

Monitoraggio strutturale per la protezione sismica del patrimonio edilizio

Maria Pina Limongelli¹

¹Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito. Politecnico di Milano.

E-mail: mariapina.limongelli@polimi.it

Keywords: monitoraggio sismico, reti di sensori, diagnosi del danno, allerta sismico

SOMMARIO Nelle fasi immediatamente successive ad un evento sismico uno dei problemi da affrontare è quello di una valutazione rapida, accurata ed affidabile dei danni, che sia utile alla gestione e coordinamento degli interventi immediati di messa in sicurezza e/o di sgombero delle costruzioni potenzialmente danneggiate dal sisma. Il monitoraggio permanente della risposta strutturale e di parametri correlabili al danneggiamento, integrato ad un sistema decisionale e di allerta può essere di notevole ausilio in tali circostanze consentendo l'individuazione in tempo quasi reale delle strutture maggiormente danneggiate e quindi la definizione di una gerarchia da seguire nella gestione degli interventi di emergenza.

INTRODUZIONE

Il tema del monitoraggio strutturale mediante reti di sensori ha ricevuto negli ultimi venti anni un interesse crescente da parte sia del mondo della ricerca sia da quello professionale come testimonia il numero crescente di sistemi di monitoraggio installati in varie nazioni del mondo. I motivi principali di questo sviluppo risiedono da un lato nelle limitazioni connesse con l'utilizzo dei metodi tradizionali basati su ispezioni visive, dall'altro nelle grandi potenzialità offerte da un sistema di rilevamento automatico dello stato di salute della struttura in termini di riduzione dei costi di manutenzione. Un numero elevato di strutture in tutto il mondo esibiscono deterioramento dovuto all'invecchiamento o a manutenzione inadeguata che il monitoraggio continuo può rapidamente individuare consentendo un ripristino tempestivo delle condizioni ottimali con conseguente riduzione dei costi sul ciclo di vita. Inoltre il controllo continuo della struttura consente di passare da un sistema manutentivo basato su controlli a prefissate scadenze temporali ad un sistema di interventi effettuati 'a richiesta' in base alle effettive condizioni strutturali con conseguente riduzione dei costi e aumento della sicurezza e dell'efficienza.

Il monitoraggio strutturale in zona sismica può avere, oltre a questi, vantaggi che derivano dalla specificità dell'azione sismica e delle sue possibili conseguenze sulle strutture. Innanzitutto la disponibilità di risposte registrate su una struttura reale costituisce un ausilio di importanza fondamentale sia per l'avanzamento delle conoscenze relative al comportamento delle strutture sotto azioni sismiche di forti intensità, sia per la calibrazione di modelli numerici che ne possano riprodurre in maniera realistica e affidabile il comportamento e possano essere utilizzati per la formulazione di diagnosi relative alle cause di eventuali danni.

Negli ultimi anni, grazie alle innovazioni nel campo dei sensori di misura e delle tecniche di trasmissione dei dati, si sta sviluppando un altro importante utilizzo dei sistemi di monitoraggio sismico permanente che consiste nella possibilità di individuare rapidamente la presenza di danni in una struttura colpita da un evento sismico. Questo può essere di importanza 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 riparazione e/o di consolidamento delle strutture danneggiate. In genere tale valutazione viene condotta da tecnici mediante metodi tradizionali basati essenzialmente sull'ispezione visiva che richiedono tempi piuttosto lunghi per il censimento dell'intera zona colpita dal sisma ed inoltre conducono a valutazioni in genere conservative, sicuramente a vantaggio della sicurezza ma non dei costi. Una riduzione dei tempi di intervento e quindi dei costi legati, da un lato, al mancato utilizzo della struttura, dall'altro ai pericoli connessi al suo utilizzo qualora i danni non vengano individuati tempestivamente, può essere ottenuta sviluppando una metodologia in grado di individuare rapidamente ed automaticamente eventuali danni sulla base di misurazioni ricavate da una rete di sensori collocata permanentemente sulla struttura.

Negli Stati Uniti, il monitoraggio sismico strutturale ha ricevuto una notevole spinta a seguito del terremoto di Northridge del 1994 durante il quale si verificarono numerose rotture fragili delle saldature nei nodi trave-colonna di telai in acciaio. In molti edifici queste rotture, pur causando riduzioni di resistenza e di rigidità localizzate, non produssero danni evidenti ad elementi secondari, dai quali generalmente si ha evidenza del danno ad elementi strutturali non visibili. Questo determinò, per le ispezioni degli edifici potenzialmente interessati da questo tipo di danni connessioni, dei costi altissimi variabili tra qualche centinaio e mille dollari per connessione [8], dovuti oltre che al numero elevato di connessioni presenti, alla necessità di rimuovere pareti di tamponamento e protezioni antincendio di amianto per portare alla luce le connessioni e verificarne l'integrità.

Oltre che per l'individuazione dei danni a valle di un evento sismico, i sistemi di monitoraggio permanente possono essere utilizzati congiuntamente a quelli di monitoraggio sismico del territorio per la realizzazione di sistemi di allarme sismico precoce ("early warning") al fine incrementare la capacità di protezione sismica [25]. Il sistema di monitoraggio strutturale consente di costruire un modello calibrato e aggiornato della struttura utilizzando il quale individuare, per un dato evento sismico, le sedi potenziali di danneggiamenti e, sulla base delle informazioni fornite dal sistema di allarme precoce, costituire un supporto ai sistemi automatici di allerta per l'adozione delle contromisure necessarie come evacuazione di un edificio o spegnimento di impianti potenzialmente critici.

