



TECNICHE DI CONSOLIDAMENTO DEI MONUMENTI: UNA PANORAMICA ATTUALE

L.Jurina

Politecnico di Milano, Dipartimento Ingegneria Strutturale

1. PREMESSA

Negli ultimi anni si è verificato un interessante fenomeno di “riscoperta” delle tecniche e dei materiali che appartengono alla edilizia storica e monumentale. Le necessità di un riuso, anche residenziale, dei centri storici e gli evidenti rischi che, soprattutto in zona sismica, minacciano gli edifici ed i loro abitanti, ha obbligato i professionisti ed i ricercatori a nuovi sforzi per la comprensione dei meccanismi resistenti degli edifici in pietra ed in muratura, al fine di valutarne la sicurezza e, di conseguenza, di individuare le modalità più efficaci, più economiche e più rispettose per migliorarne il livello. Questi sforzi di conoscenza sono stati aiutati, o talora imposti, da una normativa che, finalmente, ha posto in evidenza che una gran parte delle nostre abitazioni sono in muratura e sono soggette a carichi orizzontali oltre che verticali.

E' stato dato valore, inoltre, al formidabile ruolo della diagnostica, anche mediante coefficienti che premiano tale attività preliminare, ritenuta a ragione una *attività virtuosa*, consentendo così una riduzione dei costi di intervento.

Ciascun progetto di consolidamento si pone come obiettivo quello di conferire alla struttura esistente la capacità di sopportare e trasferire i carichi di progetto, sia verticali che orizzontali. Ovviamente nelle verifiche strutturali occorre considerare il degrado del materiale, nonché tutte quelle modificazioni che l'edificio ha subito nel corso della sua storia. Per una valutazione il più possibile oggettiva di questa variabilità vengono in aiuto le vigenti normative (*DM 14 Gennaio 2008 – Norme Tecniche per le Costruzioni* e la *Direttiva del 9 Febbraio 2011: Valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale*) che, sulla base del *livello di conoscenza* raggiunto, identificano un *fattore di confidenza*, per graduare il livello di incertezza nella modellazione e nei calcoli. Tanto più si conosce della struttura, tanto più si riducono le incertezze e, di conseguenza, il fattore di confidenza F_c (compreso tra 1 e 1,35) tende all'unità.

Nella valutazione della sicurezza sismica di un edificio, il fattore di confidenza viene applicato direttamente sulle proprietà meccaniche dei materiali, riducendone la resistenza, qualora il modello consideri la deformabilità e la resistenza dei materiali e delle strutture. Qualora

ra invece il modello consideri l'equilibrio limite degli elementi strutturali (modello di corpo rigido), F_c viene applicato direttamente sulla capacità della struttura, ossia riduce l'accelerazione corrispondente ai diversi stati limite.

È bene ricordare fin da subito che, secondo quanto previsto nella Direttiva per i Beni Culturali 2011, per i beni tutelati è necessario ottenere “almeno” un miglioramento, oltre a riparazioni o interventi locali; è possibile quindi derogare dall'adeguamento sismico, anche se questo resta l'obiettivo. Con il termine di *miglioramento* si deve intendere l'esecuzione di opere in grado di far conseguire all'edificio un maggior grado di sicurezza rispetto alle condizioni attuali, anche se il livello di protezione sismica non necessariamente raggiunge quello previsto per l'adeguamento delle costruzioni. *Riparazioni o interventi locali* interessano invece porzioni limitate della costruzione, e devono essere soggetti a verifiche locali; nel caso dei beni tutelati è comunque richiesta anche una valutazione della sicurezza complessiva, almeno in forma semplificata, in modo da certificare che non siano peggiorate le condizioni di sicurezza preesistenti.

La norma prevede tre livelli di valutazione della sicurezza sismica del manufatto nella progettazione di interventi su edifici monumentali. Il primo livello (LV1) consente valutazioni sismiche semplificate, basate su un numero ridotto di parametri meccanici o geometrici. Tale livello può essere applicato in fase di progettazione preliminare. Il secondo livello (LV2) valuta invece gli effetti delle riparazioni o degli interventi locali presenti su zone limitate del manufatto, che non alterano il comportamento globale dell'edificio. Infine, per una valutazione complessiva del comportamento sismico dell'edificio, è necessario condurre un'analisi di terzo livello (LV3). Tale livello si applica quando gli interventi sono diffusi e dunque quando è richiesto il raggiungimento del miglioramento sismico.

Gli ultimi due livelli di valutazione richiedono la comprensione del comportamento sismico dell'edificio, mediante la conduzione di analisi (lineare o non lineare, statica o dinamica).

Viene così definito *l'indice di sicurezza sismica*, ossia il rapporto tra l'accelerazione che porta al raggiungimento dello stato limite e l'accelerazione attesa. Naturalmente, ai fini del miglioramento sismico l'indice di sicurezza della struttura dopo l'intervento deve risultare incrementato rispetto allo stato di fatto.

Fatte queste premesse, esamineremo , anche se non si potrà entrare nei dettagli, le tecniche che in questi ultimi anni si sono sviluppate, con il supporto di materiali e concezioni che si sono affinate e migliorate e con il presupposto di una diagnostica mirata e poco distruttiva, finalmente ritenuta necessaria per affrontare consapevolmente gli interventi.

Solo dopo aver ricavato il maggior numero possibile di informazioni sull'edificio si può passare, infatti, alla formulazione consapevole dell'intervento di consolidamento.

2. LA DIAGNOSTICA STRUTTURALE

Prima di qualsiasi scelta progettuale è necessario conoscere l'edificio in ogni sua componente, sia strutturale che non strutturale, attraverso una approfondita ricerca storica ed una accurata diagnosi preventiva. In questo senso la valutazione della geometria, dei materiali e dei carichi nonché del degrado e del dissesto strutturale risulta prioritaria e parte integrante del progetto dell'intervento. Valutare le condizioni di una struttura significa, in

primo luogo, giudicare consapevolmente la capacità attuale di trasferire e sopportare le sollecitazioni con adeguati margini di sicurezza; significa inoltre stabilire se l'elemento strutturale continua a mantenere la funzione per cui è stato concepito e realizzato, e se la manterrà durante la sua vita utile. Tali valutazioni hanno lo scopo di condurre il progettista a scelte di interventi di consolidamento mirati, "ad hoc" e rispettosi dell'esistente, con cui il nuovo deve "con-vivere". In definitiva, una corretta diagnostica consente di convergere verso il ben noto criterio del "*minimo intervento*". Inoltre va sottolineato il fatto che l'investimento iniziale nella diagnostica comporta, nella maggior parte dei casi, un risparmio economico in fase di intervento.

Ad oggi sono disponibili numerose ed innovative tecniche diagnostiche, non invasive o semi-invasive, indirette o dirette. Le prime, se possibile, sono da preferire alle seconde, in virtù del principio di salvaguardia e tutela del bene monumentale.

Le indagini dirette, sebbene insostituibili ed in grado di fornire una valutazione quantitativa del parametro indagato, in molti casi possono ledere la integrità del manufatto; ad esempio imprudenti asportazioni di materia rischiano di modificare lo schema statico locale e produrre un aumento del danno presente. Le indagini indirette, non distruttive, d'altra parte devono essere di volta in volta calibrate e raramente sono in grado di fornire parametri quantitativi assoluti, limitandosi ad utili informazioni di confronto.

Ad esempio negli edifici storici, prevalentemente in muratura, è opportuno affiancare ai tradizionali e ben noti martinetti piatti (semi-invasivi) le prove soniche (non invasive) [1].

Mentre le prove con martinetti piatti restituiscono in modo diretto i valori di sforzo nella muratura, il modulo elastico ed altri parametri meccanici, le prove soniche sono utili allo scopo di definire le zone di pertinenza dei vari materiali e quindi di caratterizzare e descrivere qualitativamente la muratura.

Oltre all'invasività, nella scelta della prova diagnostica vanno tenuti in conto i criteri di utilità, di tempo e, non da ultimo, di costo. Ne consegue che le indagini conoscitive dello stato di fatto, propedeutiche alla scelta dell'intervento più adatto, devono essere programmate e accuratamente "progettate".

L'obiettivo delle indagini è duplice: validare le ipotesi di dissesto formulate nelle considerazioni preliminari, ed ottenere parametri, principalmente di tipo geometrico e meccanico, da utilizzare nel calcolo strutturale.

È interessante qui ricordare un ulteriore aspetto che deve far parte della progettazione di un intervento di consolidamento, vale a dire il monitoraggio nel tempo, anche durante la fase dei lavori.

