

## Capitolo 3 EDIFICIO MUNICIPALE AGGREGATO IN MURATURA

Massimo Traversari

*P.F. Rischio sismico ed opere pubbliche d'emergenza*

### 3.1 IL FABBRICATO

L'edificio sede del Comune di Montecarotto risulta essere posizionato all'interno del perimetro del centro abitato di Montecarotto, con accesso principale in via Marconi n.11.

Più specificatamente, risulta edificato sulla verticale delle mura storiche civiche, secondo un processo evolutivo che sarà meglio descritto nel seguito. Foto e disegni successivi chiariranno più adeguatamente l'integrazione e l'interazione con la stessa cinta muraria.

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

La nascita di parti dell'edificio in oggetto al di sopra del muro di cinta, così come degli edifici adiacenti, è presumibilmente riconducibile alla seconda metà del 1600. Il fabbricato raggiunge la configurazione volumetrica attuale alla fine dell'800 dove, per essere adeguato al fabbisogno pubblico, viene ottenuto dall'accorpamento di più unità immobiliari.



Foto 3.1 - Municipio (via Circonvallazione)

A parte ridotti interventi di manutenzione nel passato, le strutture sono state oggetto solo recentemente di un primo intervento di riparazione danni e di miglioramento sismico (a seguito del sisma 1997 Marche-Umbria) che ha comportato lavori nel piano seminterrato e, successivamente, di un analogo tipo di intervento che ha interessato i piani superiori (quest'ultimo tutt'ora in corso).



Foto 3.2 - Municipio (via Marconi)

Dal punto di vista distributivo-funzionale è composto da due piani fuori terra in cui si trovano i vari uffici comunali e da un piano seminterrato parzialmente occupato dagli archivi.

I due piani ad uso ufficio sono collegati tra loro da una scala che divide in modo simmetrico l'edificio.

Al piano primo, in un'ala del fabbricato, sono ubicate le sale di rappresentanza dell'Amministrazione Comunale (sala del Consiglio, ufficio del Sindaco, ufficio del Segretario), dall'altro lato dell'edificio sono stati ricavati gli ambienti per la Pretura.

Gli ambienti più rappresentativi di questo piano e l'ingresso al piano terra, presentano soffitti in camera canna decorati con disegni o stucchi.

Dal punto di vista costruttivo l'edificio presenta parte dei setti murari in muratura mista di pietre arenacee sbazzate e mattoni e parte in mattoni, gli orizzontamenti sono quelli tipici in legno con impalcato in laterizio ad eccezione del solaio della sala del Consiglio che, a seguito di un incendio avvenuto negli anni cinquanta, è stato ricostruito con un solaio del tipo "Varese". Il solaio di copertura è in legno, mostra

gravi carenze costruttive e strutturali in quanto presenta molte travi puntellate, capriate ed orditure principali sottodimensionate, elementi lignei fatiscenti.

Tutti i controsoffitti sono realizzati in camera canna ad eccezione di quelli al piano terra nei due vani ad uso dell'ufficio anagrafe in cui sono presenti controsoffitti di recente fattura in fibre minerali.

Per quanto riguarda le finiture si riscontra la presenza di pavimenti in graniglia di cemento, in marmo ed in ceramica; le pareti sono intonacate 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 subito 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 dei beni monumentali e storici.

All'interno di questa 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 da riporvi.

E' necessario riportare a questo punto, per il prosieguo, i passi principali dell'OPCM 3431 relativi agli 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, avvicinarsi 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 bucatore 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 va 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 rigidità 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 un fabbricato ricompreso in un aggregato con disposizione planimetrica a schiera lineare di notevole estensione. Come già anticipato, la caratterizzazione altimetrica rappresenta una complessità limite, si rintracciabile in altre realtà edilizie storiche marchigiane, ma che sicuramente mette a dura prova la possibilità di effettuare una analisi globale non semplificata, che rappresenta l'obiettivo principale della verifica sismica del Municipio di Montecarotto.

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 maniera

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 un terremoto severo (opere strategiche a fini di protezione civile come ospedali, caserme dei VVF, municipi, centri di comando, grandi arterie di comunicazione), che si vuole restino possibilmente funzionali, quindi senza che si danneggino gravemente; questa categoria di opere deve contare su di un livello di protezione superiore a quello di altre opere ad esposizione particolarmente elevata (sia per le presenze umane come scuole, uffici, grandi contenitori di eventi, sia per valore intrinseco come i beni di interesse culturale), in quanto opere che dovrebbero restare funzionali dopo un disastro proprio per consentire il soccorso 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" secondo Giuffré (per la garantita presenza ed efficacia di tutti quei presidi strutturali che ne impediscono l'attivazione), 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 rigidità degli orizzontamenti.

La verifica dei meccanismi locali (complementare alla verifica globale e obbligatoria per gli edifici esistenti, ai sensi del p.to 11.5 dell'OPCM 3431 e più in particolare del p.to 11.5.4.3.1) va affrontata con metodi che non sono oggetto di questo documento. Si ricorda comunque per approfondimenti sull'argomento lo studio predisposto dalla Regione Marche, per tramite dell'Università degli Studi dell'Aquila ed il CNR (resp. Prof. Giovanni C. Beolchini), ed i più recenti approfondimenti nell'ambito della ricerca a livello nazionale istituita dal consorzio ReLUIS (Progetto ReLUIS - DPC anni 2005-2008) portati avanti dal Prof. Antonio Borri - Linea di Ricerca 1, Tema 1, Edifici in aggregato.

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 meridionale del centro storico del paese per una lunghezza di circa 200 metri. 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 di cinta meridionali che scendono con andamento inclinato sino alla strada sottostante.

Nello scegliere la parte ritenuta significativa ai fini dello studio dell'US di riferimento, i limiti dell'aggregato in esame sono stati individuati da un lato (quello destro con riferimento alla vista da via Circonvallazione) nel fianco del Municipio stesso, dall'altro lato ricomprendendo ulteriori due edifici adibiti a civile abitazione. I motivi di tale delimitazione saranno meglio chiariti nel seguito. Quello che si anticipa è che mentre l'US oggetto di verifica di questo scritto è il Municipio, un altro documento parallelo (citato sotto) ha basato l'attività sulla prima US in affiancamento, la centrale delle tre risultanti dall'aggregazione selezionata. Sinteticamente, nel seguito, le tre unità saranno individuate con i nomi di Palazzo Santelli, Palazzo Perini-Stronati, Municipio Cittadino.

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 Circonvallazione, ai piedi del muro di cinta, e da via Marconi, 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 "montecarottesco" e, più specificatamente, verticalizzati sugli edifici oggetto di studio.

A tal proposito, con la preziosa collaborazione del Comune di Montecarotto 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. E' 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, come si vedrà meglio nel seguito riferendosi alle attività svolte in ciascuna delle US.

La fase finale, più propriamente di calcolo, 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.

Si ritiene fondamentale a questo punto sottolineare come, ai fini delle attività promosse dall'APQ che ricomprendono tra l'altro la presente pubblicazione, l'aspetto di rilievo critico ed indagine sugli edifici in muratura costituisca la parte prevalente del lavoro (potremmo definirlo lo "zoccolo duro"), quella di cui si avrà maggiormente memoria anche nel seguito, come scontatamente noto per la tipologia strutturale in esame, ma come messo ancora più in evidenza - se possibile - dal nuovo quadro normativo.

Ai fini della presente pubblicazione, si esporrà solo una parte del lavoro svolto complessivamente sull'edificio. Si rimanda pertanto alla lettura dei documenti presenti all'interno del sito della Regione Marche per avere un quadro più completo degli studi riguardanti l'aggregato edilizio, studi che tra l'altro ricomprendono anche una tesi universitaria realizzata grazie ad una collaborazione tra la P.F. Rischio Sismico e l'Università Politecnica delle Marche (tesista Alessandro Dell'Acqua, relatore Prof. Ing. Roberto Giacchetti).



Foto 3.3 - Palazzo "Santelli", Palazzo "Perini-Stronati", Municipio (via Circonvallazione)



Foto 3.4 - Palazzo "Perini-Stronati", Palazzo "Santelli" (via Marconi)

