



RELAZIONE GENERALE E RELAZIONE DI CALCOLO STRUTTURALE



Scuola Primaria

Via Santa Veronica
Orosei (NU)

Cod. R22079



Tel 02 36527601
ufficiotecnico@tecnoindagini.it
www.tecnoindagini.it

Committente:
Comune di Orosei
Via Santa Veronica, 5
10075 - Orosei (NU)

INDICE

1.	INTRODUZIONE	2
1.1.	Norme di riferimento	3
1.2.	Pericolosità sismica	4
2.	RILIEVO DELL'EDIFICIO E INDAGINI IN SITU	7
2.1.	Analisi storico-critica	7
2.2.	Caratterizzazione meccanica dei materiali	11
2.3.	Rilievo geometrico-strutturale	14
2.4.	Livelli di conoscenza e fattori di confidenza	19
3.	DESCRIZIONE DEL METODO DI ANALISI E DEL MODELLO	21
3.1.	Metodo di analisi	21
3.2.	Modellazione della struttura	25
3.3.	Vincoli esterni	26
3.4.	Diaframmi di piano	27
3.5.	Carichi e masse	28
4.	VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA STATICA	29
4.1.	Strutture in Cemento Armato	30
4.2.	Strutture in Muratura	31
5.	VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA	33
5.1.	Analisi modale	34
5.2.	Verifica sismica dei meccanismi locali fuori piano	37
5.3.	Verifica sismica con metodo push-over e telai equivalenti	39
5.4.	Vulnerabilità Specifiche	46
5.5.	Classificazione Sismica	49
6.	CONCLUSIONI	50
6.1.	Sicurezza statica	51
6.2.	Sicurezza sismica	52

1. INTRODUZIONE

A seguito dell'incarico conferito dalla Committenza si è proceduto ad eseguire analisi diagnostiche ed elaborazioni per valutare il rischio sismico dell'edificio che ospita la Scuola Primaria sito in Via Santa Veronica a Orosei (NU).

Ciascun territorio, in base alla sua natura geologica, è contraddistinto da una pericolosità sismica, determinata dalla probabilità (P_{VR}) che si verifichi un evento sismico di una certa magnitudo entro un dato intervallo di tempo. Tale probabilità è stata determinata studiando i terremoti che storicamente si sono ripetuti con frequenze e forze caratteristiche. In altri termini, la **pericolosità** sismica sarà tanto più elevata quanto più probabile sarà il verificarsi di un terremoto di elevata magnitudo, a parità dell'intervallo di tempo di ritorno dell'evento sismico (T_R). La pericolosità sismica tiene anche conto dell'esposizione al rischio, infatti, la maggiore o minore presenza di persone e di beni esposti al rischio, modifica la possibilità di subire la perdita di vite umane o danni ai beni culturali.

Tuttavia, le conseguenze di un terremoto sugli edifici e sulla popolazione non dipendono solo dalla pericolosità sismica del luogo in cui i fabbricati insistono: i danni dipendono direttamente anche dalle caratteristiche di resistenza delle costruzioni rispetto alle azioni indotte da una scossa sismica. La predisposizione di una costruzione ad essere danneggiata si definisce **vulnerabilità**. Le conseguenze di un terremoto saranno maggiori quanto più un edificio è vulnerabile per tipologia, progettazione inadeguata, scadente qualità dei materiali, mediocri modalità di costruzione, scarsa manutenzione.

Rischio = Vulnerabilità · Pericolosità · Esposizione

Il rischio sismico fornisce la misura dei danni attesi in un dato intervallo di tempo; in base alla sismicità del territorio; alla resistenza delle costruzioni; alla natura, qualità e quantità dei beni esposti. Esso è determinato dalla combinazione della *pericolosità* e della *vulnerabilità*.

Partendo dai requisiti fissati dalle norme vigenti, l'oggetto delle analisi contenute nel presente documento, è innanzitutto determinare il **rischio sismico** dell'edificio, ovvero dalla sua propensione a subire un danno di un determinato livello, a fronte di un evento sismico di una data intensità, attraverso la determinazione dell'**indice di sicurezza sismica**.

Il metodo proposto valuta il singolo edificio, che a sua volta può essere costituito da una o più *Unità Strutturali* (US), verificando la *vulnerabilità* di ciascuna unità strutturale e accertando che questa sia compatibile con le prestazioni richieste.

La procedura si articola in cinque passaggi principali che prevedono l'acquisizione dei dati relativi al contesto territoriale, delle caratteristiche strutturali necessarie alla modellazione matematica dell'edificio e l'analisi numerica tesa alla valutazione della sicurezza globale e locale per ogni stato limite considerato. I paragrafi seguenti descrivono nei dettagli la procedura proposta nel seguente ordine:

- Pericolosità sismica
- Rilievo dell'edificio e indagini in situ
- Verifica della sicurezza in presenza di azioni statiche
- Valutazione del rischio sismico
- Classificazione sismica

1.1. Norme di riferimento

Il metodo di analisi proposto è basato sulle indicazioni tecniche e normative vigenti, in particolare al Cap. 8 NTC 2018, che definisce i criteri generali per la valutazione della sicurezza e per la progettazione, l'esecuzione ed il collaudo degli interventi sulle costruzioni esistenti. In particolare, i riferimenti inseriti nel testo fanno capo ai seguenti documenti:

NTC 2018: Decreto Ministeriale n. 17 gennaio 2018: *Aggiornamento delle norme tecniche per le costruzioni*, pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale n. 42 del 20 febbraio 2018 – Suppl. Ordinario n. 8.

DD.MM: 58-65 2017: Decreto Ministeriale n.58, 28 febbraio 2017: *Approvazione delle linee guida per la classificazione di rischio sismico delle costruzioni nonché delle modalità per l'attestazione dell'efficacia degli interventi effettuati*. Decreto Ministeriale n.65, 7 marzo 2017: *Modifiche all'articolo 3 del Decreto Ministeriale numero 58 del 28/02/2017*.

CSLP 7: Circolare del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici n. 7 del 21 gennaio 2019: *Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni di cui al DM 17 gennaio 2018*. Pubblicata nella Gazzetta Ufficiale n. 35 dell'11 febbraio 2019 – Suppl. Ordinario n. 5.

CSLP PnD: Circolare del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici febbraio 2008: *Linee guida per la messa in opera del calcestruzzo strutturale e per la valutazione delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo indurito mediante prove non distruttive*.

OPCM 3274: Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20 marzo 2003: *Criteri generali per l'individuazione delle zone sismiche e per la formazione e l'aggiornamento degli elenchi delle stesse zone*. Pubblicata nella Gazzetta Ufficiale n. 72 dell'8 maggio 2003.

OPCM 3519: Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3519 del 28 aprile 2006: *Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica*. Pubblicata nella Gazzetta Ufficiale n. 108 dell'11 maggio 2006.

Più in generale, la stessa NTC 2018 prevede che, per quanto non diversamente specificato nel capitolo 8, si faccia riferimento alle disposizioni di carattere generale contenute negli altri capitoli della norma e queste costituiscono pertanto il riferimento anche per le costruzioni esistenti. Si intendono inoltre coerenti con i principi alla base della stessa norma, le indicazioni riportate nei seguenti documenti:

- Eurocodici strutturali pubblicati dal CEN, con le precisazioni riportate nelle Appendici Nazionali o, in mancanza di esse, nella forma internazionale EN;
- Norme UNI EN armonizzate i cui riferimenti siano pubblicati su Gazzetta Ufficiale dell'UE;
- Norme per prove, materiali e prodotti pubblicate da UNI.

Inoltre, in mancanza di specifiche indicazioni, a integrazione delle presenti norme e per quanto con esse non in contrasto, possono essere utilizzati i documenti di seguito indicati che costituiscono riferimenti di comprovata validità:

- Istruzioni del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici;
- Linee Guida del Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici;
- Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale e successive modificazioni del Ministero per i Beni e le Attività Culturali, come licenziate dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici e ss. mm. ii.;
- Istruzioni e documenti tecnici del Consiglio Nazionale delle Ricerche (C.N.R.).

1.2. Pericolosità sismica

1.2.1. Aspetti teorici e normativi

La pericolosità sismica, inerente all'intero edificio, è definita dalla Peak Ground Acceleration di domanda (PGA_D) che è la misura dell'accelerazione indotta al suolo da un terremoto in una specifica area geografica, secondo la relazione seguente:

$$PGA_D = a_g \cdot S_T \cdot S_S$$

dove S_S è il coefficiente di amplificazione stratigrafica e S_T è il coefficiente di amplificazione topografico. Tali coefficienti sono ricavabili da indagini geologiche eseguite direttamente sul terreno su cui insiste l'edificio, oppure, in assenza di una relazione geologica, possono essere dedotti in base alla categoria di sottosuolo e alle condizioni topografiche, secondo quanto prescritto nella NTC 2018 § 3.2.2.

Per valutare l'accelerazione orizzontale massima a_g dell'evento sismico, è necessario fissare la pericolosità sismica, correlandola all'esposizione dell'edificio. La pericolosità riguarda l'area geografica in cui sorge l'edificio ed è definita dall'OPCM 3519, mentre l'esposizione viene considerata laddove le norme definiscono gli edifici strategici e/o rilevanti nell'OPCM 3274 e nella Tabella C.3.2.I. della Circolare del CSLP 7.

In funzione della tipologia edilizia analizzata si definisce il livello di danno accettabile e si determinano per ciascun stato limite, ultimo (SLU) e di esercizio (SLE), le probabilità di superamento dell'evento ed i relativi tempi di ritorno secondo quanto riportato nella tabella seguente.

Stati Limite			Probabilità di superamento P_{VR}	Valori del periodo di ritorno T_R in anni al variare del periodo di riferimento V_R
Stati Limite di Esercizio (SLE)	operatività	SLO	81%	30 anni $\leq T_R = 0,60 \cdot V_R$
	danno	SLD	63%	$T_R = V_R$
Stati Limite Ultimi (SLU)	salvaguardia della vita	SLV	10%	$T_R = 9,50 \cdot V_R$
	collasso	SLC	5%	$T_R = 19,50 \cdot V_R \leq 2475$ anni

Come si vede dalla tabella, le azioni sismiche su ciascuna costruzione sono valutate in relazione ad un periodo di riferimento V_R che si ricava, per ciascun tipo di costruzione, moltiplicandone la vita nominale V_N per il coefficiente d'uso C_U :

$$V_R = V_N \cdot C_U$$

Se $V_R \leq 35$ anni si pone comunque $V_R = 35$ anni.

Il valore del coefficiente d'uso C_U è definito, al variare della classe d'uso del fabbricato, secondo le indicazioni fornite dalla NTC 2018 § 2.4.3. La vita nominale di un'opera strutturale V_N è intesa come il numero di anni in cui la struttura, purché soggetta alla manutenzione ordinaria, deve potere essere usata per lo scopo al quale è destinata. La vita nominale dei diversi tipi di opere deve essere precisata nei documenti di progetto e comunque per le opere ordinarie viene considerata ≥ 50 anni secondo le indicazioni fornite dalla NTC 2018 § 2.4.1.

Nella pagina seguente, a titolo esemplificativo, si riportano le mappature di pericolosità sismica del territorio italiano valutate rispettivamente allo SLD (con probabilità di superamento del 63% in 50 anni) e allo SLV (con probabilità di superamento del 10% in 50 anni).

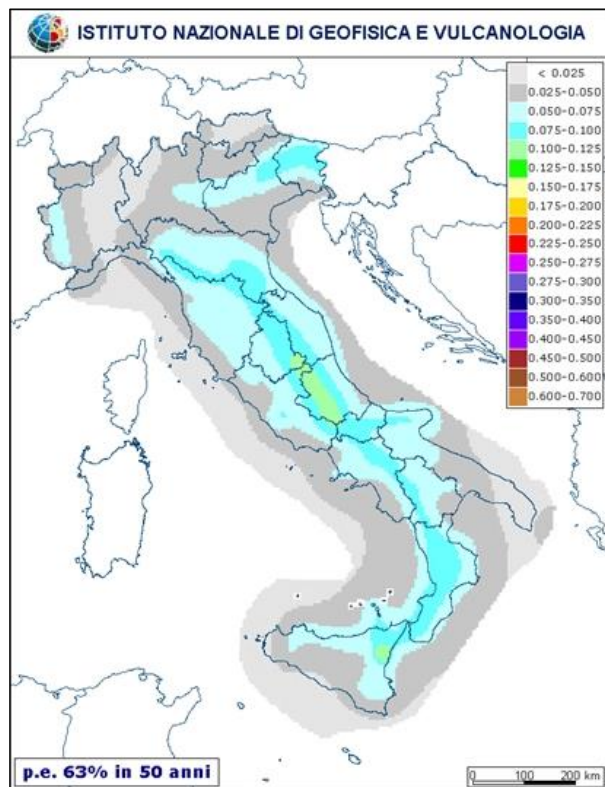


Figura 1 - Mappa della pericolosità sismica del territorio italiano valutata allo SLD.

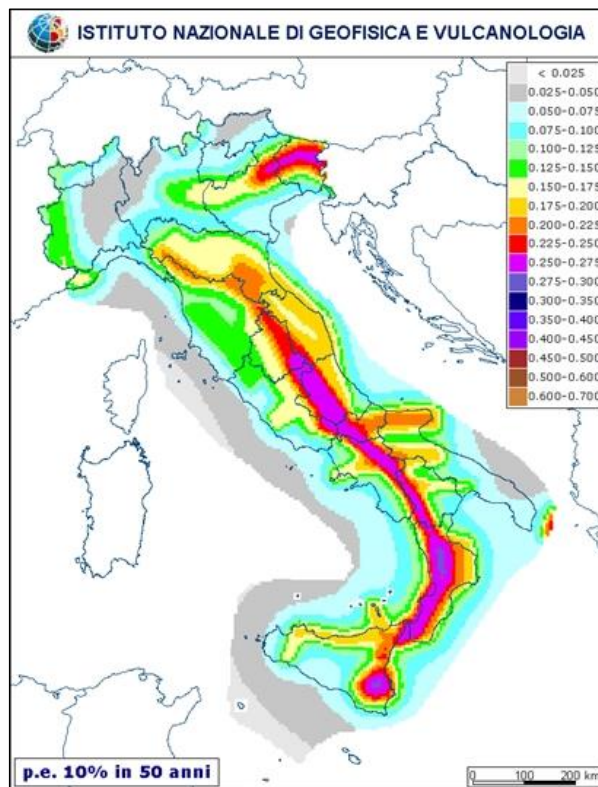


Figura 2 - Mappa della pericolosità sismica del territorio italiano valutata allo SLV.

1.2.1.1. Definizione parametri di domanda

Entrando nello specifico del manufatto oggetto della presente indagine, per la definizione dei parametri di amplificazione stratigrafica (S_s) e topografica (S_T) è stato possibile attingere ai dati forniti dalla "Relazione Geologica - Prospezione sismica M.A.S.W." eseguita dal Dott. Geol. Stefano Bonfoco, redatta per la caratterizzazione della classe categoriale preliminare dei terreni su cui sorge la vicina Scuola Secondaria in via Verdi.

$V_{s,30}$ [m/s]	Categoria di sottosuolo	Categoria topografica	Destinazione d'uso
274	E	T1 Superficie pianeggiante	Scolastico

Definita la Vita nominale della struttura ed eseguite le valutazioni espresse precedentemente si ricavano i dati riportati nella Tabella 1 necessari per determinare i parametri di domanda (Tabella 2) e per costruire degli Spettri di risposta elastica (Figura 3). Nel grafico riportato alla pagina seguente, infatti, per ogni Stato Limite Ultimo e di Esercizio definito dalla normativa è costruito lo spettro di risposta elastica in cui è possibile leggere la corrispettiva accelerazione assegnata al territorio su cui insiste la costruzione.

	V_N	Classe	C_U	V_R	S_s	S_T
Edificio oggetto di analisi	50	III	1.5	75	1.600	1.00

Tabella 1 - Definizione dei parametri di amplificazione e periodo di riferimento.

PARAMETRI SISMICI DI DOMANDA			
Stato limite considerato	Tempo di ritorno	Accelerazione al suolo di picco	Accelerazione al suolo di domanda
	T_R	a_g	PGA_D
	[anni]	[g]	[g]
SLO	45	0.022	0.035
SLD	75	0.028	0.045
SLV	712	0.056	0.090
SLC	1462	0.066	0.106

Tabella 2 - Definizione dei parametri di domanda.

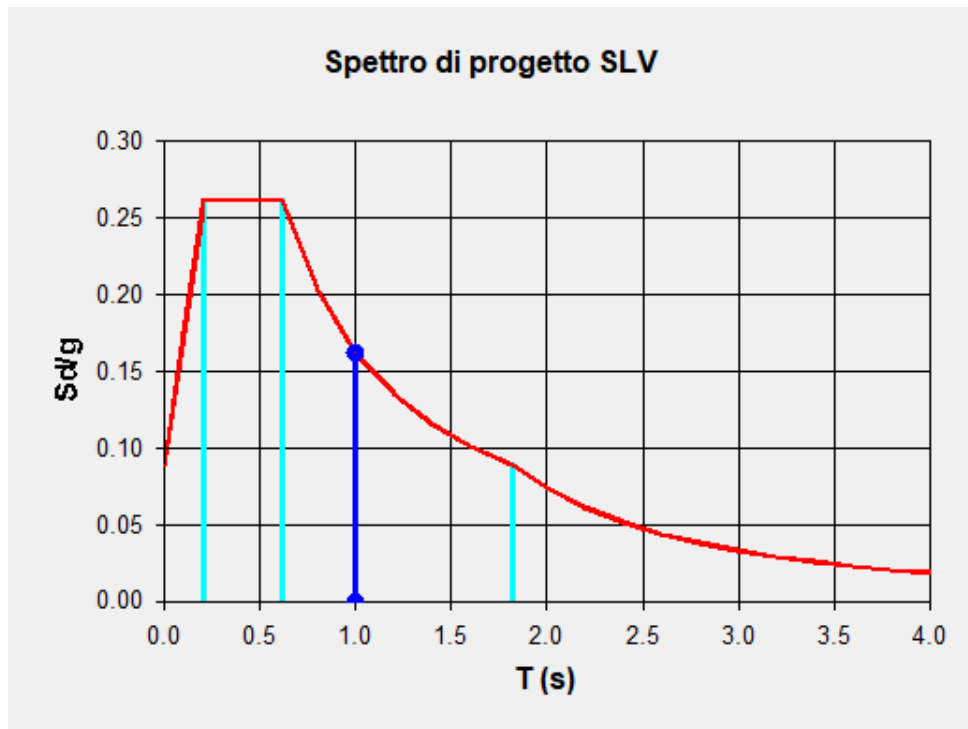


Figura 3 - Spettro di risposta per lo Stato Limite di Salvaguardia della Vita.