In un'ottica di *indagine globale in situ* in cui viene analizzato l'intero edificio, si effettua la misura del comportamento strutturale al variare del tempo e dei parametri fisico-meccanici che rappresentano l'interazione tra l'ambiente e l'oggetto. La durata e la tipologia di monitoraggio devono essere definite sulla base delle informazioni che si intendono ottenere.

La tecnologia attuale ha permesso di sostituire alle misurazioni manuali, sistemi di acquisizione in automatico, anche remoto, che consentono una grande disponibilità di informazioni. [2]

In parallelo si stanno sviluppando "sistemi esperti" che possono valutare, sulla base di criteri inseriti nella procedura, la eventuale pericolosità di una situazione o il superamento di soglie di spostamento, assoluto o relativo, o di gradienti nel tempo.

Tra le indagini globali, le prove di *caratterizzazione dinamica* della struttura appaiono non

solo una promettente possibilità, ma uno strumento concreto e sperimentato, in grado di individuare (attraverso un processo di analisi inversa, chiamato “back analysis”) molte delle caratteristiche meccaniche dei materiali e della geometria (incluse le fessurazioni ed il loro progredire), mediante un confronto tra i risultati sperimentali e una modellazione numerica a parametri variabili.

2.1. I martinetti piatti

La caratterizzazione meccanica delle murature è un presupposto fondamentale per la valutazione della sicurezza di una struttura esistente ed i parametri ottenuti entrano come dati in tutti i modelli numerici, dal più semplice al più complesso, che il progettista intenda utilizzare per valutare gli attuali stati di sforzo e di deformazione presenti nell’edificio.

Negli anni sono state sviluppate differenti tipologie di prove diagnostiche.

Tra le varie prove in situ oggi disponibili, quella con i martinetti piatti (singoli o doppi) è particolarmente interessante perché consente di ottenere informazioni in situ, attendibili, sulle principali caratteristiche meccaniche di una struttura in termini di deformabilità, stato di sforzo e resistenza. La prova, proposta più di 30 anni fa è stata migliorata nel tempo con lo sviluppo di alcune varianti. [3]



Figura 1. Prove di martinetti piatti in un matroneo del Duomo di Cremona

Una prima variante consente di ridurre gli effetti legati all’anisotropia della muratura e alla presenza del confinamento laterale (ossia l’impedita deformabilità trasversale) per una corretta determinazione del modulo elastico verticale e del coefficiente di Poisson. Tale variante consiste nel praticare, accanto ai due tagli orizzontali, anche due tagli verticali, in modo da delimitare

un prisma quasi totalmente isolato dal contorno murario. Così facendo l’effetto del contenimento laterale risulta pressoché eliminato e quindi i risultati sono più facilmente interpretabili in quanto prossimi a quelli ottenibili da prove monodimensionali.

Va sottolineato, tuttavia, che questa modalità di prova danneggia maggiormente il paramento murario e pertanto non sempre viene consentita dagli organi di tutela (e neppure proposta dal professionista scrupoloso) quando si operi su edifici monumentali.

Un altro aspetto è legato alla dimensione geometrica degli elementi di mattone o pietra che costituiscono la muratura e che possono comportare problemi di “scala” nella prova. Infatti la dimensione dell’area investigata con la usuale tecnica del martinetto doppio è certamente adeguata per murature regolari costituite da filari di mattoni e malta (tipologia di muratura per la quale la prova è stata introdotta) ma nel caso di murature in pietrame di grossa pezzatura sarebbe opportuno lavorare su prismi di dimensioni maggiori. Con tali finalità è stata proposta una tecnica di indagine innovativa, attualmente oggetto di sperimentazione, che ha

trovato applicazione nella diagnostica della sede della Magnifica Comunità di Val di Fiemme e nello studio delle caratteristiche meccaniche delle murature di Laino Castello.

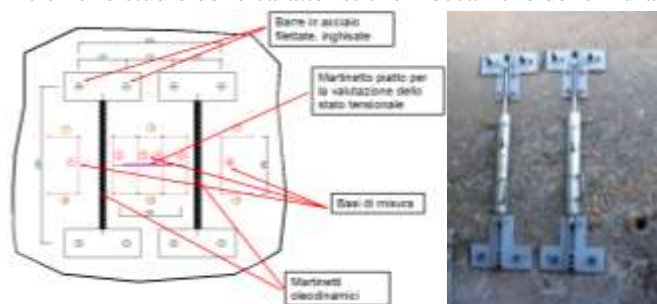


Figura 2. Prove in grande scala su muratura eterogenea con pistoni oleodinamici

La prova ha come obiettivo la valutazione del carico ultimo a rottura di una muratura eterogenea, oltre che del modulo di elasticità, su una porzione di muratura di dimensione significativa di circa 1mq. Si opera con l'adozione di 4 pistoni oleodinamici (2 da una parte e 2 dall'altra della parete), collegati mediante perni passanti.

Le basi estensimetriche installate al centro del prisma murario consentono la determinazione del diagramma sforzi -deformazioni, potendo anche disporre del valore delle tensioni verticali presenti nel "cuore" dell'area indagata, misurato attraverso un martinetto piatto appositamente alloggiato.

È stato di recente proposto [5] un interessante metodo ottico per la misurazione degli spostamenti dei punti di misura durante le prove con martinetto piatto. Il principio si basa sulla sovrapposizione, in tempo reale, di immagini fotografiche della superficie muraria, che, attraverso algoritmi di calcolo, consente di individuare i vettori degli spostamenti per ciascuno dei punti di misura. A differenza dei metodi tradizionali, capaci di acquisire solo misure locali di spostamenti relativi, questa tecnica consente di misurare in modo diffuso gli spostamenti assoluti in riferimento ad una configurazione iniziale. Si tratta di una informazione particolarmente utile in murature in pietra o irregolari in cui eventuali fenomeni di rotazione dei blocchi non verrebbero rilevati mediante semplici misure di spostamento relativo. La tecnologia ottica consente di acquisire una grande quantità di dati, in tempi brevi, e con un'elevata precisione, riducendo alcuni errori di misurazione insiti nelle tradizionali letture manuali. I punti di misura utilizzati, a differenza delle usuali basi metalliche, sono costituiti da semplici capisaldi in carta incollati sulla parte, che risultano rapidamente applicabili e soprattutto asportabili.

Il sistema è stato sperimentato con successo nel caso dei martinetti piatti doppi, mentre è ancora in fase di sviluppo l'applicazione alla prima fase di prova, quella con martinetti singoli. In questo caso, infatti, risulta difficile il ri-posizionamento dei punti di misura dopo il taglio (usualmente effettuato in presenza di abbondante acqua per il raffreddamento) e ne consegue la perdita del sistema di riferimento iniziale.

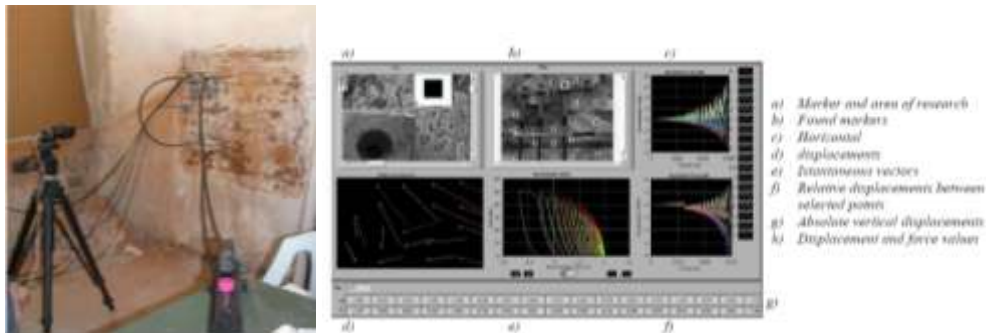


Figura 3. Sperimentazione del metodo ottico durante una prova con martinetti piatti

2.2. Le prove di pull-out sulle murature

Nel campo degli interventi di consolidamento strutturale di edifici storici sono sempre più frequenti gli inserimenti di elementi metallici (tiranti, catene, barre...) all'interno delle pareti in muratura, con lo scopo di incrementarne le caratteristiche di resistenza o di creare connessioni mutue, utili anche da un punto di vista sismico. Per questo, la sperimentazione di prove di estrazione sulle murature ha visto un crescente interesse e la proposta di soluzioni innovative.

Va sottolineato che l'inserimento nel mercato di prodotti a base di resine tixotropiche e bi-componenti ha facilitato le operazioni di inghisaggio, consentendo di modulare a piacere anche i tempi di presa e dunque di esecuzione. Tuttavia tali materiali non sempre risultano compatibili con la muratura esistente, e per questo malte da inghisaggio a base idraulica sono da preferirsi, soprattutto in edifici monumentali vincolati.

