

Restauro Strutturale: Processi e tecnologie per il controllo della sicurezza e del progetto

Prof. Ing. Giuseppe Giambanco

*Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, Aerospaziale e dei Materiali
Università degli Studi di Palermo*

PREMESSA

Una opportuna combinazione della conoscenza scientifica e culturale e dell'esperienza sono indispensabili per la redazione di un progetto di restauro. Considerando che l'obiettivo principale del progetto è la salvaguardia del valore culturale e storico dell'edificio nel suo insieme, l'ingegneria strutturale rappresenta un settore scientifico di supporto utile al raggiungimento del predetto obiettivo.

Il progetto di restauro vede generalmente coinvolte diverse figure professionali, quali il geologo, il progettista edile, l'impiantista e il tecnico restauratore. Un buon risultato si può soltanto ottenere dalla sintesi dei diversi studi che si rendono necessari.

Alla base di tutti questi studi vi sono informazioni che vengono raccolte o prodotte nel corso della progettazione. Tali informazioni possono essere di tipo qualitativo, dedotte da rilievi visivi e analisi storiche. Vi sono poi dati quantitativi che si derivano da test specifici e da modelli matematici semplici e avanzati come quelli utilizzati nella pratica ingegneristica.

In un contesto multidisciplinare come quello che si viene a realizzare per il progetto di restauro, non è semplice stabilire leggi e regolamenti. Per un verso la mancanza di un regolamento può condurre facilmente a scelte ambigue e decisioni arbitrarie mentre l'applicazione di norme predisposte per le moderne strutture può risultare inappropriata. Pertanto, è auspicabile che sia lo stato ma anche le regioni si dotino di specifiche regolamenti e linee guida utili al professionista nella conduzione del progetto di restauro.

Solo di recente le *Norme Tecniche per le Costruzioni* (NTC), introdotte con il D.M. 14-01-08, hanno delineato un percorso conoscitivo completo che permette di valutare le condizioni di sicurezza in cui si trova la struttura di un edificio esistente.

La norma distingue nel processo di studio della sicurezza strutturale due fasi principali: una fase conoscitiva che permette ai progettisti di entrare in confidenza con il manufatto e una fase di analisi della struttura che conduce alla valutazione dei carichi di progetto che la struttura è capace di sopportare nelle condizioni di sicurezza

prefissate. Solo a completamento del processo è possibile valutare la necessità o meno di interventi di consolidamento da porre in atto.

Le nuove NTC hanno una valenza generale non distinguendo fra le costruzioni esistenti quelle che sono di pregio storico e artistico. La lacuna normativa è stata colmata con la pubblicazione della Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri 09 febbraio 2011 (Supplemento Ordinario n. 54 della G.U. 47 del 26/02/2011) "*Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle Norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto del Ministero delle infrastrutture e dei trasporti del 14 gennaio 2008*". Questa direttiva concerne la salvaguardia dei beni culturali tutelati. E' da intendersi che le indicazioni contenute si riferiscano a beni mobili ed immobili che sono sottoposti a tutela, consistente "nell'esercizio delle funzioni e nella disciplina delle attività dirette, sulla base di un'adeguata attività conoscitiva, ad individuare i beni costituenti il patrimonio culturale ed a garantirne la protezione e la conservazione per fini di pubblica fruizione. L'esercizio delle funzioni di tutela si esplica anche attraverso provvedimenti volti a conformare e regolare diritti e comportamenti inerenti al patrimonio culturale" (art. 3 del Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio, D.L. n. 42 del 22-01-04).

FASE CONOSCITIVA

La fase conoscitiva è propedeutica alla valutazione della sicurezza della struttura è richiede la partecipazione di diverse professionalità, ognuna appropriata al tipo di edificio da esaminare. Questa fase prevede l'assunzione di informazioni sulla concezione strutturale dell'edificio, sulle tecniche di costruzione, sulle modificazioni funzionali e strutturali subite nel corso della sua vita, sullo stato di degrado e di danneggiamento e sulle proprietà meccaniche dei materiali.

