

Interventi su edifici in muratura di interesse culturale

Ing. Alberto Lemme^a, Dott. Antonio Mignemi^b, Ing. Carmenzo Miozzi^c

^a *Ingegnere Libero Professionista – Isernia*

^b *Restauratore titolare della società di restauro Mimarc*

^c *ingegnere – Ufficio Ricostruzione Regione Abruzzo*

Abstract

Gli argomenti affrontati nel presente contributo riguardano alcuni interventi per il miglioramento sismico degli edifici in muratura di interesse culturale con riferimento anche alla interazione tra la struttura e gli apparati decorativi con un duplice obiettivo.

Il primo è illustrare alcune soluzioni di restauro di elementi costruttivi nel rispetto di tecniche tradizionali con elevata efficacia dal punto di vista del miglioramento sismico che tengono conto degli apparati decorativi considerandoli come parte integrante della struttura ai fini della sicurezza dell'opera.

Il secondo è mostrare come taluni manufatti hanno una capacità di resistenza alle azioni sismiche che non viene intercettata dai modelli di calcolo più diffusi nella pratica professionale.

Keywords: vulnerabilità sismica; muratura; riparazione; ricostruzione; prevenzione sismica; sisma 2009

1. Premessa

Per gli edifici monumentali gli interventi devono essere rispettosi del bene sia per quanto riguarda la parte architettonica, la parte strutturale, e gli apparati decorativi e pertanto il restauro degli apparati storico artistici e il consolidamento delle strutture sono interventi che devono essere progettati in modo integrato e per la loro tutela, occorre approfondire la conoscenza dell'interazione strutturale per ottenere una efficace protezione dal rischio sismico.

In generale il patrimonio edilizio degli edifici esistenti in muratura e in particolare quello dei centri storici italiani è composto da tipologie costruttive differenti che vanno dagli edifici monumentali agli edifici residenziali organizzati in aggregati edilizi o edifici isolati realizzati con materiali diversi in base all'epoca di costruzione e all'area geografica come ad esempio gli edifici in mattoni o in pietra. La maggior parte di essi è ubicato in zone classificate a media ed elevata sismicità, non è in grado di resistere ad un evento sismico di forte intensità e non è possibile, per il rispetto delle tipologie costruttive locali e di tutela del patrimonio culturale, conseguire l'adeguamento alle norme sismiche che si sono estese ed evolute nel corso degli anni considerando a rischio sismico zone che fino a qualche anno erano escluse. I recenti eventi sismici hanno posto in primo piano il problema della vulnerabilità degli edifici esistenti in muratura, la scarsa efficacia di alcuni interventi di consolidamento che prevedono l'inserimento di elementi estranei ai manufatti originari ed alle modalità costruttive storiche locali. Tali interventi non hanno ottenuto, in termini di resistenza sismica, il risultato atteso al collaudo sismico e, in molti casi, sono stati la causa di un aggravamento del danno stesso e la problematica va affrontata nella prospettiva di calibrare gli interventi per le singole tipologie costruttive, prevedere interventi efficaci e di costo limitato, che consentono di raggiungere un livello di miglioramento sismico accettabile (minimo 60% dell'adeguamento sismico) da coniugare anche alla salvaguardia del patrimonio tutelato e alla esigenza dell'efficienza energetica.

2. Aspetti metodologici

Una classificazione sintetica degli edifici in muratura di interesse culturale riguarda le strutture, distinte in verticali, orizzontali compresi archi e volte, di copertura e gli apparati storico artistici che possono essere realizzati con materiali differenti quali lapideo, ferro, materiali assimilabili a stucco, intonaci, pitture e legno oltre alle finiture e agli impianti

In tale contesto aspetto fondamentale è l'interazione degli apparati decorativi con la struttura di supporto che può essere: di collaborazione, semplice appoggio senza alcuna interazione strutturale di massa irrilevante e decorazione applicata sulla muratura avente massa significativa che non contribuisce alla resistenza della struttura.

1 – collaborazione degli apparati decorativi con la struttura architettonica (lapideo, metalli, legno ecc). Ne sono un esempio i cantonali, gli imbotti delle aperture, le finestre, i pilastri di loggiati, le scale, i capitelli le travi, i solai, i cassettonati le grate in metallo ed altri elementi.

