



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

Antonio Borri

Dip. di Ingegneria Civile e Ambientale - Università di Perugia - Via Duranti, 93 - Perugia

Riccardo Vetturini

Ingenium srl, società di ingegneria. Corso Cavour n.84, 06034 Foligno (PG)

Keywords: muratura, isolamento alla base, miglioramento, adeguamento, beni culturali

ABSTRACT

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 06 aprile 2009 la crisi sismica che ha colpito 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 CAPACITA' 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 in grave affanno per divari così ampi tra CAPACITA' e DOMANDA. Nel presente lavoro si propone quale strategia di intervento la drastica riduzione della DOMANDA mediante l'isolamento alla base, analizzando le criticità e peculiarità di tale approccio su edifici a valenza monumentale la Chiesa di San Silvestro, caso di studio, e in termini applicativi per l'edificio "la Silvestrella" a L'Aquila.

1 CHIESA DI SAN SILVESTRO: DESCRIZIONE GENERALE, STATO DI DANNO E MECCANISMI DI COLLASSO

La Chiesa di San Silvestro in L'Aquila è un monumento che è stato oggetto di studio e di pubblicazione a cura di Chiara Calderini con il coordinamento del vicecommissario delegato per la Tutela dei Beni Culturali Luciano Marchetti, dal titolo "*Monumenti Dannati -Università sul campo: il come e il perché dei danni a 48 monumenti in Abruzzo*" riportata sul numero Speciale Abruzzo del "Giornale dell'Arte".

La chiesa, costruita nel XIII-XIV secolo, è divisa in tre navate da due file di sette arcate ogivali che appoggiano su colonne circolari. Le arcate terminano in tre ambienti absidali a pianta poligonale. I danni più significativi sono legati alle interazioni della poderosa torre campanaria (preesistente nella parte basamentale) con la facciata e con le pareti della navata laterale. La base del lato occidentale è in aderenza (da qui

l'interazione) con la prima arcata della navata destra.



Figura 1-2. Vista laterale della facciata della Chiesa di S. Silvestro

Il sistema di cordoli in c.a. disposti sulle murature longitudinali delle navate ha funzionato in generale in modo efficace, grazie alle modeste dimensioni dei cordoli e alla leggerezza della

copertura lignea efficacemente collegata alle pareti laterali; ha presentato problemi in prossimità della facciata, a causa della mancanza di collegamenti (interessante qui il cinematismo di rotazione tra cordolo e torre).



Figura 3. Principali meccanismi di collasso in corrispondenza della facciata e campanile

Le sollecitazioni sismiche hanno indotto una rotazione della facciata verso l'esterno, bloccata dalla rigidità della torre da un lato e da catene e da sradicamenti dall'altro. La rotazione del sistema facciata-campanile ha coinvolto la parete interna della torre campanaria e le arcate terminali delle navate. Tra gli altri cinematismi: il dislocamento fuori dal piano dell'estremità del cordolo sommitale della parete longitudinale di destra (dovuto al martellamento della parete stessa con la torre, con effetti flessotorsionali), la rotazione della porzione superiore della torre verso la navata della chiesa, la rotazione all'indietro dello spigolo di sinistra della facciata, la rotazione verso l'esterno dell'abside e delle cappelle laterali.

2 CHIESA DI SAN SILVESTRO: PROPOSTE DI INTERVENTO

Nel caso della chiesa di S. Silvestro si è riscontrato come i principali quadri di danno siano dovuti ad una vulnerabilità elevata del campanile alle azioni orizzontali, alla interazione tra campanile e facciata della chiesa e tra campanile e pareti delle navate della chiesa stessa, e alla carenza di alcuni collegamenti (in particolare tra cordoli e facciata).

Per migliorare il comportamento del sistema sismoresistente, si dovrà provvedere alla realizzazione delle ammorsature tra i vari elementi strutturali, attualmente carenti, alla predisposizione di elementi che rendano bilateri i

vincoli che attualmente sono solo monolateri e al consolidamento della torre campanaria in modo da renderla meno vulnerabile alle azioni orizzontali. Il consolidamento di questi storici presidi, inglobati nel tessuto murario, richiederà una particolare attenzione, sia dal punto di vista storico-culturale che da quello tecnico-operativo.