I vari gruppi di ricerca che si occupano di monitoraggio strutturale hanno dedicato parecchi sforzi all'individuazione di tecniche e strumenti in grado di migliorare sia l'affidabilità sia l'efficienza dei sistemi di monitoraggio attraverso soluzioni che incrementino le prestazioni dei vari componenti del sistema.

Schematicamente un sistema di monitoraggio permanente è costituito da quattro elementi rappresentati in Figura 1.

- una rete di sensori di vario tipo collocati permanentemente su una struttura e in grado di rilevare sia la risposta strutturale alle sollecitazioni esterne, sia le grandezze ambientali che possano influire su di essa;
- un sistema di raccolta e trasmissione dei dati che può operare mediante sistemi cablati o no;
- una procedura per l'analisi dei dati finalizzata alla diagnosi strutturale;
- un sistema decisionale e di allerta per la gestione di situazioni di emergenza.



Figura 1. Schema di un sistema di monitoraggio e allerta sismico

1 RETI DI SENSORI

Il tipo e la densità della strumentazione che costituisce un sistema di monitoraggio sismico dipendono dall'obiettivo del sistema stesso ed dal dettaglio con cui si vuole indagare il comportamento della struttura.

Tradizionalmente le risposte sismiche della struttura sono misurate mediante accelerometri in grado di registrare in uno o più punti significativi della struttura le tre componenti di accelerazione: due nel piano orizzontale e una verticale. Qualora l'obiettivo del monitoraggio sia quello di determinare a vari livelli di un edificio l'amplificazione del moto alla base al fine, ad esempio di verificare i metodi di progetto, un numero limitato di strumenti a livelli significativi di un edificio può fornire le informazioni necessarie. Le norme statunitensi (UBC-1997) raccomandano che ai fini del monitoraggio di un edificio di più di 10 piani sia previsto un numero minimo di 3 accelerometri triassiali collocati lungo l'altezza (Figura 2a). Tale distribuzione non consente però di rilevare tutti contributi dominanti la risposta sismica come ad esempio i moti torsionali oppure le rotazioni alla base dovute all'interazione terreno-struttura e che sono invece rilevabili mediante una strumentazione più estesa del tipo in Figura 2b.

Le misure di accelerazione sono molto utili per l'identificazione dei parametri rappresentativi del comportamento strutturale o per la verifica dei metodi di progetto tramite il calcolo dei valori di amplificazione del moto del suolo. Tuttavia misure in termini di spostamento consentono una stima rapida di grandezza strettamente correlate ad eventuali danni subiti dalla struttura durante un evento sismico violento. L'andamento temporale degli spostamenti può essere ottenuto mediante doppia integrazione dei segnali accelerometrici però tale procedura deve essere preceduta da un opportuno e accurato trattamento dei dati registrati al fine di eliminare potenziali sorgenti di errore dovute ad esempio alla presenza di rumore [3].

In alternativa, per strutture che si sviluppano principalmente in pianta come ponti di grande luce, si è diffuso recentemente l'utilizzo del GPS che però nel caso degli edifici può misurare gli spostamenti dell'ultimo piano ma non gli spostamenti di interpiano.

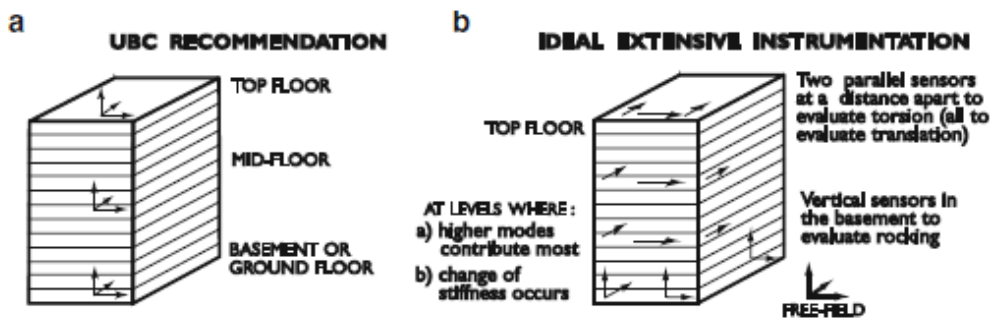


Figura 2. Schemi di collocazione dei sensori per il monitoraggio sismico. (da [3])

Per quanto riguarda la densità degli strumenti necessari, qualunque sia il sistema adottato per misurare la risposta strutturale, il dettaglio con cui questa può essere descritta dai dati registrati è strettamente connesso con il numero di sensori utilizzati e questo ha particolare importanza nel caso in cui l'obiettivo del sistema di monitoraggio sia quello di diagnosticare lo stato di salute della struttura.

A tale proposito i metodi proposti in letteratura si dividono, secondo la classificazione proposta da Rytter [18]:

- metodi di livello 1: identificazione della presenza del danno
- metodi di livello 2: identificazione della posizione del danno
- metodi di livello 3: identificazione della severità del danno
- metodi di livello 4: previsione della vita di servizio residua della struttura

A rigore mentre i le prime tre famiglie di metodi corrispondono effettivamente a livelli diversi di approfondimento della diagnosi, il quarto riguarda più strettamente la prognosi ossia la previsione del comportamento futuro della struttura. Si tratta comunque di un livello di conoscenza più approfondito dei precedenti nel senso che la prognosi viene effettuata a valle di una diagnosi sullo stato attuale della struttura e in questo senso è da intendersi la collocazione di tali metodi come ulteriore affinamento delle procedure di diagnosi.

