

Sismabonus: esempio di calcolo per un edificio esistente in muratura interno ad un aggregato

Problematiche riscontrate nella modellazione sismica di un edificio reale complesso e nell'applicazione delle Linee Guida per la classificazione del rischio sismico

■ Valusso Diego – Ingegnere, ALPE Progetti srl ■ Fedrigo Dario – Ingegnere libero professionista ■ Alessandrini Francesco – Ingegnere, ALPE Progetti srl

L'oggetto analizzato fa parte di un progetto di risanamento conservativo con adeguamento sismico di un fabbricato interno ad un aggregato edilizio complesso sito nel centro storico di Udine. L'immobile, attualmente disabitato, si trova in stato di avanzato degrado; in seguito all'intervento sarà adibito ad uso residenziale (4 unità abitative).

Trattandosi di un intervento di adeguamento sismico, così come definito al §8.4.3 punto (d) del D.M. 17.01.2018, è previsto un insieme sistematico di interventi atti a ridefinire l'organismo strutturale edilizio, con elementi anche diversi da quelli esistenti e carichi globalmente superiori a quelli attualmente gravanti in fondazione. In tal senso l'analisi strutturale globale è stata condotta nella sola situazione post-intervento ($\zeta_E \geq 1.0$). Si è comunque si è resa necessaria la valutazione globale di sicurezza del fabbricato allo stato di fatto, in condizione statica e sismica, allo scopo di ricavare i dati necessari per l'esecuzione della Classificazione del Rischio Sismico dell'edificio.

Si riportano le principali problematiche riscontrate nell'analisi sismica dello stato di fatto e nella valutazione del rischio sismico in ottemperanza a quanto previsto dal DM n.24 del 09/01/2020, presentando le soluzioni adottate e commentando i risultati ottenuti.



Figura 1 - Ubicazione dell'edificio in esame (evidenziato in rosso) all'interno dell'aggregato edilizio.

Analisi sismica del fabbricato esistente

Il fabbricato in oggetto si colloca all'interno di un aggregato edilizio complesso, risalente agli inizi del 1800. Gli spazi interni, riorganizzati più volte nel tempo, allo stato di fatto dispongono sei unità abitative. Le peculiarità strutturali principali sono di seguito elencate:

- Le murature portanti hanno caratteristiche non omogenee e sono state rimaneggiate anche significativamente nel tempo. Generalmente i paramenti murari hanno spessore fino a 50-60cm al piano terra (verosimilmente più antichi), con composizione mista in sassi (ciottoli, pietre erratiche e irregolari) e laterizio (mattoni pieni) e malte di scarsa consistenza. Essi sono continui in elevazione, con una riduzione dello spessore fino a 30-40cm ai piani superiori. Sono presenti diverse canne fumarie, di dimensione variabile e spesso completamente inserite nello spessore del muro.
- Presenza di un cavedio centrale, con murature perimetrali più recenti rispetto al nucleo originale del fabbricato, realizzate in muratura povera in sassi, con numerose interclusioni di elementi lignei, malta di scarsa consistenza e spessori variabili da 20-40cm al piano terra, a 12cm ai piani superiori.
- Solai di piano realizzati a quote sfalsate, con travi in legno e tavolato semplice; la copertura in legno e tavelle è articolata, con numerose falde a diversa inclinazione/orientazione e salti di quota. In generale gli orizzontamenti sono in stato di avanzato degrado.

Il sito ricade in zona sismica "2" ($a_g = 0.215g$, $V_N = 50$ anni, classe d'uso II). L'area oggetto di intervento è pianeggiante (T1) e il suolo appartiene alla "Categoria B" (approccio semplificato).

Indagini conoscitive preliminari

È stato condotto il rilievo geometrico completo del fabbricato, con ampia documentazione fotografica a corredo dei sopralluoghi eseguiti, con rimozione completa dell'intonaco per valutare la tessitura muraria, e sono state effettuate svariate indagini (termografiche, endoscopiche, ultrasoniche e sclerometriche) in modo diffuso; sono stati definiti il modello geologico e geotecnico, eseguendo anche scavi esplorativi in corrispondenza delle fondazioni. Il livello di conoscenza raggiunto è LC2 (intermedio), a cui corrisponde un fattore di confidenza $FC=1.20$.

La caratterizzazione della resistenza e dei moduli elastici della muratura esistente è stata fatta utilizzando i valori medi degli intervalli riportati nella Tab.C8.5.I della Circolare n.7 del 21.01.2019, applicando i coefficienti riduttivi previsti nel caso di malte con caratteristiche particolarmente scadenti.

Si è ritenuto non utile procedere all'identificazione dei parametri meccanici mediante prove dirette a causa della significativa variabilità del tessuto murario, e della estremamente ridotta resistenza del legante, che rendeva difficile operare su porzioni limitate di muratura.

E [N/mm ²]	870,00
Eh [N/mm ²]	870,00
G [N/mm ²]	290,00
w [kN/m ³]	19
f _m [N/cm ²]	140,00
f _{hm} [N/cm ²]	105,00
f _k [N/cm ²]	81,67
τ [N/cm ²]	2,60

Figura 2 - Caratteristiche meccaniche della muratura esistente.

Modello 3D per l'analisi globale sismica

La verifica di sicurezza globale sismica del fabbricato esistente è stata eseguita con l'ausilio di un software commerciale specifico per il calcolo sismico e statico delle strutture in muratura e miste, il quale utilizza il metodo di calcolo FME (Frame by Macro Element) schematizzando la struttura attraverso un telaio equivalente costituito da macroelementi collegati da nodi (2D e 3D).

