normale è crescente dalla sommità alla base:

- in Combinazione Sismica (passo 0 della Pushover) la ciminiera risulta verificata:

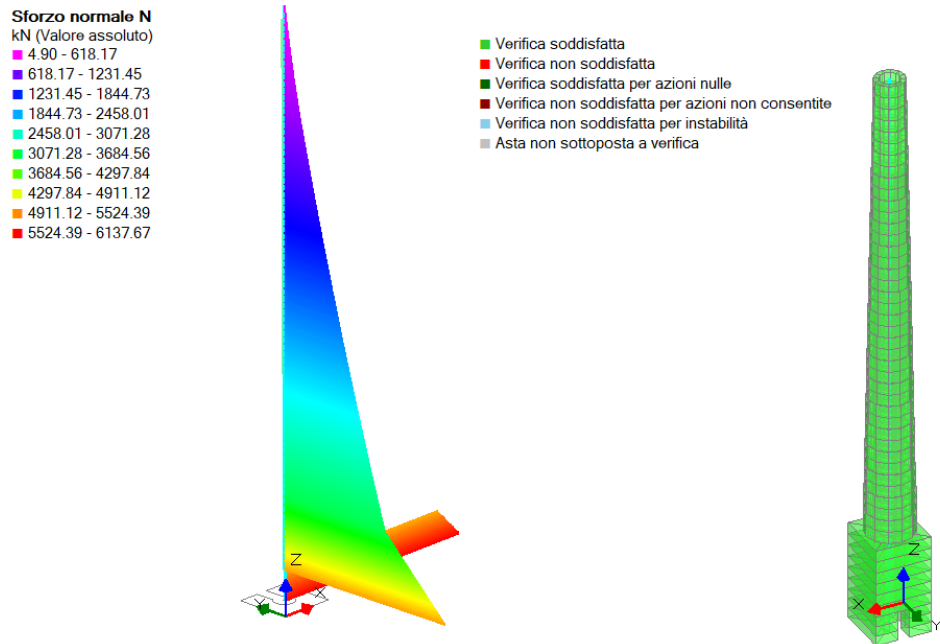


Figura 3-168: Ciminiera: Analisi Statica Non Sismica, Combinazione Sismica, Verifiche soddisfatte

- in Combinazione SLU, ad es. per Carico da Vento in Direzione X, i conci inferiori della canna fumaria e del basamento non risultano verificati a pressoflessione: il risultato è coerente ed è dovuto essenzialmente al Momento Flettente dovuto ai carichi da vento (gli ultimi conci del basamento intercettano la porta, quindi hanno una sezione minore e meno area resistente):

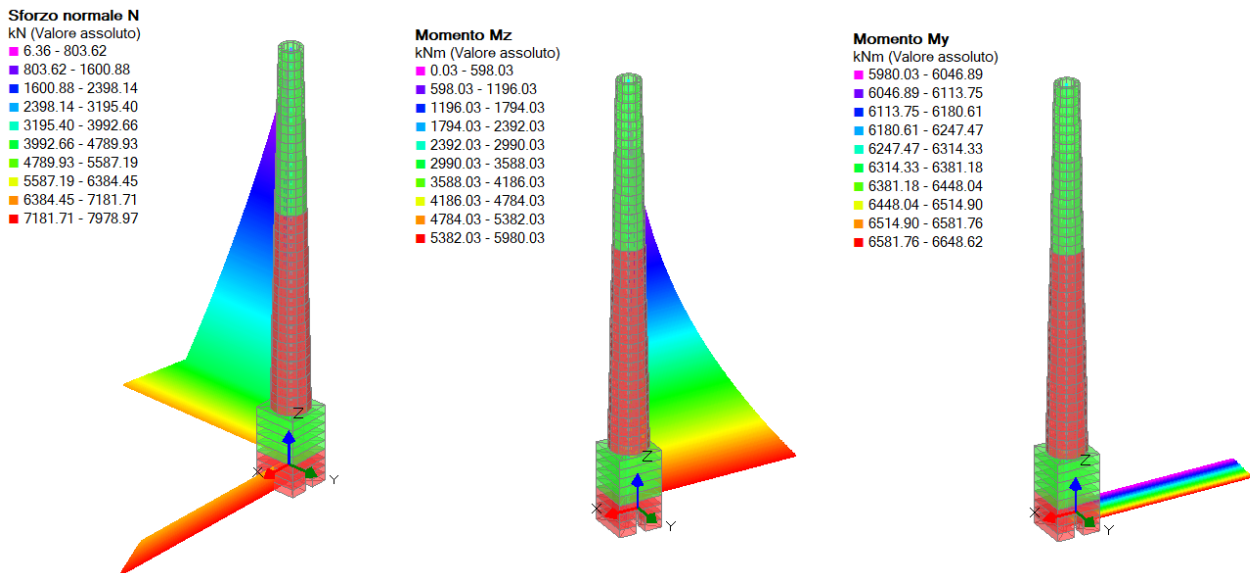


Figura 3-169: Ciminiera: Analisi Statica Non Sismica, Combinazione SLU n.1, Verifiche non soddisfatte

Visualizzando ad es. il dominio di resistenza del concio di base della canna fumaria, è possibile notare come il Momento  $M_z$  faccia ricadere il punto di sollecitazione fuori dal dominio tridimensionale:

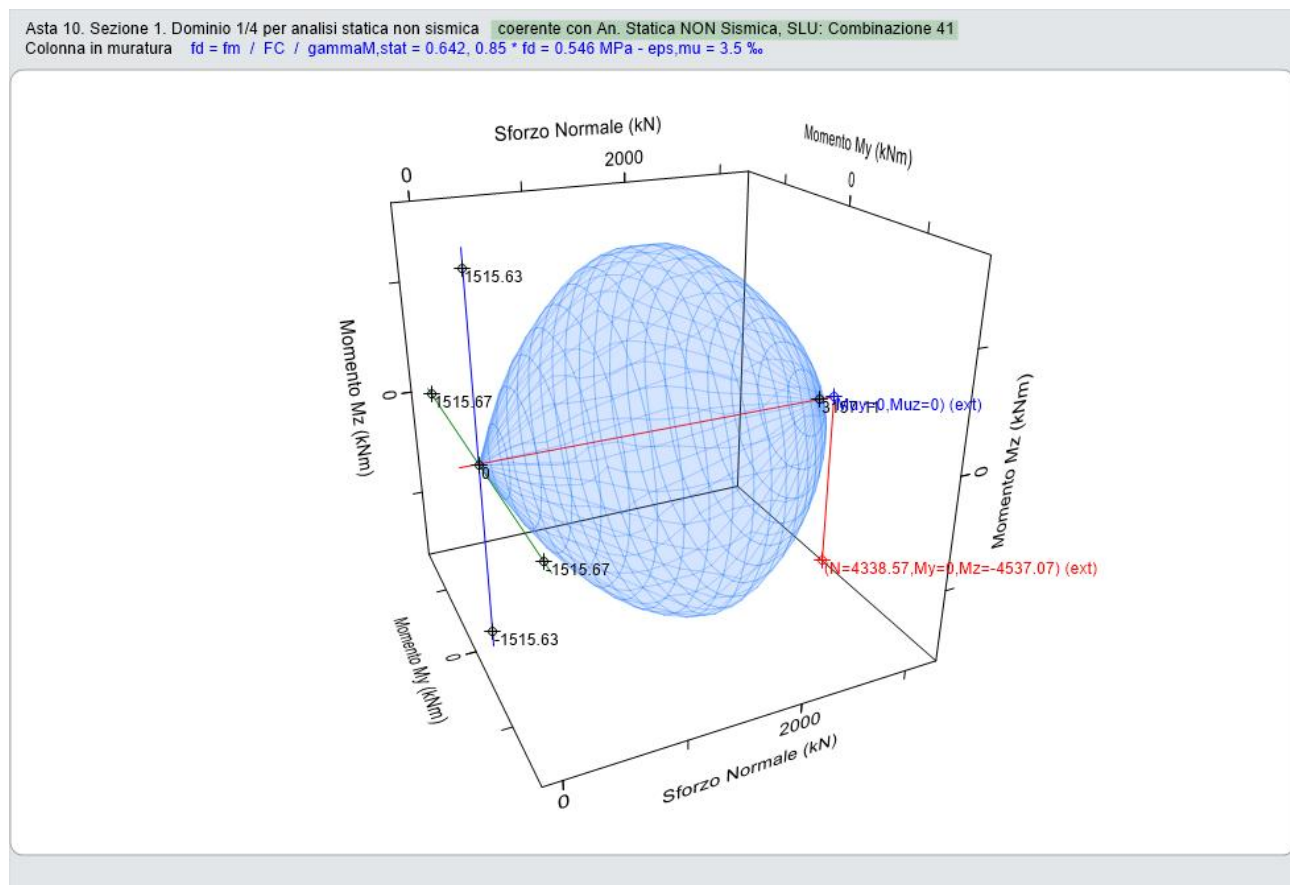


Figura 3-170: Ciminiera: Analisi Statica Non Sismica, Dominio di Resistenza per Concio di Base

Nei riguardi dell'Analisi Sismica, è possibile eseguire un'Analisi Pushover in direzione X e Y, assumendo come Punto di Controllo l'ultimo Nodo in sommità (nei "Parametri di calcolo", scheda "Pushover(2)"): la struttura diventa labile per crisi del concio inferiore della canna fumaria, inoltre si evidenzia la parzializzazione della parte di struttura situata nella porzione "opposta" alla spinta; l'analisi incrementale aggiorna di volta in volta la reale sezione dei conci, escludendo la parte parzializzata (in grigio); è inoltre interessante notare la diversità della Distribuzione delle Forze in base alle varie curve:

- le curve con distribuzione "A" massimizzano la spinta in corrispondenza di circa  $H/3$  dalla sommità;
- le curve con distribuzioni "C" e "D" mostrano una distribuzione variabile delle forze in quanto dipendenti dalle forze dinamiche e dalle forme modali;
- le curve con distribuzione "E" infine mostrano i massimi valori di forza alla base, in quanto legate alla massa che aumenta ovviamente verso il basso.

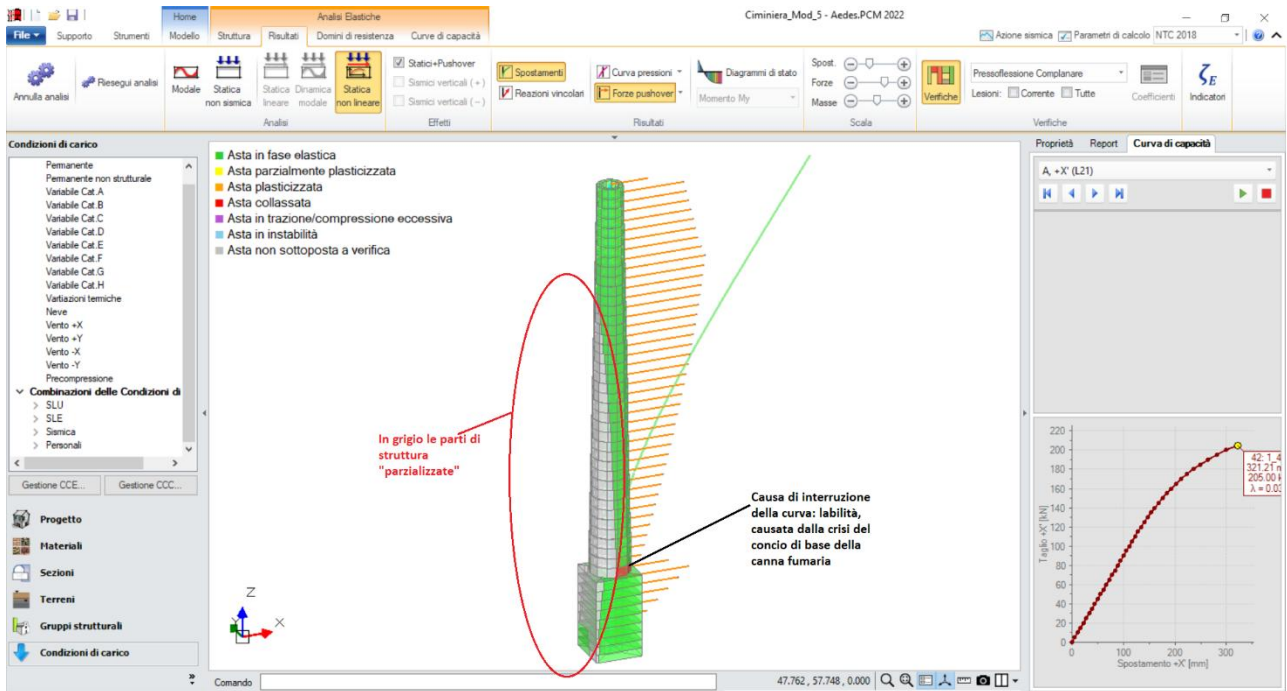


Figura 3-171: Ciminiera: Analisi Pushover, Curva A +X

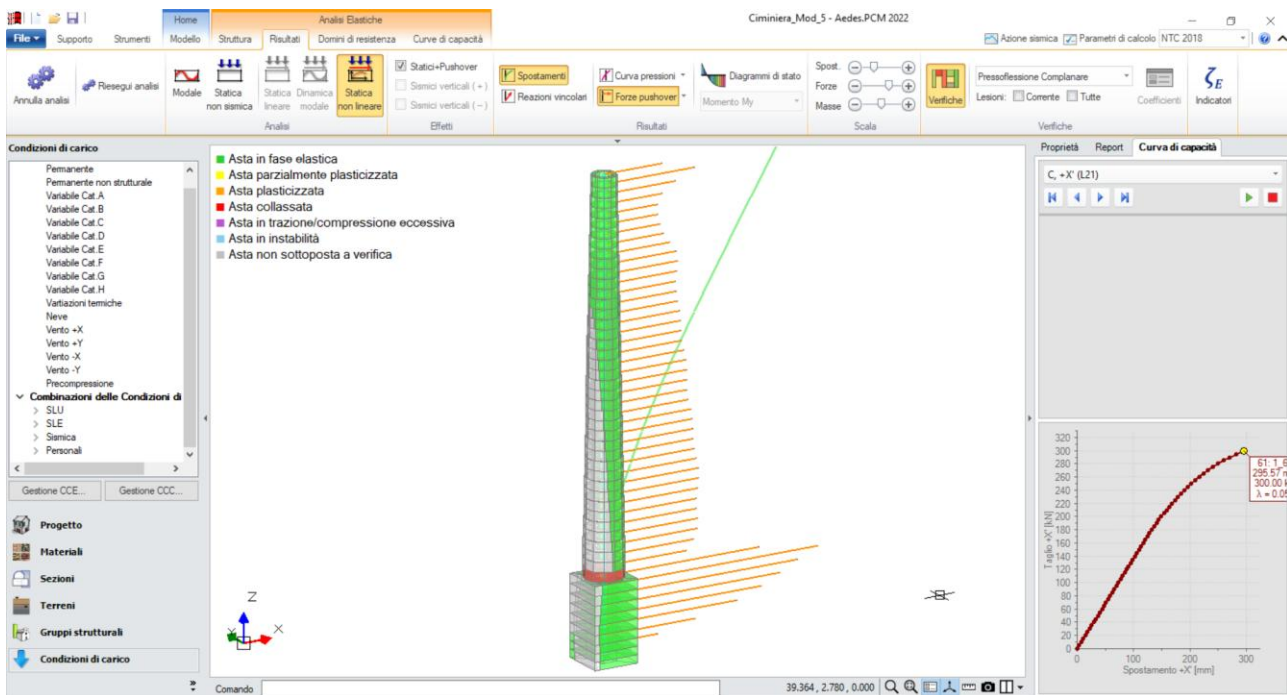


Figura 3-172: Ciminiera: Analisi Pushover, Curva C +X

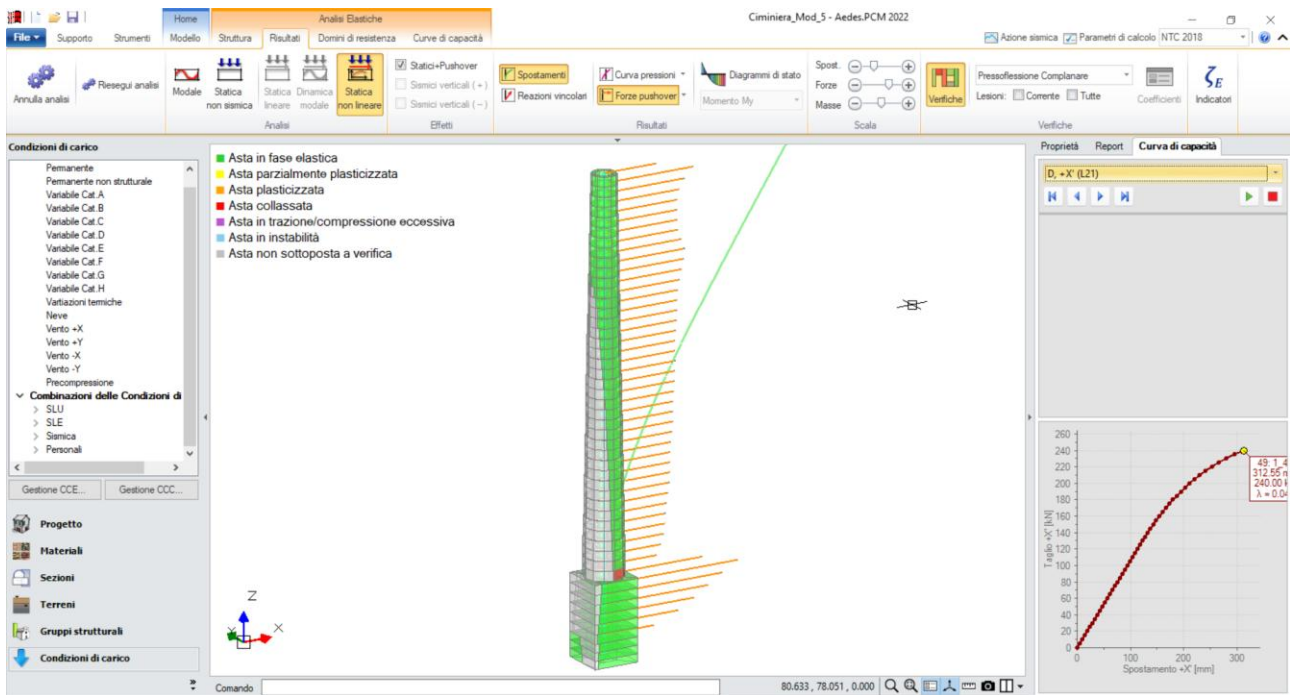


Figura 3-173: Ciminiera: Analisi Pushover, Curva D +X

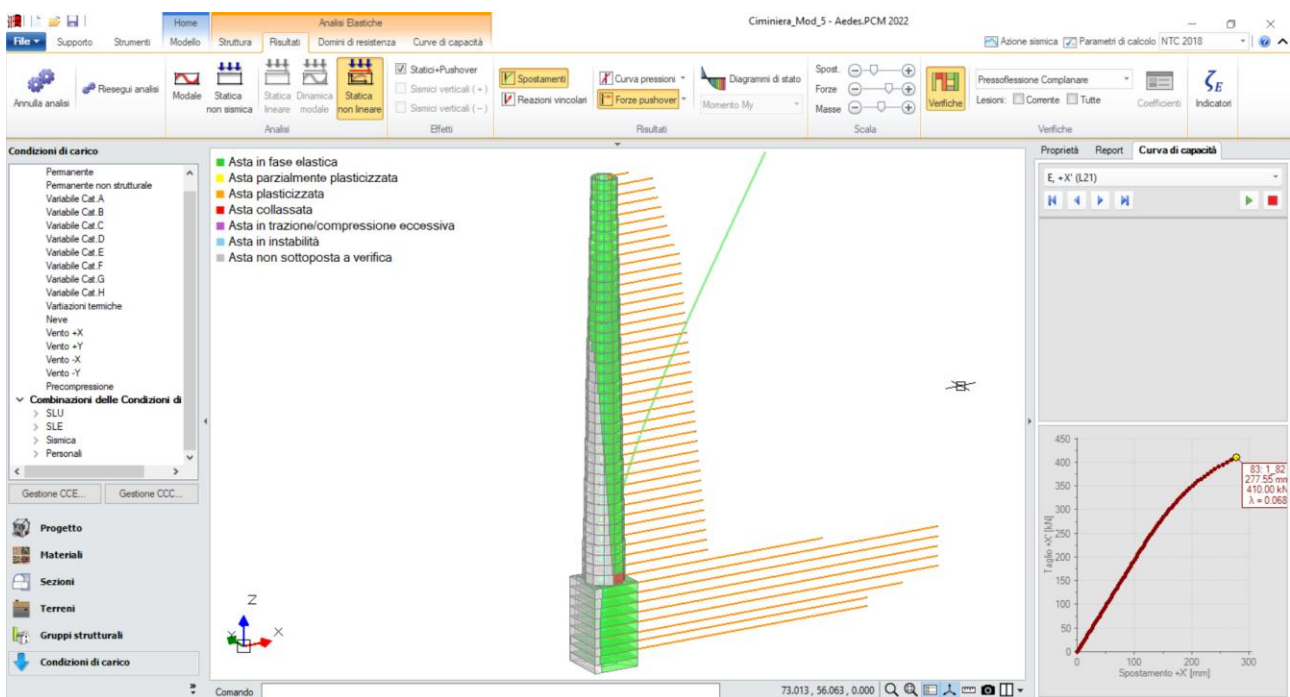


Figura 3-174: Ciminiera: Analisi Pushover, Curva E +X

N.B.: in strutture molto snelle come questa ciminiera, l'Analisi Pushover potrebbe interrompersi precocemente a causa del raggiungimento della soglia di labilità (di default considerata pari a 100). Tuttavia, per ottenere un andamento più coerente delle curve come mostrato nel documento, è ragionevole aumentare la soglia di labilità (scrivendo "avanzate" nella riga di comando in basso di PCM (e poi Invio da tastiera) , ed aumentando la soglia di labilità dalla finestra delle proprietà a lato, portando ad es. il valore a 1000). In questo modo si apprezza la reale causa del termine della curva dovuta al raggiungimento della crisi nel concio di base.

Anche in questo caso, è possibile osservare il dominio di resistenza dell'ultimo concio alla base della canna fumaria: in tal caso, si apprezza il "percorso" seguito dai punti di sollecitazione durante i passi incrementali della Pushover, che la fanno terminare quando il punto raggiunge la frontiera, limite ultimo di verifica:

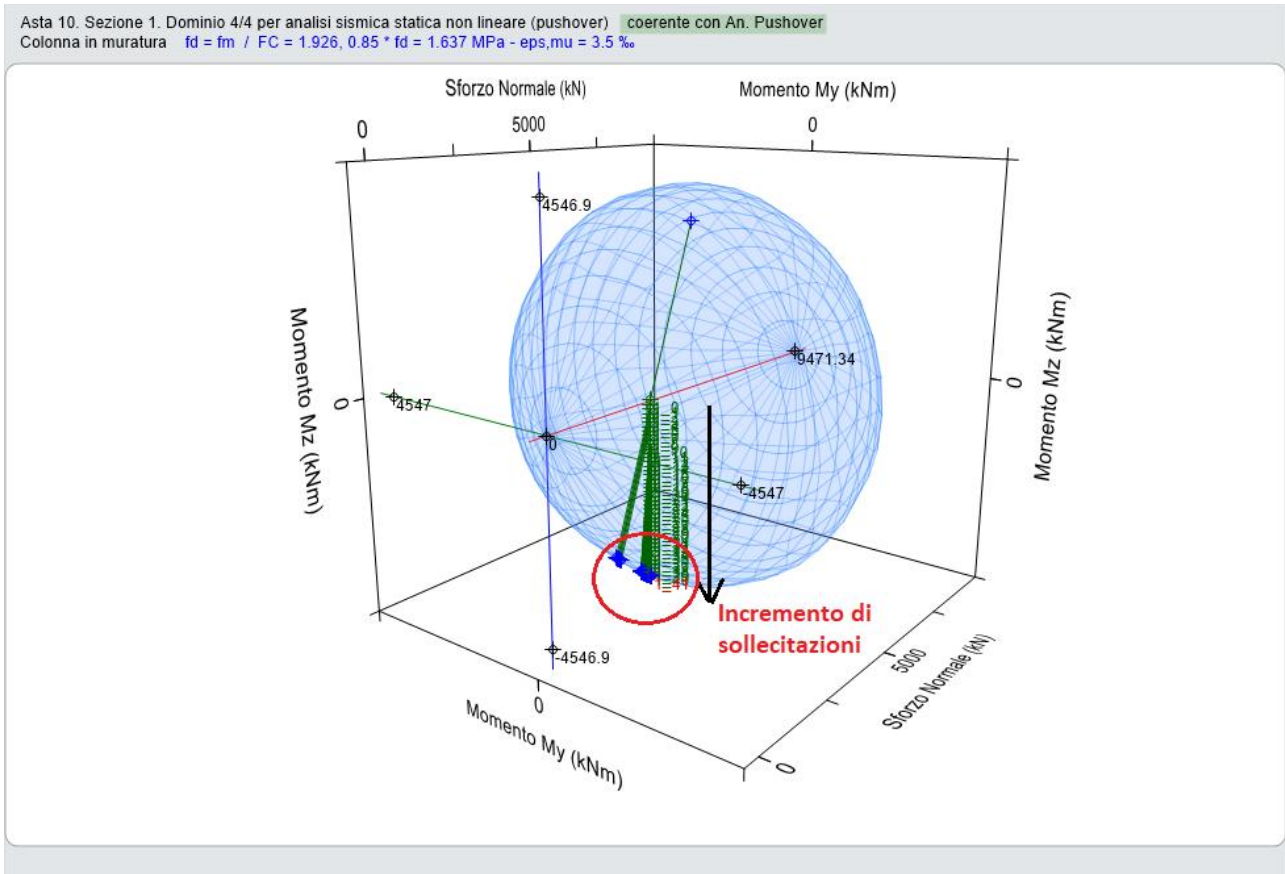


Figura 3-175: Ciminiera: Analisi Pushover, Dominio di Resistenza per Concio di Base

## **4. ESEMPI APPLICATIVI PER ELEMENTI COSTRUTTIVI STORICI E MONUMENTALI**

## 04\_001\_Chiesa\_SanSilvestro

### File di riferimento:

04\_001\_Chiesa\_SanSilvestro\_Longitudinale

04\_001\_Chiesa\_SanSilvestro\_Cinematismi

### Parole chiave:

- MECCANISMI DI COLLASSO
- CINEMATISMO GENERICO COLONNATO LONGITUDINALE

In questo esempio si descriverà lo studio di vulnerabilità della Chiesa di San Silvestro a L'Aquila, sia utilizzando una metodologia semplificata LV1 sia modellando la struttura con Aedes.PCM come se fosse affrontato uno studio LV3.