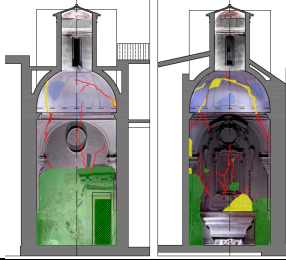
Questi elementi possono avere un ruolo attivo nella risposta strutturale dell'edificio solo per massa e contributo alla resistenza e alla rigidezza come ad esempio travi, pilastri, cantonali o soltanto per resistenza come ad esempio le catene o per resistenza e vulnerabilità, come colonne, travi, cantonali, paraste, ecc...

Nel caso degli stipiti di portoni e finestre, va curato l'inserimento nella muratura, nel caso della presenza di grate in metallo dovranno essere curati i collegamenti alla struttura.

		
Rosone e portale lapideo – Chiesa della Misericordia (Aq)	Grata metallica e imbotti in pietra - Palazzo Ardinghelli (Aq)	Portale e imbotti in lapideo nella facciata di Palazzo Ardinghelli (Aq)

2 - Decorazione applicata “semplicemente” sulla struttura muraria (pitture murali, affreschi, carta parati, tessuti, ecc) Sui prospetti e negli ambienti interni sono presenti decorazioni che non hanno alcuna funzione strutturale ma che, essendo applicate su pareti e soffitti (ad esempio le volte), decorano porzioni dell’edificio che hanno valenza statica e portante. La decorazione può presentarsi su singole pareti oppure rivestire due facce di una parete che svolge funzione portante. In questi casi gli interventi di consolidamento strutturale dovranno essere progettati nel rispetto della tutela e della conservazione del bene storico artistico.

3 - decorazione applicata sulla muratura avente massa significativa che non contribuisce alla resistenza della struttura. Questi elementi possono influenzare negativamente il comportamento della struttura aumentando la vulnerabilità di alcuni meccanismi per massa elevata e collegamento debole alla struttura (per esempio organi, cornici di grosse dimensioni, grosse statue, ..). Tali apparati possono essere sia all’interno che all’esterno degli edifici. Tra quelli all’interno vi sono i camini e le cornici di porte e finestre, le statue, all’esterno vi sono sempre i cornicioni sottogronda e a livello di piano in stucco e mattoni, i balconi, gli imbotti, le statue, le balaustre;

			
Balaustra della scala monumentale	Camino al piano nobile	Cornici di porte	Affreschi al di sopra della scala monumentale - Palazzo Ardinghelli L’Aquila
			
cappella con decorazioni a stucco al piano nobile	Elementi decorativi in facciata		

	
Organo del settecento nell’oratorio S. Antonio L’Aquila - a) prima 2009, b) dopo il restauro a seguito del sisma del 2009	

Inoltre per definire l'intervento di restauro bisogna considerare anche la qualità del collegamento degli apparati alla struttura che può essere :

- efficace e in essa inglobati come un rosone in facciata, semplicemente collegati come le inferriate o semplicemente applicati sulle murature come le pitture e gli stucchi.
- in modo poco efficace e aventi modesta resistenza come ad esempio i cornicioni, gli elementi lignei, le decorazioni in mattoni e gli stucchi in particolare quelli di grande dimensione.
- semplicemente appoggiati senza connessioni strutturali efficaci come gli altari addossati, i camini, le statue.

3. Analisi di alcuni interventi di restauro e miglioramento sismico di strutture e apparati decorativi

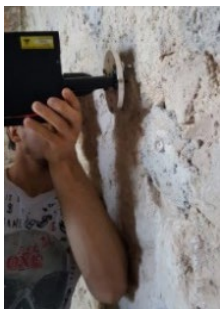
Alla luce di tali considerazioni nel presente contributo sono stati presi in considerazione alcuni interventi di restauro con miglioramento sismico di edifici tutelati realizzati con tecniche tradizionali e che tengono conto degli apparati storico calcolo più diffusi nella pratica professionale e spesso non previsti nei codici di calcolo.

