

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DEL MOLISE



DOTTORATO DI RICERCA

IN

ANALISI E VALORIZZAZIONE DEL PAESAGGIO

XXIV CICLO

TESI DI DOTTORATO

DAL TITOLO:

***SULLA PREVENZIONE DAL RISCHIO SISMICO DEL
COSTRUITO STORICO***

Candidato: Ing. Carmine LAORENZA
matr. 141370

Tutor: Prof. Ing. Giovanni FABBROCINO

Coordinamento: Prof. Arch. Donatella CIALDEA

FEBBRAIO 2012

“E pur si muove!”

Galileo Galilei, al termine della lettura dell'abiura a cui era stato costretto dagli inquisitori generali della Chiesa Cattolica il 22 giugno del 1633.

A Carmela

“A te che sei l'unica al mondo

L'unica ragione per arrivare fino in fondo

Ad ogni mio respiro”

Jovanotti, “A Te”, 2008

A Camilla, ad Azzurra

“perché sei un essere speciale

ed io

avrò cura di te...

Io sì

che avrò cura di te”

Franco Battiato, “La Cura”, 1996

Ringraziamenti

A conclusione di questa esperienza desidero ringraziare tutte le persone, che a vario titolo, hanno contribuito alla realizzazione del lavoro. Ritengo questa la parte più complessa e delicata di tutto il Dottorato. Il rischio che i ringraziamenti possano sembrare tediosi o al contrario, troppo superficiali è grande, ed il confine troppo sottile. Ho deciso pertanto di dare ad essi il taglio che ho cercato di dare a tutto il lavoro: essenziale e sequenziale. Da tecnico, è l'unico modo che conosco.

Ringrazio tutti i colleghi del Laboratorio di Dinamica Strutturale e Geotecnica StreGa dell'Università del Molise, a partire dal Coordinatore, nonché mio Tutor, Prof. Ing. Giovanni Fabbrocino, anche, ma non solo, per avermi incoraggiato ad intraprendere quest'avventura.

Ringrazio Carlo Rainieri, per aver condiviso i risultati del suo lavoro, per avermi dedicato tempo, fino all'ultimo giorno di stesura della tesi.

Ringrazio Mariella Mancini, che ha intrapreso la mia stessa avventura, per la lucidità mostrata nei momenti difficili, per il sostegno morale e non solo.

Ringrazio Antonietta Giuliano, che mi ha preceduto in questo dottorato, per l'aiuto concreto fornito.

Ringrazio Filippo Santucci de Magistris e Giovanni Lanzano per il supporto tecnico e logistico.

Ringrazio il Prof. Ing. Salvatore Gerbino, per il prezioso contributo sulle problematiche della programmazione.

Ringrazio l'Ing. Enzo Palermo, Responsabile del Procedimento per la Diocesi di Termoli - Larino, e tutti i tecnici progettisti dei lavori post-sisma coinvolti, per aver reso disponibili rilievi e dati.

Ringrazio il personale della Soprintendenza per i Beni Architettonici e Paesaggistici del Molise, ringraziando per tutti il Soprintendente, Arch. Stefano D'Amico. Ovunque siamo andati, ci siamo sentiti in famiglia.

Ringrazio i tesisti Daniele Brigante ed Eugenio Santoro, oggi ingegneri junior, per il lavoro sul campo e di catalogazione dei dati.

Ringrazio il Dott. Ing. Arindam Dey, dell'Indian Institute of Technology di Guwahati, India, mio referente estero, con il quale il lavoro, oltre che interessante, è stato anche occasione di scambio culturale. Ma quello che mancherà sarà soprattutto il rapporto umano.

Ringrazio l'Arch. Fabio Spensieri e l'Ing. Claudio Pasquale, per il materiale e le informazioni messe a disposizione sul Convitto Nazionale Mario Pagano di Campobasso.

Ringrazio la Coordinatrice del Dottorato, Prof. Arch. Donatella Cialdea, e tutto il Collegio dei Docenti, per la pazienza e la comprensione dimostrata nei miei confronti.

Ringrazio infine i miei colleghi di dottorato, Antonio e Giovanna, per lo scambio di opinioni che ho trovato stimolante.

C'è un'età per tutto nella vita e, forse, la mia non era quella per un Dottorato di Ricerca. Molte cose sono cambiate nella mia vita in questi ultimi tre anni. Mia figlia Camilla, aveva sette mesi, l'avevo in braccio quando sono venuto a controllare i risultati delle prove di ammissione. Poi è arrivata Azzurra. Oggi ho due figlie, e non ho più un padre.

Molto del tempo dedicato a questo lavoro l'ho sottratto alla mia famiglia: a mia moglie Carmela, alle mie figlie, Camilla e Azzurra. Questo, con uno spettacolare effetto domino, ha inevitabilmente coinvolto tutti i famigliari, i miei e quelli di mia moglie. A tutti devo un ringraziamento. Grazie Mamma, Rosaria, Federico, Luca.

Vanto molti crediti in giro, ma sicuramente verso la mia famiglia, soprattutto verso le più piccole e inconsapevoli, per le quali il "posto di papà" è l'angolino sul tavolo della sala dove la sera lavoro, ho un grande debito ed una grande responsabilità.

Spero nel tempo di riuscire ad onorare entrambi.

SOMMARIO

SOMMARIO	1
PREMESSA	3
1 IL CONCETTO DI “PAESAGGIO” ATTRAVERSO L’EVOLUZIONE DEL QUADRO NORMATIVO DI RIFERIMENTO: IL BINOMIO “BENE CULTURALE” - “BENE AMBIENTALE”	6
2 ASPETTI TECNICI SULLA TUTELA DEL PATRIMONIO EDILIZIO STORICO: LA PREVENZIONE DAL RISCHIO SISMICO	16
2.1 IL RISCHIO SISMICO.....	16
2.2 LA DIRETTIVA BENI CULTURALI.....	18
2.2.1 <i>Il paragrafo 5.4.2: “Palazzi, ville ed altre strutture con pareti di spina ed orizzontamenti intermedi”</i> 31	
2.2.2 <i>Il paragrafo 5.4.4: “Torri, campanili ed altre strutture a prevalente sviluppo verticale”</i>	40
2.3 LA CONOSCENZA DEL MANUFATTO	43
3 ASPETTI REGIONALI RILEVANTI E LOCALIZZAZIONE DEI CASI STUDIO	50
3.1 IL TERRITORIO MOLISANO.....	50
3.2 LE TIPOLOGIE MURARIE MOLISANE	57
3.3 LA LOCALIZZAZIONE DEI CASI STUDIO.....	60
4 CAMPANILI	64
4.1 CAMPAGNA DI PROVE PER L’IDENTIFICAZIONE DINAMICA	67
4.1.1 <i>Il campanile della Chiesa di S. Maria delle Rose in Bonefro</i>	69
4.1.2 <i>Il campanile della Chiesa di S. Maria delle Rose in Montorio nei Frentani</i>	73
4.1.3 <i>Il campanile della Chiesa di S. Maria Assunta in Ripabottoni</i>	78
4.1.4 <i>Il campanile della Chiesa di S. Maria Maggiore in Morrone del Sannio</i>	83
4.1.5 <i>Il campanile della Chiesa di S. Giacomo Apostolo in Santa Croce di Magliano</i>	87
4.1.6 <i>Campanile della Chiesa di S. Maria della Pietà in Larino</i>	90
4.1.7 <i>Il Campanile della Cattedrale di S. Pardo in Larino</i>	94
4.1.8 <i>Il campanile della Chiesa di S. Alfonso dei Liguori in Colletorto</i>	98
4.1.9 <i>Il campanile della Chiesa di S. Maria Assunta in Provvidenti</i>	101
4.2 LA PREVISIONE DEL PERIODO FONDAMENTALE DELLE “TORRI” IN MURATURA	104
5 EDIFICI MONUMENTALI TUTELATI	120
5.1 IL “SISTEMA INFORMATIVO BENI ARCHITETTONICI VALUTAZIONE E MONITORAGGIO DEL RISCHIO SISMICO” (SIVARS)	121
5.2 LA CAMPAGNA DI VERIFICHE DELLA VULNERABILITÀ SISMICA A SCALA LV1	133

5.2.1	<i>Il Castello di Gambatesa.....</i>	<i>134</i>
5.2.2	<i>Castello Pandone – Venafro (IS).....</i>	<i>139</i>
5.2.3	<i>Il Complesso monumentale di Santa Maria delle Monache di Isernia</i>	<i>143</i>
5.2.4	<i>Palazzo Japoce a Campobasso.....</i>	<i>147</i>
5.2.5	<i>Palazzo Mazzarotta a Campobasso</i>	<i>154</i>
6	IL CONVITTO NAZIONALE MARIO PAGANO.....	160
6.1	IL MODELLO SEMPLIFICATO EVOLUTO.....	173
7	CONCLUSIONI.....	180
	BIBLIOGRAFIA.....	182
	INDICE DELLE FIGURE.....	185
	INDICE DELLE TABELLE	189

Premessa

Il tema della tutela del paesaggio alla luce dei più recenti sviluppi della normativa in materia presenta aspetti di notevole complessità, che richiede necessariamente un approccio interdisciplinare. Tra i beni ambientali soggetti a tutela, come è noto, sono ricompresi le ville, i giardini, i parchi, le bellezze panoramiche e i *“complessi di cose immobili che compongono un caratteristico aspetto avente valore estetico e tradizionale”* (legge del 29 giugno 1939 n° 1497, art. 1, comma 3).

L'ultima categoria di beni, insieme alle ville, rivela tra l'altro un ruolo molto importante di quelle discipline tecniche focalizzate sulle prestazioni strutturali e funzionali del patrimonio costruito e si interessano di valutare l'impatto dei rischi naturali, come quello sismico, sui beni oggetto di tutela. Gli eventi occorsi negli ultimi anni hanno, infatti, evidenziato da un lato l'estrema vulnerabilità di alcune classi di costruzioni all'azione sismica, dall'altro la grande sensibilità dell'opinione pubblica al tema della sicurezza degli ambienti urbani, del territorio e della conservazione integrata dei beni tutelati.

Il lavoro di tesi, muovendo da tali osservazioni, si colloca nell'ambito disciplinare ampio dell'Ingegneria Sismica ed ha come tema portante proprio la protezione dal rischio sismico del costruito storico, dunque della tutela di uno degli elementi che compongono uno specifico paesaggio, *“il cui carattere deriva dall'azione di fattori umani e dalle loro interrelazioni”* [10].

Lo spunto di partenza è costituito dai paesaggi caratterizzati dagli Edifici Monumentali, i quali, per legge, vanno tutelati dal rischio sismico e per i quali sono disponibili gli strumenti necessari, con l'obiettivo di estendere gli strumenti a tutto il costruito, per *“Integrare il paesaggio nelle politiche ... che possono avere un'incidenza diretta o indiretta sul paesaggio”* [10]. Lo studio è rivolto alle procedure di analisi di vulnerabilità sismica su scala territoriale.

Il lavoro tiene conto delle problematiche di carattere territoriale, relative sia al territorio nazionale che specificamente per la regione Molise, cercando di evidenziare la rilevanza

che tali problematiche, nell'ambito di processi integrati di protezione e salvaguardia del paesaggio, possono rivestire.

Il primo capitolo fornisce un excursus sull'evoluzione delle norme di tutela del paesaggio e dei beni culturali, con particolare attenzione al loro continuo incrociarsi e sovrapporsi.

Il secondo capitolo illustra gli aspetti tecnici sulla prevenzione dal rischio sismico, sia da un punto di vista tecnico che normativo. In particolare saranno illustrate le *"Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle norme tecniche per le costruzioni"*, [8], [9], documento normativo specifico per gli Edifici Monumentali.

Il terzo capitolo ripercorre l'evoluzione del paesaggio molisano, e su quanto è già stato fatto sul territorio per la tutela del costruito dal rischio sismico, a seguito del sisma che ha colpito il Molise nel 2002. Saranno illustrati brevemente i casi oggetto di studio nel presente lavoro.

Il quarto capitolo prende in esame un bene monumentale particolare, l'edificio *"Campanile"*, considerato nell'apposito paragrafo 5.4.4 delle Linee Guida [9]: *"Torri, campanili ed altre strutture a prevalente sviluppo verticale"*. Saranno illustrati i risultati della campagna di prove di identificazione dinamica svolte sui casi studio e i risultati di uno studio sul periodo fondamentale delle strutture a torre e sulle correlazioni empiriche con le caratteristiche geometriche della struttura.

Il quinto capitolo tratta la tipologia di edificio classificata nelle Linee Guida [9] al paragrafo 5.4.2: *"Palazzi, ville ed altre strutture con pareti di spina ed orizzontamenti intermedi"*. Sono stati studiati cinque edifici, su cui è stata eseguita la verifica di vulnerabilità sismica su scala territoriale mediante il Sistema Informativo del Ministero dei Beni Culturali. Lo studio è stata un'occasione per testare un percorso metodologico che porta alla Conoscenza del manufatto, Conoscenza intesa secondo le Norme Tecniche per le Costruzioni del 2008 [1], [2] e le Linee Guida [8], [9].

Il sesto capitolo focalizza l'attenzione su un particolare edificio di importanza rilevante nel panorama molisano, sia per l'importanza storica e la valenza architettonica che riveste, sia per le attività pubbliche che ospita: il Convitto Nazionale "Mario Pagano" in Campobasso. In particolare, viene preso in esame a titolo esemplare il problema della valutazione di dettaglio della vulnerabilità sismica facendo riferimento a modelli semplificati.

1 Il concetto di “paesaggio” attraverso l’evoluzione del quadro normativo di riferimento: il binomio “Bene Culturale” - “Bene Ambientale”

La definizione di “Paesaggio” a cui oggi si fa riferimento è quella proposta dalla Convenzione Europea del Paesaggio, Firenze 20 ottobre 2000:

“Paesaggio” designa una determinata parte di territorio, così come è percepita dalle popolazioni, il cui carattere deriva dall'azione di fattori naturali e/o umani e dalle loro interrelazioni.”

L’articolo 5 - “Provvedimenti generali” al punto d) ogni Parte si impegna a:

“Integrare il paesaggio nelle politiche di pianificazione del territorio, urbanistiche e in quelle a carattere culturale, ambientale, agricolo, sociale ed economico, nonché nelle altre politiche che possono avere un'incidenza diretta o indiretta sul paesaggio.” [10]

In Italia l’esigenza di una tutela giuridica del paesaggio è affiorata timidamente e per la prima volta nell’ordinamento giuridico nazionale in occasione dell’approvazione della Legge 16 luglio 1905 n.411 riguardante la conservazione della pineta di Ravenna. La legge tuttavia non sottendeva concetti di tutela del territorio né tanto meno criteri di integrità ambientale limitandosi alla mera applicazione dei valori estetici e culturali che erano maturati nell’ambito della tutela dei monumenti.

L’evoluzione del concetto di paesaggio in Italia passa attraverso l’approvazione della legge 11 giugno 1922 n.778, intitolata “Per la tutela delle bellezze naturali e degli immobili di particolare interesse storico” e presentata da Benedetto Croce. Fondamentale l’introduzione di un concetto che sarà caposaldo della successiva evoluzione della tutela, l’equiparazione tra bene artistico (divenuto poi bene culturale) e le bellezze naturali (oggi beni ambientali) [11]. Da questa intuizione ne discese come la tutela delle bellezze naturali non venisse affidata al Ministero dell’Agricoltura, come taluni orientamenti richiedevano, ma al Ministero della Pubblica Istruzione che già aveva con la Legge n.364 del 20 giugno 1909 la tutela sulle antichità e belle arti. Croce coglie un altro aspetto culturale di estremo rilievo: la sintesi tra la componente naturalistica come espressione incontaminata e l’intervento dell’uomo che è intervenuto

ad adattare e modificare l'ambiente alle proprie esigenze pur senza stravolgerne i connotati originali.

Tuttavia la prassi interpretativa ridusse la definizione di "cose immobili" ad una porzione di territorio assai limitata o circoscritta al "monumento naturale" e non venne mai esteso a vaste realtà naturali o a complessi di beni.

Viene comunque introdotto in Italia un concetto già radicato in Francia nei primi dell'Ottocento, quando si inizia a tutelare e salvaguardare tutto ciò che definisce e caratterizza il proprio Paese, non per ultimi i monumenti. Infatti, nella Francia della *Restauration*, la tutela dei monumenti nazionali assume un ruolo innovativo nei programmi politici e governativi. Nel 1834 Prosper Mérimée viene nominato *Inspecteur général des monuments historiques*, una carica che lo porta ad impegnarsi sul fronte del recupero del patrimonio artistico nazionale ed a percorrere in lungo e in largo le province francesi. L'importanza di questa nomina deriva dalla concezione di Mérimée per cui un monumento è tale se inserito all'interno di un certo contesto o paesaggio. [12]

Si vuole comunque segnalare nella legge del 23 giugno 1912 n° 688 "Portante modifiche alla legge 20 giugno 1909 n° 364, per le antichità e le belle arti, l'art. 3:

"Nei luoghi nei quali si trovano monumenti o cose immobili soggette alle disposizioni della seguente legge, nei casi di nuove costruzioni, ricostruzioni o attuazione dei piani regolatori, possono essere prescritte dall'autorità governativa le distanze, le misure e le altre norme necessarie, affinché le nuove opere non danneggino la prospettiva e la luce richiesta dai monumenti stessi."

La tutela del monumento passa attraverso la tutela del luogo in cui il monumento stesso si trova. Il monumento dunque individua una porzione di territorio, nell'accezione moderna un "paesaggio".

Nell'articolo 80 del Regio decreto del 30 gennaio 1913 n° 363, tale concetto viene ripreso ed il "luogo" viene ampliato:

“Nei regolamenti edilizi e nei piani regolatori e di ampliamento saranno stabilite, sentito il Ministero della Pubblica Istruzione, ... ,le norme necessarie per impedire che le nuove opere danneggino la prospettiva o la luce richiesta dai monumenti.”

Un ulteriore passaggio importante per l'evoluzione del concetto di paesaggio dal punto di vista normativo è l'emanazione della legge del 29 giugno 1939 n° 1497 “Protezione delle bellezze naturali”. Nell'articolo 1 si legge:

“Sono soggette alla presente legge a causa del loro notevole interesse pubblico:

- 1. le cose immobili che hanno cospicui caratteri di bellezza naturale o di singolarità geologica;*
- 2. le ville, i giardini e i parchi che, non contemplati dalle leggi per la tutela delle cose d'interesse artistico o storico, si distinguono per la loro non comune bellezza;*
- 3. i complessi di cose immobili che compongono un caratteristico aspetto avente valore estetico e tradizionale;*
- 4. le bellezze panoramiche considerate come quadri naturali e così pure quei punti di vista o di belvedere, accessibili al pubblico, dai quali si goda lo spettacolo di quelle bellezze.”*

Nell'articolo 9 fra le altre cose specifica che *“nota essenziale d'un complesso di cose immobili costituenti un caratteristico aspetto di valore estetico e tradizionale è la spontanea concordanza e fusione fra l'espressione della natura e quella del lavoro umano, definizione che praticamente coincide con la concezione moderna di paesaggio.*

Il presupposto di una affinità, se non identità, dei concetti di arte e natura viene portato avanti nell'evoluzione del quadro normativo. Infatti nell'ordine si hanno:

- *Costituzione Italiana, Titolo I, Art. 9 del 1948, dove si definisce il dovere dello Stato nella tutela del paesaggio e del patrimonio storico artistico;*
- *Legge 26 aprile 1964, n. 310 che porta alla costituzione della “Commissione di indagine per la tutela e valorizzazione delle cose di interesse storico, artistico, archeologico e del paesaggio”. La Commissione finì i suoi lavori nel 1966. Sebbene non riuscisse a ridurre ad unità le due categorie concettuali (le cose artistiche-storiche ed il paesaggio), adottò per prima in Italia la dizione “Bene*

Culturale" dando al termine il seguente significato: "tutto ciò che costituisce testimonianza materiale avente valore di civiltà";

- *Legge 29 gennaio 1975, n. 5*, istituisce il Ministero per i Beni Ambientali e Culturali.

Altra pietra miliare nell'evoluzione del concetto è l'approvazione della *Legge 8 agosto 1985, n°431*, "Conversione in legge, con modificazioni, del decreto-legge 27 giugno 1985, n. 312, recante disposizioni urgenti per la tutela delle zone di particolare interesse ambientale", conosciuta come Legge Galasso. Da una concezione puramente estetizzante di paesaggio si passa ad una visione sistematica e oggettiva del bene da tutelare, attribuendo alla pianificazione paesistica o territoriale, il compito di definire i modi e i contenuti della tutela [11]. Si tratta di uno strumento legislativo che va ad affiancarsi alla L. n°1497/39, andando così ad introdurre aspetti innovativi in materia di paesaggio:

- la tutela è estesa a intere categorie "geografico-morfologiche" a contenuto prevalentemente naturalistico (ad eccezione delle zone archeologiche e degli usi civici): si amplia notevolmente il campo d'azione della tutela che non interessava esclusivamente ambiti circoscritti e mirati (un monumento, un contesto particolare), ma le linee fisionomiche del paesaggio stesso;
- muta il significato che si attribuisce alla tutela: essa assume un valore dinamico e gestionale, indicando come strumento principale la pianificazione paesistica;
- l'assoggettamento del bene al vincolo di tutela avviene direttamente in forza di legge e non richiede alcun provvedimento di individuazione come in precedenza con la Legge 1497/39.

Tali provvedimenti comportano numerosi problemi di applicazione, tali da chiamare in causa la Corte Costituzionale che però si dichiara a favore della costituzionalità della legge e della sua aderenza all'Art. 9 della Costituzione.

Nel *Decreto Legislativo 29 ottobre 1999, n° 490*, "Testo unico delle disposizioni legislative in materia di beni culturali ed ambientali" l'articolo 3 definisce delle "Categorie speciali

di Beni Culturali". In particolare al punto c): *"le aree pubbliche, aventi valore archeologico, storico, artistico e ambientale,..."*, coerentemente alla Legge Galasso. Non solo, si riporta integralmente l'articolo 26 sulla valutazione di impatto ambientale:

"1. Per i progetti di opere comunque soggetti a valutazione di impatto ambientale a norma dell'articolo 6 della legge 8 luglio 1986, n. 349, l'approvazione prevista dall'articolo 23 e' rilasciata da parte del Ministero in sede di concerto sulla compatibilita' ambientale, sulla base del progetto definitivo da presentarsi ai fini della valutazione di impatto ambientale medesima.

2. Qualora dall'esame del progetto effettuato a norma del comma 1 risulti che l'opera non e' in alcun modo compatibile con le esigenze conservative del bene culturale sul quale essa e' destinata ad incidere il Ministero si pronuncia negativamente, dandone comunicazione al Ministero dell'ambiente. In tal caso, ovvero qualora vi sia una valutazione contraria del progetto da parte del Ministero dell'ambiente, la procedura di valutazione di impatto ambientale si considera conclusa negativamente.

3. Se nel corso dei lavori risultino comportamenti contrastanti con l'approvazione, tali da porre in pericolo l'integrità degli immobili soggetti a tutela, il Ministero ordina la sospensione dei lavori."

La tutela del Bene Culturale è estesa all'ambiente di cui fa parte.

Al tempo stesso nella sezione II "Restauro ed altri interventi", l'articolo 34 "Definizione di restauro":

"1. Ai fini del presente Capo, per restauro si intende l'intervento diretto sulla cosa volto a mantenere l'integrità materiale e ad assicurare la conservazione e la protezione dei suoi valori culturali. Nel caso di beni immobili situati nelle zone dichiarate a rischio sismico in base alla normativa vigente il restauro comprende l'intervento di miglioramento strutturale."

Tale articolo obbliga ad attenersi alle normative antisismiche nel caso in cui si interviene nella conservazione del Bene Culturale.

Alla sezione III "Altre forme di tutela" l'articolo 49 sulle "Prescrizioni di tutela indiretta" riprende concetti presenti già dal 1912:

“1. Il Ministero, anche su proposta del soprintendente, ha facoltà di prescrivere le distanze, le misure e le altre norme dirette ad evitare che sia messa in pericolo l'integrità delle cose immobili soggette alle disposizioni di questo Titolo, ne sia danneggiata la prospettiva o la luce o ne siano alterate le condizioni di ambiente e di decoro. ...”.

Con la Legge Costituzionale del 18 ottobre 2001 n. 3 (Governo Amato) si assiste alla modifica degli articoli della costituzione che normano il paesaggio:

- Art.117 della Costituzione (prima della modifica): *“La Regione emana per le seguenti materie norme legislative nei limiti dei principi fondamentali stabiliti dalle leggi dello Stato, sempreché le norme stesse non siano in contrasto con l'interesse nazionale e con quello di altre Regioni: ordinamento degli uffici e degli enti amministrativi dipendenti dalla Regione; circoscrizioni comunali; polizia locale e urbana e rurale; fiere e mercati; beneficenza pubblica ed assistenza sanitaria ed ospedaliera; istruzione artigiana e professionale e assistenza scolastica; musei e biblioteche di enti locali; urbanistica; turismo ed industria alberghiera; tranvie e linee automobilistiche di interesse regionale; viabilità, acquedotti e lavori pubblici d'interesse regionale; navigazione e porti lacuali; acque minerali e termali; cave e torbiere; caccia; pesca nelle acque interne; agricoltura e foreste; artigianato; altre materie indicate da leggi costituzionali. Le leggi della Repubblica possono demandare alla Regione il potere di emanare norme per la loro attuazione.”*

- Art.117 della Costituzione (dopo la modifica): *“La potestà legislativa è esercitata dallo Stato e dalle Regioni nel rispetto della Costituzione, nonché dei vincoli derivanti dall'ordinamento comunitario e dagli obblighi internazionali. Lo Stato ha legislazione esclusiva nelle seguenti materie: (omissis) tutela dell'ambiente, dell'ecosistema e dei beni culturali. (omissis). Sono materie di legislazione concorrente quelle relative a: valorizzazione dei beni culturali e ambientali e promozione e organizzazione di attività culturali.(omissis). Nelle materie di legislazione concorrente spetta alle regioni la potestà legislativa, salvo che per la determinazione dei principi fondamentali, riservata alla legislazione dello Stato. Spetta alle regioni la potestà legislativa in riferimento ad ogni materia non espressamente riservata alla legislazione dello Stato.(omissis) La potestà regolamentare spetta allo Stato nelle materie di legislazione esclusiva, salvo delega alle regioni. La potestà regolamentare spetta alle regioni in*

ogni altra materia. I Comuni, le Province e le Città metropolitane hanno potestà regolamentare in ordine alla disciplina dell'organizzazione e dello svolgimento delle funzioni loro attribuite."

La modifica dell'Art. 117 sancisce in modo univoco i campi di competenza della Regione e quelli di competenza dello Stato; in particolare nella prima stesura non si affrontava il tema dei beni culturali, come invece avviene nella seconda versione. Notiamo come però, anche se lo Stato ha legislazione esclusiva in merito ai beni culturali, per ciò che riguarda la loro valorizzazione e promozione sia concorrente alle due istituzioni.

Il Decreto Legislativo del 22 gennaio 2004 n° 42 "Codice dei beni culturali e del paesaggio, ai sensi dell'articolo 10 della legge 6 luglio 2002" meglio noto come "Codice Urbani" nasce dall'esigenza di aggiornare il quadro normativo sulla tutela del paesaggio e dei beni culturali a seguito della modifica delle leggi costituzionali.

Si riporta integralmente l'articolo 2 sul patrimonio culturale:

"1. Il patrimonio culturale e' costituito dai beni culturali e dai beni paesaggistici.

2. Sono beni culturali le cose immobili e mobili che, ai sensi degli articoli 10 e 11, presentano interesse artistico, storico, archeologico, etnoantropologico, archivistico e bibliografico e le altre cose individuate dalla legge o in base alla legge quali testimonianze aventi valore di civiltà.

3. Sono beni paesaggistici gli immobili e le aree indicati all'articolo 134, costituenti espressione dei valori storici, culturali, naturali, morfologici ed estetici del territorio, e gli altri beni individuati dalla legge o in base alla legge.

4. I beni del patrimonio culturale di appartenenza pubblica sono destinati alla fruizione della collettività, compatibilmente con le esigenze di uso istituzionale e sempre che non vi ostino ragioni di tutela."

L'articolo 134 rimanda all'articolo 136 per cui in definitiva fanno parte dei beni paesaggistici *"i complessi di cose immobili che compongono un caratteristico aspetto avente valore estetico e tradizionale"* dunque i beni culturali stessi.

La sezione II "Misure di conservazione" all'articolo 29 "Conservazione" si legge:

“1. La conservazione del patrimonio culturale è assicurata mediante una coerente, coordinata e programmata attività di studio, prevenzione, manutenzione e restauro.

2. Per prevenzione si intende il complesso delle attività idonee a limitare le situazioni di rischio connesse al bene culturale nel suo contesto.

3. Per manutenzione si intende il complesso delle attività e degli interventi destinati al controllo delle condizioni del bene culturale e al mantenimento dell'integrità, dell'efficienza funzionale e dell'identità del bene e delle sue parti.

4. Per restauro si intende l'intervento diretto sul bene attraverso un complesso di operazioni finalizzate all'integrità materiale ed al recupero del bene medesimo, alla protezione ed alla trasmissione dei suoi valori culturali. Nel caso di beni immobili situati nelle zone dichiarate a rischio sismico in base alla normativa vigente, il restauro comprende l'intervento di miglioramento strutturale.

5. Il Ministero definisce, anche con il concorso delle regioni e con la collaborazione delle università e degli istituti di ricerca competenti, linee di indirizzo, norme tecniche, criteri e modelli di intervento in materia di conservazione dei beni culturali.

Il Codice urbani è oggi in vigore anche se ha subito modifiche dai decreti elencati in ordine:

- *Decreto Legislativo 24 marzo 2006 n° 156 “Disposizioni correttive ed integrative al decreto legislativo 22 gennaio 2004, n. 42, in relazione ai beni culturali.”*
- *Decreto Legislativo 24 marzo 2006 n° 157 “Disposizioni correttive ed integrative al decreto legislativo 22 gennaio 2004, n. 42, in relazione al paesaggio”.*
- *Decreto Legislativo 26 marzo 2008 n° 63 “Ulteriori disposizioni integrative e correttive del decreto legislativo 22 gennaio 2004, n. 42, in relazione al paesaggio.”*

Con la modifica dell'Art. 131 comma 1 si assiste ad una evoluzione della definizione del termine paesaggio:

- D.Lgs 42/2004: 1. Ai fini del presente codice per paesaggio si intende una parte omogenea di territorio i cui caratteri derivano dalla natura, dalla storia umana o dalle reciproche interrelazioni.

- D.Lgs 157/2006: 1. Ai fini del presente codice per paesaggio si intendono parti di territorio i cui caratteri distintivi derivano dalla natura, dalla storia umana o dalle reciproche interrelazioni.

- D.Lgs 63/2008: 1. Per paesaggio si intende il territorio espressivo di identità, il cui carattere deriva dall'azione di fattori naturali, umani e dalle loro interrelazioni.

Altre modifiche riguardano gli Artt. 132 e 133, che si realizza nel D.Lgs 63/2008. Tale modifica deriva dalla presa di coscienza che il paesaggio non è più solo di competenza nazionale, ma di competenza europea, si prende atto della Convenzione Europea del paesaggio del 2000, con ben 8 anni di ritardo.

L'Art. 135, che norma la pianificazione paesaggistica, viene completamente modificato dal D.Lgs 157/2006 in questo modo:

Art. 135 (Pianificazione paesaggistica):

"1. Lo Stato e le regioni assicurano che il paesaggio sia adeguatamente conosciuto, tutelato e valorizzato. A tale fine le regioni, anche in collaborazione con lo Stato, nelle forme previste dall'articolo 143, sottopongono a specifica normativa d'uso il territorio, approvando piani paesaggistici, ovvero piani urbanistico-territoriali con specifica considerazione dei valori paesaggistici, concernenti l'intero territorio regionale, entrambi di seguito denominati "piani paesaggistici".

2. I piani paesaggistici, in base alle caratteristiche naturali e storiche, individuano ambiti definiti in relazione alla tipologia, rilevanza e integrità dei valori paesaggistici.

3. Al fine di tutelare e migliorare la qualità del paesaggio, i piani paesaggistici definiscono per ciascun ambito specifiche prescrizioni e previsioni ordinate:

a) al mantenimento delle caratteristiche, degli elementi costitutivi e delle morfologie dei beni sottoposti a tutela, tenuto conto anche delle tipologie architettoniche, nonché delle tecniche e dei materiali costruttivi;

b) all'individuazione delle linee di sviluppo urbanistico ed edilizio compatibili con i diversi livelli di valore riconosciuti e con il principio del minor consumo del territorio, e comunque tali da non diminuire il pregio paesaggistico di ciascun ambito, con particolare attenzione alla salvaguardia dei siti inseriti nella lista del patrimonio mondiale dell'UNESCO e delle aree agricole;

c) al recupero e alla riqualificazione degli immobili e delle aree compromessi o degradati, al fine di reintegrare i valori preesistenti, nonché alla realizzazione di nuovi valori paesaggistici coerenti ed integrati;

d) all'individuazione di altri interventi di valorizzazione del paesaggio, anche in relazione ai principi dello sviluppo sostenibile."

Ciò che inconsciamente è dettato dalle indicazioni del 1912, che diventa maggiormente chiaro nel 1999, diventa assolutamente palese nel Decreto Legislativo del 24 marzo 2006 n° 157: la tutela e la valorizzazione del paesaggio passa attraverso la conservazione, il recupero e la riqualificazione degli immobili che ne fanno parte.

In modo particolare, se l'immobile è un bene monumentale, dal punto di vista strutturale la sua conservazione ed il suo recupero passa necessariamente attraverso le valutazioni e la tutela dal rischio sismico secondo le Linee Guida [8], [9].

2 Aspetti tecnici sulla tutela del patrimonio edilizio storico: la prevenzione dal rischio sismico

2.1 Il Rischio Sismico

In generale si definisce rischio (R) per un singolo bene e in relazione ad una data pericolosità, il prodotto simbolico:

$$R = H * V_u * V_a$$

La **pericolosità** (H come *Hazard*) di un sito in relazione ad un evento sismico, è la probabilità che una misura dell'entità del fenomeno, atteso nel sito stesso in un determinato periodo di tempo, superi un certo valore, ed è una caratteristica del territorio, indipendente dalla presenza o meno di beni su di esso.

L'**esposizione** rappresenta il valore del bene presente nel sito in questione, che può essere inteso come numero di vite umane, stima economica dei danni causati dal sisma sul bene, la stima economica dei danni indotti, ad esempio mancanza di introiti dovuti al turismo o alle attività produttive perché fermi. Sempre più sentito è il carattere distintivo del paesaggio, attorno a cui si forma il nucleo centrale del suo *valore d'uso*, recentemente definito "nella sua capacità di suscitare senso di identità, di appartenenza ad un territorio".

Per **vulnerabilità sismica** s'intende la predisposizione di un edificio esistente ad essere danneggiato dal terremoto; l'analisi di vulnerabilità consiste nel prevedere il livello di danno subito a seguito di un evento sismico di assegnata intensità. Generalmente questi termini non sono riferiti al singolo manufatto ma l'analisi viene condotta a livello territoriale, operando su classi di edifici omogenei per tipologia; la finalità non è quindi quella di uno studio dettagliato sul singolo caso ma di una valutazione a scala più ampia, per la previsione dello scenario di danno e per la programmazione di strategie di prevenzione sismica.

Va preliminarmente osservato che un'analisi completa della vulnerabilità deve tener conto sia delle singole entità che possono danneggiarsi, sia degli effetti che tale danneggiamento determina sul sistema territoriale e sul suo funzionamento. La prima

viene definita *vulnerabilità diretta*, ed è relativa alle singole strutture; la seconda è la *vulnerabilità indotta*, che misura gli effetti negativi sull'organizzazione del territorio causati dal danneggiamento di una delle strutture presenti (si pensi al danno sul sistema dei trasporti indotto dal crollo di un ponte), oppure il danneggiamento subito da un edificio a causa del crollo di una struttura vicina, che altrimenti non avrebbe subito danni. Si definisce, infine, una *vulnerabilità differita* in rapporto agli effetti che si manifestano nelle fasi successive all'evento e alla prima emergenza e tali da modificare il comportamento delle popolazioni (si pensi alla perdita di occupazione, e quindi al danno alla popolazione, dovuto all'inagibilità o al crollo di stabilimenti industriali).

Il problema della vulnerabilità sismica del costruito minore, ovvero degli edifici ordinari in muratura presenti nei molti centri storici del nostro paese, viene affrontato con metodologie già ampiamente sperimentate. Il numero elevato e la difficoltà di una precisa valutazione della risposta sismica, per edifici articolati ed inseriti nel contesto urbano, impongono un approccio su base statistica, fondato su una catalogazione essenzialmente tipologica dei manufatti. I risultati che si ottengono sono quindi utili a livello territoriale, anche se offrono valutazioni approssimative sul singolo edificio.

Per le opere monumentali protette dai Beni culturali si fa riferimento alle Linee Guida specifiche, secondo le quali è comunque prevista una valutazione preventiva (LV1) effettuata mediante metodi speditivi.

Per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale tutelato sono state emanate le "Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle norme tecniche per le costruzioni", approvate dall'Assemblea Generale del Consiglio Superiore dei LL.PP. col parere n° 66 reso nella seduta del 21 luglio 2006.

2.2 *La direttiva Beni Culturali*

Il documento *“Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle norme tecniche per le costruzioni”* [8] (di seguito denominato Linee Guida) trae origine da un’intesa istituzionale tra il Dipartimento della protezione civile e il Dipartimento per i beni culturali e paesaggistici - Direzione generale per i beni architettonici e paesaggistici, in attuazione di quanto previsto all’art. 3 dell’Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri del 3 maggio 2005, n. 3431. Con decreto interministeriale 23 maggio 2005 viene infatti costituito un gruppo di lavoro incaricato di elaborare delle Linee Guida per l’applicazione al patrimonio culturale della normativa tecnica di cui all’Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri 20 marzo 2003, n. 3274. Il documento è stato successivamente trasmesso per un parere al Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici che lo ha esaminato ed approvato all’unanimità, con alcune modifiche, nella seduta del 21 luglio 2006, parere n. 66.

Le Linee Guida 2006 [8] sono state redatte con l’intento di specificare un percorso metodologico per la conoscenza della fabbrica storica, per la valutazione della sicurezza sismica e per il progetto degli eventuali interventi, secondo criteri concettualmente analoghi a quanto previsto per le costruzioni in muratura non tutelate, ma opportunamente adattato alle esigenze e peculiarità del patrimonio culturale; la finalità è quella di formulare, nel modo più oggettivo possibile, il giudizio finale sulla sicurezza e sulla conservazione del bene, garantite dall’intervento di miglioramento sismico, secondo quanto previsto dall’art. 29 del Codice.

La necessita di predisporre un documento specifico per i Beni Culturali, riferito alle opere in muratura, nasce dalle modifiche introdotte dall’OPCM n° 3274 in materia di interventi sugli edifici esistenti [5].

Nel precedente D.M. LL.PP. del 16 gennaio 1996 (Supp. Ord. Alla G. U. 5/2/96 n° 29) [6] il paragrafo C.9. *“Interventi sugli edifici esistenti”* esordisce con la nota: *“Gli interventi di adeguamento o miglioramento sismico possono essere eseguiti senza l’obbligo del rispetto di quanto stabilito ai punti precedenti delle presenti norme, relativi alle nuove costruzioni....”* Anche se poi precisa che *“Si definisce intervento di adeguamento un complesso di opere*

sufficienti per rendere l'edificio atto a resistere alle azioni sismiche definite ai punti C.9.5.3, C.9.6.3 e C.9.7.3."

Nella definizione di intervento di miglioramento vengono testualmente citati i beni monumentali:

"Si definisce intervento di miglioramento l'esecuzione di una o più opere riguardanti i singoli elementi strutturali dell'edificio con lo scopo di conseguire un maggior grado di sicurezza senza, peraltro modificare in maniera sostanziale il comportamento globale.

....

Tale tipologia di intervento si applica, in particolare, al caso degli edifici di carattere monumentale, di cui all'art. 16 della legge 2 febbraio 1974 n° 64, in quanto compatibile con le esigenze di tutela e di conservazione del bene culturale."

L'art. 16 della citata legge sismica del 1974 è una sorta di deroga della normativa sismica, in quanto dispone che per le riparazioni di edifici monumentali "... restano in vigore le disposizioni vigenti in materia." [7]

L'OPCM 3274 [5] introduce modifiche sostanziali sull'approccio della verifica e degli interventi sulle strutture esistenti.

Il cap. 11 relativo alle costruzioni esistenti nelle generalità afferma che: "... la valutazione della sicurezza ed il progetto degli interventi sono normalmente affetti da un grado di incertezza diverso da quello degli edifici di nuova progettazione. Ciò comporta l'adozione di adeguati fattori di confidenza nelle verifiche di sicurezza come pure metodi di analisi e di verifica dipendenti dalla completezza e dall'affidabilità dell'informazione."

Nel paragrafo 11.2 si legge: "Qualora si intende eseguire interventi di tipo strutturale su singoli elementi di fabbrica, ... , è consentito procedere senza dar luogo alle analisi ed alle verifiche di cui al presente capitolo, a condizione che si dimostri che l'insieme delle opere previste è comunque tale da far conseguire all'edificio un maggior grado di sicurezza nei confronti delle azioni sismiche. Tali interventi sono definiti di miglioramento sismico."

E specificamente per i beni culturali tutelati: *“Per i beni culturali tutelati è in ogni caso possibile limitarsi ad interventi di miglioramento, secondo quanto disposto dal comma 4) art. 29 del Decreto Legislativo n°42/2004 “Codice dei beni culturali e del paesaggio”, è peraltro comunque richiesto di calcolare i livelli di accelerazione del suolo corrispondenti al raggiungimento di ciascuno stato limite previsto per la tipologia dell’edificio, nella situazione precedente e nella situazione successiva all’intervento.”*

Le novità introdotte dunque riguardano in primo luogo l’obbligo di raggiungere un determinato livello di conoscenza, al quale è associato un fattore di confidenza da applicare alle verifiche. In secondo luogo l’obbligo nel caso di miglioramento sismico di documentare l’incremento di sicurezza degli interventi. Ciò comporta di conseguenza la necessità di calcolare il grado di sicurezza sia prima che dopo l’esecuzione degli interventi. Non solo, ma tale obbligo è esteso anche ai beni culturali tutelati, che fino a questo momento ne erano dispensati.

In generale per tutte le tipologie costruttive (cemento armato, acciaio e muratura) i dati necessari per identificare un livello di conoscenza sono la geometria, i dettagli strutturali e le proprietà dei materiali.

Nella Tabella 1 sono indicati i livelli di conoscenza in funzione delle informazioni acquisite, con i fattori di confidenza associati e il tipo di analisi consentita.

Livello di conoscenza	Geometria	Dettagli costruttivi	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC
LC1	Rilievo strutturale	Limitate verifiche in situ	Limitate indagini in situ	Tutti	1,35
LC2		Estese verifiche in situ	Estese indagini in situ	Tutti	1,20
LC3		Esaustive verifiche in situ	Esaustive indagini in situ	Tutti	1,00

Tabella 1: Livelli di conoscenza in funzione delle informazioni disponibili e conseguenti metodi di analisi ammessi e valori dei fattori di confidenza nelle costruzioni in muratura (Tabella 11.5.1 OPCM 3274)

Gli stati limite sono definiti secondo lo schema riportato in Tabella 2.

Stato Limite	Periodo di riferimento	Probabilità di superamento	Periodo di ritorno
SLD	50 anni	50%	72
SLV	50 anni	10%	475

Tabella 2: Probabilità di superamento e periodo di ritorno dell’evento sismico in 50 anni per i vari stati limite.

Inoltre al paragrafo 2.5 “Livelli di protezione antisismica” si legge che: “Le costruzioni devono essere dotate di un livello di protezione antisismica differenziato in funzione della loro importanza e del loro uso. ... A tale scopo si istituiscono diverse categorie di importanza, a ciascuno delle quali viene associato un fattore di importanza γ_I ”. tale fattore amplifica l’intensità dell’azione sismica di progetto calcolata per edifici ordinari. I fattori di importanza sono definiti nella tabella 4.3, riportati in Tabella 3.

Categoria	Edifici	Fattore di importanza
I	Edifici la cui funzionalità durante il terremoto ha importanza fondamentale per la Protezione civile (ad esempio ospedali, municipi, caserma dei vigili del fuoco)	1,4
II	Edifici importanti in relazione alle conseguenze di un eventuale collasso (ad esempio scuole, teatri)	1,2
III	Edifici ordinari, non compresi nelle categorie precedenti.	1,0

Tabella 3: Tabella 4.3 dell’OPCM che riporta i Fattori d’importanza.

L’obiettivo perseguito dalle Linee Guida 2006 [8] è stato duplice.

In primo luogo una riduzione delle indagini invasive necessarie al raggiungimento dei livelli di conoscenza richiesti dall’OPCM n. 3274 [5], ed il superamento dei tre livelli LC1, LC2, LC3, accettando livelli intermedi ed associando ad ognuno di essi un fattore di confidenza.

Infatti nelle Linee guida il fattore di confidenza si calcola ed è uguale a:

$$FC = 1 + \sum_{k=1}^4 F_{Ck}$$

dove i valori F_{Ck} sono riportati in Tabella 4.

In secondo luogo una riduzione dei livelli di sicurezza richiesti ai vari stati limite, agendo sui fattori di importanza.

Infatti al paragrafo 2.4 “Livelli di protezione” si legge: “Per i manufatti architettonici di interesse storico artistico appare comunque opportuno confrontare l’indice di sicurezza sismica nella situazione attuale e quello eventualmente ottenibile realizzando interventi di miglioramento, compatibili con le esigenze di tutela del bene, con un livello di protezione sismica

differenziato in funzione della loro rilevanza e del loro uso, e quindi delle conseguenze più o meno gravi di un loro danneggiamento per effetto di un evento sismico. A tale scopo si istituiscono:

- tre diverse “categorie di rilevanza” (limitata, media, elevata),;
- tre diverse “categorie d’uso” (saltuario o non utilizzato, frequente, molto frequente);
....”

Rilievo geometrico	Rilievo materico e dei dettagli costruttivi	Proprietà meccaniche dei materiali	Terreno e fondazioni
rilievo geometrico completo $F_{C1} = 0,05$	limitato rilievo materico e degli elementi costruttivi $F_{C2} = 0,12$	parametri meccanici desunti da dati già disponibili $F_{C3} = 0,12$	limitate indagini sul terreno e sulle fondazioni, in assenza di dati geologici e disponibilità d'informazioni sulle fondazioni $F_{C4} = 0,06$
rilievo geometrico completo, con restituzione grafica dei quadri fessurativi e deformativi $F_{C1} = 0$	esteso rilievo materico e degli elementi costruttivi $F_{C2} = 0,06$	limitate indagini sui parametri meccanici dei materiali $F_{C3} = 0,06$	disponibilità di dati geologici e sulle strutture fondazionali; limitate indagini sul terreno e sulle fondazioni $F_{C4} = 0,03$
	esaustivo rilievo materico e degli elementi costruttivi $F_{C2} = 0$	estese indagini sui parametri meccanici dei materiali $F_{C3} = 0$	estese o esaustive indagini sul terreno e le fondazioni $F_{C4} = 0$

Tabella 4: Definizione dei livelli di approfondimento sui diversi aspetti della conoscenza e relativi fattori parziali di confidenza (Tabella 4.1 Linee Guida 2006).

Incrociando i valori delle categorie di rilevanza e le categorie d’uso si hanno diversi valori della probabilità di eccedenza in 50 anni, o in alternativa il coefficiente di protezione da utilizzare con le accelerazioni da OPCM 3274 [5], qualora non siano disponibili le accelerazioni corrispondenti alle diverse probabilità accettate.

Categoria d'uso	Categoria di rilevanza					
	Limitata		Media		Elevata	
	P eccedenza	γ_1	P eccedenza	γ_1	P eccedenza	γ_1
Saltuario o non utilizzato	40%	0,50	25%	0,65	17%	0,80
Frequente	25%	0,65	17%	0,80	10%	1,00
Molto frequente	17%	0,80	10%	1,00	6,50%	1,20

Tabella 5: Probabilità di eccedenza in 50 anni dell’azione sismica e fattori di importanza per la verifica allo SLU (Tabella 2.1 Linee Guida 2006)

Categoria d'uso	Categoria di rilevanza					
	Limitata		Media		Elevata	
	P ecedenza	γ_I	P ecedenza	γ_I	P ecedenza	γ_I
Saltuario o non utilizzato	90%	0,50	80%	0,65	65%	0,80
Frequente	80%	0,65	65%	0,80	50%	1,00
Molto frequente	65%	0,80	50%	1,00	40%	1,20

Tabella 6: Probabilità di eccedenza in 50 anni dell'azione sismica e fattori di importanza per la verifica allo SLD (Tabella 2.1 Linee Guida 2006)

In Tabella 5 si riportano i valori per lo Stato Limite Ultimo e in Tabella 6 per lo Stato Limite di Danno.

La valutazione della sicurezza sismica può essere effettuata con metodi semplificati in grado di stimare l'accelerazione al suolo relativa allo stato limite considerato. Tale accelerazione serve per determinare l'indice sicurezza, per lo Stato Limite Ultimo pari a:

$$I_s = \frac{a_{SLU}}{\gamma_I \cdot S \cdot a_g}$$

Dove: a_{SLU} è l'accelerazione al suolo che porta al raggiungimento dello stato limite ultimo; γ_I è il coefficiente di importanza; S è il fattore che tiene conto del profilo stratigrafico del sottosuolo di fondazione e degli eventuali effetti morfologici; a_g è l'accelerazione di riferimento nel sito.