A corredo della descrizione operativa delle funzioni di PCM, si riportano confronti con calcoli manuali e esempi pubblicati nella seguente bibliografia di riferimento:

[1] Circolare n. 26/12/2010, "Linee guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale."

[2] A. Borri, G. Cangi, M. Caraboni, A. Giancarlo, F. Menghini, L. Procacci, R. Vetturini, "Sisma del 6 Aprile 2009 in Abruzzo e BBCC: il caso della Chiesa di San Silvestro a L'Aquila.", Bollettino Ingegneri n°4-2010, pp. 3-24.

L'edificio è studiato nell'articolo proposto dal Bollettino degli Ingegneri n°4 – 2010, "Sisma del 6 Aprile 2009 in Abruzzo e BBCC: il caso della Chiesa di San Silvestro a L'Aquila", di A. Borri et all. [2]; gli elaborati progettuali sono pubblicamente disponibili all'indirizzo web:

<http://www.drabr-lavoripubblici.it/2013/07/procedura-aperta-per-laffidamento-della-progettazione-esecutiva-e-dellesecuzione-dei-lavori-di-consolidamento-e-restauro-della-chiesa-di-san-silvestro/>

Nel file "*04\_001\_Chiesa\_SanSilvestro\_Longitudinale.vdml*" verrà analizzato il meccanismo di collasso di un colonnato longitudinale interno alla chiesa.

Invece nel file "*04\_001\_Chiesa\_SanSilvestro\_Cinematismi.vdml*" saranno creati gli altri cinematismi studiati nella pubblicazione.

Infatti, le campagne di indagini condotte a seguito dei danni subiti sulle chiese in occasione dei più recenti eventi sismici hanno evidenziato come il comportamento sismico di queste strutture possa essere rappresentato attraverso la scomposizione della struttura in macro-elementi, ovvero elementi architettonici caratterizzati da una risposta strutturale sostanzialmente indipendente rispetto alla chiesa nel suo complesso.

Una modellazione globale della chiesa nel suo insieme assume significato sol nel caso questa risulti avere una forma compatta e simmetrica rispetto alle due direzioni, con buona tessitura muraria e adeguato grado di ammorsamento delle pareti.

I macroelementi individuati potranno poi essere studiati attraverso analisi lineari o non lineari, anche se le Linee Guida attuali ritengono più significative analisi cinematiche lineari o non lineari.

A questo punto, rimane da condurre la scelta su quali possano effettivamente essere i cinematismi significati per una chiesa: le linee guida in tal senso, basandosi sull'osservazione delle chiese danneggiate a seguito del sisma, elencano 28 meccanismi di danno che si verificano frequentemente.

Ovviamente il progettista potrà liberamente scegliere di ampliare tale elenco sulla base di quanto ritenuto più opportuno.

I macro-elementi sopra citati sono:

- Facciata;
- Protiro-Nartece;
- Aula;
- Navata;
- Transetto;
- Arco Trionfale;
- Cupola, Tamburo / Tiburio;
- Lanterna;
- Abside;
- Elementi di Copertura;
- Cappelle;
- Aggetti;
- Torre Campanaria;
- Cella Campanaria.

Per ognuno di questi elementi vengono elencati meccanismi di collasso di I modo e II modo. Questi meccanismi vengono anche utilizzati per la compilazione delle schede di danno secondo il metodo semplificato previsto per LV1: si ricorda che LV1, che comprende analisi qualitative e consente l'adozione di modelli semplificati, può essere utilizzato per la determinazione dell'indice di vulnerabilità e per la valutazione di quali siano le situazioni più critiche, in modo da programmare gli interventi futuri. Nel caso in cui venga effettuato il progetto di tali interventi che modifichino il comportamento della struttura, sarà necessaria una valutazione LV3.

La metodologia semplificata LV1 si basa sulla suddivisione in macro-elementi, corrispondenti ai meccanismi di collasso, e per ognuno di questi vengono valutate le presenze degli indicatori di vulnerabilità (ad es. elementi di elevata snellezza, elementi spingenti, grandi aperture, ecc...) e di presidi antisismici (quali catene, elementi di contrasto, buon ammorsamento, ecc...). A tali indicatori di vulnerabilità e presidi antisismici viene assegnato un punteggio in base alla loro efficacia.

L'indice di vulnerabilità dell'intero edificio può essere infine calcolato con la seguente formula:

$$i_v = \frac{1}{6} \frac{\sum_{k=1}^{28} \rho_k (v_{ki} - v_{kp})}{\sum_{k=1}^{28} \rho_k} + \frac{1}{2}$$

dove:

- $v_{ki}$ : punteggio del rilievo degli indicatori sismici relativi al k-esimo meccanismo di collasso;
- $v_{kp}$ : punteggio del rilievo dei presidi antisismici relativi al k-esimo meccanismo di collasso;
- $\rho_k$ : peso attribuito al k-esimo meccanismo di collasso.

Per avere indicazioni sui coefficienti sopra indicati si possono consultare le Linee Guida [1].

Una volta definito l'indice di vulnerabilità, sempre le Linee Guida [1] forniscono delle formule per il calcolo dell'accelerazione relativa a SLD e SLV:

$$a_{SLD} S = 0.025 \cdot 1.8^{2.75 - 3.44i_v}$$

$$a_{SLV} S = 0.025 \cdot 1.8^{5.1 - 3.44i_v}$$

Da tali valori, è possibile calcolare il relativo periodo di ritorno, attraverso l'interpolazione tra valori noti:

$$T_{SLV} = T_{R1} \cdot 10^{\log(T_{R2}/T_{R1}) \cdot \log(a_{SLV}S/F_C a_1 S_1) / \log(a_2 S_2 / a_1 S_1)}$$

dove:

- $T_{R1}, T_{R2}$ : periodi di ritorno per i quali è fornita la pericolosità sismica, all'interno dei quali si troverà  $T_{R,SLV}$ ;
- $a_1 S_1, a_2 S_2$ : valori di accelerazione su suolo rigido e del coefficiente che tiene conto di stratigrafia e topografia relativi ai due periodi di ritorno  $TR1$  e  $TR2$ .

Infine, con  $T_{SLV}$  è possibile calcolare l'Indice di sicurezza sismica:

$$I_{S,SLV} = \frac{T_{SLV}}{T_{R,SLV}}$$

Di seguito si calcolerà l'indice di sicurezza secondo LV1, studiando in parallelo i meccanismi in PCM come se si eseguisse un'analisi di vulnerabilità dello stato di fatto secondo LV3. Lo scopo di questo approfondimento è infatti mostrare come con PCM sia possibile studiare diversi meccanismi di collasso anche per edifici monumentali, confrontando quindi la risposta finale data da un'analisi più di dettaglio secondo LV3 rispetto alla metodologia semplificata LV1.

Per semplicità, nei calcoli si utilizzerà  $S=1$  (nessuna amplificazione per stratigrafia o topografia) ed  $FC=1$ . Nella realtà, ovviamente il progettista dovrà valutare le reali condizioni del sottosuolo, nonché un adeguato valore del Fattore di Confidenza: una possibile stima per quest'ultimo, in assenza di ulteriori specifiche, può essere data dalla formula:

$$F_C = 1 + \sum_{k=1}^4 F_{Ck}$$

dove:  $F_{Ck}$  sono i Fattori parziali di confidenza.

La conoscenza della storia evolutiva della costruzione è una condizione necessariamente richiesta dalle "Linee guida per la valutazione e la riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale", specialmente per strutture monumentali come le chiese.

Per tale motivo, di seguito si riporta una breve descrizione della struttura.

La chiesa di San Silvestro all'Aquila ha subito ricostruzioni e variazioni strutturali nel corso dei secoli. Le documentazioni storiche portano a considerare il progetto originale e parte della prima fase di costruzione alla fine del '200. A causa degli eventi sismici del XIV secolo, la chiesa ha subito numerose ricostruzioni e modifiche rispetto al progetto originario. Infine, verso la fine del '500 il vano di base dell'antico torrione addossato alla chiesa venne adibito a cappella e quindi modificato con l'inserimento di una copertura a cupola a base ottagonale impostata su pianta quadrata.

La struttura è composta dalla chiesa, dal campanile e dalla cappella laterale. Il campanile presenta una sezione muraria considerevole (circa 1.50m) rispetto alle sue dimensioni, che gli conferisce una rigidità notevolmente maggiore rispetto alle restanti componenti della struttura. Il campanile è costituito da una muratura irregolare, mascherato da un paramento esterno di muratura regolare (peraltro il reale materiale interno è visibile attraverso le parti lesionate).

La cappella laterale è stata derivata da una preesistente torre delle antiche mura della città, anch'essa quindi con importante sezione muraria, con paramento esterno che nasconde la reale tipologia di muratura, inoltre queste è solo accostata, non è presente un effettivo ammorsamento.

All'interno della chiesa si trovano tre navate, separate fra loro da una serie di arcate, con la navata larga circa il doppio di quelle laterali. Lo spessore delle pareti è di circa 90cm, mentre le arcate sorreggono una parete da 80cm alta 5m. La muratura costituente la chiesa esternamente presenta paramenti comunemente denominati "apparecchi aquilini", ovvero una particolare tessitura muraria caratterizzata da conci in pietra calcarea di sezione quadrata, di circa 10x10x20cm e 10x20x20cm. Il paramento interno si presume sia costituito da scaglie in pietra di varia pezzatura legate da malta aerea. La copertura della chiesa è formata da capriate lignee.

## MODELLAZIONE ARCHITETTONICA

Sulla base di quanto descritto in precedenza, il percorso di modellazione in PCM inizia sempre dalla valutazione plano-altimetrica della struttura. Partendo dalla pianta, risultano evidenti le diverse parti che compongono la chiesa, più in specifico: la chiesa vera e propria con sviluppo allungato, in cui si notano le tre navate separate da arcate, l'impronta quadrata del campanile e la cappella laterale:

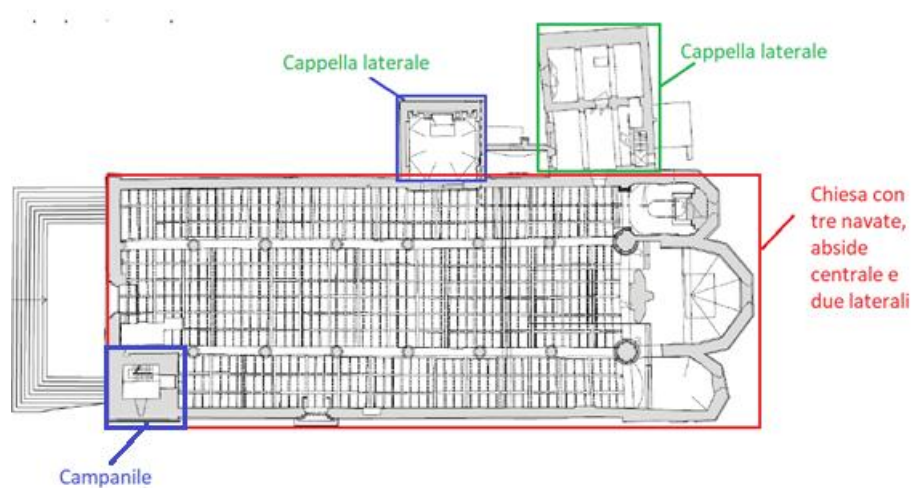


Figura 3-176: Chiesa San Silvestro: Pianta, con identificazione delle parti che la compongono

La gestione dei piani è studiata in base alla diversa altimetria degli elementi prima descritti (chiesa, campanile e cappella). In tal caso, sono stati considerati cinque piani: i primi tre piani servono per la definizione del corpo centrale della chiesa, gli ultimi due invece sono stati utilizzati per la definizione del campanile:

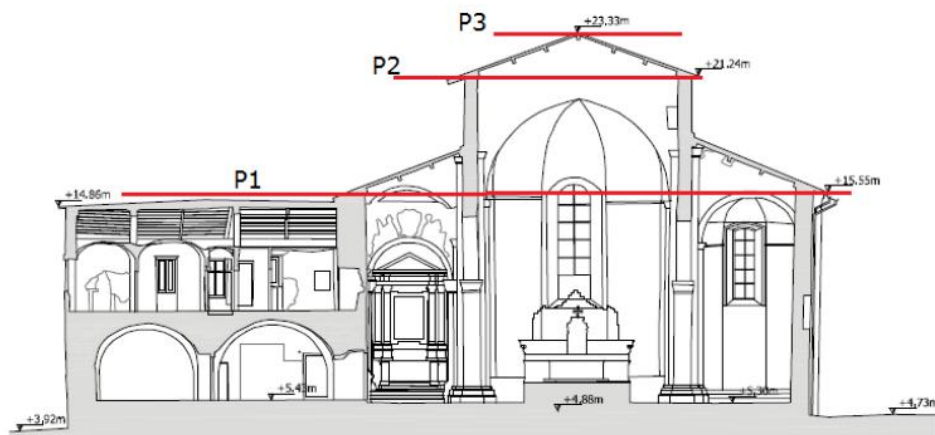


Figura 3-177: Chiesa San Silvestro: Sezione, con indicazione altezze dei primi tre piani inseriti in PCM

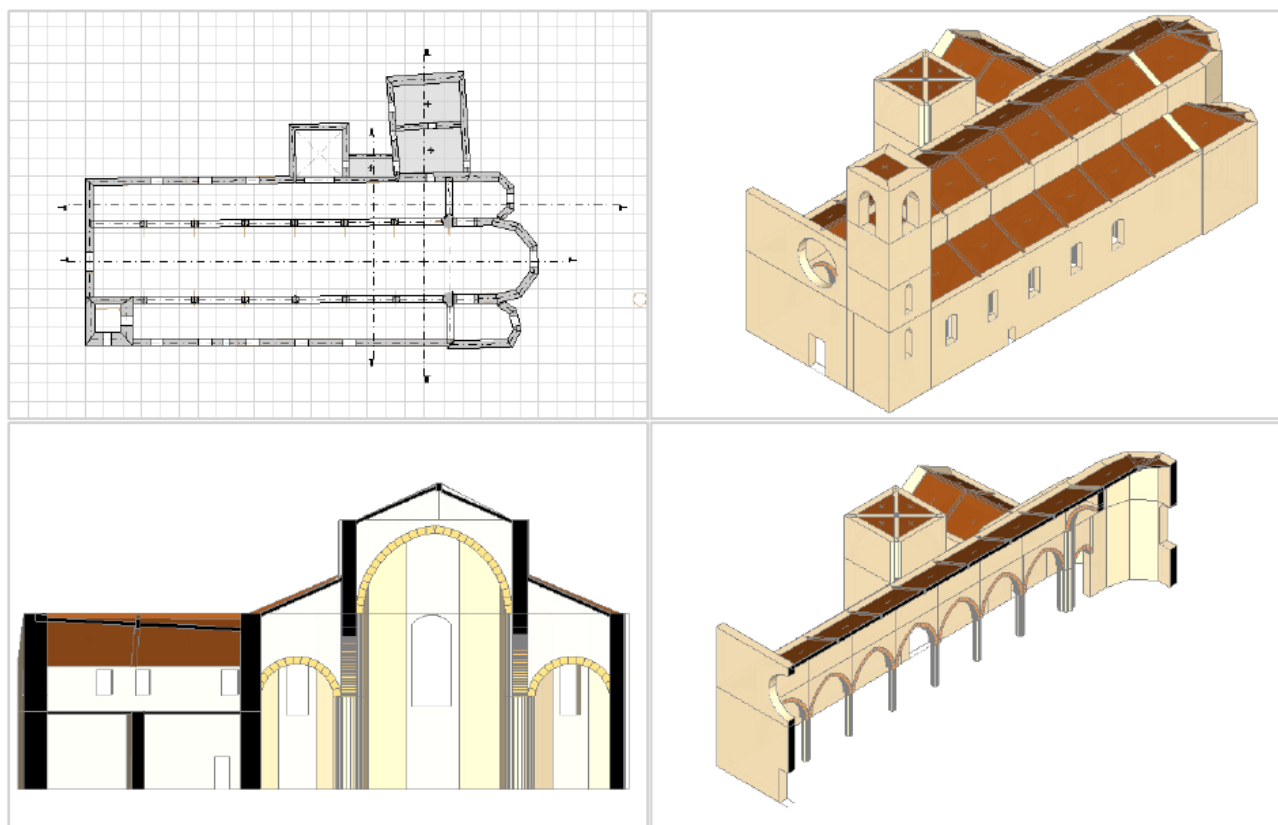


Figura 3-178: Chiesa San Silvestro: Piante, Assonometrie e Sezioni in PCM

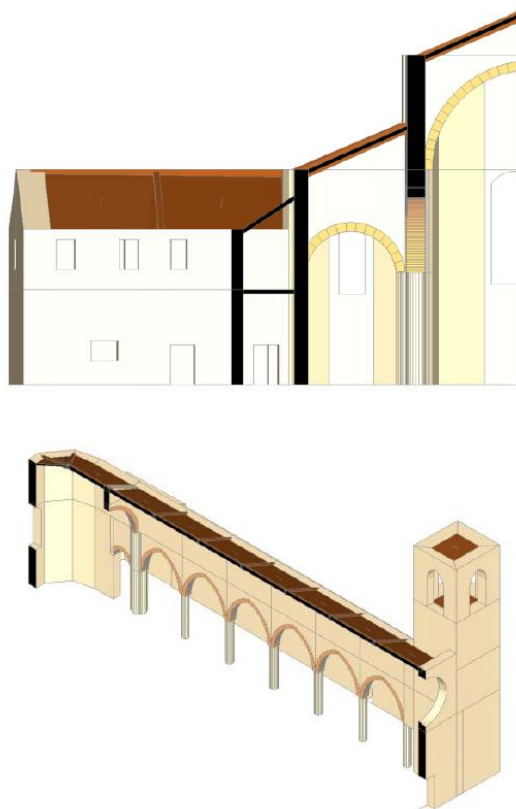


Figura 3-179: Chiesa San Silvestro: Particolari delle Sezioni del colonnato e della navata laterale in PCM

## MODELLAZIONE STRUTTURALE

Dopo aver impostato il modello architettonico secondo quanto sopra indicato, è possibile generare il "Modello Strutturale".

In questo caso, gli approfondimenti legati alla modellazione strutturale saranno validi ai fini della definizione di uno schema valido per l'esecuzione di un'Analisi Pushover dei macroelementi scelti orientata alla determinazione di un moltiplicatore di collasso, da utilizzare in termini cinematici ai fini della verifica di un meccanismo generico.

Tutti gli archi sono quindi stati modellati a "Blocchi e Giunti": considerata infatti la presenza di un doppio allineamento di arcate su colonne, appare maggiormente adatto utilizzare una modellazione più raffinata.

Nel file "04\_001\_Chiesa\_SanSilvestro\_Longitudinale.vdml" si sceglie quindi a titolo di esempio la verifica di un colonnato di separazione tra una navata laterale e quella centrale; a tal fine, in ambiente strutturale si isolano gli archi e le colonne che lo definiscono, attivando l'analisi solo per questi elementi (proprietà "Da Analizzare=Si"); per l'identificazione dei macroelementi può risultare utile il comando "Crea Gruppo" della sezione "Filtra"; selezionando solo le parti oggetto di interesse, si possono in questo modo aggiungere diversi gruppi, in modo da attivarne rapidamente la selezione:

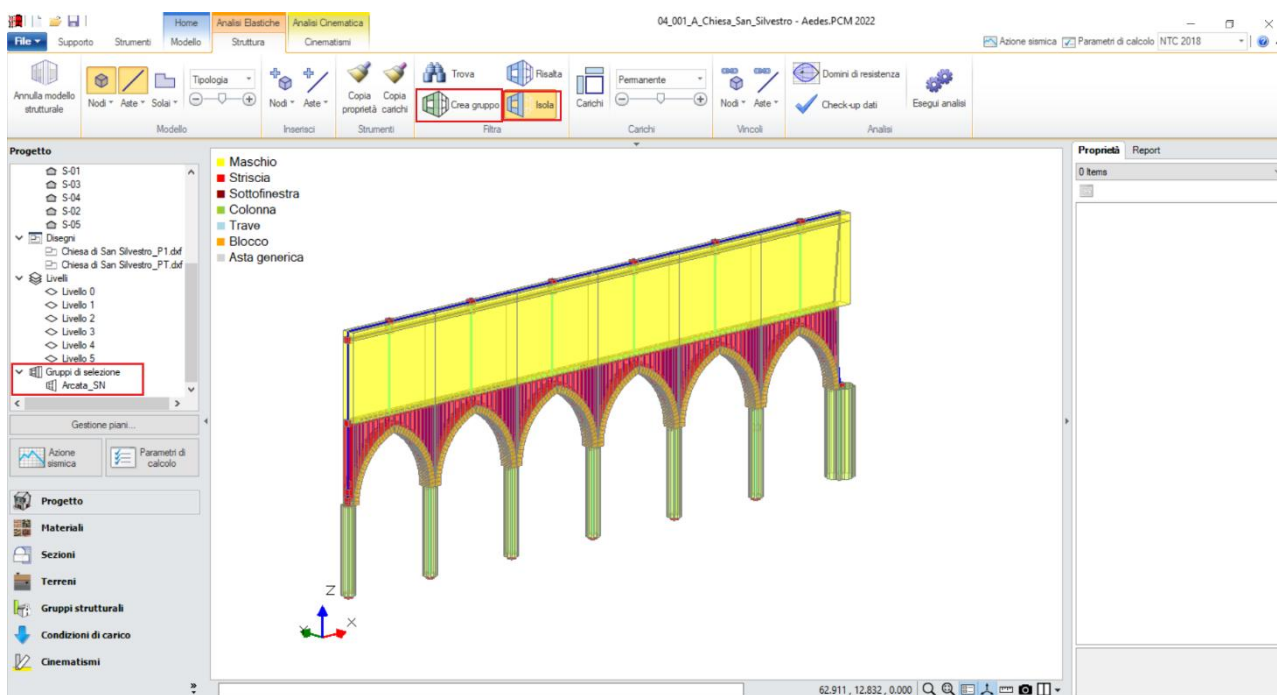


Figura 3-180: Chiesa San Silvestro: Creazione nuovo Gruppo "Arcata\_SN", isolata dal resto della struttura

## RISULTATI DELLE ANALISI

Eseguendo l'Analisi Pushover sui soli elementi selezionati, emerge come siano le colonne ad andare in crisi, gli archi invece si mantengono stabili: in corrispondenza dell'ultimo passo della Pushover, si ottiene un moltiplicatore di collasso  $\lambda=0.02$ .

Questo valore, assieme alla massa (pari in questo caso a 768552 kg, consultabile dal "Report", "Verifiche di sicurezza"), può essere inserito nelle proprietà di un "Cinematismo generico", ottenendo in tal modo il calcolo dell'Indicatore di Rischio.

In questo caso, si ottiene un valore pari a  $\zeta=0.115$  in termini di PGA, il cinematismo non è quindi verificato: in altri termini, il colonnato non è stabile, risultato già evidenziato dalla Pushover.