La conoscenza del manufatto si raggiunge attraverso lo svolgimento delle seguenti attività:

- ❖ identificazione del manufatto che comprende la posizione sul territorio, la sensibilità ai diversi fattori di rischio locali, il rapporto con altri manufatti adiacenti e l'individuazione di tutti quegli elementi che sono di pregio storico ed artistico;
- ❖ ricerca dell'evoluzione funzionale dell'edificio, dei processi costruttivi e di tutte le modificazioni intervenute nel tempo;
- ❖ rilievo geometrico e materico riguardante la struttura nel suo insieme e i singoli elementi che la compongono. Studio del quadro fessurativo, della tessitura muraria, e della compartecipazione fra elementi strutturali;

- ❖ caratterizzazione dei materiali attraverso prove in situ e in laboratorio, distruttive o non distruttive;
- ❖ indagine sui terreni di fondazione e sul tipo di fondazione.

Le indagini finalizzate alla caratterizzazione dei materiali che costituiscono la struttura rivestono un ruolo importante nel progetto di restauro strutturale in quanto forniscono le informazioni che hanno maggiore peso nella valutazione della sicurezza dell'edificio e, conseguentemente, influiscono fortemente nel dimensionamento di eventuali interventi di consolidamento.

Le indagini di tipo diretto sviluppate in situ o in laboratorio su campioni rappresentativi del materiale di cui è costituito il singolo elemento strutturale forniscono risultati di elevata affidabilità ma spesso si manifestano eccessivamente invasive lasciando segni profondi sul manufatto. Le indagini di tipo indiretto si basano sulla misura di quantità in qualche maniera correlabili ad alcuni parametri meccanici del materiale. Sono poco invasive ma possono portare a valutazioni del tutto errate se non opportunamente calibrate sulla base di dati certi e quindi provenienti da prove dirette.

Al termine delle indagini il progettista raggiunge livelli di conoscenza diversi che dipendono sia dalla qualità ma anche dalla quantità delle indagini eseguite.

Il livello di conoscenza raggiunto determina il cosiddetto fattore di confidenza F_c che assume valori compresi nell'intervallo $1 \div 1.35$. La direttiva citata in premessa attribuisce al fattore di confidenza due diversi significati in relazione al tipo di modellazione costitutiva che si intende adottare nell'analisi della struttura. Nel caso in cui il modello costitutivo sia elastico, elasto-plastico e anche danneggiativo, il fattore di confidenza rappresenta un fattore riduttivo delle caratteristiche di resistenza del materiale. Se il modello costitutivo è rigido-plastico non resistente a trazione, per cui non è necessario nessun parametro costitutivo, il fattore di confidenza è utilizzato per ridurre le capacità portanti della struttura o di un suo elemento.

VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

Il moderno metodo semiprobabilistico agli stati limite consente la valutazione delle condizioni di sicurezza di una struttura sia in condizioni statiche che sismiche.

Come per le nuove costruzioni si definiscono gli stati limite di esercizio (SLE) e gli stati limite ultimi (SLU). Gli SLE si riferiscono alla necessità di mantenere funzionale la struttura e limitare i danni che possono verificarsi per sismi frequenti e poco intensi. Gli SLU consentono di salvaguardare la costruzione e i suoi occupanti in presenza di sismi di forte intensità ma rari.

Per le costruzioni di pregio storico bisogna è stato introdotto un ulteriore specifico stato limite denominato stato limite di danno dei beni artistici (SLA). Tale stato si riferisce al fatto che in presenza di un terremoto opportunamente scelto, i beni artistici contenuti nell'edificio, mobili e immobili, devono subire al più danni di modesta entità in maniera tale che siano restaurati senza una significativa perdita del loro valore culturale.

Con riferimento ai diversi stati limite, la sicurezza si valuta sulla base del confronto fra la resistenza di progetto della struttura R_d e l'effetto prodotto sulla medesima dalle azioni di progetto E_d .

Tale confronto nel caso delle costruzioni tutelate può svilupparsi utilizzando modelli con diversi gradi di accuratezza includendo osservazioni qualitative e informazioni quantitative.

Si definiscono in genere tre livelli di valutazione (LV) della sicurezza:

- ❖ LV1 analisi qualitativa e valutazione con modelli meccanici semplificati;
- ❖ LV2 valutazione locale per macroelementi con modelli meccanici semplici o avanzati;
- ❖ LV3 valutazione complessiva della struttura utilizzando un modello globale o una opportuna suddivisione dell'edificio in macroelementi.

Il primo livello di valutazione della sicurezza è particolarmente indicato per effettuare le verifiche di sicurezza in maniera speditiva.

