Committente:

COMUNE AURIGO

PROV. IMPERIA
P.IVA 00249310087

Progetto:

PROGETTO PER LA MESSA IN SICUREZZA DI AREA IN CENTRO STORICO INTERESSATA DA DISSESTO STATICO E OBSOLESCENZA CON RECUPERO A FINE DI SERVIZIO PUBBLICO-SOCIALE E RIDUZIONE DELLA IMPERMEABILIZZAZIONE DEL SUOLO

(ai sensi dell'art.41, Allegato I.7 D.lgs. 31 marzo 2023 - 36/2023)

CUP: B66F25000100001

RELAZIONE TECNICA INDIRIZZI PER IL CALCOLO DEGLI EDIFICI UNITA' STRUTTURALI DOPO LE DEMOLIZIONI

DATA PROGETTO
Settembre 2026

ELABORATO
AUR-PF-02_2

Rev.	DATA	DESCRIZIONE	STATO
		EMISSIONE	

	Responsabile Unico Progetto Responsabile Ufficio Tecnico Dott. Gabriele Pellegatta
Coordinamento attività generali architettoniche ambientali archeologiche Studio architettura Archh Associati Via San Luca, 12/3 – 16142 – Genova (Ge) Responsabile: Arch. Lorenzo Agnese timbro	Coordinamento attività generali strutturali coord. sicurezza Studio Ing. Augusto Forno Via Guglielmo Silva, 29 – 20149 – Milano (Mi) Responsabile: Ing. Augusto Forno timbro
Coordinamento attività generali geologiche Studio Geologia Lionello Belmonte Via Belgrano, 13 – 18100 – Imperia (Im) Responsabile: Geol. Lionello Belmonte timbro	Coordinamento attività generali topografiche Studio……..…… ……. Responsabile: Geom.……timbro

VISTI E APPROVAZIONI ATTO C.C. DEL ..... DELIBERA G.C. N. DEL .....

Sommario

1. EDIFICI IN AGGREGATO OGGETTO DI GRAVE DISSESTO STATICO CON PARTI GIA' COLLASSATE 3
1.1. Introduzione 3
1.2. Evoluzione del metodo di inquadramento del modello strutturale di analisi 5
2. ASPETTI GEOLOGICI, GEOMORFOLOGICI E DI CARATTERIZZAZIONE SISMICA DEL SITO INDAGATO 8
2.1. Aspetti geologici e geomorfologici 8
2.2. Caratterizzazione sismica del sito 9
3. IDENTIFICAZIONE DELL'ORGANISMO STRUTTURALE IN FONDAZIONE 10
3.1. Premessa 10
3.2. Le indagini in sito 10
3.3. Considerazioni preliminari alle verifiche 11
4. IDENTIFICAZIONE DELL'ORGANISMO STRUTTURALE IN ELEVAZIONE 11
4.1. Premessa 11
4.2. Le indagini in sito 12
5. IL TRATTO DI SCHIERA INDAGATA 14
5.1. Definizione delle proprietà dei materiali 14
6. ANALISI AGLI ELEMENTI FINITI 15
6.1. Introduzione 15
6.2. Schematizzazione dei vincoli e modellazione del terreno 16
6.3. Modelli di studio 16
6.4. Analisi dinamica modale 16
6.5. Valutazione delle rigidezze nell'aggregato 17
6.6. Osservazioni conclusive sui risultati attesi della modellazione FEM 17
7. MODELLO A MACROELEMENTI 18
7.1. Introduzione 18
7.2. Confronto tra modello "FEM" e modello a macroelementi 19
8. CONCLUSIONI 21

1. EDIFICI IN AGGREGATO OGGETTO DI GRAVE DISSESTO STATICO CON PARTI GIA' COLLASSATE

1.1. Introduzione

Gli edifici oggetto del progetto di demolizione e recupero risultano essere posizionati all'interno del perimetro del centro abitato di Aurigo.

Tale area ha accessi praticamente solo pedonali o che consentono il transito di piccoli dumper o motocarriole.

Di seguito si riporta l'immagine area del sito dei fabbricati fatiscenti e interessato da crolli totali o parziali che è stato delimitato con linea gialla.



Fig. 1 vista aerea ortofoto del cratere dei crolli nel centro storico

Più specificatamente, il borgo risulta edificato come è riportato nel paragrafo successivo, con la costruzione di edifici quasi contemporaneamente in aderenza e contigui secondo un processo evolutivo che sarà meglio descritto nel seguito.

Foto e disegni successivi chiariranno più adeguatamente l'integrazione e l'interazione con le strutture storiche dell'aggregato.

Di seguito si riporta la mappa catastale.



Fig. 2 estratto mappa catastale

Dal punto di vista planimetrico, risulta aggregato in una schiera a caratterizzazione lineare, in posizione intermedia rispetto ad altri edifici circa coevi.

La nascita degli edifici in oggetto, così come degli edifici adiacenti, è presumibilmente riconducibile alla seconda metà del 1000. Il nucleo storico del Comune raggiunge la configurazione volumetrica attuale alla fine dell'800 dove, resta praticamente inalterato ad eccezione di manutenzioni interne dei fabbricati fino ad oggi.

A parte ridotti interventi di manutenzione nel passato, per le strutture contigue e per le strutture oggetto dell'intervento invece non sono stati oggetto di significativi interventi manutentivi ma solo di qualche intervento di riparazione solo locale senza alcuna organicità, data la frammentarietà della proprietà edilizia, per essere, per alcuni di essi, poi completamente lasciati in abbandono generando crolli a catena.

Dal punto di vista distributivo-funzionale gli edifici sono generalmente composti da due-tre piani fuori terra in cui si trovano le zone abitate e tutti generalmente provvisti da un piano parzialmente seminterrato destinato a ricovero materiali e nel secolo scorso e primo anteguerra adibiti anche a stalle.

Dal punto di vista costruttivo gli edifici dell'aggregato presentano setti murari in muratura mista di pietre arenacee sbozzate e qualche volta squadrate e solo in minima parte rari mattoni.

Gli orizzontamenti sono quelli tipici, in travi di legno e tavolato di calpestio, e sono presenti solai realizzati in camera canna con chiodatura all'intradosso delle travi principali e successiva intonacatura, ad eccezione di quelli al piano terra in cui sono presenti solai anche voltati, ad eccezione di qualche raro solaio in latero cemento che era stato ricostruito con un solaio tipo SAP con pignatte.

I solai di copertura sono generalmente in legno, e con coperture in lastre sottili di ardesia e solo successivamente nel tempo sostituiti con manto in tegole in cotto in prevalenza marsigliesi. Le strutture portanti delle coperture mostrano gravi carenze costruttive e strutturali in quanto presentano molte travi puntellate, capriate ed orditure principali sottodimensionate, elementi lignei fatiscenti.

Per quanto riguarda le finiture si riscontra la presenza di pavimenti in lastre di pietra locale simil ardesia in graniglia di cemento, le pareti interne sono talvolta intonacate con calce e tinteggiate.

La tipologia strutturale affrontata in questo studio ricade esplicitamente nell'ambito delle problematiche di stretta attualità; infatti, a fronte di una normativa che, dopo anni di "stasi", ha subìto una forte accelerazione innovativa, migliorativa senza dubbio ma non per questo scevra da incertezze tecniche ed interpretative, ci si trova comunque a dover affrontare costantemente e pressantemente quello che rimane uno dei principali problemi della realtà edilizia italiana ovvero la conservazione e la tutela del patrimonio edilizio storico.

1.2. Evoluzione del metodo di inquadramento del modello strutturale di analisi

Anche nella realtà nazionale gli aggregati edilizi non rappresentano certo delle singolarità, anzi, nelle organizzazioni urbanistiche dei centri storici italiani ricoprono una posizione di primaria importanza; a tal proposito l'Ordinanza stessa, trattandoli organicamente all'interno del Capitolo 11 al paragrafo 11.5 relativo alla verifica di sicurezza degli edifici esistenti in muratura, ne sottolinea l'importanza e la necessaria attenzione che deve essere riposta ogni volta che si affrontano simili problematiche.

È doveroso a mio avviso cenni storici sulla evoluzione della normativa in merito a come affrontare i problemi relativamente ai fabbricati dei centri storici partendo dalla l'OPCM 3431 sulla prima definizione degli aggregati edilizi:

"11.5.4.3.2 Aggregati edilizi Un aggregato edilizio è costituito da un insieme di parti che sono il risultato di una genesi articolata e non unitaria, dovuta a molteplici fattori (sequenza costruttiva, cambio di materiali, mutate esigenze, avvicendarsi dei proprietari, etc.). Nell'analisi di un edificio facente parte di un aggregato edilizio occorre tenere conto, perciò, delle possibili interazioni derivanti dalla contiguità strutturale con gli edifici adiacenti, connessi o in aderenza ad esso. A tal fine dovrà essere individuata, in via preliminare, l'unità strutturale (US) oggetto di studio, evidenziando le azioni che su di essa possono derivare dalle unità strutturali contigue.

