

Formulazione inversa per verifica strutturale mediante tecniche di acquisizione in campo dinamico.

A.Fiore, G.Porco**

** Dipartimento di Strutture, Facoltà di Ingegneria, Università della Calabria, Arcavacata di Rende (CS), Italy.*

Sommario

Oggi risulta di fondamentale attualità servirsi di tecniche e attrezzature in grado di controllare il comportamento di una struttura sotto sollecitazioni sismiche o cause esterne. In tale contesto è importante avere a disposizione strumenti capaci di valutare la sicurezza in esercizio e di programmare interventi manutentivi efficaci ed economici. Nel presente lavoro si propone una metodologia basata sull'applicazione congiunta del *problema inverso* e dell'analisi sperimentale tramite monitoraggio dinamico attraverso l'analisi di un caso di studio in cui si osservano risultati riguardanti l'*identificazione strutturale* mediante comparazione di dati con tecniche di acquisizione in campo dinamico. La metodologia proposta, economica e di semplice applicazione, è finalizzata ad identificare i requisiti di idoneità statica di strutture preesistenti e di sicurezza nei riguardi delle strutture di nuova realizzazione. La sinergia tra formulazione inversa e indagine sperimentale pone le fondamenta per lo sviluppo di nuovi studi finalizzati all'identificazione del comportamento globale della struttura sotto azioni dinamiche e alla localizzazione del danno strutturale su edifici.

SETTORE: MONITORAGGIO STRUTTURE

1. Introduzione

L'osservazione sperimentale mediante monitoraggio strutturale assume un ruolo centrale nel processo diagnostico in quanto costituisce la base informativa indispensabile per l'individuazione delle cause del dissesto. Tuttavia la conoscenza del comportamento strutturale nelle condizioni di esercizio e durante eccitazioni ambientali è diventata, negli ultimi tempi, la base per l'adozione di misure efficaci in grado di mitigare gli effetti degli eventi eccitanti sulle strutture [11,12] e sull'utenza [1,2,3]. Tali considerazioni mettono in luce come il monitoraggio strutturale sia indispensabile in un gran numero di applicazioni nel campo dell'ingegneria civile quali il progetto (attraverso tecniche di "*model updating*"), la valutazione del danno [10], il rinforzo di strutture esistenti ed il controllo delle strutture durante eccitazioni ambientali. In tutti i campi di applicazione si possono trarre benefici dalla conoscenza del comportamento dinamico della costruzione.

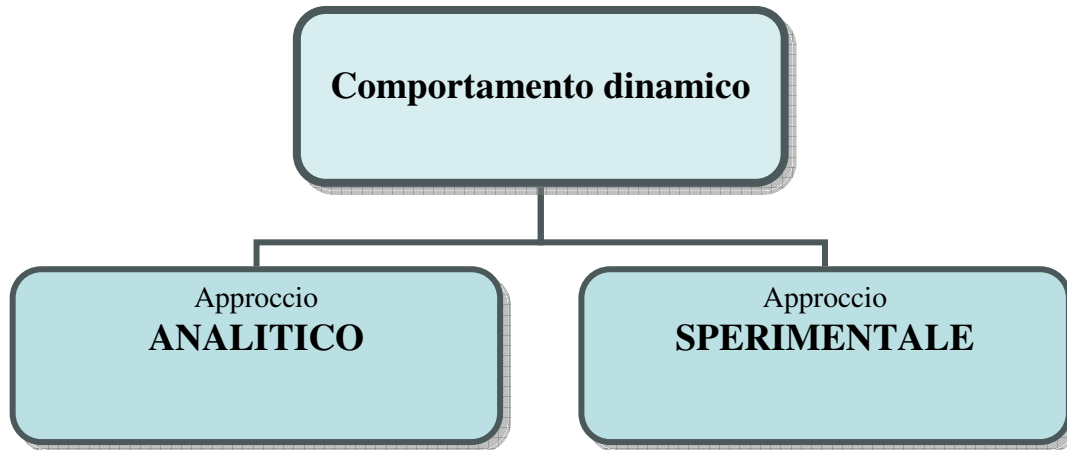
Una tipica architettura dei sistemi di monitoraggio dinamico è basata su sensori periferici direttamente connessi tramite cavi ad un sistema di acquisizione centralizzato [13,15]. Il ruolo di tale sistema è quello di aggregare, immagazzinare ed elaborare una grande mole di dati dinamici costituiti da grandezze variabili a seconda del tipo di sensore utilizzato. Tuttavia, all'aumentare del numero di sensori, un gran numero di misure converge al sistema di acquisizione, soprattutto nel caso in cui esso debba elaborare i dati ai fini dell'identificazione del danno strutturale; i relativi algoritmi, infatti, sono particolarmente onerosi dal punto di vista computazionale.