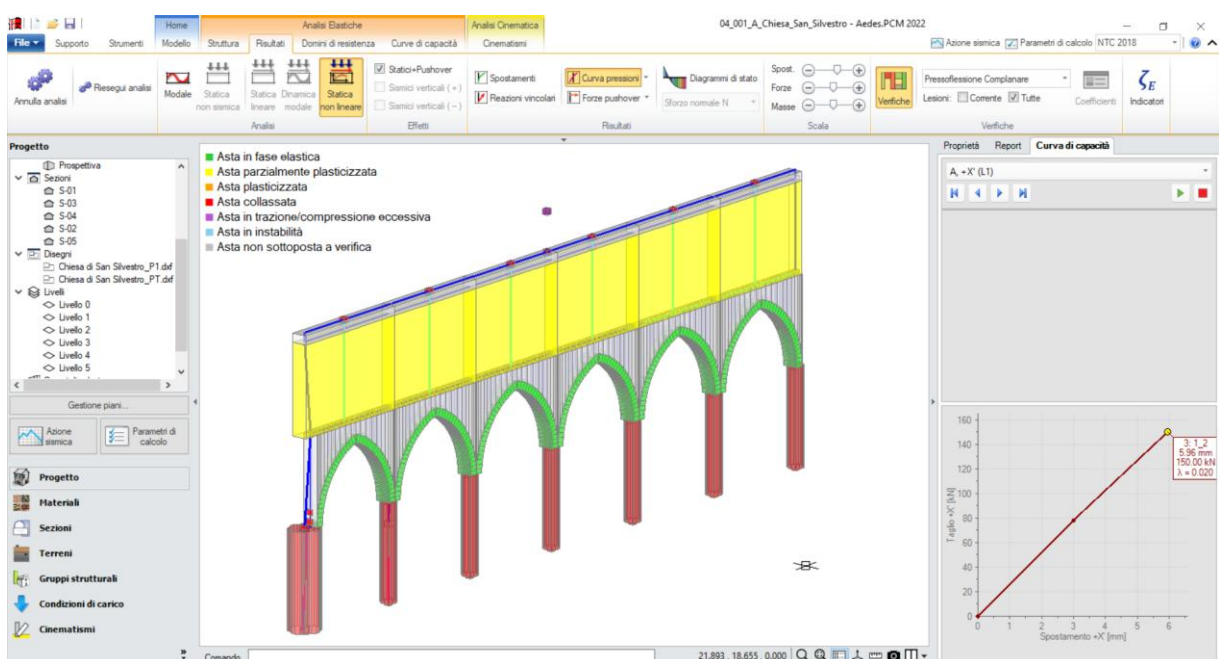


Figura 3-181: Chiesa San Silvestro: Pushover dell'arcata con evidenti crisi nelle colonne

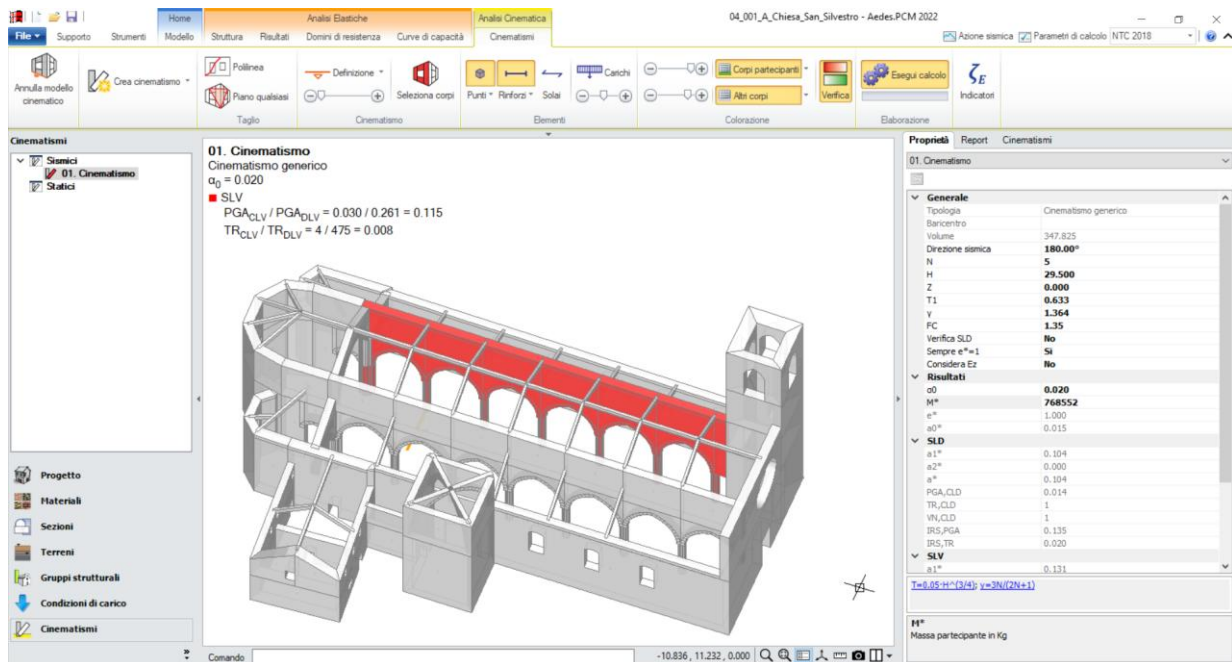


Figura 3-182: Chiesa San Silvestro: Cinematismi generico per il colonnato, verifica non soddisfatta

## MODELLAZIONE CINEMATICA

Come indicato nelle premesse, lo studio della chiesa può in generale essere condotto anche attraverso gli approfondimenti sui cinematismi dei singoli macro-elementi.

Per tale motivo, si genera anche un altro file, dedicato unicamente alla modellazione cinematica.

In questo caso, alcuni corpi rigidi saranno già sufficienti così come derivati dalla modellazione, in altri casi si renderà opportuno condurre appositi tagli attraverso il comando "Polilinea".

**Per l'esempio in esame, si studieranno i seguenti cinematismi:**

- 1) Ribaltamento della Facciata;
- 2) Ribaltamento Prospetto Cappella;
- 3) Meccanismo di Piano Archi trionfali;
- 4) Ribaltamento Absidi;
- 5) Ribaltamento Pareti delimitazione Aula e Navata;
- 6) Flessione su Cerniere Oblique rosone in facciata;
- 7) Meccanismo nel Piano Facciata.

Di seguito si descriverà in dettaglio la procedura di generazione di ogni singolo Cinematismo:

### **Cinematismi 01.1a, 02.1b, 03.2a, 04**

In questo gruppo di cinematismi, si ipotizza lo studio del Ribaltamento semplice e composto della facciata principale della chiesa, ipotizzando differenti situazioni:

- in 01.1a si considera il ribaltamento dell'intera facciata, quindi nell'ipotesi che non vi sia alcun ammorsamento con le pareti ortogonali;
- in 02.1b si considera invece che possa esserci un buon ammorsamento con la parete dell'aula, in tal caso ipotizzando che la cerniera possa formarsi ad una quota intermedia;
- in 03.2a si vuole rappresentare la possibilità che possa ribaltare lo spigolo di muratura libero, attorno ad una cerniera diagonale che segue l'inclinazione della falda retrostante;

- in 04 si ipotizza infine il trascinarsi di tutta la facciata e del campanile, che, considerata la sua posizione d'angolo, è plausibile sia chiamato in causa con un angolo di fessurazione a partire dalla base.

**01. 1a**

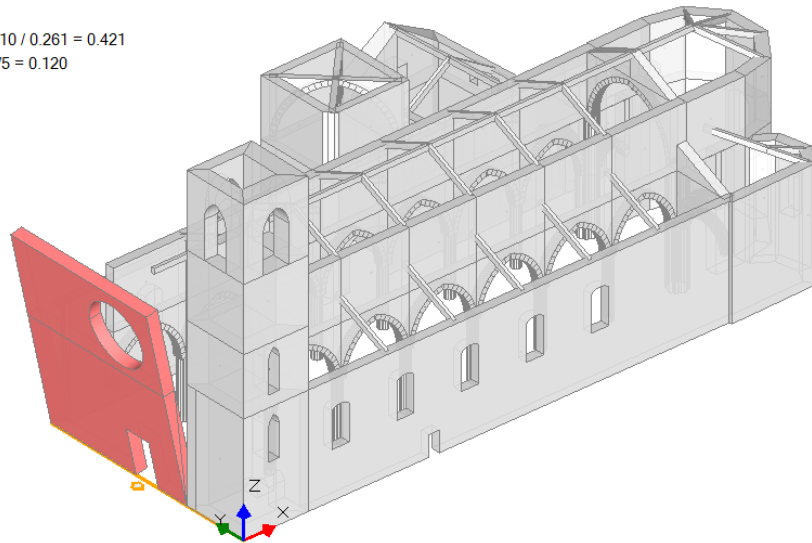
Ribaltamento semplice

$\alpha_0 = 0.061$

■ SLV

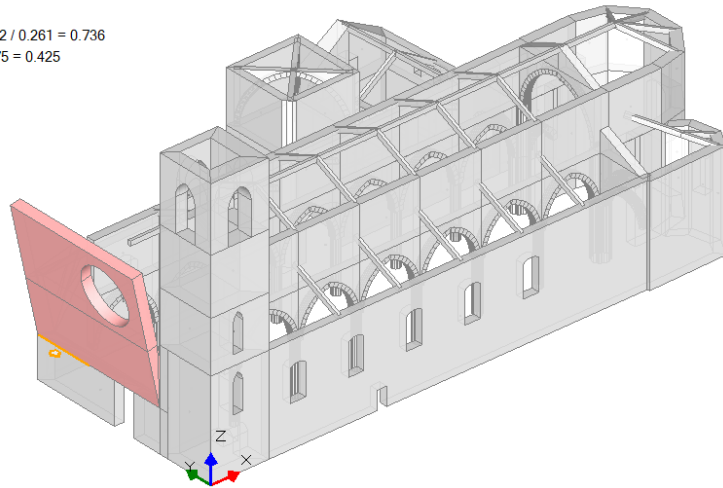
$$PGA_{CLV} / PGA_{DLV} = 0.110 / 0.261 = 0.421$$

$$TR_{CLV} / TR_{DLV} = 57 / 475 = 0.120$$



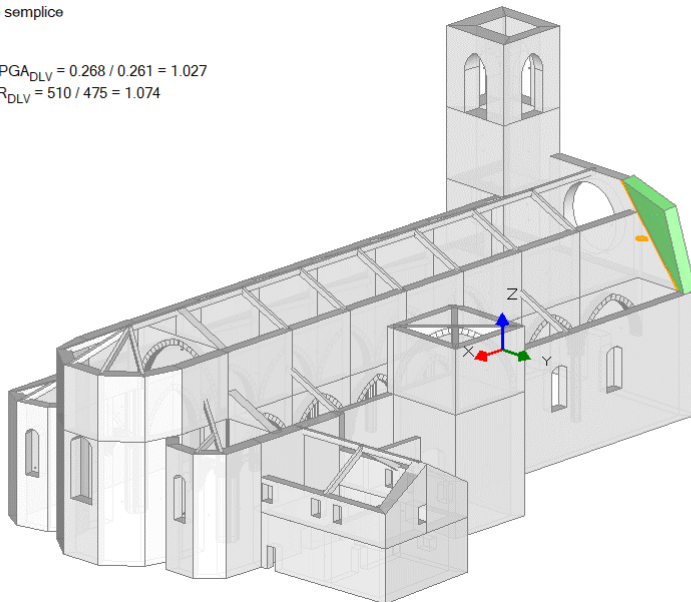
**02. 1b**  
Ribaltamento semplice  
 $\alpha_0 = 0.101$

■ SLV  
 $PGA_{CLV} / PGA_{DLV} = 0.192 / 0.261 = 0.736$   
 $TR_{CLV} / TR_{DLV} = 202 / 475 = 0.425$



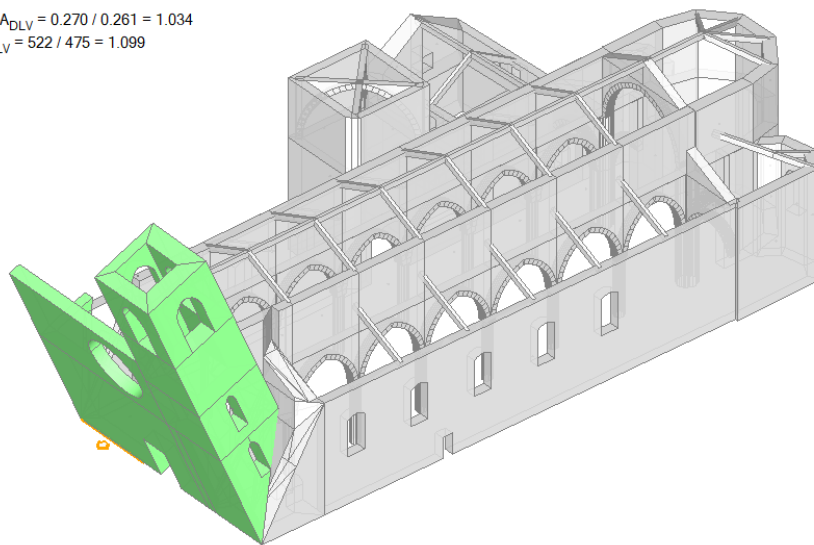
**03. 2a**  
Ribaltamento semplice  
 $\alpha_0 = 0.181$

■ SLV  
 $PGA_{CLV} / PGA_{DLV} = 0.268 / 0.261 = 1.027$   
 $TR_{CLV} / TR_{DLV} = 510 / 475 = 1.074$



**04. ribaltamento facciata + campanile**  
Ribaltamento semplice  
 $\alpha_0 = 0.143$

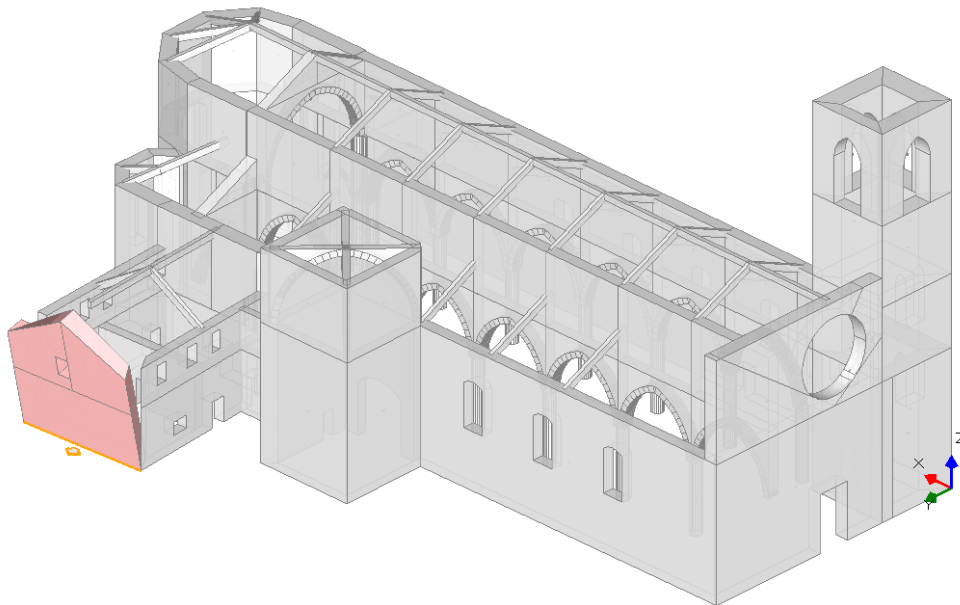
■ SLV  
 $PGA_{CLV} / PGA_{DLV} = 0.270 / 0.261 = 1.034$   
 $TR_{CLV} / TR_{DLV} = 522 / 475 = 1.099$



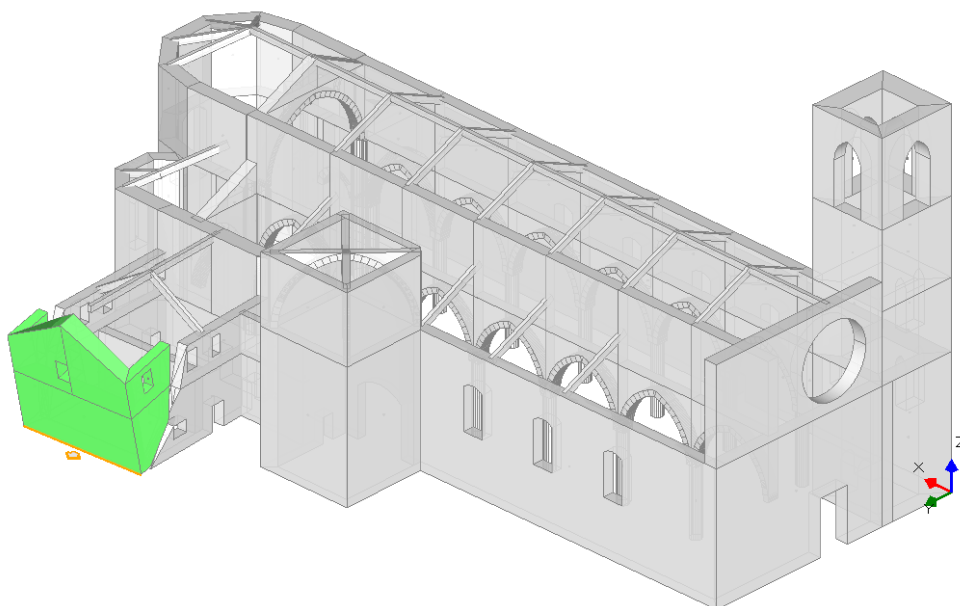
### Cinematismi 13.10a, 05.10b, 10.22

Questi tre cinematismi rappresentano il ribaltamento dei prospetti delle due cappelle, valutando o meno la considerazione di un adeguato ammorsamento con le pareti ortogonali, in questi ultimi casi tali pareti verranno opportunamente tagliate per creare due cunei di distacco partecipanti:

**13. 10a**  
Ribaltamento semplice  
 $\alpha_0 = 0.112$   
■ SLV  
 $PGA_{CLV} / PGA_{DLV} = 0.208 / 0.261 = 0.797$   
 $TR_{CLV} / TR_{DLV} = 253 / 475 = 0.533$



**05. 10b**  
Ribaltamento semplice  
 $\alpha_0 = 0.172$   
■ SLV  
 $PGA_{CLV} / PGA_{DLV} = 0.316 / 0.261 = 1.211$   
 $TR_{CLV} / TR_{DLV} = 826 / 475 = 1.739$



## 10. 22

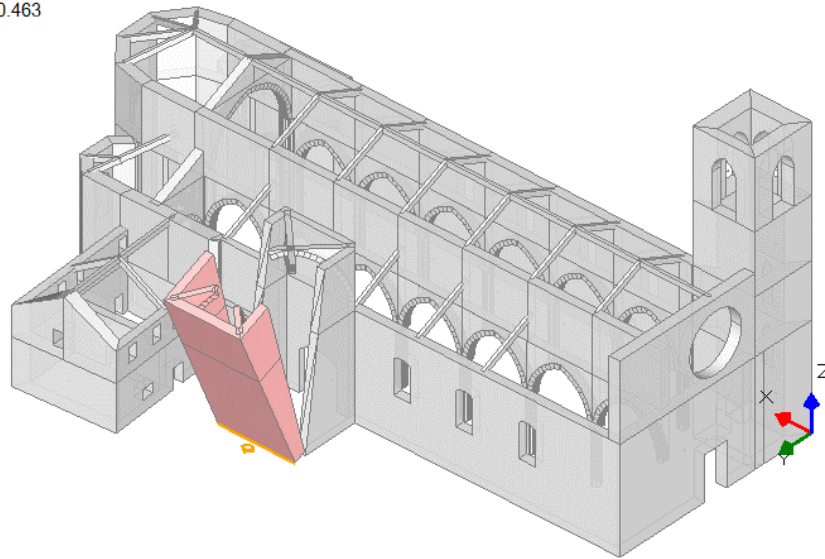
Ribaltamento semplice

$$\alpha_0 = 0.113$$

■ SLV

$$PGA_{CLV} / PGA_{DLV} = 0.198 / 0.261 = 0.759$$

$$TR_{CLV} / TR_{DLV} = 220 / 475 = 0.463$$



## Cinematismo 06.13

La presenza di un'arcata trasversale di connessione tra le due pareti più esterne della navata centrale suggerisce un possibile meccanismo di collasso dell'arco secondo il classico schema di apertura delle quattro cerniere.

Impostando quindi la posizione alternata intradosso/estradosso delle cerniere sull'arco, e considerando inoltre fra i corpi partecipanti parte della parete "espulsa", si nota come la verifica non risulti soddisfatta:

## 06. 13

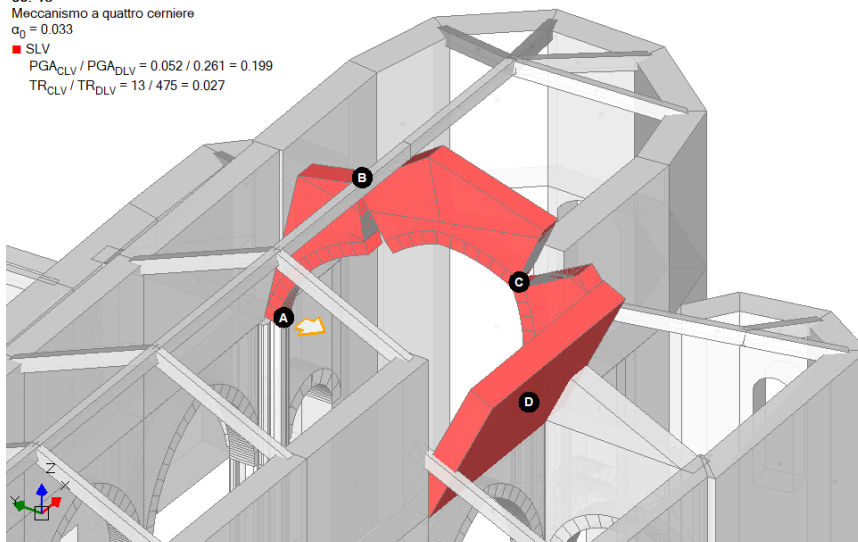
Meccanismo a quattro cerniere

$$\alpha_0 = 0.033$$

■ SLV

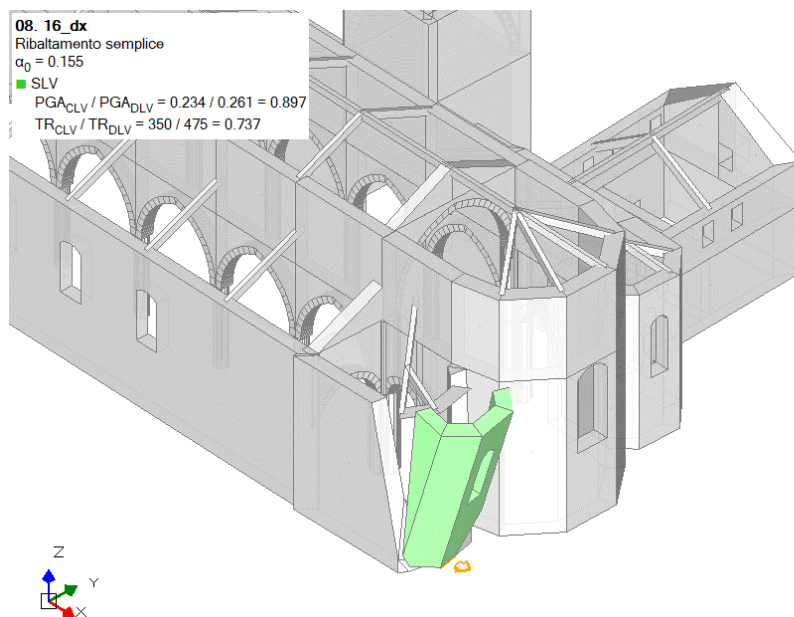
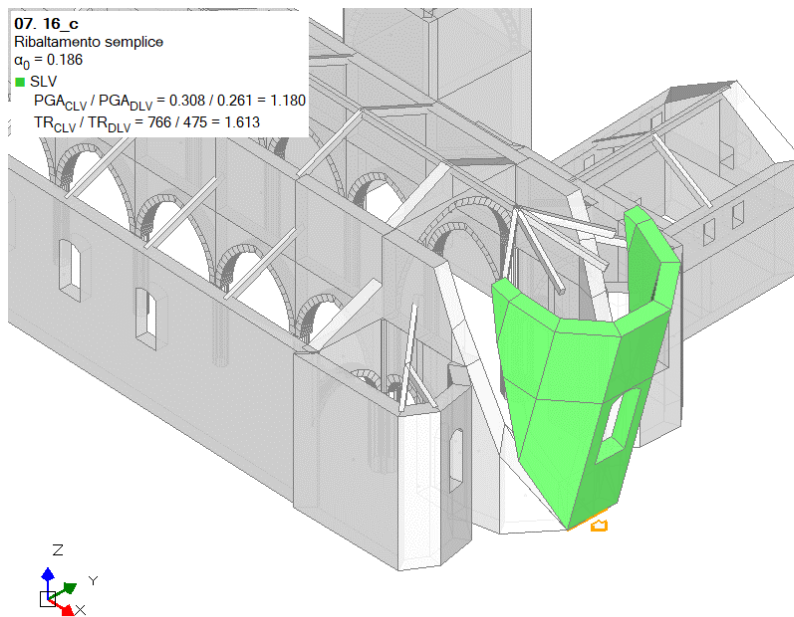
$$PGA_{CLV} / PGA_{DLV} = 0.052 / 0.261 = 0.199$$

$$TR_{CLV} / TR_{DLV} = 13 / 475 = 0.027$$



## Cinematismi 07.16c, 08.16 dx

Il ribaltamento delle absidi costituisce un'altra famiglia di cinematismi particolarmente ricorrente. In tal caso, si studia il ribaltamento sia dell'abside principale che di quello secondario, considerando un adeguato cuneo di distacco da entrambi i lati:



**Cinematismi 09.19b, 15.19a**

Nelle pareti laterali dell'aula confluiscono le travi di copertura delle navate laterali, questa configurazione suggerisce di ipotizzare il ribaltamento solo della porzione superiore di tali pareti.