L'approvazione del D.M. 14 Gennaio 2008 (*G.U. n. 29 del 4-2-2008 Suppl. Ordinario n.30*) –*Norme tecniche per le costruzioni* [1] e la successiva Circolare applicativa del Ministero Infrastrutture e Trasporti 2 febbraio 2009, n. 617 *Istruzioni per l'applicazione delle "Nuove norme tecniche per le costruzioni"* di cui al D.M. 14 gennaio 2008 [2] introducono delle modifiche nella determinazione delle azioni sismiche rispetto all'OPCM 3274 [5] ed alle sue successive modifiche.

Nell'OPCM la pericolosità del sito era determinata da un unico valore, rappresentata dall'accelerazione orizzontale massima su suolo di categoria A, a_g .

Il territorio nazionale veniva suddiviso in zone di diversa pericolosità alle quali era associato un valore di a_g (Tabella 7).

Zona	valore di a_g
1	0,35 g
2	0,25 g
3	0,15 g
4	0,05 g

Tabella 7: Zone in cui era diviso il territorio nazionale e valori di a_g associati

La forma dello spettro era determinata dalla tipologia di terreno (Tabella 8).

Categoria sottosuolo	S	T_B	T_C	T_D
A	1,00	0,15	0,40	2,00
B,C,D	1,25	0,15	0,50	2,00
E	1,35	0,20	0,80	2,00

Tabella 8: Valori del fattore S e valori dei periodi che separano i diversi rami dello spettro, in funzione della stratigrafia del suolo di fondazione (Tabella 3.1 OPCM 3274)

Nelle NTC 2008 la pericolosità sismica è determinata da due valori:

- l'accelerazione orizzontale massima attesa in condizioni di campo libero su sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale a_g ,
- il valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale F_0 .

La forma dello spettro, oltre che dal tipo di terreno (Tabella 9), nelle NTC 2008 dipende da un parametro di sito, il periodo T_C^* periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale (Tabella 10).

Categoria sottosuolo	S_s	C_c
A	1,00	1,00
B	$1,00 \leq 1,40 - 0,40 \cdot F_0 \cdot (a_g/g) \leq 1,20$	$1,10 \cdot (T_C^*)^{-0,20}$
C	$1,00 \leq 1,70 - 0,60 \cdot F_0 \cdot (a_g/g) \leq 1,50$	$1,05 \cdot (T_C^*)^{-0,33}$
D	$0,90 \leq 2,40 - 1,50 \cdot F_0 \cdot (a_g/g) \leq 1,80$	$1,25 \cdot (T_C^*)^{-0,50}$
E	$1,00 \leq 2,00 - 1,10 \cdot F_0 \cdot (a_g/g) \leq 1,60$	$1,15 \cdot (T_C^*)^{-0,40}$

Tabella 9: Valori del coefficiente di amplificazione stratigrafica S_s e del coefficiente C_c , funzione del profilo stratigrafico (A,B,C,D,E) e del sito attraverso i parametri a_g , F_0 , T_C^*

T_B	T_C	T_D
$T_C/3$	$C_C \cdot T_C^*$	$4,0 \cdot (a_g/g) + 1,6$

Tabella 10: Valori dei periodi che separano i diversi rami dello spettro, funzione del profilo stratigrafico del suolo di fondazione e del sito.

Scompaiono i coefficienti di protezione delle strutture e i diversi livelli di protezione vengono determinati attraverso la determinazione di una "Vita di Riferimento V_R ". nel paragrafo 2.4.3 "Periodo di riferimento per l'azione sismica" esordisce: "Le azioni sismiche su ciascuna costruzione vengono valutate in relazione ad un periodo di riferimento V_R che si ricava, per ciascun tipo di costruzione, moltiplicandone la vita nominale V_N per il coefficiente d'uso C_U ."

Dove:

"La vita nominale di un'opera strutturale V_N è intesa come il numero di anni nel quale la struttura, purché soggetta alla manutenzione ordinaria, deve potere essere usata per lo scopo al quale è destinata." (Paragrafo 2.4.1)

"In presenza di azioni sismiche, con riferimento alle conseguenze di una interruzione di operatività o di un eventuale collasso, le costruzioni sono suddivise in classi d'uso..."

Dunque per i vari stati limite, di seguito riportati, viene stabilito un periodo di occorrenza, che nell'OPCM era riferito a 50 anni, nelle NTC 2008 è riferito alla vita di riferimento V_R . gli Stati Limite inoltre diventano quattro: allo SLV ed allo SLD si aggiungono lo Stato Limite di Operatività (SLO) e lo Stato Limite di Collasso (SLO) (Tabella 11).

Stati Limite		P_{VR} - Probabilità di superamento nel periodo di riferimento
Stati Limite di esercizio	SLO	81%
	CLD	63%
Stati Limite ultimi	SLV	10%
	SLC	5%

Tabella 11: Probabilità di superamento P_{VR} al variare dello stato limite considerato (Tabella 3.2.I NTC 2008)

Ciò ha reso inapplicabile il calcolo dell'Indice di sicurezza così come definito nelle Linee Guida 2006, per la scomparsa del fattore di importanza e comunque per la perdita di significato dell'indice stesso, in quanto la pericolosità come visto non è più legata esclusivamente all'accelerazione a_g .

Problematico diventava anche la determinazione dei livelli di sicurezza in funzione delle tabelle 2.1 e 2.2 delle Linee Guida 2006, in quanto le probabilità di occorrenza sono riferite a 50 anni, mentre secondo le NTC 2008 vanno riferite alla Vita di Riferimento del manufatto.

Ciò ha condotto ad un lavoro di modifica delle Linee Guida al fine dell'allineamento NTC 2008. A tal fine, è stato istituito presso le sezioni I e II del Consiglio superiore dei lavori pubblici un gruppo di lavoro interministeriale con lo scopo di esaminare il testo della Direttiva 2007 ed individuare le necessarie integrazioni al testo originario. Nell'adunanza del 23 luglio 2010 l'assemblea generale del Consiglio superiore dei lavori pubblici ha espresso il proprio avviso favorevole con voto prot. 92 allo schema di Direttiva inerente l'"Allineamento delle Linee Guida per la valutazione e la riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale alle nuove Norme Tecniche sulle costruzioni" [9].

Nel nuovo documento, la prima esigenza è stata quella di ridefinire gli stati limite che nelle NTC 2008 sono diventati quattro e non trovano diretta corrispondenza con le Linee Guida 2006. Nel paragrafo 2.3 "Definizione di stati limite di riferimento per il patrimonio culturale" si legge: *"Per i manufatti architettonici di interesse storico artistico l'acquisizione di un sufficiente livello di sicurezza e protezione nei riguardi del rischio sismico è garantita attraverso il rispetto di tre stati limite: due fanno riferimento agli stati limite definiti dalle NTC, mentre uno è specifico per i beni culturali.*

....

Gli stati limite da considerare per i beni culturali sono, di norma, SLV e SLD, per la cui definizione si rimanda al punto 3.2.1 delle NTC.

Inoltre possono sussistere ragioni di tutela di specifiche opere d'arte (affreschi, stucchi, ecc.), per la protezione delle quali è opportuno introdurre uno specifico Stato Limite di danno ai beni Artistici, SLA, così definito: a seguito di un terremoto di livello opportuno (in genere quello preso in considerazione per lo stato limite di danno), i beni artistici contenuti nel manufatto, intesi come apparati decorativi, superfici pittoriche, elementi architettonici di pregio (altari, organi, balaustre, pavimentazioni, ecc.) nonché beni mobili pertinenziali (pale d'altare, fonti battesimali, statue, ecc.) subiscono danni di modesta entità, tali da poter essere restaurati senza una significativa perdita del valore culturale."

La seconda e più importante modifica riguarda la definizione dei livelli di sicurezza. Nelle Linee Guida del 2006 i livelli di sicurezza erano calibrati in funzione dell'uso e della rilevanza. Quest'ultimo parametro poneva non pochi problemi. Da un lato, è concettualmente impossibile attribuire un valore ad un bene culturale, dall'altro, ed era questa la principale difficoltà, si è riscontrato che una classificazione della rilevanza secondo tre rigide categorie poneva difficoltà concettuali ed operative; le categorie di rilevanza sono quindi state eliminate. I livelli di sicurezza nelle Linee Guida 2010 vengono determinate secondo le indicazioni delle NTC 2008: *"Pur nella consapevolezza che non sempre si possono applicare ai beni culturali tutelati le prescrizioni di modellazione e verifica indicate per gli edifici ordinari, è comunque necessario calcolare i livelli delle azioni sismiche corrispondenti al raggiungimento di ciascuno stato limite previsto per la tipologia strutturale dell'edificio, nella situazione precedente e nella situazione successiva all'eventuale intervento."* (Paragrafo 2.2 "Criteri per la valutazione della sicurezza sismica e dell'efficacia dell'intervento").

Con maggiore chiarezza nel paragrafo 4.4 "Livelli di sicurezza":

"...appare comunque opportuno definire un livello di sicurezza sismica di riferimento, differenziato in funzione delle caratteristiche proprie dei manufatti e del loro uso, e quindi delle conseguenze più o meno gravi di un loro danneggiamento per effetto di un evento sismico. A tale scopo è necessario definire:

- *la vita nominale V_N a cui viene riferita la valutazione della sicurezza e per la quale viene eventualmente progettato un intervento di miglioramento sismico; in particolare essa può essere messa in relazione alle caratteristiche del bene culturale, anche sulla base della conoscenza del*

manufatto ottenuta con la metodologia sviluppata dal Ministero dei Beni Culturali (Allegato A, punto A.15), attraverso un procedimento interdisciplinare;

- la classe d'uso C_U , coerentemente alle diverse classi definite al punto 2.4.2 delle NTC 2008 (esplicitate in Allegato A, punto B.6, con riferimento ai beni culturali nel seguente modo: Classe I – uso saltuario o non utilizzato; Classe II – uso frequente con normali affollamenti; Classe III – uso molto frequente e/o con affollamenti significativi; Classe IV – edificio strategico e uso molto frequente e/o con affollamenti significativi)“

L'Indice di sicurezza è stato ridefinito come rapporto tra il Periodo di Ritorno T_R dell'evento sismico che porta la struttura al generico stato limite e quello di riferimento. Particolarmente significativo è l'indice di sicurezza riferito allo SLV:

$$I_{S,SLV} = \frac{T_{SLV}}{T_{R,SLV}}$$

L'uso dell'indice è diverso nel caso di verifica su base territoriale LV1 rispetto al caso in cui si stia progettando un intervento di miglioramento:

“Nel primo caso (LV1) l'indice di sicurezza consente di definire una graduatoria di rischio, utile per evidenziare la necessità di ulteriori indagini di approfondimento e per la programmazione di interventi per la mitigazione del rischio. Tale graduatoria può essere stilata assumendo per tutti i beni un unico valore della vita nominale (ad esempio $V_N=50$ anni), considerando quindi nell'analisi di rischio solo la vulnerabilità e l'esposizione, oppure associando ai manufatti diversi valori della vita nominale, in modo da mettere in evidenza, a parità degli altri fattori, un maggiore rischio di perdita per i manufatti più significativi. ...

Nel caso di progettazione di un intervento di miglioramento sismico (LV2, LV3), piuttosto che all'indice di sicurezza sismica valutato con la (2.3) può essere opportuno riferirsi direttamente alla vita nominale, ovvero valutare la vita nominale corrispondente allo stato attuale e quella ottenibile a seguito dell'intervento.”

Coerentemente ai dettami delle NTC 2008, per cui *“per i beni di interesse culturale in zone dichiarate a rischio sismico ... è in ogni caso possibile limitarsi ad interventi di miglioramento effettuando la relativa valutazione della sicurezza.”* la valutazione della vita nominale

ottenibile a seguito dell'intervento da un significato operativo e quantitativo al miglioramento sismico.

In questo modo vengono chiarite anche le responsabilità professionali del Progettista, il quale progettando un intervento a cui corrisponde una certa Vita Nominale, garantisce che i requisiti posti dalla norma sono rispettati, in senso probabilistico. nell'ambito di questo periodo.

L'Indice che nella versione del 2006 rappresentava l'Indice di rischio viene comunque riproposto:

“Analogamente all'indice di sicurezza, è possibile definire un fattore di accelerazione, definito dal rapporto tra l'accelerazione al suolo che porta al raggiungimento dello SLV e quella corrispondente al periodo di ritorno di riferimento, entrambe riferite alla categoria di sottosuolo A:

$$f_{a,SLV} = \frac{a_{SLV}}{a_{g,SLV}}$$

Tale fattore considera solo uno dei parametri che definiscono l'azione sismica spettrale, ma ha il pregio di fornire un'indicazione quantitativa del deficit in termini di “resistenza” (tenendo eventualmente conto anche della duttilità)”

Nel capitolo 5 (Modelli per la valutazione della sicurezza sismica) alcune modifiche sono state apportate alle formule dei modelli LV1 relativi a palazzi, chiese e torri; queste si sono rese necessarie dalla nuova definizione degli spettri di risposta delle NTC 2008 e dalla ridefinizione dell'indice di sicurezza in termini di periodi di ritorno.

Per la valutazione della sicurezza sismica vengono individuati tre diversi livelli di crescente completezza, applicabili rispettivamente:

- LV1) per le valutazioni della sicurezza sismica da effettuarsi a scala territoriale su tutti i beni culturali tutelati;
- LV2) per le valutazioni da adottare in presenza di interventi locali su zone limitate del manufatto (definiti nelle NTC riparazione o intervento locale);

- LV3) per il progetto di interventi che incidano sul funzionamento strutturale complessivo (definiti nelle NTC interventi di miglioramento) o quando venga comunque richiesta un'accurata valutazione della sicurezza sismica del manufatto.

Nel paragrafo 5.3 delle Linee Guida vengono descritti nello specifico i tre livelli di valutazione della sicurezza sismica del manufatto:

- LV1 a questo livello la valutazione può essere condotta adottando un modello semplificato in grado di stimare l'indice di sicurezza sismica ed il fattore di accelerazione α , in alternativa secondo le indicazioni delle NTC 2008 per calcolare il periodo di ritorno e la conseguente vita utile corrispondente al raggiungimento dello SLV. Nel merito il metodo sarà descritto nei capitoli seguenti.

- LV2 si applica nei casi in cui sono previsti interventi di restauro che interessano singole parti della costruzione. L'analisi cinematica, lineare o non lineare, rappresenta lo strumento in genere più efficace ed agevole per tale valutazione. Nel caso di interventi locali, che non modificano in modo sostanziale il funzionamento originale accertato, sarebbe particolarmente gravoso imporre una valutazione complessiva, estesa all'intera costruzione, specie quando questa risulta molto articolata e l'intervento ha un impatto modesto sul comportamento complessivo. Tuttavia, siccome le NTC richiedono che per qualsiasi intervento di miglioramento venga calcolata l'accelerazione di collasso, relativamente al manufatto nel suo complesso, in questi casi la valutazione della sicurezza sismica complessiva può essere stimata con gli strumenti del livello di valutazione LV1. Dunque analisi cinematica dei macroelementi oggetto di intervento e verifica globale secondo i modelli semplificati utilizzabili a livello LV1 consentono di raggiungere il livello LV2.

- Il livello di valutazione LV3 considera la sicurezza sismica della costruzione nel suo complesso, ovvero l'accelerazione del suolo che porta allo stato limite ultimo la costruzione nel suo complesso o singole sue parti significative (macroelementi). Il livello LV3 deve essere adottato nella progettazione di interventi che modifichino il funzionamento accertato della costruzione e, comunque, quando il restauro riguarda un edificio di tipo strategico, per l'importanza sociale di conoscere in modo attendibile la

sicurezza di tali strutture. La verifica complessiva della risposta sismica del manufatto non richiede necessariamente il ricorso ad un modello globale della costruzione, ma è possibile procedere alla scomposizione della struttura in parti (macroelementi), a condizione che venga valutata la ripartizione delle azioni sismiche tra i diversi sistemi strutturali, in ragione delle diverse rigidzze e dei collegamenti tra le stesse; tale ripartizione può essere operata anche in modo approssimato, purché venga garantito l'equilibrio nei riguardi della totalità delle azioni orizzontali. La valutazione può quindi essere eseguita con gli stessi metodi utilizzati al livello LV2, ma sistematicamente su ciascun elemento della costruzione. In conclusione analisi cinematica dei macroelementi estesa a tutta la struttura e verifica globale secondo i modelli semplificati utilizzabili a livello LV1 consentono di raggiungere il livello LV3.

2.2.1 *Il paragrafo 5.4.2: "Palazzi, ville ed altre strutture con pareti di spina ed orizzontamenti intermedi"*

Il modello semplificato predisposto dalle Linee guida per il livello di accuratezza LV1 per strutture con pareti di spina ed orizzontamenti intermedi prevede il calcolo della resistenza a taglio globale dell'edificio.

La resistenza a taglio dell'edificio viene ottenuta come la minore tra quelle valutate secondo due direzioni perpendicolari, scelte in genere secondo gli assi prevalenti dei muri portanti, prendendo in esame l'eventualità del collasso ai diversi piani della costruzione. Il modello consiste nel considerare, per ciascuna direzione, i pannelli murari portanti verticali e nell'ipotizzare che il collasso avvenga quando la tensione tangenziale media raggiunge un'opportuna quota parte della resistenza a taglio del materiale muratura.

Considerando, a titolo di esempio, la direzione x ed un generico piano i dell'edificio:

$$F_{SLV,x,i} = \frac{\mu_{xi} \cdot \xi_{xi} \cdot \zeta_x A_{xi} \cdot \tau_{di}}{\beta_{xi} \cdot \kappa_i}$$

in cui:

A_{xi} è l'area resistente a taglio dei muri dell'*i*-esimo piano, posti secondo la direzione *x* (è opportuno considerare anche i pannelli aventi inclinazione α compresa tra $\pm 45^\circ$, considerando un'area efficace ridotta dal coefficiente $\cos \alpha$);

τ_{di} è il valore di calcolo della resistenza a taglio della muratura nei maschi murari del piano *i*:

$$\tau_{di} = \tau_{0d} \cdot \sqrt{1 + \frac{\sigma_{0i}}{1,5 \cdot \tau_{0d}}}$$

dove: τ_{0d} è valore di calcolo della resistenza a taglio della muratura (valutato tenendo conto del fattore di confidenza FC); σ_{0i} è la tensione verticale media sulla superficie resistente dei muri all'*i*-esimo piano;

κ_i è il rapporto tra la risultante delle forze sismiche al piano *i*-esimo e la forza sismica totale;

β_{xi} è un coefficiente di irregolarità in pianta al piano *i*-esimo, associato alla eccentricità e_{yi} , del centro delle rigidezze rispetto al baricentro delle masse (la cui entità può essere stimata), ed alla distanza d_{yi} , tra il baricentro delle rigidezze e la parete in direzione *x* più esterna.

Il coefficiente di irregolarità in pianta vale:

$$\beta_{xi} = 1 + \frac{e_{yi} \cdot d_{yi} \cdot A_{xi}}{\sum_k (y_k - y_{Ci})^2 \cdot A_{xi,k}} \leq 1,25$$

dove y_{Ci} è il baricentro delle rigidezze.

μ_{xi} è un coefficiente che considera l'omogeneità di rigidezza e resistenza dei maschi murari, che può essere così valutato:

$$\mu_{xi} = 1 - 0,2 \cdot \sqrt{\frac{N_{mxi} \sum_j A_{xi,j}^2}{A_{xi}^2} - 1} \geq 0,8$$

dove:

N_{mxi} è il numero di maschi murari in direzione x , al piano i ; A_{xij} è l'area del generico maschio in direzione x al piano i (la sommatoria è estesa a tutti i maschi del piano - $\sum_j A_{xij} = A_{xi}$).

ξ_{xi} è un coefficiente legato al tipo di rottura prevista in prevalenza nei maschi murari dell' i -esimo piano; esso vale 1 nel caso di collasso per taglio, mentre può essere assunto pari a 0.8 nel caso di collasso per presso-flessione (maschi snelli, poco caricati verticalmente o in presenza di fasce deboli);

ζ_x è un coefficiente legato alla resistenza delle fasce murarie di piano nelle pareti disposte in direzione x ; esso vale 1 nel caso di fasce resistenti (rottura dei maschi murari verticali), mentre può assumere un valore minore (fino a 0.8) nel caso di fasce deboli, non in grado di bloccare la rotazione alle estremità dei maschi murari.

Con riferimento alla condizione che porta al raggiungimento dello SLV è possibile ricavare il valore dell'ordinata dello spettro di risposta elastico:

$$S_{e,SLV}(T_1) = \frac{q \cdot F_{SLV}}{e^* \cdot M}$$

dove:

F_{SLV} è la resistenza a taglio dell'edificio;

q è il coefficiente di struttura, per il quale sulla base delle NTC e della relativa Circolare può essere assunto un valore compreso tra 3 e 3.6, per edifici con numero di piani maggiore o uguale a due e regolari in elevazione, mentre negli altri casi q deve essere compreso tra 2.25 e 2.8; nel caso di edifici caratterizzati da un meccanismo di collasso nei maschi murari, con fasce di piano rigide e resistenti, è opportuno attribuire al coefficiente di struttura i valori più bassi tra quelli appena indicati;

La massa M da considerare per la valutazione dell'azione sismica allo stato limite ultimo è quella associata ai carichi gravitazionali:

$$M = \frac{(G_k + \sum_1^N \Psi_{2j} \cdot Q_{kj})}{g}$$

dove:

G_k sono i carichi permanenti (al loro valore caratteristico), computati sull'intero edificio;

Q_{kj} sono i carichi variabili accidentali (al loro valore caratteristico) al piano j -esimo; g è l'accelerazione di gravità;

ψ_{2j} è un coefficiente di combinazione che tiene conto della probabilità che i carichi variabili al piano j -esimo siano presenti in occasione del sisma; N è il numero di piani.

Invece e^* rappresenta la frazione di massa partecipante sul primo modo di vibrazione.

Nel caso in cui non venga definito con precisione il modo di collasso, è possibile assumere una forma modale triangolare, cui corrispondono i seguenti valori per la frazione di massa partecipante sul primo modo e per il coefficiente che definisce la forza al piano i -esimo:

$$e^* = 0,75 + 0,25 \cdot N - 0,75$$

$$\kappa_i = \frac{\sum_1^N j}{\sum_1^N j}$$

In base al valore dell'ordinata dello spettro di risposta si determina il tempo di ritorno T_{SLV} dell'azione sismica corrispondente, mediante un procedimento iterativo che utilizza i dati disponibili in appendice delle NTC 2008 [1] relativi ai 9 tempi di ritorno ivi riportati. Al tempo di ritorno T_{SLV} così valutato sono associati i corrispondenti valori di a_g , F_0 e T_C^* , attraverso i quali sono definiti tutti i parametri dello spettro. Il valore dell'accelerazione, riferita a suolo rigido (categoria di sottosuolo A), che porta al raggiungimento dello stato limite ultimo in quel sito può essere calcolato come:

$$a_{SLV} = \begin{cases} \frac{S_{e,SLV}(T_1)}{S \cdot F_0} & T_B \leq T_1 < T_C \\ \frac{S_{e,SLV}(T_1)}{S \cdot F_0} \frac{T_1}{T_C} & T_C \leq T_1 < T_D \end{cases}$$

dove:

T_1 è il periodo fondamentale di vibrazione della struttura;

T_B, T_C e T_D sono i periodi caratteristici dello spettro di risposta, definito al punto 3.2.3.2 delle NTC 2008 [1];

$S=S_S \cdot S_T$ è il coefficiente che tiene conto della categoria di sottosuolo e delle condizioni topografiche.

Le caratteristiche intrinseche ed estrinseche degli edifici esistenti in muratura producono frequentemente collassi di parti isolate del fabbricato in conseguenza delle accelerazioni sismiche al suolo. Lo studio dei meccanismi di ribaltamento di singole parti dell'edificio è previsto per il raggiungimento del livello LV2.

Meccanismi locali si verificano nelle pareti murarie prevalentemente per azioni perpendicolari al loro piano, ma in funzione delle proprietà geometriche della costruzione possono svilupparsi anche nel piano delle murature.

Le valutazioni quantitative delle prestazioni sismiche dei manufatti con riferimento ai meccanismi locali di danno e collasso (nel piano e fuori piano) possono essere svolte tramite l'analisi limite dell'equilibrio. In altri termini, seguendo un approccio cinematico, va selezionato un meccanismo di collasso e di conseguenza si valuta il livello di azione orizzontale che attiva tale cinematismo.

Ai fini della valutazione della vulnerabilità, quindi, è necessaria l'analisi dei meccanismi locali ritenuti significativi per la costruzione, che possono essere identificati sulla base della conoscenza del comportamento sismico di strutture analoghe, già danneggiate dal terremoto, o individuati considerando la presenza di eventuali stati fessurativi, anche di natura non sismica. In questo processo decisionale vanno tenute presenti la qualità della connessione tra le pareti murarie, la tessitura muraria, la presenza di catene, le interazioni con altri elementi della costruzione o degli edifici adiacenti.

Per l'applicazione del metodo di analisi si ipotizza generalmente:

- resistenza nulla a trazione della muratura;
- assenza di scorrimento tra i blocchi;

- resistenza a compressione illimitata della muratura.

In queste condizioni, le prestazioni in termini di accelerazione vengono penalizzate attraverso dei coefficienti di riduzione correlati ai fattori di confidenza impiegati nel calcolo. E' possibile, nondimeno, eseguire le analisi tenendo conto delle resistenze a compressione della muratura e introducendo in tal modo in maniera esplicita l'effetto dei carichi applicati sulla posizione degli assi di rotazione dei meccanismi.

Per ottenere il moltiplicatore orizzontale α_0 dei carichi che porta all'attivazione del meccanismo locale di danno si applicano ai blocchi rigidi che compongono la catena cinematica le seguenti forze: i pesi propri dei blocchi, applicati nel loro baricentro; i carichi verticali portati dagli stessi (pesi propri e sovraccarichi dei solai e della copertura, altri elementi murari non considerati nel modello strutturale); un sistema di forze orizzontali proporzionali ai carichi verticali portati, se queste non sono efficacemente trasmesse ad altre parti dell'edificio; eventuali forze esterne (ad esempio quelle trasmesse da catene metalliche); eventuali forze interne (ad esempio le azioni legate all'ingranamento tra i conci murari). Assegnata una rotazione virtuale θ_k al generico blocco k , è possibile determinare in funzione di questa e della geometria della struttura, gli spostamenti delle diverse forze applicate nella rispettiva direzione. Il moltiplicatore α_0 si ottiene applicando il Principio dei Lavori Virtuali, in termini di spostamenti, uguagliando il lavoro totale eseguito dalle forze esterne ed interne applicate al sistema in corrispondenza dell'atto di moto virtuale.

Facendo riferimento alle nella indicazioni della Circolare 2009 allegato C8A.4 [2], con le notazioni utilizzate nei fogli di calcolo, il Principio dei lavori virtuali si applica ponendo:

$$\alpha_0 \left(\sum_{i=1}^n P_i \delta_{x,i} + \sum_{j=1}^m F_j \delta_{x,j} \right) - \sum_{i=1}^n P_i \delta_{y,i} - \sum_{j=1}^m F_j \delta_{y,j} - \sum_{h=1}^o S_h \delta_{x,h} - \sum_{k=1}^p T_k \delta_{x,k} = L_{fi}$$

dove:

- n è il numero dei diversi blocchi della catena cinematica;

-
- m è il numero di tutte le forze peso applicate ai diversi blocchi delle catene cinematiche;
 - o è il numero delle spinte orizzontali (da archi o volte), non associate a masse, applicate ai diversi blocchi;
 - p è il numero di tiranti, dunque forze non associate a masse, applicati ai diversi blocchi;
 - P_i è la generica forza peso applicata (peso proprio del blocco, applicato nel suo baricentro, o un altro peso portato);
 - F_j è la generica forza peso applicata sui blocchi, (per esempio il peso dei solai);
 - S_h è l'eventuale spinta prodotta dalla presenza di archi o volte sui blocchi della catena cinematica;
 - T_k è l'eventuale forza prodotta dalla presenza di catene in corrispondenza dei blocchi della catena cinematica;
 - $\delta_{x,i}$ è lo spostamento virtuale orizzontale del punto di applicazione dell' i -esimo peso P_i , assumendo come verso positivo quello associato alla direzione secondo cui agisce l'azione sismica che attiva il meccanismo;
 - $\delta_{x,j}$ è lo spostamento virtuale orizzontale applicazione del punto di applicazione dell' j -esimo peso F_j , assumendo come verso positivo quello associato alla direzione secondo cui agisce l'azione sismica che attiva il meccanismo;
 - $\delta_{y,i}$ è lo spostamento virtuale verticale del punto di applicazione dell' i -esimo peso P_i , assunto positivo se verso l'alto;
 - $\delta_{y,j}$ è lo spostamento virtuale verticale del punto di applicazione del j -esimo peso F_j , assunto positivo se verso l'alto;
 - $\delta_{x,h}$ è lo spostamento virtuale orizzontale del punto dove è applicata la h -esima discorde spinta, di segno positivo se con verso concorde;
 - $\delta_{x,k}$ è lo spostamento virtuale verticale del punto di applicazione della forza del k -esimo tirante T_k , assunto positivo se verso l'alto;
 - L_{fi} è il lavoro di eventuali forze interne.

La massa partecipante al cinematismo M^* può essere valutata considerando gli spostamenti virtuali dei punti di applicazione dei diversi pesi, associati al cinematismo, come una forma modale di vibrazione:

$$M^* = \frac{\left(\sum_{i=1}^n P_i \delta_{x,i} + \sum_{j=1}^m F_j \delta_{x,j} \right)^2}{g \left(\sum_{i=1}^n P_i \delta_{x,i}^2 + \sum_{j=1}^m F_j \delta_{x,j}^2 \right)}$$

La frazione di massa partecipante della struttura è pari a:

$$e^* = \frac{gM^*}{\left(\sum_{i=1}^n P_i + \sum_{j=1}^m F_j \right)}$$

L'accelerazione spettrale di attivazione del meccanismo vale quindi:

$$a_0^* = \frac{\alpha_0 \left(\sum_{i=1}^n P_i + \sum_{j=1}^m F_j \right)}{M^* FC} = \frac{\alpha_0 g}{e^* FC}$$

dove:

- g è l'accelerazione di gravità;
- FC è il fattore di confidenza.

Nel caso in cui la valutazione riguardi un elemento isolato o una porzione della costruzione comunque sostanzialmente appoggiata a terra, l'accelerazione di attivazione del meccanismo va intersecata per la valutazione della vulnerabilità con l'accelerazione al suolo, ovvero il valore dell'ordinata spettrale elastica definita nel § 3.2.6 e valutata per $T=0$:

$$\text{SLD: } a_0^* = a_g(P_{V_R}) \cdot S = PGA_{CLD}$$

$$\text{SLU: } a_0^* = \frac{a_g(P_{V_R}) \cdot S}{q} = \frac{PGA_{CLV}}{q}$$

dove: a_g è funzione della probabilità di superamento dello stato limite scelto e della vita di riferimento;

- S è il coefficiente che tiene conto della categoria di sottosuolo e delle condizioni topografiche;
- q è il fattore di struttura, il cui valore suggerito dalla Circolare 2009 è 2,0.

Se invece il meccanismo locale interessa una porzione della costruzione posta ad una certa quota, si deve tener conto del fatto che l'accelerazione assoluta alla quota della porzione di edificio interessata dal cinematiso è in genere amplificata rispetto a quella al suolo. Un'approssimazione accettabile consiste nell'incrociare l'accelerazione di attivazione dello stato limite considerato con l'ordinata spettrale nel modo seguente:

$$\text{SLD: } a_0^* = S_e(T_1) \cdot \psi(Z) \cdot \gamma$$

$$\text{SLU: } a_0^* = \frac{S_e(T_1) \cdot \psi(Z) \cdot \gamma}{q}$$

dove:

- $S_e(T_1)$ è lo spettro elastico definito dalle NTC 2008 in funzione dei parametri precedentemente determinati, della probabilità di superamento dello stato limite scelto e del periodo di riferimento T_R , calcolato per il periodo T_1 ;
- T_1 è il periodo di vibrazione primario dell'intera struttura nella direzione considerata. Si considerano i periodi nelle due direzioni, calcolati nell'analisi globale, nell'ipotesi di struttura fessurata;
- $\psi(Z)$ è il primo modo di vibrazione nella direzione considerata, normalizzato ad uno in sommità all'edificio; in assenza di valutazioni più accurate può essere assunto $\psi(Z) = Z/H$, dove H è l'altezza del punto di applicazione della forza più alto rispetto alla fondazione;

- Z è l'altezza, rispetto alla fondazione dell'edificio, del baricentro delle linee di vincolo tra i blocchi interessati dal meccanismo ed il resto della struttura: nel caso in esame all'altezza della quota di imposta del meccanismo (altezza, rispetto alla fondazione, della cerniera A);
- γ è il corrispondente coefficiente di partecipazione modale (in assenza di valutazioni più accurate può essere assunto $\gamma = 3N / (2N+1)$, con N numero di piani dell'edificio).

Dunque nei fogli di calcolo per le porzioni di struttura che si trovano ad una certa altezza si determina l'ordinata spettrale che determina lo Stato limite considerato, in particolare:

$$\text{SLD: } S_{CLD}(T_1) = Se(T_1) = \frac{a_0^*}{\psi(Z) \cdot \gamma}$$

$$\text{SLU: } S_{CLV}(T_1) = \frac{Se(T_1)}{q} = \frac{a_0^*}{\psi(Z) \cdot \gamma}.$$

La verifica può essere effettuata anche nell'ipotesi di schiacciamento della muratura alla base, il che comporta lo spostamento della cerniera al centro della zona schiacciata. Lo scostamento della cerniera dal bordo verso l'interno è pari a:

$$\Delta c = N / [(f_m / FC) \cdot L].$$

In tal caso, la resistenza della muratura è ridotta dal fattore di confidenza, invece

$$a_0^* = \frac{\alpha_0 \left(\sum_{i=1}^n P_i + \sum_{j=1}^m F_j \right)}{M^*} = \frac{\alpha_0 g}{e^*}$$

2.2.2 Il paragrafo 5.4.4: "Torri, campanili ed altre strutture a prevalente sviluppo verticale"

Per strutture a prevalente sviluppo verticale, il modello semplificato per il livello LV1 prevede il collasso a pressoflessione. Nel caso di una struttura a sezione rettangolare cava, nell'ipotesi che lo sforzo normale agente non sia superiore a $0.85f_d A_s$, il momento ultimo resistente alla base dell' i -esimo settore può essere calcolato come:

$$M_{u,i} = \frac{\sigma_i \cdot A_i}{2} \cdot \left(b_i - \frac{\sigma_{0i} \cdot A_i}{0,85 \cdot a_i \cdot f_d} \right)$$

dove:

- $M_{u,i}$ è il momento corrispondente al collasso per presso flessione della sezione i-esima di analisi;
- a_i è il lato perpendicolare alla direzione dell'azione sismica considerata della sezione i-esima di analisi, depurato dalle eventuali aperture;
- b_i è il lato parallelo alla direzione dell'azione sismica considerata della sezione di analisi;
- A_i è l'area totale della sezione di analisi (nel caso di sezione cava di spessore costante essa è pari a: $A_i = 2s_i(a_i + b_i - 2s_i) - B_i$, con s_i spessore della muratura nella sezione e B_i area della bucatore presenti);
- σ_{0i} è la tensione normale media nella sezione di analisi (W/A_i , con W pari al peso della struttura presente al di sopra della sezione di analisi);
- f_d è la resistenza a compressione di calcolo della muratura (tenendo conto del fattore di confidenza FC).

Il momento agente di calcolo può essere valutato considerando un sistema di forze distribuite lungo l'altezza della struttura, assumendo una forma lineare degli spostamenti.

Il valore dell'ordinata dello spettro di risposta elastico corrispondente al raggiungimento dello stato limite SLV nella sezione i-esima si ricava come:

$$S_{e,SLV,i}(T_1) = \frac{q \cdot g \cdot M_{u,i} \cdot \sum_{k=1}^n z_k \cdot W_k}{0,85 \cdot W \cdot (\sum_{k=i}^n z_k^2 \cdot W_k - z_{i*} \cdot \sum_{k=i}^n z_k \cdot W_k)}$$

dove:

-
- z_k è la quota del baricentro della massa del k -esimo settore rispetto alla base, avente peso W_k ;
 - z_i^* è la quota della i -esima sezione di verifica rispetto alla base
 - q è il fattore di struttura che, a meno di più accurate valutazioni, può essere assunto, in analogia a quanto fatto per gli edifici, pari a 3, nel caso di strutture regolari in elevazione, o ridotto fino a 2.25, in presenza di bruschi cambiamenti di rigidità lungo l'altezza o di strutture adiacenti a contatto
 - T_1 è il primo periodo di vibrazione della struttura, che potrà essere valutato attraverso: a) l'analisi modale di un modello a mensola equivalente; b) algoritmi iterativi che considerano la variazione delle masse e delle rigidità lungo l'altezza (adottando, per i materiali, i valori dei moduli elastici fessurati), a partire da una forma modale opportunamente assunta; c) formule semplificate, se sufficientemente attendibili. Nel caso di strutture a prevalente sviluppo verticale, il primo periodo di vibrazione in fase elastica può essere ricavato da misure dinamiche con rumore ambientale (o forzate, ad esempio indotte dalle campane); per la valutazione del comportamento a stato limite ultimo deve essere utilizzato il periodo in fase fessurata, che può essere ottenuto moltiplicando il valore del periodo identificato dalle misure dinamiche per un coefficiente compreso tra 1.4 e 1.75.

In base a tale valore di $S_{e,SLV,i}(T_1)$ si determina il tempo di ritorno $T_{R,SLV,C}$ dell'azione sismica corrispondente, mediante un procedimento iterativo che utilizza i dati disponibili in appendice delle NTC relativi ai 9 tempi di ritorno ivi riportati. Al tempo di ritorno $T_{R,SLV,C}$ così valutato sono associati i corrispondenti valori di a_g , F_0 e T_C^* , attraverso i quali sono definiti tutti i parametri dello spettro.

Il rapporto tra il periodo di ritorno di capacità $T_{R,SLV,C}$ e il periodo di ritorno della domanda $T_{R,SLV,D}$ rappresenta l'indice di sicurezza.

Lo stesso paragrafo 5.5.4 impone un controllo della resistenza a taglio, che nel caso di torri poco snelle potrebbe portare al collasso prima della crisi a pressoflessione.

2.3 La conoscenza del manufatto

Le Linee Guida 2010 [9] dedicano un intero capitolo sul tema della conoscenza del manufatto, in quanto *“la conoscenza della costruzione storica in muratura è un presupposto fondamentale sia ai fini di una attendibile valutazione della sicurezza sismica sia per la scelta di un efficace intervento di miglioramento.”*

La problematica è comune a tutti i tipi di edificio ma per le costruzioni storiche è ancora più importante *“conoscere le caratteristiche originarie della fabbrica, le modifiche intercorse nel tempo...”* ma conclude affermando che *“una completa campagna di indagini può risultare troppo invasiva sulla fabbrica stessa.”*

È questo il motivo per cui parla della necessità di affinare le tecniche di analisi ed interpretazione, privilegiando le tecniche non invasive.

Traccia poi un percorso della conoscenza, riconducendolo alle seguenti attività:

- *l'identificazione della costruzione, la sua localizzazione in relazione a particolari aree a rischio, ed il rapporto della stessa con il contesto urbano circostante; l'analisi consiste in un primo rilievo schematico del manufatto e nell'identificazione di eventuali elementi di pregio (apparati decorativi fissi, beni artistici mobili) che possono condizionare il livello di rischio;*
- *il rilievo geometrico della costruzione nello stato attuale, inteso come completa descrizione stereometrica della fabbrica, compresi gli eventuali fenomeni fessurativi e deformativi;*
- *l'individuazione della evoluzione della fabbrica, intesa come sequenza delle fasi di trasformazione edilizia, dall'ipotetica configurazione originaria all'attuale;*
- *l'individuazione degli elementi costituenti l'organismo resistente, nell'accezione materica e costruttiva, con una particolare attenzione rivolta alle tecniche di realizzazione, ai dettagli costruttivi ed alla connessioni tra gli elementi;*
- *l'identificazione dei materiali, del loro stato di degrado, delle loro proprietà meccaniche;*
- *la conoscenza del sottosuolo e delle strutture di fondazione, con riferimento anche alle variazioni avvenute nel tempo ed ai relativi dissesti.”*

L'identificazione dell'organismo parte con localizzazione sul territorio, al fine di conoscere la pericolosità sismica e l'amplificazione locale.

Si passa poi all'individuazione della tipologia di edificio, del Complesso Architettonico e dell'eventuale appartenenza ad un Aggregato Edilizio. Si dovrà poi risalire ai singoli Corpi di Fabbrica costituenti.

Vanno individuati elementi di pregio e/o particolarmente sensibili al danneggiamento *“anche per l'individuazione di possibili zone di sacrificio ove realizzare eventuali indagini distruttive”*.

La conoscenza della geometria avviene attraverso il rilievo, a volte difficoltoso in presenza di zone non accessibili. Viene riprodotto in disegni: piante, alzate e sezioni.

Il rilievo serve per la determinazione del modello strutturale e per l'analisi dei carichi.

È utile rilevare un eventuale quadro fessurativo o deformativo, *“in modo tale da consentire l'individuazione delle cause.*

Di notevole importanza risulta essere la ricostruzione dell'intera evoluzione costruttiva, per l'individuazione di elementi di *“discontinuità e disomogeneità materiale”*.

Ancora utile è la ricerca storica sugli eventi traumatici subiti, in particolare quelli sismici, assieme ai danni eventualmente subiti e gli interventi di ripristino. In questo modo si individuano *“i meccanismi di danno maggiormente critici per la conseguente definizione di modelli di calcolo attendibili.”*

Capitolo a parte è rappresentato dal rilievo materico costruttivo. *“il rilievo materico costruttivo deve permettere di individuare completamente l'organismo resistente della fabbrica”* dei dettagli costruttivi e dei materiali, e del loro stato di conservazione.

L'acquisizione di tali elementi necessita in genere l'esecuzione di prove. Il numero di tali prove dovrebbe essere statisticamente rilevante, così come stabilito nelle NTC 2008 [1], [2]. Come già affermato, nel caso dei Beni Culturali a causa del loro impatto si cerca di limitarle. A tale scopo *“è fondamentale avere un'approfondita consapevolezza delle caratteristiche costruttive dei manufatti nell'area e nei diversi periodi storici.”*

Riguardo la qualità dei materiali le Linee Guida recitano testualmente: *“Speciale attenzione dovrà essere riservata alla valutazione della qualità muraria, tenendo conto dei modi*

di costruire tipici di quel territorio ed individuando le caratteristiche geometriche e materiche dei singoli componenti, oltre che le modalità di assemblaggio.”

Particolare importanza rivestono le caratteristiche meccaniche della muratura, moduli elastici e valori di resistenza.

Le caratteristiche meccaniche vanno determinate mediante prove distruttive. La caratterizzazione della muratura mediante prove sui singoli elementi che la compongono (malta ed elemento lapideo) è possibile solo per murature in mattoni estremamente regolari. Per le altre tipologie è necessario effettuare la prova sul tessuto murario.

Per la determinazione del modulo elastico e della resistenza a compressione si possono eseguire:

- prova con doppio martinetto piatto (prova debolmente distruttiva)
- prova a compressione su un pannello murario quadrato (prova distruttiva e fortemente invasiva)

Per la determinazione della resistenza e del modulo a taglio si possono eseguire:

- prova di compressione diagonale, su un pannello quadrato (prova distruttiva e fortemente invasiva)
- prova di compressione e taglio, su un pannello rettangolare di altezza doppia della larghezza (prova distruttiva e fortemente invasiva).

Le prove distruttive possono essere calibrate da prove non distruttive, in particolare la prova sonica con la quale si determina l'omogeneità della muratura.

Mediante la prova sonica oltre alla omogeneità è possibile determinare la presenza di cavità e/o danneggiamenti, oppure la presenza di *diatoni*. Alcune formulazioni consentono di determinare anche il modulo elastico normale con sufficiente attendibilità.

Un passo importantissimo delle Linee Guida riguarda la determinazione delle caratteristiche per analogia:

“L’identificazione delle caratteristiche meccaniche potrà anche essere ottenuta per analogia con murature simili, tenendo conto, per quanto possibile, anche dei fenomeni di degrado. A tale scopo è auspicabile che gli enti territoriali di tutela e controllo istituiscano degli archivi permanenti contenenti: a) almanacchi delle diverse tipologie murarie presenti, nel corso del tempo, nell’area in esame; b) tabelle con valori di riferimento delle proprietà meccaniche, desunti da sperimentazioni organizzate dagli stessi enti e/o utilizzando campagne eseguite per singoli interventi e studi.

.....

In assenza degli archivi di cui sopra si potrà far riferimento, per ogni tipologia muraria, ai valori medi dei parametri meccanici definiti nelle Tabelle C8A.2.1 e C8A.2.2 dell’Appendice C8A alla Circolare.” (vedi Tabella 12 e Tabella 13).

Per la determinazione della resistenza per analogia è necessario che il tecnico sia in grado di individuare correttamente la tipologia muraria.

La classificazione della tipologia muraria avviene mediante la caratterizzazione della geometria e della materia degli elementi che la compongono e delle modalità di assemblaggio.

Per l’elemento lapideo:

- il materiale (calcare, arenaria, tufo, ecc.)
- la lavorazione (ciottoli, sbozzatura, a spigoli finiti, ecc.)
- le dimensioni.

Riguardo la malta:

- il tipo (di calce aerea, calce idraulica o cementizia)
- la funzione (allettamento, riempimento o stilatura)

- lo stato di conservazione (incoerente, friabile, tenace)

Tipologia di muratura	f_m	τ_0	E	G	w
	(N/cm ²)	(N/cm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(kN/m ³)
	Min-max	min-max	min-max	min-max	
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	100 180	2,0 3,2	690 1050	230 350	19
Muratura a conci sbozzati, con paramento di limitato spessore e nucleo interno	200 300	3,5 5,1	1020 1440	340 480	20
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	260 380	5,6 7,4	1500 1980	500 660	21
Muratura a conci di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)	140 240	2,8 4,2	900 1260	300 420	16
Muratura a blocchi lapidei squadriati	600 800	9,0 12,0	2400 3200	780 940	22
Muratura in mattoni pieni e malta di calce	240 400	6,0 9,2	1200 1800	400 600	18
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es.: doppio UNI foratura $\leq 40\%$)	500 800	24 32	3500 5600	875 1400	15
Muratura in blocchi laterizi semipieni (perc. foratura < 45%)	400 600	30,0 40,0	3600 5400	1080 1620	12
Muratura in blocchi laterizi semipieni, con giunti verticali a secco (perc. foratura < 45%)	300 400	10,0 13,0	2700 3600	810 1080	11
Muratura in blocchi di calcestruzzo o argilla espansa (perc. foratura tra 45% e 65%)	150 200	9,5 12,5	1200 1600	300 400	12
Muratura in blocchi di calcestruzzo semipieni (foratura < 45%)	300 440	18,0 24,0	2400 3520	600 880	14

Tabella 12: Tabella C8A.2.1 della Circolare 2009 che riporta le caratteristiche delle tipologie murarie

Tipologia di muratura	Malta buona	Giunti sottili (<10 mm)	Ricorsi o listature	Connessioni trasversali	Nucleo scadente e/o ampio	Iniezione di miscele leganti	Intonaco armato *
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	1,5	-	1,3	1,5	0,9	2	2,5
Muratura a conci sbozzati, con paramento di limitato spessore e	1,4	1,2	1,2	1,5	0,8	1,7	2
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	1,3	-	1,1	1,3	0,8	1,5	1,5
Muratura a conci di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)	1,5	1,5	-	1,5	0,9	1,7	2
Muratura a blocchi lapidei squadriati	1,2	1,2	-	1,2	0,7	1,2	1,2
Muratura in mattoni pieni e malta di calce	1,5	1,5	-	1,3	0,7	1,5	1,5

* Valori da ridurre convenientemente nel caso di pareti di notevole spessore (p.es. > 70 cm).

Tabella 13: Tabella C8A.2.2 della Circolare 2009 con i coefficienti correttivi delle caratteristiche delle tipologie murarie della Tabella C8A.2.1

Altro elemento è l'individuazione della tessitura muraria attraverso (Figura 1):

- l'apparecchiatura (disordinata, a corsi irregolari, a corsi orizzontali)
- posa degli elementi (casuale, orizzontale - verticale, orizzontale, a lisca di pesce).

Ulteriori elementi utili per la classificazione sono (Figura 2):

- il numero dei paramenti di cui è costituita la muratura (a doppio paramento, a paramento unico, ecc.)
- Il tipo di collegamento tra i paramenti (muratura a sacco, a paramenti accostati, presenza di diatoni)
- L'omogeneità delle caratteristiche degli elementi che la compongono (dimensioni dell'elemento lapideo, materiale di cui sono costituiti gli elementi, spessore dei giunti, ecc.)


