

Il retrofit sismico strutturale di un fabbricato - Dagli isolatori sismici al sistema di monitoraggio integrato

- Prima parte -

Il quadro generale del costruito

La salvaguardia del patrimonio costruito è, per addetti ai lavori, gestori, decisori e per la stessa popolazione, un dovere che va oltre il mero concetto di manutenzione. I luoghi in cui viviamo, siano essi di lavoro, di vita o infrastrutture, troppo spesso vengono attenzionati per le componenti estetiche e di “qualità degli ambienti”, lasciando in secondo piano un aspetto tutt’altro che secondario, che è quello della sicurezza. Nel panorama Italiano, vetusto sotto il profilo temporale delle costruzioni ed in cui gli interventi di manutenzione rimangono spesso in attesa di raggiungere il livello ultimo di rischio, il monitoraggio riveste oggi un ruolo determinante sia per la gestione ed il coordinamento degli interventi immediati di messa in sicurezza o sgombero, sia per la pianificazione delle prime operazioni di ripristino e/o di consolidamento delle strutture danneggiate.

In controtendenza con quanto sopra, il tema del monitoraggio strutturale mediante sistemi innovativi ha ricevuto nell’ultimo ventennio un crescente interesse sia in ambito accademico, sia da quello dei professionisti; ne è testimonianza il crescente numero di sistemi implementati, così come il proliferare nella letteratura scientifica di casi applicativi in differenti scenari. Le principali motivazioni di questo sviluppo sono riconducibili principalmente a due cause: in primo luogo, i metodi tradizionali di monitoraggio erano frequentemente basati sulle sole ispezioni visive, e quindi affidate all’esperienza soggettiva dell’operatore.

Con l'innovazione legata alle soluzioni IoT (Internet delle Cose), con nuovi protocolli e sistemi di rilevazione automatica dei dati, si è prodotto una significativa riduzione dei costi, e la consolidata possibilità di avere dati di misurazione affidabili e oggettivi.

Le strutture, come noto, sono soggette ad un deterioramento dovuto tanto dall' invecchiamento "naturale" delle stesse, quanto ad una manutenzione inadeguata. Con l'impiego dei nuovi sistemi di monitoraggio (continuo e/o puntuale) si può tenere sotto osservazione l'intera opera, ed evitare che il grado di risposta della struttura vada oltre i limiti di sicurezza. Un modo di investire sul presente, per evitare in futuro costi eccessivi, e incidere quindi sull'intero *life cycle* dell'opera.

La situazione italiana, soprattutto dopo la lunga sequela di eventi sismici che l'hanno colpita nell'ultimo ventennio – dal sisma umbro-marchigiano degli anni '90 fino al recentissimo sisma del Centro-Italia – hanno posto l'attenzione sulla vulnerabilità degli edifici esistenti per il pesante bilancio che essi hanno registrato non solo in termini di impatto economico del danno ricevuto, ma soprattutto in termini di esposizione sismica.

Molti di questi manufatti sono stati realizzati nel dopoguerra: il 60% tra il 1945 ed il 1980, con un particolare impulso negli anni '60 e '70, in un'epoca in cui lo Stato aveva risorse adeguate per finanziarne la costruzione in maniera estesa e diffusa, e sono giunti fino ai giorni nostri sostanzialmente senza aver subito negli anni alcun intervento di consolidamento, e molto spesso purtroppo anche con evidenti carenze manutentive.

Poter intervenire garantendo la sicurezza in caso di sisma è doveroso; risulta inoltre necessario, prima di realizzare qualsivoglia intervento, procedere con una profonda ed adeguata conoscenza del manufatto, per poter poi procedere ad una modellazione del sistema strutturale in fase di calcolo.

Il lavoro che viene discusso, è dunque centrato su un caso studio ad hoc e sugli aspetti appena menzionati: un edificio residenziale realizzato negli anni '60 è stato adeguato sismicamente mediante sistema di isolamento alla base. Tale intervento è stato monitorato durante l'intera durata del retrofit

strutturale attraverso differenti tecniche e tipologie e sarà tenuto sotto controllo durante l'intera vita utile al fine di valutare in "tempo reale" le condizioni di salute a seguito di eventi calamitosi, sollecitazioni di altra natura come piccoli sciami sismici, o cedimenti del terreno, etc..