Nelle applicazioni di monitoraggio sismico strutturale, le informazioni relative alla vita residua possono essere utili, nel periodo di emergenza immediatamente successivo al sisma, per stabilire una gerarchia degli interventi privilegiando le strutture che durante il sisma hanno subito un danneggiamento più modesto di altre ma che sono più prossime alle condizioni ultime e sulle quali repliche anche di modesta entità potrebbero condurre al collasso. Valutazioni di questo tipo possono essere condotte in termini statistici sulla base della probabilità di occorrenza di repliche di una data intensità e della severità del danno indotto dalla scossa principale sulla struttura valutata mediante un metodo di livello 3 che, in tempo reale, fornisca informazioni sullo stato attuale della struttura.

A ciascuno dei quattro livelli di approfondimento corrispondono approcci diversi al problema così come requisiti diversi della rete di sensori da collocare sulla struttura monitorata. In letteratura sono stati proposti numerosi metodi di livello 1 e 2 mentre sono più limitati metodi che consentano di stimare anche la severità del danno. I metodi prognostici sono ancora ad un livello embrionale e

limitati al campo delle strutture industriali, soprattutto aeronautiche.

Nel caso in cui sia sufficiente identificare se la struttura si è danneggiata durante un certo evento sismico, ossia se esibisce variazioni rispetto ad uno stato di fatto precedente (livello 1) è sufficiente effettuare il confronto tra i valori assunti da un parametro legato al danno prima e dopo l'evento potenzialmente causa di danno. A tale scopo si utilizzano ad esempio le frequenze proprie dei primi modi di vibrazione della struttura che possono essere stimate utilizzando un numero molto limitato di sensori. In molti casi sono sufficienti due sensori collocati alla base e in sommità di un edificio. Ciò può essere molto utile nei casi in cui si debba monitorare non una sola ma un gruppo di strutture con un modesto impegno economico e quindi si disponga di un numero limitato di sensori [15], [16]. In Figura 3 è riportata l'evoluzione della frequenza propria di un edificio in muratura al progredire del danno prodotto da sismi di intensità crescente simulati mediante tavola vibrante. I risultati in figura sono stati ottenuti dalle funzioni di trasferimento rispetto alla base calcolate dalla risposta misurata dall'accelerometro A2 (posto sul lato corto in posizione centrale al secondo piano). Durante le prime 3 eccitazioni, causa di modesti danni all'edificio, si è avuta una modesta riduzione della frequenza propria e una riduzione percentualmente più marcata dell'ampiezza. Durante la scossa di maggiore intensità che ha invece danneggiato notevolmente il modello, la variazione della frequenza propria diventa molto marcata mentre l'ampiezza rimane ai livelli confrontabili con quelli della scossa precedente.

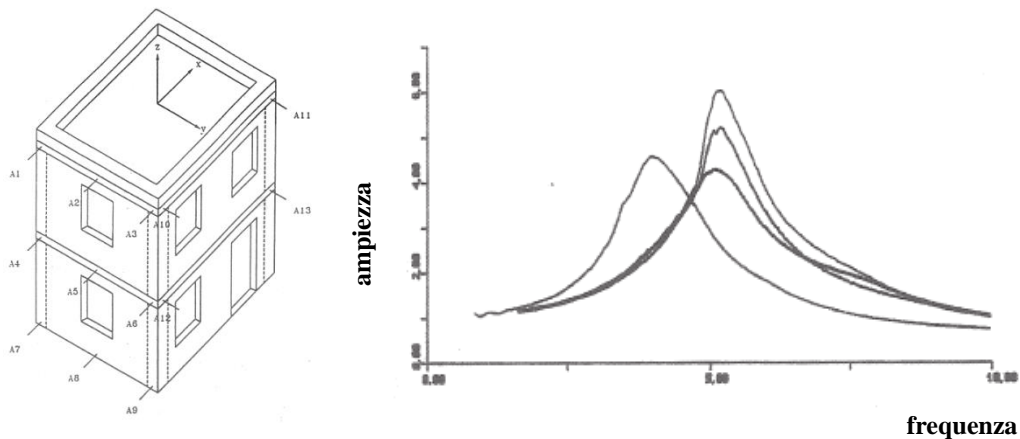


Figura 3. Evoluzione della frequenza propria del primo modo al progredire del danno per un edificio in muratura (da [11])

L'identificazione della posizione del danno richiede invece una rete di sensori più densa che consenta una stima dei parametri legati al comportamento locale della struttura. Con lo sviluppo dei sistemi di acquisizione e trasmissione dati si può prevedere che il costo di un sistema di monitoraggio molto diffuso (ad esempio con accelerometri a tutti i piani di un edificio alto) diventi sostenibile e consenta quindi un rilevamento in tempo reale e affidabile della corretta posizione di un eventuale danno a valle di un evento sismico.

A titolo di esempio in Figura 4 sono riportati i risultati forniti dall'applicazione di un metodo di localizzazione del danno [13] all'edificio Factor Building situato nel Campus dell'Università della California a Los Angeles e dotato di una rete di sensori molto densa. In ascisse è riportato l'indice di danno IDI (Interpolation Damage Index) e in ordinate i piani dell'edificio; la corretta posizione del danno è individuata dalla zona campita in azzurro. In corrispondenza di tale zona il parametro di danno assume valore massimo consentendo una rapida individuazione della zona danneggiata la cui collocazione è tanto più evidente quanto maggiore è la severità del danno, con la quale cresce

il valore dell'indice di danno. Per questo edificio quindi la rete di sensori, costituita da accelerometri collocati a tutti i piani dell'edificio, consente un'individuazione molto precisa del livello in corrispondenza del quale si verificano riduzioni anche modeste di rigidità.