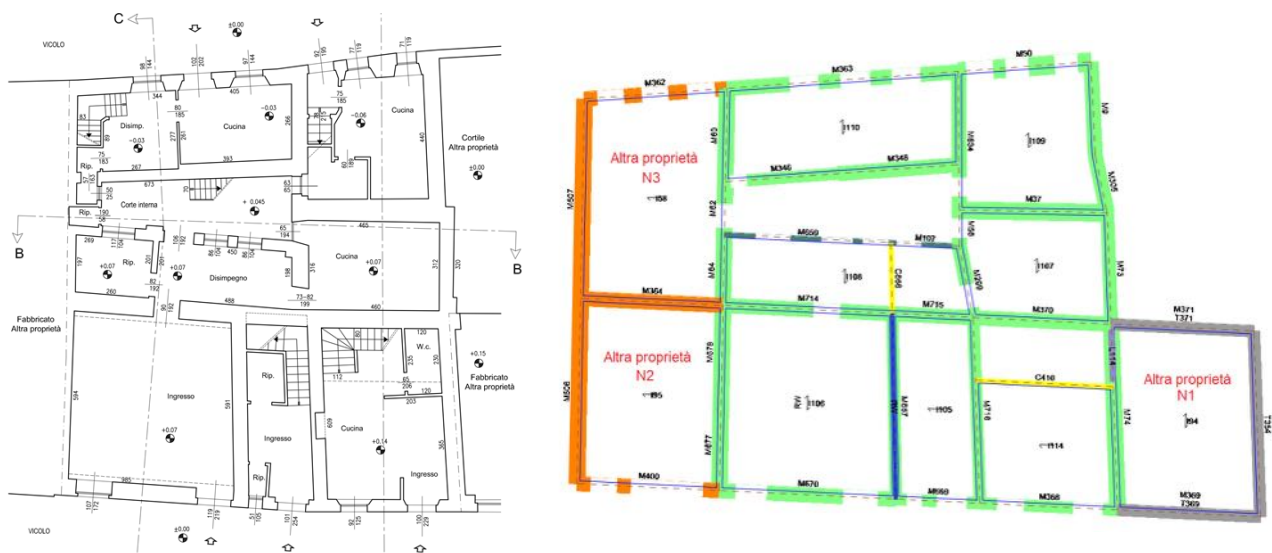


Figura 3 – Planimetria del Piano Terra: rilievo dello stato di fatto e corrispondente modello di calcolo FME (i colori diversi indicano elementi con diverse proprietà meccaniche).

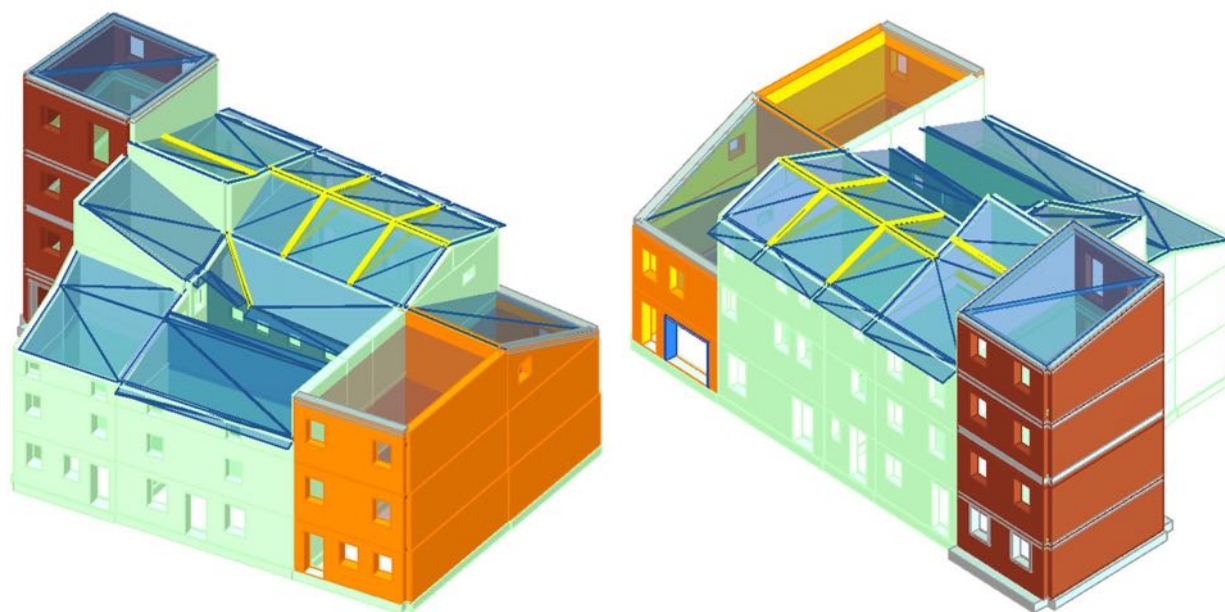


Figura 4 – Viste 3D dal modello di calcolo FME del fabbricato.

Problematiche e soluzioni adottate

La complessità della struttura, in primis geometrica, ho richiesto una necessaria semplificazione in fase di modellazione.

- 1) L'analisi di una unità strutturale (US) facente parte di un **aggregato edilizio** può essere eseguita con differenti approcci. Nei casi estremi:

- la modellazione dell'intero aggregato porta sulla carta a risultati più attendibili, ma necessita di un'attività di rilievo preliminare molto più onerosa e non sempre possibile,
- la modellazione della sola US (trascurando le US adiacenti) è più semplice e veloce, ma può portare a risultati anche sensibilmente differenti dalla realtà e non sempre a favore della sicurezza.

