

# UNIVERSITÀ DELLA CALABRIA



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE – DINCI

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA  
CIVILE INDIRIZZO STRUTTURE (DM 270)

ESTRATTO DI TESI LAUREA MAGISTRALE

“Analisi di Vulnerabilità Sismica del Duomo di Cosenza:  
Meccanismi Locali”

*Relatore*

*Prof. Ing. Francesco Bencardino*

*Candidato*

*Pierfrancesco Conforti*  
*Matr.204620*

*Correlatore*

*Arch. Rossana Baccari*

Anno Accademico 2020-2021

# 1. INTRODUZIONE

Argomento del lavoro di tesi è la valutazione della vulnerabilità sismica della “Cattedrale di Santa Maria Assunta” della città di Cosenza (riconosciuta come patrimonio testimone di cultura e di pace dall’UNESCO il 12 ottobre 2011). L’elaborato si pone come obiettivo principale quello di valutare la sicurezza nei confronti dei meccanismi locali che interessano singoli pannelli murari o più ampie porzioni della costruzione e impegnano i pannelli murari prevalentemente fuori dal loro piano medio. L’analisi viene condotta mediante il software “Aedes PCM”.

## 2. CASO DI STUDIO: DUOMO DELLA CITTÀ DI COSENZA (CATTEDRALE DI SANTA MARIA ASSUNTA)

La Cattedrale (Duomo di Cosenza) presenta una pianta a croce latina, con aula organizzata in tre navate di otto campate, ciascuna suddivisa da due file di pilastri con capitelli. La copertura a capriate di legno delle tre navate trova un’unica eccezione nell’ultima campata della navata sinistra caratterizzata da volta a crociera. Lungo la navata di sinistra si aprono due cappelle barocche.

### 2.1 Inquadramento Territoriale

La Cattedrale è situata nel cuore del centro storico della città, all’interno dell’antico tessuto urbano di Cosenza (Figura 2.1), in una zona di pericolosità sismica alta. L’inquadramento dell’unità strutturale è riportato nella Figura 2.2. La Figura 2.3 mostra la facciata principale.



Figura 2.1 – Inquadramento territoriale dell’unità strutturale.



Figura 2.2 – Inquadramento 3D dell’unità strutturale.



Figura 2.3 – Facciata principale Duomo di Cosenza.

### 2.2 Caratteristiche della Cattedrale

La planimetria dell’unità strutturale è riportata in Figura 2.4. Le dimensioni principali del Duomo sono le seguenti: lunghezza massima 61,00 m; larghezza massima 21,00 m; altezza navata centrale 19,80 m; altezza navate laterali 11,00 m; altezza massima zona presbiteriale 19,60 m.

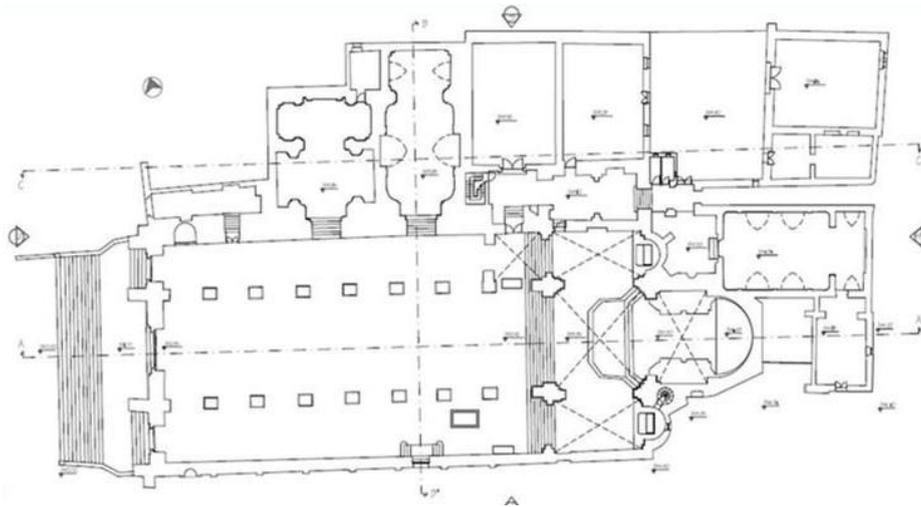


Figura 2.4 – Planimetria dell'unità strutturale.

### Livello di Conoscenza e Fattore di Confidenza della Struttura

In relazione al rilievo geometrico e alle indagini materico-costruttive si è adottato un *Livello di Conoscenza LCI*. Le proprietà dei materiali corrispondenti al livello di conoscenza *LCI* sono riportate nella Tabella 2.1;

- ✓ per le Resistenze: i minimi degli intervalli per la tipologia muraria considerata;
- ✓ per i Moduli Elastici: i valori medi degli intervalli per la tipologia muraria considerata.

Tipologia di muratura	$f$	$\tau_0$	$f_{v0}$	$E$	$G$	$w$
	(N/mm <sup>2</sup> )	(kN/m <sup>3</sup> )				
	min-max	min-max		min-max	min-max	
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	1,0-2,0	0,018-0,032	-	690-1050	230-350	19
Muratura a conci sbalzati, con paramenti di spessore disomogeneo (*)	2,0	0,035-0,051	-	1020-1440	340-480	20
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	2,6-3,8	0,056-0,074	-	1500-1980	500-660	21
Muratura irregolare di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)	1,4-2,2	0,028-0,042	-	900-1260	300-420	13-16(**)
Muratura a conci regolari di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.) (**)	2,0-3,2	0,04-0,08	0,10-0,19	1200-1620	400-500	
Muratura a blocchi lapidei squadriati	5,8-8,2	0,09-0,12	0,18-0,28	2400-3300	800-1100	22
Muratura in mattoni pieni e malta di calce (***)	2,6-4,3	0,05-0,13	0,13-0,27	1200-1800	400-600	18
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es.; doppio UNI foratura ≤40%)	5,0-8,0	0,08-0,17	0,20-0,36	3500-5600	875-1400	15

Tabella 2.1 – Identificazione materiali presenti in situ.

La Figura 2.5 riporta la collocazione in pianta dei materiali impiegati. I materiali sono distinti attraverso la colorazione.



Figura 2.5 – Collocazione in pianta dei materiali impiegati.

### 2.3 Valutazione delle Azioni

Le azioni agenti principalmente sulla struttura sono:

- ✓ *Pesi propri*, che possono essere classificati in permanenti strutturali e permanenti non strutturali;
- ✓ *Carichi variabili* (in funzione della destinazione d'uso);
- ✓ *Neve*;
- ✓ *Sisma*.

Le azioni sono state combinate secondo le indicazioni del *paragrafo 2.5.3* delle NTC2018.

Le verifiche sono state eseguite nei confronti dello SLV (Stato Limite di salvaguardia della Vita), azioni sismiche caratterizzate da probabilità di eccedenza del 10% nel periodo di riferimento  $V_R$ .

Nella Tabella 2.2 sono riportati i valori del periodo di ritorno  $T_R$  dello SLV.

Stato limite	SLV
$P_{VR}$ (%)	10
$T_R$ (Anni)	712

Tabella 2.2 – Valori di riferimento.

Un altro parametro necessario per il calcolo dell'azione sismica è il coefficiente “S” che tiene conto della categoria di sottosuolo e delle condizioni topografiche:  $S=S_S*S_T$ .

Nel caso del Duomo oggetto di studio siamo in presenza di una categoria topografica T1. Per quanto riguarda la categoria di sottosuolo, si hanno a disposizione risultati di prove di laboratorio effettuate su provini rimaneggiati di terreno estratti dal sito e sottoposti a prove di taglio diretto. A tal riguardo, non avendo informazioni sulla precisa posizione, nonché la rispettiva localizzazione della profondità del prelievo o sondaggio di campionamento, si ritiene necessario affrontare le analisi variando le diverse tipologie di terreni dalla categoria A alla C, al fine di ottenere un possibile range di risposta strutturale in funzione del tipo di terreno.

Un ulteriore parametro necessario per la valutazione degli effetti dell'azione sismica è il fattore di struttura. Nel caso in esame, avendo a che fare con una struttura in muratura a carattere storico, la capacità attesa di dissipare energia è molto bassa; si è deciso pertanto di assumere il valore  $q=1$  e, di conseguenza, le analisi sono state svolte direttamente con lo spettro di risposta elastico che coincide con lo spettro di progetto.

La Tabella 2.3 riassume, con riferimento allo SLV, i parametri principali per la definizione degli spettri elastici:

	SLV SPETTRO 1	SLV SPETTRO 2	SLV SPETTRO 3
$T_R$ (Anni)	712	712	712
Cat. suolo	A	B	C
Cat. topografica	T1	T1	T1
$S_S$	1,000	1,087	1,230
$C_C$	1,000	1,326	1,429
$S_T$	1	1	1
$S$	1,000	1,087	1,230
$a_g$	0,320g	0,320g	0,320g

Tabella 2.3 – Riepilogo dati spettrali al variare della categoria topografica.

## 2.4 Modellazione Strutturale

### Software di Calcolo

La struttura del Duomo oggetto di studio è molto complessa in quanto sono presenti diverse tipologie di archi, volte, capriate ecc. Il software “*Aedes PCM*” ha agevolato la modellazione, la rappresentazione e la creazione tridimensionale dell'organismo strutturale.

### Modello Architettonico

Utilizzando un file CAD come sorgente di input è stata definita la geometria della pianta architettonica. La fase precedente alla definizione della geometria è stata quella del settaggio dei materiali strutturali.

Dopo aver definito la geometria strutturale si è reso necessario definire ed assegnare l'azione sismica, le condizioni e le combinazioni di carico. Quanto esposto ha permesso di ottenere il *modello architettonico* riportato nelle Figura 2.6 e 2.7.

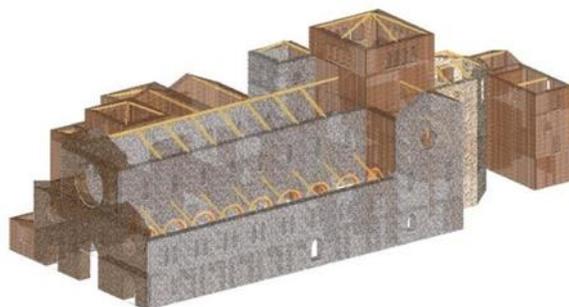


Figura 2.6 – Rendering Duomo.

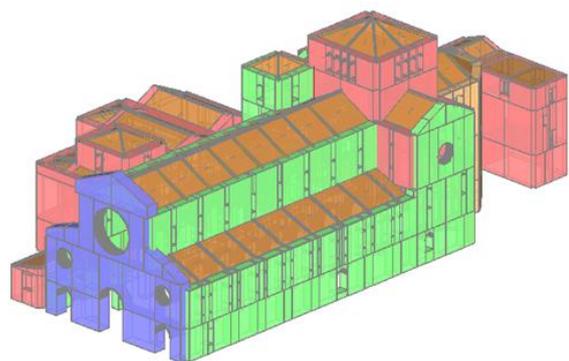


Figura 2.7 – Schematizzazione del Duomo in funzione dei materiali strutturali.

### Modello Strutturale

Successivamente è stato definito il *modello strutturale* (Figura 2.8) dove sono stati generati nodi, aste e i carichi derivanti dagli elementi e dai solai, ovvero si è definito il *telaio equivalente*; tramite tale modello è stato possibile eseguire le *analisi globali*.

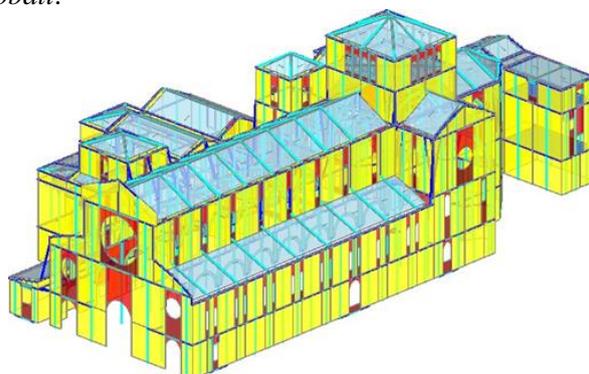


Figura 2.8 – Modello strutturale.

### Modello Cinematico

Infine, è stato definito il *modello cinematico* tramite il quale sono state svolte le *analisi cinematiche locali*.

## 3. ANALISI E RISULTATI

La fase successiva ha riguardato l'analisi del comportamento sotto sisma della Cattedrale. La Norma di riferimento per un edificio con valenza storico-culturale, quale il Duomo, è il DPCM 9 febbraio 2011, "Valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle Norme tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 14/01/2008".

Le analisi svolte tramite "Aedes PCM" sono state le seguenti:

- ✓ Analisi Modale;
- ✓ Analisi Statica Non Lineare (Pushover);
- ✓ Analisi Cinematiche Lineari Locali.