3.1. Strutture verticali

Per quanto riguarda le strutture verticali portanti una problematica rilevante riguarda la presenza di materiali di pregio sulle superfici (affreschi, intonaci, ..) e di elementi lapidei come cornicioni imbotti, portali, rosoni, grate in ferro.....

Nel caso delle superfici affrescate o ricoperte di intonaci di pregio il consolidamento può essere realizzato con iniezioni di calce e/o l'impiego di nanocalci e, se possibile, l'inserimento di connessioni trasversali in acciaio inox di piccolo spessore per il collegamento dei paramenti murari. Inoltre i materiali impiegati, inutile a dirlo, devono essere compatibili con quelli in opera.....

Il Casino delle Delizie in L'Aquila conserva dipinti realizzati con tecnica del "buon fresco" lungo le quattro pareti di una sala, databili tra la fine del 1500 primi 1600, narranti le "Storie della vita di Mosè" e riferibili alla scuola di Raffaello, altre porzioni dipinte si trovano, lungo le pareti dove insiste la scala originale che porta dal piano terra al primo piano. Purtroppo l'evento sismico, ha provocato gravissimi danni a tutta la struttura con conseguenze drammatiche sul ciclo di affreschi. Il consolidamento delle murature, in corrispondenza delle pareti affrescate è stato realizzato con iniezioni di preconsolidamento di nanocalci, iniezioni di malta di calce naturale e l'inserimento di connessioni trasversali elicoidali in acciaio inox disposte e utilizzate anche per la cucitura delle lesioni (figure 36a, 36b, e 37b). L'intervento è stato realizzato soltanto sul lato sul quale esterno dove non erano presenti gli affreschi.

			
Casino delle Delizie Branconio L'Aquila : a) applicazione nanocalci a spruzzo, b) prova penetrometrica sulla malta consolidate con nanocalci		Casino delle Delizie Branconio L'Aquila : consolidamento delle murature con iniezioni di malta di calce idraulica	

In presenza di materiali decorativi in lapideo occorre verificare la connessione con la muratura, dimensionare le eventuali connessioni e tenere conto di questi elementi come irrigidimenti delle strutture verticali.

	
Palazzo Ardinghelli L'Aquila - Particolare della loggia su Piazza S. Maria Paganica crollata nel sisma del 2009 – Foto A. Lemme	Palazzo Ardinghelli L'Aquila - La loggia su piazza S. Maria Paganica restaurata dopo il sisma del 2009 Foto A. Mignemi

Per la ricostruzione e ricollocazione degli elementi lapidei crollati quali pilastri, archi e volte a crociera del loggiato di

palazzo Ardinghelli a L'Aquila, preliminarmente all'esecuzione del lavoro di ricostruzione dei pilastri, è stato eseguito a piè d'opera il montaggio degli elementi lapidei dei pilastri e degli archi provenienti dal crollo. Questo montaggio è realizzato a secco per valutare l'entità delle lacune e la loro reintegrazione. I pilastri crollati della loggia, una volta recuperati mediante incollaggio dei frammenti e la reintegrazione delle lacune, sono stati rimontati in situ prima a secco mediante l'utilizzo di Perniture in acciaio, poste fra un concio e l'altro, e l'inserimento di nastri in acciaio disposti in modo perpendicolare al concio lapideo in modo da dare solidità ai conci ed evitare che questi possano aprirsi.



Elementi lapidei degli archi recuperati dal crollo, integrati e rimontati in situ - foto A. Mignemi

Il rimontaggio dell'apparato lapideo a secco ha permesso di verificare la corretta posizione dei conci nel rispetto dell'altezza, il ricorso dei conci lapidei e verificare dall'interno se il sistema di connessioni in acciaio potesse funzionare. A seguito i pilastri sono stati riempiti con un nuovo apparecchio in mattoni pieni.