Nel caso specifico si è tenuto in conto in modo semplificato dell'interazione con le US confinanti, modellate parzialmente per caratterizzare più realisticamente il vincolo spaziale del fabbricato in oggetto rispetto al resto dell'aggregato. La caratterizzazione geometrica è basata su rilievi eseguiti direttamente in sito. Con riferimento alla nomenclatura adottata in Figura 3, per quanto riguarda la caratterizzazione dei materiali, al nucleo N1 è stato riconosciuto un sistema di rinforzo alla scatola muraria originale mediante telai e orizzontamenti in c.a., mentre ai nuclei N2 e N3 sono state ipotizzate murature portanti di analoga tessitura rispetto all'edificio in esame. Si tratta in ogni caso di edifici residenziali in buono stato di conservazione, interessati da recenti interventi di manutenzione/ristrutturazione (assunto un coefficiente amplificativo dei parametri meccanici medi proposti dalla Circolare pari a 3.5).

- 2) Molti programmi di calcolo commerciali, tra cui quello utilizzato nel caso studio, consentono di modellare gli orizzontamenti con "reale" rigidità, in funzione dalla tipologia costruttiva, dell'orditura e del grado di ammorsamento alle pareti. Non sono però implementati *tools* utili a modellare singolarità come le **scale** (rampe e pianerottoli), generalmente trascurate nell'analisi, con completa apertura ovvero piena continuità del solaio.

Nel caso studio la scelta di dare piena continuità ai solai, da cui un migliore comportamento globale del fabbricato, è stata dettata dall'obiettivo dell'analisi (valutazione della classe di rischio sismico ante-operam e dei requisiti per l'ottenimento del Sismabonus). Solo in un caso il vano scala è stato modellato con apertura locale del solaio, stante le dimensioni significative e le strutture a cornice scarsamente efficaci nell'irrigidimento, pur applicando i carichi gravitazionali trasmessi dalle rampe ai muri.

Comportamento meccanico non lineare della muratura

Le proprietà meccaniche del materiale muratura sono state definite in modo da individuarne al meglio il comportamento in campo non lineare.

Le caratteristiche principali sono:

- rigidità iniziale secondo le caratteristiche elastiche (fessurate) del materiale;
- redistribuzione delle sollecitazioni interne all'elemento tale da garantire l'equilibrio;
- settaggio dello stato di danno secondo i parametri globali e locali;
- degrado della rigidità nel ramo plastico;
- controllo di duttilità mediante la definizione di drift massimo (δu), differenziato secondo quanto previsto nelle normative vigenti a seconda del meccanismo di danneggiamento agente sul pannello;
- eliminazione dell'elemento, al raggiungimento delle condizioni limite senza interruzione dell'analisi.

Il comportamento non lineare si attiva quando la forza raggiunge il massimo valore resistente dell'elemento, definito come il minimo fra i criteri di rottura a pressoflessione e taglio.

Il legame costitutivo del materiale utilizzato nell'analisi è di tipo multilineare e prevede il degrado della resistenza ad un valore residuo (rappresentativo dei meccanismi di rottura a taglio e pressoflessione dei maschi murari e delle fasce di piano, così come definito nella Circolare n.7 del 21.01.2019 al §C8.7.1.3.1).

Analisi incrementale a collasso

Si è proceduto ad eseguire l'analisi statica non lineare (pushover) e a verificare l'edificio in esame mediante le curve di capacità ottenute per le diverse condizioni di carico previste dalla normativa (24 analisi, distinte per tipologia di carico, direzione del sisma ed eventuale eccentricità accidentale).

Le condizioni di carico considerano due distribuzioni di forze d'inerzia, ricadenti una nelle distribuzioni principali (Gruppo 1) e l'altra nelle distribuzioni secondarie (Gruppo 2). In particolare:

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

La curva di capacità è stata individuata mediante il diagramma spostamento-taglio massimo alla base. L'analisi, eseguita in controllo di spostamento, ha proceduto al calcolo della distribuzione di forze che genera il valore dello spostamento massimo richiesto dalla normativa individuato dallo spettro elastico (D_{max}) e continua fino al decadimento del taglio alla base all'80% dal suo valore di picco, limite convenzionale che determina lo spostamento ultimo dell'edificio (D_u). Lo spostamento preso in esame convenzionalmente per il tracciamento della curva di capacità è stato quello di un nodo scelto in posizione planimetricamente centrale, a livello della copertura del fabbricato.

Si riassumono di seguito i principali risultati ottenuti, rimandando alla letteratura tecnica di settore per quanto riguarda gli aspetti teorici alla base delle analisi statiche non lineari.

Tabella 1 - Tabella riassuntiva dei risultati delle analisi eseguite sul fabbricato allo stato di fatto.