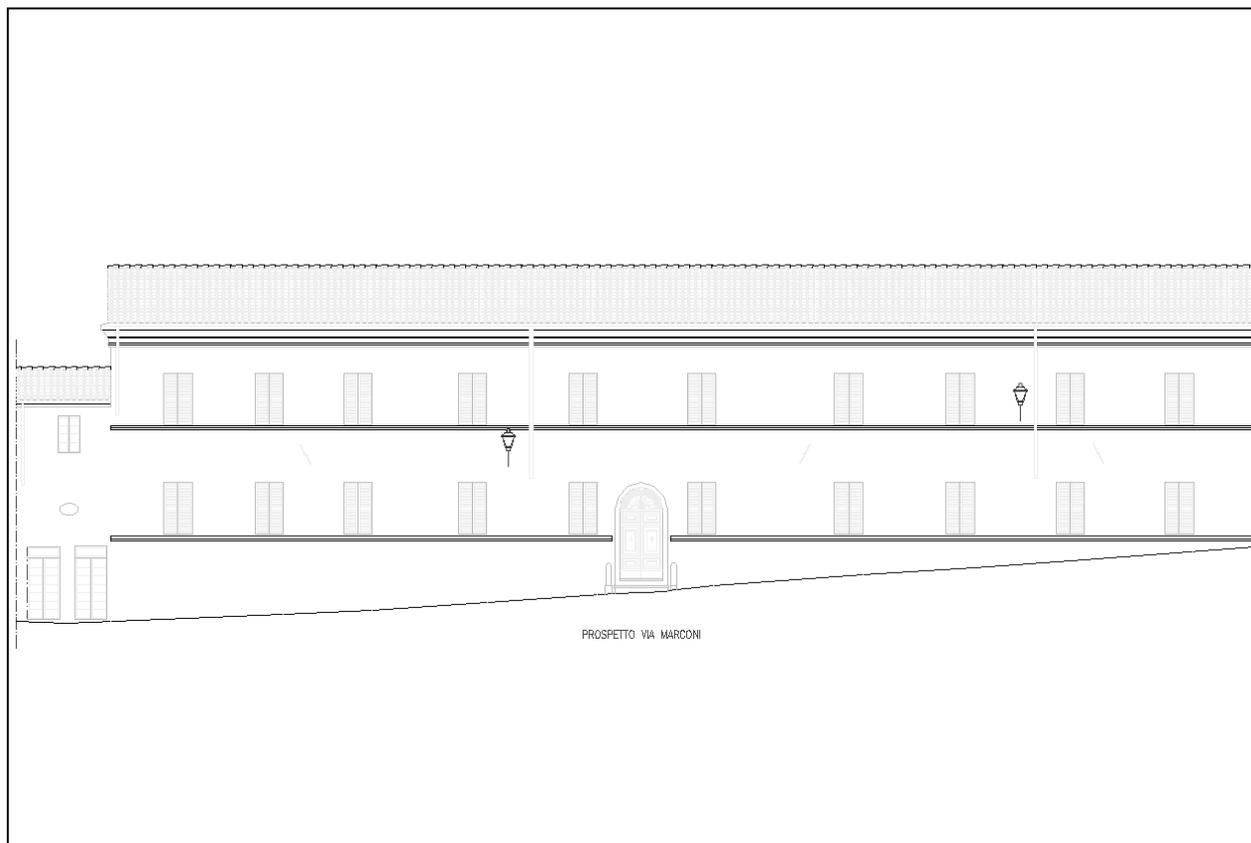


Figura 3.1 - Prospetto su via Marconi - da rilievo anno 2004

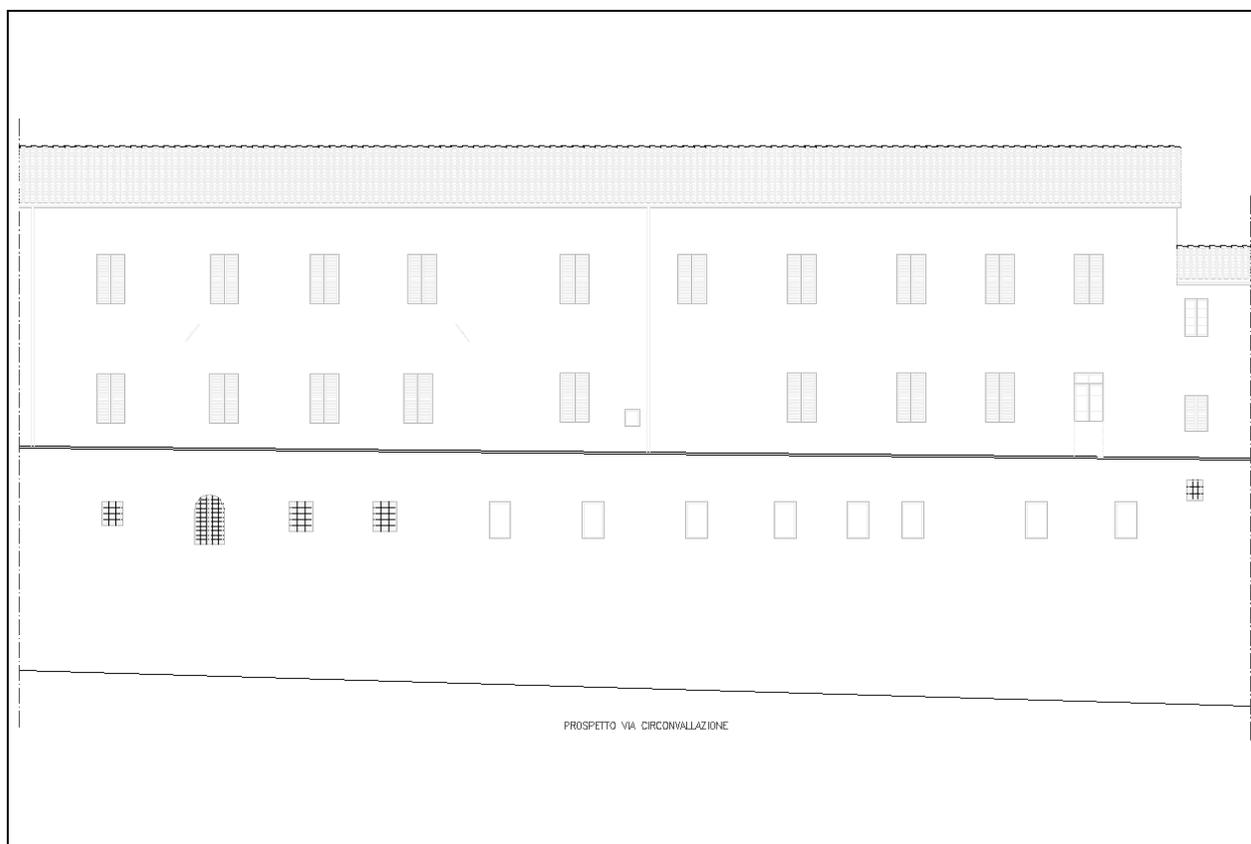


Figura 3.2 - Prospetto su via Circonvallazione - da rilievo anno 2004

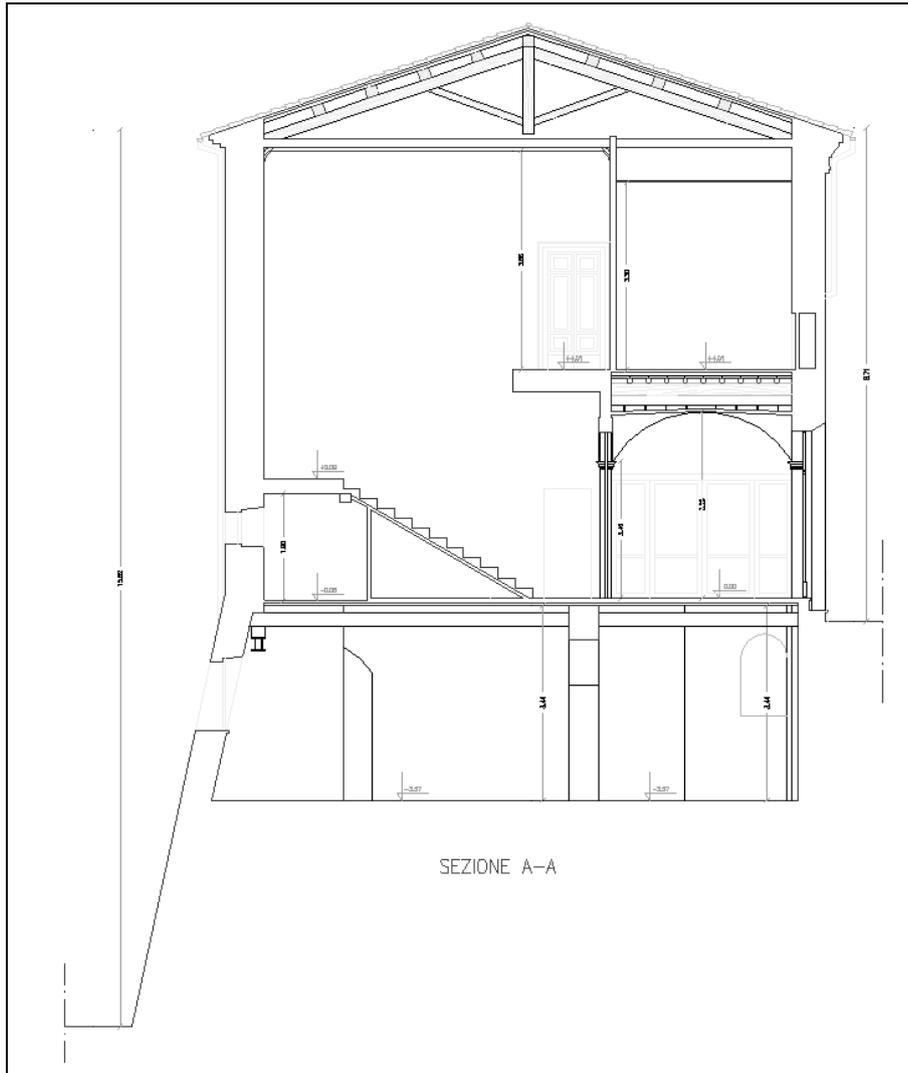


Figura 3.3 - Sezione trasversale - da rilievo anno 2004

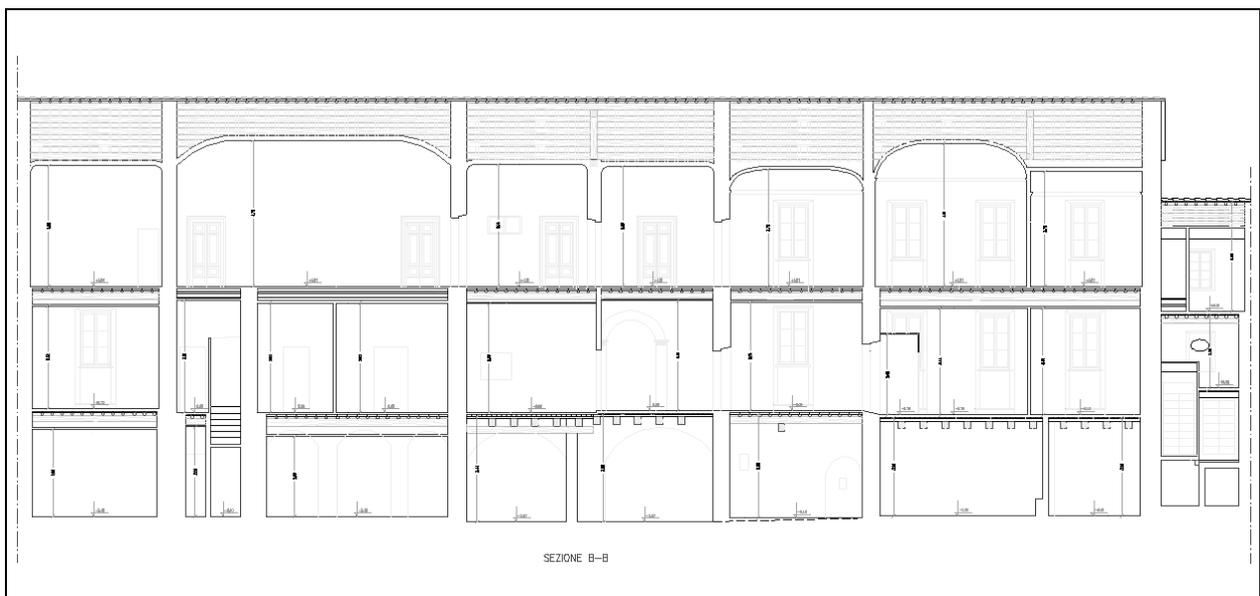


Figura 3.4 - Sezione longitudinale - da rilievo anno 2004

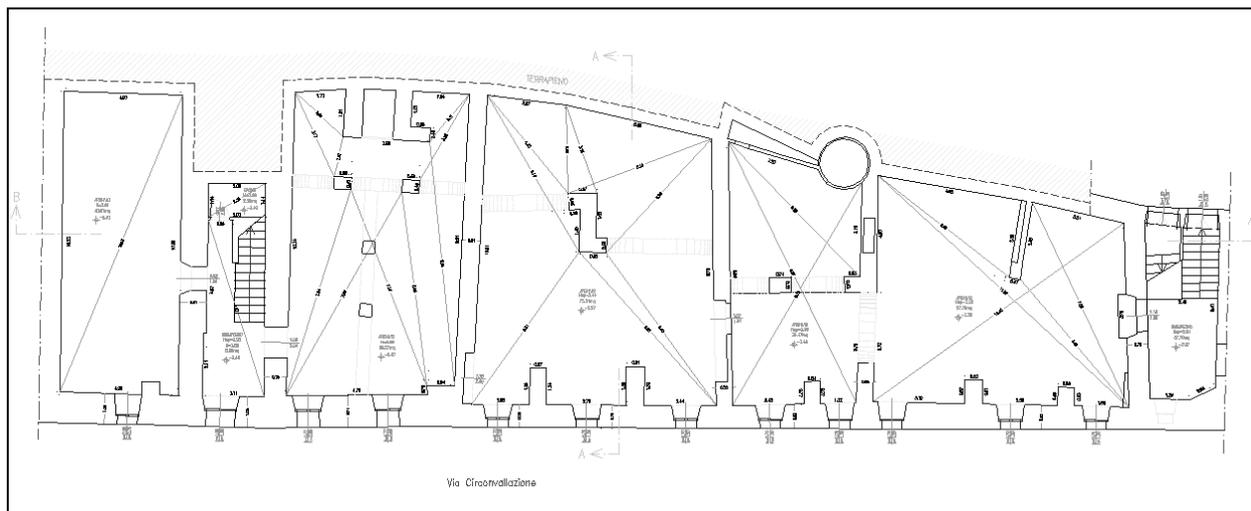


Figura 3.5 - Pianta piano seminterrato - da rilievo anno 2004

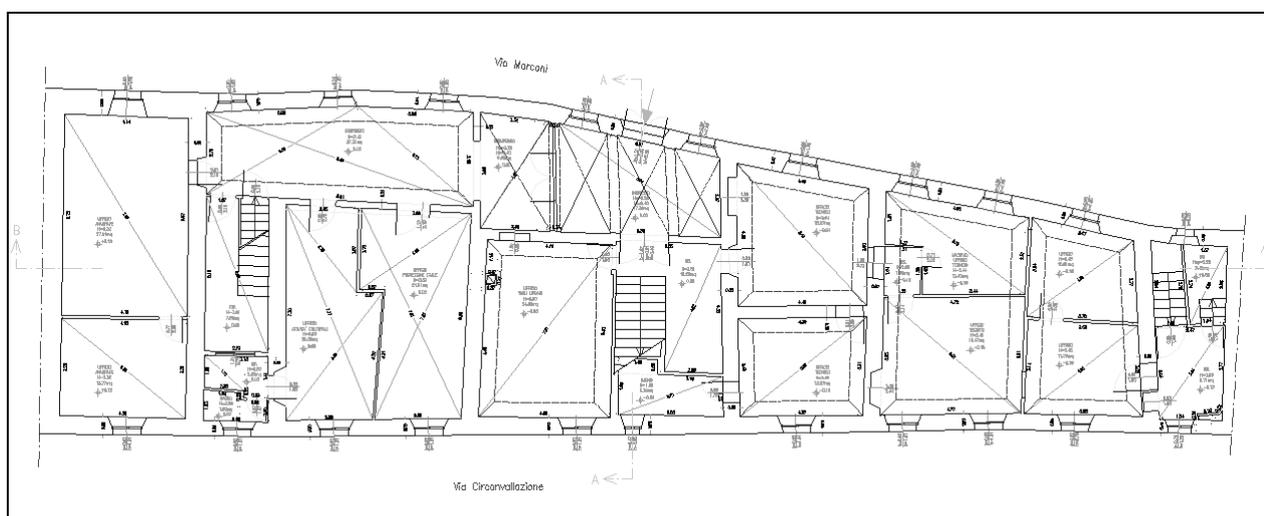


Figura 3.6 - Pianta piano terra - da rilievo anno 2004

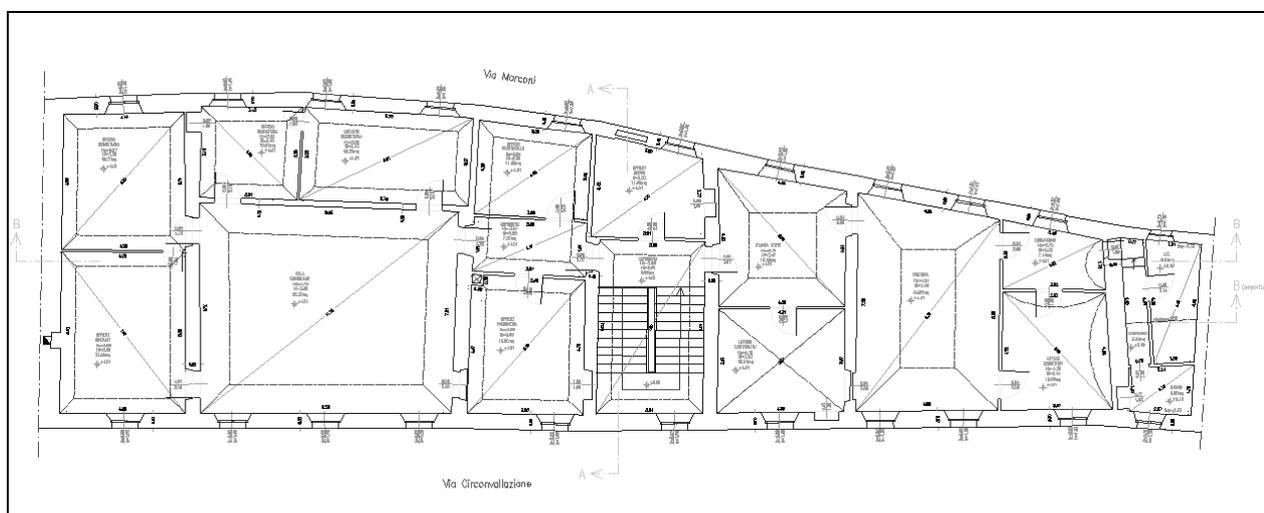


Figura 3.7 - Pianta piano primo - da rilievo anno 2004

### 3.2 ANALISI STORICA E DELLA DOCUMENTAZIONE ESISTENTE

Analogamente ad altri centri della Vallesina, il centro di Montecarotto nasce intorno all'inizio del secondo millennio, quando la crisi dei vincoli feudali nelle campagne spinge plebi rurali ad "incastellarsi" in una località il cui toponimo (Mons arcis ruptae - Monte della rocca rotta) indica la precedente esistenza di fortificazioni, probabilmente per opera dei Galli Senoni.

Una ricerca sulle trasformazioni della struttura urbana richiederebbe ricerche archivistiche e tempi superiori a quelli concessi per la presente pubblicazione: si sintetizzano nel seguito solo quei dati utili per la comprensione dello sviluppo dell'area oggetto di studio.

E' del 1509 la cinta muraria edificata (o forse più correttamente ristrutturata ed ampliata, a partire da una struttura originaria del medioevo riferibile alla rocca, come rintracciabile anche dal documento di Girolamo Baldassini "Memorie storiche della antichissima e regia città di Jesi", ed. P.P. Monelli, 1765) su disegno dell'architetto Albertino di Giacomo da Cremona.

Nella seconda metà del 1600 sul muro di cinta, che ha ormai perduto ogni utilità difensiva, cominciano a costruirsi case di abitazione innestando un processo di trasformazione fisica che con ogni probabilità continua per gran parte del secolo XVIII.

Il Catasto Gregoriano (1835 circa, tav. 3.4.1) mostra le caratteristiche di questa edificazione, su lotti molto stretti e di grande profondità posti perpendicolarmente alla cinta muraria, che fa ipotizzare un tipo di edilizia relativamente povera, per le categorie minori degli agricoltori e degli artigiani, contrapposta all'edilizia più consistente che si concentra negli isolati interni.

Dal 1833, in conseguenza dell'intelligente politica granaria stabilita dai Pontefici, nuova ricchezza venne affluendo in tutta la Vallesina, e anche a Montecarotto, con un'espansione dell'economia che si prolungherà fino al 1921. Ne sono testimonianza le grandi realizzazioni edilizie di quel secolo, tra cui notevoli palazzi gentilizi.

Il confronto fra Catasto Gregoriano e catasto attuale ci rende conto delle trasformazioni avvenute, la maggior parte delle quali possono essere datate nella seconda metà dell'ottocento (tav. 3.4.2):

- numerosi accorpamenti catastali cui corrisponde la demolizione di gran parte del tessuto edilizio minore e successiva ricostruzione di edifici con caratteristiche tipologiche superiori. E' questa l'origine di gran parte dei palazzi borghesi o nobiliari che si staccano dal resto del tessuto edilizio;
- demolizioni e arretramenti di rettifilo negli isolati centrali più antichi, che contribuiscono a creare, con una sorta di diradamento spontaneo, nuovi spazi liberi all'interno del paese;
- un complesso intervento comportante la demolizione di una delle torri poste all'ingresso del paese con la costruzione in loco del Teatro Municipale, la cui inaugurazione avvenne nel 1873, e del vicino palazzetto, attualmente sede di un istituto bancario. Tale intervento, condotto con una spregiudicatezza tipicamente ottocentesca, contempla la compresenza di motivi funzionali - collegamento della città con il borgo esterno - e civili - dotazione del paese di un'attrezzatura fondamentale per la vita associata, attrezzatura della piazza ricavata dalla demolizione.

Si riporta di seguito una tavola del Catasto Gregoriano in cui è evidenziato l'aggregato edilizio che forma la schiera muraria oggetto di studio; nei capitoli successivi tale elaborato verrà ripresentato e messo a confronto, ad evidenziarne le modifiche, con un corrispondente catastale più recente.

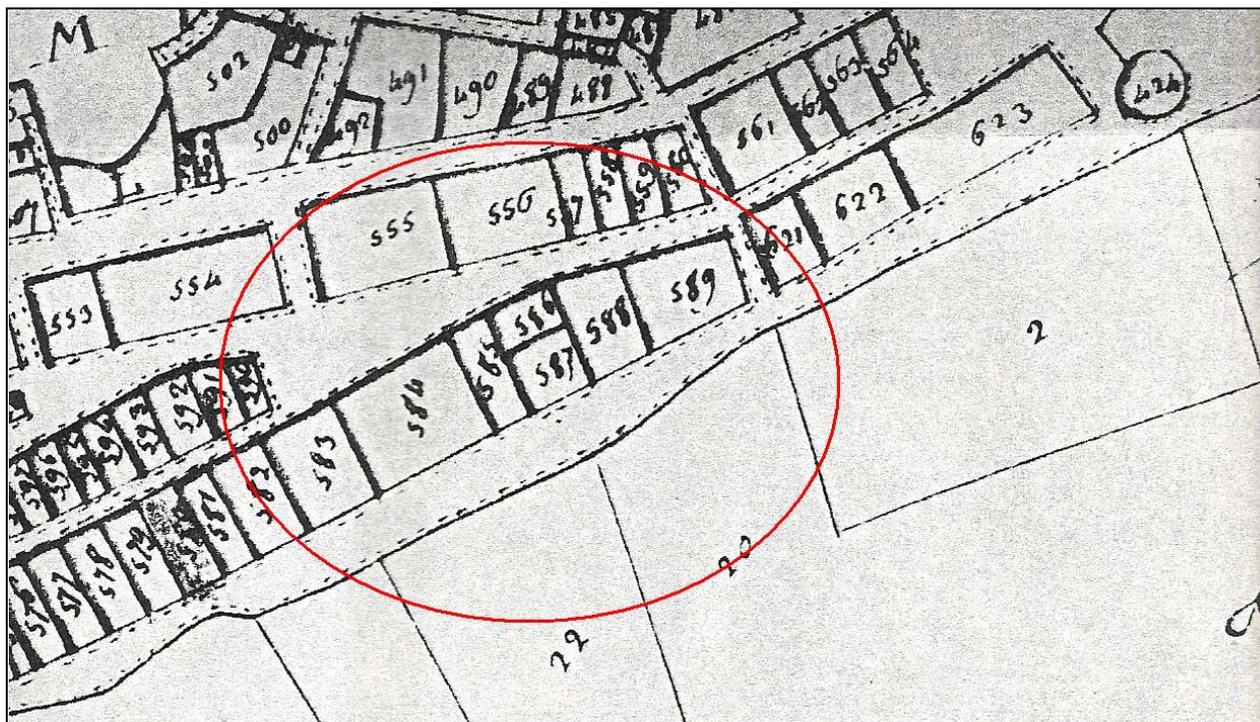


Figura 3.8 - Estratto da Catasto Gregoriano della schiera in esame (1835 circa)

Grazie alla disponibilità del Dottor Giuliano Santelli (rinventore dell'incartamento), viene riportata una foto a documentare un singolare materiale cartografico in rilievo (possiamo parlare di un vero e proprio antico modello tridimensionale, unico nel suo genere), ottenuto con la sovrapposizione alla pianta di una zona urbana di Montecarotto - prossima all'area di studio - di ritagli illustranti gli "alzati" degli edifici che vi si trovavano.

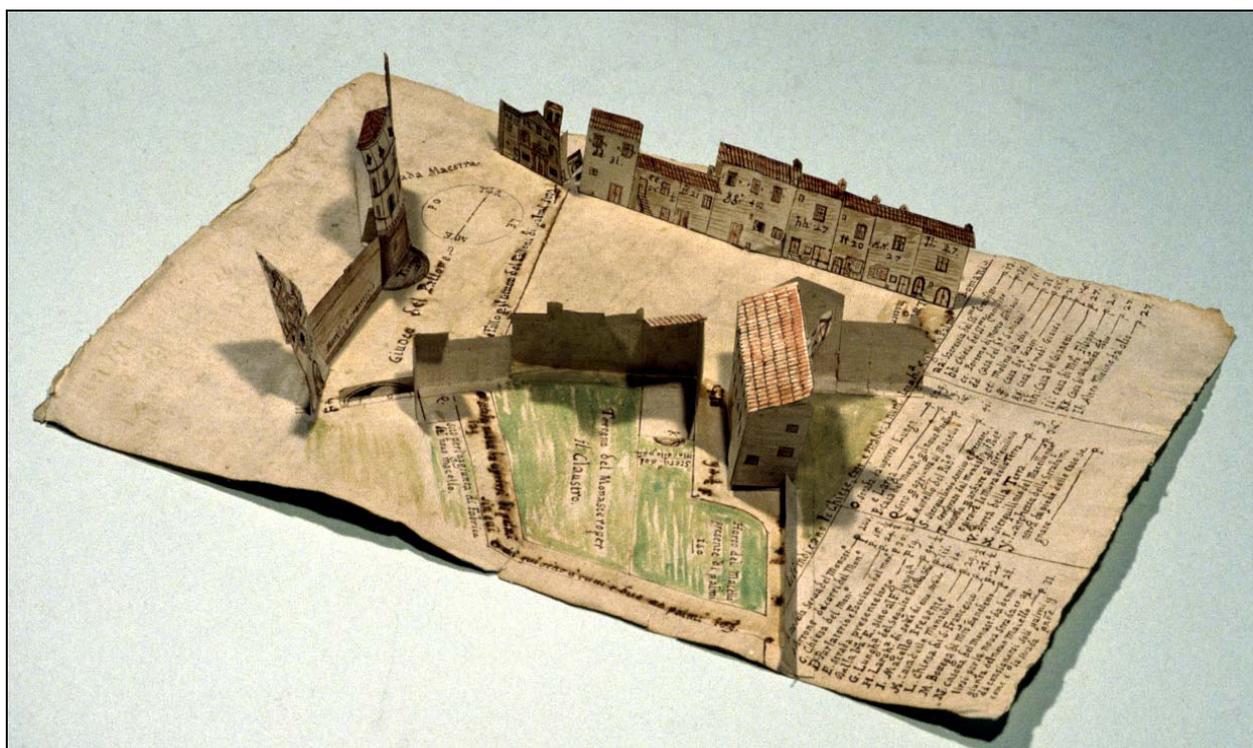


Figura 3.9 - Documento storico su Montecarotto

Tutta la documentazione è depositata e custodita presso l'Archivio di Stato in Roma. Il documento di autenticazione riporta la seguente dicitura:

*"Franciscus Giombus publicus apostolica imperialique auctoritate notarius et in Alma urbe descriptus et ad praesens Cancellarius foraneus Terrae Serrae Comitum" (Serra de' Conti), autentica la pianta del convento di S. Maria Maddalena dei Pazzi e di altri immobili del Castello di Monte Carotto, delineata ed esibita da "Angelus Albertinus", perito della città di Jesi.*

Montecarotto, 1713 luglio 27 - S. Congregazione del Buon Governo, serie II, b.2412

Infine, a completamento della fase di ricerca storica, si riporta una immagine a testimonianza evolutiva della zona urbana indagata.

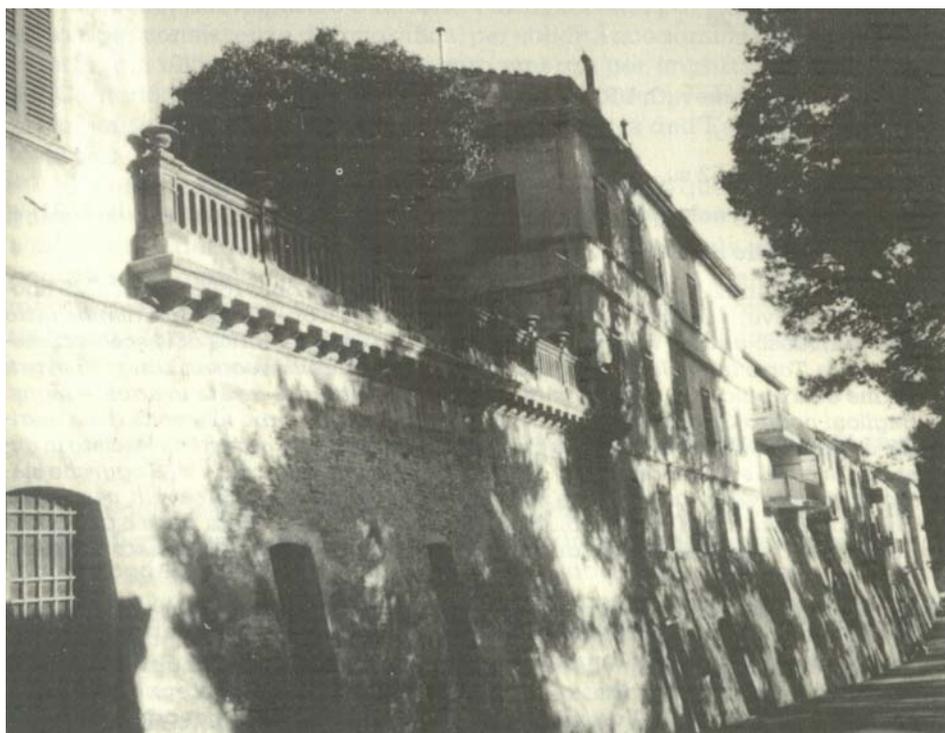


Foto 3.10 - Foto storica sul tratto di schiera indagata (Municipio a destra)

In sintesi, dal lavoro di ricerca effettuato, si è venuti in possesso della seguente documentazione:

- notizie storiche di massima sul periodo di costruzione dei fabbricati e sulla loro evoluzione;
- elaborati del progetto di "Riparazione danni e miglioramento sismico del Palazzo Comunale di Montecarotto" degli Arch. Paolo Adorisio e Ing. Giuseppe Dottori del 2004;
- indagine geologica del progetto di "Riparazione danni e miglioramento sismico del Palazzo Comunale di Montecarotto" della Dott.ssa Geol. Loretta Angelelli del 2004.

### 3.3 ASPETTI GEOLOGICI, GEOMORFOLOGICI E DI CARATTERIZZAZIONE SISMICA DEL SITO INDAGATO

#### 3.3.1 Aspetti geologici e geomorfologici

Pur rimandando alla lettura del capitolo specifico sulla caratterizzazione geologica, a seguire si riporta una schematica rappresentazione della sezione lito-stratigrafica trasversale, utile per meglio comprendere la situazione altimetrica e fondale del fabbricato.

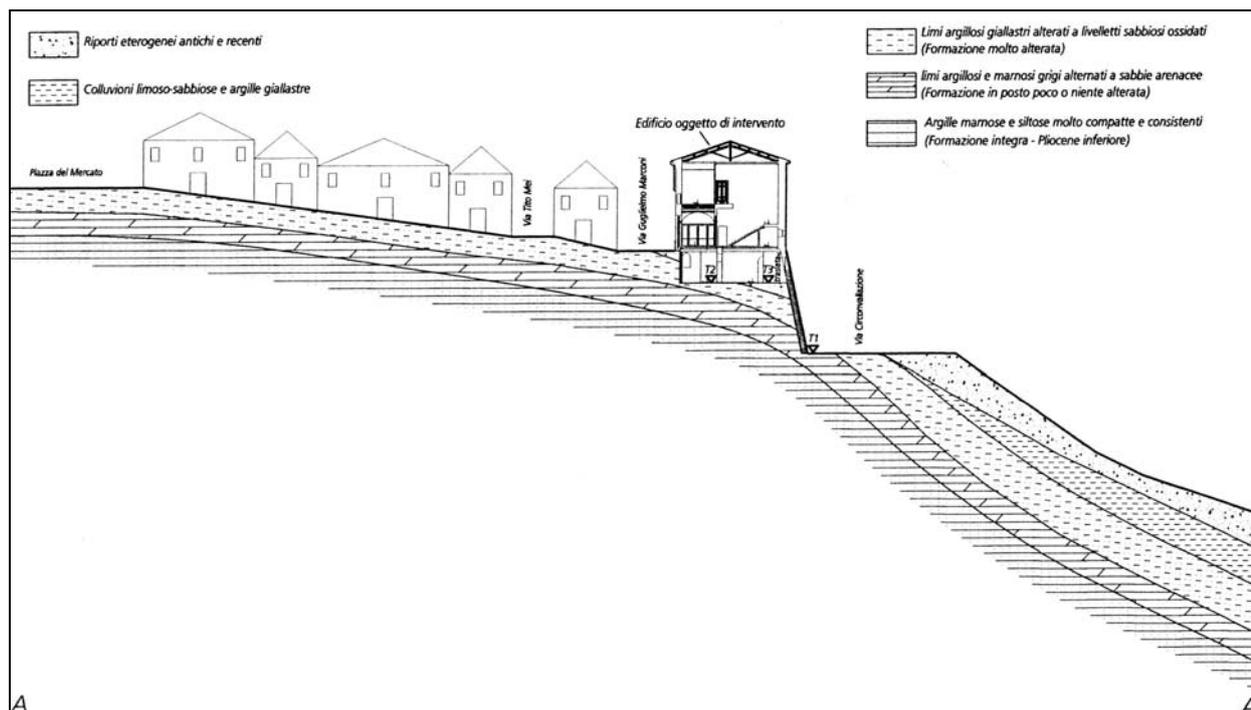


Figura 3.11 - Sezione lito-stratigrafica - da indagini anno 2004

#### 3.3.2 Caratterizzazione sismica del sito

Viste le condizioni lito-stratigrafiche emerse dalle indagini effettuate, si può classificare il *suolo di fondazione di tipo A*, secondo il D.M. 14/09/2005, al quale si attribuisce un *coefficiente di amplificazione*  $S = 1,0$ . 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 3.2.2.3 prevedono il fatto che il coefficiente  $S$  possa assumere valori superiori a quelli indicati per tenere conto di inclinazione dei pendii, dimensioni dei cigli, ecc., pur non venendo in aiuto per la precisazione di questo eventuale incremento. Per tale finalità si ricorre pertanto all'Ord. 3431 che determina questo incremento per mezzo di uno specifico *coefficiente di amplificazione topografica*  $S_T$  (tra l'altro richiesto esplicitamente per strutture con fattore di importanza  $\gamma_I > 1$ ), che risulta tabellato per tre casi specifici: per quello in esame, come riscontrabile dalla sezione morfologica sottostante, si può ritenere di ricadere nel caso c), che prevede un valore per  $S_T$  pari a 1,2.

Si ricorda infine che la stessa Ordinanza limita il prodotto  $S \times S_T$  al valore massimo di 1,6.