Per quanto riguarda invece la parete laterale della navata, è la presenza delle finestre in serie a far ipotizzare che la cerniera di rotazione possa formarsi proprio al livello della base di tali aperture:

**09. 19\_b**

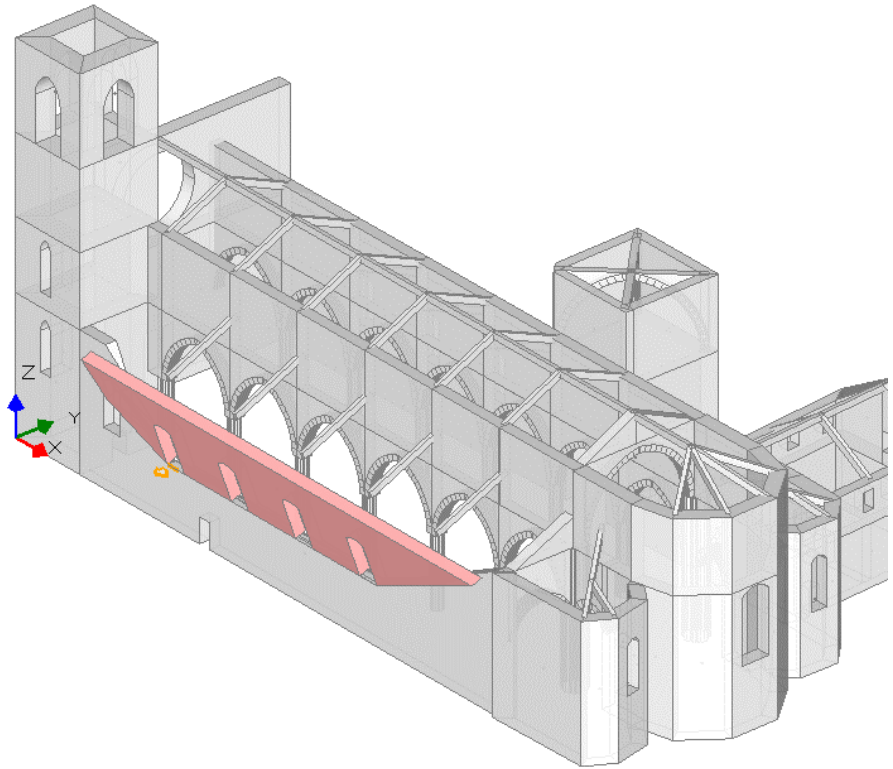
Ribaltamento semplice

$$\alpha_0 = 0.124$$

■ SLV

$$PGA_{CLV} / PGA_{DLV} = 0.183 / 0.261 = 0.701$$

$$TR_{CLV} / TR_{DLV} = 183 / 475 = 0.385$$



**15. 19\_a**

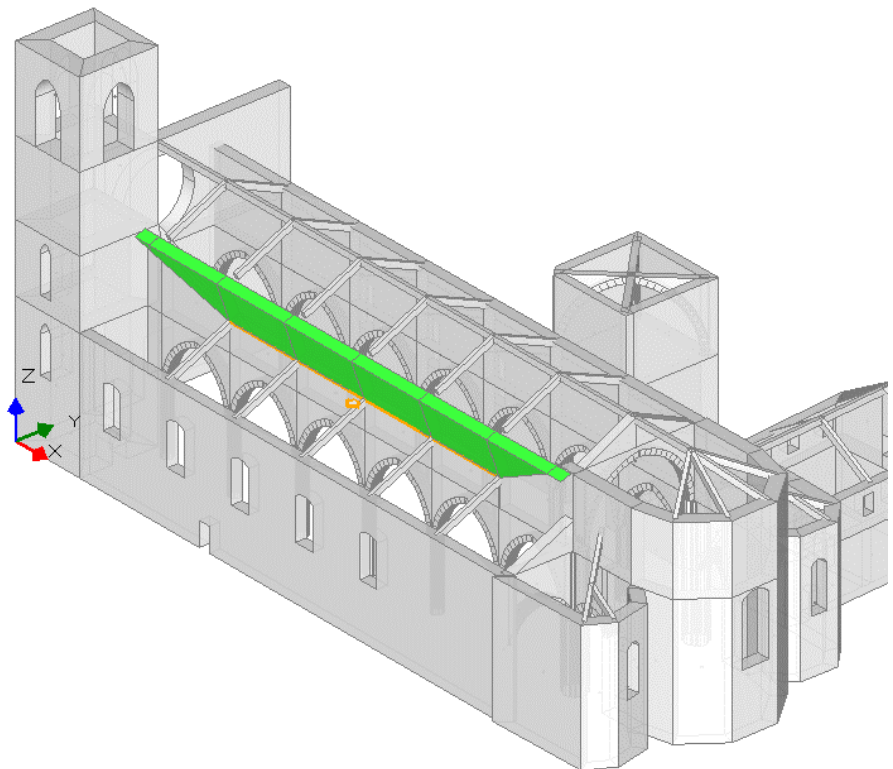
Ribaltamento semplice

$$\alpha_0 = 0.253$$

■ SLV

$$PGA_{CLV} / PGA_{DLV} = 0.380 / 0.261 = 1.456$$

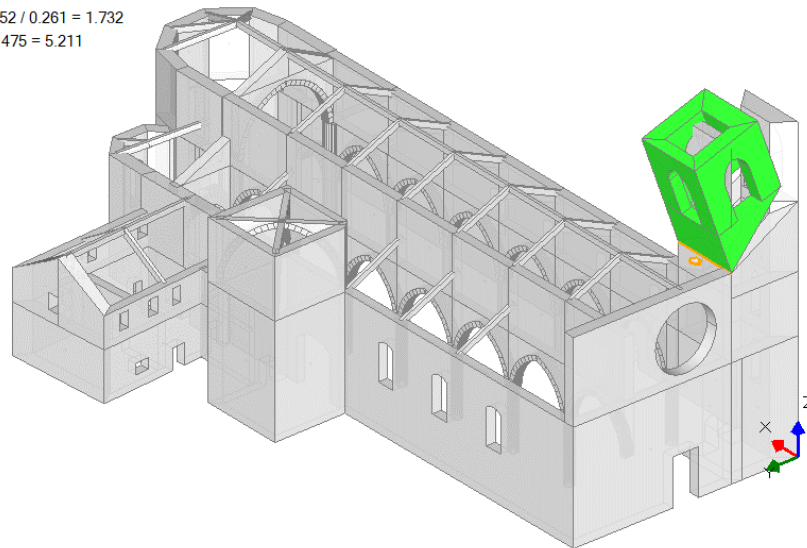
$$TR_{CLV} / TR_{DLV} = 1445 / 475 = 3.042$$



### Cinematismo 11.27

Tale cinematismo riguarda il possibile ribaltamento del campanile: si ritiene maggiormente probabile il ribaltamento della sola parte sommitale attorno ad un asse generato dall'intersezione con la quota della copertura della navata centrale:

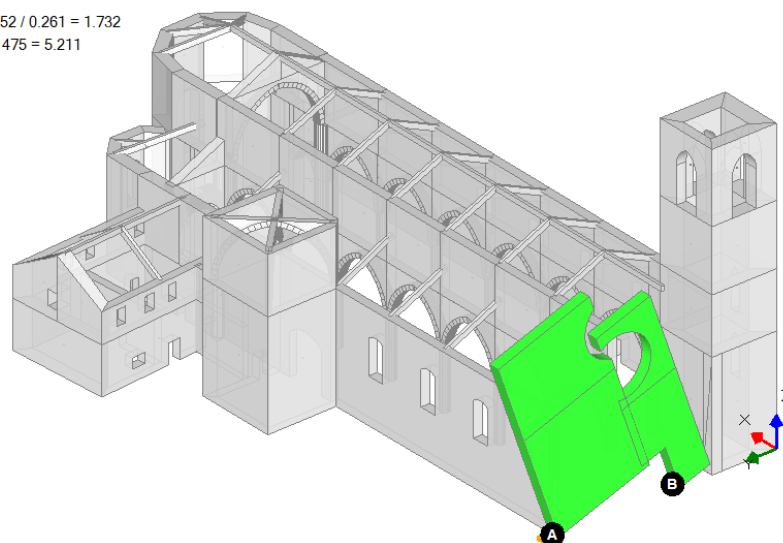
11. 27  
Ribaltamento semplice  
 $\alpha_0 = 0.428$   
■ SLV  
 $PGA_{CLV} / PGA_{DLV} = 0.452 / 0.261 = 1.732$   
 $TR_{CLV} / TR_{DLV} = 2475 / 475 = 5.211$



### Cinematismo 12.3b

Il grande rosone centrale in facciata costituisce una zona parecchio fragile, si ritiene quindi plausibile che, nei confronti di un'azione agente lungo il piano della facciata, questa possa lesionarsi proprio in corrispondenza del rosone, generando quindi un "meccanismo nel piano":

12. 3b  
Ribaltamento di parete a doppia cortina  
 $\alpha_0 = 0.398$   
■ SLV  
 $PGA_{CLV} / PGA_{DLV} = 0.452 / 0.261 = 1.732$   
 $TR_{CLV} / TR_{DLV} = 2475 / 475 = 5.211$



## Cinematismo 14.2b

Sempre con riferimento alla zona del rosone in facciata, seguendo quanto detto nel cinematismo precedente, in questo ultimo cinematismo si vuole invece rappresentare la conseguenza dell'azione in direzione ortogonale alla facciata, nell'ipotesi che i vincoli laterali comportino comunque un certo grado di trattenimento: in tale configurazione, potrebbe instaurarsi un cinematismo di "*Flessione su cerniere oblique*", che circoscrive quindi l'intero rosone chiamando in causa la mutua rotazione delle pareti attorno a cerniere dirette lungo le diagonali:

### 14. 2b

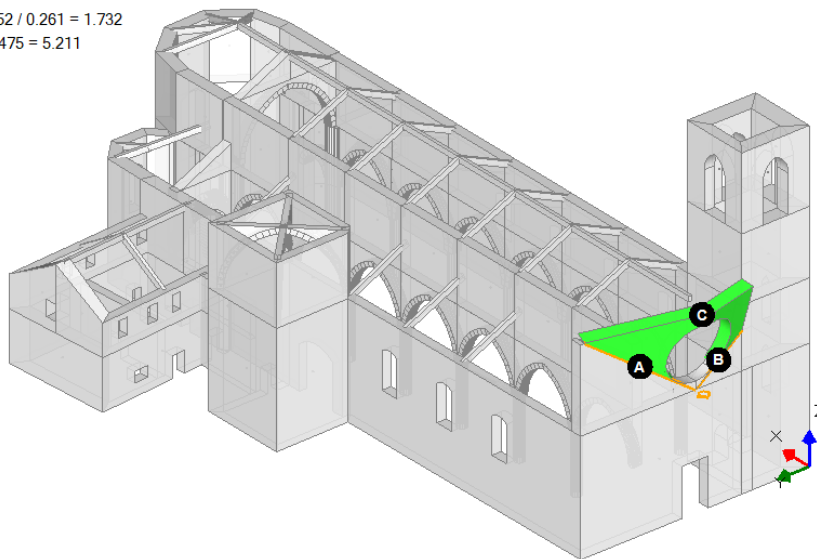
Flessione su cerniere oblique

$\alpha_0 = 0.403$

■ SLV

$$PGA_{CLV} / PGA_{DLV} = 0.452 / 0.261 = 1.732$$

$$TR_{CLV} / TR_{DLV} = 2475 / 475 = 5.211$$



Riassumendo in una tabella conclusiva tutti i risultati dei cinematismi sopra studiati, risulta quindi possibile determinare l'Indice di Vulnerabilità secondo la metodologia LV1.

Adottando giudizi minimi sui presidi antisismici e massimi agli indici di vulnerabilità, si ottiene il seguente quadro:

n°	PGA <sub>CLV</sub>	V <sub>kp</sub>	V <sub>kl</sub>	P <sub>k</sub>		
1	0.110	Nessun presidio antisismico presente	0	Presenza di elementi spingenti sulla facciata come volte e archi	2	1
2	0.267	Nessun presidio antisismico presente	0	Presenza di grandi aperture come il rosone	2	1
3	0.452	Nessun presidio antisismico presente	0	Presenza di aperture di grandi dimensioni	2	1
7	0.028	Presenza di catene longitudinali	1	Nessun indicatore di vulnerabilità presente	0	0.5
13	0.052	Arco composto da conci di buona fattura	1	Nessun indicatore di vulnerabilità presente	0	0.5
16	0.234	Nessun presidio antisismico presente	0	Presenza di elementi di copertura spingenti	2	1
19	0.183	Nessun presidio antisismico presente	0	Presenza di elementi di copertura spingenti	2	1
22	0.198	Nessun presidio antisismico presente	0	Nessun indicatore di vulnerabilità presente	0	1
27	0.452	Campanile inglobato nella struttura della chiesa	1	Presenza di aperture significative; Campanile inglobato all'interno della struttura della chiesa	3	1
Personalizzato	0.269	Nessun presidio antisismico presente	0	Presenza di aperture significative; Campanile inglobato all'interno della struttura della chiesa	3	1

Utilizzando la formula 1.1 per la determinazione dell'Indice di Vulnerabilità Globale si ottiene:

$$i_v = 0.76$$

Applicando infine le formule 1.3 ed 1.4, si ricavano l'accelerazione ed il tempo di ritorno relativi ad  $i_v$  sopra determinato per SLV:

$$a_{SLV} = 0.11g$$

$$T_{SLV} = 52.15 \text{anni}$$

Ne consegue un Indice di Sicurezza sismica allo SLV pari a:  $I_{s,SLV} = T_{SLV} / T_{R,SLV} = \mathbf{0.11}$

Considerando invece un punteggio per i presidi antisismici efficaci e viceversa un giudizio inefficace agli indici di vulnerabilità, si ottiene il seguente quadro:

n°	V <sub>kp</sub>		V <sub>ki</sub>		P <sub>k</sub>
1	Nessun presidio antisismico presente	0	Presenza di elementi spingenti sulla facciata come volte e archi	1	1
2	Nessun presidio antisismico presente	0	Presenza di grandi aperture come il rosone	1	1
3	Nessun presidio antisismico presente	0	Presenza di aperture di grandi dimensioni	1	1
7	Presenza di catene longitudinali	2	Nessun indicatore di vulnerabilità presente	0	0.5
13	Arco composto da conci di buona fattura	2	Nessun indicatore di vulnerabilità presente	0	0.5
16	Nessun presidio antisismico presente	0	Presenza di elementi di copertura spingenti	1	1
19	Nessun presidio antisismico presente	0	Presenza di elementi di copertura spingenti	1	1
22	Nessun presidio antisismico presente	0	Nessun indicatore di vulnerabilità presente	0	1
27	Campanile inglobato nella struttura della chiesa	2	Presenza di aperture significative; Campanile inglobato all'interno della struttura della chiesa	2	1
Personalizzato	Nessun presidio antisismico presente	0	Presenza di aperture significative; Campanile inglobato all'interno della struttura della chiesa	2	1

Aggiornando i calcoli dell'Indice di Vulnerabilità Globale si ottiene:

$$i_v = 0.59$$

Dal quale, si ha:

$$a_{SLV} = 0.15g$$

$$T_{SLV} = 97.77 \text{anni}$$

Ne consegue un Indice di Sicurezza sismica allo SLV pari a:  $I_{s,SLV} = T_{SLV} / T_{R,SLV} = 0.2$

Da quanto sopra indicato emerge quindi come l'assegnare giudizi opposti tra presidi di resistenza e indici di vulnerabilità porti a Indici di sicurezza molto differenti, con variazione anche del 100%.

Ne consegue che l'interpretazione dei giudizi assuma un peso fondamentale nell'ambito delle scelte del progettista, come era prevedibile in base alle ipotesi semplificate del metodo stesso.

Pertanto, ci si potrebbe chiedere se a questo punto non siano maggiormente affidabili i risultati derivanti da un'analisi LV3, dove innanzitutto si derivano direttamente gli Indicatori di Rischio in termini di PGA e TR, ma soprattutto in cui i valori ottenuti non siano influenzati da valutazioni soggettive e medie pesate, bensì dalle minime risposte legate a singoli determinati cinematicismi.

## **04\_002\_Campanile\_SantAntonin**

### File di riferimento:

04\_002\_Campanile\_SantAntonin\_Isolato

04\_002\_Campanile\_SantAntonin\_Vincolato

### Parole chiave:

- CAMPANILE ISOLATO
- CAMPANILE VINCOLATO

### Riferimenti utili:

Manuale di ECS, paragrafo 6.2.2

L'esempio illustrato in questo paragrafo fa riferimento al campanile descritto nella Circolare 26/2010 [20], nell'ambito degli Esempi Applicativi: "Venezia, Campanile della Chiesa di Sant'Antonin".

La Circolare 26/2010 può essere consultata anche dalla scheda "Supporto" di PCM, in corrispondenza dell'elenco delle normative "Nazionale" relativamente al Patrimonio Culturale.

Si rimanda ai contenuti presenti in tale riferimento per ulteriori approfondimenti.

## **MODELLAZIONE ARCHITETTONICA**

Per la descrizione dell'opera, si riporta un estratto dal testo di riferimento:

*"(...) La torre campanaria ha forma affusolata a lesene, è caratterizzata dall'assenza del basamento, da una canna singola in muratura di lati 5,40m x 5,60m e 24,60m d'altezza, da una cella campanaria a bifore alta 6,30 m sormontata da un tiburio ottagonale con una cupola a cipolla ad otto spicchi. L'altezza totale è di 43,05 m. Sono presenti al suo interno sei solai intermedi in legno, collegati fra loro da una scala anch'essa in legno posta in appoggio. Il campanile è in aderenza su tutti e quattro i lati con edifici adiacenti, a nord con uno stacco di 10,80 m, a sud con uno stacco di 16 m, a ovest con uno stacco di 12,30 m e infine ad est con uno stacco di 15,40 m. La muratura della canna è in mattoni con giunti di calce, esternamente intonacata ed internamente a vista nella parte alta. La tessitura nella parte a vista è irregolare con giunti dello spessore di circa 15 mm. La cella campanaria presenta una complessa struttura in muratura ed un castello campanario molto articolato. Le aperture sul lato nord e sul lato ovest sono tamponate per 1,26 m. Sopra il castello ligneo, ad una quota di circa 6.30 m dal piano di calpestio, vi è un primo livello di catene angolari e reme, sulle quali poggiano pilastrini in muratura. Sopra di essi e sostenuto da modiglioni in pietra vi è un secondo livello di catene angolari e di reme, che sorregge a sua volta un sistema di pilastri interamente intonacati. Ultimo livello, posto a 12,73 m dal piano di calpestio della cella, un terzo ordine di reme costituisce il punto di partenza delle costolonature di copertura. Il campanile presenta strapiombi nel lato nord, di valore 0,065m, e nel lato ovest, di valore 0,297 m, rilevati rispettivamente ad una quota di 23,23 m e 23,24 m. (...)"*

Figura 1. Vista del Campanile della Chiesa di Sant'Antonin: prospetti nord-ovest



Figura 2. Campanile della Chiesa di Sant'Antonin: contesto urbano. (a) vista ovest (b) vista nord

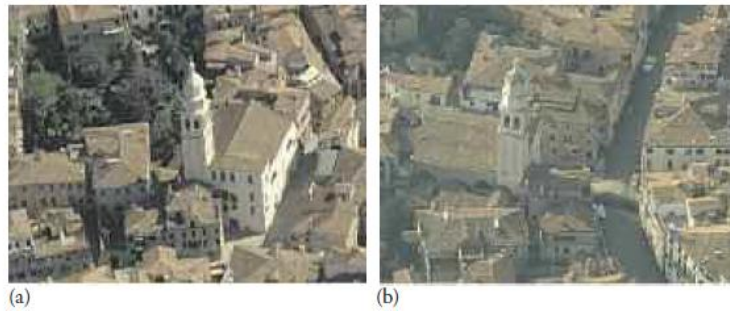


Figura 3-183: Campanile Sant'Antonin: Immagini tratte dal testo di riferimento

Il testo riporta anche una le sezioni trasversali del campanile e la sua suddivisione in altezza, indicando con "Concio" una stessa zona omogenea: da non confondere con il concetto di "Concio" adottato in PCM, il quale si riferisce a singoli elementi derivanti dalla discretizzazione dei Muri.:

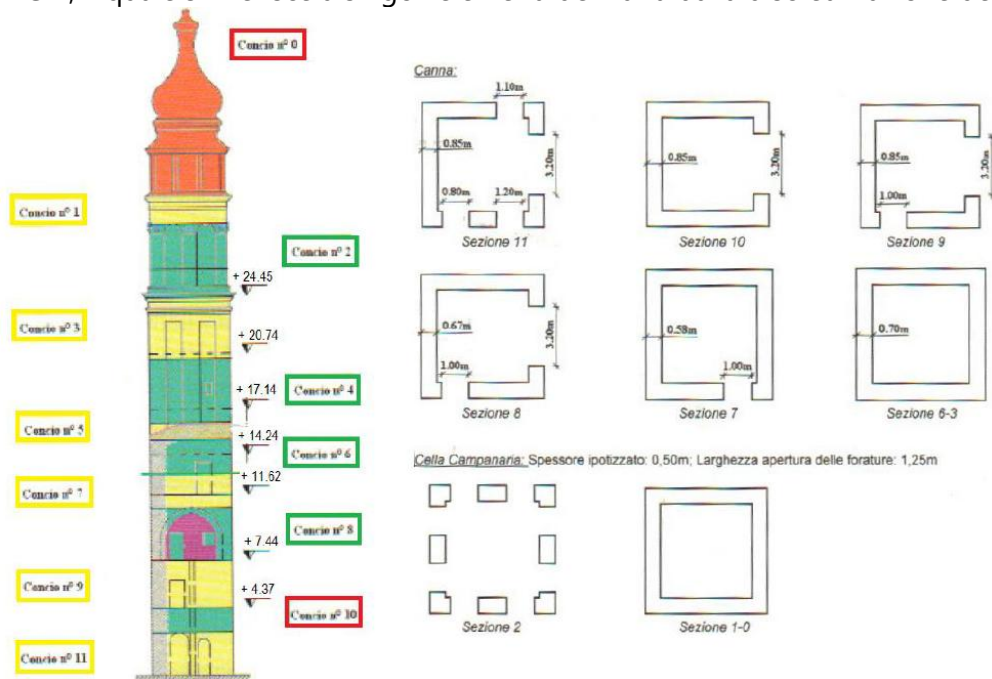


Figura 3-184: Campanile Sant'Antonin: Sezioni trasversali e suddivisione dei piani nel testo di riferimento

Il modello architettonico in PCM risulta composto da 9 piani, ai quali disegnare dei Muri con Aperture secondo quanto indicato nei disegni del rilievo, in ultimo aggiungendo i solai dove presenti.

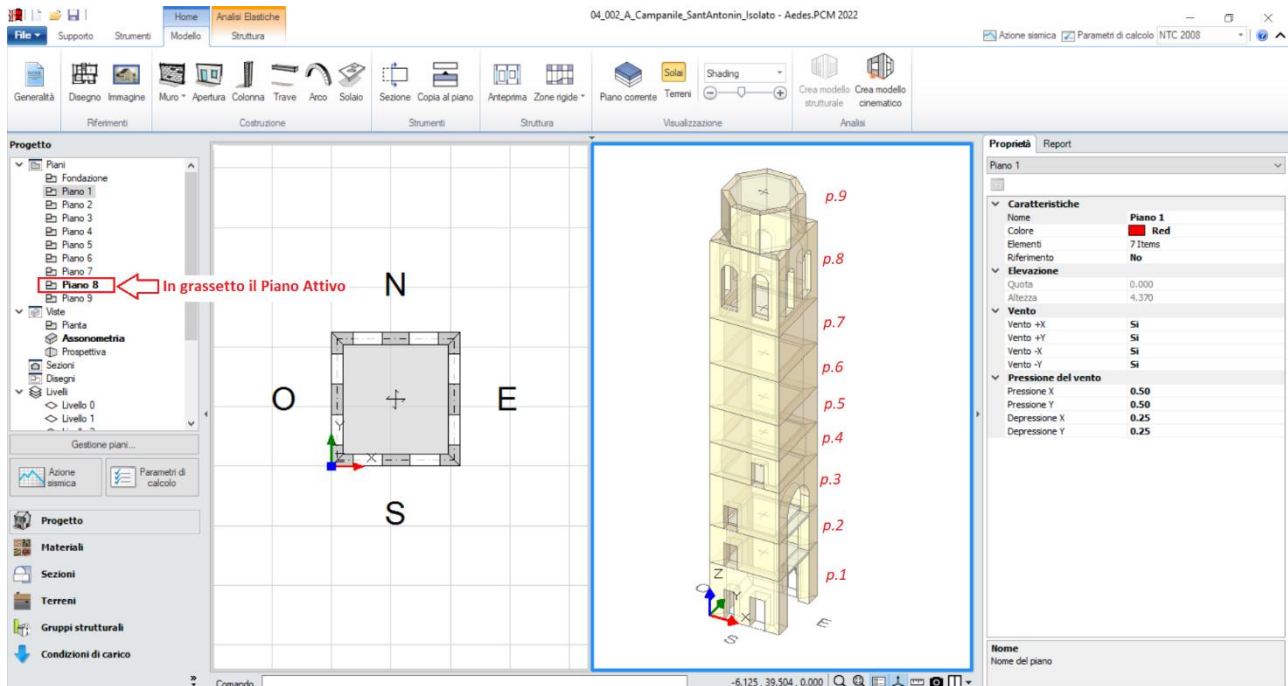


Figura 3-185: Campanile Sant'Antonin: Modello Architettonico, vista in Pianta e Assonometria

La struttura viene modellata attraverso la schematizzazione "a Torre": si crea quindi un apposito "Gruppo Strutturale", da assegnare a tutti gli elementi presenti nel modello.

In questo caso, si imposta una "Lunghezza dei blocchi" pari a 0.5m, inoltre si considera anche un fuoripiombo: come indicato di seguito, la struttura si considera "inclinata" secondo scostamenti misurati ad un'altezza di circa 23.24m pari a 0.297m verso Ovest e 0.065m verso Nord:

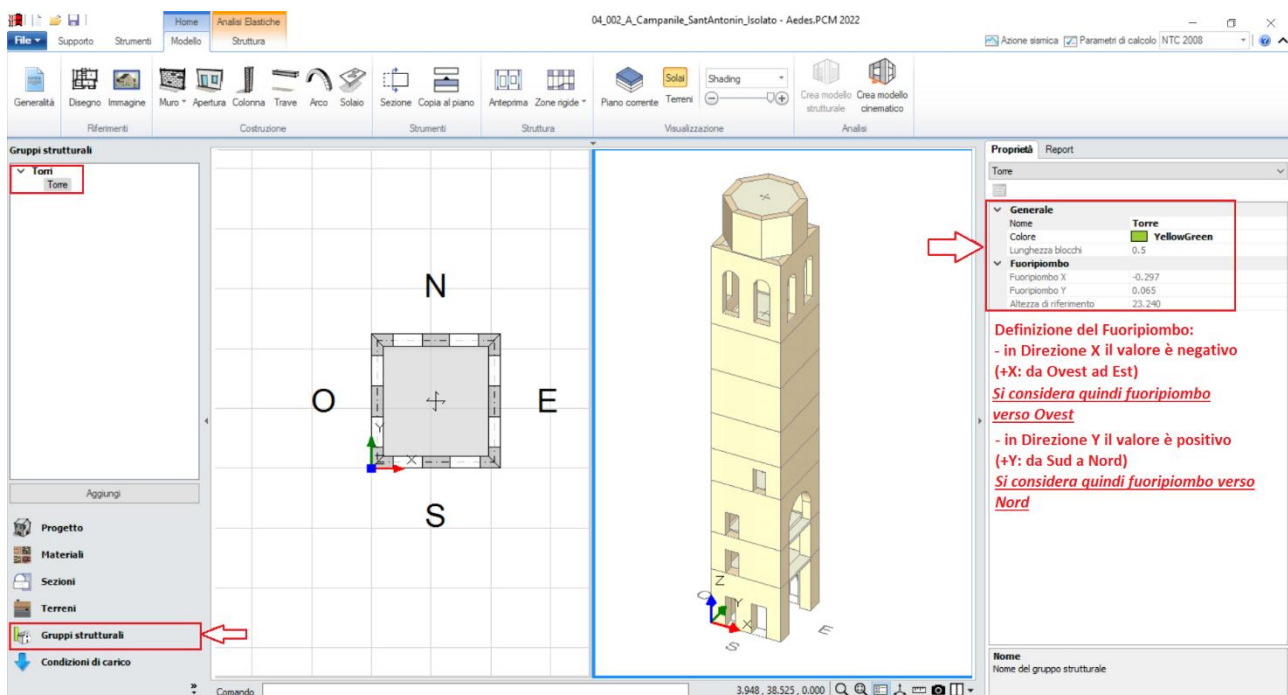


Figura 3-186: Campanile Sant'Antonin: Modello Architettonico, proprietà del Gruppo Strutturale "Torre"

Le pareti del campanile sono in "Mattoni pieni e malta di calce": si adotta un Livello di Conoscenza LC1, a cui corrispondono valori Minimi per le Resistenze e Medi per i Moduli Elastici. In aderenza al testo di riferimento, si sceglie la classificazione del materiale secondo la precedente normativa NTC 2008.