Sono state di recente condotte prove sperimentali [6] con lo scopo di valutare l'efficacia di un metodo di iniezione alternativo.



Figura 4. Prove di pull-out su murature condotte presso l'Università di Bergamo

L'elemento di rinforzo, costituito da una barra in acciaio, risulta avvolto da una speciale calza in tessuto che ha la funzione di contenere il materiale consolidante iniettato per solidarizzare l'elemento in acciaio al substrato. Tale calza in tessuto assume quindi un triplice ruolo: il primo ruolo è quello di confinare la miscela evitando inutili e non controllabili dispersioni di boiaccia all'interno del paramento murario; il secondo è quello di permettere

una efficace espansione della calza in quanto essa, risultando sufficientemente elastica, permette di conformarsi alle cavità circostanti di piccola e media entità garantendo un'efficace azione di ingranamento dell'ancoraggio; il terzo è quello di potersi imbibire di calce esercitando così un contributo non trascurabile alle risorse di resistenza per aderenza dell'ancoraggio stesso.

Obiettivo delle prove è la misura dello spostamento dell'estremità di ogni tirafondo in funzione del carico di prova fino allo sfilamento incipiente. I numerosi test eseguiti hanno portato alla creazione di uno standard per l'esecuzione di prove di estrazione per ancoraggi innestati, caratterizzato dalla definizione di alcuni parametri ritenuti significativi per la definizione del problema, quali le sollecitazioni di taglio all'interfaccia barra-malta e quelle all'interfaccia bulbo-substrato.



Un interessante sviluppo delle prove di pull-out sulle murature prevede l'utilizzo di barre inghisate sia singole che doppie, che vengono inserite nella muratura con una inclinazione di 20° . Una campagna di prove è stata condotta dallo scrivente presso l'Ex Convento di San Cristoforo a Lodi ed ha fornito risultati interessanti.

Figura 5. Prove di pull-out sulle murature presso l'Ex Convento di san Cristoforo a Lodi

2.3. Le prove penetrometriche sulle murature

Le prove meccaniche indirette in situ rappresentano uno strumento di indagine di enorme valore. Tanto più diffuse e tanto meno invasive esse siano, tanto meglio aiutano a caratterizzare e a distinguere le varie zone, all'interno delle quali, successivamente, verranno effettuate prove dirette, più complete anche se più invasive.

Derivate dalle indagini geotecniche sui suoli, da quelle sclerometriche sul calcestruzzo e dalle prove in situ sul legno con trapani strumentati si stanno sviluppando apparecchiature analoghe anche per le murature, utili soprattutto per la caratterizzazione delle malte [7].

E' in corso una approfondita campagna di analisi sperimentali in situ, presso il Politecnico di Milano, accompagnata dal prelievo di campioni di muratura da vari edifici, da sottoporre a prove in laboratorio.

2.4. Il telerilevamento satellitare

Da alcuni decenni il telerilevamento satellitare è diventato una delle principali tecniche di rilievo utilizzate in topografia, soprattutto per capacità di rilevare abbondanti porzioni di territorio in modo semiautomatico, con buona precisione e costi unitari contenuti. Grazie a queste insolite e favorevoli caratteristiche, una speciale applicazione del telerilevamento, ossia l'interferometria satellitare, viene utilizzata da oltre 15 anni in affiancamento alle tradizionali tecniche di rilievo nel controllo dei cedimenti del terreno e dei danni degli edifici,

su varie scale di territorio.

Una particolare applicazione di rilevamento satellitare interferometrico, sviluppata prima con la tecnica PSInSAR e ora con SqueeSAR [8] consente di monitorare il territorio urbano andando a percepire le variazioni di quota dei punti di rilievo, con cadenza regolare e costante di alcuni giorni, in modo automatico e con una precisione altissima, dell'ordine dei 3 mm. Uno dei vantaggi di tale tecnica è che si possono reperire le immagini radar di rilievo, a cadenza regolare del territorio, a partire dagli anni '90, avendo così a disposizione, per gran parte dei centri urbani, le serie storiche che delineano gli spostamenti del suolo (subsidenza o cedimenti locali o globali) con la possibilità di cogliere anomalie anche per porzioni piuttosto piccole, dell'ordine di grandezza di 50 mq, come le falde di un tetto.

La flessibilità e le molteplici caratteristiche di questa tecnica interferometrica ne fanno un importante strumento a disposizione dei professionisti della diagnostica strutturale, soprattutto quando si debbano ricostruire, ex-post, eventi occorsi nel recente passato, come spesso si verifica nelle attività tipiche dell'ingegneria forense.

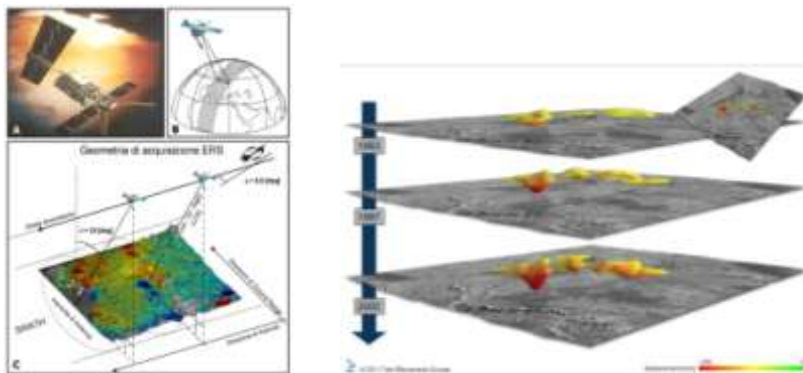


Figura 6. Il rilevamento satellitare interferometrico

Accanto a quanto descritto, le prove diagnostiche degli ultimi anni propongono strumenti di misura più sensibili, monitor con maggiori risoluzioni, trasmissione più rapida delle informazioni, modalità di perturbazione delle pareti e del suolo basate su nuovi principi fisici.

Sempre più sovente, e con costi ragionevoli, il professionista ed il ricercatore possono giovare dell'uso di termografie da campo, con apparecchiature dell'ingombro e del peso di una macchina fotografica, di tomografie di precisione per l'individuazione delle diverse densità dei materiali interni, di laser-scanner per il rilievo tridimensionale, di georadar capaci di indagare profondità notevoli, di endoscopi rigidi o flessibili e dei sempre più numerosi apparecchi dove l'uso raffinato della elettronica e della interpretazione delle immagini aiutano ad una osservazione "da dentro" dei materiali e delle geometrie, completa e rapida. Naturalmente la diagnostica non è fine a sé stessa e il suo significato sta nel migliorare la conoscenza del manufatto per aiutare a prendere decisioni. Un atteggiamento esattamente analogo a quello del medico. Esamineremo pertanto alcune tecniche di consolidamento, frutto di decisioni consapevoli, che si sono sviluppate in questi ultimi anni, esaminando i temi delle fondazioni, delle pareti murarie, degli archi e delle volte, degli orizzontamenti e delle coperture in legno.

3. ALCUNI CRITERI GENERALI NEL CONSOLIDAMENTO DEI MONUMENTI

Tra i criteri fondamentali cui attenersi nel consolidamento strutturale degli edifici storici, la necessità va messa al primo posto. Seguono la non nocività (“*primum non nocere*”), l’efficacia, la durabilità, la compatibilità, la reversibilità e naturalmente l’eleganza, la sensibilità e il buon gusto.

Sui primi temi il consenso è unanime, ma riguardo al tema della reversibilità coesistono atteggiamenti diversi. Si va dalle richieste aprioristiche dell’organo di tutela, alla accettazione rassegnata di una impossibilità teorica, al tentativo di mediare per avvicinarsi all’obiettivo. Va detto che, a parere dello scrivente, la piena reversibilità non esiste, ma che essa rappresenta una “*utopia utile*” [9], capace di portare a scelte responsabili, inducendo a ragionare sulla *qualità* dell’intervento di consolidamento e non soltanto sui suoi parametri quantitativi. La reversibilità può fornire lo stimolo ed il *principio ispiratore* per una progettazione creativa, capace di novità, legata in modo mirato al singolo oggetto di cui ci si occupa.

Occorrono pertanto interventi responsabili, capaci di tutelare le possibilità future del bene, tenuto conto dei margini di incertezza insiti in ogni scelta, e quindi capaci di essere modificati e migliorati in corso d’opera.

Nella scelta dell’intervento va posta attenzione anche al tipo di “contatto” tra materiali antichi e nuovi, soprattutto quando il contatto è di tipo diffuso (come nelle iniezioni murarie) oppure quando l’inserimento della struttura nuova necessita di “spazi” ottenuti da demolizioni dell’antica, oppure ancora quando le eventuali rimozioni del nuovo danneggerebbero anche l’antico.