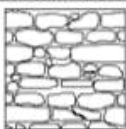


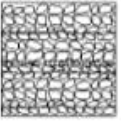

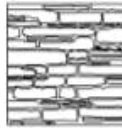


ELEMENTI COSTITUTIVI				
Materiale:	<input type="checkbox"/> arenaria	<input type="checkbox"/> calcare	<input type="checkbox"/> tufo	<input type="checkbox"/> calcarenite
	<input type="checkbox"/> mattoni cotti	<input type="checkbox"/> mattoni crudi	<input type="checkbox"/> vario di reimpiego	<input type="checkbox"/>
Lavorazione:	<input type="checkbox"/> assente (ciottoli)	<input type="checkbox"/> sbazzatura	<input type="checkbox"/> a spigoli finiti	<input type="checkbox"/> a conci squadrati
Dimensioni (diagonale elemento):	<input type="checkbox"/> piccole (< 15 cm)		<input type="checkbox"/> medie (15-25 cm)	<input type="checkbox"/> grandi (> 25 cm)
Stato di conservazione e qualità:	<input type="checkbox"/> pessimo		<input type="checkbox"/> discreto	<input type="checkbox"/> buono
MALTA				
Tipo:	<input type="checkbox"/> di calce aerea	<input type="checkbox"/> di calce idraulica	<input type="checkbox"/> cementizia	<input type="checkbox"/>
Stato di conservazione e consistenza:	<input type="checkbox"/> incoerente		<input type="checkbox"/> friabile	<input type="checkbox"/> tenace
Funzione:	<input type="checkbox"/> allettamento		<input type="checkbox"/> riempimento	<input type="checkbox"/> stitatura
Calce aerea : Composta da leganti che induriscono unicamente all'aria come ad esempio l'argilla, il gesso , la calce aerea.				
Calce idraulica : Composta da leganti che hanno la proprietà di indurire sott'acqua in assenza di aria; sono leganti idraulici la calce idraulica e i vari tipi di cemento				
POSA IN OPERA DEGLI ELEMENTI				
TESSITURA DEI PARAMENTI				
APPARECCHIATURA				
				
<input type="checkbox"/> disordinata	<input type="checkbox"/> corsi irregolari	<input type="checkbox"/> corsi orizzontali		
POSA DEGLI ELEMENTI:				
				
<input type="checkbox"/> casuale	<input type="checkbox"/> a lisca di pesce	<input type="checkbox"/> orizzontale/verticale	<input type="checkbox"/> orizzontale	
Ricorsi o listatura:	<input type="checkbox"/> assenti	<input type="checkbox"/> in mattoni	<input type="checkbox"/> altro	Zeppe o scaglie: <input type="checkbox"/> assenti <input type="checkbox"/> in pietra <input type="checkbox"/> in cotto
				

Figura 1: Estratto dalla Scheda Muratura del Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti a cura della prof.ssa Luigia Binda [13]


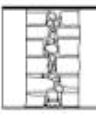
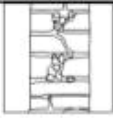
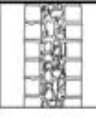

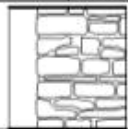

SEZIONE TRASVERSALE			
Tipologia:	<input type="checkbox"/> paramento unico	<input type="checkbox"/> due paramenti accostati	<input type="checkbox"/> due paramenti ammorsati
	<input type="checkbox"/> a sacco (incoerente)	<input type="checkbox"/> a sacco (coerente)	Paramento aggiunto: <input type="checkbox"/>
			
<input type="checkbox"/> paramento unico		<input type="checkbox"/> due paramenti accostati	
			
<input type="checkbox"/> due paramenti ammorsati		<input type="checkbox"/> a sacco	
Spessori:	totale: _____	paramento esterno: _____	paramento interno: _____
Presenza significativa di vuoti: <input type="checkbox"/>		Presenza di diatoni: (collegamenti puntuali tra il paramento interno e quello esterno) <input type="checkbox"/>	
INTONACO			
Stato attuale:	<input type="checkbox"/> mur. faccia a vista	<input type="checkbox"/> mancante	<input type="checkbox"/> in parte mancante <input type="checkbox"/> presente
Stato di conservazione e consistenza:		<input type="checkbox"/> degradato	<input type="checkbox"/> fessurato <input type="checkbox"/> buono
COLLEGAMENTI TRA LE PARETI MURARIE			
ANGOLATE			
Tipologia:	<input type="checkbox"/> ammorsamento scadente	<input type="checkbox"/> collegamenti irregolari	<input type="checkbox"/> alternanza regolare
			
			
Elementi costitutivi:	<input type="checkbox"/> analoghi alla muratura	<input type="checkbox"/> di dimensione maggiore	<input type="checkbox"/> a conci squadri

Figura 2: Estratto dalla Scheda Muratura del Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti a cura della prof.ssa Luigia Binda [13]

3 Aspetti regionali rilevanti e localizzazione dei casi studio

3.1 Il territorio molisano

La caratterizzazione di un territorio necessita di uno studio multidisciplinare:

- Uno studio sulla conformazione geomorfologica
- Uno studio delle vicissitudini geopolitiche
- Uno studio dell'economia
- Uno studio della rete dei trasporti.

L'altezza dei rilievi, la morfologia e la natura dei terreni hanno fortemente condizionato l'economia regionale molisana, influenzando quindi anche la distribuzione della popolazione e dei centri abitati [11].

Il Molise, viene convenzionalmente suddiviso in quattro zone: *alto Molise, bacino del Volturno, Molise centrale, basso Molise*.

Dal punto di vista geologico [14] è possibile suddividere indicativamente il territorio regionale in tre grandi fasce caratterizzate da una diversa tipologia specifica: la fascia più interna, la fascia del Molise centrale e la fascia costiera, con relative fasce di transizione da una zona all'altra.

L'eterogeneità del territorio molisano, rappresentato in toto da terreni di natura sedimentaria, descrive ampiamente le caratteristiche geologiche dell'intera catena appenninica (Signorini, 1935; Manfredini, 1963; Crescenti, 1967; Scrocca & Tozzi, 1999; Di Luzio et al., 1999).

Il settore molisano della catena appenninica può essere distinto nelle sue principali unità costituenti:

- le Unità di Piattaforma (Pescatore, 1964), che affiorano prevalentemente nel settore sud occidentale del territorio regionale;

-
- le formazioni del Bacino Molisano, che differenziate a seconda delle facies sono distinte in: Flysch di Frosolone (Ippolito et al., 1973; Sgrosso et al., 1988), di ambiente di scarpata, Unità di Agnone, di Tufillo e della Daunia, di facies rispettivamente sempre più distale.

Di differente posizione paleogeografica, ma diffusamente presente sul territorio, è il Flysch di San Bartolomeo (Crostellà & Vezzani, 1964; Tortorici, 1975), che da molti autori è indicato come bacino di “piggy back”: esso è distinto in un membro inferiore, a prevalente componente argillosa, ed un membro superiore caratterizzato da sedimentazione arenaceo-conglomeratica.

Degni di nota sono anche i depositi della cosiddetta “Falda Sannitica”: si tratta di depositi di discussa provenienza e rappresentati essenzialmente dalla Formazione delle Argille Variegate (Ippolito & Lucini, 1956; Sgrosso, 1988) e da inclusi calcareo-quarzarenitici.

Infine, al di là dei termini attuali e di copertura, particolare interesse è rivestito dai cicli trasgressivo-regressivi plio-pleistocenici, che caratterizzano i settori orientali e periadriatici del territorio regionale.

Il territorio molisano dal punto di vista geomorfologico si presenta direttamente connesso alle vicissitudini tettoniche presenti a scala regionale.

La morfologia appare quanto mai articolata a causa della grande variabilità nella resistenza all’erosione delle litologie affioranti.

I terreni carbonatici e francamente arenitici, infatti, si presentano talvolta aridi, sovente dai versanti decisamente acclivi e caratterizzati da forme d’erosione di natura chimico-fisica, mentre i terreni flyschoidi hanno morfologia decisamente più dolce.

Le litologie meno conservative, come i terreni argillosi e sabbioso argillosi di natura flyschoidi, sono caratterizzate da un profilo morfologico spesso ondulato. Questi terreni, presenti soprattutto nelle depressioni strutturali e topografiche, sono di regola caratterizzati da fitta vegetazione e spesso sede di coltivazioni agricole.

La loro evoluzione morfologica è a luoghi dovuta a movimenti gravitativi di notevole estensione ed, in alcuni casi, modellata dalle acque dilavanti che hanno determinato forme d'erosione di tipo calanchivo.

In generale, il territorio molisano appare dunque caratterizzato da versanti variamente inclinati ma dall'andamento estremamente dolce.

I principali elementi morfoevolutivi attivi sono dati dai numerosi fenomeni gravitativi attivi che, a seconda delle litologie affioranti, danno origine a movimenti franosi di vario tipo. Occorre precisare che oltre che per la natura variegata del territorio, spesso l'innescio di tali fenomeni è da attribuirsi all'azione erosiva delle acque ruscellanti.

se si escludono i fisiologici movimenti lenti dei suoli, i fenomeni gravitativi riscontrati, sia quiescenti che attivi, possono essere ascritti a poche tipologie:

- scorrimenti rotazionali;
- colate;
- movimenti misti. [4]

Dal punto di vista geopolitico il Contado del Molise in un primo tempo non si estendeva fino al mare. (Figura 3)

La prima tavola cartografica dove i confini molisani arrivano sino al Mare Adriatico risale al 1816.

L'intreccio tra viabilità e sviluppo economico, è caratterizzata nel territorio molisano, dalla presenza di una viabilità del tutto particolare: i Tratturi. Si tratta dei percorsi utilizzati nelle attività pastorizie per la transumanza. Il Molise è stato un territorio di passaggio, e l'economia è legata alla pastorizia ed alla transumanza con tutte le attività connesse [17].

Elemento di notevole importanza è lo sviluppo dei tratturi: infatti essi attraversano il Molise principalmente sull'asse Nord-Sud, con pochi collegamenti tra l'entroterra e la zona costiera (Figura 4).



Figura 3: il Contado di Molise nella cartografia di M. Cartaro, 1613

Le caratteristiche geomorfologiche diverse tra l'entroterra e la costa, l'appartenenza a regioni diverse fino agli inizi del XIX secolo, la mancanza collegamenti hanno comportato sviluppi socio-economici sostanzialmente diversi. Questi meccanismi hanno influenzato senza dubbio anche il patrimonio architettonico presente, favorito anche dalla presenza dei medesimi materiali da costruzione per le similitudini di carattere geologico [15], [16].

Al giorno d'oggi una sorta di separazione è rimasta. Si consideri che la viabilità moderna si è sviluppata quasi integralmente sui tracciati dei tratturi. L'unica via di interesse nazionale che collega l'entroterra e la costa è costituita dalla Strada Statale 647 "Fondovalle del Biferno". Una seconda dorsale è rappresentata dalla Strada Statale 650 "Fondovalle del Trigno" ma raggiunge la costa nel territorio abruzzese.

Nel secolo scorso la costa è stata oggetto della riforma fondiaria partita negli anni '20 con culmine negli anni '50, con bonifiche e sviluppo degli insediamenti rurali, che ha

portato all'espansione urbana dei centri costieri, anche a scopo turistico, con una sostanziale modifica del paesaggio che ha acquisito connotati moderni ed attuali [15].

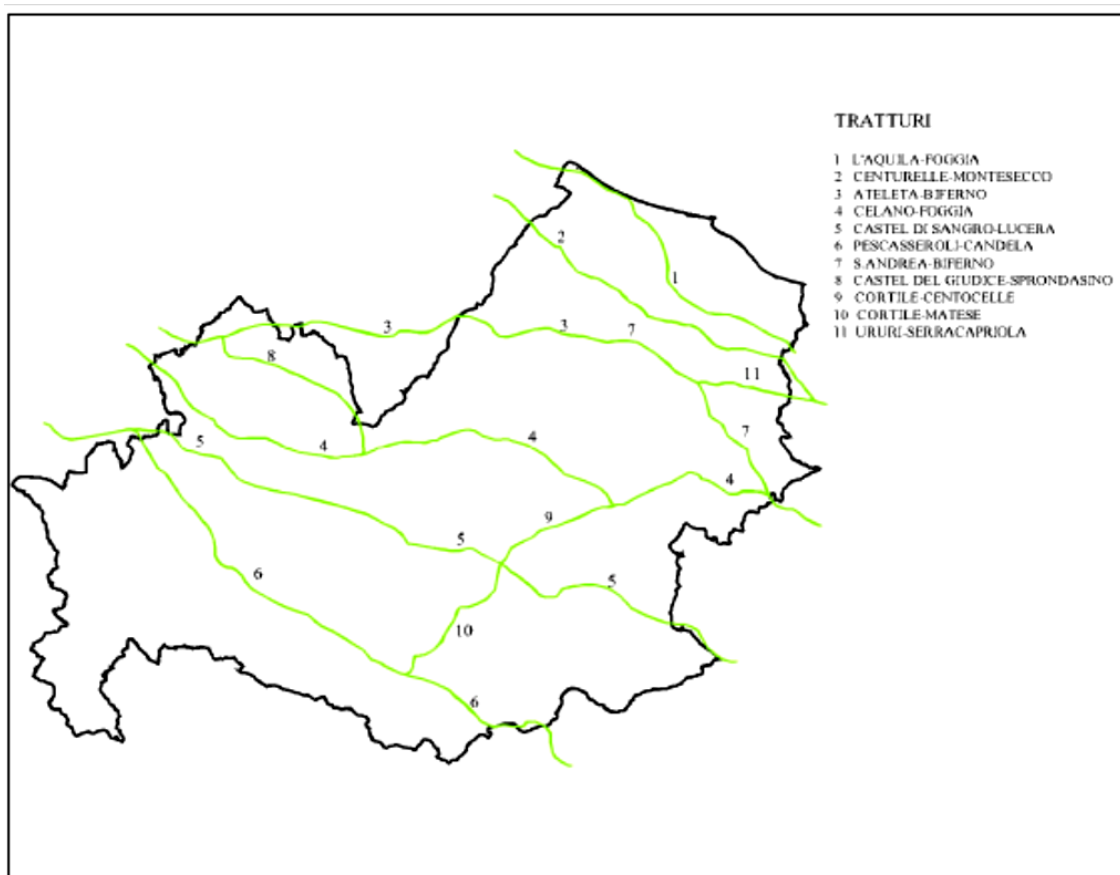


Figura 4: La Rete dei Tratturi che attraversano il Molise

Nello stesso periodo l'entroterra a causa dei fenomeni emigratori, verso la costa, ma ancor di più fuori regione ed all'estero per le ben note motivazioni di carattere economico hanno portato alla diminuzione progressiva della popolazione dei piccoli centri rurali e montani dell'Alto Molise e del Molise Centrale, con qualche eccezione (i Capoluoghi e qualche altro centro). Queste condizioni hanno spesso preservato, o perlomeno non del tutto stravolto alcuni paesaggi. In modo particolare l'attenzione del presente lavoro è focalizzato sui centri urbani fortemente caratterizzati dalla presenza di elementi architettonici storico - monumentali che saranno oggetto di studio nei capitoli successivi (Figure 5, 6, 7, 8) [15], [16].



Figura 5: Vinchiaturò (CB): Vista con la Chiesa, il Campanile ed il Palazzo signorile (foto dal sito www.turismo.provincia.campobasso.it)



Figura 6: Civitacampomariano (CB) : Vista del Castello angioino (foto dal sito www.viaggiomolise.it)



Figura 7: Ripalimosani (CB) (foto dal sito www.ecodelsangro.it)



Figura 8: Oratino (CB): Vista aerea del Borgo con il Palazzo Ducale (foto dal sito www.borghitalia.it)

3.2 *Le tipologie murarie molisane*

L'aspetto costruttivo di interesse maggiore nella verifica sismica a scala territoriale è costituito dalla tipologia muraria che influisce in modo proporzionale sull'indice di sicurezza attraverso la propria resistenza meccanica.

Come già osservato le caratteristiche meccaniche della muratura storica è possibile determinarla solo con prove distruttive. Le norme, a partire dall'OPCM 3274 del 2003 [5], emanata a seguito del sisma del 31 ottobre 2002 che interessò proprio il territorio molisano, consentono di stabilire le caratteristiche meccaniche attraverso la classificazione. A partire da questa considerazione, la Struttura del Commissario Delegato per le attività post sisma, con la collaborazione del Consiglio Nazionale delle Ricerche - Istituto per la Tecnologia delle Costruzioni dell'Aquila e dell'Università di Genova, ha svolto un lavoro di catalogazione delle tipologie murarie molisane [18].

Il materiale, oltre a quello fornito al momento dai rilievi di censimento del danno negli edifici monumentali, proviene da diversi progetti, anche precedenti al sisma, la maggior parte dei quali riguardanti edifici monumentali.

La Tabella 14 presenta i risultati statistici sulla presenza dei differenti parametri che caratterizzano la tipologia muraria.

In funzione dei rilievi è stata riscontrata una distribuzione geografica dei materiali costitutivi che ha permesso di individuare sul territorio tre zone, ognuna delle quali caratterizzata da una prevalente tipologia di muratura:

- **zona A** (provincia di Isernia e Molise Centrale): murature in pietrame costituito da conci sbozzati o squadriati.
- **zona B** (in prossimità della costa - Larino e dintorni): murature in pietrame con una percentuale elevata di mattoni pieni; di solito le strutture verticali sono in pietra e/o pietra e mattoni e le strutture orizzontali (volte) in mattoni pieni o cavi;
- **zona C** (comuni della costa): murature ed orizzontamenti in mattoni di argilla pieni o cavi.

Le zone sono riportate nella cartina tematica (Figura 9)

Elementi costitutivi - Materiale		Tessitura dei paramenti – Posa degli elementi	
Arenaria	31.7%	Casuale	19.9%
Calcere	56.2%	A lisca di pesce	0.9%
Mattoni cotti	6.5%	Orizzontale - verticale	12.7%
Altro	2.2%	Orizzontale	61.2%
Non compilato	3.4%	Non compilato	5.3%
Elementi costitutivi – Lavorazione		Tessitura dei paramenti – Ricorsi o listatura	
Assente (ciottoli)	4.7%	Assenti	81.1%
Sbozzatura	59.3%	In mattoni	5.6%
A spigoli finiti	14.6%	Altro	6.2%
A conci squadrati	16.5%	Non compilato	7.1%
Non compilato	5.0%	Tessitura dei paramenti – Zeppe e scaglie	
Malta – Tipo		Assenti	35.1%
Di calce aerea	77.6%	In pietra	52.5%
Di calce idraulica	10.9%	In cotto	3.7%
Cementizia	6.2%	Non compilato	8.7%
Non compilato	5.3%	Sezione trasversale – Tipologia	
Malta – Stato di conservazione e consistenza		Paramento unico	13.4%
Incoerente	41.3%	Due paramenti accostati	36.0%
Friabile	21.1%	Due paramenti ammorsati	19.3%
Tenace	32.0%	A nucleo interno (sacco) incoerente	7.5%
Non compilato	5.6%	A nucleo interno (sacco) coerente	2.8%
Tessitura dei paramenti – Apparecchiatura		Paramento aggiunto	0.3%
Disordinata	16.5%	Non compilato	20.8%
Corsi irregolari	25.5%	Sezione trasversale – Diatoni	
Corsi orizzontali	52.8%	Presenti	14.3%
Non compilato	5.3%	Assenti	48.8%
		Non compilato	36.3%

Tabella 14: Tabella 3.3 del Volume “Sisma 2002 – dall’emergenza alla ricostruzione – Edifici in muratura”

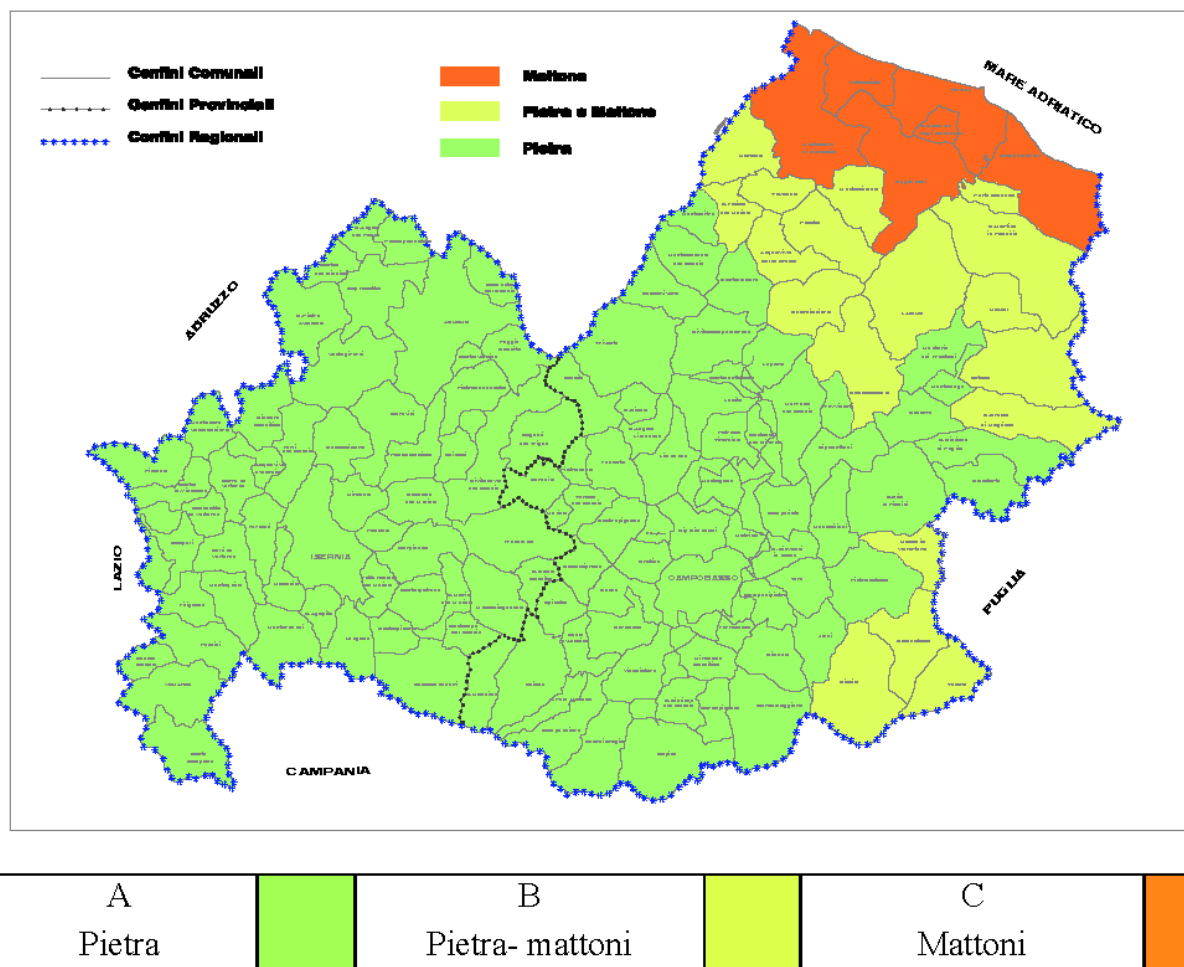


Figura 9: Macro domini delle tipologie murarie (tratto dal Volume “Sisma 2002 – dall’emergenza alla ricostruzione – Edifici in muratura)

La distribuzione sul territorio regionale delle differenti tipologie murarie è stata verificata ed approfondita attraverso la localizzazione delle cave locali e delle fornaci nel caso di laterizi.

Infine l’analisi di dettaglio è stata finalizzata alla stima dei parametri meccanici della muratura. Alcune murature è stato possibile attribuirle alle tipologie predisposte dalla norma.

Per le altre murature sono state proposte delle sottoclassi delle tipologie riportate nella OPCM 3274 (Tabella 15).

A - Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)
A1 - Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari) a paramento unico
A2 - Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari) a sacco
A3 - Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari) con zeppe o scaglie.
B - Muratura a conci sbozzati
B1 - Muratura a conci sbozzati con nucleo interno
B2 - Muratura a conci sbozzati a paramento unico o a due paramenti ammorsati
C - Muratura in pietra a spacco con buona tessitura
C1 - Muratura in pietra a spacco con buona tessitura e presenza di ricorsi o listature
C2 - Muratura in pietra a spacco con buona tessitura e presenza di zeppe o scaglie
C3 - Muratura in pietra a spacco con buona tessitura a paramento unico o a due paramenti ammorsati.
E - Muratura a blocchi lapidei squadriati
E1 - Muratura a blocchi lapidei squadriati e malta di buona qualità.
E2 - Muratura a blocchi lapidei squadriati a paramento unico o a due paramenti ammorsati
E3 - Muratura a blocchi lapidei squadriati a due paramenti con nucleo interno
F - Muratura in mattoni pieni e malta di calce
F1 - Muratura in mattoni pieni e malta di calce di buona qualità
F2 - Muratura in mattoni pieni e malta di calce a paramento unico o a due paramenti ammorsati.

Tabella 15: Tipologie murarie proposte per la Regione Molise (tratto dal Volume “Sisma 2002 – dall’emergenza alla ricostruzione – Edifici in muratura”)

Le caratteristiche meccaniche relative alle tipologie individuate ed alle sottoclassi sono ottenute partendo dagli intervalli proposti dall’Ordinanza 3274/03 ss. mm. nella Tabella 11.D.1 attraverso un nuovo utilizzo dei valori riportati nella Tabella 11.D.2. nulla è cambiato con l’introduzione delle NTC 2008 che riporta la stessa identica classificazione, anche se sono cambiati alcuni valori delle caratteristiche.

3.3 La localizzazione dei casi studio

Per i campanili elencati di seguito è stata svolta una campagna di identificazione dinamica, a seguito di una convenzione stipulata tra la Curia Vescovile di Termoli ed il Laboratorio di Dinamica Strutturale e Geotecnica “StreGa” dell’Università degli Studi del Molise:

1. Campanile della Chiesa di S. Maria delle Rose in Bonefro (CB);
2. Campanile della Chiesa di S. Alfonso dei Liguori in Colletorto (CB);

-
3. Campanile della Chiesa di S. Maria della Pietà in Larino (CB);
 4. Campanile della Cattedrale di S. Pardo in Larino (CB);
 5. Campanile della Chiesa di S. Maria ad Nives in Montelongo (CB);
 6. Campanile della Chiesa di S. Maria Assunta in Montorio nei Frentani (CB);
 7. Campanile della Chiesa di S. Maria Maggiore in Morrone del Sannio (CB);
 8. Campanile della Chiesa di S. Maria Assunta in Provvidenti (CB);
 9. Campanile della Chiesa di S. Maria Assunta in Ripabottoni (CB);
 10. Campanile della Chiesa di S. Giacomo in Santa Croce di Magliana (CB).

Le operazioni rientrano nelle attività post sisma coordinate dalla Struttura del Delegato alla Ricostruzione post sisma. Le strutture sono localizzate infatti nelle zone interessate dall'evento sismico iniziato il 31 ottobre 2002. La zona presenta una pericolosità sismica in termini di accelerazione che varia da 0,175 a 0,225 g.

L'Università del Molise ha stipulato una Convenzione con la Soprintendenza ai Beni Architettonici e Paesaggistici che ha riguardato la valutazione del rischio sismico di cinque edifici, di seguito elencati:

1. Castello Di Capua - Gambatesa (CB);
2. Castello Pandone - Venafro (IS);
3. Convento Santa Maria delle Monache - Isernia;
4. Palazzo Japoce - Campobasso;
5. Palazzo Mazzarotta - Campobasso

Le verifiche sono state eseguite con il programma predisposto dal Ministero dei Beni Culturali, ed utilizzabile online previa autorizzazione all'accesso.

Il sottoscritto è stato accreditato come verificatore presso il SIVARS, ed insieme al gruppo di lavoro sono stati eseguiti i sopralluoghi, inseriti i dati richiesti ed effettuata la verifica sismica.

Contestualmente è stata prodotta una Relazione Generale contenente le notizie storiche indispensabili alla conoscenza del manufatto, così come richiesto dal paragrafo 4 delle Linee Guida [9], che portano in definitiva a stabilire il livello di Conoscenza e giustificare il Fattore di Confidenza utilizzati. Inoltre è stato rilevato il quadro fessurativo. Entrambi gli elaborati sono stati caricati nella scheda dell'immobile come documentazione integrativa.

Gli immobili sono dislocati sull'intero territorio dell'Alto Molise e ad eccezione di Gambatesa la cui pericolosità massima in termini di accelerazione è pari a 0,175 g, a Campobasso ed a Venafro si raggiunge 0,250 g ed a Isernia 0,275 g.

Altro edificio storico oggetto di studio è il Convitto Nazionale "Mario Pagano" di Campobasso, per il quale è stata effettuata una analisi di vulnerabilità sismica raggiungendo un livello di approfondimento LV3. La pericolosità in termini di accelerazione è pari a 0,230 g.

Nella Figura 10 viene riportata la dislocazione dei casi studio sulla mappa di pericolosità regionale, aggiornata nel 2006.

MAPPA DI PERICOLOSITA' SISMICA DEL TERRITORIO REGIONALE

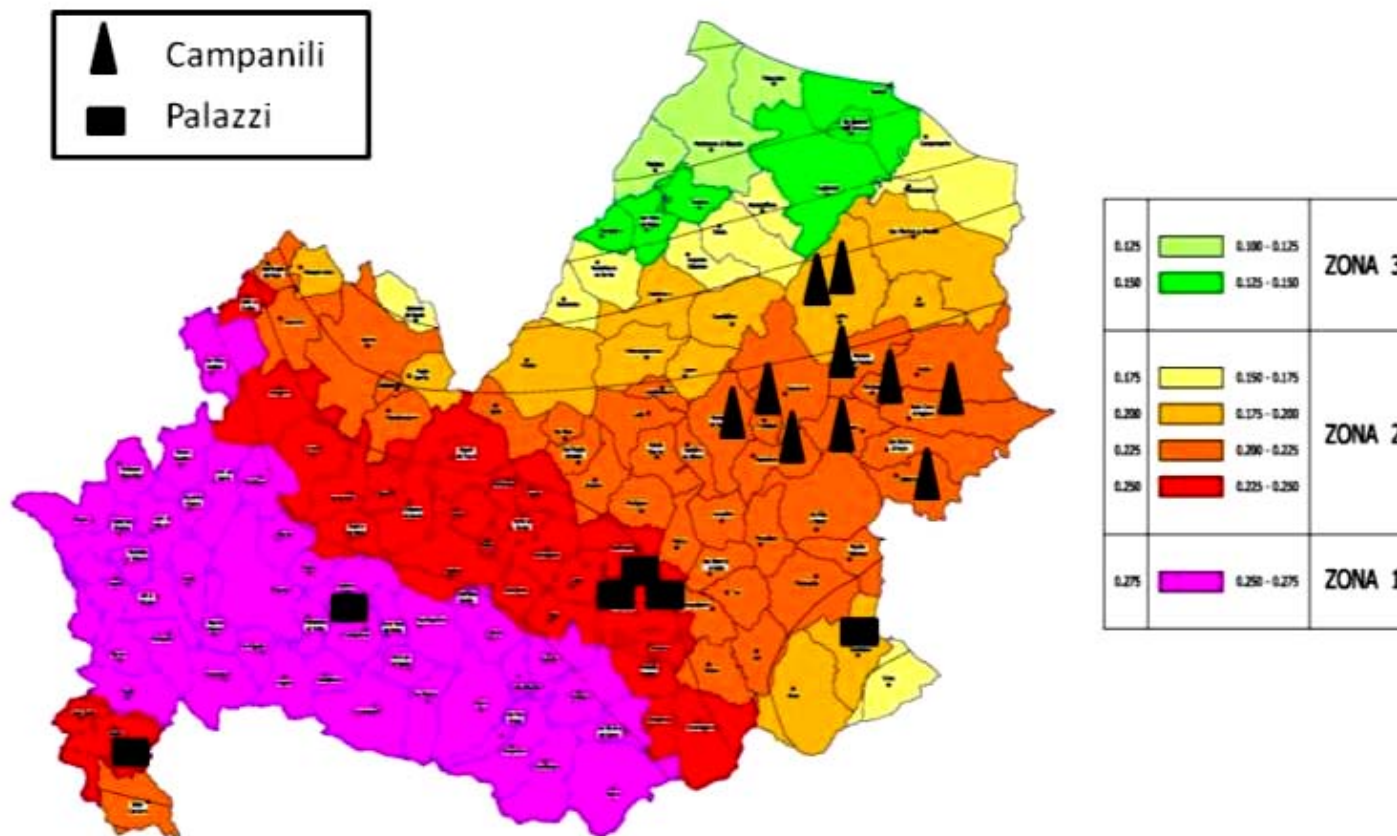


Figura 10: Localizzazione dei casi studio

4 Campanili

Nell'ambito della valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale tutelato, l'accelerazione di collasso alla fine è determinata in funzione del periodo proprio T_1 della struttura.

Specificamente per le strutture a torre, il periodo proprio può essere determinato:

- mediante analisi modale
- mediante modelli semplificati
- attraverso misure dinamiche.

Essendo le murature costituite da elementi lapidei naturali e malta, esse possono presentare caratteristiche meccaniche fortemente diversificate nell'ambito dell'edificio murario, sia per caratteristiche differenti dei singoli elementi che per differenti modalità di posa in opera. In particolar modo il comportamento sismico delle torri, è prevalentemente influenzato da:

- **La snellezza:** nel caso di campanili snelli (Figura 11) il comportamento a mensola è maggiormente rispettato, al contrario di strutture massicce (Figura 12);
- **L'ammorsamento delle pareti:** l'ammorsamento delle pareti di una struttura muraria a prevalente sviluppo verticale è funzionale a garantire che questa si comporti come una mensola incastrata alla base, con una rigidità associata all'intera sezione muraria (Figura 14). Un cattivo ammorsamento richiede lo studio di un insieme di pareti distinte;
- **Vincoli orizzontali:** La presenza di vincoli orizzontali a diverse quote può mutare profondamente il comportamento della struttura, da una parte limitandone l'effettiva snellezza, dall'altra costituendo irrigidimenti localizzati e punti di possibile concentrazione degli sforzi. Tali vincoli sono spesso diversi secondo le due direzioni principali nel piano orizzontale. Esempi di vincoli orizzontali sono l'inglobamento nella

struttura della chiesa per i campanili, nella cinta muraria nel caso delle torri. Altri elementi che influenzano il comportamento sono la presenza di orizzontamenti ben collegati, o la presenza di elementi spingenti, come alcune coperture oppure la presenza di volte.



Figura 11: Ripabottoni, chiesa di S. Maria Assunta: Campanile snello.



Figura 12: Bonifro, Chiesa di S. Maria delle Rose: Campanile tozzo



Figura 13: Ripabottoni, Chiesa di S.M. Assunta: Cella campanaria con ampie aperture



Figura 14: Morrone del Sannio, Chiesa di S.M. Maggiore: Muratura ben ammorsata, giunto tra campanile e chiesa

- **Elementi vulnerabili in sommità:** Le celle campanarie, dotate di ampie aperture, con conseguenti pilastri snelli e poco caricati, oppure la presenza di guglie, elementi poco resistenti o male ammortati alla struttura rappresentano elementi di vulnerabilità locale (Figura 13). Allo stesso modo la presenza di elementi di copertura pesanti e poco ammortati, ad esempio in cemento armato, come spesso è accaduto a seguito di interventi successivi alla costruzione, rappresentano elementi di vulnerabilità locale.

Per questo possiamo dire che ai fini di un adeguato intervento di miglioramento su edifici storici risulta di fondamentale importanza la conoscenza della costruzione, intesa sia come modifiche intercorse nel tempo dovute a fenomeni di danneggiamento per cause antropiche, invecchiamento di materiali ed eventi calamitosi, che come caratteristiche geometriche, costruttive e di proprietà dei materiali.

4.1 Campagna di prove per l'identificazione dinamica

Con il termine identificazione dinamica si comprendono tutte quelle tecniche sia analitiche che sperimentali, che consentono di individuare le caratteristiche dinamiche della struttura, frequenze proprie, modi di vibrazione e smorzamenti. Questa tecnica è stata utilizzata per la prima volta in ambito aeronautico, con lo scopo di studiare il comportamento degli aerei sotto l'azione dei carichi dinamici. Successivamente è stata applicata al campo della meccanica, della robotica, ed in fine nell'ambito delle costruzioni civili, che sta vivendo una fase di forte sperimentazione [19], [20]. Applicata al campo delle costruzioni, permette di definire il comportamento dinamico delle strutture, che dipende dalle masse, dalle rigidità e dagli smorzamenti, dal grado di vincolo, ovvero da caratteristiche intrinseche della struttura stessa.

Quindi se non intervengono fattori che modificano tali caratteristiche della costruzione, il comportamento rimane inalterato, viceversa quando un edificio si trova in condizioni di danno variano le sue caratteristiche in termini di frequenze, forme modali e smorzamenti.

L'identificazione dinamica è stata effettuata mediante procedure Operational Modal Analysis (OMA). In questo tipo di analisi l'eccitazione della struttura è provocata da cause naturali quali il vento, il traffico o altro, come dal suono delle campane nel caso dei campanili. Nelle vibrazioni ambientali, quindi, la causa eccitatrice non può essere modificata a seconda dello scopo della prova ed, inoltre, in molti casi, la forzante è incognita [19], [20].

Il rumore ambientale, definito come il complesso di vibrazioni indotte dalle attività antropiche (traffico veicolare, attività produttive, ecc.), ed azioni ambientali (vento, microtremori, ecc.) può essere adeguatamente rappresentato come un rumore bianco. Esso rappresenta un tipo di eccitazione che, seppur di energia limitata, possiede la caratteristica di essere ad ampio spettro, per tale caratteristica si presta bene ad essere utilizzato come sorgente di eccitazione per le strutture da identificare, dal momento che esso andrà ad eccitare tutte le frequenze più importanti.

Sulle singole torri è stato effettuato uno studio ad ampio raggio, così come previsto dalle Linee Guida, riguardante:

- l'analisi storica dell'edificio;
- la descrizione della struttura;
- rilievo geometrico;
- l'esecuzione delle misure;
- l'elaborazione dei dati.

Nei paragrafi seguenti vengono riportati in breve i risultati dello studio di cui sopra per ogni campanile.

4.1.1 *Il campanile della Chiesa di S. Maria delle Rose in Bonefro*

Nella antica Terra di Venifro (Bonefro), fin dal XIII secolo esiste la Chiesa Madre di S. Maria delle Rose (Figura 15). L'edificio ha subito nel tempo molti rifacimenti che hanno mascherato il disegno originario: tuttavia sono ancora visibili alcuni elementi risalenti al periodo di costruzione. In particolare la parte della fabbrica prospiciente il vallone Varco presenta le caratteristiche dello stile romanico, anche nella mole del campanile.

Nel tempo la Chiesa ha subito diverse riparazioni e opere di restauro. Nel 1847 si è dovuto riparare il muro di prospetto crollante e la copertura.

Gli ultimi importanti lavori di riparazione sono stati eseguiti tra il 1960 e il 1966. Alla fine degli interventi, la Chiesa è risultata modificata in più parti. Nel 1963 è stata abbattuta la guglia del campanile, resasi pericolante. Al suo posto è stata costruita una ringhiera, a protezione delle campane dell'orologio, che ha fatto riacquistare al campanile l'originario stile romanico.

Si è scoperto inoltre che i pilastri sono costruiti in pietra scalpellata, a base quadrata. Essi furono ringrossati nei due lati verso le navate, forse per rinforzare la fabbrica, quando Mons. Tria fece innalzare la Chiesa di dodici palmi (più di tre metri).

La Chiesa è a pianta quasi quadrata: la navata centrale è lunga 22 m e larga 8 m. Entrambe le navate laterali sono lunghe 17 m e larghe 7 m.

La torre campanaria, realizzata come struttura isolata, dopo gli interventi del Tria risulta inglobata nella pianta della chiesa e condivide con l'edificio una parete muraria. Si articola in quattro ordini. La pianta è pseudo quadrata, con dimensioni esterne di 5.85 x 5.85 m, interne di 2.85 x 2.85 m per una altezza di circa 16.00 m dal piano di calpestio dell'aula. L'altezza massima, misurata dalla base del campanile è di 24.30 m.

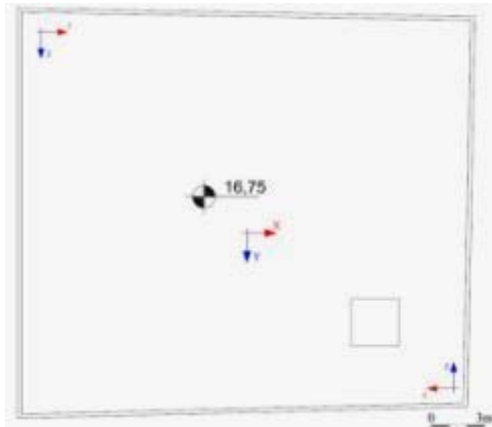
L'edificio è interamente in muratura a faccia a vista. Gli elementi lapidei sono conci sbozzati, l'apparecchiatura è a corsi irregolari e la posa casuale. Le listature sono assenti, zeppe e scaglie sono presenti. Il modulo elastico normale stimato è pari a: $E = 1230 \text{ N/mm}^2$ (Figura 16).



Figura 15: Il campanile della Chiesa di S. Maria delle Rose in Bonefro.



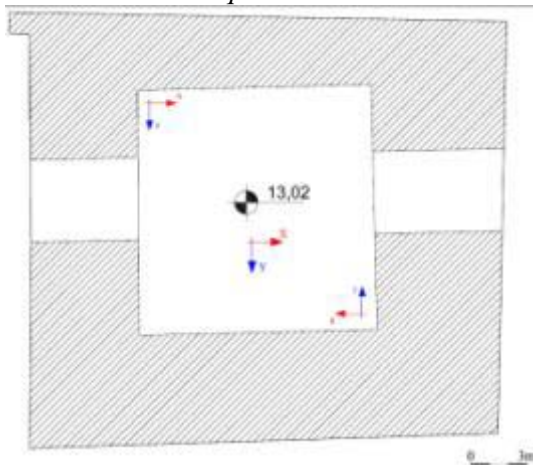
Figura 16: Campanile della Chiesa di S. Maria delle Rose in Bonefro: particolare della muratura



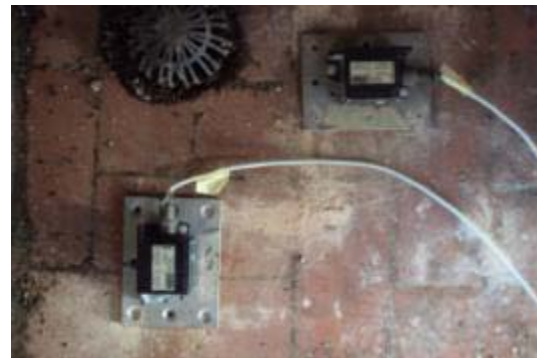
Pianta quota +16.75



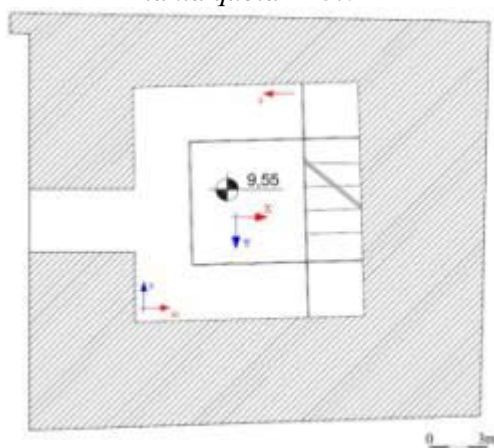
Sensori 3, 4



Pianta quota +13.02



Sensori 7, 8



Pianta quota +9.55



Sensori 9,10

Figura 17: Campanile della Chiesa di S. Maria delle Rose in Bonefro: Pianta del campanile con la disposizione dei sensori e relative foto

Per l'identificazione delle proprietà dinamiche del campanile si è proceduto all'installazione di n.11 accelerometri del tipo Force Balance EpiSensor ES-U2 in maniera

distribuita sulla struttura, dal sistema di acquisizione TrioGuard32 e da un Notebook, in modo da ottenere le caratteristiche in termini di frequenze naturali e una buona definizione spaziale per quanto riguarda le forme modali del sistema strutturale [22] (Figura 17).

L'elaborazione dei dati di prova effettuata ha consentito l'identificazione dei primi cinque modi della struttura (Tabella 16 e Figura 18).

Modo	Tipo	Frequenza naturale [Hz]	Rapporto di smorzamento [%]
I	Prev. Traslazionale y	2.96	0.8
II	Prev. Traslazionale x	3.52	1.1
III	Torsionale	6.04	1.5
IV	Torsionale	6.96	1.4
V	Prev. Traslazionale y	8.44	1.3

Tabella 16: Campanile della Chiesa di S. Maria delle Rose in Bonefro: Frequenze e forme modali dei primi cinque modi di vibrazione

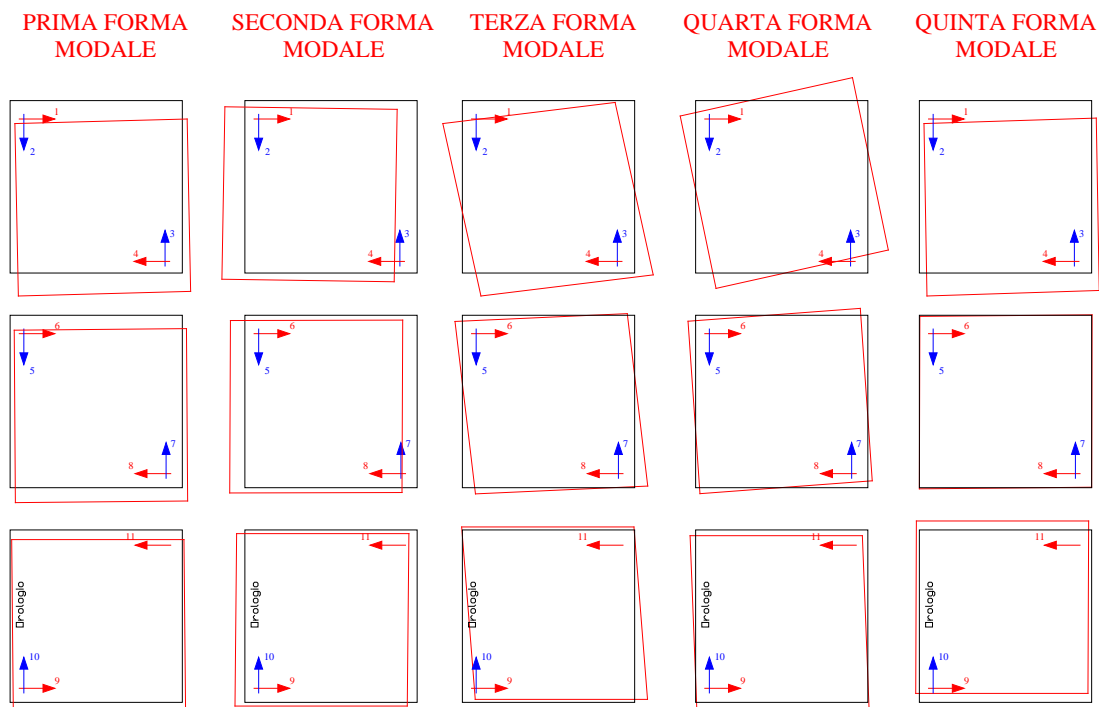


Figura 18: Campanile della Chiesa di S. Maria delle Rose in Bonefro: Rappresentazione grafica delle forme modali identificate

4.1.2 *Il campanile della Chiesa di S. Maria delle Rose in Montorio nei Frentani.*

Dalla documentazione raccolta e dalle indagini esperite in luogo è emerso che nel 1720, il 17 ottobre è stato stipulato il contratto e dato incarico per la costruzione del campanile attuale (Figura 19); nello stesso atto viene pattuito il prezzo e stabilite forma e dimensioni dell'opera da realizzare. In seguito alla visita Pastorale di S.E. mons. Tria, che trova la chiesa in un pessimo stato di conservazione ed in condizioni statiche alquanto precarie, sentite le opinioni di più periti ed esperti fabbricatori dell'epoca, ne decretò l'abbattimento e quindi la riedificazione. Il 9 maggio del 1730 viene stipulato il contratto per la realizzazione della nuova Chiesa Madre. Nel 1731 fu posta la prima pietra per la costruzione della nuova chiesa "riuscita una delle più belle della Diocesi". I lavori terminarono nel 1738.

Nel 2002 la chiesa viene danneggiata dal terremoto del 31 ottobre e l'anno successivo viene fatto un primo intervento di messa in sicurezza con la posa in opera di catene alla navata centrale e interventi di cucitura sulla parte alta della parete posteriore.

Notizie di interventi di manutenzione straordinaria sul campanile:

- 1950-60: rinzafo facciata principale e campanile, riparazione sperone di sostegno, riparazione tetto;
- 1977: un fulmine colpisce la cupola del campanile (in laterizio pieno) provocando un buco di notevoli dimensioni, qualche mese dopo per motivi di incolumità pubblica, viene abbattuta e ricostruita nel 1983, in cemento armato;

La chiesa attuale, avente dimensioni in pianta di 27.30 m e 16.38 m, è costituita da tre navate con volte a crociera e separate da tre colonne in muratura delle dimensioni 0.8 m x 1.6 m. L'angolo sinistro della chiesa sembra inglobare il campanile. La pianta del campanile alla base è quadrata, di dimensioni esterne 6.15 m, interne 3,40 x 3,43 m. In corrispondenza della prima cella campanaria a quota 18.15 m, presenta lato di 5.50 m; alla quota di 21.95 m, in corrispondenza della seconda cella campanaria, si presenta in

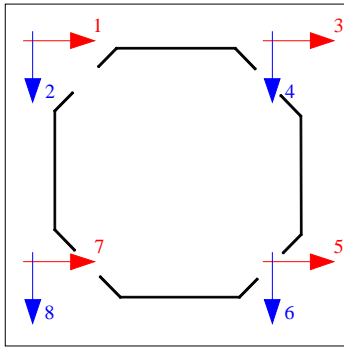
pianta ottagonale inscrivibile in un cerchio di raggio 3.00 m. L'altezza complessiva è di 25.85 m.

Il campanile, essendo stato realizzato in periodo antecedente la costruzione della chiesa, non risulta adeguatamente ammortato, per questo sono state rilevate lesioni lungo i lati di giunzione.



Figura 19: Campanile della Chiesa di S. Maria delle Rose in Montorio nei Frentani e a destra particolare della muratura

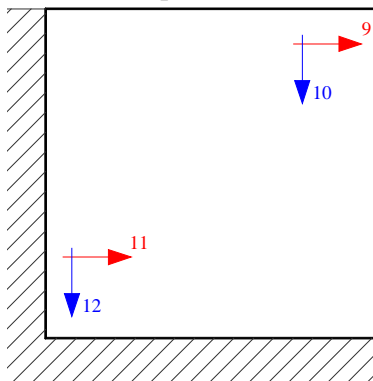
Gli elementi lapidei sono conci sbozzati, l'apparecchiatura è a corsi irregolari e la posa casuale. Le listature sono assenti, zeppe e scaglie sono presenti. Il modulo elastico normale stimato è pari a: $E = 1230 \text{ N/mm}^2$ (Figura 19).