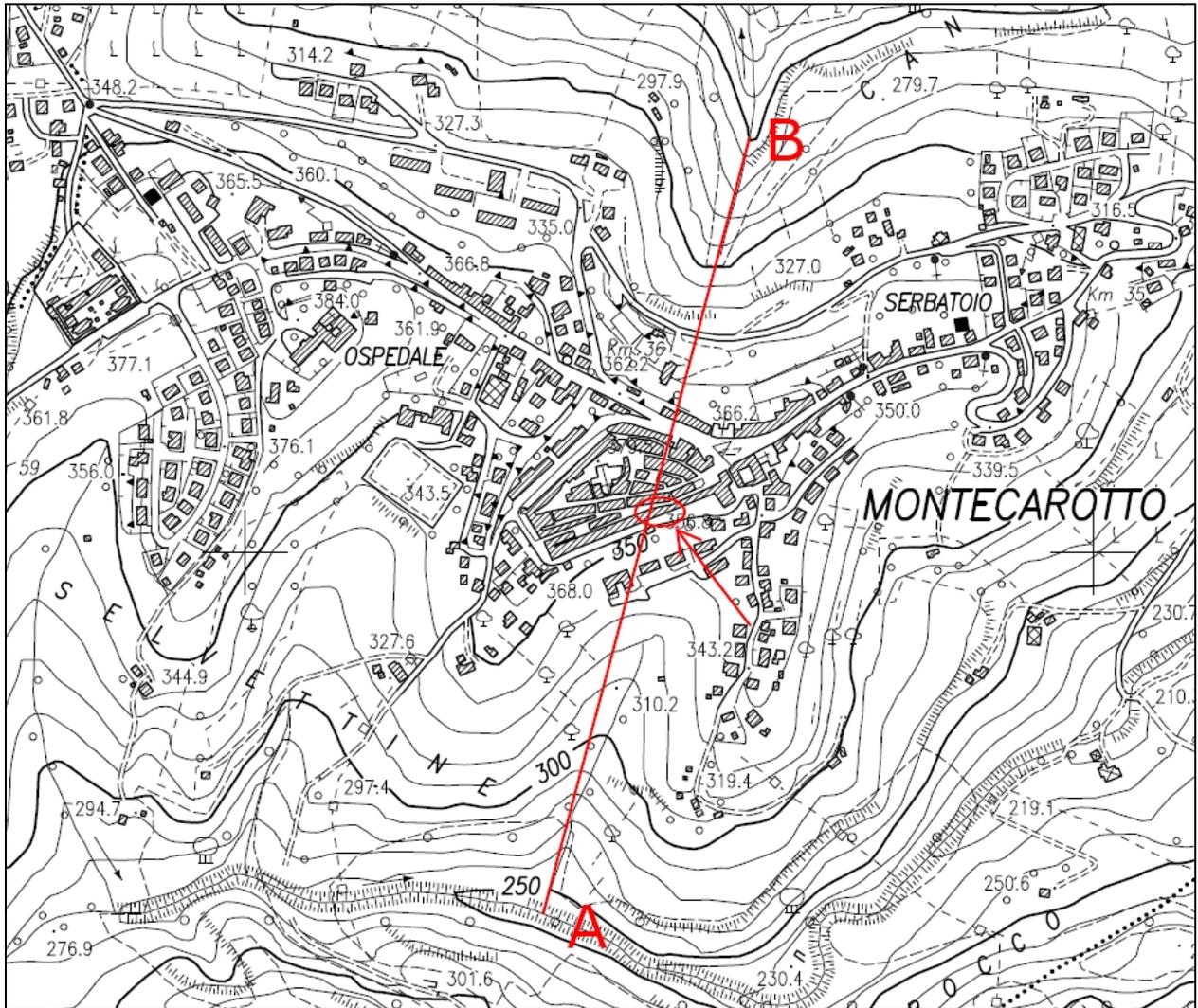


Figura 3.12 - Estratto da Carta Tecnica Regionale per tracciamento sezione morfologica

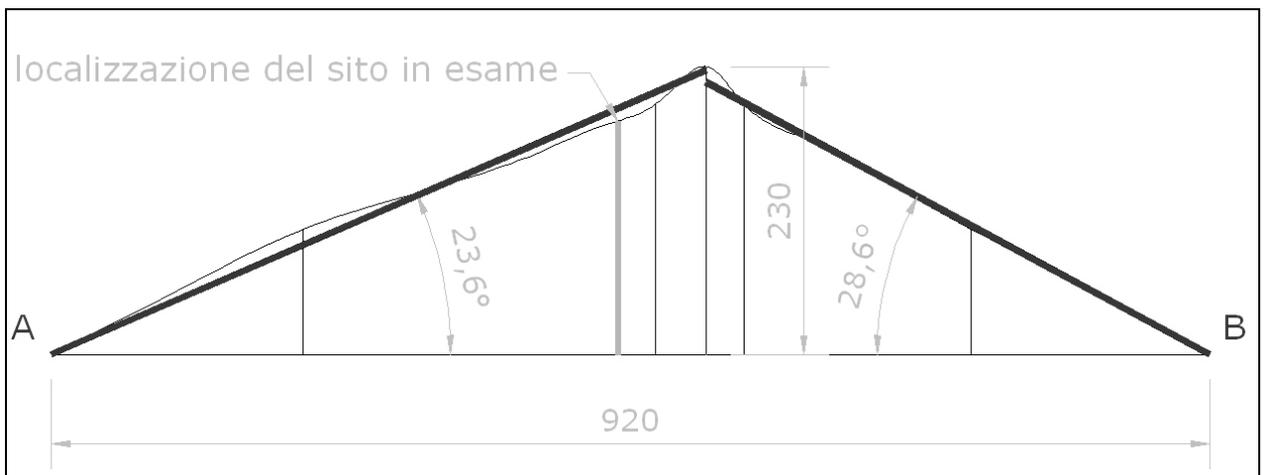


Figura 3.13 - Sezione morfologica

## 3.4 IDENTIFICAZIONE DELL'ORGANISMO STRUTTURALE IN FONDAZIONE

### 3.4.1 Premessa

Pur avendo riscontrato inizialmente - in posizioni generiche - la presenza e la consistenza di fondazioni continue, è stata 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 mura civiche.

In particolare resta non sempre verificata l'estensione a tutta altezza dei contrafforti riscontrati nei seminterrati dei diversi edifici indagati, pur avendone rilevati di completi in corrispondenza delle unità strutturali affiancate che si sviluppano per l'intera altezza delle mura. Il perdurare di tale dubbio ha costretto lo sviluppo di modelli di calcolo alternativi (con riferimento agli studi effettuati con metodologia FEM) ed ha lasciato incertezze sull'adozione di utili adattamenti per l'assunzione di modelli semplificati.

### 3.4.2 Le indagini in situ

Come è stato riscontrato dalle trincee esplorative eseguite per le indagini del 2004 (vedi schema seguente), la fondazione esistente al di sotto delle murature perimetrali esterne è di tipo continuo "a sacco", costituita in pratica da una trincea della larghezza pari a quella della muratura in elevazione e immorsamento variabile da 1.5m a 1.0m, rispettivamente in corrispondenza della cinta muraria su via Circonvallazione e delle murature interne e verso via Marconi.

L'imposta delle fondazioni è all'interno dei livelli ben addensati sabbiosi e sabbioso-arenacei, 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 e frammenti di mattoni di varia grandezza, gettati alla rinfusa con malta con legante prevalentemente di tipo aereo. I paramenti esterni delle murature al contrario sono costituiti da pietre arenacee sbazzate di varia grandezza, talora parzialmente squadrate e disposte abbastanza regolarmente, con malta formata prevalentemente da sabbia e calce.

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

Le fondazioni mostrano un buon grado di conservazione: i mattoni e le pietre arenacee sbazzate 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.

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) e i contrafforti del paramento inclinato delle mura civiche, in particolare quando c'è collegamento fra le due parti con parete continua o con archi in elevazione. Questo grazie all'utilizzo della tecnica del *georadar*, che ha permesso con buona approssimazione ed invasività nulla di individuare la presenza o meno di archi di scarico interrati, necessari per "scavalcare" la zona di terreno alterata o di riporto a tergo delle mura stesse.

### 3.4.3 Considerazioni preliminari alle verifiche

Concludendo, confortati anche dall'assenza di cedimenti 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.

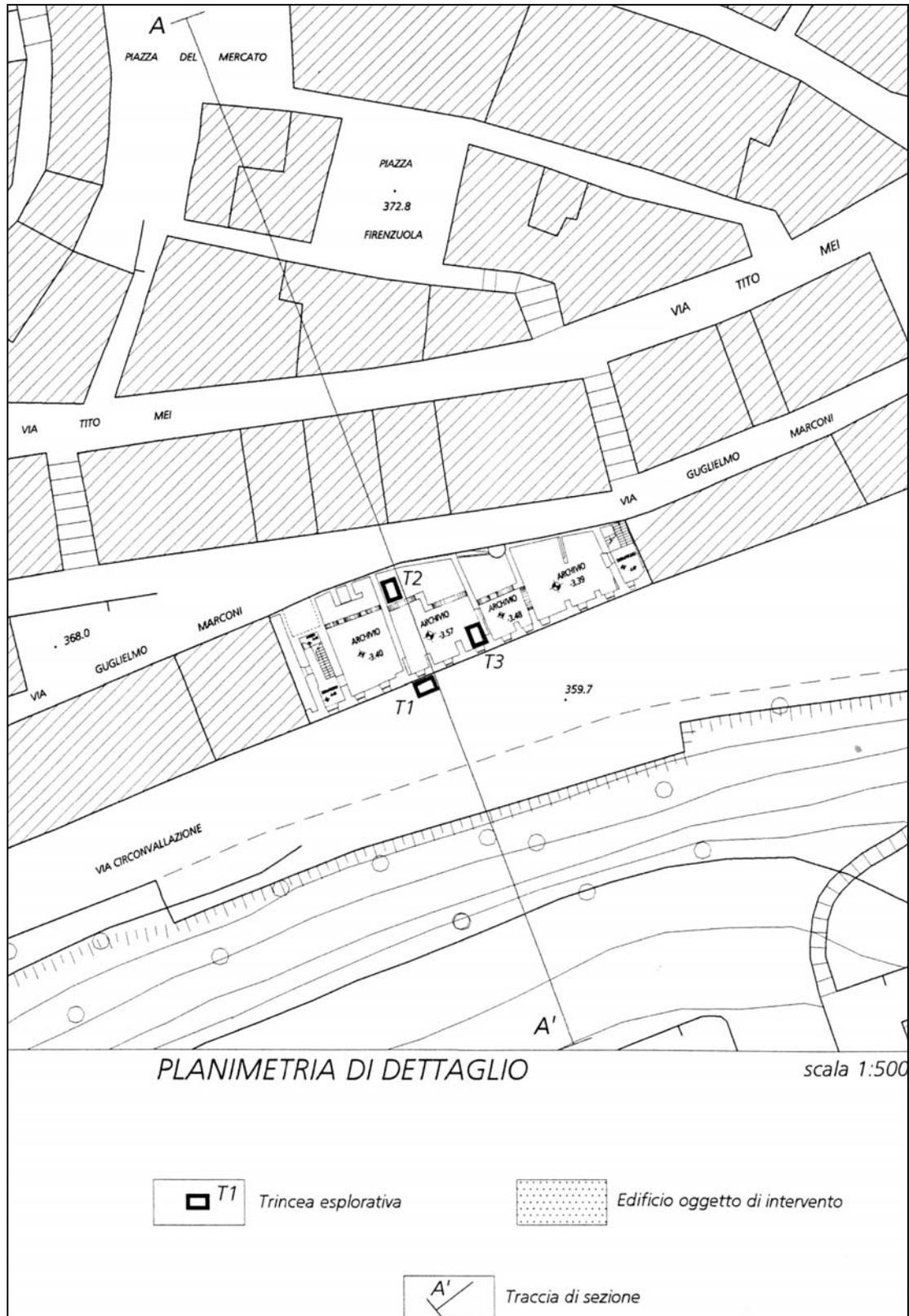


Figura 3.14 - Posizione sezione lito-stratigrafica e sondaggi fondali - da indagini anno 2004

## 3.5 IDENTIFICAZIONE DELL'ORGANISMO STRUTTURALE IN ELEVAZIONE

### 3.5.1 Premessa

Nell'affrontare lo studio rivolto ad una successiva analisi e verifica sismica di un edificio storico o comunque di importanza strategica, 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.

E' 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 tutti.

Ogni edificio ha una sua storia, ha subito 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 in ognuno dei tre edifici ricompresi nello studio, appoggiandosi solamente per quel che riguarda il Municipio cittadino a rilievi svolti in precedenza da professionisti incaricati del "Progetto di recupero e miglioramento sismico" a seguito del danneggiamento provocato dal sisma del 1997.

In aggiunta, sempre con riferimento all'edificio comunale, si sono effettuate indagini conoscitive di approfondimento basate sia su rilievi di tipo visivo, realizzate attraverso la rimozione dell'intonaco e ricorrendo a saggi nella muratura che hanno consentito di esaminarne le caratteristiche in superficie e nello spessore, sia su prove di caratterizzazione meccanica; pur essendo queste indagini effettuate esclusivamente all'interno del Municipio stesso, i risultati sono stati comunque di aiuto anche nello studio delle strutture dei due edifici adiacenti, di caratteristiche simili. A tal proposito, infatti, è la normativa stessa che specifica in due punti del paragrafo 11.5.2.3 che "*... 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*".

### 3.5.2 Le indagini in situ

Le fasi di rilievo e indagine sperimentale sono state 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*, in analogia a quanto riportato per l'edificio di Senigallia.

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 all'interno dell'edificio municipale, all'allegato specifico per una lettura più esaustiva.

#### MUNICIPIO CITTADINO DI MONTECAROTTO

Come già anticipato, l'attuale edificio comunale deriva dalla fusione di alcune unità immobiliari contigue avvenuta negli ultimi decenni del sec. XIX al fine di realizzare una nuova sede che potesse contenere, oltre agli uffici comunali, la pretura, la delegazione di pubblica sicurezza e l'ufficio postale.

Con delibera del maggio 1870 è stata decisa la vendita del vecchio Palazzo Comunale, che si trovava in precarie condizioni di conservazione, e si è dato avvio alla realizzazione della nuova sede municipale.

Nel gennaio 1863 il Sindaco Sante Bartoloni, a proposito della necessità di realizzare il nuovo Palazzo Comunale dichiarò di possedere un edificio posto in "contrada di sotto" composto da due piani più un piano di cantine: "Al piano superiore si accede attraverso una discreta scala che dà accesso ad un ampio salone circondato da quattro stanze. Vendendo la vecchia residenza si possono acquistare i locali attigui al Palazzo Bartoloni ove sistemare la Pretura, la delegazione di pubblica sicurezza nonché le scuole".

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

Con riguardo all'inserimento nella schiera, il Municipio, confinante sul suo lato occidentale con l'edificio Perini-Stronati e ad est con l'edificio noto come Palazzo Vici, si caratterizza per il fatto di avere un ampio sviluppo in senso longitudinale; mostra, quale altra peculiarità, un restringimento nella dimensione "trasversale" man mano che ci si sposta verso il suo estremo orientale, restringimento chiaramente evidenziato negli schemi planimetrici a disposizione.

Dall'osservazione esterna e dalla consultazione delle piante e delle sezioni, si nota la presenza di un volume di altezza inferiore a segnare il confine con l'adiacente Palazzo Vici. La presenza di questo particolare "volume di saturazione" trova spiegazione attraverso lo studio delle vecchie mappe del Catasto Gregoriano. Si nota infatti che nei secoli precedenti era proprio il Municipio cittadino (o più propriamente gli edifici poi confluiti nel Comune stesso) a segnare l'inizio, sul versante est, della schiera oggetto di studio; la presenza di uno stretto vicolo lo separava completamente dal vicino Palazzo Vici.

In seguito (le carte a disposizione non consentono precisi riferimenti temporali), questo piccolo affaccio dalle mura di cinta venne chiuso proprio attraverso il collegamento tra i due palazzi realizzato con una semplice aggiunta di due mura perimetrali a "battere", appunto, contro i paramenti murari laterali del Municipio e di Palazzo Vici.



Per migliore comprensione di questo fatto si riportano due estratti di mappe catastali e delle foto. Nella prima figura è riportato un estratto dal Catasto Gregoriano in cui, cerchiato in rosso, è evidenziato il passaggio pedonale tra il Municipio e Palazzo Vici; nella figura successiva invece una rappresentazione più recente in cui la cerchiatura in rosso evidenzia la chiusura del suddetto passaggio.

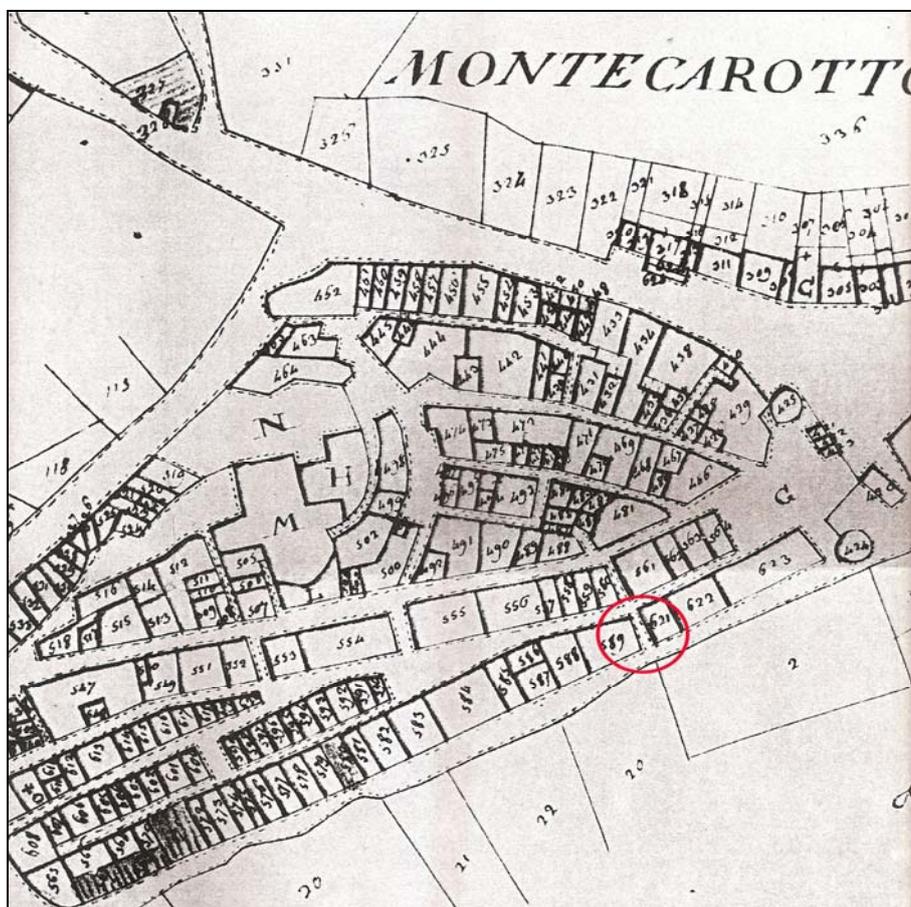


Figura 3.15 - Estratto di mappa da Catasto gregoriano

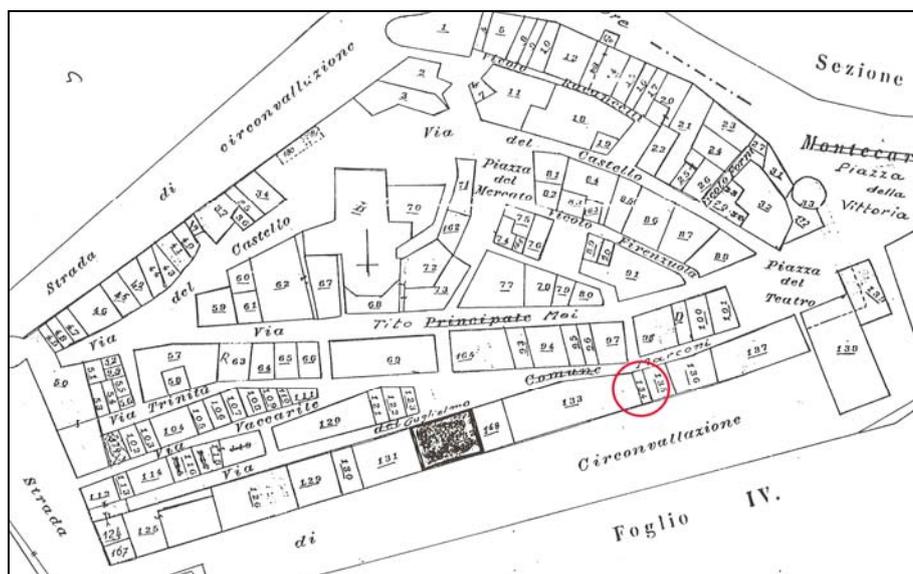


Figura 3.16 - Estratto di mappa catastale recente

I ragionamenti preliminari su questo volume sono stati necessari per le scelte da effettuare in base al suo contributo, cioè nel giustificare come plausibile o meno (nell'individuazione degli schemi limite da adottare per le procedure di analisi) la ricomprensione del suddetto volume di chiusura nei modelli di calcolo. La cosa incide considerevolmente sulla delimitazione del tratto di schiera "funzionalmente in aggregato" in corrispondenza del lato orientale. Stante la genesi della parte, la sua consistenza strutturale (ovviamente in confronto alle strutture limitrofe), il grado di connessione muraria alle pareti longitudinali di continuità e, non ultimo, stante anche la ridotta monoliticità degli orizzontamenti (prevalente l'incidenza delle rampe scala, di scarsa consistenza), con particolare riferimento alla direzione di maggior interesse per questo studio - la trasversale -, si è oggettivamente portati in prima ipotesi a considerare tale componente come il primo sacrificale nella logica di sequenza di perdita di efficacia degli elementi resistenti.

Mentre per tale fianco dell'aggregazione funzionale la scelta di "taglio" effettuata aprioristicamente sembra ben giustificata, per la delimitazione sul lato opposto, tenendo in conto preliminarmente le caratteristiche di massima delle US a seguire, si ritiene adottabile uno sviluppo che ricomprensione i due edifici successivi.

L'interessante studio di tesi, condotto in parallelo al presente, ha consentito 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 tratto di schiera che ricomprensione l'intero Municipio, il Palazzo Perini-Stronati, il Palazzo Santelli.



Foto 3.8 - Volume di chiusura (da via Circonv.)



Foto 3.9 - Volume di chiusura (da via Marconi)

Passando ora alla descrizione dei singoli livelli, si parte dall'analisi del primo piano (ultimo orizzontamento praticabile).

Il suo sviluppo planimetrico, che si manterrà poi invariato anche nei due livelli inferiori, è di circa 36m in senso longitudinale, e varia invece da un valore massimo di 10,60m ad uno minimo di 6,10m in senso trasversale.

Da una prima analisi del rilievo costruttivo, si sono individuati una serie di muri di spina trasversali, di dimensioni variabili tra i 55cm per i più massicci ai 15cm circa per quelli posti al di sotto delle capriate lignee.

Il paramento murario che segna la facciata principale del Municipio sul lato interno al paese risulta essere di spessore medio variabile tra un minimo di 50cm ed un massimo di 58cm; sul lato esterno al paese, invece, il paramento si mantiene di spessore costante e sempre pari a circa 55cm.

Il rilievo costruttivo evidenzia anche le caratteristiche dei solai di copertura; siamo in presenza esclusivamente di tradizionali solai in legno a doppia orditura, non spingenti, con la presenza di due capriate in corrispondenza degli ambienti più ampi. Tali coperture non risultano a vista, ma schermate da controsoffittature in camera canna di consistente sviluppo.

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 presenza di catene.



