
sintesi di tesi di laurea

Università degli Studi di Firenze - Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Edile

IL PALAZZO COMUNALE DI POGGIBONSI.

ANALISI DEL COMPORTAMENTO STRUTTURALE E PROPOSTE DI MIGLIORAMENTO SISMICO.

Autore: Andrea ALDINUCCI, Tommaso GAMBASSI (tesi in collaborazione)

Relatori: Prof. Ing. Claudio BORRI, Prof. Ing. Maurizio ORLANDO, Prof. Ing. Paolo SPINELLI,

Dr. Ing. Luca SALVATORI, Dr. Ing. Emanuele DEL MONTE

Anno Accademico: 2008-2009

INTRODUZIONE

La tesi degli ingg. Aldinucci e Gambassi ha per oggetto l'analisi del comportamento strutturale ed il progetto di miglioramento sismico del Palazzo Comunale di Poggibonsi. Il lavoro rappresenta un ottimo esempio di applicazione delle recenti Norme Tecniche per le Costruzioni ad un edificio esistente in muratura di importanza storico-artistica. Lo studio è svolto con molta cura, come testimoniato sia dalla fase iniziale di tipo conoscitivo con ricerche svolte anche presso l'Archivio di Stato di Siena e l'archivio del Comune di Poggibonsi sia dalle successive fasi di analisi e modellazione numerica in campo statico non lineare e di proposte progettuali per il rinforzo dell'edificio. La tesi mette bene in evidenza come per edifici esistenti in muratura, in particolare quelli in aggregato, la valutazione dei meccanismi locali per macroelementi può da sola indirizzare il progettista verso soluzioni efficaci ai fini del miglioramento sismico.

Prof. Ing. Maurizio ORLANDO

SOMMARIO

Oggetto dello studio è il Palazzo Comunale di Poggibonsi, situato nel centro storico della città, in Piazza Cavour. Il lavoro ha avuto come obiettivo l'analisi statica e sismica dell'edificio alla luce delle recenti Norme Tecniche per le Costruzioni (*D.M. 14/01/2008 e Circolare 02/02/2009*) e del *D.P.C.M. per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale del 12/08/2007*, con l'intento di individuare alcuni criteri metodologici applicabili anche ad altri edifici aventi caratteristiche sia morfologiche che funzionali analoghe all'edificio in studio.

Lo studio si è sviluppato in tre parti. La prima comprende il rilievo, le indagini storiche e l'analisi dello stato attuale; la seconda è relativa alla verifica degli impalcati e delle murature per le azioni verticali, all'analisi globale (attraverso modellazioni numeriche agli elementi finiti) ed all'analisi dei meccanismi locali per le azioni sismiche; infine la terza ed ultima parte contiene alcune proposte di miglioramento ed adeguamento sismico dell'edificio sviluppate sulla base di quanto emerso dalle verifiche eseguite nelle prime due parti.



Fig. 1. Il Palazzo Comunale di Poggibonsi, prospetto principale (vista da Piazza Cavour)

PARTE I: LA CONOSCENZA DEL MANUFATTO.

La nuova normativa pone in risalto il fatto che per l'analisi ed il progetto degli interventi sul costruito storico si debba avere cura di rintracciare il maggior numero possibile di informazioni circa la geometria, i dettagli costruttivi e le caratteristiche meccaniche dei materiali. Si è pertanto provveduto al rilievo metrico dell'edificio ed all'esame a vista dei dettagli costruttivi e del quadro fessurativo. Per edifici pubblici caratterizzati da un uso continuativo, come quello oggetto dello studio, difficilmente è possibile eseguire saggi e prove meccaniche che necessitano dell'interruzione (anche se minima) della funzione ospitata. Per queste ragioni si è fatto uso di tecniche non distruttive, come ad es. la termografia che, seppure in maniera limitata, ha permesso di identificare alcuni elementi costruttivi, quali orditure dei solai in latero-cemento e archi di rinforzo di alcune volte in muratura.

