



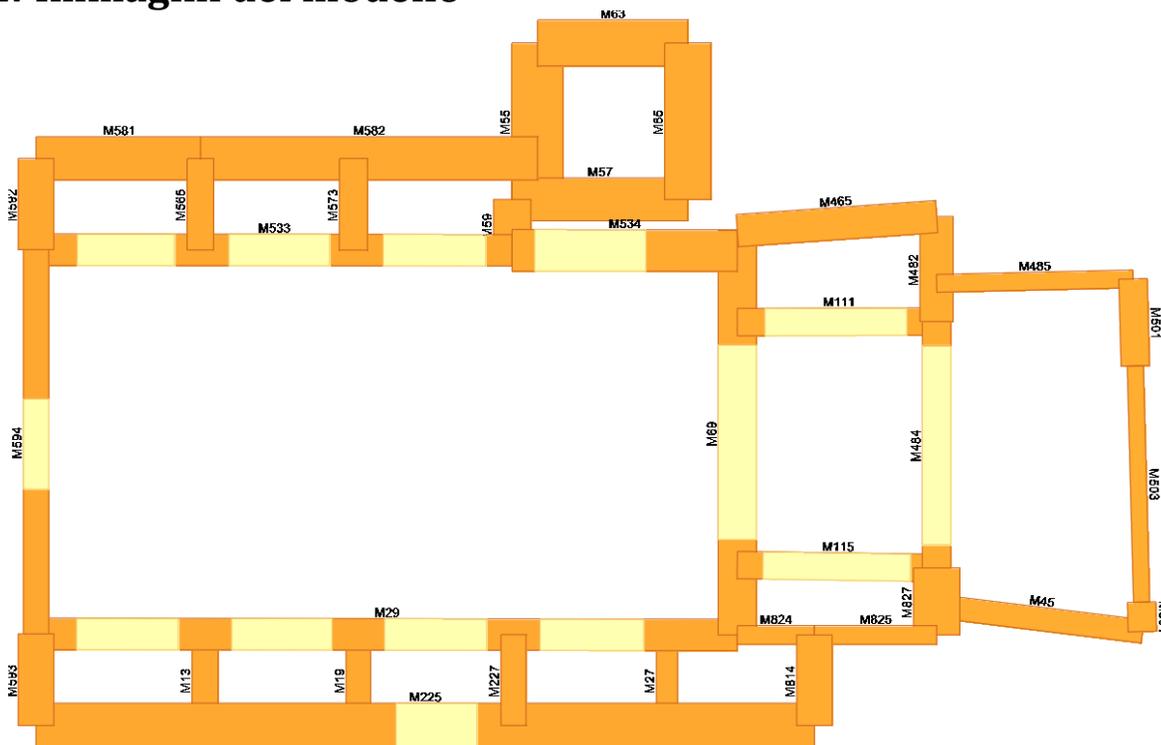
## INDICE

1. Descrizione Generale .....	2
2. Immagini del modello .....	2
3. Norme di riferimento .....	9
4. Descrizione del modello.....	9
4.1 Materiali.....	9
5. Geometria del modello .....	9
6. Carichi .....	11
6.1 Carico Sismico: .....	11
6.2 Carico Statico: .....	11
7. Azioni sismiche: spettro da normativa.....	12
8. Metodo di calcolo.....	13
9. Metodo di verifica per meccanismi locali.....	14
9.1 Stato limite di Vita (SLV) .....	14
10. Verifica statica.....	15
10.1 Snellezza della muratura .....	15
10.2 Eccentricità dei carichi .....	15
10.3 Verifica a carichi verticali.....	16
11. Descrizione analisi <i>pushover</i> .....	16
12. Risultati.....	18
12.1 Stato limite Collasso (SLV):.....	18
12.1.1 Vulnerabilità sismica .....	18

