Validazione dei modelli FEM tramite assimilazione dei dati di spostamento durante le prove su tavola vibrante



Gerardo De Canio, Marialuisa Mongelli, Ivan Roselli
ENEA Centro Ricerche Casaccia. Via Anguillarese 301, 00123 Roma

Keywords: Motion Capture 3D , modelli agli elementi finiti (FEM), test su tavole vibrante.

ABSTRACT
This paper describes an interactive methodology for validation of Finite Element Models (FEM) of structures subjected to experimental tests by shaking table through the use of displacement data obtained by a 3D motion capture system, called 3DVision, installed at the ENEA Casaccia Research Centre, Roma, Italy.
The system is able to detect the complete motion of retro-reflective markers placed on the structure subjected to experimental tests. The methodology provides a first FE analysis to identify the critical points in order to identify the most significant positions for the monitoring of the structure. Since the FEM, at this stage, has a degree of uncertainty in terms of material properties, loads and constraints, the next step is to perform a numerical analysis of the structure as imposing external forcing time history of the measured displacements of the most significant nodes, while the other nodes are the control points for the validation of the numerical model. The 3Dvision system provides the real input in terms of the displacements to be imposed to the FE analysis. Consequently, the results of numerical analysis obtained in terms of displacements calculated in the remaining structural nodes are compared with the experimental data of the markers fixed in the corresponding positions on the real structures. This is done at each step of the sequence of tests, so the validation procedure is interactive and the FEM model is properly calibrated and updated during the sequence of tests.

1 INTRODUZIONE

Nel presente lavoro viene illustrata una metodologia interattiva di validazione dei modelli agli elementi finiti (FEM) di strutture sottoposte a prove sperimentali su tavola vibrante, tramite l'utilizzo di dati di posizione acquisiti da un sistema di motion capture 3D, denominato 3DVision, installato presso il Centro Ricerche ENEA Casaccia.

Tale sistema è in grado di rilevare il moto completo di un qualsivoglia numero di marcatori retroriflettenti posizionati sulla struttura sottoposta a prove sperimentali (Hutchinson et al. 2004). La metodologia prevede una prima analisi FE per identificare i punti critici della struttura e fissare conseguentemente le posizioni più significative ai fini del monitoraggio.

Poiché il FEM, in questa fase, presenta un certo grado di incertezze in termini di proprietà dei materiali, carichi e vincoli, il passo successivo consiste nell'eseguire un'analisi numerica della struttura imponendo come forzante esterna la storia temporale degli spostamenti misurati dei punti nodali più significativi, i restanti punti nodali saranno i punti di controllo per la validazione del modello numerico.

Pertanto, il sistema 3Dvision fornisce l'input reale in termini di spostamenti imposti per l'analisi FE ed i risultati dell'analisi numerica in termini di spostamenti calcolati nei rimanenti nodi strutturali vengono confrontati con i dati sperimentali dei marcatori fissati nelle corrispondenti posizioni sulla struttura reale.

Ciò viene effettuato ad ogni passo della successione delle prove, pertanto la procedura di validazione è interattiva ed il modello FE risulta opportunamente calibrato ed aggiornato durante il susseguirsi delle prove stesse.

Le campagne sperimentali sono condivisibili in remoto utilizzando il laboratorio virtuale DySCo (Structural Dynamic, numerical Simultaion, qualification tests and vibration Control); le analisi agli elementi finiti (FEA) sfruttano le risorse software e hardware rese disponibili dal sistema CRESCO (Computational RESearch center on COmplex system) via ENEA-GRID (Mongelli et al., 2011).

La metodologia verrà illustrata sul caso studio di un telaio in acciaio a prevalente sviluppo verticale progettato e verificato sperimentalmente su tavola vibrante nell'ambito del progetto TELLUS STABILITA.

Tale struttura è stata sottoposta successivamente ad una nuova campagna sperimentale nell'ambito dell'Accordo di programma ENEA-MSE (tema di ricerca "Nuovo nucleare da fissione") nel quale, lo studio è stato dedicato alla raccolta e alla validazione dei risultati sperimentali ottenuti mediante accelerometri tradizionali ed il sistema 3DVision.