Si può basare su una analisi storica del manufatto che consenta di stimare i danneggiamenti eventualmente subiti nel tempo in presenza di eventi sismici. Può affermarsi che la storia di una costruzione è un laboratorio sperimentale completo che permette di studiare la risposta della struttura in presenza di azioni variabili nel tempo anche severe come quelle derivanti dal sisma. E' possibile stimare la sicurezza della costruzione sulla base della conoscenza della predetta risposta storica anche se l'affidabilità della previsione è fortemente condizionata dal danneggiamento e invecchiamento subito dal manufatto.

Sempre dal punto di vista qualitativo la valutazione della sicurezza può farsi per via induttiva estrapolando le conoscenze sviluppate dal professionista su strutture simili poste nel medesimo contesto ambientale. Anche in questo caso l'affidabilità della previsione è difficilmente stimabile in quanto la valutazione della sicurezza non si basa su un procedimento scientifico ma sul giudizio personale.

La DPCM del 2011 per tipologie di strutture complesse fornisce modelli semplificati della risposta sismica che consentono di valutare l'indice di sicurezza sismica nei confronti dello stato limite ultimo di salvaguardia della vita SLV. Tale indice è il rapporto fra il periodo di ritorno dell'azione sismica e il corrispondente periodo di

ritorno di riferimento della medesima azione. Un valore superiore all'unità di tale indice consente di affermare che la struttura è in condizioni di sicurezza ovvero che il manufatto è in grado di sopportare l'azione sismica di riferimento del sito. Al contrario, valori inferiori all'unità evidenziano la necessità di ulteriori approfondimenti e la programmazione di interventi di consolidamento.

Il secondo livello di valutazione della sicurezza si basa su approcci analitici che implicano la necessità di modellare il singolo macroelemento in maniera più o meno complessa.

Il modello più semplice da utilizzare è quello che ipotizza il materiale omogeneo ed isotropo con comportamento rigido-plastico non resistente a trazione. In questo caso l'analisi limite del macroelemento è il metodo di analisi più appropriato per identificare il moltiplicatore dei carichi variabili che porta la struttura nelle condizioni limite esaminate. L'analisi può essere sviluppata nell'ipotesi di piccoli spostamenti (analisi lineare) o di grandi spostamenti (analisi non lineare).

In alternativa possono adottarsi modellazioni avanzate del materiale dove in maniera rigorosa si distinguono i blocchi, naturali o artificiali, dai giunti, a secco o di malta. Le proprietà elastiche e quelle di resistenza del materiale muratura sono il risultato dell'interazione fra i due elementi costituenti (blocchi e giunti) aventi le proprie caratteristiche di deformabilità e resistenza. Questo tipo di modellazione del materiale viene detta meso-modellazione e fornisce risultati molto accurati sulla risposta dell'elemento strutturale agli effetti indotti dalle azioni fisse e variabili. La mesomodellazione richiede metodi di analisi numerici come quello degli elementi finiti. Il tipo di analisi può essere statica, dinamica, lineare e non.

Infine, il terzo livello di valutazione della sicurezza considera la struttura nel suo complesso e richiede modelli matematici di tipo numerico. La direttiva, comunque, dà la possibilità di lavorare per macroelementi, come nell'LV2, ma l'analisi deve riguardare tutti i macroelementi che compongono la costruzione tenendo conto dell'interazione fra essi.

INTERVENTI DI CONSOLIDAMENTO

A seguito della fase di indagine e della valutazione della sicurezza allo stato attuale si può giungere ad una diagnosi sullo stato in cui si trova la struttura con riferimento ai carichi verticali pseudo statici e ai carichi sismici.

Se le condizioni di sicurezza nei confronti dello stato limite ultimo non sono soddisfatte in presenza dei soli carichi verticali la struttura necessita di interventi di consolidamento improcrastinabili. Se il criterio non è soddisfatto in presenza delle

azioni sismiche è una scelta della proprietà intervenire o meno con elementi di mitigazione del rischio sismico. Nel caso dei beni tutelati, il Codice dei beni culturali e del paesaggio precisa all'art. 29 che il progetto di restauro nelle zone dichiarate a rischio sismico comprende il *miglioramento strutturale*. Questa precisazione da un lato spinge il progettista a prevedere comunque una serie di interventi volti a mitigare il rischio sismico e dall'altro a limitare la consistenza degli interventi affinché la costruzione mantenga la sua identità originaria.