Il caso di studio: L'intervento di adeguamento sismico di un edificio in situ di cemento armato mediante isolamento alla base

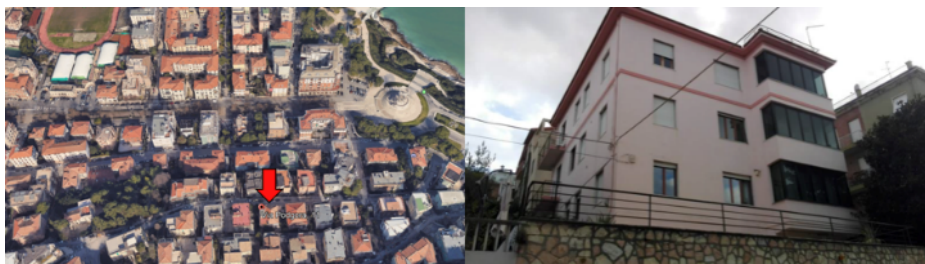


Fig.1 - Collocazione e vista generale del manufatto.

L'edificio interessato dall'intervento è situato in zona centrale della città di Ancona, a ridosso dell'area residenziale del Passetto. Realizzato nel 1961, l'edificio si presenta come una struttura regolare in pianta ed anche in elevazione con dimensioni di circa 13,80 x 13,00 m, mentre in altezza si sviluppa per 13,00 m.

L'analisi del comportamento strutturale dell'edificio allo stato attuale in relazione alle azioni sismiche ha evidenziato la necessità di sottoporre la struttura ad **interventi di adeguamento sismico attraverso una tecnica di intervento innovativa basata sull'introduzione di isolatori sismici** in testa ai pilastri del piano terra.

La scelta degli isolatori

L'idea dell'isolamento alla base nasce da una semplice considerazione. Le strutture tradizionali, a base fissa, hanno periodi di vibrazione principali abbastanza bassi, che in genere ricadono nell'intervallo in cui l'accelerazione del sisma viene notevolmente amplificata. Se alla base si interpone un sistema di isolamento, costituito da elementi molto deformabili in senso orizzontale, il periodo cresce notevolmente e l'accelerazione si riduce a valori molto più bassi.

La scelta di proporre tale tipologia di intervento è motivata dal fatto che, con un unico intervento localizzato sui soli elementi strutturali del piano terra è possibile adeguare l'edificio nonostante le scarse caratteristiche meccaniche dei materiali e raggiungere un livello di protezione al sisma caratterizzato da assenza di danneggiamenti, garantendo protezione anche agli elementi non strutturali.

L'alternativa di migliorare la risposta sismica dell'edificio attraverso interventi di rinforzo (incamiciature) degli elementi strutturali della sovrastruttura risulterebbe meno efficace e altamente invasiva in quanto prevederebbe interventi di demolizione all'interno degli appartamenti. Ciò avvalorata la scelta degli isolatori.

Nel progetto sono stati dimensionati i dispositivi di isolamento necessari per adeguare la struttura. La sovrastruttura dovrà essere verificata allo stato limite di salvaguardia della vita (SLV), mentre il sistema di isolamento dovrà essere dimensionato e progettato allo stato limite di collasso (SLC).

Il dimensionamento dei dispositivi di isolamento si basa sulla determinazione del periodo del moto fondamentale. Si impone, cioè, il periodo fondamentale di oscillazione alla struttura, al quale corrisponde un valore dell'accelerazione sullo spettro di risposta inferiore rispetto a quello della stessa struttura a base fissa, ma al contempo cui corrisponde un valore dello spostamento maggiore.

La scelta del periodo di vibrazione è, pertanto, l'aspetto centrale nella progettazione di strutture isolate alla base.

Si ottiene un buon "disaccoppiamento" se la struttura isolata ha un periodo maggiore di almeno 3 volte il periodo della sovrastruttura a base fissa ($T_{bs}=0,57s$). Nel nostro caso $3 \cdot T_{bs}=1,71$ sec.