Se, invece, il consolidamento viene ottenuto con un “accostamento” puntuale ed attivo tra strutture antiche e strutture nuove, ecco che il risultato del *rispetto per l’esistente* può essere raggiunto.

In quest’ottica “*aggiungere, integrare, appoggiare, legare, cerchiare, tirare, spingere*”, possono essere azioni reversibili. “*Sostituire, iniettare, incollare, demolire*”, sono certamente irreversibili.

Se ne deduce (lo affermiamo in modo provocatorio) che solo il puntone e il tirante rappresentano il vero paradigma dell’intervento strutturale leggero e reversibile.

Semplicemente accostati e quindi rimovibili, paralleli e separati, esterni e riconoscibili, nuovi ma così essenziale da essere anche antichi, il *puntone* ed il *tirante* racchiudono la forma ed assieme la sostanza del loro modo di funzionare, in grado di coniugare la minima invasività con il massimo dell’efficacia e della durata, così da coadiuvare, senza esautorarla, la struttura originaria.

Tirante e puntone sono soluzioni semplici ed essenziali, che devono rappresentare una agiunta dichiarata e non mimetica. Il nuovo deve essere *a vista* ma non deve prevaricare l’antico, deve lasciare leggibili le presistenze con cui si confronta e si integra, senza contrapporsi. Insomma, deve essere visibile ma non ostentato.

Altro criterio è quello di favorire il mutuo collegamento tra le parti, nel tentativo di dare luogo a “scatole strutturali” dove le parti più deboli possano appoggiarsi alle più forti, mediante vincoli in grado di creare collegamenti efficaci, duttili, duraturi, nell’ottica dell’analisi limite. A questo concetto di scatolarità si rifanno tutti gli interventi di collegamento tra le pareti (mediante tiranti interni o esterni), oppure i collegamenti tra fondazioni, pareti, solai e coperture, che nei paragrafi seguenti verranno descritti,

3.1. Archi, volte e cupole

Sul tema di archi e volte in muratura è maturato, a partire dalla seconda metà del XX secolo, un sensibile e crescente interesse da parte della comunità scientifica internazionale. La ricerca sul comportamento statico di tali strutture coinvolge ingegneri e architetti nonché storici della meccanica applicata all'architettura che si trovano oggi a condividere un campo d'indagine rimasto per lungo tempo lontano dagli specifici interessi disciplinari. Tale interesse nasce, naturalmente, dalla rinnovata e particolare attenzione per la conservazione del patrimonio edilizio storico, un evento di grande importanza sia culturale che economica. Un arco è, per definizione, un elemento lineare curvo che collega due punti e che è in grado di sopportare prevalentemente carichi assiali, sebbene contemporaneamente sia chiamato a far fronte ad azioni flessionali, talora impreviste. Volte e cupole altro non sono che lo sviluppo nello spazio tridimensionale dell'arco.

Nelle patologie di origine meccanica che più frequentemente si manifestano sugli archi e sulle volte è ricorrente imbattersi in lesioni concentrate in pochi punti, assimilabili a "cerniere" strutturali, che, quando superano il numero di tre, generano un meccanismo di collasso.

L'arco, in origine tre volte iperstatico, si trasforma in un cinematismo ad un grado di libertà, con conseguente crollo. Si tratta pertanto di impedire la formazione di tali meccanismi di collasso che, come dimostrato sia dal punto di vista teorico che sperimentale, si manifestano con la presenza di cerniere che si aprono in modo alternato, all'intradosso e all'estradosso.

Diverse tipologie di intervento sono state proposte e messe in pratica su archi e volte in muratura. Il contenimento delle spinte orizzontali all'imposta, l'impedimento della formazione di meccanismi di collasso, e l'incremento del carico di collasso costituiscono il minimo comune denominatore tra tutti gli interventi.

L'aggiunta di catene intradossali, ossia posizionate in corrispondenza del piano d'imposta della volta, o estradossali, ossia applicate orizzontalmente al di sopra della volta (come le cosiddette *catene a braga*), rappresentano soluzioni diffusamente adottate in passato per contrastare le spinte orizzontali sui piedritti. Oggi l'aggiunta di una nuova catena in aiuto alle strutture spingenti, quale sono gli archi, può talora comportare problemi di accettabilità, almeno dal punto di vista formale o estetico.

Per questo, negli ultimi anni sono state messe a punto tecniche differenti, ma egualmente efficaci, agendo su geometria, materiali e carichi, ciascuna con vantaggi e svantaggi.



Figura 7. a) Il “gazebo strutturale” nella cripta del Sacromonte di Varese (modello Giglio -2011);
b) Galleria laterale dell’”Antica Parrocchiale” del Castello della Manta

La modifica della geometria dell’arco può essere per esempio ottenuta intervenendo dall’intradosso con l’aggiunta di un “sottarco” collaborante oppure intervenendo “da sopra” con una modifica dei rinfianchi (dove il materiale sciolto viene sostituito da materiale coeso), oppure con l’introduzione di nuovi elementi irrigidenti estradosali, tipo “frenelli”, nervature o cappa collaborante in c.a.. La necessità di mettere a nudo l’estradosso dell’arco o della volta rende complessa e costosa l’operazione e l’introduzione di masse aggiuntive può provocare inconvenienti alle strutture verticali o alle fondazioni e non giova di certo alla struttura in caso di sisma. Oltre alla irreversibilità dell’intervento, la mancata traspirabilità della muratura e il percolamento di acqua, nel caso si adottino le cosiddette “cappe in c.a.”, è tra le cause di maggiore danno per gli affreschi.

In alternativa è stato troppo spesso proposto di creare un solaio indipendente, all’estradosso, con eventuale svuotamento o modifica dei rinfianchi, in grado di assorbire la totalità dei carichi accidentali, lasciando alla volta soltanto una funzione formale ed il compito di resistere al proprio peso, perdendo quindi la sua ragion d’essere. Questa rappresenta ovviamente una violazione della autenticità strutturale del manufatto, ridotto a pura immagine di se stesso.

Tra le soluzioni proposte, sono interessanti i tentativi di trasformare l’arco, composto da conci separati, in una struttura capace di lavorare anche a trazione. Materiali innovativi, come le fasce in FRP incollate all’estradosso oppure all’intradosso dell’arco, rappresentano una soluzione. Si tratta tuttavia di interventi di tipo passivo, seppur rapido da eseguire e con indubbi vantaggi strutturali. E’ possibile naturalmente circoscrivere il rinforzo a zone di estensione limitata, scegliendo solo quelle maggiormente sollecitate. Non è garantita la reversibilità e la traspirabilità soprattutto quando si utilizzino aggrappi a base di resina, tra le fasce e la muratura. I costi delle materie prime e dell’applicazione non sono contenuti e va tenuto presente il fattore estetico ed il rischio derivante da incendio, specie nel caso di interventi di fasciatura all’intradosso.

Recentemente sono apparsi sul mercato alcune nuove proposte, in cui la membrana “a rete”

in FRP viene fissata al supporto mediante malte a base idraulica, che hanno un buona parte risolto il problema della traspirabilità e dell'incendio [10].

Ampiamente adottate e sperimentate, sono state proposte due ulteriori tecniche di consolidamento di volte in muratura.



Figura 8. Il metodo delle “graffette” per il consolidamento di volte in muratura

La prima è la cosiddetta tecnica della “graffetta” [11], che consiste nell’impiego di elementi diagonali tesi, fissati alla muratura in prossimità delle imposte dell’arco e sostenuti, in alto, da una rigida trave metallica posta al di sopra alla volta. Tale sistema costituisce un presidio semplice ed efficace in grado di contrastare la spinta laterale delle volte senza la necessità di introdurre la classica catena intradossale.

La seconda è la tecnica dell’”Arco Armato” [12] che prevede l’uso di cavi post-tesati, posti all’estradosso o all’intradosso dell’arco, i quali inducono un benefico stato di coazione nel sistema, incrementando il carico di compressione trasmesso tra concio e concio dell’arco e contemporaneamente spostandone la risultante globale verso l’asse baricentrico.

L’obiettivo principale di questo intervento di consolidamento è quello di ottenere la massima corrispondenza tra forma d’asse dell’arco, ossia la sua forma geometrica, e la curva delle pressioni, o per lo meno di ridurne la eccentricità a valori minimi e comunque contenuti nello spessore strutturale. Al posto di modificare la geometria per adeguarla ai carichi, si modificano i carichi per renderli adeguati alla geometria esistente, nel rispetto della autenticità geometrica e materica della struttura originaria.