Inoltre, secondo quanto esposto nella Tab. 4.1 della Dir. 9.2.2011, si impostano i coefficienti parziali del materiale  $\gamma_M=1$  (dai "Parametri di Calcolo", scheda "Muratura"), in tal modo tutta la sicurezza del materiale ricade unicamente su FC:

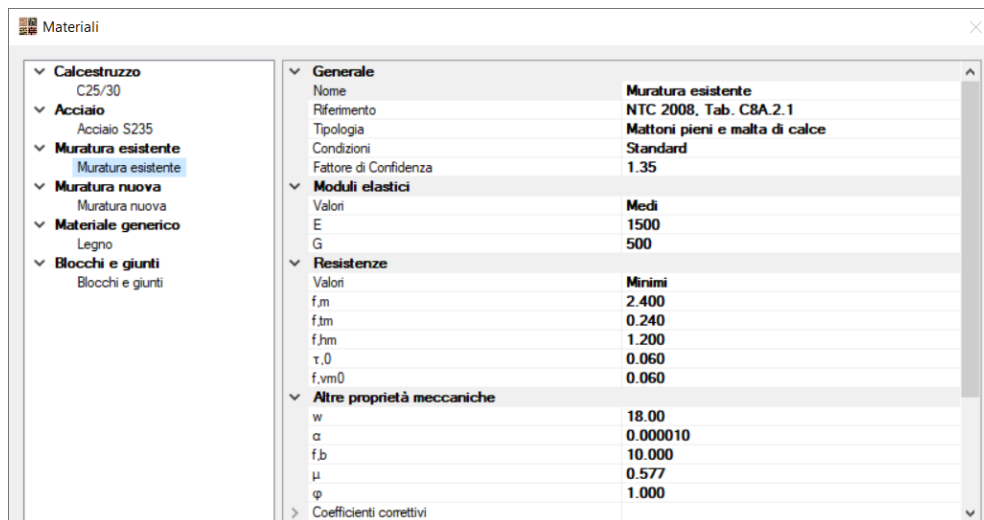


Figura 3-187: Finestra Materiali, caratteristiche del materiale muratura in "Mattoni pieni e malta di calce"

Le strutture di completamento in sommità non sono state inserite fisicamente nella modellazione, ma considerate in ambiente strutturale solo come carichi aggiuntivi.

Ad ogni modo, per maggior completezza, si è disegnata una guglia con delle Linee attraverso i comandi Cad della scheda Strumenti, assegnando tali linee ad un Layer specifico in modo da poterlo visualizzare o nascondere in base alle esigenze.

Seguendo lo stesso principio, la gestione dei Layer è risultata utile anche per assegnare ad altro Layer delle linee rappresentative delle "Quote di stacco", ovvero le altezze di delimitazione con gli edifici adiacenti, tenuti in considerazione nell'ipotesi di campanile vincolato.

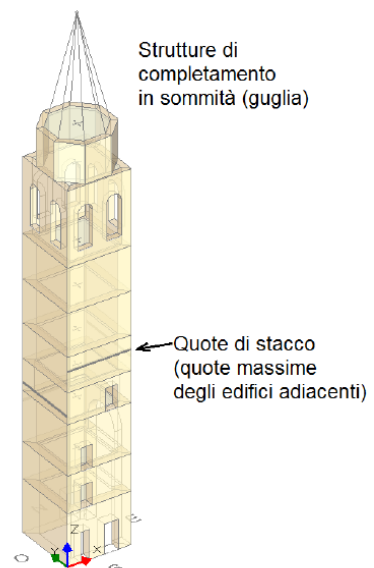
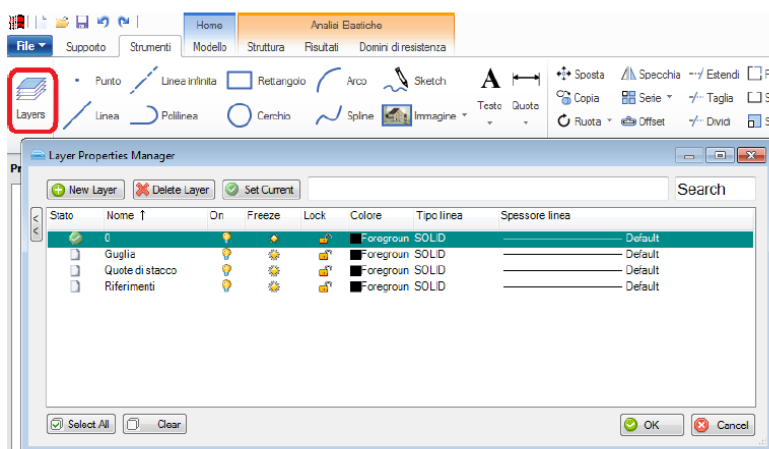


Figura 3-188: Gestione Layers, attivazione / disattivazione linee di riferimento utili

## MODELLAZIONE STRUTTURALE

In ambiente strutturale, si nota la tipica schematizzazione "a torre", costituita da conci in sequenza, ognuno con una sua sezione (in base alla definizione architettonica): sulla presenza di nodi coincidenti lungo l'altezza si è già parlato nei capitoli precedenti (cfr. Modello 03\_008 Torre).

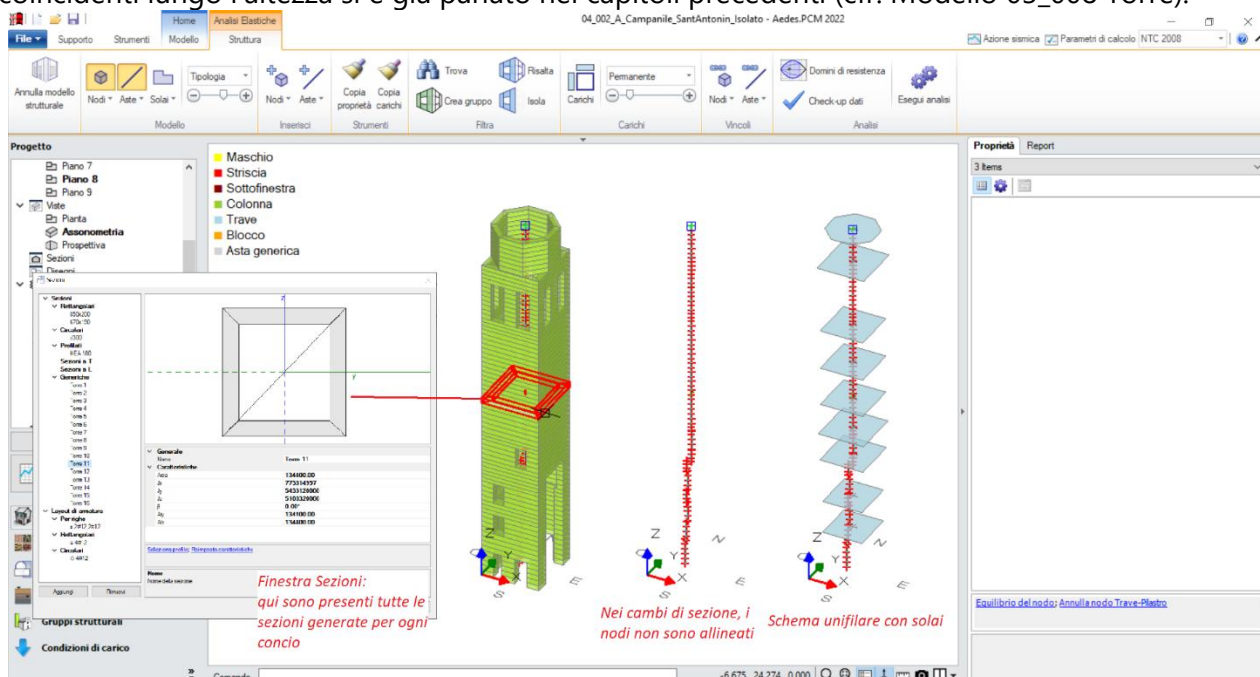


Figura 3-189: Campanile Sant'Antonin: Modello Strutturale, con vista "Solida" e "unifilare"

Visualizzando la struttura per "Piano", è possibile paragonare la suddivisione dei piani in PCM Analogia a quanto indicato nel testo di riferimento, notando sostanzialmente un'analogia, ovvero la definizione dei piani considera zone omogenee, ed in base alle aperture presenti in fase di creazione del modello strutturale saranno generate delle Sezioni Generiche in ambiente strutturale:

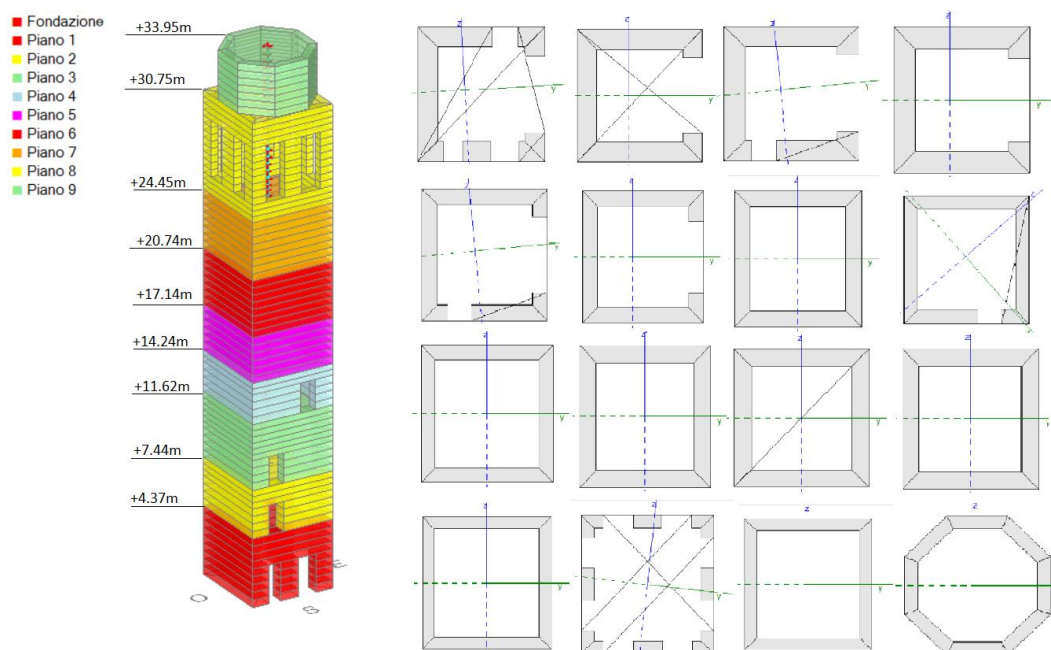


Figura 3-190: Campanile Sant'Antonin: Vista per "Piano" con indicazione Sezioni Generiche generate

Da notare inoltre che ogni sezione generica aggiunta avrà un proprio asse neutro: in presenza di evidenti bi-simmetrie, gli assi y e z locali saranno coincidenti con le direzioni coordinate; diversamente, la presenza di aperture asimmetriche comporterà una diversa inclinazione dell'asse neutro, di conseguenza dell'angolo tra gli assi baricentrici e le direzioni globali coordinate.

In ambiente strutturale, si impostano altre proprietà tipiche delle aste, in particolare selezionando tutti i conci si impostano le caratteristiche costruttive del materiale "Connessioni trasversali" e "Nucleo scadente", che rispettivamente comportano un coefficiente amplificativo di 1.3 per le resistenze e deamplificativo pari a 0.7 applicato sia alle resistenze che ai moduli elastici.

Ne consegue quindi il calcolo dei seguenti valori di calcolo rispetto ai parametri base del materiale:

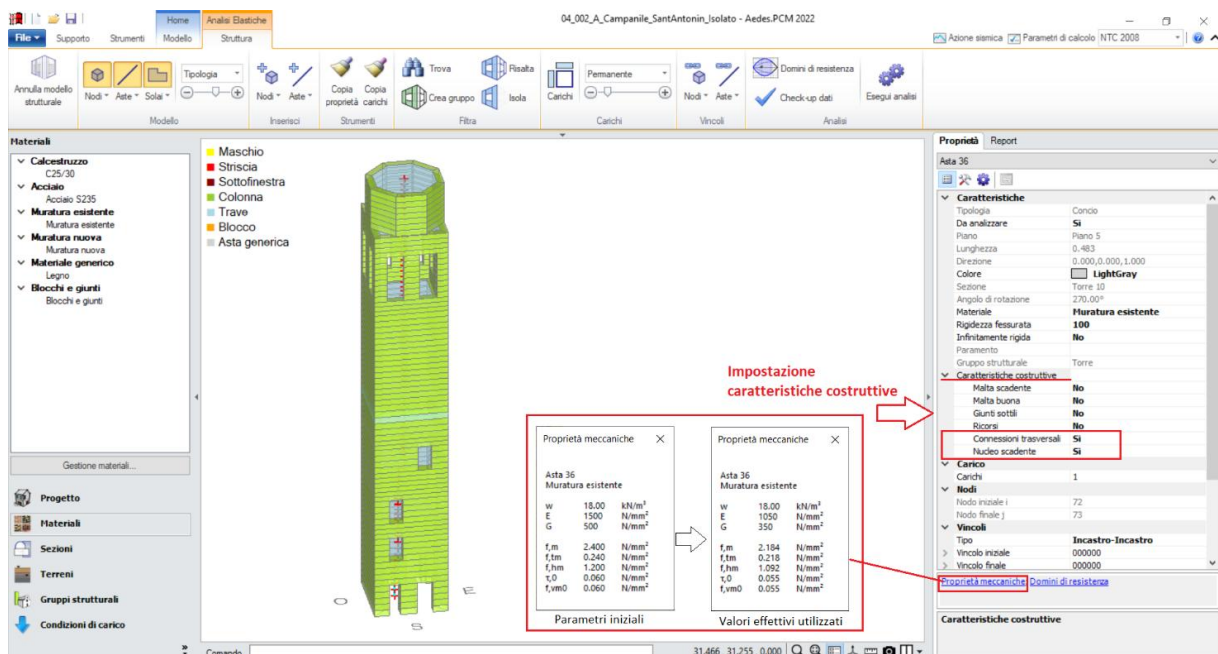


Figura 3-191: Campanile Sant'Antonin, Modello Strutturale, caratteristiche costruttive aste

Osservando più in particolare il Modello Strutturale, si evidenzia di seguito cosa accade nei nodi di sommità.

In cima al campanile sono presenti due nodi, il n. 153 ed il n. 154: il n. 153 è il nodo finale dell'ultimo concio, mentre il n.154 è il nodo di sommità del campanile: inizialmente, questi due nodi coincidono, in fase di analisi invece, a causa della parzializzazione delle sezioni, il n.153 può variare di posizione, mentre lo spostamento ai fini della Pushover rimane quello relativo al n.154.

**N.B.:** nel caso di schematizzazione "a Torre", la gestione dei carichi da solai segue un percorso diverso da quello di un generico edificio. In questa modellazione infatti non ci sono Maschi Murari e Link rigidi perimetrali che delimitano gli orizzontamenti (i solai infatti sono "senza aste di contorno"): il carico di ogni solaio è calcolato in base alla sua area e la sua Risultante è applicata come "Carico Concentrato" sul nodo della struttura posto alla stessa quota. Selezionando il solaio, fra le sue proprietà è possibile consultare il "Nodo di Carico", ed approfondirne i carichi agenti.

In questo esempio, in sommità è presente anche una guglia: il suo carico viene ripartito sul solaio ottagonale di copertura. Il suo carico è stato assunto pari a 320 kN, da cui il relativo "Carico permanente non strutturale" di 20 kN/m<sup>2</sup>.

Il carico permanente dei solai viene stimato pari ad 1 kN/m<sup>2</sup>, ipotizzando un ordine di grandezza coerente con la tipologia di solai lignei, non avendo dati specifici da trarre dal testo di riferimento.

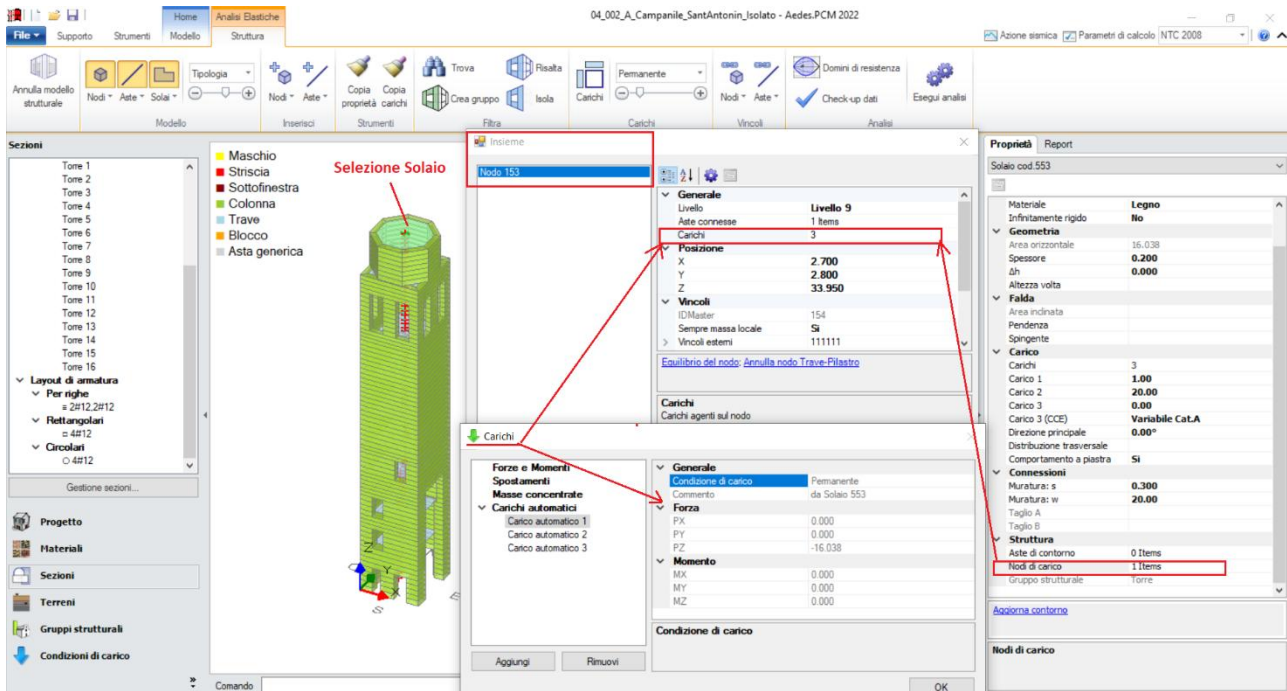


Figura 3-192: Campanile Sant'Antonin, Modello Strutturale, consultazione carichi da Solai

Un aspetto importante riguarda il fuoripiombo: in base a quanto definito in ambiente architettonico, se vengono impostate le proprietà caratterizzanti un fuoripiombo, in ambiente strutturare, per ogni concio a partire dalla quota inserita, viene considerata una distribuzione lineare del fuoripiombo, che si traduce nell'applicazione di momenti aggiuntivi dati dal prodotto tra peso proprio del concio e braccio determinato dal fuoripiombo alla quota del concio stesso.

Un esempio di calcolo è indicato di seguito:

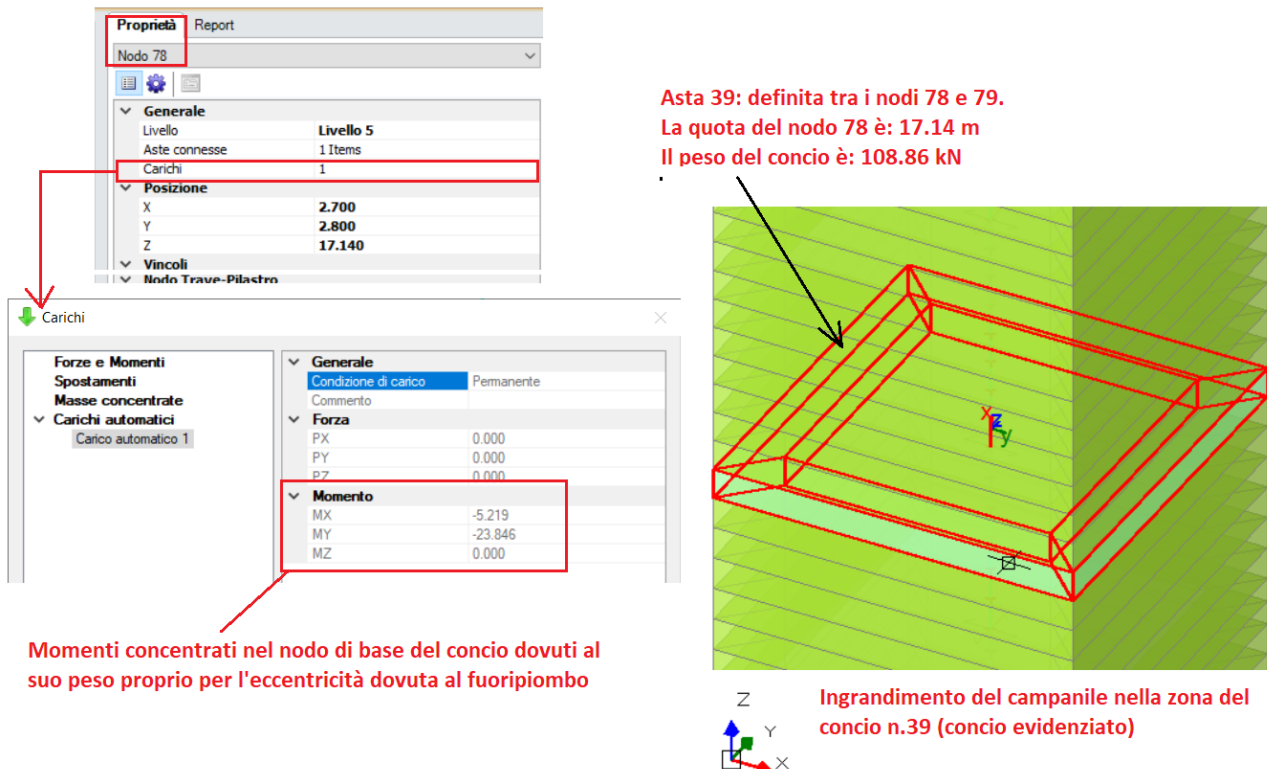


Figura 3-193: Campanile Sant'Antonin, Modello Strutturale, momenti aggiuntivi sul concio 39 per fuoripiombo

In corrispondenza della quota 23.24m il fuoripiombo vale: -0.297m in direzione X, 0.065m in direzione Y. Avendo ipotizzato un andamento lineare, alla quota 17.14m il fuoripiombo vale: -0.129m in direzione X e 0.048 in direzione Y. Il peso del concio è 108.86 kN, quindi si calcolano i seguenti momenti:

$$MX = 108.86 \text{ kN} \cdot 0.048 \text{ m} = -5.219 \text{ kNm} \quad \text{e} \quad MY = 108.86 \text{ kN} \cdot 0.219 \text{ m} = -23.846 \text{ kNm}$$

Infatti:

- il fuoripiombo in direzione X (verso il lato -X) genera un momento attorno all'asse Y (MY, negativo perché porta X su Z);
- il fuoripiombo in direzione Y (verso il lato +Y) genera un momento attorno all'asse X (MX, negativo perché porta Z su Y).

Relativamente al fuoripiombo, il testo di riferimento ne considera gli effetti riducendo il momento resistente; in PCM, si opera in modo duale, amplificando le sollecitazioni tramite i momenti distribuiti. Sostanzialmente si ottiene lo stesso risultato, essendo la sicurezza espressa sempre da un rapporto tra sollecitazione e resistenza.

Dai dati a disposizione, non si evince uno stato di fessurazione iniziale del materiale. Tuttavia, proprio in tema di rigidezza della struttura e fessurazioni, si ritiene di dover precisare alcuni aspetti.

Il metodo semplificato di tipo LV1 previsto nella Direttiva per i Beni Monumentali prevede l'esecuzione di un'analisi sismica lineare, per cui ai fini del confronto LV1 anche in PCM si condurrà l'analisi sismica lineare.

La normativa prevede di calcolare il periodo proprio della struttura come  $T_1 = 0.0187 H$  (con H in m) ed amplificarlo di un coefficiente pari ad 1.4 per tener conto della fase fessurata.

La formulazione semplificata però tiene già in considerazione anche il fattore di comportamento "q", che (come indicato in §3.2.3.5 del DM 14.1.2008) serve a ridurre le forze elastiche dello spettro per tener conto sia dei fenomeni dissipativi che dell'incremento del periodo proprio.

Quindi, l'incremento di  $T_1$  sopra detto appare ridondante, poiché l'effetto dovrebbe già essere compreso nella determinazione di q. Ad ogni modo, poiché la Norma fa cenno a tale incremento, per l'Analisi Sismica Lineare si considera il periodo amplificato anche in PCM, impostando nei "Parametri di Calcolo", scheda "Sismica", proprio il periodo  $T = 0.889 \text{ sec}$  considerato nel testo di riferimento.