2. RILIEVO DELL'EDIFICIO E INDAGINI IN SITU

L'acquisizione dei dati necessari alla modellazione dell'edificio richiede necessariamente il rilievo della vulnerabilità e questa si articola in quattro fasi distinte:

- analisi storico-critica;
- caratterizzazione meccanica dei materiali;
- rilievo geometrico-strutturale;
- determinazione dei livelli di conoscenza e fattori di confidenza.

2.1. Analisi storico-critica

2.1.1. Finalità

Il punto fondamentale per la corretta individuazione del sistema strutturale dell'edificio, del suo stato di sollecitazione e di conservazione, è la ricostruzione dei processi che hanno interessato il manufatto nel corso del tempo: a partire dalla sua costruzione, passando per le modifiche succedutesi e considerando gli eventi eccezionali che lo hanno interessato. Il primo passo per ricostruire questo percorso è la ricerca documentale storico-critica che raccoglie tutte le informazioni propedeutiche alle analisi successive. Quanto più accurata potrà essere tale ricerca – e maggiori saranno le informazioni ricavate – quanto maggiore sarà il livello di conoscenza dell'edificio e minori potranno essere le indagini necessarie per giungere ad un livello di conoscenza comparabile.

Le fonti da considerare per l'acquisizione dei dati necessari, secondo il § 8A.1.B della CSLP 7, sono eventuali documenti di progetto, con particolare riferimento a relazioni geologiche, geotecniche e strutturali ed elaborati grafici strutturali ed eventuale documentazione acquisita in tempi successivi alla costruzione.

A tal fine è stata individuata l'unità strutturale oggetto di studio, evidenziando le azioni che su di essa possono derivare dalle unità strutturali contigue. L'US, in generale, è caratterizzata dalla continuità da cielo a terra per quanto riguarda il flusso dei carichi verticali e, di norma, è delimitata o da spazi aperti, o da giunti strutturali, o da edifici contigui strutturalmente ma, almeno tipologicamente, diversi. Oltre a quanto normalmente previsto per gli edifici non disposti in aggregato, nel caso di edifici contigui si valutano gli effetti di spinte non contrastate, causate da orizzontamenti sfalsati di quota sulle pareti in comune con le US adiacenti, meccanismi locali derivanti da prospetti non allineati, US adiacenti di differente altezza.

2.1.2. Cenni storici

Dalla documentazione fornita dalla Committenza non è stato possibile determinare con precisione l'anno di costruzione del fabbricato in muratura originario, che tuttavia risulta verosimilmente databile all'inizio degli anni '60. Successivamente sono state aggiunte due porzioni in blocchi di calcestruzzo e mattoni con fori orizzontali direttamente collegate alla struttura originaria.

La struttura portante dell'edificio non è stata progettata per resistere ai carichi da sisma previsti dalle vigenti NTC 2018. Il Comune di Orosei (NU) è stato classificato, per la prima volta, in Zona Sismica 4 dall'OPCM n. 3274/2003, aggiornata con la Delibera della Giunta Regionale della Sardegna n. 15/31 del 30.03.2004. In virtù di quanto sopra esposto e del periodo di edificazione è lecito ritenere che le strutture non siano state realizzate secondo criteri "antisismici" moderni.

Consultando gli archivi dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) è stato possibile determinare che l'edificio in analisi, a partire dalla sua costruzione nell'arco di 60km, ha subito gli effetti dei seguenti eventi sismici:

Terremoto	Anno	Magnitudo
Tirreno centrale	2001	4

2.1.3. Definizione delle Unità Strutturali

Il complesso scolastico in esame risulta inserito nel conglomerato urbano del Comune di Orosei, con accesso dalla via Santa Veronica. Attualmente i locali sono adibiti alle attività didattiche della Scuola Primaria.



Foto 1 – Inquadramento dell'edificio nel contesto.

Il complesso è costituito da più corpi di fabbrica frutto di una stratificazione costruttiva avvenuta in differenti epoche e si sviluppa principalmente su due livelli fuori terra. Entrambi i piani sono adibiti prevalentemente ad aule didattiche; in più, al piano terra sono presenti anche aule per i docenti e per il personale e la palestra. La struttura di elevazione principale è prevalentemente realizzata in setti di muratura in pietra di spessore di 50/60cm, mentre per gli ampliamenti più recenti, si avvale di telai di pilastri e travi in conglomerato cementizio armato e gettato in opera e murature in blocchi di cls e blocchi in laterizio con fori orizzontali. Gli orizzontamenti sono principalmente realizzati con tecnologia laterocementizia. Le coperture ammettono per la maggior parte falde inclinate e manto di rivestimento in coppi. La copertura della porzione relativa agli ampliamenti è invece realizzata in muricci e tavelloni che poggiano sulla soletta di supporto sottostante. Le osservazioni condotte in situ non hanno permesso di risalire al sistema di fondazione dei fabbricati.

Sulla base degli approfondimenti eseguiti in fase di indagine e a causa dell'assenza di giunti strutturali, l'edificio è stato considerato come un'unica Unità Strutturale, evidenziata nell'immagine sottostante.



Foto 2 - Suddivisione dell'edificio in Unità Strutturali
(US1 in verde chiaro).

2.2. Caratterizzazione meccanica dei materiali

I materiali vengono caratterizzati a partire dalle informazioni ricavate dall'analisi documentale, successivamente controllate in situ con verifiche visive ed indagini sperimentali basate su prove non distruttive o limitatamente distruttive. Il tipo di indagine ed i punti di esecuzione sono pianificati, in base al loro effettivo uso nelle verifiche e, nel caso di beni culturali e di edifici storici, viene tenuto in considerazione l'impatto in termini di conservazione del bene, limitando il più possibile gli interventi invasivi. Le resistenze meccaniche dei materiali vengono quindi valutate sulla base delle prove effettuate direttamente sulla struttura, prescindendo dalle classi discretizzate previste nelle norme per le nuove costruzioni. Sulla base delle caratteristiche geometriche e strutturali dell'edificio in esame e sulla base del livello di conoscenza da raggiungere richiesto dalla Committenza è stata effettuata la campagna di indagine meglio descritta nell'allegato *Relazione sulle Indagini*.

Nei paragrafi seguenti sono raccolti i risultati delle misure in situ. Negli Elaborati Grafici allegati alla relazione è riportato, per ciascun elemento verticale rilevato, un riepilogo delle caratteristiche geometriche e dei materiali, la schematizzazione della sezione trasversale e una breve documentazione fotografica. Inoltre, nelle tavole di *Report Diagnostico* sono restituite le planimetrie con l'individuazione dei punti di prova.

2.2.1. Strutture in Muratura

Per valutare le **caratteristiche delle murature** si eseguono analisi dirette tramite scarificazione dell'intonaco con valutazioni visive dei paramenti che consentono di individuare gli elementi costituenti, la tramatura ed i livelli di ammassamento tra muri collegati. Altre informazioni sono reperite da documentazione fornita dalla Committenza.

Per determinare lo **spessore delle murature**, senza produrre una ispezione "passante" si impiega un transpinter dotato di due sonde ("ricevitore" e "trasmettitore") che appoggiate sulle due facce dell'elemento da analizzare consente di stimarne lo spessore con la precisione di $\pm 5\%$.

I risultati raccolti permettono così di identificare con maggior precisione i parametri di caratterizzazione meccanica tra quelli proposti dalla NTC 2018. Per quanto riguarda le tipologie di muratura in foratoni e blocchi di calcestruzzo, i parametri si riferiscono a valori reperiti in letteratura (*Resistenza meccanica di blocchi forati a fori orizzontali* – Consorzio POROTON Italia e *Circolare esplicativa 2 febbraio 2009, n. 617*).

Muratura		Descrizione Tipologia Muratura	f_m [N/cm ²]	τ_c [N/cm ²]	E [N/mm ²]	G [N/mm ²]	w [kN/m ³]
1	Pietrame disordinato	Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	100-200	1.8-3.2	690-1050	230-350	19
2	Conci sbozzati	Muratura a conci sbozzati, con paramenti di spessore disomogeneo	200	3.5-5.1	1020-1440	340-480	20
3	Pietre a spacco	Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	260-380	5.6-7.4	1500-1980	500-660	21
4	Conci irregolari pietra tenera	Muratura irregolare di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc...)	140-220	2.8-4.2	900-1260	300-420	13-16
5	Conci regolari pietra tenera	Muratura a conci regolari di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc...)	200-320	4.0-8.0	1200-1620	400-500	13-16
6	Blocchi lapidei	Muratura a blocchi lapidei squadriati	580-820	9.0-12.0	2400-3300	800-1100	22
7	Mattoni pieni	Muratura in mattoni pieni e malta di calce	260-430	5.0-13.0	1200-1800	400-600	18
8	Mattoni semipieni	Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia	500-800	8.0-17.0	3500-5600	875-1400	15
9	Foratoni con fori orizzontali	Muratura in foratoni con fori disposti orizzontalmente	100-150	1.9-3.2	900-1200	300-400	11
10	Blocchi di calcestruzzo con foratura tra 45% e 65%	Muratura in blocchi di calcestruzzo o argilla espansa (perc. foratura tra 45% e 65%)	150-200	9.5-12.5	1200-1600	300-400	12

2.2.1.1. Unità strutturale 1

In seguito alle osservazioni condotte in situ, mediante le scarifiche murarie, delle caratteristiche costruttive delle murature ed alle prove dirette sulle murature indagate, si riportano, nella successiva tabella, i valori delle resistenze e dei moduli elastici caratterizzanti le differenti tipologie di murature presenti. Come indicazione base si considera quanto indicato nel capitolo C8.5.4.1 della Circolare NTC 2019 ovvero che per un livello di conoscenza LC2 è possibile riferirsi, per le tipologie di murature presenti nella tabella C8.5.I, ai valori medi delle resistenze e dei moduli elastici caratterizzanti le stesse.

Nello specifico tali valori si riferiscono a precise condizioni della muratura, quali: malta di calce di modeste caratteristiche, assenza di ricorsi, paramenti semplicemente accostati o mal collegati, tessitura a regola d'arte, muratura non consolidata. Condizioni differenti a quelle precedentemente riportate conducono all'applicazione di coefficienti maggiorativi o riduttivi definiti in tabella C8.5.II della circolare NTC 2019. Per quanto riguarda la tipologia di muratura in "foratoni" i parametri si riferiscono a valori reperiti in letteratura (*Resistenza meccanica di blocchi forati a fori orizzontali* – Consorzio POROTON Italia).

Materiale	Denominazione	E [MPa]	G [MPa]	f_m [MPa]	τ_c [MPa]	γ [kN/m ³]
M1	Muratura in blocchi di calcestruzzo semipieni (foratura < 45%)	2960	740	3.70	0.210	14
M2	Muratura in foratoni con fori disposti orizzontalmente	1050	350	1.25	0.026	11
M3	Muratura a conci sbozzati, con paramenti di spessore disomogeneo	1230	410	2.00	0.043	20
M4	Muratura in blocchi di calcestruzzo (perc. foratura tra 45% e 65%)	1400	350	1.75	0.110	12

2.3. Rilievo geometrico-strutturale

Per definire le caratteristiche del sistema resistente dell'edificio e quantificare le azioni a cui sono soggette le strutture, non sempre l'analisi documentale fornisce gli elaborati dei progetti architettonici e strutturali completi, pertanto, il rilievo geometrico-strutturale oltre a consentire di verificare accuratamente in situ i dati raccolti; permette di riscontrare le difformità coi progetti depositati, e finalizzare le attività di indagine per completare le informazioni nei casi in cui questi non siano disponibili o carenti.

Il **rilievo geometrico-strutturale** è riferito sia alla geometria complessiva del manufatto che a quella degli elementi costruttivi, comprendendo i rapporti con le eventuali strutture in aderenza. Negli elaborati vengono rappresentate le modifiche intervenute nel tempo, come desunte dall'analisi storico-critica. Il sopralluogo, attraverso l'ausilio di varie strumentazioni, permette inoltre di individuare la membratura resistente del manufatto, tenendo in considerazione la qualità e lo stato di conservazione dei materiali e degli elementi costitutivi.

Per ciascun elemento che compone la struttura portante, indipendentemente dalla sua natura, è quindi necessario risalire accuratamente alle proprie dimensioni in pianta e alla precisa posizione planimetrica. Le misure dimensionali devono tenere conto della sola porzione resistente, al netto quindi dello strato di rivestimento. Tali misure sono indispensabili sia per risalire all'azione orizzontale a cui è soggetto il fabbricato, sia per valutare la quota parte di azione sismica che interessa ciascun elemento strutturale.

Durante i sopralluoghi, per individuare gli elementi che compongono la struttura portante inglobati all'interno di tramezze o pareti perimetrali è risultato particolarmente utile l'ausilio della termografia ad infrarossi che ha consentito di individuare tali elementi grazie alla differenza di temperatura che caratterizza ciascun materiale. Attraverso l'**analisi termografica** sono state inoltre rilevate le tipologie costruttive delle componenti strutturali orizzontali. L'individuazione delle componenti strutturali avviene grazie alla sensibilità di misurazione dello strumento, che permette di distinguere con colorazioni differenti, zone che ammettono temperature superficiali diverse. La termocamera permette di misurare e rappresentare la radiazione infrarossa emessa da un oggetto. La radiazione, quale funzione della temperatura della superficie di un oggetto, emessa dallo strumento permette di calcolare e visualizzare tale temperatura. La radiazione rilevata dalla termocamera non dipende solo dalla temperatura dell'oggetto ma è anche una funzione dell'emissività. L'emissività è una misura che si riferisce alla quantità di radiazione termica emessa dall'oggetto, comparata a quella emessa dal perfetto corpo nero. L'emissività della maggior parte dei materiali da costruzione ha valori compresi tra 0,85 e 0,90. Le caratteristiche tecniche della termocamera ad infrarosso utilizzata sono le seguenti:

- Campo di misura della temperatura da -20 °C a +120 °C
- Frequenza di immagine: 30 Hz
- Sensibilità termica (NETD) 50 mK @ +30°C
- Risoluzione spaziale a 45°: 1,23 mRad
- Sensore: Focal Plane Array (FPA) con microbolometro non raffreddato 640x480 pixel, vanadium oxide.
- Campo spettrale da 7,8 a 14 µm

Per completare la caratterizzazione dei materiali l'integrazione con perforazioni, scarificazioni puntuali e **analisi endoscopiche** ha permesso l'osservazione diretta dei materiali impiegati nei vari elementi. La strumentazione di ispezione è composta da un endoscopio flessibile alla cui estremità è posizionato un obiettivo intercambiabile con visione variabile da 15° in avanti e a retroguardia 135°, con lampadina LED incorporata alimentata da un regolatore di intensità luminosa. L'immagine viene visualizzata dalla telecamera e trasferita al display per la successiva memorizzazione su scheda di memoria. L'analisi delle immagini registrate consente così la ricostruzione della stratigrafia delle strutture, evitando l'esecuzione di demolizioni eccessive.

Le caratteristiche tecniche dell'endoscopio utilizzato sono le seguenti:

- Diametro esterno 5,8 mm
- Luce bianca a LED regolabile
- Regolazione della messa a fuoco
- Direzione di visione panoramica su 360°
- Terminale specchiato per visioni laterali

Definite le componenti geometriche è stato necessario spingersi ulteriormente a fondo con il rilievo, individuando numero, dimensione e disposizione dei ferri di armatura presenti nei pilastri e nei setti in c.a. o nel caso delle murature la tipologia muraria che realizza le pareti portanti.

L'indagine per la localizzazione delle armature nei getti di calcestruzzo è stata eseguita mediante **analisi pacometrica**. Il pacometro digitale basa il suo funzionamento sul fenomeno delle correnti parassite. La posizione dei ferri è determinata muovendo la sonda sulla superficie in esame, fino ad individuare la direzione di massimo assorbimento elettromagnetico che corrisponde all'andamento longitudinale della barra. Tale principio operativo presenta, rispetto ad altri sistemi, una maggiore precisione (± 1 mm) e l'assenza di disturbo dovuto ad umidità ed altri fenomeni chimici o termici. Il principio a induzione di impulsi utilizzato dallo strumento ha un range di funzionamento predefinito. L'accuratezza della misurazione dipende dalle dimensioni dell'armatura e dalla profondità del ricoprimento. Ad integrazione dei rilievi pacometrici sono state eseguite valutazioni a campione al vero delle dimensioni delle armature metalliche da rilevare, previa **scarificazione del copriferro** cementizio e messa a nudo parziale delle armature sia longitudinali che trasversali e successiva misurazione mediante calibro digitale.