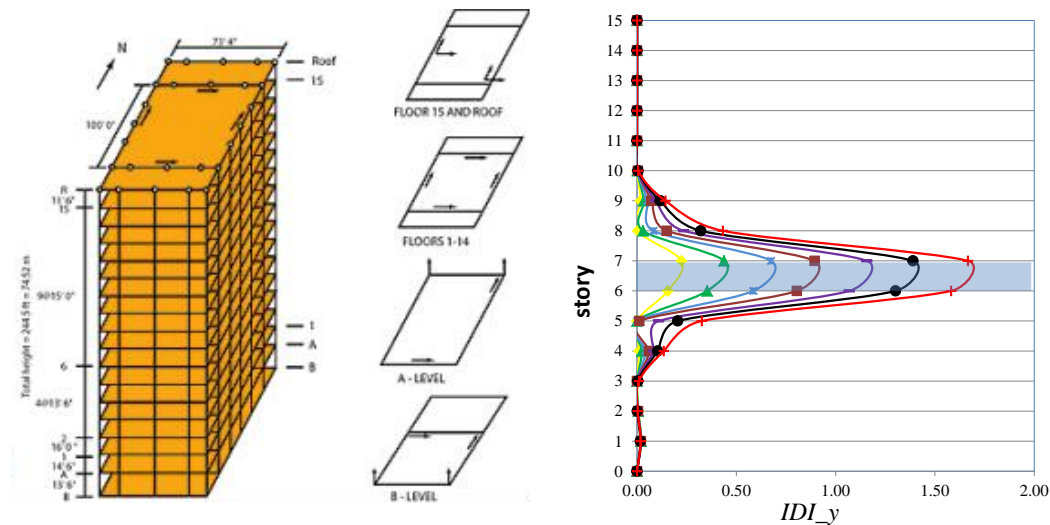


Figura 4. Localizzazione del danno in un edificio multipiano densamente strumentato (da [13])

I metodi di livello 3 proposti in letteratura effettuano la stima della severità del danno utilizzando in generale un modello numerico calibrato sulla base dei dati registrati sulla struttura che consente di passare dai valori stimati dei parametri di danno all'entità delle riduzioni di rigidità nei singoli elementi strutturali. Ciò rende poco praticabile la possibilità di ottenere in tempo reale, a valle di un terremoto, informazioni circa la severità del danno occorso nell'edificio strumentato. A tale scopo sarebbe molto utile, ed è attualmente oggetto di studio, l'individuazione di parametri di danno identificabili sulla base dei dati registrati e il cui valore fosse correlabile alle rigidità dei singoli elementi strutturali o di porzioni della struttura.

Infine la previsione della vita residua connessa con l'utilizzo dei metodi di livello 4, richiede una conoscenza più approfondita delle cause del danno e una modellazione più dettagliata che consentano di prognosticare e modellare l'evoluzione del comportamento strutturale sulla base di: a) ipotesi circa le future azioni sulla struttura; b) modellazione accurata del o dei fenomeni che inducono lo stato di danno; c) stato di salute attuale della struttura. Questo richiede che oltre ai sensori che misurano la risposta a vibrazioni per individuare possibili variazioni di rigidità, si utilizzino sensori forniscano informazioni sulla resistenza residua della struttura e altri che rilevino le condizioni atmosferiche – variazioni di temperatura o di umidità ad esempio - o operative legate all'utilizzo della struttura (per esempio le masse legate al passaggio di veicoli nel caso di ponti) necessarie per una previsione ragionevole delle azioni future sulla struttura.

2 SISTEMI DI RACCOLTA E TRASMISSIONE DEI DATI

Un dibattito molto attuale sia dal punto di vista della ricerca sia da quello delle applicazioni pratiche è relativo alla scelta tra sistemi tradizionali di sensori cablati (wired) e sistemi non cablati (wireless) che, grazie allo sviluppo dei sistemi di trasmissione di dati, nell'ultimo decennio hanno conosciuto un notevole sviluppo. A ciascuno dei due tipi di sistemi, cablati e non, sono associati

vantaggi e svantaggi che ne guidano la scelta per le diverse applicazioni. Nel primo caso il cablaggio incide in maniera non secondaria sui costi del sistema di monitoraggio che può risultare particolarmente oneroso sia per la necessità di proteggere i cavi dall'ambiente esterno mediante alloggiamenti appositi sia in termini di ingombro dei cavi. Per i sistemi cablati invece non costituiscono un problema né l'alimentazione dei sensori, né la sincronizzazione delle risposte registrate che, al contrario, influiscono notevolmente sull'efficienza delle reti wireless e sono state oggetto di numerosi studi nell'ultimo decennio [14].

Allo scopo di ridurre il consumo di energia dei sensori wireless sono stati progettati sensori 'multifunzione' dotati, oltre che di una unità per l'acquisizione e di modulo per la trasmissione dei dati, anche di un microprocessore che consente un'analisi in locale. La presenza dell'unità per l'analisi dei dati consente di trasmettere solo i risultati delle elaborazioni invece delle storie temporali registrate con notevole risparmio delle batterie dei sensori. Inoltre i dati non vengono trasmessi con continuità ma solo su richiesta o al superamento di una soglia consentendo al sensore di rimanere in stand by per il resto del tempo. Un'altra strada perseguibile per il risparmio delle batterie dei sensori, nel caso in cui sia necessario trasmettere i dati grezzi è quella dell'invio di dati compressi la cui efficienza è strettamente legata a quella delle tecniche di compressione il cui funzionamento è regolato da un compromesso tra completezza e peso dei dati trasmessi

Un'ulteriore strada che si sta percorrendo per affrontare il problema dell'alimentazione dei sensori risiede nello sviluppo di tecnologie in grado di trasformare l'energia legata alle vibrazioni della struttura in energia elettrica per l'alimentazione dei sensori wireless. Una di queste tecnologie è basata ad esempio su materiali piezoelettrici cui la struttura cristallina consente di trasformare l'energia meccanica di deformazione in carica elettrica [21].