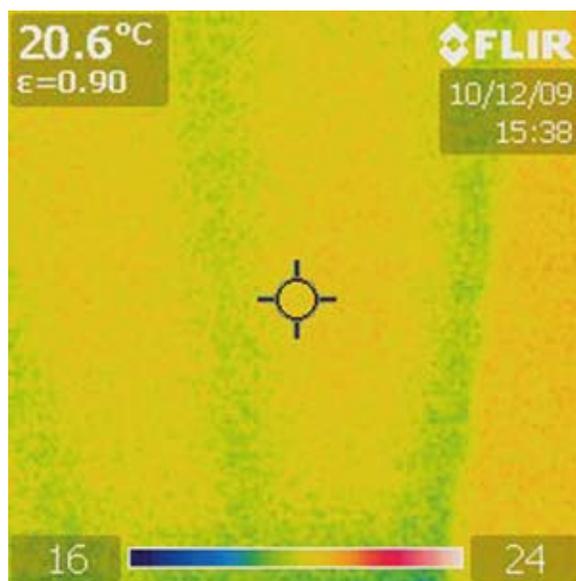


Fig. 2 Termografia: orditura dei travetti del solaio in cemento armato del locale archivio

Informazioni utili all'identificazione del sistema strutturale sono state desunte dalle fonti disponibili presso l'Archivio di Stato di Siena e quello del Comune di Poggibonsi e dai documenti del Catasto Leopoldino. In particolare presso l'Archivio di Stato di Siena è stata recuperata un'ampia documentazione del progetto originario, risalente alla seconda metà del 1800, redatto dall'Arch. Salvatore Guidi, che prevedeva la trasformazione di alcune botteghe e di altri volumi a due-tre piani fuori terra nell'attuale Palazzo Comunale. Il capitolato delle lavorazioni effettuate per la realizzazione del progetto dell'Architetto Guidi te-

stimonia come il Palazzo sia stato costruito in rispetto delle regole dell'arte, molte delle quali valide ancora oggi: ammorsamento tra murature vecchie e nuove e tra murature ortogonali, uso di catene per contrastare le spinte dei sistemi voltati, etc. Tuttavia, come già anticipato sopra, in questo studio non è stato possibile eseguire saggi per verificare la rispondenza dell'edificio realizzato alle indicazioni del capitolato del progetto originario.

È stata inoltre effettuata una ricerca sulla manualistica storica per affinare la conoscenza sulle tecniche costruttive dell'epoca di costruzione dell'edificio e raccogliere informazioni utili alla comprensione dei metodi di progettazione e costruzione dell'edificio. Gli esempi maggiormente significativi della manualistica dell'epoca sono il "Trattato Teorico e Pratico dell'Arte di Edificare" di Jean Baptiste Rondelet (Lione, 4 giugno 1743 - Parigi, 27 settembre 1829), tradotto in Italia per la prima volta nel 1831, a Mantova, e "Particolari di costruzioni murali e finimenti di fabbricati" di Musso e Copperi costruttori, edito a Torino a partire dal 1885.

Più recentemente, negli anni '90, l'edificio ha subito la sostituzione della copertura esistente in legno con una in latero-cemento, la rimozione dei controsoffitti in canniccio e la realizzazione di un orizzontamento aggiuntivo in latero-cemento, sul quale sono stati ricavati i locali destinati all'archivio comunale.

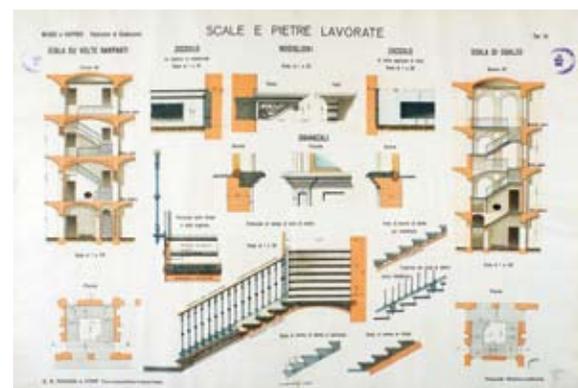


Fig. 3 NCF, Musso e Copperi, "Particolari di costruzioni murali e finimenti di fabbricati", foto di Mario Setter

La fase conoscitiva ha evidenziato come l'edificio sia il risultato di interventi stratificati uno sull'altro, ognuno dei quali caratterizzato da processi di demolizione, redistribuzione e ampliamento, cosicché le strutture hanno subito nel tempo significative variazioni di carico e di schema statico.

In base alle informazioni ricavate, le verifiche di resistenza delle strutture esistenti sono state eseguite con riferimento al livello di conoscenza più basso delle NTC 2008, ossia il livello LC1 a cui corrisponde un Fattore di Confidenza FC=1,35.

PARTE II: ANALISI DELLO STATO ATTUALE PER CARICHI VERTICALI E AZIONI SISMICHE, VERIFICHE DEL COMPORTAMENTO GLOBALE E LOCALE.

La seconda parte dello studio è stata dedicata all'analisi del comportamento strutturale dell'edificio allo stato attuale nei confronti delle azioni verticali e delle azioni sismiche. Sono state eseguite le verifiche di sicurezza sia degli impalcati sia delle strutture murarie, con i modelli ed i criteri previsti dalla nuova normativa. Poiché il Palazzo è inserito in un aggregato connesso all'edilizia seriale del centro storico, è stato considerato l'intero isolato come unità strutturale.