Sono stati infine ricercati e rilevati i **dissesti**, in atto o stabilizzati, ponendo particolare attenzione all'individuazione dei quadri fessurativi relativi a potenziali **meccanismi di danno**, così come eventuali vulnerabilità locali di elementi strutturali e non strutturali.

Nei paragrafi successivi, sono riassunte le caratteristiche costruttive delle principali componenti strutturali che costituiscono ciascuna US:

- Strutture orizzontali e coperture;
- Strutture verticali;
- Fondazioni.

2.3.1. Rilievo strutture orizzontali e coperture

I rilievi non distruttivi e le demolizioni localizzate, effettuate in alcuni punti dell'edificio, hanno permesso di identificare le tipologie di solaio e copertura presenti. Le proprietà degli impalcati sono riassunte nei paragrafi seguenti: eventuali variazioni delle dimensioni caratteristiche possono essere legate all'altezza e alla geometria degli elementi costituenti, in relazione principalmente alle luci coperte dai solai. Negli Elaborati Grafici le varie tipologie di solaio sono evidenziate con etichette e, per ciascun tipo, vengono riepilogate le caratteristiche costruttive, l'analisi dei carichi e la schematizzazione della sezione trasversale con le dimensioni relative degli elementi costituenti.

2.3.1.1. Unità strutturale 1

Identificativo	Categoria	Tipologia costruttiva	Capacità di ridistribuzione	Spessore [cm]	Tipologia di carico	Peso [kN/m ²]
SOLAIO A	C	Laterocemento	Piano rigido	18+4	g ₁	2.60
				9+int.	g ₂	1.90
				-	q _i	3.00
SOLAIO B	C	Laterocemento	Piano rigido	28+5	g ₁	3.50
				11+int.	g ₂	1.90
				-	q _i	3.00
SOLAIO C	H	Laterocemento	Piano rigido	20+4	g ₁	2.95
				0+int.	g ₂	0.20
				-	q _i	0.50
COPERTURA A	H	Laterocemento	Copertura rigida	16+4	g ₁	2.50
				Coppi	g ₂	0.80
				-	q _i	0.50
COPERTURA B	H	Laterocemento	Copertura rigida	28+5	g ₁	3.50
				Muricci e Tavelloni - Coppi	g ₂	2.30
					q _i	0.50
SCALE	C	C.A.	-	-	g ₁	3.75
					g ₂	0.50
					q _i	4.00

Per le Unità Strutturali in esame è stato considerato un carico caratteristico da neve, non incluso nelle tabelle sopra riportate, pari a 0.60 kN/m². Considerando l'inclinazione del piano di copertura si introduce un coefficiente di forma pari a 0.80; il valore del carico da neve assunto nelle analisi risulta pertanto pari a 0.48 kN/m².

2.3.2. Rilievo struttura verticale

I paragrafi seguenti raccolgono le informazioni generali degli elementi del sistema sismo-resistente delle Unità Strutturali che compongono l'edificio in esame; le caratteristiche dimensionali, unitamente ai risultati delle misurazioni condotte in situ e dalle prove eseguite in laboratorio, sono raccolte nella *"Relazione sulle Indagini"*.

2.3.2.1. Unità strutturale 1

La struttura di elevazione dell'Unità Strutturale in esame è costituita da setti in muratura di quattro differenti tipologie: blocchi in cls semipieno con percentuale di foratura <45%, blocchi in foratoni con fori orizzontali, pietra a conci sbazzati e blocchi in cls con percentuale di foratura tra 45% e 65%.

La nomenclatura degli elementi è corrispondente a quella specificata negli elaborati grafici strutturali allegati.

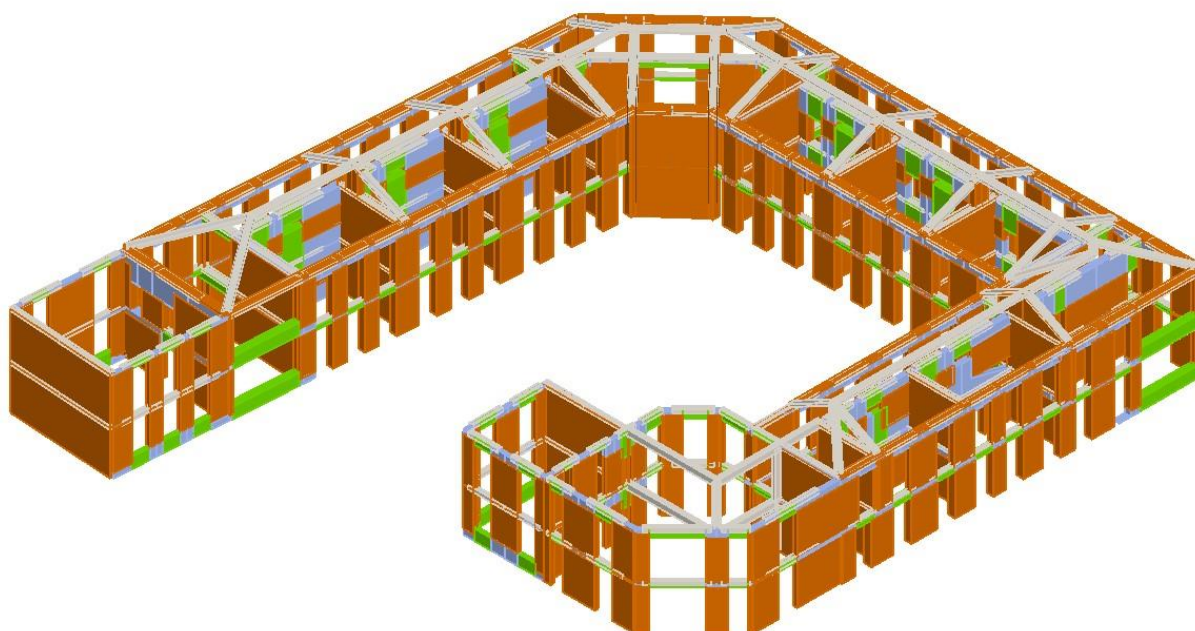


Figura 4 – Osservazione generale del modello globale dell'edificio in esame.

2.3.3. Rilievo delle fondazioni

La valutazione della sicurezza di una costruzione richiede, infine, la verifica del sistema di fondazione. Secondo la normativa vigente (NTC 2018 § 8.3) la verifica del sistema di fondazione è obbligatoria solo se sussistono condizioni che possano dare luogo a fenomeni di instabilità globale o se si verifica una delle seguenti condizioni:

- Nella costruzione siano presenti importanti dissesti attribuibili a cedimenti delle fondazioni o dissesti della stessa natura si siano prodotti nel passato;
- Siano possibili fenomeni di ribaltamento e/o scorrimento della costruzione per effetto di condizioni morfologiche sfavorevoli, di modificazioni apportate al profilo del terreno in prossimità delle fondazioni, delle azioni sismiche di progetto;
- Siano possibili fenomeni di liquefazione del terreno di fondazione dovuti alle azioni di progetto.

Le predette condizioni devono essere verificate facendo riferimento alla documentazione disponibile e si potrà omettere di svolgere tali indagini solo qualora siano presenti elementi di conoscenza sufficienti per effettuare le valutazioni precedentemente esposte.

2.3.3.1. Unità strutturale 1

A valle della campagna di indagini è possibile affermare che le Unità Strutturali non ricadono in nessuna delle precedenti condizioni richieste per la verifica del sistema di fondazione, pertanto, ai sensi della Normativa non sono state eseguite prove in situ. L'assenza di documentazione non ha consentito di desumere la tipologia costruttiva dei sistemi di fondazione dell'Unità Strutturale.

2.4. Livelli di conoscenza e fattori di confidenza

La valutazione della sicurezza di un edificio esistente, rispetto a quello di un edificio di nuova progettazione, è normalmente affetta da un grado di incertezza diverso. L'impossibilità di risalire o di determinare in situ le effettive caratteristiche meccaniche di tutti i materiali utilizzati porta con sé un valore di incertezza di cui è necessario tenere conto nei calcoli di verifica.

Sulla base degli approfondimenti effettuati nelle tre fasi conoscitive sopra riportate, vengono individuati i **livelli di conoscenza** (LC) dei diversi parametri coinvolti nel modello: *geometria*, *dettagli costruttivi* e *materiali*; possono così essere definiti i correlati fattori di confidenza, da utilizzare come ulteriori coefficienti parziali di sicurezza in modo tale da tenere conto delle carenze nella conoscenza dei parametri del modello.

Pertanto, nel caso di edifici esistenti si fa riferimento ai **fattori di confidenza** (FC) che variano a seconda del livello di conoscenza sulla struttura raggiunto, mediante le indagini in situ.

I fattori di confidenza hanno principalmente lo scopo di diminuire la resistenza dei materiali ottenuta dalle prove in situ e in alcuni casi di incrementare le sollecitazioni di verifica da applicare alla struttura.

	Livello di Conoscenza	Geometria	Dettagli Strutturali	Proprietà dei Materiali	Metodi di Analisi	Fattore di Confidenza
Limitata	LC1	Da disegni di carpenteria originali con rilievo visivo a campione oppure rilievo ex-novo completo	Progetto simulato in accordo alle norme dell'epoca e limitate verifiche in-situ	Valori usuali per la pratica costruttiva dell'epoca e limitate prove in-situ	Analisi lineare statica o dinamica	1,35
Adeguate	LC2		Disegni costruttivi incompleti + limitate verifiche in situ oppure estese verifiche in-situ	Dalle specifiche originali di progetto o dai certificati di prova originali + limitate oppure estese prove in-situ	Tutti	1,20
Accurata	LC3		Disegni costruttivi completi + limitate verifiche in situ oppure esaustive verifiche in-situ	Dalle specifiche originali di progetto o dai certificati di prova originali + estese oppure esaustive prove in-situ	Tutti	1,00

Per l'edificio in esame, grazie al rilievo in situ si è ottenuta una conoscenza adeguata della geometria di elementi strutturali principali (muratura, pilastri, setti e travi) e secondari (solai e coperture), per i dettagli costruttivi e le armature delle sezioni è stata raggiunta una conoscenza sufficientemente estesa sia negli elementi strutturali principali che in quelli secondari. Per il comportamento delle strutture murarie, il parametro geometrico è fondamentale al fine della valutazione della prestazione sismica.

Il livello di conoscenza risulta essere pertanto classificabile come **Livello di Conoscenza LC2**: ciò comporta la possibilità di condurre le verifiche di sicurezza adottando un fattore di confidenza $F_c = 1,20$ almeno a livello di verifica preliminare.

In fase di modellazione del comportamento dei materiali vengono assunti, dove opportuno, i coefficienti di sicurezza parziali, che riducono le proprietà dei materiali conformemente alle NTC18 e relativa Circolare Esplicativa.

2.4.1.1. Unità strutturale 1

Di seguito si riassumono, in forma tabellare, i fattori di confidenza e i coefficienti di sicurezza adottati per determinare le caratteristiche meccaniche dei materiali individuati in situ. Per tutte le tipologie di muratura sono stati assunti i valori medi di f_m e τ_0 fra quelli riportati in Tabella C8.5.I della Circolare NTC18. Per quanto riguarda la tipologia di muratura in “foratoni” i parametri si riferiscono a valori reperiti in letteratura (*Resistenza meccanica di blocchi forati a fori orizzontali* – Consorzio POROTON Italia).

VERIFICA ANALISI NON LINEARI - MURATURA						
Materiale	f_m [MPa]	FATTORE DI CONFIDENZA	$f_{m,progetto}$ [MPa]	τ_c [MPa]	FATTORE DI CONFIDENZA	$\tau_{c,progetto}$ [MPa]
M1	3.70	1.20	3.08	0.210	1.20	0.175
M2	1.25	1.20	1.04	0.026	1.20	0.021
M3	2.00	1.20	1.67	0.043	1.20	0.036
M4	1.75	1.20	1.46	0.110	1.20	0.092

VERIFICA STATICA - MURATURA				
Materiale	f_m [MPa]	FATTORE DI CONFIDENZA	COEFFICIENTE DI SICUREZZA	$f_{m,progetto}$ [MPa]
M1	3.70	1.20	3.00	1.03
M2	1.25	1.20	3.00	0.35
M3	2.00	1.20	3.00	0.56
M4	1.75	1.20	3.00	0.49

3. DESCRIZIONE DEL METODO DI ANALISI E DEL MODELLO

La valutazione della sicurezza strutturale nei confronti dell'azione sismica richiede la modellazione del sistema sismo-resistente che compone l'edificio e l'utilizzo di un metodo di analisi che permette di calcolare l'azione sismica agente sulla struttura in esame.

3.1. Metodo di analisi

3.1.1. Metodo di analisi per strutture in muratura

Per l'analisi delle strutture in muratura si adottano i seguenti metodi:

- **Metodo dell'analisi cinematica lineare con fattore di struttura $q = 2,0$** per la verifica del comportamento delle pareti murarie sollecitate fuori piano;
- **Metodo dell'analisi statica non lineare *pushover*** per la valutazione del comportamento d'insieme;

L'instaurarsi di un meccanismo globale, negli edifici in muratura portante, è generalmente possibile qualora siano inibiti i cinatismi locali, quali tipicamente quelli di ribaltamento fuori piano delle singole pareti: ciò è possibile in presenza di diaframmi rigidi, resistenti ed efficacemente collegati alle pareti (tramite connessioni meccaniche), in presenza di setti murari perpendicolari ben ammortati tra loro, o in presenza di cordoli efficacemente ammortati alle pareti. Il caso di cordoli o diaframmi inseriti in breccia nelle pareti, anche con connessioni a coda di rondine, costituisce una criticità e non una risorsa sismica.

L'analisi cinematica locale, o analisi limite dell'equilibrio secondo l'approccio cinematico, si basa sulla scelta del meccanismo di collasso e sulla valutazione dell'azione orizzontale che attiva tale cinematismo.

Per lo sviluppo delle analisi *pushover*, finalizzate alla valutazione del comportamento d'insieme, ci si è attenuti alle specifiche istruzioni espresse da NTC18 e dalla Circolare 7 per lo studio delle strutture esistenti.

L'analisi non lineare statica è condotta attraverso:

- modello FEM non lineare con elementi finiti a 2 nodi e 6GdL per nodo dotati di cerniere a plasticità concentrata (duttili o fragili) definite usando i valori delle proprietà meccaniche dei materiali indicate in §2;
- due gruppi di forze sismiche per direzione orizzontale ($\pm X$ e $\pm Y$): distribuzione di sollecitazioni da "Gruppo 1" (distribuzione di accelerazioni proporzionali alle forze statiche equivalenti per la direzione considerata); distribuzione di sollecitazioni da "Gruppo 2" (distribuzione di sollecitazioni proporzionale alla massa). In totale vengono eseguite 24 analisi per tener conto delle due direzioni del sisma e delle eccentricità accidentali previste dalla normativa;
- equilibrio calcolato, ad ogni step d'analisi, sulla configurazione indeformata (ipotesi di piccoli spostamenti).

Le verifiche da effettuare nel caso di analisi *pushover* consistono nel comparare la capacità di spostamento della struttura, ottenuta attraverso cerniere plastiche o elasto-fragili dalla resistenza sezionale ottenuta a partire dai valori caratteristici di resistenza dei materiali divisi per il fattore di confidenza FC (e eventualmente per il coefficiente parziale di sicurezza sui materiali per meccanismi fragili), confrontata con la domanda di spostamento strutturale che viene valutata attraverso lo spettro di risposta: si passa da uno spettro elastico ad uno ADRS dove l'accelerazione non è più funzione del periodo proprio della struttura, ma dello spostamento. La verifica è quindi condotta secondo:

$$d^*_{\max}/d^*_u < 1.$$

Si deve verificare inoltre che il rapporto tra il taglio totale agente sulla base del sistema equivalente ad un grado di libertà calcolato dallo spettro di risposta elastico e il taglio alla base resistente del sistema equivalente ad un grado di libertà ottenuto dall'analisi non lineare risulti inferiore a 3,0 (§7.8.1.6).

$$q^* = S_e(T^* m^*) / F_y^* < 3$$

Per la definizione delle cerniere a plasticità concentrata del modello FEM non-lineare, quindi per l'esecuzione delle verifiche di sicurezza allo SLV, si è fatto riferimento ai modelli di capacità assimilabili a quelli rappresentati nella figura seguente:

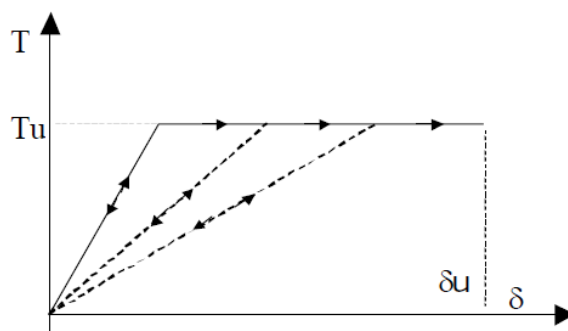


Figura 5 - Legame elasto-plastico definito per le cerniere plastiche.

