



VALUTAZIONE SPERIMENTALE DEL COMPORTAMENTO DINAMICO DI UN EDIFICIO AI FINI DELLA VERIFICA SISMICA

Settimo Martinello
Maurizio Bruson

4 EMME Service S.p.A.

Sommario

Lo sviluppo recente della tecnologia sperimentale permette di ottenere la caratterizzazione dinamica di un edificio senza l'ausilio di forzanti (vibroline, provini a rottura). Questo enorme passo avanti è stato ottenuto con lo sviluppo di particolari terne di sensori, in abbinamento tra accelerometri e velocimetri, con una sensibilità tale da percepire le vibrazioni indotte dal rumore sismico di fondo, anche conosciuto come microtremore.

La caratterizzazione dinamica di un edificio consente la calibrazione del modello numerico attraverso l'individuazione degli input che permettono la migliore aderenza tra risposta teorica e sperimentale. Il modello reale così individuato può essere sollecitato attraverso lo spettro sismico, corrispondente al sito e all'edificio, individuando così gli elementi strutturali che più si avvicinano o superano le sollecitazioni limite.

La memoria presenta un esempio sviluppato su un edificio in calcestruzzo caratterizzato dinamicamente prima e dopo l'inserimento dei tamponamenti. Questa analisi permette di valutare gli effetti sulla rigidità d'insieme provocati dalle masse e dai collegamenti tamponamento-struttura e fornisce delle interessanti indicazioni numeriche, attribuibili ai tamponamenti, sul comportamento dinamico dell'edificio prima, dopo e durante una scossa sismica.

1. Introduzione

E' sempre più frequente la richiesta da parte di amministrazioni e proprietari privati di valutare il comportamento di un edificio a fronte di una scossa sismica, al fine di stimare la capacità di risposta ed eventuali interventi di consolidamento.

Casi tipici sono gli ospedali o edifici scolastici che attirano investimenti anche importanti nell'ottica di un loro adeguamento. Spesso il budget viene messo a disposizione ancora prima di conoscere le effettive necessità dell'edificio, con la presunzione di avere individuato il budget sufficiente sulla base di ragionamenti finanziari.

Si è quindi chiamati, quali sperimentatori, a svolgere delle indagini sui materiali o su singoli elementi strutturali o per l'individuazione delle armature su alcune travi e alcuni nodi, ecc. senza un criterio d'insieme, ma più che altro per fornire delle informazioni utili al professionista incaricato, a crearsi un'idea di massima dello stato di fatto.

Questa impostazione non permette di affrontare con efficacia la progettazione di un consolidamento e corre il rischio di produrre un costo esagerato con interventi su parti di un edificio che, dal punto di vista sismico, non ne abbisognano: sarebbe invece fondamentale intervenire su quegli elementi, generalmente i nodi strutturali, che per primi vanno in crisi.

Va ricordato in questa premessa che tutto il territorio italiano è considerato "sismico" nel senso che ad ogni luogo è stato associato un livello di pericolosità sismica di base: la verifica viene effettuata ricavando da apposite tabelle, riportate in appendice del TU 2008, i valori caratteristici dell'accelerazione e nelle quali l'Italia è stata suddivisa in un reticolo di 10751 punti. Sulla base dell'individuazione geografica dell'edificio, in termini di latitudine e longitudine, se ne ricava l'accelerazione orizzontale massima a_g , massimo fattore di amplificazione dello spettro F_0 ed il periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro T'_c .

Tali parametri, assieme alla scelta della vita nominale, classe d'uso e vita di riferimento, producono le azioni sismiche esplicitate in uno spettro di accelerazioni cui assoggettare l'edificio in esame.

L'analisi sismica prevista nei confronti degli Stati Limite Ultimi, necessità di individuare un modello numerico che sia veramente rappresentativo dell'edificio in esame.

L'approccio pertanto non può prescindere dalla precisa conoscenza delle geometrie dell'edificio, oltre che dai parametri meccanici dei materiali, ed infine necessita, per essere realistico, di individuare dei parametri comportamentali strutturali che possano essere messi a confronto con quelli derivanti dalla modellazione numerica.