Durante la fase di modellazione è stato necessario utilizzare due diversi modelli:

- "Modello Analisi Globali", necessario per effettuare l'analisi modale e l'analisi statica non lineare;
- "Modello Analisi Cinematiche", necessario per effettuare le analisi cinematiche lineari.

### 3.1 Analisi Modale

Il software “Aedes PCM” esegue come impostazione predefinita l’analisi modale. Quest’analisi fornisce indicazioni immediate sulla correttezza del modello. Si sono ricercati tutti i modi di vibrare (Figure 3.1 – 3.13) con massa partecipante superiore al 5% nelle tre direzioni, come di seguito riportato.

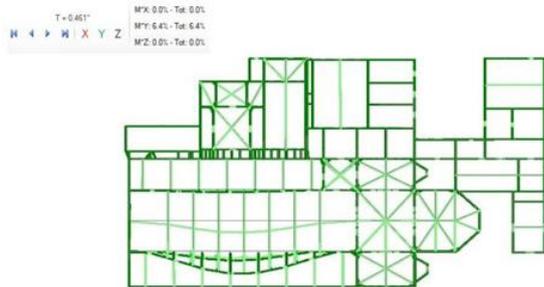


Figura 3.1 – Modo di vibrare 1.

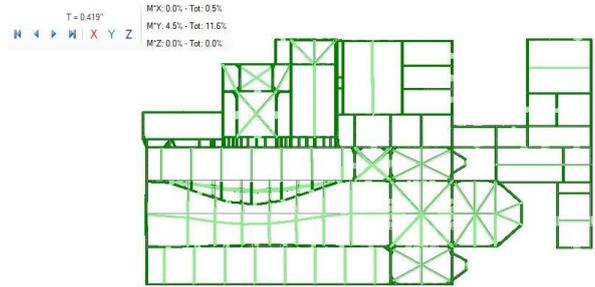


Figura 3.2 – Modo di vibrare 2.

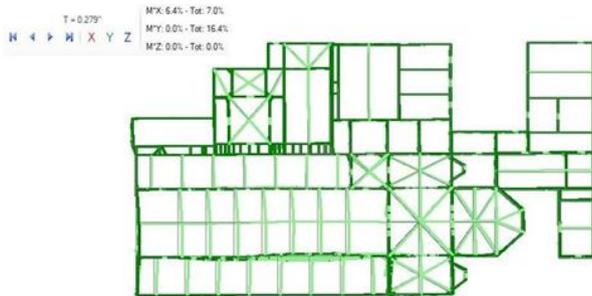


Figura 3.3 – Modo di vibrare 3.

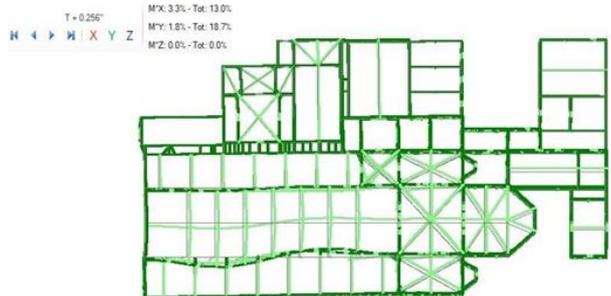


Figura 3.4 – Modo di vibrare 4.

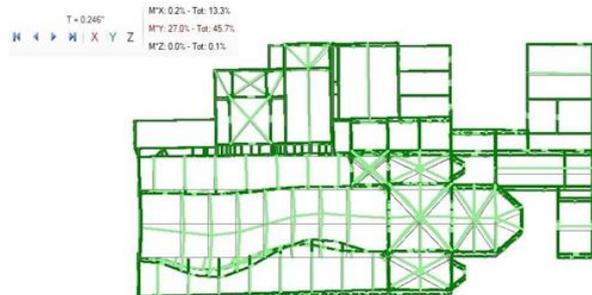


Figura 3.5 – Modo di vibrare 5.

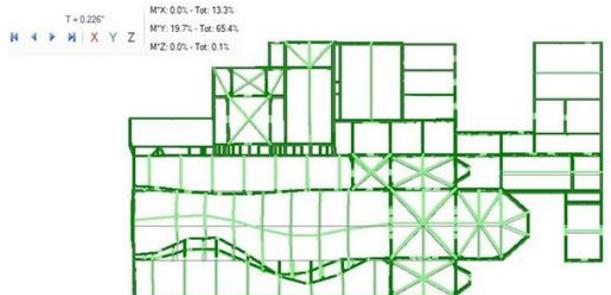


Figura 3.6 – Modo di vibrare 6.

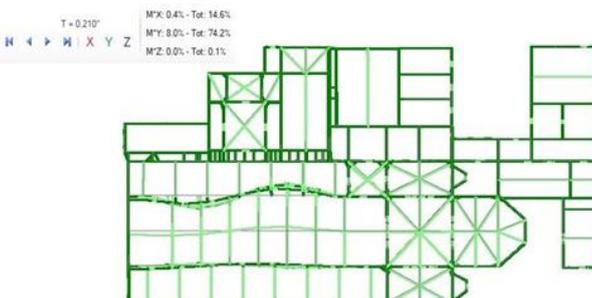


Figura 3.7 – Modo di vibrare 7.

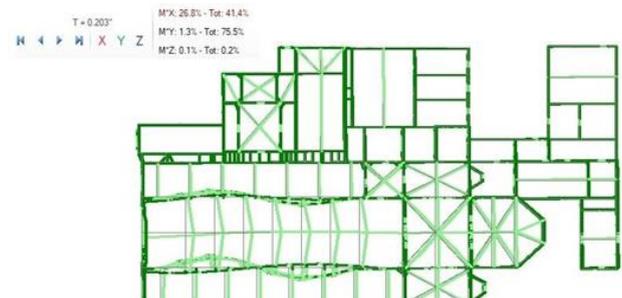


Figura 3.8 – Modo di vibrare 8.

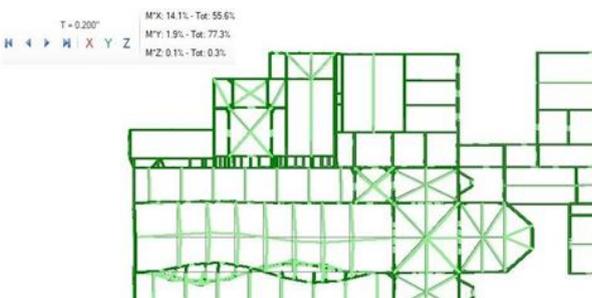


Figura 3.9 – Modo di vibrare 9.

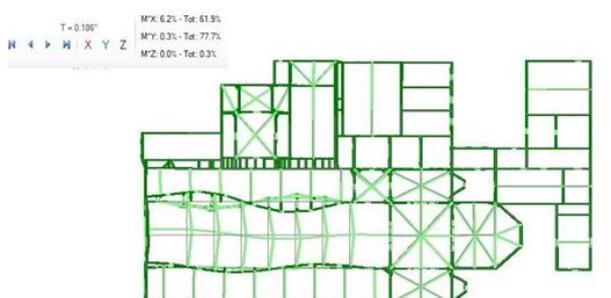


Figura 3.10 – Modo di vibrare 10.

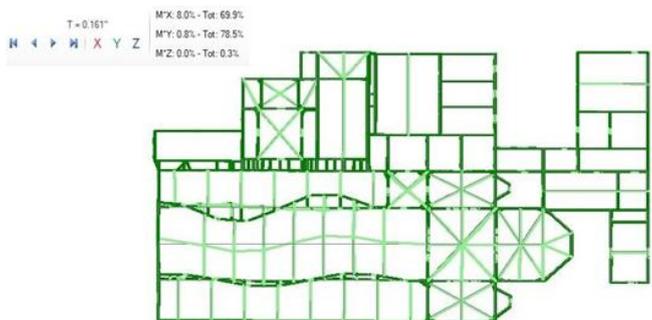


Figura 3.11 – Modo di vibrare 11.

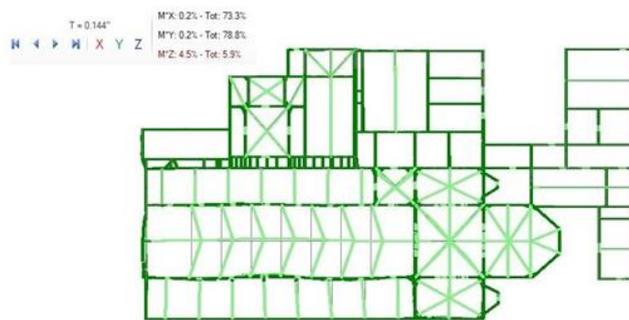


Figura 3.12 – Modo di vibrare 12.

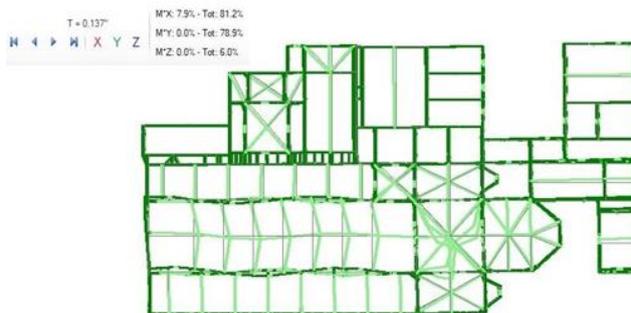


Figura 3.13 – Modo di vibrare 13.

I modi di vibrare e le forme modali soprariportati confermano la correttezza della modellazione, in cui sono presenti sia le coperture che gli aggregati.

Si sono considerati i primi tredici modi di vibrare che eccitano un quantitativo di massa partecipante pari, rispettivamente, al 81,2% lungo X, al 78,9% lungo Y e al 6,0% lungo Z.

La zona con un maggior numero di frequenze risulta essere quella centrale del Duomo, caratterizzata da colonnati con aperture ad arco di significativa altezza.

### 3.2 Analisi Statica Non Lineare (Pushover)

L'analisi statica non lineare consiste nell'applicare alla struttura i carichi gravitazionali e, per la direzione considerata dell'azione sismica, un sistema di forze orizzontali distribuite secondo un certo profilo di carico ad ogni livello della costruzione. Tali forze sono scalate in modo da far crescere, fino al collasso, monotonamente lo spostamento di un punto rappresentativo del comportamento della struttura.

Il modello utilizzato per tutte le analisi pushover è il "Modello Analisi Globali".

#### Analisi Pushover Intera Struttura

L'analisi statica non lineare è stata eseguita per l'intera struttura del Duomo, trascurando gli aggregati. Sono stati considerati, come previsto dalla Normativa, due profili di carico:

- Distribuzione proporzionale alle forze statiche (B);
- Distribuzione uniforme, proporzionale alle masse (E).

Le analisi sono state svolte per ogni direzione principale dell'edificio (X e Y), esclusivamente per la direzione positiva, trascurando l'eccentricità accidentale, la componente verticale del sisma e la combinazione direzionale. Sono state effettuate un numero totale di analisi pari a 4 ed i risultati, in termini di tagliante alla base e spostamento del punto di controllo, sono riportati nelle Figure 3.14 – 3.17. Le quattro curve di capacità sopra riportate sono state interrotte per "spostamenti ritenuti inaccettabili".

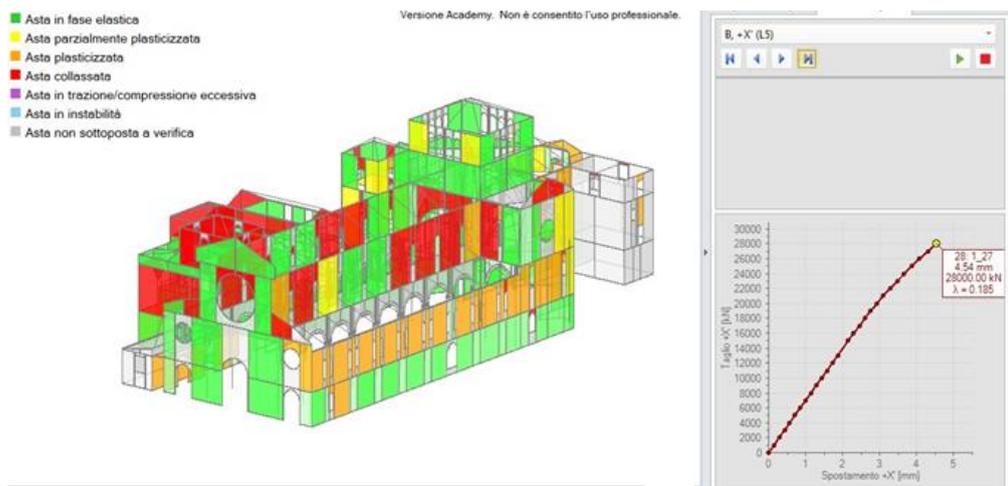


Figura 3.14 – Curva di capacità, distribuzione B, direzione +X.