Foto 3.10 - Sala Consiliare al piano primo



Foto 3.11 - Capriata lignea

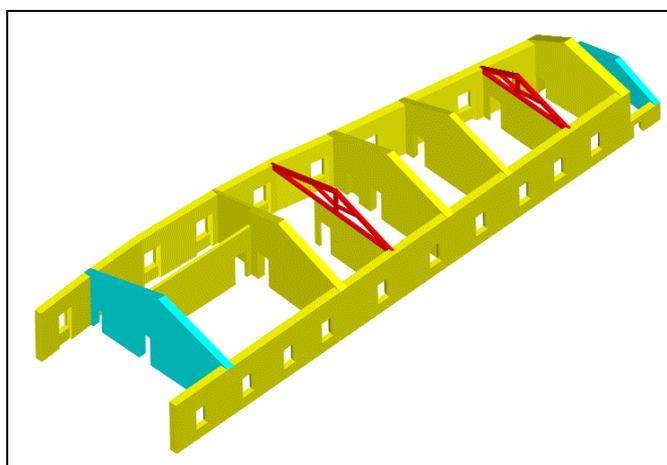


Figura 3.17 - Primo piano Municipio: elementi strutturali (a meno parete con Perini-Stronati)

Il passaggio al piano terra, possibile attraverso il vano scala principale, porta ad un livello con le stesse caratteristiche planimetriche del primo piano.

I muri di spina già presenti al piano superiore trovano appoggio su altre murature portanti ad esse allineate, alcune delle quali caratterizzate da spessori maggiorati con piccole riseghe.

Al piano terra è inoltre presente l'entrata principale del Municipio (su via Marconi), delimitata internamente da alcune pareti di ridotto spessore (22cm), funzionali alla realizzazione delle voltine dei corridoi in camera canna; l'accesso al Municipio è possibile, inoltre, anche attraverso il volume di chiusura adiacente a Palazzo Vici.

Il paramento murario che segna la facciata interna al paese presenta, rispetto al corrispondente del primo piano, una risega tale per cui i suoi spessori passano a valori di 55cm e 64cm; il paramento esterno al paese invece trova perfetta continuità dimensionale con quello del livello superiore, mantenendosi quindi di 55cm.

Dalle tavole relative al rilievo costruttivo si apprezzano anche in questo caso solai lignei a doppia orditura, eccezion fatta per il calpestio della sovrastante Sala Consiliare in cui invece è segnalata la presenza di un solaio tipo "Varese" con doppio tavellonato, sostituito in passato per le motivazioni già anticipate.

Un'altezza media nella norma ed una "apparentemente" corretta organizzazione delle murature caratterizzano in sintesi il piano. Si chiarirà l'affermazione dopo la presa visione del piano sottostante.



Foto 3.12 - Interni del piano terra



Foto 3.13 - Scala principale

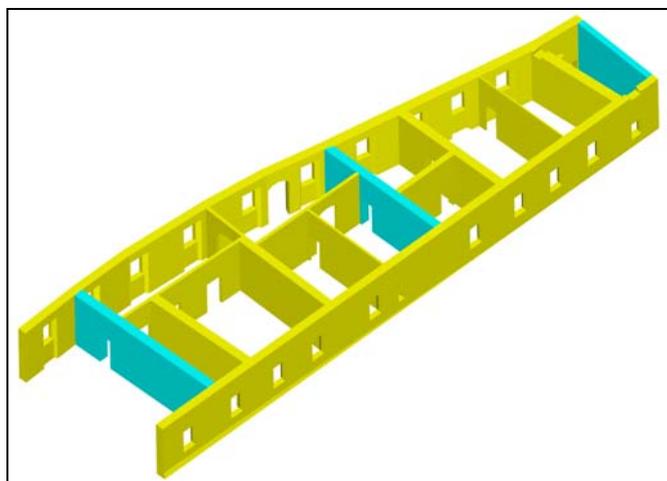


Figura 3.18 - Piano terra Municipio: elementi strutturali (a meno parete con Perini-Stronati)

Infine, passando al piano seminterrato, si arriva ad uno spazio che, come si vedrà anche per gli altri due edifici esaminati, è fortemente caratterizzato dalla presenza delle mura civiche con paramenti inclinati.

Nell'organizzazione strutturale, planimetricamente si discosta dal piano terra e dal primo piano per una serie di motivi.

Innanzitutto, come detto, la presenza del muro di cinta a delimitarne il lato meridionale: ciò ha determinato da sempre problemi di giustapposizione verticale con la parete del livello superiore, soventemente in appoggio in falso sulle travi del solaio per parte dello spessore.

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 le mura civiche, andando a ricollegarsi con i contrafforti del paramento inclinato per mezzo di archi. Questo, come già anticipato, per evitare i problemi di tenuta del terreno a tergo delle mura, di riporto o alterato. Accorgimenti simili sono stati adottati anche a terra per preservare la stabilità del piano di calpestio.

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.

Resta parzialmente aperta, invece, la questione riguardante la possibile estensione verticale dei contrafforti di sostegno delle mura civiche, rinvenibili a questo piano.

Questo perché, nonostante alcune "rassicurazioni" derivanti da:

- l'esigenza di stabilizzare il paramento inclinato quando fuori terra,
- la necessità di chiudere efficacemente (con riferimento alla stabilità verticale) gli allineamenti murari trasversali,
- il fatto che la loro presenza è stata effettivamente riscontrata fino alla quota stradale in quegli edifici che arrivano a sviluppare fino a terra,

non è comunque rimasta completamente indagata ed eventualmente confermata la loro presenza.

Il muro di cinta è caratterizzato dal medesimo spessore che lo contraddistingue anche negli altri edifici, ossia pari a 50cm; per quanto riguarda invece la parete controterra sul lato settentrionale, non avendo a disposizione dati certi, si è scelto di definirla di spessore pari alla corrispondente al piano terra.

Relativamente all'altezza muraria media dei singoli piani, il valore ridotto riscontrabile in corrispondenza del livello seminterrato, ha come conseguenza primaria l'aver 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.



Foto 3.14 - Locali del piano seminterrato



Foto 3.15 - Locali del piano seminterrato



Foto 3.16 - Solai lignei, travi ed archi portanti



Foto 3.17 - Una cisterna del piano

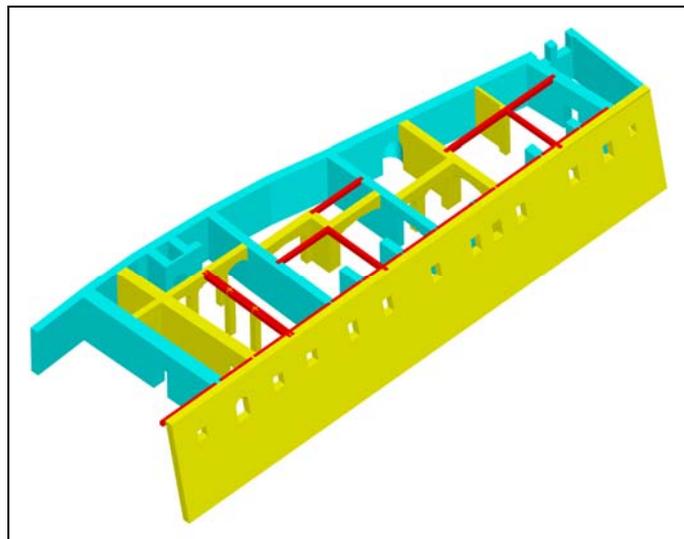


Figura 3.19 - Piano semint. Municipio: elementi strutturali (a meno parete con Perini-Stronati)

Si riportano, infine, delle figure derivanti dalla restituzione CAD 3D, a rappresentare il Palazzo Municipale di Montecarotto nella sua completa ricostruzione della geometria strutturale.

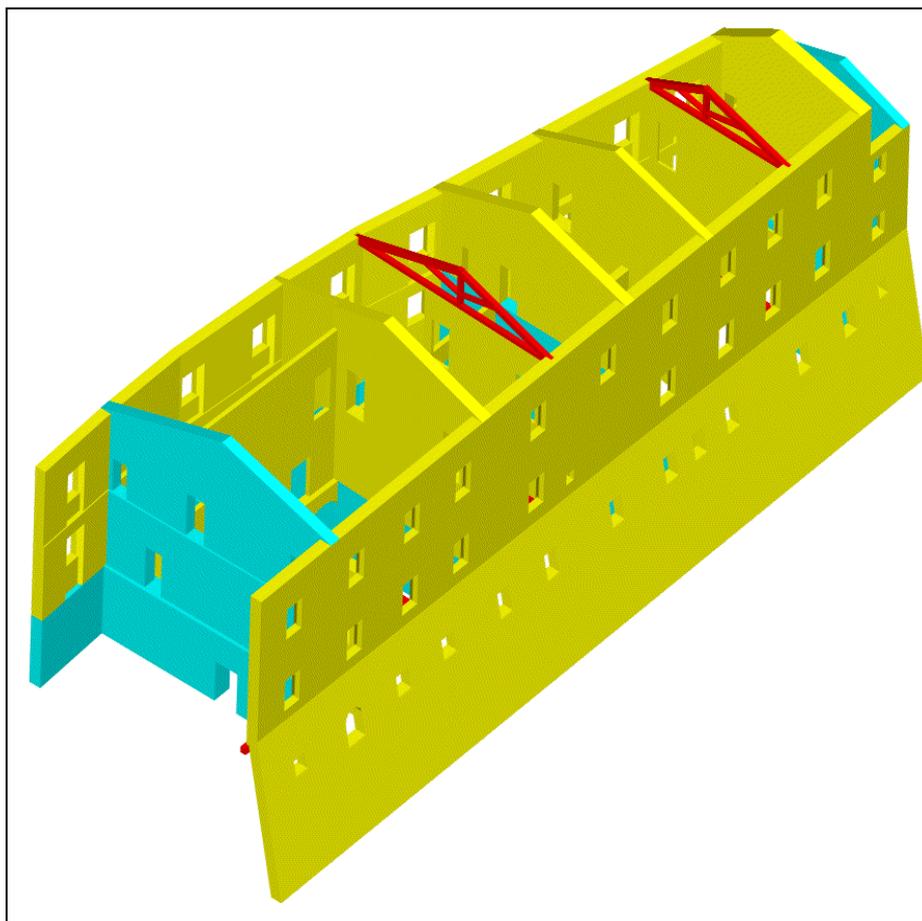


Figura 3.20 - Municipio di Montecarotto da via Circonvallazione (a meno parete con Perini-Stronati)

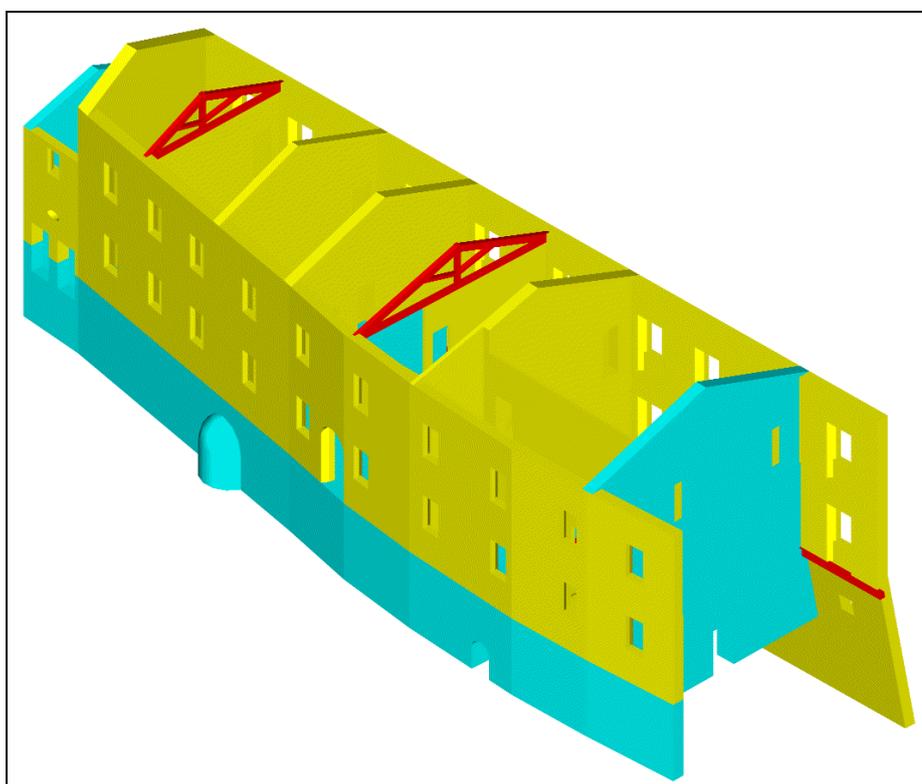


Figura 3.21 - Municipio di Montecarotto da via Marconi (a meno parete con Perini-Stronati)

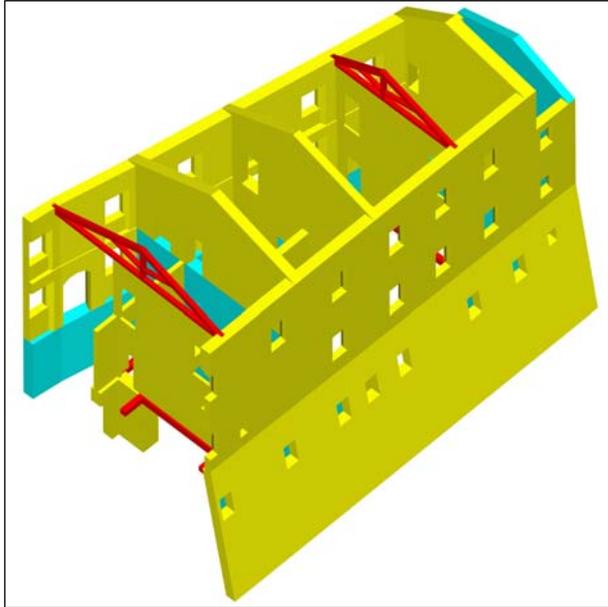


Figura 3.22 - Municipio di Montecarotto:  
sezione trasversale in corrispondenza della  
prima parete del vano scale (prima capriata); si  
noti la muratura in falso per due livelli su una  
trave lignea

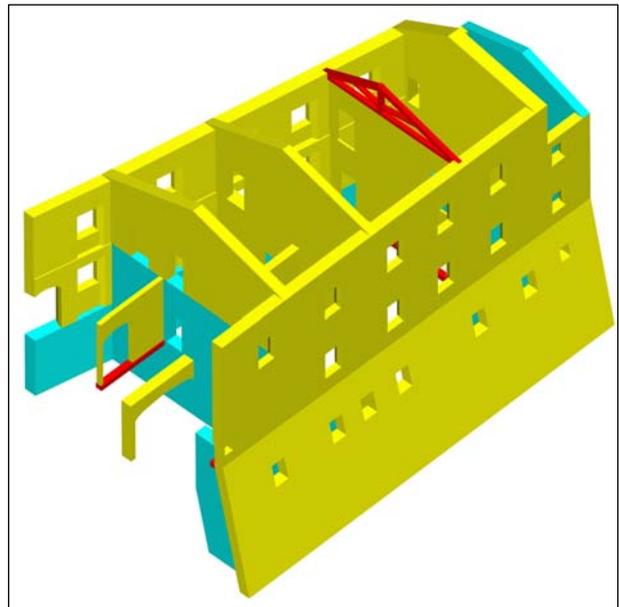


Figura 3.23 - Municipio di Montecarotto:  
sezione trasversale in corrispondenza della  
seconda parete del vano scale;  
si noti la muratura in falso per un livello su una  
trave lignea

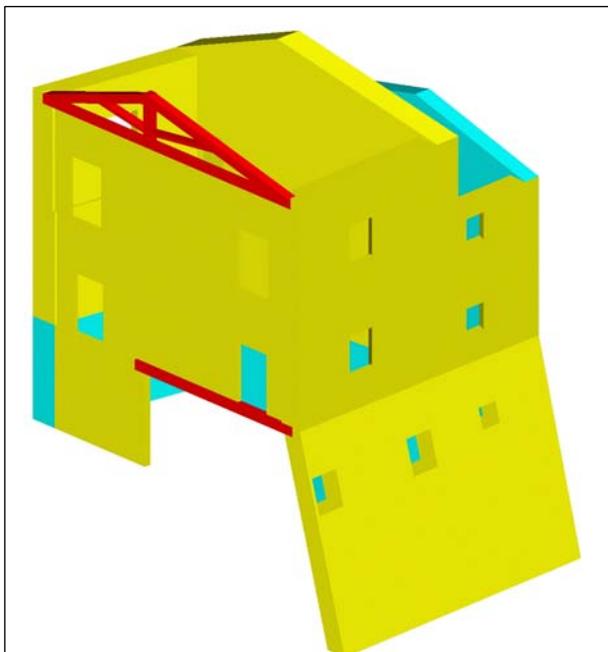


Figura 3.24 - Municipio di Montecarotto:  
sezione trasversale in corrispondenza della  
seconda capriata; si noti la muratura in falso per  
due livelli su una trave lignea

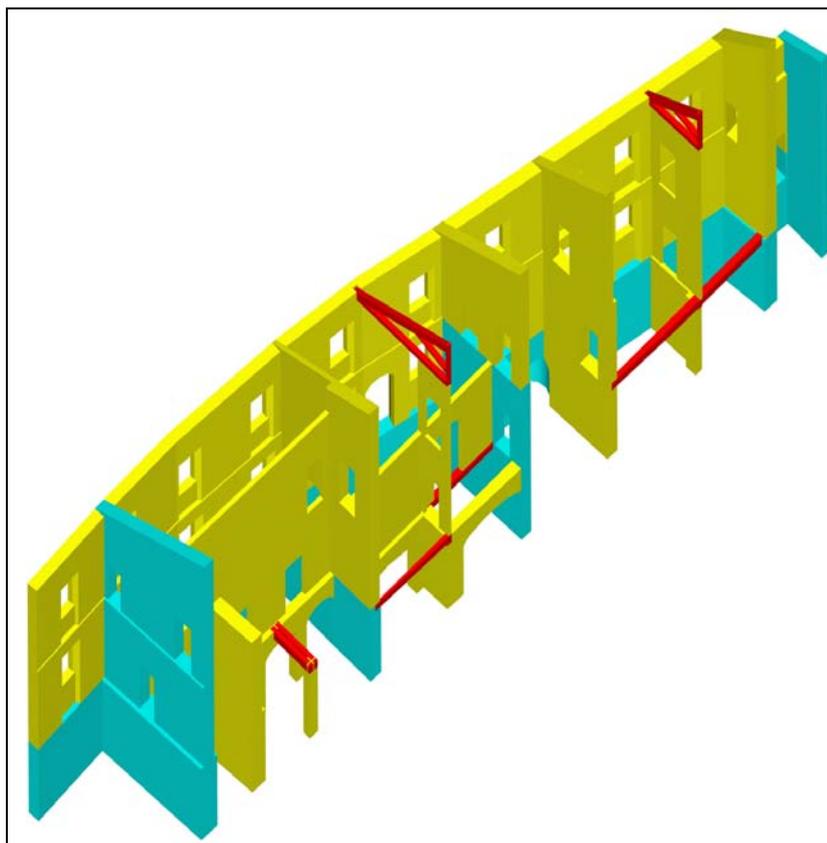


Figura 3.25 - Municipio di Montecarotto: sezione longitudinale verso via Marconi

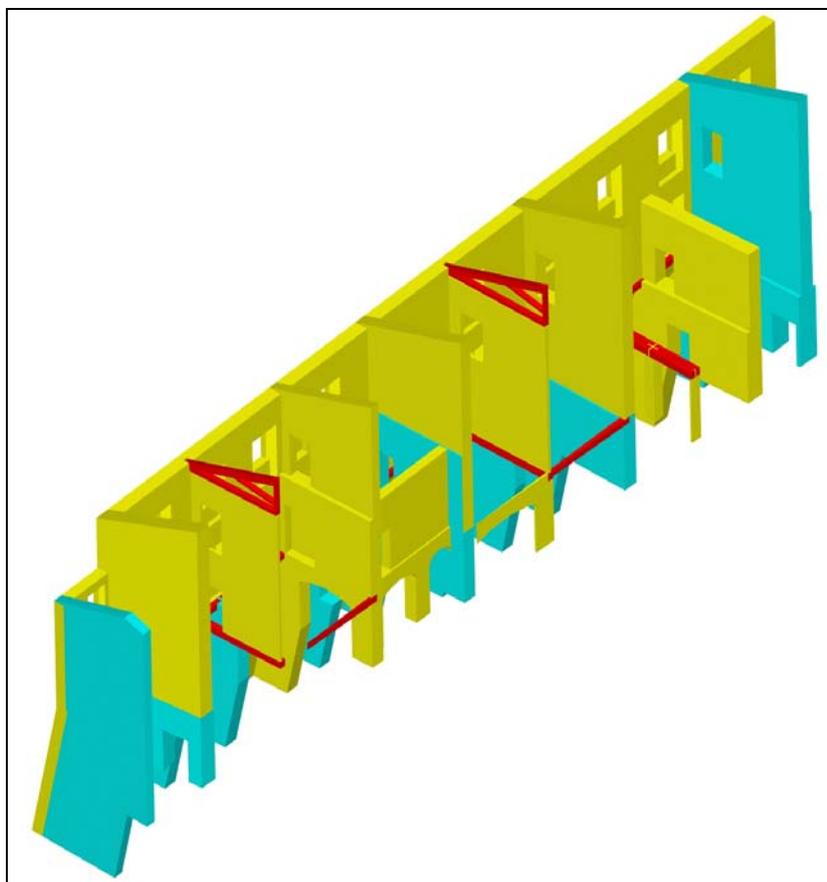


Figura 3.26 - Municipio di Montecarotto: sezione longitudinale verso via Circonvallazione

### PALAZZO FAM. PERINI-STRONATI

L'edificio centrale della schiera in esame si sviluppa su sei piani complessivi, completamente apprezzabili da un'osservazione fatta dall'esterno delle mura civiche; i primi tre risultano essere parzialmente interrati e, quindi, non visibili dal lato interno al paese.

Questo particolare rappresenta una delle due caratteristiche di unicità dell'edificio rispetto alle altre unità componenti la "stecca", che presentano sì piani parzialmente interrati, ma che mai sviluppano i propri livelli per l'intera estensione in altezza del muro di cinta.

L'altra eccezionalità è costituita dalla sequenza tipologica degli orizzontamenti: partendo dal basso, i primi due livelli (deposito merci) presentano una tipologia di solaio con profilati in acciaio a sostenere voltine in laterizio, che si discosta completamente dalla tipologia delle strutture di orizzontamento del piano scantinato sovrastante - con volte a crociera ed a botte - decisamente più massiva, per poi passare fino in copertura (per le abitazioni) al tradizionale solaio ligneo.

Questa seconda peculiarità porta ad un'importante riflessione su quello che è stato il probabile processo storico di "nascita e crescita" dell'edificio rilevato. Si è ragionevolmente portati a credere, infatti, che gli ultimi due livelli semi-interrati posti al di sotto del piano voltato, siano stati ottenuti solo in seguito alla costruzione dell'edificio e ricavati, quindi, attraverso una vera e propria opera di svuotamento per necessità nate solo successivamente.

E' altresì importante sottolineare la valenza dell'orizzontamento voltato intermedio nei confronti delle murature interne dei piani superiori: questo costituisce un vero e proprio piano "fondale", al di sopra del quale la regola di disposizione degli allineamenti murari prescinde completamente da quella adottata inferiormente. Ciò ha comportato 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".

Si riportano di seguito delle figure derivanti dalla restituzione CAD 3D, a rappresentare Palazzo Perini-Stronati, che aiutano a comprendere quanto detto.