Ove necessario, tale analisi preliminare dovrà considerare l'intero aggregato, al fine di individuare le relative connessioni spaziali fondamentali, con particolare attenzione al contesto ed ai meccanismi di giustapposizione e di sovrapposizione. In particolare, il processo di indagine sugli aggregati edilizi si dovrebbe sviluppare attraverso l'individuazione di diversi strati d'informazione:

- *i rapporti tra i processi di aggregazione ed organizzazione dei tessuti edilizi e l'evoluzione del sistema viario;*
- *i principali eventi che hanno influito sugli aspetti morfologici del costruito storico (fonti storiche);*
- *la morfologia delle strade (andamento, larghezza, flessi planimetrici e disassamenti dei fronti edilizi);*
- *la disposizione e la gerarchia dei cortili (con accesso diretto o da androne) ed il posizionamento delle scale esterne;*
- *l'allineamento delle pareti; verifiche di ortogonalità rispetto ai percorsi viari; individuazione dei prolungamenti, delle rotazioni, delle intersezioni e degli slittamenti degli assi delle pareti (ciò aiuta ad identificare le pareti in relazione alla loro contemporaneità di costruzione e quindi a definire il loro grado di connessione);*
- *i rapporti spaziali elementari delle singole cellule murarie, nonché i rapporti di regolarità, ripetizione, modularità, ai diversi piani (ciò consente di distinguere le cellule originarie da quelle dovute a saturazione successiva);*

- *la forma e la posizione delle bucature nei muri di prospetto: assialità, simmetria, ripetizione (ciò consente di determinare le zone di debolezza nel percorso di trasmissione degli sforzi, nonché di rivelare le modificazioni avvenute nel tempo);*
- *i disassamenti e le rastremazioni delle pareti, i muri poggianti "in falso" sui solai sottostanti, lo sfalsamento di quota tra solai contigui (ciò fornisce indicazioni sia per ricercare possibili fonti di danno in rapporto ai carichi verticali e sismici, sia per affinare l'interpretazione dei meccanismi di aggregazione).*

Per la individuazione dell'US da considerare si terrà conto principalmente della unitarietà del comportamento strutturale di tale porzione di aggregato nei confronti dei carichi, sia statici che dinamici.

A tal fine è importante rilevare la tipologia costruttiva ed il permanere degli elementi caratterizzanti, in modo da indirizzare il progetto degli interventi verso soluzioni congruenti con l'originaria configurazione strutturale.

L'individuazione dell'US deve comunque eseguita caso per caso, in ragione della forma del sistema edilizio di riferimento a cui appartiene l'US (composta da una o più unità immobiliari), della qualità e consistenza degli interventi previsti e con il criterio di minimizzare la frammentazione in interventi singoli.

Il progettista potrà quindi definire la dimensione operativa minima, che talora potrà riguardare l'insieme delle unità immobiliari costituenti il sistema, ed in alcuni casi porzioni più o meno estese del contesto urbano.

L'US dovrà comunque avere continuità da cielo a terra per quanto riguarda il flusso dei carichi verticali e, di norma, sarà delimitata o da spazi aperti, o da giunti strutturali, o da edifici contigui costruiti, ad esempio, con tipologie strutturali diverse, o con materiali diversi, oppure in epoche diverse.

Tra le interazioni strutturali con gli edifici adiacenti si dovranno considerare: carichi (sia verticali che orizzontali, in presenza di sisma) provenienti da solai o da pareti di US adiacenti; spinte di archi e volte appartenenti ad US contigue; spinte provenienti da archi di contrasto o da tiranti ancorati su altri edifici.

La rappresentazione dell'US attraverso piante, alzati e sezioni permetterà di valutare la diffusione delle sollecitazioni e l'interazione fra le US contigue.

Oltre a quanto normalmente previsto per gli edifici non disposti in aggregato, dovranno essere valutati gli effetti di: spinte non contrastate causate da orizzontamenti sfalsati di quota sulle pareti in comune con le US adiacenti; effetti locali causati da prospetti non allineati, o da differenze di altezza o di rigidezza tra US adiacenti, azioni di ribaltamento e di traslazione che interessano le pareti nelle US di testata delle tipologie seriali (schiere).

Dovrà essere considerato inoltre il possibile martellamento nei giunti tra US adiacenti.

L'analisi di una unità strutturale secondo i metodi utilizzati per edifici isolati, senza una adeguata modellazione oppure con una modellazione approssimata dell'interazione con i corpi di fabbrica adiacenti assume un significato convenzionale. Di conseguenza, si ammette che l'analisi della capacità sismica globale dell'US possa essere verificata attraverso metodologie semplificate, come descritto al punto 11.5.5.1.

11.5.5.1 *Verifica globale semplificata per gli edifici in aggregati edilizi*

Nel caso di solai sufficientemente rigidi, la verifica convenzionale allo SLU e allo SLD di un edificio (unità strutturale) in aggregato può essere svolta, anche per edifici con più di due piani, mediante l'analisi statica non lineare analizzando e verificando separatamente ciascun interpiano dell'edificio, e trascurando la variazione della forza assiale nei maschi murari dovuta all'effetto dell'azione sismica.

Con l'esclusione di unità strutturali d'angolo o di testata, così come di parti di edificio non vincolate o non aderenti su alcun lato ad altre unità strutturali (es. piani superiori di un edificio di maggiore altezza rispetto

a tutte le US adiacenti), l'analisi potrà anche essere svolta trascurando gli effetti torsionali, ipotizzando che i solai possano unicamente traslare nella direzione considerata dell'azione sismica.

Qualora i solai dell'edificio siano flessibili si procederà all'analisi delle singole pareti o dei sistemi di pareti complanari che costituiscono l'edificio, ciascuna analizzata come struttura indipendente, soggetta ai carichi verticali di competenza ed all'azione del sisma nella direzione parallela alla parete.

In questo caso l'analisi e le verifiche di ogni singola parete seguiranno i criteri esposti ai punti 8.1.6 e 8.2.2 per gli edifici in muratura ordinaria di nuova costruzione, con le integrazioni riportate al punto 11.5.8."

Per il caso oggetto di studio si è preso in considerazione il perimetro dei fabbricati che delimitano il cratere di crollo ricompreso in un aggregato con disposizione planimetrica a schiera lineare.

Come già anticipato, la caratterizzazione altimetrica rappresenta una complessità limite, sì rintracciabile in altre realtà edilizie storiche liguri, ma che sicuramente mette a dura prova la possibilità di effettuare una analisi globale non semplificata, che rappresenta l'obbiettivo principale della verifica sismica del complesso di edifici ante e post-intervento.

Infatti, il contributo che si vuol dare con il presente capitolo vuole essere quello di mostrare non tanto un approccio univoco o di riferimento per indagare nella migliore un aggregato edilizio tenendo conto di tutte le complessità geometrico strutturali in esso individuabili, quanto invece un percorso di approfondimento necessariamente da effettuare per la delicatezza della tematica in esame.

Tutto parte dal significato che, ormai, assumono le opere sulle quali si fa conto per l'assistenza alla popolazione dopo i terremoti, che si vuole che i fabbricati restino possibilmente funzionali; quindi, senza che si danneggino gravemente; consentendo la salvaguardia della vita umana e alla popolazione.

Questo è ottenuto applicando un'azione sismica di riferimento più elevata proprio perché si consegue, come risultato, che le loro prestazioni siano maggiori di quelle delle costruzioni ordinarie.

Si effettuerà pertanto un percorso per affrontare la verifica sismica dell'Unità Strutturale in esame che sia il più rispettoso possibile delle richieste del p.to 11.5.4.3.2 di cui sopra, non ricorrendo di conseguenza alle semplificazioni ammesse dal successivo punto 11.5.5.1.

Partendo dal presupposto che un'analisi della risposta globale di un edificio in muratura ha significato solo quando sono impediti preventivamente i meccanismi di collasso associati alla risposta dinamica fuori dal piano, cioè lo sviluppo dei meccanismi cosiddetti di "primo modo" ed allora il meccanismo resistente è governato dalla risposta nel piano delle pareti.

In aggiunta, in edifici inseriti in aggregato, la significatività dell'analisi globale non viene meno se si tiene conto dell'interazione con gli edifici adiacenti, o, più correttamente, della parte significativa dell'aggregazione ai fini dell'interazione.

Quest'ultimo aspetto è dominato in prima approssimazione dalla rigidezza degli orizzontamenti.