Le verifiche a pressoflessione per carichi orizzontali e l'analisi in campo elastico-lineare agli elementi finiti hanno mostrato un tasso di lavoro elevato per alcune delle murature del piano terra e del piano primo.

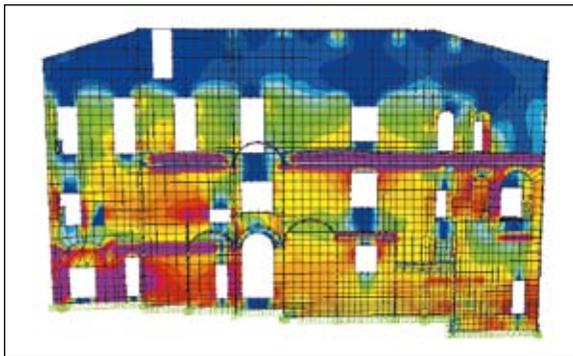


Fig. 4 Andamento delle tensioni di compressione nella parete longitudinale prodotte dalla combinazione allo stato limite ultimo per azioni verticali, modello FEM elastico-lineare

L'analisi sismica è stata effettuata con due diversi metodi: a) analisi dinamica modale con modellazione tridimensionale dell'edificio utilizzando elementi finiti bidimensionali in campo elastico-lineare, b) analisi statica non lineare (*pushover*).

La prima analisi, sviluppata con il codice di calcolo SAP2000, ha mostrato come l'edificio in esame sia caratterizzato da modi di vibrazione principali di tipo traslazionale.

L'analisi statica-non lineare, sviluppata con l'ausilio del codice di calcolo 3MURI (S.T.A. Data S.r.l), è invece basata su una schematizzazione a telaio equivalente delle pareti murarie secondo la trattazione proposta da Gambarotta e Lagomarsino (Gambarotta et al., 1996).

Il telaio tridimensionale risulta composto da macroelementi di tipo *maschio e trave* con legame costitutivo non lineare che tiene conto di: danneggiamento, degrado di resistenza con ramo softening e degrado di rigidità.

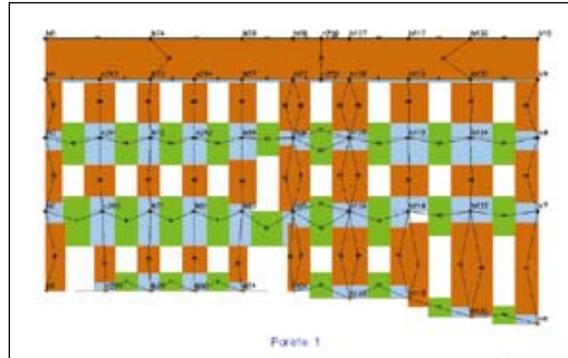


Fig.5 Schema a telaio equivalente della facciata principale del Palazzo Comunale

L'analisi non lineare si sviluppa attraverso:

1. la determinazione di un legame forza-spostamento rappresentativo del reale comportamento monotono della struttura, la cui definizione deriva dall'analisi *pushover*;
2. la valutazione dello spostamento massimo o punto di funzionamento (performance point) raggiunto dalla struttura a fronte di un evento sismico definito tramite uno spettro di risposta elastico in accelerazione; l'analisi di spinta consente quindi di descrivere il comportamento della struttura tramite un semplice legame monodimensionale forza-spostamento (curva di capacità).

In questo modo l'analisi della risposta della struttura viene ricondotta a quella di un sistema ad un solo grado di libertà (SDOF, *Single Degree Of Freedom*) equivalente alla struttura di partenza.

I metodi statici non lineari permettono di individuare lo spostamento massimo di tale sistema SDOF equivalente e quindi la risposta della struttura.

In letteratura sono presenti vari approcci all'analisi statica non lineare, ma i caratteri essenziali sono sempre quelli sintetizzati nella seguente tabella:

Domanda	<ul style="list-style-type: none"> definizione di uno spettro di risposta compatibile con l'azione sismica attesa nel sito
Capacità	<ul style="list-style-type: none"> definizione del modello matematico MDOF (<i>Multi Degree Of Freedom</i>) della struttura e delle relative non linearità. esecuzione di una analisi di <i>pushover</i>
Risposta	<ul style="list-style-type: none"> definizione di un sistema SDOF equivalente definizione di un criterio per considerare gli effetti del comportamento ciclico della struttura determinazione della risposta del sistema SDOF equivalente conversione delle risposta del sistema SDOF equivalente in quella del sistema MDOF
Verifica	<ul style="list-style-type: none"> definizione dell'obiettivo prestazionale: stati limite corrispondenti ad un evento sismico di data intensità verifica dell'accettabilità della risposta globale