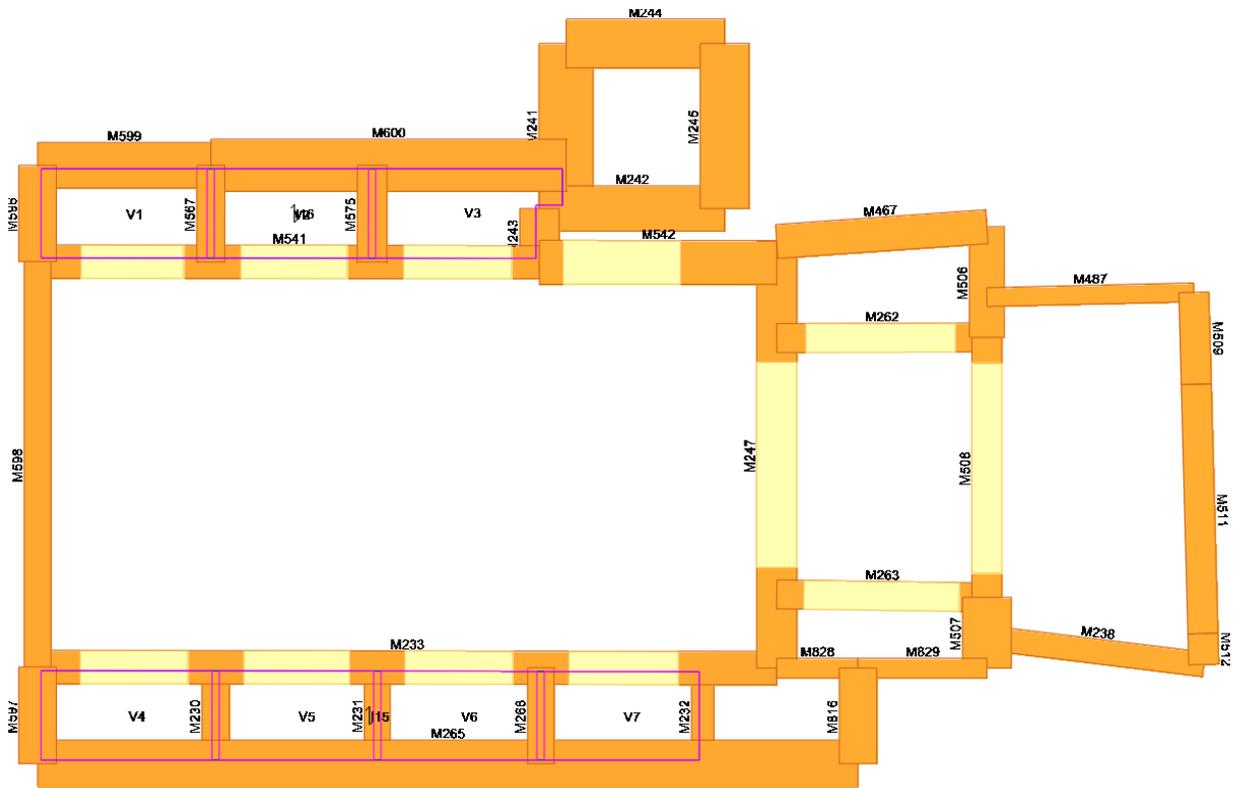
## 1. Descrizione Generale

La presente relazione ha per oggetto l'analisi delle strutture, le considerazioni di merito, i calcoli svolti per la redazione del progetto di consolidamento dell'edificio della Chiesa della Trinità sito in Potenza ubicata alla Via Pretoria n. 109. La struttura è realizzata interamente in muratura con due tipologie principali di tessitura: pietre a spacco con buona tessitura e muratura di mattoni pieni relativamente ad alcuni rifacimenti e interventi eseguiti nel corso degli anni. Gli orizzontamenti sono rigidi e semirigidi. La copertura dell'aula al livello 4 (cfr. rappresentazione spaziale) è formata da un graticcio di travi in c.a. su cui poggia una soletta piena realizzata sempre in c.a. Gli altri orizzontamenti sono modeste solette poste al di sopra di elementi metallici (putrelle con sezione IPE). La volta a crociera al di sopra dell'altare principale è realizzata in incannucciato ed è per questo inefficace in termini di rigidezza. È stata tenuta in conto, pertanto, solamente in termini di peso e quindi di massa. Nel seguito sono riportate le descrizioni delle metodologie e le ipotesi di calcolo utilizzate per le verifiche in condizioni statiche, per le verifiche dei meccanismi locali delle pareti per azioni fuori dal piano e per le verifiche sismiche globali tramite analisi statiche non lineari (*pushover*). Sono ivi riportati i principali dati strutturali. I dettagli di tutti i calcoli e le verifiche sono riportati nei "tabulati di calcolo".