Una volta definito il numero totale di dispositivi da introdurre (un dispositivo ogni pilastro del piano terra, $N^{\circ}_{dispositivi}=N^{\circ}_{pilastri}=20$), la disposizione in pianta e il numero dei dispositivi HDRB sono stati studiati in modo che il baricentro delle rigidezze del sistema di isolamento sia il più possibile vicino alla verticale passante per il baricentro delle masse dell'intera sovrastruttura, al fine di ottimizzare il comportamento dinamico della stessa, ossia in modo che i primi due modi siano puramente traslazionali nelle direzioni x e y. Nel nostro caso sono stati inseriti 10 dispositivi elastomerici ad alto smorzamento e 10 isolatori a scorrimento.

Il dispositivo HDRB è un isolatore progettato utilizzando diversi strati di elastomero (gomma naturale) rinforzati con lamierini d'acciaio. Lo smorzamento fornito dagli isolatori HDRB proviene dalla natura della miscela elastomerica e riduce l'accelerazione durante un evento sismico.

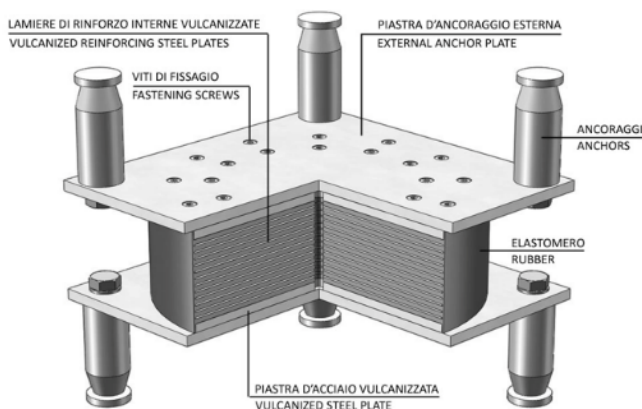


Fig.2 – Isolatore HDBR (High Damping Rubber Bearing)

Per evidenziare l'estrema efficacia dell'intervento viene riportato di seguito il confronto tra lo spettro di risposta elastico allo SLC allo stato attuale e lo spettro di risposta elastico della struttura isolata allo SLC.

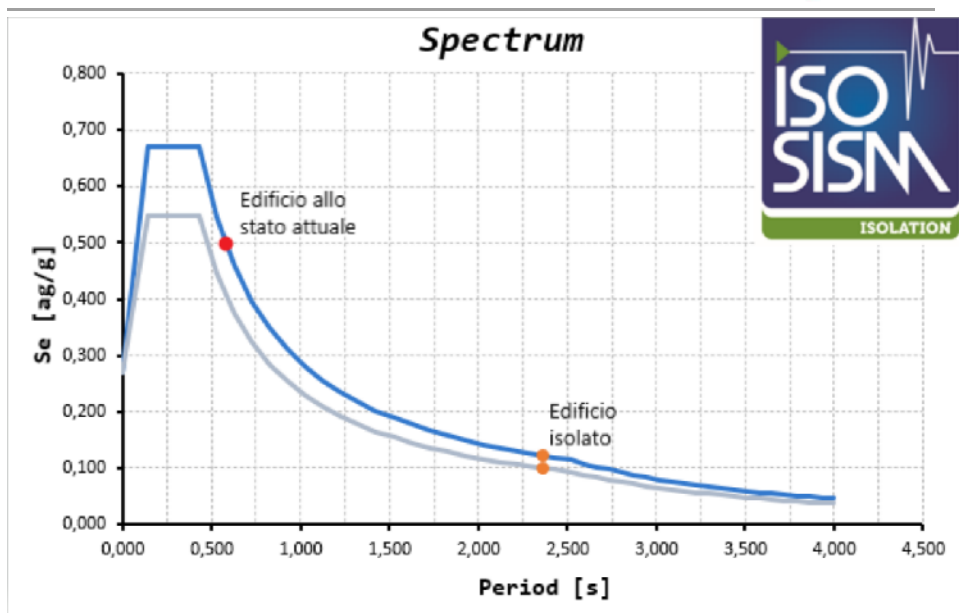


Fig. 3 - Spettri di Risposta allo SLC (stato limite di collasso).