Un'ulteriore limite relativo al seguente sistema risiede negli elevati costi di installazioni e soprattutto di manutenzione, dovuto in particolar modo all'impiego dei cavi, malgrado l'attuale tendenza dell'utilizzo del sistema wireless di minor costo.

I sistemi di monitoraggio possono quindi, essere usati per creare un database di misure durante l'intero ciclo di vita della struttura ed è evidente l'importanza dell'identificazione dei parametri modali delle strutture nelle condizioni di esercizio e durante eventi sismici: di qui il ruolo fondamentale svolto dall'analisi modale sperimentale. È in questo ambito che con il presente lavoro si vuole proporre una procedura di formulazione inversa finalizzata al confronto tra, la risposta strutturale in termini cinematici di un modello virtuale e quella derivante da un'indagine sperimentale. Tale procedura consentirà di verificare, durante la vita di esercizio e in funzione delle registrazioni effettuate a seguito di eventi sismici, se l'immobile strumentato continua a garantire le prestazioni in termini di sicurezza previsti in fase di progettazione e realizzazione. Questa procedura facilmente standardizzabile potrà costituire una metodologia per il controllo delle affidabilità degli edifici, da estendere sia sul patrimonio edilizio pubblico che privato.

2. Il “problema inverso” o Analisi modale sperimentale

Uno dei principali campi di studio dell'ingegneria civile nell'ambito strutturale è rappresentato dall'analisi del comportamento dinamico delle strutture. La conoscenza di tale comportamento è perseguibile mediante due diversi approcci:



- L'approccio *Analitico*: partendo dalla conoscenza della geometria della struttura, delle condizioni al contorno, delle caratteristiche dei materiali, dalla distribuzione delle masse, rigidità e smorzamento (mediante rappresentazione matriciale) fornisce, risolvendo un problema agli autovalori, parametri modali del sistema (frequenze naturali, fattori di smorzamento e forme modali);
- L'approccio *Sperimentale*: partendo dalla misura dell'input dinamico sulla struttura e della acquisizione della risposta strutturale in termini cinematici, valuta le funzioni di risposta in frequenza e stima a partire da esse, i parametri dinamici della struttura.

Generalizzando, quindi, con l'espressione “*identificazione dinamica*” di una struttura si intendono tutte quelle tecniche, sia analitiche che sperimentali, che consentono di individuare la risposta dinamica della struttura stessa, ovvero le frequenze proprie i relativi modi di vibrazioni e i coefficienti di smorzamento. L'analisi modale sperimentale è nota anche come “**problema inverso**” (in contrapposizione al cosiddetto “problema diretto”, nel quale sono noti l'input, la geometria della struttura e si vuole conoscere la risposta), trattandosi di un problema nel quale sono noti la risposta strutturale e l'input (quindi il fenomeno che causa la risposta) e si vuole conoscere la configurazione di partenza. Il principale motivo di interesse nei riguardi dell'analisi modale sperimentale è legato alla considerazione che il comportamento dinamico di una struttura è una sorta di “impronta digitale” in quanto esso dipende solo dalle sue caratteristiche intrinseche (masse, rigidità ecc...) e non dal tipo e dalla entità del carico applicato: quindi, se non insorgono danni strutturali (modifiche interne al manufatto) il comportamento della struttura rimane inalterato. In caso contrario si avranno delle variazioni di frequenze e dei modi di vibrare. Un altro grande vantaggio si riscontra nel fatto che l'identificazione strutturale mediante

formulazione inversa è una tecnica non distruttiva applicabile sia su strutture nuove che strutture esistenti o storiche.