Il grafico è in grado di rappresentare il fenomeno fisico che si sviluppa all'interno del singolo elemento durante l'incremento della sollecitazione di taglio, associata sia al meccanismo di rottura per pressoflessione sia al meccanismo di rottura per taglio. Le caratteristiche relative all'elemento trave in muratura, che ne influenzano il comportamento non lineare, possono essere sintetizzate in:

- Rigidezza iniziale secondo le caratteristiche elastiche (fessurate) del materiale, determinata direttamente a partire dal calcolo dei contributi di rigidezza a taglio e flessionale, computabili sulla base delle proprietà meccaniche e geometriche (modulo elastico di Young E, modulo di taglio G e geometria del pannello);
- Comportamento bilineare con valori massimi di taglio e momento coerenti con i valori di stato limite ultimo;
- Redistribuzione delle sollecitazioni interne all'elemento tali da garantire l'equilibrio;
- Settaggio dello stato di danno secondo i parametri globali e locali;
- Degradazione della rigidezza nel ramo plastico;
- Controllo di duttilità mediante la definizione di drift massimo differenziato secondo quanto previsto nelle normative vigenti a seconda del meccanismo di danneggiamento agente sul pannello. Si assume uno spostamento ultimo per azioni nel piano di ciascun pannello pari a:
 - 0.5% dell'altezza del pannello, nel caso di rottura per taglio;
 - 1.0% dell'altezza del pannello, nel caso di rottura per presso-flessione.
- Eliminazione dell'elemento (ossia l'elemento è in grado di garantire un contributo all'equilibrio esclusivamente per i contributi associati al suo peso proprio), al raggiungimento dello s.l.u. senza interruzione dell'analisi.

Tale formulazione è adottata sia per i maschi murari che per le fasce di piano. Si precisa, inoltre, che il contributo di resistenza e di rigidezza nel fuori piano è trascurato.

I legami utilizzati per caratterizzare il comportamento delle cerniere plastiche sono:

- Per il meccanismo di taglio quello rappresentato in Figura 6 e caratterizzato dai punti indicati in Tabella 3;

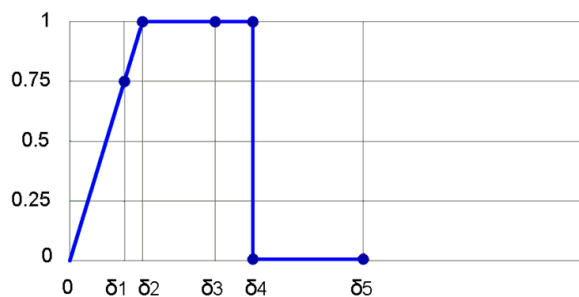


Figura 6 – Caratterizzazione cerniera a taglio elementi in muratura.

Tabella 3 – Descrizione legame rappresentato in Figura 6.

Tratto	Descrizione
$0 - \delta_1$	Elasticità
$\delta_1 - \delta_2$	Incipiente di plasticità
$\delta_2 - \delta_3$	Plastico per taglio
$\delta_3 - \delta_4$	Incipiente rottura per taglio
$\delta_4 - \delta_5$	Rottura per taglio
$\delta_5 - \infty$	Crisi grave

- Per il meccanismo di pressoflessione quello rappresentato in Figura 7 e caratterizzato dai punti indicati in Tabella 4;

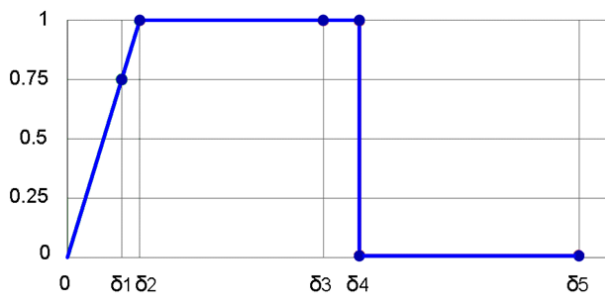


Figura 7 – Caratterizzazione cerniera a pressoflessione elementi in muratura.

Tabella 4 – Descrizione legame rappresentato in Figura 7.

Tratto	Descrizione
$0 - \delta_1$	Elasticità
$\delta_1 - \delta_2$	Incipiente di plasticità
$\delta_2 - \delta_3$	Plastico per pressoflessione
$\delta_3 - \delta_4$	Incipiente rottura per pressoflessione
$\delta_4 - \delta_5$	Rottura per pressoflessione
$\delta_5 - \infty$	Crisi grave

Per la definizione delle cerniere a plasticità concentrata degli elementi in calcestruzzo armato del modello FEM non lineare, si fa riferimento ad un comportamento bilineare con resistenza limitata e comportamento elastico-perfettamente plastico con pendenza durante i cicli di scarico invariata rispetto a quella iniziale. Inoltre, si considerano come meccanismi resistenti duttili e fragili rispettivamente quelli associati ai meccanismi di flessione e di taglio.

Ciascuna verifica, la cui "domanda sismica" (richiesta di spostamento o di resistenza – attraverso il fattore " q^* ") risulti maggiore della "capacità sismica" (capacità di spostamento o di resistenza – attraverso il fattore " q^* "), si ritiene non soddisfatta. Per le verifiche non soddisfatte il grado di criticità sarà definito sulla base di un coefficiente di sicurezza ζ_E , dato dal rapporto tra capacità e relativa richiesta. Le verifiche non soddisfatte sono caratterizzate da valori di ζ_E inferiori all'unità.

In genere, per strutture esistenti, è considerato accettabile un indice di sicurezza ζ_E minimo superiore a 0.60 (poiché $\zeta_E = 0.60$ è il livello prestazionale minimo previsto dalle NTC18 a seguito di interventi di miglioramento per edifici in classe d'uso III a destinazione scolastica e edifici in classe d'uso IV).

Gli spettri di progetto elastici, in accelerazione e spostamento necessari in analisi push-over (nelle quali il fattore di struttura q^* è parte del risultato dell'analisi) impiegati per le verifiche sono illustrati di seguito:

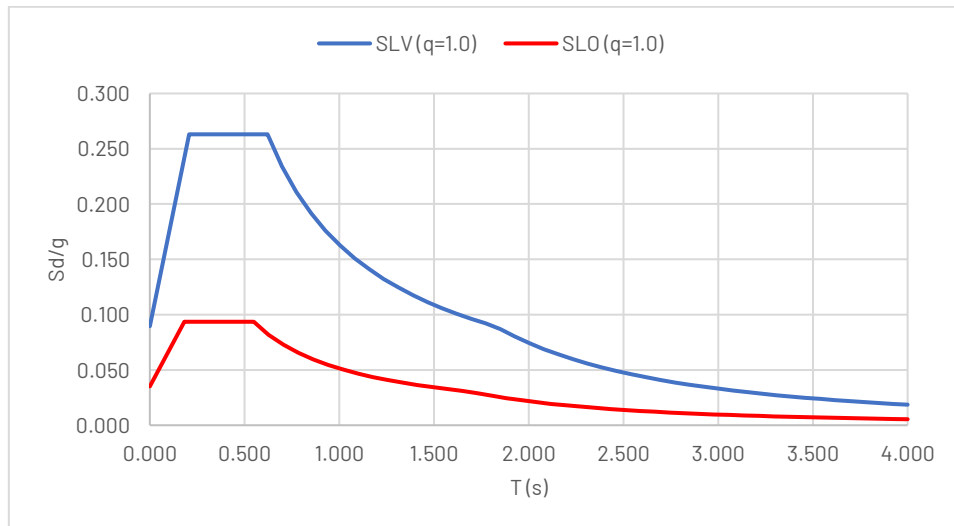


Figura 8 - Spettri di risposta di progetto

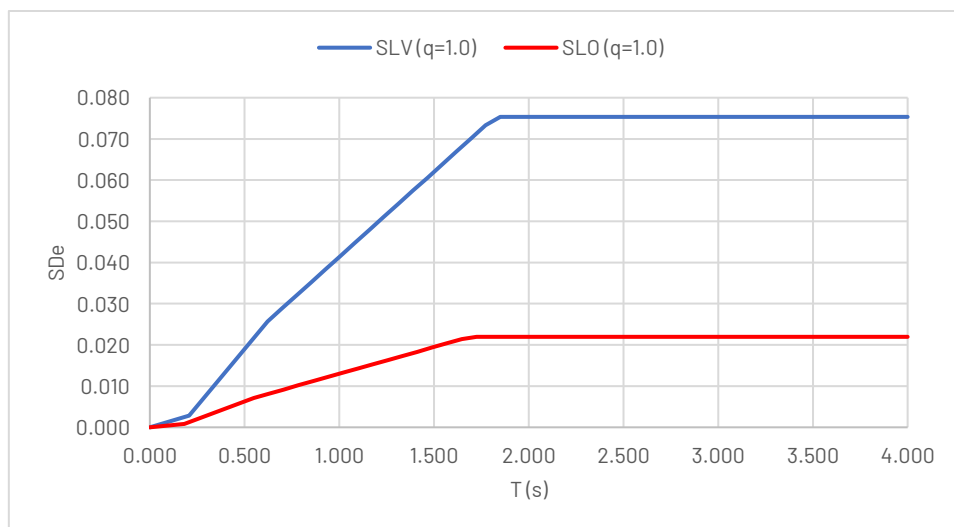


Figura 9 - Spettri di spostamento di progetto

3.2. Modellazione della struttura

3.2.1. Modellazione delle strutture in muratura (US1)

Per eseguire le verifiche di sicurezza le Unità Strutturali realizzate in muratura sono state modellate sulla base delle seguenti considerazioni attraverso un modello a telaio equivalente:

- Le pareti sono schematizzate come telai costituiti da elementi ad asse verticale (maschi murari) ed elementi ad asse orizzontale (architravi e fasce di piano). La schematizzazione determina la suddivisione degli elementi che costituiscono il telaio in porzioni indeformabili, in corrispondenza delle intersezioni tra maschi murari e fasce, e porzioni deformabili altrove.;
- Gli elementi sono implementati come “*macroelementi*” bidimensionali a due nodi, assimilabili a travi a 6 gradi di libertà;
- Gli orizzontamenti sono inseriti solamente in termini di massa, senza modellare direttamente i travetti, che avrebbero generato dispersione modale. I carichi dei solai sono distribuiti in corrispondenza delle travi di competenza e/o cordoli che caricano direttamente i maschi murari;
- Al fine di considerare il carico delle strutture in adiacenza costruite in appoggio sulle Unità Strutturali considerate, nel modello, sono stati inseriti specifici carichi lineari equivalenti al peso dei solai in appoggio;
- La struttura tridimensionale si ottiene dall’assemblaggio dei diversi telai piani connessi mediante diaframmi nel piano orizzontale (*story*) posti alla quota degli orizzontamenti, la cui rigidezza è valutata in funzione della stratigrafia. Gli orizzontamenti sono infatti definiti come elementi finiti planari con comportamento membranale anisotropo, per tener conto della diversa rigidezza nelle due direzioni principali;
- L’analisi statica non lineare è applicata considerando una distribuzione dell’azione sismica proporzionale alle forze statiche equivalenti ed una uniformemente accelerata (Uniform Acceleration).
- Le sezioni e gli spessori degli elementi strutturali sono stati definiti sulla base dei documenti progettuali forniti dalla Committenza e delle indagini diagnostiche eseguite direttamente in situ;
- Lo zero sismico è posto a livello del piano di campagna.

3.3. Vincoli esterni

Il processo di modellazione comprende anche la scelta della tipologia di vincolo da applicare al modello matematico, al fine di restituire risultati il più possibile coerenti con la realtà. In relazione a ciò, l'introduzione di incastri rigidi alla base della struttura, escludendo il processo di modellazione delle fondazioni e l'interazione suolo-struttura, rappresenta una scelta tendenzialmente conservativa nel quantificare le azioni sollecitanti.

3.3.1. Vincoli esterni per le strutture

Gli elementi verticali sono stati vincolati a terra mediante incastri posizionati alla base degli elementi stessi, in corrispondenza del livello delle fondazioni e/o del piano di campagna. Nello specifico gli elementi in muratura sono stati modellati vincolati a terra mediante incastri nella direzione dell'asse flessionale forte e cerniere nella direzione dell'asse flessionale debole.

Di seguito si riportano la Mesh che rappresenta la suddivisione in "macroelementi": in marrone i maschi, in verde le fasce, in azzurro i nodi rigidi e in grigio gli elementi in c.a. (3Muri)

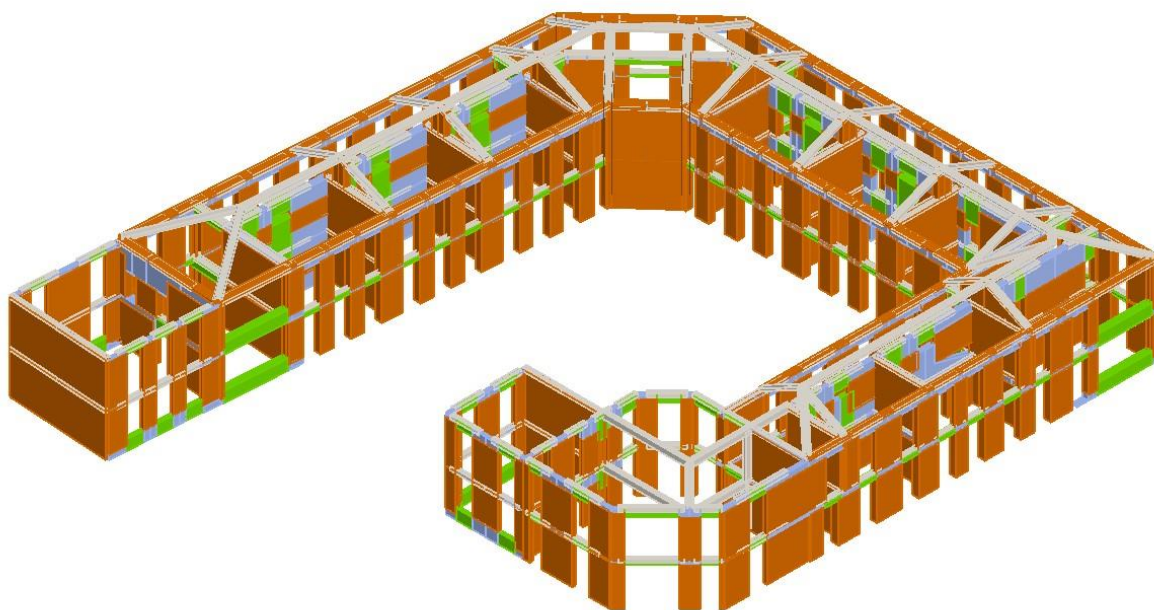


Figura 10 - Mesh che rappresenta la suddivisione in "macroelementi": in marrone i maschi, in verde le fasce, in azzurro i nodi rigidi e in grigio gli elementi in c.a. (3Muri)

3.4. Diaframmi di piano

Dallo studio degli orizzontamenti del manufatto si ipotizza la presenza di un diaframma di piano, la cui rigidezza è valutata in funzione della stratigrafia. Gli orizzontamenti sono infatti definiti come elementi finiti planari con comportamento membranale anisotropo, per tener conto della diversa rigidezza nelle due direzioni principali.

3.4.1. Unità strutturale 1

Nome diaframma di piano	Livello [m]	Massa partecipante [t]
Roof	8.25	
2F	4.25	
1F	0.00	
Somma		4277.81



3.5. Carichi e masse

I calcoli e le verifiche sono condotti con il metodo semiprobabilistico degli stati limite secondo le indicazioni delle NTC 2018, in particolare, per quanto riguarda le verifiche, si prenderanno come riferimento i risultati ai soli Stati Limite Ultimi.

Nello specifico, valgono le seguenti combinazioni:

- a) **Combinazione fondamentale**, impiegata per le verifiche di sicurezza agli stati limite ultimi (SLU):

$$\gamma_{G1} \cdot G_1 + \gamma_{G2} \cdot G_2 + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q1} \cdot G_{k1} + \sum_{i=2}^n \gamma_{Qi} \cdot \Psi_{0i} \cdot Q_{ki}$$

- b) **Combinazione caratteristica**, cosiddetta rara, impiegata per le verifiche di sicurezza agli stati limite di esercizio (SLE):

$$G_1 + G_2 + P + Q_{k1} + \sum_{i=2}^n \Psi_{0i} \cdot Q_{ki}$$

- c) **Combinazione sismica**, impiegata per le verifiche di sicurezza sia agli stati limite di esercizio (SLO e SLD) sia agli stati limite ultimi (SLV e SLC) specificatamente definiti per l'azione sismica:

$$E + G_1 + G_2 + P + \sum_{i=1}^n \Psi_{2i} \cdot Q_{ki}$$

dove:

- L'azione elementare E rappresenta gli effetti dell'azione sismica, che vanno calcolati per ciascuno degli stati limite di riferimento specificatamente definiti per l'azione sismica;
- I termini γ sono coefficienti parziali di sicurezza (definiti in accordo a quanto riportato dalle NTC 2018 § 2.6.1 – Tab. 2.6.I);
- I termini ψ sono coefficienti di combinazione (definiti in accordo a quanto riportato dalle NTC 2018 § 2.5.2 – Tab. 2.5.I).

Per chiarezza si riportano le tabelle dei coefficienti parziali e di combinazione utilizzati nelle verifiche della presente trattazione:

COEFFICIENTI PARZIALI DI SICUREZZA				
		Coefficiente γ_F	EQU	A1
Carichi permanenti G_1	Favorevoli	γ_{G1}	0,9	1,0
	Sfavorevoli		1,1	1,3
Carichi permanenti non strutturali G_2	Favorevoli	γ_{G2}	0,8	0,8
	Sfavorevoli		1,5	1,5
Azioni variabili Q	Favorevoli	γ_Q	0,0	0,0
	Sfavorevoli		1,5	1,5

COEFFICIENTI DI COMBINAZIONE		
	Ψ_0	Ψ_2
Categoria C	0,7	0,6
Categoria H	0,0	0,0
Neve (a quota ≤ 1000 m s.l.m.)	0,5	0,0

4. VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA STATICA

La verifica della sicurezza di una struttura è volta a determinare l'entità delle azioni che la struttura è in grado di sostenere con un livello di sicurezza minimo. Tale valutazione deve permettere di stabilire se:

- L'uso della costruzione possa continuare senza interventi;
- L'uso debba essere modificato (declassamento, cambio di destinazione e/o imposizione di limitazioni e/o cautele nell'uso);
- Sia necessario aumentare la sicurezza strutturale, mediante interventi.