Come già anticipato precedentemente, l'aggregato edilizio nella sua interezza si presenta con uno sviluppo a schiera lineare, esteso quindi in lunghezza e comunemente definito "a stecca". L'aggregato corre, segnandolo, lungo il confine di due "carruggi" paralleli.

Le singole unità strutturali poste all'interno della schiera presentano, logicamente, le proprie facciate principali con relative zone di accesso nel lato interno al paese, mentre sono invece caratterizzate, sul lato opposto, dalla particolarità di poggiare sulle mura.

Nello scegliere la parte ritenuta significativa ai fini dello studio dell'US di riferimento, i limiti dell'aggregato in esame sono stati individuati da nei lati ricomprendendo ulteriori due edifici adibiti a civile abitazione.

Quello che si anticipa è che mentre l'US oggetto di verifica di questo scritto il complesso di edifici esistenti prima del crollo e dopo le demolizioni per valutare la sicurezza degli edifici rimanenti.

. Nota importante è che la "riduzione" effettuata è soprattutto indirizzata allo studio nella direzione ritenuta più significativa ai fini del comportamento in aggregazione, cioè la trasversale.

Nella pagina seguente si riportano una serie di fotografie della "schiera" realizzate rispettivamente da via……, ……, la strada che fiancheggia l'aggregato sul lato interno al paese.

La prima fase di studio è stata quella della ricerca di documenti con base storico urbanistica, relativi allo sviluppo del tessuto cittadino, più specificatamente, verticalizzati sugli edifici oggetto di studio.

A tal proposito, con la preziosa collaborazione del Comune di Aurigo e degli stessi abitanti delle unità edilizie rilevate in successione, si è giunti in possesso di planimetrie cittadine e dei singoli edifici utili nella comprensione delle modifiche ad ampia scala subite dal tessuto urbano nel corso dei secoli.

La successiva fase è stata quella di rilievo all'interno dei singoli fabbricati, partendo dagli elaborati precedentemente messi a disposizione o effettuando nuove misurazioni, sempre con particolare riferimento agli aspetti strutturali.

È in questa fase che si sono esplicate le particolarità genericamente rintracciabili negli aggregati storici, e più in particolare nella specificità degli edifici oggetto di questo studio, per ciascuna delle US.

La fase di calcolo del progetto esecutivo vuole tracciare un possibile percorso di approfondimento (più che costituire un riferimento univoco) volto alla comprensione dei meccanismi di interazione che possono nascere in compagini strutturali complesse.

2. ASPETTI GEOLOGICI, GEOMORFOLOGICI E DI CARATTERIZZAZIONE SISMICA DEL SITO INDAGATO

2.1. Aspetti geologici e geomorfologici

Pur rimandando alla lettura della relazione specifica sulla caratterizzazione geologica, redatta da geologo, a seguire, si riporta una schematica rappresentazione della sezione lito-stratigrafica trasversale, utile per meglio comprendere la situazione altimetrica e fondale dei fabbricati.

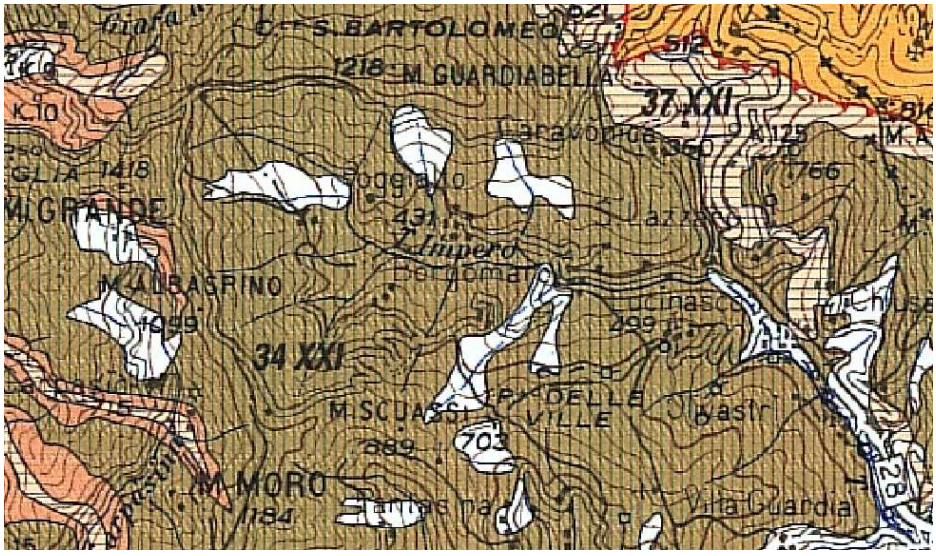


Fig. 3 Estratto da carta geologica Ligure

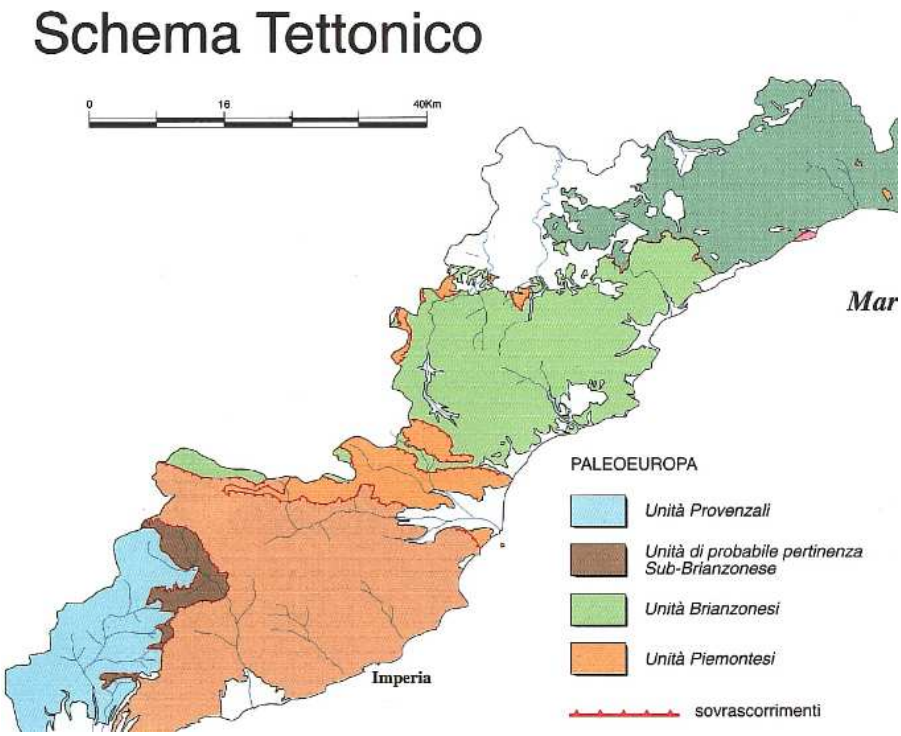


Fig. 4 Sezione lito-stratigrafica

2.2. Caratterizzazione sismica del sito

Viste le condizioni lito-stratigrafiche emerse dalle indagini effettuate, si può classificare il suolo di fondazione, in prima istanza in attesa della relazione geologica, si ipotizza suolo di tipo A, secondo le NTC 2018, al quale si attribuisce un coefficiente di amplificazione S=Ss*St

Gli esiti dell'indagine geologica eseguita sono stati ritenuti sufficienti per l'identificazione univoca, ai fini della risposta sismica locale, della categoria di suolo tra quelle previste dalle NTC.

D'altro canto, considerando le condizioni morfologiche del rilievo preso in esame, le stesse NTC al p.to 3.2.3.1 prevedono St=1,2 poiché il paese si trova sulla sommità di una collina;

Si ha pertanto una amplificazione di 1,2.