L'intero processo può essere sinteticamente illustrato:

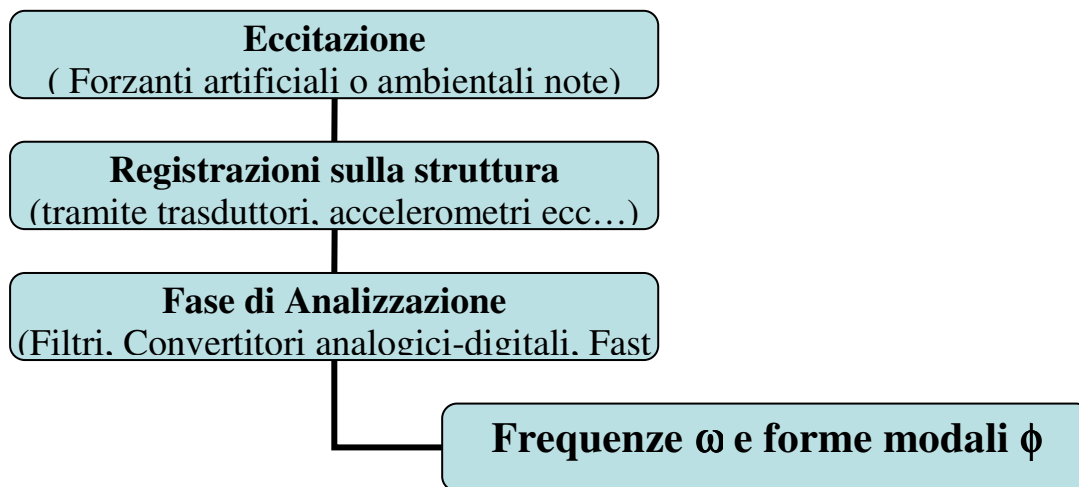


FIGURA 1 – Diagramma di flusso del “problema inverso” o Analisi modale sperimentale

La formulazione inversa per ricavare il comportamento dinamico di una struttura è basata sulle seguenti ipotesi fondamentali:

- **Linearità:** Il comportamento dinamico è lineare, per cui la risposta ad una combinazione di cause eccitanti è uguale alla medesima combinazione delle rispettive risposte. Vale quindi il Principio di sovrapposizione degli effetti.
- **Osservabilità:** I dati necessari per ricavare le caratteristiche dinamiche devono essere facilmente misurate. Da qui si entra in un campo molto vasto inerente la teoria sulla scelta dei punti di misura destinati al posizionamento dei sensori del sistema di monitoraggio.
- **Stazionarietà:** le caratteristiche dinamiche sono indipendenti dal tempo.

Terminata la fase di analizzazione, la valutazione delle frequenze e delle forme modali può essere perseguita tramite tecniche FEM . Le tecniche di analisi modale trovano oggi sempre maggiore applicazione attraverso software dedicati agli elementi finiti, che consentono la realizzazione di modelli virtuali anche molto complessi per analizzare le proprietà statiche e dinamiche delle strutture. Accade spesso però che le proprietà dinamiche calcolate con gli elementi finiti differiscano dalle proprietà reali della struttura. Tale differenza è da imputarsi a varie cause:

- Le masse e le rigidità sono facilmente valutabili in base alla geometria e alle proprietà dei materiali mentre lo smorzamento della struttura all'interno della struttura è estremamente variabile e difficilmente riproponibile virtualmente nel modello.
- Approssimazioni legate all'interazioni con elementi non strutturali.

- La discretizzazione della realtà alla base della teoria agli elementi finiti comporta un'approssimazione dei campi di spostamento a funzioni forma predefinite all'interno di ciascun elemento.

Per colmare la differenza tra struttura reale e modello è necessario ricorrere a tecniche sperimentali al fine di confrontare i risultati del modello virtuale con dati acquisiti sperimentalmente mediante tecniche di monitoraggio dinamico. Tale passaggio fondamentale permette di perfezionare il modello virtuale in modo da renderlo più aderente alla realtà.

La procedura finalizzata al confronto necessita, per il suo sviluppo e applicazione, di una strumentazione così costituita:

- Risposta strutturale acquisita mediante monitoraggio dinamico della struttura sulla base di eccitazioni dinamiche ambientali verificatesi durante il periodo di osservazione.
- Segnale (andamento di spostamenti, velocità o accelerazioni per la durata dell'evento eccitante) e spettro delle accelerazioni di un generico impulso rilevato alla base della struttura in esame.
- Software per analisi strutturale statica e dinamica, lineare e non lineare agli elementi finiti.