Tabella 1 Approccio all'analisi statica non lineare

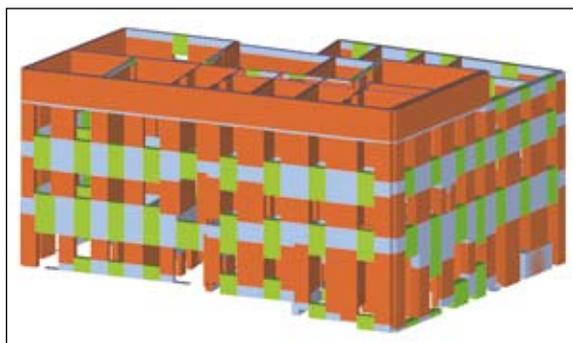


Fig. 6 Assonometria del modello tridimensionale

Le analisi *pushover* effettuate sull'edificio in entrambe le direzioni e con due diverse distribuzioni di masse, così come prescritto dalle NTC 2008, hanno permesso una più agevole lettura del comportamento globale attraverso le curve di capacità e hanno evidenziato le differenze tra le direzioni principali X e Y (la direzione X è la direzione longitudinale dell'edificio, parallela alla facciata principale). In direzione X i valori del taglio alla base, per entrambe le distribuzioni di forze d'inerzia previste dalle NTC, presentano valori molto vicini tra di loro e anche il comportamento globale della struttura risulta qualitativamente simile.

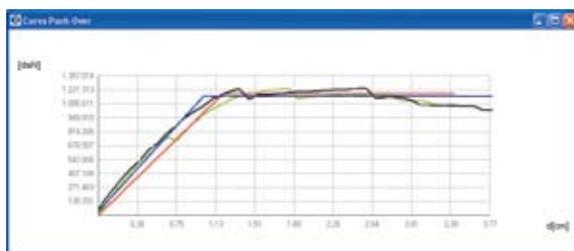


Fig. 7 Confronto delle due curve di capacità per i casi +x (verde e rosso) e -x (nero e blu); carico proporzionale al primo modo.

Nella direzione trasversale Y, invece, il comportamento della struttura cambia in funzione del verso di spinta. La differenza è dovuta alla distribuzione non simmetrica delle masse dell'intero isolato, tenuto conto che all'interno dell'unità strutturale la parte occupata dal Palazzo Comunale presenta un piano in più rispetto alla restante parte

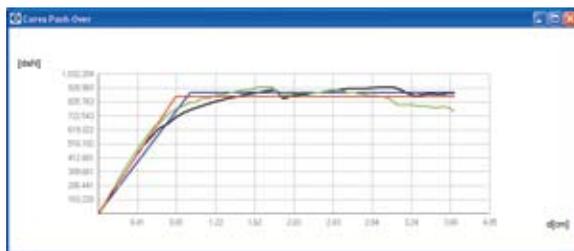


Fig. 8 Confronto delle due curve di capacità per i casi +y (verde e rosso) e -y (nero e blu); carico proporzionale alla massa.

Infine si è proceduto alla verifica dei meccanismi locali di primo modo suscettibili di attivazione durante un evento sismico (teoria dell'analisi limite dell'equilibrio secondo l'approccio cinematico). L'analisi dei meccanismi locali è molto importante negli aggregati edilizi e più significativa delle verifiche globali quando il comportamento d'insieme risulta difficilmente garantito dalla inefficienza degli ammortamenti tra murature ortogonali o dalla presenza di sistemi spingenti (archi o volte non opportunamente contrastati). Sulla base dell'esperienza maturata a seguito degli eventi sismici passati, sono stati classificati in letteratura i cinematismi ricorrenti in molte situazioni comuni. Un utile strumento per le verifiche è il programma di calcolo C.I.N.E. (Condizioni d'Instabilità Negli Edifici) disponibile sul sito web www.reluis.it, che permette di stabilire se un dato meccanismo locale risulta suscettibile di attivazione, attraverso il calcolo dell'accelerazione di picco che attiva il meccanismo (PGA - SLV- Peak ground acceleration - Stato Limite di Salvaguardia della Vita).



Fig. 9 Meccanismo locale attivato dalla spinta della volta presente al secondo livello dell'edificio

PARTE III: PROPOSTE DI MIGLIORAMENTO SISMICO.

Il Palazzo Comunale di Poggibonsi è classificato come strategico ai sensi della L.R. Toscana n. 1 del 2005; l'edificio è inoltre vincolato dalla Soprintendenza per i Beni Architettonici.