In questo senso si è sviluppata una ricerca per valutare la possibilità di ricavare dei parametri modali sperimentali utilizzando dei nuovi tipi di strumenti, chiamati Microsismic, costituiti da terne abbinata di sensori accelerometrici e velocimetri, che consentono il rilievo delle caratteristiche dinamiche dell'edificio senza l'ausilio di forzanti esterne, ma semplicemente leggendo le vibrazioni indotte dal microtremore di fondo.

La presente ricerca ha voluto spingere ulteriormente i suoi obiettivi per valutare l'effetto che i tamponamenti producono sulla rigidità e sul comportamento dinamico di un edificio.

Va infatti considerato che l'effetto dinamico della messa in opera dei tamponamenti è bivalente. La massa, intesa come peso, tende a ridurre le frequenze proprie mentre, per effetto del controventamento prodotto dai tamponamenti stessi e la loro rigidità intrinseca, si manifesta un aumento delle frequenze. Questi due effetti contrapposti vanno valutati con attenzione, in quanto dopo un evento sismico il contributo positivo alla rigidità dei tamponamenti tende bruscamente a diminuire, essendo i primi elementi lesionati, mentre la massa, ovviamente, rimane inalterata.

Ci si troverà così di fronte ad un'eventuale seconda scossa sismica con una rigidità inferiore che, però, deve ancora essere in grado di fornire una valida opposizione alle forze in gioco.

Conoscere il "range" tra frequenze di pura struttura e frequenze di struttura finita (coi tamponamenti) è molto utile per una valutazione della vulnerabilità dopo un terremoto. Ipotizzando infatti di effettuare dei rilievi dinamici dopo un sisma, si dovrebbe individuare se la nuova situazione statica sta a cavallo tra struttura pura e struttura+tamponamenti o se, nel peggiore dei casi, siamo già a valori così bassi che indicano una probabile riduzione della capacità portante della struttura stessa tale da comprometterne l'agibilità.

2. Il comportamento sismico degli edifici

L'Italia è tra i paesi più sismici d'Europa. Solo nell'ultimo secolo si valutano oltre 120.000 vittime e danni economici incalcolabili.

La tabella riporta gli eventi più significativi degli ultimi 30 anni dove si evince che la frequenza media si assesta attorno a 3 anni. ^[1]

Data	Zona	M
21/8/1962	Irpinia	6,2
15/1/1968	Belice	6,1
6/5/1976	Friuli	6,4
15/9/1976	Friuli	6,0
15/4/1978	Golfo di Patti	6,0
19/9/1979	Val Nerina	5,9
23/11/1980	Irpinia	6,9
7/5/1984	Abruzzo	5,9
5/5/1990	Basilicata	5,8
13/12/1990	Augusta	5,7
26/9/1997	Umbria-Marche	6,0
6/9/2002	Palermo	5,8
31/10/2002	Molise	5,7
26/10/2006	L'Aquila	5,9
20/5/2012	Emilia	6,0
29/5/2012	Emilia	5,8

Nell'osservazione dei valori di magnitudo, peraltro un valore complesso con molte sfaccettature, va grossolanamente considerato che ogni 0,2 di magnitudo rappresenta un raddoppio delle accelerazioni, e quindi delle forze, da calcolare.

Vanno preventivamente ricordati alcuni concetti relativamente a quello che è definito come "Rischio sismico". Ricordiamo che:

$$\text{Rischio Sismico} = \text{Pericolosità} \times \text{Valore Esposto} \times \text{Vulnerabilità}$$

dove la Pericolosità è la probabilità che un sito ha di essere epicentrico, il Valore Esposto è il valore intrinseco di persone e cose nell'area e la Vulnerabilità è la potenziale non-resistenza delle strutture alle sollecitazioni sismiche.