N.	Dir. sisma	Car. sismico prop.	Ecc. [cm]	SLC				SLV				SLD			SLO		
				D_{max} SLC [cm]	D_u SLC [cm]	q^* SLC	SLC ver.	D_{max} SLV [cm]	D_u SLV [cm]	q^* SLV	SLV ver.	D_{max} SLD [cm]	D_u SLD [cm]	SLD ver.	D_{max} SLO [cm]	D_u SLO [cm]	SLO ver.
1	+X	Uniforme	0,0	1,66	1,92	1,57	Si	1,18	1,44	1,57	Si	0,34	0,60	Si	0,26	0,40	Si
2	+X	Forze statiche	0,0	2,11	2,37	1,66	Si	1,54	1,78	1,66	Si	0,47	0,79	Si	0,36	0,52	Si
3	-X	Uniforme	0,0	1,72	2,00	1,58	Si	1,23	1,50	1,58	Si	0,36	0,62	Si	0,27	0,42	Si
4	-X	Forze statiche	0,0	2,28	2,63	1,76	Si	1,68	1,97	1,76	Si	0,52	0,81	Si	0,39	0,54	Si
5	+Y	Uniforme	0,0	1,29	0,58	1,96	No	0,91	0,44	1,96	No	0,21	0,29	Si	0,16	0,20	Si
6	+Y	Forze statiche	0,0	1,44	0,74	1,83	No	1,02	0,55	1,83	No	0,26	0,35	Si	0,20	0,24	Si
7	-Y	Uniforme	0,0	1,18	0,79	1,63	No	0,82	0,59	1,63	No	0,20	0,34	Si	0,15	0,23	Si
8	-Y	Forze statiche	0,0	1,39	1,23	1,80	No	0,98	0,92	1,80	No	0,24	0,32	Si	0,19	0,22	Si
9	+X	Uniforme	79,6	1,67	1,53	1,61	No	1,19	1,15	1,61	No	0,34	0,58	Si	0,26	0,38	Si
10	+X	Uniforme	-79,6	1,72	2,00	1,58	Si	1,23	1,50	1,58	Si	0,35	0,62	Si	0,27	0,41	Si
11	+X	Forze statiche	79,6	2,12	1,76	1,73	No	1,55	1,32	1,73	No	0,47	0,75	Si	0,36	0,50	Si
12	+X	Forze statiche	-79,6	2,20	2,84	1,67	Si	1,62	2,13	1,67	Si	0,50	0,83	Si	0,38	0,55	Si
13	-X	Uniforme	79,6	1,74	1,84	1,70	Si	1,25	1,38	1,70	Si	0,35	0,57	Si	0,27	0,38	Si
14	-X	Uniforme	-79,6	1,71	2,11	1,57	Si	1,22	1,58	1,57	Si	0,35	0,63	Si	0,27	0,42	Si
15	-X	Forze statiche	79,6	2,31	2,45	1,69	Si	1,70	1,84	1,69	Si	0,53	0,87	Si	0,41	0,58	Si
16	-X	Forze statiche	-79,6	2,15	2,38	1,82	Si	1,57	1,78	1,82	Si	0,47	0,72	Si	0,36	0,48	Si
17	+Y	Uniforme	120,0	1,28	0,61	1,97	No	0,90	0,45	1,97	No	0,21	0,29	Si	0,16	0,19	Si
18	+Y	Uniforme	-120,0	1,23	0,58	1,80	No	0,86	0,43	1,80	No	0,20	0,31	Si	0,15	0,21	Si
19	+Y	Forze statiche	120,0	1,46	0,78	1,94	No	1,04	0,58	1,94	No	0,26	0,32	Si	0,20	0,21	Si
20	+Y	Forze statiche	-120,0	1,48	0,65	2,01	No	1,05	0,49	2,01	No	0,26	0,36	Si	0,20	0,24	Si
21	-Y	Uniforme	120,0	1,20	0,76	1,81	No	0,83	0,57	1,81	No	0,19	0,30	Si	0,15	0,20	Si
22	-Y	Uniforme	-120,0	1,11	0,85	1,49	No	0,76	0,64	1,49	No	0,19	0,36	Si	0,15	0,24	Si
23	-Y	Forze statiche	120,0	1,41	1,18	2,05	No	1,00	0,89	2,05	No	0,24	0,32	Si	0,18	0,21	Si
24	-Y	Forze statiche	-120,0	1,32	1,36	1,56	Si	0,92	1,02	1,56	Si	0,24	0,37	Si	0,19	0,25	Si

Dalla tabella riassuntiva dei risultati sopra riportata si osserva che in 13 casi su 24 le verifiche non sono soddisfatte agli stati limite SLC/SLV, mentre sono in ogni caso soddisfatte per gli stati limite SLD/SLO. La direzione sismica ortogonale allo sviluppo dell'aggregato (Y) risulta più critica, con 11 analisi non soddisfatte. Le analisi più gravose sono la n°.11 (X) e la n°.20 (Y), per le quali si ha il minimo valore del parametro di vulnerabilità sismica $\alpha_{PGA-SLC} = PGA_c/PGA_d$ (=0.55 allo SLC).

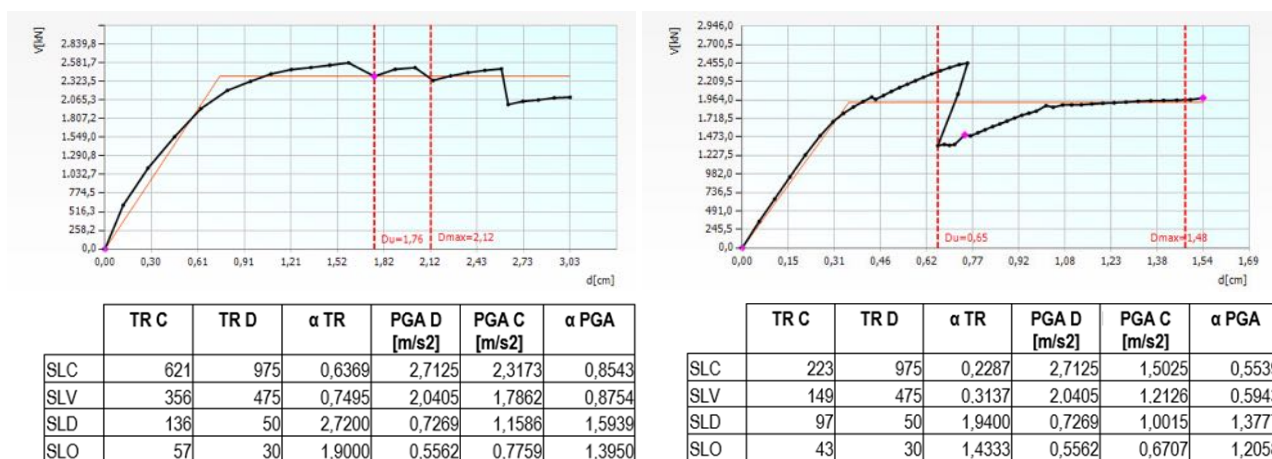


Figura 5 - Curve di capacità SLC e indici di vulnerabilità sismici: analisi statica non lineare n°11 a sinistra e n°20 a destra (stato di fatto). Si osserva l'andamento irregolare delle curve indicatore di potenziali errori numerici occorsi durante il calcolo (es. presenza di labilità locali interne).