Pianta quota +18,15



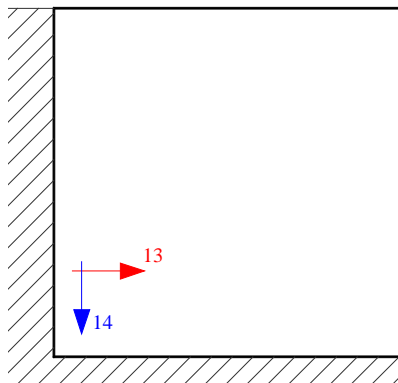
Sensori 7, 8



Pianta quota +11,75



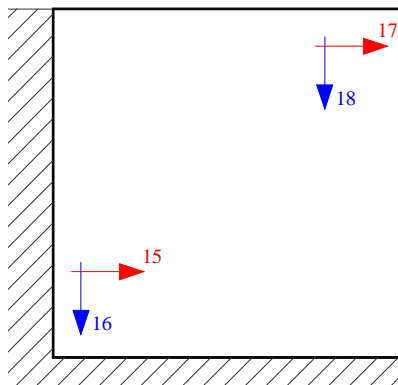
Sensori 11, 12



Pianta quota +9,40



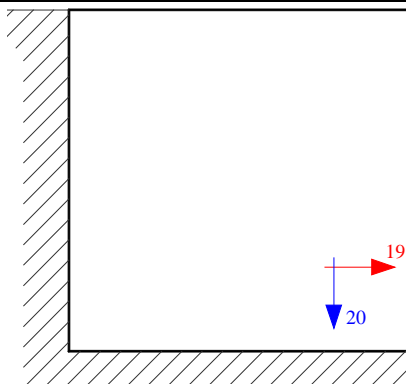
Sensori 13, 14



Pianta quota +7,60



Sensori 17, 18



Pianta quota +5,40



Sensori 19, 20

Figura 20: Campanile della Chiesa di S. Maria delle Rose in Montorio nei Frentani: Pianta con la disposizione dei sensori e relative foto

Per il caso in esame, la catena di misura utilizzata è rappresentata da n. 20 accelerometri del tipo Force Balance EpiSensor ES-U2 alla frequenza di campionamento di 100 Hz, dal sistema di acquisizione TrioGuard32 e da un Notebook per il controllo del sistema [21], [22] (Figura 20).

L'elaborazione dei dati di prova ha consentito l'identificazione dei primi sei modi della struttura (Tabella 17 e Figura 21).

Modo	Tipo	Frequenza naturale [Hz]	Rapporto di smorzamento [%]
I	Traslazionale x	2.74	1.6
II	Traslazionale y	3.43	1.2
III	Locale Diagonale (ultimi 2 livelli)	3.80	1.4
IV	Traslazionale x	6.02	1.6
V	Torsionale	7.39	1.7
VI	Traslazionale x - torsionale	7.70	1.3

Tabella 17: Campanile della Chiesa di S. Maria delle Rose in Montorio nei Frentani: Frequenze e forme modali dei primi sei modi di vibrazione

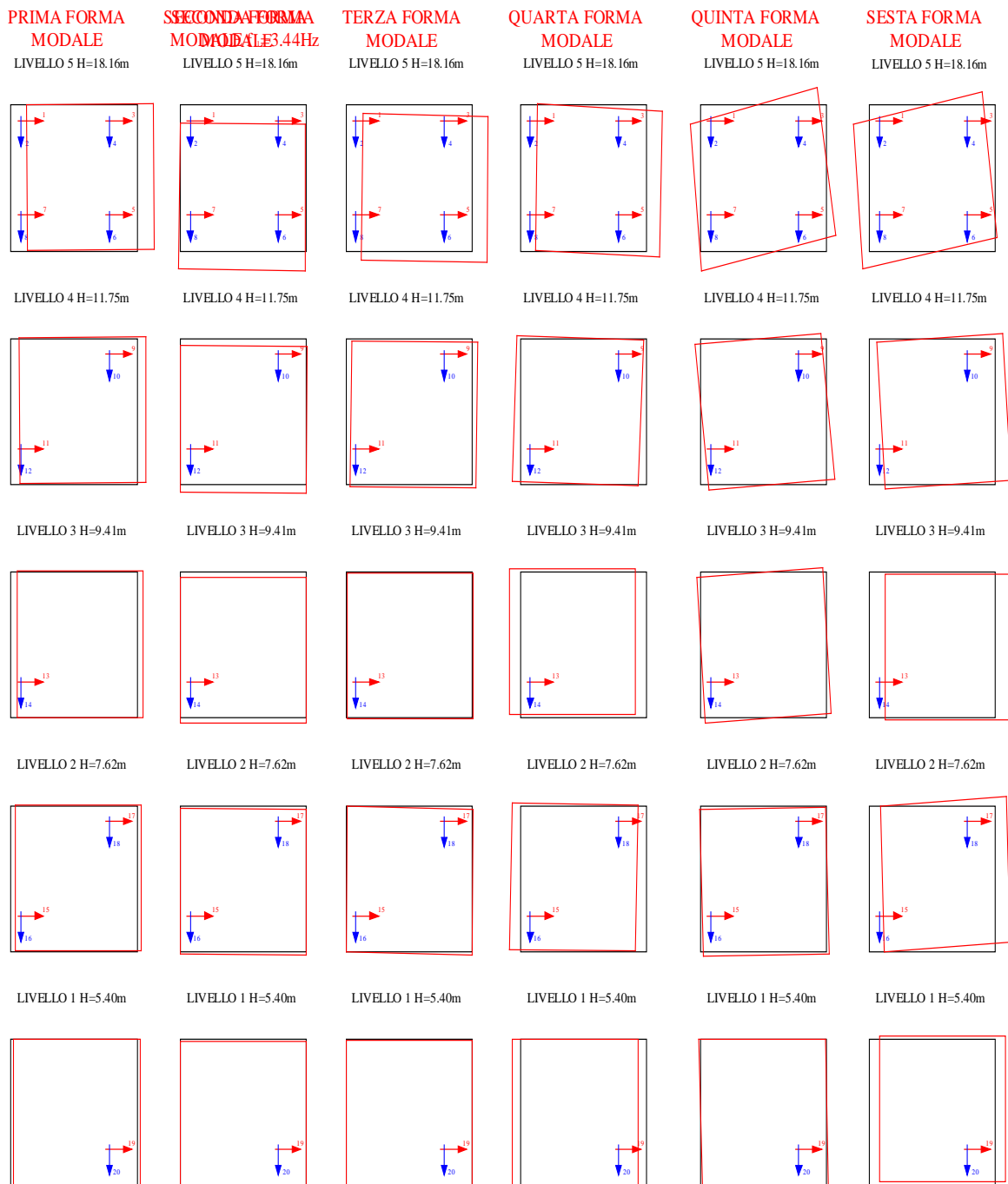


Figura 21: Campanile della Chiesa di S. Maria delle Rose in Montorio nei Frentani: Rappresentazione grafica delle forme modali identificate.

4.1.3 Il campanile della Chiesa di S. Maria Assunta in Ripabottoni

La chiesa di Santa Maria Assunta in Ripabottoni (Figura 22), situata nella parte più antica del centro urbano risale al XVIII sec. L'edificio fu costruito sul sito dell'antica chiesa ormai in rovina di San Rocco, ad un'unica navata contenente tre altari, e di alcuni edifici vicini demoliti per l'occasione.

Il Vescovo di Larino, Mons. Tria, ritenne necessario costruire una nuova chiesa madre in quanto l'antica chiesa, a due navate, dedicata a Santa Maria Maggiore, situata nella zona detta Terra Vecchia, era fatiscente e per giunta appariva insufficiente alle esigenze dell'accresciuta popolazione.

La costruzione del nuovo edificio ebbe inizio con la posa in opera della prima pietra il 6 maggio 1731. Il progetto è del pittore e scenografo napoletano Ferdinando Sanfelice, massimo esponente dell'architettura napoletana del suo tempo.

I lavori si conclusero nel 1774, anno di consacrazione, ad esclusione del campanile che a questa data era ancora in fase di realizzazione ed è terminato nel XIX secolo.

Nel 1926 la chiesa è stata dichiarata monumento nazionale, quale modello significativo del barocco molisano.

Nel 2002 la chiesa viene danneggiata dal terremoto del 31 ottobre e l'anno successivo viene fatto un primo intervento di messa in sicurezza con la posa in opera di catene alla navata centrale e interventi di cucitura sulla parte alta della parete posteriore.

Nel 1972 (data riportata sulla capriata in copertura), in seguito ad un evento sismico, l'edificio di culto fu oggetto di lavori di consolidamento che interessarono le strutture orizzontali mediante l'incamiciamento delle volte tramite la realizzazione all'estradosso di solette in calcestruzzo armato e con la costruzione di un cordolo perimetrale.

Notizie di interventi di manutenzione straordinaria sul campanile:

- nel 1818, a seguito dei danni dovuti alla caduta di fulmini, fu ricostruita parte della cupola e parte del piano ottagonale;

- nel 1850 è attestato il crollo del terzo e del quarto ordine e della cuspide, poi ricostruiti.
- 1950-60: rinzafo facciata principale e campanile, riparazione sperone di sostegno, riparazione tetto;
- 1977: un fulmine colpisce la cupola del campanile (in laterizio pieno) provocando un buco di notevoli dimensioni, qualche mese dopo per motivi di incolumità pubblica, viene abbattuta e ricostruita nel 1983, in cemento armato;

Il campanile a pianta quadrangolare è posizionato sul lato sinistro della facciata e rispetto a questa rientrante di circa 100 cm. Una parte del corpo è inglobato nella muratura della navata laterale sinistra, infatti internamente la campata interessata non presenta rientranze tra i due pilastri murali poiché tale spessore è occupato dal volume del campanile. La struttura è formata da quattro ordini, sottolineati da un cornicione in pietra, più la cuspide a base ottagonale. Solamente il primo ordine è sicuramente coevo alla costruzione settecentesca, che come il secondo presenta conci in pietra lavorata sugli spigoli e muratura in bozze di pietra; il terzo ordine presenta quattro monofore, una per ogni lato, mentre nel quarto ordine a pianta ottagonale si aprono otto monofore.

Le dimensioni in pianta, esternamente sono di 4.95 x 5.20 m, internamente 2.45 x 2.75 m. L'altezza massima è pari a 27,90 m.

Gli elementi lapidei sono conci sbazzati, l'apparecchiatura è a corsi irregolari e la posa casuale. Le listature sono assenti, zeppe e scaglie sono presenti. Il modulo elastico normale stimato è pari a: $E = 1230 \text{ N/mm}^2$ (Figura 23).

Per l'identificazione delle proprietà dinamiche del campanile si è proceduto all'installazione di n. 16 accelerometri del tipo Force Balance EpiSensor ES-U2, dal sistema di acquisizione TrioGuard32 e da un Notebook per il controllo del sistema [21], [22] (Figura 24).

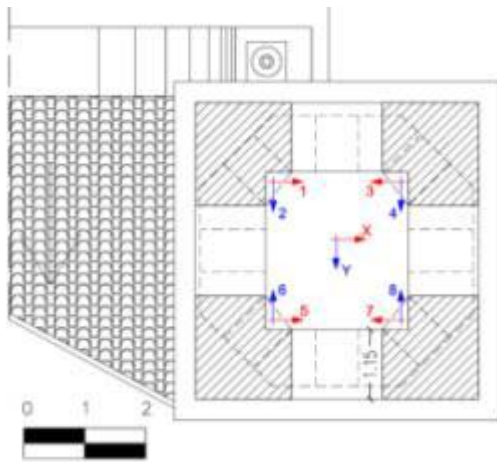
L'elaborazione dei dati della prova ha consentito l'identificazione dei primi quattro modi della struttura (Tabella 18 e Figura 25).



Figura 22: La Chiesa di S. Maria Assunta in Ripabottoni



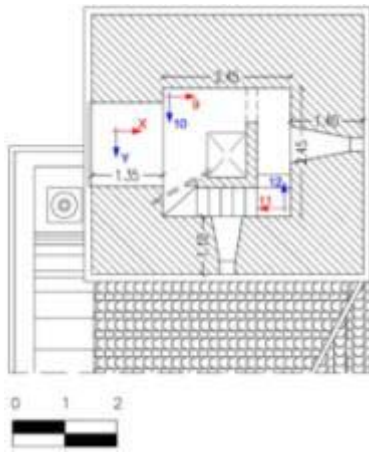
Figura 23: Campanile della Chiesa di S. Maria Assunta in Ripabottoni: particolare della muratura



Pianta Livello 3



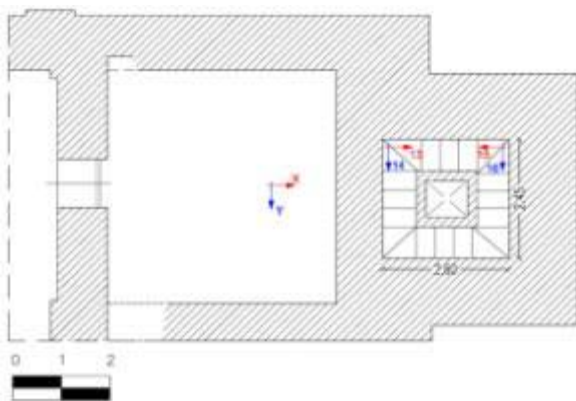
Sensori 3, 4



Pianta Livello 2



Sensori 9, 10



Pianta Livello 1



Sensori 15, 16

Figura 24: Campanile della Chiesa di S. Maria Assunta in Ripabottoni: Pianta con la disposizione dei sensori e relative foto

Modo	Tipo	Frequenza naturale [Hz]	Rapporto di smorzamento [%]
I	Prev. Trasl. x	2.27	1.1
II	Prev. Trasl. y	2.68	0.9
III	Prev. Trasl. x	3.37	0.9
IV	Torsionale	3.88	1.9

Tabella 18: Campanile della Chiesa di S. Maria Assunta in Ripabottoni: Frequenze e forme modali dei primi quattro modi di vibrazione

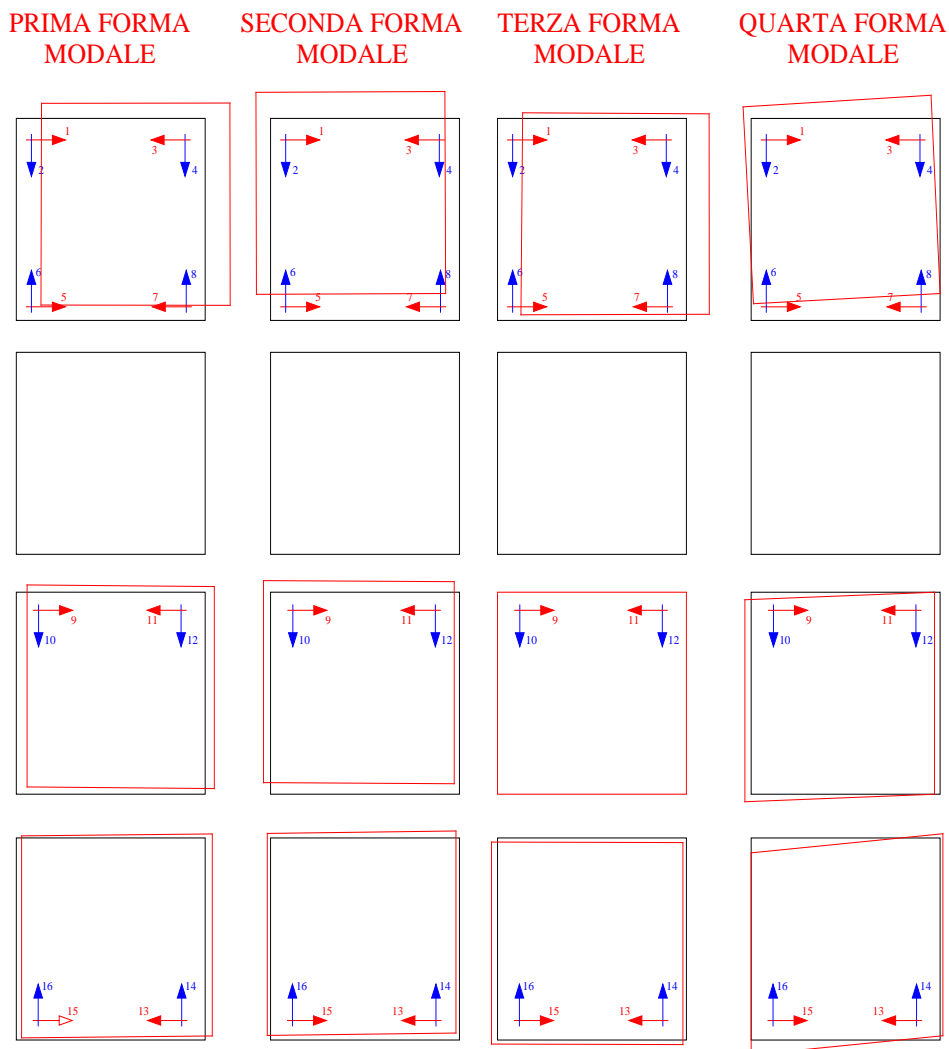


Figura 25: Campanile della Chiesa di S. Maria Assunta in Ripabottoni: Rappresentazione grafica delle forme modali identificate

4.1.4 *Il campanile della Chiesa di S. Maria Maggiore in Morrone del Sannio*

La prima costruzione risale all'anno 1200 circa, ma la configurazione attuale è dovuta ai lavori iniziati intorno al 1720. In quegli anni, un terremoto ha colpito il paese che si trova costretto a varare un progetto di riqualificazione urbanistica, che è proseguito fino agli anni del Fascismo.

La costruzione della chiesa nelle fattezze attuali ha origini curiose: un importante nobile della zona sognò la Vergine Maria che gli disse di edificare una chiesa in suo nome nel punto in cui sarebbe caduta la neve. Era il mese d'agosto, (La storia ricorda le origini della basilica romana di Santa Maria Maggiore), la neve cadde sulla preesistente chiesa duecentesca. Il nobile chiese udienza al Vescovo Tria, che decise di appoggiarlo nella costruzione della nuova chiesa. I lavori durarono dieci anni. Il 29.10.1730 la chiesa è stata consacrata con il nome di Santa Maria ad Nives, per ricordare le particolari circostanze che portarono alla sua costruzione. A testimonianza di tale evento è stata murata, all'interno della chiesa, nel primo pilastro a destra, una lapide.

Salendo la scalinata e percorrendo il ballatoio, si accede alla chiesa, suddivisa in tre navate d'ordine toscano, di cui quelle laterali risultano metà di quella maggiore. Le navate laterali sono dotate di tre cappelle ciascuna con i rispettivi altari.

La chiesa è anche provvista di un campanile di bella e solida costruzione, fabbricato con antichissime pietre quadre gravinate e presenta cinque campane, di cui quella maggiore è detta di S. Pardo. Le dimensioni esterne in pianta sono 6.47 x 7.15 m, internamente 3.80 x 3.90 m. l'altezza massima è pari a 35.00 m (Figura 26).

Gli elementi lapidei sono conci sbazzati, l'apparecchiatura è a corsi irregolari e la posa casuale. Le listature sono assenti, zeppe e scaglie sono presenti. Il modulo elastico normale stimato è pari a: $E = 1230 \text{ N/mm}^2$ (Figura 27).

Per l'identificazione delle proprietà dinamiche del campanile si è proceduto all'installazione di 10 accelerometri del tipo Force Balance EpiSensor ES-U2, in maniera distribuita sulla struttura [22] (Figura 28).

L'elaborazione dei dati di prova ha consentito l'identificazione dei primi tre modi della struttura (Tabella 19 e Figura 29).



Figura 26: Il Campanile della Chiesa di S. Maria Maggiore in Morrone del Sannio



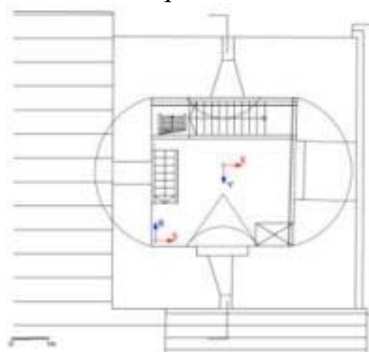
Figura 27: Campanile della Chiesa di S. Maria Maggiore in Morrone del Sannio: Particolare della muratura



Pianta quota +20.9



Sensori 3, 4



Pianta quota +15.5



Sensori 9, 10

Figura 28: Campanile della Chiesa di S. Maria Maggiore in Morrone del Sannio: Pianta con la disposizione dei sensori e relative foto

Modo	Tipo	Frequenza naturale [Hz]	Rapporto di smorzamento [%]
I	Prev. Traslazionale x	1.96	1.2
II	Prev. Traslazionale y	2.24	1.0
III	Torsionale	4.76	1.2

Tabella 19: Campanile della Chiesa di S. Maria Maggiore in Morrone del Sannio: Frequenze e forme modali dei primi tre modi di vibrazione

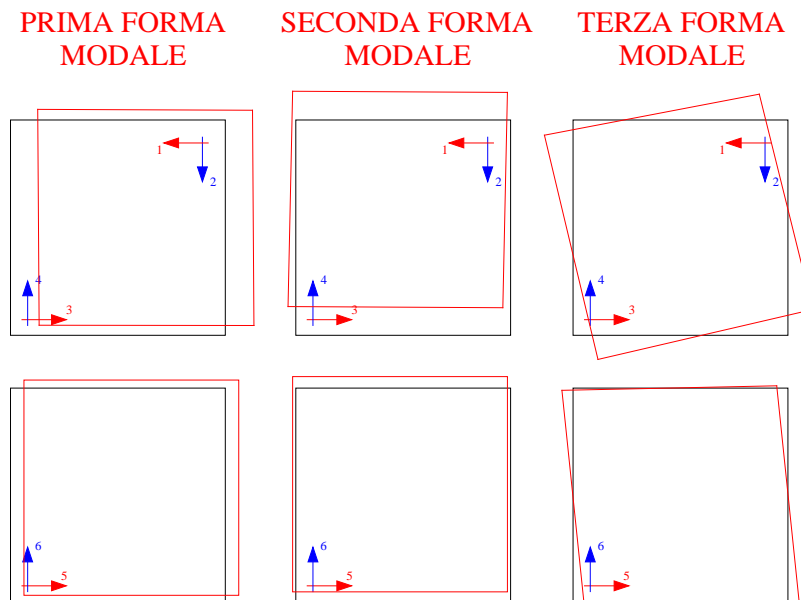


Figura 29: Campanile della Chiesa di S. Maria Maggiore in Morrone del Sannio: Rappresentazione grafica delle forme modali identificate

4.1.5 *Il campanile della Chiesa di S. Giacomo Apostolo in Santa Croce di Magliano*

La Chiesa di S. Giacomo Apostolo venne realizzata nel corso della prima metà del settecento. I lavori iniziano nel 1727. E' ad una sola "nave", perché una parte è occupata da un piccolo cimitero. In seguito sono stati eseguiti lavori di ampliamento, si presume nel periodo compreso tra il 1825 e il 1890. È documentato che alla data del 1890 la chiesa presentava senza dubbio la configurazione odierna. Nel 1850 secondo quanto riferisce il Masciotta, furono condotti *importanti restauri*, si suppone che questi lavori riguardassero la facciata poiché nel 1847 fu redatta una perizia per la sua ricostruzione in quanto minacciava di crollare.

Nel 1989 la Soprintendenza ha curato gli ultimi lavori di restauro estesi sia all'interno che all'esterno dell'edificio. A quell'epoca risale il consolidamento della lanterna ottagonale del campanile, nella parte sommitale, e il rivestimento in rame del pennacchio arabeggiante.

Il campanile, a base quadrangolare, è formato da cinque ordini. Alla struttura originaria settecentesca è possibile attribuire il primo ordine in quanto numerosi furono gli interventi anche di ricostruzione parziale che interessarono il manufatto. Ma l'intervento sostanziale si ebbe alla fine dell'ottocento che conferì al campanile la forma attuale, un' epigrafe datata 1875 murata esternamente ne ricorda l'avvenimento. I primi tre ordini sono sottolineati da una cornice di pietra sagomata a tondino che fungono in un certo qual modo da gocciolatoio, il quarto ordine rispetta il dorico, di sezione lievemente inferiore si presenta con quattro grandi monofore con architrave semicircolare in pietra, ai cui lati si trovano lesene fornite di alta base e di trabeazione con cornice a dentelli e fregio ornato nella scansione dettata dalle metope e da triglifi. Esisteva un quinto ordine, a pianta ottagonale, di sezione ancora minore rispetto alla precedente. Era forato da quattro monofore e fungeva da base alla cuspide del bulbo in rame. Il quinto ordine è crollato a seguito del sisma del 2002 (Figura 30).

Sono presenti inoltre catene trasversali sui lati come presidi antisismici. Presenta pianta quadrata di dimensioni esterne 4.87 m, interne di 2,05 x 2,10 m. L'altezza attuale è di 20.00 m.

Gli elementi lapidei sono conci sbazzati, l'apparecchiatura è a corsi irregolari e la posa casuale. Le listature sono assenti, zeppe e scaglie sono presenti. Il modulo elastico normale stimato è pari a: $E = 1230 \text{ N/mm}^2$.

È documentata la presenza di fondazioni continue in muratura.



Figura 30: Il Campanile della Chiesa di S. Giacomo Apostolo in Santa Croce di Magliano prima e dopo il crollo.

Per l'identificazione delle proprietà dinamiche del campanile si è proceduto all'installazione di 6 accelerometri del tipo Force Balance EpiSensor ES-U2, in sommità [22] (Figura 31).

L'elaborazione dei dati di prova ha consentito l'identificazione dei primi tre modi della struttura (Tabella 20 e Figura 32).

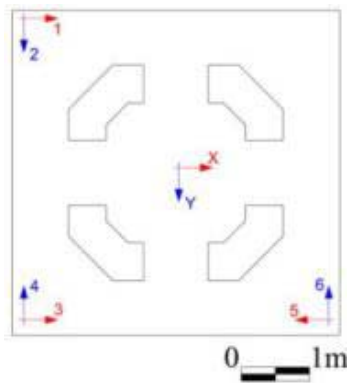


Figura 3.28 Pianta quota +19,75



Sensori 5, 6

Figura 31: Campanile della Chiesa di S. Giacomo Apostolo in Santa Croce di Magliano: Pianta con la disposizione dei sensori e relative foto

Modo	Tipo	Frequenza naturale [Hz]	Rapporto di smorzamento [%]
I	Prev. Traslazionale x	3.06	1.5
II	Prev. Traslazionale y	3.44	1.2
III	Traslazionale x	4.08	1.9

Tabella 20: Campanile della Chiesa di S. Giacomo Apostolo in Santa Croce di Magliano: Frequenze e forme modali dei primi tre modi di vibrazione

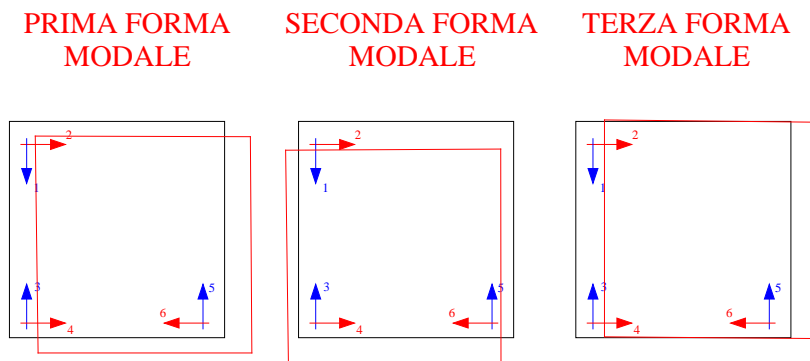


Figura 32: Campanile della Chiesa di S. Giacomo Apostolo in Santa Croce di Magliano: Rappresentazione grafica delle forme modali identificate

4.1.6 Campanile della Chiesa di S. Maria della Pietà in Larino

Al di fuori delle mura cittadine era situata la chiesa di Santa Maria della Pietà.

Nel corso dei secoli l'edificio sacro ha cambiato molto spesso denominazione: fonti autorevoli documentano che fino al 1564 in questo luogo sorgeva una chiesa dedicata a San Basilio Magno edificata nel XIV sec.

Nel 1663 l'edificio cambiò denominazione appellandosi Chiesa di Santa Maria della Pietà che, come ricorda Mons. Tria, le venne attribuito per la presenza di una statua in pietra raffigurante la Madonna della Pietà: infatti la statua, di cui parlano le "Cronache Cassinesi" è stata rinvenuta nelle soffitte della chiesa nel corso del XIX secolo e collocata nella facciata.

La chiesa è formata da una navata principale e due navate minori, entrambe suddivise in tre campate.

La torre campanaria addossata alla destra della facciata principale, si presenta di forma pressoché quadrata, con dimensioni esterne 4.89 m × 4.70 m, interne 1.90 × 2.07. L'altezza massima è di 14.89 m (Figura 33).

Gli elementi lapidei sono blocchi squadrati, l'apparecchiatura è a corsi orizzontali e la posa orizzontale/verticale. Le listature, come zeppe e scaglie sono assenti. Il modulo elastico normale stimato è pari a: $E = 2800 \text{ N/mm}^2$ (Figura 33).

Per l'identificazione delle proprietà dinamiche del campanile si è proceduto all'installazione di 16 accelerometri del tipo Force Balance EpiSensor ES-U2, in maniera distribuita sulla struttura [22] (Figura 34).

L'elaborazione dei dati di prova ha consentito l'identificazione dei primi sei modi della struttura (Tabella 21 e Figura 35).



Figura 33: Il Campanile della Chiesa di S. Maria della Pietà in Larino con la tipologia muraria in evidenza

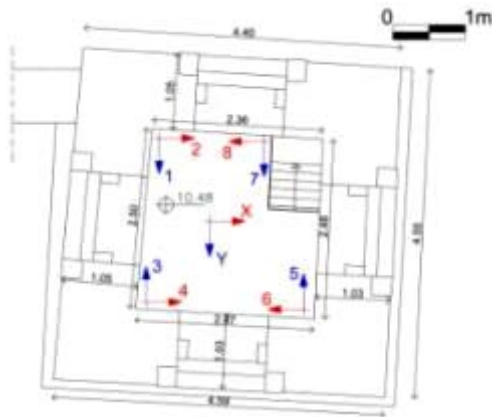


Figura 4.22a: Pianta quota +10,48



Sensori 5, 6

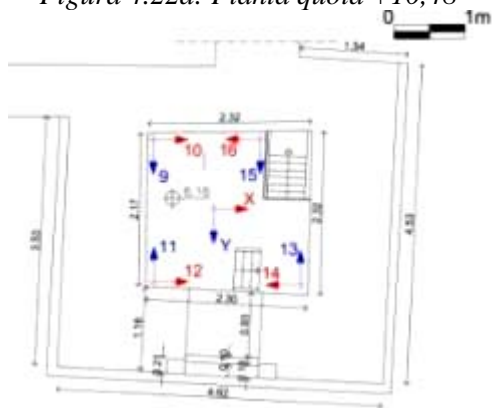


Figura 4.22b: Pianta quota +6,16



Sensori 9, 10

Figura 34: Campanile della Chiesa di S. Maria della Pietà in Larino: Piante con la disposizione dei sensori e relative foto

Modo	Tipo	Frequenza naturale [Hz]	Rapporto di smorzamento [%]
I	Prev. Trasl. x	3.61	2.7
II	Prev. Trasl. y	3.86	3.7
III	Diagonale	4.34	1.5
IV	Diagonale	4.75	1.8
V	Torsionale	7.77	2.2
VI	Torsionale	8.43	0.9

Tabella 21: Campanile della Chiesa di S. Maria della Pietà in Larino: Frequenze e forme modali dei primi sei modi di vibrazione

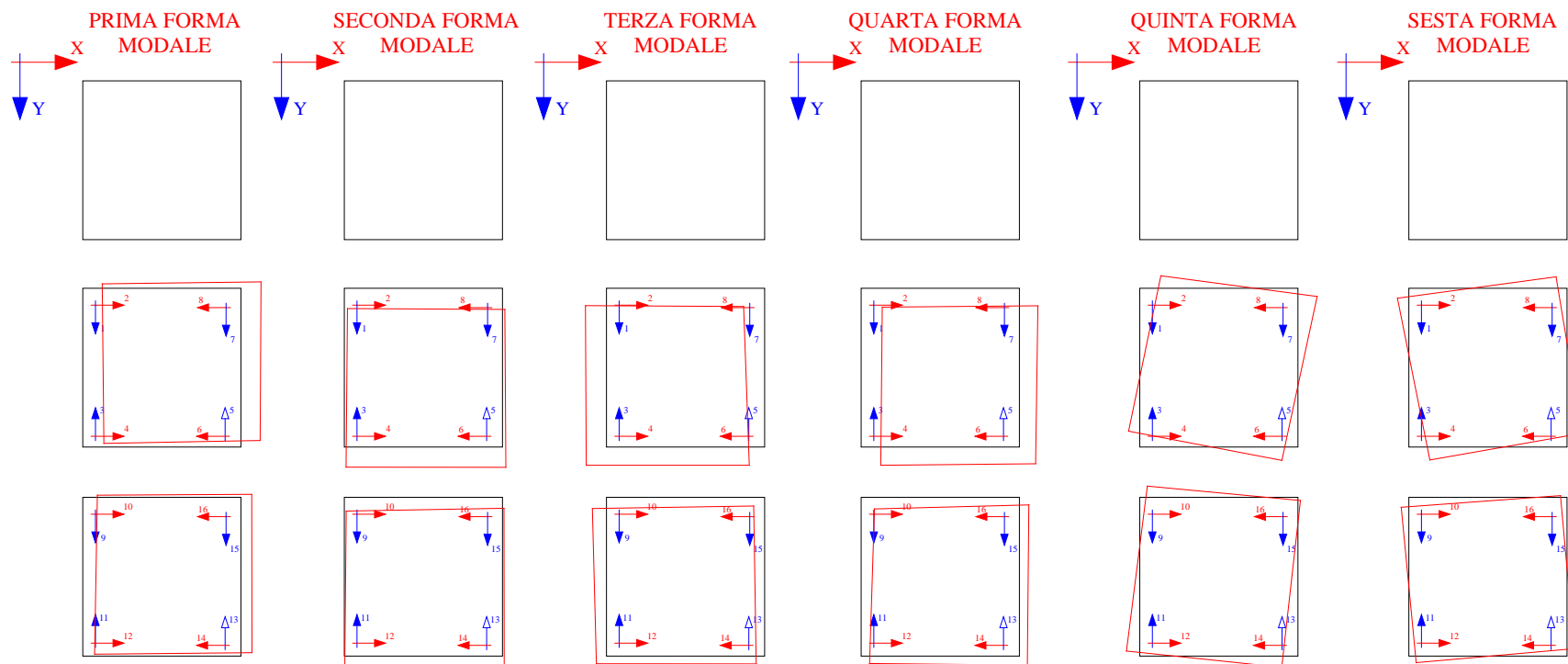


Figura 35: Campanile della Chiesa di S. Maria della Pietà in Larino: Rappresentazione grafica delle forme modali identificate

4.1.7 *Il Campanile della Cattedrale di S. Pardo in Larino*

L'edificio risale al XII secolo e la data di consacrazione, ossia il 1319, è riportata nell'architrave del portale centrale in caratteri gotici. La chiesa è dedicata all'Assunta ed al Patrono S. Pardo, Vescovo di Larino. La facciata è divisa in due piani da una cornice: la parte superiore presenta le caratteristiche delle chiese romaniche abruzzesi (terminazione orizzontale) ed è caratterizzata dalla presenza di un particolare rosone a tredici raggi. Nella parte inferiore si apre il portale strombato con timpano, decorato con colonnine tortili e con ricchi capitelli, a guardia dell'ingresso ci sono sui lati grifi e leoni simboli della vigilanza.

La Cattedrale di Larino presenta una struttura spaziale tipicamente romanica nella quale si innestano alcuni elementi formali tipici della corrente culturale del gotico, di cui l'arco ogivale rappresenta l'elemento più tipico. Gli studi attuali concordano nel ritenere l'organismo realizzato in due tempi diversi. Al primo dovrebbero risalire le uniche tre coppie di pilastri corrispondenti specularmente, al secondo, il resto della chiesa caratterizzata da sostegni asimmetrici.

Il campanile si erge sul lato destro della Cattedrale su un imponente arco a sesto acuto risalente al 1451. Il campanile è stato edificato su uno più antico, di cui non restano tracce, ed è stato realizzato in due epoche diverse, che hanno visto la realizzazione dapprima di due poderosi archi a sesto acuto ("Arco di San Pardo") nel XV sec. e, successivamente, la costruzione della parte superiore nel corso del XVI sec. Nel 1875 al secondo piano del campanile fu posto l'orologio; al terzo piano si trova la cella delle campane; nell'ottagono sono collocate le due campane dell'orologio (Figura 36).

Le dimensioni in pianta, esternamente sono 10.00 x 7.00 m. l'altezza massima è pari a 33.00 m.

Al primo livello gli elementi lapidei sono blocchi squadrati, l'apparecchiatura è a corsi orizzontali e la posa orizzontale/verticale. Le listature, come zeppe e scaglie sono assenti. Il modulo elastico normale stimato è pari a: $E = 2800 \text{ N/mm}^2$. Ai livelli successivi la muratura è in mattoni pieni, posati a lisca di pesce. Il modulo elastico normale stimato è pari a: $E = 1500 \text{ N/mm}^2$ (Figura 36).



Figura 36: Il Campanile della Cattedrale di S. Pardo in Larino con in evidenza le tipologie murarie

Per l'identificazione delle proprietà dinamiche del campanile si è proceduto all'installazione di 10 accelerometri del tipo Force Balance EpiSensor ES-U2, in maniera distribuita sulla struttura [22] (Figura 37).

L'elaborazione dei dati di prova ha consentito l'identificazione dei primi tre modi della struttura (Tabella 22 e Figura 38).

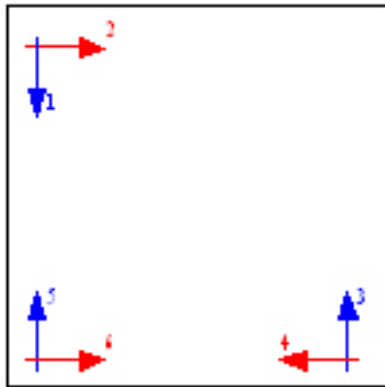


Fig.4.25a: Pianta quota +



Sensori 5, 6

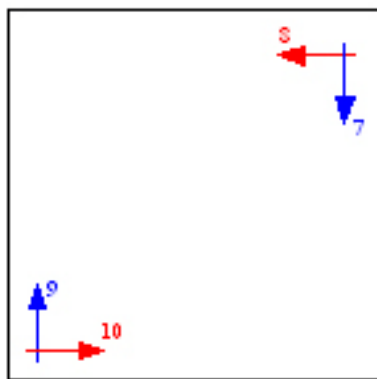


Fig.4.25b: Pianta quota



Sensori 9, 10

Figura 37: Campanile della Cattedrale di S. Pardo in Larino: Pianta con la disposizione dei sensori e relative foto

Modo	Tipo	Frequenza naturale [Hz]	Rapporto di smorzamento [%]
I	Traslazionale x	2.81	1.4
II	Traslazionale y	3.34	1.3
III	Torsionale	7.00	1.2

Tabella 22: Campanile della Cattedrale di S. Pardo in Larino: Frequenze e forme modali dei primi tre modi di vibrazione

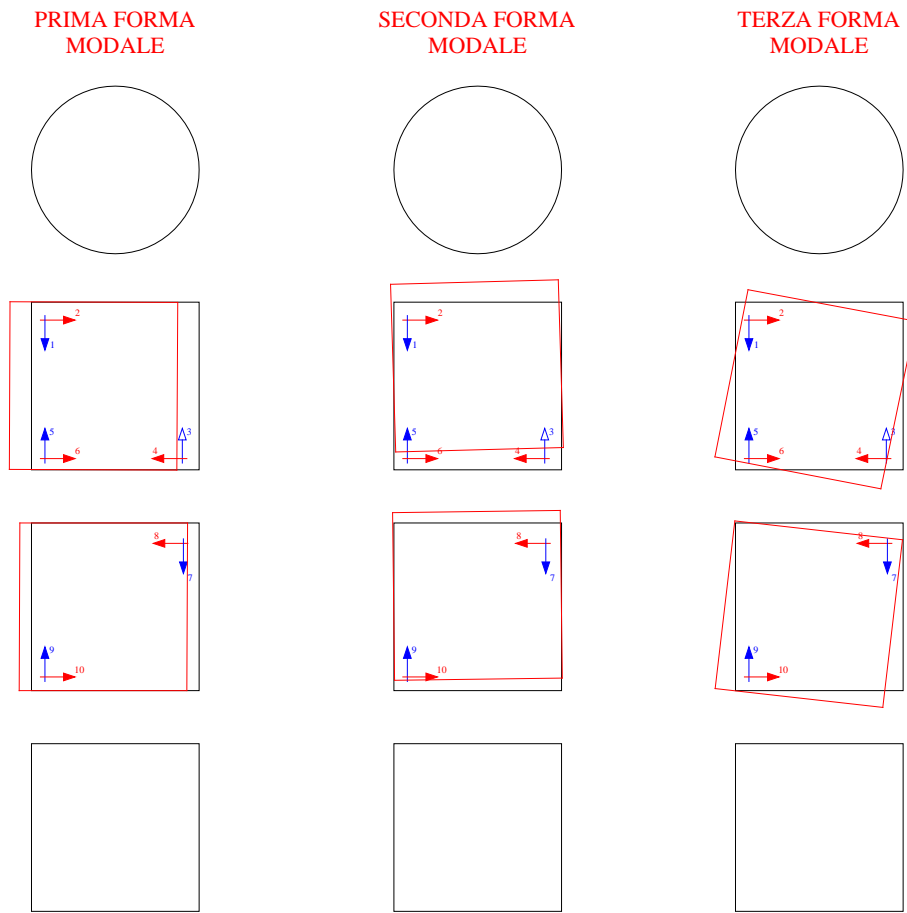


Figura 38: Campanile della Cattedrale di S. Pardo in Larino: Rappresentazione grafica delle forme modali identificate

4.1.8 Il campanile della Chiesa di S. Alfonso dei Liguori in Colletorto

La chiesa di S. Alfonso dei Liguori era annessa ad un monastero di Carmelitani, soppresso per bolla di Innocenzo X (1644-1655) e successivamente (1728) fatto riedificare dal marchese Rota. La primitiva chiesa Carmelitana era composta da due navate, a cui si accedeva da due porte, con quattro altari.



Figura 39: Il Campanile della Chiesa di S. Alfonso dei Liguori in Colletorto

La chiesa è formata da una navata principale larga 8 m.

La torre campanaria inglobata all'interno, si presenta di forma pressoché quadrata con dimensioni esterne 3.73×3.95 m, interne 2.00×2.05 m. L'altezza massima è pari a 21.35 m (Figura 39).

Gli elementi lapidei sono conci sbozzati, l'apparecchiatura è disordinata e la posa casuale. Le listature sono assenti, zeppe e scaglie sono presenti. Il modulo elastico normale stimato è pari a: $E = 1230 \text{ N/mm}^2$ (Figura 41).

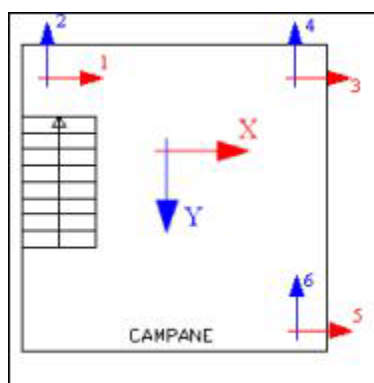


Fig.4.29a: Pianta quota +2.10



Sensori 5, 6

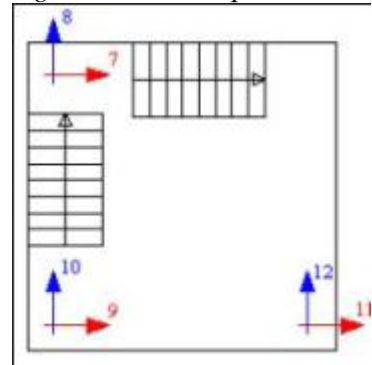


Fig. 4.29b: Pianta quota +7.12



Sensori 9, 10, 11, 12

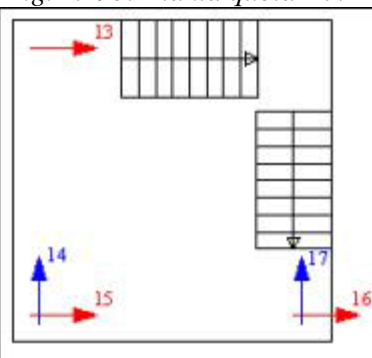


Fig.4.29c: Pianta quota +13.16



Sensori 13, 14, 15

Figura 40: Campanile della Chiesa di S. Alfonso dei Liguori in Colletorto: Pianta con la disposizione dei sensori e relative foto

Per l'identificazione delle proprietà dinamiche del campanile si è proceduto all'installazione di 17 accelerometri del tipo Force Balance EpiSensor ES-U2, in maniera distribuita sulla struttura [22] (Figura 40).

L'elaborazione dei dati di prova ha consentito l'identificazione dei primi cinque modi della struttura (Tabella 23 e Figura 42).



Figura 41: Campanile della Chiesa di S. Alfonso dei Liguori in Colletorto: Particolare della muratura

Modo	Tipo	Frequenza naturale [Hz]	Rapporto di smorzamento [%]
I	Traslazionale y	4.44	1.1
II	Traslazionale x	5.16	2.2
III	Torsionale	6.96	1.4
IV	Diagonale	7.68	1.7
V	Diagonale	8.80	1.9

Tabella 23: Campanile della Chiesa di S. Alfonso dei Liguori in Colletorto: Frequenze e forme modali dei primi cinque modi di vibrazione

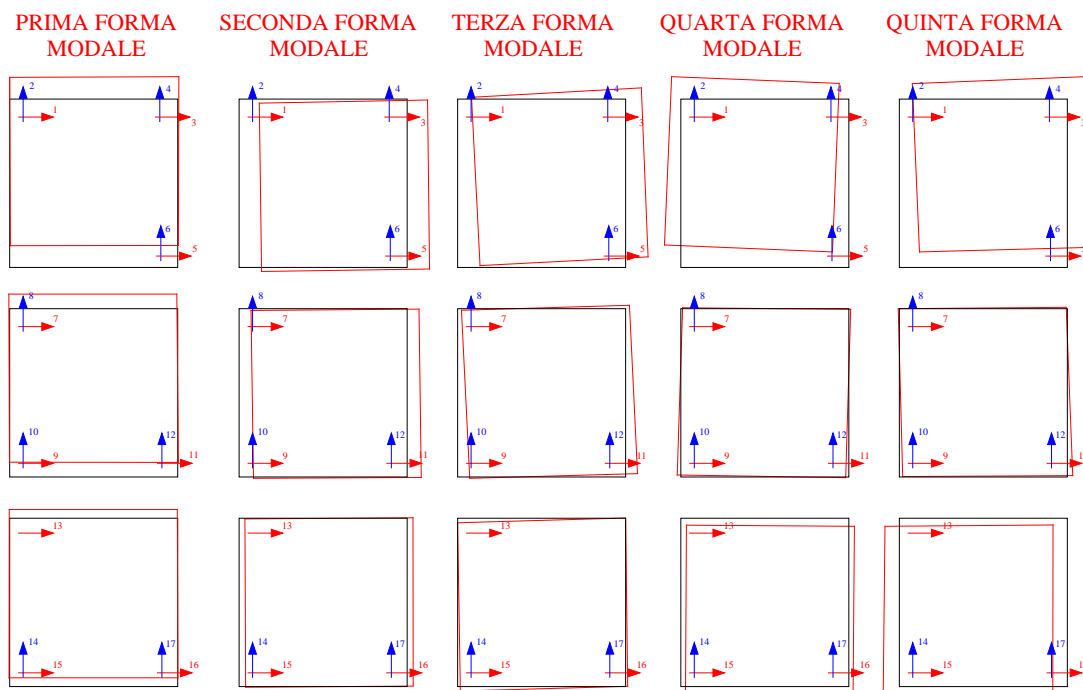


Figura 42: Campanile della Chiesa di S. Alfonso dei Liguori in Colletorto: Rappresentazione grafica delle forme modali identificate

4.1.9 *Il campanile della Chiesa di S. Maria Assunta in Provvidenti*

La Chiesa di S. Maria Assunta è il più importante edificio religioso di Provvidenti. Fu edificata tra il 1727 ed il 1734 nelle adiacenze della parrocchia preesistente.

La chiesa presenta una sola grande navata, con l'altare maggiore e ulteriori quattro altari all'interno delle cappelle disposte due per lato. Il campanile, collocato fra la presente chiesa e l'antica, porta incisa la data del 1380, che forse ricordava la costruzione della chiesa parrocchiale primitiva, ma i reperti gotici e romani rinvenuti potrebbero indicare che questa possa essere molto più antica (Figura 43).



Figura 43: Il Campanile della Chiesa di S. Maria Assunta in Provvidenti

Gli elementi lapidei sono conci sbozzati, l'apparecchiatura è disordinata e la posa casuale. Le listature sono assenti, zeppe e scaglie sono presenti. Il modulo elastico normale stimato è pari a: $E = 1230 \text{ N/mm}^2$ (Figura 44).



Figura 44: Campanile della Chiesa di S. Maria Assunta in Provvidenti: Particolare della muratura

Per l'identificazione delle proprietà dinamiche del campanile si è proceduto all'installazione di 6 accelerometri del tipo Force Balance EpiSensor ES-U2, in sommità [22] (Figura 45).

L'elaborazione dei dati di prova ha consentito l'identificazione dei primi tre modi della struttura (Tabella 24 e Figura 46).