Per un terreno di tipo A si hanno i seguenti valori al

SLO= 0,030

SLD=0,043

SLV= 0,158

SLC=0,211

Nel caso specifico la struttura sarà sottoposta anche alla amplificazione così: slv=0,158x1,2 = 0,1896

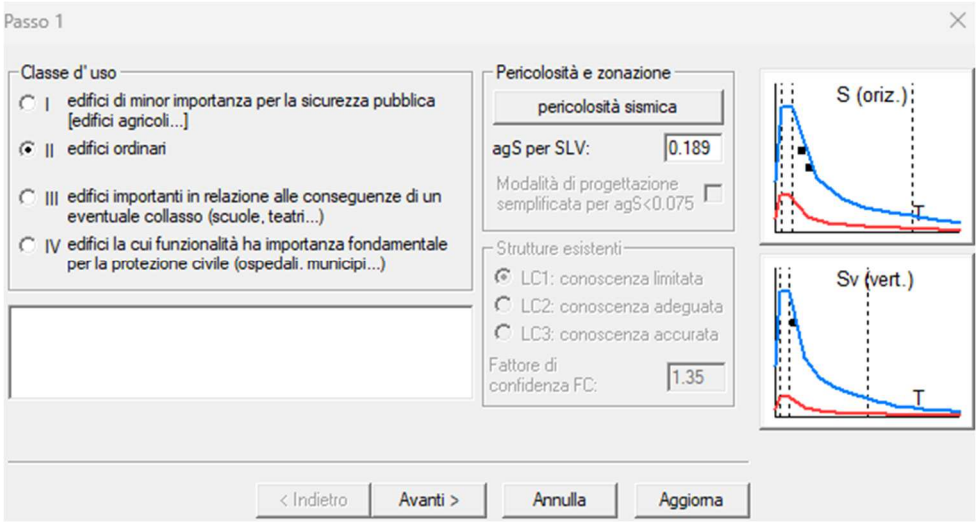


Fig. 5 Accelerogrammi

3. IDENTIFICAZIONE DELL'ORGANISMO STRUTTURALE IN FONDAZIONE

3.1. Premessa

Pur avendo riscontrato inizialmente - in posizioni generiche - la presenza e la consistenza di fondazioni continue, sarà necessaria un'attività di approfondimento aggiuntiva utile a filtrare le incertezze sull'organizzazione fondale ai diversi livelli, stante la complessità altimetrica e il significato "fondale" da attribuire alle murature.

In particolare, nei seminterrati dei diversi edifici indagati, in corrispondenza delle unità strutturali affiancate che si sviluppano per l'intera altezza delle murature.

Il perdurare di tale dubbio costringe allo sviluppo di modelli di calcolo alternativi (con riferimento agli studi effettuati con metodologia FEM) da mettere in confronto con l'adozione di utili adattamenti per l'assunzione di modelli semplificati.

3.2. Le indagini in sito

Come è stato riscontrato dai sondaggi esplorativi eseguiti in vari punti delle zone accessibili, le fondazioni esistenti al di sotto delle murature perimetrali esterne sono di tipo continuo "a muratura ordinata", costituita in pratica da una trincea della larghezza pari a quella della muratura in elevazione e con immorsamento variabile da 1.0 m a 0.5m, rispettivamente in corrispondenza delle murature interne e perimetrali.

L'imposta delle fondazioni è all'interno dei livelli ben addensati, alternati a livelli argilloso-marnosi molto compatti e consistenti, attribuibili alla porzione di tetto della formazione in posto poco o niente alterata.

Il materiale di riempimento della trincea è costituito da pietrame arenaceo di varia grandezza, gettati in modo semi ordinato generalmente senza malta o con leganti prevalentemente di tipo calci povere, all'epoca della costruzione, prodotte localmente.

I paramenti esterni delle murature al contrario sono costituiti da pietre arenacee sbozzate di varia grandezza, talora parzialmente squadrate e disposte abbastanza regolarmente, con malta formata prevalentemente da calce molto povera.

Le strutture fondali al di sotto delle murature meno spesse e comunque interne sono impostate su strutture continue in muratura piena di pietre arenacee generalmente squadrate.

Le fondazioni mostrano un buon grado di conservazione: le pietre arenacee sbozzate si presentano regolari, senza sconnessioni o fratture e lesioni di nessun genere; la malta risulta talora piuttosto sabbiosa e lievemente disgregata per effetto dell'umidità e della qualità povera già in origine.

Con le nuove indagini si sono potute approfondire alcune questioni riguardanti il collegamento a terra, al piano seminterrato, tra le pareti interne di spina (più normalmente interrotte anticipatamente rispetto al lato a valle), in particolare quando c'è collegamento fra le due parti con parete continua od anche con archi in elevazione.

Questo ha permesso di individuare la presenza o meno di archi di scarico interrati, necessari per "scavalcare" la zona di terreno alterata o di riporto incontrate sull'asse delle murature.

3.3. Considerazioni preliminari alle verifiche

Concludendo, confortati anche dall'assenza di cedimenti fondazionali in atto o latenti, si può, in prima approssimazione, dare un giudizio positivo sulla stabilità dell'impianto fondale.

Grazie agli approfondimenti di cui sopra, risulteranno comunque ben validate le ipotesi aprioristiche alla base dei modelli di calcolo delle strutture in elevazione.

I collassi e cedimenti delle strutture murarie si sono verificati solo per una inesistente manutenzione dove per causa di infiltrazioni sulle strutture dei solai si hanno avuti fenomeni di degrado rapido sia delle strutture orizzontali in legno che delle strutture murarie a causa del dilavamento della calce povera legante delle murature in pietrame.

4. IDENTIFICAZIONE DELL'ORGANISMO STRUTTURALE IN ELEVAZIONE

4.1. Premessa

Nell'affrontare lo studio rivolto ad una successiva analisi e verifica sismica di un edificio storico, non si può prescindere da un accurato rilievo strutturale.

Questo va ben oltre il semplice rilievo geometrico, ed intende analizzare tutti gli elementi strutturali componenti l'edificio al fine di ottenere una conoscenza approfondita delle sue risorse, del suo comportamento e del modo di esplicare le sue funzioni.

Si tratterà quindi di approfondire la conoscenza di tutti quegli elementi che costituiscono la fabbrica e cioè le murature, gli orizzontamenti (cioè volte, solai e coperture), i collegamenti verticali e qualsiasi altro elemento che influenzi il comportamento strutturale del fabbricato.

Solo così si ottiene un quadro completo dell'edificio che, unito alle notizie storiche e alle ipotesi rese possibili dall'osservazione diretta, permetterà di descriverne con più precisione la prestazione strutturale, nonché di prevederne la risposta in caso di azioni derivanti da input sismici anche nelle condizioni che le strutture in aggregato vengano a perdere in alcune parti la continuità originaria e quindi occorre valutare quali interventi integrativi debbano essere previsti e messi in atto sugli edifici che è previsto per essi restare in opera dovendo fornire e soddisfare a tutti i requisiti di sicurezza .

È vero comunque che, sempre nel caso specifico di edifici storici, poiché non è esistita una regola costruttiva unitaria, non può esistere, conseguentemente, un modello o uno schema di rilievo da applicare valido per tutte le tipologie.

Ogni edificio ha una sua storia, ha subìto le sue modifiche (volute o imposte dagli eventi), si è trasformato nei secoli.

Fondamentale risulta quindi la preliminare analisi storico-evolutiva dell'edificio stesso, l'individuazione del periodo di costruzione, l'approfondimento delle trasformazioni in esso avvenute e le vicende cui esso è andato incontro, fattori, questi, molto spesso meglio leggibili tramite l'osservazione diretta che non con lo studio dei soli documenti; tutti questi parametri di studio forniscono una conoscenza approfondita della vita del fabbricato, così da poterne valutare capacità e modalità di comportamento.

Per quanto riguarda l'operazione di rilievo geometrico e strutturale in elevazione, questa è stata svolta preliminarmente in ognuno dei sei edifici ricompresi nello studio, appoggiandosi solamente su valutazioni e stime di altri professionisti intervenuti in interventi di messa in sicurezza.

In aggiunta, si dovranno effettuate indagini conoscitive di approfondimento basate sia su rilievi di tipo visivo, realizzate attraverso la rimozione dell'intonaco, ove esistente, e ricorrendo a saggi nella muratura che hanno consentito di esaminarne le caratteristiche in superficie e nello spessore, sia su prove di caratterizzazione meccanica; i risultati saranno comunque di aiuto anche nello studio delle strutture degli edifici adiacenti, di caratteristiche simili dove sono disponibili dati.

A tal proposito, infatti, è la normativa stessa che specifica in due punti del paragrafo *"… Qualora esista una chiara, comprovata corrispondenza tipologica per materiali, pezzatura dei conci, dettagli costruttivi, in sostituzione delle prove sull'edificio oggetto di studio possono essere utilizzate prove eseguite su altri edifici presenti nella zona dell'edificio"*.

4.2. Le indagini in sito

Le fasi di rilievo e indagine sperimentale saranno condotte con la finalità di produrre un'aderente modellazione analitica dell'organismo resistente, nonché con l'intenzione di acquisire informazioni per l'analisi dei carichi e per affrontare le problematiche legate alla definizione dei livelli di conoscenza.

Delle operazioni effettuate, verrà descritta nel presente documento la sola fase di rilievo strutturale geometrico, rimandando, per le indagini conoscitive dei dettagli costruttivi e per le prove sperimentali svolte sui fabbricati ad un allegato specifico.

Tali informazioni storico-evolutive sono state fondamentali per la comprensione di situazioni riscontrate all'esterno ed all'interno degli edifici.