La valutazione della sicurezza di costruzioni esistenti può essere eseguita, come specificato nelle NTC 2018 § 8.3, prendendo in analisi i soli carichi verticali e le combinazioni di carico che riguardano esclusivamente lo Stato Limite Ultimo. La combinazione dei carichi considerata è quella fondamentale, così come proposta nelle NTC 2018 e già esplicitata al capitolo 3.5 della presente trattazione. Ai sensi delle NTC 2018 § 8.3, si specifica che è necessario adottare provvedimenti restrittivi dell'uso della costruzione e/o procedere ad interventi di miglioramento o adeguamento nel caso in cui non siano soddisfatte le verifiche relative alle azioni controllate dall'uomo, ossia prevalentemente ai carichi permanenti e alle altre azioni di servizio.

Per la valutazione della sicurezza statica degli elementi strutturali sono state introdotte alcune ipotesi e considerazioni di base per uniformare la lettura dei risultati:

- Per le **strutture con sistema resistente realizzato in muratura**, si considera una verifica a pressoflessione per carichi laterali (NTC18 § 4.5.6.2) considerando, un coefficiente di riduzione di resistenza dei materiali ϕ in funzione delle eccentricità derivanti dai carichi agenti, di esecuzione e la corretta snellezza convenzionale λ . In alcuni casi viene calcolato, in prima istanza, un coefficiente di riduzione di resistenza dei materiali ϕ ponendo il coefficiente di eccentricità m unitario ed un valore di snellezza convenzionale λ non dipendente dal vincolo fornito dalle murature ortogonali a quella in verifica (ipotesi cautelativa di maschi isolati), affinando il calcolo per valori di ζ_y inferiori all'unità. Infine, si esprime la valutazione dei coefficienti parziali di sicurezza derivanti dalla verifica a pressoflessione per carichi laterali, andando ad evidenziare le effettive criticità statiche primarie per valori di $\gamma_m < 3$.

Si rimanda alle planimetrie del *Rilievo geometrico-strutturale* per la localizzazione degli elementi strutturali secondo la nomenclatura riportata nelle verifiche sottostanti.

4.1. Strutture in Cemento Armato

4.1.1. Verifica allo Stato Limite Ultimo (SLU)

Di seguito si riportano i risultati della verifica di tutti gli elementi strutturali verticali in condizione di Stato Limite Ultimo.

4.1.1.1. Unità strutturale 1

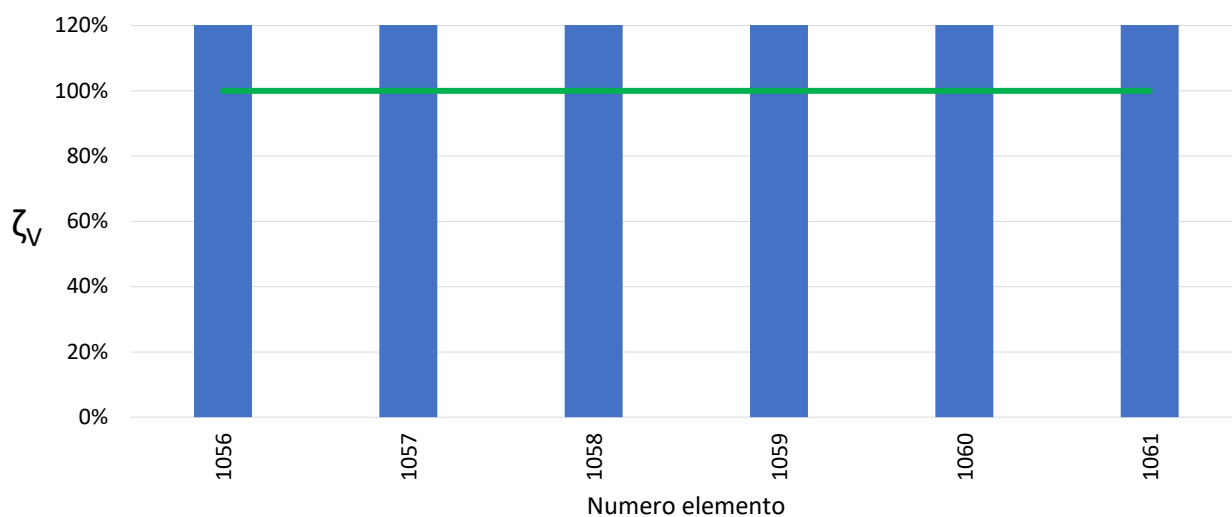


Figura 11 - Verifica SLU degli elementi verticali – Pilastri – US1.

Dalla verifica di sicurezza statica e dai grafici sopra riportati è possibile concludere che, in condizione SLU, **tutti gli elementi verticali (pilastri) soddisfano le verifiche.**

4.2. Strutture in Muratura

4.2.1. Verifica allo Stato Limite Ultimo (SLU)

Di seguito si riportano i risultati, suddivisi per Unità Strutturale, della verifica a presso-flessione per carichi verticali di tutti gli elementi strutturali verticali in condizione di Stato Limite Ultimo.

4.2.1.1. Unità strutturale 1

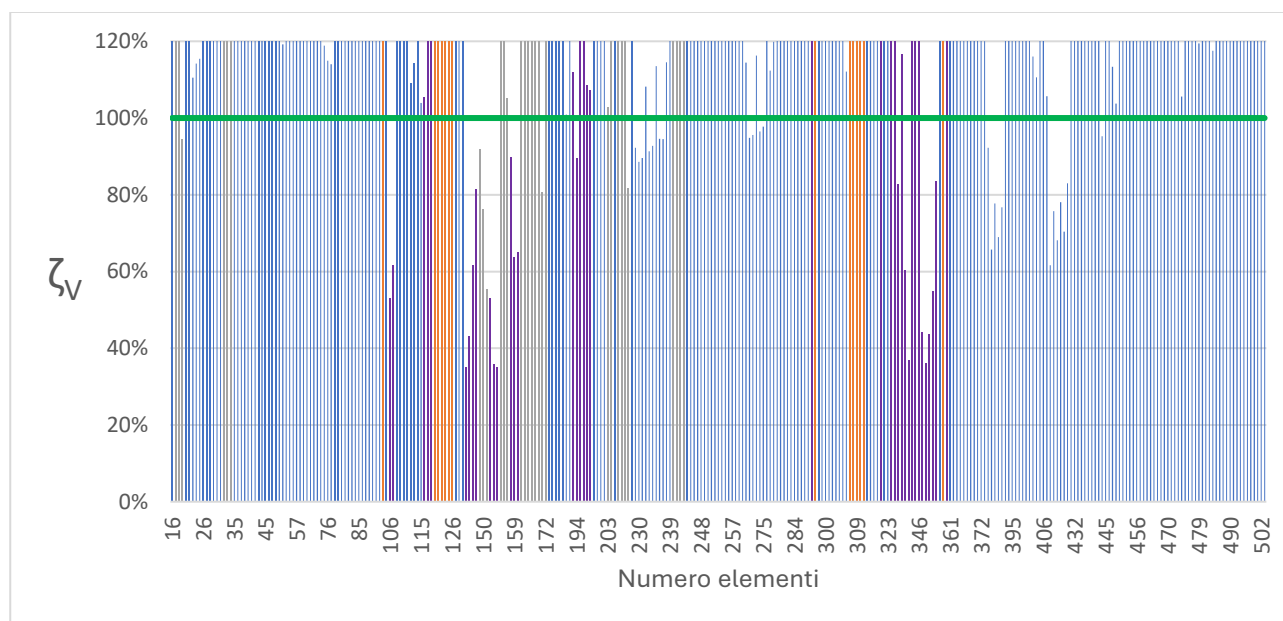


Figura 12 - Verifica a presso-flessione SLU degli elementi verticali - Maschi murari - Muratura M1 in grigio, M2 in viola, M3 in blu e M4 in rosso - US1.

Dalla verifica di sicurezza statica e dai grafici sopra riportati è possibile concludere che, in condizione SLU, **6 elementi appartenenti alla tipologia di muratura M1, 21 elementi della tipologia M2 e 24 elementi della tipologia M3 non soddisfano le verifiche, mentre gli elementi appartenenti alla tipologia di muratura M4 soddisfano le verifiche.**

4.2.2. Valutazione coefficienti parziali di sicurezza

Di seguito si riportano, dove necessario, i risultati suddivisi per Unità Strutturale del coefficiente di sicurezza effettivo γ_m per i carichi statici, al fine di individuare le criticità statiche primarie e i livelli di sofferenza strutturale, oltre il limite **derivato dalla Normativa** di $\gamma_m = 2$.

4.2.2.1. Unità strutturale 1

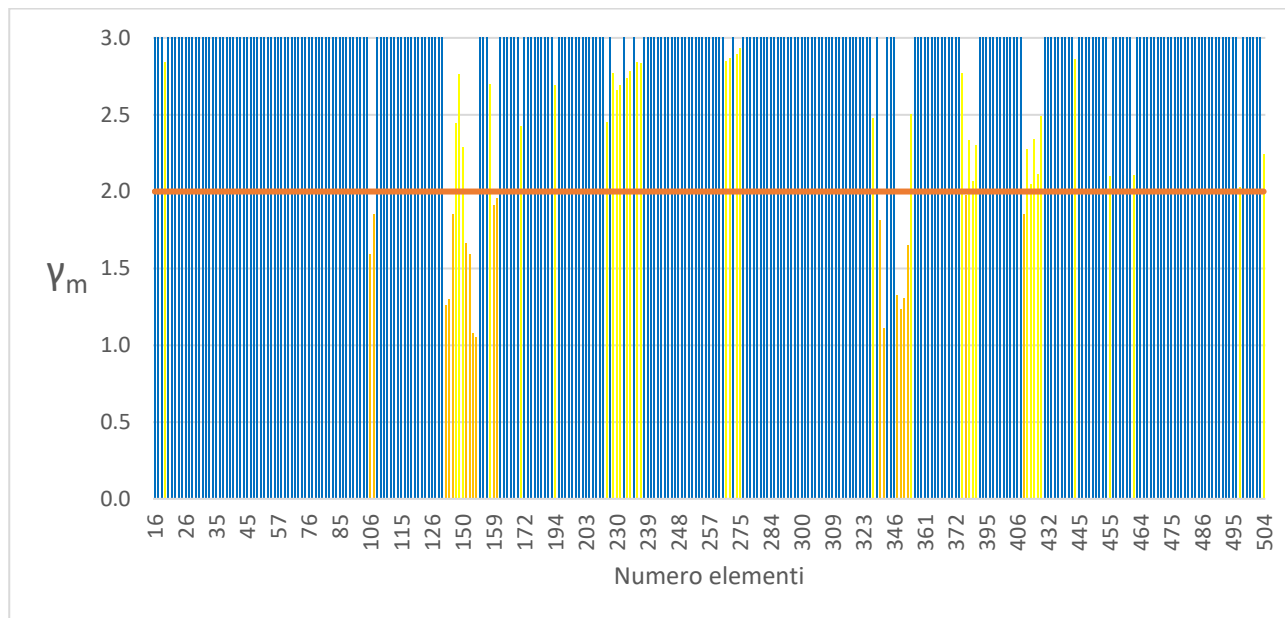


Figura 13 – Valutazione coefficienti parziali di sicurezza nella verifica a pressoflessione SLU – Maschi murari – US1.

Dalla valutazione dei coefficienti parziali di sicurezza statica e dai grafici sopra riportati è possibile concludere che, in condizione SLU, **nessun elemento murario presenta un $\gamma_m < 1$. Venti (20) elementi appartenenti alla tipologia muratura M1, M2 e M3 richiedono coefficienti parziali di sicurezza inferiori a 2 (106, 107, 116, 135, 136, 138, 151, 152, 153, 154, 159, 160, 339, 342, 349, 353, 354, 355, 389, 425), mentre trentuno (31) elementi murari richiedono coefficienti parziali di sicurezza compresi tra 2 e 3.**

Si prescrive di programmare nel breve/medio periodo interventi locali di rinforzo per gli elementi non rispondenti ai requisiti minimi previsti dalla Normativa ($\zeta_v < 1$ e $\gamma_m < 2$). Si consiglia, inoltre, di estendere gli interventi di adeguamento per gli elementi non verificati SLU con $\zeta_v < 1$ e $2 \leq \gamma_m \leq 3$ al fine di ottenere coefficienti parziali di sicurezza superiori a 3; ai sensi della Circolare esplicativa, il loro valore di γ_m è risultato accettabile.

5. VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA

L'indice di sicurezza sismica ζ_E della struttura è definito come il rapporto tra l'azione sismica corrispondente al raggiungimento della capacità della struttura e la domanda sismica **allo stato limite ultimo di salvaguardia della vita**. In caso di calcolo mediante analisi statica, la vulnerabilità sismica può essere calcolata come il rapporto tra resistenza ultima T_{Ri} e le sollecitazioni T_{Si} per ciascuna sottostruttura i -esima, il valore di vulnerabilità sismica da attribuire all'intera struttura è il minimo tra tutti quelli ottenuti su ciascuna sottostruttura: la vulnerabilità è dunque determinata dalla prima sottostruttura che raggiunge lo stato limite ultimo.

$$\zeta_E = \min \left\{ \frac{T_{Ri}}{T_{Si}} \right\}$$

Se si ottiene un indice di vulnerabilità inferiore all'unità la struttura non ha resistenza sufficiente a far fronte ad un evento sismico con intensità fissata dalle norme; la carenza rispetto all'unità rappresenta il suo grado di inadeguatezza.

Pertanto, una volta determinata la sollecitazione che porta al raggiungimento dello stato limite ultimo (SLV) della prima sottostruttura, è possibile determinare l'accelerazione $PGA_d(SLV)$ che genera tale sollecitazione, per ciascuna direzione principale e tenuto conto del fattore di struttura. Rappresentando su un diagramma cartesiano in ascissa la accelerazione PGA ed in ordinata la vulnerabilità V , il valore $PGA_d(SLV)$ rappresenta il limite oltre il quale le verifiche di vulnerabilità vengono soddisfatte e quindi l'Unità Strutturale considerata risulta sicura. La combinazione dei carichi considerata è quella quasi permanente e i tassi di lavoro dei materiali quelli indicati nel paragrafo 2.4 della presente trattazione.

La normativa attualmente vigente (NTC 2018) richiede una diversa metodologia di verifica in funzione della tipologia strutturale dell'edificio in questione, pertanto, nei paragrafi seguenti verranno presentate le seguenti metodologie di valutazione della sicurezza sismica:

- Verifica sismica dei meccanismi locali fuori piano;
- Verifica sismica globale con metodo push-over.