Fase di stuccatura dei conci; fase di consolidamento estradossale in fibra di basalto e malta di calce; inserimento di mattoni pieni allo scopo di ottenere una superficie piana pronta per la costruzione dell'arco a mattoni (strutturale) e volta a crociera – Foto A. Mignemi

I cornicioni e le fasce marcapiano

Il cornicione di palazzo Ardinghelli è realizzato con elementi lapidei di supporto arricchiti da stucchi di matrice calcarea, realizzati con una malta a base di calce. Le decorazioni hanno un considerevole aggetto e consistono in ampie volute arricchite da foglie d'acanto che sorreggono visivamente la cornice superiore, collegate tra loro da ghirlande di foglie d'acanto. Le volute sono costruite su di un'anima in mattoni ricoperta da una malta da aggrappaggio ad un ulteriore strato di arriccio e infine è stato steso l'ultimo strato di malta, più sottile di spessore, con cui è stato realizzato il modellato definitivo. L'intervento di restauro ha avuto lo scopo di conferire agli strati d'intonaco continuità strutturale e valori di adesione sufficienti a garantire meccanica e sono stati effettuati consolidamenti con malte di calce ad iniezione.



Cornicione di Palazzo Ardinghelli

3.1.2. Modellazione numerica e verifica allo stato limite artistico

Per Palazzo Ardinghelli sono state eseguite alcune verifiche allo SLA (stato limite artistico) introdotto dalla direttiva del Consiglio dei ministri 9 febbraio 2011 e la valutazione è stata svolta con modelli locali su parti del fabbricato ritenute di pregio o comunque per le quali è prevista una valutazione del livello di accelerazione indotto da un potenziale sisma. Di seguito si riportano alcune elaborazioni relative a due apparati decorativi in materiale lapideo: la loggia sul cortile, per la quale la verifica numerica fa riferimento allo SLU (stato limite ultimo), che nel caso specifico può coincidere con lo

SLA in quanto elemento con funzione strutturale, e il cornicione.

Il loggiato

Il primo modello di calcolo è stato elaborato per stimare l'accelerazione che porta al danneggiamento. Il modello è costituito da elementi trave, che rappresentano i pilastri, e da elementi di tipo "shell" a quattro nodi utilizzati per la schematizzazione della muratura.

Valutazione delle tensioni indotte nella muratura (elementi shell) dai carichi statici, peso proprio oltre l'aliquota degli accidentali. La tensione verticale registrata varia da 0 (aree rosse) a 0.75 MPa (aree viola). C. Miozzi	Valutazione delle tensioni indotte nella muratura (elementi shell) dai carichi statici e sismici (allo SLV). La sollecitazione "di taglio" registrata varia da 0 (rosso) a 0.7 MPa (viola). C. Miozzi

Il cornicione

In base al rilievo fatto ed alla lettura della tipologia del danneggiamento del cornicione, nel modello semplificato si ipotizza una rottura per flessione della "mensola" indicata con il tratto di colore rosso nella fig.32 dovuta alle sollecitazioni della massa sovrastante e della copertura delimitate dal tratto verticale di colore blu. Le frecce gialla e verde indicano le azioni dovute a carichi gravitazionali G e ad azioni sismiche orizzontali S.

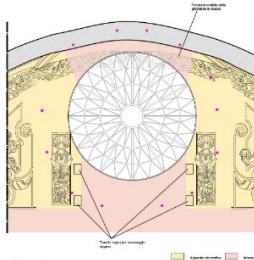
Restituzione grafica in sezione del cornicione nel tratto compreso fra due volute successive. Con la linea verticale di colore blu si delimita il volume della muratura e della copertura sovrastante che grava sul cornicione "a mensola" indicato dalla linea rossa. L'area campita con il puntinato è costituita da muratura, quella con la linea continua obliqua da pietra arenaria.	Relazione tra accelerazione ag sollecitante e sollecitazione indotta in corrispondenza del lembo più sollecitato nel cornicione al variare di a. C.Miozzi

I cornicioni interni all'Oratorio di S.Antonio , L'Aquila, collaborano in modo limitato con la struttura e l'intervento è stato realizzato con connessioni in acciaio inox, ripristino delle porzioni crollate per aumentare le resistenza e la rigidezza contribuendo a migliorare la resistenza flessionale fuori del piano della parete di elevata altezza .

porzione della trabeazione con distacco dal supporto murario,	fratture e dissesto del cornicione	dettaglio costruttivo trabeazione, disegno dott.F.Martinez	dettaglio costruttivo altare laterale su via S.Marciano. dott.ssa F.Martinez

Chiesa della Misericordia L'Aquila : il Rosone in Contro facciata

In questa zona, da un punto di vista architettonico e strutturale, i danni da sisma sono stati rilevanti e di conseguenza l'apparato decorativo in stucco ha riportato importanti danni che in parte si manifestano con lesioni e distacchi mentre in alcune zone, dove gli spessori sono notevoli, si percepisce che l'intero apparato presenta distacchi significativi a ridosso della muratura.

		
Sopra nella foto si evidenziano i distacchi dell'apparato in stucco addossato all'elemento lapideo del rosone.	Particolare del degrado del rosone. Lesione presente fra i due paramenti del rosone	Ubicazione Connessioni trasversali in controfacciata

Gli interventi di restauro si prevedono le seguenti operazioni: Inserimento di collegamenti in filo di acciaio flessibile (trefolo) e guainato da applicare mediante piombatura su appositi fischer di acciaio su 2 puttini, consolidamento e riadesione dell'intonaco e degli stucchi alla struttura muraria mediante iniezione di malte a base di calce con eventuale inserimento di micropernature, lungo il perimetro, oltre il cornicione, sono previste connessioni trasversali realizzate con barre in acciaio inox iniettate, inserimento, tra il rivestimento in pietra esterno e quello interno, di un terzo paramento realizzato con pietre squadrate della stessa dimensione dei blocchi del paramento interno, intervallate da blocchi di lunghezza maggiore, uno ogni 4 pietre, connessioni trasversali con barre in acciaio inox disposte perimetralmente all'esterno del rosone. (si veda tavola interventi architettonici), stuccatura delle lacune e delle fessurazioni presenti sugli elementi in stucco e sulla parte lapidea del rosone interno, pulitura dell'apparato lapideo corrispondente al rosone e degli elementi in stucco raffiguranti i puttini, ghirlande e volute varie.

3.2. Le strutture orizzontali

Le strutture orizzontali possono essere realizzate con tecnologie differenti come solai in ferro e laterizio o in legno, volte in mattoni, in pietra ed essere presenti contemporaneamente nello stesso impalcato. In tale contesto assume rilevanza la rigidità dell'impalcato sia per quanto riguarda il comportamento dell'intero edificio sia per la deformabilità degli elementi costruttivi in particolare le volte e i solai in legno.

Nel contesto strutturale della costruzione le volte sono deformabili o semideformabili in base alla tipologia costruttiva. Le volte leggere in camorcanna o in mattoni disposti di foglio sono le più deformabili mentre le volte in pietra di elevato spessore sono meno deformabili inoltre anche la forma contribuisce alla deformabilità nelle due direzioni.

La deformazione delle volte è influenzata dal collegamento alle strutture verticali e alla capacità di realizzare un vincolo alle pareti fuori del piano e di ridistribuire le forze sismiche tra le pareti sollecitate nel piano. Le volte come gli archi trasmettono le azioni orizzontali sulle pareti verticali e può quindi accadere che questi, in assenza di catene e altri presidi, sollecitino le pareti agevolando l'attivazione di meccanismi fuori del piano.

Volte in Camorcanna: sono caratterizzate da una struttura composta da centine lignee ed elementi di ripartizione nelle due direzioni che sostiene la parte opaca della volta realizzata con uno strato di materiale leggero, tipo cannucciato, inglobato in un intonaco di calce o gesso.

Nel caso di due volte nell'ex Licelo I via Maielle all'Aquila partendo dall'intradosso è presente un primo strato di intonaco di calce o gesso avente spessore di circa 2 cm sul quale sono appoggiati decorazioni a stucco. Sia l'intonaco che gli stucchi dovranno essere restaurati e conservati. Al di sopra dello strato di intonaco è presente l'incannucciato realizzato con mezze canne avente diametro di circa 2 cm disposte a maglia sovrapposta con un intreccio a sormonto costituite, da uno strato di 4-5 semicanne in direzione dei paralleli per una larghezza di circa 5 cm e da un secondo strato di cannuccie in direzione ortogonale che, in moto alternato, a distanza di circa 30 cm passano sopra e sotto il primo strato di cannuccie. Lo spesso del cannuccio è di circa 2 cm. Al di sopra della maglia di cannuccio è presente uno strato di malta di calce in discrete condizioni che termina in corrispondenza di ogni listello che sporgono verso l'alto di altri 2 cm circa.