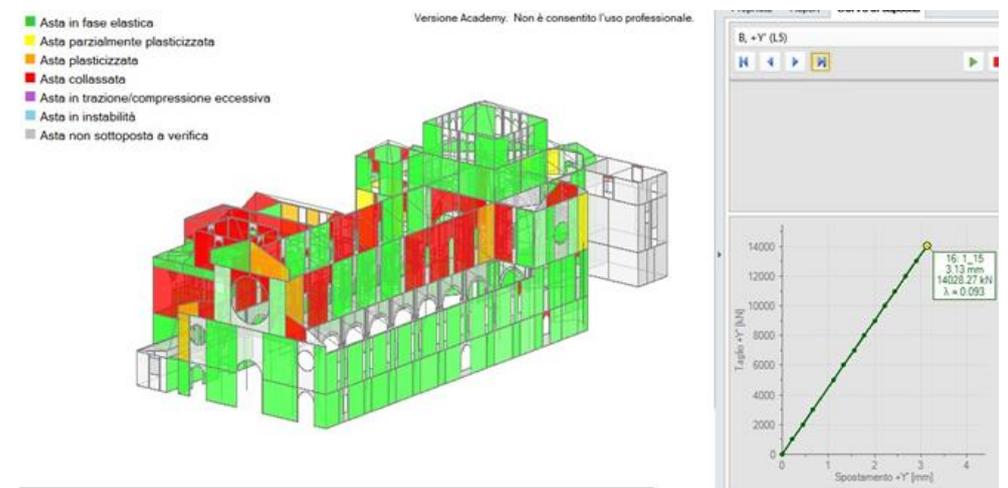


Figura 3.15 – Curva di capacità, distribuzione B, direzione +Y.

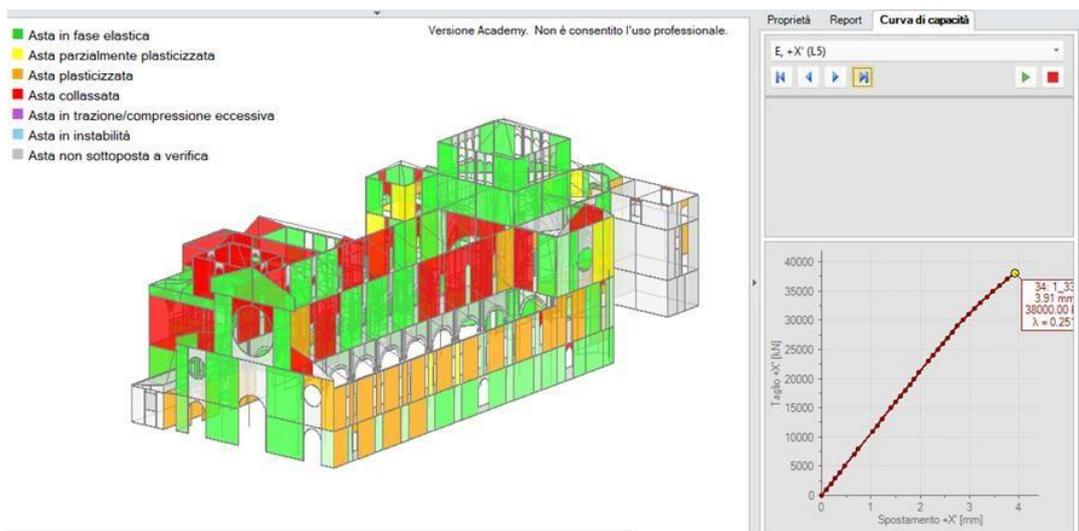


Figura 3.16 – Curva di capacità, distribuzione E, direzione +X.

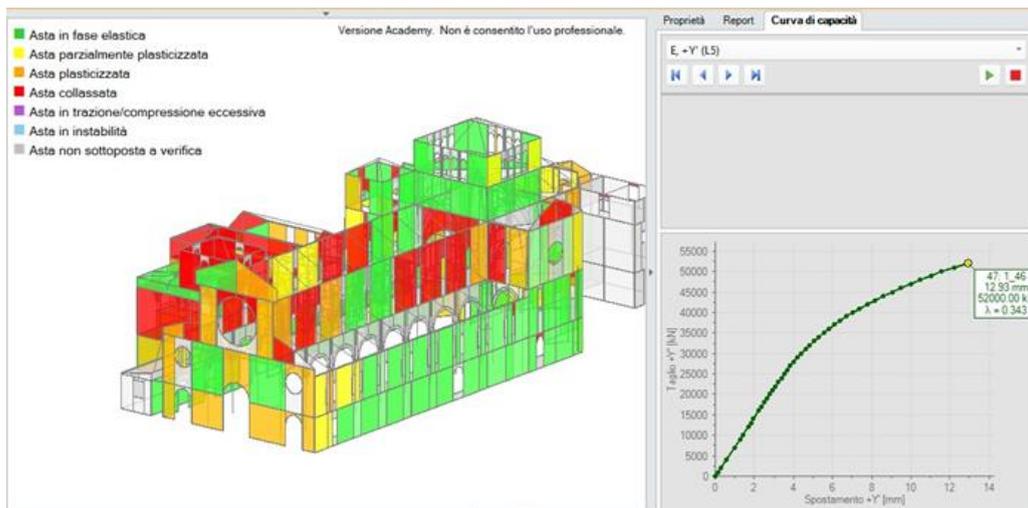


Figura 3.17 – Curva di capacità, distribuzione E, direzione +Y.

### Analisi Pushover Facciata Principale Nord-Ovest

Dopo aver effettuato un'analisi pushover dell'intero edificio, si è scelto di analizzare la facciata principale, posta a Nord-Ovest, in quanto ritenuta significativa.

Si è scelto un solo verso di analisi, ovvero la direzione +Y e solo due profili di carico:

- Unimodale (B), con forze corrispondenti al primo modo di vibrare;
- Uniforme (E), con forze proporzionali alle masse.

Si riportano di seguito le due curve di capacità ottenute considerando il punto di controllo n. 80, che corrisponde al punto più alto della facciata principale Nord-Ovest, (Figura 3.18 e 3.19).

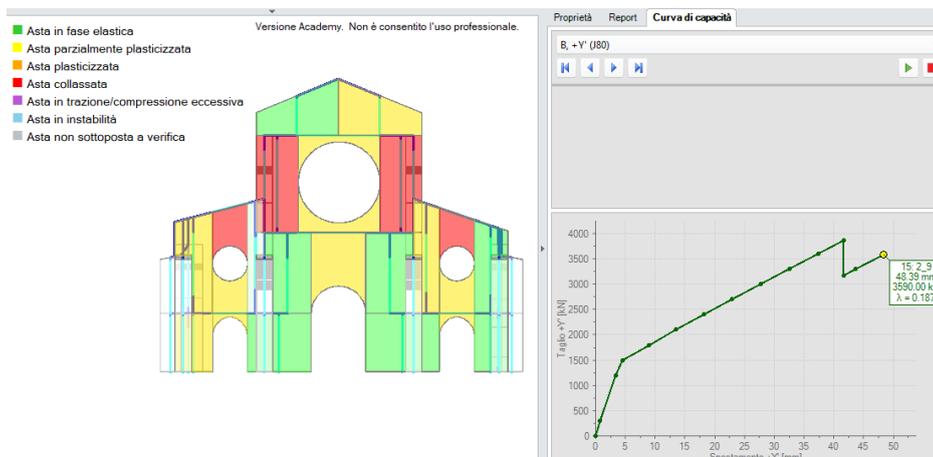


Figura 3.18 – Curva di capacità, profilo di carico (B), direzione +Y punto di controllo n.80.

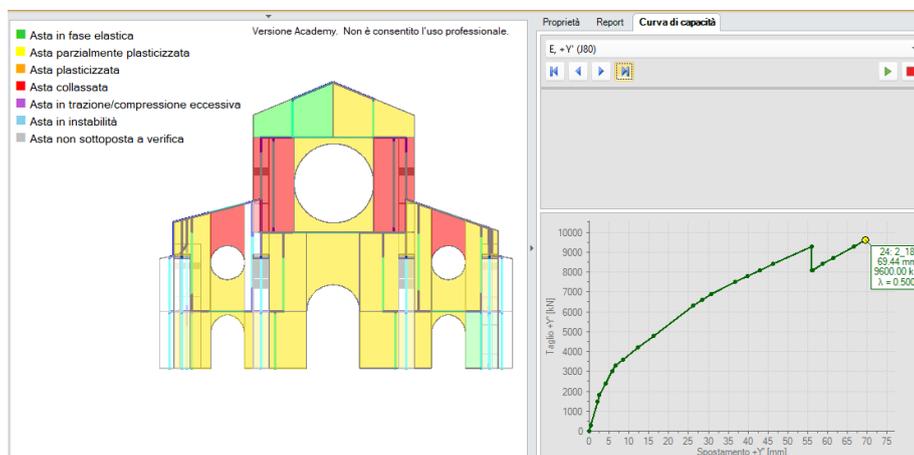


Figura 3.19 – Curva di capacità, profilo di carico (E), direzione +Y punto di controllo n.80.

Per entrambi i profili di carico, la causa del termine di costruzione della curva di capacità è stato il *collasso a pressoflessione sotto azioni complanari di tutti i maschi al terzo livello*.

Dal confronto della domanda e della capacità in termini di spostamento si nota come la capacità sia maggiore della domanda, pertanto la verifica di vulnerabilità allo SLV, per sottosuolo di categoria A, risulta soddisfatta. Tale procedimento è analogo per gli altri due punti di controllo scelti, 66 e 57 corrispondenti ai vertici inferiori del timpano della stessa facciata. Al fine di evitare inutili ripetizioni si riportano nella Tabella 3.1 i risultati delle analisi.

Profilo di carico	Punto di controllo	Tagliante alla base (kN)	Capacità di spostamento (mm)	Domanda sismica (mm)	Esito verifica SLV
Proporzionale alle masse (E)	80	8926,66	52,08	43,99	Positiva
Proporzionale alle masse (E)	66	8950,38	52,48	43,69	Positiva
Proporzionale alle masse (E)	57	8941,11	51,84	43,35	Positiva

Tabella 3.1 – Risultati analisi pushover, facciata principale, categoria A.

La stessa analisi è stata nuovamente effettuata considerando come categoria di sottosuolo rispettivamente B e C; di seguito si riportano le Tabelle 3.2 e 3.3 riassuntive dei risultati ottenuti.

Profilo di carico	Punto di controllo	Tagliante alla base (kN)	Capacità di spostamento (mm)	Domanda sismica (mm)	Esito verifica SLV
Proporzionale alle masse (E)	80	8926,66	52,08	63,56	Negativa
Proporzionale alle masse (E)	66	8950,38	52,48	63,12	Negativa
Proporzionale alle masse (E)	57	8941,11	51,84	62,62	Negativa

Tabella 3.2 – Risultati analisi pushover, facciata principale, categoria B.

Profilo di carico	Punto di controllo	Tagliante alla base (kN)	Capacità di spostamento (mm)	Domanda sismica (mm)	Esito verifica SLV
Proporzionale alle masse (E)	80	8929,66	52,08	77,62	Negativa
Proporzionale alle masse (E)	66	8950,38	52,48	77,08	Negativa
Proporzionale alle masse (E)	57	8941,11	51,48	76,48	Negativa

Tabella 3.3 – Risultati analisi pushover, facciata principale, categoria C.

Nei casi di categoria di sottosuolo B e C le verifiche di vulnerabilità non sono soddisfatte; quindi il peggioramento della categoria di sottosuolo determina il non soddisfacimento delle verifiche.

### Analisi Pushover Facciata Laterale Sud-Ovest

In modo analogo a quanto riportato nel precedente paragrafo, si riportano i risultati dell'analisi statica non lineare anche per la facciata laterale sud-ovest. Sono stati scelti i profili di carico unimodale (B) e uniforme (E), come di seguito indicati (Figure 3.20 e 3.21), considerando il punto di controllo corrispondente al baricentro del livello 2.

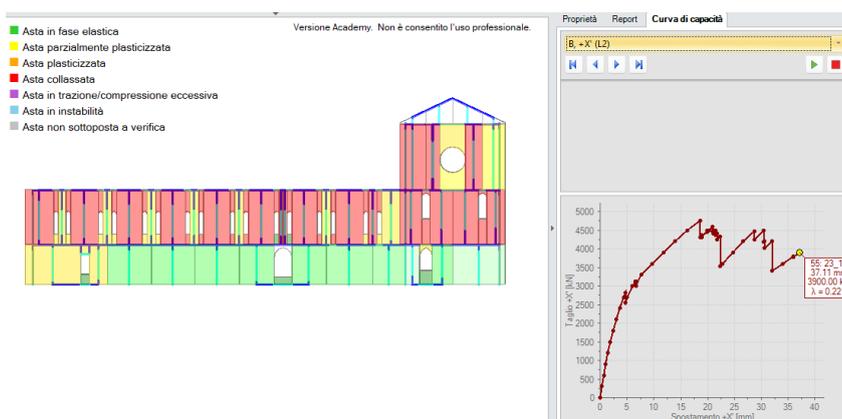


Figura 3.20 – Curva di capacità, profilo di carico (B), direzione +Y punto di controllo baricentro livello 2.