Il sistema ha il vantaggio di essere rimovibile e ripesabile; un sistema attivo, efficiente, poco invasivo e praticamente privo di masse aggiunte, con notevoli vantaggi in termini di resistenza ai carichi orizzontali, capace di condurre la struttura verso un miglioramento o addirittura un adeguamento sismico. Inoltre il sistema risulta versatile ed adattabile a diverse geometrie di archi e volte.

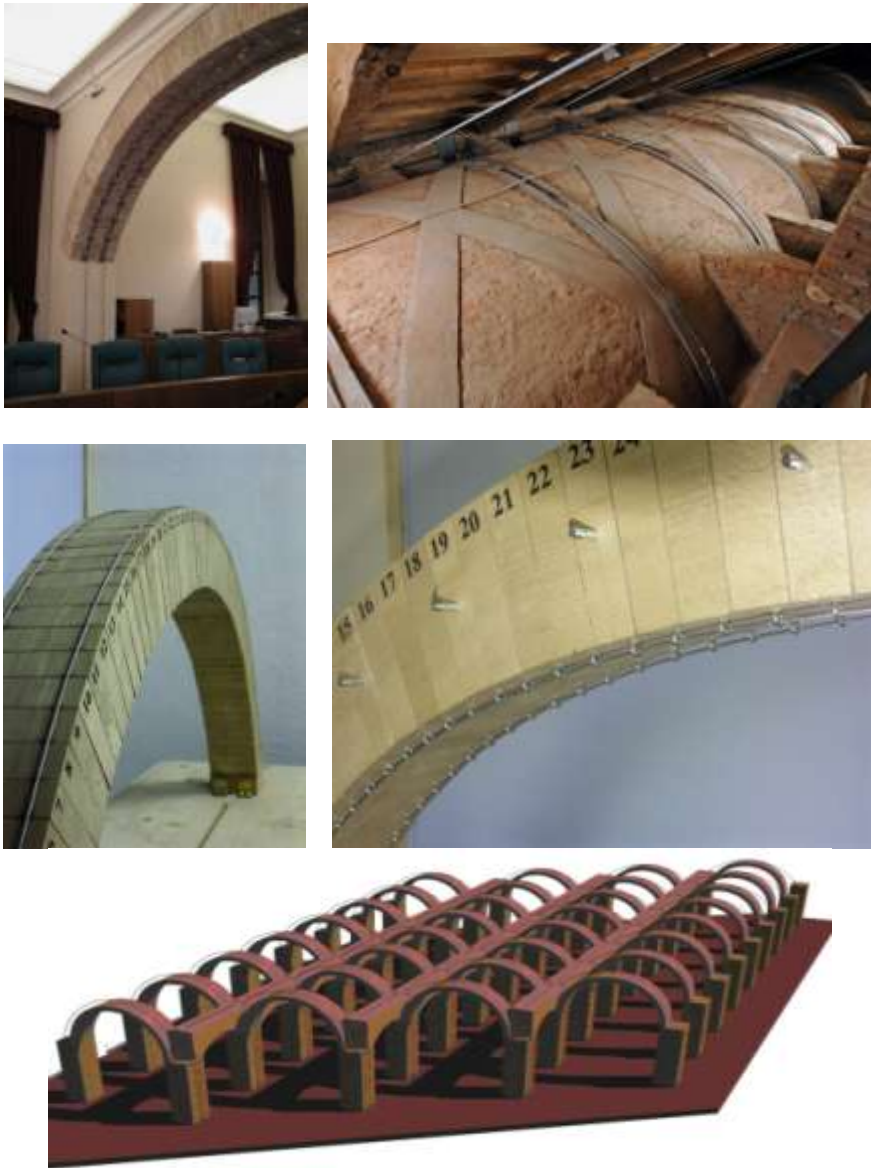


Figura 9. La tecnica dell'”arco armato”- interventi all’estradosso ed all’intradosso

Una interessante estensione del metodo dell’arco armato prevede il prolungamento della fune fino ai piedritti e l’inserimento di un puntone telescopico ubicato alla quota delle imposte. Il sistema di tiranti “ad angolo”, sollecitati verso l’esterno dal puntello telescopico, esercita un’azione di contenimento, ossia verso l’interno, all’imposta della volta, applicata senza l’aggiunta di alcuna catena nella navata. [13]

Le strutture di contrasto restano a vista nelle zone di matronei ma non sono visibili dall'interno della chiesa, secondo il principio a cui credo sia utile attenersi, nel rispetto del costruito, ossia che “le nuove strutture aggiunte debbano essere visibili solo per chi voglia vederle”.



Figura 10. Duomo di Cremona: variante della tecnica dell'“arco armato”, in grado di applicare forze orizzontali all'imposta degli archi.

3.2. Le pareti in muratura

Il consolidamento di elementi murari verticali in edifici in muratura soggetti a carichi orizzontali e verticali costituisce uno degli interventi fondamentali per il raggiungimento di un adeguato livello di sicurezza. Troppo spesso la scarsa qualità nelle caratteristiche meccaniche delle murature, il degrado del mattone o l'assenza di malta con buona consistenza hanno provocato crolli e gravi lesioni ad edifici sollecitati da sisma. Troppo spesso un inadeguato ammorsamento tra i maschi murari, e tra le pareti e gli orizzontamenti hanno portato a crolli locali o globali. Se presenti ed efficaci, tali ammorsamenti, possono consentire una adeguata risposta alle sollecitazioni dinamiche, evitando ogni collasso attraverso la creazione di un comportamento di tipo “scatolare”. L'effetto si traduce in una riduzione della vulnerabilità sismica dell'intero corpo di fabbrica.

Esistono diverse tecniche d'intervento possibili per il consolidamento di edifici in muratura, in grado di restituire monoliticità alle strutture, alcune più tradizionali (operazioni di “scuci e cucì” della muratura oppure operazioni di “cucitura armata” delle lesioni o iniezioni consolidanti) altre più innovative.

Un possibile approccio, sulla base del principio dell'*aggiunta* e dell'*intervento attivo* prevede l'accostamento di una nuova struttura a quella esistente. Ne sono esempi emblematici la torre metallica, interna e attiva, realizzata nella Torre San Dalmazio di Pavi, o gli interventi di “strallatura” realizzati a Forte Fuentes o al Castello di Trezzo sull'Adda.



Figura 11. Una parete del Castello di Trezzo sull'Adda consolidata con stralli diagonali ed una parete di Forte Fuentes a Colico consolidata con barre verticali e stralli

Sempre più diffuso è anche l'utilizzo di barre in acciaio post-tesate o di profili metallici che, posti trasversalmente alla muratura, inducono un benefico effetto di confinamento laterale, agendo come "diatoni attivi".

Il collegamento mutuo dei grandi blocchi in tufo mediante sottili barre disposte "a piramide", nelle murature a tre strati (tipiche ad esempio della architettura armena, dove lo strato interno è debole e decoeso) sta fornendo sviluppi interessanti nella resistenza sismica globale del monumento, evitando l'instaurarsi di crolli locali, con espulsione dei blocchi superficiali.

Va sottolineato anche il contributo fornito dagli orizzontamenti rigidi, ossia dai solai e dalle coperture, quando siano ben connessi alle murature perimetrali. Essi rappresentano dei veri e propri diaframmi i quali, a diversi livelli, restituiscono un buon comportamento scatolare. Riguardo alle perforazioni lunghe nelle murature, per l'inserimento di tiranti, accanto alle tradizionali scelte di attrezzature "a secco" oppure di attrezzature "raffreddate ad acqua", si sono sviluppate recentemente tecniche in cui l'acqua viene portata alla punta ma immediatamente aspirata da una canna in depressione, interna al tubo di carotaggio, assieme alle

scorie di muratura.

Va citata naturalmente una tecnica antica che costantemente si rinnova: quella delle iniezioni diffuse nella muratura. Sono state abbandonate per fortuna le iniezioni cementizie, spesso eseguite ad alta pressione, il cui risultato era spesso di divaricare ulteriormente i blocchi tra loro e di creare situazioni di incompatibilità con le malte di calce e fuoriuscita di sali. Si è passati a tecniche di iniezione a pressione controllata, con controllo costante delle quantità iniettate, e con l'uso di miscele compatibili, inorganiche, chimicamente testate prima della posa. Non è opportuno di inserire miscele di grande resistenza e rigidità ma, al contrario, miscele di caratteristiche meccaniche poco discoste da quelle in situ, che però siano in grado di penetrare in profondità e siano ricche di legante. Le miscele di resine organiche (ad esempio quelle epossidiche) vengono applicate in ambiti più limitati, sia per ragioni di durabilità che per ragioni di costo.