La parte relativa alle qualificazioni meccaniche e sismiche è stata finalizzata allo studio dell'integrazione fra prove di tipo e simulazioni numeriche, utilizzando sistemi innovativi di acquisizione dei dati sperimentali e codici numerici di simulazione meccanica e sismica, ed allo studio dei limiti di applicabilità dei risultati delle analisi numeriche ai processi di qualificazione nucleare su sistemi complessi similari.

1.1 Caratteristiche delle Tavole Vibranti

Le caratteristiche tecniche delle due tavole vibranti presso l'ENEA C.R. Casaccia sono sintetizzate in Tabella 1.

Le tavole possono riprodurre le azioni sismiche in tutti e sei i gradi di libertà e possono essere utilizzate per prove sperimentali triassiali meccaniche e sismiche su strutture di notevole dimensione.

Il principale limite della tavola più grande (Sistema 1 di Tabella 1) è costituito dal momento ribaltante massimo pari a 300 kNm. Ciò consente di effettuare, ad esempio, test con strutture di 10 tonnellate in massa e con un'accelerazione applicata a 1 m dalla base della tavola fino a 3 g.

Tabella 1. Caratteristiche tecniche delle due tavole vibranti

	Sistema 1	Sistema 2
Dimensioni della tavola sismica	4 x 4 [m]	2 x 2 [m]
Gradi Di Libertà	6 GDL	6 GDL
Campo di Frequenza	0-50 [Hz]	0-100 [Hz]
Accelerazione	3g peak	5g peak
Velocità	0.5 m/s (0-peak)	1 m/s (0-peak)
Spostamento	0.25 m (0-peak)	0.30 m (0- peak)
Massa ed altezza del baricentro dell'oggetto in prova	10 [t] 1 m altezza baricentrica	1 [t] 1 m altezza baricentrica

1.2 Sistema 3DVision

Nel campo delle prove dinamiche realizzate con le tavole vibranti al C.R. Casaccia, l'acquisizione dei dati è stata realizzata con sensori tradizionali (LVDT, accelerometri, strain gauges) ed il sistema 3DVision, che utilizza un insieme di telecamere ad alta risoluzione all'infrarosso vicino (NIR) che svolgono all'interno del laboratorio una funzione analoga ai satelliti dei sistemi di posizionamento globale (ad esempio il GPS).

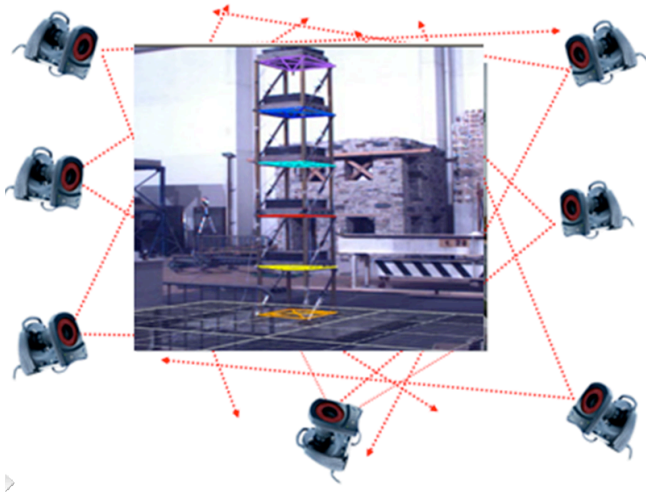


Figura 1. Telaio a prevalente sviluppo verticale: schema di funzionamento del sistema 3DVision.

Si tratta, cioè, di un sistema di posizionamento "locale" in cui le telecamere, una volta fissate alle pareti o montate su appositi tripodi, illuminano il volume di misura con led a luce infrarossa e acquisiscono la radiazione retroriflessa dai marcatori (marker) incollati nei punti della

struttura significativi ai fini del monitoraggio (Figura 1).

Il dato di base è costituito dalla traiettoria nello spazio di speciali marcatori con cui è possibile ricavare il moto completo dei punti selezionati (spostamenti, velocità e accelerazioni), nonché effettuare misure della distanza tra due punti o dell'angolo formato dalle rette congiungenti tre punti (Beraldin et al. 2004).

Ciò è in linea con i nuovi orientamenti della progettazione strutturale agli spostamenti in ingegneria sismica.