Allo scopo di fornire all'Amministrazione alcune indicazioni sulla possibilità di aumentare il livello di sicurezza dell'edificio nei confronti delle azioni statiche e sismiche sono state avanzate alcune proposte di rinforzo.

Innanzitutto è stata fatta l'ipotesi che le informazioni raccolte nella prima fase (fase conoscitiva) consentano di raggiungere un livello di conoscenza LC2. Si ricorda che il livello di conoscenza LC2 è molto oneroso circa la conoscenza dei

dettagli costruttivi, perché presuppone che siano state eseguite verifiche in situ estese ed esaustive, con controlli effettuati in modo sistematico su tutto l'edificio. È stata pertanto effettuata nuovamente l'analisi pushover sullo stesso modello numerico utilizzato per l'analisi dello stato attuale per il livello di conoscenza LC1, ma con parametri meccanici aumentati: la verifica sismica globale è risultata soddisfatta, ma non le verifiche di alcune pareti nei confronti dei cinematismi di collasso fuori del piano. Successivamente è stato appurato come il semplice cambio di destinazione d'uso dei locali sot-

totetto da archivio (Cat. E1) ad uffici non aperti al pubblico (Cat. B1) comporta un discreto miglioramento del comportamento sismico globale dell'edificio, ma non il suo adeguamento. Infine è stato preso in considerazione il consolidamento dei solai in legno ed a voltine e la creazione di impalcati rigidi, nonché l'inserimento di catene in corrispondenza delle volte spingenti. Questi interventi consentono di eliminare i meccanismi locali e di migliorare il comportamento scatolare dell'edificio, ma non sono sufficienti a garantire la verifica sismica globale dell'edificio.

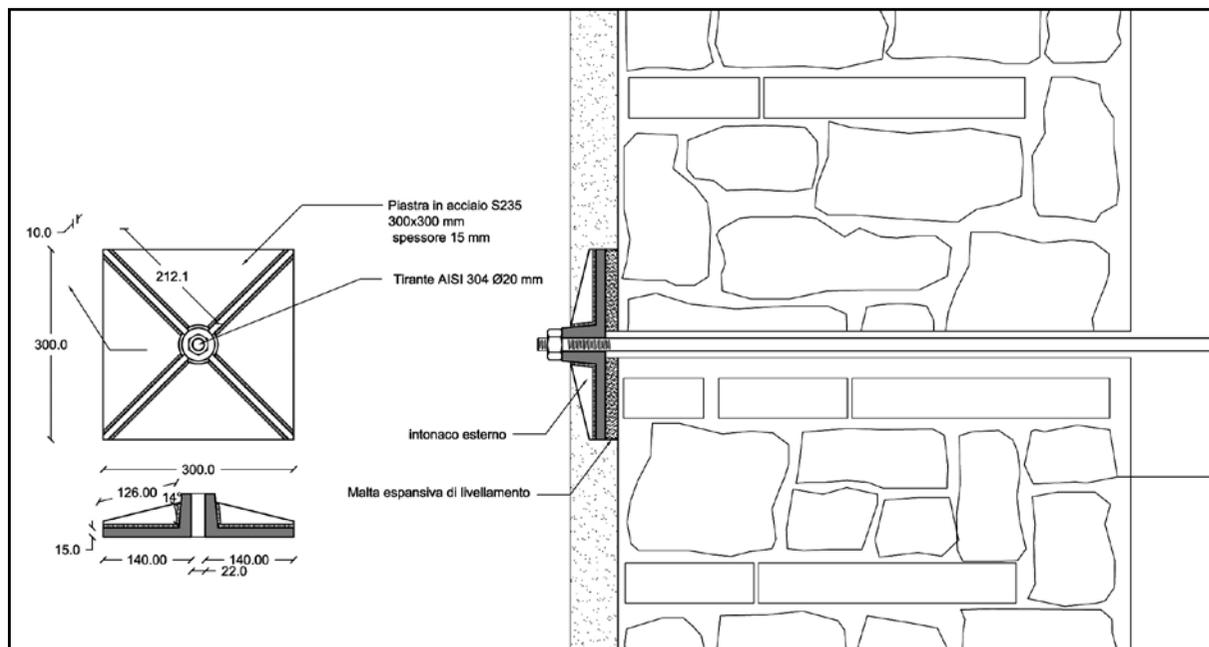


Fig.10 Particolare costruttivo della catena metallica inserita per contrastare le spinta delle volte

Per i solai con insufficiente capacità portante nei confronti dei carichi verticali, sono state sviluppate alcune soluzioni progettuali diversificando il grado di invasività delle scelte effettuate e valutando i pro e i contro di ognuna di esse.