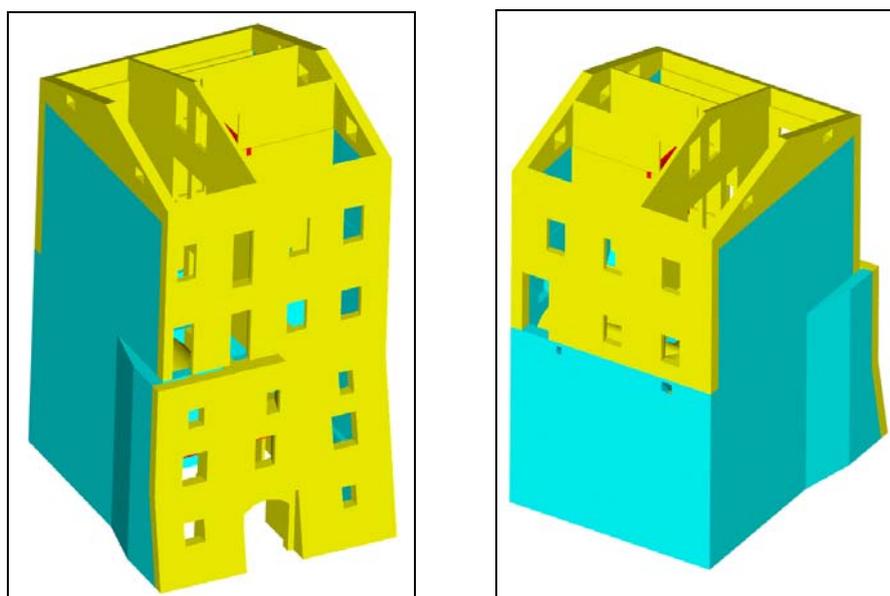


Figura 3.27 - Palazzo Perini-Stronati

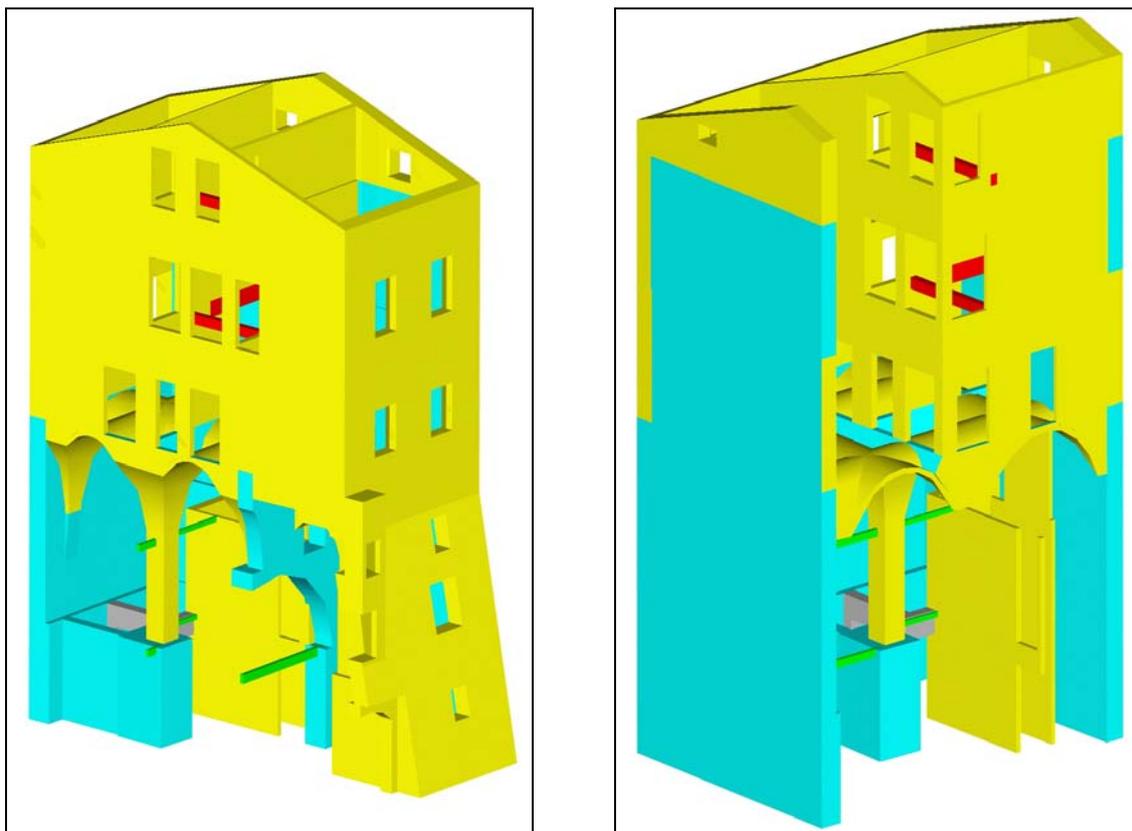


Figura 3.28 - Palazzo Perini-Stronati: sezioni trasversali

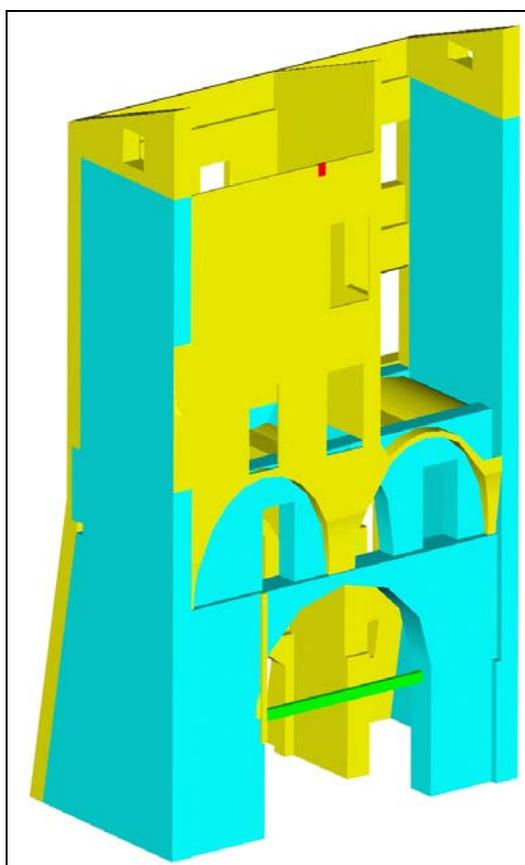


Figura 3.29 - Palazzo Perini-Stronati: sezione longitudinale

### PALAZZO FAM. SANTELLI

Il terzo edificio oggetto di indagine è stato quello di proprietà del Dott. Giuliano Santelli, posto sul confine occidentale dell'edificio appena descritto.

Si tratta di un fabbricato noto anche come Palazzo ex-Baldoni ora Santelli-Cesaroni, soggetto a vincolo diretto ai sensi del D.L. 22 gennaio 2004 n.42 "Codice dei beni culturali e del paesaggio".

La configurazione altimetrica del fabbricato torna ad essere come quella del Municipio: un unico piano seminterrato - compenetrato con le mura civiche - e due piani completamente fuori terra. Per quanto riguarda le pareti, mentre per quelle longitudinali si mantiene la regolarità delle aperture osservabile anche negli edifici adiacenti, per le trasversali interne si sono appurate, dopo un'attenta analisi, delle tipicità che ne limitano fortemente la prestazione strutturale. In corrispondenza del primo muro di spina (arrivando da Palazzo Perini-Stronati), infatti, si ha una situazione compromessa dalla somma delle presenze di canne fumarie e di aperture: la situazione finale è quella della sezione trasversale riportata nel seguito. La seconda parete, apparentemente riscontrabile dalle piante architettoniche come strutturalmente efficace per tutta la continuità orizzontale e verticale delle tre elevazioni, si è rivelata, invece, essere muro portante solo parzialmente, diventando poi semplice tramezzo divisorio. Dalle figure successive si vede, infatti, che il muro di spina di sinistra non si estende, come l'altro, per tutta la larghezza dell'edificio, ma termina all'incirca a metà, affidando poi la funzione strutturale di collegamento murario e di supporto delle orditure dei solai ad un paio di travi lignee affiancate.

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.

Si riportano di seguito le restituzioni CAD 3D di Palazzo Santelli.

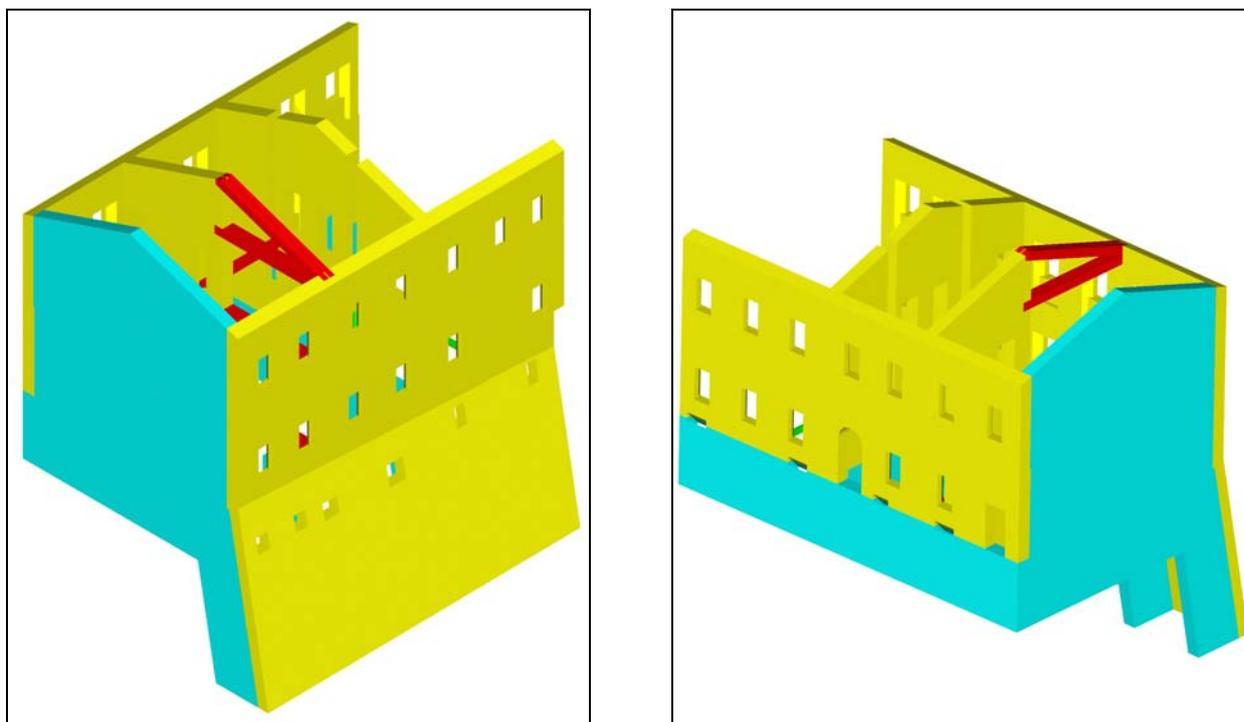


Figura 3.30 - Palazzo Santelli (a meno parete con Perini-Stronati)

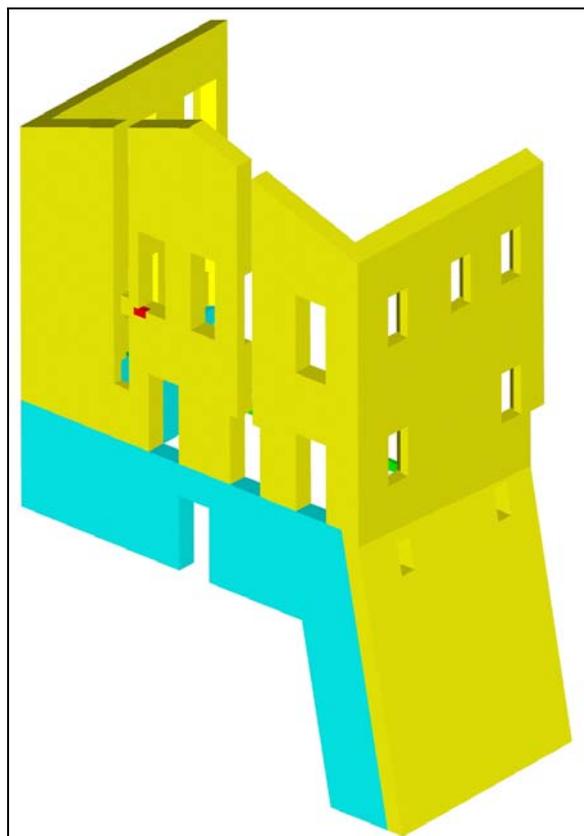
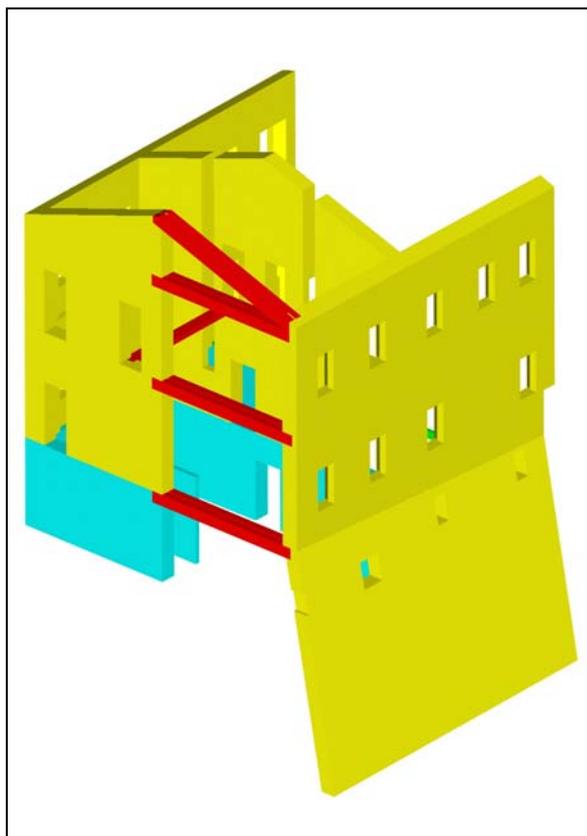


Figura 3.31 - Palazzo Santelli: sezioni trasversali

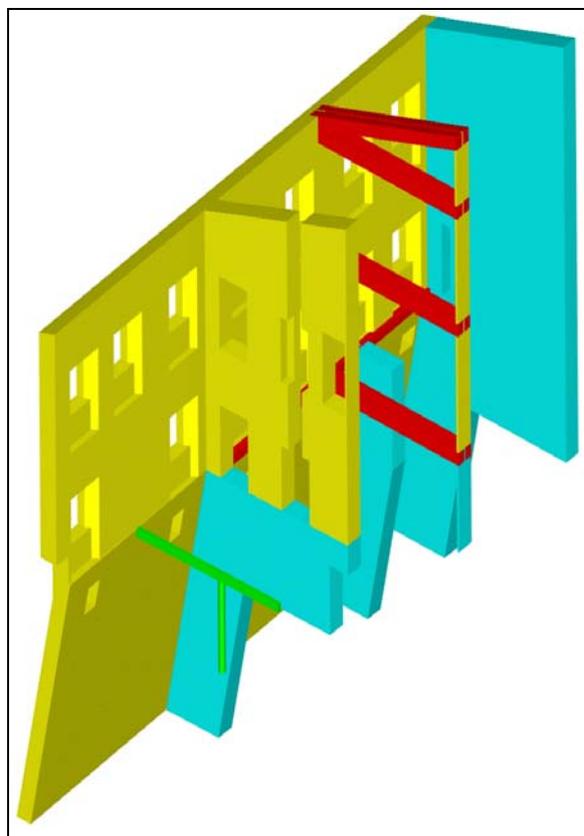
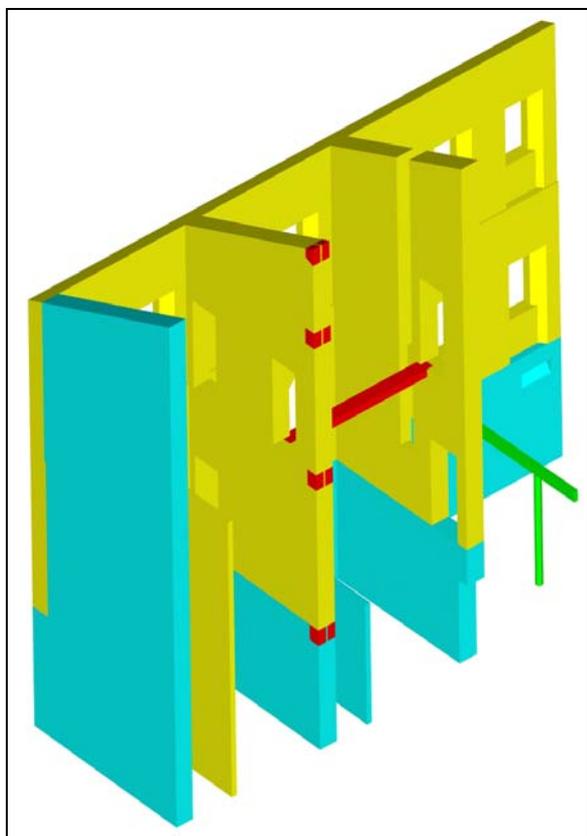


Figura 3.32 - Palazzo Santelli: sezioni longitudinali

### 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. Si apprezzi, dallo sfalsamento verticale delle finestre, la presenza di solai a quote differenziate fra le diverse US, come già desumibile dalle fotografie precedenti.

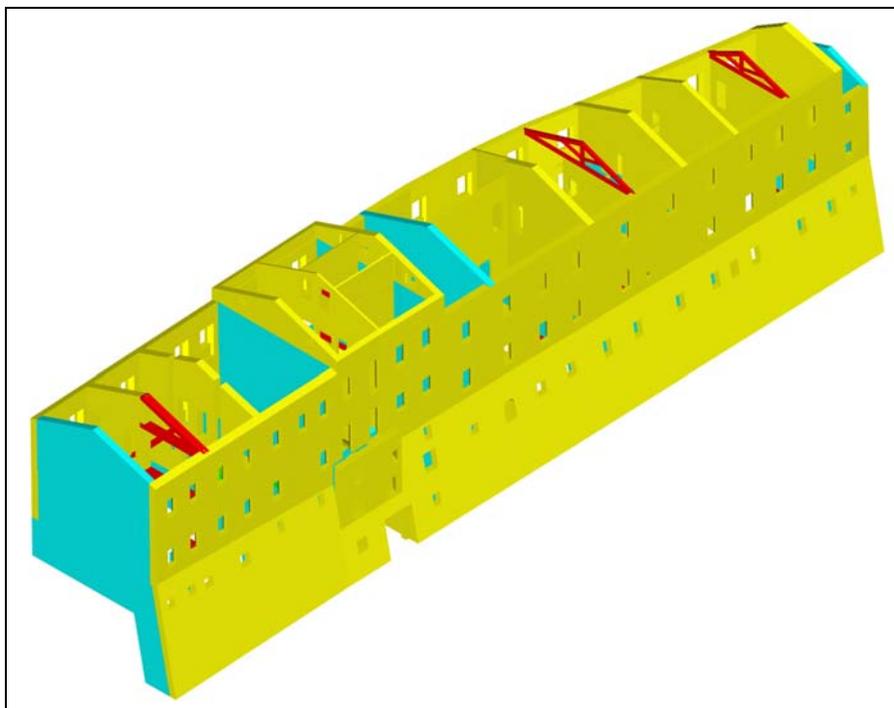


Figura 3.33 - L'aggregato studiato, da via Circonvallazione

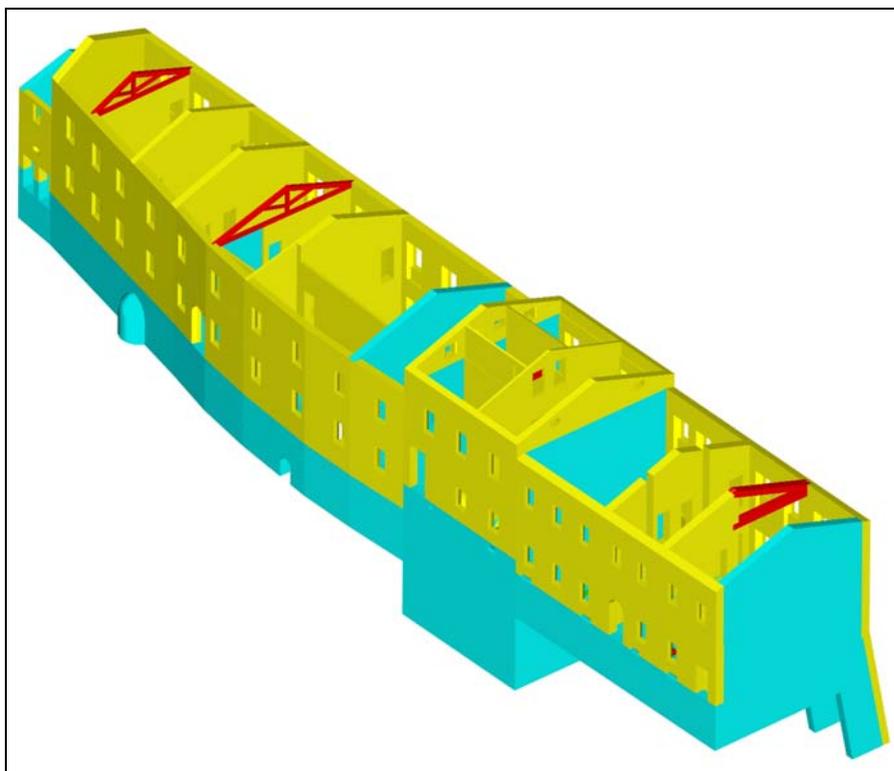


Figura 3.34 - L'aggregato studiato, da via Marconi

### 3.5.3 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 effettuate ed anche in base a quanto riscontrato dalle indagini visive e sui dettagli, tutto rintracciabile nella Relazione P2982A/06 della SGM in allegato, ci si è potuti accostare alla *tabella 11.D.1* dell'*Allegato 11.D* all'OPCM 3431 ed estrarne i parametri numerici tra quelli proposti.