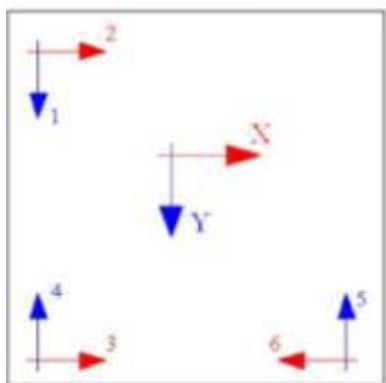


Figura 4.33: Pianta quota +17.00



Sensori 1, 2

Figura 45: Campanile della Chiesa di S. Maria Assunta in Provvidenti: Pianta con la disposizione dei sensori e relativa foto

Modo	Tipo	Frequenza naturale [Hz]	Rapporto di smorzamento [%]
I	Prev. Traslazionale x	2.82	1.3
II	Prev. Traslazionale y	3.40	1.2
III	Diagonale	4.00	1.5

Tabella 24: Campanile della Chiesa di S. Maria Assunta in Provvidenti: Frequenze e forme modali dei primi tre modi di vibrazione

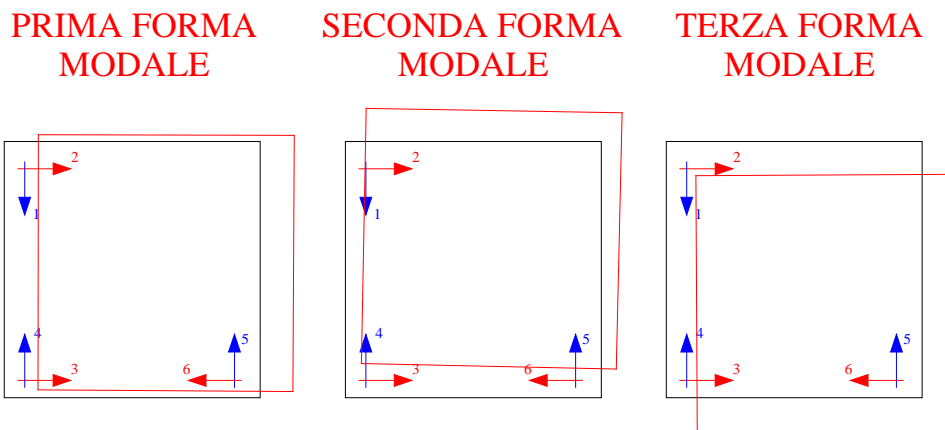


Figura 46: Campanile della Chiesa di S. Maria Assunta in Provvidenti: Rappresentazione grafica delle forme modali identificate

4.2 La previsione del periodo fondamentale delle "torri" in muratura

Il periodo fondamentale di vibrazione dipende dalle caratteristiche della struttura in termini di massa e rigidità. Studi condotti a seguito di numerosi terremoti distruttivi hanno dimostrato l'esistenza di una correlazione tra il livello di danno causato dal sisma per una determinata struttura e la vicinanza tra il suo periodo di vibrazione fondamentale e il periodo predominante del moto alla base. Pertanto, lo studio delle relazioni tra moto al piede della struttura e caratteristiche dinamiche della stessa risulta di fondamentale importanza per la valutazione del rischio sismico e la sua gestione in aree urbanizzate, nonché per la definizione di scenari di danno.

Il periodo fondamentale di vibrazione svolge un ruolo di primaria importanza nella definizione della capacità sismica. Infatti, alla forza che porta allo Stato Limite considerato, è associata una accelerazione spettrale S_e , funzione, oltre che dei parametri di pericolosità e di amplificazione locale, anche del periodo di vibrazione. Dunque, a parità di accelerazione spettrale, il periodo di ritorno dell'evento sismico che la provoca varia in funzione del periodo fondamentale della struttura, così come nell'esempio riportato nella Figura 47 in calce al presente capitolo. A parità di accelerazione spettrale ($S_e = 6,545 \text{ m/s}^2$) per una struttura con periodo fondamentale $T_1 = 0,539 \text{ sec}$, l'evento sismico che la porta allo SLV ha un periodo di ritorno pari a 475 anni, se invece la struttura ha $T_1 = 0,663 \text{ sec}$ il periodo di ritorno salirà a 949 anni.

Le Linee Guida [8], [9] per le strutture a torre stabiliscono che il periodo fondamentale può essere ottenuto mediante prove dinamiche, mediante modellazione o formulazioni semplificate, ma non ne suggeriscono nessuna. L'unico cenno è riportato nelle Linee Guida nuove, la versione 2010, dove all'esempio 5, (redatto da Faccio, Podestà e Saetta) che riporta l'analisi di vulnerabilità del Campanile di S. Antonin a Venezia, propongono una formulazione per determinare il periodo fondamentale delle strutture a torre [24].

Nel corso degli anni sono stati numerosi gli sforzi per lo sviluppo di correlazioni empiriche per la determinazione di tale parametro [23].

Sebbene le torri in muratura rappresentino una tipologia costruttiva relativamente semplice dal punto di vista strutturale, risultano ancora carenti studi sistematici del loro

comportamento dinamico finalizzati allo sviluppo di correlazioni empiriche per la determinazione delle caratteristiche dinamiche fondamentali. Il periodo fondamentale di vibrazione, pertanto, viene generalmente stimato mediante formulazioni sviluppate per edifici ordinari in muratura.

L'analisi del grado di correlazione tra valori sperimentali del periodo fondamentale e alcuni parametri geometrici della tipologia strutturale in esame consente di mettere in evidenza la dipendenza del periodo fondamentale dalla morfologia della struttura. Infatti, la dipendenza del periodo fondamentale dalle distribuzioni di massa e rigidezza della struttura considerata può essere ricondotta, in ultima analisi, a parametri geometrici quali l'altezza e le dimensioni in pianta, oltre che alla tipologia strutturale in esame.

Infatti, le correlazioni sperimentali semplificate per la stima del periodo fondamentale di alcune tipologie strutturali ricorrenti sono funzione di parametri geometrici della struttura (in genere, l'altezza), purché risultino soddisfatte delle condizioni in termini di regolarità della struttura. Tali correlazioni sono richiamate anche in diverse norme sismiche, sia nazionali che europee (NTC 2008 [1], Eurocodice 8 [3]).

Le proprietà modali di una struttura sono generalmente valutate mediante un'analisi agli autovalori di un modello meccanico della struttura stessa.

Le torri in muratura sono generalmente caratterizzate da minore complessità dal punto di vista geometrico e strutturale rispetto ad altre tipologie di strutture monumentali quali, ad esempio, le chiese. Pertanto, possono essere analizzate secondo schemi strutturali classici e, una modellazione accurata, in genere, è sufficiente a fornire risultati affidabili.

Da segnalare l'importanza dello studio dell'amplificazione del moto lungo lo sviluppo verticale di tali strutture. Quest'ultimo aspetto è rilevante ai fini della valutazione della parte superiore delle torri, dove, ad esempio, la presenza di campane determina una perdita di regolarità in elevazione. Le aperture praticate per l'installazione delle campane, infatti, fanno in modo che, nella parte superiore della struttura, si passi da una struttura a pareti ad una struttura costituita da colonne in muratura snelle e poco

compresse. Queste risultano, pertanto, estremamente vulnerabili, in particolare se si tiene conto dell'amplificazione del moto dalla base alla sommità della struttura.

L'analisi dinamica lineare (modale) svolge, pertanto, un ruolo fondamentale nella valutazione sismica delle strutture a torre, in particolare per la determinazione dell'amplificazione del moto con l'altezza.

Il periodo fondamentale di vibrazione ottenuto mediante prove di identificazione dinamica in condizioni operative, dato il modesto livello di vibrazione tipicamente riscontrato, consente di ritenere rappresentative del comportamento elastico lineare della struttura le stime così ottenute delle relative proprietà dinamiche. In condizioni di stato limite ultimo viene poi suggerita l'adozione di un valore amplificato (attraverso un coefficiente moltiplicativo nel range $1.4 \div 1.75$) del periodo fondamentale ottenuto dalle prove dinamiche in condizioni operative, in maniera da considerare gli effetti della fessurazione e di altri fenomeni non lineari che si manifestano per livelli di vibrazione maggiori. Il valore amplificato del periodo fondamentale, in sostanza, tiene conto dell'incremento del periodo che si manifesta a seguito di crescenti livelli di danneggiamento indotti dall'azione sismica.

L'effettiva risposta di una struttura all'eccitazione sismica alla base dipende dall'evoluzione delle sue proprietà dinamiche durante il sisma. La loro conoscenza per bassi livelli di vibrazione è comunque rilevante, in quanto la risposta strutturale in principio è governata dalle proprietà modali del comportamento strutturale in regime lineare. Il progressivo aumento del periodo naturale è solo una conseguenza dell'eccitazione sismica alla base e della sua intensità.

L'analisi e la progettazione basate su un approccio prestazionale, inoltre, richiedono la conoscenza del valore iniziale della frequenza naturale, per cui la conoscenza delle proprietà dinamiche della struttura in fase elastica costituisce, comunque, un utile riferimento per la calibrazione della struttura nello stato iniziale a partire dal quale procedere poi all'esecuzione delle analisi non lineari.

Una valutazione accurata delle proprietà modali in fase elastica, infine, risulta utile nei procedimenti di identificazione del danno.

I risultati delle prove eseguite e un'estesa revisione della letteratura scientifica hanno consentito la costruzione di un database (Tabella 25). I dati raccolti hanno permesso la valutazione dell'efficacia, nel caso delle torri, delle correlazioni suggerite dalle diverse norme sismiche per la previsione del periodo fondamentale delle strutture in muratura, nonché lo sviluppo di una nuova formulazione empirica per la previsione del periodo di vibrazione fondamentale delle torri in muratura ricadenti nel territorio italiano.

Località	Descrizione della struttura	H [m]	B [m]	L [m]	b [m]	l [m]	E [N/mm ²]	Frequenze naturali			Periodo			B/L	spessore [m]	Atot [m ²]	Ares [m ²]	I [m ⁴]
								f ₁ [Hz]	f ₂ [Hz]	f _n [Hz]	T ₁ [s]	T ₂ [s]	T _n [s]					
Larino (CB)	Campanile della Chiesa di S. Maria della Pietà	14,90	4,67	4,89	1,90	2,07	2800	3,61	3,86	....	0,28	0,26	....	0,96	1,40	22,84	18,90	40
Trignano (Reggio Emilia)	Campanile della cattedrale di S. Giorgio a Trignano, ha subito forti danni dopo il terremoto del 1996	18,50	3,30	3,35	2,50	2,55	2000	2,57	2,72	6,26	0,39	0,37	0,16	0,99	0,40	11,06	4,68	7
Santa Croce di Magliano (CB)	Campanile della Chiesa di S. Giacomo Apostolo danneggiato a seguito del sisma del 2002	20,00	4,75	4,80	2,05	2,10	1230	3,06	3,44	....	0,33	0,29	....	0,99	1,35	22,80	18,50	41
Guardiagrele (Chieti)	Torre campanaria costruita in più periodi, che vanno dalla fine del XII sec all'inizio del XX sec	20,00	8,61	8,90	4,61	4,90	3000	3,70	7,20	10,40	0,27	0,14	0,10	0,97	2,00	76,63	54,04	433
Pratolino (Firenze)	Torre Campanaria	20,00	5,00	5,00	3,90	3,90		2,00			0,50			1,00	0,55	25,00	9,79	33
Colletorto (CB)	Campanile della Chiesa di S. Alfonso dei Liguori	21,35	3,73	3,95	2,00	2,05	1230	4,40	5,16	....	0,23	0,19	....	0,94	0,91	14,73	10,63	16
Provvidenti (CB)	Campanile della Chiesa di S. Maria Assunta	21,45	4,15	4,94	1,74	2,15	1230	2,82	3,40	....	0,35	0,29	....	0,84	1,30	20,50	16,76	28
Bonefro (CB)	Campanile della Chiesa di S. Maria delle Rose	24,30	5,85	5,85	2,85	2,98	1230	2,96	3,52	....	0,34	0,28	....	1,00	1,47	34,22	25,73	92
Montorio nei Frentani (CB)	Campanile della Chiesa di S. Maria delle Rose	24,90	6,14	6,21	3,40	3,43	1230	2,74	3,43	....	0,36	0,29	....	0,99	1,38	38,13	26,47	109
Roccoverano (Asti)	Campanile della Chiesa della SS Annunziata, costruito nel XVI secolo	25,30	5,00	4,00	3,00	2,00		1,66	2,26	4,67	0,60	0,44	0,21	1,25	1,00	20,00	14,00	37
Ripabottoni (CB)	Campanile della Chiesa di S. Maria Assunta	27,90	4,95	5,20	2,45	2,75	1740	2,27	2,68	....	0,44	0,37	....	0,95	1,24	25,74	19,00	49
Larino (CB)	Campanile della Cattedrale di S. Pardo	33,00	6,00	10,00	3,00	7,00	2150	2,81	3,34	....	0,36	0,30	....	0,60	1,50	60,00	39,00	164
Roma	Torre dei Capocci, torre medievale caratterizzata da una estrema regolarità della sezione lungo l'altezza	34,10	8,60	8,60	4,60	4,60	4000	2,00	2,17	6,70	0,50	0,46	0,15	1,00	2,00	73,96	52,80	419
San Miniato (Pisa)	Torre di Matilde, oggi campanile del Duomo di Santa Maria e San Genesio, di origine militare seconda metà del XII secolo	34,35	7,00	10,00	4,85	7,50	2450	1,28	1,83	3,02	0,78	0,55	0,33	0,70	1,16	70,00	33,63	215
Morrone del Sannio (CB)	Campanile della Chiesa di S. Maria Maggiore	35,00	6,47	7,15	3,80	3,90	1230	1,96	2,24	....	0,51	0,45	....	0,90	1,48	46,26	31,44	144
Arcisate (Milano)	Campanile della chiesa di S. Vittore, costruito nel 1563	37,00	5,70	5,80	2,98	3,08	3000	1,21	1,29	3,56	0,83	0,78	0,28	0,98	1,36	33,06	23,88	83
Soncino	Torre campanaria, costruita nel 1128 (h.31,5m) e successivamente sopraelevata nel 1575 a (h.39,5)	39,50	5,95	5,95	3,14	3,14	3400	1,05	1,15	2,50	0,95	0,87	0,40	1,00	1,41	35,40	25,54	96
Capua (Caserta)	Torre	41,00	11,30	11,30	7,30	7,30	3700	1,26	1,29	3,1	0,79	0,775	0,32	1,00	2,00	127,69	74,40	1122
Aversa (Caserta)	Torre	45,50	14,00	14,00	10,00	10,00	2150	1,05	1,37	4,81	0,95	0,73	0,21	1,00	2,00	196,00	96,00	2368
Teramo	La torre della cattedrale di Teramo. Il primo livello è realizzato con pietre squadrate, mentre gli altri livelli con pietre alternate a mattoni	48,48	6,85	6,85	3,95	3,95	4500	1,47	1,59	3,63	0,68	0,63	0,28	1,00	1,45	46,92	31,32	163
Burano (Venezia)	Campanile di S. Martino a Burano, presenta una notevole inclinazione, apparsa dopo pochi anni dalla sua costruzione	53,00	6,15	6,15	4,55	4,55	3300	0,79	0,84	3,47	1,27	1,19	0,29	1,00	0,80	37,82	17,12	83
Napoli	Campanile della Chiesa della Madonna del Carmine, muratura di tufo giallo napoletano a sacco fino alla quota di circa 41.4m. La parte superiore a pianta ottagonale è realizzata in muratura piena di mattoni rossi di argilla	57,80	8,01	9,16	2,88	4,50	690	0,69	0,76	2,28	1,45	1,32	0,44	0,87	2,45	73,37	60,41	383
S. Andrea (Venezia)	Campanile della Chiesa di S. Andrea Venezia	58,00	7,62	7,64	3,22	3,23	1800	0,61	0,73	2,81	1,64	1,37	0,36	1,00	2,20	58,22	47,82	273
Portogruaro (Venezia)	Campanile della cattedrale di S. Marco	59,00	7,30	7,30	4,70	4,70	2830	0,88	1,08	1,64	1,14	0,93	0,61	1,00	1,30	53,29	31,20	196
Pavia	Torre Grossa	60,00	9,50	9,50	5,30	5,30	5200	1,306	1,33	3,4	0,77	0,752	0,29	1,00	2,10	90,25	62,16	613
Monza	La torre della cattedrale di Monza	63,67	6,50	7,00	3,70	4,20	1400	0,59	0,71	2,46	1,69	1,41	0,41	0,93	1,40	45,50	29,96	142

Tabella 25: Data base a disposizione

Le prime osservazioni riguardano i parametri che influenzano il comportamento sismico del manufatto.

Il periodo fondamentale è proporzionale alla radice quadrata della massa ed inversamente proporzionale alla radice quadrata della rigidezza. Dunque, complessivamente il comportamento dinamico è funzione dei seguenti parametri:

- La qualità muraria;
- Le dimensioni in pianta;
- Lo spessore dei paramenti murari;
- L'altezza della struttura;
- Il grado di vincolo.

La qualità muraria interviene sia come massa, in funzione del peso per unità di volume, sia come rigidezza, con i moduli di elasticità normale e tangenziale.

In termini di massa le differenze tra le diverse tipologie non sono apprezzabili in quanto il peso per unità di volume varia da un minimo di 18 kN/m³ per le murature in mattoni ad un massimo di 22 kN/m³ per le murature a blocchi squadri, con uno scarto del 22%.

Il modulo elastico normale, invece, varia da 690 N/mm² della muratura a conci sbozzati a 3200 N/mm² della muratura a blocchi squadri, 4,7 volte più grande.

Le dimensioni in pianta e lo spessore dei paramenti sono di fondamentale importanza in quanto incidono sui valori dei momenti d'inerzia assiali. Non solo: dato che nelle strutture in muratura l'aliquota preponderante della massa è data dal peso proprio dei muri, l'area resistente della sezione rappresenta un altro dato sensibile.

Il grado di vincolo ma, soprattutto, l'altezza della struttura determinano i valori di rigidezza.

Altri parametri, legati alla tipologia costruttiva, possono influenzare il comportamento dinamico della struttura:

- Il grado di vincolo del campanile alle strutture circostanti;
- Il grado di ammorsamento delle murature;
- La presenza di piani rigidi.

Il campanile può essere vincolato alla struttura chiesa in modo diverso:

- La struttura può essere completamente isolata;
- La struttura può avere in comune solo un angolo;
- La struttura può avere in comune una o più pareti;
- La struttura può essere completamente inglobata.

Nei casi indagati non emergono situazioni di cattivo ammorsamento delle murature.

La presenza di piani rigidi si registra in casi isolati (Larino cattedrale di S. Pardo).

L'assenza o il numero statisticamente irrilevante dei parametri suddetti non ha consentito valutazioni sulla loro influenza.

D'altronde, le tecniche costruttive dell'epoca portano a pensare che il campanile, avendo delle esigenze costruttive diverse rispetto al resto della chiesa (spessori murari maggiori, altezza notevole) sorga come struttura isolata e successivamente inglobata. Allo stesso modo è difficile pensare di trovare pareti non ammorsate, in quanto ciò avrebbe significato erigere singole pareti che non avrebbero retto per la loro snellezza; dunque un campanile va eretto edificando contemporaneamente le quattro pareti, garantendo così la stabilità.

L'assenza di piani rigidi è legata alle tecniche costruttive che prevedevano solai in legno o volte in mattoni. Eventuali piani rigidi sono stati introdotti successivamente a seguito di interventi. Da valutare, inoltre, il fatto che la necessità di lasciare varchi per il passaggio delle scale di accesso alle parti alte negli spazi angusti a disposizione, difficilmente consente di considerare rigido anche un solaio in cemento armato, visto che le aperture raggiungono anche il 50% della superficie.

Le osservazioni appena descritte permettono la definizione del modello meccanico del campanile, che in prima approssimazione si comporta come una mensola incastrata alla base, con la massa uniformemente distribuita lungo l'altezza, la cui sezione resistente è cava.

Una volta definito il modello meccanico si è passati allo studio delle relazioni tra le caratteristiche di cui il periodo fondamentale è funzione. Dato che le formulazioni del periodo fondamentale sono tutte funzione dell'altezza H delle strutture, sono stati effettuati degli studi di sensibilità tra le altre caratteristiche geometriche e meccaniche che potrebbero influenzare il periodo fondamentale stesso:

- L'area totale di base con l'altezza (Figura 48);
- L'area resistente di base con l'altezza (Figura 49);
- Il momento d'inerzia della sezione di base con l'altezza (Figura 50);
- Il modulo elastico normale della muratura utilizzata con l'altezza (Figura 51);
- Lo spessore delle murature con l'altezza (Figura 52).

I dati si dimostrano dispersi e non è stato possibile trovare una correlazione statisticamente valida.

Invece la funzione di regressione lineare dei dati sperimentali ai minimi quadratici è la retta di equazione:

$$T_1 = 0,0204 \cdot H \quad (2)$$

che rappresenta la correlazione cercata, e presenta un buon coefficiente di correlazione:

$$R^2 = 0,75.$$

Nel diagramma di Figura 53 sono riportati i dati sperimentali e la relativa retta interpolante, ed il confronto con la formulazione delle NTC 2008 [1] per gli edifici in muratura.

Si può notare come tale formulazione, nata per gli edifici, sia attendibile in corrispondenza di valori bassi delle altezze, mentre si discosta per altezze superiori. Infatti se il campanile è basso può essere assimilato ad un edificio e come tale si comporta dinamicamente.

Si riporta anche la formulazione proposta da Faccio ed altri in allegato alle Linee Guida del 2011, Esempio 5 [24], che propongono una formulazione, anch'essa lineare e determinata statisticamente, non molto lontana dalla correlazione (2).

Dai risultati delle analisi di sensibilità descritte, si può concludere che il periodo fondamentale di una struttura a torre è direttamente proporzionale all'altezza della struttura.

Invece hanno una trascurabile influenza dal punto di vista statistico:

- la geometria della sezione di base, sia in termini di area totale, che di area resistente;
- gli spessori delle pareti;
- il modulo elastico normale del materiale di cui è costituita.

Spettri di Accelerazione Elastici SLV

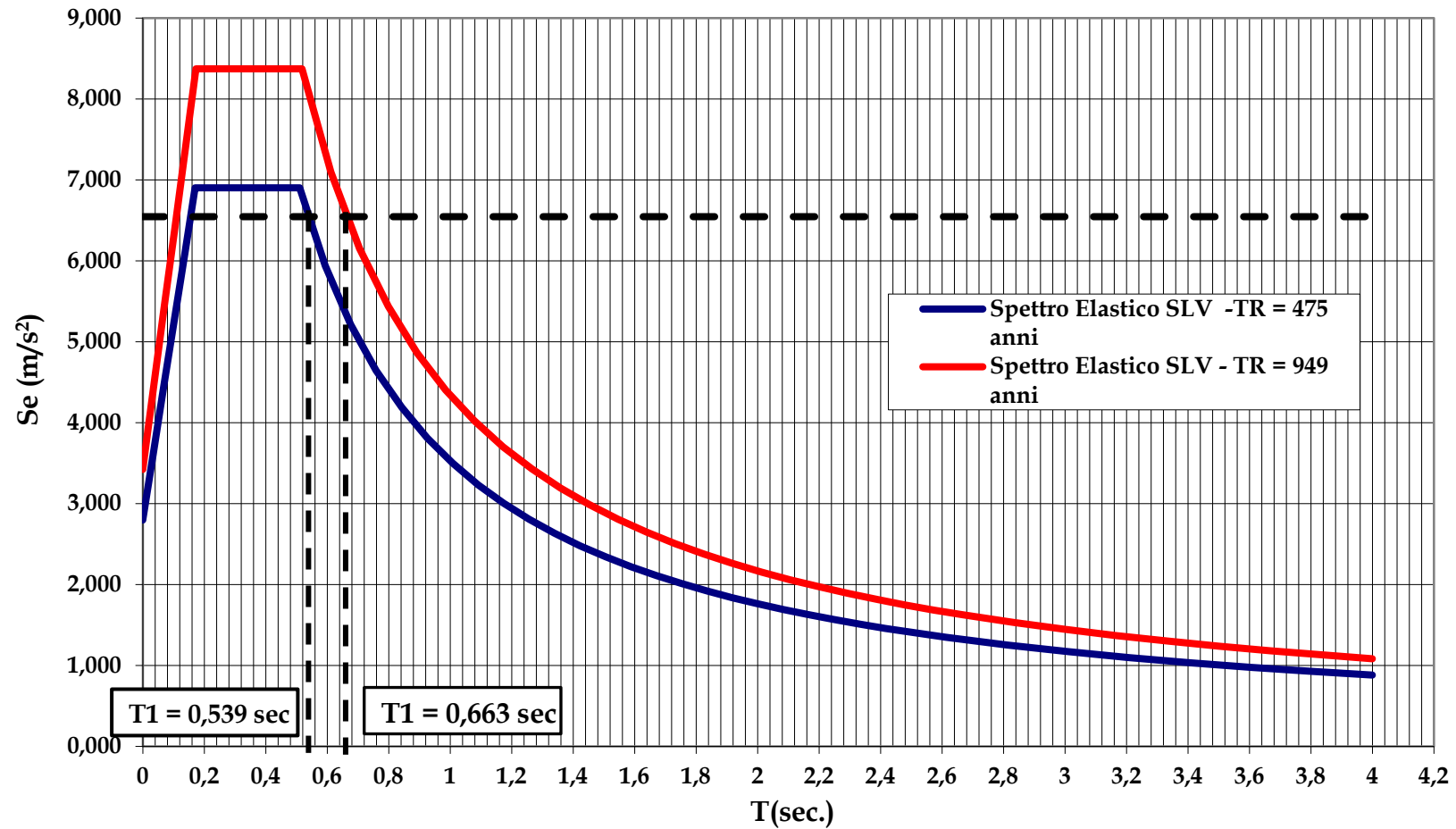


Figura 47: Confronto tra i periodi di ritorno al variare del periodo fondamentale T_1 .

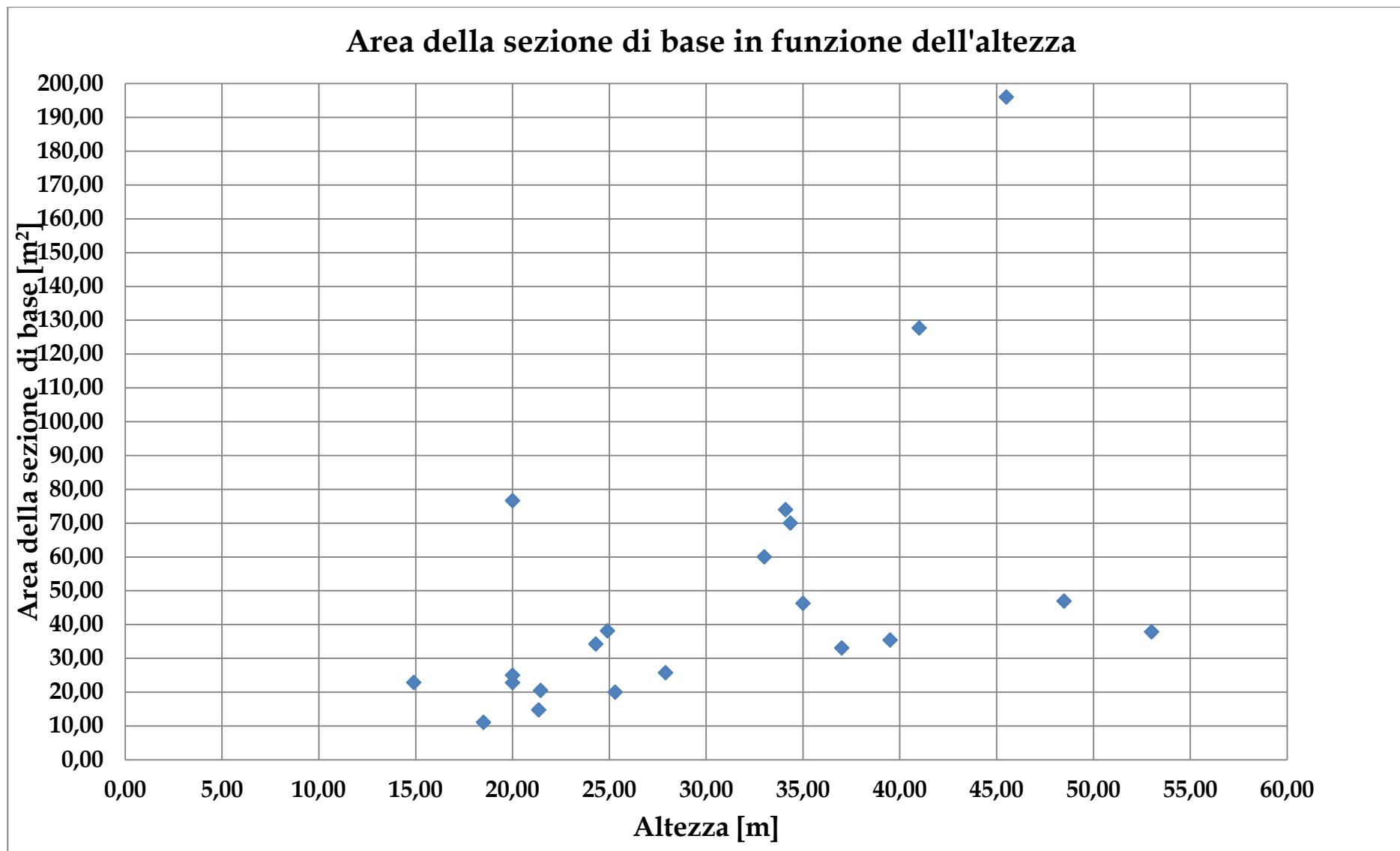


Figura 48: Area della sezione di base in funzione dell'altezza

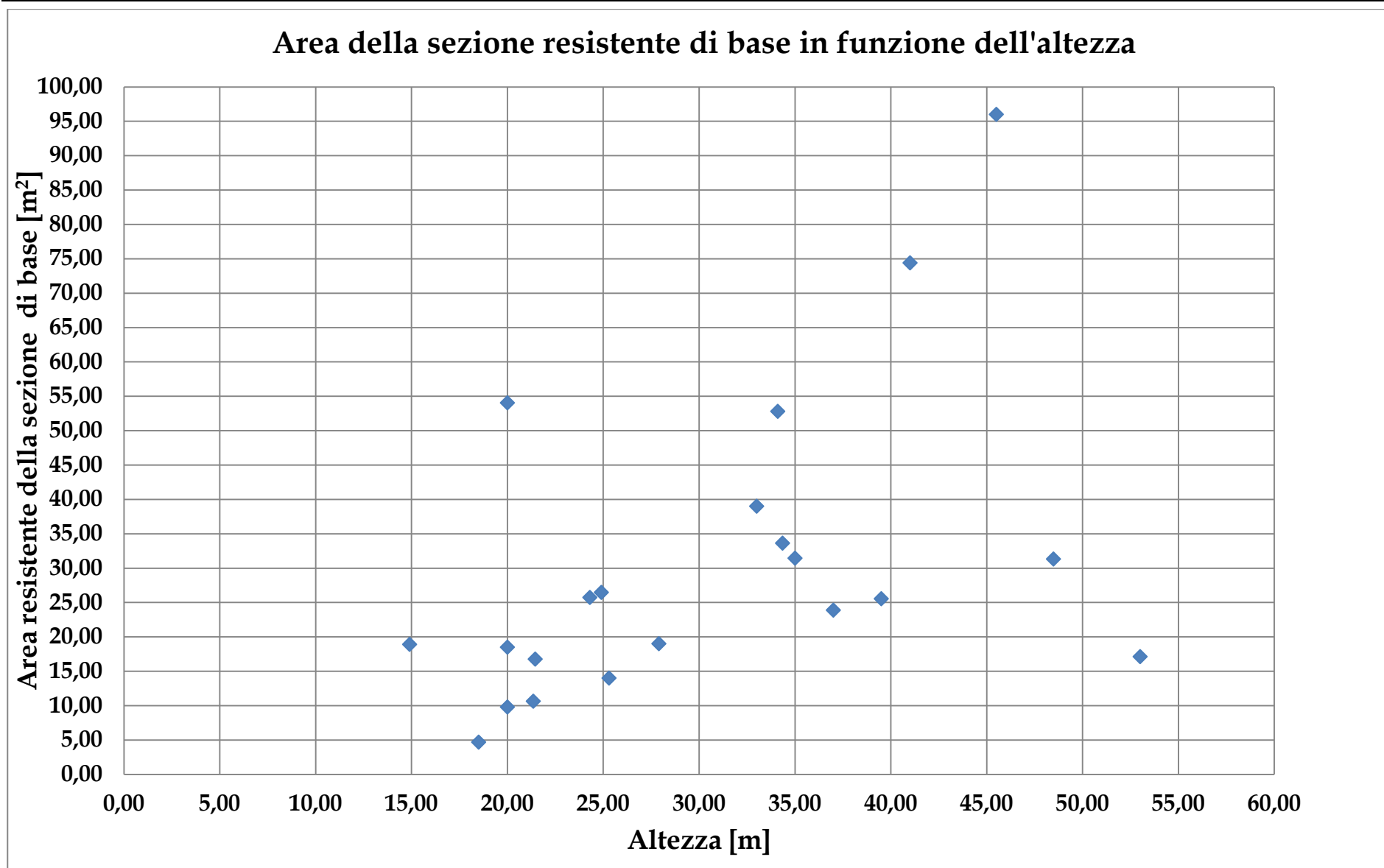


Figura 49: Area della sezione resistente di base in funzione dell'altezza

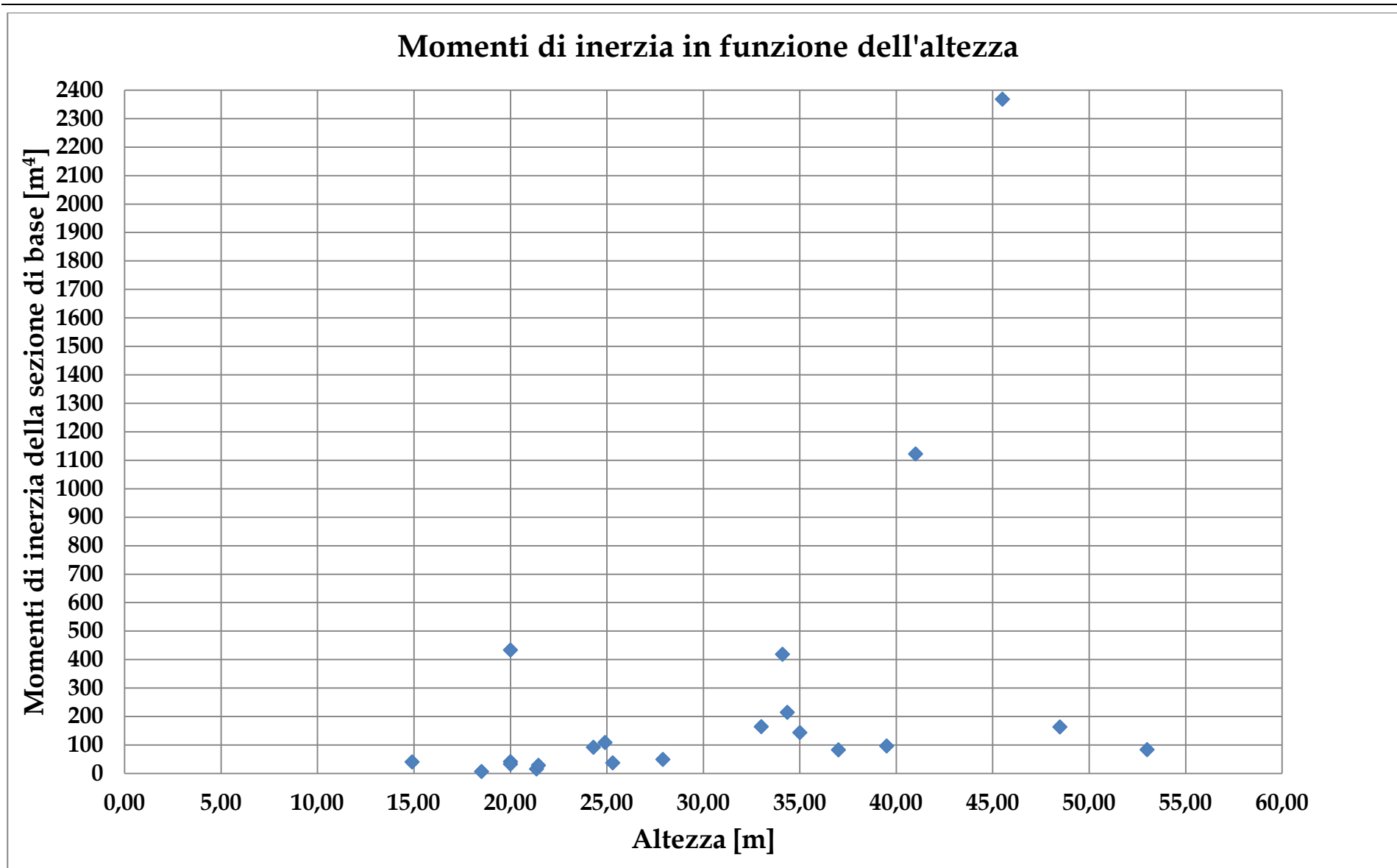


Figura 50: Momenti di inerzia in funzione dell'altezza

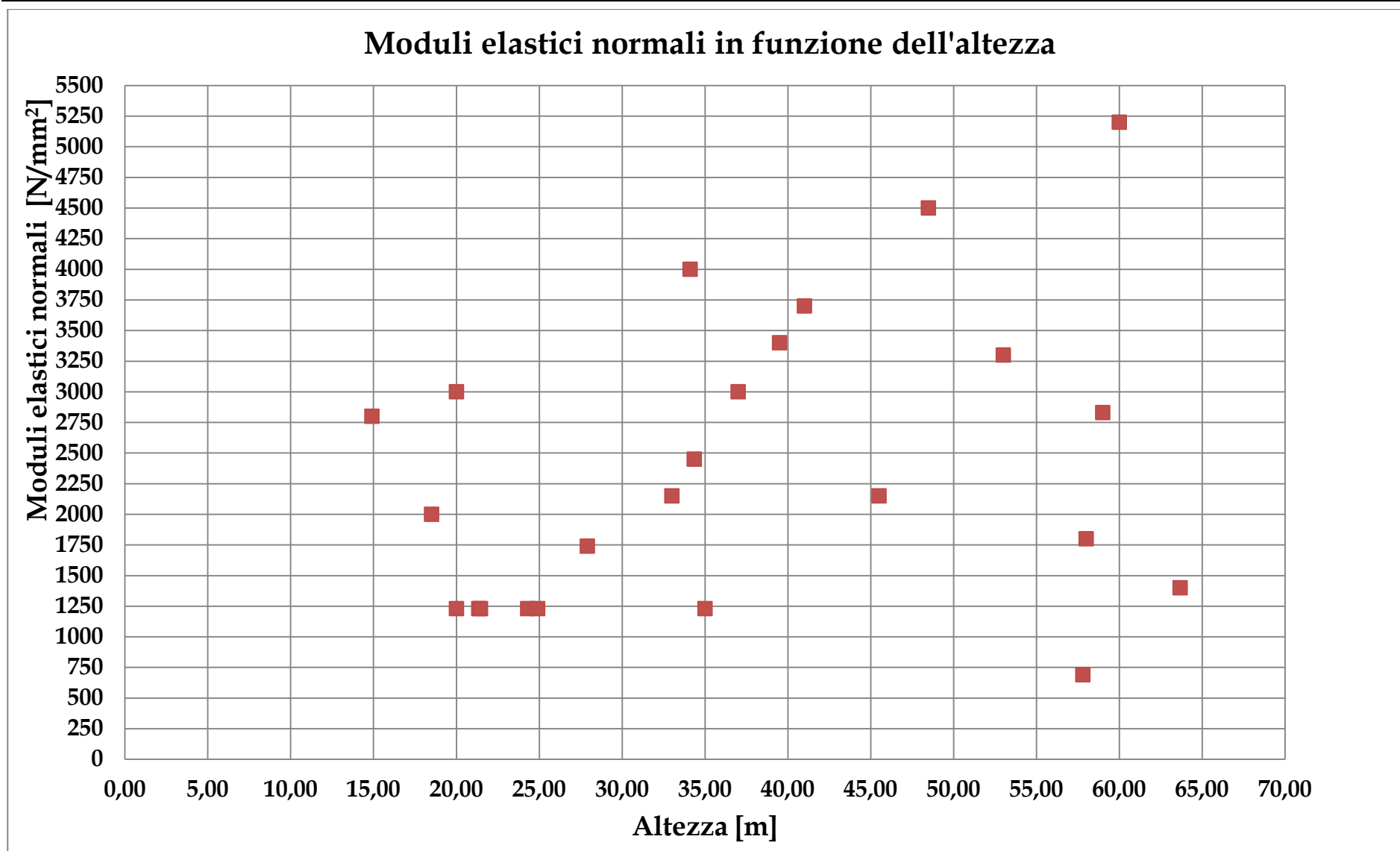


Figura 51: Moduli elastici normali in funzione dell'altezza

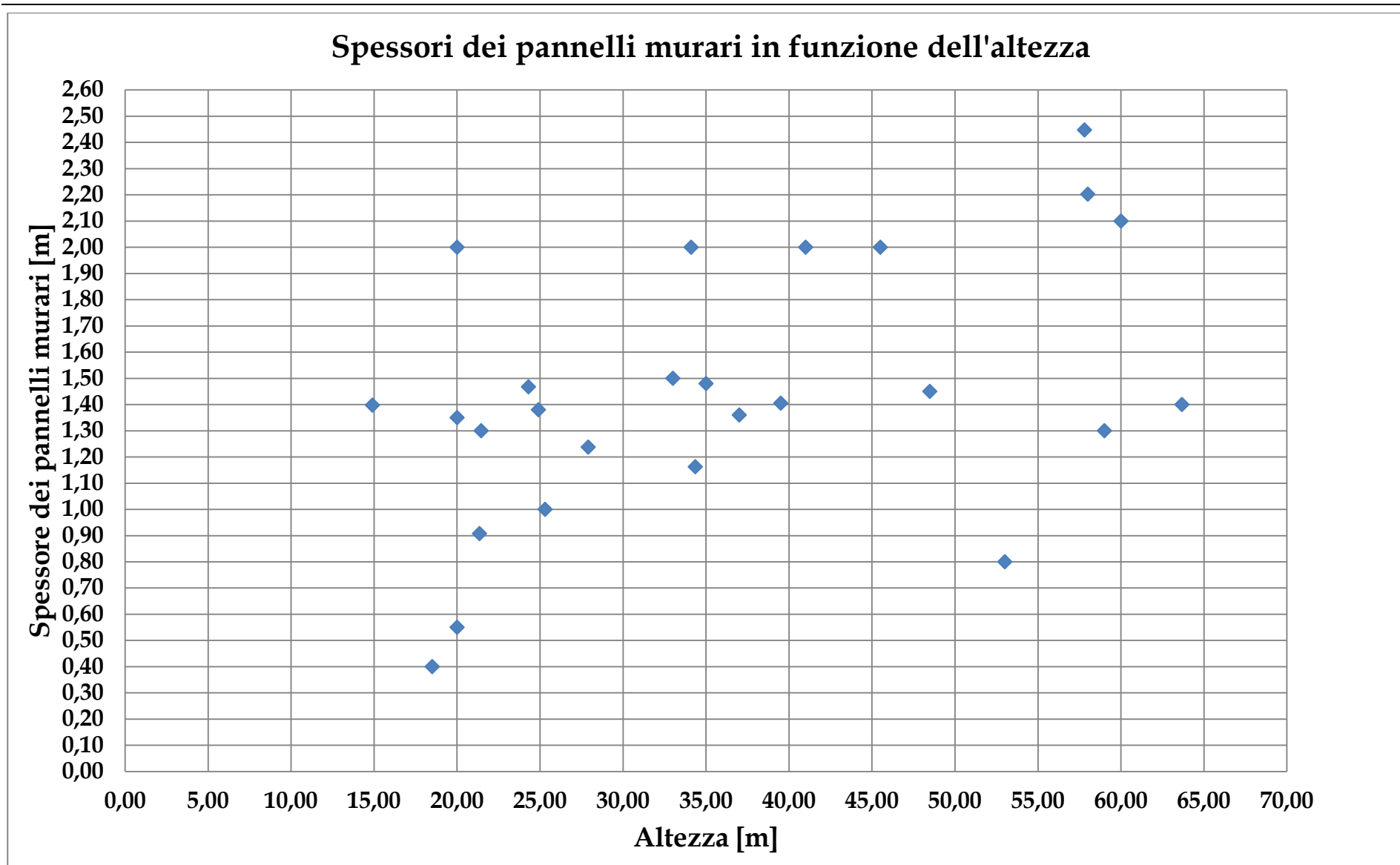


Figura 52: Spessore dei pannelli murari in funzione dell'altezza

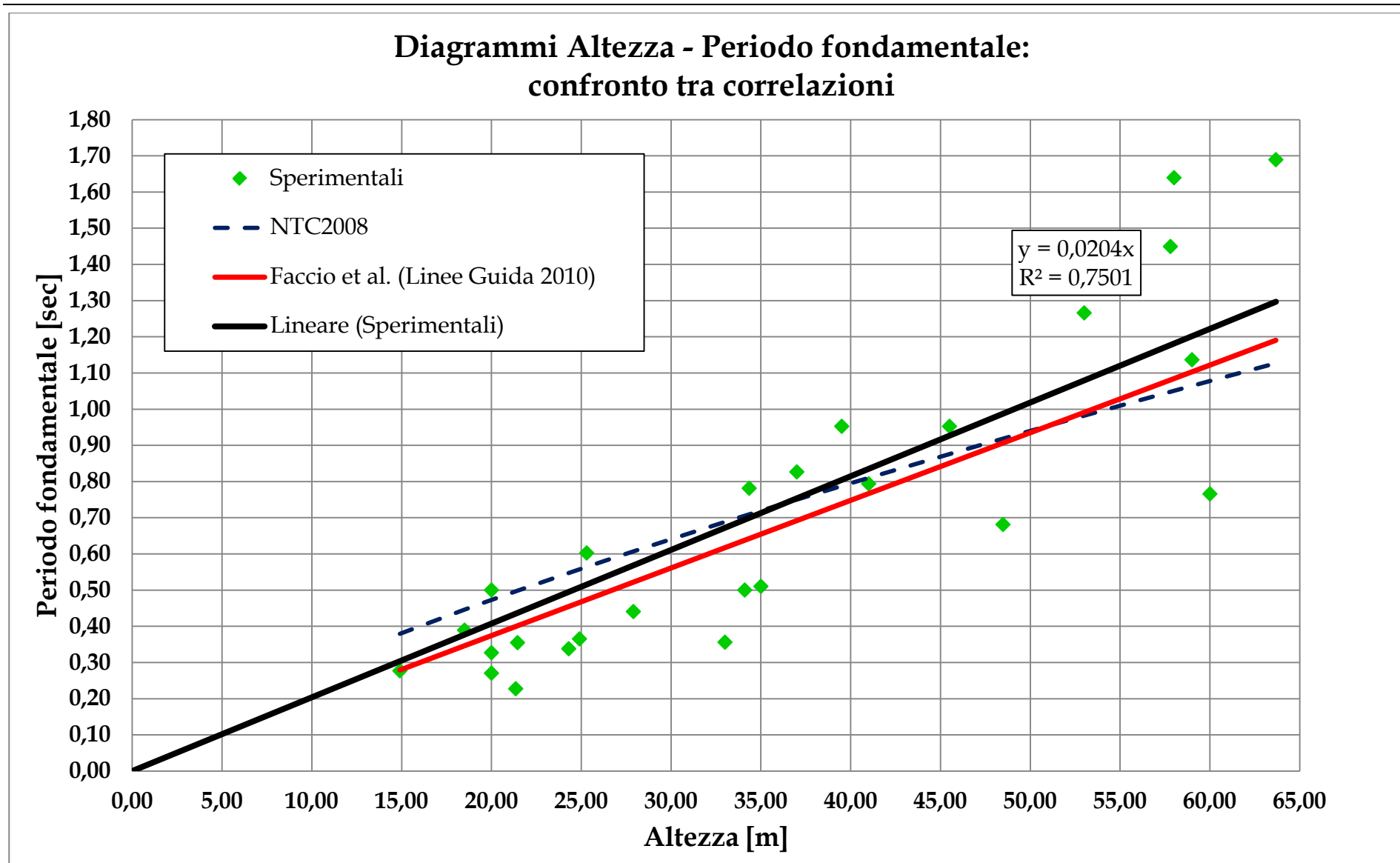


Figura 53: Diagramma delle correlazioni tra periodo fondamentale ed altezza

5 Edifici monumentali tutelati

L'Università del Molise ha stipulato una Convenzione con la Soprintendenza ai Beni Architettonici e Paesaggistici del Molise, che ha riguardato la valutazione del rischio sismico su scala territoriale, denominato nelle Linee Guida LV1, di cinque edifici [25].

Gli edifici in questione sono di seguito elencati:

1. Castello Di Capua - Gambatesa (CB);
2. Castello Pandone - Venafro (IS);
3. Convento Santa Maria delle Monache - Isernia;
4. Palazzo Japoce - Campobasso;
5. Palazzo Mazzarotta - Campobasso

Le verifiche sono state eseguite con il "Sistema Informativo beni architettonici Valutazione e monitoraggio del Rischio Sismico", il cui acronimo è SIVARS. Tale programma è stato predisposto dal Ministero dei Beni Culturali, Direzione Generale per il Paesaggio, Belle Arti, Architettura e Arte Contemporanea (PaBAAC) ed è utilizzabile online previa autorizzazione all'accesso [26].

Nei paragrafi che seguono viene descritto il funzionamento del SIVARS dal punto di vista dell'Operatore, senza poter entrare nel merito delle scelte operative del programma.