Un secondo aspetto delicato, connesso all'utilizzo di sensori non cablati, risiede nella necessità di sincronizzare i dati registrati da sensori diversi collocati in postazioni differenti. Le risposte registrate sulla struttura devono essere riferite ad una scala temporale comune affinché l'analisi delle registrazioni effettuate in posizioni differenti della struttura sia significativa. A tale scopo sono state messe a punto tecniche che consentono di portare gli errori di sincronizzazione al di sotto del ms, basate sull'invio di un segnale, al ricevimento del quale tutti i sensori della rete portano a zero un orologio interno che deve essere ri-sincronizzato di frequente per evitare perdite di precisione [14].

3 METODI PER LA DIAGNOSI STRUTTURALE

Il cuore di un sistema di monitoraggio risiede nelle procedure utilizzate per l'interpretazione dei dati registrati al fine della diagnosi di un eventuale stato di danno. In letteratura negli ultimi 30 anni sono stati proposti a questo scopo numerosissimi metodi che possono essere classificati in due grandi categorie: metodi basati su un modello fisico della struttura ad elementi finiti della struttura, validato e aggiornato sulla base dei parametri che governano il comportamento dinamico globale e locale della struttura. Metodi di questa categoria sono indubbiamente più impegnativi da un punto di vista computazionale rispetto agli altri ma consentono, se il modello è affidabile, la simulazione della risposta strutturale sotto condizioni di carico diverse da quelle effettivamente registrate e/o la simulazione degli effetti di eventuali modifiche apportate alla struttura quali interventi di miglioramento di vario tipo. Ciò non è in generale possibile con i metodi basati sull'identificazione di parametri di danno dalle risposte registrate sulla struttura che però, a loro volta, presentano l'indubbio vantaggio di una maggiore rapidità nell'elaborazione dei dati e quindi la possibilità di essere impiegati per valutazioni in tempo reale dello stato strutturale, non praticabili qualora la diagnosi richieda la calibrazione di un modello numerico.

Peraltro i due approcci al problema possono e devono essere combinati per diagnosi più

approfondite che comprendano valutazioni della severità del danno o per effettuare una prognosi del futuro comportamento strutturale sulla base dello stato attuale della struttura.

Una larghissima parte dei metodi di identificazione di parametri di danno è basata sull'utilizzo di frequenze proprie [2], [4], [5], coefficienti di smorzamento [4], forme modali [1], curvatura modale [17], derivate delle forme modali [9], energia di deformazione modale [10] ossia su parametri modali o funzioni di questi. L'inconveniente legato a tali parametri, ed in particolare alle frequenze proprie, risiede nella loro dipendenza da parametri ambientali come la temperatura o l'umidità che possono provocare variazioni non correlate con il danno, costituendo una possibile fonte di errore nelle procedure diagnostiche. I valori degli altri parametri, coefficienti di smorzamento e forme modali, sono maggiormente influenzati del rumore presente nei dati registrati e quindi, indipendentemente dalle condizioni ambientali, in genere hanno un'affidabilità di gran lunga inferiore a quella delle frequenze proprie. Questo naturalmente limita la confidenza nelle diagnosi fornite dai metodi che utilizzano questi parametri e le rendono dipendenti dalla qualità dei dati registrati. Al fine di superare tali inconvenienti sono stati proposti metodi di identificazione del danno che non richiedono la stima dei parametri modali. Alcuni di questi sono basati sull'utilizzo di modellazioni matematiche delle storie temporali di accelerazione [22] e spesso risultano poco attraenti per le applicazioni civili essendo basati su parametri non direttamente legati ad un preciso significato fisico che ne rende difficoltosa l'interpretazione. Altri metodi sono basati sull'utilizzo delle Funzioni Risposta in Frequenza [12], [19], [20] che, oltre a non richiedere la stima dei parametri modali hanno l'ulteriore vantaggio di considerare l'intero ambito di frequenza della risposta strutturale per il calcolo dei parametri di danno senza scartare (come implicitamente fa il processo di estrazione dei parametri modali) i dati relativi ad ambiti lontani da quelli modali e che invece possono fornire informazioni utili ai fini della valutazione dello stato di danno [20]. I metodi di questo tipo, definiti 'non modali' hanno l'ulteriore pregio di richiedere una minima interazione con un operatore per la stima dei parametri risultando quindi più indicati per sistemi automatici di rilevamento del danno da utilizzare in sistemi di allerta.

4 SISTEMI DI ALLERTA

I sistemi di allerta hanno lo scopo di rilevare e trasmettere l'informazione circa un eventuale stato di danno della struttura in tempi sufficientemente brevi da fornire un ausilio alla gestione degli interventi di emergenza. Data la rapidità con cui tali informazioni devono essere disponibili, il sistema deve funzionare in maniera automatica prescindendo da un intervento umano che, necessariamente, rallenterebbe la procedura.