Al termine dell'unica prova con martinetti piatti doppi, effettuata sulla muratura in pietra, la stima del valore del modulo elastico  $E$  è stata fatta considerando le letture n°5, isolando la parte lineare del grafico sforzo-deformazioni unitarie ottenuto per interpolazione dei primi 6 valori (sviluppo lineare). Il modulo elastico è dato dal valore del coefficiente angolare della linea di tendenza di tale grafico, e cioè pari a:

$$E = \sigma/\varepsilon = 719 \text{ N/mm}^2$$

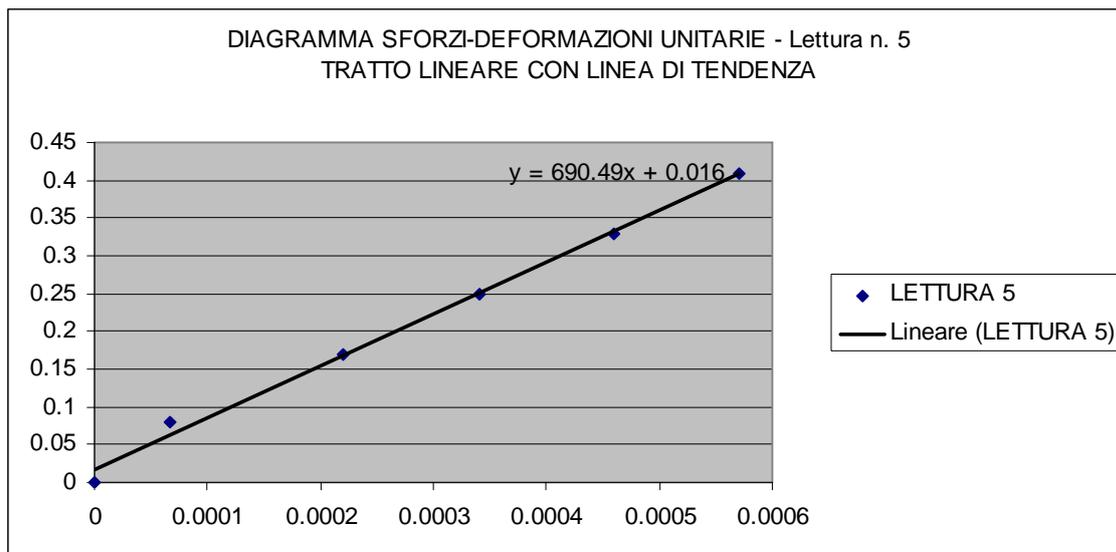


Figura 3.35 - Determinazione del modulo elastico  $E$  della muratura in pietra

La definizione dei parametri meccanici è stata sì fatta in funzione di quanto suggerito dalla normativa e dal livello di conoscenza raggiunto, ma anche attraverso un'osservazione critica dei valori proposti, supportati in questo dall'articolo del Prof. Lagomarsino citato nel capitolo precedente.

Ricordando che si giudica raggiunto il livello di conoscenza LC2, per tale livello l'ordinanza stabilisce quanto segue: *"LC2 - Resistenze: medie degli intervalli riportati in tabella 11.D.1 dell'Allegato 11.D 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 in mattoni pieni e malta di calce**.

I *range* di valori proposti per questi due tipi di muratura dalla *tab. 11.D.1* sono:

	$f_m$	$\tau_0$	E	G	w
	[N/cm <sup>2</sup> ]	[N/cm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[kN/m <sup>3</sup> ]
	min-max	min-max	min-max	min-max	
<b>Muratura in pietrame disordinata</b>	60	2	690	115	
	90	3.2	1050	175	19
<b>Muratura in mattoni pieni e malta di calce</b>	180	6	1800	300	
	280	9.2	2400	400	18

In particolare si noti come il valore determinato dall'unica prova effettuata ricada all'interno dell'intervallo prospettato per la tipologia muraria individuata.

Relativamente ai valori della resistenza media a taglio  $\tau_0$  e di quella media a compressione  $f_m$ , l'Ordinanza indica, per un LC2, di assumere il valor medio del *range* di variazione di *tab. 11.D.1*. Si ricordi però 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 *tab. 11.D.1*, 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.

Anche dal pur ridottissimo "esercizio" effettuato dalla Regione Marche, si è trovata parimenti una buona rispondenza per le equivalenti tipologie marchigiane.

Si riportano quindi i valori definiti in seguito a questo secondo passaggio:

	$f_m$	$\tau_0$	E	G	w
	[N/cm <sup>2</sup> ]	[N/cm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[kN/m <sup>3</sup> ]
<b>Muratura in pietrame disordinata</b>	75	2.6	435	145	19
<b>Muratura in mattoni pieni e malta di calce</b>	230	7.6	1050	350	18

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 l'Ordinanza 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 in *tab. 11.5.1*, sarà pari ad 1,2.

I valori definitivi, da adottare per i parametri di calcolo delle due tipologie murarie presenti nell'aggregato, saranno quindi i seguenti:

	$f_m$	$\tau_0$	E	G	w
	[N/cm <sup>2</sup> ]	[N/cm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[kN/m <sup>3</sup> ]
<b>Muratura in pietrame disordinata</b>	62.5	2.17	435	145	19
<b>Muratura in mattoni pieni e malta di calce</b>	191.67	6.33	1050	350	18

Tali valori sono da considerare finali, in quanto non vengono applicati gli ulteriori coefficienti correttivi per i parametri meccanici previsti dalla *tab. 11.D.2*, stante le risultanze delle indagini sperimentali e visive.

## 3.6 ANALISI AGLI ELEMENTI FINITI

### 3.6.1 Introduzione

Come anticipato all'inizio del documento, volontà di questo studio era quello di mostrare un accostamento possibile all'argomento "aggregati edilizi" che non prevedesse 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 edilizia rappresentata dal Municipio, ma anche per aiutare a comprendere come il mantenimento di destinazioni d'uso a caratteristica più elevata (es. edificio strategico) all'interno di una schiera con utilizzo più omogeneo (es. abitazioni) possa coinvolgere, nelle scelte progettuali, le US in continuità.

Si è affrontato pertanto 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 una "messa a punto" reciproca, capace di permettere ad almeno uno dei due iter di arrivare più compiutamente alla finalità della verifica.

Maggiori dettagli delle analisi, qui sintetizzate, saranno resi disponibili nel sito della Regione Marche.

### 3.6.2 La modellazione ad elementi finiti

Con la prima procedura si è affrontato lo studio del comportamento strutturale dell'aggregato per mezzo di un'analisi dinamica modale su un modello agli elementi finiti a caratterizzazione lineare di materiali e vincoli, con il programma COSMOSM nella sua versione 2007.

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 sono stati:

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

Vista la geometria non regolare della struttura, le diverse zone massive di transizione dovute alle diverse tipologie costruttive, i cambi dei materiali e, soprattutto nel caso dell'unità strutturale centrale, la differente organizzazione muraria ai piani, si è optato per la creazione di un modello che prevedesse l'utilizzo di elementi complessi.

Per la muratura, la maglia base consiste nella ripetizione di elementi tetraedrici di tipo "TETRA" a 10 nodi, caratterizzati da un *element size* medio di 46cm.

Si riporta sotto una figura ad evidenziare l'estrema adattabilità degli elementi "TETRA10" anche in quelle che risultano essere le zone con maggiori particolarità ed eterogeneità geometriche e materiche.

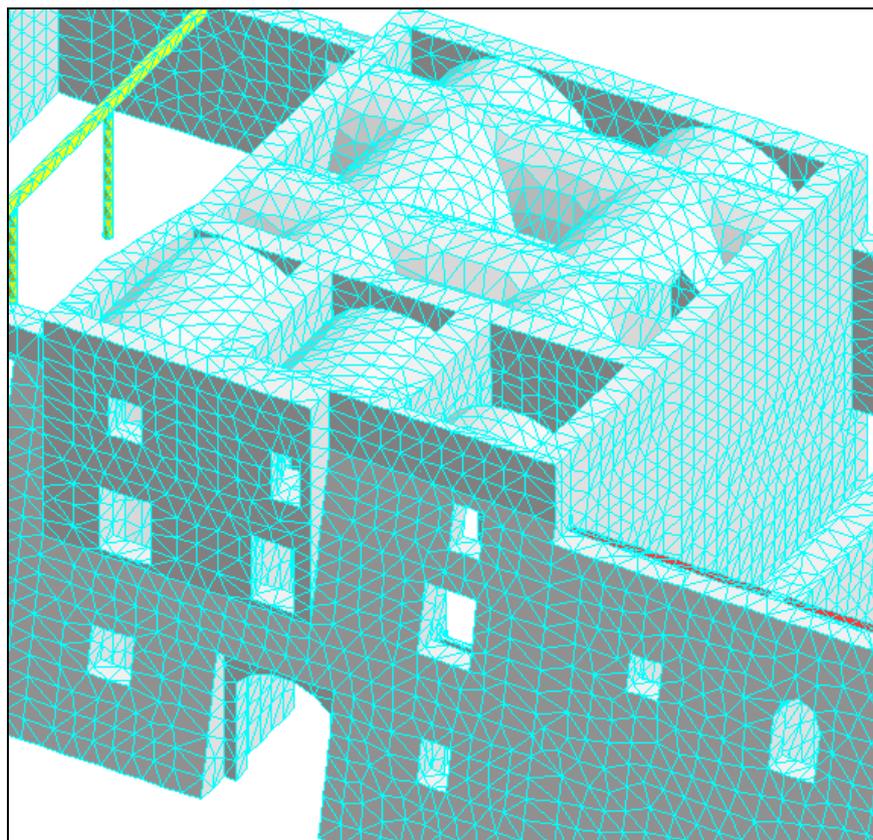


Figura 3.36 - Mesh FE con elementi solidi per le parti murarie

Per quanto riguarda la modellazione dei solai di orizzontamento e delle falde di copertura, tali strutture hanno trovato rappresentazione attraverso elementi triangolari di tipo "SHELL" a 6 nodi.

Questa modellazione ha avuto quale scopo quello di ottenere, di volta in volta a seconda della direzione di orditura, elementi ortotropi con solo comportamento a lastra. Questo nell'ottica di imporre una rigidità 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 (già aprioristicamente di dubbia applicabilità per le strutture in questione) e l'ipotesi di assenza totale di vincolo realizzata dall'orizzontamento. Mentre la prima supposizione, se non verificata, può "semplicemente" portare a studiare un'altra struttura, la seconda idea, che riconduce al calcolo dei singoli elementi resistenti verticali (intera parete o unico maschio murario), anche se normalmente ha come primo effetto una sovrastima delle azioni orizzontali di competenza, può comunque far perdere di vista le problematiche connesse all'interazione fra le US, che possono invece determinare più correttamente - per la struttura da esaminare - sia ulteriori incrementi di azioni per accoppiamenti con effetto di "trascinamento", sia, all'opposto, "sconti" dovuti a contributi irrigidenti. Anticipando 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 ad alcune sorprese; fatto, questo, che si intende evidenziare attraverso il presente studio.

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.

Anche per gli elementi "SHELL6" si riporta un particolare del loro utilizzo, in corrispondenza delle falde di copertura.

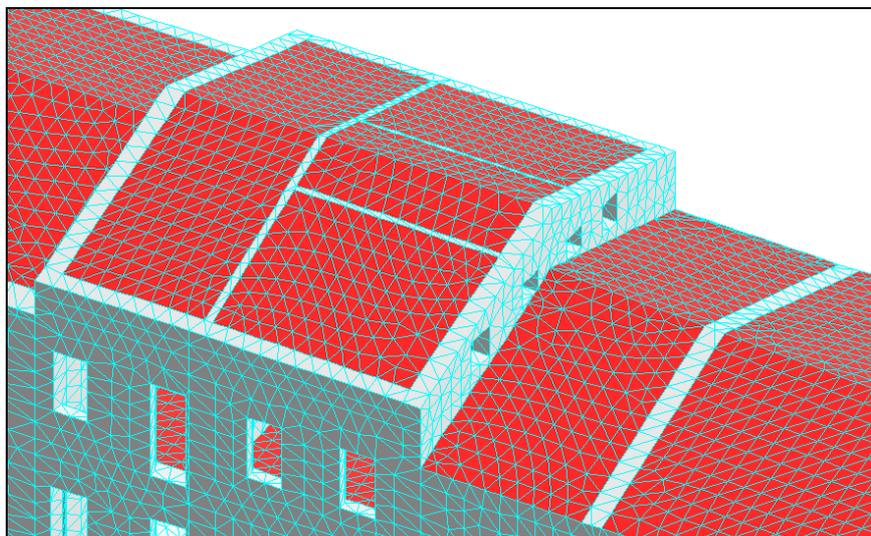


Figura 3.37 - Mesh FE con elementi bidimensionali per i solai

### 3.6.3 Schematizzazione dei vincoli e modellazione del terreno

La complessità organizzativa dell'aggregato e la sua eterogeneità strutturale ha 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. Come già ampiamente descritto nei paragrafi precedenti, l'aggregato a schiera oggetto di studio si trova in una posizione singolare, con appoggio parziale sulle mura di cinta cittadine, segnando, di conseguenza, un notevole salto di quota tra il lato interno al paese e la sottostante circonvallazione esterna.

Inoltre, dei tre edifici analizzati, solo il nucleo centrale sviluppa il proprio volume su sei livelli (dal piano stradale ai piedi della cinta muraria, sino al sottotetto) disponendo di tre piani semi-interrati, mentre le due strutture laterali (Palazzo Santelli e il Municipio) si limitano ad un unico piano parzialmente interrato.

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

Molto sinteticamente, sono stati 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 in corrispondenza della formazione efficiente, mentre per la sola base delle mura civiche si è imposto un vincolo completamente attivo.

Infine, per la determinazione della spinta esercitata dal terreno a tergo delle murature sommitali dei piani seminterrati su via Marconi, il riferimento è stato il pur non approvato Allegato 4 della Ord. 3274.

### 3.6.4 Modelli di studio

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 è passati 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 sono realizzati una serie di altri sottomodelli per gli approfondimenti del caso. In

particolare, per il Municipio ha avuto significato anche il modello che lo accoppia all'edificio al centro dell'aggregato in esame.

Si riportano due immagini a rappresentare il solo modello completo dell'intero aggregato.

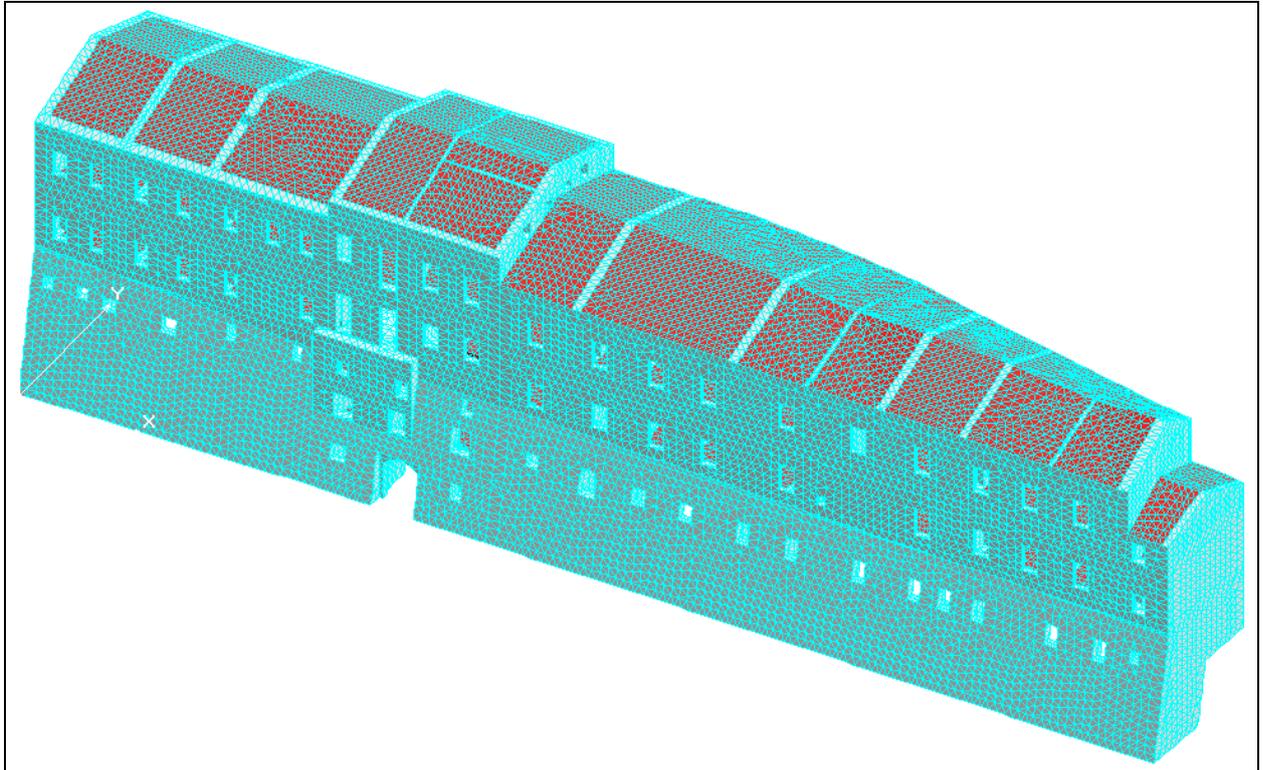


Figura 3.38 - Mesh dell'aggregato completo, da via Circonvallazione

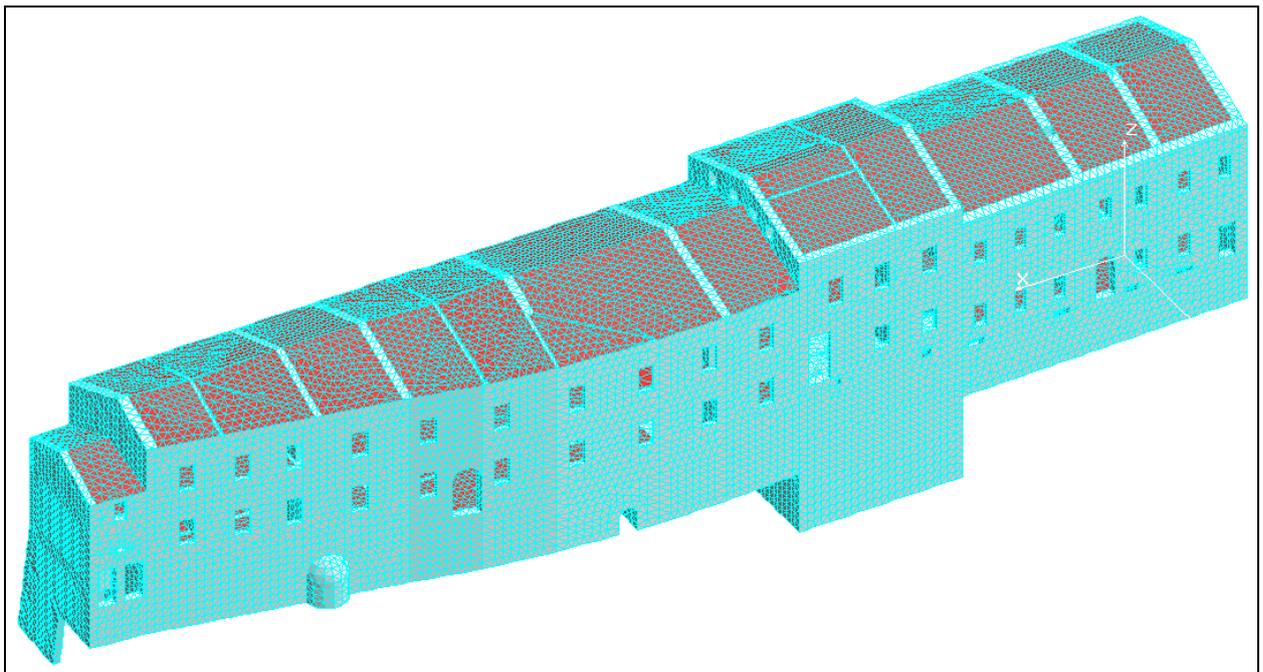


Figura 3.39 - Mesh dell'aggregato completo, da via Marconi

### 3.6.5 Analisi dinamica modale

Secondo quanto indicato dall'OPCM 3431 ai paragrafi 4.5.3 e 8.1.5.3, i modelli FEM appena descritti sono stati studiati attraverso un'analisi dinamica modale con successiva applicazione di uno spettro elastico.

I modelli 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 (dir. X nel S.R. considerato), 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 (ben oltre i 3 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" è prevista e supportata anche dall'OPCM 3431 all'interno del punto 11.5.5.1 riportato all'inizio del capitolo.

A seguito dell'estrazione di un congruo numero di modi di vibrare, è stato quindi introdotto uno spettro elastico (quindi *fattore di struttura*  $q=1$ ), come definito dal D.M. 14 Settembre 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.

Si riporta la rappresentazione grafica dello spettro elastico utilizzato, spettro riferito, in funzione della zonazione sismica relativa a Montecarotto e delle caratteristiche del terreno, ad una zona sismica "2", suolo di fondazione di categoria "A", con in più un *coefficiente di amplificazione topografica*  $S_T$  pari a 1,2 e un *fattore di importanza*  $\gamma_I$  di 1,4 da applicare per edifici di categoria I.

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

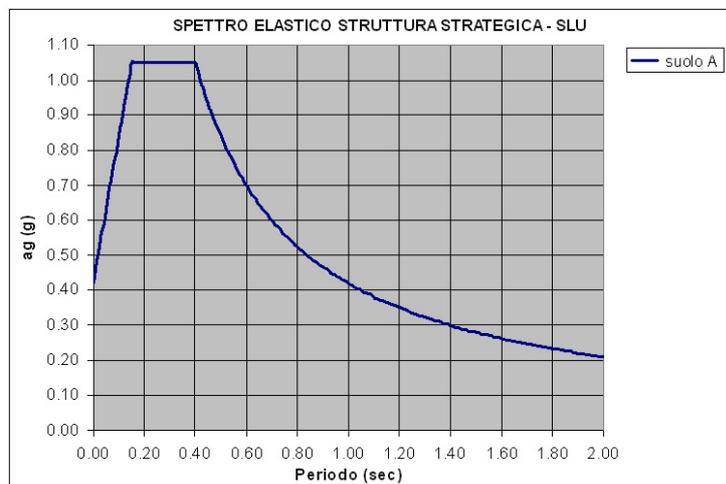


Figura 3.40 - Spettro elastico per zona 2, suolo A,  $S_T=1.2$ ,  $\gamma_I=1.4$

### 3.6.6 Prima estrazione dei risultati

Le valutazioni sono state effettuate attraverso un confronto tra i modelli in termini di spostamenti massimi subiti, come detto, in direzione Y; come punti di controllo per il comportamento del fianco del Municipio in continuità, sono stati scelti due allineamenti verticali posti sugli spigoli esterni delle due US in contatto, di cui sotto si riporta una rappresentazione grafica a chiarimento (con indicazioni riportate sulla parete dell'edificio centrale). Gli omologhi sono presenti sul fianco verso Santelli.

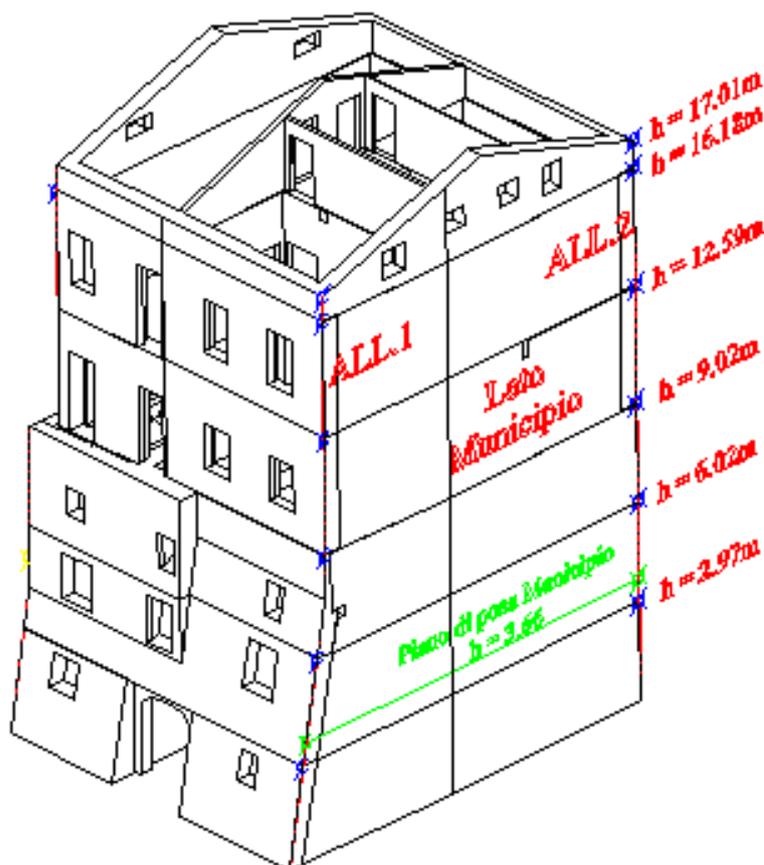


Figura 3.41 - Allineamenti verticali per la lettura degli spostamenti lungo Y, lato Municipio

Lungo ognuno dei due allineamenti di cui sopra, i punti di misura sono stati dislocati in corrispondenza delle quote dei cinque impalcati, sino ad arrivare al punto di quota maggiore sulle falde di copertura.