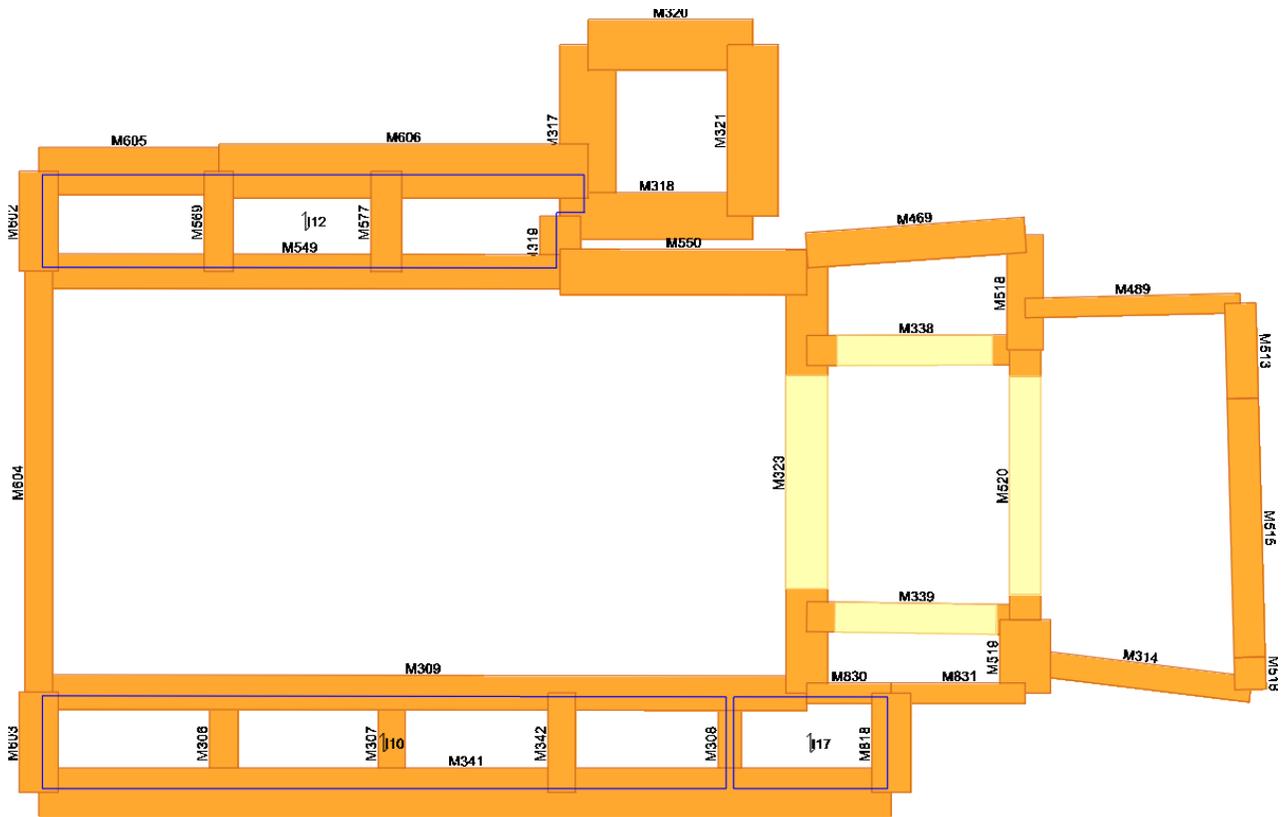
## 2. Immagini del modello



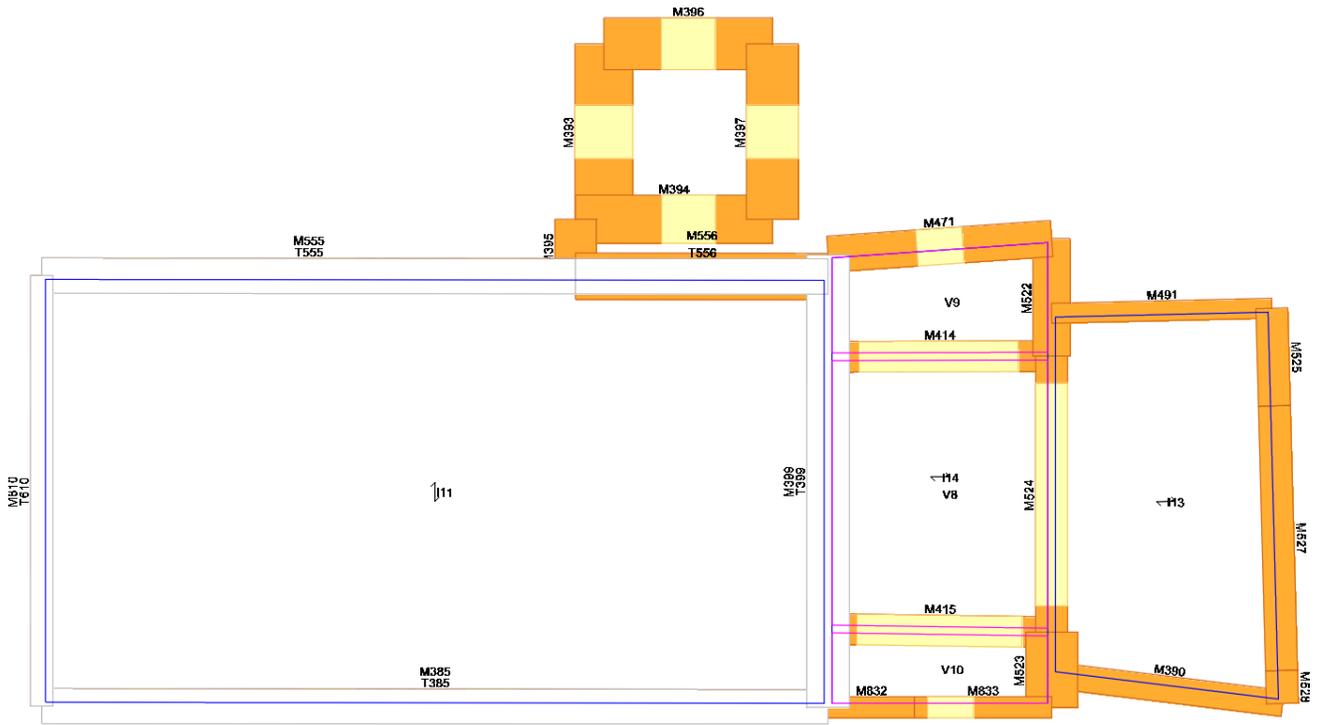
Vista pianta livello 1



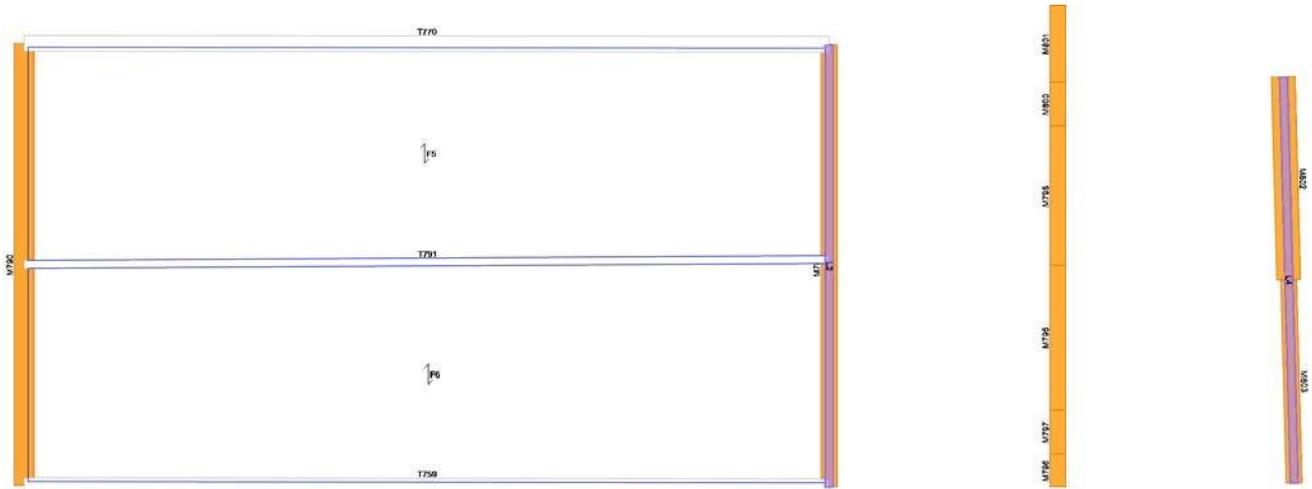
Vista pianta livello 2



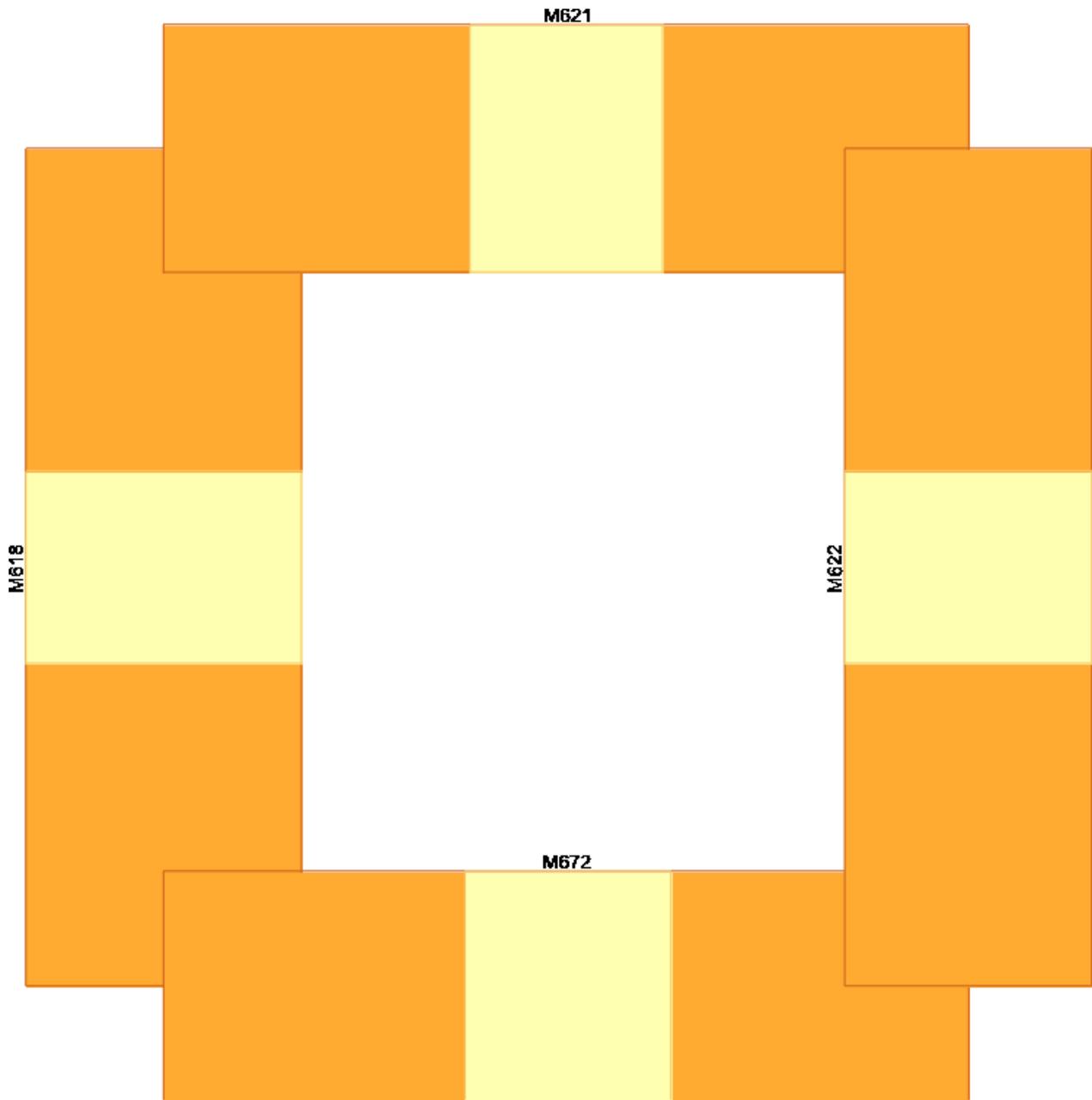
Vista pianta livello 3



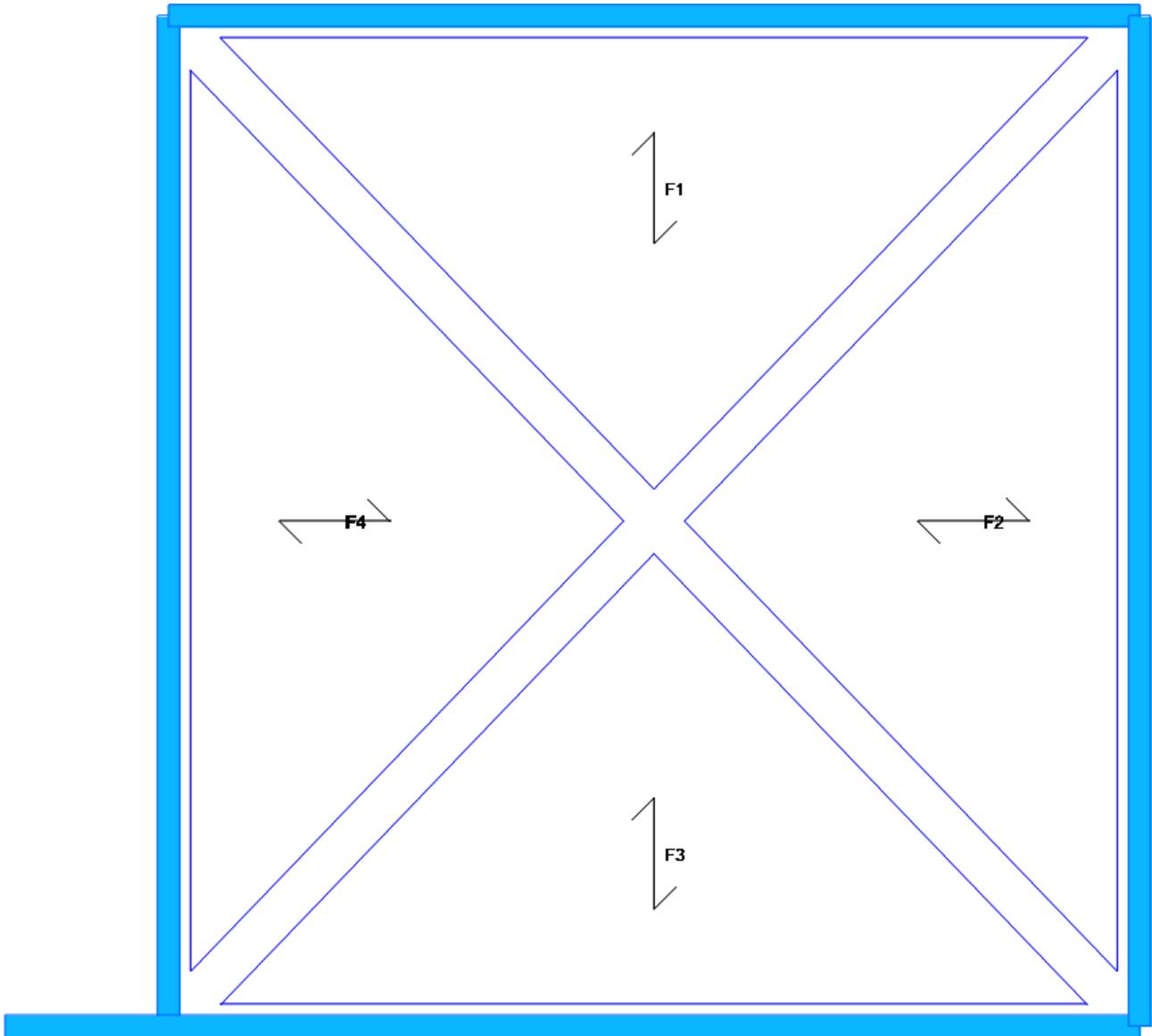
Vista pianta livello 4



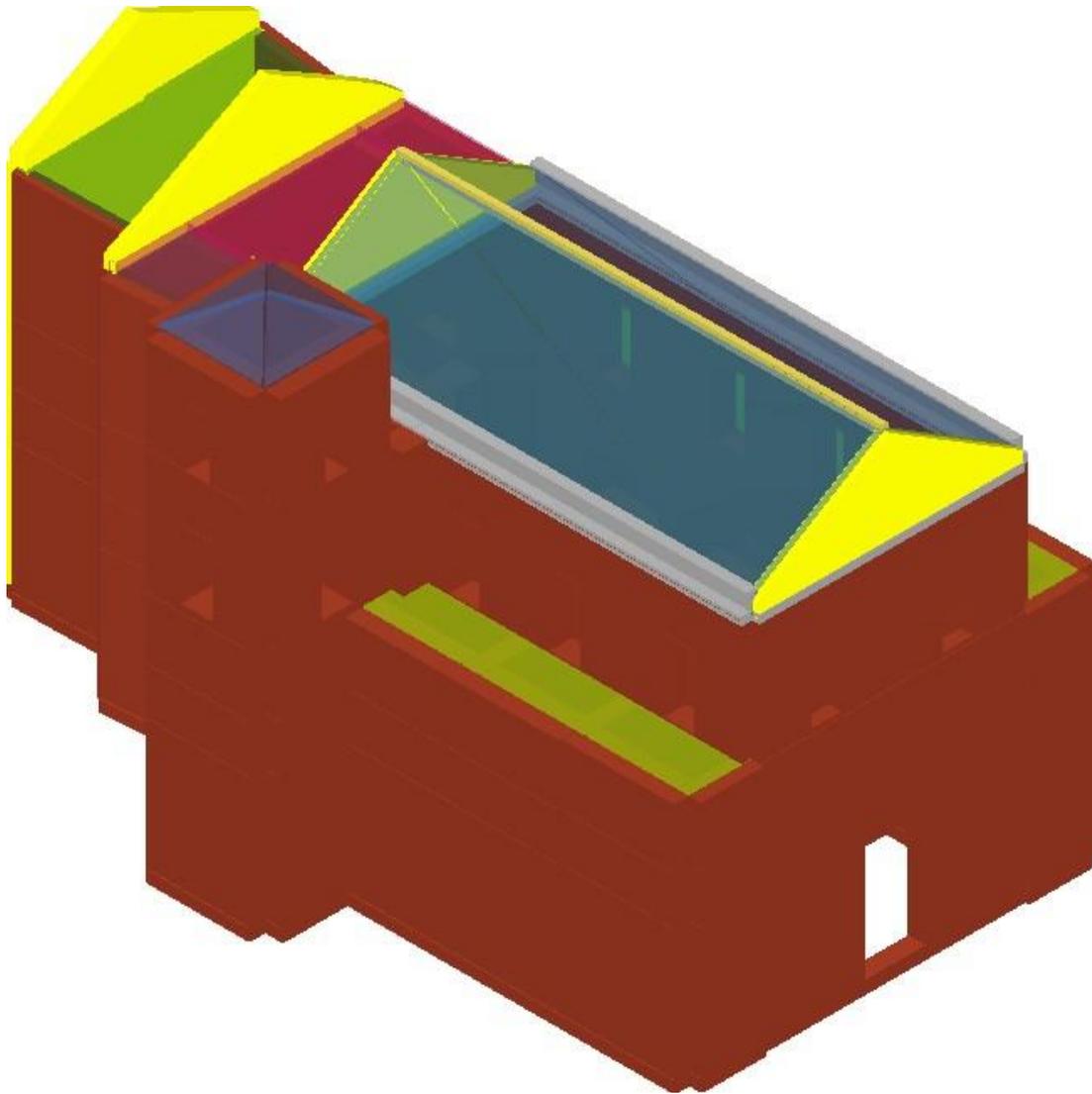
Vista pianta livello 4 tetto



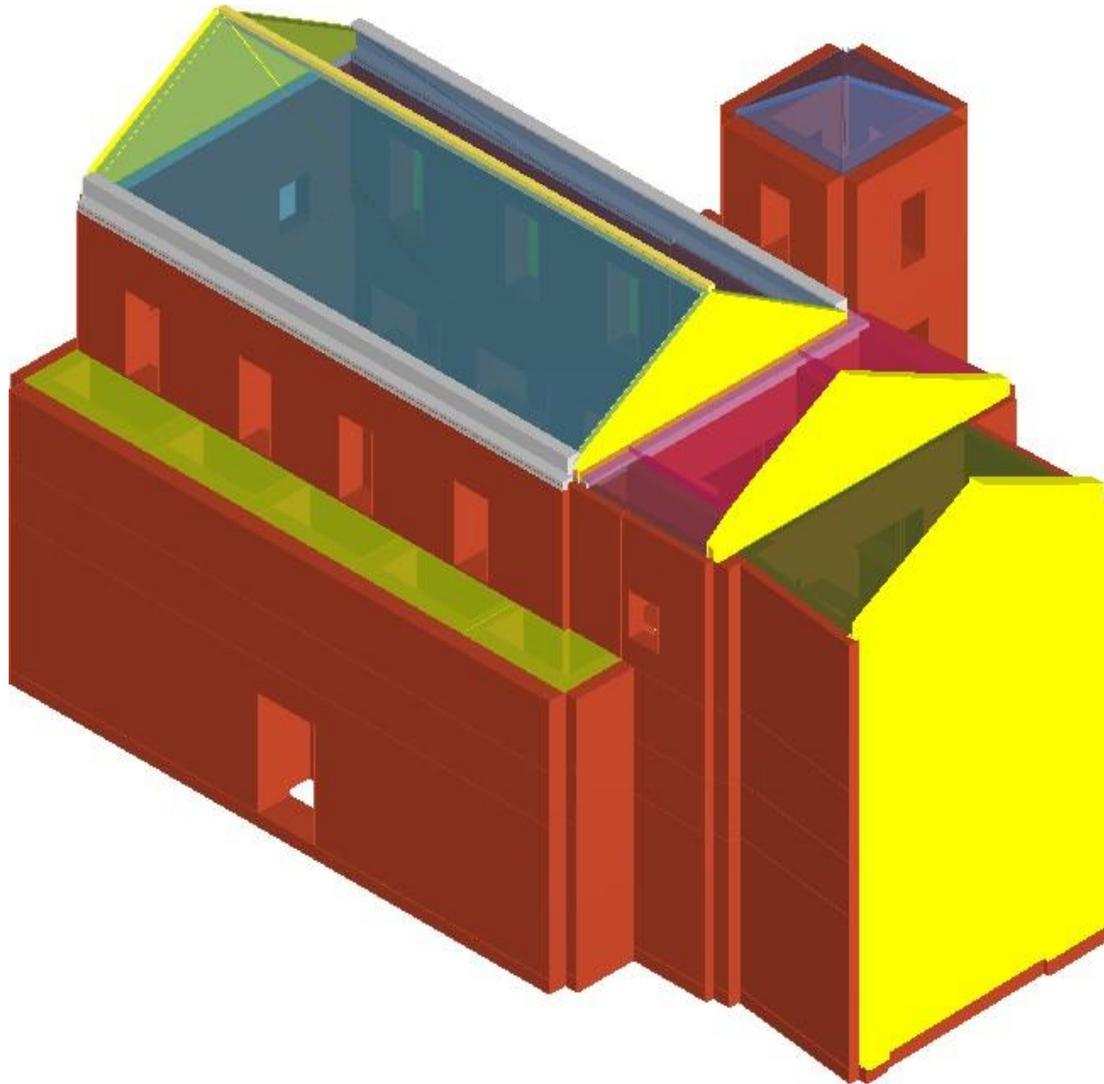
**Vista pianta livello 5**



**Vista pianta livello 5 tetto**



**Vista 3D (1)**



**Vista 3D (2)**

### 3. Norme di riferimento

Per le analisi svolte in seguito sono stati recepiti i principi e le regole riportate nelle normative seguenti: Decreto Ministeriale 17 gennaio 2018 - "Norme tecniche per le Costruzioni".

### 4. Descrizione del modello

#### 4.1 Materiali

##### Muratura

Nome	E [N/mm <sup>2</sup> ]	G [N/mm <sup>2</sup> ]	Peso specifico [kN/m <sup>3</sup> ]	f <sub>m</sub> [N/cm <sup>2</sup> ]	τ f <sub>vm0</sub> [N/cm <sup>2</sup> ]