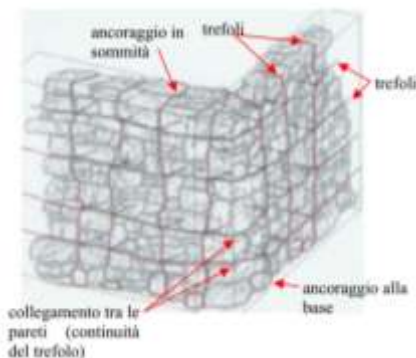


Figura 12. La tecnica del “reticolatus” per il confinamento di superficie mediante trefoli

Per il rinforzo diffuso delle murature, accanto alle usuali iniezioni “interne”, è stata di recente proposta [16] una tecnica “esterna” che opera sulla superficie della parete, nei giunti di malta di entrambe le facce della muratura. Una volta scarniti i giunti, in questi viene inserita una maglia intrecciata e interconnessa realizzata con sottili trefoli in acciaio o in fibra, inglobati nella muratura senza intaccare gli elementi di pietra, che vengono tra loro collegati mutuamente. Tale tecnica di rinforzo, denominata “Reticolatus”, può essere applicata sia a murature regolari (mattoni di laterizio o blocchi lavorati) sia a murature irregolari (elementi lapidei naturali di varia forma e dimensione). L'intervento ha portato a incrementi significativi delle resistenze e delle rigidità a compressione e a taglio.

Molto diffuso, forse anche troppo, l'uso di intonaci armati, con l'applicazione di maglie esterne in FRP di vario materiale (dal carbonio, al vetro, al basalto) collegate alla muratura. Quando le maglie siano due (interna ed esterna) e quando vengano ben collegate tra loro con connettori trasversali, l'effetto statico è rilevante. Resta l'obiezione che la maglia interna non è sempre facile da rendere continua, (considerata la presenza delle pareti trasversali e degli orizzontamenti) e la obiezione, altrettanto importante, che l'aspetto superficiale della parete viene totalmente nascosto e quindi negato.



Figura 13. L'uso di FRP nel consolidamento di elementi lignei e in muratura

Un tema interessante riguarda la cerchiatura delle colonne in muratura, spesso chiamate a sopportare carichi più elevati oppure a offrire maggiori prestazioni sotto carichi orizzontali. La cerchiatura non è altro che l'applicazione di una legatura intorno ad un oggetto con l'obiettivo di limitarne o impedirne le deformazioni laterali e l'innescare della rottura. Ne sono un esempio antico le doghe in legno delle botti tenute assieme da cerchi in ferro. Nel campo delle costruzioni, l'applicazione di cerchiature è utilizzata sia per confinare singoli elementi strutturali sia interi edifici o parti di essi.

Le tradizionali (e visivamente invasive) cerchiature con fasce in acciaio si possono ritenere interventi solo moderatamente attivi (oggi realizzati con bullonature e, più anticamente, con cunei, previo riscaldamento del cerchio). Le chiusure adottate (cerniere, forchette o bullonature) sono necessarie ai fini operativi di posa e garantiscono la buona aderenza con l'oggetto esistente, ma risultano di forte impatto visivo e alterano la lettura dell'elemento originario.



Figura 14. Cerchiatura esterna con bandelle in acciaio inox di una colonna in muratura e confinamento di una parete in muratura (metodo CAM)

Una soluzione alternativa fa uso di bandelle in acciaio di limitato spessore, post-tesate, adottabili in presenza di intonaco superficiale, ma non adatte per muratura "faccia a vista".

Un metodo innovativo di cerchiatura di colonne murarie con l'uso di cavi inox di piccolo spessore, post-tesati, inseriti nei giunti di malta, è stato recentemente sottoposto a verifica sperimentale con buoni risultati [18].

Si tratta di un sistema attivo, poco invasivo, che porta a notevoli incrementi sia del carico verticale a rottura che della duttilità.



Figura 15. Cerchiatura di colonne in muratura con cavi inseriti nei giunti

3.3. Le coperture ed i solai in legno

La tecnica di rinforzo e irrigidimento delle strutture lignee a capriata mediante controventi mutui è un intervento che interessa la scala globale non solo della copertura, ma dell'intero edificio.

Nella versione più classica il controventamento delle coperture prevede la disposizione di diagonali in metallo (costituite da barre, cavi o bandelle disposte a croce di Sant'Andrea) ad integrazione dei campi quadrangolari formati da travi ed arcarecci. In alternativa, elementi diagonali possono svilupparsi secondo il piano di imposta delle coperture.

Il controventamento delle coperture può anche interessare singole unità strutturali, ma molto più spesso l'intervento coinvolge l'intera orditura, "impacchettandola".

Una proposta alternativa di consolidamento delle coperture lignee, nella logica degli interventi cosiddetti "compatibili", prevede l'inserimento di un doppio assito ligneo incrociato e avvitato alla sottostante orditura, anch'essa lignea. La falda si comporta come un diaframma rigido nel proprio piano, e le capriate, le terzere e gli arcarecci, inizialmente indipendenti, risultano mutuamente collegati. L'insieme dà luogo ad una grande struttura reticolare a due falde, capace di resistere anche alle azioni orizzontali.

Una estensione di questa soluzione prevede l'aggiunta di bandelle in acciaio (inox o zinco) di spessore ridotto, disposte a croce e chiodate all'assito ligneo.

Viene anche in questo caso introdotto un benefico contributo di "scatolarità" dell'intero corpo di fabbrica, con l'utilizzo di un "coperchio" rigido, capace di resistere alle azioni sismiche.



Figura 16. Consolidamento delle coperture del Duomo di Cremona con la creazione di diaframmi rigidi di falda

L'affiancamento delle capriate con puntelli lignei e cavi metallici post-tesati rappresenta una possibilità di intervento leggero e talora elegante, che dà luogo ad una soluzione mista legno-acciaio. [19]

Tale tipologia di intervento è stata recentemente applicata, con una modalità tridimensionale, ad una copertura quadrata a quattro falde, soggetta a carichi notevolissimi, mantenendo a vista le eleganti strutture. [20]

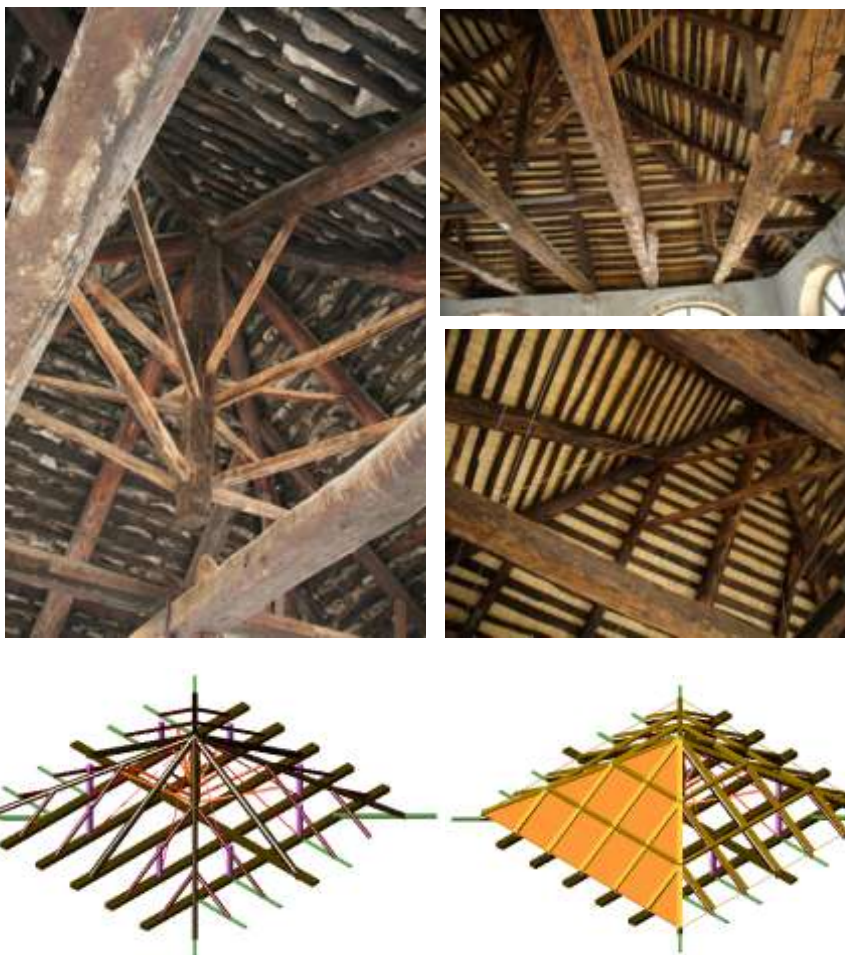


Figura 17. Consolidamento di tetto a quattro falde mediante puntoni e tiranti – Torre del Castello di Domodossola

Riguardo ai solai in legno, la ormai classica soluzione della cappa in c.a., collegata ai travevetti sottostanti mediante connettori metallici di varie fogge e tipi, risulta ampiamente utilizzata. Va ancora enfatizzata la necessità di collegare la cappa con le murature, meglio se adottando barre metalliche inghisate, con andamento inclinato, così da opporre anche un ritegno meccanico allo sfilamento, oltre a quello chimico. Sono state proposte soluzioni con materiale alleggerito, di buona efficacia, e altre soluzioni in cui lo spessore della cappa si può ridurre a meno di 4 cm, favorendo così il mantenimento delle quote originali, ed, allo stesso tempo, permettendo l’inserimento degli impianti sotto al pavimento.