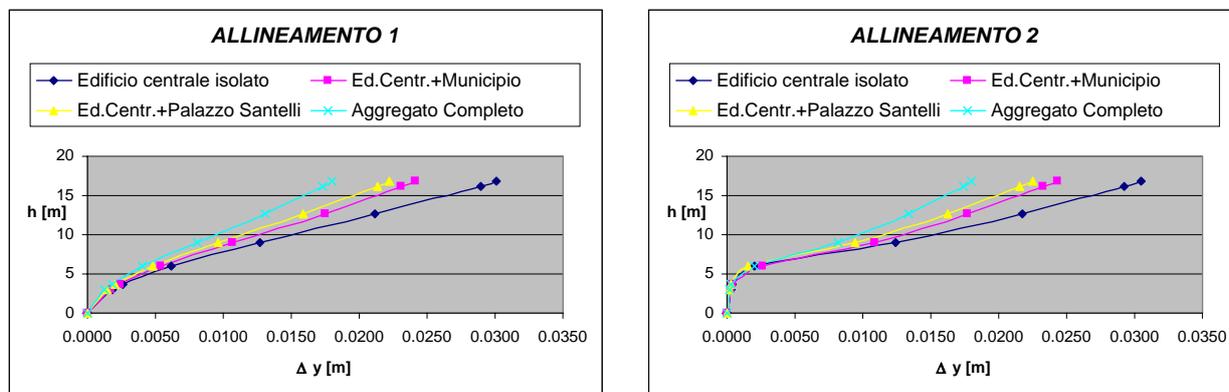


Figura 3.42 - Letture spostamenti nei due allineamenti Municipio, con le diverse modellazioni

Ovviamente ciò che appare chiaro dall'osservazione dei grafici è che l'aggregato completo risulta essere il modello che subisce gli spostamenti inferiori e quindi il più rigido: è proprio di come questo effetto risulti determinato da un mutuo (ma differenziato) contributo che ci vogliamo occupare.

Il confronto fra il comportamento del modello centrale isolato rispetto a quelli delle due aggregazioni parziali (edificio centrale + Palazzo Santelli ed edificio centrale + Municipio, con riferimento alle letture fatte su entrambe le pareti di continuità) risulterà di aiuto nella determinazione dei contributi parziali.

La prima evidenza è che l'organizzazione strutturale di Palazzo Santelli è tale da non riuscire a fornire un adeguato beneficio irrigidente all'edificio adiacente, nel confronto con quanto avviene sul lato opposto; infatti, come già parzialmente visto nel capitolo relativo alle operazioni di rilievo e come verrà dimostrato anche graficamente e nel dettaglio nel successivo paragrafo, tale edificio appare svantaggiato nella sua prestazione dalla estrema parzializzazione dei due muri interni di spina.

Il Palazzo Municipale, invece, risulta essere di miglior organizzazione, con una distribuzione abbastanza omogenea dei muri di spina su tutta la sua superficie ed inoltre, a differenza di Palazzo Santelli, caratterizzati da una certa continuità lungo tutto il loro sviluppo (orizzontale e verticale) e con spessori abbastanza importanti. Di conseguenza, sul lato di nostro interesse, si determina un più virtuoso effetto mutuo, con un interscambio di apporti di rigidità meno penalizzato dalle masse in gioco o da mancanze locali.

Tale cooperazione prestazionale, sinteticamente, risulta determinata dalla elaborazione dell'insieme complesso di informazioni che hanno permesso questa ipotesi di ricostruzione (geometrica e meccanica) dell'aggregato strutturale. I singoli contributi, all'interno della compagine strutturale, dei diversi aspetti messi in gioco sono il risultato delle scelte prodromiche che riguardano l'impostazione voluta per la metodologia di studio: tra queste, oltre alla più evidente scelta del rispetto delle "massività" presenti tramite la realizzazione di un modello tridimensionale solido, è maggiormente significativa la preferenza di inserimento delle rigidità "finite" dei singoli campi di solaio (anche differenziate in funzione delle tipologie costruttive) che, simulando in maniera più raffinata le condizioni di funzionamento reali, ha permesso una stima dell'effetto di continuità "finito", altrimenti non stimabile.

Nel paragrafo successivo si cercherà un riscontro a queste prime ipotesi fornendone anche una più precisa quantificazione in termini di contributi irrigidenti delle diverse strutture.

### ***3.6.7 Valutazione delle rigidità nell'aggregato***

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

L'iter di calcolo seguito ha preso spunto dall'osservazione dei grafici che mettono in evidenza quelle che sono, alle diverse quote degli impalcati nei quattro 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.

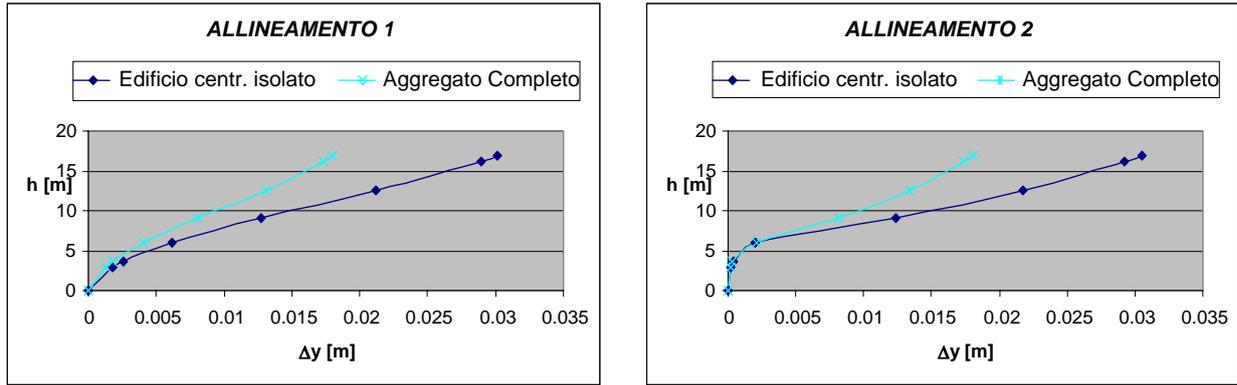


Figura 3.43 - Letture spostamenti nei due allineamenti Municipio, prima degli irrigidimenti

Non si riportano, in questo articolo, le pur importanti problematiche emerse ed affrontate per il meccanismo deformativo lungo l'asse Z che, numericamente, influenza anche gli spostamenti oggetto di analisi e confronto tra i modelli, ovvero lungo la direzione Y.

Il procedimento seguito, atto a ridurre gli spostamenti  $\Delta y$  misurati sul modello centrale isolato, con l'intento di assimilarli, eguagliandoli, a quelli misurati nel modello dell'aggregato completo, è consistito nel progressivo e differenziato aumento di rigidità da apportare ai vari livelli, agendo sui paramenti murari di confine con Palazzo Santelli e con il Municipio.

Nella pratica i parametri su cui si è intervenuti per modificare le rigidità, aumentandole, sono i moduli elastici flessionale E e tangenziale G.

La procedura utilizzata è stata di tipo iterativo ed è partita dall'irrigidimento dei due paramenti di confine relativi al piano di quota minore (Piano Terra Deposito); operazione questa ripetuta sino al raggiungimento di valori di rigidità tali da fornire, per il corrispondente tratto di curva, un soddisfacente grado di convergenza con il corrispondente tratto di curva dell'aggregato completo.

Come si può desumere dall'osservazione dei grafici definitivi riportati sotto, che mostrano il risultato finale della fase iterativa, il grado di coincidenza raggiunto risulta di buona precisione e confermato anche numericamente in termini di valori assoluti degli spostamenti sui vari punti di misura; le uniche zone che hanno mantenuto una netta differenziazione sono quelle descritte dal breve tratto terminale delle due curve (punti di misura posti in corrispondenza dell'ultimo livello - sottotetto Stronati), per le quali si omettono le considerazioni specifiche che le riguardano.

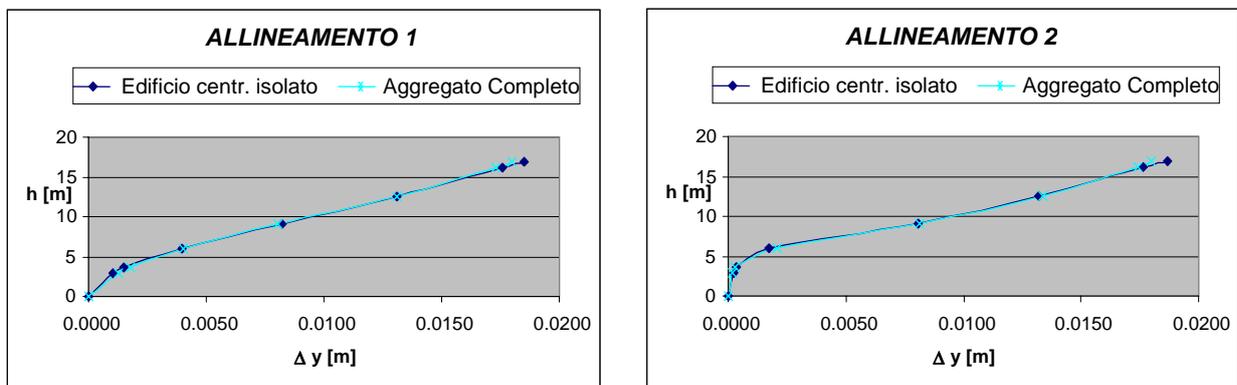


Figura 3.44 - Letture spostamenti nei due allineamenti Municipio, dopo gli irrigidimenti ai piani



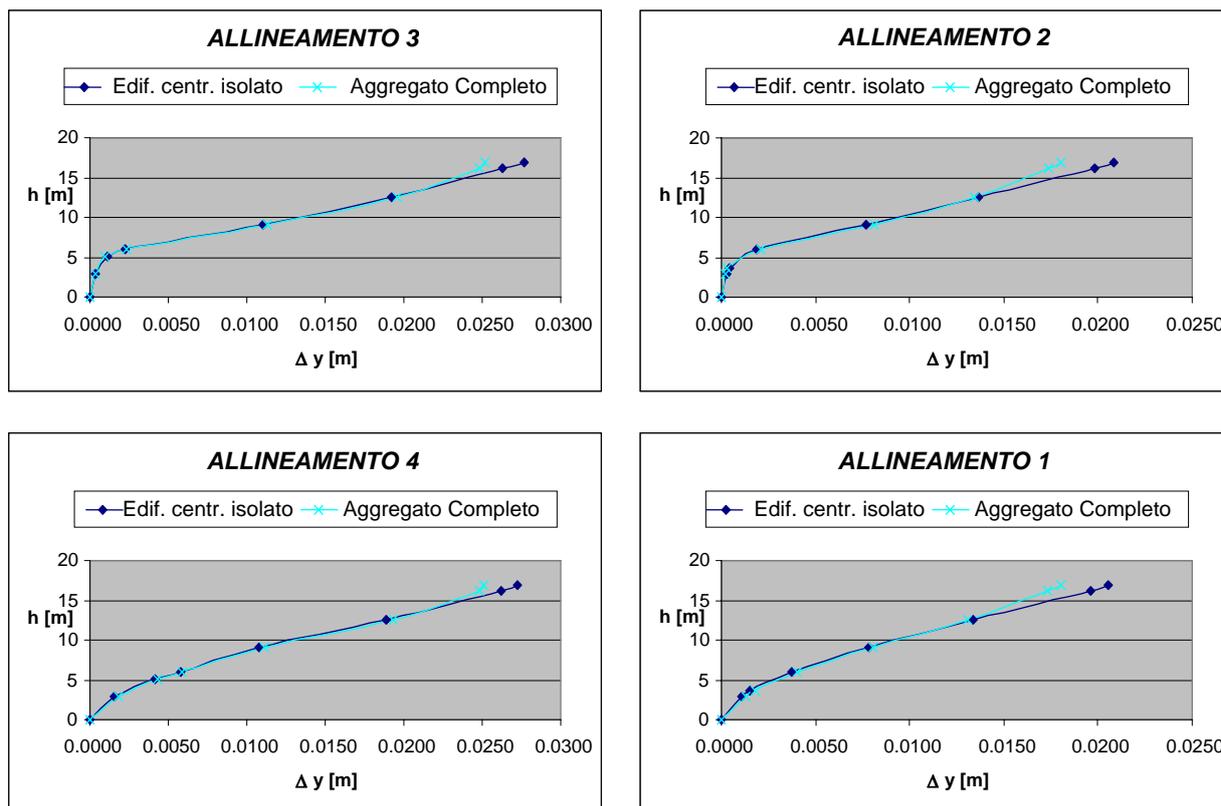


Figura 3.47 - Letture spostamenti nei quattro allineamenti, dopo gli irrigidimenti mediati

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

E' possibile a questo punto quantificare in maniera molto più sintetica quella che risulta essere l'efficacia derivante dalla continuità imposta dalla schiera, anche se differenziata: infatti, se l'accoppiamento con Palazzo Santelli ha determinato (nel confronto con il modello isolato) un aumento di E e G pari al 37% dei valori iniziali, quello con il Palazzo Comunale ha comportato un aumento medio delle rigidzze pari al 102%.

Il "guadagno" in termini di rigidezza sul lato Municipio risulta essere pertanto quasi il triplo (2.75 volte per l'esattezza) rispetto a quello riscontrato sul Palazzo Santelli.

### 3.6.8 Osservazioni conclusive sui risultati 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, ridurre l'approccio ad un unico e riconosciuto codice metodologico.

L'aggregato oggetto di questo studio non rappresenta certo 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

all'interno dello stesso Palazzo (vedi ad es. l'unità centrale), fa sì che quanto affermato poco sopra venga ulteriormente rimarcato.

E' chiaro, quindi, che l'approccio iniziale del professionista 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 rigidzze, non sarà sicuramente di egual "peso".

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, come descritto, sono state 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 rigidzza 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 in 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 obiettivo 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.

## 3.7 MODELLO A MACROELEMENTI

### 3.7.1 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, il tutto a corretta implementazione di norma (esplicitamente OPCM 3431). Tale implementazione è stata effettuata attraverso il software 3MURI, per le cui caratteristiche salienti si rimanda alla lettura del capitolo sulla scuola di Senigallia.

### 3.7.2 Modello a macroelementi dell'aggregato edilizio

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 3MURI 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.

Prima di descrivere ed analizzare, nel paragrafo successivo, i risultati scaturiti dal confronto tra modello FEM e modello a macroelementi, si riportano nel seguito una serie di immagini riferibili proprio al modello 3Muri della schiera in muratura.

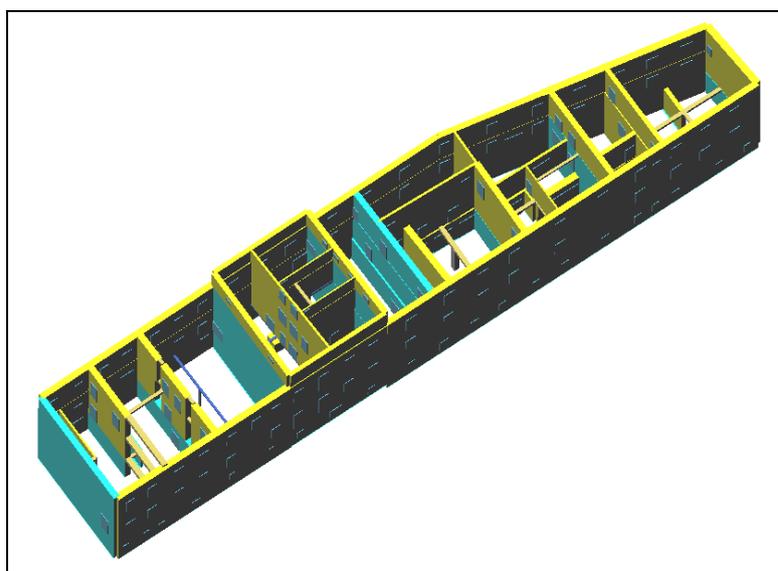


Figura 3.48 - Modello 3Muri, vista interna

Come si evince anche dal riscontro delle immagini, il modello studiato è sì quello dell'aggregato completo dei tre edifici, ma si limita a considerare solo il primo (partendo dall'alto) piano semi-interrato di ogni singolo palazzo, trascurando quindi i due adibiti a deposito della US centrale. Questo è dovuto, in parte, al fatto che il software 3MURI (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 a quota più bassa dell'aggregato (presenza di due piani semi-interrati su un solo edificio, ma sviluppo omogeneo lungo tutta la schiera del paramento murario di cinta, per di più a paramento inclinato); per questo motivo si è quindi scelto un piano fondale comune a tutti e tre i palazzi della schiera, individuato dal livello più basso presente su tutti e tre gli edifici. Di conseguenza, per permettere il successivo confronto con il modello FEM, a quest'ultimo è stata apportata una modifica consistente in un vincolamento aggiuntivo di tutta la mesh basale, a simulare la condizione al piede applicata al modello 3MURI. Tale imposizione, in realtà, non introduce una modifica sostanziale nel comportamento di entrambi i modelli per le finalità di verifica.

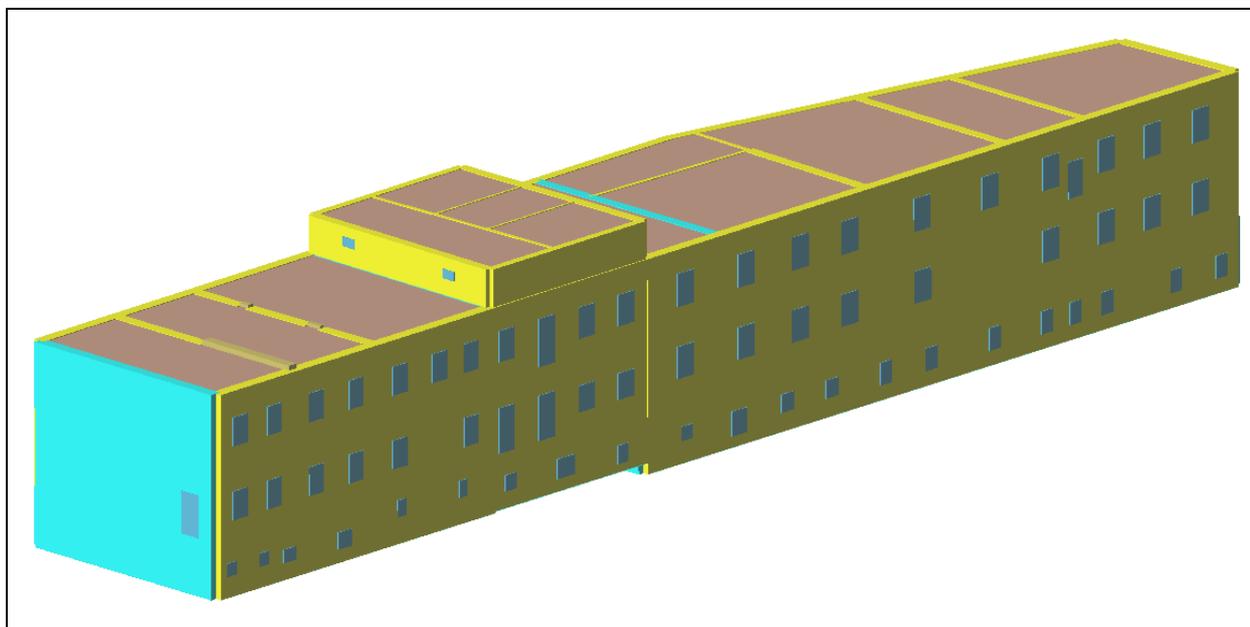


Figura 3.49 - Modello 3Muri, da via Circonvallazione

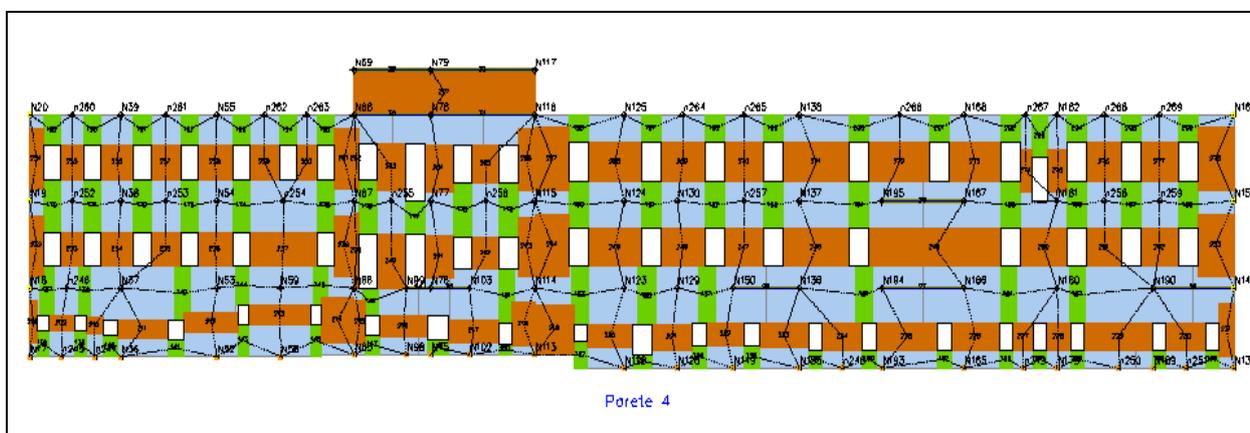


Figura 3.50 - Mesh 3Muri, da via Circonvallazione

### 3.7.3 Confronto tra modello "FEM" e modello a macroelementi

Una fase saliente di questo lavoro è stata 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, sono stati presi in considerazione, parallelamente, i risultati in termini di masse partecipanti, frequenze naturali e rispettivi campi deformativi.

Prima di riportare i risultati ottenuti si rendono necessarie una serie di precisazioni indirizzate alla comprensione delle fasi di "costruzione" dei due modelli finalizzate alla confrontabilità ed alla evidenziazione di quelle che sono le fondamentali differenze di approccio al problema che contraddistinguono i due metodi di analisi.

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 si "sintetizza" la complessa struttura ed organizzazione muraria con un telaio con aste verticali (maschi murarie), 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 COSMOSM 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 modello 3MURI 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) secondo quanto previsto e richiesto dall'OPCM 3431.