L'intervento di adeguamento sismico in progetto

Si riporta l'elenco sintetico dei principali interventi strutturali previsti nel progetto e adottati con l'obiettivo di raggiungere l'adeguamento sismico del fabbricato.

- Sottofondazioni in c.a. sulle murature portanti esistenti e nuove fondazioni (travi o plinti in c.a.) realizzate in corrispondenza dei nuovi elementi verticali portanti previsti in progetto.
- Consolidamento diffuso delle murature con iniezioni di boiacca di calce e intonaco fibro-rinforzato con inserimento di connettori passanti.
- Ripristino locale della tessitura muraria mediante interventi di tipo "cuci-scuci" in presenza di fessure/crepe, elementi estranei (es. lignei), nicchie, cavità, canne fumarie o simili.
- Demolizioni di alcune pareti e ricostruzione con laterizio semipieno, cordoli in c.a. ovvero con telai in acciaio.
- Generale riposizionamento piano-altimetrico delle aperture (porte e finestre) con inserimento di cerchiature rigide laddove necessario.
- Demolizione di tutti i solai di piano esistenti e ricostruzione alle quote di progetto, con travi in legno e acciaio e irrigidimento mediante doppio tavolato incrociato.
- Demolizione della copertura esistente e ricostruzione con travi portanti in legno e acciaio, poggianti su nuovi cordoli perimetrali in c.a. ben ammortati alla muratura.
- Demolizione delle scale esistenti e ricostruzione nelle posizioni di progetto. È prevista l'installazione di un ascensore a servizio dei 3 piani del fabbricato, con vano corsa realizzato da un nucleo a C in muratura portante di nuova realizzazione.

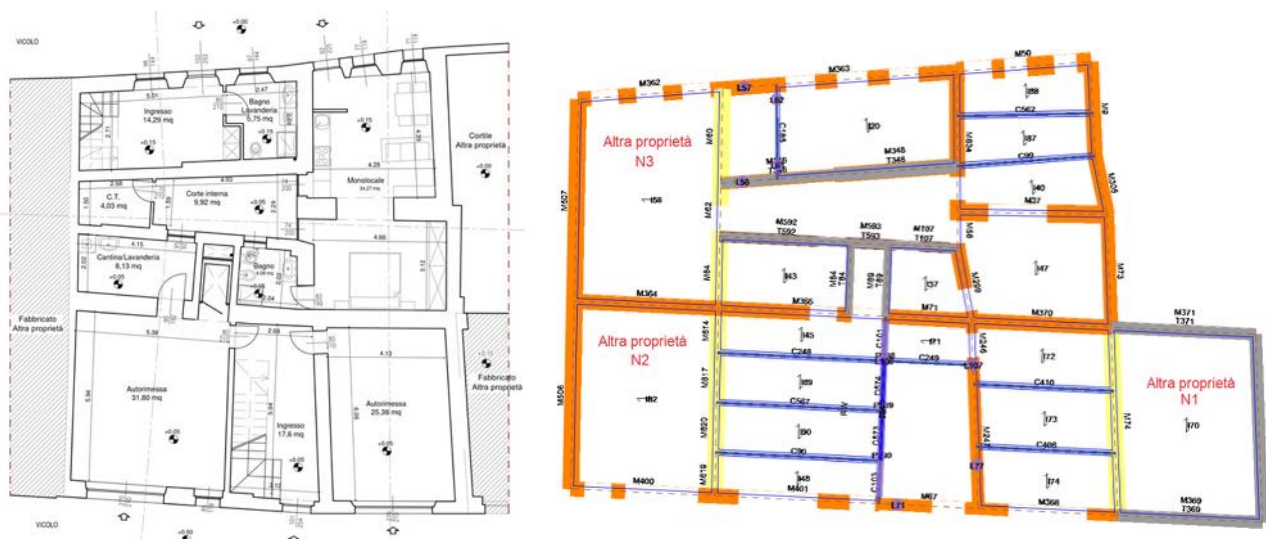


Figura 6 – Planimetria del Piano Terra: stato di progetto e corrispondente modello di calcolo FME.

La scelta ed il progetto degli interventi non è oggetto del presente articolo, nel quale riportiamo solamente i risultati dell'analisi sismica allo stato di progetto.

Tabella 2 - Tabella riassuntiva dei risultati delle analisi eseguite sul fabbricato allo stato di progetto.