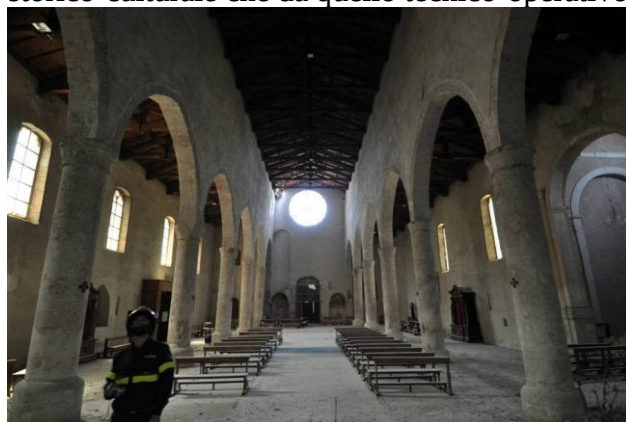


Figura 4. L'interno della Chiesa

Per quanto riguarda gli interventi sulla struttura muraria, intesi in senso stretto, si deve tener presente che l'apparecchio aquilano, con la sua pezzatura piccola e appena sbazzata, si presenta piuttosto vulnerabile alle azioni sismiche. Una serie di indagini conoscitive ha evidenziato come tale apparato non è ammorsato al tessuto interno e strutturalmente è assimilabile una sorta di "rivestimento esterno" che scarsamente partecipa all'azione resistente. Anche l'interno, lo spessore murario, è estremamente carente, è infatti costituito da ciottoli e malte di pessima qualità caratterizzati da una regola costruttiva eterogenea priva di ricorsi orizzontali e di efficaci morse negli incroci e cantonali. Per migliorare il comportamento antisismico della compagine muraria si riscontra una difficoltà operativa in più parti dell'edificio poiché va ricercata una metodologia che colleghi l'apparecchio aquilano con l'interno della muratura ed un conseguente incremento della resistenza a taglio. La difficoltà si pone con forza sulla gran parte delle pareti che sono caratterizzate da affreschi e parti dipinte con la difficoltà operativa quindi di non poter intervenire con decisione né dall'esterno dove la cortina lapidea limita fortemente interventi "tradizionali", né tanto dall'interno dove intonaci di pregio, decorazioni e affreschi condizionano ancor più opere di intervento sostanziali e non solo "contemplative".

Pertanto in condizioni di tale tipo o similari ci si chiede se sia necessario modificare radicalmente l'approccio, invertendo i termini del problema, non più ricercare un incremento della CAPACITA' dell'edificio ad equilibrare le spinte

sismiche, ma viceversa riducendo la DOMANDA isolando alla base l'edificio dal terreno. In altre parole il problema strutturale che in estrema sintesi è riassunto nella disuguaglianza $CAPACITA' \geq DOMANDA$ condizionata dal rispetto della valenza storica monumentale dell'oggetto di intervento potrebbe essere risolto riducendo il termine DOMANDA piuttosto che incrementare il termine CAPACITA'.



Figura 5. Interno di una delle cappelle laterali

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 CAPACITA' e DOMANDA binati a limitazioni così forti per la valenza dell'edificio. Tuttavia per edifici di tal genere, l'intervento teoricamente meno invasivo è quello che riduce la domanda piuttosto che incrementare la capacità. Per alcune situazioni particolari, come potrebbe essere il caso di studio della Chiesa di San Silvestro, tale strategia, di ridurre la domanda anziché operare nell'incremento della capacità, sarebbe possibile conseguirla attraverso l'isolamento alla base. Con questo approccio infatti le lavorazioni intervengono in maniera incisiva solo 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 del complesso, fino a cinque volte attraverso l'isolamento, consente pertanto 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" della Chiesa, le fondazioni.