Inoltre, per evitare la composizione della risposta anche con le altre direzioni, si sceglie di eseguire l'analisi sismica lineare solo in direzione X (con ciò intendendo i risultati di PCM già relativi alla più sfavorevole delle direzioni tra X e -X). In tal senso, si confronteranno i risultati con la direzione più sfavorevole anche del testo di riferimento:

The image shows a software window titled "Parametri di Calcolo" with a "Sismica" tab selected. The interface includes several sections:

- Direzioni sismica e quote di riferimento:** A sub-section titled "Analisi Sismiche Lineari" with "Direzioni di analisi" set to "X".
- Combinazione delle componenti:** A radio button is selected for "Sommare ai massimi ottenuti per l'azione applicata in una direzione il 30% dei massimi ottenuti per l'azione applicata nelle altre direzioni [§7.3.5]".
- Analisi Sismica Statica Lineare:** A sub-section titled "Periodo principale  $T_1$ " with "T<sub>1X</sub> = 0.889 sec" and "T<sub>1Y</sub> = 0.889 sec" entered. Below it, a formula  $T_1 = C_1 \cdot H^{3/4}$  is shown with  $C_1 = 0.050$  and  $T_1 = 0.703 \text{ sec}$ .

Figura 3-194: Campanile Sant'Antonin, "Parametri di Calcolo", scheda "Sismica"

**Per superare le problematiche relative all'amplificazione del periodo proprio e alla necessità di considerare al contempo il fattore q, è possibile ricorrere all'Analisi Sismica Non Lineare.**

Utilizzando la distribuzione modale adattiva infatti il periodo si allunga ad ogni riduzione di rigidità, fino ad arrivare allo stato limite ultimo. Inoltre, la variazione del periodo non ha un'influenza diretta sulle verifiche di sicurezza, ma costituisce comunque un valore fondamentale nei riguardi dell'analisi modale al passo e alla variazione della forma della distribuzione di forze tra le masse della struttura. Anche il fattore di comportamento "q" non è un parametro direttamente adottato in Pushover, superando quindi anche la problematica della scelta di specifici valori consigliati (ad es. tra 2.8 e 3.6), range di variazione che appare maggiormente applicabile ad edifici civili piuttosto che a strutture a torre, il cui comportamento si ritiene comunque decisamente differente.

In generale quindi, come per le torri anche per campanili la via preferenziale è l'esecuzione dell'Analisi Pushover con Rigidezze iniziali elastiche.

Il modello studiato per le torri inoltre costituisce di fatto uno schema a plasticità diffusa (data la discretizzazione molto fitta dei conci): ogni concio sarà sottoposto a verifiche di sicurezza ad ogni passo, la crisi avverrà generalmente per eccessiva compressione (oppure potrà essere considerato anche il taglio, se si attiva la relativa verifica). A seguito della crisi, il concio subirà svincolamenti con sconnessione a momento e a sforzo assiale, determinando di fatto l'interruzione della costruzione della curva stessa.

Per confrontare i risultati dell'analisi non lineare, nei "Parametri di Calcolo", scheda "Pushover(1)" si sceglie quindi di eseguire la Pushover nelle due direzioni X e Y, nei due versi + e -, con forze secondo le distribuzioni "A" ed "F".

La distribuzione A, caratterizzata da forze proporzionali alle forze statiche, permetterà il confronto con la metodologia semplificata da normativa, ed anche con la stessa analisi sismica lineare di PCM. La distribuzione F invece, essendo caratterizzata da rapporti adattivi tra le forze, costituisce il punto più di sviluppo più avanzato proposto da PCM.

Si noti inoltre la specifica del nodo 154 (ultimo nodo della struttura) come "Punto di Controllo".

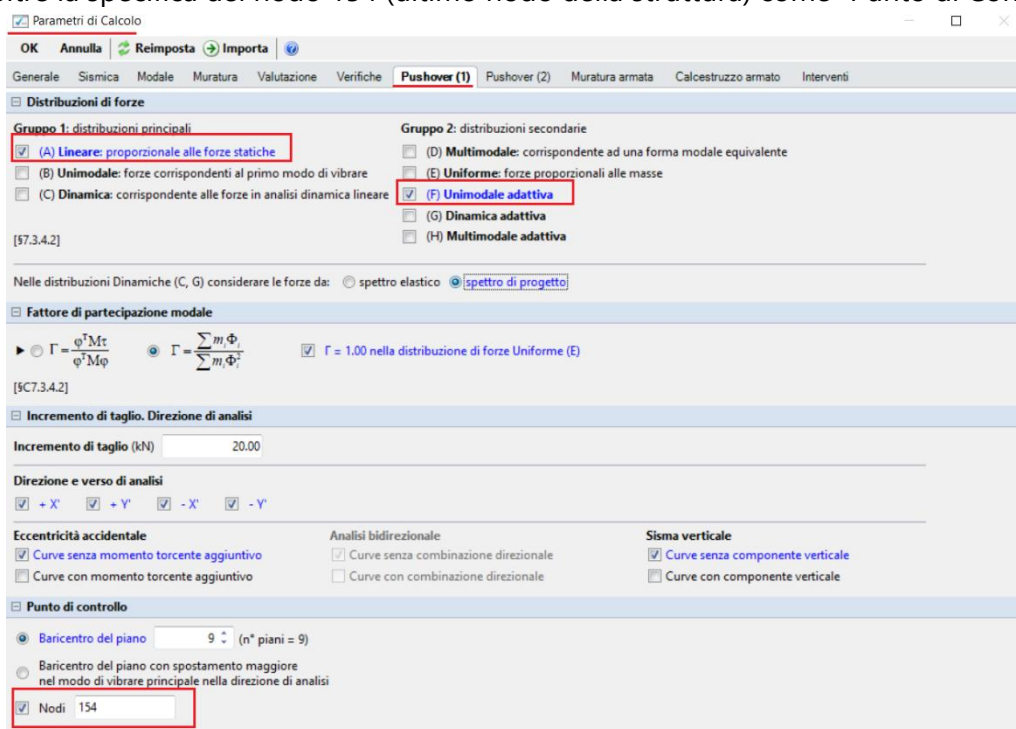


Figura 3-195: Campanile Sant'Antonin, "Parametri di Calcolo", scheda "Pushover(1)"

Come già indicato per le strutture snelle già trattate in precedenza, è consigliabile inoltre aumentare la soglia di labilità (scrivendo "avanzate" nella riga di comando, e portando il valore di default a 1000mm), in modo da mettere in risalto la crisi a compressione dei conci quale reale causa di labilità.

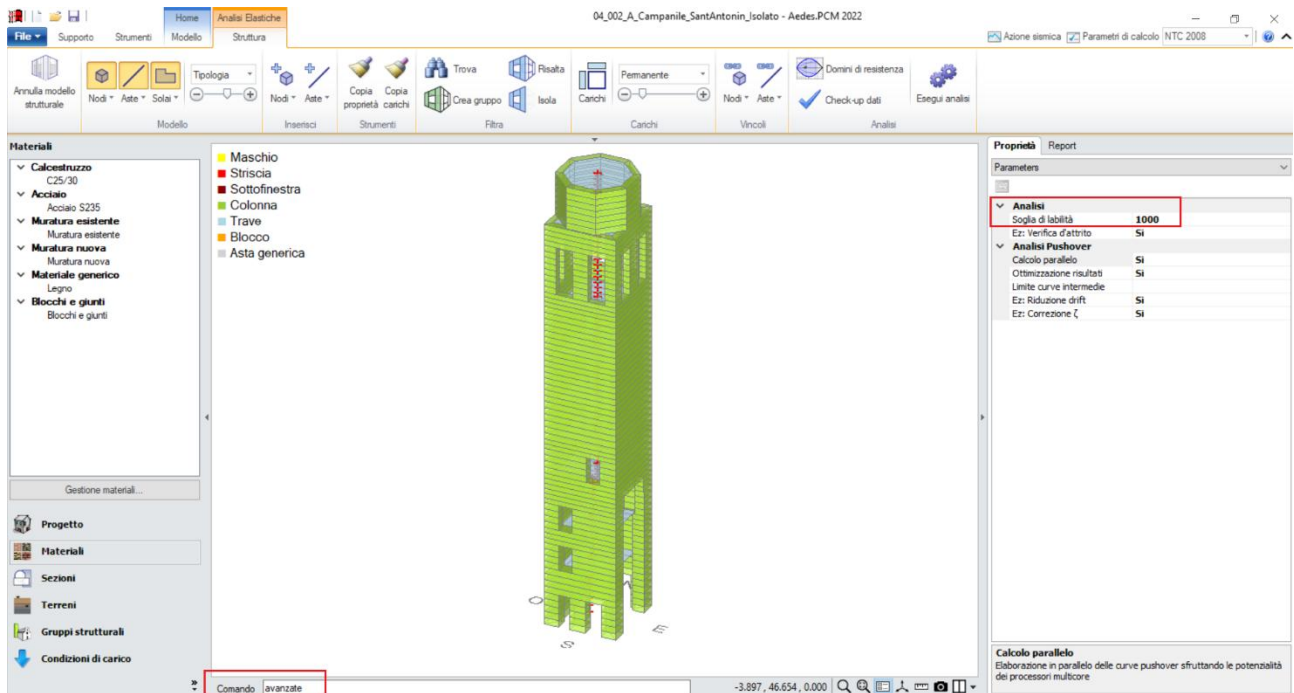


Figura 3-196: Campanile Sant'Antonin, Modello Strutturale, impostazioni soglia di labilità

## RISULTATI DELLE ANALISI

Con riferimento ai risultati relativi al modello del Campanile isolato (di cui al file "04\_002\_A\_Campanile\_SantAntonin\_Isolato.vdm"), si osservano innanzitutto i risultati dell'Analisi Sismica Lineare:

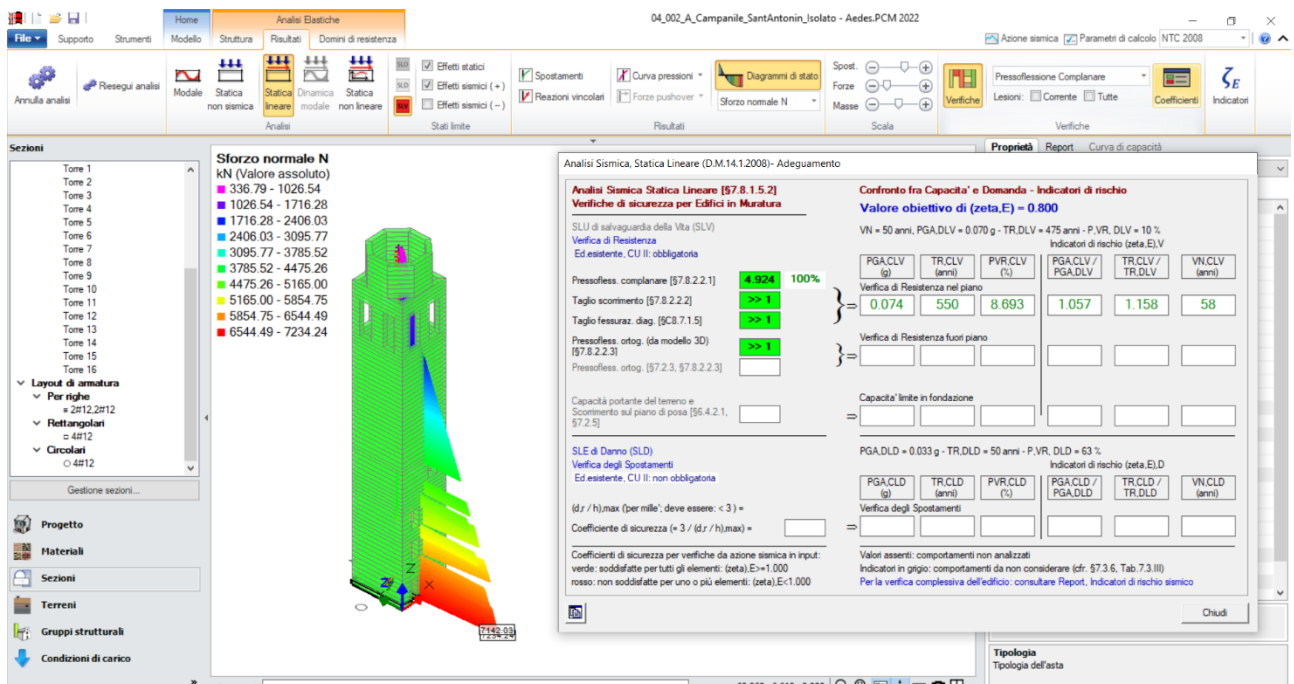


Figura 3-197: Campanile Sant'Antonin Isolato, Analisi Sismica Lineare

Attivando la visualizzazione dello Sforzo Normale, si nota che i diagrammi non risultano allineati in altezza: questo è dovuto al fatto che il diagramma viene rappresentato sempre nel piano degli assi principali, ma ogni sezione trasversale del campanile può avere assi diversamente inclinati per quanto indicato in precedenza.

Le verifiche risultano soddisfatte (come mostrato dal Report di Sintesi degli Indicatori di Rischio): questo significa che la verifica a pressoflessione deviata è soddisfatta per ogni concio: per approfondire i risultati, con riferimento ad es. al concio di base, si possono annotare le tre caratteristiche della sollecitazione N, My ed Mz e visualizzare il dominio di resistenza.

In questo caso ad es. il concio di base è sollecitato da: N=7234 kN, My= -1255.06 kNm ed Mz=10247.80 kNm. La terna di sollecitazione è interna alla frontiera del dominio tridimensionale di resistenza:

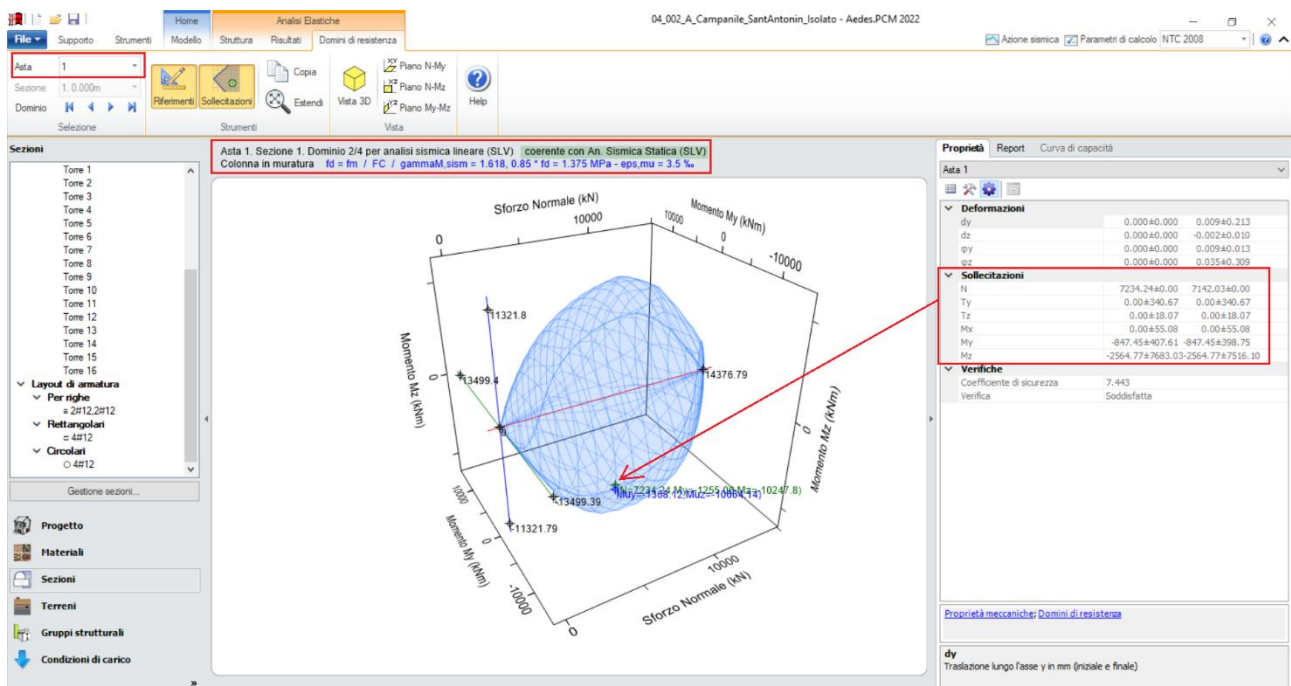


Figura 3-198: Campanile Sant'Antonin Isolato, Analisi Sismica Lineare, Dominio Resistenza Concio n.1 alla base

I minimi Indicatori di Rischio per l'Analisi Sismica Lineare lungo X risultano i seguenti:

$\alpha_{v,PGA}=1.057$ ,  $\alpha_{v,TR}=1.158$ , Capacità in termini di Vita Nominale:  $V_{N,C}=58$  anni

Elaborando lo stesso modello con riferimento all'Analisi Sismica Lineare lungo Y si ottiene invece:

$\alpha_{v,PGA}=1.400$ ,  $\alpha_{v,TR}=2.749$ , Capacità in termini di Vita Nominale:  $V_{N,C}=138$  anni

Il testo di riferimento propone valori minori:

X:  $\alpha_{v,PGA}=0.910$ ,  $\alpha_{v,TR}=0.746$ , Capacità in termini di Vita Nominale:  $V_{N,C}=37$  anni

Y:  $\alpha_{v,PGA}=1.074$ ,  $\alpha_{v,TR}=1.236$ , Capacità in termini di Vita Nominale:  $V_{N,C}=62$  anni

Si conferma tuttavia la tendenza ad un miglior comportamento in direzione Y: confrontando i valori minimi, PCM conduce ad una differenza del 14% circa.

La corrispondenza può ritenersi buona considerate le incertezze sui dati in Input dovuti ai carichi della guglia e dei solai, ed altri piccoli aspetti legati a lievi differenze geometriche in qualche apertura rispetto alla struttura reale.

Passando ai risultati della Pushover, si nota un andamento quasi lineare nelle direzioni +X e -Y, la torre infatti mostra in queste direzioni una fessurazione più contenuta; diversamente, si evidenzia un maggior degrado in termini di rigidità per le direzioni -X e +Y:

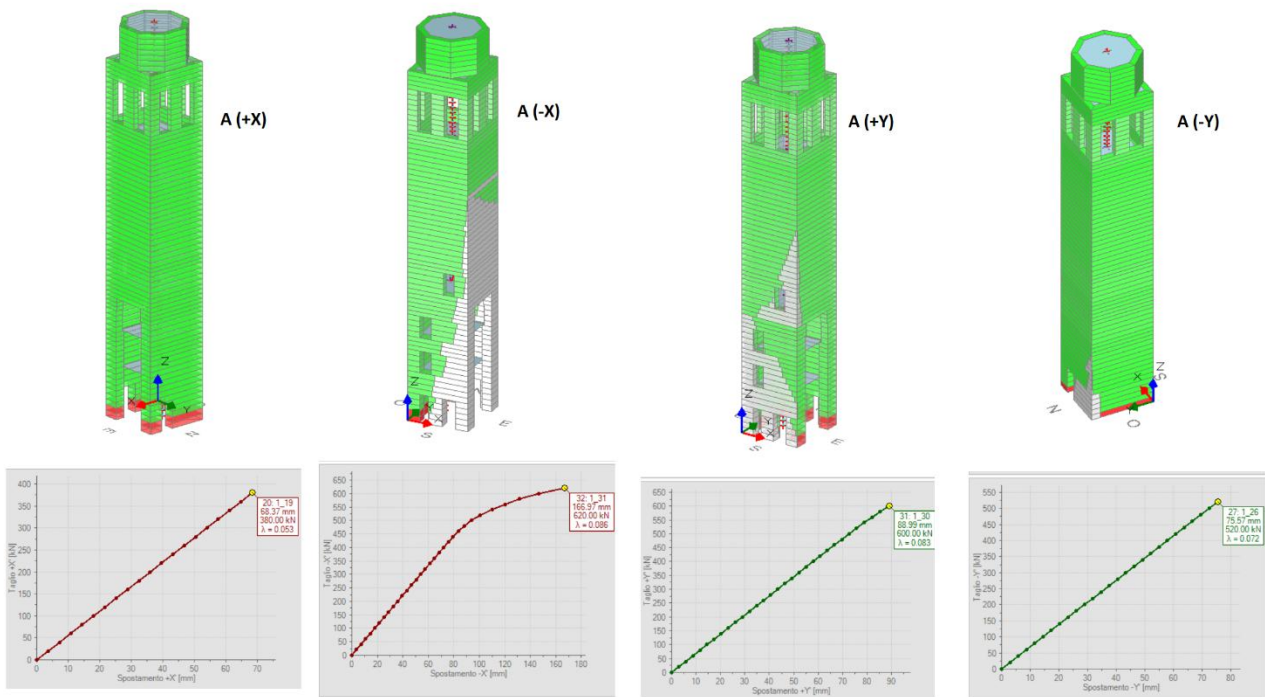


Figura 3-199: Campanile Sant'Antonin Isolato, Analisi Pushover, curve con distribuzione A

Di seguito si riporta il quadro di Sintesi degli Indicatori di Rischio, che comprende anche i risultati delle curve con distribuzione F:

N° curva	Corrente	Vista	Distr.	Direz.	Direz. 2	Mt	Ez	Control ✓	$\zeta_{PGA}(SLV)$	$\zeta_{TR}(SLV)$	VN.CLV
10	☉	☐	F	+X'				J154	<b>0.829</b>	0.575	29
2	☉	☐	A	+X'				J154	0.871	0.663	33
16	☉	☐	F	-Y'				J154	1.000	1.000	50
8	☉	☐	A	-Y'				J154	1.029	1.065	53
12	☉	☐	F	+Y'				J154	1.129	1.411	71
4	☉	☐	A	+Y'				J154	1.186	1.636	82
14	☉	☐	F	-X'				J154	1.600	4.352	218
6	☉	☐	A	-X'				J154	1.700	5.211	261

Figura 3-200: Campanile Sant'Antonin Isolato, Analisi Pushover, sintesi degli Indicatori di Rischio

Il confronto in termini di PGA con i valori del testo di riferimento (indicati tra parentesi) mostra una buona corrispondenza anche in questo caso, la differenza più marcata è in direzione +X:

X:  $\alpha_{v,PGA} = 0.829$  (0.910: -9%)

-X:  $\alpha_{v,PGA} = 1.600$  (1.700: -6%)

Y:  $\alpha_{v,PGA} = 1.129$  (1.112: +1.5%)

-Y:  $\alpha_{v,PGA} = 1.000$  (1.074: -7.4%).

La validazione è quindi soddisfatta in termini di ordini di grandezza, date le differenze tra le due elaborazioni.

Con riferimento al confronto tra la distribuzione A ed F, non si notano molte differenze. Si osserva una lieve diminuzione dell'indicatore di rischio minimo (ad es. da 0.871 scende a 0.829 in direzione +X).

Si può quindi ritenere maggiormente congruente il quadro dei risultati fornito dalla distribuzione F.

Gli approfondimenti dei risultati ottenuti in Analisi Pushover possono essere visti anche sotto un'altra ottica; dall'esame dei risultati in termini di Indicatori di Rischio, possono emergere due situazioni:

- risulta  $\zeta < 1$ : questo significa che la Capacità è inferiore alla Domanda, quindi, allo Stato Limite Ultimo, il quadro fessurativo è quello corrispondente all'ultimo punto della curva;
- risulta  $\zeta > 1$ : questo indica invece "Verifica soddisfatta", ovvero la Capacità è maggiore della Domanda.

In questo secondo caso, per adeguare meglio eventuali interventi di rinforzo, potrebbe risultare utile conoscere lo stato fessurativo in corrispondenza della Domanda.

Per ottenere tale risultato, è sufficiente attivare sulla curva il passo corrispondente all'incrocio con la retta di Domanda, in tal modo si visualizza la fessurazione a quel determinato passo in cui di fatto Capacità e Domanda coincidono: ad esempio, con riferimento alla visualizzazione estesa della curva F +Y, la Capacità=89.15mm, mentre la Domanda= 78.04mm.

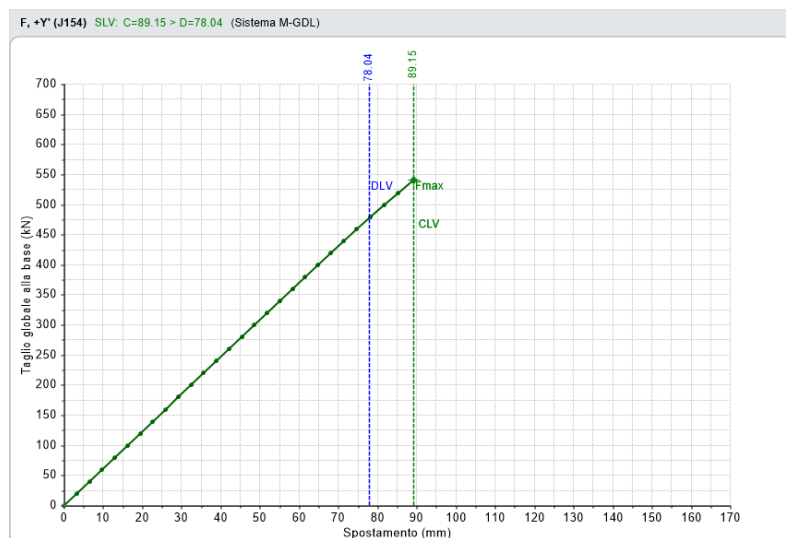


Figura 3-201: Campanile Sant'Antonin Isolato, Analisi Pushover, esempio per Curva F +Y

Attivando la visualizzazione delle verifiche al passo, e spostando il cursore sul passo corrispondente a circa 78mm (passo 24), si può effettivamente confrontare che lo stato fessurativo è minore rispetto allo stato limite ultimo, potendo quindi calibrare opportunamente gli interventi:

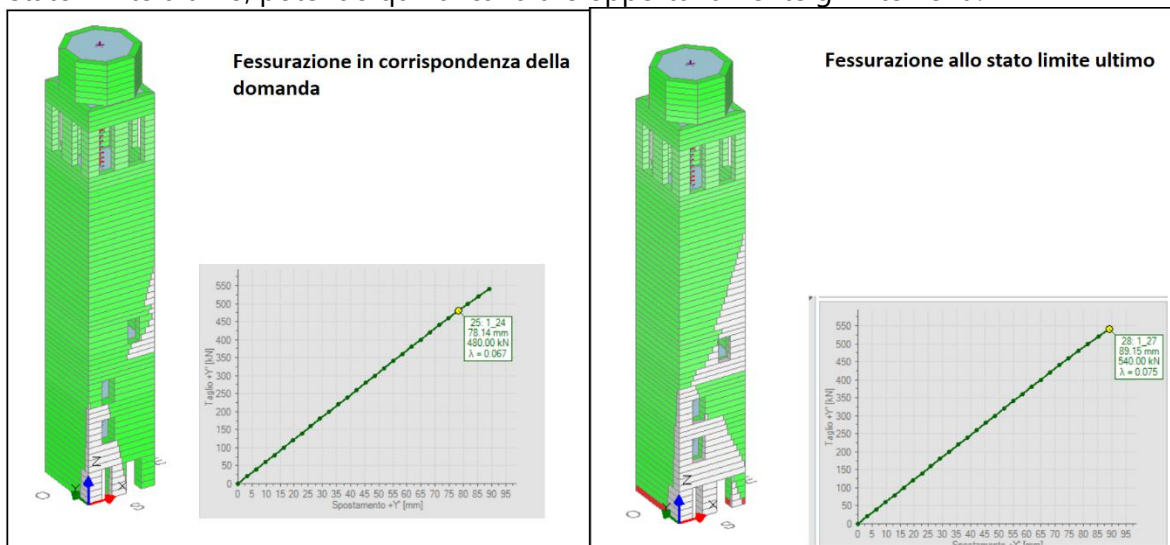


Figura 3-202: Campanile Sant'Antonin Isolato, Analisi Pushover, confronto fra fessurazioni di domanda e a SLU

Un'ultima osservazione riguarda il periodo di vibrazione. Attivando la visualizzazione dei risultati dell'Analisi Modale "al passo Pushover", è possibile notare che il periodo passa da un valore "iniziale" pari a circa  $T=1.367$  sec ad un valore di  $T=1.403$ sec in corrispondenza della Domanda, fino ad arrivare a  $T=1.522$  sec in condizioni di SLU.