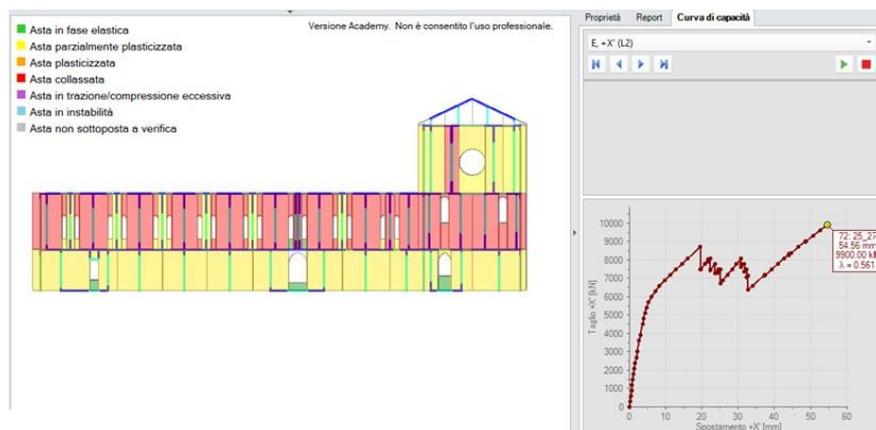


Figura 3.21 – Curva di capacità, profilo di carico (E), direzione +Y punto di controllo baricentro livello 2.

Per entrambi i profili di carico, la causa del termine di costruzione della curva di capacità è stata la *labilità della struttura*, nel momento in cui gli spostamenti sono diventati inaccettabili.

Tale procedimento è analogo per gli altri due punti di controllo scelti precedentemente. Al fine di evitare inutili ripetizioni si riportano i risultati delle analisi in forma tabellare (Tabella 3.4).

Profilo di carico	Punto di controllo	Tagliante alla base (kN)	Capacità di spostamento (mm)	Domanda sismica (mm)	Esito verifica SLV
Proporzionale alle masse (E)	Baricentro livello 2	7655,71	40,24	21,40	Positiva
Proporzionale alle masse (E)	94	7190,48	35,32	18,42	Positiva
Proporzionale alle masse (E)	105	7769,48	71,10	38,89	Positiva

Tabella 3.4 – Risultati analisi pushover, facciata laterale, categoria A.

La stessa analisi è stata nuovamente effettuata considerando però come categoria di sottosuolo rispettivamente B e C; di seguito si riportano le tabelle riassuntive dei risultati ottenuti (Tabelle 3.5 e 3.6).

Profilo di carico	Punto di controllo	Tagliante alla base (kN)	Capacità di spostamento (mm)	Domanda sismica (mm)	Esito verifica SLV
Proporzionale alle masse (E)	Baricentro livello 2	7655,71	40,24	28,78	Positiva
Proporzionale alle masse (E)	94	7190,48	35,32	25,29	Positiva
Proporzionale alle masse (E)	105	7769,48	71,10	57,50	Positiva

Tabella 3.5 – Risultati analisi pushover, facciata laterale, categoria B.

Profilo di carico	Punto di controllo	Tagliante alla base (kN)	Capacità di spostamento (mm)	Domanda sismica (mm)	Esito verifica SLV
Proporzionale alle masse (E)	Baricentro livello 2	7655,71	40,24	35,16	Positiva
Proporzionale alle masse (E)	94	7190,48	35,32	31,13	Positiva
Proporzionale alle masse (E)	105	7769,48	71,10	68,16	Positiva

Tabella 3.6 – Risultati analisi pushover, facciata laterale, categoria C.

Anche nei casi di categoria di sottosuolo B e C, dal confronto della domanda e della capacità in termini di spostamento, la verifica di vulnerabilità risulta soddisfatta.

### 3.3 Analisi Cinematiche Lineari Locali

Le analisi cinematiche lineari, maggiormente significative per lo studio del comportamento del Duomo, permetteranno di compiere uno studio di sensibilità in funzione della categoria di sottosuolo del terreno di fondazione. Per ogni cinematico ipotizzato verranno visualizzati, in maniera immediata, i risultati riassuntivi dell'analisi cinematica, quali il moltiplicatore di collasso  $\alpha_0$  ed i rapporti  $\zeta_E$  (*indicatori di rischio*) tra capacità e domanda in termini di PGA (Peak Ground Acceleration) e tempo di ritorno  $T_R(I_{S,SL})$ , sia per lo SLD (Stato Limite di Danno) che per lo SLV. Le verifiche si ritengono soddisfatte qualora gli indicatori di rischio risultino maggiori o uguali a 1.

Di seguito si riportano i risultati ottenuti per le diverse tipologie di meccanismi di danno locale considerando, inizialmente, una categoria di sottosuolo A.

#### Ribaltamento Semplice di Parete

La prima tipologia di cinematico analizzata è il ribaltamento semplice, in cui si suppone che i corpi interessati

non siano vincolati in alcun modo dagli elementi ad essi ortogonali, ovvero assenza di ammassamento efficace tra le pareti.

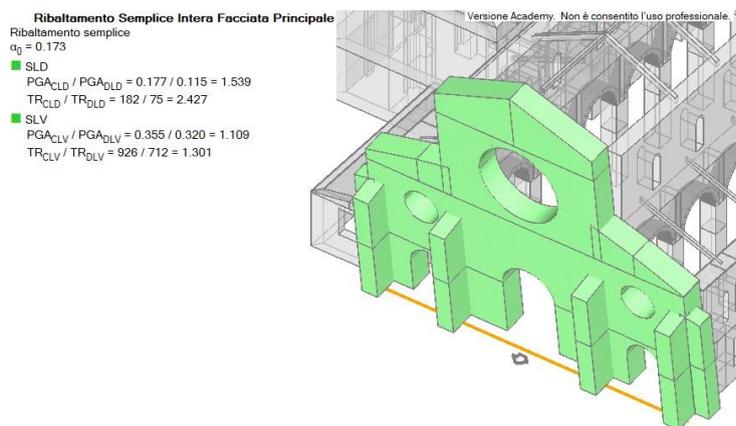


Figura 3.22 – Ribaltamento semplice facciata principale.

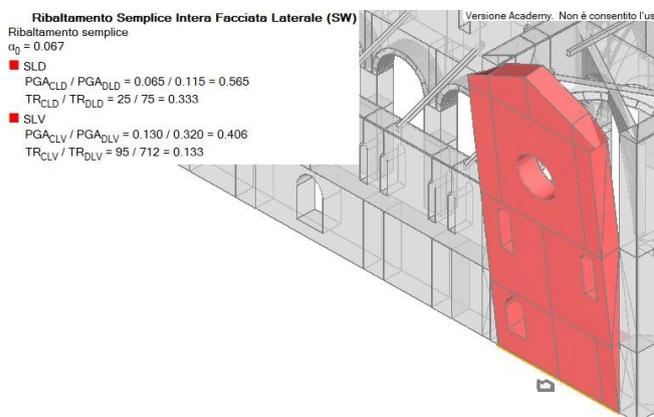


Figura 3.23 – Ribaltamento semplice facciata laterale Sud-Ovest.

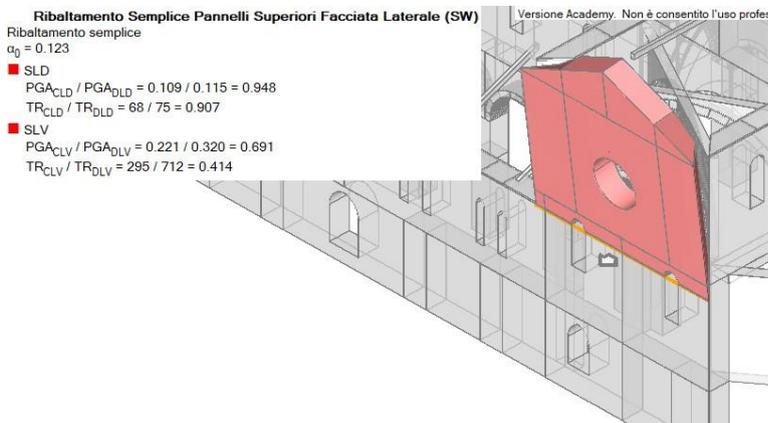


Figura 3.24 – Ribaltamento pannello superiore facciata laterale Sud-Ovest.

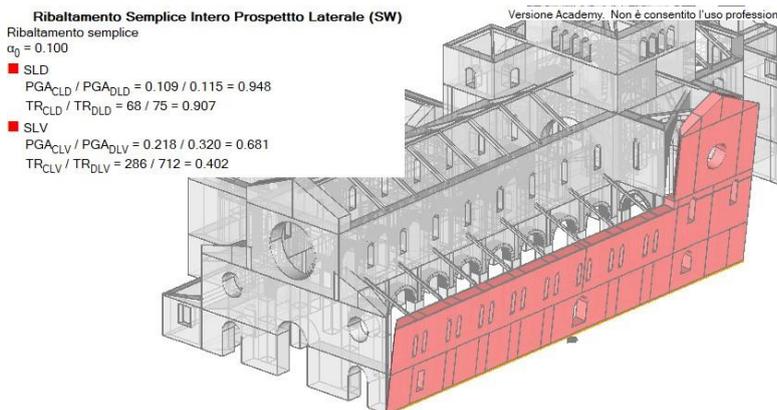


Figura 3.25 – Ribaltamento semplice intero prospetto laterale Sud-Ovest.

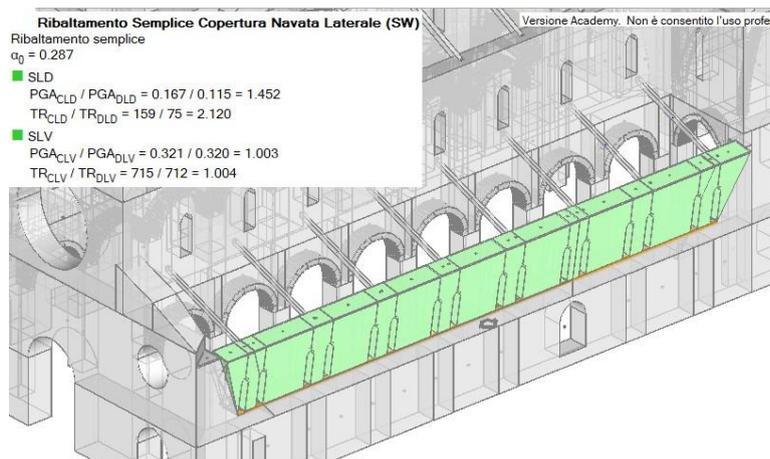


Figura 3.26 – Ribaltamento semplice copertura navata laterale Sud-Ovest.

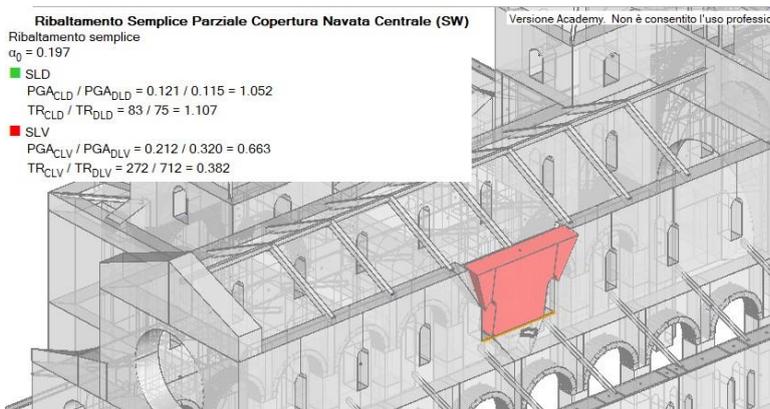


Figura 3.27 – Ribaltamento semplice parziale copertura navata centrale Sud-Ovest.

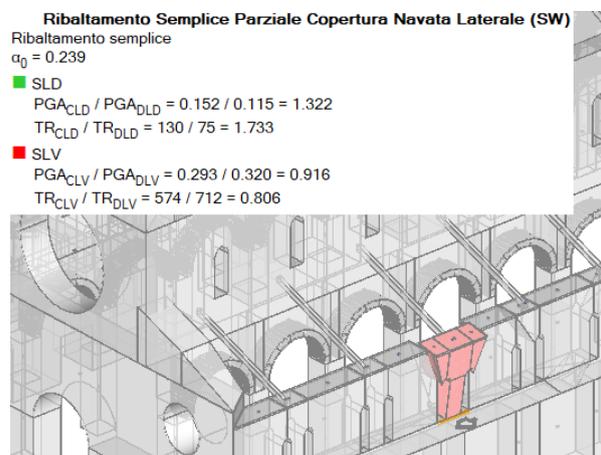


Figura 3.28 – Ribaltamento semplice parziale copertura navata laterale Sud-Ovest.