Anche il terreno su cui è edificata una struttura ha una grande importanza sugli effetti di un terremoto. Caso tipico è quello della risonanza, cioè della corrispondenza tra frequenza del terreno circostante e quella dell'edificio. Tale fenomeno produce un'amplificazione delle sollecitazioni che possono portare al collasso anche per terremoti di bassa entità. E' per questo motivo che la Normativa Europea, Eurocodice 8, prevede la classificazione del terreno da un punto di vista sismico tramite la misura della Vs30 con stima degli effetti di sito.

La tecnica per fornire stime affidabili della frequenza fondamentale di risonanza del sottosuolo è quella dei rapporti spettrali tra le componenti del moto orizzontale e quella verticale H/V (Horizontal / Vertical Spectral Ratio).^[2]

La frequenza libera di un edificio è governata prevalentemente dall'altezza e può essere calcolata approssimativamente secondo la formula empirica:

$$\text{Frequenza naturale di un edificio} \approx 10 \text{ Hz} / \text{numero piani.}$$

Fatte queste premesse si evince come la possibilità di misurare le frequenze fondamentali del terreno e delle strutture diventi un fattore importantissimo.

Infatti, conoscendo a priori lo spettro del terreno attraverso una misurazione sperimentale, il progettista potrebbe verificare teoricamente che la frequenza fondamentale dell'edificio in progetto non sia coincidente o vicina a quella del terreno (nel qual caso appunto si produrrebbe la risonanza). Sarebbe così in grado di modificare il progetto riducendo di molto la Vulnerabilità dell'edificio.

Si potrebbe effettuare la misura anche sugli edifici esistenti verificando se si trovino in queste condizioni e nel qual caso intervenire preventivamente.

Ottenere queste misure solo attraverso i microtremori di fondo richiede un livello di sensibilità dei sensori particolarmente alto ed una capacità interpretativa informatica altrettanto sofisticata.

3. Gli strumenti di misura

Per affrontare i rilievi dinamici accennati, sia sul terreno sia sulle strutture, è stato sviluppato uno strumento, denominato "Microsismic", che contiene sia una terna di sensori accelerometrici sia una terna di velocimetri. Le amplificazioni possibili permettono rilievi in condizioni di vibrazioni minime, cioè in sola condizione di misure derivanti dal microtremore di fondo, sempre presente: questo permette di evitare l'uso di sistemi di eccitazione forzata.

Le caratteristiche dello strumento sono:

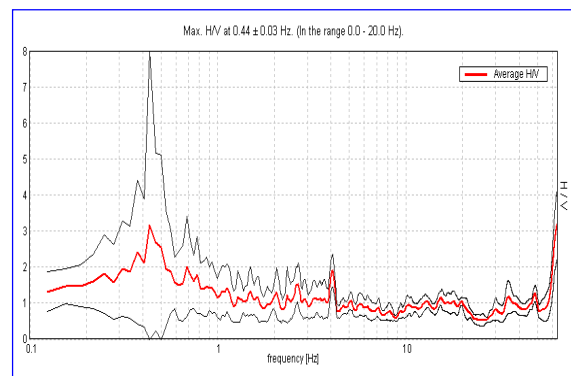
Rumore: $< 0.5 \mu\text{V r.m.s.}$
Range di frequenze: DC - 360 Hz
Campionamento: 1-16.384 Hz
Conversione A/D: 24 bit

Le unità di acquisizione sono collegate via radio con l'unità master che comanda la partenza dell'acquisizione e la sincronizzazione. I dati sono memorizzati singolarmente partendo dal comando sincronizzato del master. Sono poi scaricabili su computer per effettuare le elaborazioni.

Nel grafico è riportato lo spettro H/V del terreno circostante l'edificio che sarà analizzato quale esempio. Si individua bene la frequenza fondamentale pari a 0,42 Hz. Sulla base della formula empirica riportata precedentemente, in prima approssimazione, si può indicare che, su questo tipo di terreno, vanno evitate costruzioni con circa 24 piani.