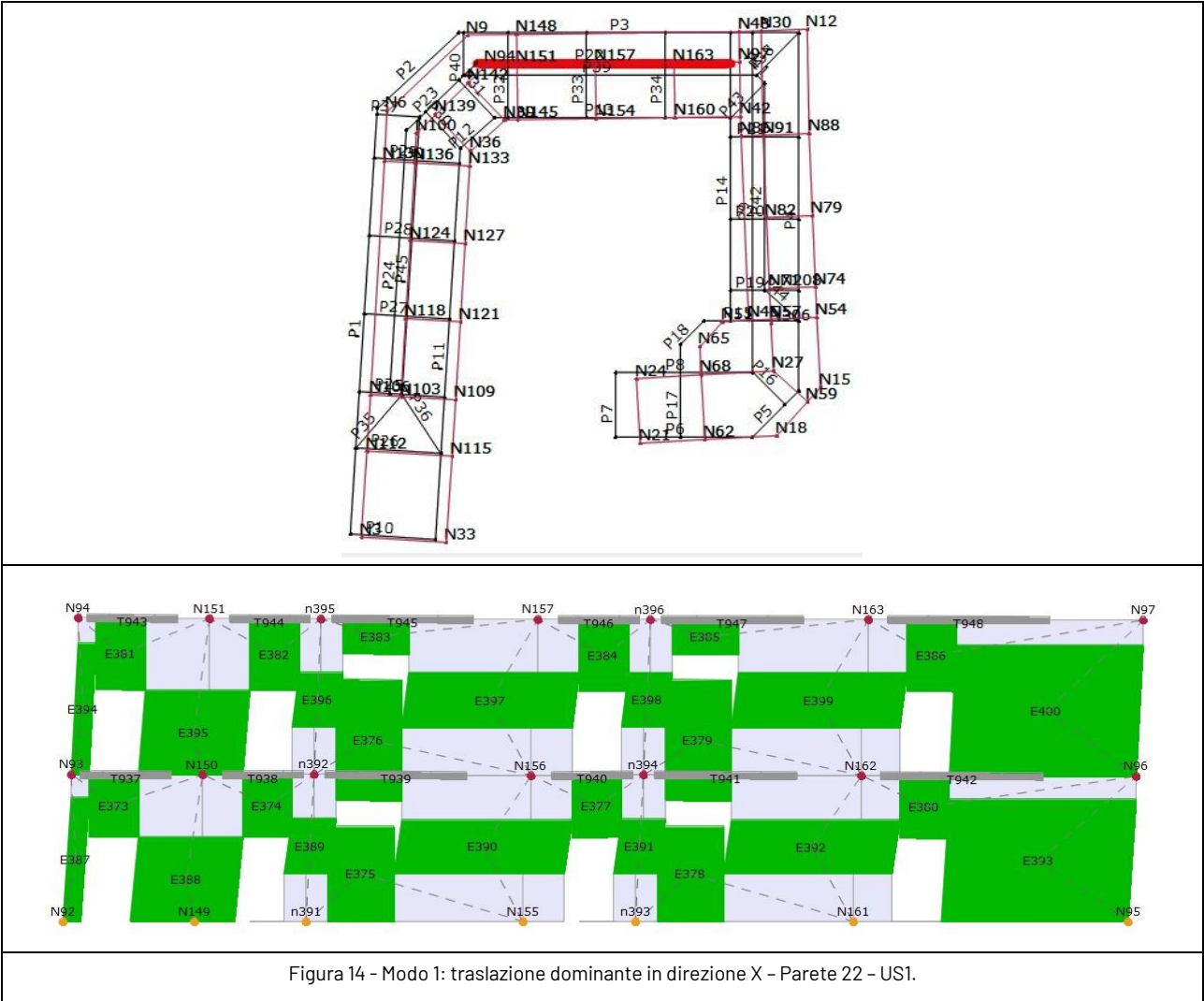
5.1. Analisi modale

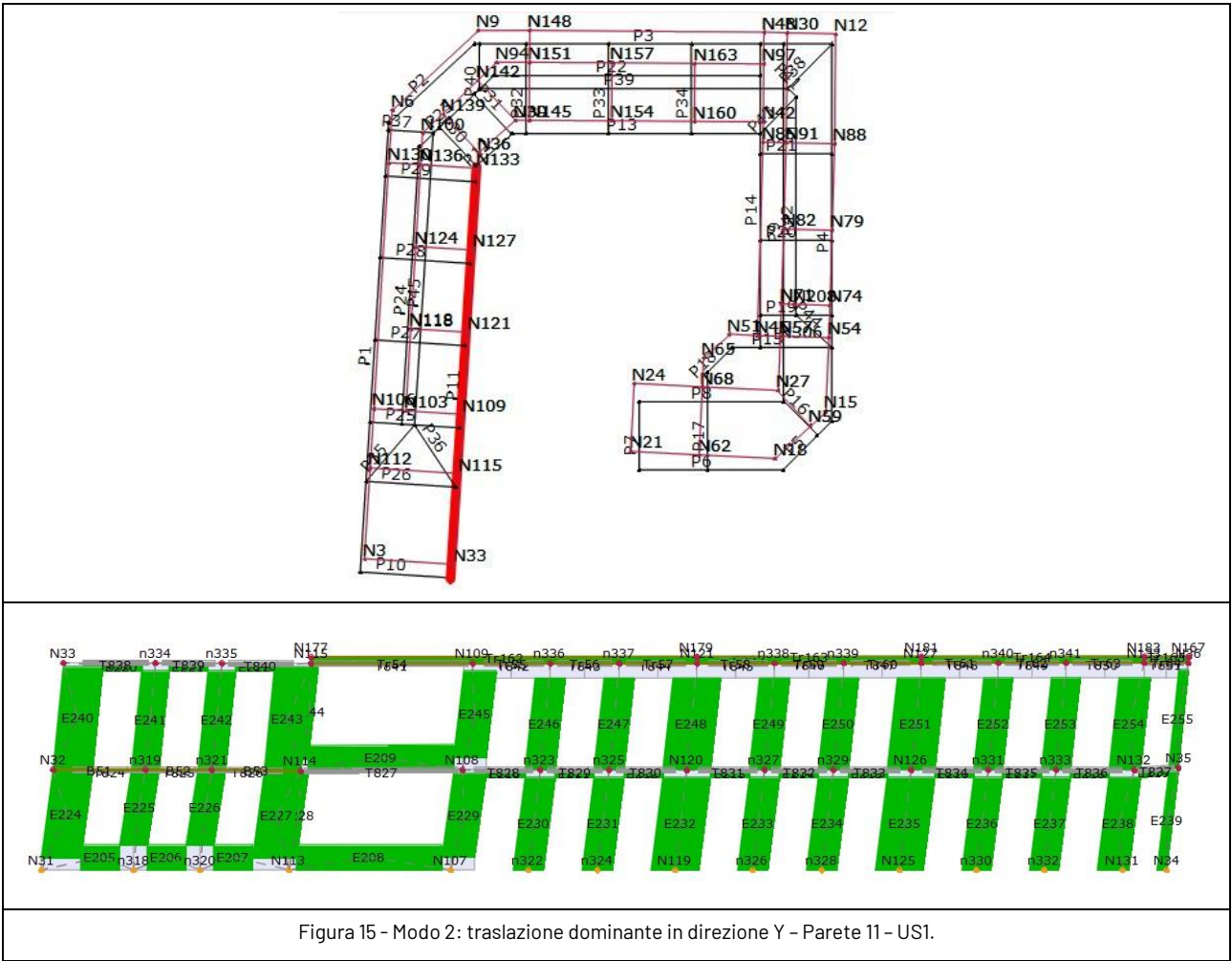
Per effettuare un primo controllo della “bontà” dei modelli numerici, nonché per determinare i modi propri di vibrare, è stata svolta un’analisi agli autovalori (eigenvalue). Nelle seguenti tabelle vengono riportati i modi di vibrare caratterizzati da una massa modale superiore al 5%, suddivisi per Unità Strutturale, evidenziando quelli che possiedono la maggior massa partecipante nelle due direzioni principali. Infine, per ogni Unità Strutturale, vengono riportate le deformate modali dei due modi principali.

5.1.1. Unità strutturale 1

Tabella 5 – Forme modali principali – US1.

Modo	Periodo [s]	Traslazione X		Traslazione Y		Rotazione Z	
		Massa [%]	Somma [%]	Massa [%]	Somma [%]	Massa [%]	Somma [%]
1	0.310	77.580	77.580	0.730	0.730	0.020	0.020
2	0.290	3.010	80.590	79.810	80.540	0.010	0.030
3	0.283	7.730	88.320	7.270	87.810	0.000	0.030
...
20	0.093	0.000	97.650	0.000	98.070	6.880	11.710
...
23	0.087	0.020	97.720	0.000	98.140	8.950	21.960
...
25	0.085	0.030	98.030	0.000	98.250	41.420	65.250
...
778	0.000	0.000	98.290	0.000	98.490	0.000	99.860





5.2. Verifica sismica dei meccanismi locali fuori piano

Le verifiche dei meccanismi locali fuori piano delle Unità Strutturali realizzate in muratura sono state condotte mediante il metodo dell'analisi limite dell'equilibrio secondo l'approccio cinematico. Tale metodo è basato sulla scelta del meccanismo di collasso più probabile e sulla valutazione dell'azione orizzontale che attiva tale cinematico, come prescritto nella Circolare NTC 2019 § C8.7.1.2.

Il livello di sicurezza dei meccanismi locali fuori piano nei confronti dell'azione sismica è valutato sulla base della seguente formula:

$$\zeta_E = \frac{\textit{Accelerazione sismica spettrale massima sopportabile}}{\textit{Accelerazione sismica spettrale massima di progetto di una nuova costruzione}}$$

Dove:

- L'azione sismica massima sopportabile è calcolata in termini di accelerazione sismica spettrale a_0^* che attiva il meccanismo con il metodo dell'analisi limite (definita in accordo a quanto riportato dalla Circolare NTC 2019 § C8.7.1.2.1.2);
- L'azione massima di progetto di una nuova costruzione è definita in termini di accelerazione per elementi che poggiano direttamente a terra o posti ad una determinata quota da terra (definita in accordo a quanto riportato dalla Circolare NTC 2019 § C8.7.1.2.1.2).

Per il calcolo delle azioni sollecitanti si adotta un fattore di struttura pari a **q = 2,0**.

5.2.1 Unità strutturale 1

Sulla base delle caratteristiche morfologiche dell'Unità Strutturale e dello studio dei dettagli costruttivi si ritiene plausibile il meccanismo di ribaltamento semplice delle facciate in muratura e di flessione verticale. Le osservazioni disposte durante il sopralluogo non hanno dato modo di constatare la presenza di dispositivi di ritegno che connettano le murature con gli orizzontamenti e considerando in semplice appoggio le stesse non si esclude l'attivazione di cinematismi di ribaltamento semplice di parete.

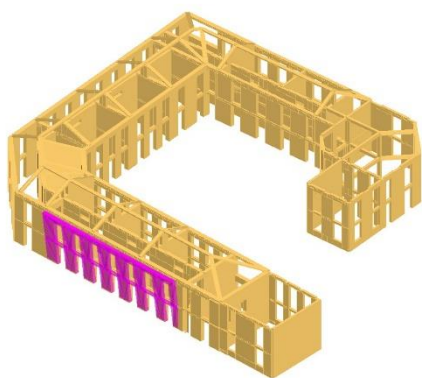


Foto 3 – Ribaltamento semplice parete P1 – Livello terra e primo

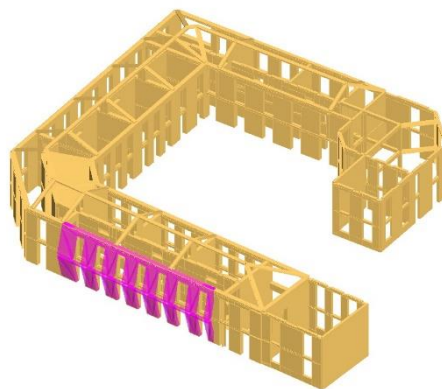


Foto 4 – Flessione semplice parete P1 – Livello terra e primo

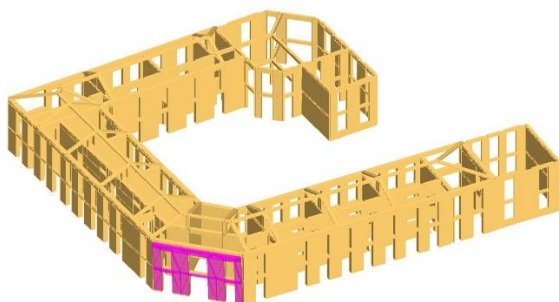


Foto 5 – Ribaltamento semplice parete P2 – Livello terra e primo.

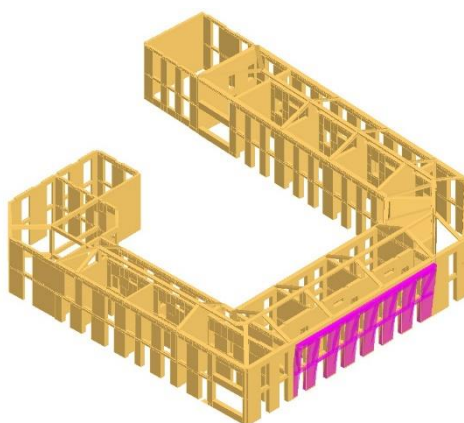


Foto 6 – Flessione semplice parete P4 – Livello terra e primo.

Fronte analizzato	Meccanismo di collasso	Piani coinvolti	Azione sismica di riferimento (g)	Azione sismica massima sopportabile (g)	Livello di Sicurezza	Verifica
					ζ_E	
Parete 1	Ribaltamento semplice	Terra e Primo	0,056	0,071	>1	OK
Parete 1	Flessione Verticale	Terra e Primo	0,056	0,414	>1	OK
Parete 2	Ribaltamento semplice	Terra e Primo	0,056	0,063	>1	OK
Parete 4	Ribaltamento semplice	Terra e Primo	0,056	0,058	>1	OK

5.3. Verifica sismica con metodo push-over e telai equivalenti

La verifica globale delle Unità Strutturali realizzate in muratura è stata condotta mediante un'analisi statica non lineare di tipo push-over. Tale metodo ha lo scopo di studiare il comportamento della struttura fino al suo collasso, valutando il progressivo danneggiamento degli elementi strutturali e la redistribuzione delle azioni sugli elementi stessi all'aumentare dell'azione sismica sollecitante. L'analisi push-over permette di determinare, mediante la curva di capacità della struttura, la massima azione sismica, corrispondente al taglio alla base, e la massima capacità di spostamento del sistema. Generalmente, le accelerazioni di attivazione dei meccanismi locali risultano inferiori rispetto a quelle di attivazione dei meccanismi globali.

La modellazione della struttura per la verifica globale con metodo push-over, inoltre, considera efficaci (rigidi, resistenti e collegati meccanicamente alle pareti) i diaframmi di piano degli orizzontamenti.

L'analisi statica non lineare è applicabile secondo le modalità descritte nelle NTC 2018 § 7.3.4.2, considerando una distribuzione dell'azione sismica proporzionale ai modi di vibrare principali, già descritti e illustrati al paragrafo 3.1 della presente trattazione.

Il livello di sicurezza globale nei confronti dell'azione sismica è valutato sulla base della seguente formula:

$$\zeta_E = \frac{\text{Spostamento sismico massimo sopportabile}}{\text{Spostamento sismico massimo di progetto di una nuova costruzione}}$$

La verifica di sicurezza consiste nel confronto tra la capacità di spostamento ultimo della costruzione e la domanda di spostamento:

Dove:

- La capacità di spostamento è ottenuta dalle curve di capacità risultanti dall'analisi statica non lineare in accordo a quanto riportato dalla Circolare NTC 2019 § C7.3.4.2.
- La domanda di spostamento è definita in accordo a quanto riportato dalle NTC 2018 § 7.3.4.2 e 7.8.1.6.

L'analisi statica non lineare richiede almeno 8 analisi di tipo push-over considerando l'azione sismica agente nelle due direzioni principali dell'edificio (X/Y) e nei due versi (+/-), secondo due distribuzioni, Static EQ e Uniform Acceleration.

Per le Unità Strutturali interessate, si riportano, di seguito, le **curve di capacità** che sono state calcolate in base alle seguenti ipotesi:

- Buon ammorsamento tra maschi e fasce;
- Muratura monolitica e coerente;
- Architravi resistenti a flessione efficacemente ammorsati alle estremità.

La verifica risulta soddisfatta se la capacità della struttura risulta almeno pari a quella di domanda da spettro e nelle ulteriori **tabelle di riepilogo** sono inseriti i risultati delle analisi sia in condizione di Stato Limite di Salvaguardia della Vita (SLV) sia in condizione di Stato Limite di Operatività (SLO).

5.3.1 Unità strutturale 1

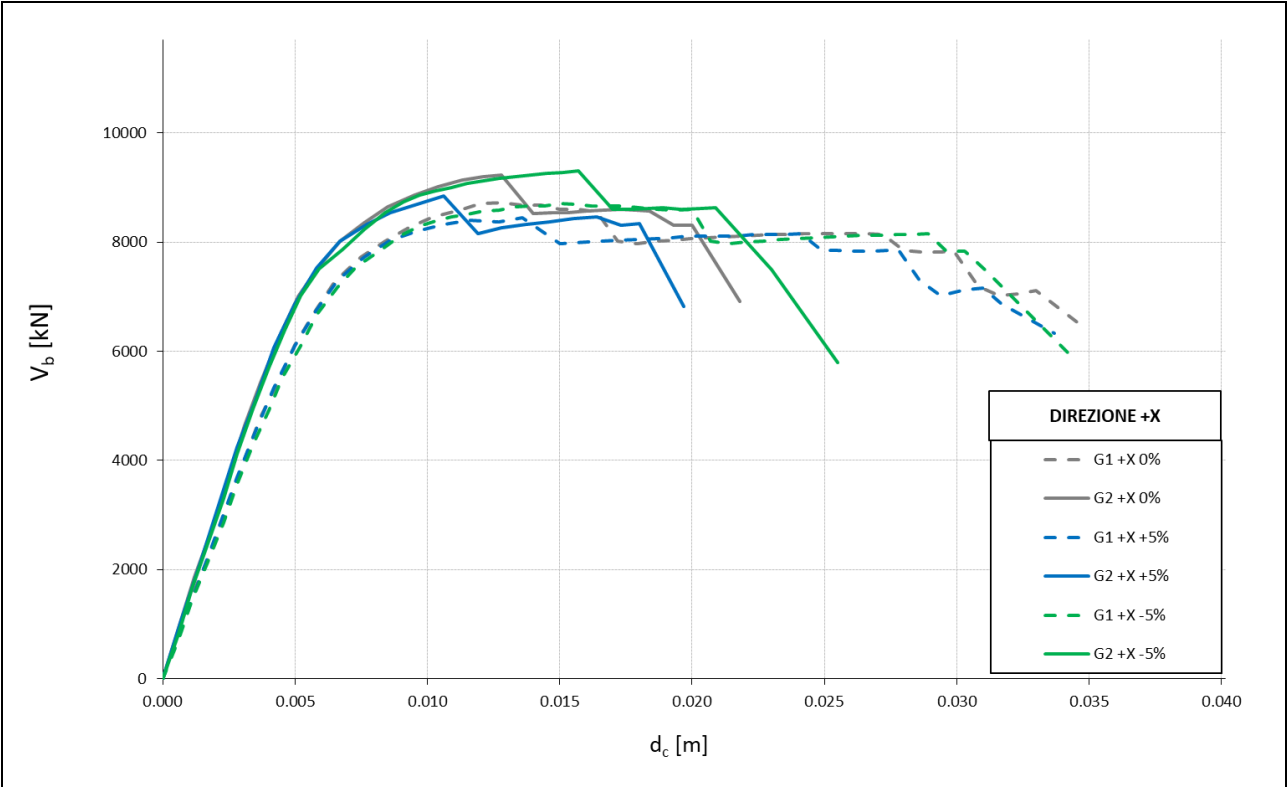


Figura 16 – Curve di capacità per azione sismica agente in direzione longitudinale (+X).