## Ribaltamento Composto di Parete

Successivamente, l'analisi è stata eseguita con l'ipotesi che sia in essere un buon grado di ammassamento tra le pareti e sono, quindi, interessate anche porzioni di pareti ortogonali.

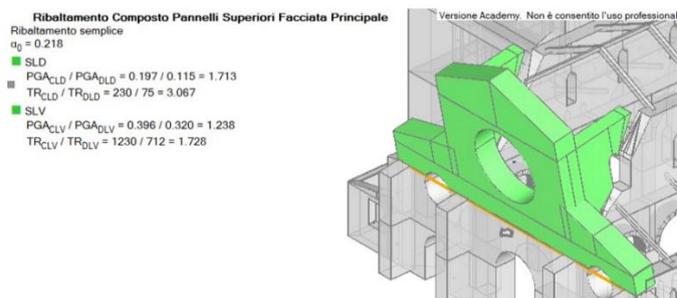


Figura 3.29 – Ribaltamento composto pannelli superiori facciata principale.

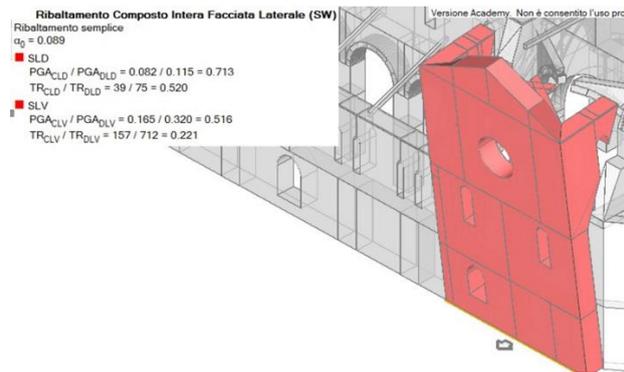


Figura 3.30 – Ribaltamento composto intera facciata laterale Sud-Ovest.

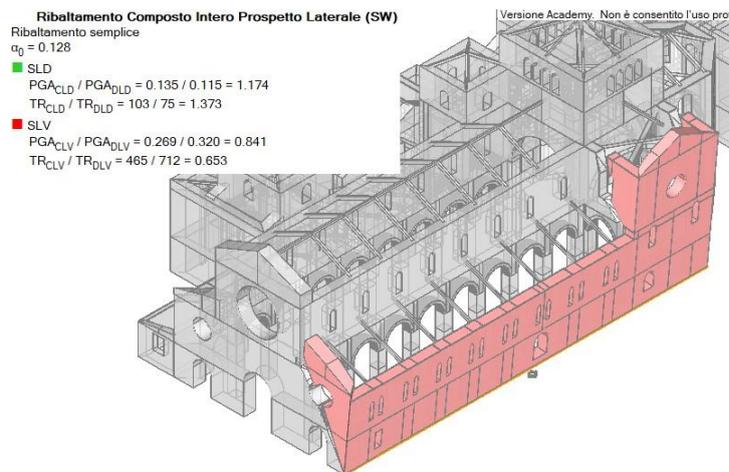


Figura 3.31 – Ribaltamento composto intero prospetto laterale Sud-Ovest.

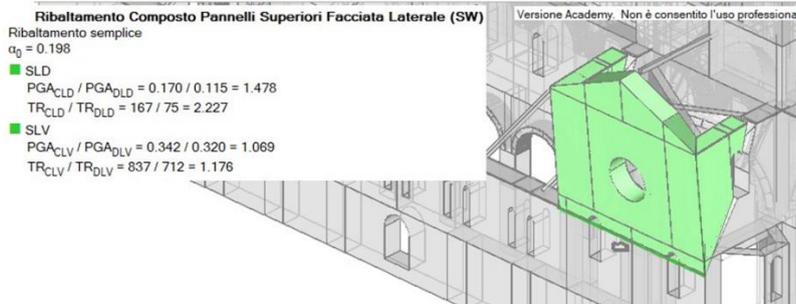


Figura 3.32 – Ribaltamento composto Pannelli Superiori Facciata Laterale Sud-Ovest.

## Ribaltamento Cantonale

Il ribaltamento del cantonale riguarda la parte alta dell'intersezione tra due pareti ortogonali esterne, in assenza di collegamenti adeguati.

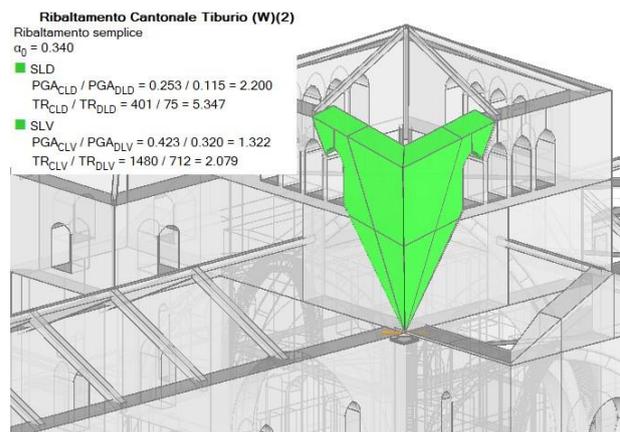


Figura 3.33 – Ribaltamento cantonale tiburio Ovest.

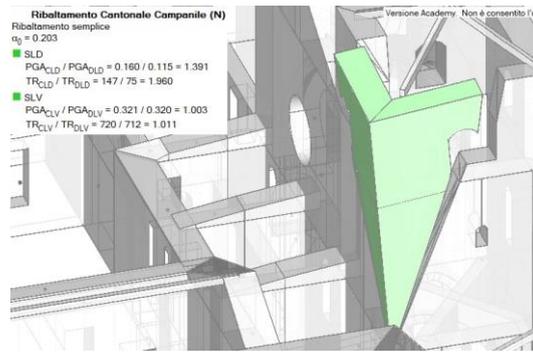


Figura 3.34 – Ribaltamento cantonale campanile Nord.

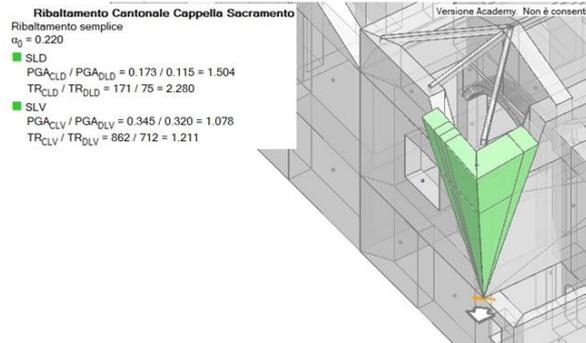


Figura 3.35 – Ribaltamento cantonale cappella sacramento.

## Sfondamento Timpano

Questa tipologia di cinematismo è determinata dalla mancanza di collegamenti adeguati con le pareti ortogonali ed il tetto. Esso è agevolato dall'effetto di martellamento della trave di colmo della copertura.

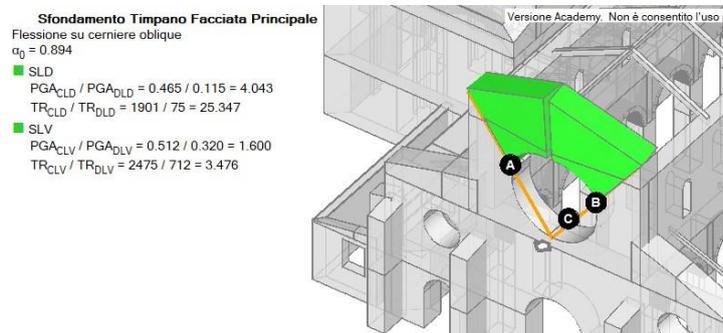


Figura 3.36 – Sfondamento timpano facciata principale.

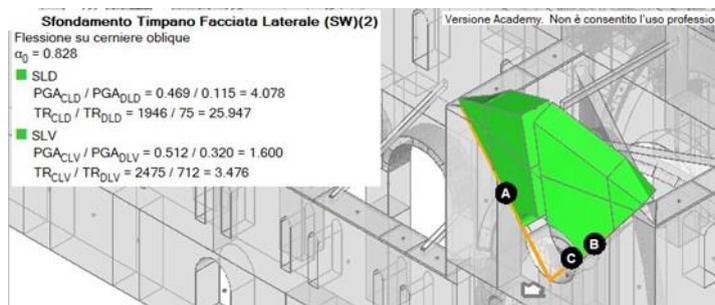


Figura 3.37 – Sfondamento timpano facciata laterale Sud-Ovest.

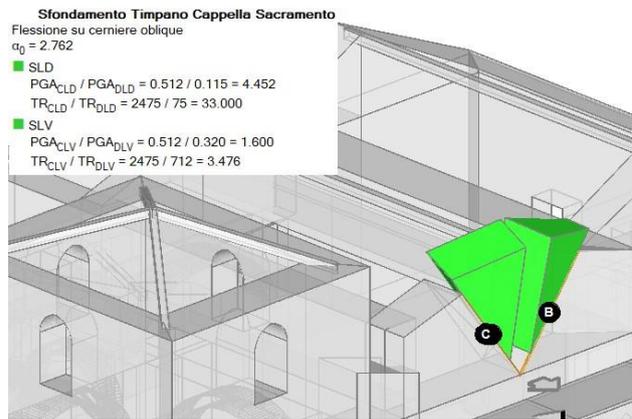


Figura 3.38 – Sfondamento timpano cappella sacramento.

## Ribaltamento Fascia Sottotetto

Tale cinematica è determinata dall'eventuale mancanza di collegamenti adeguati alle pareti ortogonali, dall'effetto di martellamento generato dalle travi di copertura e dalla presenza di aperture, le quali favoriscono la formazione di linee preferenziali di rottura.

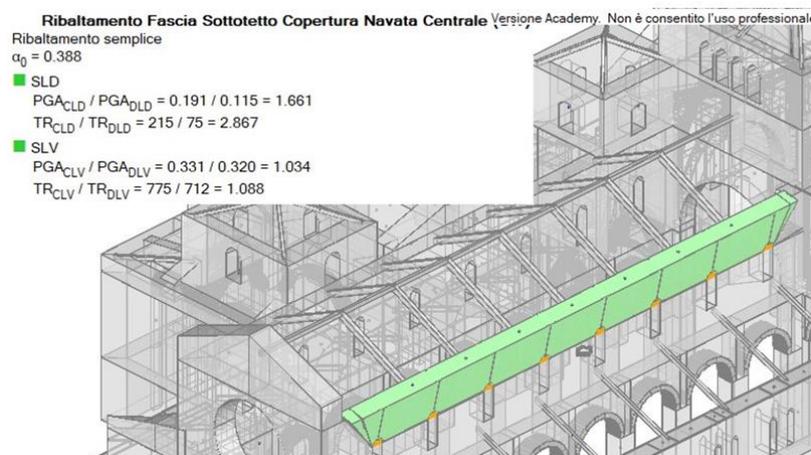


Figura 3.39 – Ribaltamento fascia sottotetto copertura navata centrale Sud-Ovest.

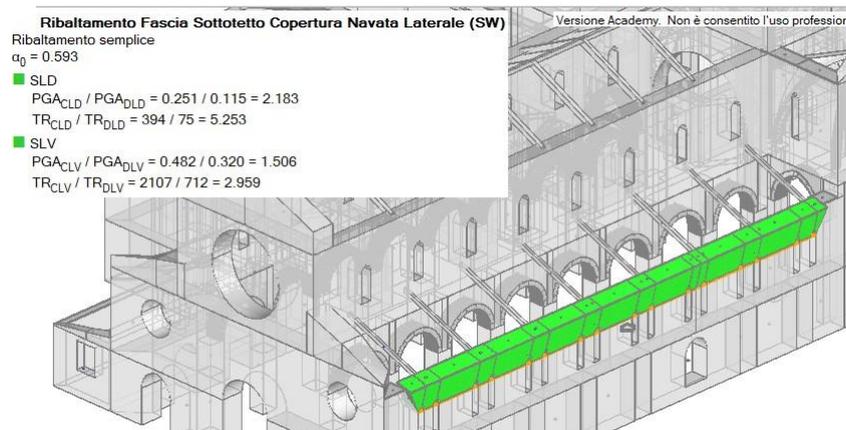


Figura 3.40 – Ribaltamento fascia sottotetto copertura navata laterale Sud-Ovest.