Una volta in possesso della gamma di accessori sopra definita è necessario seguire il seguente iter procedurale:

- 1) Discretizzazione, su software agli elementi finiti, dell'edificio soggetto dell'analisi nel pieno rispetto delle caratteristiche fisico-geometriche e dei carichi al fine di ottenere un perfetto modello virtuale della struttura in esame.
- 2) Costruzione del segnale e dello spettro delle accelerazioni dalla lettura dei dati acquisiti da una centralina accelerometrica posta alla quota terreno. Costruzione effettuata mediante restituzione grafica attraverso apposito software decodificatore dei dati rilevati dai sensori.
- 3) Immissione del segnale e dello spettro in modo opportuno all'interno del software e verifica della risposta strutturale del modello virtuale a seguito dell'eccitazione ambientale tradotta.
- 4) Valutazione dei parametri cinematici (spostamenti e accelerazioni) rilevati per ogni nodo strutturale del modello virtuale. In particolare conviene valutare la risposta strutturale in termini di spostamenti, per ogni modo di vibrare e combinazione di carico, al fine di correggere errori di input dedotti da eventuali discrepanze presenti nell'ordine di grandezza dei parametri.
- 5) Confronto delle accelerazioni rilevate nei punti di applicazione dei sensori nell'edificio, a seguito dell'evento registrato, con le accelerazioni calcolate nei nodi (corrispondenti ai punti di applicazione dei sensori) del modello virtuale a seguito dello stesso evento opportunamente simulato.

Se il passo 5 restituisce un esito positivo allora è possibile ritenere che il procedimento sia stato compiuto correttamente.

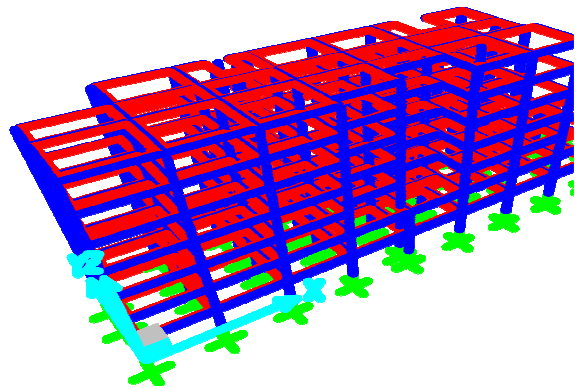
3. Applicazione della formulazione inversa ad un caso reale

La formulazione inversa proposta è stata applicata su un caso di studio costituito da un edificio con ossatura portante in c.a.

Effettuata una sommaria descrizione delle caratteristiche geometriche dell'immobile, nonché del sistema di monitoraggio adottato verranno mostrate delle comparazioni tra le misure sperimentali e quelle derivanti dal modello virtuale opportunamente tarato.

Descrizione dell'edificio

L'edificio oggetto di studio presenta una struttura regolare e compatta che si sviluppa su 6 livelli più una copertura piana. L'ossatura portante è costituita da travi e pilastri in c.a. fondata su travi rovesce. Le dimensioni d'ingombro massime in pianta sono di 58,45 m per 15,35 m, l'altezza dell'edificio è pari a 28,35 m nel punto più alto; la superficie coperta e la cubatura sono rispettivamente pari a circa 830 m² e 16000 m³. I pilastri sono rettangolari ed hanno dimensione variabile da 0,40 x 1,00 m al piano terra (e interrati) a 0,25 x 1,00 m ai piani superiori. Nell'estremità laterale che si sviluppa per due piani i pilastri sono di forma quadrata con dimensione 0,40 x 0,40 m.



Tramite indagine a campione, mediante un'attività di rilievo è stato appurato che i solai sono di tipo latero-cementizio, con spessori variabili di 32,5 e 44,5 cm.

Le tamponature esterne che presentano uno spessore totale medio di 0,40 m sono costituite da due strati di mattoni forati da 8 cm e 12 cm separati da un'intercapedine d'aria di 12 cm.

Nella porzione di edificio esaminata (quella più grande ottenuta dalla separazione attuata da un giunto tecnico) si riscontra la presenza di un unico corpo scala. La scala è compresa tra due setti in c.a di spessore pari a 25 cm, la tipologia è la soletta rampante e i pianerottoli intermedi, costituiti da una soletta in c.a alleggerito, sono a sbalzo al di fuori del filo della facciata.