Microsismic sul terreno



Spettro H/V

3. Esempio di analisi di un edificio

Il processo diagnostico e valutativo introdotto è stato applicato su un edificio quando era ancora a semplice telaio, nel maggio 2011, sia dopo il completamento dei tamponamenti nel novembre 2012.

L'edificio oggetto delle indagini è sito a Bolzano ed è costituito da 2 piani interrati e 6 piani fuori terra per un'altezza di circa 19 m.

La pianta è di forma rettangolare con lati di circa 60 x 13 m.

Lo schema strutturale è quello classico del telaio con travi in calcestruzzo armato, pilastri in c.a. (acciaio-calcestruzzo solo al II piano), solai a lastre ai piani interrati e solette piene ai piani fuori terra; i tamponamenti esterni saranno costituiti da muratura e da vetrate al piano terra.



Edificio solo struttura

La prima analisi è stata condotta sull'edificio completato solo strutturalmente.

Sono stati utilizzati 8 Microsismic, quattro posti al VI livello e quattro al II livello fuori terra. Gli strumenti sono stati posizionati agli angoli estremi come indicato nello schema.

Sono state ripetute più rilevazioni della durata di 32 minuti ciascuna con una frequenza di campionamento di 1024 Hz.

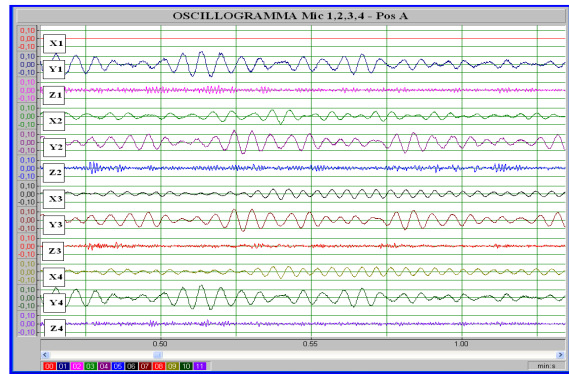


Schema di posizionamento



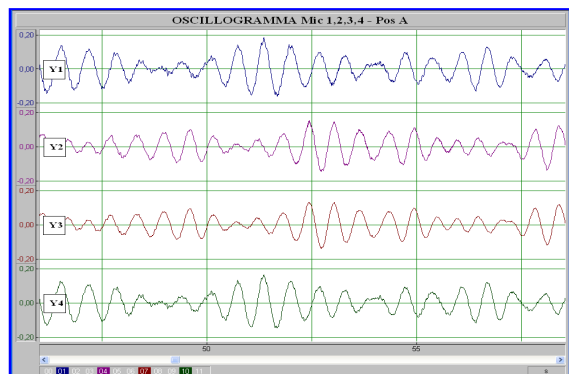
Posizionamento dei Microsismic al VI piano

Nel grafico si riporta un'acquisizione sviluppata nel dominio dei tempi. Il grafico mostra il segnale acquisito dai 12 canali accelerometrici. La scala delle ordinate è di $0,10 \text{ mm/s}^2$ ed evidenzia un segnale con basse frequenze nelle direzioni X e Y e di alte frequenze nella direzione Z.

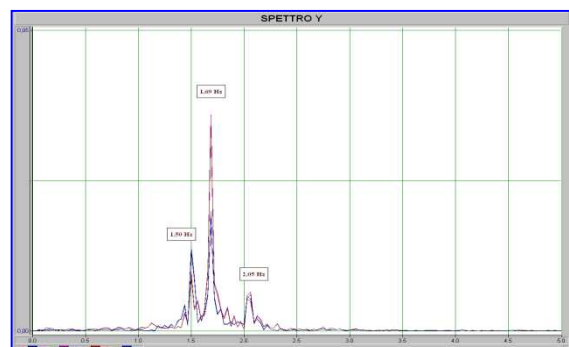


Procediamo ad isolare i soli segnali rilevati dai sensori nella direzione Y, di minore rigidezza. Si nota innanzitutto che i segnali dei sensori 1 e 4 sono in fase tra loro ed in controfase rispetto ai segnali derivanti ai sensori 2 e 3.

Questo indica un moto flessionale trasversale di tipo torsionale, dove il lato corto di destra dell'edificio va in direzione opposta al lato sinistro.

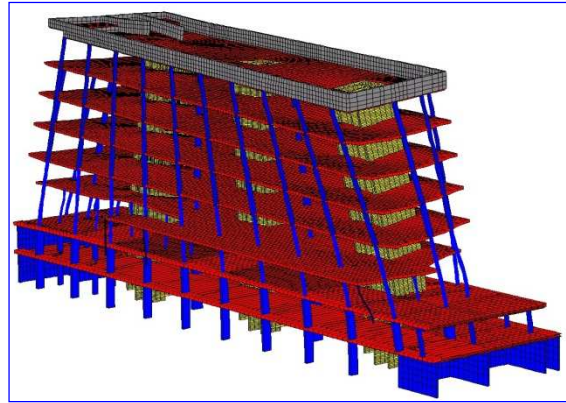


Sui dati rilevati è stata effettuata la trasformata di Fourier ricavandone lo spettro. Questo mette in chiara evidenza delle frequenze perfettamente convergenti tra tutti i canali che individuano tre frequenze fondamentali pari a 1,50 Hz, 1,69 Hz e 2,05 Hz. La precisione di questa analisi si spinge a $\pm 0,01 \text{ Hz}$ che è un valore molto apprezzabile per la situazione di rilevazione in campo.



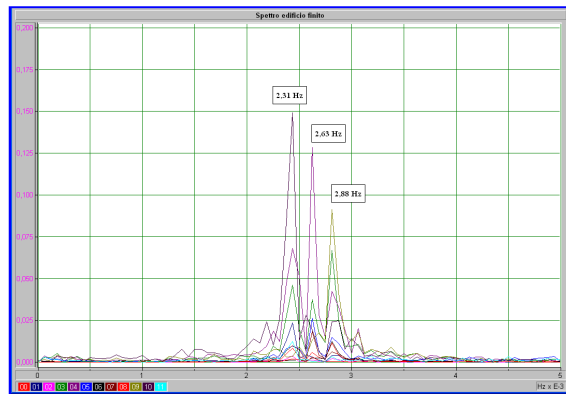
Successivamente è stato costruito un modello numerico dell'edificio attraverso il software Straus 7. Il modello è stato calibrato sulla base della caratterizzazione dinamica sperimentale.

Una volta assemblato, si è provveduto alla calibrazione sulla base dei risultati dinamici sperimentali, variando i parametri di contorno, ossia le caratteristiche dei materiali e dei vincoli in fondazione. Il modello agli elementi finiti è costituito da 49.988 nodi, da 46.581 elementi plate e da 3.257 elementi beam.

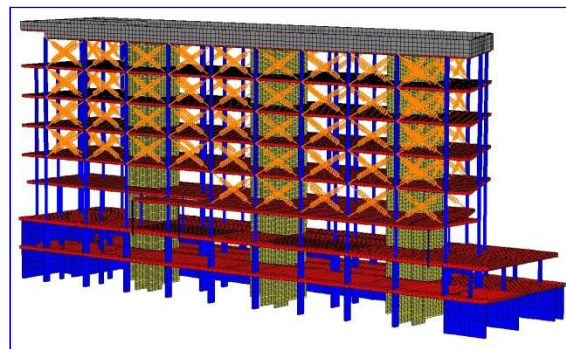


Modello agli elementi finiti – 1 modo di vibrare

Come anticipato, nel novembre 2012, una volta completato l'edificio con tutti i tamponamenti e gli elementi accessori esterni, si è proceduto ad una nuova acquisizione di cui si presenta lo spettro delle frequenze.



Sulla base di questa nuova acquisizione il modello, completato dai tamponamenti, è stato rielaborato e ricalibrato. Gli elementi di tamponamento sono stati creati inserendo delle bielle diagonali, con masse corrispondenti a quelle reali e rigidzze che sono state variate fino a far convergere al meglio i valori dinamici teorici con quelli sperimentali.



Modello agli elementi finiti con tamponamenti

Di seguito si riportano le frequenze sperimentali a sola struttura ed a edificio completato.

TABELLA 1

Frequenza	Sperimentale			
	Solo telaio		Edificio completato	
	Hz	Modo	Hz	Modo
f_1	1,50	Trasv.-Tors.	2,31	Trasversale
f_2	1,69	Trasversale	2,63	Trasv.-Tors.
f_3	2,05	Longitudinale	2,88	Longitudinale

Di seguito si riportano le frequenze sperimentali a sola struttura e ad edificio completato.

TABELLA 2

Frequenza	Teoriche			
	Solo telaio		Edificio completato	
	Hz	Modo	Hz	Modo
f_1	1,51	Trasv.-Tors.	2,33	Trasversale
f_2	1,70	Trasversale	2,64	Trasv.-Tors.
f_3	2,08	Longitudinale	2,86	Longitudinale

Un'ulteriore tabella è costruita ricavando i risultati teorici dal modello dove le rigidzze delle bielle diagonali, rappresentanti i tamponamenti, vengono ridotte a "zero" rimanendo così il solo effetto delle masse.

TABELLA 3

Frequenza	Teoriche		
	Solo telaio	Edificio completato con solo massa dei tamponamenti	Edificio completato con tamponamenti integri
	Hz	Hz	Hz
f_1	1,51	1,50	2,33
f_2	1,70	1,69	2,64
f_3	2,08	2,07	2,86

I dati riportati sono estremamente interessanti e consentono alcune considerazioni.

Si nota innanzitutto che il I modo di vibrare a puro telaio, che era quello Trasversale Torsionale, quando si inseriscono i tamponamenti diventa il II modo di vibrare.

La tabella 3 evidenzia il piccolo apporto delle masse sul cambiamento delle frequenze proprie. Questo aspetto assume una grande valenza se si ipotizza di effettuare dei rilievi dinamici di confronto tra una struttura appena costruita o dopo molti anni. Infatti il risultato indica che le masse (dei tamponamenti) hanno pochissima influenza sui modi di vibrare e pertanto anche misure sperimentali di confronto effettuate dopo

molti anni, quando ovviamente i carichi di esercizio nella struttura sono sicuramente diversi da quelli originali, non sono influenzati da questi cambiamenti. Di conseguenza i valori misurabili potranno essere interpretati su logiche esclusivamente strutturali.

Come si osserva dai valori ricavati sia sperimentalmente che dal modello, l'inserimento dei tamponamenti con la loro rigidità comporta un notevole incremento delle frequenze.

Nell'ipotesi, quindi, di un sisma di notevole intensità i primi elementi che entreranno in crisi saranno proprio i tamponamenti che tenderanno, fessurandosi, a rompere i legami con la struttura portante. Questo fenomeno comporterà una tendenza ad un abbassamento della frequenza reale dell'edificio e aumenterà la vulnerabilità a fronte di scosse successive, mancando appunto l'effetto assorbente dell'energia prodotto dalla fessurazione dei tramezzi.

Entrando nel merito della valutazione della capacità di resistenza sismica dell'edificio in analisi si è proceduto ad impostare le condizioni di contorno richieste dalla normativa per una ubicazione prima in Bolzano e successivamente nella zona dell'Aquila.

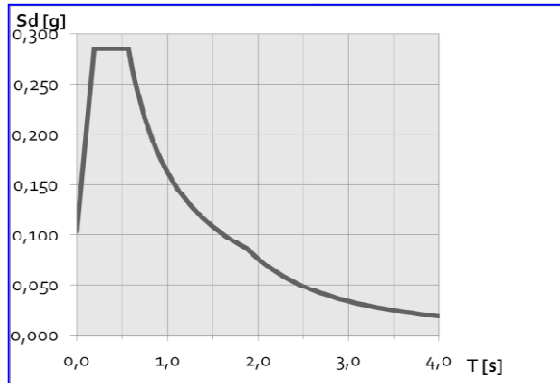
Le tabelle successive mostrano i parametri introdotti e ricavati. ^[3]

Parametri di progettazione						
Vita Nominale [anni]	Classe d'uso	Coeff. d'uso	Periodo di riferimento [anni]	Stato Limite Ultimo	Probabilità di superamento	Periodo di ritorno [anni]
V_N		C_U	V_R		P_{VR}	T_R
50	III	1,5	75	SLC	5%	1462

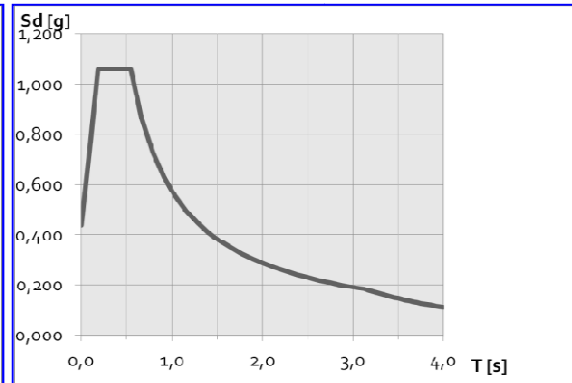
Parametri di riferimento forme spettrali			
Accelerazione orizzontale massima al sito a_g	Fattore amplificazione spettrale		Periodo inizio tratto a velocità costante spettro in accelerazione orizzontale T_{c*}
	Orizzontale F_o	Verticale F_v	
0,177 g	2,434	$1,35 \cdot (a_g/g)^{0,5}$	0,290 s

Coefficienti azione sismica					
Componente accelerazione	Categoria sottosuolo	C	Categoria topografica	T1	Fattore di alterazione spettro per smorzamenti $\xi \neq 0,05$
	Amplificazione stratigrafica		Amplificazione topografica		
	S_s	C_c	S_T		η
Orizzontale	1,442	1,580	1,000		1,000
Verticale	1,000	–	1,000		1,000

Se ne ricava lo spettro di sollecitazione a cui sottoporre il modello che nello specifico è stato ricavato sia per l'area Bolzano sia per l'area Aquila.



Spettro di sollecitazione a Bolzano



Spettro di sollecitazione a L'Aquila

L'analisi dei risultati è rappresentata con dei dati di sintesi nelle tabelle successive.

Le tabelle mostrano i nodi che presentano le maggiori sollecitazioni. E' evidente la notevole differenza tra le due localizzazioni, derivante dai diversi valori di accelerazione previsti.

SISMA BOLZANO

Piano	Nr. Pilastro	tra Nodi	Dim-Materiale	Compressione MAX	
				Rigidezza Bielle=K	Rig Bielle=K/2
V	13	15-421	30x25 cls	-16,5	-18,6
	17	19-425	30x25 cls	-15,9	-18,2
	10	12-418	30x25 cls	-15,6	-17,7
IV	76	421-6504	30x25 cls	-14,7	-16,2
	92	425-6520	30x25 cls	-13,9	-15,6
III	77	6504-6505	35x25 cls	-15,5	-16,7
	93	6520-6521	35x25 cls	-14,8	-16,3
II	78	6505-6506	40x25 cls	-13,8	-14,6
	54	6481-6482	40x25 cls	-13,6	-14,8
I	35	6462-6463	D35 Acc-cls	-28,6	-27,6
	127	6554-6555	D35 Acc-cls	-28,5	-28,1
P.T.	153	6463-31593	D35 Acc-cls	-45,3	-46,9
	176	6555-31616	D35 Acc-cls	-41,6	-43,6
-1	221	45714-45715	30x30 cls	-14,2	-14,5
	220	45712-45713	30x30 cls	-13,3	-13,4
-2	920	45706-46542	120x30 cls	-10,7	-10,7
	921	45705-46543	120x30 cls	-10,5	-10,6