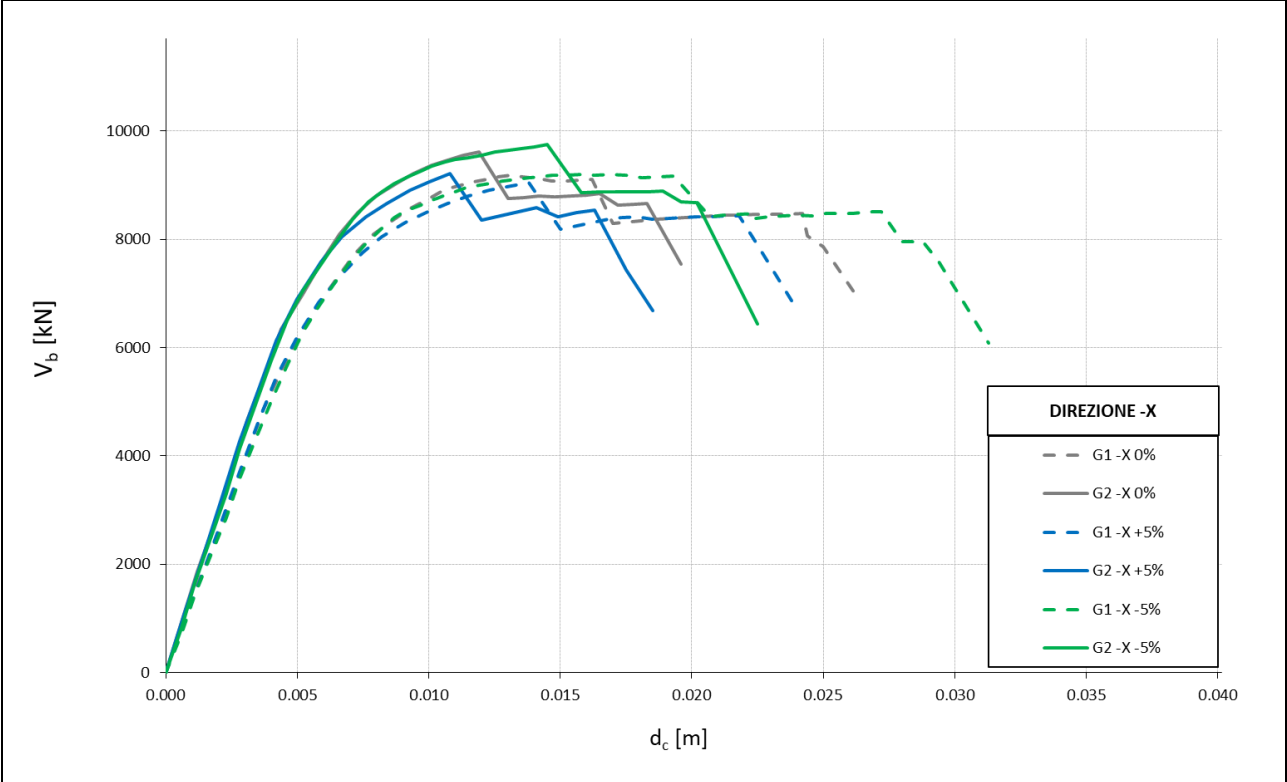


Figura 17 – Curve di capacità per azione sismica agente in direzione trasversale (-X).

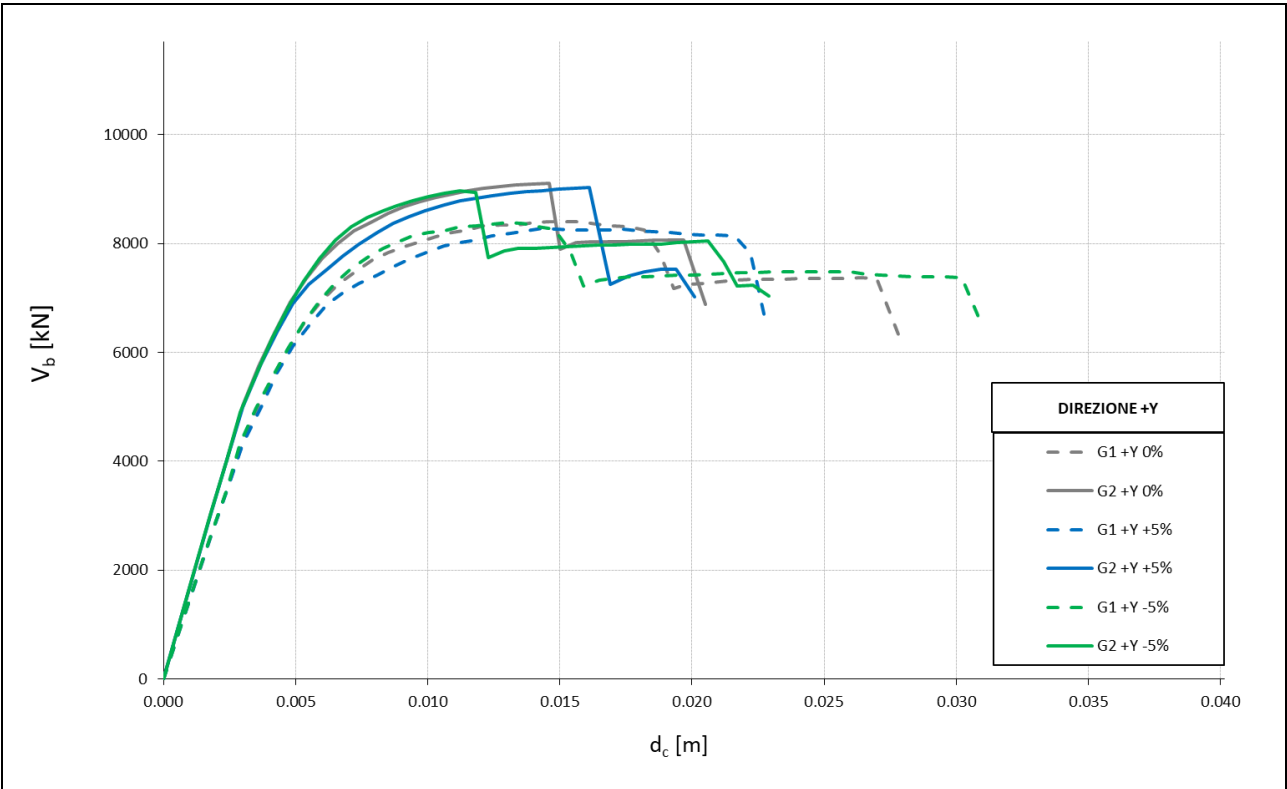


Figura 18 – Curve di capacità per azione sismica agente in direzione longitudinale (+Y).

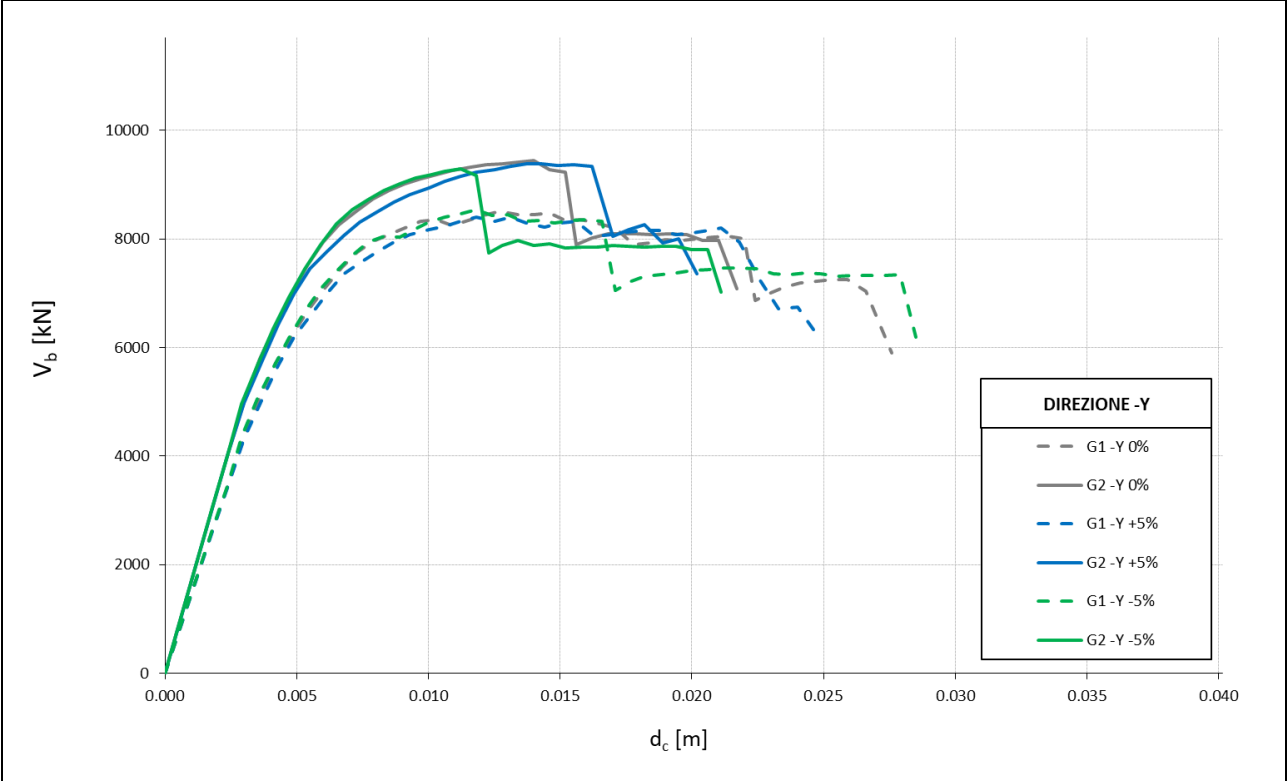


Figura 19 – Curve di capacità per azione sismica agente in direzione trasversale (-Y).

Di seguito si riportano gli indici di sicurezza raggiunti, in riferimento allo Stato limite di Salvaguardia della Vita e in riferimento allo Stato limite di Operatività, evidenziando quelli più gravosi per le due direzioni principali considerate.

Tabella 6 - Verifiche di sicurezza: indici di sicurezza in termini di spostamento e fattore di comportamento per SLV

VERIFICA SLV								
Distribuzione Pushover		Ecc.	Spostamento			Duttilità		μ_E
			Domanda	Capacità	Rapporto			
Gruppo	Direzione		$d_{max}^{*}(T^{*})$ [cm]	d_{SL}^{*} [cm]	$d_{max}^{*}(T^{*})/$ d_{SL}^{*}	q^{*}	q^{*} / q_{lim}	
2	+X	0%	0.83	0.96	0.86	1.16	2.59	>1
1	+X	0%	0.96	1.23	0.78	1.20	2.50	>1
2	-X	0%	0.81	0.89	0.91	1.11	2.70	>1
1	-X	0%	0.94	1.22	0.77	1.14	2.63	>1
2	+Y	0%	0.77	1.09	0.71	1.15	2.61	>1
1	+Y	0%	0.92	1.36	0.68	1.23	2.44	>1
2	-Y	0%	0.75	1.05	0.71	1.11	2.70	>1
1	-Y	0%	0.91	0.78	1.17	1.27	2.36	0.91
2	+X	5%	0.85	0.79	1.08	1.20	2.50	0.96
2	+X	-5%	0.83	1.18	0.70	1.14	2.63	>1
1	+X	5%	0.98	1.02	0.96	1.24	2.42	>1
1	+X	-5%	0.99	1.50	0.66	1.20	2.50	>1
2	-X	5%	0.83	0.81	1.02	1.16	2.59	0.99
2	-X	-5%	0.81	1.09	0.74	1.09	2.75	>1
1	-X	5%	0.95	1.03	0.92	1.18	2.54	>1
1	-X	-5%	0.94	1.44	0.65	1.14	2.63	>1
2	+Y	5%	0.79	1.21	0.65	1.17	2.56	>1
2	+Y	-5%	0.77	0.89	0.87	1.16	2.59	>1
1	+Y	5%	0.94	1.67	0.56	1.26	2.38	>1
1	+Y	-5%	0.92	1.11	0.83	1.24	2.42	>1
2	-Y	5%	0.76	1.21	0.63	1.12	2.68	>1
2	-Y	-5%	0.75	0.89	0.84	1.12	2.68	>1
1	-Y	5%	0.93	1.17	0.79	1.24	2.42	>1
1	-Y	-5%	0.90	1.24	0.73	1.22	2.46	>1

Tabella 7 - Verifiche di sicurezza: indici di sicurezza in termini di spostamento per SLO

VERIFICA SLO						
Distribuzione Pushover		Ecc.	Spostamento			μ_E
			Domanda	Capacità	Rapporto	
Gruppo	Direzione		$d_{max}^*(T^*)$ [cm]	d_{SL}^* [cm]	$d_{max}^*(T^*)/ d_{SL}^*$	
2	+X	0%	0.26	0.34	0.76	>1
1	+X	0%	0.30	0.38	0.79	>1
2	-X	0%	0.26	0.39	0.67	>1
1	-X	0%	0.30	0.43	0.70	>1
2	+Y	0%	0.24	0.32	0.75	>1
1	+Y	0%	0.28	0.36	0.78	>1
2	-Y	0%	0.24	0.36	0.67	>1
1	-Y	0%	0.27	0.40	0.68	>1
2	+X	5%	0.25	0.34	0.74	>1
2	+X	-5%	0.26	0.35	0.74	>1
1	+X	5%	0.29	0.39	0.74	>1
1	+X	-5%	0.31	0.39	0.79	>1
2	-X	5%	0.26	0.41	0.63	>1
2	-X	-5%	0.26	0.39	0.67	>1
1	-X	5%	0.30	0.39	0.77	>1
1	-X	-5%	0.30	0.43	0.70	>1
2	+Y	5%	0.24	0.33	0.73	>1
2	+Y	-5%	0.24	0.31	0.77	>1
1	+Y	5%	0.28	0.37	0.76	>1
1	+Y	-5%	0.27	0.35	0.77	>1
2	-Y	5%	0.24	0.41	0.59	>1
2	-Y	-5%	0.24	0.39	0.62	>1
1	-Y	5%	0.28	0.37	0.76	>1
1	-Y	-5%	0.27	0.35	0.77	>1

Gli indici riportati nelle tabelle precedenti rappresentano il rapporto tra la resistenza dell'edificio in oggetto e quello di un edificio analogo progettato in accordo alla normativa vigente, in termini di prestazione globale.

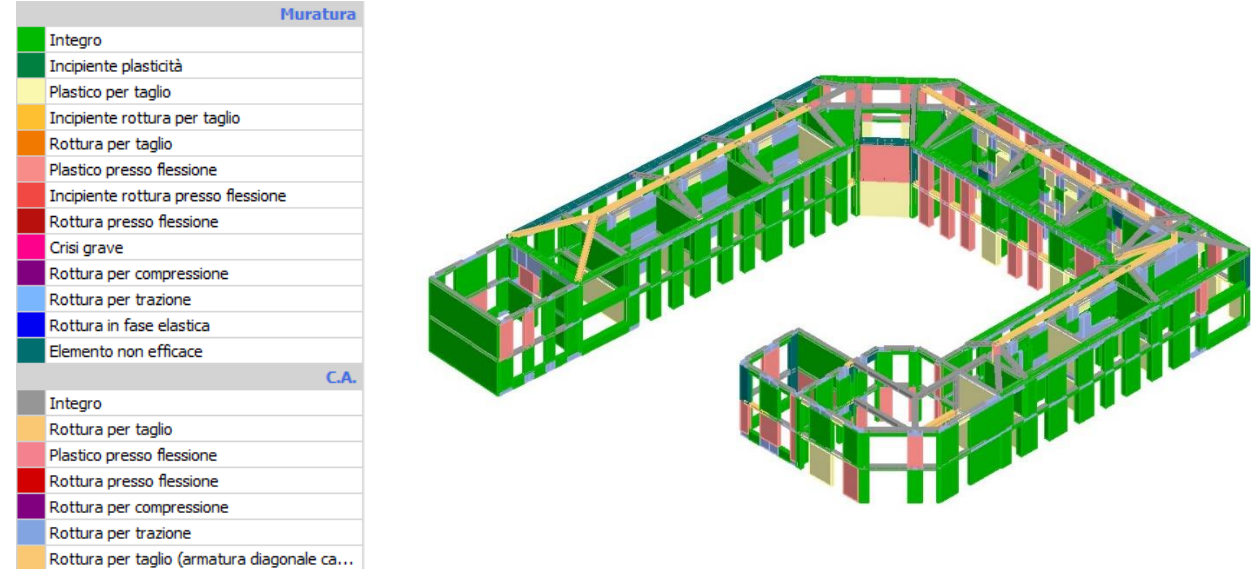
Le prestazioni non risultano adeguate allo SLV con un indice minimo pari al **91%, legato a distribuzioni di Gruppo 1** mentre risultano invece adeguate allo SLO.