Il nucleo ascensore, analogamente al corpo scala, è costituito da setti in c.a, con spessore di 25 cm. Si mostra (Fig. 2) la pianta tipo ed una sezione del fabbricato.

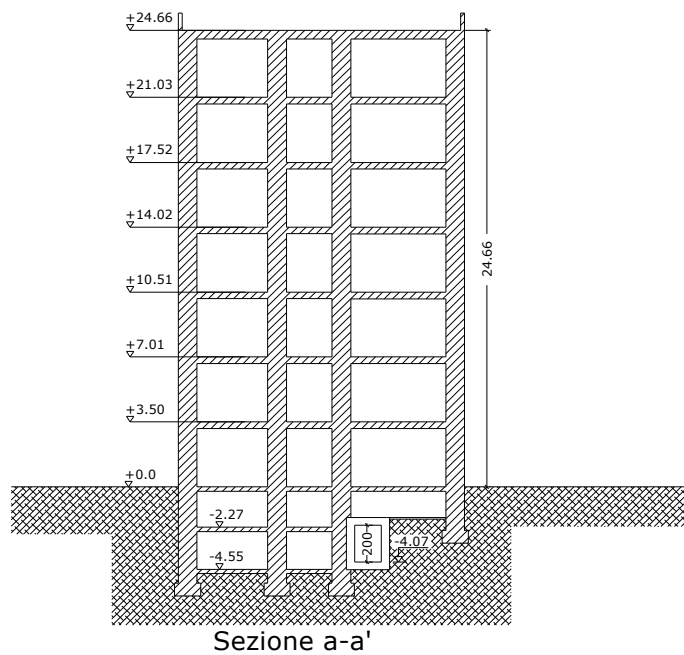
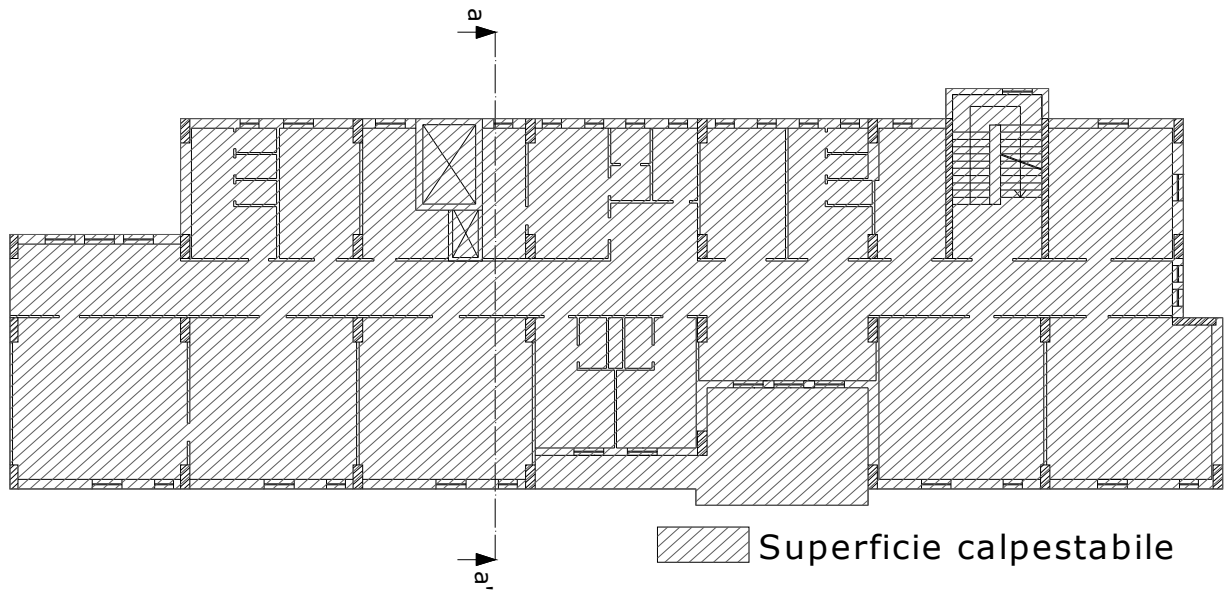