Nondimeno i dati raccolti saranno utili per la validazione di un procedimento semiautomatico che rappresenta una evoluzione del modello semplificato previsto dalle Linee Guida per la valutazione della vulnerabilità LV1.

Interessante è seguire il percorso della conoscenza, che ha consentito il raggiungimento dei livelli di conoscenza necessari per l'esecuzione delle verifiche anche in assenza di una campagna prove.

Seguirà anche una breve descrizione delle opere oggetto di studio, con i risultati delle ricerche e dei sopralluoghi.

5.1 Il “Sistema Informativo beni architettonici VALutazione e monitoraggio del Rischio Sismico” (SIVARS)

Il SIVARS nasce con l'intento di creare una banca dati condivisa dei beni d'interesse culturale, degli elementi conoscitivi e dei fattori di vulnerabilità degli edifici, secondo quanto previsto dalle Linee Guida e di ottenere risultati omogenei, dunque confrontabili, sugli Indici di Rischio relativi alle verifiche di vulnerabilità sismica a scala territoriale LV1. Il SIVARS è accessibile nell'area ad accesso riservato del sistema www.benitutelati.it.

La modalità di presentazione consiste nell'organizzazione dei dati secondo liste e schede con funzionalità attivate da pulsanti. La raccolta delle informazioni segue una sorta di “sequenzialità” che è rappresentata dall'ordinamento con cui i moduli schedografici sono presentati nella barra dei menù [27].

Si passa ad una rapida rassegna dei moduli schedografici (Figura 54) più significativi.



Figura 54: Moduli schedografici (estratto da: Sistema_Monitoraggio_sismico_Manuale_UTENTE)

Nella **Valutazione Culturale** vanno inseriti i dati relativi a:

- *Categoria di rilevanza*, che può essere: limitata, media, elevata;
- *Categoria d'uso*. Le opzioni previste sono: saltuario non utilizzato; frequente (uso settimanale); molto frequente (uso giornaliero).

Da tali parametri si calcolano probabilità di eccedenza in 50 anni dell'azione sismica e fattore di importanza.

Vengono successivamente richiesti:

- **Orografia**, per la determinazione del Coefficiente di Topografia;
- **Categoria di suolo di fondazione**;
- **Presenza di corpi franosi** che possono interessare il fabbricato;
- **Rilievo dell'ingombro**. La maschera consente di definire la posizione del fabbricato sulla Carta Tecnica Regionale e conseguentemente di ottenere le coordinate dell'ingombro che permettono di calcolare automaticamente, tramite interpolazione i valori di accelerazione con una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni.

Nei **Fattori di Sensibilità** vanno inseriti:

- *Dati geometrici della struttura*, e cioè la superficie coperta, l'altezza di gronda, il numero di piani fuori terra;
- Le *Caratteristiche della struttura*, cioè il Fattore di Struttura (3,00 o 2,25) e l'Ipotesi di Collasso.

Riguardo le **Ipotesi di Collasso** viene richiesta la scelta tra due meccanismi di collasso ricorrenti per i palazzi:

1. *Collasso per Piano Debole*: avviene quando un piano risulta decisamente più debole degli altri, per cui la costruzione non riesce a sfruttare le capacità dissipative e di spostamento degli altri piani, che restano in fase elastica.
2. *Collasso Uniforme*: avviene quando il collasso si presenta con la rottura delle fasce orizzontali di muratura a livello degli orizzontamenti, ed i maschi che collassano alla base del primo livello per pressoflessione.

Il valore del **Fattore di Confidenza** viene calcolato automaticamente dal SIVARS, in funzione del livello di conoscenza che è possibile ottenere rispetto a: il rilievo geometrico,

il rilievo materico e dei dettagli costruttivi, le proprietà meccaniche dei materiali, la conoscenza del suolo e delle fondazioni (Figura 55).

Denominazione del Bene: **Complesso monumentale di Santa Maria delle Monache**

Livello di approfondimento raggiunto per i diversi aspetti della conoscenza: **Fattore di confidenza: 1,3**

Rilievo geometrico:

- Rilievo geometrico completo
- Rilievo geometrico completo con restituzione grafica dei quadri fessi deformativi

Rilievo materico e dei dettagli costruttivi:

- Limitato rilievo materico e degli elementi costruttivi
- Esteso rilievo materico e degli elementi costruttivi
- Esaustivo rilievo materico e degli elementi costruttivi

Proprietà meccaniche dei materiali:

- Parametri meccanici desunti da dati già disponibili
- Limitate indagini sui parametri meccanici dei materiali
- Estese indagini sui parametri meccanici dei materiali

Terreno e fondazioni:

- Limitate indagini sul terreno e le fondazioni, in assenza di dati geologici; disponibilità d'informazioni sulle fondazioni
- Disponibilità di dati geologici e sulle strutture fondazionali; limitate indagini sul terreno e sulle fondazioni
- Estese o esaustive indagini sul terreno e le fondazioni

Figura 55: Modulo Fattore di Confidenza

Vengono richieste informazioni relative allo **Stato di Utilizzo ed Affollamento** del fabbricato:

- *Stato di Utilizzo*: totale se la frequenza d'uso è estesa a tutto il fabbricato;
- *Affollamento*: viene richiesto di spuntare tale indicatore solo se il limite di affollamento previsto è raggiunto o superato frequentemente (circa una volta a settimana);
- *Numero di Presenze Medie* e *Numero di Presenze Massime* giornaliere.

Sono richieste informazioni relative all'**Accessibilità del Manufatto**, dato di fondamentale importanza in fase di emergenza.

Interessante è il **Rilievo Semplificato** della struttura. È stata implementata una procedura semiautomatica, con la quale è possibile inserire i dati relativi agli elementi strutturali per via grafica, caricando file immagine che faranno da base. Sono codificati i seguenti elementi:

- gli elementi verticali V;
- gli elementi orizzontali O;
- la copertura C;
- gli elementi di collegamento verticali S.

Tali elementi vanno innanzitutto definiti mediante “lucidatura” dell’immagine caricata, una volta definita la scala metrica, dopodiché ad ognuno degli elementi è associata una maschera in cui vanno assegnate altre caratteristiche (Figura 56).

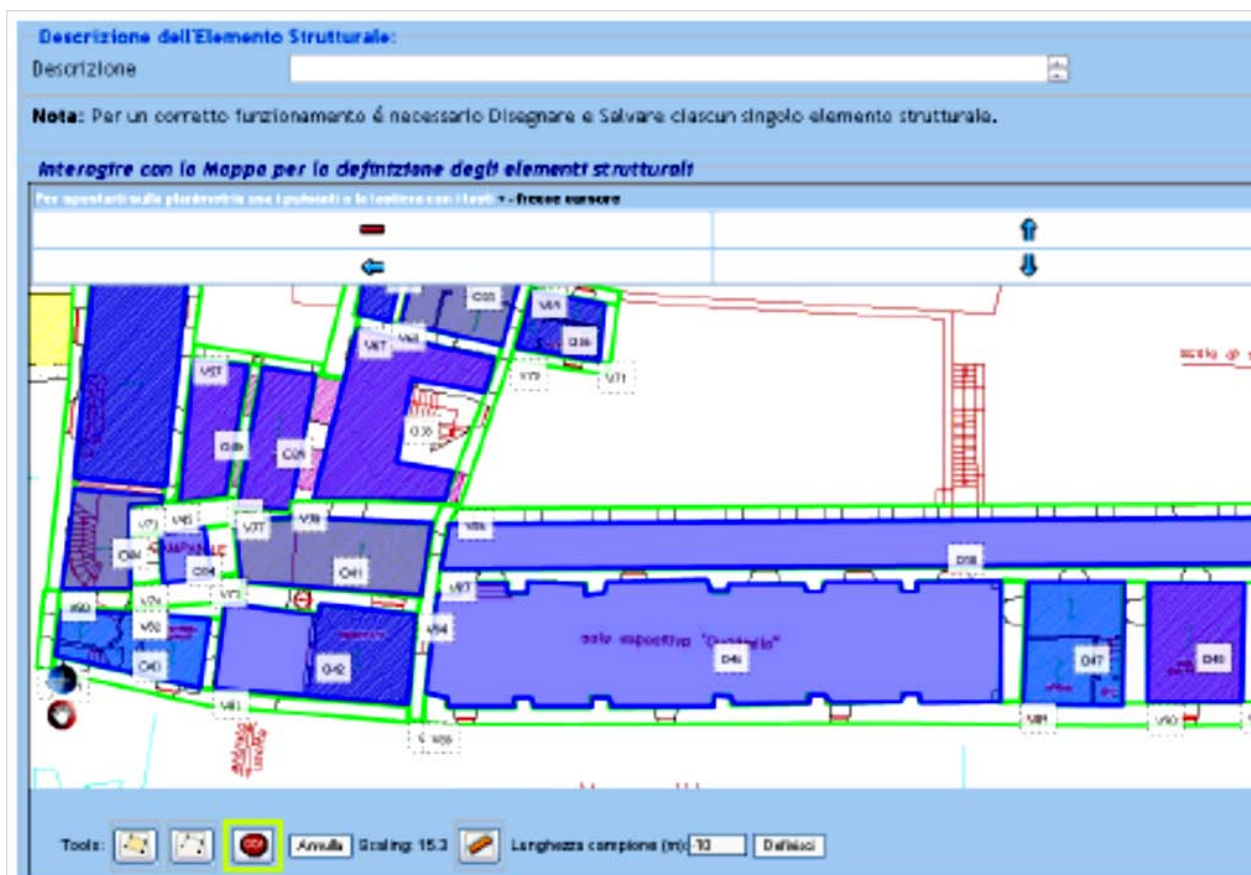


Figura 56: Maschera per la “lucidatura” degli elementi

Nel modulo **Associazione tra Elementi Strutturali Orizzontali e Verticali**, ad ogni elemento orizzontale è possibile correlare le pareti su cui grava, assegnando ad ogni parete una percentuale del carico a seconda dell'orditura del solaio o della tipologia della volta.

Per quanto riguarda gli elementi verticali occorre ed è possibile definire:

Lunghezza della parete (m): è un campo numerico in cui viene riportata la lunghezza dell'elemento calcolata direttamente dal SIVARS. Il campo è modificabile, consentendo una possibile correzione del valore.

Ispezionabilità: con tre possibili scelte (*ispezionabili, parzialmente ispezionabile, non ispezionabile*).

Orientamento delle pareti (gradi sessagesimali): viene riportata l'inclinazione della parete con approssimazione al grado calcolata direttamente dal SIVARS; il campo è modificabile per eventuali correzioni.

Baricentro: vengono riportate le coordinate del baricentro individuate direttamente dal SIVARS. Il valore è modificabile.

Numero delle aperture e lunghezza complessiva delle aperture dell'elemento considerato.

Altezza sottofinestra e Altezza soprafinestra dell'elemento considerato, dati necessari per una corretta determinazione della massa. Nel caso di situazioni disomogenee è necessario inserire un valore medio.

La **Tipologia dell'Elemento Strutturale** si assegna con un menù a tendina in cui viene riportato elenco delle tipologie murarie proposte nella Tabella 11.D.1 dell'Allegato 11.D. dell'OPCM 3274/03 ss.mm.

Si sottolinea che per gli elementi verticali è altresì possibile inserire delle informazioni aggiuntive (facoltative) relativamente alla tecnica muraria attivando il pulsante "tecnica costruttiva" a lato dell'elenco principale. I campi previsti sono i seguenti:

Elementi costitutivi:

1. Materiale: inserire litotipo prevalente o la tipologia di blocco artificiale;
2. Lavorazione: *assente, sbazzati, a spigoli finiti*;
3. Dimensione: diagonale dell'elemento;
4. Stato di conservazione e qualità: *ottimo, medio, pessimo*.

Malta:

1. Tipo: malta di calce, *malta idraulica, malta bastarda, malta di cemento, ecc.*;
2. Funzione: *allettamento, stilatura*;
3. Stato di lavorazione e qualità: *ottimo, medio, pessimo*;
4. Stato di conservazione e resistenza: *incoerente, friabile, tenace*.

Posa in opera degli elementi:

1. Apparecchiatura: *disordinata, a corsi regolari, a corsi suborizzontali*;
2. Posa degli elementi: *casuale, regolare*;
3. Zeppe o scaglie: *in pietra, in mattoni*;
4. Ricorsi o listatura: *in mattoni a tutto spessore, in c.a. a tutto spessore, ecc.*

Sezione trasversale:

1. Spessore totale: in metri;
2. Paramento esterno: in metri;
3. Paramento interno: in metri;
4. Presenza di vuoti significativi: si/no;
5. Presenza di diafani: si/no;
6. Tipologia: *ad un paramento, a due paramenti accostati, a tre paramenti*.

Collegamenti tra le pareti murarie (martelli):

1. Tipologia: collegamenti *efficaci* o *inefficaci*;
2. Differente tipologia dei muri di spina: si/ no;
3. Frequente presenza di catene: si/ no.

Collegamenti tra le pareti murarie (angolate):

1. Elementi costitutivi: analoghi alla muratura o differenti;
2. Tipologia: collegamenti *irregolari* o *regolari*.

Presenza di intonaco:

1. Spessore totale (paramento interno): in metri;
2. Spessore totale (paramento esterno): in metri;
3. Stato di conservazione: *rigonfiamento, presenza di umidità, presenza di fessurazioni, buono.*

Per quanto riguarda gli elementi orizzontali:

Descrizione: è un campo facoltativo nel quale possono essere inseriti informazioni peculiari dell'orizzontamento considerato.

Ispezionabilità: come per gli elementi verticali (*ispezionabili, parzialmente ispezionabile, non ispezionabile*)

Area di superficie (m²): viene calcolata in automatico dal SIVARS ma il campo è modificabile.

Peso proprio (kN/m²): Con riferimento alla Combinazione dell'azione sismica con le altre azioni (NTC 2008) tale valore rappresenta G1 + G2. Tale valore è difficilmente tabellabile, per la varietà di orizzontamenti presenti nel costruito storico pertanto va inserito dall'utente a seguito di un'analisi dei carichi.

Carico variabile (kN/m²): si deve inserire il valore più significativo dei carichi variabili (nel caso di simultanea presenza di più carichi variabili), secondo le indicazioni delle NTC 2008.

Coefficienti di combinazione: riportati nella Tabella 2.5.I della NTC 2008.

Baricentro: vengono riportate le coordinate del baricentro individuate direttamente dal SIVARS.

Tipologia dell'Elemento Strutturale: è disponibile un'ampia gamma di tipologie:

- *Solaio ligneo a semplice orditura*
- *Solaio ligneo a doppia orditura*
- *Solaio ligneo misto*
- *Solaio in profili metallici e voltine in laterizio*
- *Solaio latero-cementizio*
- *Solaio in conglomerato cementizio (pieno)*
- *Volte strutturali a botte*
- *Volte strutturali a crociera*
- *Volte strutturali a padiglione*
- *Volte strutturali a vela*

Gli **Elementi di Copertura** vengono trattati allo stesso modo degli elementi orizzontali, cambiano solamente le **Tipologie**:

- *Copertura lignea;*
- *Copertura in acciaio;*
- *Copertura in conglomerato cementizio.*

Per ogni elemento strutturale è possibile associare delle vulnerabilità. Si elencano brevemente.

Per gli **Elementi Verticali** sono presi in considerazione:

- *Carenza di collegamento fra le pareti ortogonali;*

- *Architravi con resistenza flessionale inadeguata;*
- *Presenza di elementi strutturali spingenti.*

Per gli **Elementi Orizzontali** sono presi in considerazione:

- *Carenza del collegamento fra solai e pareti;*
- *Manca di rigidità di piano.*

Per gli **Elementi di Copertura** sono presi in considerazione:

- *Carenza del collegamento fra copertura e pareti;*
- *Assenza di controventamento di falda;*
- *Scadente qualità delle unioni.*

Per ogni elemento è possibile individuare il **meccanismo di danno** che, eventualmente, si è rilevato.

Per gli **orizzontamenti**:

- *Collapsi locali dell'impalcato o della volta;*
- *Danno alle volte per rotazione delle imposte;*
- *Danno alle volte per deformazione di piano;*
- *Rottura fragile;*
- *Sfilamento testa delle travi e/o martellamento;*
- *Rottura dell'eventuale irrigidimento di piano;*
- *Presenza di degrado abiotico;*
- *Presenza di degrado biotico;*
- *Danneggiamento in chiave delle voltine in laterizio;*
- *Ossidazioni;*

- *Alveorizzazione degli elementi;*
- *Sfondellamento degli elementi in laterizio;*
- *Espulsione del copriferro.*

Viene inoltre richiesto di esprimere un giudizio sull'**estensione del danno**, secondo tre livelli:

- *con numero di elementi minori di 1/3 del totale;*
- *con numero di elementi compreso tra 1/3 e 2/3 del totale;*
- *con numero di elementi maggiore di 2/3 del totale.*

Cause Estrinseche del Danno: è richiesto all'utente di individuare la causa del danneggiamento rilevato (*eventi sismici, frane/alluvioni, scoppi/incendi, azioni antropiche, spinte statiche, cedimenti di fondazione, non valutabile*).

Per gli **Elementi Verticali:**

- *Ribaltamento delle pareti (fuori piombo);*
- *Instabilità verticale delle pareti (spanciamento);*
- *Rottura a flessione delle pareti;*
- *Taglio nelle pareti: maschi;*
- *Taglio nelle pareti: architravi e muratura sovrastante;*
- *Traslazione verticale;*
- *Scorrimento di piano.*

Tipologia del Danno: *lesioni isolate o lesioni diffuse.*

Livello di Attivazione (o evoluzione) del Meccanismo di Danno: dovrà essere valutato in accordo con la scala EMS98 che prevede 5 livelli oltre al danno nullo: *lieve, medio, grave, molto grave, collasso.*

Cause Estrinseche del Danno: come per gli elementi orizzontali.

Per gli Elementi di Copertura il **Meccanismo di Danno** che, eventualmente, si è rilevato va individuato tra i seguenti:

- *Rottura fragile;*
- *Sfilamento testa delle travi e/o martellamento;*
- *Rottura dell'eventuale irrigidimento di piano;*
- *Presenza di degrado abiotico;*
- *Presenza di degrado biotico;*
- *Rottura localizzata in corrispondenza dei nodi;*
- *Rotazioni fuori del piano di appartenenza della struttura.*

Poi allo stesso modo delle strutture orizzontali richiesto di esprimere un giudizio su **Estensione del Danno** e **Cause Estrinseche del Danno**.

È possibile stampare moduli con le informazioni inserite per eseguire controlli.

Riepilogo e calcolo Is (Figura 57) sono riportati tutti i risultati intermedi a livello di ogni singolo piano che vengono utilizzati per il calcolo dell'indice di sicurezza. In fondo alla maschera sono riportati due pulsanti: "*Calcola l'indice di sicurezza*" che permette di calcolare l'indice di sicurezza e "*Memorizza il valore calcolato*" che fissa automaticamente la data in cui viene calcolato l'indice di sicurezza.

Nella maschera **Rettifica dell'Indice calcolato** sono riportati dei dati relativi ai risultati della verifica LV1 e la possibilità di inserire un nuovo indice di sicurezza ottenuto attraverso un metodo alternativo all'approccio semplificato proposto dalle Linee Guida. La natura della correzione dovrà essere motivata nell'apposito campo note.

Denominazione del Bene: Complesso monumentale di Santa Maria delle Monache

Caratteristiche dell'immobile:

Superficie coperta (m ²)	1975	Altezza di gronda (m)	23
Numero piani seminterrati	0	Numero piani fuori terra	3

Parametri di Calcolo

Massa sismica totale (kg)	17925270,04	C(T)	2,3804
Periodo dell'Edificio (s)	0,5251	Fattore di Importanza	1,2
Probabilità di Eccedenza	0,065		

Calcola Parametri dell'intero Modello

Strutturazione del Piano 2

Numero del Piano	2	Altezza di Interpiano	2,7 (m)	Descrizione	Piano terzo
Tipologia Elemento:		c		Numerosità:	23
Tipologia Elemento:		v		Numerosità:	45

Area In X (m ²):	272,572	Area In Y (m ²):	455,565	N° Maschi X:	75	N° Maschi Y:	103
Centro rig. X (m):	36,841	Centro rig. Y (m):	40,578	Bar.Masse X (m):	39,54	Bar.Masse Y (m):	41,891
Eccentricità X(m):	2,699	Eccentricità Y (m):	1,313	Dist. piano X (m):	54,097	Dist. piano Y(m):	30,361
β_x :	1,09	β_y :	1,25	μ_x :	0,83	μ_y :	0,8
ϵ_x :	1	ϵ_y :	1	σ_0 (N/m ²):	68114,315	T_{dx} (N/m ²):	34371,662
τ_{dy} (N/m ²):	34791,404	$F_{SLU X}$ (N):	7134004,287	$F_{SLU Y}$ (N):	10144282,689	A_{SLU-I} (m/s ²):	1,129

Indice di Sicurezza

Indice di Sicurezza I_s :

Data di calcolo:

Calcola l'Indice di Sicurezza

Memorizza il valore calcolato

Figura 57: il modulo “Riepilogo e calcolo Is”

5.2 La campagna di verifiche della vulnerabilità sismica a scala LV1

L'Autore è stato accreditato come verificatore presso il SIVARS (Figura 58), ed insieme al gruppo di lavoro sono stati eseguiti i sopralluoghi, inseriti i dati richiesti ed effettuata la verifica sismica.

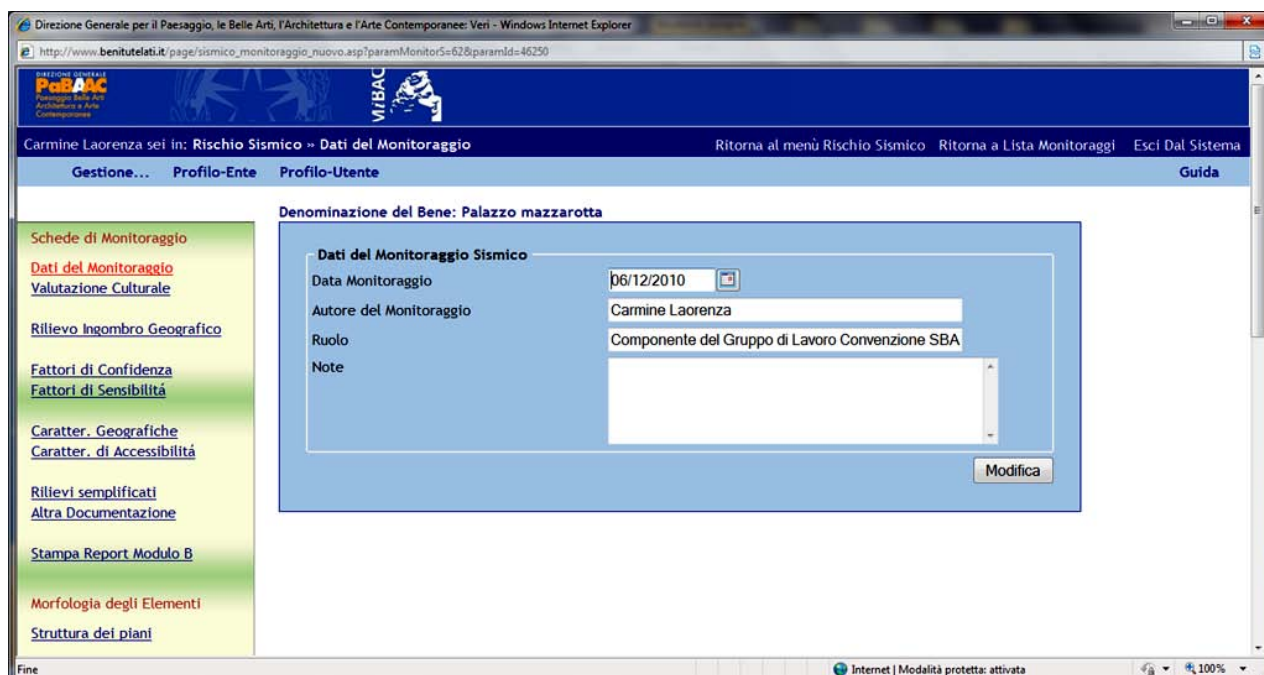


Figura 58: Una maschera del Sistema Informativo del PaBAAC

Contestualmente ed a sostegno delle verifiche sono stati predisposti [25]:

- Una **Relazione Generale** sull'edificio, contenente un capitolo di relazione storico - critica, con l'identificazione del manufatto e di eventuali elementi di pregio (apparati decorativi fissi, beni artistici mobili) che possono condizionare il livello di rischio, una descrizione della costruzione allo stato attuale, l'evoluzione della fabbrica, la conoscenza del sottosuolo e delle strutture di fondazione con riferimento anche alle variazioni avvenute nel tempo ed ai relativi dissesti. Il secondo capitolo descrive gli aspetti strutturali rilevanti in prospettiva sismica e di conservazione, con la descrizione del livello di conoscenza raggiunto e gli aspetti strutturali per la conservazione e la salvaguardia sismica;
- I grafici con il rilievo del **Quadro Fessurativo**.

5.2.1 Il Castello di Gambatesa

Castello Di Capua (Figura 59) è situato ai margini del centro storico in direzione nord della cittadina di Gambatesa. Tipico fortilizio dell'epoca medievale a pianta di forma quadrata, è oggi il risultato di una serie di corpi aggiunti nel tempo, ma soprattutto, di trasformazioni avvenute dopo il terremoto che scosse il centro abitato nel 1456.



Figura 59: Castello Di Capua in Gambatesa

Il castello, nato per scopi difensivi, nel rinascimento divenne dimora dei signori del feudo di Gambatesa, la famiglia Di Capua. In questi anni una serie di migliorie architettoniche trasformano gli ambienti del secondo piano in sale di rappresentanza: un atrio molto accogliente in cui si aprono le porte del salone e di altri ambienti minori. In tutto il piano sono presenti gli affreschi di epoca cinquecentesca opera di Donato da Copertino e di stile manierista.

Oltre agli affreschi ed al portale originale in legno, altro elementi di pregio è sicuramente il portale del secondo piano al quale si accede attraverso una scala esterna a tre rampe,

costituito da una successione di elementi bugnati caratterizzati in chiave da un concio emergente una sagoma a punta.

Il castello presenta una forma quadrangolare i cui lati sono pari a circa 35 m x 22 m; non è inglobato all'interno degli aggregato urbani adiacenti, pur trovandosi all'interno del centro urbano. Nonostante oggi risulti essere una struttura isolata, da una serie di testimonianze raccolte possiamo affermare che si tratta di un organismo che ha conosciuto varie fasi di accrescimenti. Inoltre nel restauro eseguito negli anni '80 sono state eliminate una serie di superfetazioni che hanno portato ad una vera e propria "liberazione" del castello stesso. Il prospetto che affaccia sulla piazza, dove c'è l'ingresso principale, ha un'altezza pari a circa 18 m; su di esso si innesta una scala esterna a tre rampe che porta all'ingresso del piano nobile. Sul lato prospiciente la Valle Tappino si notano, ai due lati, le torri quadrangolari che poggiano le proprie fondamenta sul costone tufaceo e la copertura a terrazza che termina con una serie di merli, eseguiti durante il restauro. Tutti i lati, ad eccezione di quello sulla piazza, sono contrassegnati da una serie di contrafforti. L'altezza di interpiano degli ambienti interni è di circa 5 m al piano terra, le vecchie stalle; di circa 3 m nei piani superiori. L'altezza di gronda è di circa 20.8 m.

Il nucleo originario del castello è senza dubbio la torre quadrangolare inglobata nel prospetto che si affaccia sulla piazza. Solo successivamente, una serie di aggiunte e di trasformazioni hanno portato la fabbrica ad assumere la conformazione attuale.

Le trasformazioni più radicali si ebbero però dopo il 1484 e, probabilmente, durante la prima metà del sec. XVI quando il feudo fu affidato ai signori della Famiglia Di Capua (Andrea e Ferrante, Duca di Termoli). In questo periodo fu realizzato sul versante Nord un corpo di fabbrica avanzato che, chiudendo le due ali preesistenti, inglobò completamente il nucleo originario; furono apportate varianti interne ed esterne e le facciate si arricchirono di nuove aperture con pregevoli incorniciature in pietra. Un ciclo di affreschi che ricopre quasi completamente il primo piano del Castello costituì sicuramente il tocco finale di questo rinnovamento, essendo datato al 1550. Gli affreschi rappresentano senza alcun dubbio l'aspetto più rilevante di questo straordinario complesso, contribuendo a smentire una ipotesi già consolidata che voleva il Molise del tutto carente di valori artistici rinascimentali.

Il fortilizio venne ampliato sul lato prospiciente la piazza, con un nuovo corpo di fabbrica innestato sulla vecchia struttura e allineato, a sinistra, all'antica torre quadrangolare. In questi anni furono sicuramente apportate anche delle modifiche interne per garantire una migliore distribuzione degli ambienti interni.

Il terreno è classificato di tipo A, come risulta dalla microzonazione sismica della Regione Molise, e come si vede chiaramente dal banco tufaceo affiorante, che tra l'altro fa parte integralmente del castello in quanto il piano seminterrato in parte è costituito da vani scavati nel tufo.

Gli elementi a disposizione per la conoscenza del manufatto sono i seguenti [26]:

- Rilievi geometrico completo degli elementi portanti verticali;
- Ricerca storica;
- Testimonianza dei custodi presenti al momento degli interventi.

La ricerca storica ha evidenziato dei trascorsi complessi a causa delle numerose modifiche subite dalla struttura.

Le indagini hanno evidenziato in particolare un intervento di recupero statico e funzionale nella prima metà degli anni '80, durante il quale sono stati eseguiti i seguenti interventi:

- sostituzione di tutti i solai;
- operazioni abbattimento parziale di superfetazioni degli ultimi anni;
- esecuzione di un rinforzo locale delle torri quadrangolari presenti sul costone, mediante iniezioni e inserimento di tiranti per frenare lo scivolamento a valle;
- ristilatura dei giunti.

Di notevole aiuto è stato uno dei custodi del castello che con la sua testimonianza ha fornito elementi essenziali al percorso della conoscenza del manufatto. In dettaglio:

- I solai, originariamente in legno sono stati sostituiti con solai prefabbricati a camera d'aria e getto di soletta armata.

- Durante l'esecuzione di una breccia in un muro per l'installazione della vasca antincendio, gli operatori trovarono estremamente difficoltoso proseguire. Da ciò si può dedurre che la qualità della malta è buona.
- Ricorda l'esistenza di un arco, esterno all'edificio, che collegava il castello a quella che oggi è una costruzione privata. La posizione dell'arco è riportata in Figura 60.

Quest'ultima notizia ha ulteriormente confermato la complessità dell'edificio e ci ha portato ad intraprendere metodi propri del Restauro Architettonico per approfondire la conoscenza sugli accrescimenti. In modo particolare sono state eseguite Analisi geometrico-proporzionale, metrologica e degli allineamenti [26].

Il sopralluogo ha portato i seguenti risultati:

- La presenza diffusa di pareti senza intonaco ha consentito la classificazione della muratura.
- In molti punti si è potuto notare dove i cantonali sono ben ammorsati e dove le pareti dei corpi aggiunti sono accostate all'organismo esistente.
- Si è potuto notare che le piattabande in pietra non sono ben ammorsate, mentre molte altre sono ad arco.
- Si è potuta determinare la tipologia fondale, di tipo diretto in quanto (Figura 60) in alcuni punti le pareti poggiano sul banco tufaceo affiorante.

Le tipologie murarie riscontrate sono due: la prima, che caratterizza la parte più bassa del castello, che è anche la più antica, consiste in una muratura in pietra sbozzata, di media pezzatura, disordinata, con posa degli elementi prevalentemente orizzontale e senza la presenza di zeppe e scaglie; la seconda tipologia muraria, che è stata utilizzata invece per la parte più alta del castello e quindi più recente, consiste in una muratura in pietra non lavorata, di media-piccola pezzatura, disordinata, con posa degli elementi casuale e con zeppe e scaglie in pietra. Dunque secondo la classificazione delle tabelle C8.A.2.1 e C8.A.2.2 del paragrafo C8.A.2 della Circolare alle NTC 2008 del 2009, la muratura più antica è "*Muratura a conci sbozzati, con paramento di limitato spessore e nucleo interno*", mentre

la seconda tipologia è “*Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)*” (Figura 61).



Figura 60: Castello Di Capua in Gambatesa: Banco di tufo affiorante su cui fondano le pareti ed indicazione dell’arco abbattuto



Figura 61: Castello Di Capua in Gambatesa: le due tipologie murarie, a sinistra la parte antica ed a destra la parte nuova

5.2.2 *Castello Pandone – Venafro (IS)*

Situato a nord-est dell'abitato di Venafro, su una zona dominante, Castello Pandone (Figura 62) viene a ricadere al limite dell'antica centuriazione urbana romana. La scelta del sito, è certamente condizionata da preesistenze molto più antiche, come si desume dagli avanzi di un'opera muraria ciclopica al disotto del mastio.

Punto di riferimento nel territorio, il castello venafrano si pone come elemento fondamentale nel sistema di difesa e di controllo della grande pianura che gli sta di fronte e di tutta l'alta Valle del Volturno.



Figura 62: Castello Pandone in Venafro

Il castello all'inizio del secolo XVI, ad opera di Enrico Pandone, conte di Venafro e Boiano, viene trasformato in residenza di lusso con l'aggiunta di elementi architettonici che ne ingentiliscono l'aspetto esterno, modificandone la forma preesistente. In particolare viene creato il loggiato occidentale e il giardino ad oriente. Il loggiato si sviluppa collegato alla torre nord-occidentale e per questo in pianta assume una forma trapezoidale. Sui due prospetti rivolti verso il borgo e verso l'ampia pianura venafrana si aprono quattro archi a tutto sesto, due per parte, con elementi in pietra lavorata con pregevole tecnica.

Oltre agli elementi puramente architettonici, altri particolari che possono condizionare il livello del rischio è la presenza di affreschi. Si tratta di opere di eccezionale valore storico e documentario non solo per essere gli unici a Venafro e nel territorio circostante a non presentare un carattere sacro, ma soprattutto per essere realizzati con la tecnica poco usuale a rilievo che conferisce loro una dimensionalità diversa. Si tratta della rappresentazione di otto magnifici cavalli in affresco a rilievo, di grandezza naturale, ultima testimonianza della passione che aveva per essi il loro padrone.

Il castello presenta una forma quadrangolare i cui lati sono pari a circa 26 m x 30 m; si tratta di una struttura isolata completamente distaccata dall'aggregato urbano. Sul prospetto che si affaccia sul centro urbano si attestano le due torri circolari che hanno un diametro pari a circa 20 m. La terza torre invece, quella quadrangolare, ha i lati pari a circa 10 m. Presenta quattro piani fuori terra per un'altezza di gronda media pari a circa 27.2 m; l'altezza di interpiano degli ambienti interni è di circa 4 m nei piani nobili, di circa 3 m nei piani superiori.

L'edificio nei secoli seguenti ha subito un gran numero di interventi che se da un lato hanno apportato modifiche decisamente contrastanti con quella che era la sua specifica funzione, tuttavia sotto certi aspetti ne hanno garantito la conservazione. Dalla prima metà del 1800 il castello cominciò ad essere considerato un semplice edificio da adibire ad abitazioni; fu quindi sottoposto a trasformazioni che non tennero in minimo conto la dignità del luogo, per creare modesti appartamenti rurali.

L'edificio è stato acquisito dal Ministero dei Beni Culturali nel 1979 e successivamente restaurato a cura della Soprintendenza ai beni architettonici del Molise. Nonostante i lavori di restauro siano stati oggetto di controversie e dibattiti tra gli esperti, hanno comunque permesso di far tornare il castello, almeno in parte, al suo antico splendore.

Il terreno è classificato di tipo A, come risulta dalla microzonazione sismica della Regione Molise.

Non si hanno informazioni dettagliate sulle fondazioni, ma data l'epoca della costruzione si assume che si tratti di fondazioni dirette.

La zona è a rischio frana, classificata come R4 rischio elevatissimo. D'altronde la struttura è già stata oggetto di un evento di notevole rilevanza nel 1600.

Gli elementi a disposizione per la conoscenza del manufatto sono i seguenti [26]:

- Rilievi geometrico completo degli elementi portanti verticali;
- Ricerca storica;
- Testimonianza dei custodi presenti al momento dell'esecuzione degli interventi.

In assenza di documentazione la testimonianza dei custodi presenti hanno consentito la scoperta di un intervento di recupero statico e funzionale risalente ai primi anni '80, durante il quale sono stati sostituiti molti dei solai in legno originali.



Figura 63: Castello Pandone in Venafro: particolare della muratura

I solai nuovi sono stati eseguiti senza ammorsamenti alle pareti, né cordoli di coronamento, come era in uso all'epoca in assenza di normativa sismica prescrittiva

L'assenza di documentazione progettuale non ha consentito ovunque l'individuazione dell'orditura del solaio, né di confermarne la tipologia.

I sopralluoghi, grazie all'assenza di intonaco in molte zone, in particolare sulla quasi totalità delle facciate esterne, hanno consentito l'individuazione della tipologia muraria. Si tratta di muratura in pietra calcarea non lavorata, con posa degli elementi casuale e disordinata, con zeppe e scaglie in pietra. Dunque secondo la classificazione delle tabelle

C8.A.2.1 e C8.A.2.2 del paragrafo C8.A.2 della Circolare alle NTC 2008 del 2009, è “Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)” (Figura 63).

I solai più antichi, in legno, sono tutti ispezionabili.

I solai sostituiti con solai in ferro e voltine non sono ispezionabili in quanto nascosti da finti solai lignei a semplice orditura.

Nei piani intermedi sono presenti volte a crociera e a botte.

La copertura è costituita da una struttura in legno non ispezionabile.

A seguito delle informazioni disponibili si assume, a vantaggio di sicurezza che:

- Le volte e tutti i solai sono ovunque non rigidi e non ammorsati alle pareti;
- che nessuna muratura è stata oggetto di interventi di rinforzo;
- le piattabande non sono efficaci.

L'altezza e le orditure dei solai, dove non visibili, sono state determinate mediante progetto simulato.

5.2.3 *Il Complesso monumentale di Santa Maria delle Monache di Isernia*

Il complesso monumentale di Santa Maria delle Monache (Figura 64), è situato nel centro storico della cittadina di Isernia. E' un ex convento, oggi sede della Soprintendenza, del Museo Archeologico e della Biblioteca.

Il complesso è costituito dai resti della vecchia chiesa, oggi trasformata in area espositiva esterna, non aperta al pubblico a causa dei prolungati lavori di restauro, e dal convento che ospita in sé tutte le attività prima elencate.



Figura 64: Complesso Monumentale S. Maria delle Monache in Isernia

Per la sua conformazione architettonica, il complesso rappresenta di per sé un bene artistico di estremo valore. La presenza delle vecchie mura poligonali, la lettura delle diverse stratificazioni, gli apparati decorativi del campanile e dei resti della chiesa rappresentano elementi di pregio che condizionano fortemente il livello di rischio, aumentato poi dalla presenza dei reperti del museo archeologico e dagli archivi della

Soprintendenza. Altri beni artistici sono sicuramente i testi conservati all'interno della Biblioteca.

Il complesso di Santa Maria delle Monache si presenta abbastanza articolato; in particolare è possibile scomporre il fabbricato in due macroblocchi: il primo antistante Piazza Santa Maria, che ospita gli uffici della biblioteca e parte degli uffici della Soprintendenza, che si accosta ai resti della vecchia chiesa; ed un secondo che invece si sviluppa lungo Corso Marcelli e che ospita al suo interno i magazzini e le sale del Museo Archeologico.

Il primo blocco ha forma trapezoidale i cui lati misurano rispettivamente: 52.20 m, 19 m, 50 m e 27.5 m; al cui interno è inglobato il campanile che ha un'altezza pari a circa 19 m. Il secondo blocco invece ha una forma rettangolare i cui lati misurano rispettivamente 10.50 m e 55 m.

I piani fuori terra sono 3, con un'altezza di interpiano che varia tra i 3 m ed i 4 m, a seconda della funzione ospitata.

Alcuni documenti pongono la sua costruzione tra il 591 e il 641, voluta da Arechi I, prima della realizzazione della chiesa di Santa Sofia a Benevento, costruita da Arechi II verso il 762. Il *Chronicon Vulturense* conferma questa datazione, indicando la chiesa come già esistente nel 738.

Informazioni più precise si hanno sulle trasformazioni dell'edificio nel X secolo, attraverso due iscrizioni: una è incisa sul campanile della chiesa e riferisce che Landenolfo, figlio del signore Landolfo conte, ha eretto l'edificio dalle fondamenta; l'altra è sul portale della biblioteca comunale e indica Landenolfo come il committente della costruzione di una parte della chiesa, come conseguenza anche della riorganizzazione urbanistica del nucleo longobardo.

Nuove modifiche ci furono nel XII secolo; a questo periodo, e dunque in conseguenza alla protezione imperiale di Federico II, possiamo far risalire quegli interventi architettonici che in larga misura caratterizzano gli attuali prospetti esterni della chiesa e la sopraelevazione del campanile.

Similmente del XIII, senza escludere la riutilizzazione di pezzi antichi, appaiono la bifora e le monofore del campanile con i relativi capitelli. La sopraelevazione, o comunque la sua ridefinizione architettonica, dovette essere conseguenza dell'ampliamento della chiesa e del convento che cominciava ad inquadrarsi in una nuova dimensione urbanistica, la quale trovò definitiva sistemazione alla fine del XIII secolo.

Nulla sappiamo delle trasformazioni successive, certo è che nel XVIII secolo il complesso monastico si trovava profondamente trasformato; il convento con le fattezze che ritroviamo ancora oggi, il campanile completamente inglobato nel complesso.

Ultimo restauro noto è quello del 1972, dove la Soprintendenza ha fatto tutta una serie di interventi atti a risanare la struttura dopo il bombardamento subito nel II conflitto mondiale.

Oggi invece sono sottoposti a lavori di manutenzione le sale adibite a museo archeologico, con un intervento di consolidamento delle capriate lignee messe in opera con il restauro del 1972.

La tipologia muraria, secondo la classificazione delle tabelle C8.A.2.1 e C8.A.2.2 del paragrafo C8.A.2 della Circolare alle NTC 2008 del 2009, è "*Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)*".

Le strutture orizzontali, quasi tutte ispezionabili, sono costituite per la maggior parte da solai in putrelle e voltine. Sono presenti volte a crociera e a botte nei piani intermedi.

La copertura è sorretta da una struttura in legno.

La presenza di strutture orizzontali in acciaio ha quindi restituito un modello con solai deformabili, mentre l'analisi delle testimonianze fotografiche dei lavori di restauro effettuati nei primi anni ottanta ha evidenziato l'assenza di connessioni tra gli elementi.

Il terreno è classificato di tipo B, come risulta da indagini condotte nelle vicinanze. Gli scavi archeologici effettuati, sia in adiacenza che al disotto dell'edificio, evidenziano che si tratta di fondazioni dirette.

Non è stato possibile accedere a dati relativi il rischio di frane. È comunque il caso di segnalare la presenza di abbassamenti subiti dalla struttura nel tempo, che hanno reso i pavimenti della zona prospiciente alla scarpata inclinati verso valle.

Gli elementi a disposizione per la conoscenza del manufatto sono i seguenti [26]:

- Rilievi geometrico completo degli elementi portanti verticali;
- Ricerca storica
- Testimonianza dei custodi.

A seguito delle informazioni disponibili si assume che:

- i solai di piano non sono rigidi, né ammortati alle pareti;
- che il solaio di copertura non è rigido, né ammortato alle murature;
- che le piattabande non sono efficaci.

L'altezza e le orditure dei solai, sono state determinate mediante progetto simulato.

L'adozione di solai non rigidi e non ammortati non hanno reso necessaria la suddivisione in due blocchi del complesso, in quanto in ogni caso il comportamento dei singoli maschi murari è indipendente dagli altri.

5.2.4 Palazzo Japoce a Campobasso

Palazzo Japoce (Figura 65) è situato nel centro storico di Campobasso, in via Salita di San Bartolomeo, su di una cresta con accessibilità ridotta ai soli pedoni.

L'edificio in questione è inserito all'interno di un aggregato urbano di non facile comprensione, dovuta per lo più ad una ridotta conoscenza degli accrescimenti dell'aggregato stesso e dall'impossibilità di ispezionare i fabbricati adiacenti.



Figura 65: Palazzo Japoce in Campobasso

Probabilmente il Palazzo nasce come dimora signorile, anche se a supporto di tale ipotesi attualmente abbiamo solo il palazzo stesso. Unico elemento di pregio è il portale principale. A condizionare il livello di rischio sono i documenti raccolti e conservati presso gli archivi della Soprintendenza all'interno dello stabile.

Palazzo Japoce, data la complessità dell'aggregato in cui è inserito, non si presta facilmente ad una descrizione di natura stereometrica. I due fronti liberi che si affacciano

sulla piazzetta antistante via Salita di San Bartolomeo sono di circa 12 m e 16.50 m rispettivamente.

La restante parte del complesso, costituita da una stecca perpendicolare alla via Salita di San Bartolomeo, si sviluppa invece per circa 55 m.

In media sono presenti 3 piani fuori terra; l'altezza media di interpiano è di circa 3.2 m, tranne nel piano seminterrato dove l'altezza media è di 3.9 m. L'altezza di gronda è tra i 10 e i 12.80 m.

Le scarse informazioni storiche reperite non ci permettono di fornire indicazioni ben precise circa l'evoluzione della fabbrica e la sequenza delle fasi di trasformazione edilizia. A causa degli interventi che ha subito anche la ricerca di segni particolari interni alla fabbrica non hanno dato alcun risultato.

Le uniche informazioni risalgono alla seconda metà degli anni '90, quando Palazzo Japoce, in seguito al trasferimento degli uffici della Soprintendenza nei propri locali, è stato oggetto di restauro.

Il terreno è classificato di tipo A, come risulta dalla microzonazione sismica della Regione Molise.

La zona non è a rischio di frane.

Gli elementi a disposizione per la conoscenza del manufatto sono i seguenti [26]:

- Rilievi geometrico completo degli elementi portanti verticali;
- Documentazione fotografica dell'edificio prima degli interventi di recupero;
- Documentazione fotografica degli interventi;
- Testimonianza delle maestranze che hanno seguito gli interventi.

Per la natura degli interventi effettuati sulla fabbrica, in assenza di documentazione progettuale, non si sarebbe potuto procedere alla verifica in assenza di una campagna prove, per la scarsità delle informazioni. Invece le testimonianze degli operatori della Soprintendenza che hanno seguito i lavori e dell'Impresa che li ha eseguiti, mettendo a

disposizione il loro repertorio fotografico, ci hanno consentito di tracciare un percorso per definire il livello di conoscenza necessario per le verifiche.

La situazione attuale è riportata nelle Figure 66 e 67



Figura 66: Interno di Palazzo Japoce allo stato attuale



Figura 67: Interno di Palazzo Japoce allo stato attuale

Le foto della fabbrica prima degli interventi oltre che i sopralluoghi, hanno consentito l'individuazione di due tipologie murarie, una facente parte delle facciate esterne di migliore qualità, l'altra facente parte delle murature interne di qualità più scadente. Secondo la classificazione delle tabelle C8.A.2.1 e C8.A.2.2 del paragrafo C8.A.2 della Circolare alle NTC 2008 del 2009, la muratura esterna è *"Muratura in pietre a spacco con buona tessitura"* e la muratura interna è *"Muratura a conci sbozzati, con paramento di limitato spessore e nucleo interno"*. (Figura 68)



Figura 68: Palazzo Japoce in Campobasso: Le due tipologie murarie, a sinistra la tipologia esterna ed a destra la tipologia interna

Le due murature essendo costruite in momenti diversi si presentano non ammorsate fra loro. Tale circostanza è confermata dalle foto storiche. (Figura 69)

L'edificio è stato oggetto di un importante intervento di recupero statico e funzionale.

Gli interventi nel recupero statico e funzionale, iniziati nella seconda metà degli anni '90 e terminati circa 10 anni dopo sono testimoniati dalla documentazione fotografica. Sono elencati di seguito:

- sostituzione di tutti i solai;

- rinforzo locale delle murature a piano terra mediante esecuzione di intonaco armato, di notevoli spessori (Figura 70);
- abbattimento e ricostruzione di parte del muro esterno che si presentava eccessivamente danneggiato;
- operazioni abbattimento parziale e ricostruzione in corrispondenza dei vani, allo scopo di eseguire piattabande in calcestruzzo armato e mazzette, in alcuni casi rinforzate con inserimento di mattoni pieni;
- recupero della struttura in cemento armato eseguita da privati a copertura di un cortile, mediante incamiciatura dei pilastri e sostituzione dei solai;
- rifacimenti di archi, eseguiti in mattoni e di piattabande, eseguite in cemento armato (Figura 70);
- sostituzione di tutte le coperture, sia quelle in legno della struttura in muratura che quella in calcestruzzo armato della struttura nuova, con copertura leggera costituita da capriate in acciaio e lamiera sandwich. (Figura 72)
- Eliminazione di una volta crollata, tra il piano interrato ed il piano terra;
- Esecuzione di un rinforzo locale in calcestruzzo armato nel piano seminterrato a sostegno di una parete interna che presenta un arco di notevole luce;

I solai, originariamente in legno sono stati sostituiti con le seguenti tipologie:

- Solai con putrelle in acciaio e lamiera grecata, senza connettori, e con le travi poggianti su selle Gerber appositamente preparate; (Figura 71)
- Solai in putrelle in acciaio e tavole con camera d'aria con le travi poggianti su selle Gerber appositamente preparate;
- Solai laterocementizi, con nervature costituite da due travetti prefabbricati accostati ed armatura aggiuntiva.

Ovunque è presente soletina armata.



Figura 69: Palazzo Japoce in Campobasso durante gli interventi: le due tipologie murarie. La breccia aperta (segnata nell'ovale) evidenzia la mancanza di ammassamento (foto: Soprintendenza BAP Molise)



Figura 70: Palazzo Japoce in Campobasso: a sinistra rifacimento degli archi, a destra rifacimento delle piattabande ed incamiciatura delle pareti a pianoterra. (foto: Soprintendenza BAP Molise)

Gli ammassamenti alle pareti e i cordoli di coronamento sono presenti, come da prescrizioni di normativa sismica vigente.