N.	Dir. sisma	Car. sismico prop.	Ecc. [cm]	SLC				SLV				SLD			SLO		
				Dmax SLC [cm]	Du SLC [cm]	q* SLC	SLC ver.	Dmax SLV [cm]	Du SLV [cm]	q* SLV	SLV ver.	Dmax SLD [cm]	Dd SLD [cm]	SLD ver.	Dmax SLO [cm]	Dd SLO [cm]	SLO ver.
1	+X	Uniforme	0,0	0,84	1,49	1,26	Si	0,55	1,12	1,26	Si	0,14	0,30	Si	0,11	0,20	Si
2	+X	Forze statiche	0,0	1,15	2,06	1,35	Si	0,75	1,54	1,35	Si	0,19	0,39	Si	0,14	0,26	Si
3	-X	Uniforme	0,0	0,96	1,68	1,40	Si	0,64	1,26	1,40	Si	0,15	0,29	Si	0,11	0,20	Si
4	-X	Forze statiche	0,0	1,28	2,26	1,51	Si	0,85	1,70	1,51	Si	0,20	0,37	Si	0,15	0,25	Si
5	+Y	Uniforme	0,0	0,82	1,55	1,27	Si	0,53	1,16	1,27	Si	0,14	0,30	Si	0,10	0,20	Si
6	+Y	Forze statiche	0,0	1,05	1,83	1,39	Si	0,68	1,37	1,39	Si	0,17	0,33	Si	0,13	0,22	Si
7	-Y	Uniforme	0,0	0,74	1,28	1,19	Si	0,47	0,96	1,19	Si	0,13	0,30	Si	0,10	0,20	Si
8	-Y	Forze statiche	0,0	1,02	1,81	1,31	Si	0,66	1,36	1,31	Si	0,17	0,36	Si	0,13	0,24	Si
9	+X	Uniforme	79,6	0,80	1,51	1,25	Si	0,51	1,13	1,25	Si	0,13	0,29	Si	0,10	0,19	Si
10	+X	Uniforme	-79,6	0,89	1,48	1,29	Si	0,58	1,11	1,29	Si	0,14	0,31	Si	0,11	0,21	Si
11	+X	Forze statiche	79,6	1,13	2,08	1,36	Si	0,73	1,56	1,36	Si	0,18	0,37	Si	0,14	0,25	Si
12	+X	Forze statiche	-79,6	1,18	2,15	1,37	Si	0,77	1,61	1,37	Si	0,19	0,39	Si	0,15	0,26	Si
13	-X	Uniforme	79,6	0,95	1,71	1,37	Si	0,63	1,28	1,37	Si	0,15	0,30	Si	0,11	0,20	Si
14	-X	Uniforme	-79,6	1,01	1,68	1,40	Si	0,67	1,26	1,40	Si	0,15	0,31	Si	0,12	0,20	Si
15	-X	Forze statiche	79,6	1,26	2,28	1,50	Si	0,84	1,71	1,50	Si	0,20	0,37	Si	0,15	0,24	Si
16	-X	Forze statiche	-79,6	1,28	2,34	1,53	Si	0,86	1,76	1,53	Si	0,20	0,36	Si	0,15	0,24	Si
17	+Y	Uniforme	120,0	0,80	1,28	1,23	Si	0,51	0,96	1,23	Si	0,14	0,30	Si	0,10	0,20	Si
18	+Y	Uniforme	-120,0	0,85	1,38	1,30	Si	0,55	1,03	1,30	Si	0,14	0,29	Si	0,10	0,20	Si
19	+Y	Forze statiche	120,0	1,08	1,45	1,46	Si	0,71	1,09	1,46	Si	0,17	0,32	Si	0,13	0,21	Si
20	+Y	Forze statiche	-120,0	1,04	1,76	1,36	Si	0,68	1,32	1,36	Si	0,17	0,34	Si	0,13	0,23	Si
21	-Y	Uniforme	120,0	0,80	1,01	1,30	Si	0,52	0,75	1,30	Si	0,13	0,27	Si	0,10	0,18	Si
22	-Y	Uniforme	-120,0	0,70	1,08	1,13	Si	0,43	0,81	1,13	Si	0,13	0,31	Si	0,10	0,21	Si
23	-Y	Forze statiche	120,0	1,10	1,59	1,41	Si	0,72	1,19	1,41	Si	0,18	0,35	Si	0,14	0,23	Si
24	-Y	Forze statiche	-120,0	0,98	1,88	1,30	Si	0,63	1,41	1,30	Si	0,16	0,35	Si	0,12	0,23	Si

Dalla tabella riassuntiva dei risultati sopra riportata si osserva che le 24 analisi sono sempre soddisfatte. Le analisi più gravose sono la n°.10 (X) e la n°.21 (Y), per le quali si ha il minimo valore del parametro di vulnerabilità sismica $\alpha_{PGA-SLC} = PGA_c/PGA_d (=1.15 \text{ allo SLC})$.

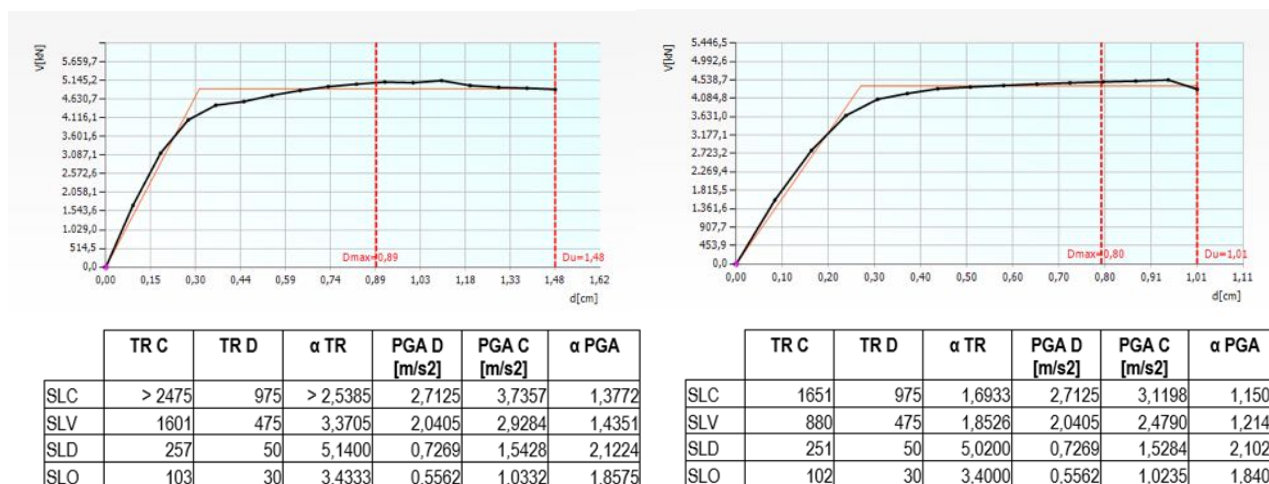


Figura 7 - Curve di capacità SLC e indici di vulnerabilità sismici: analisi statica non lineare n°10 a sinistra e n°21 a destra (stato di progetto).