Per queste sue caratteristiche, il sistema 3DVision è particolarmente indicato per la sperimentazione condivisa a distanza e per l'assimilazione dei dati sperimentali nei modelli numerici agli elementi finiti (Mongelli et al. 2010).Ciò avviene posizionando i marker sui punti dell'apparato da qualificare corrispondenti ai nodi della griglia del modello numerico. I dati sperimentali dei campi di spostamento dei nodi vengono poi successivamente assimilati nel modello ai fini della sua validazione. Questo costituisce valore aggiunto nei processi di qualificazione nucleare, in speciale modo quelli che adottano le prove di tipo, il modello analitico e/o la qualificazione combinata.

2 PROVE SPERIMENTALI

2.1 Caso studio: Telaio a prevalente sviluppo verticale

Il telaio a prevalente sviluppo verticale realizzato per la sperimentazione è costituito da elementi portanti in acciaio saldati tra loro, ha un ingombro in pianta di 0.6x0.6 m per lato ed interpiano di 0.9 m e ha un solaio di spessore pari a 0.1m.

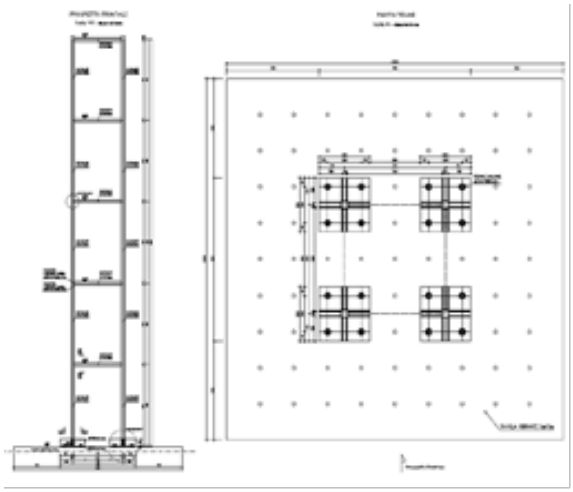


Figura 2. Modello in scala del telaio a sviluppo verticale

La struttura è a 5 livelli la cui rigidezza è ottenuta tramite uno strato di calcestruzzo gettato su una lamiera grecata solidale agli elementi in acciaio per un'altezza complessiva di 4.5 m (Figura 2).

Tutti gli elementi portanti verticali ed orizzontali sono stati realizzati con elementi tubolari 0.4x0.4 m e spessore 0.004 m.

Il peso totale del telaio denominato è di circa 2000 kg ed è stato ottenuto disponendo sullo strato in calcestruzzo delle masse in acciaio di opportune dimensioni.

E' stata aggiunta per ciascuno dei primi quattro piani una massa di 360 kg e di 260 per l'ultimo.

Il telaio si presenta sostanzialmente simmetrico nelle due dimensioni.

2.2 Modello previsionale ed analisi agli elementi finiti (FEA)

Per definire le posizioni più significative al fine del monitoraggio è stata definito un modello agli elementi finiti (FE) della struttura da esaminare su tavola vibrante.

Sulla base dei dati progettuali e delle proprietà dei materiali usati nella costruzione del telaio (calcestruzzo ed acciaio) è stato possibile realizzare un'analisi FE tenendo conto delle masse aggiuntive necessarie applicate ai vari livelli del telaio.