Pietre a spacco	1,740.00	580.00	21	266.67	5.42
Mattoni pieni	1,500.00	500.00	18	266.67	6.33

##### Calcestruzzo

Nome	E [N/mm <sup>2</sup> ]	G [N/mm <sup>2</sup> ]	Peso specifico [kN/m <sup>3</sup> ]	f <sub>cm</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	f <sub>ck</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]
cls cordoli	28,608.00	11,920.00	25	13.9	10.79

##### Acciaio armatura

Nome	E [N/mm <sup>2</sup> ]	G [N/mm <sup>2</sup> ]	Peso specifico [kN/m <sup>3</sup> ]	f <sub>ym</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	f <sub>yk</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]
acciaio liscio	206,000.00	79,231.00	79	222.2	280.00

##### Legno

Nome	E [N/mm <sup>2</sup> ]	G [N/mm <sup>2</sup> ]	Peso specifico [kN/m <sup>3</sup> ]	f <sub>wm</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	f <sub>wk</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]
ANS1Conifere. Pioppo (Abete Nord 1)	12,000.00	750.00	4	41.0	29.00

### 5. Geometria del modello

La modellazione dell'edificio è stata realizzata mediante l'inserimento di pareti discretizzate in macroelementi rappresentativi di maschi murari e di fasce di piano deformabili; i nodi rigidi sono indicati nelle porzioni di muratura che tipicamente sono meno soggette al danneggiamento sismico. Solitamente i maschi e le fasce sono contigui alle aperture, i nodi rigidi rappresentano elementi di collegamento tra maschi e fasce.

La concezione matematica che si nasconde nell'impiego di tale elemento, permette di riconoscere il meccanismo di danno a taglio nella sua parte centrale o a pressoflessione sui bordi dell'elemento in modo da percepire la dinamica del danneggiamento così come si presenta effettivamente nella realtà.

I nodi del modello sono nodi tridimensionali a 5 gradi di libertà (le tre componenti di spostamento nel sistema di riferimento globale e le rotazioni intorno agli assi X e Y) o nodi bidimensionali a 3 gradi di libertà (due traslazioni e la rotazione nel piano della parete). I nodi tridimensionali vengono usati per permettere il trasferimento delle azioni da un primo muro a un secondo disposto trasversalmente rispetto al primo.

I nodi di tipo bidimensionale hanno gradi di libertà nel solo piano della parete permettendo il trasferimento degli stati di sollecitazione tra i vari punti della parete.

Gli orizzontamenti, sono modellati con elementi solaio a tre nodi connessi ai nodi tridimensionali, sono caricabili perpendicolarmente al loro piano dai carichi accidentali e permanenti.

Le azioni sismiche caricano il solaio lungo la direzione del piano medio. Per questo motivo l'elemento finito solaio viene definito con una rigidità assiale ma nessuna rigidità flessionale, in quanto il comportamento meccanico principale che si intende sondare è quello sotto carico orizzontale dovuto al sisma.