FIGURA 2 – Pianta tipo e sezione

Descrizione del sistema di monitoraggio

Il sistema di monitoraggio installato sull'edificio è costituito da una serie di sensori accelerometrici di tipo mono-, bi- e triassiale opportunamente collegati mediante cavi ad una centrale di acquisizione. I livelli di soglia del sistema di acquisizione sono stati impostati su un valore di 0,001 rilevatosi, per l'edificio oggetto di

osservazione, sufficienti al fine di rilevare eventi anche non imputabili ad azioni sismiche. Il sistema di acquisizione registra eventi ogni qual volta almeno i 2/3 dei sensori accelerometrici superano i livelli di soglia. Ciascun sensore effettua una misurazione per intervallo di tempo, impostato, nel nostro caso, pari a 0,04 sec. Di seguito viene mostrata (fig.3) la collocazione nel piano tipo dei sensori accelerometrici e il collegamento in verticale con la centrale di acquisizione dati.

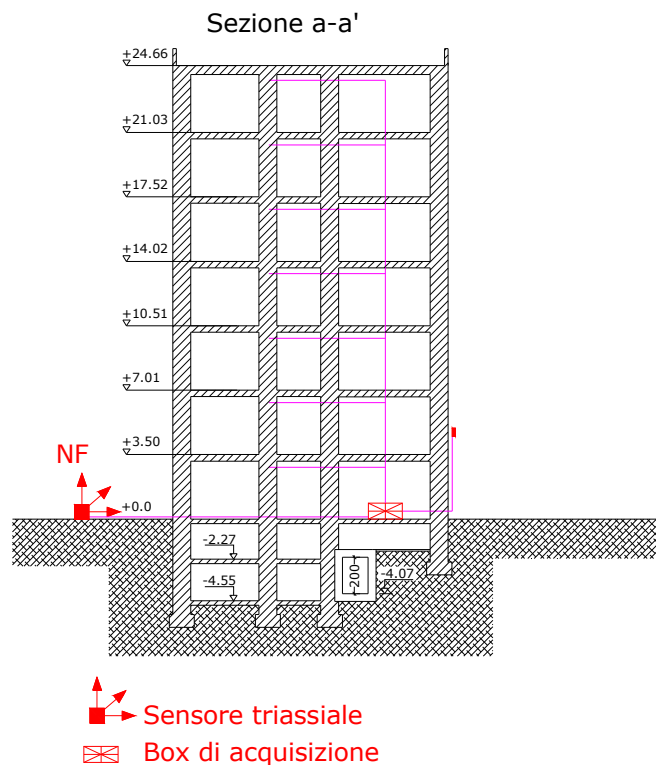
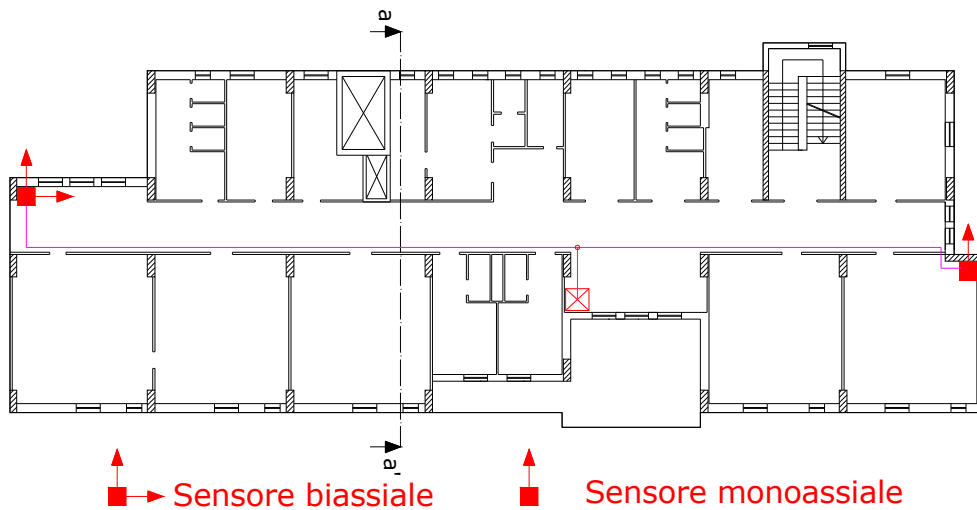