Un approccio utilizzato frequentemente è basato sulla definizione di un valore di soglia del parametro rappresentativo del danno: al di sopra della soglia si assume che la struttura sia danneggiata. Il valore di soglia è quello cui corrisponde una probabilità, considerata sufficientemente bassa, che la struttura non sia danneggiata (probabilità accettata di falso allarme). L'obiettivo della definizione di una soglia è quello di fissare un valore al superamento del quale, attraverso una procedura automatica, venga comunicato ad una centrale di controllo se la struttura necessita ulteriori ispezioni visive – nel caso sia troppo bassa la probabilità che la struttura non sia danneggiata - oppure se queste possono essere evitate. Naturalmente alla scelta della soglia, effettuata sulla base di considerazioni statistiche, è comunque associato un margine di errore e pertanto la sua definizione deve derivare da un compromesso tra l'esigenza di limitare 'falsi' allarmi che comportano costose ma inutili ispezioni della struttura e l'esigenza di evitare 'mancati' allarmi che possono invece condurre a situazioni di pericolo per gli utilizzatori della struttura e/o a un aggravarsi dei danni a causa di un evento successivo. Tale compromesso in genere viene ricercato come risultato di un'analisi costi/benefici condotta confrontando i costi legati ad interventi non necessari conseguenti ad un falso allarme, ai benefici prodotti dal risparmio

associato all'adozione di interventi per l'evacuazione della costruzione o per il suo rafforzamento al fine di evitare un aggravio dello stato di danno.

5 IL MONITORAGGIO SISMICO IN ITALIA E ALL'ESTERO

Gran parte dei metodi di identificazione del danno proposti in letteratura sono stati verificati solo utilizzando dati simulati mediante modelli numerici o dati sperimentali ricavati da esperimenti su elementi strutturali molto semplici in laboratorio. In realtà una verifica rigorosa dell'affidabilità di un qualunque metodo di identificazione del danno richiederebbe l'utilizzo di dati registrati su strutture reali sui quali influiscono una serie di errori di misura legati all'influenza di parametri ambientali o operativi che difficilmente possono essere riprodotti con un modello ad elementi finiti o durante un esperimento in laboratorio.

Negli ultimi anni l'installazione di reti di monitoraggio sismico su strutture reali in Italia così come all'estero ha ricevuto uno sviluppo piuttosto rilevante e sta aumentando la quantità di dati disponibili per la verifica delle metodologie proposte.

In Italia il monitoraggio permanente della risposta sismica di costruzioni pubbliche - scuole, ospedali, municipi, ponti, dighe è condotto tramite l'Osservatorio sismico delle strutture (OSS) gestito dal Dipartimento della Protezione Civile [7]. Le strutture monitorate sono strumentate mediante accelerometri collegati ad un sistema di allerta che, nel caso di superamento dei valori di soglia definiti in termini di accelerazione, invia un messaggio d'allarme all'elaboratore centrale situato nella sede del Dipartimento della Protezione Civile dove i dati registrati vengono elaborati al fine di stimare grandezze rappresentative del danno - spostamenti di interpiano e/o variazioni delle frequenze proprie - o anche utilizzati per calibrare e aggiornare modelli numerici delle strutture. I rapporti relativi alle strutture monitorate, contenenti i risultati delle elaborazioni sono resi disponibili sul sito del Dipartimento della Protezione Civile [6]. In Figura 5 è riportato a titolo di esempio il rapporto pubblicato sul sito dell'OSS a seguito del terremoto del 20 maggio 2012 e relativo al comportamento durante il terremoto di una delle strutture monitorate.

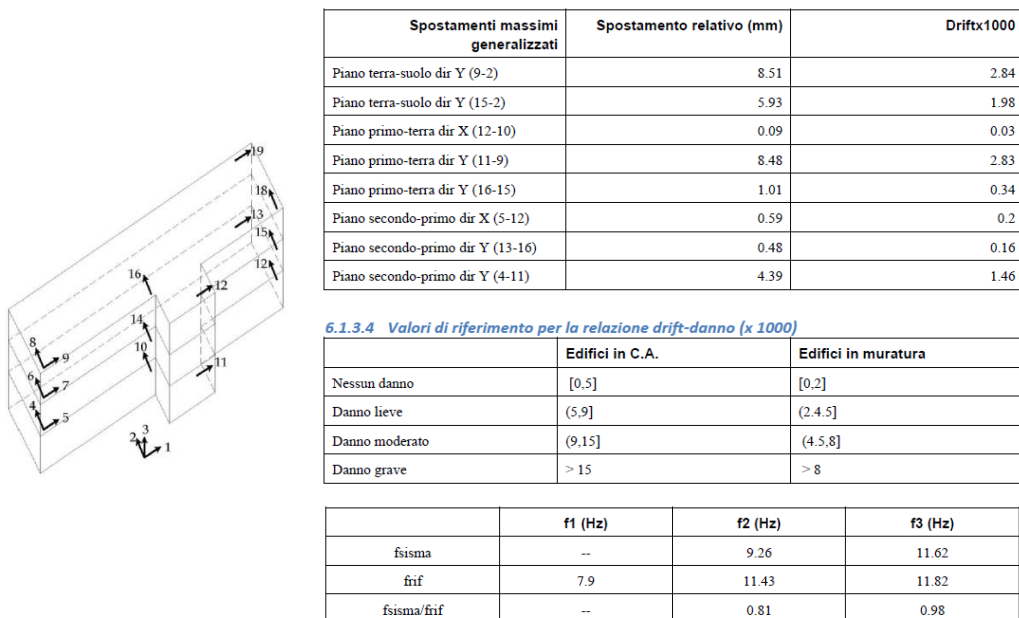


Figura 5. Scuola Media G. Saffi di Forlì (da [6])

Originariamente in Italia, così come in altri paesi del mondo posti in zone ad elevato rischio sismico, i sistemi di monitoraggio sono stati collocati su un certo numero di strutture rappresentative del tessuto edilizio italiano, allo scopo di indagarne più in dettaglio il comportamento durante sismi intensi. L'evoluzione verso sistemi per la diagnosi e per la gestione dell'emergenza sismica in alcune nazioni come gli Stati Uniti e il Giappone e anche l'Italia si è verificata prima che in altre.