Non si hanno informazioni dettagliate sulle fondazioni, ma le testimonianze riportano che si tratta di fondazioni dirette, e oggetto di interventi di rinforzo con cordoli in calcestruzzo armato, da cui poi partivano le armature dell'intonaco armato.



Figura 71: Palazzo Japoce in Campobasso: Uno dei solai nuovi, in acciaio e lamiera grecata. (foto: Soprintendenza BAP Molise)



Figura 72: Palazzo Japoce in Campobasso: La copertura in acciaio e lamiera. (foto: Impresa Macchiarola, Campobasso)

5.2.5 *Palazzo Mazzarotta a Campobasso*

Palazzo Mazzarotta (Figura 73) è situato nel centro storico della cittadina di Campobasso, in una zona a forte pendenza con accessibilità ridotta ai soli pedoni.

L'edificio in questione è inserito all'interno di un aggregato urbano di non facile comprensione, dovuta per lo più ad una ridotta conoscenza degli accrescimenti dell'aggregato stesso e dall'impossibilità di ispezionare i fabbricati adiacenti.



Figura 73: Palazzo Mazzarotta in Campobasso

Il palazzo nasce come stabile religioso; solo nel 1700, a seguito del passaggio della proprietà alla famiglia Mazzarotta, acquisisce alcuni elementi di pregio conseguenti al cambio di destinazione d'uso. In particolare il loggiato ed il portale principale. A

condizionare maggiormente il livello di rischio sono i beni artistici in esposizione nell'area museale e la biblioteca, che attualmente occupano circa la metà del complesso.

Il complesso può essere suddiviso in due blocchi uniti tra loro da un ponte di collegamento (Figura 74). La suddivisione è inoltre giustificata anche da una differente destinazione d'uso dell'edificio stesso. In particolare nel BL1 ha sede il museo archeologico sannitico e la biblioteca; nel BL2 invece troviamo gli uffici della Soprintendenza.

Il BL1 presenta due fronti di circa 22 m ciascuno (sia su via Chiarizia che su vico Pizzo Ferrato). In media sono presenti 4 piani fuori terra e la copertura. L'altezza interna media di interpiano è di circa 3 m; l'altezza media della gronda è di circa 16 m. Il rilievo delle altezze è da intendersi medio a causa della condizione orografica in pendio.

Il BL2 ha il fronte in via Chiarizia pari a circa 10 m, mentre il fronte su vico Pizzo Ferrato è di circa 15 m. Allo stesso modo l'altezze medie di interpiano sono di 3 m; l'altezza media della gronda è pari a circa 16 m.

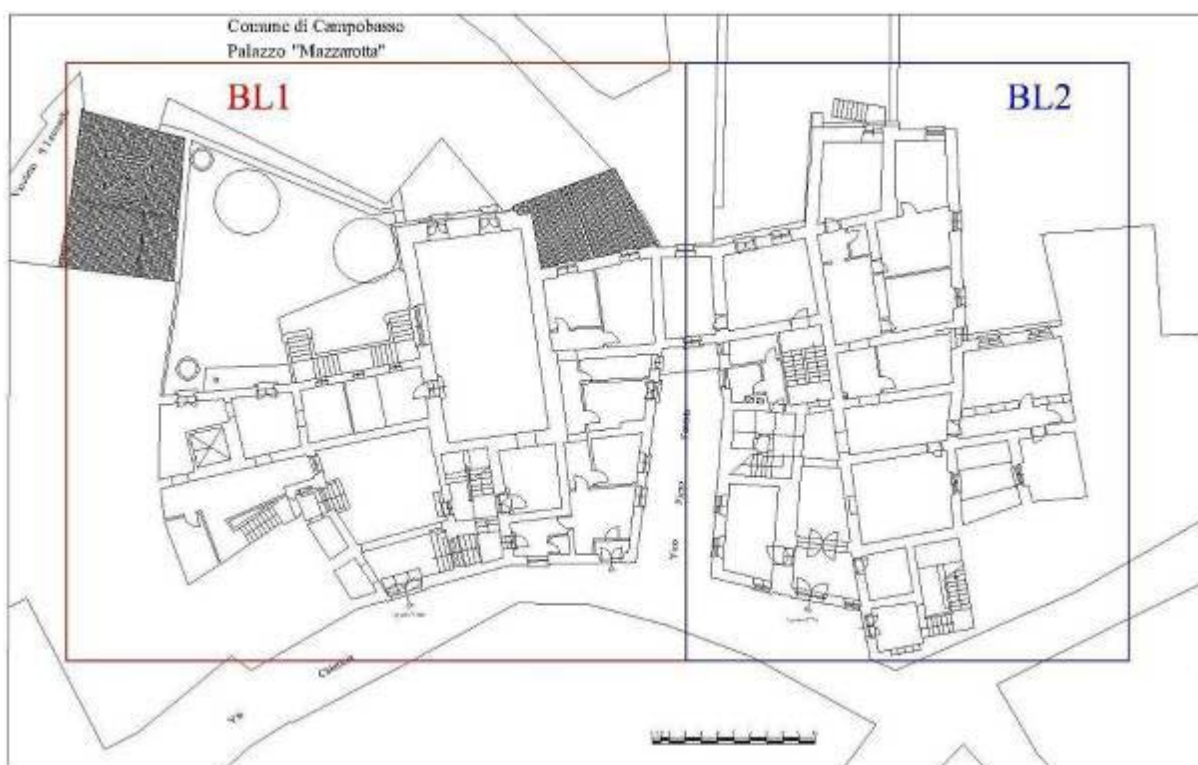


Figura 74: Palazzo Mazzarotta in Campobasso: Suddivisione in blocchi

Le scarse informazioni circa l'accrescimento dell'aggregato urbano nel quale è inserito Palazzo Mazzarotta, non ci permettono di fornire indicazioni ben precise circa

l'evoluzione della fabbrica e la sequenza delle fasi di trasformazione edilizia. La povertà di informazioni archivistiche e bibliografiche hanno portato ad una ricerca di segni interni alla fabbrica. Il Palazzo Mazzarotta risulta essere stato, in passato, proprietà di un ordine o confraternita religiosa, non successivi al XVI sec., come è deducibile dalla croce di Lorena incastonata in uno degli ambienti del piano terra.

Nel 1700 il Palazzo andrebbe identificato in una piccola abitazione che ora risulta inglobata nell'attuale palazzo, appartenente sicuramente ad una famiglia agiata. Il loggiato ed il portale del corpo orientale sono di chiara definizione ottocentesca, mentre la distribuzione ambientale, talora labirintica, rivela un disorganico succedersi di interventi statici ed accrescitivi di più antica derivazione.

Gli elementi a disposizione per la conoscenza del manufatto sono i seguenti [26]:

- Rilievi geometrico completo degli elementi portanti verticali;
- Ricerca storica;
- Documentazione fotografica dell'edificio prima degli interventi di recupero;
- Documentazione fotografica degli interventi;
- Testimonianza delle maestranze che hanno eseguito gli interventi.

L'assenza di documentazione progettuale, assieme all'allestimento del Museo Sannitico nei locali non avrebbe consentito la verifica in assenza di campagna di prove, per la scarsità delle informazioni. Invece le testimonianze degli operatori presenti durante i lavori (Impresa esecutrice e personale della Soprintendenza), ed in alcune situazioni il loro repertorio fotografico, hanno consentito un percorso per definire il livello di conoscenza necessario per le verifiche.

Palazzo Mazzarotta è stato oggetto di un restauro tra il 1979 ed il 1982. Le testimonianze affermano che:

- Sono stati rifatti i solai dei piani intermedi in acciaio e voltine in laterizio, senza ammorsamenti alle pareti né cordoli di coronamento, come era in uso all'epoca, in

assenza di normativa sismica prescrittiva. In alcune zone invece i solai sono latero cementizi con travetti prefabbricati.

- E' stata rifatta la copertura con capriate in acciaio e soletta collaborante in calcestruzzo armato
- Alcune pareti sono state rinforzate mediante iniezioni. (Figura 78)

Le foto della fabbrica prima degli interventi oltre che i sopralluoghi, hanno consentito l'individuazione di due tipologie murarie, una facente parte delle facciate esterne di migliore qualità, l'altra facente parte delle murature interne di qualità più scadente. Secondo la classificazione delle tabelle C8.A.2.1 e C8.A.2.2 del paragrafo C8.A.2 della Circolare alle NTC 2008 del 2009, la tipologia della muratura esterna è una *"Muratura in pietre a spacco con buona tessitura"*, mentre la tipologia della muratura interna è una *"Muratura a conci sbozzati, con paramento di limitato spessore e nucleo interno"*. (figura 75)



Figura 75: Palazzo Mazzarotta: le due tipologie murarie, a sinistra (foto: Soprintendenza BAP Molise) quella interna ed a destra quella esterna

L'analisi delle testimonianze fotografiche dell'edificio prima del restauro ha evidenziato l'assenza di connessioni tra le murature. (Figura 76)

Il terreno è classificato di tipo A, come risulta dalla microzonazione sismica della Regione Molise.



Figura 76: Palazzo Mazzarotta in Campobasso: Assenza di connessione tra le pareti. (foto: Soprintendenza BAP Molise)

Non si hanno informazioni dettagliate sulle fondazioni, tranne alcuni punti in cui affiora la roccia (Figura 77). Si assume dunque che le fondazioni sono dirette. La zona non è a rischio di frane.



Figura 77: Palazzo Mazzarotta in Campobasso: Rocce affioranti



Figura 78: Palazzo Mazzarotta in Campobasso: Esecuzione delle iniezioni. (foto: Soprintendenza BAP Molise)

L'assenza di documentazione progettuale non ha consentito l'individuazione delle pareti rinforzate, né dell'orditura e della tipologia di solaio.

A seguito delle informazioni disponibili si assume, a vantaggio di sicurezza che:

- i solai sono tutti in acciaio, non rigidi e non ammorsati alle pareti;
- che nessuna muratura è stata oggetto di interventi di rinforzo;
- che il solaio di copertura è della stessa tipologia dei solai di piano.
- che le pareti esterne e gli allineamenti interni di spessore maggiore sono in pietre a spacco ed ammorsate tra loro, mentre le pareti interne sono a conci sbozzati e non ammorsate alle pareti esterne.

L'altezza e le orditure dei solai, sono state determinate mediante progetto simulato.

L'adozione di solai non rigidi e non ammorsati non hanno reso necessaria la suddivisione in due blocchi del complesso, in quanto in ogni caso il comportamento dei singoli maschi murari è indipendente dagli altri.

6 Il Convitto Nazionale Mario Pagano

La storia del complesso edilizio che ospita il Convitto Nazionale Mario Pagano [28] ha inizio nel 1874, con la visita a Campobasso del ministro della Pubblica Istruzione, Ruggiero Bonghi, eletto nel collegio di Agnone. Il Ministro visita il Convitto, che allora aveva sede nell'ex convento di San Francesco della Scarpa dei Frati Francescani Conventuali, divenuto ormai un'importante realtà scolastica cittadina, e incoraggia la costruzione di un nuovo progetto.

Nella Figura 79 una immagine del prospetto a inizio XX secolo.

Nel 1876, su proposta di Bonghi viene affidato l'incarico del progetto a Giulio De Angelis.

Quando De Angelis ottiene l'incarico non è ancora diventato un esponente di spicco della cultura architettonica nazionale del secondo Ottocento. Soltanto in seguito realizza importanti architetture come il Teatro Quirino (1882), la Galleria Sciarra (1885) e i Magazzini dei fratelli Bocconi (1885), tutte costruite nella capitale, e significative opere pubbliche come l'edificio della Cassa di Risparmio de L'Aquila (1883), il convitto Regina Margherita di Anagni (1889-90) o il Museo garibaldino di Mentana (1905).

Mostrando tecniche costruttive innovative - come l'uso del ferro e della ghisa, non più utilizzati solo come materiali da nascondere all'interno delle strutture - insieme a un linguaggio cinquecentista di sicuro impatto nell'ambito della cultura nazionale post-unitaria, De Angelis diventa un assoluto protagonista sulla scena romana.

De Angelis sperimenta, e utilizza sovente elementi in ferro e ghisa nelle sue opere, a volte come soluzione strutturale lasciata a vista, a volte come espediente per inedite soluzioni spaziali. E se nelle grandi città l'uso dei materiali nuovi, anche come espressione di un linguaggio moderno, comincia a diffondersi nel corso del secondo Ottocento soprattutto in tipologie architettoniche giovani o reinventate, nei piccoli centri urbani è relegato ancora a piccoli interventi costruttivi come chioschi, padiglioni o casse armoniche. Per tale motivo, la realizzazione del Convitto Mario Pagano di Campobasso - da considerarsi un vero e proprio, seppur difficoltoso, laboratorio di sperimentazione - risulta ancora più significativa, in quanto si trattava del primo complesso ai fini educativi in cui alla severa e austera immagine esterna si contrapponeva la leggerezza di alcuni ambienti interni

concepiti con coperture in ferro e vetro, come la palestra, o con elementi sottili in ghisa per dilatare la percezione dello spazio come nel refettorio.

Dopo varie proposte e modifiche il progetto viene approvato il 18 novembre 1878 dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici e il 5 febbraio 1879 dal Ministero della Pubblica Istruzione.

L'avviso d'asta è datato 23 marzo 1879 e la gara è vinta dall'impresa Ricciardella-Guacci.

Schematicamente, si può affermare che tre sono le fasi realizzative del manufatto [29]:

- il primo lotto, costruito negli anni tra il 1879 e 1883 dall'Impresa Ricciardella;
- il secondo lotto, costruito negli anni tra il 1887 ed il 1899 dall'Impresa Cerio;
- il terzo lotto inizia nel 1900 e completa l'ala che affaccia sull'attuale Corso Bucci.

Le fasi esecutive sono riportate della Figura 80.

Si propongono alcuni dati per rendere l'idea delle dimensioni e dell'importanza odierna dell'opera:

- Il complesso, cortili compresi, copre una superficie di quasi 7000 (settemila) metri quadrati;
- Il volume costruito è di circa 100000 (centomila) metri cubi;
- Il complesso ospita:
 - Il Tribunale Civile di Campobasso;
 - Scuola primaria, scuole secondarie di I e II grado, con alloggi e servizio mensa;
 - Esercizi commerciali.
- Il complesso è occupato, giornalmente, da circa 1000 (mille) persone.

Il complesso è stato oggetto di verifica di vulnerabilità sismica secondo le indicazioni fornite dalle "Linee Guida 2010" [9].

Sono state effettuate le verifiche a taglio dei maschi con il metodo meccanico semplificato previsto per il livello LV1 e sono stati studiati i meccanismi di collasso con l'analisi cinematica prevista per il livello LV2. Lo studio dei meccanismi di collasso è stato esteso a tutte le parti della struttura (Figura 83), considerando anche meccanismi di collasso complessi (Figura 84).

In tal modo si è raggiunto il livello massimo di accuratezza LV3 [29].

Per la definizione dell'organismo strutturale si è partiti dalle risultanze della ricerca storica condotta da un esperto in materia. Data l'importanza del complesso la ricerca è stata molto proficua: sono stati ritrovati:

- Grafici dell'intero complesso e di alcuni particolari costruttivi (nella Figura 81 il grafico del piano terra e nella Figura 82 il progetto del solaio in acciaio del refettorio);
- Relazioni di calcolo delle strutture in acciaio, cioè la copertura e il solaio del refettorio;
- Carteggi tra le amministrazioni coinvolte (Amministrazione del Convitto, Genio Civile, ecc.), relazioni tecniche e/o economiche sullo stato di manutenzione dell'edificio;
- Iconografie (cartoline, foto, rappresentazioni grafiche).

I risultati della ricerca storica sono stati determinanti per la determinazione delle problematiche di carattere statico.

Sono stati eseguiti sopralluoghi accurati, che hanno interessato il complesso nella sua interezza. Ogni locale è stato visitato, compresi lo scantinato e il sottotetto. Dove presenti sono stati smontati i controsoffitti per visionare le volte e i solai.

I sopralluoghi nel sottotetto sono stati estremamente proficui, per diversi motivi: l'assenza di intonaco ed una serie di interventi rimasti incompiuti, che hanno lasciato scassi aperti nelle murature, hanno consentito un rilievo materico e dei dettagli costruttivi minuzioso. L'assenza di interventi di manutenzione, ordinaria e non, hanno consentito il rilievo dell'effettivo stato di degrado delle strutture. In particolar modo si è potuto rilevare l'entità del quadro fessurativo, in termini di estensione e di ampiezza delle lesioni.

È stato implementato un sistema di monitoraggio dell'edificio (Figure 85 e 86), che ha interessato:

- L'ampiezza di alcune fessure, mediante l'installazione di piastrine per le misure al tensotest;
- Gli spostamenti del terreno, mediante l'installazione di tubi inclinometrici;
- La presenza di acqua mediante l'installazione di piezometri.

Il monitoraggio è stato implementato per evidenziare eventuali correlazioni tra la presenza di acqua nel terreno, gli spostamenti del terreno stesso e le ampiezze delle fessure [29].

Per la determinazione delle caratteristiche della muratura e del terreno sono state eseguite:

- Una prova con martinetti piatti doppi per la determinazione dello stato tensionale, della resistenza a compressione ultima e del modulo elastico normale della muratura;
- Uno scavo fondale a sezione obbligata, fino alla profondità di imposta della fondazione;
- Un sondaggio a carotaggio continuo per la determinazione delle caratteristiche del terreno di fondazione, eseguito in occasione dell'installazione dei tubi inclino metrici e dei piezometri.

Inoltre sono disponibili agli atti del Convitto altri rapporti di prova, in particolare:

- Uno studio dei microtremori col metodo di Nakamura;
- Tre relazioni geologiche, prodotte da tre tecnici diversi ed in periodi diversi;
- Una relazione "Determinazione dello stato tensionale e delle caratteristiche meccaniche delle murature in sito" in cui sono riportati i risultati di quattro prove con martinetto singolo e tre prove con martinetto doppio.

Dalla ricostruzione della sequenza costruttiva e dal rilievo dei dettagli costruttivi, il complesso strutturale è stato suddiviso in 5 blocchi, che si presentano sufficientemente omogenei, per tipologia costruttiva ed età di costruzione. La suddivisione in blocchi è riportata nella Figura 87.



Figura 79: Il Prospetto principale del Convitto Nazionale in una foto di inizio XX secolo.

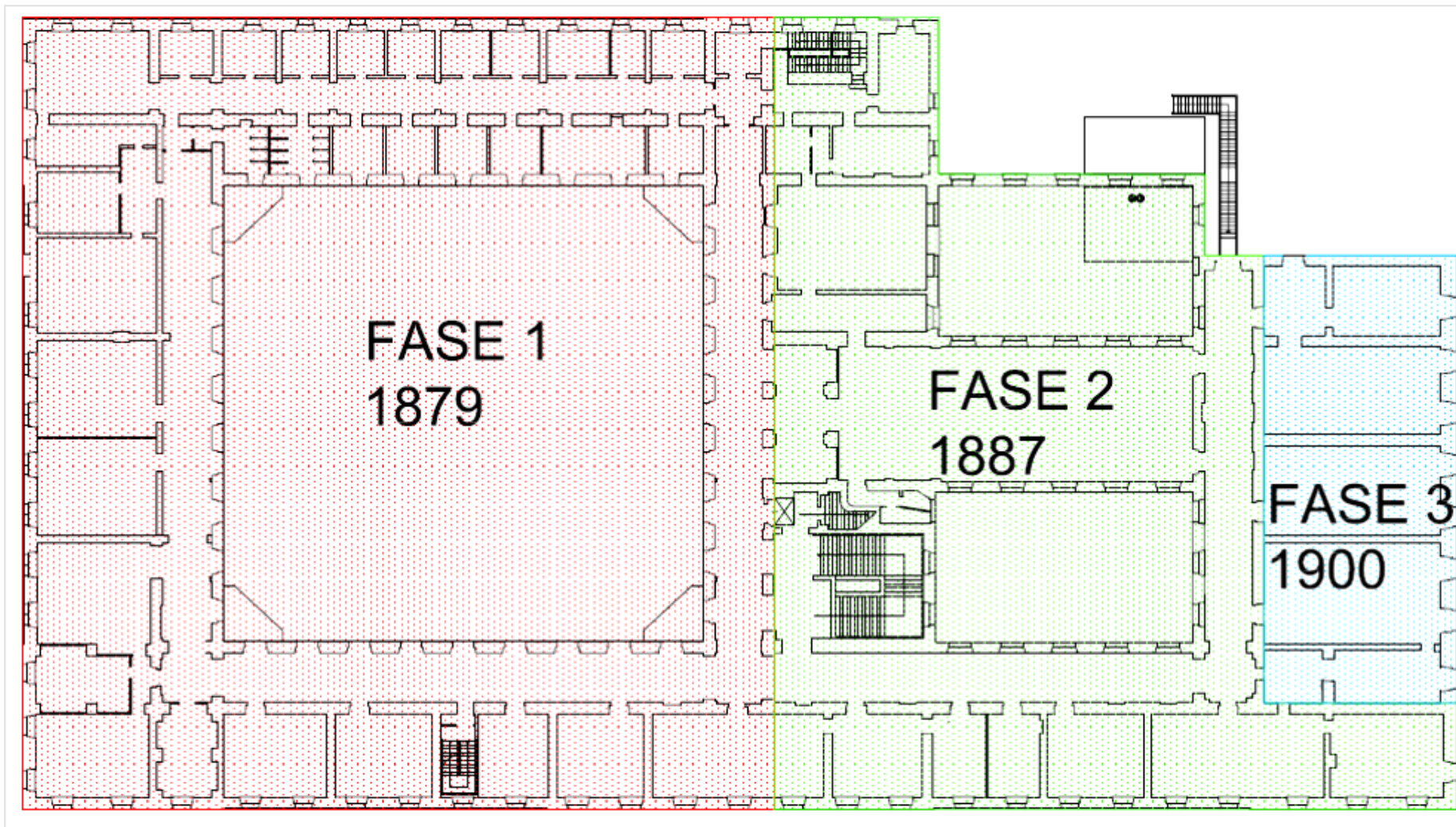


Figura 80: Convitto Nazionale "M. Pagano": Pianta delle fasi costruttive

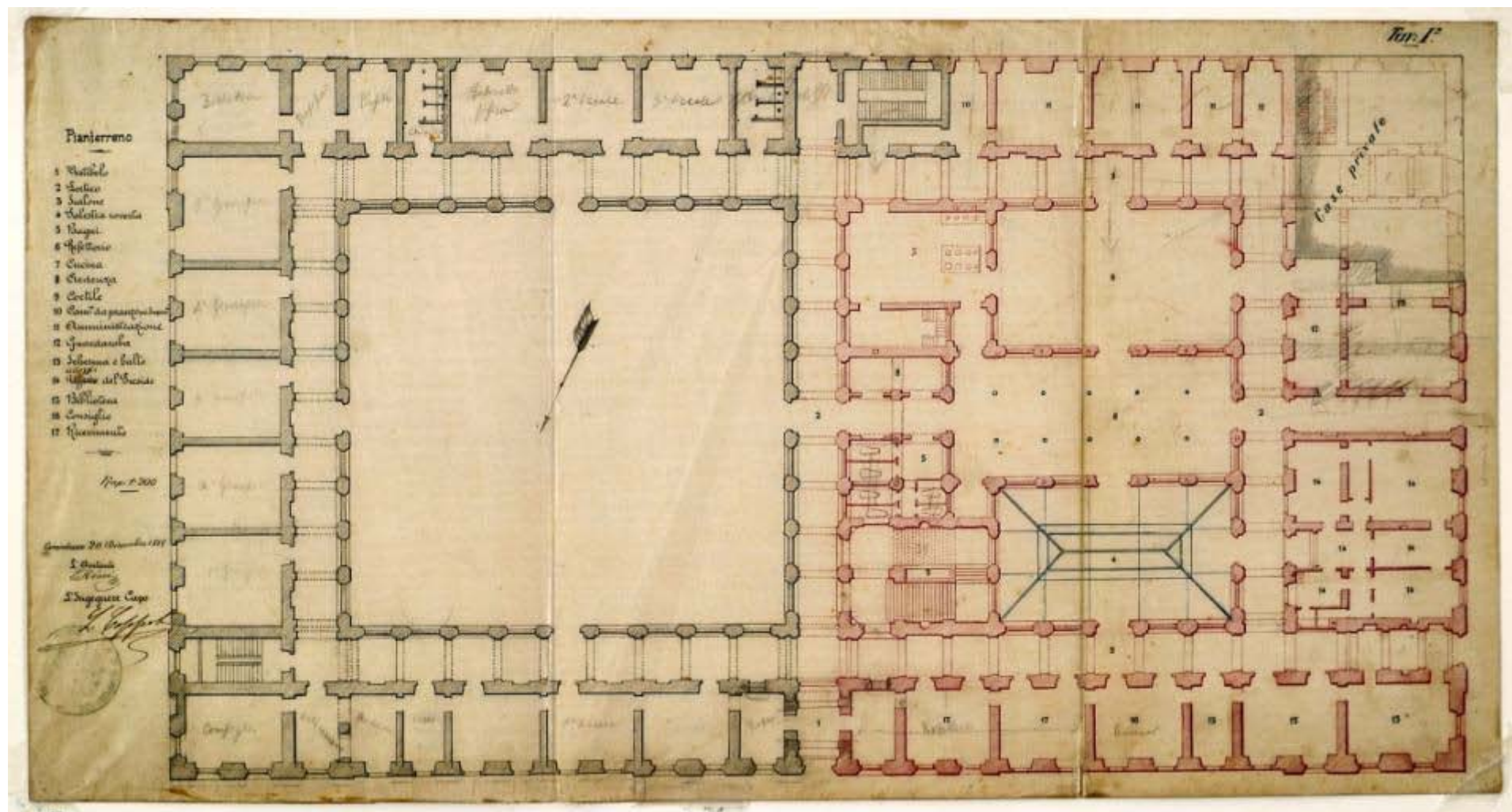


Figura 81: Convitto Nazionale "M. Pagano": Un grafico originale, che rappresenta il piano terra. In grigio il lotto realizzato, in rosso le parti da realizzare (Archivio Storico di Campobasso)

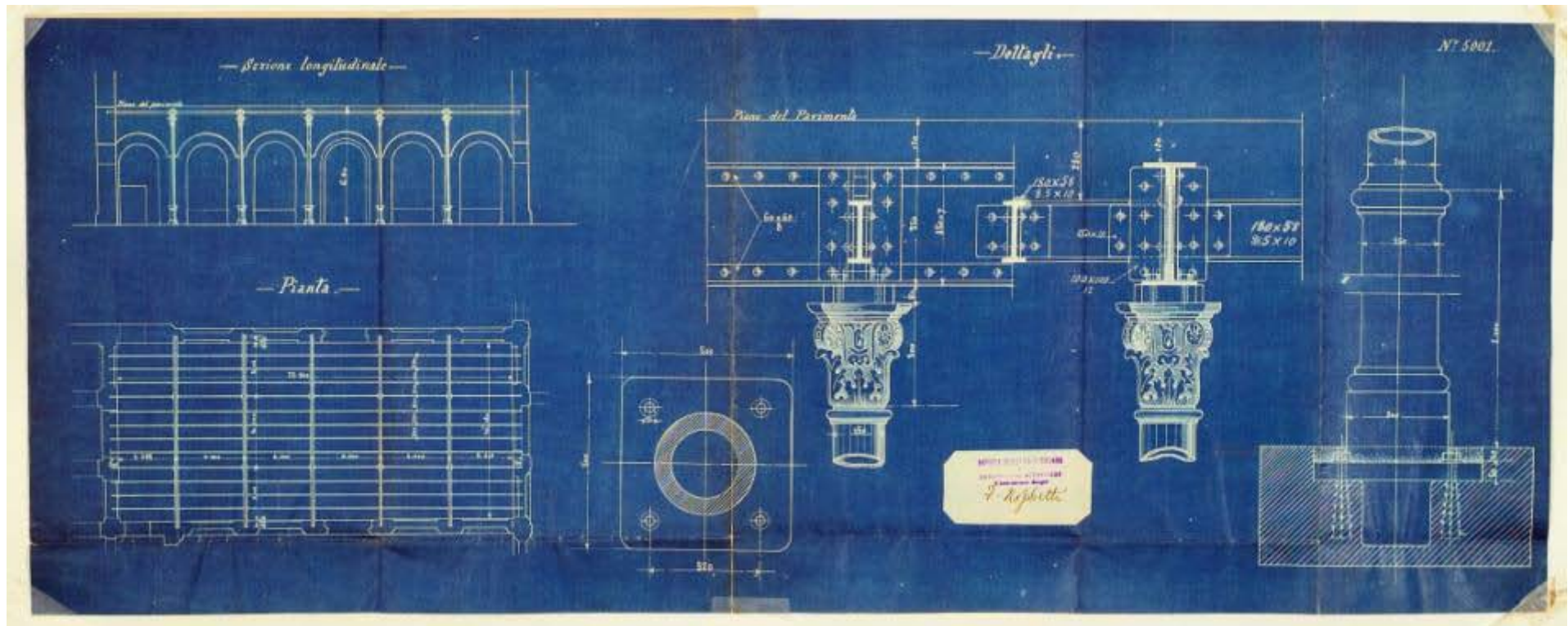


Figura 82: Convitto Nazionale “M. Pagano”: Il grafico originale del progetto del solaio a copertura del refettorio, eseguito dall’Impresa Industriale Italiana di Costruzioni Metalliche, 1891 (Archivio Storico di Campobasso)

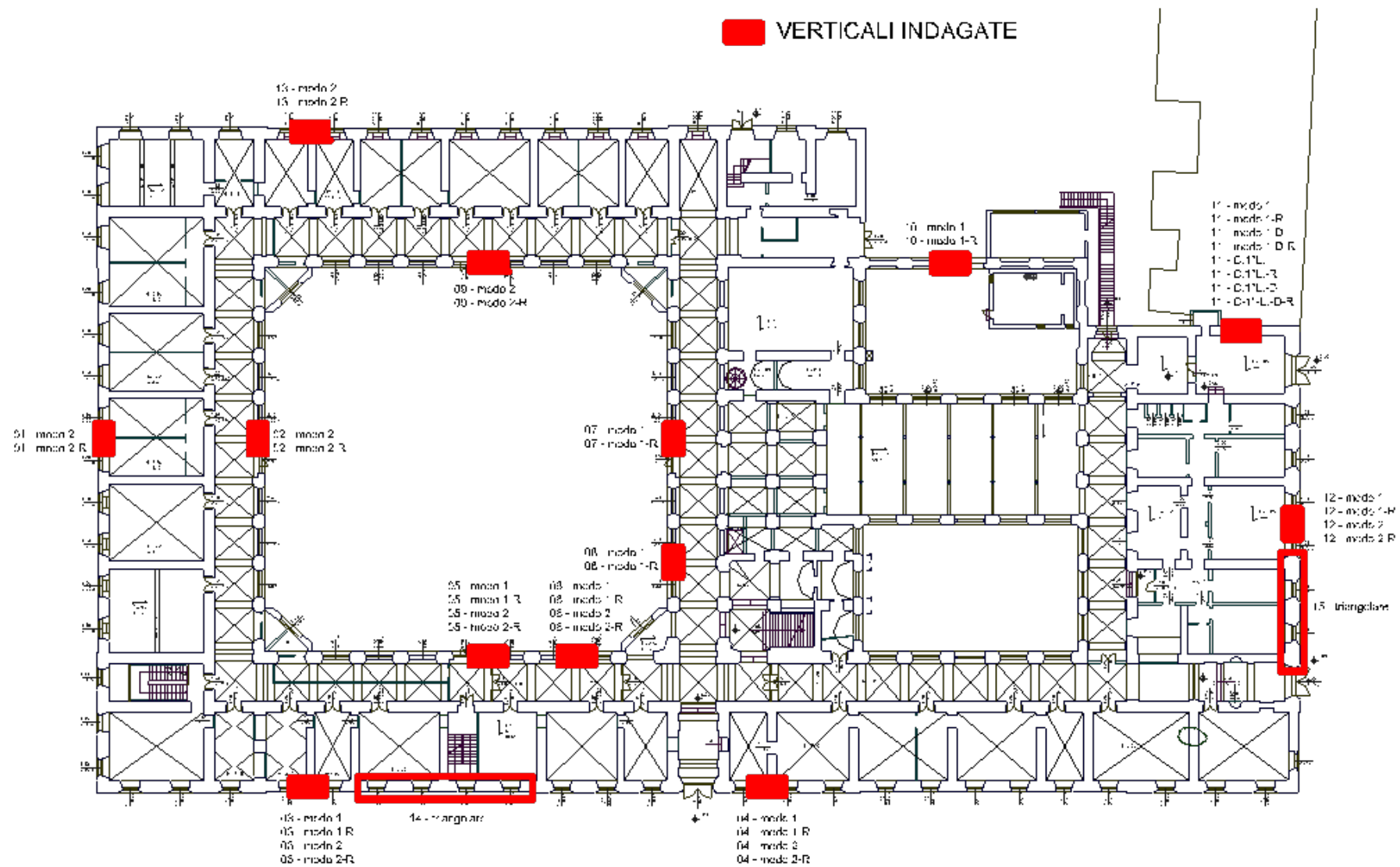


Figura 83: Convitto Nazionale “M. Pagano”: Studio dei Meccanismi di Collasso, indicazioni sulle verticali indagate

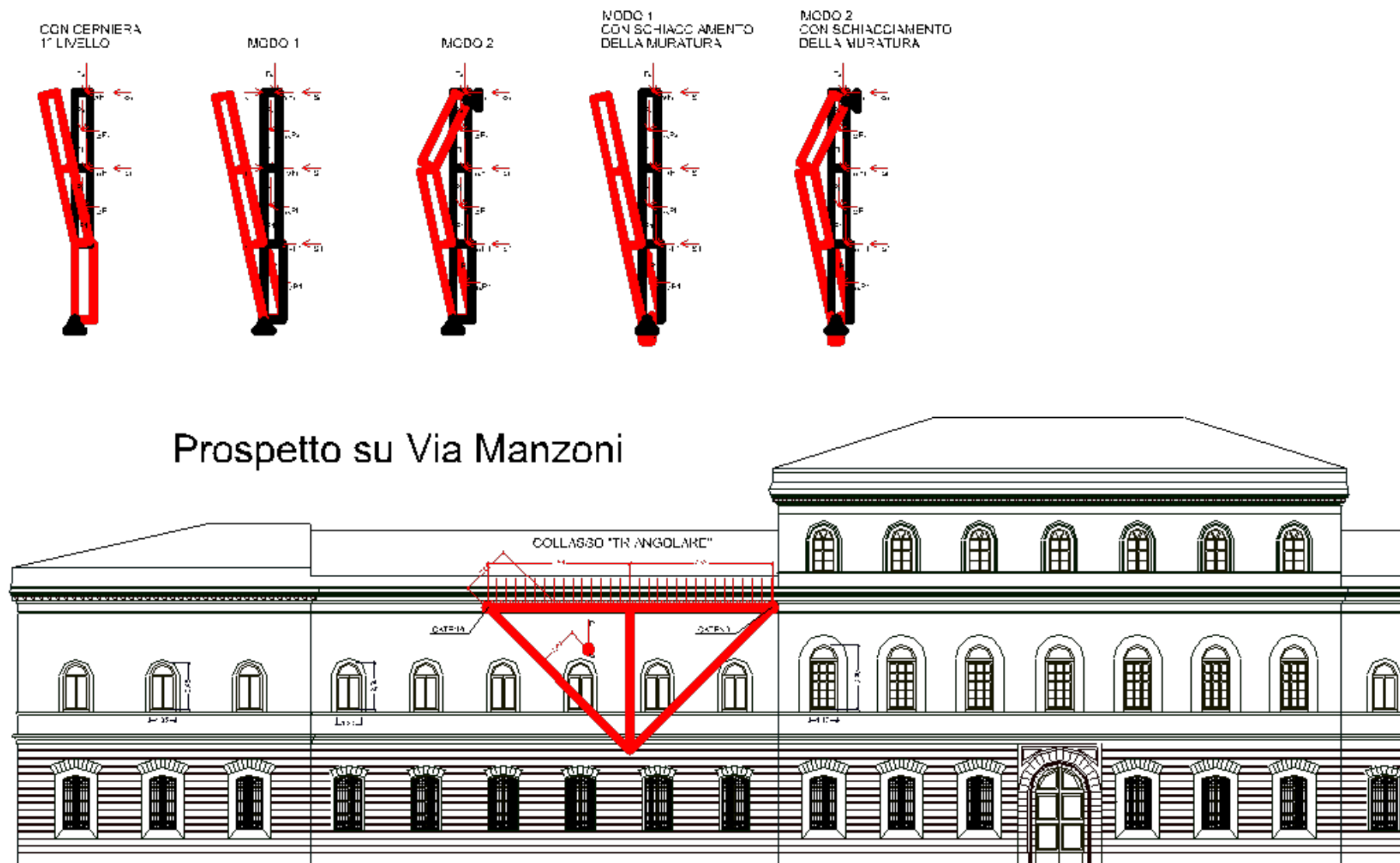


Figura 84: Convitto Nazionale "M. Pagano": Studio dei Meccanismi di Collasso, tipologie di collasso

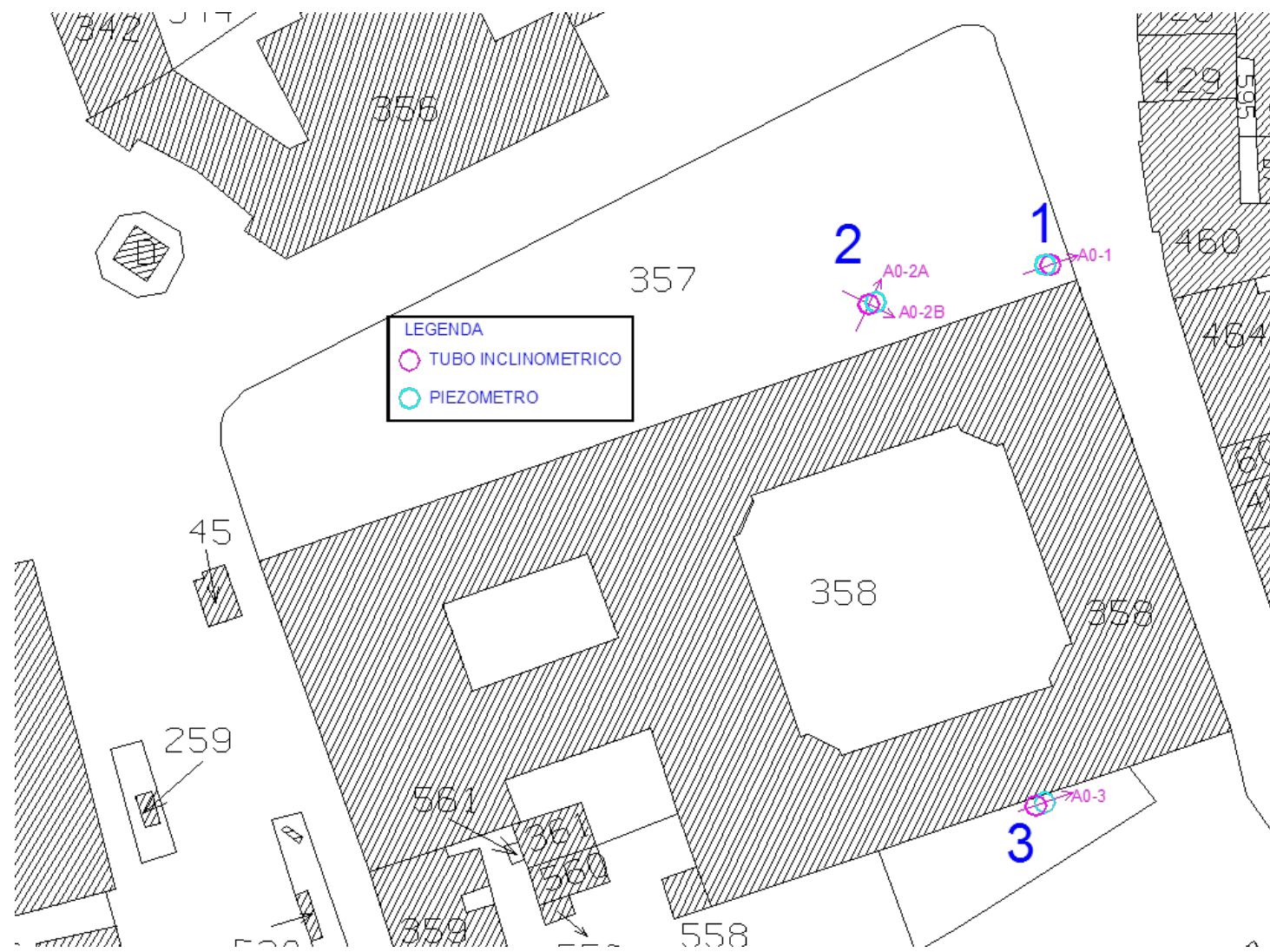


Figura 85: Convitto Nazionale “M. Pagano”: Sistema di monitoraggio, pianta con la posizione dei tubi inclinometrici e dei piezometri installati

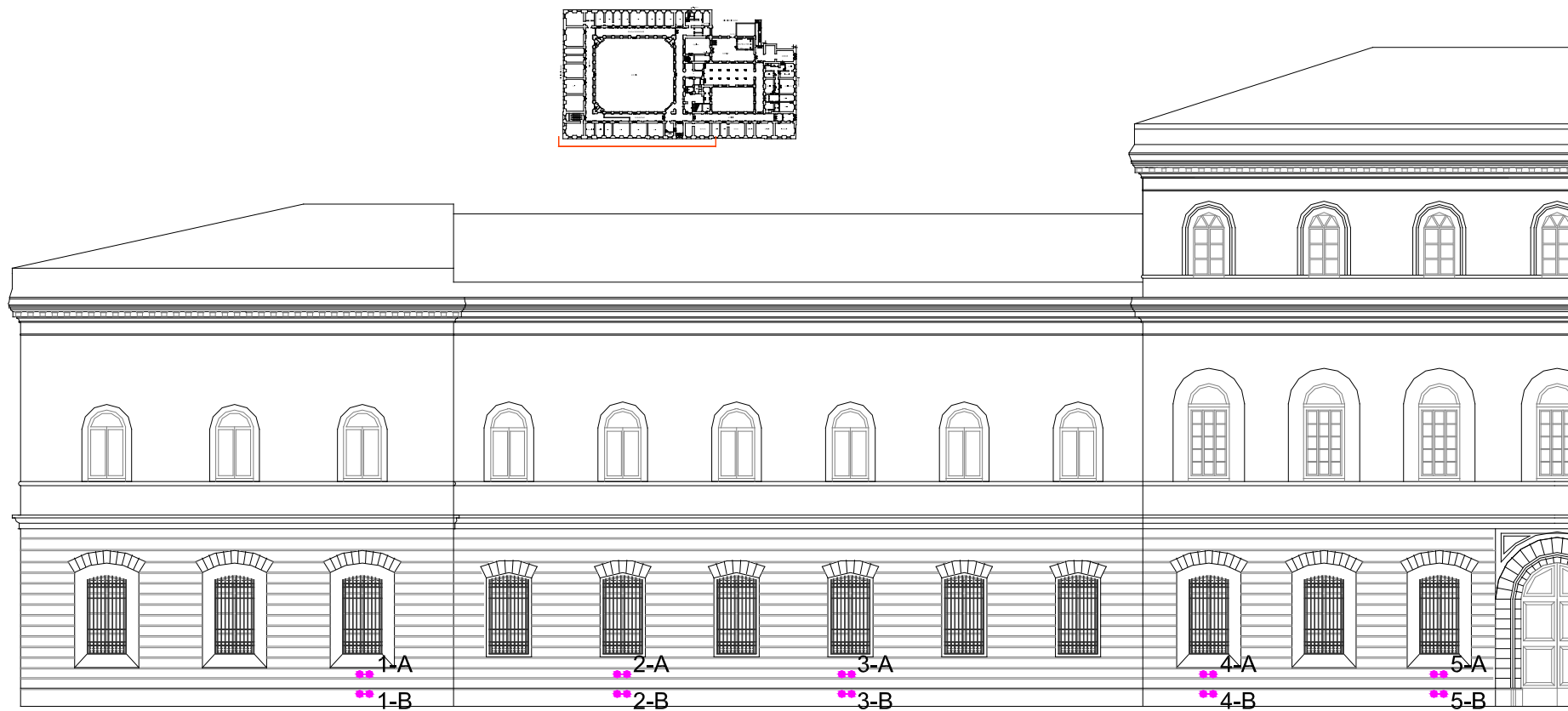


Figura 86: Convitto Nazionale “M. Pagano”: Sistema di monitoraggio, posizione di alcune delle piastrine per le misure al tensotast, sulla facciata principale

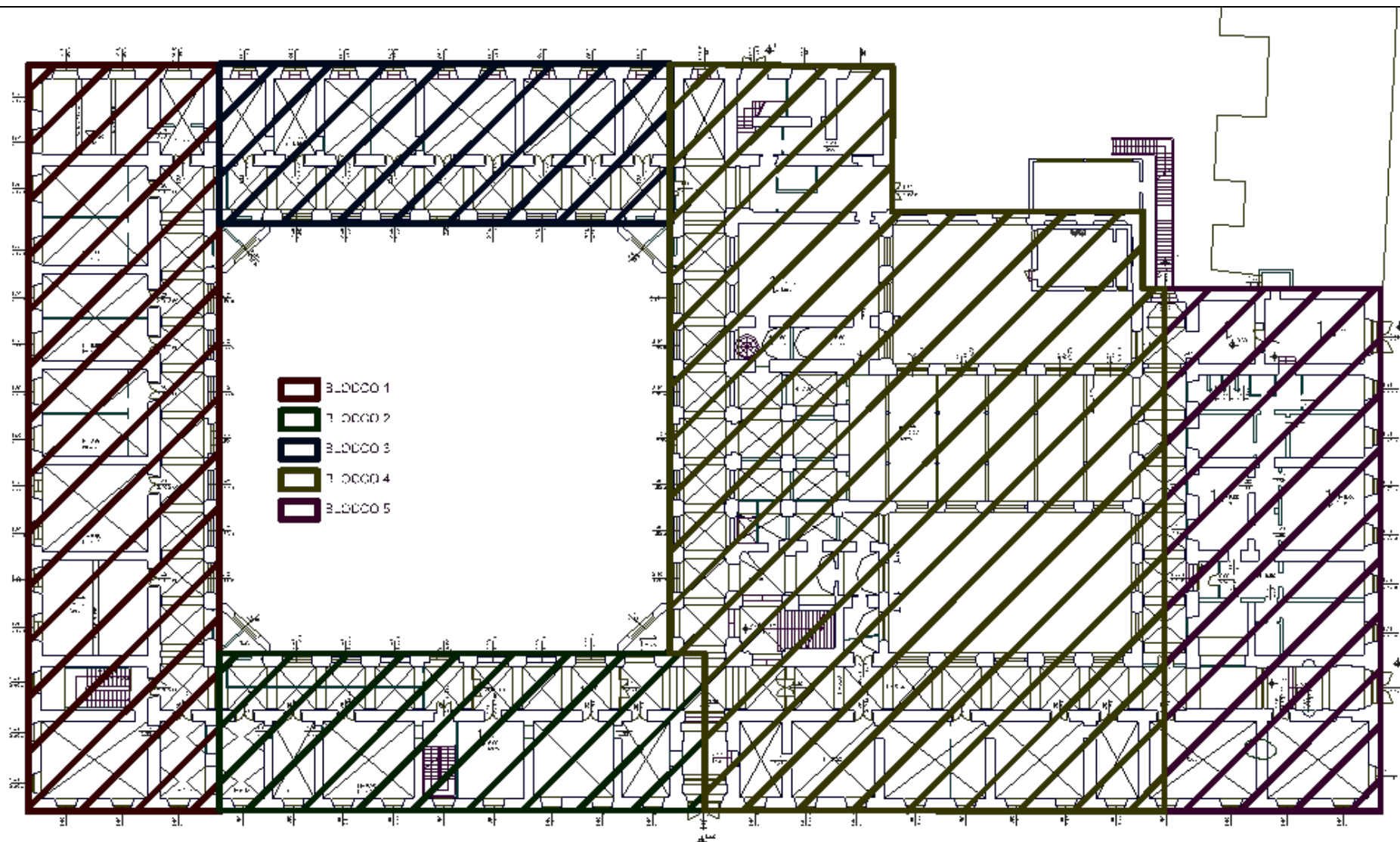


Figura 87: Convitto Nazionale "M. Pagano": Suddivisione in blocchi

6.1 Il modello semplificato evoluto

La verifica sismica del Convitto Nazionale “Mario Pagano” è stata l’occasione per applicare un modello semplificato per la valutazione quantitativa del periodo di ritorno cui corrisponde il raggiungimento dello SLV, che parte dal modello proposto nelle Linee Guida relativo a “Palazzi, ville ed altre strutture con pareti di spina ed orizzontamenti intermedi” (paragrafo 5.4.2) [9], introducendo modifiche nella formula della resistenza a taglio dell’edificio F_{SLV} e, prendendo spunto dal SIVARS, introducendo una procedura per l’inserimento dei dati per via grafica.

Ricordiamo la formula della resistenza a taglio dell’edificio.

Considerando, a titolo di esempio, la direzione x ed un generico piano i dell’edificio:

$$F_{SLV,x,i} = \frac{\mu_{xi} \xi_{xi} \zeta_x A_{xi} \tau_{di}}{\beta_{xi} \kappa_i}$$

in cui:

A_{xi} è l’area resistente a taglio dei muri dell’ i -esimo piano, posti secondo la direzione x ;

τ_{di} è il valore di calcolo della resistenza a taglio della muratura nei maschi murari del piano i :

$$\tau_{di} = \tau_{0d} \cdot \sqrt{1 + \frac{\sigma_{0i}}{1,5 \cdot \tau_{0d}}}$$

dove: τ_{0d} è valore di calcolo della resistenza a taglio della muratura (valutato tenendo conto del fattore di confidenza FC); σ_{0i} è la tensione verticale media sulla superficie resistente dei muri all’ i -esimo piano;

κ_i è il rapporto tra la risultante delle forze sismiche al piano i -esimo e la forza sismica totale;

β_{xi} è un coefficiente di irregolarità in pianta al piano i -esimo, associato alla eccentricità e_{yi} , del centro delle rigidezze rispetto al baricentro delle masse (la cui entità può essere stimata), ed alla distanza d_{yi} , tra il baricentro delle rigidezze e la parete in direzione x più esterna.

Il coefficiente di irregolarità in pianta vale:

$$\beta_{xi} = 1 + \frac{e_{yi} \cdot d_{yi} A_{xi}}{\sum_k (y_k - y_{Ci})^2 \cdot A_{xi,k}} \leq 1,25$$

dove y_{Ci} è il baricentro delle rigidezze.

μ_{xi} è un coefficiente che considera l'omogeneità di rigidezza e resistenza dei maschi murari, che può essere così valutato:

$$\mu_{xi} = 1 - 0,2 \cdot \sqrt{\frac{N_{mxi} \sum_j A_{xi,j}^2}{A_{xi}^2}} - 1 \geq 0,8$$

dove:

N_{mxi} è il numero di maschi murari in direzione x , al piano i ; $A_{xi,j}$ è l'area del generico maschio in direzione x al piano i (la sommatoria è estesa a tutti i maschi del piano - $\sum_j A_{xi,j} = A_{xi}$).

ξ_{xi} è un coefficiente legato al tipo di rottura prevista in prevalenza nei maschi murari dell' i -esimo piano; esso vale 1 nel caso di collasso per taglio, mentre può essere assunto pari a 0.8 nel caso di collasso per presso-flessione (maschi snelli, poco caricati verticalmente o in presenza di fasce deboli);

ζ_x è un coefficiente legato alla resistenza delle fasce murarie di piano nelle pareti disposte in direzione x ; esso vale 1 nel caso di fasce resistenti (rottura dei maschi murari verticali), mentre può assumere un valore minore (fino a 0.8) nel caso di fasce deboli, non in grado di bloccare la rotazione alle estremità dei maschi murari.

Si parte dalla considerazione che le caratteristiche geometriche necessarie per il calcolo di F_{SLV} sono:

- A_{xi} : area resistente a taglio dei muri dell' i -esimo piano;
- y_{Ci} : baricentro delle rigidezze.

Per la determinazione delle caratteristiche geometriche dei maschi resistenti a taglio, è stato implementato uno script in ambiente RHINOCEROS, nel quale è sufficiente definire le sezioni creando delle superfici. (Figura 88)

Lo script numera le superfici, anche graficamente (Figura 88), e produce un file di testo con l'area, posizione della singola sezione, il momento d'inerzia nella direzione lungo la quale si vuole effettuare la verifica ed infine calcola la posizione del baricentro delle aree. (Figura 89)

Tali dati possono essere caricati in ambiente EXCEL in cui si è implementata la procedura di calcolo. (Figura 90)

Le modifiche introdotte nel calcolo riguardano le considerazioni riguardanti l'eventuale rottura a pressoflessione del maschio.

Invece di adottare il coefficiente ξ_{xi} , si è calcolato direttamente il momento resistente dei maschi murari secondo le indicazioni delle NTC 2008 (formula (7.8.2) del paragrafo 7.8.2.2.1 "Pressoflessione nel piano"):

$$M_U = (L^2 \cdot t \cdot \sigma_0 / 2) \cdot (1 - \sigma_0 / 0,85 \cdot f_d) \quad (3)$$

ed il relativo taglio resistente:

$$V_M = 2 \cdot M_U / H$$

Dove:

L è la lunghezza della sezione orizzontale del maschio;

t è lo spessore della sezione orizzontale del maschio;

H è l'altezza del maschio.

Il taglio resistente effettivo V_{EFF} dell'i-mo maschio del j-mo piano è dato dal minimo tra $A_i \cdot \tau_{d,j}$ e V_M .

Di conseguenza F_{SLV} diventa:

$$F_{SLV} = (\mu_{xi} \cdot \zeta_{xi} \cdot V_{EFF}) / (b_{xi} \cdot \kappa_i).$$

In tal modo si supera il problema della scelta del valore nei casi complessi dove, per esempio nei piani terra del Convitto Nazionale "Mario Pagano" (Figura 88), sono

presenti contemporaneamente elementi molto snelli (le pilastrate in muratura del porticato, circa 1,10x 1,10 m) ed elementi molto tozzi (pareti lunghe oltre 8 m).

Considerando che la forma dei maschi in pianta è spesso irregolare, i valori di L e t sono rappresentativi di un rettangolo geometricamente equivalente, avente cioè la stessa area A e lo stesso momento d'inerzia I.

Si considera che:

$$I = \frac{t \cdot L^3}{12} = \frac{A \cdot L^2}{12},$$

il momento d'inerzia I e l'area A sono noti, per cui si calcola L come:

$$L = \sqrt{\frac{12 \cdot I}{A}}$$

ed infine si calcola lo spessore t come:

$$t = \frac{A}{L}.$$

Una ultima considerazione la si vuole fare in relazione al valore della resistenza a taglio, $\tau_{di} = \tau_{0d} \cdot \sqrt{1 + \frac{\sigma_{0i}}{1,5 \cdot \tau_{0d}}}$ si evidenzia la mancanza di limiti allo sforzo normale, o meglio alla σ_0 utilizzata poi nel calcolo della tensione tangenziale. Dunque vengono trascurati eventuali collassi a sforzo normale centrato.

Le NTC 2008 [1] limitano i valori massimi delle resistenze a taglio per edifici di nuova costruzione in questo modo:

$f_{vk} = f_{vko} + 0,4 \sigma_n$ e "Il valore di f_{vk} non può comunque essere maggiore di $1,4 \overline{f_{bk}}$, dove $\overline{f_{bk}}$ indica la resistenza caratteristica a compressione degli elementi nella direzione di applicazione della forza, né maggiore di 1,5 MPa". Per analisi statiche non lineari " $f_{vd} = f_{vm0} + 0,4 \sigma_n$ con f_{vm0} resistenza media a taglio della muratura (in assenza di determinazione diretta si può porre $f_{vm0} = f_{vko}/0,7$)" e inoltre "il valore di f_{vd} non può comunque essere maggiore di $2,0 \overline{f_{bk}}$ né maggiore di 2,2 MPa".

Per gli edifici esistenti la Circolare 2009 2] “nel caso di muratura irregolare o caratterizzata da blocchi non particolarmente resistenti”, riporta la formulazione adottata dalle Linee Guida [9], infatti il valore del taglio può essere assunto pari a:

$$V_t = l \cdot t \frac{1,5 \cdot \tau_{0d}}{b} \cdot \sqrt{1 + \frac{\sigma_{oi}}{1,5 \cdot \tau_{0d}}} \quad (4)$$

senza limitazioni sulle tensioni, e con $l \cdot t$ = area della sezione totale.

Da segnalare che $1,5 \cdot \tau_{0d}$ rappresenta la resistenza a trazione per taglio diagonale, determinata in assenza di sforzo normale.

La scelta sulla formulazione da adottare è caduta sulla (4) per semplicità, in quanto il taglio viene determinato con l'area totale del pannello, termine noto, e non l'area parzializzata, valore che andrebbe calcolato.

L'assenza di limitazione allo sforzo normale consentito nel calcolo del taglio porta, nel caso di tensioni normali alte, a sovrastimare eccessivamente la resistenza effettiva.

In alternativa, come proposto, si supera il problema della limitazione tenendo in conto la resistenza a pressoflessione del pannello con la formula (3). Il problema è noto da tempo (metodo PORFLEX, 1982 [30], [31], metodo RAN, 1984 [30], [32], [33]), ed è alla base di tutte le moderne metodologie di calcolo della muratura [30]. Infatti al raggiungimento di un certo valore della σ_0 la capacità di resistenza a pressoflessione va diminuendo, fino ad annullarsi per $\sigma_0 = 0,85 \cdot f_d$ (vedi formula (3)).

Il metodo resta semplificato, in quanto permangono inesattezze nel calcolo, alcune delle quali si segnalano di seguito:

- il baricentro delle rigidezze viene calcolato come baricentro delle aree dei setti, considerando la sola rigidezza tagliante ($K_V = GA/(1,2 \cdot H)$), e trascurando l'aliquota di rigidezza flessionale ($K_M = 12 \cdot E \cdot I/H^3$);
- si considera il raggiungimento dello SLV di tutti i pannelli, sia che si rompano a taglio, sia che si rompano a pressoflessione, senza considerazioni sugli spostamenti ultimi, che potrebbero portare al collasso qualche pannello prima che tutti gli altri raggiungano il valore di resistenza massimo. Infatti la norma NTC 2008 [1] stabilisce come limiti convenzionali per le verifiche dei pannelli in murature che, per rottura pressoflessione “lo spostamento ultimo può essere

assunto pari allo 0,8% dell'altezza del pannello", per rottura a taglio "lo spostamento ultimo può essere assunto pari allo 0,4% dell'altezza del pannello". In parte di questo problema si tiene conto attraverso il coefficiente μ_{xi} .

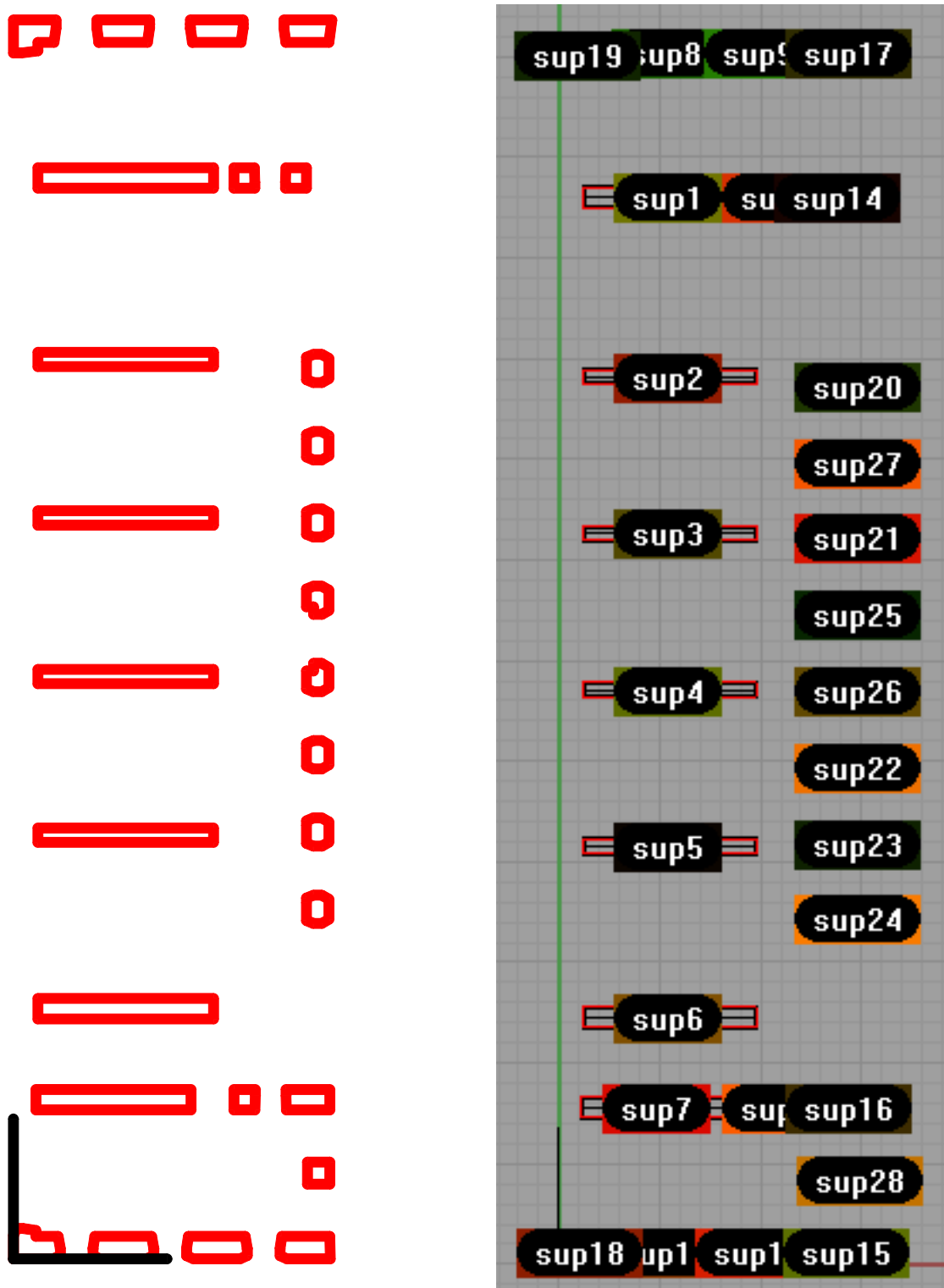


Figura 88: I setti definiti graficamente (a sinistra) e l'output grafico dello script (a destra)

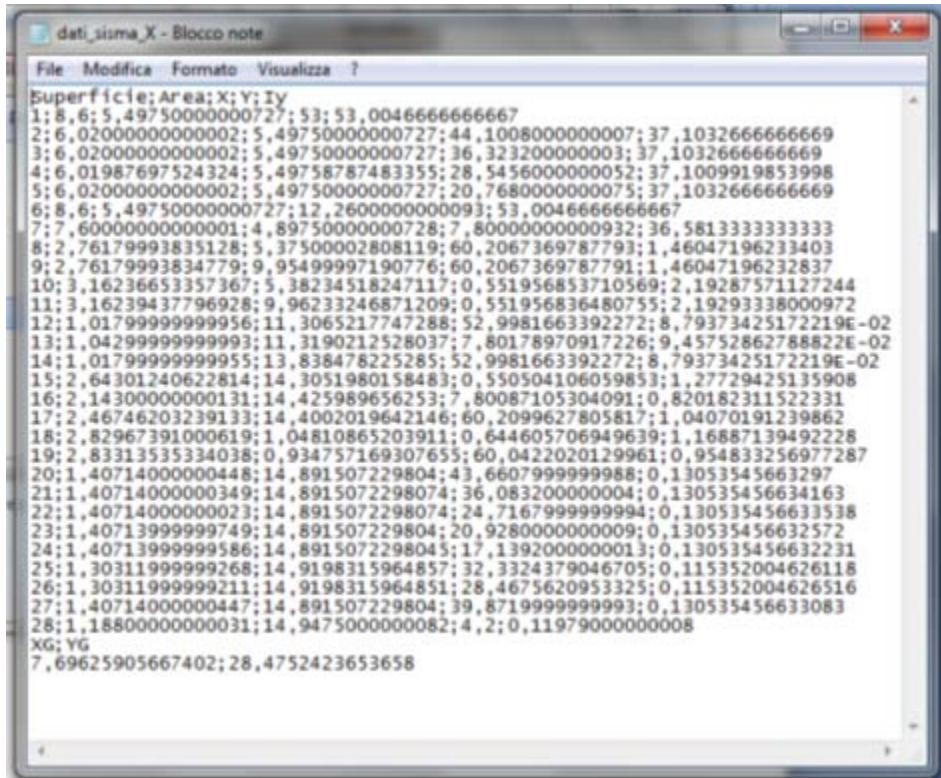


Figura 89: L’output numerico dello script fornito come file di testo

Superficie	Area	X	Y	Iy	XG	YG
	[m ²]	[m]	[m]	[m ⁴]	[m]	[m]
1	8,6	5,4975	53	53,00467	7,696259	28,47524
2	6,02	5,4975	44,1008	37,10327		
3	6,02	5,4975	36,3232	37,10327		
4	6,019877	5,497588	28,5456	37,10099		
5	6,02	5,4975	20,768	37,10327		
6	8,6	5,4975	12,26	53,00467		
7	7,6	4,8975	7,8	36,58133		
8	2,7618	5,375	60,20674	1,460472		
9	2,7618	9,955	60,20674	1,460472		
10	3,162367	5,382345	0,551957	2,192876		
11	3,162394	9,962332	0,551957	2,192933		
12	1,018	11,30652	52,99817	8,79E-02		
13	1,043	11,31902	7,80179	9,46E-02		
14	1,018	13,83848	52,99817	8,79E-02		
15	2,643012	14,3052	0,550504	1,277294		
16	2,143	14,42599	7,800871	0,820182		
17	2,467462	14,4002	60,20996	1,040702		
18	2,829674	1,048109	0,644606	1,168871		
19	2,833135	0,934757	60,0422	0,954833		
20	1,40714	14,89151	43,6608	0,130535		
21	1,40714	14,89151	36,0832	0,130535		
22	1,40714	14,89151	24,7168	0,130535		
23	1,40714	14,89151	20,928	0,130535		
24	1,40714	14,89151	17,1392	0,130535		
25	1,30312	14,91983	32,33244	0,115352		
26	1,30312	14,91983	28,46756	0,115352		
27	1,40714	14,89151	39,872	0,130535		
28	1,188	14,9475	4,2	0,11979		

Figura 90: L’output numerico caricato in Excel

7 Conclusioni

Il lavoro di tesi ha avuto come finalità lo studio dell'analisi di vulnerabilità sismica su scala territoriale dei Beni Monumentali per i quali sono già disponibili strumenti ed approcci.

L'obiettivo è stato quello di analizzare le metodologie nell'ambito dei recenti documenti normativi in materia con spirito critico, di ottimizzare l'approccio di analisi in modo da garantire una sostenibilità dei metodi adottati e, per quanto possibile, di semplificare le procedure.

In questa direzione è andato lo studio sul periodo fondamentale delle strutture a torre, che ha avuto come risultato la correlazione del periodo in funzione della sola altezza della struttura. In assenza della formulazione per lo studio anche a scala territoriale delle strutture a torre era necessario procedere mediante prove di identificazione dinamica o implementare modelli di calcolo numerici, con grande dispendio di tempo e risorse.

Allo stesso modo il percorso della conoscenza tracciato nello studio degli edifici monumentali oggetto di studio, con l'utilizzo dello strumento dell'intervista consente il raggiungimento dei livelli di conoscenza necessari per effettuare le verifiche, senza dover ricorrere a campagne di prove.

Nelle recenti elaborazioni delle Linee Guida per la valutazione delle prestazioni sismiche del costruito storico è evidenziata la considerazione sull'importanza della conoscenza e della classificazione delle murature a scala locale, col superamento delle tabelle previste dalle norme nazionali, che si dimostrano efficaci, ma sono sicuramente incomplete. In questo contesto si afferma chiaramente che in mancanza della possibilità di classificazione, e cioè per tipologie murarie a carattere strettamente locale che non possono essere catalogate secondo le tabelle predisposte, la determinazione delle caratteristiche meccaniche deve passare attraverso l'esecuzione di prove distruttive. La preparazione di data base locali, con la definizione di ulteriori classificazioni è di fondamentale importanza per procedere alla determinazione delle caratteristiche meccaniche senza dover procedere all'esecuzione delle suddette prove. Da questo punto

di vista il lavoro svolto in Molise dalla Struttura del Commissario Delegato per le attività post sisma, rappresenta un utile riferimento e una base solida da ampliare e consolidare.

I Metodi Semplificati per le analisi globali proposte dalle Linee Guida rappresentano degli strumenti molto potenti, per la semplicità di applicazione e per l'affidabilità del risultato.

Naturalmente la semplificazione richiede una interpretazione dello stato di fatto, con la conseguente definizione del flusso primario delle azioni e dei meccanismi resistenti. In tal modo, diviene possibile una modulazione della modellazione e dei legami costitutivi capace di conseguire un grado di approssimazione delle analisi compatibile con il livello di analisi e la finalità delle valutazioni quantitative.

Relativamente all'analisi di *"Palazzi, ville ed altre strutture con pareti di spina ed orizzontamenti intermedi"*, può essere indicato come risultato del lavoro l'elaborazione e l'introduzione di procedure capaci di computare in maniera più adeguata i meccanismi di rottura dei maschi murari. In particolare si è proceduto a svincolare il calcolo dalla scelta arbitraria del coefficiente correttivo proposto dalle Linee Guida e soprattutto introducendo implicitamente una limitazione al valore della tensione normale agente sui maschi. Tutto questo con un dispendio computazionale sostanzialmente invariato.

Dal lato della semplificazione può essere citata l'implementazione della procedura per l'input grafico.

Tutto il lavoro è stato impostato nella prospettiva di ampliare il campo di applicabilità delle metodologie predisposte per i Beni Monumentali a tutto il costruito storico, (che oggi è già soggetto a forme di tutela, ma non a quella riguardante il rischio sismico) dove ai vincoli di tutela monumentale si sostituiscono vincoli di carattere economico che rendono impossibile operare su scala territoriale con le disposizioni delle Norme Tecniche per le Costruzioni del 2008 a cui oggi tutti gli edifici diversi da quelli monumentali devono fare riferimento.

Bibliografia

- [1].D.M. 14 Gennaio 2008 (*G.U. n. 29 del 4 febbraio 2008 Suppl. Ordinario n. 30*) - "Norme tecniche per le costruzioni".
- [2].Circolare 2 febbraio 2009, n. 617 del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti approvata dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici (*G. U. del 26 Febbraio 2009 n. 47, Suppl. Ordinario n. 27*) "Istruzioni per l'applicazione delle "Nuove norme tecniche per le costruzioni" di cui al decreto ministeriale 14 gennaio 2008".
- [3].UNI EN 1998-1:2005 - Eurocodice 8 - "Indicazioni progettuali per la resistenza sismica delle strutture".
- [4].D.M. 14 settembre 2005 (*G.U. n. 222 del 23 settembre 2005 Suppl. Ordinario n. 159*) - "Norme tecniche per le costruzioni".
- [5].O.P.C.M. n. 3274 del 20 marzo 2003 - "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica".
- [6].D.M. LL.PP. del 16 gennaio 1996 (*Suppl. Ord. Alla G. U. del 5 febbraio 1996 n. 29*) "Norme tecniche per le costruzioni in zona sismica".
- [7].Legge 2 febbraio 1974 n. 64 (*G.U. del 21 marzo 1974 n. 76*) "Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche".
- [8]. "Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle norme tecniche per le costruzioni", approvate dall'Assemblea Generale del Consiglio Superiore dei LL.PP. col parere n° 66 reso nella seduta del 21 luglio 2006.
- [9]. "Allineamento delle Linee Guida per la valutazione e la riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale alle nuove Norme Tecniche sulle costruzioni" approvate dall'Assemblea Generale del Consiglio Superiore dei LL.PP. col parere n° 92 reso nella seduta del 23 luglio 2010.
- [10]. "Convenzione Europea del Paesaggio." Firenze, 20 ottobre 2000.
- [11]. Antonietta Giuliano, "Il Manuale del recupero e della tutela del "paesaggio suburbano" del Basso Molise. Una proposta di metodo." - Dottorato di ricerca in "Analisi e valorizzazione del paesaggio" XXII ciclo, Università degli Studi del Molise, 2009.

-
- [12]. Prosper Mérimée *“Notes d’un voyage en Corse”*, Parigi 1840.
- [13]. L. Binda *“Scheda Muratura”* del Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti.
- [14]. A. Di Carluccio, G. Fabbrocino, F. Santucci de Magistris, F. Todisco S. Fabbrocino *“Approccio metodologico alla valutazione di vulnerabilità per infrastrutture distribuite: aspetti geologici e geotecnici”* ANIDIS 2009, Bologna.
- [15]. D. Cialdea *“Il Molise. Una realtà in crescita. Aree protette ed attività agricole.”* Franco Angeli, Milano 1996.
- [16]. D. Cialdea *“L’evoluzione dello sviluppo rurale delle Comunità Montane del Molise.”* Editrice Arti Grafiche La Regione, Ripalimosani 1996.
- [17]. D. Cialdea *“Il Molise terra di transito. I tratturi come modello di sviluppo del territorio.”* Editrice Arti Grafiche La Regione, Ripalimosani 2007.
- [18]. A. Lemme, S. Podestà, G. Cifani *“Sisma 2002 - Dall’Emergenza alla Ricostruzione. Edifici in muratura.”* D.E.I. Tipografia del Genio Civile, 2008.
- [19]. C. Rainieri *“Operational Modal Analysis for Seismic Protection of Structures.”* Tesi di Dottorato in *“Ingegneria delle Strutture”* Università di Napoli *“Federico II”*, 2008.
- [20]. R. Brincker, L. Zhang, P. Andersen *“Modal identification from ambient responses using frequency domain decomposition.”* 18th SEM International Modal Analysis Conference, San Antonio, TX, USA 2000.
- [21]. C. Rainieri, C. Laorenza, G. Fabbrocino *“Modal identification of heritage structures: Molise’s bell towers.”* Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures – EVACES ’09, Polonia 2009.
- [22]. D. Brigante *“Caratteristiche strutturali e dinamiche dei campanili del Basso Molise.”* Tesi di Laurea in *“Tecniche dell’Edilizia”*, Università del Molise, 2010.
- [23]. C. Rainieri, G. Fabbrocino *“Il periodo elastico delle torri in muratura: correlazioni empiriche per la previsione”* ANIDIS 2011, Bari.
- [24]. P. Faccio, S. Podestà, A. Saetta *“Venezia, Campanile della Chiesa di Sant’Antonin”* Esempio 5, in *“Allineamento delle Linee Guida per la valutazione e la riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale alle nuove Norme*

- Tecniche sulle costruzioni” approvate dall’Assemblea Generale del Consiglio Superiore dei LL.PP. col parere n° 92 reso nella seduta del 23 luglio 2010.
- [25]. Soprintendenza dei Beni Architettonici e Paesaggistici del Molise, *“Convenzione SBAP-MOL/UNIMOL per Attività di Valutazione del Rischio Sismico.”* 2010. Documenti riservati.
- [26]. E. Santoro *“Applicazione del metodo LV1 di valutazione del rischio sismico su edifici storici del territorio molisano”* Tesi di Laurea in *“Tecniche dell’Edilizia”*, Università del Molise, 2011.
- [27]. Ministero per i Beni e le Attività Culturali *“SIVARS Manuale Utente.”*
- [28]. M. Savorra *“Ingegneri e Architetture a Campobasso: la costruzione del Convitto Nazionale Mario Pagano. Analisi storica nel contesto di analisi di vulnerabilità sismica per attività di prevenzione del rischio sismico di cui alla OPCM 3362/2004.”* 2011
- [29]. G. Fabbrocino, F. Spensieri, C. Pasquale *“Convitto Nazionale Mario Pagano Campobasso – Analisi della Vulnerabilità sismica.”* 2011. Documenti riservati.
- [30]. AA.VV *“Manuale delle Murature Storiche.”* Direttore scientifico A. Borri, a cura di C. Donà, D.E.I. Tipografia del Genio Civile, 2011.
- [31]. F. Braga, M. Dolce *“Un metodo per l’analisi di edifici multipiano in muratura antisismici.”* Proceeding of the 6th I.B.Ma.C, Roma 1982.
- [32]. A. Raithel, N. Augenti *“La verifica dei pannelli murari.”* In Atti del II Congresso Nazionale ASS.I.R.C.CO *“La città difficile”*, Ferrara 1984.
- [33]. N. Augenti *“Il calcolo sismico degli edifici in muratura”* UTET, Torino 2000.

NOTA: dove non diversamente specificato, le foto sono state scattate dal personale afferente al Laboratorio di Dinamica Strutturale e Geotecnica StreGa dell’Università degli Studi del Molise durante lo svolgimento delle attività.

Indice delle Figure

FIGURA 1: ESTRATTO DALLA SCHEDA MURATURA DEL GRUPPO NAZIONALE PER LA DIFESA DAI TERREMOTI A CURA DELLA PROF.SSA LUIGIA BINDA [13].....	48
FIGURA 2: ESTRATTO DALLA SCHEDA MURATURA DEL GRUPPO NAZIONALE PER LA DIFESA DAI TERREMOTI A CURA DELLA PROF.SSA LUIGIA BINDA [13].....	49
FIGURA 3: IL CONTADO DI MOLISE NELLA CARTOGRAFIA DI M. CARTARO, 1613.....	53
FIGURA 4: LA RETE DEI TRATTURI CHE ATTRAVERSANO IL MOLISE.....	54
FIGURA 5: VINCHIATURO (CB): VISTA CON LA CHIESA, IL CAMPANILE ED IL PALAZZO SIGNORILE (FOTO DAL SITO WWW. TURISMO.PROVINCIA.CAMPOBASSO.IT).....	55
FIGURA 6: CIVITACAMPOMARANO (CB) : VISTA DEL CASTELLO ANGIOINO (FOTO DAL SITO WWW. VIAGGIOMOLISE.IT).....	55
FIGURA 7: RIPALIMOSANI (CB) (FOTO DAL SITO WWW.ECODELSANGRO.IT).....	56
FIGURA 8: ORATINO (CB): VISTA AEREA DEL BORGO CON IL PALAZZO DUCALE (FOTO DAL SITO WWW. BORGHITALIA.IT).....	56
FIGURA 9: MACRO DOMINI DELLE TIPOLOGIE MURARIE (TRATTO DAL VOLUME "SISMA 2002 - DALL'EMERGENZA ALLA RICOSTRUZIONE - EDIFICI IN MURATURA).....	59
FIGURA 10: LOCALIZZAZIONE DEI CASI STUDIO.....	63
FIGURA 11: RIPABOTTONI, CHIESA DI S. MARIA ASSUNTA: CAMPANILE SNELLO.....	65
FIGURA 12: BONEFRO, CHIESA DI S. MARIA DELLE ROSE: CAMPANILE TOZZO.....	65
FIGURA 13: RIPABOTTONI, CHIESA DI S.M. ASSUNTA: CELLA CAMPANARIA CON AMPIE APERTURE.....	66
FIGURA 14: MORRONE DEL SANNIO, CHIESA DI S.M. MAGGIORE: MURATURA BEN AMMORSATA, GIUNTO TRA CAMPANILE E CHIESA.....	66
FIGURA 15: IL CAMPANILE DELLA CHIESA DI S. MARIA DELLE ROSE IN BONEFRO.....	70
FIGURA 16: CAMPANILE DELLA CHIESA DI S. MARIA DELLE ROSE IN BONEFRO: PARTICOLARE DELLA MURATURA.....	70
FIGURA 17: CAMPANILE DELLA CHIESA DI S. MARIA DELLE ROSE IN BONEFRO: PIANTE DEL CAMPANILE CON LA DISPOSIZIONE DEI SENSORI E RELATIVE FOTO.....	71
FIGURA 18: CAMPANILE DELLA CHIESA DI S. MARIA DELLE ROSE IN BONEFRO: RAPPRESENTAZIONE GRAFICA DELLE FORME MODALI IDENTIFICATE.....	72
FIGURA 19: CAMPANILE DELLA CHIESA DI S. MARIA DELLE ROSE IN MONTORIO NEI FRENTANI E A DESTRA PARTICOLARE DELLA MURATURA.....	74
FIGURA 20: CAMPANILE DELLA CHIESA DI S. MARIA DELLE ROSE IN MONTORIO NEI FRENTANI: PIANTE CON LA DISPOSIZIONE DEI SENSORI E RELATIVE FOTO.....	76
FIGURA 21: CAMPANILE DELLA CHIESA DI S. MARIA DELLE ROSE IN MONTORIO NEI FRENTANI: RAPPRESENTAZIONE GRAFICA DELLE FORME MODALI IDENTIFICATE.....	77
FIGURA 22: LA CHIESA DI S. MARIA ASSUNTA IN RIPABOTTONI.....	80

FIGURA 23: CAMPANILE DELLA CHIESA DI S. MARIA ASSUNTA IN RIPABOTTONI: PARTICOLARE DELLA MURATURA	80
FIGURA 24: CAMPANILE DELLA CHIESA DI S. MARIA ASSUNTA IN RIPABOTTONI: PIANTE CON LA DISPOSIZIONE DEI SENSORI E RELATIVE FOTO	81
FIGURA 25: CAMPANILE DELLA CHIESA DI S. MARIA ASSUNTA IN RIPABOTTONI: RAPPRESENTAZIONE GRAFICA DELLE FORME MODALI IDENTIFICATE.....	82
FIGURA 26: IL CAMPANILE DELLA CHIESA DI S. MARIA MAGGIORE IN MORRONE DEL SANNIO	84
FIGURA 27: CAMPANILE DELLA CHIESA DI S. MARIA MAGGIORE IN MORRONE DEL SANNIO: PARTICOLARE DELLA MURATURA.....	85
FIGURA 28: CAMPANILE DELLA CHIESA DI S. MARIA MAGGIORE IN MORRONE DEL SANNIO: PIANTE CON LA DISPOSIZIONE DEI SENSORI E RELATIVE FOTO.....	85
FIGURA 29: CAMPANILE DELLA CHIESA DI S. MARIA MAGGIORE IN MORRONE DEL SANNIO: RAPPRESENTAZIONE GRAFICA DELLE FORME MODALI IDENTIFICATE	86
FIGURA 30: IL CAMPANILE DELLA CHIESA DI S. GIACOMO APOSTOLO IN SANTA CROCE DI MAGLIANO PRIMA E DOPO IL CROLLO.	88
FIGURA 31: CAMPANILE DELLA CHIESA DI S. GIACOMO APOSTOLO IN SANTA CROCE DI MAGLIANO: PIANTE CON LA DISPOSIZIONE DEI SENSORI E RELATIVE FOTO	89
FIGURA 32: CAMPANILE DELLA CHIESA DI S. GIACOMO APOSTOLO IN SANTA CROCE DI MAGLIANO: RAPPRESENTAZIONE GRAFICA DELLE FORME MODALI IDENTIFICATE.....	89
FIGURA 33: IL CAMPANILE DELLA CHIESA DI S. MARIA DELLA PIETÀ IN LARINO CON LA TIPOLOGIA MURARIA IN EVIDENZA.....	91
FIGURA 34: CAMPANILE DELLA CHIESA DI S. MARIA DELLA PIETÀ IN LARINO: PIANTE CON LA DISPOSIZIONE DEI SENSORI E RELATIVE FOTO	92
FIGURA 35: CAMPANILE DELLA CHIESA DI S. MARIA DELLA PIETÀ IN LARINO: RAPPRESENTAZIONE GRAFICA DELLE FORME MODALI IDENTIFICATE.....	93
FIGURA 36: IL CAMPANILE DELLA CATTEDRALE DI S. PARDO IN LARINO CON IN EVIDENZA LE TIPOLOGIE MURARIE	95
FIGURA 37: CAMPANILE DELLA CATTEDRALE DI S. PARDO IN LARINO: PIANTE CON LA DISPOSIZIONE DEI SENSORI E RELATIVE FOTO	96
FIGURA 38: CAMPANILE DELLA CATTEDRALE DI S. PARDO IN LARINO: RAPPRESENTAZIONE GRAFICA DELLE FORME MODALI IDENTIFICATE.....	97
FIGURA 39: IL CAMPANILE DELLA CHIESA DI S. ALFONSO DEI LIGUORI IN COLLETORTO.....	98
FIGURA 40: CAMPANILE DELLA CHIESA DI S. ALFONSO DEI LIGUORI IN COLLETORTO: PIANTE CON LA DISPOSIZIONE DEI SENSORI E RELATIVE FOTO.....	99
FIGURA 41: CAMPANILE DELLA CHIESA DI S. ALFONSO DEI LIGUORI IN COLLETORTO: PARTICOLARE DELLA MURATURA.....	100
FIGURA 42: CAMPANILE DELLA CHIESA DI S. ALFONSO DEI LIGUORI IN COLLETORTO:RAPPRESENTAZIONE GRAFICA DELLE FORME MODALI IDENTIFICATE.....	100

FIGURA 43: IL CAMPANILE DELLA CHIESA DI S. MARIA ASSUNTA IN PROVVIDENTI.....	101
FIGURA 44: CAMPANILE DELLA CHIESA DI S. MARIA ASSUNTA IN PROVVIDENTI: PARTICOLARE DELLA MURATURA	102
FIGURA 45: CAMPANILE DELLA CHIESA DI S. MARIA ASSUNTA IN PROVVIDENTI: PIANTA CON LA DISPOSIZIONE DEI SENSORI E RELATIVA FOTO.....	102
FIGURA 46: CAMPANILE DELLA CHIESA DI S. MARIA ASSUNTA IN PROVVIDENTI: RAPPRESENTAZIONE GRAFICA DELLE FORME MODALI IDENTIFICATE.....	103
FIGURA 47: CONFRONTO TRA I PERIODI DI RITORNO AL VARIARE DEL PERIODO FONDAMENTALE T_1	113
FIGURA 48: AREA DELLA SEZIONE DI BASE IN FUNZIONE DELL'ALTEZZA.....	114
FIGURA 49: AREA DELLA SEZIONE RESISTENTE DI BASE IN FUNZIONE DELL'ALTEZZA.....	115
FIGURA 50: MOMENTI DI INERZIA IN FUNZIONE DELL'ALTEZZA.....	116
FIGURA 51: MODULI ELASTICI NORMALI IN FUNZIONE DELL'ALTEZZA.....	117
FIGURA 52: SPESSORE DEI PANNELLI MURARI IN FUNZIONE DELL'ALTEZZA.....	118
FIGURA 53: DIAGRAMMA DELLE CORRELAZIONI TRA PERIODO FONDAMENTALE ED ALTEZZA.....	119
FIGURA 54: MODULI SCHEDOGRAFICI (ESTRATTO DA: SISTEMA_MONITORAGGIO_SISMICO_MANUALE_UTENTE)	121
FIGURA 55: MODULO FATTORE DI CONFIDENZA.....	123
FIGURA 56: MASCHERA PER LA "LUCIDATURA" DEGLI ELEMENTI.....	124
FIGURA 57: IL MODULO "RIEPILOGO E CALCOLO I_s ".....	132
FIGURA 58: UNA MASCHERA DEL SISTEMA INFORMATIVO DEL PABAAC.....	133
FIGURA 59: CASTELLO DI CAPUA IN GAMBATESA.....	134
FIGURA 60: CASTELLO DI CAPUA IN GAMBATESA: BANCO DI TUFO AFFIORANTE SU CUI FONDANO LE PARETI ED INDICAZIONE DELL'ARCO ABBATTUTO.....	138
FIGURA 61: CASTELLO DI CAPUA IN GAMBATESA: LE DUE TIPOLOGIE MURARIE, A SINISTRA LA PARTE ANTICA ED A DESTRA LA PARTE NUOVA.....	138
FIGURA 62: CASTELLO PANDONE IN VENAFRO.....	139
FIGURA 63: CASTELLO PANDONE IN VENAFRO: PARTICOLARE DELLA MURATURA.....	141
FIGURA 64: COMPLESSO MONUMENTALE S. MARIA DELLE MONACHE IN ISERNIA.....	143
FIGURA 65: PALAZZO JAPOCE IN CAMPOBASSO.....	147
FIGURA 66: INTERNO DI PALAZZO JAPOCE ALLO STATO ATTUALE.....	149
FIGURA 67: INTERNO DI PALAZZO JAPOCE ALLO STATO ATTUALE.....	149
FIGURA 68: PALAZZO JAPOCE IN CAMPOBASSO: LE DUE TIPOLOGIE MURARIE, A SINISTRA LA TIPOLOGIA ESTERNA ED A DESTRA LA TIPOLOGIA INTERNA.....	150
FIGURA 69: PALAZZO JAPOCE IN CAMPOBASSO DURANTE GLI INTERVENTI: LE DUE TIPOLOGIE MURARIE. LA BRECCIA APERTA (SEGNATA NELL'OVALE) EVIDENZIA LA MANCANZA DI AMMORSAMENTO (FOTO: SOPRINTENDENZA BAP MOLISE).....	152

FIGURA 70: PALAZZO JAPOCE IN CAMPOBASSO: A SINISTRA RIFACIMENTO DEGLI ARCHI, A DESTRA RIFACIMENTO DELLE PIATTABANDE ED INCAMICIATURA DELLE PARETI A PIANOTERRA. (FOTO: SOPRINTENDENZA BAP MOLISE)	152
FIGURA 71: PALAZZO JAPOCE IN CAMPOBASSO: UNO DEI SOLAI NUOVI, IN ACCIAIO E LAMIERA GRECATA. (FOTO: SOPRINTENDENZA BAP MOLISE).....	153
FIGURA 72: PALAZZO JAPOCE IN CAMPOBASSO: LA COPERTURA IN ACCIAIO E LAMIERA. (FOTO: IMPRESA MACCHIAROLA, CAMPOBASSO).....	153
FIGURA 73: PALAZZO MAZZAROTTA IN CAMPOBASSO	154
FIGURA 74: PALAZZO MAZZAROTTA IN CAMPOBASSO: SUDDIVISIONE IN BLOCCHI.....	155
FIGURA 75: PALAZZO MAZZAROTTA: LE DUE TIPOLOGIE MURARIE, A SINISTRA (FOTO: SOPRINTENDENZA BAP MOLISE) QUELLA INTERNA ED A DESTRA QUELLA ESTERNA	157
FIGURA 76: PALAZZO MAZZAROTTA IN CAMPOBASSO: ASSENZA DI CONNESSIONE TRA LE PARETI. (FOTO: SOPRINTENDENZA BAP MOLISE).....	158
FIGURA 77: PALAZZO MAZZAROTTA IN CAMPOBASSO: ROCCE AFFIORANTI.....	158
FIGURA 78: PALAZZO MAZZAROTTA IN CAMPOBASSO: ESECUZIONE DELLE INIEZIONI. (FOTO: SOPRINTENDENZA BAP MOLISE).....	159
FIGURA 79: IL PROSPETTO PRINCIPALE DEL CONVITTO NAZIONALE IN UNA FOTO DI INIZIO XX SECOLO.	164
FIGURA 80: CONVITTO NAZIONALE "M. PAGANO": PIANTA DELLE FASI COSTRUTTIVE	165
FIGURA 81: CONVITTO NAZIONALE "M. PAGANO": UN GRAFICO ORIGINALE, CHE RAPPRESENTA IL PIANO TERRA. IN GRIGIO IL LOTTO REALIZZATO, IN ROSSO LE PARTI DA REALIZZARE (ARCHIVIO STORICO DI CAMPOBASSO)	166
FIGURA 82: CONVITTO NAZIONALE "M. PAGANO": IL GRAFICO ORIGINALE DEL PROGETTO DEL SOLAIO A COPERTURA DEL REFETTORIO, ESEGUITO DALL'IMPRESA INDUSTRIALE ITALIANA DI COSTRUZIONI METALLICHE, 1891 (ARCHIVIO STORICO DI CAMPOBASSO)	167
FIGURA 83: CONVITTO NAZIONALE "M. PAGANO": STUDIO DEI MECCANISMI DI COLLASSO, INDICAZIONI SULLE VERTICALI INDAGATE	168
FIGURA 84: CONVITTO NAZIONALE "M. PAGANO": STUDIO DEI MECCANISMI DI COLLASSO, TIPOLOGIE DI COLLASSO.....	169
FIGURA 85: CONVITTO NAZIONALE "M. PAGANO": SISTEMA DI MONITORAGGIO, PIANTA CON LA POSIZIONE DEI TUBI INCLINOMETRICI E DEI PIEZOMETRI INSTALLATI.....	170
FIGURA 86: CONVITTO NAZIONALE "M. PAGANO": SISTEMA DI MONITORAGGIO, POSIZIONE DI ALCUNE DELLE PIASTRINE PER LE MISURE AL TENSOTAST, SULLA FACCIATA PRINCIPALE.....	171
FIGURA 87: CONVITTO NAZIONALE "M. PAGANO": SUDDIVISIONE IN BLOCCHI	172
FIGURA 88: I SETTI DEFINITI GRAFICAMENTE (A SINISTRA) E L'OUTPUT GRAFICO DELLO SCRIPT (A DESTRA)	178
FIGURA 89: L'OUTPUT NUMERICO DELLO SCRIPT FORNITO COME FILE DI TESTO.....	179
FIGURA 90: L'OUTPUT NUMERICO CARICATO IN EXCEL.....	179

Indice delle Tabelle

TABELLA 1: LIVELLI DI CONOSCENZA IN FUNZIONE DELLE INFORMAZIONI DISPONIBILI E CONSEGUENTI METODI DI ANALISI AMMESSI E VALORI DEI FATTORI DI CONFIDENZA NELLE COSTRUZIONI IN MURATURA (TABELLA 11.5.1 OPCM 3274).....	20
TABELLA 2: PROBABILITÀ DI SUPERAMENTO E PERIODO DI RITORNO DELL'EVENTO SISMICO IN 50 ANNI PER I VARI STATI LIMITE.....	20
TABELLA 3: TABELLA 4.3 DELL'OPCM CHE RIPORTA I FATTORI D'IMPORTANZA.	21
TABELLA 4: DEFINIZIONE DEI LIVELLI DI APPROFONDIMENTO SUI DIVERSI ASPETTI DELLA CONOSCENZA E RELATIVI FATTORI PARZIALI DI CONFIDENZA (TABELLA 4.1 LINEE GUIDA 2006).....	22
TABELLA 5: PROBABILITÀ DI ECCEDENZA IN 50 ANNI DELL'AZIONE SISMICA E FATTORI DI IMPORTANZA PER LA VERIFICA ALLO SLU (TABELLA 2.1 LINEE GUIDA 2006).....	22
TABELLA 6: PROBABILITÀ DI ECCEDENZA IN 50 ANNI DELL'AZIONE SISMICA E FATTORI DI IMPORTANZA PER LA VERIFICA ALLO SLD (TABELLA 2.1 LINEE GUIDA 2006).....	23
TABELLA 7: ZONE IN CUI ERA DIVISO IL TERRITORIO NAZIONALE E VALORI DI A_G ASSOCIATI.....	24
TABELLA 8: VALORI DEL FATTORE S E VALORI DEI PERIODI CHE SEPARANO I DIVERSI RAMI DELLO SPETTRO, IN FUNZIONE DELLA STRATIGRAFIA DEL SUOLO DI FONDAZIONE (TABELLA 3.1 OPCM 3274).....	24
TABELLA 9: VALORI DEL COEFFICIENTE DI AMPLIFICAZIONE STRATIGRAFICA S_5 E DEL COEFFICIENTE C_C , FUNZIONE DEL PROFILO STRATIGRAFICO (A,B,C,D,E) E DEL SITO ATTRAVERSO I PARAMETRI A_G , F_0 , T_C^*	24
TABELLA 10: VALORI DEI PERIODI CHE SEPARANO I DIVERSI RAMI DELLO SPETTRO, FUNZIONE DEL PROFILO STRATIGRAFICO DEL SUOLO DI FONDAZIONE E DEL SITO.....	25
TABELLA 11: PROBABILITÀ DI SUPERAMENTO P_{VR} AL VARIARE DELLO STATO LIMITE CONSIDERATO (TABELLA 3.2.I NTC 2008).....	25
TABELLA 12: TABELLA C8A.2.1 DELLA CIRCOLARE 2009 CHE RIPORTA LE CARATTERISTICHE DELLE TIPOLOGIE MURARIE	47
TABELLA 13: TABELLA C8A.2.2 DELLA CIRCOLARE 2009 CON I COEFFICIENTI CORRETTIVI DELLE CARATTERISTICHE DELLE TIPOLOGIE MURARIE DELLA TABELLA C8A.2.1	47
TABELLA 14: TABELLA 3.3 DEL VOLUME "SISMA 2002 - DALL'EMERGENZA ALLA RICOSTRUZIONE - EDIFICI IN MURATURA"	58
TABELLA 15: TIPOLOGIE MURARIE PROPOSTE PER LA REGIONE MOLISE (TRATTO DAL VOLUME "SISMA 2002 - DALL'EMERGENZA ALLA RICOSTRUZIONE - EDIFICI IN MURATURA")	60
TABELLA 16: CAMPANILE DELLA CHIESA DI S. MARIA DELLE ROSE IN BONEFRE: FREQUENZE E FORME MODALI DEI PRIMI CINQUE MODI DI VIBRAZIONE.....	72
TABELLA 17: CAMPANILE DELLA CHIESA DI S. MARIA DELLE ROSE IN MONTORIO NEI FRENTANI: FREQUENZE E FORME MODALI DEI PRIMI SEI MODI DI VIBRAZIONE	76

TABELLA 18: CAMPANILE DELLA CHIESA DI S. MARIA ASSUNTA IN RIPABOTTONI: FREQUENZE E FORME MODALI DEI PRIMI QUATTRO MODI DI VIBRAZIONE	82
TABELLA 19: CAMPANILE DELLA CHIESA DI S. MARIA MAGGIORE IN MORRONE DEL SANNIO: FREQUENZE E FORME MODALI DEI PRIMI TRE MODI DI VIBRAZIONE	86
TABELLA 20: CAMPANILE DELLA CHIESA DI S. GIACOMO APOSTOLO IN SANTA CROCE DI MAGLIANO: FREQUENZE E FORME MODALI DEI PRIMI TRE MODI DI VIBRAZIONE	89
TABELLA 21: CAMPANILE DELLA CHIESA DI S. MARIA DELLA PIETÀ IN LARINO: FREQUENZE E FORME MODALI DEI PRIMI SEI MODI DI VIBRAZIONE	92
TABELLA 22: CAMPANILE DELLA CATTEDRALE DI S. PARDO IN LARINO: FREQUENZE E FORME MODALI DEI PRIMI TRE MODI DI VIBRAZIONE.....	96
TABELLA 23: CAMPANILE DELLA CHIESA DI S. ALFONSO DEI LIGUORI IN COLLETORTO: FREQUENZE E FORME MODALI DEI PRIMI CINQUE MODI DI VIBRAZIONE	100
TABELLA 24: CAMPANILE DELLA CHIESA DI S. MARIA ASSUNTA IN PROVVIDENTI: FREQUENZE E FORME MODALI DEI PRIMI TRE MODI DI VIBRAZIONE	103
TABELLA 25: DATA BASE A DISPOSIZIONE	108