Un interessante studio da condurre in parallelo consentirà di stimare, in fase elastica, i contributi mutui offerti dai singoli edifici in termini di massa e rigidezza, utile apporto, questo, alla comprensione dei meccanismi di interazione, finalizzati anche all'ottenimento di parametri utilizzabili per l'estrazione di modelli semplificati.

Sinteticamente, quindi, è per queste motivazioni che si è ragionevolmente considerato, sin dalle iniziali fasi di approccio, quale aggregato "funzionale", al fine dell'individuazione del primo e più significativo modello limite,

Il rilievo costruttivo evidenzia anche le caratteristiche dei solai di copertura; siamo in presenza esclusivamente di tradizionali solai in legno a semplice orditura, quindi spingenti, con la presenza di travi di legno povere ricavate da tronchi di albero.

Tali coperture risultano a vista, talvolta sono schermate da controsoffittature in canna con intonaco.

Solo una modesta parte al centro dell'area è stata oggetto di interventi più recenti con la presenza di solaio in latero cemento appoggiante sulle murature. La muratura di appoggio verso il lato valle è ora oggetto di destabilizzazione in quanto il muro portante è oggetto di rotazione fuori del piano.

Come desumibile dalla sezione trasversale del fabbricato, siamo in presenza di un livello murario con altezze centrali anche considerevoli, caratterizzato dall'inefficace collegamento realizzato dall'orizzontamento e dalla ridottissima senza presenza di catene.

Il paramento murario presenta talvolta, rispetto al corrispondente del primo piano, una risega tale per cui i suoi spessori passano a valori di 50 cm e 65b cm.

Relativamente invece alla disposizione interna delle strutture portanti, a differenza di quanto accadeva nei due piani superiori, in cui i muri di spina sostanzialmente trovavano completa continuità spostandosi da un livello all'altro, qui le pareti trasversali spesso sviluppano in maniera parziale procedendo verso la via interna.

In aggiunta, in corrispondenza di altri allineamenti, sono rinvenibili "scarichi" di pareti murarie superiori su travi lignee o su piccoli archi, come evidenziato nelle sezioni trasversali e longitudinali a seguire.

Ciò comporta, complessivamente, un'organizzazione della maglia muraria molto più frammentata rispetto ai piani superiori e, soprattutto, con grosse interruzioni delle continuità verticali.

Relativamente all'altezza muraria media dei singoli piani, il valore ridotto riscontrabile in corrispondenza del livello seminterrato ha come conseguenza primaria l'avere pareti con snellezze inferiori rispetto a quelle dei livelli sovrastanti. Si torna infine ad avere nel piano seminterrato un'organizzazione dei solai con strutture lignee a doppia orditura.

Ciò comporterà delle importanti scelte relativamente alle metodologie di analisi utilizzabili e, in particolare, per l'approccio FEM ha portato a servirsi di una modellazione tridimensionale solida, per meglio cogliere le massività presenti e poiché, soprattutto, utile nel dare continuità a geometrie disposte "casualmente".

Nella logica di funzionamento del fabbricato e, ancor più interessante, in quella del funzionamento in aggregazione, lo scarso contributo irrigidente offerto da questi due allineamenti murari interni comporterà delle riflessioni significative, come si descriverà meglio nel paragrafo sui risultati delle analisi.



Fig. 7 foto da drone della parte centrale dei crolli

5. IL TRATTO DI SCHIERA INDAGATA

Si riporta, a conclusione di queste pagine dedicate all'opera di indagine, la rappresentazione dell'intera geometria strutturale, finalizzata alle analisi seguenti.

5.1. Definizione delle proprietà dei materiali

Come detto in apertura del paragrafo precedente, non si riporta il dettaglio degli approfondimenti di indagine realizzati sull'edificio. Anche se non completamente esaustivi nei confronti delle richieste di minimo della norma, per le finalità del documento si intende comunque esaurito il percorso di acquisizione del livello di conoscenza (LC) desiderato, altrimenti compiuto secondo la procedura descritta nel capitolo sull'edificio in muratura in configurazione isolata.

Sulla scorta, quindi, delle prove di caratterizzazione dei materiali da effettuate ed anche in base a quanto riscontrato dalle indagini visive e sui dettagli, ci si è potuti accostare alla tabella Circolare esplicativa della NTC 2018 del 21 gennaio 2019 ed estrarne i parametri numerici tra quelli proposti.

Saranno previste almeno 4 prove con martinetti piatti doppi, da effettuare sulla muratura in pietra, la stima del valore del modulo elastico E sarà fatta considerando le letture, isolando la parte lineare del grafico sforzo-deformazioni unitarie ottenuto per interpolazione dei primi valori (sviluppo lineare).

Il modulo elastico è dato dal valore del coefficiente angolare della linea di tendenza di tale grafico, e cioè pari a: $E = \sigma/\varepsilon$ in N/mm2 che sarà determinato per ogni prova da effettuarsi sui fabbricati perimetrali alla zona di crollo e tali fabbricati devono rimanere operativi.

Ricordando che si giudica raggiunto il livello di conoscenza LC2, per tale livello la Circolare stabilisce quanto segue: "LC2 – Resistenze: medie degli intervalli riportati in tabella della Circolare gennaio 2019 per la tipologia muraria in considerazione; moduli elastici: valori medi degli intervalli riportati nella tabella suddetta."

All'interno dell'aggregato il rilievo visivo e le prove di caratterizzazione materica hanno portato alla individuazione di due tipologie murarie principali: muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari) e muratura ordinata e malta di calce.

I range di valori proposti per questi due tipi di muratura dalla tab. Circolare sono:

Relativamente ai valori della resistenza media a taglio $\tau 0$ e di quella media a compressione fm, la Circolare indica, per un LC2, di assumere il valor medio del range di variazione.

Al riguardo si deve però considerare il giudizio critico espresso dal Prof. Lagomarsino sui bassi valori attribuiti dalla norma alla resistenza a compressione.

Per i moduli elastici E e G, sempre riferendosi all'articolo suddetto, per i valori da assegnare si è scelto di adottare E come valore dimezzato della media del range proposto in Circolare, mentre per G ci si è limitati, considerandolo come valore già fessurato, a determinare semplicemente il valor medio dell'intervallo dato.

Sulla scorta delle considerazioni del Prof. Lagomarsino, tali valori sono ritenuti ben stimati e, inoltre, confermati anche dalla consistente campagna di prove effettuate appositamente dalla Regione Toscana su differenti tipologie murarie.

Passaggio finale, ora, necessario nella definizione ultima dei parametri da utilizzare per la caratterizzazione delle murature, è quello dell'applicazione del Fattore di Confidenza FC, al fine di considerare non solo le incertezze di natura intrinseca della muratura, ma anche quelle di natura epistemica.

In particolare, la Circolare definisce FC, da applicare alle sole resistenze medie dei materiali per il calcolo della capacità della costruzione, in funzione del livello di conoscenza raggiunto nell'edificio in esame, legato alla

quantità ed alla qualità delle informazioni acquisite sulle caratteristiche geometriche degli elementi strutturali, sui dettagli costruttivi e sulle proprietà dei materiali.

Avendo quindi raggiunto un LC2, il fattore FC da adottare, come riportato nelle tabelle valori definitivi, da adottare per i parametri di calcolo delle due tipologie murarie presenti nell'aggregato, saranno quindi definiti

6. ANALISI AGLI ELEMENTI FINITI

6.1. Introduzione

Come anticipato della relazione, la volontà finale dello studio progettuale è quello di mostrare un accostamento possibile all'argomento degli "aggregati edilizi" che non preveda l'utilizzo di metodi semplificati, pur ammessi dalla norma.

Questo perché si è ritenuto più interessante mostrare un percorso di approfondimento relativo al comportamento strutturale dell'edificio in esame (sempre finalizzato alla verifica, ai sensi dell'attività descritta in questa pubblicazione), importante non solo per la tipologia, ma anche per aiutare a comprendere come il mantenimento di destinazioni d'uso all'interno di una schiera con utilizzo più omogeneo (es. abitazioni) possa coinvolgere, nelle scelte progettuali, le US in continuità.

Si affronterà lo studio esecutivo con un percorso duplice, differenziato per metodologia di analisi di base, per diversa complessità di trattamento della geometria strutturale e del comportamento dei materiali, in cui ognuno dei due approcci (ovviamente complementari) mostra limiti e capacità di descrizione del fenomeno, utili per un affinamento reciproco, capace di permettere ad almeno uno dei due iter di arrivare più compiutamente alla finalità della verifica.