Applicazione delle Linee Guida allegate al DM n.24 del 09/01/2020

Alla luce dei risultati ottenuti dall'analisi globale della costruzione allo stato di fatto e di progetto, è possibile quantificare l'effetto di mitigazione del rischio sismico secondo le Linee Guida approvate con DM n.65 del 07/03/2017 e riproposte nel DM n.24 del 09/01/2020, valutando l'idoneità dell'intervento al "Sismabonus".

La determinazione della Classe di Rischio dell'edificio in esame è stata condotta mediante il metodo convenzionale, facendo riferimento ai due parametri:

- Perdita Annuale Media attesa (PAM), che tiene in considerazione le perdite economiche associate ai danni agli elementi, strutturali e non, e riferite al costo di ricostruzione (CR) dell'edificio privo del suo contenuto (8 classi, con perdita crescente dalla lettera A+ alla lettera G).
- Indice di Sicurezza (IS-V) della struttura, equivalente al parametro di vulnerabilità sismica per lo Stato Limite di salvaguardia della Vita ($IS-V = \alpha_{PGA} = PGA_c / PGA_d$) (7 classi, con perdita crescente dalla lettera A+ alla lettera F).

Si individua la Classe di Rischio della costruzione come la peggiore tra la Classe PAM e la Classe IS-V.

Gli interventi strutturali in progetto hanno lo scopo di mitigare il rischio, con effetti su entrambi i parametri. L'utilizzo del metodo convenzionale comporta l'onere di eseguire l'analisi globale sismica della costruzione, indipendentemente da come l'intervento strutturale si inquadri nell'ambito delle Norme Tecniche per le Costruzioni (adeguamento, miglioramento o intervento locale). Pertanto, anche laddove si eseguano degli interventi locali di rafforzamento, che ai sensi delle suddette norme (punto 8.4.3) richiedono solo la verifica a livello locale, deve essere comunque eseguita la verifica globale, esclusivamente per attribuire la Classe di Rischio e senza in alcun altro modo incidere sulle procedure amministrative previste per tali interventi.

Per lo stesso motivo, nel caso analizzato di adeguamento sismico è stato necessario eseguire anche la verifica globale allo stato di fatto, in modo da quantificare la riduzione della Classe di Rischio conseguita.

Senza pretesa di completezza nel riportare qui la teoria alla base del calcolo dei parametri PAM e IS-V (per approfondire si rimanda all'Allegato A del D.M. n.24 del 09/01/2020), si riassumono di seguito i principali risultati ottenuti per il fabbricato in oggetto.

PRE-INTERVENTO:

Stato limite	SLR	SLC	SLV	SLD	SLO	SLID
Analisi più gravosa	-	20 (Y+)	20 (Y+)	19 (Y+)	19 (Y+)	-
α_{min}	-	0.554	0.594	1.224	1.072	-
TR_c [anni]	-	223	149	75	34	10
TR_D [anni]	-	975	475	50	30	-
PGA_c [m/s]	-	-	1.2126	-	-	-
PGA_D [m/s]	-	-	2.0405	-	-	-
CR [%]	100%	80%	50%	15%	7%	0%
$\lambda = 1/TR_c$	0.45%	0.45%	0.67%	1.33%	2.94%	10.00%

INDICE DI SICUREZZA DELLA STRUTTURA (IS-SLV)

PGA_c / PGA_D [%]	59.43%
Classe di rischio IS-V	C

PERDITA ANNUALE MEDIA ATTESA (PAM)

PAM [%]	1.23%
Classe di rischio PAM	B

$$PAM = \sum_{i=2}^5 [\lambda(SL_i) - \lambda(SL_{i+1})] * [CR(SL_i) + CR(SL_{i+1})]/2 + \lambda(SLC) * CR(SLR)$$

POST-INTERVENTO:

Stato limite	SLR	SLC	SLV	SLD	SLO	SLID
Analisi più gravosa	-	21 (Y-)	21 (Y-)	16 (X-)	16 (X-)	-
α_{min}	-	1.150	1.215	1.807	1.581	-
TR_c [anni]	-	1651	880	179	73	10
TR_D [anni]	-	975	475	50	30	-
PGA_c [m/s]	-	-	2.4790	-	-	-
PGA_D [m/s]	-	-	2.0405	-	-	-
CR [%]	100%	80%	50%	15%	7%	0%
$\lambda = 1/TR_c$	0.06%	0.06%	0.11%	0.56%	1.37%	10.00%

INDICE DI SICUREZZA DELLA STRUTTURA (IS-SLV)

PGA_c / PGA_D [%]	121.49%
Classe di rischio IS-V	A+

PERDITA ANNUALE MEDIA ATTESA (PAM)

PAM [%]	0.63%
Classe di rischio PAM	A

Gli interventi strutturali in progetto **riducono di 2 classi il rischio sismico** globale associato al fabbricato.