Per i solai a voltine del piano mezzanino è stato progettato un intervento di rinforzo che prevede la rimozione del riempimento ed il getto di una soletta in calcestruzzo armato resa collaborante alle longarine di acciaio mediante connettori a staffa saldati all'ala superiore delle longarine (soluzione a travi miste acciaio-cls) (fig. 11). Questa soluzione necessita tuttavia di indagini preliminari per accertare le caratteristiche meccaniche dell'acciaio delle longarine ed in particolare la sua saldabilità. È stato pertanto progettato anche un secondo tipo di intervento di rinforzo, che trascura completamente il contributo delle

longarine esistenti e consta nella realizzazione di travi in c.a. (una trave per ogni longarina) e di una soletta in calcestruzzo armato, opportunamente ammorsate alle murature (fig. 12).

Per i solai in legno sono state progettate tre diverse tipologie di rinforzo. La prima prevede l'adozione di connettori ancorati a travi e travetti e la realizzazione di una soletta armata. Si costituisce, così, un impalcato rigido capace di ridistribuire in maniera ottimale l'azione sismica e che soddisfa le verifiche previste dalla normativa agli stati limite ultimi e di esercizio per azioni verticali. L'invasività e l'interruzione per un periodo rilevante dell'attività dei locali sono i principali punti critici da evidenziare per questo tipo di intervento.

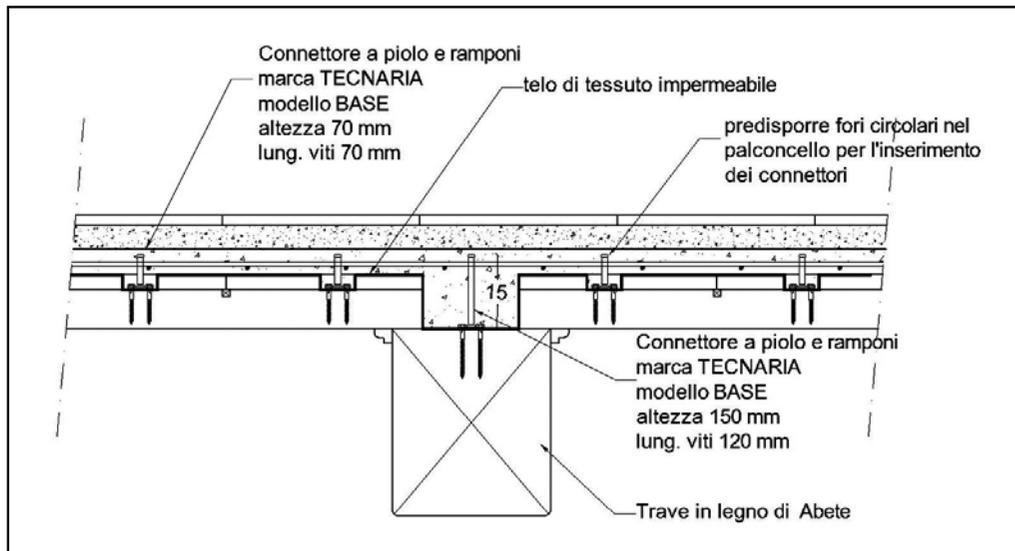


Fig 11. Rinforzo di solaio in acciaio e voltine mediante soletta in calcestruzzo armato resa collaborante mediante connettori a staffa