In Giappone l'attenzione si è concentrata soprattutto su sistemi di allerta precoce ossia sul monitoraggio di ampie zone geografiche finalizzato alla determinazione, in tempi estremamente ridotti, dell'intensità per la messa in atto di contromisure (rallentare i treni veloci, spegnere impianti potenzialmente pericolosi, ecc) che riducano l'effetto del terremoto.

In Italia a seguito del terremoto verificatosi a L'Aquila nel 2009 il numero delle strutture strumentate dall'OSS è sensibilmente aumentato così come negli Stati Uniti a seguito delle conseguenze del terremoto di Northridge cui si è accennato in precedenza, l'USGS (United States Geological Survey) ha installato nuove reti permanenti di sensori o ha incrementato il numero di strumenti su reti già esistenti, allo scopo di effettuare una diagnosi in tempo reale dopo un evento sismico. Sugli edifici, tendenzialmente, sono stati collocati sensori a tutti i piani allo scopo di valutare parametri correlati al danno come gli spostamenti di interpiano da confrontare con i valori limite. Un esempio della rete di sensori e dell'intero sistema di monitoraggio collocato su una delle strutture strumentate è riportata in Figura 6.

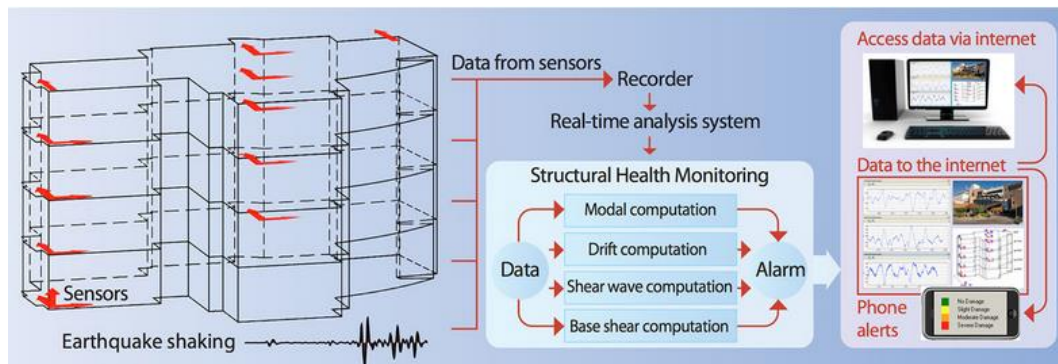


Figura 6. Reti di sensori sul 'UNLV Science and Engineering Building' (da [23])

Un ulteriore sistema di monitoraggio è stato collocato su un edificio di 15 piani situato nel campus di UCLA. Si tratta del Factor Building (Figura 7), un edificio di 17 piani di cui 15 fuori terra, situato nel campus dell'università della California a Los Angeles (UCLA).

Sull'edificio è installata una rete accelerometrica a 72 canali che registra il moto prodotto da vibrazioni ambientali e da piccoli terremoti locali. A ciascun piano la rete è costituita da quattro canali: due in direzione NS e due in direzione EO. verticale. I dati registrati su questo edificio durante terremoti di modesta intensità sono resi liberamente disponibili su un sito dedicato [24] e costituiscono una fonte preziosa e insostituibile per i ricercatori che si occupano di argomenti legati al monitoraggio di strutture reali. Sarebbe auspicabile che per un maggior numero di costruzioni di svariate tipologie i dati ottenuti dai sistemi di monitoraggio durante terremoti reali fossero messi liberamente a disposizione per motivi di studio e ricerca.

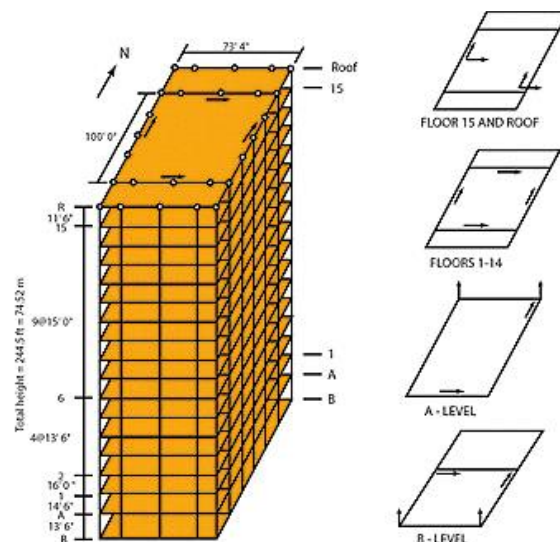


Figura 7. 'UCLA Factor Building' e postazioni di misura (da [24]).

6 CONCLUSIONI

Il monitoraggio sismico delle strutture è riconosciuto come uno degli strumenti più efficaci per la comprensione del comportamento strutturale durante eventi sismici di forte intensità. Inoltre, negli ultimi anni, grazie all'evoluzione della strumentazione di misura e delle tecniche di trasmissione dei dati, l'utilizzo di sistemi di monitoraggio permanente per la gestione dell'emergenza post sismica ha ricevuto notevole attenzione sia da parte del mondo scientifico sia nelle applicazioni già diffuse in alcune nazioni. L'integrazione delle metodologie proposte dal mondo scientifico per l'identificazione del danno prodotto da sismi intensi in sistemi di monitoraggio sismico affidabili ed efficienti costituisce uno degli obiettivi principali sia di ricercatori sia degli utilizzatori di tali sistemi. A tale scopo la disponibilità di registrazioni effettuate su strutture reali durante eventi sismici costituisce sia uno strumento insostituibile per lo studio, la messa a punto e l'affinamento dei metodi di identificazione del danno - la cui affidabilità non avrebbe modo altrimenti di essere controllata - sia l'occasione per la messa in opera di sistemi di allerta che possano ridurre gli effetti del sisma ed essere di ausilio nelle operazioni di ispezione post-sisma.