I passi fondamentali del processo di discretizzazione e di preparazione di un modello aderente alla logica di questo approccio e quindi quanto più rappresentativo della situazione realmente riscontrata in loco saranno:

- conversione della restituzione 3D del rilievo in un modello di calcolo;
- scelta dei tipi di elementi finiti da adottare;
- definizione dei parametri caratteristici dei materiali;
- determinazione e distribuzione di masse e carichi agenti;
- modellazione dei vincoli presenti;
- rappresentazione in termini di masse e rigidezze del terreno a tergo della schiera ed alla base dei piani di fondazione.

Vista la geometria non regolare delle strutture, le diverse zone massive di transizione dovute alle diverse tipologie costruttive, talvolta i cambi dei materiali e, la differente organizzazione muraria ai piani, si opterà per la creazione di un modello che preveda l'utilizzo di elementi complessi.

Per la muratura, la maglia base consiste nella ripetizione di elementi tetraedrici di tipo, caratterizzati da un element size medio di 40 cm circa.

Per quanto riguarda la modellazione dei solai di orizzontamento e delle falde di copertura, tali strutture avranno rappresentazione attraverso elementi triangolari di tipo "SHELL". Tale modellazione avrà lo scopo di ottenere, di volta in volta a seconda della direzione di orditura, elementi ortotropi con solo comportamento a lastra.

Tale soluzione impostazione mira a imporre una rigidezza finita agli impalcati, differenziata nelle due direzioni, capace di istituire con le murature d'ambito quella relazione che meglio rappresenti il comportamento intermedio fra l'ipotesi di piano infinitamente rigido e l'ipotesi di assenza totale di vincolo realizzata dall'orizzontamento.

Si anticipa che, come facilmente comprensibile, l'effetto di continuità si tramuta in modo naturale in un benefico effetto rispetto al comportamento in isolamento quando riferibile a US omogenee, in occasione di eterogeneità questo, più in dettaglio, può condurre invece a risultati diversi.

Relativamente ai carichi permanenti ed accidentali agenti sulle strutture di impalcato, la loro massa è stata messa in conto attraverso l'applicazione di elementi monodimensionali sulle "linee di scarico", applicati di volta in volta, a seconda delle differenti direzioni di orditura, su paramenti murari o travi.

6.2. Schematizzazione dei vincoli e modellazione del terreno

La complessità organizzativa dell'aggregato e la sua eterogeneità strutturale hanno portato ad una serie di considerazioni necessarie prima di definire uno schema vincolare affidabile e tale, quindi, da poter tener conto dei diversi parametri in gioco.

L'aggregato a schiera oggetto di studio si trova in una posizione singolare, segnando, di conseguenza, un notevole salto di quota tra la stradina più bassa al paese e quella più in alto.

Inoltre, dei cinque edifici analizzati, solo il nucleo centrale sviluppa il proprio volume su tre livelli (dal piano fondazioni, sino al sottotetto) disponendo di uno-due piani semi-interrati, mentre le strutture laterali si limitano ad un numero variabile di piani.

Per questi motivi non è stato possibile uniformare, in termini vincolari e di interazione con il terreno, il comportamento degli edifici, ma, al contrario, si è reso necessario valutare caso per caso le singole situazioni.

Molto sinteticamente, saranno definiti quindi dei vincoli elastici per l'appoggio delle strutture che raggiungono il terreno alle quote superiori e per il contrasto orizzontale delle pareti controterra.

6.3. Modelli di studio

Quando sarà portata a termine quindi la modellazione dell'intero aggregato attraverso la valutazione di tutti i parametri in gioco, propri della struttura e caratteristici del contesto geomorfologico in cui ci si trova, si passerà alla fase relativa alla preparazione dei modelli di studio e di confronto.

Oltre, quindi, al modello più completo relativo ai tre edifici affiancati a formare l'aggregato a schiera, per le finalità comuni e analoghe a quelle dello studio di tesi condotto parallelamente, si realizzeranno una serie di altri sotto modelli per gli approfondimenti del caso.

6.4. Analisi dinamica modale

Secondo quanto indicato dalle NTC 2018, i modelli FEM appena descritti sono stati studiati attraverso un'analisi dinamica modale con successiva applicazione di uno spettro elastico.

I modelli saranno predisposti, oltre ad essere caratterizzati da tutti i parametri finora descritti, sono stati ulteriormente vincolati sulle facce libere di estremità da vincoli nodali di tipo "carrello", tali da impedirne il movimento nella direzione parallela a quella di sviluppo longitudinale della schiera, per le motivazioni date nel seguito.

Si è, infatti, in prima ipotesi, approfondito il comportamento nella direzione di ingresso del sisma che maggiormente risente della problematica della continuità: questo in virtù del fatto che l'aggregato, vista la sua organizzazione a schiera lineare e considerato il suo esteso sviluppo longitudinale (oltre i 2 edifici considerati), sarà capace di evidenziare componenti di spostamento più complessi nella direzione ad esso ortogonale. Questi vincoli di tipo carrello (a livello nodale, riconducibili ad un vincolo di tipo "pattino" per l'intera parete), quindi, forzando gli spostamenti proprio in questa direzione, consentono, soprattutto per i modelli parziali, di evitare fenomeni rotazionali (torsionali) che nella realtà la conformazione stessa della schiera farà sì che non sussistano; tale ipotesi "semplificativa".

A seguito dell'estrazione di un congruo numero di modi di vibrare, sarà quindi introdotto uno spettro elastico (quindi fattore di struttura q=1), come definito dal D.M. 20 Gennaio 2018 e relativa Circolare gennaio 2019 2005, con direzione di entrata Y, ovvero, per quanto detto sopra, la direzione di "maggior sensibilità" e di maggior interesse per l'aggregato in questione. Ci si riferirà nel seguito ai soli risultati legati a questa unica direzione di ingresso del sisma.

Lo stesso spettro verrà identicamente applicato in occasione dell'utilizzo dell'altra metodologia di analisi, la non-lineare statica, per condurre un confronto sulle rigidezze nella fase elastica iniziale.

6.5. Valutazione delle rigidezze nell'aggregato

Dopo questa prima fase di studio ed analisi dei comportamenti saranno evidenziati nei differenti modelli, si procederà nel cercare di ottenere una conferma di tipo numerico a quelli che, seppur qualitativamente, sembrano essere i principali comportamenti esplicati dagli edifici all'interno della schiera.

L'iter di calcolo seguito prenderà spunto dall'osservazione dei grafici che mettono in evidenza quelle che sono, alle diverse quote degli impalcati negli allineamenti considerati, le differenze fra gli spostamenti nella direzione di indagine misurate attraverso il confronto tra il modello relativo all'intero aggregato e quello relativo al singolo edificio centrale.

Nella pratica i parametri su cui si interverrà per modificare le rigidezze, aumentandole, sono i moduli elastici flessionale E tangenziale G. La procedura che sarà utilizzata è di tipo iterativo ed è partita dall'irrigidimento dei due paramenti di confine relativi al piano di quota minore; operazione questa che ripetuta sino al raggiungimento di valori di rigidezze tali da fornire, per il corrispondente tratto di curva, un soddisfacente grado di convergenza con il corrispondente tratto di curva dell'aggregato completo.

Il grado di coincidenza che sarà raggiunto risulterà di buona precisione e anche numericamente in termini di valori assoluti degli spostamenti sui vari punti di misura

A questo punto, quindi, dopo aver ottenuto indicazioni differenziate lato per lato e relativamente ai paramenti murari di confine di ogni livello, lo step successivo e definitivo sarà quello di mediare i diversi aumenti di rigidezza apportati sui vari piani, al fine di ottenere un risultato più generale e, eventualmente, di più immediato utilizzo.

La precedente fase iterativa condurrà quindi ad una serie di aumenti di rigidezza diversificati sui vari livelli che, mediati ad un unico valore per ciascun lato, hanno comunque consentiranno di ottenere un'ottima convergenza con le curve Δy relative al modello dell'aggregato completo.

È possibile a questo punto quantificare in maniera molto più sintetica quella che risulta essere l'efficacia derivante dalla continuità imposta dalla schiera.

6.6. Osservazioni conclusive sui risultati attesi della modellazione FEM

Prima di qualsivoglia argomentazione conclusiva a latere delle analisi e dei relativi risultati appena descritti, risulta fondamentale ripetere, sottolineandolo, quello che è il primo punto da tenere in considerazione ogni qual volta ci si trovi ad "operare" nei confronti di aggregati edilizi in muratura esistenti.

L'estrema eterogeneità in termini di organizzazione strutturale e caratterizzazione materica, nonché i differenti gradi manutentivi ai quali tali edifici possono essere stati sottoposti nel corso dei secoli, fanno sì che risulti estremamente difficoltoso, se non addirittura impossibile, ridurne l'approccio ad un unico e riconosciuto codice metodologico.