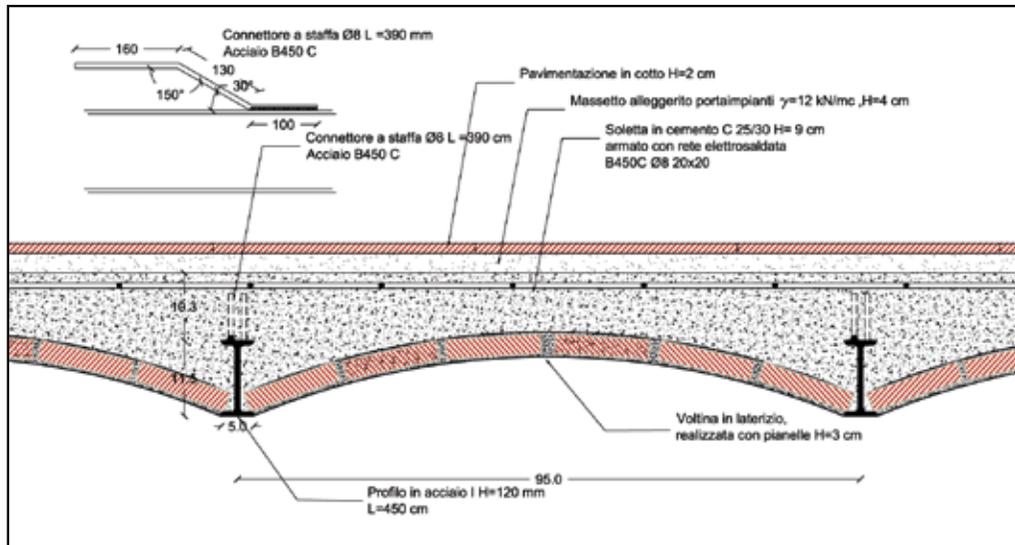


Fig. 12. Trave e soletta in calcestruzzo armato realizzata al di sopra delle voltine in cotto

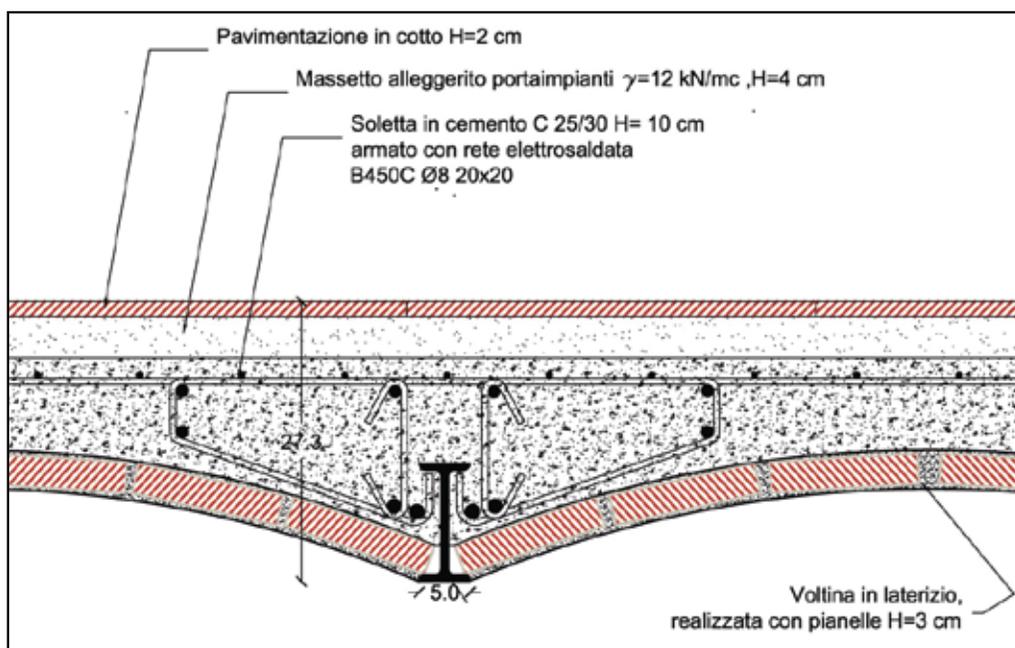


Fig. 13 Rinforzo con soletta collaborante in calcestruzzo armato

La seconda tipologia di rinforzo prevede l'utilizzo di rinforzi in zona tesa con materiali compositi fibrorinforzati (FRP).

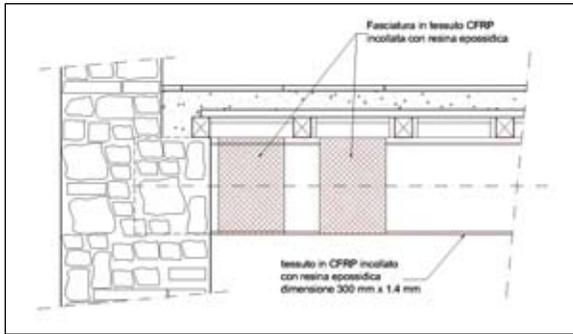


Fig. 14 Rinforzo con FRP

La terza ed ultima tipologia consiste nell'inserimento di nuove travi in legno lamellare in direzione parallela a quelle esistenti. Esse agiscono da appoggio intermedio per i travetti e dimezzano il carico sulle travi. L'inserimento di un cordolo in acciaio permette poi di ancorare i nuovi elementi e scongiurare un possibile sfilamento sotto l'azione sismica.

In conclusione, nell'ipotesi di acquisire un livello di conoscenza LC2, l'insieme di tutti gli interventi proposti (cambio di destinazione d'uso nel sottotetto, catene e piani rigidi ai livelli dei solai) garantiscono la verifica sismica globale dell'edificio.