Diverse sono le tecniche di consolidamento adottate nel restauro e la scelta deve avvenire al fine di massimizzare, innanzitutto, l'efficacia dell'intervento e poi la durabilità, compatibilità e reversibilità. Al contempo si deve tentare di minimizzare l'invasività e il costo.

In generale sono di notevole efficacia, principalmente nei siti con elevato rischio sismico, tutti quegli interventi volti a migliorare i collegamenti fra i singoli setti murari e gli orizzontamenti con le strutture verticali. Il miglioramento dei collegamenti permette di realizzare una scatola muraria dove le azioni orizzontali di tipo sismico si ripartiscono sui setti murari in maniera efficace ovvero con forze interne giacenti nel piano medio del muro. Sono da preferire tutti quegli interventi che possono realizzarsi localmente e non in maniera diffusa.

Negli elementi ad arco e nelle volte gli interventi devono orientarsi alla riduzione delle spinte alle imposte e, in alcuni casi, all'incremento della capacità portante ai carichi verticali ed orizzontali. La spinta può essere eliminata o ridotta inserendo le tradizionali catene metalliche o introducendo, compatibilmente con l'architettura dell'edificio, altri elementi murari come contrafforti e frenelli. Il miglioramento della capacità portante si raggiunge introducendo i placcaggi con materiale metallico o in composito all'estradosso dell'arco o della volta.

Si può intervenire sulla capacità portante degli elementi murari migliorando le proprietà meccaniche della muratura o inserendo elementi di rinforzo. Il miglioramento delle proprietà meccaniche si raggiunge con la riparazione di parti degradate e lesionate, con l'inserimento di diatoni per fare partecipare più paramenti del medesimo muro e con l'iniezione di leganti compatibili chimicamente con i materiali esistenti. Per migliorare la capacità di resistenza sia in direzione verticale che orizzontale si introducono in corrispondenza delle aperture architravi o telai chiusi di acciaio.

Negli orizzontamenti e nelle coperture gli interventi di miglioramento possono riguardare sia lo stato limite ultimo che lo stato limite di esercizio.

Per i solai l'intervento più semplice è la rimozione di solette e massetti di elevato spessore e peso. Le nuove solette possono essere connesse alle nervature di legno o di acciaio in maniera da ottenere una struttura mista più rigida, resistente e leggera. Al fine di ridurre i pesi e le forze sismiche, i massetti possono essere realizzati con calcestruzzo alleggerito.

Per le coperture è preferibile mantenere la tipologia con ossatura lignea per la riduzione dei carichi alla sommità dell'edificio. Inoltre, l'irrigidimento nel piano di copertura è auspicabile tramite inserimento di controventi metallici.

Per tutti gli interventi si rende necessaria la verifica dell'effettiva efficacia. Per cui bisogna procedere nuovamente allo studio della sicurezza strutturale in presenza degli interventi consolidamento.

Nel caso di interventi locali che interessano alcune parti della costruzione e che non modificano in maniera sostanziale il funzionamento originale della struttura è indicato il livello di valutazione LV2. Se, al contrario gli interventi sono estesi a tutta la costruzione ed è da aspettarsi una modifica del funzionamento dell'organismo strutturale si deve ricorrere al livello di valutazione LV3 con l'analisi globale dell'edificio o di tutti i suoi macroelementi.

In entrambi i livelli di valutazione una stima ragionata dell'efficacia dell'intervento può portare a sostanziali modificazioni delle scelte effettuate.

MONITORAGGIO

Il controllo della costruzione nel tempo è uno strumento importante per una consapevole conservazione del bene in quanto consente di programmare la manutenzione ed attuare in tempo interventi di riparazione. Un programma di monitoraggio è essenziale per garantire alla costruzione la vita nominale prevista.

Il monitoraggio visivo è di basso costo e di notevole efficacia. Consiste nel rilievo periodico dello stato fessurativo e di degrado e nell'acquisizione di informazioni in merito a trasformazioni avvenute nella struttura e nell'ambiente circostante

Il monitoraggio in continuo strumentale è una recente opportunità che identificati alcuni parametri di controllo e le relative soglie di pericolosità permette di stabilire quando intervenire prontamente per evitare gravi dissesti.