L'aggregato oggetto di questo studio non rappresenta quindi un'eccezione sotto questo punto di vista, anzi il suo diverso contenuto strutturale nel passare da un edificio all'altro nonché la presenza di complessi di elementi realizzati in epoche differenti.

È chiaro, quindi, che l'approccio iniziale debba essere, compatibilmente con le possibilità "ambientali", indirizzato ad individuare al meglio tutte queste singolarità.

Allo stesso tempo però è altrettanto vero che, proprio per questi motivi, nel momento in cui ci si trovi a dover analizzare il comportamento di un edificio esistente all'interno di un aggregato edilizio storico, sia altamente probabile che le caratteristiche strutturali ed organizzative degli edifici adiacenti siano tra loro differenti; l'impatto quindi, in termini di rigidezze, sarà da tenere in debito conto.

Poter quindi quantificare percentualmente tali differenze significa avere una non trascurabile informazione relativamente a quello che può essere il comportamento dell'unità di studio valutata in un contesto di aggregazione edilizia.

Nel caso oggetto del presente lavoro, verranno eseguite approfondite operazioni di rilievo materico e strutturale su tutti e tre gli edifici dell'aggregato, ma questo ad altro non è servito che a confermare quanto scritto poco sopra.

Infatti, dando per scontata la possibilità di avere informazioni dettagliate dell'edificio su cui si opera, potrebbe rivelarsi sufficiente limitarsi ad un'attenta, ma sommaria, presa di visione delle fondamentali caratteristiche organizzative e materiche delle strutture immediatamente vicine, se la "omogeneità" strutturale della schiera risultasse ben garantita.

L'aver a che fare, ad esempio, con un impianto strutturale ben organizzato da un lato e con uno invece di caratteristiche di minor efficacia dall'altro, attraverso modelli di studio anche molto più semplificati può essere stimato percentualmente in termini di differente apporto di rigidezza sull'unità di studio. In questo periodo, poi, caratterizzato da una maggior sensibilità nei confronti di un'attenta conservazione degli edifici storici di cui l'Italia è ricchissima, sono state ad esempio introdotte da molti enti pubblici, dediti appunto alla protezione e conservazione del patrimonio artistico e storico italiano, delle schede semplificate per una prima valutazione speditiva sugli edifici dei centri storici e, più specificatamente, anche sugli aggregati edilizi in muratura.

I parametri utilizzati nelle queste schede sono di semplice definizione, come numero di piani fuori terra, altezze differenziate tra gli edifici della stessa schiera, caratteristiche di massima dei principali elementi strutturali, ecc. e si pongono quale obbiettivo quello di migliorare la stima qualitativa degli edifici appartenenti ad uno stesso aggregato edilizio; ecco quindi che la possibilità di implementazione all'interno di queste schede di una valutazione più prettamente strutturale, come quella descritta in questo capitolo, potrebbe aggiungere un maggior peso alla valutazione globale, che resta comunque un approccio iniziale ai fini di una presa di visione completa del problema oggetto di studio.

7. MODELLO A MACROELEMENTI

7.1. Introduzione

Con la seconda procedura si è affrontato lo studio del comportamento sismico dell'aggregato per mezzo di un'analisi dinamica modale e successivamente statica non lineare (tipo pushover) su un modello cosiddetto a macroelementi, fondamentalmente capace di semplificare la struttura in un telaio equivalente con elementi finiti monodimensionali a caratterizzazione specializzata per la muratura, tra cui spicca la possibilità di assegnazione del comportamento non lineare ai materiali.

Tale implementazione è stata effettuata attraverso il software implementato per le murature per le cui caratteristiche salienti si rimanda alla lettura del capitolo relativo della 2Si.

L'approccio al problema, a differenza di quanto fatto nella "costruzione" del modello FEM, è stato indirizzato verso una modellazione che non seguisse pedissequamente ogni singolarità strutturale e geometrica ma che attraverso le ipotesi di base del software fosse in grado di cogliere più direttamente il risultato "globale".

Tale virtualizzazione è stata raggiunta attraverso una serie di successive meshature, all'interno delle quali, di volta in volta, venivano visionate ed eventualmente corrette rappresentazioni di maschi e fasce murarie di scarsa verosimiglianza. Questo è un aspetto particolarmente importante e talvolta sottostimato; l'approccio critico ai risultati finali e, ancor prima, in fase di implementazione dei modelli di calcolo, fa sì che il software venga ottimizzato e sia in grado di fornire poi riscontri numerici di provata affidabilità.

Quindi, nel caso specifico del software base 2Si applicato alla schiera oggetto di studio, tale aspetto è stato ancor più curato poiché ci si è trovati nella condizione di lavorare con un modello semplificato su una situazione strutturale estremamente eterogenea.

Come si evince, il modello studiato sarà quello dell'aggregato completo dei due edifici, ma si limita a considerare solo il primo (partendo dall'alto) piano semi-interrato di ogni singolo fabbricato. Questo è dovuto, in parte, al fatto che il software ……. (nella sua versione commerciale, allo stato attuale) non consente ancora un adeguato metodo di inserimento di situazioni geometrico-strutturali come quelle che caratterizzano le zone.

7.2. Confronto tra modello "FEM" e modello a macroelementi

Una fase saliente della analisi sarà l'indirizzamento verso il confronto tra i due diversi approcci analitici all'aggregato edilizio in muratura. Con riferimento all'analisi modale effettuata su entrambi i modelli, verranno presi in considerazione, parallelamente, i risultati in termini di masse partecipanti, frequenze naturali e rispettivi campi deformativi.

Il punto fondamentale, da cui poi nasce il reale motivo di interesse di questo confronto, è la completa antitesi sulla quale fondano le proprie basi di partenza e le successive possibilità di analisi i due modelli; da un lato quello FEM, basato su un'operazione di rilievo di estrema precisione "riversata" poi in una successiva fase di restituzione che ha portato all'ottenimento di un modello quanto più fedele, geometricamente, alla realtà e dall'altro, invece, un modello semplificato a macroelementi che sì "sintetizza" la complessa struttura ed organizzazione muraria con un telaio con aste verticali (maschi murari), aste orizzontali (fasce murarie) e nodi rigidi di connessione, ma recupera veridicità per il più corretto comportamento assegnato al materiale.

Da questi ben distinti punti di partenza i due modelli permettono poi un iter di analisi altrettanto diversificato; infatti, se con il modello 2Si base si colgono, attraverso un'analisi dinamica con spettro di progetto, quelli che sono i comportamenti in fase indefinitamente elastica lineare dell'intera struttura (allo stato attuale di sviluppo del modello), con il modello2Si push over ci si può spingere ben oltre, potendo verificare, con un'analisi statica non-lineare (pushover), quelle che sono le riserve deformative della struttura in fase post-elastica (portata quindi a collasso)come previsto dalle norme.

Il raffronto, perciò, "legato" al software ed all'analisi più vincolante in termini di confrontabilità, è basato - come già accennato - alla presa di visione dei risultati ottenuti da un'analisi dinamica modale effettuata su entrambi i modelli; ciò che dunque si vuole accertare è l'attendibilità di uno studio fatto su un edificio di anche complessità geometrico-strutturale attraverso l'utilizzo di un modello che ne semplifica in maniera consistente molte singolarità.

Ecco che, se la rispondenza in fase elastica (analisi dinamica modale) dovesse essere verificata (buona corrispondenza quindi dei risultati ottenuti con 2Si base con quelli del modello C2Si pushover), questo sarebbe un primo risultato di validazione dei successivi risultati ottenibili attraverso un'analisi pushover; viceversa si sarebbe portati a dire che per situazioni strutturali di estrema complessità, la semplificazione con uno schema a telaio, potrebbe risultare eccessiva e portare quindi ad una perdita di significatività dei risultati finali.

È utile ricordare che, a meno delle differenze sostanziali proprie del diverso approccio alla modellazione dei due software, tutti gli altri parametri in gioco sono stati valutati in maniera tale da garantire la massima confrontabilità; quindi, materiali con i medesimi parametri fisico-meccanici, spessori murari, posizionamento e dimensioni delle aperture coincidenti.

Il confronto, prenderà inizio dall'estrazione, all'interno delle due analisi, di quelli che risultano essere i modi che evidenziano i valori più elevati in termini di massa partecipante lungo la direzione di studio Y; una volta isolati tali modi, sia sul modello a macroelementi che sul modello FEM, si confronteranno le rispettive rappresentazioni grafiche delle deformate, andando poi ad accoppiarle, modello per modello, ogniqualvolta si sarà valutato che le deformazioni evidenziate interessassero le stesse zone e, quindi, le stesse pareti dell'aggregato.

Inoltre, la minor rigidezza globale, che sarà normalmente evidenziata dal modello a macroelementi, deve essere ricercata anche in due sostanziali differenze di approccio alla modellazione rispetto a quanto fatto invece nel caso del modello FEM.