Il rapporto tra periodo allo stato limite ultimo e periodo in condizioni elastiche è pari a circa 1.12, lievemente inferiore a quanto indicato in normativa in merito sul metodo semplificato con amplificazione compresa tra 1.4 e 1.75, ma comunque in linea con la tendenza dell'effetto amplificativo finale del periodo stesso.

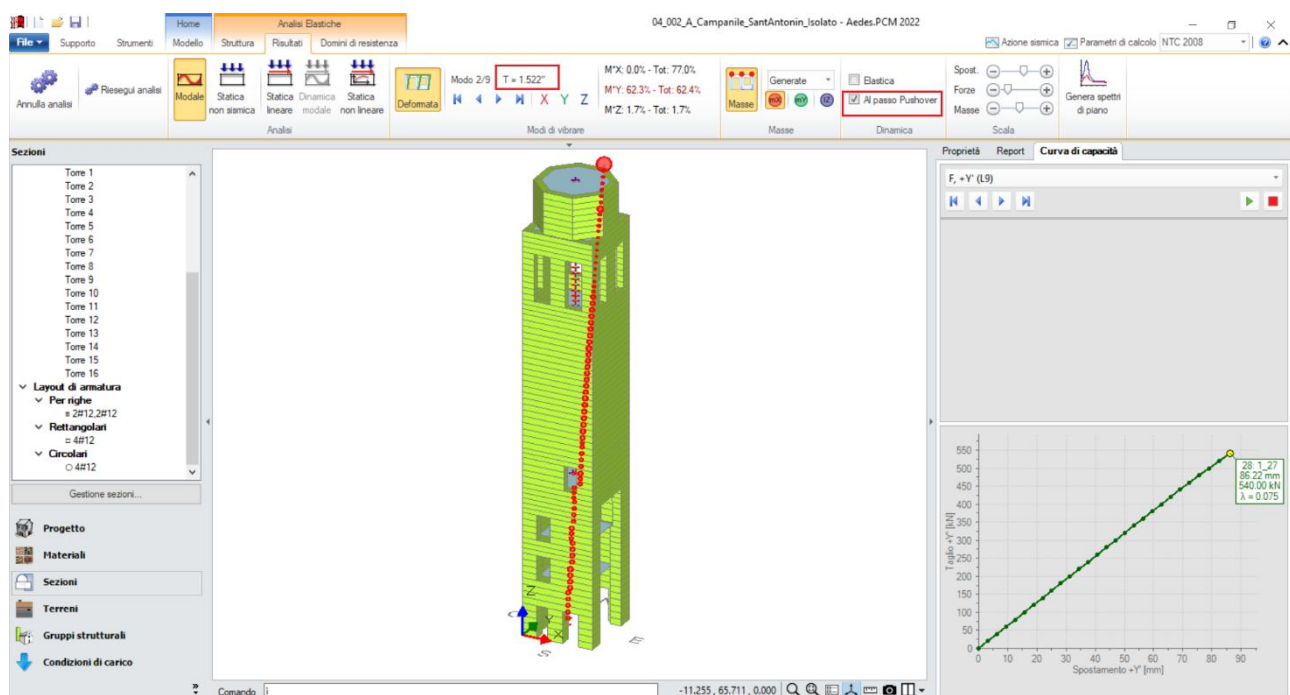


Figura 3-203: Campanile Sant'Antonin Isolato, Pushover, consultazione Analisi Modale al Passo Pushover

La presenza di edifici adiacenti può essere tenuta in considerazione "bloccando" le componenti di spostamento in X o Y della porzione di struttura di fatto sottoposta a tali vincoli (file: "04\_002\_C\_Campanile\_SantAntonin\_Vincolato.vdml").

In questo caso, attivando la visualizzazione dei Layers in precedenza nascosti, è possibile visualizzare le quattro quote di stacco degli edifici adiacenti: a favore di sicurezza, si considera influente solo la parte più bassa, ovvero fino ad un'altezza di 10.83m dalla base. Per tutti i nodi fino a questa quota sarà impedito lo spostamento lungo Y agendo direttamente dai vincoli nella finestra delle proprietà dei nodi:

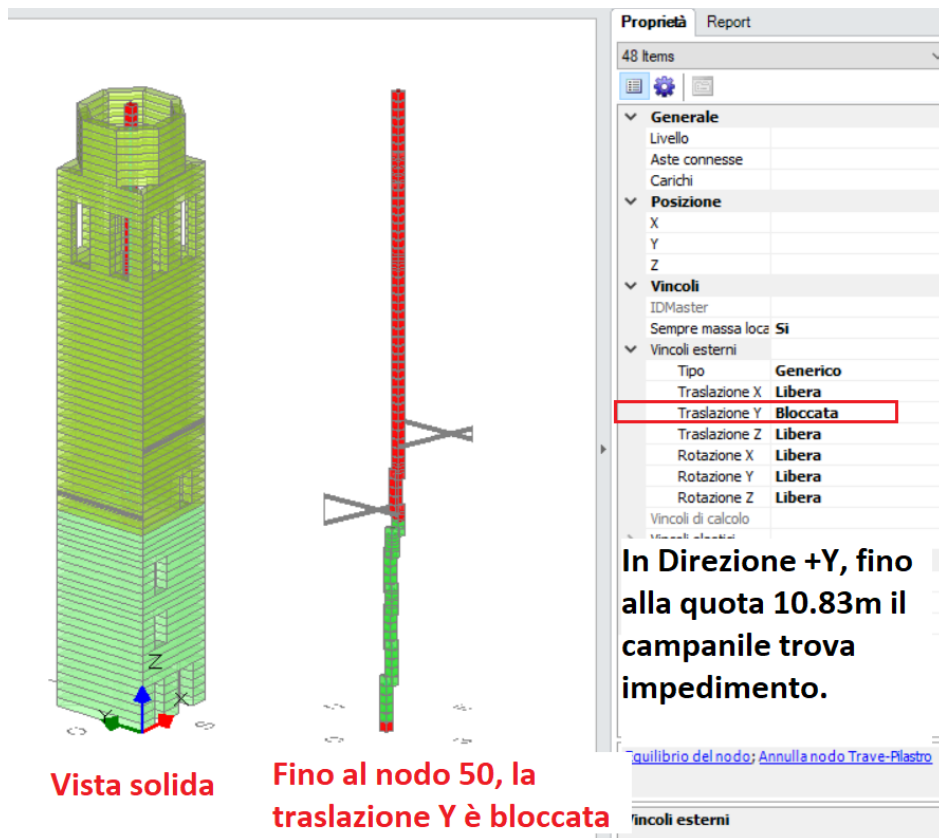


Figura 3-204: Campanile Sant'Antonin Vincolato: impedimento della Traslazione Y, fino a quota +10.83m

Visualizzando entrambe le curve Pushover calcolate, emerge un peggioramento della risposta del campanile, sia in termini di Forza Massima ma soprattutto di Spostamento raggiunto:

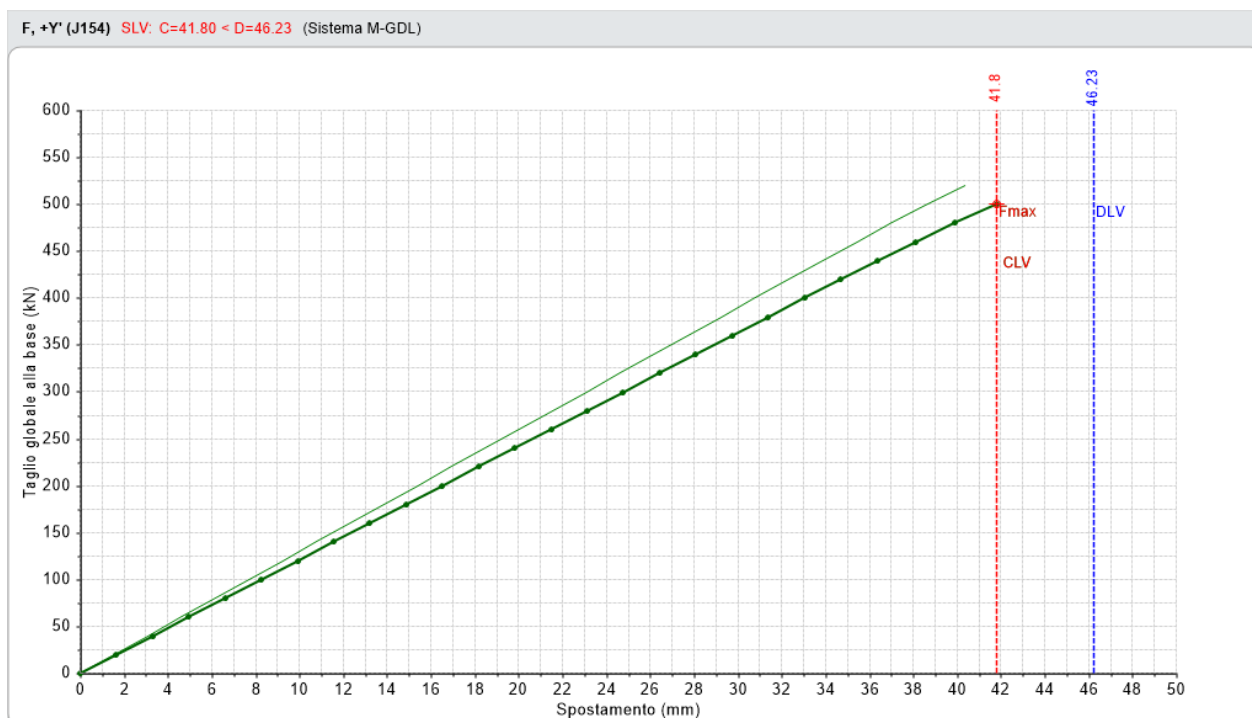


Figura 3-205: Campanile Sant'Antonin Vincolato, Analisi Pushover, Curve A ed F in Direzione +Y

Di seguito sono riportati gli Indicatori di rischio:

N°curva	Corrente	Vista	Distr.	Direz.	Direz.2	Mt	Ez	Control	ζ,PGA(SLV)	ζ,TR(SLV)	VN,CLV
2		<input checked="" type="checkbox"/>	A	+Y'				J154	0.933	0.785	39
4		<input checked="" type="checkbox"/>	F	+Y'				J154	0.933	0.785	39

Visualizzando le verifiche allo stato limite ultimo, si nota come si raggiunga una crisi nel concio di base che in questo caso è quello coincidente con la quota a partire dalla quale il campanile non è più vincolato (+10.83m).

La crisi avviene per taglio (come indicato anche dalla "Storia Evolutiva"): questo comportamento si ritiene plausibile, la riduzione di altezza libera comporta infatti una struttura più "tozza", pertanto maggiormente sollecitata da azioni taglianti.

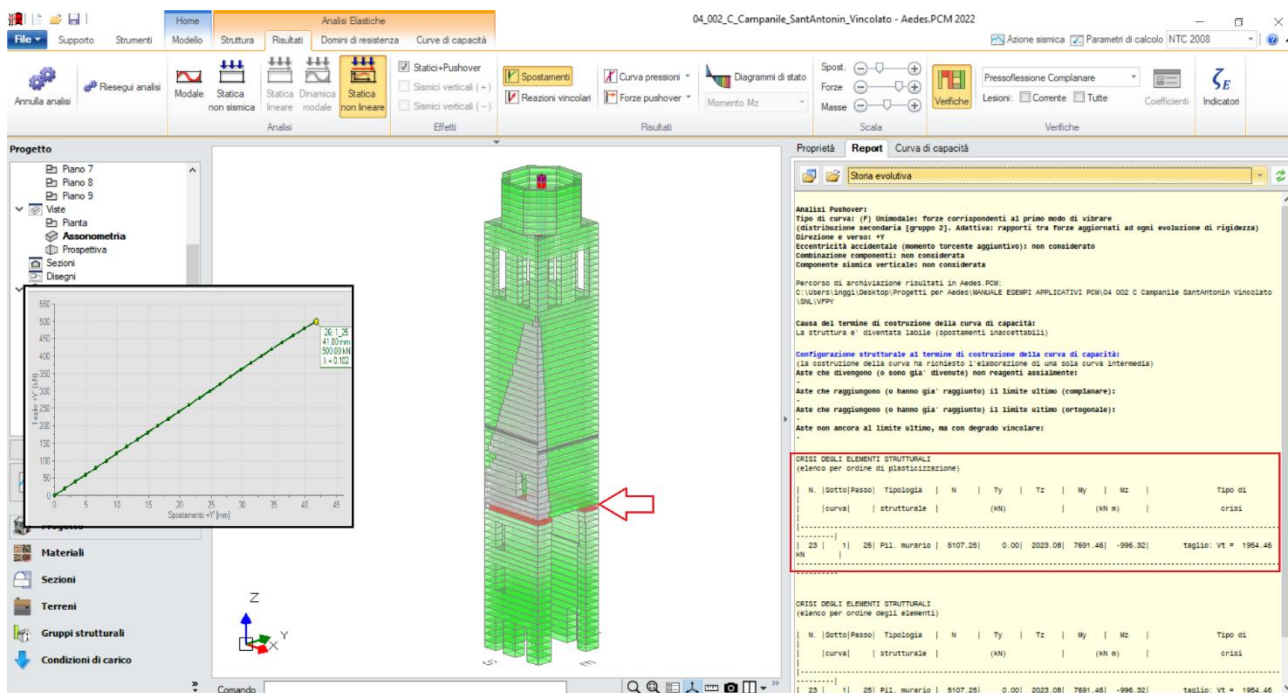


Figura 3-206: Campanile Sant'Antonin Vincolato, Analisi Pushover, fessurazione allo stato limite ultimo

Come conferma della crisi per taglio del concio 23, si può calcolare il Taglio Resistente, tenendo presente che la sezione muraria a questa quota ha un'area pari a 109088.27 cm<sup>2</sup> e si osserva uno sforzo normale pari a N=5107.25 kN, si ottiene:

$$V_t = (\tau_0 * A + f * N) / FC = (0.06 * 10908827 + 0.40 * 5107.25 * 10^3) / 1.35 = 1998096 \text{ N} = 1998 \text{ kN}$$

Il valore è coincidente con quanto calcolato da PCM, a meno di arrotondamenti:

CRISI DEGLI ELEMENTI STRUTTURALI  
(elenco per ordine di plasticizzazione)

N.	Sotto curva	Passo	Tipologia strutturale	N	Ty (kN)	Tz	My (kN m)	Mz	Tipo di crisi
23	1	25	Pil. murario	5107.25	0.00	2023.08	7691.46	-996.32	taglio: Vt = 1954.46 kN

## 04\_003\_Chiesa\_Cupola

File di riferimento:

04\_003\_Chiesa\_Cupola

Parole chiave:

- MODELLAZIONE CUPOLA

La metodologia di schematizzazione avanzata proposta in PCM per lo studio degli elementi costruttivi storici e monumentali può essere utilizzata anche per la modellazione di particolari elementi di copertura complessi come le Cupole. Nell'ambito di strutture come le chiese o le grandi basiliche, tali elementi costituiscono un macro-elemento di una certa rilevanza, sia dal punto di vista culturale che prettamente ingegneristico.

### MODELLAZIONE ARCHITETTONICA

Nel presente capitolo si descriverà lo studio di una cupola semicircolare di una basilica: a tal fine, in PCM verrà modellata solo la porzione della basilica che coinvolge la cupola stessa, costituita da grandi arcate trionfali impostate su colonne circolari, con altezze variabili in relazione alle navate da cui derivano; dall'incrocio tra navate e transetto si definisce un grande ambiente centrale a pianta quadrata, attorno a cui trovano luogo tre absidi perimetrali. Sopra tale ambiente centrale si imposteranno i muri di sostegno della Cupola stessa.

La cupola ha un diametro di circa 7.20m e può essere ragionevolmente discretizzata considerando una pianta decagonale, fra i cui vertici è possibile disegnare i muri con le finestre centrali. Lo schema resistente della Cupola viene rappresentato da una serie di cinque archi disposti a raggiera, collegando fra loro gli spigoli interni dei muri di imposta.

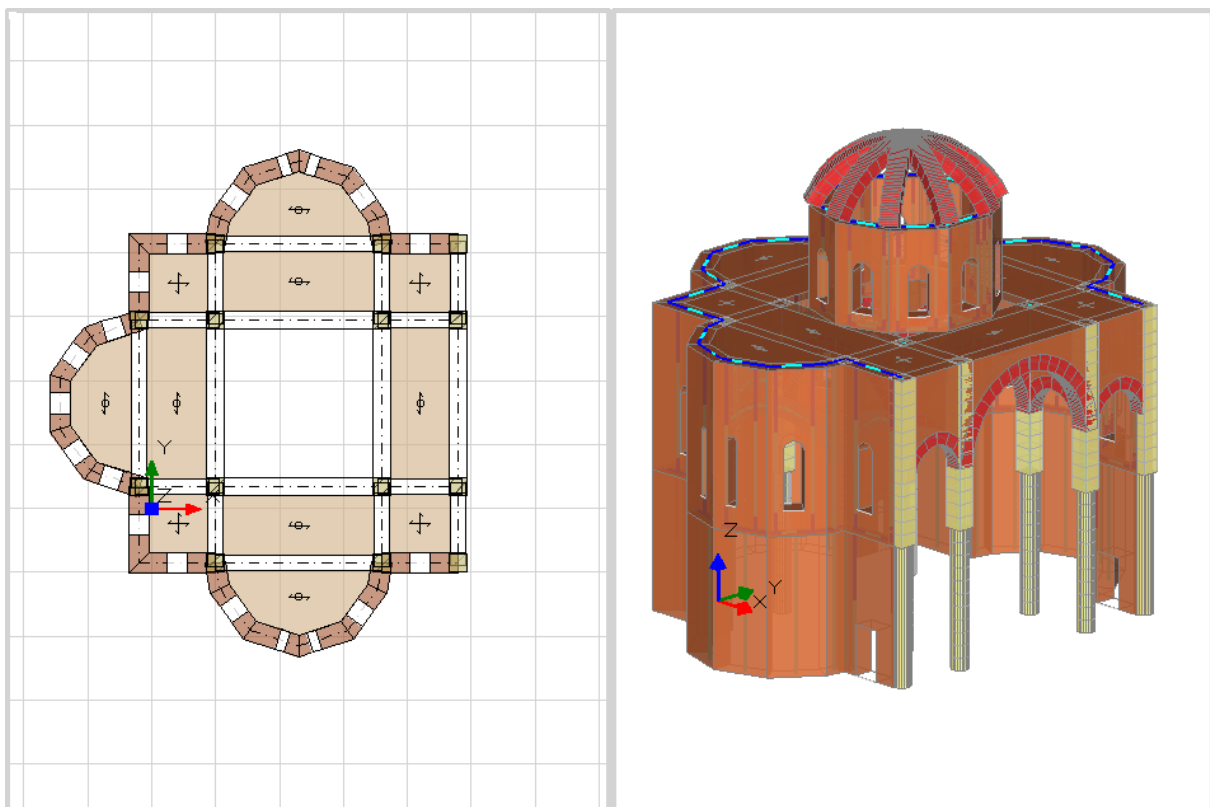


Figura 3-207: Basilica con Cupola, vista in Pianta ed Assonometria

Per la modellazione sono stati considerati quattro piani:

- Piano Colonne: H=5.50m (dove creare le colonne di base per le arcate superiori e le murature perimetrali delle absidi);
- Piano archi: H=6.50m (dove sono stati compiutamente definite le arcate trionfali);
- Piano Lanterna: H=4.00m (rappresenta il piano di definizione dei muri della lanterna a pianta decagonale);
- Piano Cupola: H=3m (è il piano di inserimento degli archi della cupola).

In base a tale geometria, gli archi della cupola hanno una luce libera di 6.50m ed una freccia pari a 2m, quindi hanno un andamento leggermente ribassato rispetto ad un completo sesto acuto. Lo spessore della cupola viene quindi rappresentato dallo spessore degli archi adottato pari a 60cm, la loro profondità indica invece la costolatura effettivamente resistente ed adottata pari a 70cm.

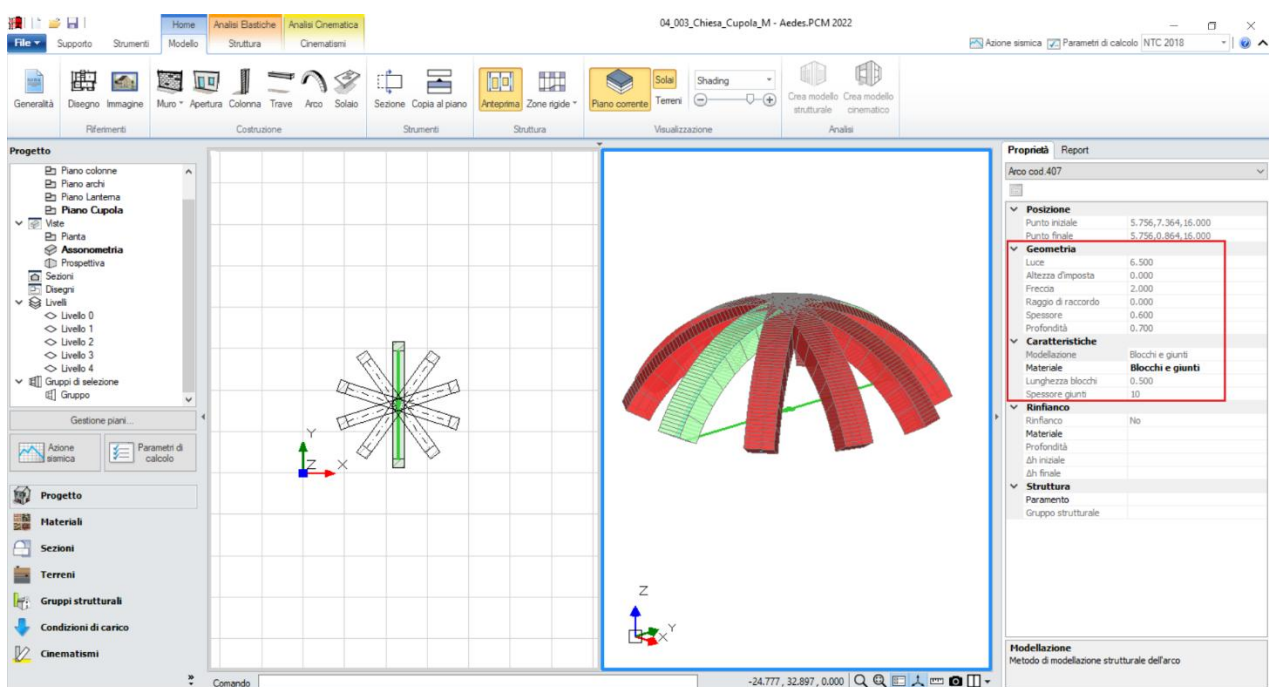


Figura 3-208: Basilica con Cupola, proprietà degli archi rappresentanti la Cupola

Per tutti gli archi presenti nel modello si considera una modellazione a "Blocchi e Giunti", con una suddivisione in blocchi da 0.50m e giunti di spessore 10mm: per il relativo materiale nella finestra "Materiali" si considera una resistenza a compressione  $f_m = 35$  MPa per i blocchi e una resistenza a trazione dei giunti  $f_{tm} = 0.25$  MPa.

Le murature delle pareti sono costruite in "Pietrame disordinato", mentre sia per le colonne a sezione circolare che per quella a sezione rettangolare (costituenti i conci di imposta finale degli archi trionfali sottostanti) si considera una muratura in "Blocchi Lapidei squadrate".

Per tutti i materiali presenti si considera un Livello di Conoscenza LC1, ritenendo tuttavia coerente adottare i valori medi sia per le resistenze che per i moduli elastici.