Tale confronto ha evidenziato un sostanziale aumento del periodo fondamentale di vibrazione (da 0,57 a 2,35 secondi), con conseguente riduzione del 75% dell'accelerazione (da 0,50 a 0,12 con riferimento allo spettro di SLC).

L'introduzione del sistema di isolamento permette quindi di diminuire drasticamente l'energia in ingresso destinata in caso di sisma agli elementi strutturali della sovrastruttura, che non sarebbero in grado di fornire una risposta adeguata viste le scarse caratteristiche meccaniche dei materiali.

Si raggiunge in questo modo un elevatissimo livello di protezione sismica con un duplice vantaggio: in caso di evento sismico la struttura non viene danneggiata (diversamente da quanto accadrebbe con interventi tradizionali) e soprattutto gli occupanti sono al sicuro.

Modalità di installazione degli isolatori

Il dispositivo di isolamento viene installato in testa ai pilastri del piano terra. Per consentire l'alloggiamento del dispositivo e la realizzazione del retrofitting, ciascun pilastro originario è stato incamiciato inserendo nuove

gabbie di armatura e con nuovo getto di calcestruzzo. Tale procedura consente l'inserimento dei dispositivi in ciascun elemento strutturale dopo aver rinforzato il pilastro e il pulvino sommitale. Tale tipologia di installazione consiste nello scaricare un concio del pilastro mediante martinetti disposti tra il solaio e quattro martinetti reagenti direttamente sulla testa del pilastro. A concio scarico si provvede ad un taglio dello stesso, e alla sostituzione della parte tagliata con l'isolatore. Di seguito si riportano



Fig. 4 – Fasi di installazione dei dispositivi: incamiciatura dei pilastri, messa in carico, taglio del concio di pilastro, posizionamento dell'isolatore sismico

alcune immagini relative alle fasi cruciali dell'intervento.



Fig. 5 – La messa a in opera dell'isolatore sismico

Il monitoraggio strutturale: stato dell'arte e applicazione al caso di studio

Il monitoraggio strutturale rappresenta il processo di caratterizzazione delle



Fig. 6 - Procedura di caratterizzazione dinamica.

opere con il quale ci si propone di ottenere informazioni sul livello prestazionale delle strutture al fine di poter mantenere nel tempo elevati livelli di sicurezza ed efficienza. Considerate le specifiche problematiche che caratterizzano la struttura e il suo contesto, attraverso la misura di specifici parametri fisici rilevati dalla rete dei sensori e l'aggiornamento dei modelli strutturali numerici è, infatti, possibile seguire l'evoluzione delle condizioni della struttura nel tempo e quindi rispondere celermente a eventuali necessità di intervento e pianificare in maniera efficiente l'attività manutentiva, volta a prolungare in sicurezza la sua vita utile.

Le attuali metodologie di monitoraggio strumentale (*Structural Health Monitoring*) si basano sull'installazione di reti di sensori gestite da sistemi hardware/software che consentono di acquisire i dati, provenienti dai sensori,

e di elaborarli, attraverso l'ausilio della modellazione numerica; Identificando e segnalando, in tempo utile ("**early warning**"), le criticità della struttura.

L'efficacia di tali metodologie, capaci di garantire le adeguate caratteristiche "**early warning**" del sistema di monitoraggio, si basa sull'integrazione tra un valido sistema di monitoraggio strumentale sulle opere (SHM), e la piattaforma di gestione di tale sistema, comunemente da remoto, e la corretta analisi e interpretazione dei dati attraverso l'uso del modello



Fig. 7 - Centralina di acquisizione, stazione di acquisizione e accelerometri piezoelettrici.

strutturale del manufatto.