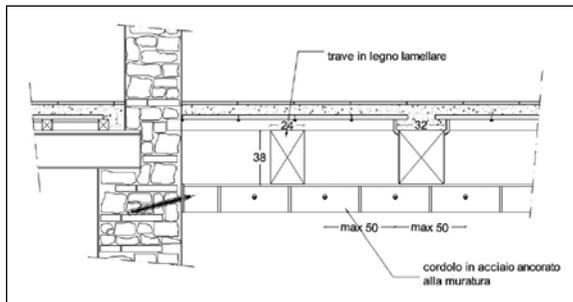


Fig. 15 Inserimento di travi in legno lamellare

CONCLUSIONI

Il lavoro svolto ha evidenziato la necessità di sviluppare, facendo leva su studi analoghi, una fase di confronto e dibattito tendente alla pianificazione degli interventi sul patrimonio edilizio esistente in generale, ma soprattutto su quegli immobili che ospitano funzioni strategiche per le finalità della protezione civile.

Le maggiori perplessità sorte nel corso dello studio riguardano le analisi numeriche da effettuare per la caratterizzazione del comportamento globale degli edifici in muratura in condizioni sismiche. Se da una parte l'analisi dinamica lineare

si basa su un legame costitutivo del materiale lontano dal comportamento effettivo della muratura, dall'altra l'analisi *pushover*, nonostante sia il metodo suggerito dalla normativa per l'analisi sismica degli edifici esistenti, non è ancora supportata da sufficiente sperimentazione.

La questione risulta aperta: alla luce di questa esperienza lo sviluppo di analisi basate sulla valutazione dei meccanismi locali per macroelementi sembra condurre, per gli edifici esistenti in muratura (in particolare per quelli in aggregato) a risultati più attendibili che indirizzano il progettista verso soluzioni più funzionali ed efficaci.

BIBLIOGRAFIA

- Aldinucci, A., Gambassi, T. "Il Palazzo Comunale di Poggibonsi. Analisi del comportamento strutturale e proposte di miglioramento sismico", A.A. 2008-2009, Facoltà di Ingegneria, Università degli Studi di Firenze.
- Beolchini G.C., Milano L., Antonacci E. Repertorio dei Meccanismi di danno, delle tecniche di intervento e dei relativi costi negli edifici in muratura" Convenzione di Ricerca con la Regione Marche; CNR - Istituto per la Tecnologia delle Costruzioni- Sede di L'Aquila; Dipartimento di Ingegneria delle Strutture, delle Acque e del Terreno (DiSAT) - Università degli Studi di L'Aquila, Volume 2 parte 1 2005.
- Blasi C. "Manuale per la riabilitazione e la ricostruzione postsismica degli edifici Ed DEI
- Borri A., Corradi M., "Sull'impiego di tessuti in materiale composito per il consolidamento di strutture lignee. Primi risultati di una sperimentazione".
- Brunetta L. "Manuale completo di SAP2000 v7 italiano CSI Berkeley California"
- Cangi G., "Manuale del recupero strutturale e antisismico" Ed DEI 2005
- Cifani G. Lemme A. Podestà S. " Beni monumentali e terremoto, dall'emergenza alla ricostruzione" Ed DEI 2002
- Del Piero G. "Le costruzioni in muratura," Collana di Ingegneria Strutturale n.2, CISM, Udine, 1984
- Guerrerri F. "Manuale per la riabilitazione e la ricostruzione postsismica degli edifici - Regione Umbria" Ed. DEI 1999
- Iacobelli F. "Progetto e Verifica delle Costruzioni in Muratura in Zona Sismica - V Edizione" Ed. EPC 2008
- Lemme A., Martinelli A. Podestà M. "Sisma Molise 2002 dall'emergenza alla ricostruzione Edifici in Muratura" Ed DEI 2002.
- Mariani M. " Trattato sul Consolidamento e Restauro degli Edifici in Muratura" Ed. DEI Tomo I - II 2006
- Mastrodicca S. "Dissesti statici delle strutture edilizie, Diagnosi, Consolidamento, Istituzioni Teoriche, Applicazioni Pratiche" Ed. Hoepli 1993 9 edizione
- Musso e Copperi Costruttori "Particolari di costruzioni murali e finimenti di fabbricati" Torino 1885
- Rondelet J.B Lione, 4 giugno 1743 - Parigi, 27 settembre 1829 "Trattato Teorico e Pratico dell'Arte di Edificare"
- Sta.Da.Ta "Manuale d'Uso software 3MURI".
- "Analisi statica non lineare (pushover)" di C. Nuti e T. Albanesi, Dipartimento di Strutture Università Roma 3, Maggio 2007