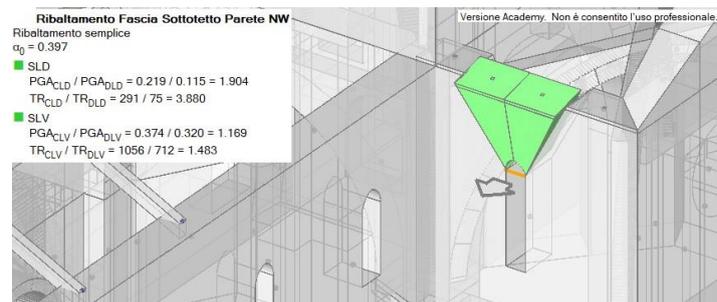


Figura 3.41 – Ribaltamento fascia sottotetto parete Nord-Ovest.



Figura 3.42 – Ribaltamento fascia sottotetto abside parete Sud-Ovest.

## Ribaltamento Abside

È stato ipotizzato che possa ribaltare l'abside della navata centrale e quella di una delle due navate laterali.

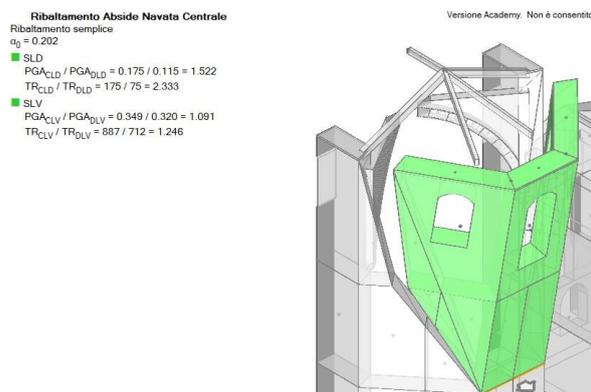


Figura 3.43 – Ribaltamento abside navata centrale.

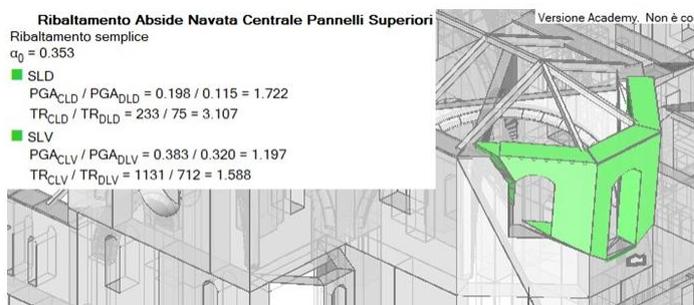


Figura 3.44 – Ribaltamento abside navata centrale pannelli superiori.

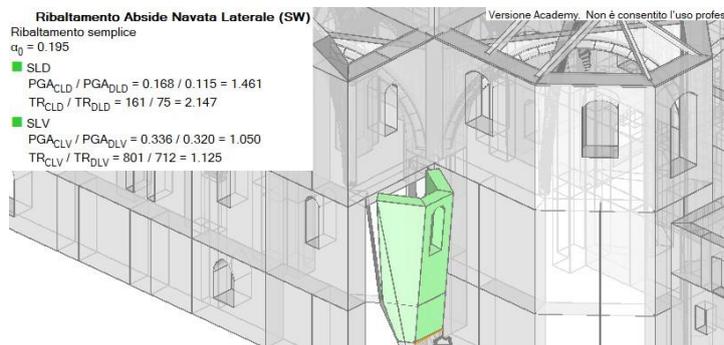


Figura 3.45 – Ribaltamento abside navata laterale Sud-Ovest.

## Meccanismi nel Piano della Facciata

Il cinematismo prevede la rotazione della parete rispetto alla cerniera posta in “A”, accompagnata dallo scorrimento dei pannelli di sinistra rispetto al piano passante per la cerniera posta in “B”, in corrispondenza del quale è presente sia il portale della navata centrale che il rosone superiore.

### Meccanismi nel piano della Facciata Principale

Ribalamento di parete a doppia cortina  
 $\alpha_0 = 0.782$

- SLD  
 $PGA_{CLD} / PGA_{DLD} = 0.512 / 0.115 = 4.452$   
 $TR_{CLD} / TR_{DLD} = 2475 / 75 = 33.000$
- SLV  
 $PGA_{CLV} / PGA_{DLV} = 0.512 / 0.320 = 1.600$   
 $TR_{CLV} / TR_{DLV} = 2475 / 712 = 3.476$

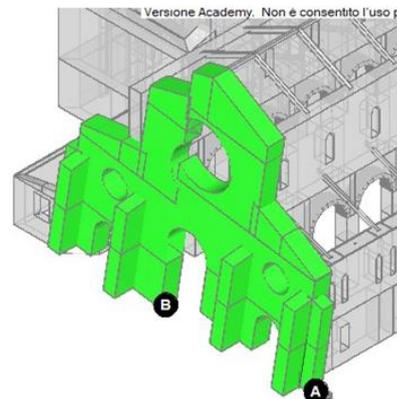


Figura 3.46 – Meccanismi nel piano facciata principale.

## Flessione Orizzontale di Parete

La flessione orizzontale avviene quando c'è un vincolo efficace ai muri ortogonali, altrimenti la parete ribalterebbe semplicemente. Il cinematiso è composto poiché partecipano più corpi.

Il software "Aedes PCM" consente di modellare il suddetto cinematiso in due modi differenti: rotazione attorno a cerniere verticali; rotazione attorno a cerniere oblique (schematizzazione più attinente).

### Flessione su Cerniere Verticali:

#### Flessione Orizzontale Tiburio SW (cerniere verticali)

Flessione di parete vincolata ai bordi  
 $\alpha_0 = 0.328$

- SLD  
 $PGA_{CLD} / PGA_{DLD} = 0.186 / 0.115 = 1.617$   
 $TR_{CLD} / TR_{DLD} = 202 / 75 = 2.693$
- SLV  
 $PGA_{CLV} / PGA_{DLV} = 0.323 / 0.320 = 1.009$   
 $TR_{CLV} / TR_{DLV} = 729 / 712 = 1.024$

Versione Academ

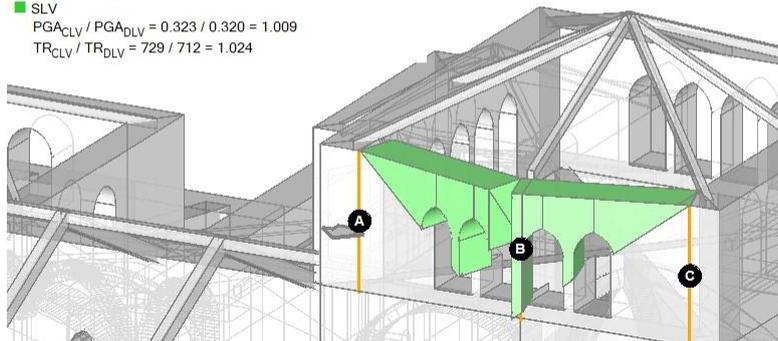


Figura 3.47 – Flessione orizzontale tiburio Sud-Ovest (cerniere verticali).

### Flessione su Cerniere Oblique:

#### Flessione Orizzontale Tiburio SW (cerniere oblique)

Flessione su cerniere oblique  
 $\alpha_0 = 0.981$

- SLD  
 $PGA_{CLD} / PGA_{DLD} = 0.443 / 0.115 = 3.852$   
 $TR_{CLD} / TR_{DLD} = 1677 / 75 = 22.360$
- SLV  
 $PGA_{CLV} / PGA_{DLV} = 0.512 / 0.320 = 1.600$   
 $TR_{CLV} / TR_{DLV} = 2475 / 712 = 3.476$

Versione Ar

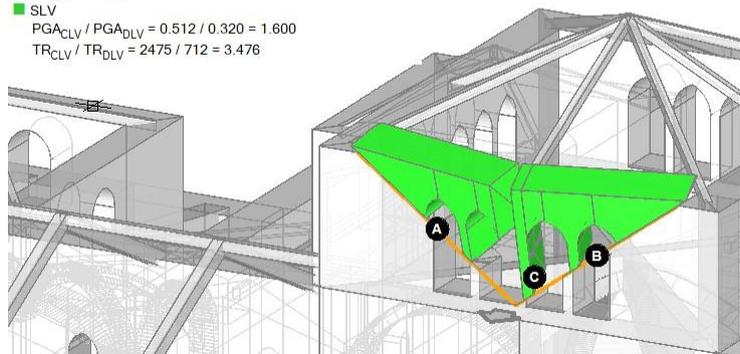


Figura 3.48 – Flessione orizzontale tiburio Sud-Ovest (cerniere oblique).

## Risposta Longitudinale del Colonnato

Per i macroelementi di edifici monumentali studiati con analisi pushover è possibile condurre la verifica di sicurezza in termini di PGA, rilevando dall'analisi il valore del moltiplicatore di collasso e la massa partecipante per poi utilizzarli direttamente in una verifica cinematica, come un qualsiasi altro meccanismo cinematico di collasso.

A tal proposito, per la valutazione della risposta longitudinale del colonnato si è creato un modello strutturale dove sono stati isolati gli archi e il colonnato della navata, e su cui è stata eseguita l'analisi modale e l'analisi statica non lineare; per quest'ultima si è scelta come distribuzione delle forze quella proporzionale alle masse, considerando la direzione di analisi X con un punto di controllo corrispondente al baricentro dell'ultimo piano (Figure 3.49 e 3.50).

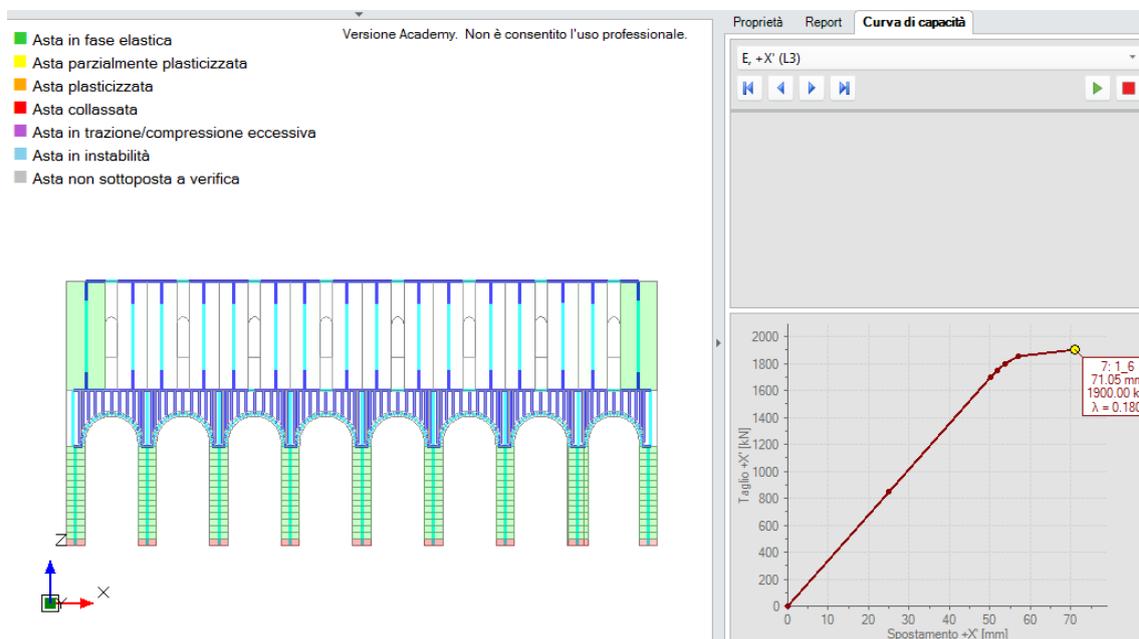


Figura 3.49 – Risultati pushover colonnato.

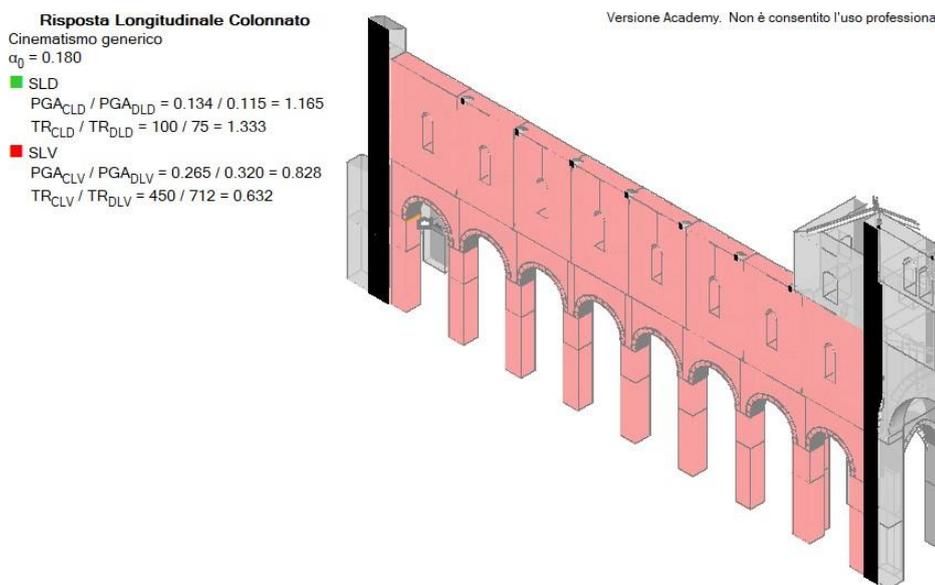


Figura 3.50 – Risposta longitudinale colonnato.