In accordo con queste premesse, la filosofia applicata al caso studio che viene presentato, consiste in diversi step:

1. **Monitoraggio dinamico ante-operam**, al fine di calibrare in modo accurato il modello ad elementi finiti adottato per il calcolo strutturale;
2. **Monitoraggio dinamico in continuo**, al fine di verificare le prestazioni strutturali dinamiche nel corso del retrofit strutturale e per eseguire una diagnosi dell'edificio a seguito di eventuali eventi calamitosi (azione sismica).
3. **Monitoraggio statico in continuo**, tenendo sotto controllo spostamenti e inclinazioni di alcuni punti della struttura durante le delicate fasi di lavorazione;

4. **Monitoraggio topografico**, per avere un ulteriore dato in termini di spostamenti globali di punti significativi dell'edificio e al contorno.

Identificazione dei parametri strutturali

Il monitoraggio dinamico è una tecnica che consente di conoscere i parametri dinamici della struttura, come frequenze proprie, smorzamenti e forme modali, altrimenti impossibili da determinare sperimentalmente.

Tali dati permettono di calibrare opportunamente il modello numerico sulla base dei risultati ottenuti dalla campagna di monitoraggio.

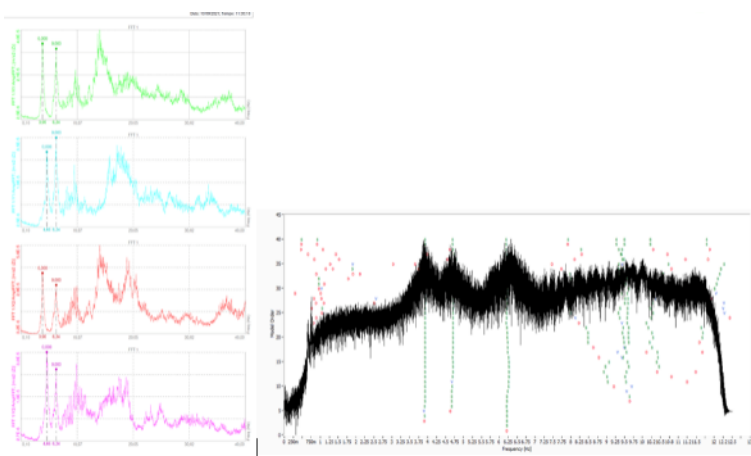


Fig. 8 – stima delle frequenze proprie di vibrazione mediante algoritmo di identificazione

Oggi, l'identificazione dinamica è una tecnica largamente impiegata in ambito civile e ingegneristico, in particolar modo per le strutture esistenti. L'analisi modale operazionale (*Operational Modal Analysis* – OMA-)

consente di descrivere il comportamento dinamico della struttura semplicemente registrando i bassissimi livelli di vibrazione a cui è sottoposto un manufatto, impiegando l'eccitazione ambientale come input (azione del vento, microtremori, traffico veicolare, ecc.).

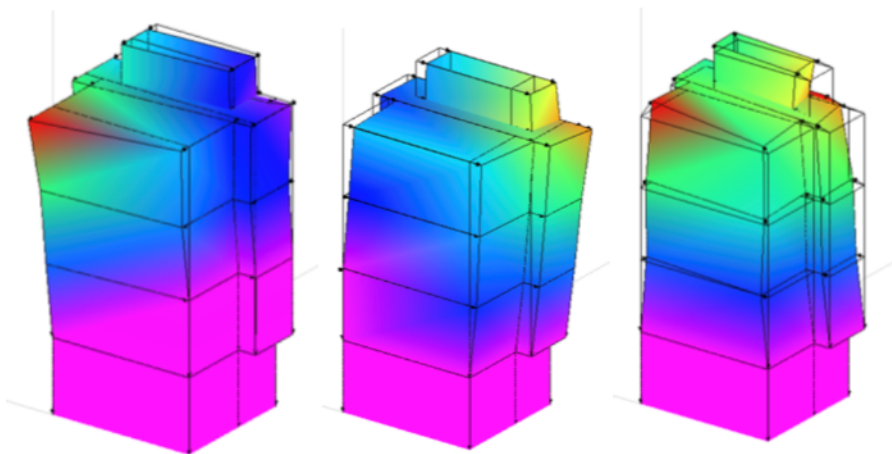


Fig. 9 - Rappresentazione dei diversi modi di vibrazione. Da sinistra a destra: Modo 1 – 3.93 Hz – traslazionale X, Modo 2 – 4.71 Hz – traslazionale Y, Modo 3 – 6.198 Hz – torsionale.