In particolare:

- la classe IS-V passa dalla C alla A+
- la classe PAM passa dalla B alla A

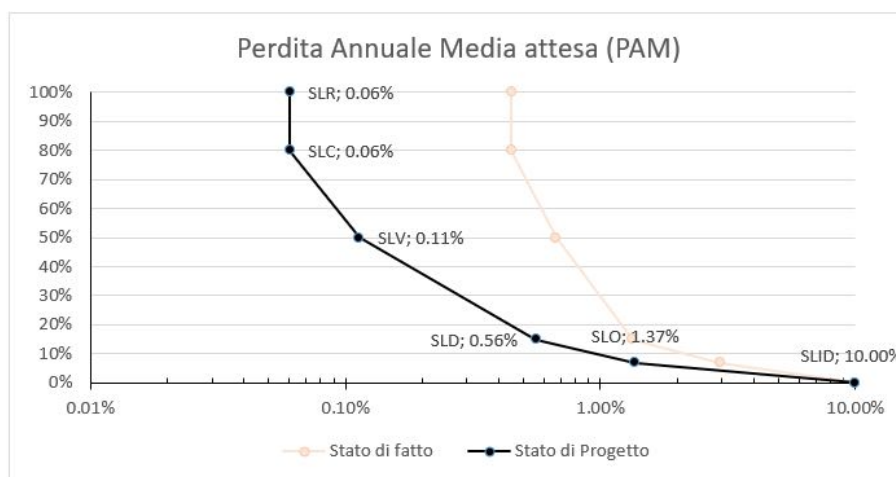


Figura 8 - Confronto tra curve PAM: si nota la riduzione dell'area sottesa, a indicare la riduzione delle perdite attese tra stato di fatto e di progetto.

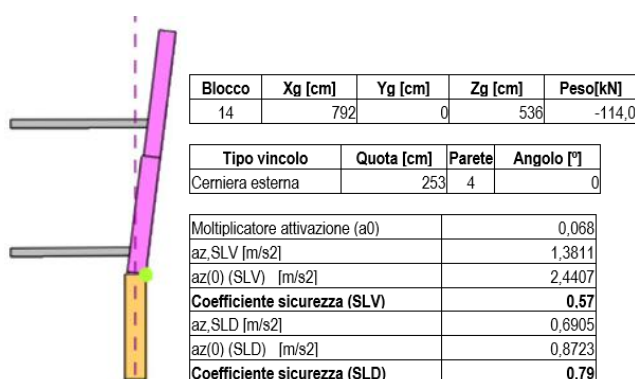
Osservazioni sui risultati

Nel calcolo della Classe di Rischio sono stati considerati i risultati assoluti più gravosi (TR_C , PGA_C) ottenuti delle 24 analisi statiche non lineari per i diversi Stati Limite, indipendentemente dalle altre condizioni di calcolo.

Gli interventi in progetto portano ad una riduzione complessiva della vulnerabilità sismica (e del conseguente rischio), ma presi singolarmente non tutti hanno il medesimo effetto. Interventi quali l'irrigidimento dei solai di piano, il consolidamento diffuso delle murature, i cordoli rigidi perimetrali a livello della copertura etc. portano beneficio nella risposta sismica globale del fabbricato, mentre ad esempio la realizzazione di nuove aperture di dimensioni anche significative nei maschi murari, l'incremento di peso dei solai di piano etc. ne riducono l'efficacia.

Si sottolinea inoltre che, ai sensi delle Norme Tecniche per le Costruzioni, affinché possa attivarsi il comportamento globale del fabbricato (ipotesi di base dell'analisi incrementale a collasso) è necessario che siano stati preliminarmente eliminati i meccanismi locali, la cui attivazione potrebbe impedire una risposta strutturale d'insieme. Per il caso in esame questo è verificato nella situazione post-intervento, ma non allo stato di fatto (l'assenza di cordoli rigidi a livello della copertura rende la struttura sensibile a meccanismi di ribaltamento delle pareti perimetrali parziali o totali). Indicatore di ciò è anche l'andamento molto irregolare delle curve di capacità allo stato di fatto (si confronti Figura 5 con Figura 7).

PRE-INTERVENTO:



POST-INTERVENTO:



Figura 9 – Esempio di meccanismo di collasso della parete esterna. Ribaltamento nella condizione pre-intervento ($FS=0,57$); flessione verticale nella condizione post-intervento (vincoli efficaci in fondazione e al cordolo sotto-copertura, $FS=1,18$).

Allo stesso modo, la valutazione dei cinematismi locali (meccanismi di 1° modo), assume significato se è garantita la qualità e il grado di interconnessione nella tessitura muraria (blocchi e malta), tale da impedire collassi per disgregazione dei paramenti. Questo non è garantito allo stato di fatto (tipologia muraria in pietrame arrotondato con tessitura disordinata e presenza di malte scadenti).

Si riscontra inoltre che allo stato di fatto i paramenti più snelli, ad esempio quelli affacciati al cavedio interno, non risultano verificati nemmeno per i carichi statici (non soddisfatte le verifiche di eccentricità e di resistenza ai carichi verticali). In questa condizione l'indice di sicurezza IS-V risulterebbe pari a zero e il parametro PAM non sarebbe calcolabile, rendendo inutile l'esecuzione di una più complessa analisi sismica non lineare.

Alla luce di quanto sopra evidenziato, volendo rifarsi alle Linee Guida del D.M. n.24/2020 e non trovando specifiche indicazioni a riguardo, i risultati ottenuti dall'analisi statica non lineare allo stato di fatto possono

essere intesi come un “limite superiore convenzionale” della resistenza sismica dell’insieme strutturale, avendo implicitamente considerato un comportamento globale unitario del fabbricato esistente non perfettamente realistico. Perciò anche la conseguente Classe di Rischio sismico ottenuta (classe C) dovrebbe intendersi come la classe migliore a cui l’edificio può appartenere.

In modo più rigoroso invece, non sarebbe possibile eseguire l’analisi incrementale a collasso allo stato di fatto essendo disattese le ipotesi fondanti del metodo di calcolo.

Risulterebbe quindi più corretto, a parere degli scriventi, assumere che il fabbricato in esame ricada automaticamente nella Classe di Rischio peggiore (G), risparmiando l’onere di analisi sismiche complesse e non del tutto realistiche.