Tale prestazione risulta un limite superiore per la struttura una volta che si siano confermate le ipotesi alla base dell'analisi globale; in sintesi, una volta che:

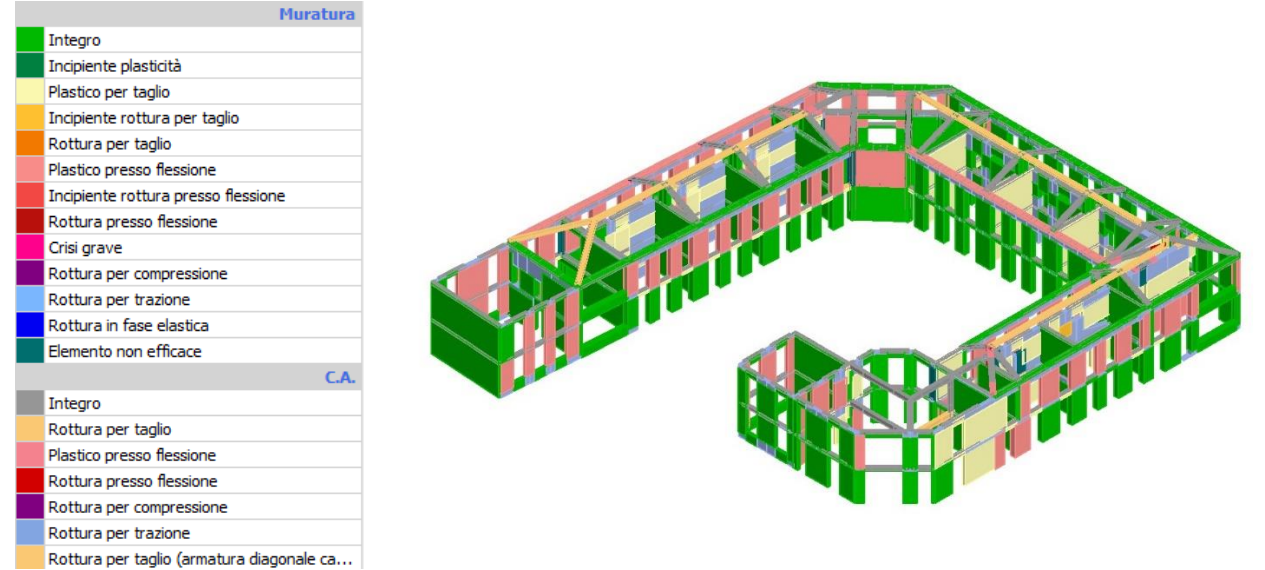
- I solai siano efficacemente collegati alle pareti sismo-resistenti;
- Siano creati cordoli o eventuali architravi/voltini a sostegno delle fasce murarie siano organizzati al fine di garantire un comportamento efficace a telaio equivalente;
- La muratura, anche a valle di interventi di rinforzo, sia in grado di deformarsi sotto sisma senza perdere di coesione e monoliticità.

Di seguito si riportano in maggior dettaglio le verifiche che in seguito all'analisi non lineare risultano essere le più gravose allo SLV per le direzioni principali di sollecitazione sismica in corrispondenza dello step relativo allo spostamento massimo.

Direzione X – Analisi con distribuzione n.9



Direzione Y – Analisi con distribuzione n.8



5.4. Vulnerabilità Specifiche

L'intero edificio è stato sottoposto ad una analisi orientata all'individuazione delle vulnerabilità; dall'analisi morfologica è stato possibile riscontrare l'eventuale presenza di irregolarità geometriche in pianta o in elevazione, delle quali si è tenuto conto per l'elaborazione dei modelli numerici. Mediante uno studio più dettagliato degli elementi costituenti ciascuna Unità Strutturale ed il rilievo delle relative connessioni, si è stati in grado di identificare ulteriori vulnerabilità intrinseche dovute ad elementi strutturali o non strutturali. Queste Vulnerabilità Specifiche sono spesso conseguenza di non corrette modalità costruttive, o di situazioni di carente o errata manutenzione.

Le osservazioni condotte durante il sopralluogo hanno rilevato che **l'accostamento tra le Unità Strutturali contigue non è stato eseguito interponendo adeguati giunti sismici**: i rilievi condotti hanno infatti permesso di ravvisare che le strutture di elevazione sono affiancate senza adeguate spaziature. Le NTC 2018 §7.2.1. prescrivono che *"La distanza tra costruzioni contigue deve essere tale da evitare fenomeni di martellamento e comunque non può essere inferiore alla somma degli spostamenti massimi determinati per lo SLV, calcolati per ciascuna costruzione secondo il §7.3.3 (analisi lineare) o il §7.3.4 (analisi non lineare) e tenendo conto, laddove significativo, dello spostamento relativo delle fondazioni delle due costruzioni contigue, secondo quanto indicato ai §§ 3.2.4.1, 3.2.4.2 e 7.3.5. La distanza tra due punti di costruzioni che si fronteggiano non potrà in ogni caso essere inferiore a 1/100 della quota dei punti considerati, misurata dallo spiccato della fondazione o dalla sommità della struttura scatolare rigida di cui al §7.2.1, moltiplicata per $2a_g S/g \leq 1$. Qualora non si possano eseguire calcoli specifici, lo spostamento massimo di una costruzione non isolata alla base può essere stimato in 1/100 della sua altezza, misurata come sopra, moltiplicata per $a_g S/g$; in questo caso, la distanza tra costruzioni contigue non potrà essere inferiore alla somma degli spostamenti massimi di ciascuna di esse"*.

L'ispezione del sottotetto ha permesso di constatare che la morfologia a falde inclinate del sistema di copertura determina l'attivazione di una spinta statica, presidiata dal cordolo perimetrale che sovrasta la scatola muraria. In caso di inadeguatezza dello stesso particolare costruttivo, tale situazione risulterebbe particolarmente vulnerabile in caso di evento sismico.

Per lo stesso sistema di copertura deve essere considerata come vulnerabile **l'assenza di connessioni dirette** con la struttura di elevazione lungo la trave di colmo; quest'ultima è infatti sorretta per mutuo contrasto dalle falde dei padiglioni.

A livello del sottotetto sono stati individuati dei **pilastrini in falso** in c.a: tale situazione risulta essere particolarmente critica in caso di evento sismico data l'assenza di una connessione diretta con il piano di fondazione.

I rilievi condotti hanno dato la possibilità di constatare lo **scarso ammorsamento tra i setti murari di differenti tipologie**. L'assenza di tale dettaglio costruttivo non consente alla fabbrica muraria di manifestare un comportamento scatolare e, anzi, favorisce l'attivazione di cinematismi locali che possono determinare il collasso in determinate posizioni.

I rilievi in situ hanno dato modo di riscontrare che per la realizzazione dei solai, in alcune posizioni sono stati eseguiti **cordoli in breccia** nelle strutture murarie. Tale dettaglio costruttivo muta il regime statico delle murature causando la migrazione degli sforzi verso il paramento esterno; il solaio, inoltre, gravando esclusivamente sul paramento interno, in presenza di azioni sismiche esercita una spinta orizzontale sul paramento esterno causandone l'espulsione.

In seguito all'indagine effettuata si ritiene necessario porre l'attenzione sul particolare metodo di posa dei blocchi "foratoni" che costituiscono le pareti portanti di una parte del manufatto, la cui disposizione a fori orizzontali porta fisiologicamente la muratura a presentare esigui valori di resistenza meccanica, che nel caso dell'edificio in esame portano ad avere risultati delle verifiche statiche particolarmente gravosi. La progettazione dell'epoca consentiva l'utilizzo di elementi per murature portanti in blocchi forati a fori orizzontali, che tuttavia non consentono di soddisfare le verifiche imposte dalla normativa oggi vigente.

La normativa di riferimento (D.M. 17 gennaio 2018 - § Cap. 7.2.1) stabilisce che per quanto riguarda gli edifici, una costruzione è regolare in pianta se tutte le seguenti condizioni sono rispettate:

- a) *la distribuzione di masse e rigidezze è approssimativamente simmetrica rispetto a due direzioni ortogonali e la forma in pianta è compatta, ossia il contorno di ogni orizzontamento è convesso; il requisito può ritenersi soddisfatto, anche in presenza di rientranze in pianta, quando esse non influenzano significativamente la rigidezza nel piano dell'orizzontamento e, per ogni rientranza, l'area compresa tra il perimetro dell'orizzontamento e la linea convessa circoscritta l'orizzontamento non supera il 5% dell'area dell'orizzontamento;*
- b) *il rapporto tra i lati del rettangolo circoscritto alla pianta di ogni orizzontamento è inferiore a 4;*
- c) *ciascun orizzontamento ha una rigidezza nel proprio piano tanto maggiore della corrispondente rigidezza degli elementi strutturali verticali da potersi assumere che la sua deformazione in pianta influenzi in modo trascurabile la distribuzione delle azioni sismiche tra questi ultimi e ha resistenza sufficiente a garantire l'efficacia di tale distribuzione.*

Sempre riferendosi agli edifici, una costruzione è regolare in altezza se tutte le seguenti condizioni sono rispettate:

- d) *tutti i sistemi resistenti alle azioni orizzontali si estendono per tutta l'altezza della costruzione o, se sono presenti parti aventi differenti altezze, fino alla sommità della rispettiva parte dell'edificio;*
- e) *massa e rigidezza rimangono costanti o variano gradualmente, senza bruschi cambiamenti, dalla base alla sommità della costruzione (le variazioni di massa da un orizzontamento all'altro non superano il 25%, la rigidezza non si riduce da un orizzontamento a quello sovrastante più del 30% e non aumenta più del 10%); ai fini della rigidezza si possono considerare regolari in altezza strutture dotate di pareti o nuclei in c.a. o di pareti e nuclei in muratura di sezione costante sull'altezza o di telai controventati in acciaio, ai quali sia affidato almeno il 50% dell'azione sismica alla base;*
- f) *il rapporto tra la capacità e la domanda allo SLV non è significativamente diverso, in termini di resistenza, per orizzontamenti successivi (tale rapporto, calcolato per un generico orizzontamento, non deve differire più del 30% dall'analogo rapporto calcolato per l'orizzontamento adiacente); può fare eccezione l'ultimo orizzontamento di strutture intelaiate di almeno tre orizzontamenti;*
- g) *eventuali restringimenti della sezione orizzontale della costruzione avvengano con continuità da un orizzontamento al successivo; oppure avvengano in modo che il rientro di un orizzontamento non superi il 10% della dimensione corrispondente all'orizzontamento immediatamente sottostante, né il 30% della dimensione corrispondente al primo orizzontamento. Fa eccezione l'ultimo orizzontamento di costruzioni di almeno quattro orizzontamenti, per il quale non sono previste limitazioni di restringimento.*

Le osservazioni condotte durante il sopralluogo e l'analisi planimetrica dell'Unità Strutturale hanno permesso di constatare come la stessa risulti **planimetricamente irregolare. È possibile affermare che le porzioni ed elementi di collegamento tra le sottostrutture saranno più soggette a danneggiamento e/o fessurazione per sollecitazioni differenziali in caso di sisma.**



Foto 7 - Vista di insieme della copertura sorretta per mutuo contrasto.



Foto 8 - Vista di insieme della copertura sorretta per mutuo contrasto.



Foto 9 - Vista di insieme della presenza di pilastro in falso nel sottotetto.



Foto 10 - Vista di insieme della presenza di pilastro in falso nel sottotetto.



Foto 11 - Particolare della tipologia di muratura in foratoni orizzontali.



Foto 12 - Particolare della tipologia di muratura in foratoni orizzontali.

5.5. Classificazione Sismica

La classificazione del Rischio sismico può essere valutata, ai sensi dei DD.MM. 58-65 2017, attribuendo a ciascuna US una specifica **Classe di Rischio Sismico**, da A+ a F.

Indice di sicurezza	Classe IS-V	
$100\% < IS-V$	A+ _{IS-V}	
$100\% \geq IS-V > 80\%$	A _{IS-V}	
$80\% \geq IS-V > 60\%$	B _{IS-V}	
$60\% \geq IS-V > 45\%$	C _{IS-V}	
$45\% \geq IS-V > 30\%$	D _{IS-V}	
$30\% \geq IS-V > 15\%$	E _{IS-V}	
$IS-V \leq 15\%$	F _{IS-V}	

L'appartenenza a ciascuna classe è determinata in base ai valori assunti dall'**indice di sicurezza** IS-V (attualmente indicato come coefficiente ζ_E nelle nuove NTC 2018), definito - come descritto nel paragrafo precedente - dal rapporto tra l'accelerazione di picco al suolo che determina il raggiungimento dello Stato Limite di salvaguardia della Vita e quella prevista, nello stesso sito per un nuovo edificio. Vengono così fissate sette diverse classi caratterizzate dai valori di soglia determinanti per ricadervi secondo i valori presentati in tabella.

6. CONCLUSIONI

A seguito dell'incarico conferito dalla Committenza si è proceduto ad eseguire analisi diagnostiche ed elaborazioni per valutare il rischio sismico dell'edificio che ospita la Scuola Primaria sito in Via Santa Veronica a Orosei (NU).

Dalla documentazione fornita dalla Committenza non è stato possibile determinare con precisione l'anno di costruzione del fabbricato in muratura originario, che tuttavia risulta verosimilmente databile all'inizio degli anni '60. Successivamente sono state aggiunte due porzioni in blocchi di calcestruzzo e mattoni con fori orizzontali direttamente collegate alla struttura originaria.

La struttura portante dell'edificio non è stata progettata per resistere ai carichi da sisma previsti dalle vigenti NTC 2018. Il Comune di Orosei (NU) è stato classificato, per la prima volta, in Zona Sismica 4 dall'OPCM n. 3274/2003, aggiornata con la Delibera della Giunta Regionale della Sardegna n. 15/31 del 30.03.2004. In virtù di quanto sopra esposto e del periodo di edificazione è lecito ritenere che le strutture non siano state realizzate secondo criteri "antisismici" moderni.

Il complesso è costituito da più corpi di fabbrica frutto di una stratificazione costruttiva avvenuta in differenti epoche e si sviluppa principalmente su due livelli fuori terra. Entrambi i piani sono adibiti prevalentemente ad aule didattiche; in più, al piano terra sono presenti anche aule per i docenti e per il personale e la palestra. La struttura di elevazione principale è prevalentemente realizzata in setti di muratura in pietra di spessore di 50/60cm, mentre per gli ampliamenti più recenti, si avvale di telai di pilastri e travi in conglomerato cementizio armato e gettato in opera e murature in blocchi di cls e blocchi in laterizio con fori orizzontali. Gli orizzontamenti sono principalmente realizzati con tecnologia laterocementizia. Le coperture ammettono per la maggior parte falde inclinate e manto di rivestimento in coppi. La copertura della porzione relativa agli ampliamenti è invece realizzata in muricci e tavelloni che poggiano sulla soletta di supporto sottostante. Le osservazioni condotte in situ non hanno permesso di risalire al sistema di fondazione dei fabbricati.

6.1. Sicurezza statica

L'esito della verifica di sicurezza della struttura in esame eseguita ai sensi della Normativa vigente, secondo un livello di conoscenza LC2, è riassunta nella seguente tabella:

N° elementi non verificati				
Unità Strutturali	Tipologia costruttiva	C.A.	Muratura	
			Verifica SLU	$\gamma_m < 2$
US1	Muratura M1	-	6	1
	Muratura M2	-	21	16
	Muratura M3	-	24	3
	Muratura M4	-	0	0
	CA1	0	-	-
TOTALE		0	51	

Dalle verifiche condotte e dalla valutazione dei coefficienti parziali di sicurezza statica è possibile concludere che, in condizione SLU, **nessun elemento murario presenta un $\gamma_m < 1$. Venti (20) elementi appartenenti alla tipologia muratura M1, M2 e M3 richiedono coefficienti parziali di sicurezza inferiori a 2 (106, 107, 116, 135, 136, 138, 151, 152, 153, 154, 159, 160, 339, 342, 349, 353, 354, 355, 389, 425), mentre trentuno (31) elementi murari richiedono coefficienti parziali di sicurezza compresi tra 2 e 3.**

Si prescrive di programmare nel breve/medio periodo interventi locali di rinforzo per gli elementi non rispondenti ai requisiti minimi previsti dalla Normativa ($\zeta_v < 1$ e $\gamma_m < 2$). Si consiglia, inoltre, di estendere gli interventi di adeguamento per gli elementi non verificati SLU con $\zeta_v < 1$ e $2 \leq \gamma_m \leq 3$ al fine di ottenere coefficienti parziali di sicurezza superiori a 3; ai sensi della Circolare esplicativa, il loro valore di γ_m è risultato accettabile.

6.2. Sicurezza sismica

I risultati analitici ottenuti dalle verifiche delle diverse unità strutturali, eseguite con livello di conoscenza LC2, hanno consentito di definire i valori di **sicurezza sismica** ζ_E corrispondenti ad una determinata classe di rischio sismico. La tabella sotto riportata riassume, per ogni Unità Strutturale individuata, i risultati ottenuti dalle verifiche eseguite:

CLASSIFICAZIONE SISMICA					
Unità Strutturale	Tipologia costruttiva	Spostamento Max [cm]	ζ_E (PGA _c /PGA _d)	T _{R,SLV} [anni]	Classe
US1	Muratura	-	91%	546	A ISV

I risultati delle analisi svolte evidenziano per l'Unità Strutturale esaminata una prestazione di sicurezza sismica superiore a quella minima accettabile (IS-V pari al 60%). Tale prestazione risulta un limite superiore per la struttura una volta che si siano garantite le ipotesi alla base della modellazione globale (efficace collegamento degli orizzontamenti alle murature d'ambito, efficace ammortamento tra gli elementi murari e muratura in grado di deformarsi sotto sisma senza perdita di coesione e monoliticità).

In caso di evento sismico deve essere considerata la possibilità dell'insorgenza di danni sugli elementi non strutturali, come ad esempio i tavolati divisorii, i sistemi di controsoffittatura e/o elementi appesi. Pertanto, non si potrà comunque prescindere dalla mitigazione delle **vulnerabilità specifiche** descritte nei paragrafi precedenti, che tuttavia appaiono non particolarmente gravose, tenendo anche in considerazione la sismicità del sito e pertanto le probabili forme di danneggiamento attese

Orosei (NU), 31/08/2022

Dott. Ing. Marco Gallotta



Tecnoindagini Srl

TECNOINDAGINI SRL
Via Monte Sabotino n° 14
20095 Cusano M. (MI)
P.IVA 06383520969