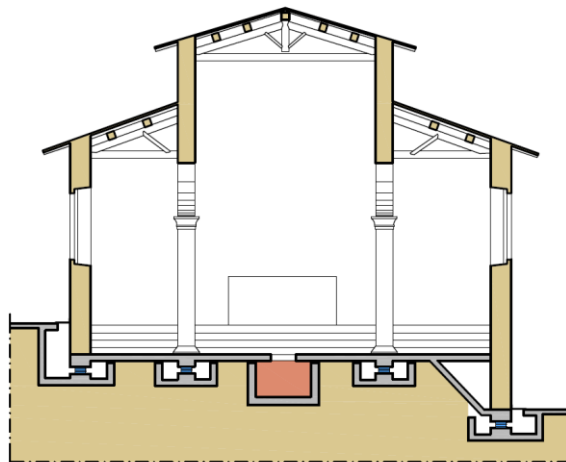


Figura 6. Schema degli interventi previsti per l'applicazione dell'isolamento sismico, sezione trasversale

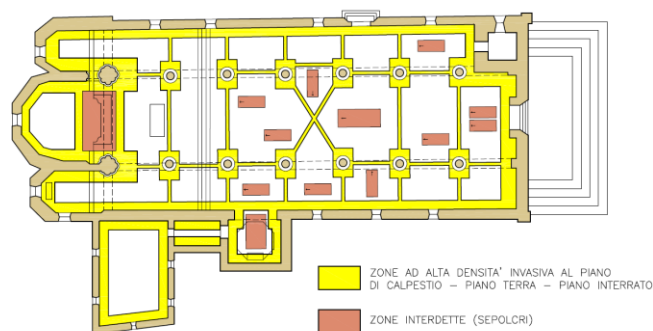


Figura 7. Schema degli interventi previsti per l'applicazione dell'isolamento sismico, pianta con evidenziate le zone ad alta invasività e le zone interdetto per la presenza di sepolcri

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", viceversa, 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, 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 CAPACITA' (caratteristica dell'edificio). E' evidente il totale ribaltamento di approccio rispetto ad un intervento "tradizionale", la cui progettazione parte dalla definizione dalla domanda, per poi dimensionare gli interventi in modo da fornire agli elementi strutturali esistenti quella CAPACITA', di resistenza e duttilità, in grado di soddisfare la DOMANDA stessa.

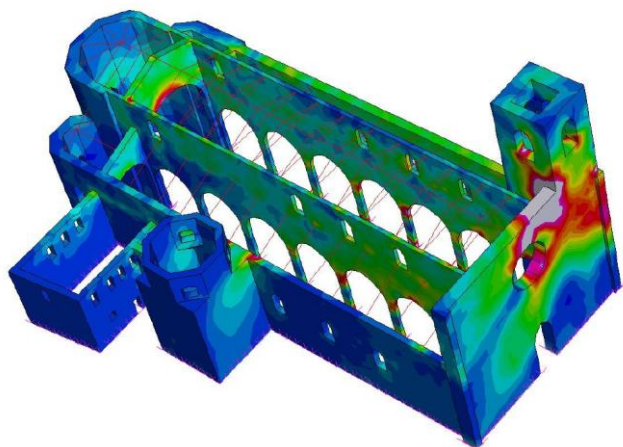


Figura 8. Combinazione dinamica (sisma x) e (0,3 sisma y): rappresentazione tensioni principali σ_{11} – BASE FISSA

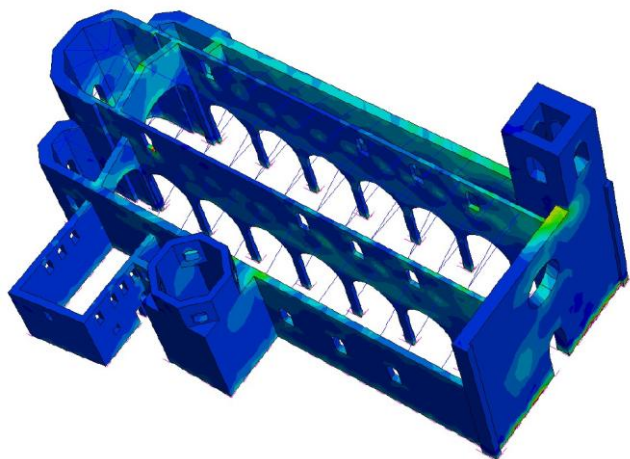


Figura 9. Combinazione dinamica (sisma x) e (0,3 sisma y): rappresentazione tensioni principali σ_{11} – BASE ISOLATA

A tale assunto teorico tuttavia, ricavando la curva di CAPACITA' 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 di 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.

Trattandosi di un caso di studio non si hanno elementi di rilievo di dettaglio tali da comprendere con esattezza le eventuali limitazioni per la presenza di sepolcri o tombe che condizionerebbero le geometrie, le posizioni e le articolazioni del sistema di isolamento alla base. Per comprendere viceversa nel dettaglio le implicazioni e le metodiche di una simile proposta di approccio si analizza un caso concreto di applicazione dell'isolamento sismico alla base di un edificio di più ridotte dimensioni, ma che ha in comune un forte divario tra CAPACITA' e DOMANDA e con pressanti limitazioni sull'applicabilità di interventi tradizionali a bassa invasività.

3 "LA SILVESTRELLA": CONSIDERAZIONI ARCHITETTONICHE

La crisi sismica del 06 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 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.



Figura 10. Prospetto ovest della villa "La Silvestrella"

La realizzazione della villa denominata *La Silvestrella* 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. L'edificio è vincolato ai sensi della D.Lgs42/04.



Figura 11. Vista della villa “La Silvestrella” a seguito delle opere provvisorie di messa in sicurezza conseguenti al sisma del 6 aprile 2009



Figura 12. Vista della Villa “La Silvestrella” dall’ampia terrazza

4 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 anche al di sotto del piano di campagna.

L'edificio è stato fortemente danneggiato dal sisma del 06-04-2009 e successivi, 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.

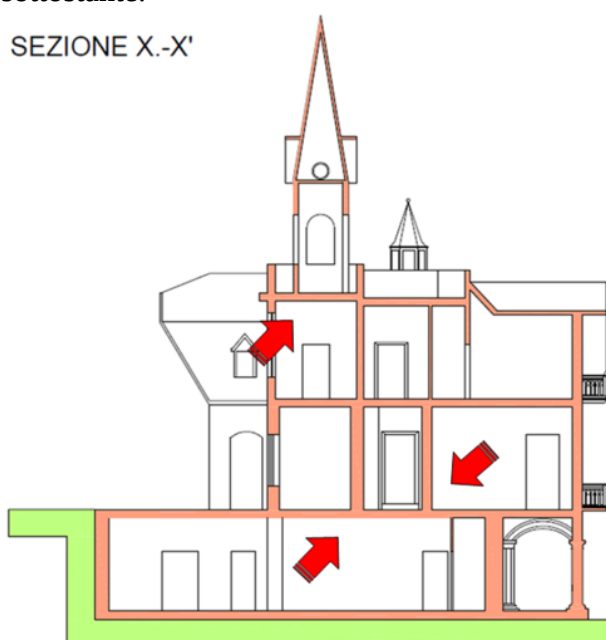


Figura 13. Sezione dell'edificio con evidenziazione delle murature in falso presenti

L'edificio è stato concepito con una logica costruttiva ben congeniata dal punto di vista dei carichi verticali, 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 forati sono fortemente disgregate, i due torrini sono stati gravemente compromessi, risultano inclinati in modo evidente e sono stati imbragati per la messa in sicurezza con intervento della Protezione Civile.

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, così come tutta la copertura. 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 inesistenti. Nelle pareti del piano terra si evidenziano localmente lesioni congruenti a piccoli cedimenti locali, laddove appunto la parete appoggia su detrito ed in adiacenza si delinea un quadro fessurativo che interessa anche i pavimenti del piano terra.

5 ANALISI STRUTTURALI

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 sicurezza attuali si è proceduto ad un'analisi strutturale agli elementi finiti complessiva della fabbrica per valutare la CAPACITA' attuale (pre - sisma) dell'edificio principalmente per le azioni nel piano, 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.

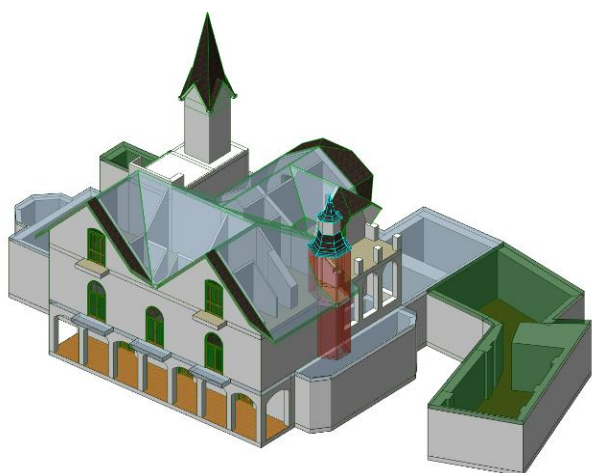


Figura 14. Modello strutturale adottato per l'analisi dello stato attuale dell'edificio

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).

Tabella. 1 Valori di progetto dell'azione sismica

	a_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

In figura 15 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.

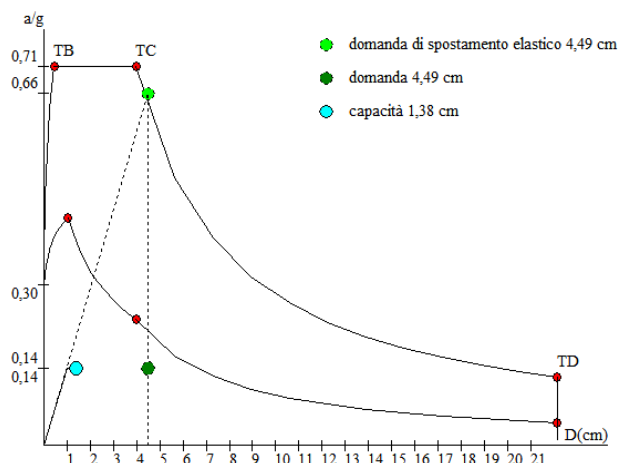


Figura 15. Punti caratteristici della domanda e della capacità di prestazioni della struttura nei confronti dell'azione sismica, in coordinate spettrali

Dalle analisi svolte si è ottenuta la seguente capacità dell'edificio in termini di accelerazione massima al suolo: $PGA_{CLV} = 0.110$ g, ed il corrispondente indicatore di rischio sismico della struttura: $IR_{PGA} = 0.367$.

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

6 STRATEGIA D'INTERVENTO "TRADIZIONALE" DI INCREMENTO DELLA CAPACITA'

Il principio generale che necessariamente si è voluto fin dall'inizio rispettare, discende dal fatto che l'edificio riveste particolare interesse Storico, Architettonico ed Ambientale; questo comporta che in ogni caso deve essere configurata 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).

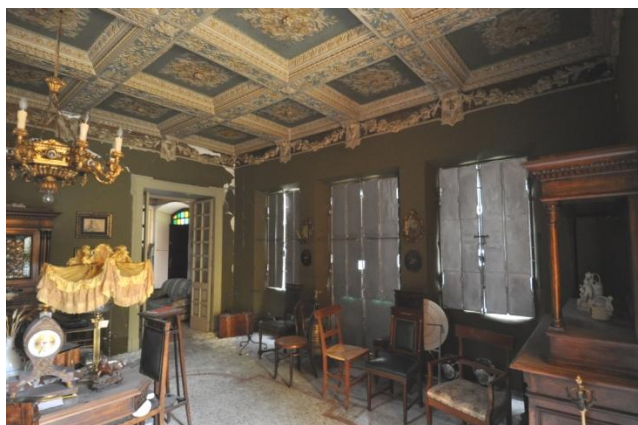


Figura 16. Vista degli interni, con stucchi e rivestimenti di pregio

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.

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. Ne 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.

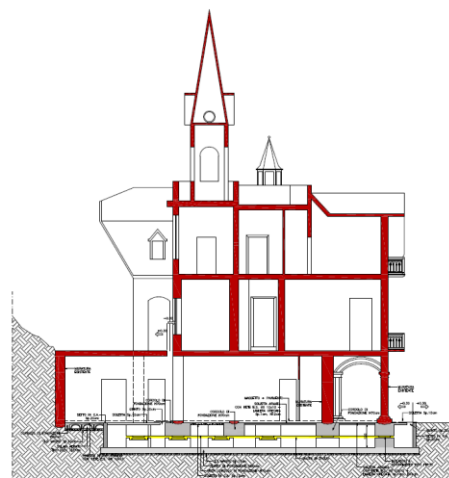


Figura 17. Schema degli interventi previsti per l'applicazione dell'isolamento sismico (sezione x-x)

SEZIONE Y-Y

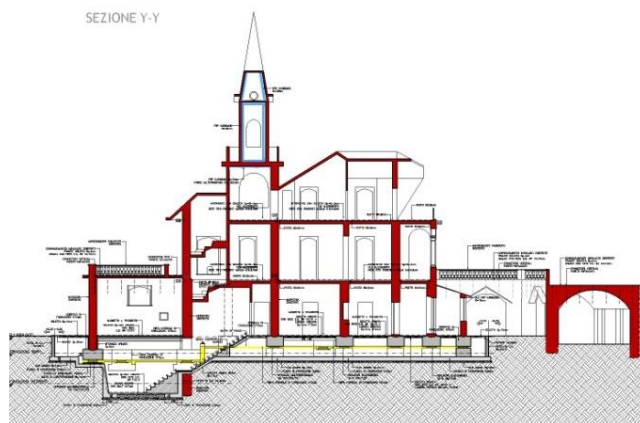


Figura 18. Schema degli interventi previsti per l'applicazione dell'isolamento sismico (sezione y-y)

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

L'invasività delle lavorazioni si concentrano come già evidenziato al di sotto il piano di calpestio del piano terra. La parte di edificio 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 per contro 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.

7 CANTIERABILITÀ DELL'INTERVENTO

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 edificio 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 in muratura privo di fondazioni. Le fasi esecutive prevedono in prima istanza una riparazione degli elementi strutturali murari più precari e le opere di tirantatura al fine di limitare ovviamente 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 edificio 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 fondi e cantine di scarso valore storico artistico. Dopo aver provveduto ad una debita puntellazione dell'impalcato si procede alla suddivisioni in sottocantieri dell'intero edificio avviando lo scavo e successiva esecuzione di un cordolo in calcestruzzo armato secondo le consuete metodiche degli interventi di sottofondazione. Dopo avere sottofondato l'intero edificio, avendo quindi garanzie di distribuzione sufficientemente uniforme delle sollecitazioni al piede delle pareti, si procede ad una seconda opera di sottofondazione più profonda. Si costruiscono dei "plinti", operando sempre per sottocantieri, che dovranno avere la caratteristica di avere una nicchia di alloggio per ospitare l'isolatore e dei ferri d'attesa per il collegamento alla futura platea di base fissa. Costruiti tutti i plinti si procede al getto di una platea armata che colleghi rigidamente tra loro tutti i plinti.

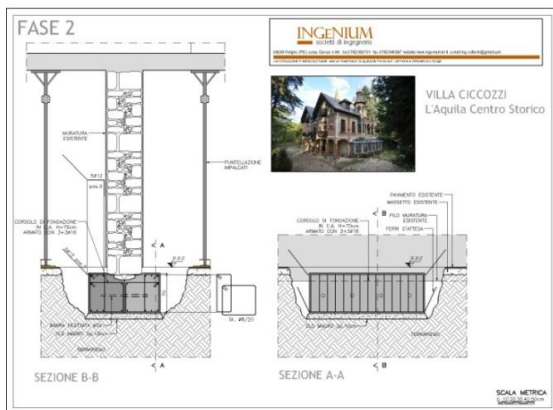


Figure 19-20-21-22. Fasi dell'intervento per l'applicazione dell'isolamento sismico

A questo punto i plinti, la platea e la fondazione sotto alla muratura sono ancora collegati. Per la realizzazione del piano di scorrimento si procederà alla metodologia di inserimento "retrofit" degli isolatori già testata ed eseguita con successo per molte cantierizzazioni su strutture in c.a.. Sempre operando per sottocantieri si dispongono dei martinetti che sosterranno temporaneamente le strutture soprastanti il piano di scorrimento e una volta inserito il dispositivo "isolatore" si procederà alla rimozione dei martinetti e alla ripetizione di detta fase per tutti gli altri plinti. L'ultima lavorazione è la posa in opera di un solaio in acciaio che ripristinerà il piano di calpestio al di sotto del

quale rimarrà il vano tecnico per la manutenzione e controllo degli isolatori.

Gli isolatori adottati, di tipo elastomerico (FIP SI-S 450/126), sono 25, cui si affiancano 23 di tipo a slitta (FIP VASOFLOX VM 150/100/50). 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 6m.

Le masse in gioco viceversa 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.; è stato infatti possibile raggiungere l'adeguamento sismico del fabbricato.

Tabella 2. 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
ξ_{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
$S_e(T_{is,rif})$	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; 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 23 e 24 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 capacitiva ADS ("Acceleration Displacement Spectrum").

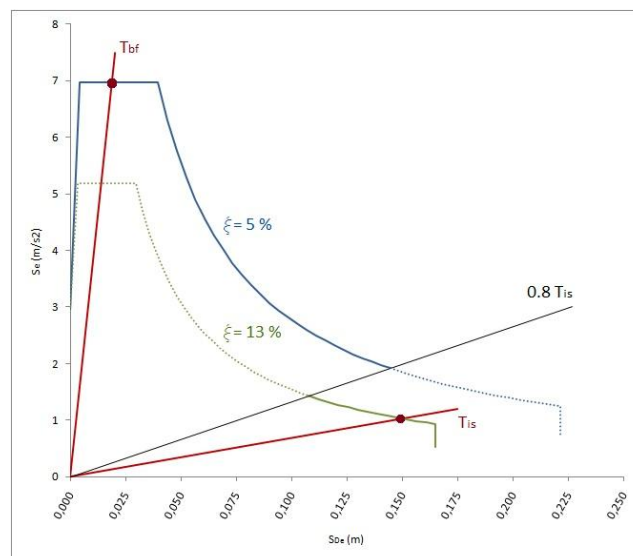
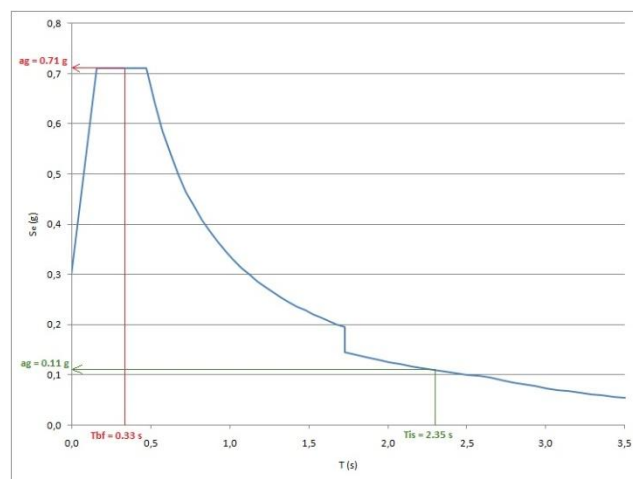


Figura 23 - 24. Confronto della risposta spettrale della struttura per la configurazione a base fissa e per quella a base isolata (rappresentazione capacitiva ADS)

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;
- 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, 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 2.63 secondi. Si sono adottati un totale di 48 dispositivi, di cui 25 elastomerici e 23 a slitta.

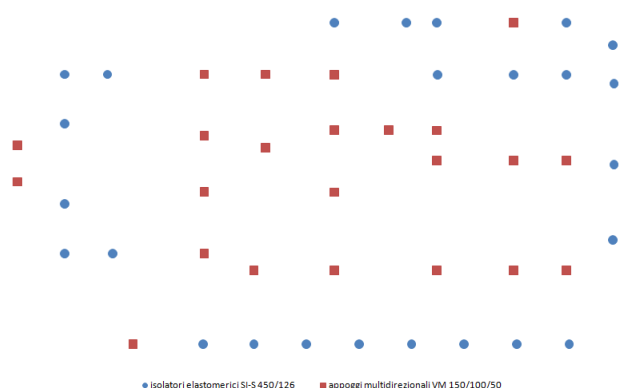


Figura 25. Disposizione in pianta dei dispositivi elastomerici e delle slitte

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

BIBLIOGRAFIA

- Dolce M., Ponzo F.C., Di Cesare A., Arleo G., "Progetto di Edifici con Isolamento Sismico", Iuss Press – Seconda edizione.
- Castellano, M.G., Infanti S., "Sistemi di protezione per la sicurezza delle costruzioni", Atti del Convegno internazionale "Bioarchitettura e ingegneria ambientale – Progetti di sviluppo e mobilità sostenibile sul territorio", Pistoia 3-5 ottobre 2007
- Dolce M., Martelli A., Panza G., "Moderni metodi di protezione dagli effetti del terremoto. 21° secolo" - Milano, 2006.
- Kelly J.M., "Base isolation: Linear Theory and Design", Earthquake Spectra, Vol.6
- Indirli M., Forni M., Martelletti A. et al., "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