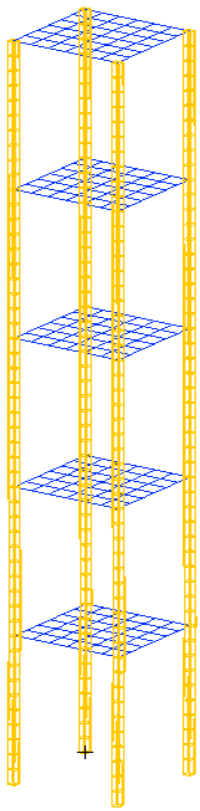


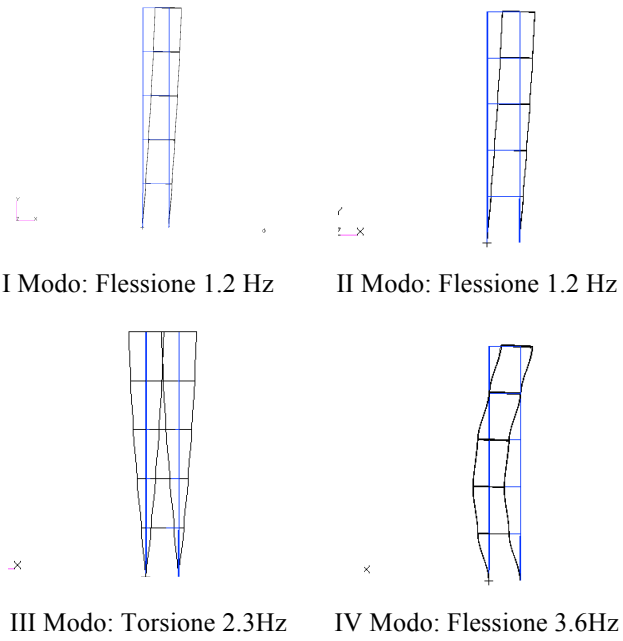
Figura 3. Definizione Modello FE

Il modello semplificato, è stato vincolato in tutti e sei i gradi di libertà nei quattro nodi alla base simulando l'incastro perfetto alla tavola, è stato realizzato con elementi monodimensionali per quanto riguarda la struttura in acciaio, mentre le piastre in cls di ogni livello sono state discretizzate con elementi bidimensionali di tipo shell a quattro nodi (Figura 3) (MacNeal et al., 1994).

2.2.1 Analisi modale

Sulla struttura in esame è stata eseguita un'analisi modale per individuare i primi modi di vibrare della struttura in termini di forma e frequenza.

Si riportano in Figura 4, i primi 4 modi di vibrare del modello.



I Modo: Flessione 1.2 Hz II Modo: Flessione 1.2 Hz

III Modo: Torsione 2.3Hz IV Modo: Flessione 3.6Hz

Figura 4. Forme modali e frequenze.

2.3 Campagna sperimentale, prove su tavola vibrante: posizionamento accelerometri e marker

Sulla base delle informazioni ottenute dal modello numerico semplificato sono state individuate le aree critiche della struttura in esame ed i dati sperimentali sono stati quindi acquisiti sia mediante sensori tradizionali (accelerometri), posizionati in corrispondenza del primo e terzo solaio, sia per mezzo del sistema di acquisizione 3DVision seguendo lo schema in Figura 5.

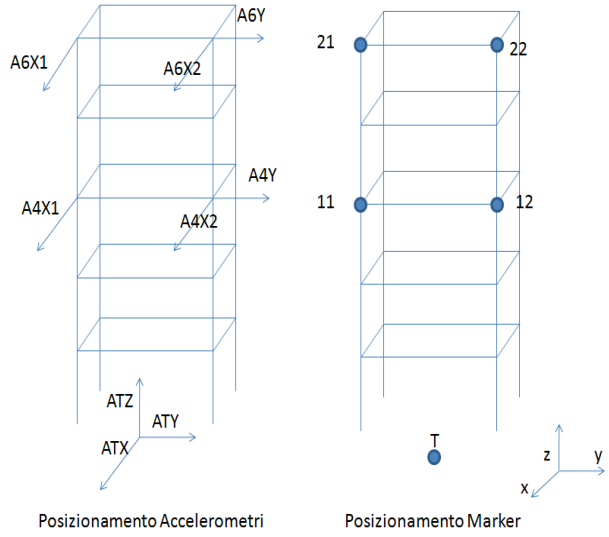


Figura 5. Disposizione accelerometri e marker .

2.3.1 Catena accelerometrica

Il sistema di misura tradizionale di tipo accelerometrico, preso a riferimento per il confronto con il sistema innovativo 3DVision sopra descritto, utilizza accelerometri di tipo capacitivo modello 3701G3FA3G della PCB caratterizzato da sensibilità pari a 1 V/g, range di frequenze 0 -100 Hz.

Gli accelerometri impiegati per le prove sperimentali sono stati tarati presso il centro accreditato P&P LMC (SIT n. 178).

La taratura è stata eseguita in regime sinusoidale per confronto con catena accelerometrica campione.