FIGURA 3 – Posizione sensori nel piano e collegamento in verticale

Modellazione della struttura

Al fine di creare un modello virtuale della struttura il più possibile aderente alla struttura reale, la modellazione è stata effettuata rappresentando le caratteristiche della struttura con un livello di dettaglio tale da tenere in conto effetti generalmente considerati secondari, ma che possono nelle condizioni attuali, contribuire in modo non trascurabile alla risposta dinamica dell'edificio. Nella costruzione del modello su software sono state assunte alcune approssimazioni:

- Sono stati trascurati, ai fini della risposta strutturale, i contributi derivanti dai piani interrati in quanto confinati lateralmente dal terreno.
- L'interazione suolo-struttura è stata imposta al piano terra vincolando le estremità dei pilastri con dei vincoli d'incastro perfetto.
- I solai latero-cementizi sono stati modellati mediante elementi "shell" (con spessore equivalente a quello reale) considerando un comportamento di impalcato infinitamente rigido nel proprio piano di appartenenza.
- L'incidenza delle tamponature esterne sul comportamento globale è stata valutata come carico per metro lineare sulle travi perimetrali esterne. Il carico dovuto alle tamponature è stato moltiplicato per un opportuno coefficiente di riduzione (pari al rapporto tra l'area della superficie finestrata e l'area della superficie di tamponatura considerata senza finestre) che tiene conto della presenza delle aperture nelle stesse.

Durante il periodo di osservazione è stato registrato un evento sismico significativo di magnitudo 3,7 poco distante in linea d'aria dall'ubicazione del fabbricato. I sensori accelerometrici installati sulla struttura hanno rilevato il fenomeno e trasformato l'eccitazione in accelerazioni.

Costruito lo spettro delle accelerazioni per la centralina NF posta al piano terra si è potuto simulare, all'interno del software, con il modello virtuale costruito, l'evento registrato sperimentalmente.

Al fine di effettuare un confronto tra la media delle accelerazioni registrate dai sensori (per un periodo di durata dell'evento di 2 sec.) e le accelerazioni calcolate per il modello virtuale nei punti d'installazione delle centraline accelerometriche (Tab.1). Osserviamo in modo diretto che il valore delle accelerazioni dal modello virtuale sono maggiori rispetto a quelle reali, come era auspicabile a seguito delle approssimazioni e delle riflessioni effettuate in precedenza.

Stazione accelerometrica	Accelerazioni sperimentali (m/s ²)	Accelerazioni modello agli EF (m/s ²)	Variazioni (%)	Ubicazione sensore
A1-x	0,00777	0,00804	3,36	Piano terra
A1-y	0,00612	0,00646	5,26	Piano terra
A2-y	0,00657	0,00739	11,10	Piano terra
A3-x	0,00513	0,00585	12,31	Piano
A3-y	0,00595	0,00716	16,90	Piano
A4-y	0,00107	0,00121	11,57	Piano
A5-y	0,01979	0,01992	0,65	Piano
A6-x	0,00638	0,00773	17,46	Piano
A6-y	0,01296	0,01589	18,44	Piano
A7-y	0,00787	0,00918	14,27	Piano
A8-x	0,00543	0,00592	8,28	Piano terzo
A8-y	0,00554	0,00701	20,97	Piano terzo
A9-y	0,0173	0,02143	19,27	Piano terzo
A10-x	0,00305	0,00338	9,76	Piano
A10-y	0,00952	0,01044	8,81	Piano
A11-y	0,00655	0,00795	17,61	Piano
A12-x	0,02065	0,02581	19,99	Piano
A12-y	0,00235	0,00238	1,26	Piano
A13-y	0,01193	0,01567	23,87	Piano
A14-x	0,0131	0,01481	11,55	Piano sesto
A14-y	0,01205	0,01569	23,20	Piano sesto
A14-z	0,01074	0,01102	2,54	Piano sesto
A15-y	0,00598	0,00714	16,25	Piano sesto
A16-z	0,00183	0,00234	21,79	Piano sesto
A17-y	0,00304	0,00375	18,93	Piano sesto
A18-z	0,02719	0,03516	22,67	Piano sesto

TABELLA 1 – Confronto tra valori delle accelerazioni reali e sperimentali.