## 6. Carichi

### 6.1 Carico Sismico:

Le verifiche allo stato limite ultimo (SLV) e allo stato limite di esercizio (SLD; SLO) devono essere effettuate per la seguente combinazione [Norme Tecniche per le Costruzioni NTC 2018 §2.5.3].

$$E + G_{k1} + G_{k2} + \sum_i \Psi_{2i} Q_{ki}$$

Gli effetti dell'azione sismica sono stati valutati tenendo conto delle masse associate ai seguenti carichi gravitazionali:

$$G_{k1} + G_{k2} + \sum_i \Psi_{2i} Q_{ki}$$

### 6.2 Carico Statico:

La verifica allo stato limite ultimo per carichi statici viene condotta con la seguente combinazione dei carichi:

$$\gamma_{G1} G_{k1} + \gamma_{G2} G_{k2} + \gamma_Q \Psi_0 Q_k$$

dove:

E	azione sismica per lo stato limite in esame;
G <sub>k1</sub>	peso proprio di tutti gli elementi strutturali;
G <sub>k2</sub>	peso proprio di tutti gli elementi non strutturali;
Q <sub>Ki</sub>	valore caratteristico della azione variabile;
Ψ <sub>2</sub>	coefficiente di combinazione;
Ψ <sub>0</sub>	coefficiente di combinazione per i carichi variabili
γ <sub>G1</sub> ; γ <sub>G2</sub> ; γ <sub>Q</sub>	coefficienti parziali di sicurezza

I valori dei vari coefficienti sono scelti in base alla destinazione d'uso dei vari solai secondo quanto indicato nella norma. [Norme Tecniche 2018 Tabella 2.5.1].

## 7. Azioni sismiche: spettro da normativa

Gli spettri di risposta, sono definiti in funzione del reticolo di riferimento definito nella “Tabella 1” (parametri spettrali) in allegato alle Norme Tecniche.

Tale tabella fornisce, in funzione delle coordinate geografiche (latitudine, longitudine), i parametri necessari a tracciare lo spettro. I parametri forniti dal reticolo di riferimento sono:

ag: accelerazione orizzontale massima del terreno;

F0: valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale; T<sup>\*C</sup>: periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

La trilogia di valori qui descritta, è definita per un periodo di ritorno assegnato (TR), definito in base alla probabilità di superamento di ciascuno degli stati limite.

Tali valori, saranno pertanto definiti per ciascuno degli stati limite esaminati (cfr. tabella).

Lo spettro sismico dipende anche dalla “Classe del suolo” e dalla “categoria topografica” (cfr. tabella).

	SLC	SLV	SLD	SLO
Ag [m/s <sup>2</sup> ]	3.27	2.55	1.00	0.77
F0	2.46	2.44	2.39	2.36
Tc* [s]	0.42	0.40	0.33	0.32
Tr	1950.00	949.00	101.00	60.00

	SLC	SLV	SLD	SLO
Ss	1.07	1.15	1.20	1.20
Tb [s]	0.18	0.18	0.15	0.15
Tc [s]	0.55	0.53	0.45	0.44
Td [s]	2.93	2.64	2.01	1.92

## 8. Metodo di calcolo

Negli edifici esistenti in muratura spesso avvengono collassi parziali per cause sismiche, in genere per perdita dell'equilibrio di porzioni murarie; la verifica nei riguardi di questi meccanismi, secondo le modalità descritte nel seguito, assume significato se è garantita una certa monoliticità della parete muraria, tale da impedire collassi puntuali per disgregazione della muratura.

Le verifiche con riferimento ai meccanismi locali possono essere svolte tramite l'analisi limite dell'equilibrio, secondo l'approccio cinematico, che si basa sulla scelta del meccanismo di collasso e la valutazione dell'azione orizzontale che attiva tale cinematismo.

L'applicazione del metodo di verifica presuppone quindi l'analisi dei meccanismi locali ritenuti significativi per la costruzione, che possono essere ipotizzati sulla base della conoscenza del comportamento sismico di strutture analoghe, già danneggiate dal terremoto, o individuati considerando la presenza di eventuali stati fessurativi, anche di natura non sismica; inoltre saranno tenute presente la qualità della connessione tra le pareti murarie, la tessitura muraria, la presenza di catene, le interazioni con altri elementi della costruzione o degli edifici adiacenti.

L'approccio cinematico permette inoltre di determinare l'andamento dell'azione orizzontale che la struttura è progressivamente in grado di sopportare all'evolversi del meccanismo.

Per ogni possibile meccanismo locale ritenuto significativo per l'edificio, il metodo si articola nei seguenti passaggi:

- A. trasformazione di una parte della costruzione in un sistema labile (catena cinematica), attraverso l'individuazione di corpi rigidi, definiti da piani di frattura ipotizzabili in grado di ruotare o scorrere tra loro.
- B. valutazione del moltiplicatore orizzontale dei carichi  $\alpha_0$  che comporta l'attivazione del meccanismo mediante l'impiego del principio dei lavori virtuali.
- C. Individuazione dell'accelerazione sismica spettrale di attivazione  $a^*0$  a partire dal moltiplicatore orizzontale dei carichi  $\alpha_0$ .

## 9. Metodo di verifica per meccanismi locali

### 9.1 Stato limite di Vita (SLV)

Nel caso in cui la verifica riguardi un elemento isolato o una porzione della costruzione comunque sostanzialmente appoggiata a terra la condizione di superamento della verifica è fornita dalla seguente disequazione:

$$a_0^* \geq a_{0-min}^* = \frac{a_g \cdot (P_{VR}) \cdot S}{q}$$

Nel caso in cui il meccanismo locale interessa una porzione della costruzione posta ad una certa quota, si deve tener conto del fatto che l'accelerazione assoluta alla quota della porzione di edificio interessata dal cinematismo è in genere amplificata rispetto a quella al suolo; per questo il superamento della verifica è fornito dalla seguente disequazione:

$$a_0^* \geq a_{0-min}^* = \max \left( \frac{a_g \cdot (P_{VR}) \cdot S}{q}; \frac{S_g(T_1) \cdot \Psi(Z) \cdot \gamma}{q} \right)$$

## 10. Verifica statica

Le verifiche statiche eseguite sulla struttura in questione sono le seguenti:

### 10.1 Snellezza della muratura

La verifica di snellezza è eseguita in conformità con quanto riportato al comma 4.5.4. del D.M.2018. Si definisce snellezza di una muratura il rapporto  $h_0/t$  in cui:

$h_0$ : lunghezza libera di inflessione del muro pari a  $\rho \cdot h$ .

t: spessore del muro.

h: l'altezza interna di piano.