Le prove sono state eseguite sulla tavola vibrante di dimensione 2x2 [m] (sistema 2 di Tabella 1).

L'elaborazione dei dati tra marker (sistema 3Dvision) e accelerometri è stata eseguita confrontando gli indici caratteristici la cui teoria è riportata brevemente nel sottoparagrafo di seguito.

2.3.2 Input sismici

Per lo studio del comportamento dinamico della struttura in esame sono stati utilizzati diversi input sismici e più specificamente sono stati considerati le seguenti time-history: Nat1, Nat2, Aterno e Pettino.

Nat1 e Nat2 fanno riferimento a due spettri di sismi spettro-compatibili ricavati dal "strong Motion database" scalati ai valori massimi previsti per il sito di Reggio Calabria con periodo di ritorno pari a 2475 anni. Aterno e Pettino, invece sono relativi rispettivamente a dati registrati durante il sisma del 2009 dell'Aquila nelle stazioni di Pettino e a Valle dell'Aterno.

I risultati ottenuti in termini di accelerazione della struttura durante i differenti input sismici, sono stati misurati in corrispondenza dei livelli 3 e 5 del telaio per gli accelerometri piezoelettrici posti nelle posizioni A4 e A6 del modello e per i marker nelle posizioni 11, 12 e 21, 22.

In Figura 6 si evidenzia un'immagine del sistema 3DVision ottenuta durante una prova applicando alla tavola l'input sismico Nat1 al 30% misurato tramite l'acquisizione della traiettoria (grafici in basso) del marker in alto (marker blu a sinistra).

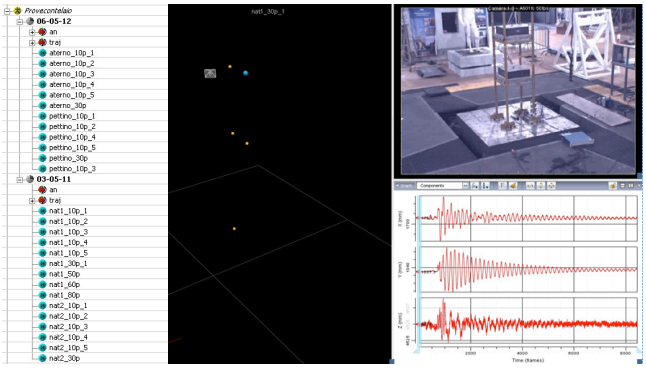


Figura 6. Sistema 3DVision –Input sismico Nat1(30%).

2.3.3 *Confronto dei risultati sperimentali: accelerometri e marker*

Nell'ambito del progetto MSE-ENEA è stato condotto uno studio relativo al confronto dei dati sperimentali ottenuti mediante accelerometri e marker.

Successivamente, i dati sperimentali e quelli numerici sono stati confrontati con i dati degli accelerometri e con quelli ottenuti dal sistema 3DVision (De Canio et al. 2012).

L'elaborazione dei dati sperimentali è stata effettuata tramite i seguenti indici (Ye, et al. 2011):

- Amax- Max picco di accelerazione

$$A\max = \max(a(t)) \tag{1}$$

- Arms: Accelerazione quadratica media

$$A_{rms} = \sqrt{\frac{1}{tr}\int_0^{t1} a(t)^2\,dt} \tag{2}$$

Il tasso medio di energia contenuto nel segnale accelerometrico è poco influenzato dalle componenti ad alta frequenza e non fornisce informazioni sul contenuto in frequenza.

- Arias- Intensità di Arias

$$Ia = \frac{\pi}{2g}\int_0^{\infty} a(t)^2\,dt \tag{3}$$

E' una grandezza scalare e misura l'energia totale per unità di massa trasmessa dal terremoto ad una batteria di oscillatori ad 1GDL senza smorzamento.

- Ic – Intensità Caratteristica

$$Ic = \left(a_{rms}\right)^{\frac{2}{3}}\sqrt{tr} \tag{4}$$

Misura della potenziale capacità distruttiva del terremoto, tr è la durata significativa del terremoto, definita come l'intervallo di tempo in cui l'intensità di Arias passa dal 5% ed il 95% del suo valore massimo.

- HI- Intensità spettrale

$$HI = \int_{t1}^{t2} