

Intervento di isolamento sismico alla base di un edificio in muratura di pregio storico-artistico in L'Aquila

Seismic base-isolation of a historical masonry building in L'Aquila

Riccardo Vetturini¹, Walter Cecchini¹, Rolando Mariani², Romeo Mariani², Tiziana Ciotti², Elisabetta Maria Agostini³ ■

Sommario

La crisi sismica del 6 aprile 2009 che ha colpito il territorio di L'Aquila ha provocato nell'edificio "La Silvestrella" un livello di danneggiamento estremamente grave e diffuso fino a determinare una condizione di dissesto prossima al crollo. L'immobile è in realtà una villa dei primi del novecento che è stata conservata senza alcuna manomissione o superfetazione. L'interesse fondamentale che riveste l'edificio discende proprio da tale caratteristica che la pone tra i rari esempi di architettura eclettica, fantastica, grottesca, giunta ai giorni nostri senza manomissioni. La presente relazione pone in evidenza le particolarità storiche dell'edificio, evidenziando gli elementi di grave vulnerabilità sismica, rappresentando le difficoltà operative di effettuare un approccio "tradizionale" di rinforzo rispettoso della valenza storica del bene stesso e contemporaneamente efficace in ordine all'incremento sensibile della sicurezza.

In questo lavoro si analizzano le fasi esecutive e le problematiche specifiche relative alla realizzazione, operando in condizioni di sicurezza, di un'opera di isolamento alla base di un edificio in muratura esistente per altro gravemente danneggiato. Il tema offre inoltre spunto per alcune riflessioni di carattere generale sulla possibilità di estendere tale approccio ovvero i limiti di applicazione dello stesso ad altre tipologie similari.

Parole chiave: Isolamento alla base, Edificio storico, Analisi spettrale

Abstract

The seismic event that occurred in L'Aquila on April 6th 2009, caused a wide and extremely high damage level in the historical masonry building called "La Silvestrella", that its general condition was near the collapse. Actually the structure is a historical mansion, built in the early years of the 1900, that was kept in its original configuration, without changes or superfetations. This characteristic is the reason of the importance of this building, since it represents an uncommon example of eclectic, fantastic, grotesque architecture that has been passed down over the years without changes or additional external interventions.

This article underlines the historical peculiarities of the examined building and describes the elements that may represent a particularly critical seismic vulnerability. The practical difficulties of following a traditional strengthening intervention approach, that respects the historical importance of the structure and is really effective in terms of seismic response and safety level, are highlighted.

The different phases and the peculiar issues of a seismic base isolation intervention on an existing highly damaged historical masonry structure are analyzed. Moreover the topic described in this article may give some useful practical general information about the advantages and the limitations of the base isolation intervention and the possibility to extend it to other typologies of heavily damaged structures.

Keywords: Base isolation, Historical building, Response spectrum analysis

1. Considerazioni Architettoniche

La realizzazione della villa denominata *La Silvestrella* (Figure 1 e 2) si colloca nei primi decenni del XX secolo, periodo stilisticamente caratterizzato in Italia dal gusto liberty frequentemente declinato in progetti di dimora signorile e di rappresentanza, e che in Abruzzo si manifesta

secondo un tono non particolarmente accentuato e quindi non sempre di immediata riconoscibilità, bensì con un apparato decorativo ricondotto a fabbriche di impostazione eclettica, neogotica o neorinascimentale (Figura 3).

Alla luce del quadro storico e linguistico sinteticamente delineato, la villa La Silvestrella sembra

¹ INGENIUM Srl - Società di Ingegneria - Corso Cavour, 84 - Foligno (PG) - www.ingeniumsrl.com

² Studio Tecnico R. Mariani - Via XX Settembre, 23 - Ascoli Piceno (AP) - www.rolandomariani.it

³ Docente di Architettura presso l'Università degli Studi di Firenze



Figura 1
Prospetto ovest della villa
"La Silvestrella".

contenere alcuni caratteri propri della sensibilità liberty abbinati ad elementi tipologici e morfologici derivati da influenze neo-gotiche e neo-rinascimentali.

Nello specifico la villa si sviluppa secondo un'articolazione asimmetrica della pianta cui corrisponde un fronte principale impostato su un asse centrale di simmetria, rimarcato dalla presenza di un'apertura; un arioso portico, decorato ed impreziosito con motivi ad affresco, definisce il basamento del fronte principale per l'intera lunghezza, mediante la successione continua di sette arcate a sesto ribassato. Su quest'ultimo si eleva il corpo binato del fronte principale che sembra invece voler derivare sia il linguaggio che la definizione formale da un gusto propriamente neo-gotico.

Una medesima libertà compositiva impronta i fronti laterali della villa distinguendo in modo particolare l'attacco a terra della stessa: da un lato un corpo di fabbrica ad unico piano con terrazza soprastante, e decorato da una partizione architettonica neo-classica, termina in un bow-window (elemento ascrivibile tra quelli propri del gusto liberty); dall'altro un'architettura di ferro e vetro - vagamente riecheggiante una serra o un giardino d'inverno-, su cui si innesta una delle due torrette che caratterizzano la

variegata articolazione dei volumi (Figura 3).

L'articolazione del corpo di fabbrica, oltre ad una forte espressività dovuta alla variazione di forma della copertura, evidenzia la presenza di due corpi alti, le torrette, il cui linguaggio - oltre ad appartenere ai canoni del gusto liberty per la generosità delle superfici vetrate e delle decorazioni-, lascia aperti possibili riferimenti all'architettura neogotica coeva di derivazione mitteleuropea, messa in atto in un ambito geografico distante da quello specifico di riferimento. È senza dubbio affascinante ritenere che il luogo abbia in qualche modo influenzato i riferimenti di carattere linguistico della villa e che siano stati ricercati nel panorama contemporaneo i riferimenti appropriati, e pertanto altri rispetto all'architettura dei villini liberty realizzati negli stessi anni sui litorali abruzzesi. In particolare proprio il confronto nel trattamento delle torrette, elementi caratterizzanti i villini del periodo liberty, con queste ultime della villa Ciccozzi, lascia spazio ad un ragionamento su tale ipotesi. Nella torretta più alta infatti la consueta finestra a tre luci dell'architettura liberty coesiste con la terminazione a guglia tipicamente adottata nell'architettura nordica.

La stessa copertura, plasmata con forme che ancora una volta riconducono all'architettura



Figura 2
Prospetto est della villa
"La Silvestrella".

Figura 3
Vista della villa
"La Silvestrella" a seguito
delle opere provvisionali di
messa in sicurezza
conseguenti al sisma del 6
aprile 2009 (in basso).



Figura 4
Villa Fallet, Le Corbusier
presso La Chaux De Fonds,
Svizzera - prospetto
principale.



Figura 5
Villa Fallet, Le Corbusier
presso La Chaux De Fonds,
Svizzera - prospetto laterale.



alpina, e la stessa opzione per il manto di protezione, rimandano a scelte assonanti a quelle operate contestualmente nell'area mitteleuropea. A titolo di puro riferimento per alcuni caratteri tipologici e morfologici si richiama la Villa Fallet che Le Corbusier costruisce presso La Chaux De Fonds in Svizzera nel 1905 (Figure 4 e 5). La villa La Silvestrella (silvestre come proprio dei boschi) presenta un apparato decorativo analogo a quello della Villa Fallet: si notino a titolo

di esempio i sistemi di contrasto dell'oggetto della copertura, trattati come elementi decorati in legno, nonché la forma stessa di quest'ultima. Nella villa Ciccozzi inoltre vengono declinate con lo stesso linguaggio e materiale dei puntoni suddetti anche la maggior parte delle balaustre e delle strutture di oggetto dei balconi. In conclusione se da un lato il carattere della villa sembra volersi ispirare al luogo di appartenenza attribuendo alla fabbrica, attraverso la



gentile presenza del liberty, il carattere fiabesco di "architettura del bosco" - anche lo stesso muro di cinta sembra ispirarsi a tale suggestione nonché il parco che la accoglie -, dall'altro l'aderenza al linguaggio del periodo storico permane come carattere distintivo ed unico della stessa e come dato manifesto sia negli elementi tipologici - il portico, la torretta, sia nella ricchezza degli apparati decorativi, dal trattamento policromo delle superfici in laterizio o dipinte ad affresco, fino ad arrivare alle balaustre, ai marcapiani, agli intradossi decorati delle coperture ed alle superfici vetrate (Figura 6).

2. Descrizione generale - analisi del dissesto

Il fabbricato si sviluppa per tre livelli fuori terra (quattro se si considera la torretta) e per una porzione limitata al di sotto del piano di campagna completamente interrato (Figure da 7 a 11). L'edificio è stato fortemente danneggiato dal sisma del 6 aprile 2009. Il danneggiamento riguarda sia le pareti murarie che presentano un quadro fessurativo complesso, profondo e articolato, sia le colonne del porticato esterno sul lato ovest, sia gli impalcati costituiti in parte da solai in travi in acciaio, in parte da solette in calcestruzzo armato.

In realtà l'edificio è strutturato in modo da risultare estremamente vulnerabile per la componente orizzontale delle azioni sismiche poiché molte delle murature dei piani superiori non sono la prosecuzione di quelle presenti al pianterreno. Molte delle pareti del piano primo e del piano secondo nascono "in falso" su travature poggiate sulle pareti trasversali del vano sottostante (Figure 12 e 13). L'edificio è stato costruito con una logica costruttiva ben congeniata dal punto di vista dei carichi verticali, avendo ad esempio di costruire le pareti "in falso" in blocchi forati leggeri e con una camera d'aria interna per alleggerire ulteriormente, ma trascurando completamente la sicurezza a fronte delle azioni orizzontali.

Questo "squilibrio" costruttivo si evidenzia dal raffronto delle piante dei vari livelli per molte pareti non sovrapponibili che appaiono quasi piante di tre fabbricati diversi.

Tutte le murature al pianterreno, del tipo misto, con legante in calce di scarsa consistenza strutturale, presentano lesioni importanti per taglio. Le pareti in foratoni sono fortemente disgregate, i due torrioni sono stati gravemente compromessi, risultano inclinati in modo evidente e sono stati imbragati per la messa in sicurezza con intervento della Protezione Civile.

Figura 6
Vista della Villa
"La Silvestrella" dall'ampia
terrazza.

Figura 7
Pianta del piano interrato.

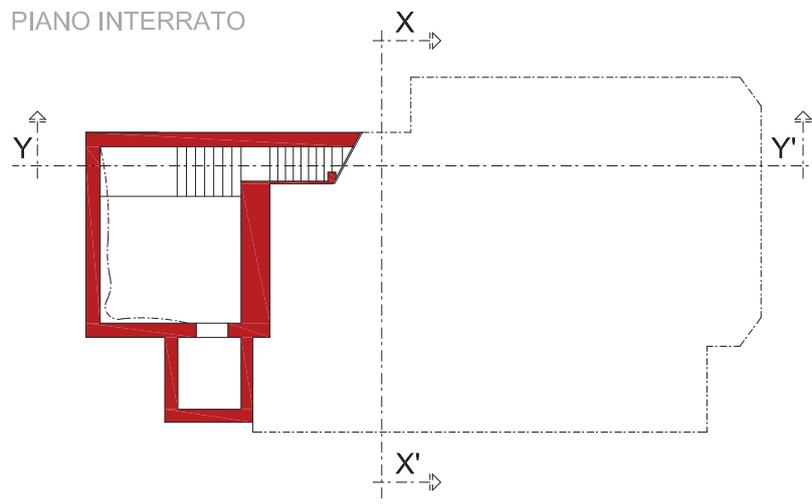
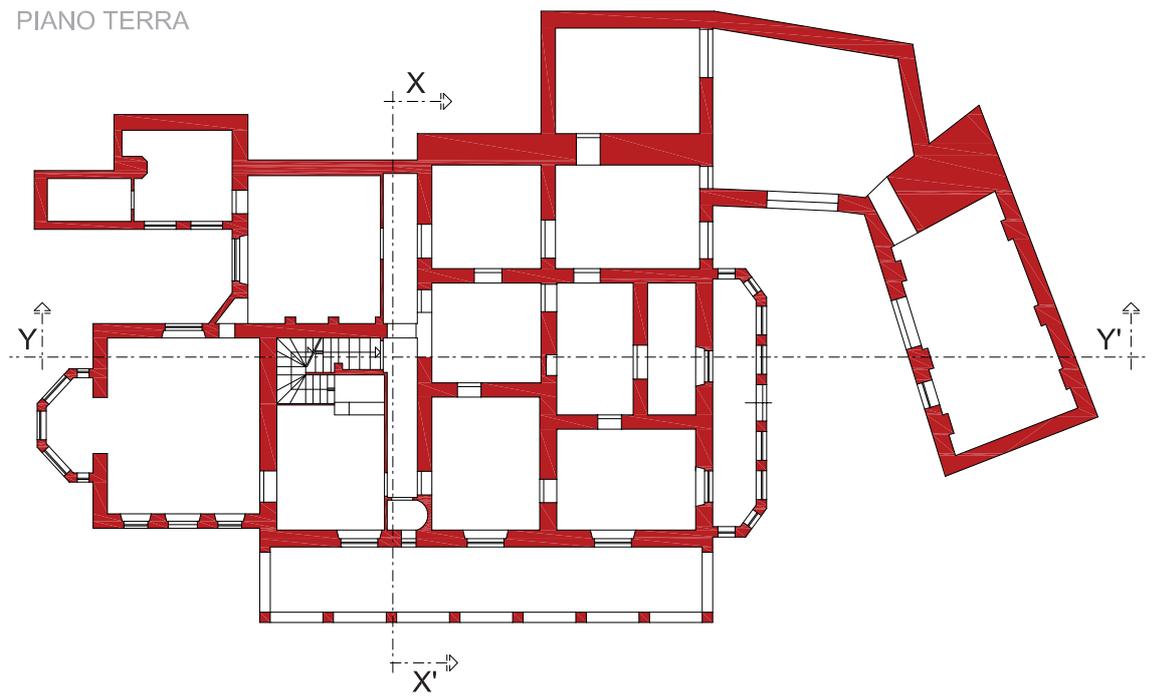
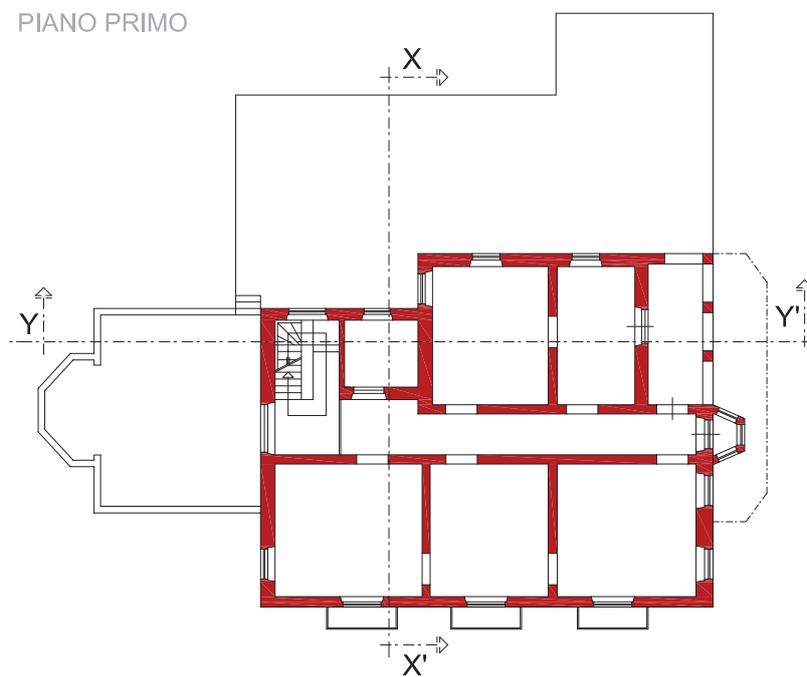


Figura 8
Pianta del piano terra.



Figur 9
Pianta del piano primo.



PIANO SECONDO

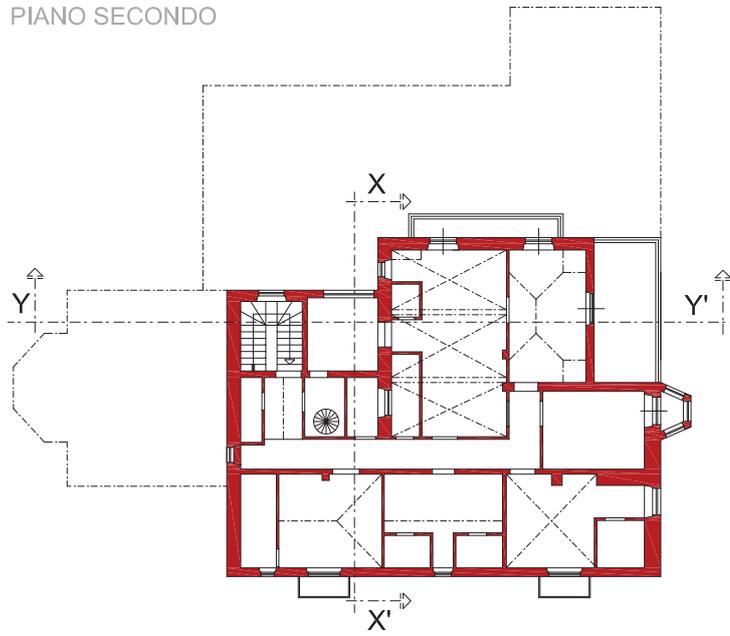


Figura 10
Pianta del piano secondo.

COPERTURA

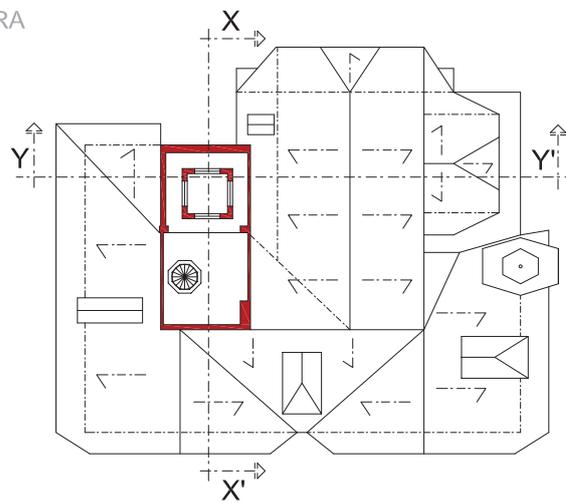
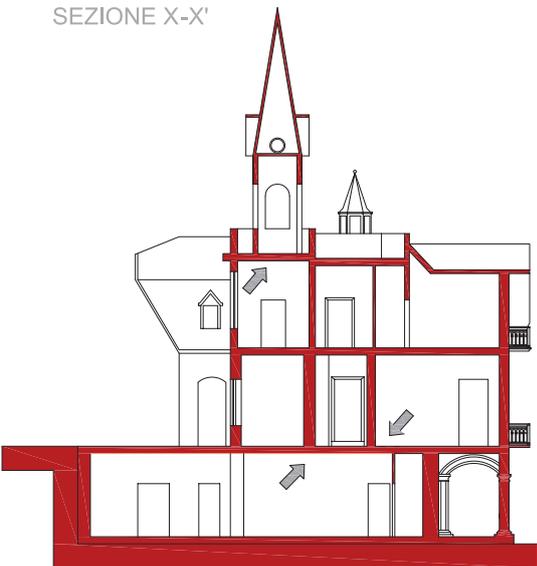


Figura 11
Pianta della soffitta e della
copertura.

SEZIONE X-X'



SEZIONE Y-Y'



Figure 12 e 13
Sezioni dell'edificio con
evidenziazione delle
murature in falso presenti.

Figura 14
Opere provvisorie di messa in sicurezza di uno dei torrioni.



Gravi danni, con espulsione di parte della parete, ha riportato l'ala nord del primo piano sopra la zona porticata.

I pilastri del porticato e le arcate in laterizio debbono essere sottoposte ad un consistente intervento di consolidamento (si veda la precedente Figura 3), così come tutta la copertura (Figura 14). Al pianterreno, si sono verificate fessurazioni sulle pavimentazioni poggiate su massetti direttamente posti sul terreno.

L'edificio, anche per il rilievo che riveste in termini di valore storico ed architettonico, deve dunque avere un importante intervento di consolidamento, mirato a migliorarne eliminando le manifeste carenze strutturali a fronte di un evento sismico.

Occorre inoltre evidenziare la particolarità delle strutture di fondazione, che di fatto sono inesi-

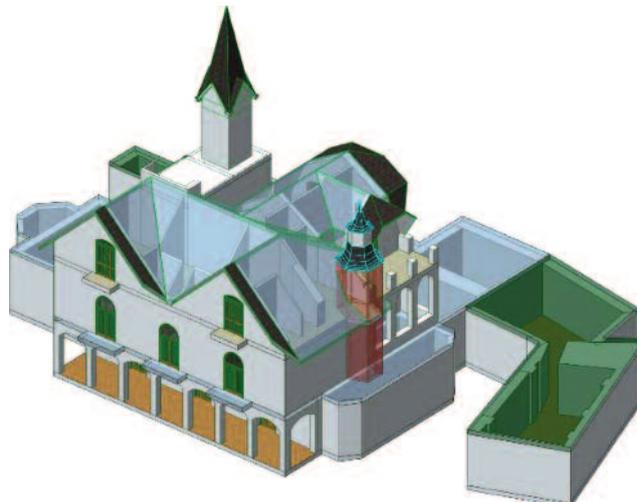
stenti. L'edificio sorge infatti in un sito ove le formazioni costituite da detriti calcarei cementati sono affioranti. Con probabilità nella fase di costruzioni si è proceduto ad un scavo/demolizioni di tali affioramenti rocciosi e ad una riprofilatura grossolana del piano di campagna con gli stessi detriti di risulta dello sbancamento. Pertanto la fondazione in realtà non esiste per gran parte delle murature che poggiano direttamente sullo strato litico affiorante; viceversa laddove era presente un'irregolarità altimetrica del contatto stratigrafico, questa venne con probabilità colmata con i detriti di risulta dello scavo/sbancamento, appoggiando le pareti in elevazione anche in questo caso direttamente a quota pavimento. Nelle pareti del piano terra si evidenziano localmente lesioni congruenti a piccoli cedimenti locali, laddove appunto la parete appoggia sul detrito ed analogamente si delinea un quadro fessurativo che interessa anche i pavimenti del piano terra.

3. Analisi strutturali

Per la struttura oggetto del presente intervento si è conseguito un livello di conoscenza limitato LC1, in quanto la presenza di pareti decorate e/o di tessuti e carta da parati da conservare ha impedito la possibilità di effettuare prove in situ, anche se limitatamente invasive (martinetti piatti...). È stato eseguito un rilievo completo della struttura e del quadro fessurativo; si sono rilevati i principali dettagli costruttivi e le tipologie di murature presenti; le pareti principali dell'edificio sono classificabili come muratura in pietrame disordinata, mentre le colonne del porticato sono realizzate in mattoni pieni; le pareti perimetrali presentano inoltre una cortina decorativa esterna realizzata prevalentemente in mattoni pieni.

Pur nella consapevolezza di non poter numericamente modellare il comportamento strutturale di un manufatto così complesso ed articolato con il solo scopo di "stimare" le condizioni di sicu-

Figura 15
Modello strutturale adottato per l'analisi dello stato attuale dell'edificio.



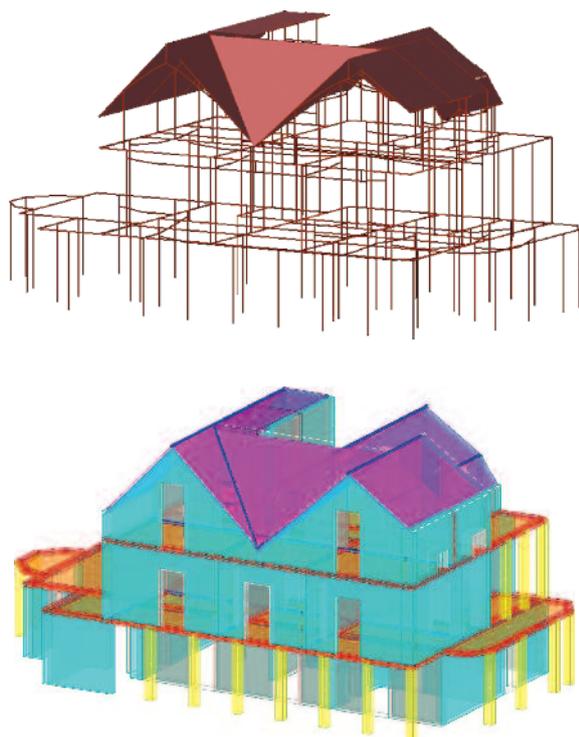


Figure 16 e 17
Modello strutturale adottato per l'analisi statica non lineare dello stato attuale dell'edificio.

rezza attuali si è proceduto ad un'analisi strutturale agli elementi finiti complessiva della fabbrica per valutare la "capacità" attuale (pre-sisma) dell'edificio principalmente per le azioni nel piano (Figura 15), mentre sono stati analizzati alcuni dei più probabili meccanismi locali che il modello generale non riusciva a descrivere in maniera sufficientemente aderente alla realtà dell'edificio, in particolare il portico e le torrette, con modelli cinematici locali.

L'analisi del comportamento globale della struttura allo stato attuale sotto azioni sismiche è stata condotta mediante un'analisi statica non lineare (analisi push-over), che consiste nell'applicare alla struttura i carichi gravitazionali e, per l'azione considerata per l'azione sismica, un sistema di forze orizzontali distribuite proporzionalmente alle forze di inerzia ed aventi risultante pari al taglio alla base; tali forze sono scalate in modo da far crescere monotonamente lo spostamento orizzontale d_c di un punto di controllo coincidente con il centro di massa dell'ultimo livello, fino al raggiungimento delle condizioni di collasso locale o globale.

A parere degli Autori, tale tipo di analisi è il metodo più appropriato a descrivere il comportamento delle costruzioni in muratura e per determinarne la sicurezza, espressamente previsto dalle Norme Tecniche per le Costruzioni per la determinazione degli effetti delle azioni sismiche al punto 7.3.4.1 (Figura 18). La variabilità spaziale del moto sismico e le incertezze nella localizzazione delle masse sono tenute in conto attribuendo al centro di massa dei solai rigidi un

eccentricità accidentale, come stabilita al 7.2.6 delle NTC.

Le ipotesi iniziali sono:

- Vita nominale (VN): 50 anni;
- Classe d'uso (classe): II;
- Coeff. D'uso (CU): 1.0;
- Periodo di riferimento per l'azione sismica ($V_R = V_N \times C_U$): 50 anni.
- Categoria sismica del terreno: B

Tabella 1 - Valori di progetto dell'azione sismica

	α_g/g	F_0	T_c^*
SLC	0.3340	2.40	0.36
SLV	0.2607	2.36	0.35
SLD	0.1039	2.33	0.28

La modellazione utilizzata per l'analisi statica non lineare della sovrastruttura è stata eseguita mediante il metodo del telaio equivalente; la successiva analisi dinamica modale della struttura isolata è stata invece eseguita su un modello realizzato mediante mesh piane di elementi bidimensionali a 4 nodi (Figure 16 e 17). In entrambe le modellazioni si è adottata una schematizzazione a solai infinitamente rigidi nel proprio piano, tenendo conto degli interventi previsti sugli impalcati allo stato di progetto.

Sono state eseguite verifiche sia per i meccanismi duttili di pressoflessione che per i meccanismi fragili a taglio con la nota formula di Turnsek & Cacovic (1971).

Nell'analisi pushover della struttura a base fissa sono state utilizzate due distribuzioni di carico

Figura 18
Spettro elastico relativo allo Stato Limite di Salvaguardia della Vita.

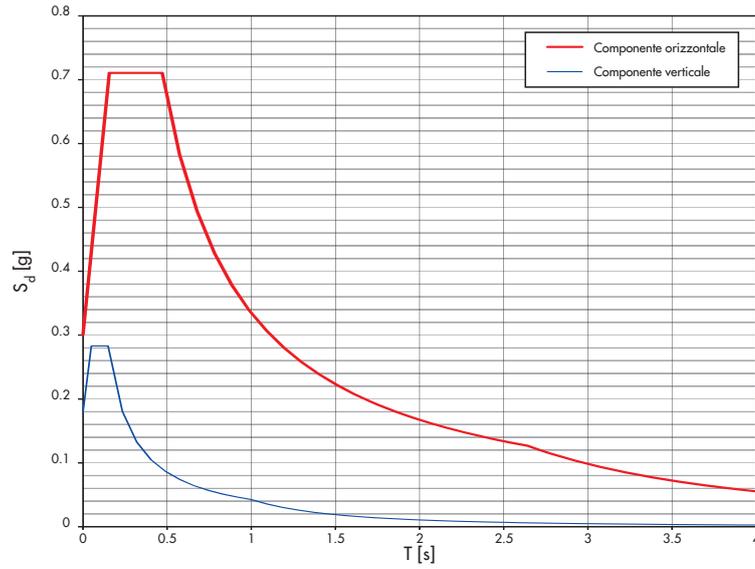
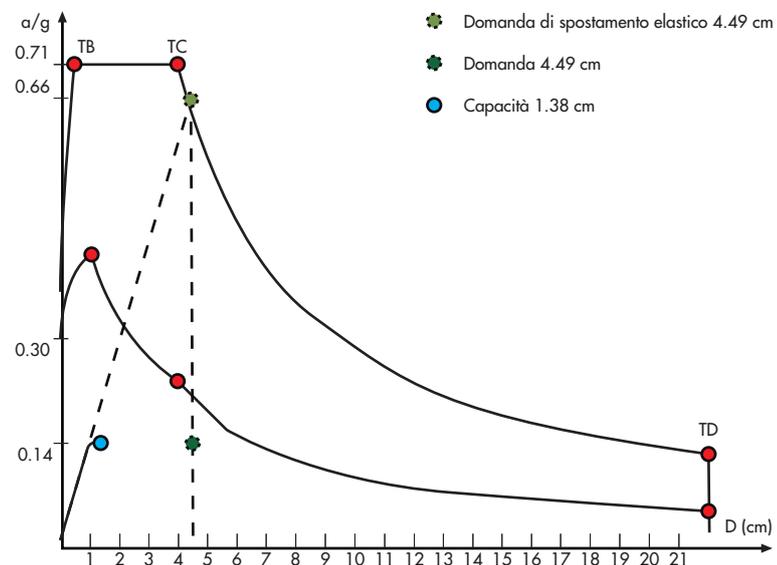


Tabella 2 - risultati relativi ad ogni curva di spinta esaminata nell'analisi sismica statica non lineare, in termini di periodo di ritorno, PGA e indici di rischio IR,TR e IR,PGA in funzione rispettivamente del periodo di ritorno e della PGA considerati

Comb	Carichi	TR	IR,TR	PGA	IR,PGA
1	gruppo1	55	0.413	0.13	0.433
1	gruppo2	50	0.397	0.125	0.415
2	gruppo1	50	0.397	0.125	0.415
2	gruppo2	50	0.397	0.125	0.415
3	gruppo1	45	0.381	0.118	0.391
3	gruppo2	40	0.363	0.11	0.367
4	gruppo1	55	0.413	0.13	0.433
4	gruppo2	40	0.363	0.11	0.367
5	gruppo1	55	0.413	0.13	0.433
5	gruppo2	45	0.381	0.118	0.391
6	gruppo1	45	0.381	0.118	0.391
6	gruppo2	45	0.381	0.118	0.391
7	gruppo1	55	0.413	0.13	0.433
7	gruppo2	50	0.397	0.125	0.415
8	gruppo1	45	0.381	0.118	0.391
8	gruppo2	50	0.397	0.125	0.415

Figura 19
Punti caratteristici della domanda e della capacità di prestazioni della struttura nei confronti dell'azione sismica, incoordinate spettrali.



(Tabella 2), secondo quanto previsto al punto 7.3.4 delle NTC2008: la prima di forma “triangolare” e proporzionale al primo modo di vibrare (distribuzione A – Gruppo 1), e la seconda di forma “rettangolare” e proporzionale alle masse (distribuzione E – Gruppo 2).

Per l’analisi statica non lineare relativa allo Stato Limite di Salvaguardia della Vita si sono eseguite 16 analisi di spinta (pushover), considerando una distribuzione principale delle forze di inerzia proporzionali alle forze statiche ed una distribuzione secondaria caratterizzata da forze uniformi. I risultati ottenuti per ogni curva di spinta sono riportati in Tabella 2, in termini di periodo di ritorno, di PGA e di indicatori di rischio.

In figura 19 si riporta la rappresentazione grafica del rapporto tra domanda e capacità della struttura, in coordinate spettrali, relativamente alla curva di spinta più gravosa per l’edificio.

Dalle analisi svolte si è ottenuta la seguente capacità dell’edificio in termini di accelerazione massima al suolo per la forma spettrale considerata: $PGA_{SLV} = 0.110 g$

ed il corrispondente indicatore di rischio sismico IR_{PGA} della struttura, calcolato come rapporto fra la capacità e la domanda sismica in termini di accelerazione:

$$IR_{PGA} = 0.367$$

Il valore ottenuto conferma le valutazioni qualitative che il quadro fessurativo manifesta.

5. Ipotesi di intervento “tradizionale” per l’incremento della capacità

Essendo l’edificio di particolare interesse storico, architettonico ed ambientale (Figura 20), è necessario in ogni caso configurare una proposta d’intervento equilibrata che eviti lo stravolgimento della situazione di fatto. In altre parole le

ragioni della sicurezza devono trovare un giusto compromesso con la tutela ed il rispetto della valenza storico ed architettonica dell’edificio. Tenuto conto della tipologia costruttiva è stato chiaro fin dall’inizio che non si sarebbe riusciti a garantire la capacità di assorbire il 60% dell’accelerazione sismica di un adeguamento così come richiesto dalle norme per la ricostruzione post sismica per edifici non vincolati.

I temi strutturali da affrontare immediatamente emersi sono risultati subito numerosi e tra essi possiamo distinguere opere di semplice riparazione, opere di rinforzo e opere di eliminazione di difetti strutturali. Come già evidenziato l’edificio è di particolare pregio storico artistico e la sua valenza si esprime in una serie di dettagli costruttivi che riguardano il fabbricato in ogni sua parte, i paramenti esterni ricchi di cornici ed elementi decorativi, gli infissi interni, i soffitti, le pavimentazioni, gli imbotti delle aperture. Si ha pertanto poco spazio di manovra per operare ad esempio un rinforzo “tradizionale” e l’eliminazione di quei difetti che hanno condotto al dissesto (carenza di maschi murari sismo resistenti).

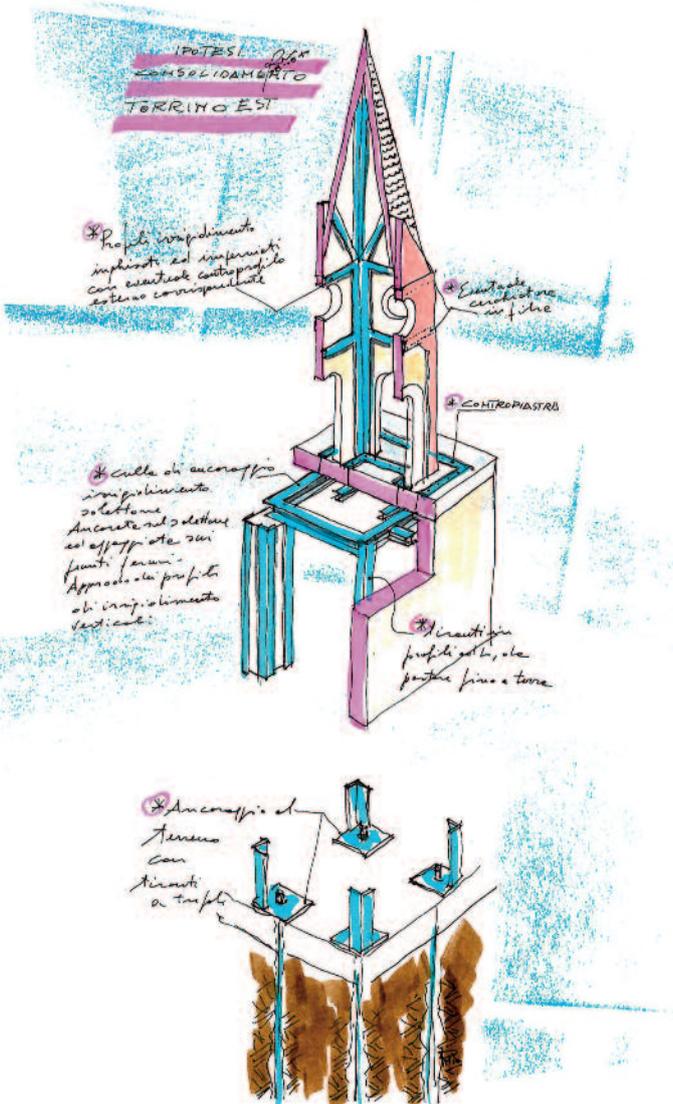
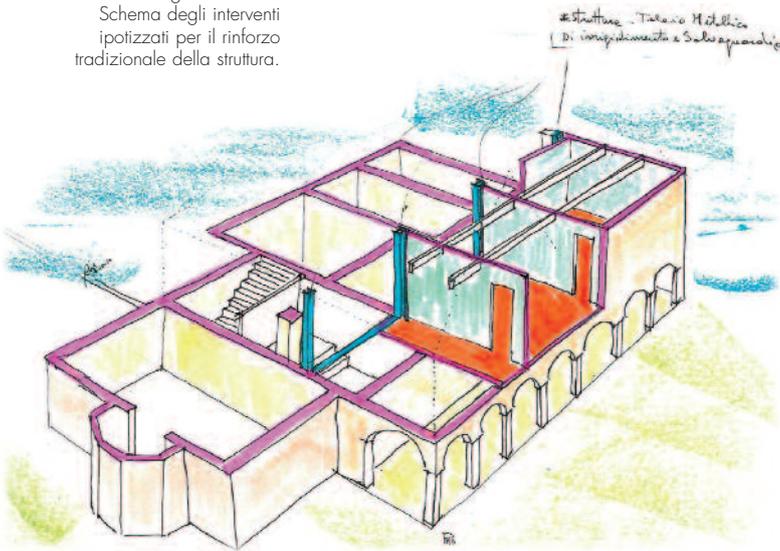
La prima ipotesi d’intervento è stata condotta con un approccio di tipo tradizionale, cioè puntando alla esecuzione di risanamenti locali delle pareti con diffusi interventi di cuci-scuci ed alla configurazione di una struttura di “Salvaguardia Passiva”, costituita da una intelaiatura metallica da inserire in modo accorto all’interno dell’edificio, nella direzione longitudinale che all’interno della struttura muraria risulta più “leggera”, per affidare ad essa un contributo nella fase sismica, secondo lo schema illustrato nelle schede grafiche preliminari riportate nelle Figure 21 e 22.

Ad esempio per il risanamento dell’area del torrino Est l’ipotesi configurata prevedeva, dopo il risanamento delle murature che sostengono la



Figura 20
Vista degli interni, con stucchi e rivestimenti di pregio.

Figure 21 e 22
 Schema degli interventi ipotizzati per il rinforzo tradizionale della struttura.



soletta da cui si origina il torrino, la realizzazione di una struttura metallica che costituisse una nuova ossatura della struttura, da ancorare al terreno attraverso tiranti o micropali sbulbati. Analogamente si era ipotizzato in prima battuta la costruzione di cerchiature metalliche al di sotto le pareti in falso.

Tenuto conto delle caratteristiche di pregio dell'edificio tutelato, questo approccio si è dimostrato poco convincente in quanto avrebbe comportato una forte manomissione generale dell'edificio con l'inserimento irreversibile di nuovi elementi strutturali il cui funzionamento in fase sismica sarebbe rimasto comunque poco verificabile, per la diversità di funzionamento delle strutture e per i problemi che si sarebbero verificati al contatto tra le masse murarie e le strutture in acciaio di sostegno. Nè tantomeno era possibile ricostruire nuove murature al di sotto quelle in falso che avrebbe comportato una disgregazione funzionale dell'unità abitative e soprattutto una manomissione irreversibile degli elementi decorativi esistenti nei soffitti e nelle pareti.

Si è dunque deciso, di modificare radicalmente l'approccio, invertendo i termini del problema, non più ricercare un incremento della capacità dell'edificio ad equilibrare le spinte sismiche, ma viceversa riducendo la domanda isolandolo alla base l'edificio dal terreno.

In altre parole il problema strutturale, che in estrema sintesi è riassunto nella disegualianza $\text{capacità} \geq \text{domanda}$ condizionata dal rispetto della valenza storica monumentale dell'oggetto di intervento, è stato risolto riducendo il termine domanda piuttosto che incrementare il termine capacità. L'intervento di miglioramento sismico convenzionale tende ad operare nella direzione di incremento della capacità operando con interventi di rinforzo tendenzialmente compatibili con il pregio storico artistico del manufatto, ma in grave affanno per divari così ampi tra capacità e domanda e con limitazioni così forti per la valenza dell'edificio. Per alcune situazioni particolari come quella oggetto del presente lavoro, è possibile conseguire una significativa riduzione della domanda mediante l'isolamento alla base del fabbricato (Figura 23). Le opere previste intervengono in maniera incisiva al di sotto del piano di calpestio del piano terra, concentrando quasi esclusivamente alle fondazioni l'invasività dell'opera, salvo poi ricondurre l'intervento di recupero nella parte in elevazione ad una "semplice" riparazione, o meglio restauro, delle parti strutturali e non, danneggiate dalla crisi sismica. La parte di "sacrificio", al di sotto il piano di calpestio è bene notare che sarebbe comunque stata oggetto di intervento di sottofondazione per eliminare i cedimenti a cui si è fatto cenno in precedenza.

L'abbattimento drastico dell'accelerazione alla base dell'edificio attraverso l'isolamento consente pertanto di ridurre al minimo gli interventi di rafforzamento nella parte di elevazione e conseguentemente limitare l'invasività dell'intervento stesso alla parte di minor pregio del fabbricato in oggetto, ovvero le fondazioni. Al fine di limitare i costi di intervento si prevede la regolarizzazione planimetrica dell'edificio creando un giunto tra la porzione di edificato che si sviluppa per tre livelli e la parte di edificato che risulta parzialmente interrata e che è di un solo livello. Il complesso edilizio è infatti scomponibile in una parte che si eleva per più livelli e una parte che raccorda detta porzione più alta con il terreno in pendio nella zona di monte del lotto ove sorge "La Silvestrella".

6. Strategia dell'isolamento

La progettazione di un adeguamento/miglioramento sismico di un edificio esistente si differenzia ovviamente in maniera sostanziale rispetto all'approccio progettuale della costruzione di un edificio ex-novo. Per una struttura nuova si stabiliscono le prestazioni del sistema, ad esempio periodo e smorzamento, e poi si progetta la nuova struttura di elevazione in modo che i suoi elementi strutturali siano in grado di resistere alle sollecitazioni. Nel caso di una struttura esistente, invece, volendo evitare interventi di rafforzamento (ovvero limitare) si determina innanzitutto la capacità resistente della struttura rispetto alle azioni orizzontali, per poi calibrare le caratteristiche del sistema d'isolamento, con l'obiettivo di limitare la domanda al di sotto la capacità,

SEZIONE X-X

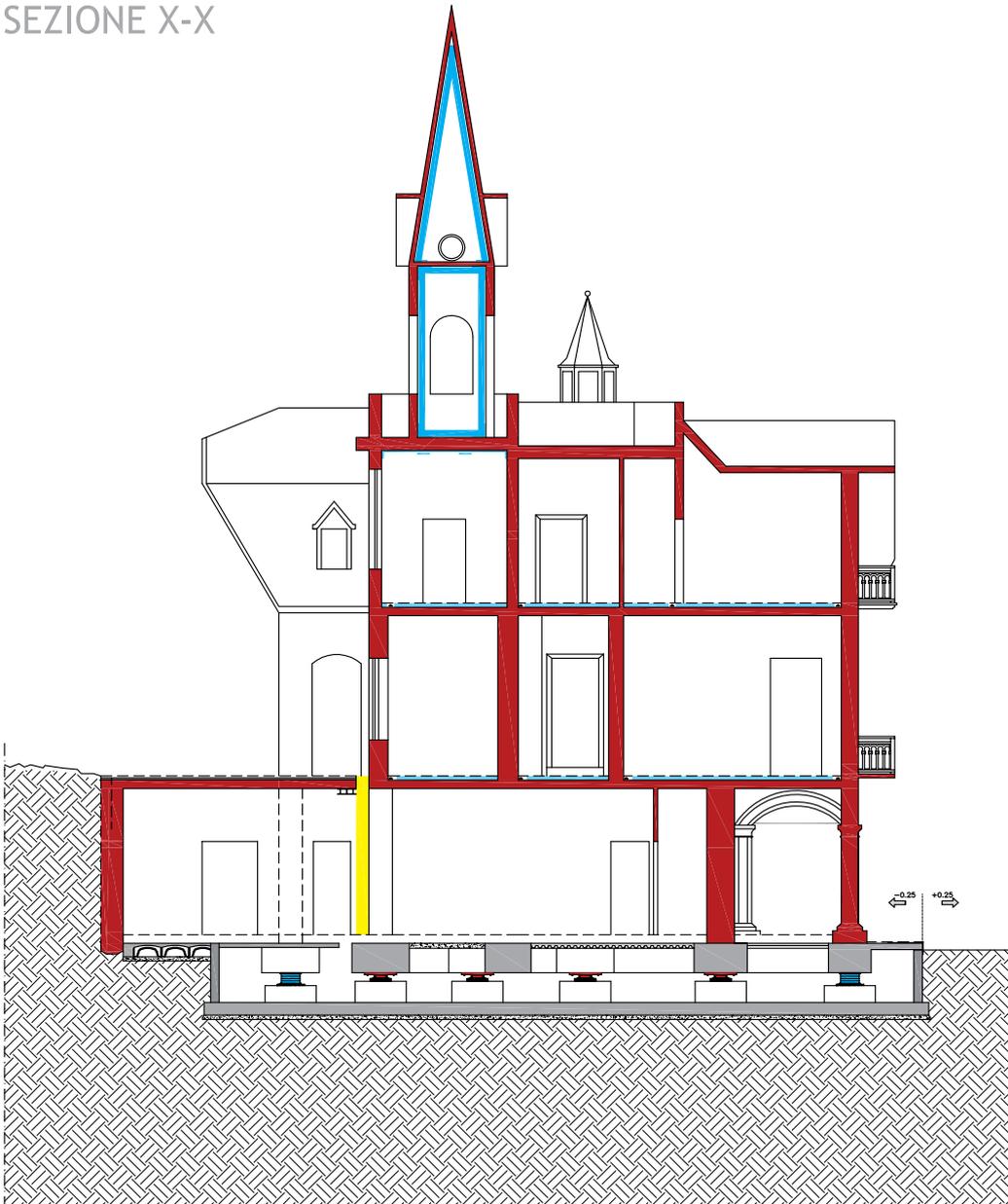
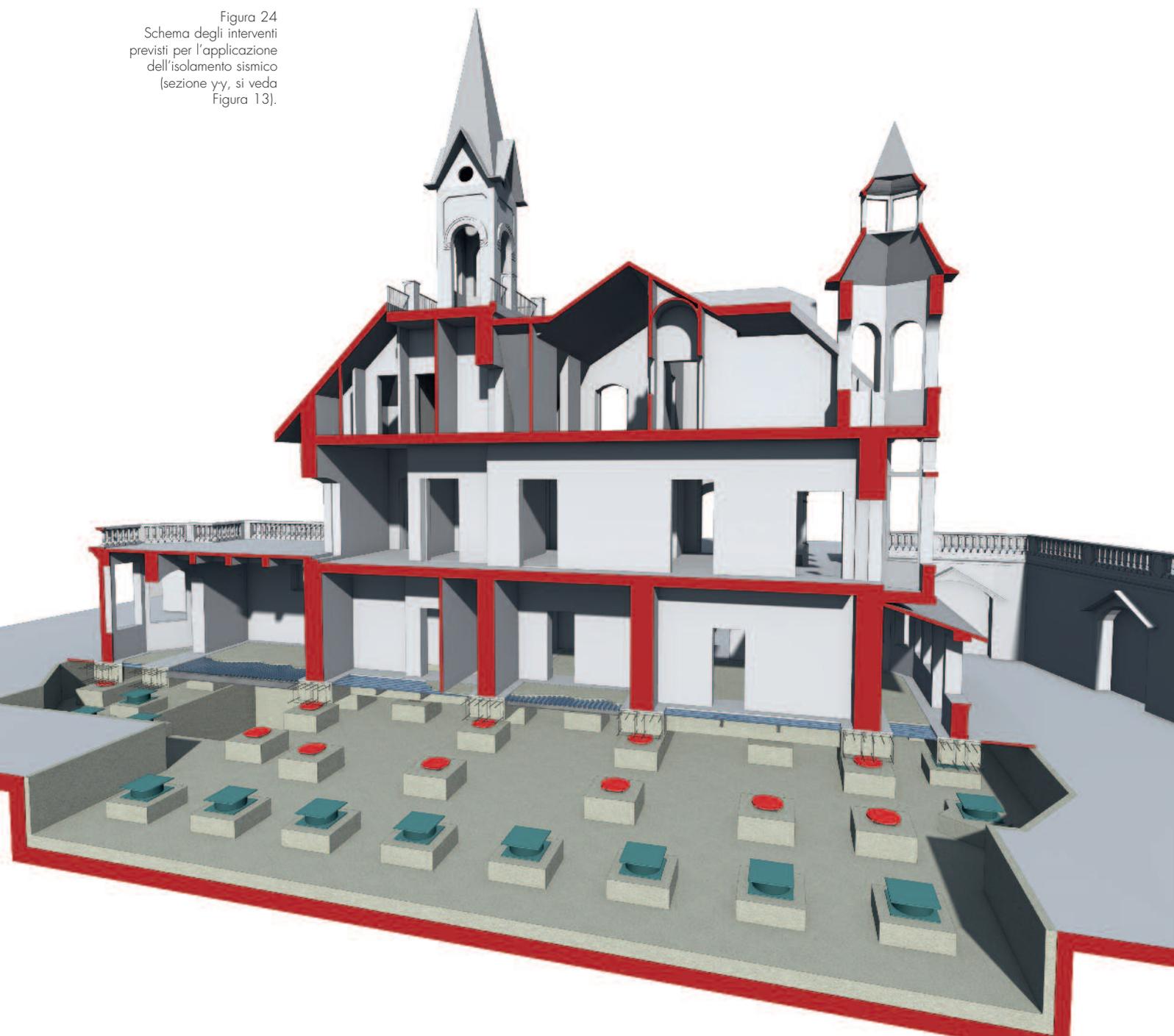


Figura 23
Schema degli interventi previsti per l'applicazione dell'isolamento sismico (sezione x-x, si veda Figura 11).

Figura 24
Schema degli interventi
previsti per l'applicazione
dell'isolamento sismico
(sezione yy, si veda
Figura 13).



ossia limitare le forze sismiche agenti sulla struttura a valori inferiori a quelle resistenti. In altre parole *si progetta la domanda (isolatore)* affinché sia tale da essere minore della capacità (caratteristica dell'edificio).

È evidente il totale ribaltamento di approccio rispetto ad un intervento "tradizionale", la cui progettazione parte dalla definizione della domanda, per poi dimensionare gli interventi in modo da fornire agli elementi strutturali esistenti quella capacità, di resistenza duttilità, in grado di soddisfare la domanda stessa.

A tale assunto teorico tuttavia ricavando la

curva di capacità dell'esistente può avvenire che esistano elementi strutturali a bassa resistenza/duttilità che possono condurre ad un valore dell'accelerazione di progetto molto basso e, conseguentemente, a valori troppo elevati del periodo di isolamento non compatibili con tipologie di isolatori presenti sul mercato, in questi casi è opportuno pensare di intervenire localmente su tali elementi strutturali deficitari, con tecniche di rinforzo locali e mirate al fine di ricondurre la curva di capacità a soglie di periodo proprio coerenti con le tecniche costruttive di isolamento consuete (Figura 24).

7. Il cantiere e le modalità esecutive

Definita pertanto la strategia si pone il problema nell'esecuzione dell'intervento di isolamento alla base per un edificio esistente in muratura e gravemente danneggiato, che quindi deve essere separato dal terreno e dalla porzione di edificato alta un solo livello. Le modalità operative per la realizzazione di questa strategia "innovativa" si basano su metodologie di intervento "tradizionali" ampiamente sperimentate nell'ambito di opere di sottofondazione di un edificio fondato direttamente sul terreno sottostante.

Le fasi esecutive (Figura 25 da A a F) prevedono in prima istanza una riparazione degli elementi strutturali murari più precari e le opere di tirantatura, al fine di limitare le condizioni di rischio ed equilibrare le spinte di archi e puntoni presenti nell'edificio. La separazione del corpo di fabbrica a più livelli rispetto la parte di edificato contro terra avviene banalmente creando un giunto di circa 25 cm nei solai e nelle pareti adiacenti. In questo caso la creazione di un giunto è un'opera non traumatica poiché le strutture che vengono separate sono prevalentemente

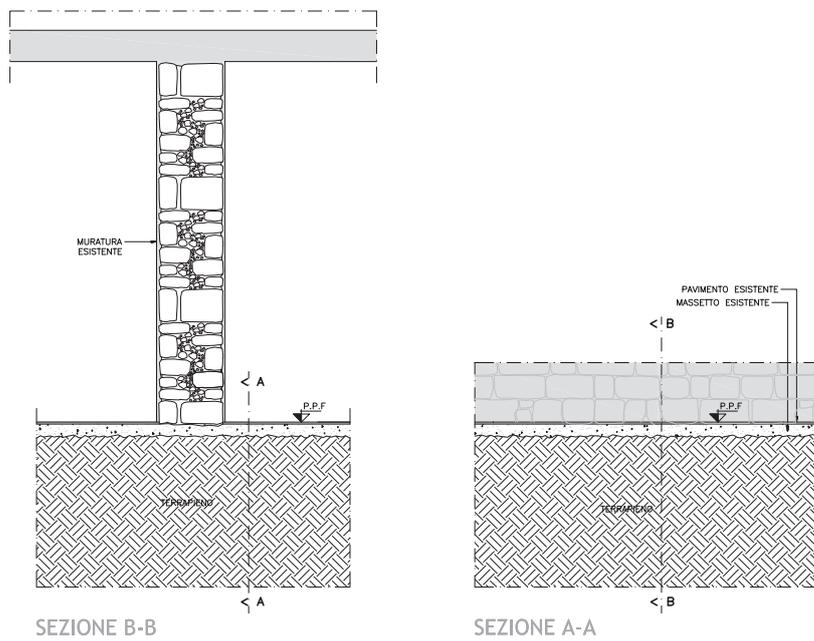


Figura 25a
Fasi dell'intervento per l'applicazione dell'isolamento sismico (FASE 1: Stato di fatto).

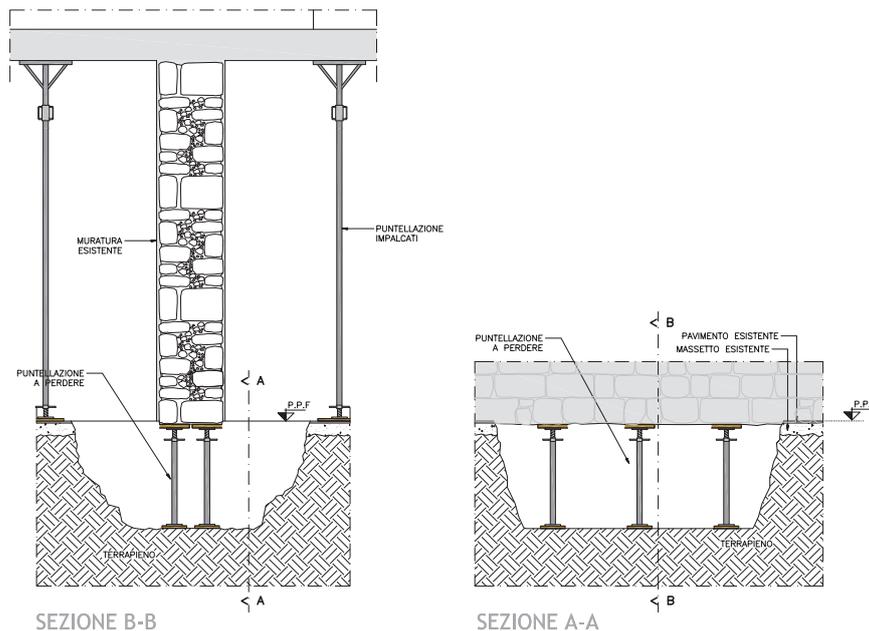


Figura 25b
FASE 2: Scavo per cantieri e puntellazione.

Figura 25c
FASE 3: Esecuzione
sottofondazione c.a. per
cantieri posizionando dima
superiore isolatore.

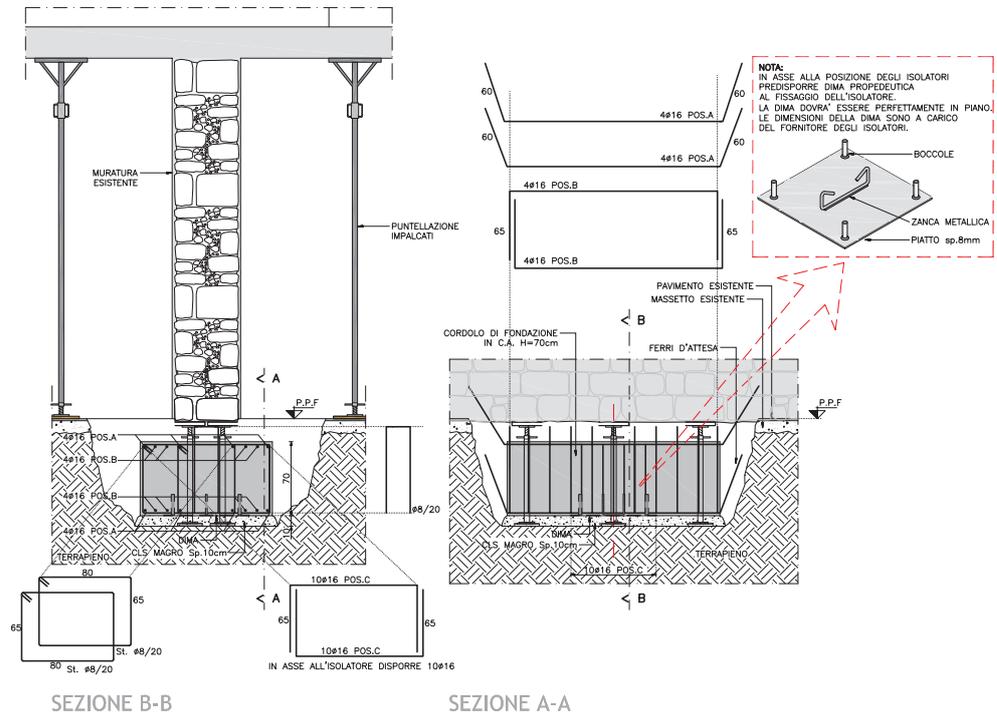
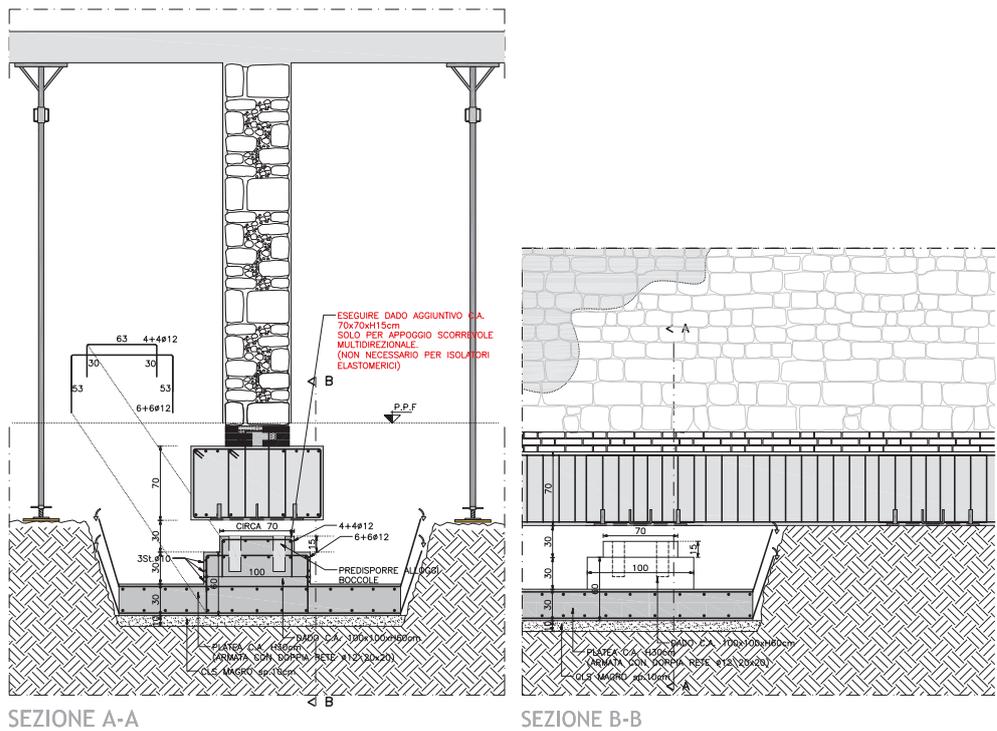


Figura 25d
FASE 4: Scavo per cantieri
ed esecuzione paltea
nervata.



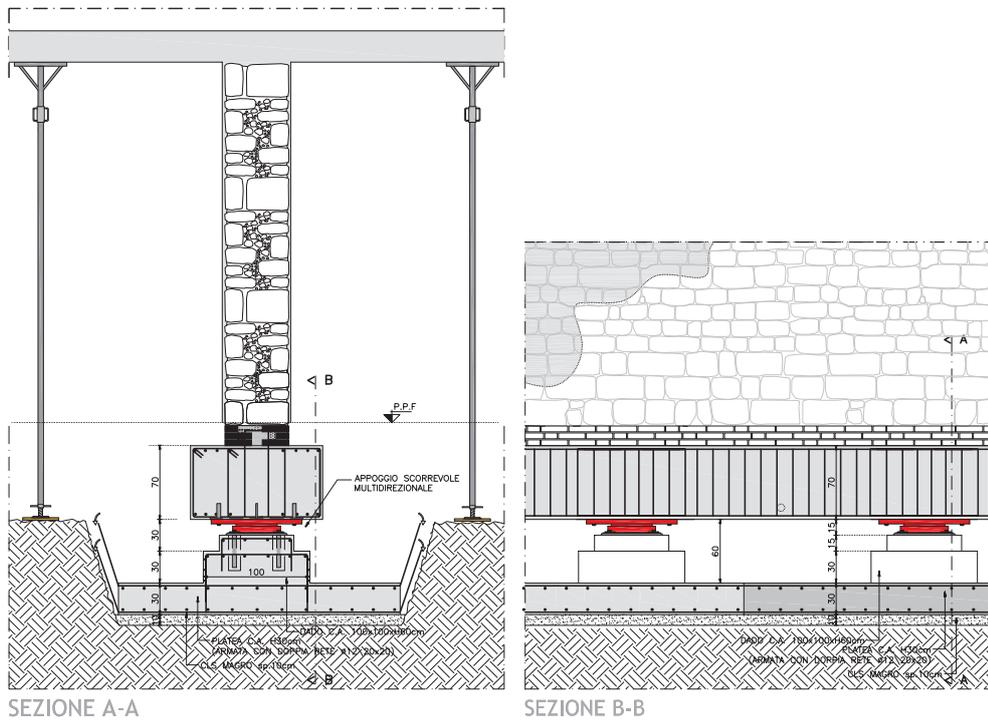


Figura 25e
FASE 5: Ripetere le fasi precedenti per tutti gli isolatori.

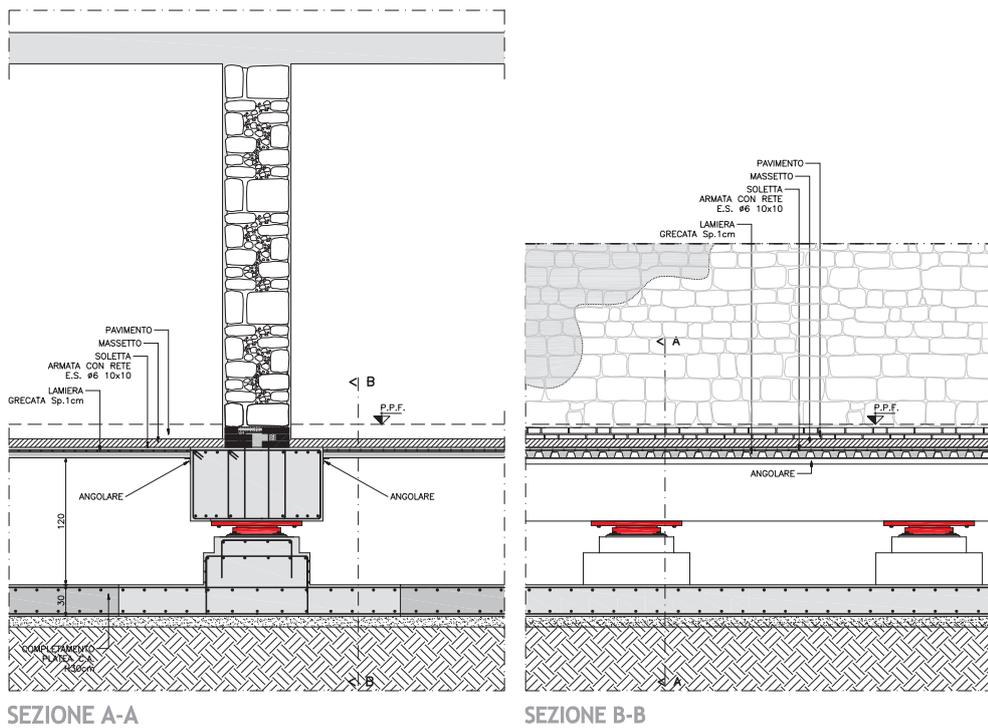


Figura 25f
FASE 6: Realizzazione solaio in lamiera grecata e getto collaborante di complemento.

Figure 26 e 27
Vista della sottofondazione
dell'edificio in muratura e
della seconda fase di scavo
e realizzazione dei
baggioli di appoggio.



fondi e cantine di scarso valore storico artistico. Dopo aver provveduto ad una debita puntellazione degli impalcati si procede alla suddivisione in sottocantieri dell'intero edificio avviando lo scavo e la successiva esecuzione un cordolo in calcestruzzo armato di sottofondazione secondo le consuete metodiche di tali interventi. Dopo avere sottofondato l'intero edificato, avendo quindi garanzie di una distribuzione sufficientemente uniforme delle sollecitazioni al

piede delle pareti (Figura 26), si procede ad una seconda opera di sottofondazione più profonda. Si costruiscono dei "plinti", o baggioli di appoggio (Figura 27), e delle porzioni della futura platea, operando sempre per sottocantieri; in tali elementi si dovranno predisporre dei fori di alloggio per ospitare successivamente l'isolatore e le relative boccole di fissaggio. La posa in opera degli isolatori avviene avvitan-doli alla contropiastra superiore ed inserendo



Figure 28, 29 e 30
Fasi di inserimento e
fissaggio dell'isolatore,
posa in opera del martinetto
piatto a perdere.

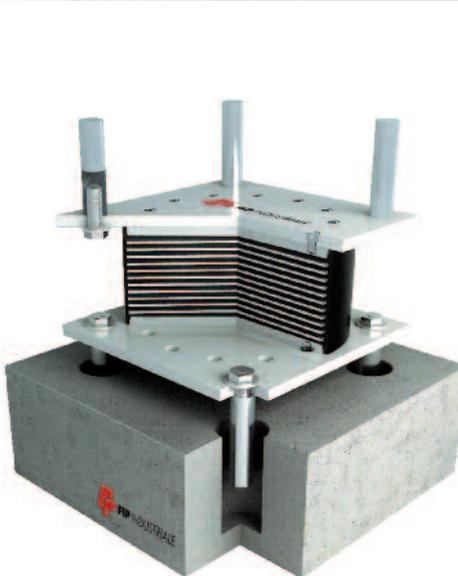


Figura 31
Vista di un isolatore
inserito al di sotto del
portico.

Figura 32
Schema tipo di isolatore
elastomerico.

quindi dei martinetti piatti "a perdere" al di sotto dei dispositivi. Iniettando all'interno resina epossidica si trasferisce parte del carico della struttura superiore all'isolatore e ponendo inoltre in pressione anche la nuova fondazione; in tal modo si eliminano le probabilità di cedimenti differenziali in fondazione dovute alla realizzazione per cantieri dell'intervento (Figure da 28 a 32). Sempre operando per sottocantieri non adiacenti tra loro, si ripetono le fasi precedenti disponendo

tutti gli isolatori elastomerici e a scorrimento che sosterranno ormai definitivamente le strutture murarie soprastanti il piano di scorrimento (Figure da 33 a 35). Costruiti tutti i plinti e messo in carico gli isolatori si procede al getto di completamento delle parti residue di platea armata che costituisce l'elemento di collegamento rigido tra tutti i plinti e la base dei dispositivi di isolamento. L'ultima lavorazione è la posa in opera di un solaio in acciaio e lamiera grecata che ripristi-

Figura 33
Viste del porticato antistante
alla villa a seguito della
posa in opera degli
isolatori.



Figura 34
vista del baggiolo della
sottostruttura, del sistema di
isolamento, del cordolo di
base e della sovrastruttura.



Figura 35
fasi di realizzazione del
cordolo di base al di sotto
della "bow window" su uno
dei prospetti laterali.



nerà il piano di calpestio al di sotto del quale rimarrà il vano tecnico per la manutenzione e controllo degli isolatori e rappresenta il piano rigido al di sopra il piano di scorrimento.

Sono stati adottati 25 isolatori di tipo elastomerico, cui si affiancano 23 tipo a slitta. Si noti il numero relativamente ridotto degli isolatori elastomerici rispetto al totale; ciò è riconducibile al fatto che il numero complessivo degli isolatori è condizionato dal fatto di collocarli a distanze non troppo elevate per consentire le lavorazioni anzidette di sottofondazione.

Gli interassi tra gli isolatori sono stati contenuti tra 2.5 e 3.5 m per evitare opere di cordolatura di sottofondazione troppo ingombranti, ne consegue che il numero di isolatori per unità di superficie risulta maggiore rispetto un analogo intervento su struttura in c.a. dove gli interassi sono di consueto tra 4.5 e 6 m.

Le masse in gioco non sono tali da richiedere un gran numero di elementi elastomerici e pertanto ne consegue che gli elastomerici sono in proporzione quasi 1/1 rispetto le slitte che di fatto rappresentano solo un appoggio scorrevole.

8. Risultati

Le analisi numeriche condotte hanno portato a dei valori sorprendenti in termini di conseguimento della sicurezza sismica del fabbricato.

Tabella 3 - Valutazione del periodo proprio minimo della struttura isolata necessario per un abbattimento delle forze sismiche pari a quello ricercato

$T_{is,rif}$	=	2.279	s
ϵ_{esi}	=	13.0%	
η	=	0.745	
a_g	=	0.261	g
F_0	=	2.360	
T_c^*	=	0.350	s
Terreno		B	
S_S	=	1.154	
S_T	=	1	
$Se(T_{is,rif})$	=	0.110	g

Il dimensionamento del sistema di isolamento è stato svolto imponendo l'accelerazione massima trasmessa alla sovrastruttura pari al valore della capacità prestazionale allo Stato Limite di Salvaguardia della Vita della struttura in muratura;

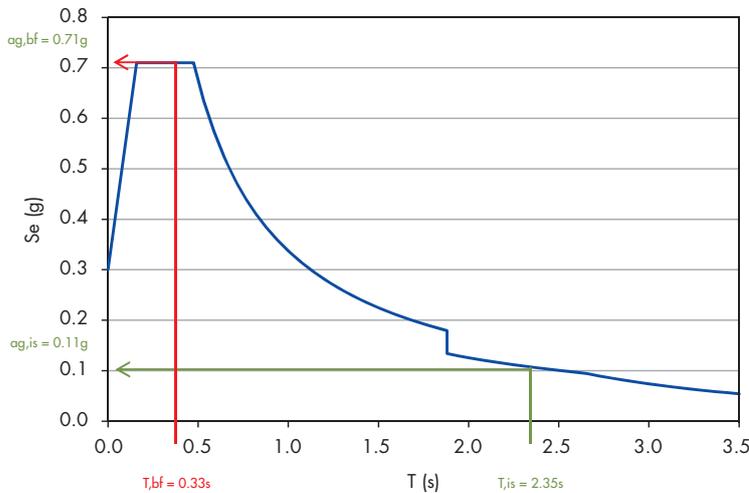


Figura 36
Confronto della risposta spettrale della struttura per la configurazione a base fissa e per quella a base isolata.

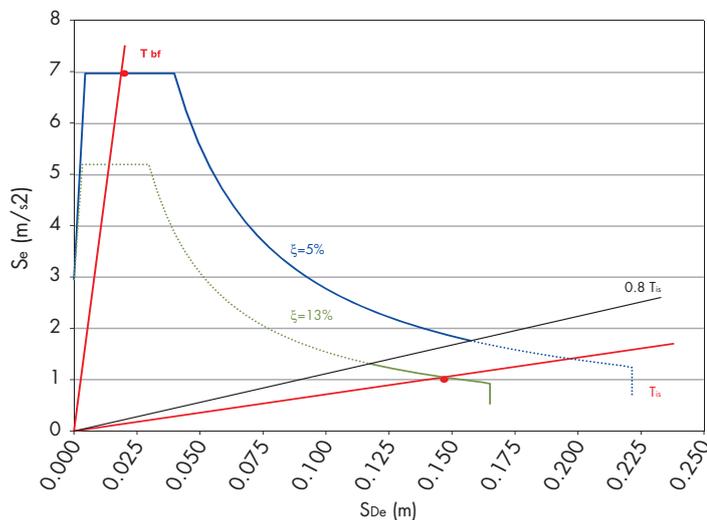
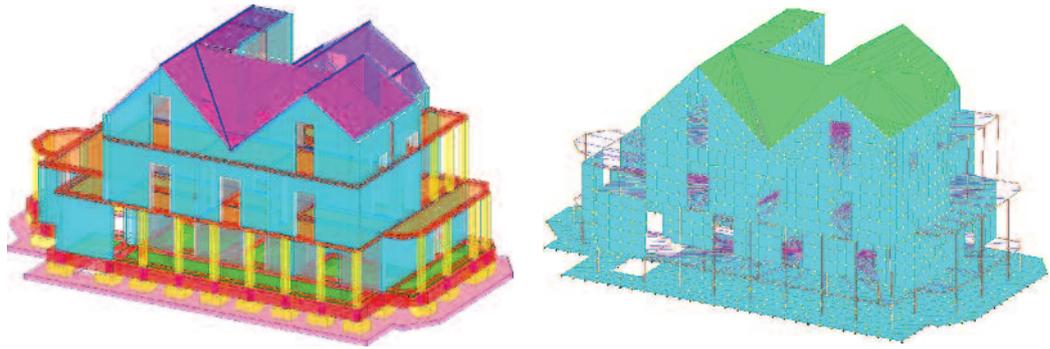


Figura 37
Confronto della risposta spettrale della struttura per la configurazione a base fissa e per quella a base isolata (rappresentazione capacitiva ADS).

Figura 38
 Differenti rappresentazione
 del modello strutturale
 adottato per l'analisi dello
 stato di progetto
 dell'edificio.



mediante l'esame dello spettro elastico, si è quindi ricavato il minimo periodo del sistema di isolamento che permettesse un abbattimento pari a quello richiesto.

Nelle Figure 36 e 37 si riporta lo spettro elastico riferito al sito in esame, con l'indicazione delle accelerazioni alla base della struttura a base fissa e di quella isolata, sia nella rappresentazione spettrale standard che in quella capacitativa ADS ("Acceleration Displacement Spectra").

Dall'esame di tali diagrammi è possibile rilevare i principali effetti ottenuti dall'isolamento sismico della struttura alla base, mediante isolatori elastomerici HDRB. In particolare:

- un abbattimento significativo delle accelerazioni trasmesse alla sovrastruttura, ottenuto mediante spostamento dei periodi principali del sistema verso zone spettrali caratterizzate da una minore densità di potenza ;
- un aumento degli spostamenti richiesti alla struttura a causa dell'incremento del periodo proprio del sistema; si fa tuttavia notare come tali spostamenti rimangano a carico del solo piano di isolamento e quindi dei dispositivi elastomerici, dotati di una elevata deformabilità laterale (domanda massima in spostamento: 237 mm, capacità dei dispositivi: 250 mm).
- un aumento dello smorzamento proprio del sistema, dai valori tipici delle strutture a base fissa (5%) a valori ben più elevati (13%), che ha sia una riduzione degli spostamenti richiesti al sistema di isolamento, sia un'ulteriore abbattimento delle accelerazioni trasmesse alla sovrastruttura.
- un forte disaccoppiamento del comportamento della sovrastruttura da quello del terreno, grazie ad un rapporto di isolamento

T_{is}/T_{bf} pari a circa 7.

La progettazione del sistema di isolamento è stata quindi eseguita mediante un modello completo dell'insieme sottostruttura-isolamento-sovrastuttura (Figura 38), con i seguenti obiettivi:

- periodo del sistema di isolamento superiore a quello necessario all'adeguamento della struttura, precedentemente ricavato;
- disposizione degli isolatori il più possibile al perimetro della struttura, per garantire una significativa rigidità torsionale al sistema;
- disposizione dei dispositivi in modo tale da centrare il più possibile il baricentro delle masse della sovrastruttura ed il baricentro delle rigidità del sistema di isolamento.

Si riporta di seguito la configurazione finale del sistema di isolamento, per il quale si è ottenuto un periodo proprio T_{is} pari a 2.35 secondi. Si sono adottati un totale di 48 dispositivi, di cui 25 elastomerici e 23 a slitta (Figura 40); le caratteristiche di ciascun dispositivo adottato è riportato in Tabella 4.

In tale modo si è riusciti ad ottenere una sostanziale coincidenza dei baricentri di massa e rigidità del sistema, con un'eccentricità residua di 15 cm nella direzione parallela alla dimensione maggiore dell'edificio e 8 cm lungo la direzione ortogonale.

La buona progettazione del sistema di isolamento è infine confermata dai tre modi principali del sistema isolato, che risultano disaccoppiati: il primo traslazionale in direzione x, il secondo traslazionale in direzione y e il terzo rotazionale (Figura 41).

Sono state quindi eseguite le verifiche di sicurezza delle murature della sovrastruttura nel modello globale appena descritto.

Tabella 4 - Proprietà meccaniche dei dispositivi adottati

Tipologia	V [KN]	F [KN]	Ke [kg/cm]	ξ [%]	Xmax [mm]	N°isolat [-]
SI-S 450/126	530	2890	510	13.0	300	25
SLITTA VM 150/100/50	1200	1200	-	-	300	23

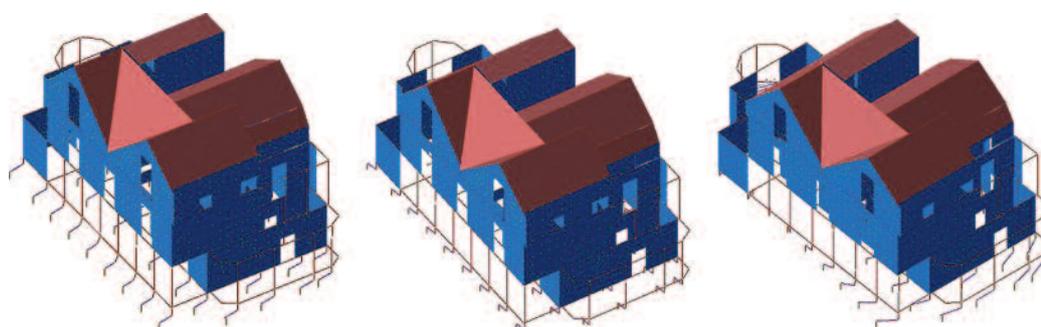
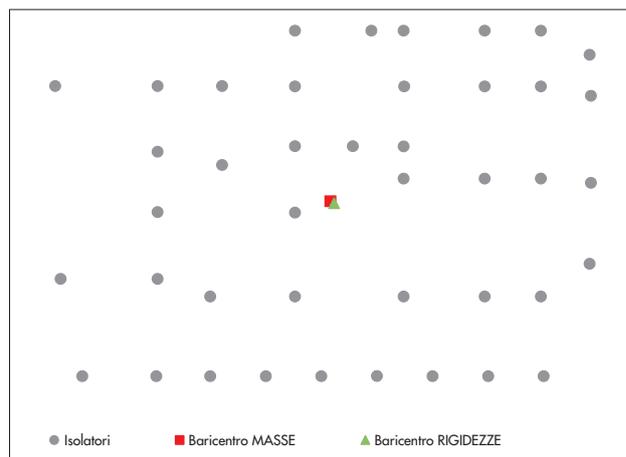
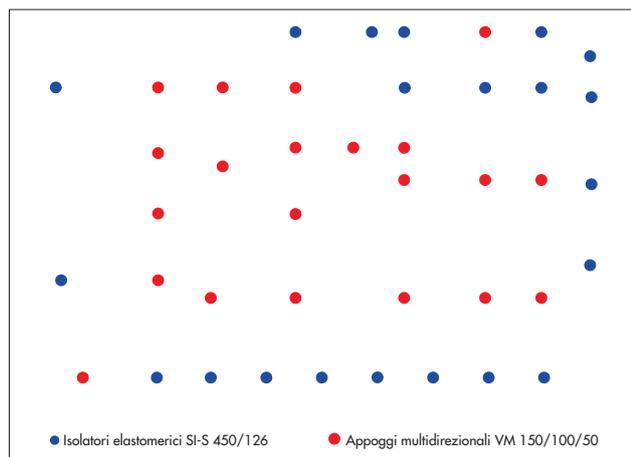


Figura 39
Disposizione in pianta dei dispositivi elastomerici e delle slitte (in alto a sinistra).

Figura 40
Posizione del baricentro delle masse e delle rigidzze del sistema di isolamento (in alto a destra).

Figura 41
Primi tre modi di vibrare della struttura isolata.

9. Conclusioni

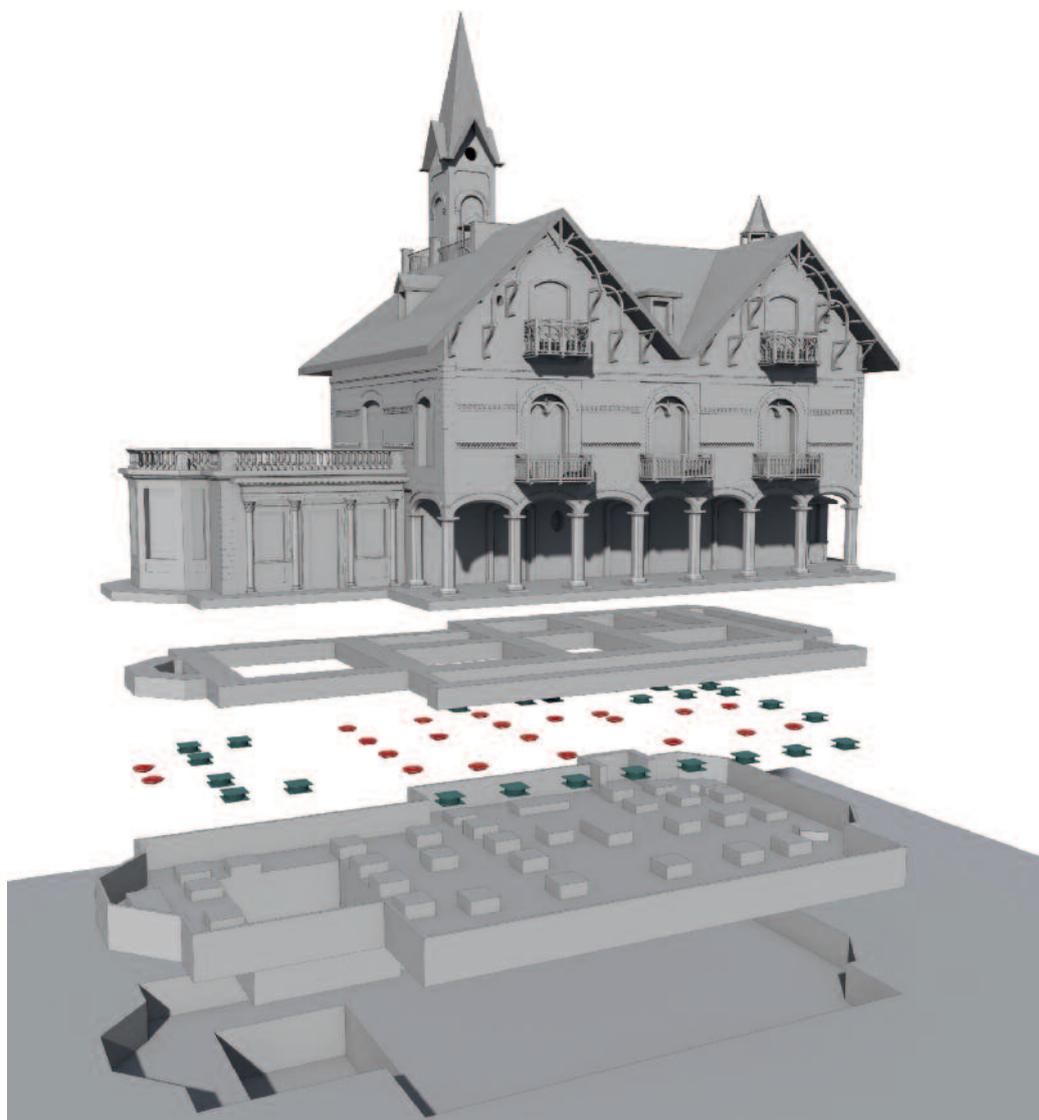
La messa in sicurezza di un edificio in muratura, di pregio storico artistico, pone il progettista nella complessa valutazione di quale sia l'intervento più opportuno nel coniugare le ragioni della sicurezza con quelle della conservazione. Il problema strutturale in sintesi si propone quale obiettivo la risoluzione della disuguaglianza $\text{capacità} \geq \text{domanda}$ condizionata dal rispetto della valenza storica monumentale dell'oggetto di intervento. Il 6 aprile 2009 la crisi sismica che colpì l'Aquila ha prodotto un effetto devastante nel patrimonio storico culturale della Città e del territorio ponendo in evidenza il problema della sicurezza di edifici di scarsa capacità a fronte di una elevata domanda sismica, ciò per varie ragioni, ma frequentemente riconducibili alla scarsa qualità muraria dell'edificio evidenziando spesso come sia ampio il divario tra i due termini della disuguaglianza. L'intervento di miglioramento sismico convenzionale tende ad operare nella direzione di incremento della capacità operando con interventi di rinforzo tendenzialmente compatibili con il pregio storico artistico del manufatto, ma è in grave affanno per divari così ampi tra capacità e domanda. Tuttavia per edifici di tal genere, teoricamente, l'intervento meno invasivo è quello che riduce la domanda piuttosto che incrementare la capacità. Per alcune situazioni particolari come

quella oggetto del presente lavoro tale strategia, di ridurre la domanda anziché operare nell'incremento della capacità, è possibile conseguirla attraverso l'isolamento alla base.

L'intervento proposto riguarda un edificio in muratura su cui si interviene in maniera incisiva al di sotto del piano di calpestio del piano terra concentrando quasi esclusivamente alle fondazioni l'invasività dell'opera, salvo poi ricondurre nella parte in elevazione l'intervento di recupero ad una "semplice" riparazione, o meglio, restauro delle parti strutturali e non, danneggiate dalla crisi sismica. L'abbattimento drastico dell'accelerazione alla base dell'edificio attraverso l'isolamento consente infatti di ridurre al minimo gli interventi di rafforzamento nella parte di elevazione e conseguente limitare l'invasività dell'intervento stesso alla parte di minor pregio del fabbricato in oggetto, le fondazioni (Figura 42).

Questa soluzione sostanzialmente limita l'intervento strutturale a livello delle fondazioni senza introdurre ulteriori manomissioni sulle aree superiori che saranno interessate esclusivamente dalla riparazione dei numerosi danneggiamenti subiti a seguito del sisma. Il grande vantaggio è il conseguimento di un "adeguamento sismico" livello di sicurezza spesso insperato per edifici con tali caratteristiche senza procedere ad interventi fortemente invasivi.

Figura 42
Esploso degli interventi
previsti per l'isolamento alla
base della struttura.



Concretizzato l'isolamento alla base il problema strutturale di "la Silvestrella" nella parte di elevazione viene dunque ricondotto ad un semplice ripristino, o meglio restauro, di un bene monumentale utilizzando le tecniche di restauro, così come si sarebbe fatto se l'edificio fosse stato in zona non sismica o a bassa sismi-

cità conseguendo un livello di sicurezza di "adeguamento sismico".

10. Ringraziamenti

Si ringraziano in modo particolare la FIP Industriale e la ditta esecutrice Giancarlo Mariani srl di Ascoli Piceno.

11. Bibliografia

- Borri A., Vetturini R. (2011) - Isolamento alla base di un edificio di pregio storico-artistico a L'Aquila, ANIDIS 2011.
- CEN, European Committee for Standardisation (2007) - PrEN-15129, Antiseismic devices.
- Concrete srl (2012) - Sismicad 2012 - Manuale d'uso.
- Dolce M., Pozzo F.C., Di Cesare A., Arleo G. (2010) - Progetto di Edifici con Isolamento Sismico, Iuss Press, Seconda edizione.
- Mezzi M., Parducci A. (1988) - Base isolation in Retrofitting Historical Buildings, Workshop on Seismic Performance of Monuments - Lisboa (Portugal).
- Mezzi M., Vetturini R., Cecchini W (2012) - Base iso-

- lation for the seismic protection of historical buildings, 15° WCEE Lisboa (Portugal) 2012.
- Indirli M., Forni M., Martelletti A. et al. (2001) - ENEA activities for the development and application of innovative techniques for the seismic protection of cultural heritage, 5th world congress on joints, bearing and seismic systems for concrete structures, Rome, october 2001.
- Kelly J.M. (1990) - Base isolation: Linear Theory and Design, Earthquake Spectra, v.6, n.2, may 1990.
- Salvadori A., Pedicone D. (2011) - Applicazione dell'isolamento sismico ad edifici in muratura: il caso di edifici danneggiati dal sisma del 6 aprile 2009 a L'Aquila, ANIDIS 2011.