Intervento realizzato : Rinforzo delle delle centine mediante risanamento con trattamenti, inserimento di tavole della stessa essenza disposte ai lati e integrazione della agli appoggi, trattamento ed eventuale rinforzo dei listelli radiali, restauro dell'intonaco e degli stucchi all'intradosso, miglioramento del collegamento tra l'incannucciato e il sistema resistente della volta mediante l'inserimento di fascette in acciaio inox al di sotto dei fasci disposti secondo i meridiani in modo alternato e i paralleli.

		
Volta in camorcanna prima intervento Particolare cannuccio intrecciato	Intervento di rinforzo della camorcanna con fasce in acciaio trasversali in legno	

4. Considerazioni sulla rigidità degli impalcati

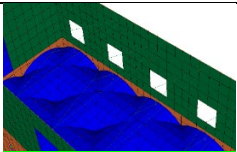
Negli edifici esistenti la regolarità in pianta e in elevazione non sempre è rispettata e la rigidità degli impalcati può condizionare il comportamento degli edifici. Un meccanismo molto frequente è l'espulsione dell'angolata localizzata nella fascia di collegamento fra due pareti contigue. Si ha la separazione di parte dell'angolata quando l'interazione di forze agenti su pannelli minori ortogonali determina la rotazione fuori piano del blocco dell'angolata con punto di cerniera a quota inferiore. Il meccanismo è favorito da azioni con componente orizzontale e dalla presenza di orizzontamenti rigidi che contrastano la naturale deformazione della cella muraria, determinando negli spigoli un'azione concentrata fuori del piano. In questo caso l'intervento di miglioramento sismico devono essere controllati tutti i meccanismi di primo modo con collegamenti di piano realizzati con catene, profili angolari in acciaio disposti sul perimetro e non devono essere realizzate solette rigide all'estradosso.

	
Collegamenti continui di piano in acciaio	Solaio in travi in ferro e tavelloni rinforzati con travi rompitratta e collegamenti di piano - Sisma L'Aquila 2009 - Casina Delizie Branconio - foto A. Lemme

Altro aspetto rilevante è la regolarità in pianta delle strutture ed in elevazione che può avere differenti configurazioni e tra queste è molto frequente la presenza di ambienti con una lunghezza elevata senza pareti trasversali come nel caso di molti edifici di culto o di edifici pubblici.

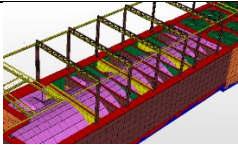
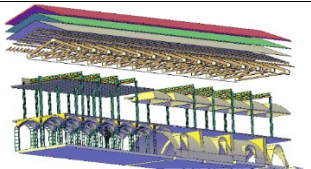
Nel caso del liceo in via Maiella a L'Aquila il complesso edilizio composto da tre corpi di fabbrica separati da giunti di cui il corpo centrale "B" è vincolato ai sensi del dlgs 42/2004 e nella sua conformazione originaria ha forma rettangolare allungata con un rapporto tra i lati pari a circa 6,5, (11 m x 70,50 m) inoltre il sistema resistente in pianta risulta molto squilibrato oltre che per forma anche per distribuzione degli elementi resistenti.

Nella parte sinistra si possono apprezzare dei setti trasversali costituiti da archi in muratura parzialmente tamponati che non trovano continuità nel piano superiore mentre parte destra c'è un impianto di pilastri e volte, di epoca successiva a quella originale e in testata è presente un corpo ascensore con pareti in c.a. oltre alla scala e altre pareti di spessore inferiore a quelle perimetrali inoltre sul lato ascensore la parte terminale scende per due livelli al di sotto della parte rimanente del corpo di fabbrica. Tale irregolarità in elevazione e per distribuzione di rigidità trasversali comporta che a seguito di spinte dinamiche la fabbrica ruota intorno alla zona che ha una altezza maggiore facendo cerniera con uno spostamento che induce tensioni elevate nelle murature longitudinali. Nelle immagini seguenti è stata evidenziata questa criticità e per eliminare queste vulnerabilità dovute alla irregolarità in pianta, elevazione e alla distribuzione delle rigidità trasversali sono stati inseriti dei presidi in acciaio in direzione trasversale per aumentare la rigidità in questa direzione oltre a interventi localizzati di regolarizzazione del tessuto murario.