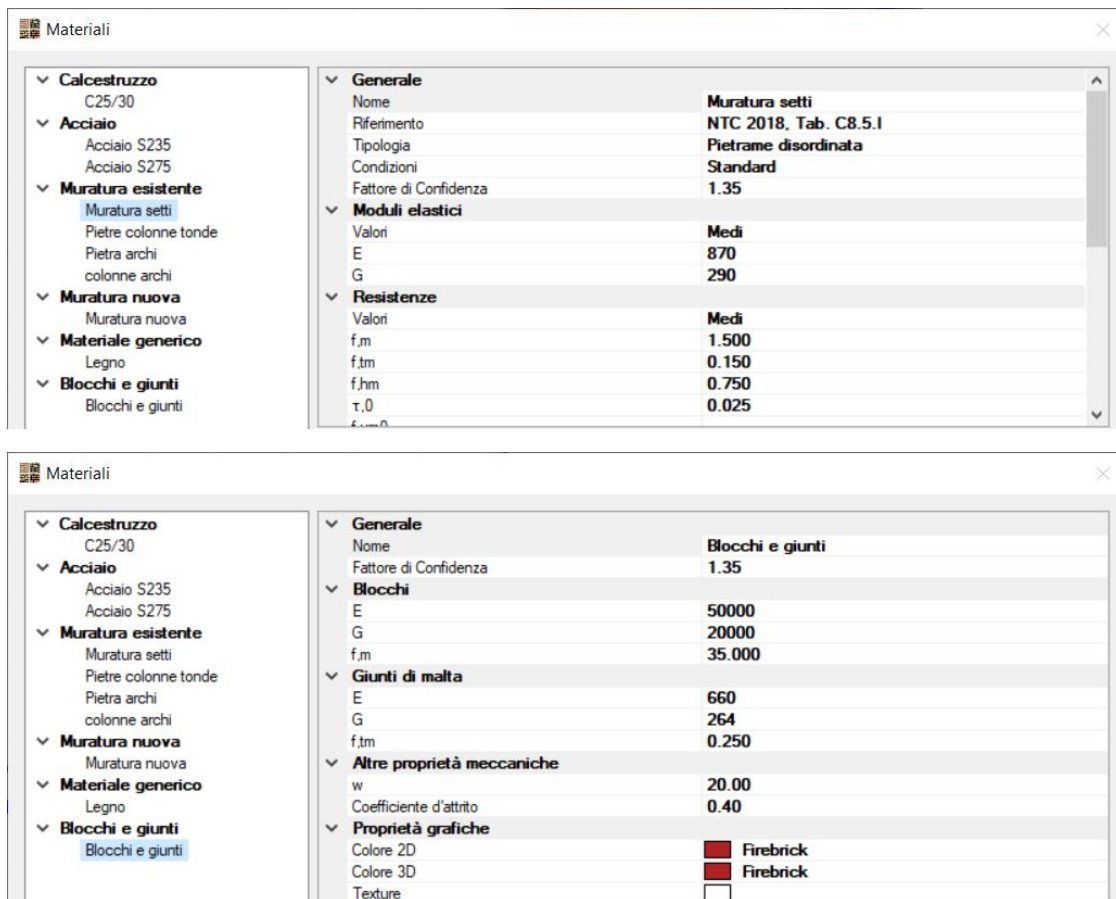


Figura 3-209: Basilica con Cupola, Finestra Materiali

Per la definizione dei solai di copertura delle absidi e dei transetti intermedi gli archi trionfali sono stati dotati di Rinfianchi, adottando la tipologia di solai con volta "a Botte" e con distribuzione "a piastra" nelle zone di incrocio fra le orditure.

## MODELLAZIONE STRUTTURALE

Dopo aver impostato il modello architettonico secondo quanto sopra indicato, è possibile generare il "Modello Strutturale".

In questo caso, poiché la lanterna/cupola costituisce un elemento non rappresentativo dell'intera impronta planimetrica, se l'obiettivo dell'Analisi Pushover è la ricerca di un moltiplicatore di collasso da utilizzare per il successivo studio dei cinematismi di pareti ed archi inferiori, non si ritiene un macroelemento che debba essere considerato ai fini dell'analisi.

Per tal motivo, si ritiene coerente selezionare sia le pareti della lanterna che Archi e Giunti costituenti la Cupola e non considerarli ai fini delle analisi, impostando la relativa proprietà "Da Analizzare=No". Questa proprietà viene anche impostata per i link rigidi diagonali generati in automatico per ricollegare negli angoli gli archi trionfali all'orizzontamento (link non necessari, in quanto sono già ricollegati con link orizzontali alle colonne d'angolo).

Non risulta quindi necessario curare gli approfondimenti legati alle connessioni tra le murature della lanterna e gli archi sottostanti, oppure tra gli archi della cupola e le pareti della lanterna. Queste parti infatti al momento risultano "scollegate", come è possibile notare attraverso la mancanza di link rigidi di connessione, ma in base a quanto indicato questo aspetto è trascurabile.

La presenza di lanterna e cupola viene però considerata come carichi aggiuntivi sulle aste dei rinfianchi perimetrali degli archi sottostanti: in questo modo, si considera comunque la sua massa ai fini sismici.

Attivando la visualizzazione dei carichi aggiuntivi, si considera un carico permanente non strutturale aggiuntivo pari a  $-14.46$  kN:

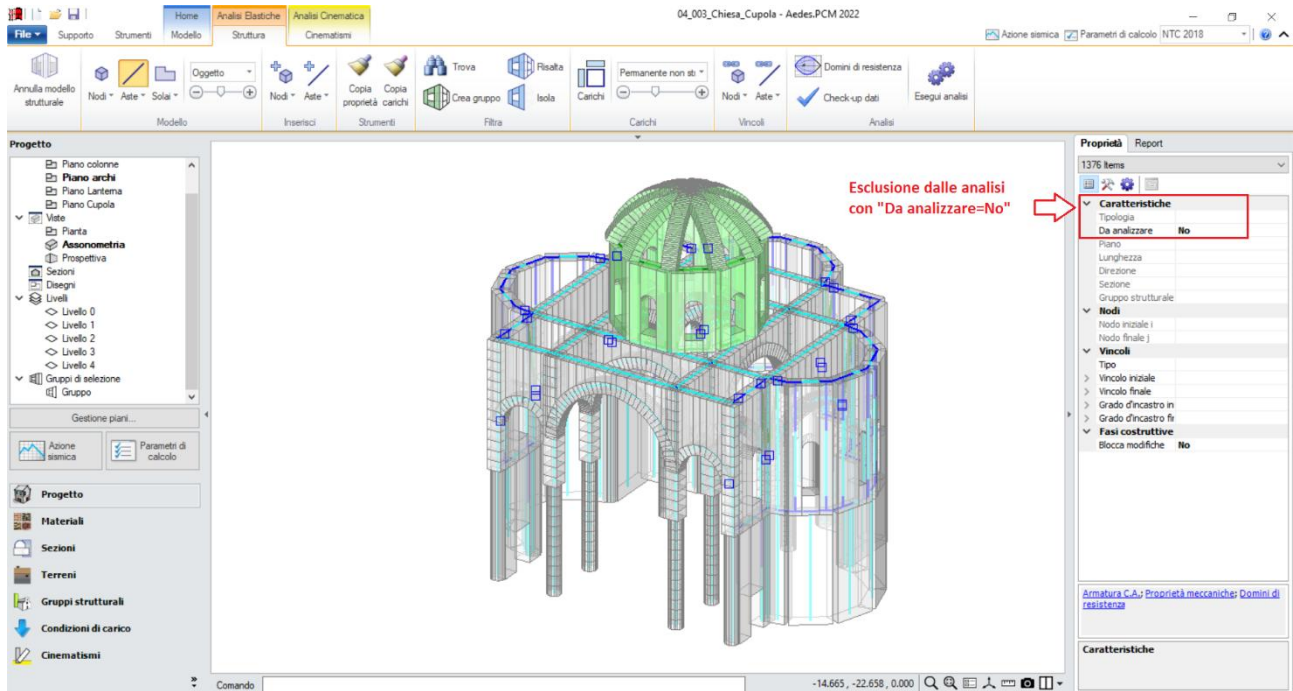


Figura 3-210: Basilica con Cupola, Modello Strutturale: impostazione "Da Analizzare=No" per la lanterna

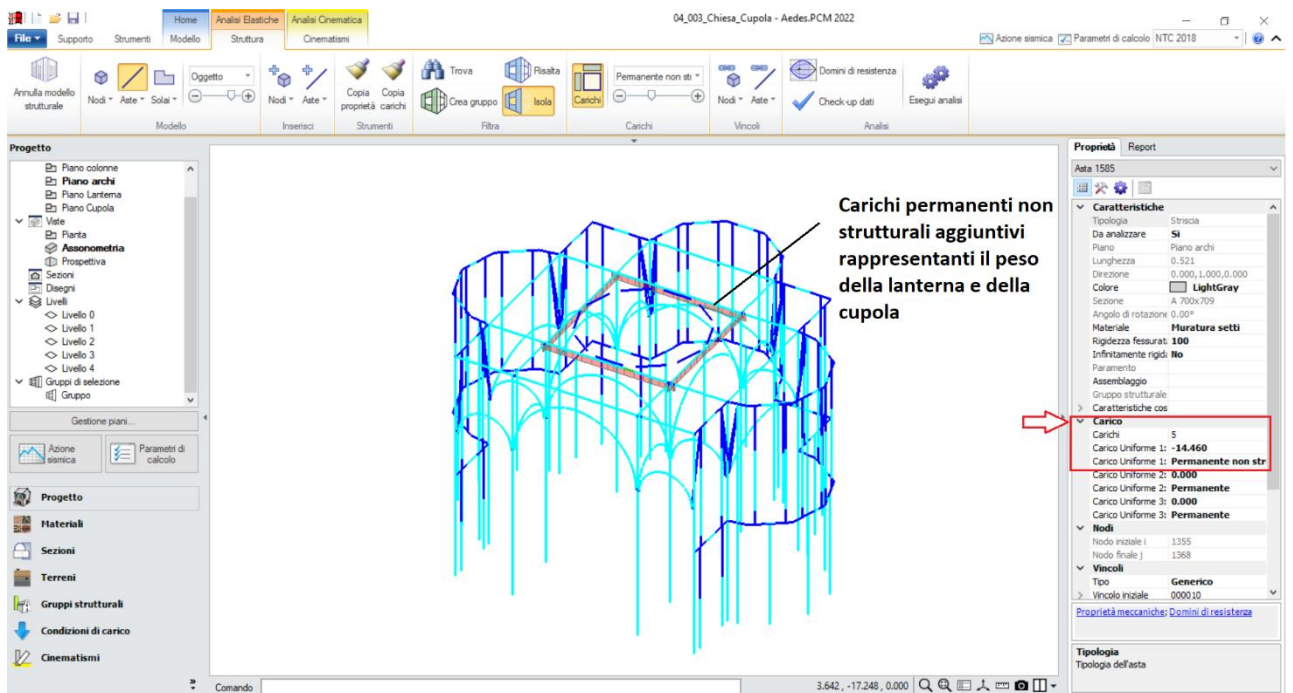


Figura 3-211: Basilica con Cupola, Modello Strutturale: attivazione vista Carichi Aggiuntivi

Per lo stesso motivo sopra detto, nei "Parametri di Calcolo", scheda "Pushover(1)" risulta necessario adeguare la posizione del punto di controllo, abbassandolo al Piano 2 (ovvero la quota dell'orizzontamento al di sotto della lanterna con cupola):

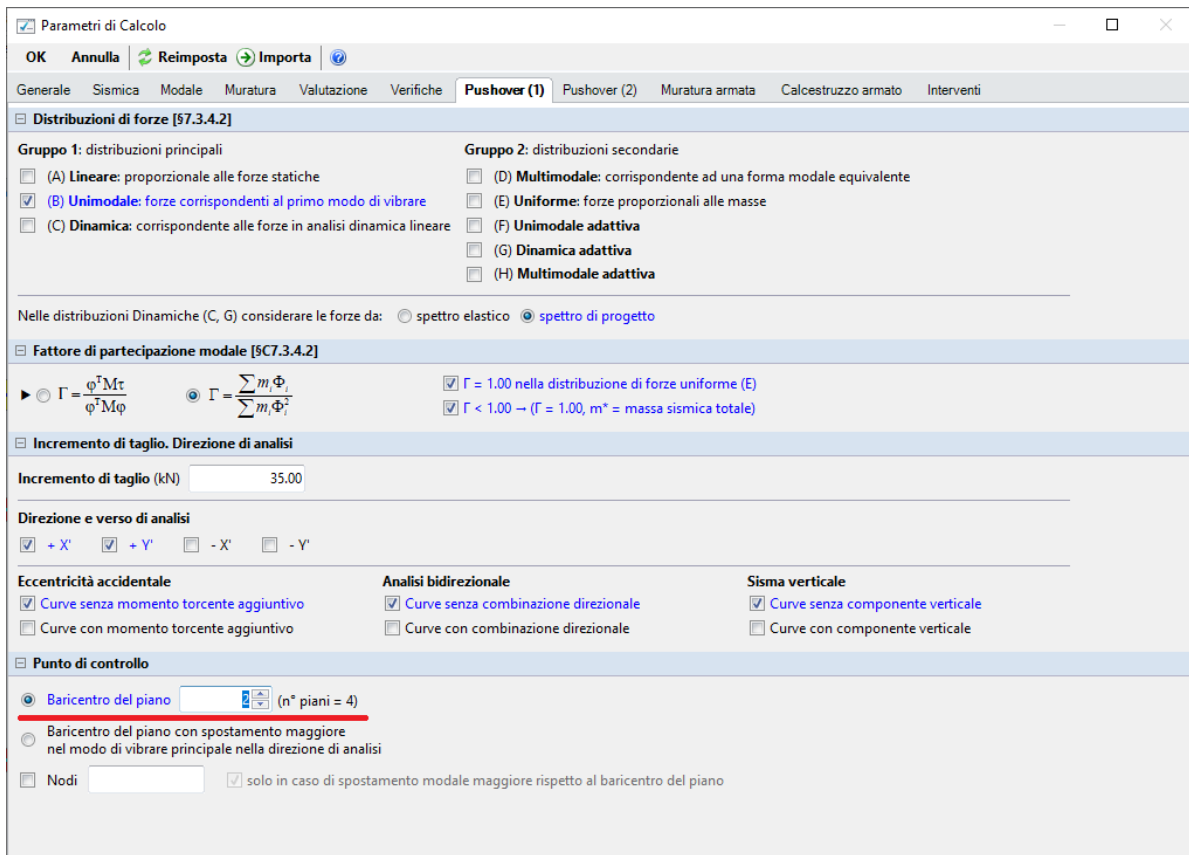


Figura 3-212: Basilica con Cupola, "Parametri di Calcolo", scheda "Pushover(1)"

Nella scheda "Pushover(2)" inoltre si decide di considerare, a favore di sicurezza, come modalità di calcolo del punto rappresentativo dello SLU quello "rispetto al massimo relativo": in tal modo, si evitano sovrastime della risposta, in coerenza anche con la presenza della cupola che potrebbe contribuire ad abbassarne il livello di sicurezza:

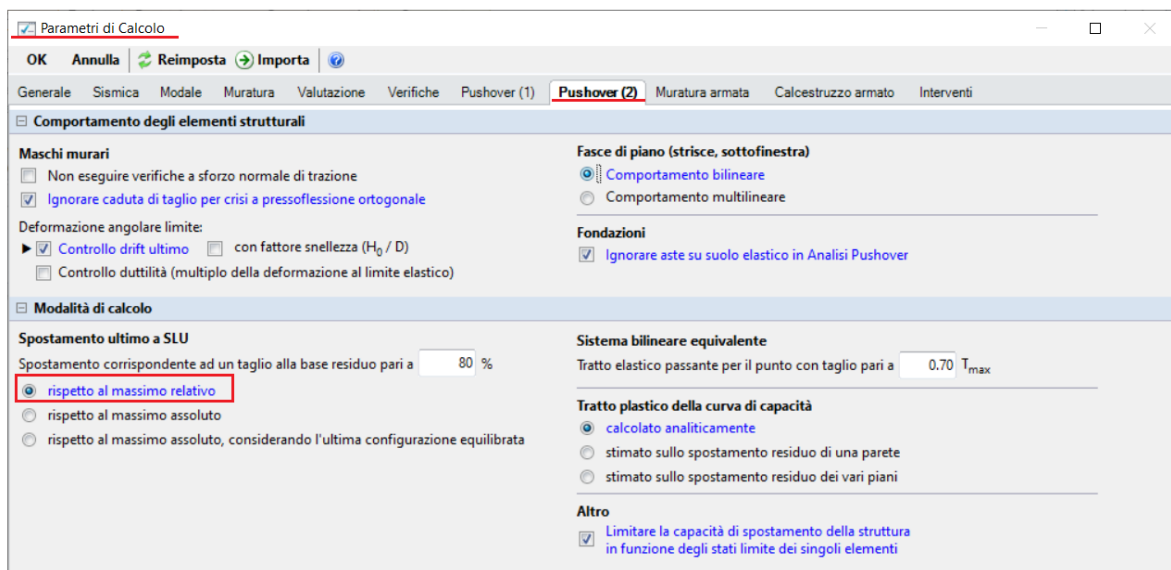


Figura 3-213: Basilica con Cupola, "Parametri di Calcolo", scheda "Pushover(2)"

## RISULTATI DELLE ANALISI

Con riferimento ai risultati relativi all'Analisi Pushover condotta in entrambe le direzioni X ed Y con distribuzione B, è possibile osservare come le cause del termine di costruzione delle curve siano riconducibili ad una caduta di taglio superiore al limite massimo relativo, per come considerato nei Parametri di Calcolo:

- per la direzione +X, tale caduta è essenzialmente dovuta all'attivazione dei tipici meccanismi di collasso a quattro cerniere sulle arcate trionfali, accompagnate da una plasticizzazione diffusa delle pareti perimetrali e delle absidi;
- per la direzione +Y, accanto al quadro fessurativo delle pareti e degli archi, seppur per certuni meno evidente e in qualche caso non attivato, si riscontra un collasso anche di colonne, con conseguenti riduzioni della resistenza di tutta la struttura:

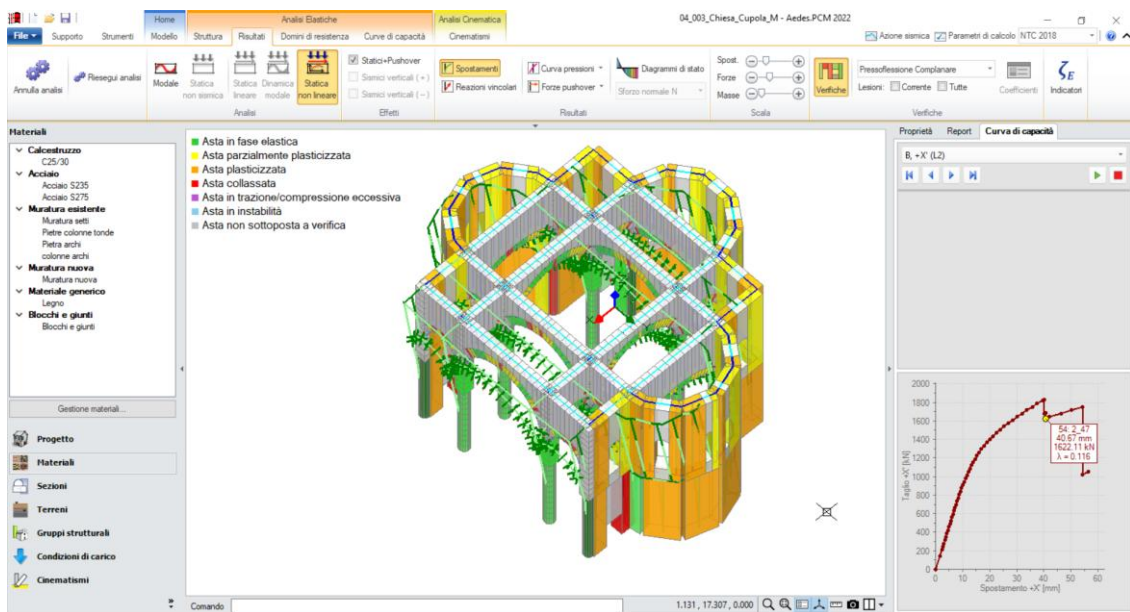


Figura 3-214: Basilica con Cupola, Analisi Pushover, consultazione verifiche al passo, Curva B +X

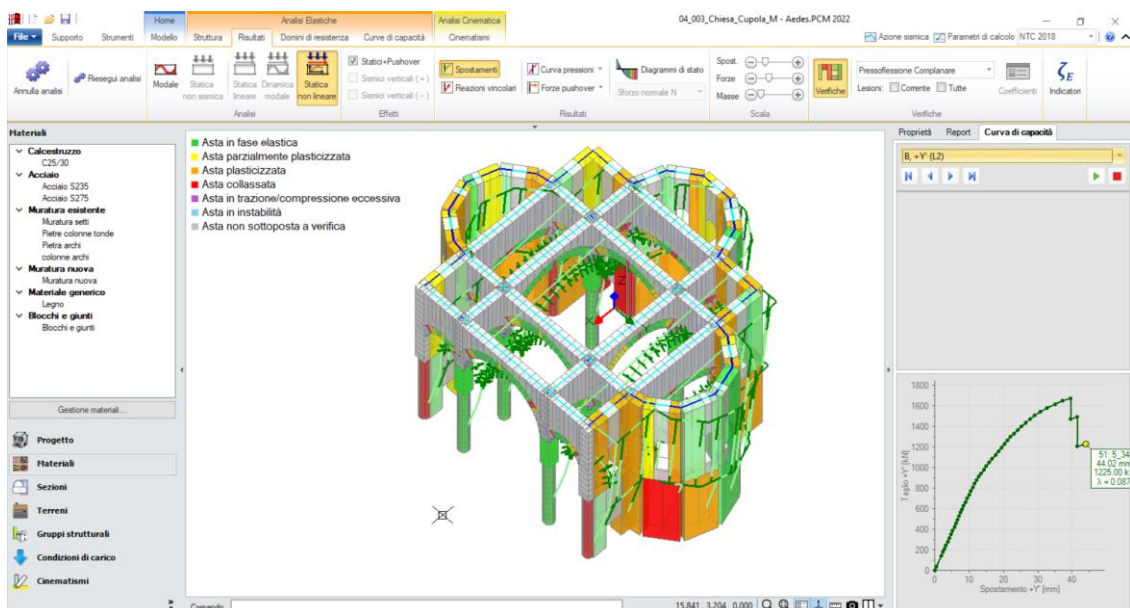


Figura 3-215: Basilica con Cupola, Analisi Pushover, consultazione verifiche al passo, Curva B +Y

Dalle curve Pushover ottenute potrà essere derivato il moltiplicatore di collasso, da utilizzare per la generazione di eventuali cinematismi generici.

Ad esempio in questo caso volendo considerare il moltiplicatore di collasso per la direzione +X, si ottiene  $\lambda=0.116$  corrispondente ad una massa sismica totale  $M^*=1431356$  kg (visualizzabile dal "Report", "Verifiche di sicurezza"): impostando in ambiente cinematico un cinematismo generico dove considerare, fra le sue proprietà, i valori appena ricavati, si otterrebbe un valore dell'Indicatore di Rischio  $\zeta=0.915$ , lievemente inferiore a quanto ottenuto per la corrispondente curva Pushover:

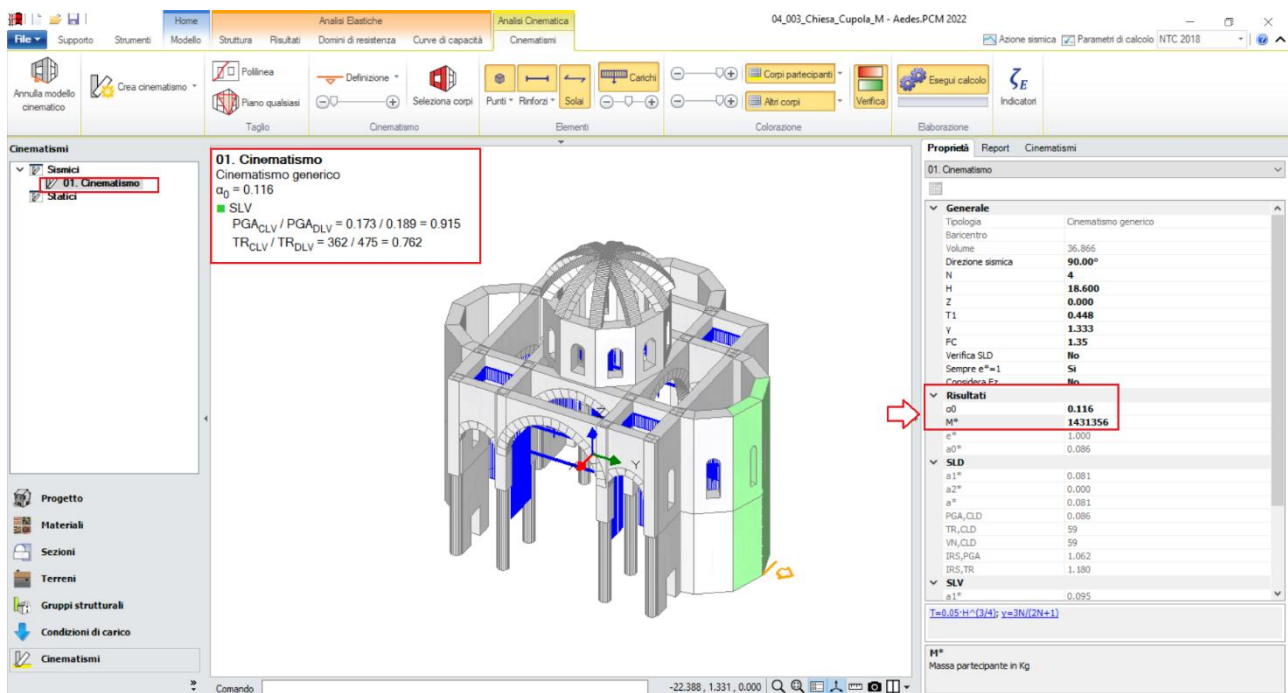


Figura 3-216: Basilica con Cupola, Cinematismo generico con  $\lambda=0.116$  e  $M^*=1431356$  kg

La risposta strutturale della cupola potrà essere valutata separatamente a favore di sicurezza in ambiente cinematico, studiando vari meccanismi di collasso degli archi che coinvolgano anche parte delle pareti della lanterna.

Nell'ottica di una verifica semplificata di tipo LV1, se dai risultati dovesse emergere un indicatore di rischio minore, potrà essere assunto questo livello di sicurezza quale minimo fra tutti i macroelementi considerati nelle verifiche.