Il risultato è la creazione di un modello numerico/digitale (Fig.7) che sia quanto più simile alla struttura reale. Lo scopo della prova è di identificare le effettive caratteristiche dinamiche del sistema strutturale, valutare a posteriori l'affidabilità dei modelli adottati in fase progettuale, e valutare l'efficacia della disposizione dei sensori previsti per il sistema di monitoraggio descritto di seguito. Applicando l'algoritmo di identificazione si ottengono le

frequenze relative ai principali modi propri di vibrare, unitamente alla stima degli smorzamenti associati e alle forme modali.

Tali informazioni sono state impiegate come base di calibrazione del modello a elementi finiti, impiegato poi per le analisi strutturali.

Il risultato è la generazione di un “Gemello Digitale” (Digital Twin) che rappresenta fedelmente la struttura reale dal punto di vista statico e strutturale.

Conclusioni

Il lavoro descritto in questo articolo ha presentato soluzioni innovative e tradizionali a supporto della sicurezza sismica e del monitoraggio strutturale. In particolare, le soluzioni proposte riguardano da un lato l'installazione di isolatori sismici in un edificio urbano, dall'altro un sistema complesso ed integrato di tecniche di monitoraggio al fine di garantire sicurezza strutturale sia in fase di cantiere che per l'intero *life cycle* dell'edificio stesso (aspetto che verrà approfondito nella seconda parte dell'articolo).

La fase di monitoraggio dinamico preliminare si conferma essere un metodo semplice e affidabile per la conoscenza strutturale, consentendo di affinare il modello numerico a elementi finiti che, senza tali valutazioni, avrebbe condotto ad analisi differenti o valutazioni sismiche errate. Il modello FEM calibrato ha permesso di ottimizzare le soluzioni tecnologiche di adeguamento individuate, sulla base delle reali criticità che il modello stesso ha evidenziato. Si è quindi scongiurato il rischio di eseguire inutilmente interventi su elementi “sani”, favorendo interventi mirati. Le tecnologie di isolamento utilizzate hanno inoltre consentito di non pregiudicare la fruibilità né di alterarne le caratteristiche architettoniche del manufatto, grazie alla loro bassa invasività. La tecnica dell'isolamento, infatti, permette di adeguare sismicamente l'edificio e di garantirne la sicurezza contro ogni evento nella zona di intervento, rendendo la struttura sicura sia per i suoi occupanti che per l'intero impianto urbano del quartiere. La soluzione risulta quindi una

valida alternativa ad interventi più invasivi di demolizione e ricostruzione, creando notevoli vantaggi sia in termini di sicurezza sia in termini di ridotto impatto ambientale.

Un punto cruciale resta, tuttavia, quello economico. L'investimento è stato di notevole entità, e probabilmente senza l'accesso ai crediti del bonus 110 non sarebbe stata possibile la messa in sicurezza con il metodo proposto; questo deve fare riflettere amministratori e decisori, che nel futuro dovranno fronteggiare il grave problema di un patrimonio edilizio ormai fatiscente, la cui cura non potrà essere subordinata a piani di intervento sporadici come il bonus, ma richiederanno certamente un intervento su fondi più strutturali e sostenibili nel tempo.

Se si volesse ripartire dal gemello digitale, questo articolo dimostra che, almeno in termini di controllo e monitoraggio, i nuovi paradigmi dell' IOT sono una valida soluzione che *out-of-the-shelf*, a basso costo e di indubbia utilità almeno per un primo screening, rimandando interventi più invasivi a valutazioni più approfondite.

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano fortemente il supporto nel progetto, dell' ing. G.Stefania, il quale si è occupato della progettazione strutturale del sistema di isolatori, insieme al progetto strutturale delle altre parti di intervento (per ciò lo abbiamo definito "progetto strutturale").

A Gabriele Potenza va invece il nostro riconoscimento per averci supportato nella progettazione del monitoraggio integrato della rete di sensori e del controllo e monitoraggio basati su tecniche topografiche.

Segue seconda parte su InGENIO prima settimana di Ottobre 2023