Bibliografia

- [1] Allemang, R.J. and Brown, D.L. (1982). Correlation coefficient for modal vector analysis. In: *Proceedings, 1st International Modal Analysis Conference*, Orlando, Florida, USA, pp. 110–116.
- [2] Benedetti D., Limongelli M.P. (1998). "A model to estimate the virgin and ultimate effective stiffnesses from the response of a damaged structure to a single earthquake" *Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, 25: 1095–1108. doi: 10.1002/(sici)1096-9845(199610)25:10<1095::aid-eqe603>3.0.co;2-9
- [3] Celebi M. (2013). "Seismic Monitoring of Structures and new Developments" *Earthquakes*

- and Health Monitoring of Civil Structures, M. Garevski (ed.), Springer Environmental Science and Engineering, DOI 10.1007/978-94-007-5182-8_2,
- [4] Celebi M. Comparison of damping in buildings under low amplitude and strong motions. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 1996; 59:309–323.
- [5] Clinton JF, Bradford SC, Heaton TH, Favela J. The observed wander of the natural frequencies in a structure. *Bulletin of the Seismological Society of America* 2006; 96(1):237–257.
- [6] DCP-OSS (2012) Rapporto sulle attività dell'Osservatorio Sismico delle Strutture Agg. 23 Maggio 2012. http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/view_oss.wp?contentId=OSS32628
- [7] Dolce M. (2012) “Qui DPC”. *Progettazione sismica*. 2012 (1)
- [8] Hamburger, R. O. 2000 A policy guide to steel moment-frame construction. *Technical Report No. 354. Washington DC: Federal Emergency Management Agency*.
- [9] Ho Y.K., Ewins D.J. “On the structural damage identification with mode shapes”. *Proc. of the European COST F3 Conference on Structural Identification and Structural Health Monitoring*. Madrid, Spain 2000, 677-686.
- [10] Kim J.T., Stubbs N. “Improved damage identification method based on modal information”. *Journal of Sound and Vibration*. 252(2) (2002) 223-238.
- [11] Limongelli M.P., Pezzoli P. (1994). "Analysis of the seismic response of masonry buildings excited by a shaking table". (1994). *European Earthquake Engineering*, 2, pp. 18-30.
- [12] Limongelli, M.P., (2011). The interpolation damage detection method for frames under seismic excitation. *Journal of Sound and Vibration*, 330. 5474–5489.
- [13] Limongelli, M.P. (2013). “Seismic health monitoring of an instrumented multistorey building using the Interpolation Method” submitted to *Earthquake Engng. Struct. Dyn.*
- [14] Lynch, J. P. (2007). “An overview of wireless structural health monitoring for civil structures” *Phil. Trans. R. Soc. A* (2007) 365, 345–372 doi:10.1098/rsta.2006.1932
- [15] Michel, C., Guéguen, P., El Arem, S., Mazars, J. and Kotronis, P. (2010), Full-scale dynamic response of an RC building under weak seismic motions using earthquake recordings, ambient vibrations and modelling. *Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, 39: 419–441. doi: 10.1002/eqe.948
- [16] Mucciarelli M, Masi A, Gallipoli MR, Harabaglia P, Vona M, Ponzio F, Dolce M. “Analysis of RC building dynamic response and soil-building resonance based on data recorded during a damaging earthquake (Molise, Italy, 2002)”. *Bulletin of Seismological Society of America* 2004; 94(5):1943–1953.
- [17] Pandey, A. K., Biswas, M., and Samman, M. M., 1991, “Damage Detection from Changes in Curvature Mode Shapes”. *Journal of Sound and Vibration*, 145(2) 321–332.
- [18] Rytter, A. (1993). *Vibration based inspection of civil engineering structures*. Ph.D. Dissertation, Department of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University, Denmark.
- [19] Ratcliffe C.P., 2000, “A frequency and curvature based experimental method for locating damage in structures”. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers Journal of Vibration and Acoustics*. 122 324–329.
- [20] Sampaio R.P.C., Maia N.M.M., Silva J.M.M., 1999, “Damage detection using the frequency response function curvature method”. *Journal of Sound and Vibration* 226(5) 1029-1042.
- [21] Sodano, H. A., Park, G. & Inman, D. J. 2003 A review of power harvesting using piezoelectric materials. *Shock Vibration Digest* 36, 197–206. (doi:10.1177/0583102404043275)
- [22] Sohn, H., Farrar, C.R., Hunter, N.F., and Worden, K. (2001) “Structural Health Monitoring Using Statistical Pattern Recognition Techniques,” *ASME Journal of Dynamic Systems*,

Measurement and Control: Special Issue on Identification of Mechanical Systems, Vol. 123, No. 4, pp. 706–711.

[23] USGS <http://earthquake.usgs.gov/monitoring/buildings/unlv.php>

[24] USGS <http://factor.gps.caltech.edu/node/61>

[25] Wu S., Beck J.L. (2012). “Synergistic combination of systems for structural health monitoring and earthquake early warning for structural health prognosis and diagnosis” in *Health Monitoring of Structural and Biological Systems 2012*, edited by Tribikram Kundu, Proc. of SPIE Vol. 8348, 83481Z © 2012 SPIE CCC code: 0277-786X/12/\$18 doi: 10.1117/12.914996.