## 4. SINTESI DELLE ANALISI

L'obiettivo di questo capitolo è quello di sintetizzare, in forma tabellare, gli esiti delle verifiche dei diversi meccanismi analizzati che si possono attivare sotto sisma. In tal modo si faciliterà la lettura degli indicatori di rischio, che permetteranno di effettuare le valutazioni strutturali in modo immediato e decidere se necessario o meno procedere ad indagini conoscitive più approfondite.

### 4.1 Risultati dei Meccanismi Locali - Categoria di Sottosuolo A

Con riferimento alla categoria di sottosuolo A, per ogni tipologia di meccanismo di danno è stata redatta una tabella di sintesi, dove sono riportati gli esiti delle verifiche in termini di PGA allo SLD e SLV.

Ribaltamento Semplice di Parete - Categ. Sottosuolo A								
Porzione di Verifica	Ir(PGA) - SLD			Esito Verifica	Ir(PGA) - SLV			Esito Verifica
		>	1			>	1	
Intera Facciata Principale	1.896	>	1	SI	1.363	>	1	SI
Intera Facciata Laterale (Sud-Ovest)	0.565	<	1	NO	0.406	<	1	NO
Pannelli Superiori Facciata Principale	1.226	>	1	SI	0.881	<	1	NO
Pannelli Superiori Facciata Laterale (Sud-Ovest)	0.948	<	1	NO	0.691	<	1	NO
Intero Prospetto Laterale (Sud-Ovest)	0.948	<	1	NO	0.681	<	1	NO
Copertura Navata Centrale	1.122	>	1	SI	0.706	<	1	NO
Copertura Navata Laterale (Sud-Ovest)	1.452	>	1	SI	1.003	>	1	SI
Parziale Copertura Navata Centrale	1.052	>	1	SI	0.663	<	1	NO
Parziale Copertura Navata Laterale (Sud-Ovest)	1.322	>	1	SI	0.916	<	1	NO
Parete Tiburio (Sud-Ovest)	1.409	>	1	SI	0.878	<	1	NO
Cappella Sacramento Facciata Nord-Est	0.530	<	1	NO	0.378	<	1	NO

Tabella 4.1 – Ribaltamento Semplice, Categoria Sottosuolo A – Esiti Verifiche Meccanismi Locali.

Ribaltamento Composto di Parete - Categ. Sottosuolo A								
Porzione di Verifica	Ir(PGA) - SLD			Esito Verifica	Ir(PGA) - SLV			Esito Verifica
		>	1			>	1	
Pannelli Superiori Facciata Principale	1.678	>	1	SI	1.209	>	1	SI
Intera Facciata Laterale (Sud-Ovest)	0.713	<	1	NO	0.516	<	1	NO
Intero Prospetto Laterale (Sud-Ovest)	1.174	>	1	SI	0.841	<	1	NO
Pannelli Superiori Facciata Laterale (Sud-Ovest)	1.478	>	1	SI	1.069	>	1	SI
Parete Nord-Est	1.504	>	1	SI	1.078	>	1	SI

Tabella 4.2 – Ribaltamento Composto, Categoria Sottosuolo A – Esiti Verifiche Meccanismi Locali.

Ribaltamento Cantonale - Categ. Sottosuolo A								
Porzione di Verifica	Ir(PGA) - SLD			Esito Verifica	Ir(PGA) - SLV			Esito Verifica
		>	1			>	1	
Cantonale Tiburio (Ovest)(1)	1.600	>	1	SI	1.003	>	1	SI
Cantonale Tiburio (Ovest)(2)	2.200	>	1	SI	1.322	>	1	SI
Cantonale Campanile (Nord)	1.391	>	1	SI	1.003	>	1	SI
Cantonale Cappella Sacramento	1.504	>	1	SI	1.078	>	1	SI

Tabella 4.3 – Ribaltamento Cantonale, Categoria Sottosuolo A – Esiti Verifiche Meccanismi Locali.

Sfondamento Timpano - Categ. Sottosuolo A								
Porzione di Verifica	Ir(PGA) - SLD			Esito Verifica	Ir(PGA) - SLV			Esito Verifica
		>	1			>	1	
Timpano Facciata Principale	4.043	>	1	SI	1.600	>	1	SI
Timpano Facciata Laterale (Sud-Ovest)(1)	3.270	>	1	SI	1.600	>	1	SI
Timpano Facciata Laterale (Sud-Ovest)(2)	4.078	>	1	SI	1.600	>	1	SI
Timpano Cappella Sacramento	4.452	>	1	SI	1.600	>	1	SI

Tabella 4.4 – Sfondamento Timpano, Categoria Sottosuolo A – Esiti Verifiche Meccanismi Locali.

Ribaltamento Fascia Sottotetto - Categ. Sottosuolo A								
Porzione di Verifica	Ir(PGA) - SLD			Esito Verifica	Ir(PGA) - SLV			Esito Verifica
		>	1			>	1	
Fascia Copertura Navata Centrale (Sud-Ovest)	1.661	>	1	SI	1.034	>	1	SI
Fascia Copertura Navata Laterale (Sud-Ovest)	2.183	>	1	SI	1.506	>	1	SI
Fascia Tiburio (Sud-Ovest)	2.557	>	1	SI	1.528	>	1	SI
Fascia Parete Nord-Ovest	1.904	>	1	SI	1.169	>	1	SI
Fascia Abside Navata Centrale	4.383	>	1	SI	1.600	>	1	SI
Fascia Abside Parete Sud-Ovest	2.435	>	1	SI	1.600	>	1	SI

Tabella 4.5 – Ribaltamento Fascia Sottotetto, Categoria Sottosuolo A – Esiti Verifiche Meccanismi Locali.

Ribaltamento Abside - Categ. Sottosuolo A								
Porzione di Verifica	Ir(PGA) - SLD			Esito Verifica	Ir(PGA) - SLV			Esito Verifica
		>	1			>	1	
Abside Navata Centrale	1.522	>	1	SI	1.091	>	1	SI
Abside Navata Centrale Pannelli Superiori	1.722	>	1	SI	1.197	>	1	SI
Abside Navata Laterale (Sud-Ovest)	1.461	>	1	SI	1.050	>	1	SI

Tabella 4.6 – Ribaltamento Abside, Categoria Sottosuolo A – Esiti Verifiche Meccanismi Locali.

Meccanismi nel Piano della Facciata - Categ. Sottosuolo A								
Porzione di Verifica	Ir(PGA) - SLD		Esito Verifica	Ir(PGA) - SLV		Esito Verifica		
Piano Facciata Principale	4.452	>	1	SI	1.600	>	1	SI

Tabella 4.7 – Meccanismo nel Piano della Facciata, Categoria Sottosuolo A – Esiti Verifiche Meccanismi Locali.

Meccanismi di Flessione Orizzontale di Parete - Categ. Sottosuolo A								
Porzione di Verifica	Ir(PGA) - SLD		Esito Verifica	Ir(PGA) - SLV		Esito Verifica		
Tiburio (cerniere verticali)	1.617	>	1	SI	1.009	>	1	SI
Tiburio (cerniere oblique)	3.852	>	1	SI	1.600	>	1	SI

Tabella 4.8 – Flessione Orizzontale di Parete, Categoria Sottosuolo A – Esiti Verifiche Meccanismi Locali.

Meccanismi di Risposta Longitudinale del Colonnato - Categ. Sottosuolo A								
Porzione di Verifica	Ir(PGA) - SLD		Esito Verifica	Ir(PGA) - SLV		Esito Verifica		
Risposta Longitudinale del Colonnato	1.165	>	1	SI	0.828	<	1	NO

Tabella 4.9 – Meccanismo Longitudinale del Colonnato, Categoria Sottosuolo A – Esiti Verifiche Meccanismi Locali.

### Osservazioni sui Risultati delle Analisi

La sintesi delle analisi svolte nell'ipotesi di categoria di sottosuolo A (Tabella 4.1-4.9) evidenzia come nel complesso la struttura non presenti particolari criticità locali, in particolar modo la quasi totalità delle verifiche ha mostrato come un eventuale collasso locale sarebbe probabilmente preceduto dalla crisi globale della struttura.

### 4.2 Risultati dei Meccanismi Locali – Categoria di Sottosuolo B

Anche per la categoria di sottosuolo B, per ogni tipologia di meccanismo di danno è stata redatta una tabella di sintesi, dove sono riportati gli esiti delle verifiche allo SLD e SLV (Tabella 4.10-4.18).

Ribaltamento Semplice di Parete - Categ. Sottosuolo B								
Porzione di Verifica	Ir(PGA) - SLD		Esito Verifica	Ir(PGA) - SLV		Esito Verifica		
Intera Facciata Principale	1.580	>	1	SI	1.253	>	1	SI
Intera Facciata Laterale (Sud-Ovest)	0.471	<	1	NO	0.374	<	1	NO
Pannelli Superiori Facciata Principale	1.029	>	1	SI	0.807	<	1	NO
Pannelli Superiori Facciata Laterale (Sud-Ovest)	0.790	<	1	NO	0.592	<	1	NO
Intero Prospetto Laterale (Sud-Ovest)	0.790	<	1	NO	0.626	<	1	NO
Copertura Navata Centrale	0.754	<	1	NO	0.555	<	1	NO
Copertura Navata Laterale (Sud-Ovest)	1.217	>	1	SI	0.925	<	1	NO
Parziale Copertura Navata Centrale	0.703	<	1	NO	0.517	<	1	NO
Parziale Copertura Navata Laterale (Sud-Ovest)	1.123	>	1	SI	0.848	<	1	NO
Parete Tiburio (Sud-Ovest)	0.920	<	1	NO	0.644	<	1	NO
Cappella Sacramento Facciata Nord-Est	0.442	<	1	NO	0.351	<	1	NO

Tabella 4.10 – Ribaltamento Semplice, Categoria Sottosuolo B – Esiti Verifiche Meccanismi Locali.

Ribaltamento Composto di Parete - Categ. Sottosuolo B								
Porzione di Verifica	Ir(PGA) - SLD		Esito Verifica	Ir(PGA) - SLV		Esito Verifica		
Pannelli Superiori Facciata Principale	1.428	>	1	SI	1.135	>	1	SI
Intera Facciata Laterale (Sud-Ovest)	0.601	<	1	NO	0.480	<	1	NO
Intero Prospetto Laterale (Sud-Ovest)	0.986	<	1	NO	0.773	<	1	NO
Pannelli Superiori Facciata Laterale (Sud-Ovest)	1.210	>	1	SI	0.871	<	1	NO
Parete Nord-Est	1.254	>	1	SI	0.874	<	1	NO

Tabella 4.11 – Ribaltamento Composto, Categoria Sottosuolo B – Esiti Verifiche Meccanismi Locali.

Ribaltamento Cantonale - Categ. Sottosuolo B								
Porzione di Verifica	Ir(PGA) - SLD		Esito Verifica	Ir(PGA) - SLV		Esito Verifica		
Cantonale Tiburio (Ovest)(1)	1.080	>	1	SI	0.756	<	1	NO
Cantonale Tiburio (Ovest)(2)	1.478	>	1	SI	1.009	>	1	SI
Cantonale Campanile (Nord)	1.167	>	1	SI	0.825	<	1	NO
Cantonale Cappella Sacramento	1.261	>	1	SI	0.994	<	1	NO

Tabella 4.12 – Ribaltamento Cantonale, Categoria Sottosuolo B – Esiti Verifiche Meccanismi Locali.

Sfondamento Timpano - Categ. Sottosuolo B								
Porzione di Verifica	Ir(PGA) - SLD			Esito Verifica	Ir(PGA) - SLV			Esito Verifica
		>	1			>	1	
Timpano Facciata Principale	2.935	>	1	SI	1.471	>	1	SI
Timpano Facciata Laterale (Sud-Ovest)(1)	2.355	>	1	SI	1.471	>	1	SI
Timpano Facciata Laterale (Sud-Ovest)(2)	3.101	>	1	SI	1.471	>	1	SI
Timpano Cappella Sacramento	3.710	>	1	SI	1.471	>	1	SI

Tabella 4.13 – Sfondamento Timpano, Categoria Sottosuolo B – Esiti Verifiche Meccanismi Locali.