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 considerevole 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 il 3MURI con quelli del modello COSMOSM), 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, quale appunto l'aggregato di Montecarotto, la semplificazione con uno schema a telaio, come quella adottata dal codice 3MURI, potrebbe risultare eccessiva e portare quindi ad una perdita di significatività dei risultati finali.

E' 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. Per il resto il modello 3Muri, pur nella necessità di implementazione di alcune ovvie semplificazioni geometriche, mette in

gioco correttamente le ulteriori caratterizzazioni strutturali tra le quali, ad esempio, le masse e le rigidità degli orizzontamenti, anche nel rispetto degli ambienti voltati.

Le analisi dinamiche modali sui due modelli hanno preso in considerazione le prime 30 frequenze naturali. Si riportano qui sotto due tabelle riferite rispettivamente al modello FEM COSMOSM ed al modello a macroelementi 3MURI, in cui sono elencati i principali parametri di valutazione e confronto, ossia le frequenze naturali di vibrazione, i relativi periodi propri e le masse partecipanti lungo la direzione principale Y.

Il confronto, a questo punto, ha preso 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 sono confrontate le rispettive rappresentazioni grafiche delle deformate, andando poi ad accoppiarle, modello per modello, ogniqualvolta si è valutato che le deformazioni evidenziate interessassero le stesse zone e, quindi, le stesse pareti dell'aggregato.

Da questo raffronto, come indicato nella tabella riportata sotto, viene evidenziata per ogni coppia di modello corrispondente la medesima tendenza, ovvero valori di frequenze di vibrazione differenti e sempre più alti nel caso del modello FEM.

Si riportano nelle pagine seguenti alcune rappresentazioni grafiche delle deformate oggetto di confronto.

#### MODELLO FEM (COSMOSM)

<i>Freq</i>	<i>Frequency</i>	<i>Period</i>	<i>My</i>
	[cycles/sec]	[seconds]	[kg]
<b>1</b>	3.053	0.328	4.59E+05
<b>2</b>	3.767	0.265	3.41E+05
<b>3</b>	3.810	0.262	7.16E+05
<b>4</b>	3.941	0.254	3.43E+05
<b>6</b>	4.069	0.246	8.27E+04
<b>11</b>	5.071	0.197	2.41E+05
<b>24</b>	6.456	0.155	6.50E+04

#### MODELLO A TELAIO (3MURI)

<i>Freq</i>	<i>Frequency</i>	<i>Period</i>	<i>My</i>
	[cycles/sec]	[seconds]	[kg]
<b>4</b>	2.537	0.394	1.69E+05
<b>3</b>	2.458	0.407	7.24E+05
<b>5</b>	3.005	0.333	5.14E+05
<b>10</b>	3.796	0.263	1.76E+05
<b>6</b>	3.121	0.32	1.70E+05
<b>9</b>	3.724	0.269	1.62E+05
<b>18</b>	6.133	0.163	1.20E+05

Figura 3.51 - Tabella di raffronto del comportamento dinamico tra i due modelli

Tale situazione indica una rigidità globalmente superiore del modello tridimensionale ad elementi finiti rispetto a quello a telaio.

Questo può essere spiegato con quella che è la sostanziale differenza di approccio al problema dei due metodi; se da un lato, infatti, il modello FEM garantisce un'assoluta continuità geometrica, strutturale e di comportamento nei confronti delle azioni esterne di tutte le pareti interessate, siano esse parallele od ortogonali alla direzione di sollecitazione esterna, dall'altro il modello a macroelementi 3MURI fa sì che le proprie assunzioni teoriche di partenza considerino come elementi resistenti solo quelli paralleli all'azione in questione (nei riguardi delle azioni orizzontali la modellazione adottata trascura il contributo resistente delle pareti in direzione ortogonale al proprio piano, data la notevole flessibilità, e perché permesso dalla normativa), a meno di contributi parziali nel caso di rotazioni strutturali, escludendo quindi ogni altra parete di diverso orientamento da qualsiasi funzione irrigidente.

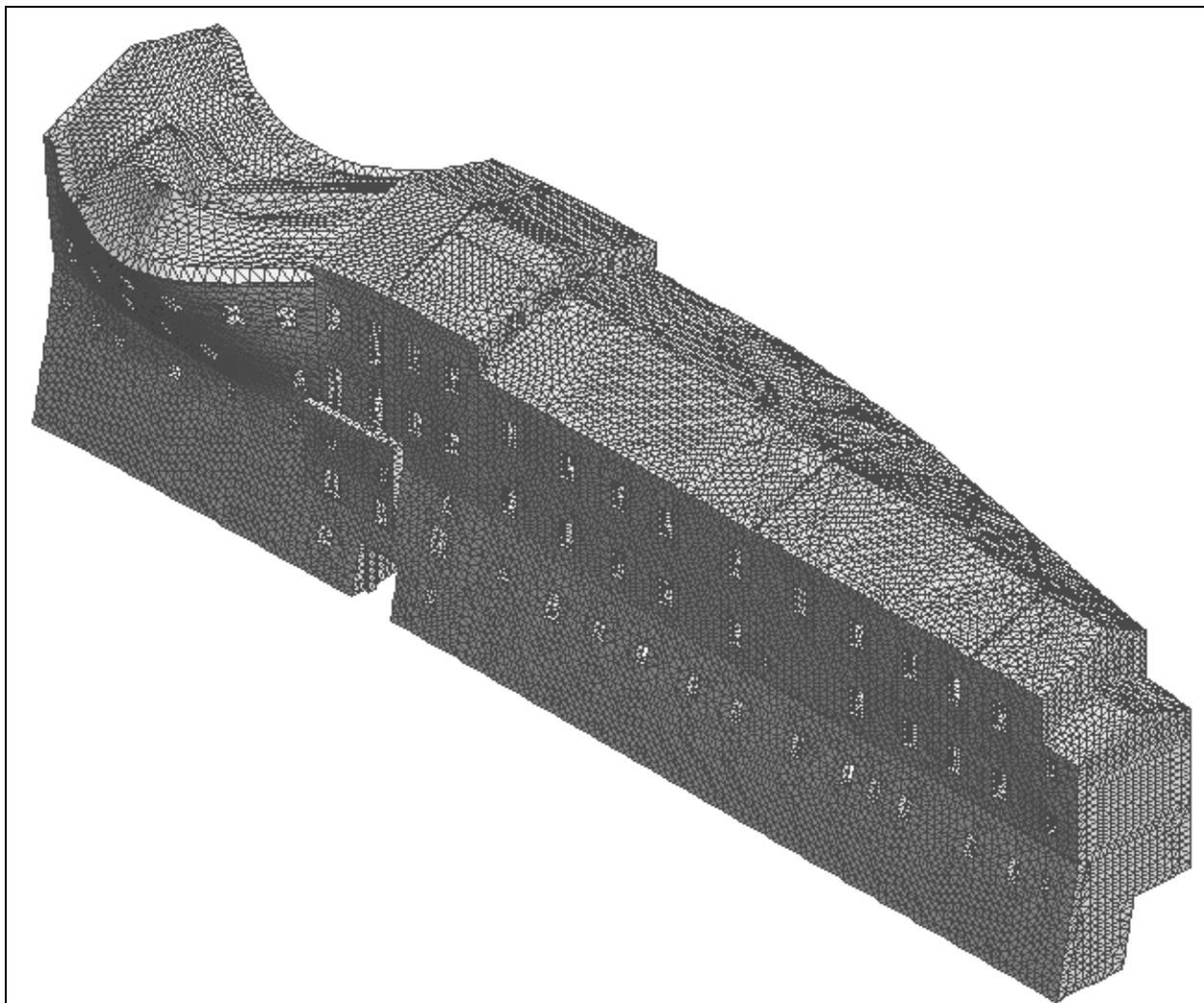


Figura 3.52 - 1° modo modello COSMOSM

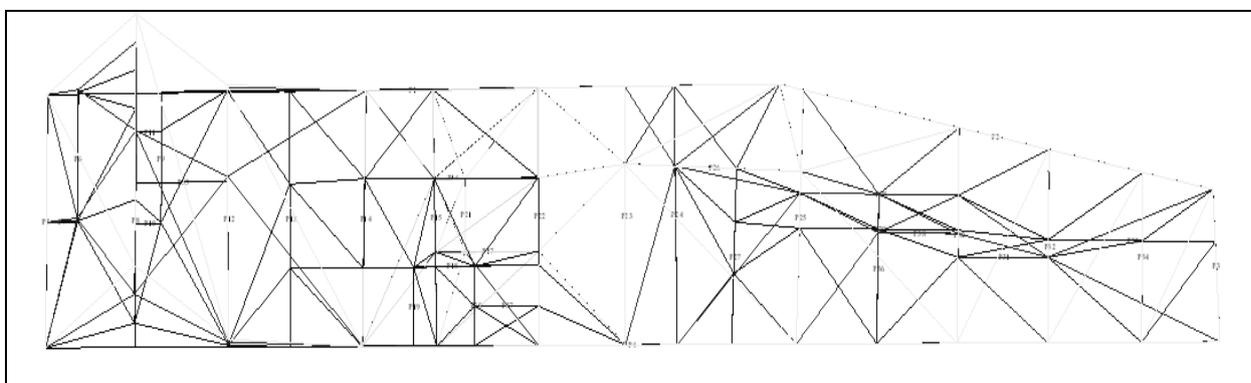


Figura 3.53 - 4° modo modello 3MURI

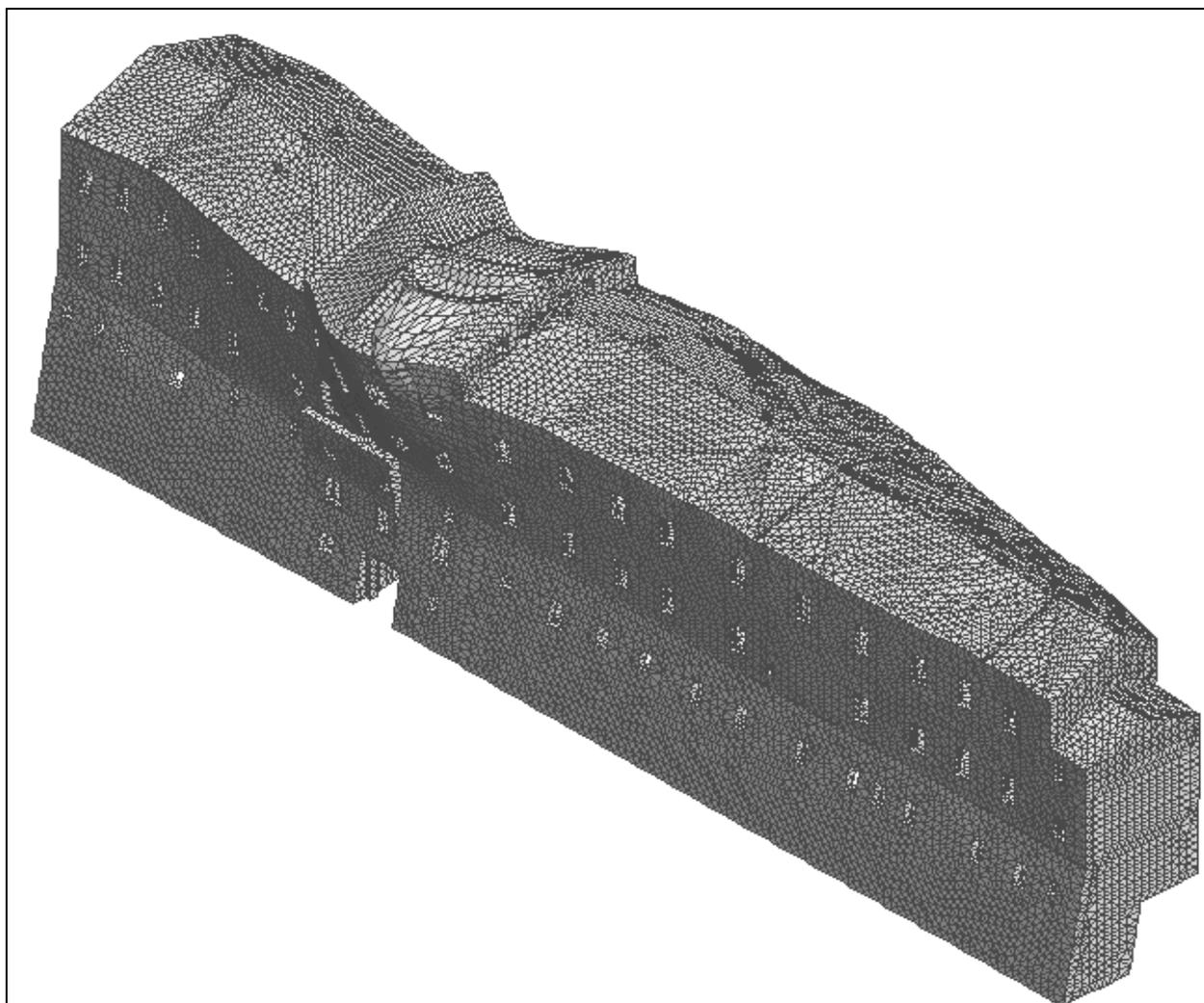


Figura 3.54 - 2° modo modello COSMOSM

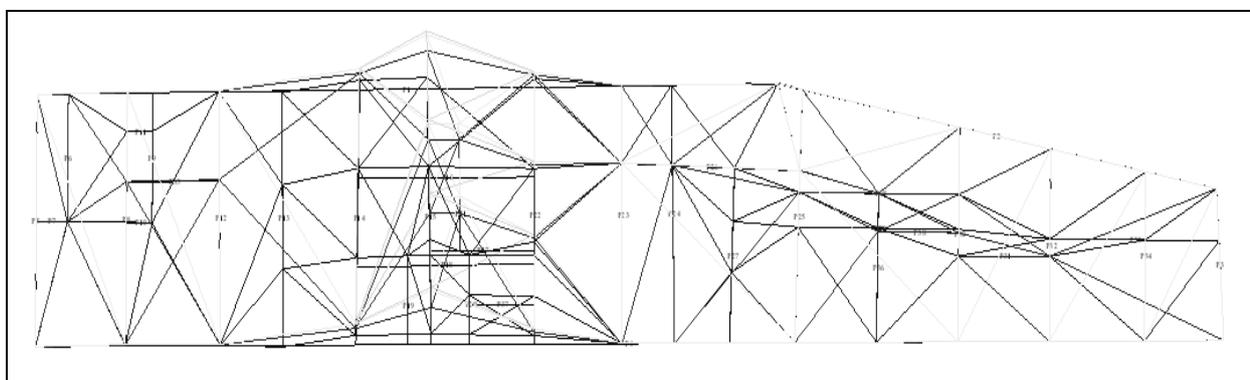


Figura 3.55 - 4° modo modello 3MURI

Inoltre, la minor rigidità globale, 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.

Innanzitutto nel codice 3MURI 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 rigidità 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 rigidità rotazionale locale. Ci si trova allora ad avere, in corrispondenza degli spigoli incidenti di due pareti che non giacciono sullo stesso piano, delle vere e proprie cerniere rotazionali, mentre nella modellazione ad elementi finiti, a meno delle possibilità deformative dovute ai differenti materiali in gioco, in queste zone è garantita la completa "continuità vincolare" (intesa quindi come perfetto grado di ammorsamento).

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 membranale; ciò che però ne differenzia il comportamento in termini di apporto irrigidente è il diverso grado di connessione con le pareti su cui gravano. L'elemento finito di riferimento considerato nel 3MURI è un elemento a tre nodi, eventualmente "ampliabile" anche a quattro nodi attraverso una mediazione del contributo di elementi a tre nodi secondo cui è possibile suddividere il generico quadrilatero; la matrice di rigidità coinvolge, quindi, i soli nodi tridimensionali di incidenza del solaio.

Nell'"approccio FEM", invece, gli elementi "SHELL6" di modellazione degli orizzontamenti sono vincolati (o, perlomeno, possono esserlo) con tutti i nodi incidenti agli elementi relativi alle pareti che delimitano lo sviluppo perimetrale del solaio in questione; questo significa, ovviamente, avere un diverso apporto in termini di rigidità globale.

Se in situazioni di buona regolarità organizzativa e strutturale, quindi, tali differenze di approccio risultano sicuramente valide, ci si chiede se la stessa cosa possa essere sostenuta anche in casi come quello oggetto di studio; infatti, come già visto, l'aggregato a schiera di Montecarotto è quanto di più eterogeneo ci si possa attendere geometricamente e strutturalmente, ed è lecito pensare che, forse, ogni mutua azione e contributo delle singole pareti e più in generale di ogni singolo elemento resistente possa avere la sua importanza e, perciò, non debba essere trascurato.

A sostegno però di quello che è l'"approccio 3MURI" 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 rigidità 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, nonostante la minor rigidità del modello 3MURI, 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 3MURI, che esula dal tenere "in conto" 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 rigidità 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 rigidità 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 un'ultima e definitiva conferma del fatto che la maggior influenza irrigidente del modello COSMOSM risulta essere focalizzata negli elementi "fuori piano" rispetto all'azione orizzontale del sisma.

### 3.8 CONCLUSIONI

Dovendo ripercorrere quanto affrontato all'interno di questo lavoro, l'avvicinamento utilizzato nei confronti delle diverse questioni trattate, i risultati raggiunti, nonché le problematiche studiate, ma rimaste ancora "aperte", non si andrà, all'interno di questo paragrafo conclusivo, nello specifico delle singole trattazioni (come del resto già fatto all'interno dei singoli paragrafi), ma, al contrario, si evidenzieranno gli aspetti principali, più generali, ma di basilare ed 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, 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 nella seconda parte dell'attività altro non hanno fatto che confermare quanto già emerso a livello indicativo dalla fase preliminare di indagine.

Il confronto tra una serie di modelli, ad aggregazione parziale e completa, di tipo FEM tridimensionali, curati nel dettaglio per quanto riguarda tutte le zone di rilevanza

strutturale, ha evidenziato, attraverso un'analisi dinamica modale con applicazione di uno spettro elastico, i differenti "pesi" in termini di rigidità 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; si torna a ripetere, in un periodo, come questo, di attenzione e tutela rivolta alla conservazione dei beni storici, quanto poter quantificare, seppur qualitativamente, i diversi pesi in termini di rigidità 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 descritto, in campo elastico lineare per una prima valutazione delle rigidità "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'obiettivo postosi è stato 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 rigidità 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 come quello analizzato, a meno di recenti operazioni di restauro, risulta molto difficile trovare solai di caratteristiche tali da giustificare un comportamento infinitamente rigido e gli esempi, in tal senso, sono immediati e di semplice comprensione; la maggior parte dei solai della schiera di Montecarotto 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; come descritto nel paragrafo precedente, infatti, i differenti comportamenti dovuti alla presenza di cerniere rotazionali nelle zone di incidenza di pareti da una parte (3MURI) e di incastri dall'altra (COSMOSM) non avrebbero avuto, con la presenza di un solaio infinitamente rigido, possibilità di manifestarsi.

Allo stesso modo, un orizzontamento di infinita rigidità 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.

## BIBLIOGRAFIA (comune ai due capitoli sulla muratura)

Ordinanza P.C.M. n. 3274 del 20/03/2003 come modificata dall'Ordinanza P.C.M. n. 3431 del 03/05/2005, "Norme tecniche per il progetto, la valutazione e l'adeguamento sismico degli edifici"

D.M. 14/09/2005, "Norme Tecniche per le Costruzioni" - Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2005

D.M. 20/11/1987, "Norme tecniche per la progettazione, esecuzione e collaudo degli edifici in muratura e per il loro consolidamento" - Ministero dei Lavori Pubblici, 1987

S. CATTARI - E. CURTI - S. GIOVINAZZI - S. LAGOMARSINO - S. PARODI, "Un Modello Meccanico per l'Analisi di Vulnerabilità del Costruito in Muratura a Scala Urbana", Atti dell'XI Congresso Nazionale "L'Ingegneria Sismica in Italia" - Genova, 25-29 Gennaio 2004

S. CATTARI - A. GALASCO - S. LAGOMARSINO - A. PENNA, "Analisi Non Lineare di Edifici in Muratura con il Programma 3MURI", Atti dell'XI Congresso Nazionale "L'Ingegneria Sismica in Italia" - Genova, 25-29 Gennaio 2004

S. CATTARI - E. CURTI - A. GALASCO - S. RESEMINI, "Analisi Sismica Lineare e Non Lineare degli Edifici in Muratura" - Sistemi Editoriali SE, Settembre 2005

L. BORGESA - A. CASTAGNONE, "Verifiche Sismiche Edifici in Muratura", Documenti dal "Corso Murature S.T.A. DATA" - Torino, Settembre 2006

R. GIACCHETTI, "Fondamenti di Dinamica delle Strutture e di Ingegneria Sismica" - EPC LIBRI, Giugno 2004

R. GIACCHETTI - S. BUFARINI - V. D'ARIA, "Il Controllo Strutturale degli Edifici in Cemento Armato e Muratura" - EPC LIBRI, Settembre 2005

P. MAZZOTTI (ref.) - C. CAROCCI - V. CERADINI - I. CREMONINI - M. PANZETTA - M. SMARGIASSO, "Recupero e Riduzione della Vulnerabilità dei Centri Storici Danneggiati dal Sisma del 1997" - Regione Marche: Dipartimento Affari Istituzionali e Generali; Centro Operativo Programmi di Recupero e Beni Culturali - Settembre 2004

F. DOGLIONI - P. MAZZOTTI (a cura di), "Codice di Pratica per gli Interventi di Miglioramento Sismico nel Restauro del Patrimonio Architettonico" - Regione Marche: Assessorato Beni ed Attività Culturali; Servizio Cultura, Turismo e Commercio; P.F. "Beni Culturali e Programmi di Recupero" - Marzo 2007

P. MAZZOTTI (coord.) - A. CHERUBINI - F. TORRESI - I. CREMONINI, "Prevenzione del Rischio Sismico nei Centri Storici Marchigiani: il caso di studio di Offida (AP)" - Regione Marche: Servizio Cultura, Turismo e Commercio, P.F. Beni culturali e Programmi di Recupero, Dipartimento per le politiche integrate di sicurezza e per la protezione civile - Giugno 2008

N. COSENTINO, "Modalità di Analisi e Definizione dei Parametri Meccanici", Atti della Riunione "Vulnerabilità Sismica di Edifici Esistenti" promossa dalla Regione Emilia Romagna - Servizio Geologico Sismico e dei Suoli - Bologna, 10 Novembre 2006

G. BEOLCHINI, "La Valutazione della Resistenza Sismica degli Edifici in Muratura" - Attività di supporto all'attuazione del primo Programma Regionale delle verifiche tecniche degli edifici strategici e rilevanti del territorio della Regione Abruzzo, Aprile 2007

G. MAGENES (coordinatore), "Corso Breve in: Valutazione e Consolidamento Antisismico degli Edifici Esistenti in Muratura", EUCENTRE, Pavia, 5-6 Ottobre 2007

Codici di calcolo utilizzati:

COSMOSM ver. 2007 - S.R.A.C.

3Muri ver. 3.0.503 PROFESSIONAL - S.T.A. DATA

TreMuri ver. 1.7.8 Ricerca - Prof. S. Lagomarsino, Dott. Ing. A. Galasco, Dott. Ing. A. Penna