Le tecniche che prevedono l’uso di “legno su legno” presentano qualche difficoltà realizzativa e di collegamento coi muri d’ambito, ma certamente sono una strada da percorrere ulteriormente.

Più complesso si presenta il tema del collegamento tra la cappa superiore (in qualunque materiale essa sia) e le travi principali, dovendo superare lo spazio vuoto, solo parzialmente occupato dai travetti.

L'uso di barre diagonali, alternativamente tese e compresse, che collegano la cappa e la trave, rappresenta una soluzione valida, ossia una sorta di trave reticolare, ormai testata con successo durante numerose prove di carico.

Di tradizione ottocentesca, ma rivisitati in chiave moderna, sono gli interventi in cui si interviene da sotto, invece che da sopra, con la aggiunta di cavi sagomati posti all'intradosso, opportunamente "forzati" mediante puntelli contro le travi da rinforzare.

3.4. Le fondazioni

Tra le cause più frequenti di dissesto strutturale sono quelle indotte da cedimenti del terreno o dall'interazione tra la struttura e il piano di appoggio.

E' noto che la portata del terreno dipende essenzialmente da tre fattori, ossia la tipologia di suolo, la profondità delle fondazioni, la superficie di contatto struttura-terreno. Gli interventi di consolidamento possono essere rivolti a migliorare uno o più di questi aspetti, valutando caso per caso le cause che hanno provocato il dissesto, il contesto, la tipologia della struttura su cui si deve intervenire.

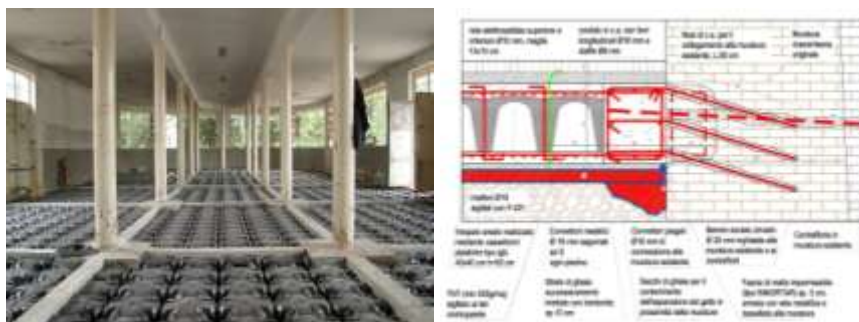


Figura 18. Vespai armati nell'ex Colonia Elioterapica del Polaresco (BG)

Una tecnica recentemente sviluppata è il cosiddetto "vespajo armato" [23].

Essa consente di allargare notevolmente la superficie di appoggio e di rendere collaboranti tra loro le fondazioni perimetrali di ogni singolo vano inserendo una piastra resistente e rigida, ma molto leggera, alla base dell'edificio. Tale piastra viene ottenuta mediante due solette in c.a., superiore ed inferiore, collegate con connettori metallici in corrispondenza dei piedini dei casseri a perdere in pvc, tra esse inseriti.

Il vantaggio, oltre che nella ripartizione dei carichi verticali, risiede nel poter collegare tra loro in modo continuo le fondazioni in muratura, garantendo anche a questo livello un comportamento scatolare, che si oppone ai carichi orizzontali.

L'uso di micropali di varia tecnologia realizzativa deve fare i conti con la difficoltà di collegarne la testa alle murature di fondazione, spesso di limitata profondità. Soluzioni recenti prevedono l'uso di micropali inclinati, realizzati con attrezzature di ridotte dimensioni, in modo da costituire una sorta di "culla" con le gambe inclinate, capace di accogliere la muratura, in semplice appoggio.



Si stanno adottando anche soluzioni di consolidamento attivo, che prevedono l'inserimento di micropali attivi, ossia messi in contrasto rispetto alle fondazioni mediante pistoni, oppure l'uso di resine espansive diffuse, iniettate nel terreno sotto alle fondazioni. [24]

Lo scopo, del tutto condivisibile, è di far lavorare le nuove strutture ausiliarie fin dall'istante della loro posa in opera, senza attendere che ulteriori cedimenti le mettano in carico.

Figura 19. Consolidamento attivo mediante l'iniezione di resine espansive

4. LE OPERE PROVVISORIALI

Non possiamo concludere senza accennare all'importante aspetto nel mondo del consolidamento strutturale che riguarda le opere provvisorie di sostegno, ossia tutti quegli interventi previsti per la messa in sicurezza tempestiva e il rinforzo di un organismo, al fine di evitare il cedimento dell'intera struttura o di sue singole parti.

Tali interventi sono generalmente temporanei e rimovibili perché predisposti in attesa di demolizioni o consolidamenti, soprattutto in fase di emergenza post-sisma; devono quindi arrestare il fenomeno di dissesto senza alterare lo stato presente.



Figura 20. Opera di messa in sicurezza mediante fasce in poliestere della Ghiacciaia di Villa Arconati a Bollate (Jurina 2011) e di una chiesa a L'Aquila



Figura 21. Opera di messa in sicurezza mediante fasce in poliestere presso la Torre dei Masserano a Biella (Jurina 2012)

Negli ultimi anni si è potuto assistere ad un uso massiccio delle fasce in poliestere, o materiali simili, le quali sono dotate di un dispositivo semplice ed efficiente per il serraggio e la messa in tensione, che in gergo viene chiamato “cricchetto”. La cerchiatura o il mutuo collegamento tra elementi pericolanti viene così realizzato in modo veloce ed attivo, con una evidente possibilità di ritrattare l'intervento, aumentando la tesatura, e la possibilità di rimuoverlo, quando venga posto in opera l'intervento definitivo.

È bene ricordare che la realizzazione di un intervento provvisorio necessita, al pari degli interventi di consolidamento definitivi, di un progetto e di un piano adeguatamente studiati. Infatti, la scelta della più idonea tipologia d'intervento non può esaurirsi facendo riferimento agli usuali interventi in campo statico, senza una adeguata considerazione dei possibili fenomeni dinamici legati all'evoluzione della serie sismica in atto. Scelte ancorate al mondo della statica possono portare a interventi di scarsa efficacia o addirittura tali da incrementare la vulnerabilità sismica. Si pensi per esempio a un puntellamento tra due edifici prospicienti in cui il contrasto su una delle due pareti è inesistente; oppure l'assenza di vincoli bilateri necessari ad evitare, in caso di sisma, la perdita di appoggio del puntello o una sua azione di martellamento su uno dei due muri. Va notato che in molte realizzazioni anche la snellezza dei puntelli e il sistema di controventamento appaiono spesso inadeguati.

In definitiva, anche in questo caso, la valutazione del potenziale meccanismo di collasso e la conoscenza del funzionamento del presidio temporaneo sono i presupposti per un intervento adeguato.

Puntelli e centine che lavorano a compressione, tiranti che resistono a trazione, speroni, cerchiature e controventi costituiscono i principali sistemi di messa in sicurezza. Gli stessi criteri validi per un intervento di consolidamento devono trovare applicazione anche in un intervento provvisorio. In questo senso la messa in sicurezza dell'opera deve risultare rispettosa dell'esistente, poco invasiva ed, insieme, veramente e *completamente reversibile*, proprio in vista della sua temporaneità. L'intervento deve tuttavia essere anche durevole perchè talvolta la sua funzione si prolunga ben più di quanto sarebbe auspicabile....