$\rho$ : il fattore laterale di vincolo.

La verifica di snellezza risulta soddisfatta se risulta verificata la seguente relazione:

$$h_0/t < 20$$

### 10.2 Eccentricità dei carichi

La verifica di eccentricità è eseguita in conformità con quanto riportato al comma 4.5.6.2. del D.M.2018. Tale verifica risulta soddisfatta qualora risultino verificate le seguenti condizioni:

$$e_1/t \leq 0.33$$

$$e_2/t \leq 0.33$$

dove:

t: spessore del muro

$$e_1 = |e_s| + |e_a| \quad ; \quad e_2 = \frac{e_1}{2} + |e_v|$$

$e_s$ : eccentricità totale dei carichi verticali

$e_a$ :  $h/200$

$e_v$ : eccentricità dovuta al vento  $e_v = M_v/N$

### 10.3 Verifica a carichi verticali

La verifica di snellezza è eseguita in accordo con quanto riportato al comma 4.5.6.2. del D.M.2018. Tale verifica risulta soddisfatta qualora risulti verificata la seguente:

$$N_d \leq N_r$$

in cui:

$N_d$ : carico verticale agente

$N_r$  : carico verticale resistente;  $N_r = \phi f_d A$

A: area della sezione orizzontale del muro al netto delle aperture;

$f_d$ : resistenza di calcolo della muratura;

$\phi$ : coefficiente di riduzione della resistenza del muro.

Queste verifiche sono state eseguite in ogni maschio murario della struttura, nelle tre sezioni principali (inferiore, centrale, superiore).

I valori dello sforzo normale resistente sono calcolabili solamente se le verifiche di snellezza ed eccentricità dei carichi risultano soddisfatte. Si riportano di seguito i dettagli di verifica per le singole pareti.

## 11. Descrizione analisi *pushover*

Al fine di eseguire le dovute verifiche nei riguardi dell'edificio in questione, è stato deciso di procedere con l'esecuzione di un'analisi statica non lineare.

Le verifiche richieste si realizzano nel confronto tra la curva di capacità per le diverse condizioni previste e la domanda di spostamento prevista dalla normativa.

La curva di capacità è individuata mediante un diagramma spostamento-taglio massimo alla base.

Secondo le prescrizioni da normativa, le condizioni di carico da esaminare devono considerare almeno due distribuzioni di forze d'inerzia, ricadenti l'una nelle distribuzioni principali (Gruppo 1) e l'altra nelle distribuzioni secondarie (Gruppo 2) appresso illustrate.

1. distribuzione proporzionale alle Forze statiche (Gruppo 1)
2. distribuzione uniforme di forze, da intendersi come derivata da una distribuzione uniforme di accelerazioni lungo l'altezza della costruzione (Gruppo 2);

L'analisi eseguita in controllo di spostamento, procede al calcolo della distribuzione di forze che genera il valore dello spostamento richiesto.

L'analisi viene fatta continuare fino a che non si verifica il decadimento del taglio all'80% dal suo valore di picco. Si calcola così il valore dello spostamento massimo alla base dell'edificio generato da quella distribuzione di forze. Questo valore di spostamento costituisce il valore ultimo dell'edificio.

Lo spostamento preso in esame per il tracciamento della curva di capacità è quello di un punto dell'edificio detto nodo di controllo.

La normativa richiede il tracciamento di una curva di capacità bi-lineare di un sistema equivalente (SDOF). Il tracciamento di tale curva deve avvenire con una retta che, passando per l'origine interseca la curva del sistema reale in corrispondenza del 70% del valore di picco; la seconda retta risulterà parallela all'asse degli spostamenti tale da generare l'equivalenza delle aree tra i diagrammi del sistema reale e quello equivalente.

La determinazione della curva relativa al sistema equivalente, permette di determinare il periodo con cui ricavare lo spostamento massimo richiesto dal sisma, secondo gli spettri riportati dalla normativa.

La normativa definisce una eccentricità accidentale del centro delle masse pari al 5% della massima dimensione dell'edificio in direzione perpendicolare al sisma.

In base alla tipologia dell'edificio e alle scelte progettuali che si ritengono più idonee si può decidere la condizione di carico sismico da prendere in esame.

1. Carico sismico: Individua quale delle due tipologie di distribuzioni (proporzionale alle masse o al primo modo) prendere in esame.
2. Direzione: Individua la direzione lungo cui viene caricata la struttura (X o Y del sistema globale) dal carico sismico.

Al fine di individuare la condizione di carico sismico più gravosa, si è deciso di eseguire le analisi distinte per tipologia di carico, direzione del sisma e di eventuali eccentricità accidentali.

## 12. Risultati

Secondo le indicazioni da normativa si devono eseguire le seguenti verifiche:

### 12.1 Stato limite Collasso (SLV):

#### 12.1.1 Vulnerabilità sismica

Per lo stato limite eseguito viene calcolato l'indice di rischio  $\alpha$  ( $\alpha_{SLV}$ ). Questi parametri vengono calcolati come indicato nel seguito:

Accelerazioni di capacità: l'entità massima delle azioni, considerate nelle combinazioni di progetto previste, che la struttura è capace di sostenere.

Accelerazioni di domanda : Valori di riferimento delle accelerazioni dell'azione sismica.

Tali valori vengono definiti a partire dal carico sismico definito nella forma dello spettro.

- PGADLV :accelerazione di picco al suolo corrispondente a SLV.

Il Progettista  
Ing. Maurizio TOLVE