Inoltre risulta evidente che le accelerazioni dei nodi, determinate mediante il modello virtuale, siano del tutto sovrapponibili come ordine di grandezza a quelle dedotte dalla indagine sperimentale. Ancora, per la maggior parte dei punti di misura risulta una sovrastima del dato cercato. Ciò va senza dubbio a vantaggio di sicurezza per la verifica di idoneità statica. Per quanto si attiene alle variazioni numeriche

percentuali, per la maggioranza dei punti di misura, esse risultano minori del 20%; limite ritenuto accettabili per le grandezze oggetto di misurazione. Tali variazioni percentuali sono in parte riferibili alle approssimazioni adottate per la costruzione del modello virtuale e all'adozione degli elementi finiti.

La standardizzazione del modello permetterà, pertanto il confronto, per eventi sismici simili, delle grandezze cinematiche misurate; eventuali differenze tra i valori rappresenteranno una variazione dello stato di consistenza della struttura con conseguente diminuzione dell'affidabilità strutturale nei riguardi di eventi sismici.

Conclusioni

Nel seguente lavoro è stata proposta una metodologia basata sull'applicazione congiunta del “*problema inverso*” e dell'analisi sperimentale mediante la quale è possibile riprodurre il comportamento strutturale reale a seguito di eccitazioni random. L'identificazione strutturale è perseguibile sia per le strutture esistenti sia per le strutture di nuova realizzazione. Per le costruzioni esistenti la procedura consente di valutare la presenza di differenze comportamentali in campo dinamico per eventi di uguale intensità che sono il sintomo di un peggioramento dello stato di consistenza. Per le strutture di nuova realizzazione la metodologia rappresenta, in fase di progettazione, un potente strumento per la verifica dell'affidabilità nei riguardi delle azioni dinamiche, consentendo l'adozione di soluzioni tecnico-strutturali finalizzate al soddisfacimento dei requisiti di idoneità sismica per le membrature e di comfort per l'utenza, secondo le vigenti normative in materia.

La metodologia descritta, alla luce ed in forza della sperimentazione condotta, costituisce un efficace strumento che consente: di indirizzare al tipo di intervento manutentivo globale più adatto, ad eliminare le differenze dinamiche riscontrate nel tempo, di isolare anomalie comportamentali locali e di porre le basi per lo sviluppo di procedure miranti alla localizzazione del danno strutturale di edifici esistenti e di nuova realizzazione.

Bibliografia

- [1]. UNI 9916 - *Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici*. Milano 1991.
- [2]. ISO 4866 - *Vibrazioni meccaniche e urti - Vibrazioni di edifici - Guida per la misura di vibrazioni e valutazioni dei loro effetti sugli edifici*. Milano 1991
- [3]. DIN 4150 - *Vibrazioni negli edifici; principi e misurazione dell'ampiezza di oscillazioni*. Berlino 1975
- [4]. D.M. Min. LL.PP. 16/1/1996 - *Norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche*. Roma 1996.
- [5]. R. Clough, J. Penzien - *Dynamics of structures* McGraw-Hill International edition 1993.
- [6]. R. Giacchetti, S. Bufarini, V. D'aria - *Il controllo strutturale degli edifici in cemento armato e muratura*, EPC Libri s.r.l., Roma 2005.
- [7]. C. Gavarini - *Dinamica delle strutture*, ESA Roma 1977.

- [8]. R. Muscolino - *Dinamica delle strutture*, McGraw-Hill Libri Italia s.r.l. Milano 2005
- [9]. Ma Ge , E. Lui - *Identification using system dynamics*, Computer & Structures 83 (2005) 2185-2196.
- [10]. L. Binda, A. Saisi - *Il ruolo delle indagini nella diagnostica strutturale* - DIS Dipartimento ingegneria strutturale, Politecnico di Milano
- [11]. A.L. Materazzi - *Effetti delle vibrazioni di origine ambientale sulle costruzioni civili* - Dipartimento di ingegneria civile e ambientale, Università di Perugia.
- [12]. P. Zanon - *Monitoraggio strutturale della chiesa di San Gaudenzo in Novara.* - Dipartimento di Strutture, Università di Trento.
- [13]. B. Glisic, D. Inaudi, A. Del Grosso, F. Lanata - *Monitoraggio a breve e a lungo termine* - SMARTEC SA & Dipartimento ingegneria strutturale e geotecnica, Genova.
- [14]. *Prove di carico su solai con tecniche di identificazione dinamica* - TECNITER SRL, Centro di ricerche applicate ingegneria civile e industriale.
- [15]. *Monitoraggio di edifici civili e industriali* - Catalogo ESSEBI s.r.l.