5 - CONCLUSIONI

Ci pare utile affermare, a conclusione di questa sintetica panoramica, che non è certo la disponibilità di nuovi materiali ad aver modificato, in questi ultimi 20 anni, le modalità di intervento nell'affascinante mondo del consolidamento degli edifici storici. Si tratta piuttosto del fatto che, anche nei professionisti e nei committenti, e non solo in chi si occupa della storia oppure della teoria del restauro, si sta sviluppando una maggiore consapevolezza delle proprie responsabilità nei confronti del patrimonio monumentale e questo porta a scelte innovative ma, contemporaneamente, prudenti, appoggiate sulla chiara consapevolezza che l'opera è un "unicum" da non danneggiare e da conservare nella sua autenticità e nella sua verità, anche strutturale. Sta prendendo piede anche il concetto che sono necessarie soluzioni non ripetitive e generiche ma *mirate* al caso specifico.

Da ultimo si sperimenta, con sollievo, una nuova consapevolezza da parte del committente sul fatto che al progettista vadano fornite adeguate informazioni diagnostiche, in una fase preliminare rispetto al progetto. Il committente, sia pubblico che privato, comincia a rendersi conto che la diagnostica è un risparmio, oltre che un dovere. ...e naturalmente le NTC 2008 hanno dato un grande contributo in questa direzione.

Resta ancora un punto dolente, tuttavia, su cui l'intero sistema deve impegnarsi a lavorare, vale a dire la mancanza di sinergia che, sovente, si sperimenta tra le parti in causa, ossia l'architetto, lo strutturista, l'impiantista, il committente e l'impresa, per non parlare degli organi di verifica e di tutela. Occorre il coraggio di creare, fin da subito, tavoli di lavoro comune dove si condividano problemi, limiti e obiettivi con lo scopo di operare al meglio, con il massimo del rispetto e guidati dal concetto di necessità, su quegli oggetti unici che la sorte, o la provvidenza, ci hanno affidato.

Ringraziamenti

Desidero ringraziare i miei collaboratori, Andrea Bassoli, Valentina Mogicato, Alice Filaretti, Daniele Rampoldi e, in particolare Edoardo Radaelli, per l'aiuto prestato alla stesura di questo articolo.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Binda L., Saisi A., Tiraboschi C., *Utilizzo delle indagini soniche per la diagnosi di strutture murarie danneggiate e riparate: applicazioni alla Cattedrale di Noto*, Rivista Edilizia, N. 9/10, pp. 28-41, 2000
- [2] Jurina L., *Alcuni recenti sviluppi nella tecnica dei martinetti piatti*, Conv. Naz. "La meccanica delle murature tra teoria e progetto", Messina 1996;
- [3] Jurina L., Ferretti A., Franchioni G., *Valutazione degli effetti di scavi in falda sui cedimenti strutturali di edifici mediante utilizzo di tecniche satellitari SAR*. Convegno Internazionale "Crolli e stabilità delle strutture", Università di Napoli
- [4] Jurina L., *Indagini sulle condizioni statiche del Palazzo della Ragione di Milano* Corso IP su Recupero strutturale del patrimonio edilizio esistente, Centro Edile di Segrate, 1981
- [5] Cucchi M., Tiraboschi C., Antico M., Binda L., *Optical system for real-time measurement of the absolute displacements applied to flat jack test*, SAHC, 8th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions, 2012
- [6] Poverello E. Plizzari G. Giuriani E. Algeri C. *Prove sperimentali di estrazione di ancoraggi iniettati in murature storiche*- Seminario Internazionale CIAS - Madrid; 2010

- [7] Felicetti R. e Gattesco N. (2006), *“Le prove penetrometriche per la stima della risposta meccanica delle malte nelle murature degli edifici storici”*, Atti convegno “Sperimentazione su materiali e strutture”, Venezia (Italy), p.224-232
- [8] Jurina L., Giannico C., Ferretti A., Ricci M., *Application of satellite radar interferometry for structural damage assessment and monitoring*. atti del convegno “IALCCE 2012- Third International Symposium on Life-Cycle Civic Engineering”, Hofburg Palace, Vienna Austria, October 3-6, 2012
- [9] Jurina L., *La possibilità dell'approccio reversibile negli interventi di consolidamento strutturale*, Atti del XIX Convegno Scienza e Beni Culturali “ La reversibilità nel restauro. Riflessioni, Esperienze, percorsi di ricerche, Bressanone, 1-4 luglio 2003
- [10] Jurina L., Corrieri L., Squarcina T., *Biblioteca Braidense di Milano*, in Recupero e Conservazione , n. 62, pp. 34-41, 2005
- [11] Jurina L., *La riscoperta del metodo delle graffette per il consolidamento di archi e volte*, XXIII Convegno Nazionale CTA, Lacco Ameno, Ischia.
- [12] Jurina L., *Prove a collasso su archi in muratura consolidati con la tecnica dell'arco armato: risultati di una sperimentazione*, Atti di IF CRASC'09 I convegno di Ingegneria Forense, IV convegno su CRolli, Affidabilità Strutturale, Consolidamento, Napoli, 2-4 dicembre 2009.
- [13] Jurina L., *Intervento di Consolidamento antisismico del Duomo di Cremona con adozione di tecniche innovative*, Atti di IF CRASC'12 II convegno di Ingegneria Forense, V convegno su CRolli, Affidabilità Strutturale, Consolidamento, Pisa, 15-17 Novembre 2012.
- [14] Jurina L., *Il consolidamento strutturale della Torre S.Dalmazio a Pavia*, XV Conv.Naz. CTA, Riva del Garda, 1995
- [15] Canali P., Jurina L., Pertot G., Treccani GP., *Un documento del guasto come tecnica, Militare: lacune e progetto di conservazione al Forte Fuentes di Colico*.XIII Conv. Naz.di Scienza e Beni Culturali, Bressanone, 1997
- [16] A. Borri, M. Corradi, E. Speranzini, A. Giannantoni, *Reticolatus. Una tecnica di rinforzo di murature irregolari mediante una maglia continua di trefoli metallici*, L'Edilizia, de Lettera editore, 2009.
- [17] M. Dolce, D. Nigro, F.C. Ponso, R. Marnetto: *Rafforzamento delle strutture murarie. Il sistema CAM di Cuciture Attive per la Muratura X Congresso Nazionale “L'ingegneria Sismica in Italia”, Potenza-Matera* 9-13 settembre 2001
- [18] Jurina L., *Prove a collasso su colonne cerchiate in muratura*, Atti di IF CRASC'09 I convegno di Ingegneria Forense, IV convegno su CRolli, Affidabilità Strutturale, Consolidamento, Napoli, 2-4 dicembre 2009
- [19] Jurina L., *L'uso dell'acciaio nel consolidamento delle capriate e dei solai in legno* Percorsi / Legno 2011
- [20] Jurina L., *Un monaco e dodici saette, ovvero la storia di otto puntelli e dei loro tiranti per il consolidamento della copertura nella Torre del castello di Domodossola*, L'edilizia-Structural, n169, anno XIX, pp.72-79, DeLettera-Editore
- [21] Giuriani E., *Trattato Di Restauro Architettonico. Consolidamento Degli Edifici Storici*, 2011, Utet Scienze Tecniche - Gruppo WKI.
- [22] Jurina L., *L'uso dell'acciaio nel consolidamento delle capriate e dei solai in legno* In Il manuale del legno strutturale, vol IV Interventi sulle strutture L. Uzielli (a cura di), Ed. Mancosu ISBN 888-7017-417.
- [23] Mogenicato V., *Il consolidamento delle fondazioni nel progetto di conservazione: stato dell'arte e nuove tecnologie*, tesi di laurea specialistica, rel. Lorenzo Jurina, Politecnico di Milano, 2008/09
- [24] Gabassi M., Paschetto A., Vinco G. *Consolidamento Del Terreno Di Fondazione Del Palazzo Di Punta Della Dogana In Venezia Realizzato Con Iniezioni Di Resina Poliuretanic*, Xxiv Convegno Nazionale di Geotecnica - L'innovazione tecnologica nell'ingegneria geotecnica, 2011
- [25] Jurina L., Ambrogio K., Barbò S., Chesi C., Conforti A., Cordiè C., Marra A., Peluchetti F., Petrucci S., Spinella C., *Finalizzazione del rilievo e gradi di approfondimento. Il caso di Laino Castello*

(CS), Atti del 27° Convegno UID “Unità e unicità: il futuro del disegno”, Lerici, 6-7-8 ottobre 2005.

[26] Mezzina M., Uva G., Jurina L., *Rischio sismico e strategie di mitigazione nei centri storici. Il caso di Laino Castello*, ed. BIBLIOS, ISBN 886-2250-207.

[27] S. Scabini; *Prodotti e tecnologie per ripristini e rinforzi strutturali ad elevatissime prestazioni*; Seminario CIAS; Varese; 2011.