SISMA L'AQUILA

Compressione MAX	
Rigidezza Bielle=K	Rig Bielle=K/2
-39,6	-47,1
-38	-46,1
-34,5	-44,4
-32,8	-37,5
-31,3	-36,7
-33,9	-37,9
-32,5	-37,2
-28,4	-30,7
-27,5	-30,4
-78,3	-73,9
-84,7	-82,7
-138,7	-144,4
-141,6	-148,7
-41,1	-42,2
-38,3	-38,4
-25,3	-25,6
-25,1	-25,7

Sintesi delle sollecitazioni ai nodi – tabella gerarchica

4. Conclusioni

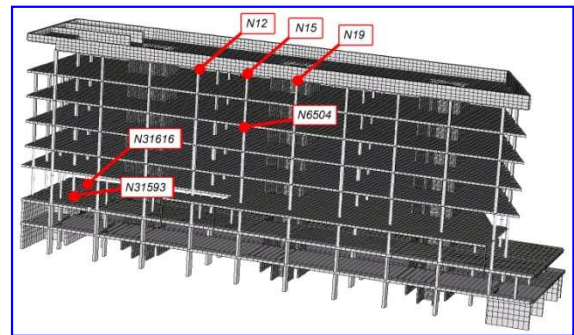
L'approccio all'analisi sperimentale-teorica presentata in questo lavoro ha permesso di confermare la possibilità di una verifica sismica realistica sia su un edificio nuovo che su uno esistente.

In particolare l'utilizzo di questi nuovi strumenti, Microsismic, apre un territorio sperimentale inesplorato che può portare ad una migliore conoscenza delle strutture affinandone i modelli e valutando il loro comportamento prima e dopo un sisma.

E' notevole immaginare di poter effettuare la caratterizzazione dinamica sugli edifici di nuova costruzione ma anche su quelli esistenti ed in particolare su quelli strategici, sfruttando esclusivamente l'eccitazione prodotta dai microtremori. Questi dati sperimentali, presi all'atto della costruzione, rappresentano il comportamento d'insieme dell'edificio, la sua carta di identità, e sarebbero dei valori utilissimi per chi, dopo un sisma, dovesse occuparsi di decidere sull'agibilità di un edificio.

Lo studio delle sollecitazioni prodotte dallo spettro delle sollecitazioni sismiche sui singoli nodi, con la sua gerarchia, permette di "mirare" un potenziale intervento di consolidamento direttamente sui nodi più caricati, limitando così gli interventi ai soli elementi che ne abbisognano.

La stessa regola varrebbe per le indagini sperimentali di tipo meccanico sui materiali o sulla presenza dei ferri, che invece di essere effettuata "a pioggia" e casualmente, potrebbe essere orientata proprio su quei nodi che indicano la loro condizione di rischio.



Nodi più caricati

Questo modo di operare parte dal presupposto di una conoscenza teorica molto affinata, attraverso lo strumento della modellazione, strumento che richiede una conoscenza geometrica perfetta dell'edificio e una valutazione meccanica degli elementi, aderente alla realtà.

Tutto questo comporta un processo di diagnosi costoso, basti pensare alle situazioni, più che mai reali in Italia, dove non si hanno più i disegni delle opere e dove, quindi, il lavoro parte da zero. Ma una diagnosi corretta, con la produzione di un modello reale, permetterà una precisa determinazione degli interventi di consolidamento necessari e di conseguenza una spesa limitata a quanto strettamente necessario.

In ultima analisi si ottiene un risparmio rispetto a un intervento di recupero e consolidamento generalizzato e, soprattutto, una conoscenza realistica delle capacità di resistenza ai terremoti.

Bibliografia

- [1] Archivio dell'Istituto Italiano di Geofisica e Vulcanologia – Terremoti storici 2012
- [2] “*Tecniche speditiva per la stima dell’amplificazione sismica* ” – Muciarelli M., Castellaro S. – Aracne editrice Srl (2012)
- [3] “*Norme tecniche per le costruzioni*” – D.M. Infrastrutture 24.1.2008 - Circolare 02.2.2009 n. 617

settimo.martinello@4emme.it

maurizio.bruson@4emme.it