			
Ortofoto del complesso edilizio del liceo in Via	Modello strutturale edificio B	Particolare modellazione della volte	Analisi modale prima dell'intervento

Maiella a L'Aquila			
--------------------	--	--	--

Gli interventi previsti sono stati : frenelli in mattoni pieni sopra le volte, travi reticolari e profili in acciaio di collegamento al piano primo, ringrosso delle murature snelle, aumento delle caratteristiche meccaniche della muratura in linea con rinforzo realizzato con rete in tessuto di basalto e connessioni trasversali. L'analisi modale sulla situazione di progetto evidenzia una rilevante riduzione delle deformazioni

			
srtalcio modello strutturale con rinforzi in acciaio	Vista ssonometrica degli elementi di rinforzo in acciaio	Interventi di irrigidimento trasversale	Analisi modale dopo l'intervento

Nei casi presi in esame l'interazione con gli apparati storico artistici e le peculiarità strutturali degli edifici non sempre consentono di conseguire un livello di sicurezza accettabile (almeno 60%) e anche se la norma consente di derogare per questi edifici rimane che il problema della sicurezza sismica in relazione all'uso pubblico. Negli interventi illustrati è stato realizzato il rinforzo e il consolidamento delle strutture e degli apparati decorative intervenendo sulla capacità alle azioni sismiche dei corpi di fabbrica e degli apparati costruttivi.

4.1. Strategia di intervento integrative

I livelli di sicurezza potrebbero essere ulteriormente migliorati intervenendo sulla domanda con interventi poco invasivi che in generale sono l'isolamento alla base degli edifici o la posa negli edifici di masse ascillanti che controllano e riducono l'azione sismica sulle strutture.

La protezione sismica degli edifici monumentali con le masse oscillanti (ISAAC Innovative Seismic protection based on Adaptive Active Control) che rappresenta una tecnologia applicabile al patrimonio culturale. Il sistema di controllo attivo e adattivo protegge gli edifici storici dalle azioni sismiche senza modificarne la struttura portante nel rispetto della reversibilità e della invasività. Le componenti principali sono:

1. Attuatori elettromeccanici: dispositivi che applicano forze orizzontali controllate alla struttura.
2. Sensori: accelerometri e altri strumenti che misurano in tempo reale la risposta dell'edificio.
3. Unità di controllo: un software intelligente (algoritmo predittivo) che elabora i segnali e comanda gli attuatori in base al comportamento dell'edificio.

Questi sistemi utilizzano meccanismi che si azionano se registrano un movimento della struttura oltre una certa soglia, la cui forza è modulata in base alle accelerazioni registrate. Il sistema può essere installato in sommità del fabbricato e, grazie a sensori accelerometrici applicati in punti significativi, registra i movimenti della struttura e contrasta in autonomia le forze inerziali indotte dal terremoto o dal vento. Ne risulta un incremento dello smorzamento strutturale che riduce gli spostamenti, evitando danni alla struttura o collassi improvvisi. Questo approccio inoltre permette di rafforzare la sicurezza sismica senza interrompere le attività o modificare l'aspetto esteriore degli edifici.



5. Conclusioni

L'interazione tra beni storico artistici e struttura porta a modificare sostanzialmente l'approccio progettuale che nella pratica usuale considera separati questi due aspetti.

Le soluzioni molto rigide che amplificano alcuni meccanismi di collasso non devono essere inserite negli edifici in muratura e negli edifici tutelati. Potrebbero essere fonte di danno sismico come hanno testimoniato gli eventi sismici che hanno colpito il patrimonio edilizio Italiano negli ultimi anni caratterizzati dalla esecuzione di interventi in cemento armato per il rinforzo delle strutture in muratura.

Integrare gli interventi di restauro e consolidamento degli edifici in muratura con soluzioni non invasive che controllano le oscillazioni degli edifici e consentono di ottenere un livello di protezione maggiore (Active Mass Damper).