Ribaltamento Fascia Sottotetto - Categ. Sottosuolo B								
Porzione di Verifica	Ir(PGA) - SLD			Esito Verifica	Ir(PGA) - SLV			Esito Verifica
		>	1			>	1	
Fascia Copertura Navata Centrale (Sud-Ovest)	1.167	>	1	SI	0.879	<	1	NO
Fascia Copertura Navata Laterale (Sud-Ovest)	1.841	>	1	SI	1.385	>	1	SI
Fascia Tiburio (Sud-Ovest)	1.725	>	1	SI	1.152	>	1	SI
Fascia Parete Nord-Ovest	1.341	>	1	SI	1.026	>	1	SI
Fascia Abside Navata Centrale	3.652	>	1	SI	1.471	>	1	SI
Fascia Abside Parete Sud-Ovest	2.036	>	1	SI	1.471	>	1	SI

Tabella 4.14 – Ribaltamento Fascia Sottotetto, Categoria Sottosuolo B – Esiti Verifiche Meccanismi Locali.

Ribaltamento Abside - Categ. Sottosuolo B								
Porzione di Verifica	Ir(PGA) - SLD			Esito Verifica	Ir(PGA) - SLV			Esito Verifica
		>	1			>	1	
Abside Navata Centrale	1.268	>	1	SI	1.003	>	1	SI
Abside Navata Centrale Pannelli Superiori	1.449	>	1	SI	1.000	>	1	SI
Abside Navata Laterale (Sud-Ovest)	1.217	>	1	SI	0.963	<	1	NO

Tabella 4.15 – Ribaltamento Abside, Categoria Sottosuolo B – Esiti Verifiche Meccanismi Locali.

Meccanismi nel Piano della Facciata - Categ. Sottosuolo B								
Porzione di Verifica	Ir(PGA) - SLD			Esito Verifica	Ir(PGA) - SLV			Esito Verifica
		>	1			>	1	
Piano Facciata Principale	3.710	>	1	SI	1.471	>	1	SI

Tabella 4.16 – Meccanismo nel Piano della Facciata, Categoria Sottosuolo B – Esiti Verifiche Meccanismi Locali.

Meccanismi di Flessione Orizzontale di Parete - Categ. Sottosuolo B								
Porzione di Verifica	Ir(PGA) - SLD			Esito Verifica	Ir(PGA) - SLV			Esito Verifica
		>	1			>	1	
Tiburio (cerniere verticali)	1.080	>	1	SI	0.759	<	1	NO
Tiburio (cerniere oblique)	2.659	>	1	SI	1.471	>	1	SI

Tabella 4.17 – Flessione Orizzontale di Parete, Categoria Sottosuolo B – Esiti Verifiche Meccanismi Locali.

Meccanismi di Risposta Longitudinale del Colonnato - Categ. Sottosuolo B								
Porzione di Verifica	Ir(PGA) - SLD			Esito Verifica	Ir(PGA) - SLV			Esito Verifica
		>	1			>	1	
Risposta Longitudinale del Colonnato	0.971	<	1	NO	0.761	<	1	NO

Tabella 4.18 – Meccanismo Longitudinale del Colonnato, Categoria Sottosuolo B – Esiti Verifiche Meccanismi Locali.

### Osservazioni sui Risultati delle Analisi

La sintesi delle analisi svolte nell'ipotesi di categoria di sottosuolo B (Tabella 4.10-4.18) evidenzia come la struttura presenti criticità locali nei riguardi dei meccanismi di ribaltamento semplice, composto e del cantonale; per questi la quasi totalità delle verifiche allo SLV ha dato esito negativo.

Pertanto, allo stato di fatto, nell'ipotesi di categoria di sottosuolo B, risulta necessaria la progettazione e la realizzazione di interventi di riparazione/rinforzo e/o miglioramento sismico.

### 4.3 Risultati dei Meccanismi Locali – Categoria di Sottosuolo C

Infine, per la categoria di sottosuolo C, per ogni tipologia di meccanismo di danno è stata redatta una tabella di sintesi, dove sono riportati gli esiti delle verifiche allo SLD e SLV (Tabella 4.19-4.27).

Ribaltamento Semplice di Parete - Categ. Sottosuolo C						
Porzione di Verifica	Ir(PGA) - SLD		Esito Verifica	Ir(PGA) - SLV		Esito Verifica
Intera Facciata Principale	1.260	> 1	SI	1.107	> 1	SI
Intera Facciata Laterale (Sud-Ovest)	0.376	< 1	NO	0.327	< 1	NO
Pannelli Superiori Facciata Principale	0.809	< 1	NO	0.716	< 1	NO
Pannelli Superiori Facciata Laterale (Sud-Ovest)	0.630	< 1	NO	0.518	< 1	NO
Intero Prospetto Laterale (Sud-Ovest)	0.630	< 1	NO	0.553	< 1	NO
Copertura Navata Centrale	0.578	< 1	NO	0.497	< 1	NO
Copertura Navata Laterale (Sud-Ovest)	0.983	< 1	NO	0.827	< 1	NO
Parziale Copertura Navata Centrale	0.532	< 1	NO	0.464	< 1	NO
Parziale Copertura Navata Laterale (Sud-Ovest)	0.902	< 1	NO	0.759	< 1	NO
Parete Tiburio (Sud-Ovest)	0.705	< 1	NO	0.553	< 1	NO
Cappella Sacramento Facciata Nord-Est	0.353	< 1	NO	0.312	< 1	NO

Tabella 4.19 – Ribaltamento Semplice, Categoria Sottosuolo C – Esiti Verifiche Meccanismi Locali.

Ribaltamento Composto di Parete - Categ. Sottosuolo C						
Porzione di Verifica	Ir(PGA) - SLD		Esito Verifica	Ir(PGA) - SLV		Esito Verifica
Pannelli Superiori Facciata Principale	1.156	> 1	SI	1.008	> 1	SI
Intera Facciata Laterale (Sud-Ovest)	0.480	< 1	NO	0.419	< 1	NO
Intero Prospetto Laterale (Sud-Ovest)	0.775	< 1	NO	0.685	< 1	NO
Pannelli Superiori Facciata Laterale (Sud-Ovest)	0.936	< 1	NO	0.782	< 1	NO
Parete Nord-Est	0.948	< 1	NO	0.769	< 1	NO

Tabella 4.20 – Ribaltamento Composto, Categoria Sottosuolo C – Esiti Verifiche Meccanismi Locali.

Ribaltamento Cantonale - Categ. Sottosuolo C						
Porzione di Verifica	Ir(PGA) - SLD		Esito Verifica	Ir(PGA) - SLV		Esito Verifica
Cantonale Tiburio (Ovest)(1)	0.815	< 1	NO	0.642	< 1	NO
Cantonale Tiburio (Ovest)(2)	1.121	> 1	SI	1.000	> 1	SI
Cantonale Campanile (Nord)	0.890	< 1	NO	0.721	< 1	NO
Cantonale Cappella Sacramento	1.006	> 1	SI	0.878	< 1	NO

Tabella 4.21 – Ribaltamento Cantonale, Categoria Sottosuolo C – Esiti Verifiche Meccanismi Locali.

Sfondamento Timpano - Categ. Sottosuolo C						
Porzione di Verifica	Ir(PGA) - SLD		Esito Verifica	Ir(PGA) - SLV		Esito Verifica
Timpano Facciata Principale	2.370	> 1	SI	1.299	> 1	SI
Timpano Facciata Laterale (Sud-Ovest)(1)	1.902	> 1	SI	1.299	> 1	SI
Timpano Facciata Laterale (Sud-Ovest)(2)	2.497	> 1	SI	1.299	> 1	SI
Timpano Cappella Sacramento	2.960	> 1	SI	1.299	> 1	SI

Tabella 4.22 – Sfondamento Timpano, Categoria Sottosuolo C – Esiti Verifiche Meccanismi Locali.

Ribaltamento Fascia Sottotetto - Categ. Sottosuolo C						
Porzione di Verifica	Ir(PGA) - SLD		Esito Verifica	Ir(PGA) - SLV		Esito Verifica
Fascia Copertura Navata Centrale (Sud-Ovest)	0.948	< 1	NO	0.787	< 1	NO
Fascia Copertura Navata Laterale (Sud-Ovest)	1.474	> 1	SI	1.223	> 1	SI
Fascia Tiburio (Sud-Ovest)	1.329	> 1	SI	1.008	> 1	SI
Fascia Parete Nord-Ovest	1.092	> 1	SI	0.914	< 1	NO
Fascia Abside Navata Centrale	2.913	> 1	SI	1.299	> 1	SI
Fascia Abside Parete Sud-Ovest	1.653	> 1	SI	1.299	> 1	SI

Tabella 4.23 – Ribaltamento Fascia Sottotetto, Categoria Sottosuolo C – Esiti Verifiche Meccanismi Locali.

Ribaltamento Abside - Categ. Sottosuolo C						
Porzione di Verifica	Ir(PGA) - SLD		Esito Verifica	Ir(PGA) - SLV		Esito Verifica
Abside Navata Centrale	1.017	> 1	SI	0.886	< 1	NO
Abside Navata Centrale Pannelli Superiori	1.179	> 1	SI	0.982	< 1	NO
Abside Navata Laterale (Sud-Ovest)	0.983	< 1	NO	0.853	< 1	NO

Tabella 4.24 – Ribaltamento Abside, Categoria Sottosuolo C – Esiti Verifiche Meccanismi Locali.

Meccanismi nel Piano della Facciata - Categ. Sottosuolo C								
Porzione di Verifica	Ir(PGA) - SLD		Esito Verifica	Ir(PGA) - SLV		Esito Verifica		
Piano Facciata Principale	2.960	>	1	SI	1.299	>	1	SI

Tabella 4.25 – Meccanismo nel Piano della Facciata, Categoria Sottosuolo C – Esiti Verifiche Meccanismi Locali.

Meccanismi di Flessione Orizzontale di Parete - Categ. Sottosuolo C								
Porzione di Verifica	Ir(PGA) - SLD		Esito Verifica	Ir(PGA) - SLV		Esito Verifica		
Tiburio (cerniere verticali)	0.827	<	1	NO	0.647	<	1	NO
Tiburio (cerniere oblique)	2.087	>	1	SI	1.299	>	1	SI

Tabella 4.26 – Flessione Orizzontale di Parete, Categoria Sottosuolo C – Esiti Verifiche Meccanismi Locali.

Meccanismi di Risposta Longitudinale del Colonnato - Categ. Sottosuolo C								
Porzione di Verifica	Ir(PGA) - SLD		Esito Verifica	Ir(PGA) - SLV		Esito Verifica		
Risposta Longitudinale del Colonnato	0.775	<	1	NO	0.673	<	1	NO

Tabella 4.27 – Meccanismo Longitudinale del Colonnato, Categoria Sottosuolo C – Esiti Verifiche Meccanismi Locali.

### Osservazioni sui Risultati delle Analisi

La sintesi delle analisi svolte nell'ipotesi di categoria di sottosuolo C (Tabella 4.19-4.27) evidenzia come la struttura presenti criticità locali nei riguardi dei meccanismi di ribaltamento semplice, composto, del cantonale, delle fasce sottotetto e dell'abside.

Allo stato di fatto, nell'ipotesi di categoria di sottosuolo C, si può affermare come la struttura del Duomo sotto sisma collapserebbe localmente anziché presentare un comportamento globale (scatolare).

Per quanto detto risulterà necessaria la progettazione e la realizzazione di interventi di riparazione/rinforzo e/o miglioramento sismico, al fine di scongiurare l'attivazione dei meccanismi locali suddetti.

## CONCLUSIONI

L'analisi del comportamento globale della struttura, studiata attraverso l'analisi statica non lineare, è stata affiancata dalla valutazione dei cinematismi locali di collasso, argomento principale di questo studio, al fine di individuare i punti nevralgici della struttura.

Nel complesso la quasi totalità delle verifiche effettuate nell'ipotesi di categoria di sottosuolo A, ad eccezione del ribaltamento semplice, hanno indicato come un eventuale collasso locale sarebbe probabilmente preceduto dalla crisi globale della struttura.

L'incremento dell'azione sismica, conseguente alla variazione della categoria di sottosuolo (B e C), determina un aumento del numero di cinematismi attivabili sotto sisma, aumentando così la vulnerabilità sismica dei singoli macroelementi e dell'organismo strutturale nel suo complesso. Pertanto, è di fondamentale importanza la conoscenza della categoria di sottosuolo, in quanto la stessa influenza il comportamento locale della struttura.

In conclusione, le analisi condotte forniscono utili informazioni sullo stato di vulnerabilità sismica del Duomo e sul suo comportamento al variare della PGA.

Un giudizio più appropriato sarà possibile a valle di indagini diagnostiche in situ più approfondite al fine di definire, oltre alla suddetta categoria di sottosuolo, le caratteristiche della muratura, le connessioni tra i paramenti murari ed eventuali degradi (parametri da cui dipendono le verifiche di vulnerabilità sismica).