In genere nel codice per analisi push over i nodi di connessione, appartenenti ad una sola parete, mantengono i propri gradi di libertà nel piano nel riferimento locale, mentre i cosiddetti nodi 3D che appartengono a più pareti (localizzati nelle incidenze di queste ultime) debbono necessariamente disporre di gradi di libertà nel riferimento globale; questi nodi, in virtù dell'ipotesi di trascurare la rigidezza flessionale fuori piano delle pareti, non necessitano di un grado di libertà rotazionale intorno all'asse verticale Z in quanto non connessi ad elementi in grado di fornire termini di rigidezza rotazionale locale.

La seconda differenza di modellazione, a cui è corretto far riferimento, è da individuarsi nell'ambito dei solai di orizzontamento e di copertura, definiti in entrambi i software come elementi ortotropi con comportamento a membrana; ciò che però ne differenzia il comportamento in termini di apporto irrigidente

A sostegno però di quello che è l'"approccio push over" si può dire che un'ipotesi del genere potrebbe risultare conservativa - a maggior ragione per criteri di tipo non lineare - a fronte anche delle difficoltà esplicite nell'andare poi effettivamente a valutare le riserve di rigidezza che le strutture ortogonali all'azione sismica sono in grado di fornire. Tornando all'osservazione delle forme modali estratte dalle due analisi dinamiche studiate e confrontando le frequenze (o gli equivalenti periodi) che le caratterizzano con lo spettro elastico di cui sopra, si nota che, in entrambi i casi ci si mantiene all'interno del cosiddetto plateau; in realtà questo succede nel momento in cui, per il modello a telaio equivalente, si è deciso di non considerare le prime due forme modali in quanto con massa partecipante trascurabile, forme modali, queste, caratterizzate da valori di periodi di oscillazione che avrebbero invece incrociato all'interno dello spettro valori di accelerazione ben più bassi di quelli definiti dal tratto orizzontale del plateau stesso.

Quanto appena scritto significa che a fronte di una maggior "conservatività" del codice push over, che esula dal tenere considerare l'apporto di pareti non parallele all'azione sismica, un rischio potrebbe poi essere quello di attivare masse sismiche rilevanti in corrispondenza di valori di periodo T superiori a quelli che definiscono il tratto orizzontale dello spettro; questo porterebbe quindi all'assunzione, per il modello a telaio equivalente, di valori di accelerazione inferiori, fatto questo contrastante con quello che è invece lo spirito più cautelativo legato al non considerare le pareti ortogonali alla direzione del sisma.

E' importante, infine, fare un'ultima precisazione relativamente al comportamento della singola parete nei due modelli; infatti, mentre l'approccio FEM evidenzia, come ormai chiaro, un comportamento globale di maggior rigidezza dovuto proprio all'apporto di tutti gli elementi resistenti, se si spostasse l'attenzione alla singola parete o, meglio ancora, al singolo telaio piano che definisce un allineamento, ci si accorgerebbe che la sua rigidezza risulterebbe maggiore nel modello a macroelementi a causa della presenza di nodi rigidi di connessione tra gli elementi fascia e gli elementi maschi.

Questa risulta quindi essere una conferma del fatto che la maggior influenza irrigidente del modello push over risulta essere focalizzata negli elementi “fuori piano” rispetto all’azione orizzontale del sisma.

8. CONCLUSIONI

Dovendo ripercorrere quanto affrontato all’interno di questo preliminare lavoro, l’avvicinamento utilizzato nei confronti delle diverse questioni trattate, nonché le problematiche studiate, ma rimaste ancora “aperte”, non si andrà, all’interno di questo paragrafo conclusivo, nello specifico delle singole trattazioni, ma, al contrario, si evidenzieranno gli aspetti principali, più generali, ma di basilari e di irrinunciabile importanza per poter affrontare correttamente e con cognizione di causa problematiche di stretta attualità, come, appunto, quelle connesse agli aggregati edilizi storici in muratura.

Il primo punto da sottolineare, come del resto ampiamente e coscientemente trattato anche all’interno dell’OPCM 3431, e quindi delle NTC 2018 Circolare 2019 è l’importanza fondamentale che riveste tutta la fase preliminare alle analisi, ossia quella relativa alle operazioni di rilievo e di indagini conoscitive e sperimentali indirizzate alla più corretta presa di coscienza dell’organizzazione strutturale, dei dettagli costruttivi e dei materiali utilizzati.

Un adeguato Livello di Conoscenza ed uno spirito critico nel comprendere, seppur qualitativamente, sin dall’inizio, quelle che saranno le zone con comportamento più incerto nei confronti di un’azione sismica, consentono poi di approcciarsi con correttezza e consapevolezza, senza una mera ed incondizionata accettazione dei numeri ottenuti, ai risultati derivanti dalle analisi svolte.

L’attenzione da riporre in fase di rilievo dovrà essere la maggiore possibile; a dimostrare questa necessità c’è proprio il tratto di schiera in esame, con le sue molteplici zone di criticità. A tal proposito, infatti, i risultati ottenuti con il progetto esecutivo, altro non devono che confermare quanto già emerso a livello indicativo dalla fase preliminare di indagine strutturale, che ha evidenziato, attraverso un’analisi dinamica modale con applicazione di uno spettro elastico, i differenti “pesi” in termini di rigidezza degli edifici appartenenti alla schiera.

Riferendosi ad una generica Unità Strutturale fra quelle considerate (e più strettamente a quella di studio), si è evinto e numericamente quantificato - in termini di differenze percentuali - quale sia l’importanza di un edificio di buona organizzazione e distribuzione spaziale delle murature e quanto questo aspetto possa pesare all’interno di un aggregato edilizio; quanto poter quantificare, seppur qualitativamente, i diversi paesi in termini di rigidezza dei singoli edifici appartenenti ad una schiera possa essere un’indicazione anche solo all’interno di un programma di catalogazione, in termini di necessità migliorative e di adeguamento, di edifici appartenenti a centri storici.

La terza ed ultima fase di questo studio è stata indirizzata invece verso il confronto tra i risultati ottenuti attraverso l’analisi dinamica modale su modelli differenti. Da un lato la modellazione FEM, già utilizzata, come appena decritto, in campo elastico lineare per una prima valutazione delle rigidezze “in gioco”, dall’altra una modellazione a macroelementi a telaio equivalente, appositamente nata per edifici in muratura ed in grado anche di implementare analisi sismiche di tipo statico non lineare (pushover).

L’obbiettivo è quello di valutare, in funzione di differenti assunzioni teoriche di base e di modellazione proprie dei due software utilizzati, eventuali differenze di risultati in termini di masse modali partecipanti, frequenze naturali di vibrazione e, quindi, più in generale, di rigidezze all’interno dell’aggregato.

E’ importante sottolineare l’adozione di solai deformabili nelle modellazioni svolte ed è doveroso elencare una serie di motivazioni nel validare questa scelta; innanzitutto i meccanismi traslazionali, amplificati da un’eventuale scelta di solai con comportamento nel piano infinitamente rigido, perderebbero di significato

se implementati all'interno di una struttura aggregata, caratterizzata normalmente da differenti organizzazioni strutturali interne e da una mancata simmetria geometrica e di comportamento.

Inoltre, in edifici storici e vecchi, a meno di recenti operazioni di restauro, risulta molto difficile trovare solai di caratteristiche tali da giustificarne un comportamento infinitamente rigido e gli esempi, in tal senso, sono immediati e di semplice comprensione; la maggior parte dei solai degli edifici contigui e di quelli collassati risultano, infatti, essere lignei non irrigiditi.

Poi, proprio in relazione al confronto instaurato tra modello FEM e modello semplificato a telaio equivalente, la scelta di solai deformabili, giustificata dai motivi appena descritti, fa sì, anche, che le sostanziali differenze di modellazione dei due software possano esplicarsi ed evidenziarsi al meglio; infatti, i differenti comportamenti dovuti alla presenza di cerniere rotazionali nelle zone di incidenza di pareti da una parte e di incastri dall'altra non avrebbero avuto, con la presenza di un solaio infinitamente rigido, possibilità di manifestarsi.

Allo stesso modo, un orizzontamento di infinita rigidezza avrebbe anche imposto, sotto l'azione di forze orizzontali, spostamenti uguali (a meno di asimmetrie geometriche) per pareti parallele appartenenti agli stessi campi di solaio.

Con questa scelta pertanto, comunque validata, come già visto, anche da contingenze strutturali reali, si sono volute amplificare le differenze comportamentali esibite dai due codici di calcolo e descritte nel paragrafo precedente.

Il tecnico

Ing. Augusto Forno

Milano settembre 2026

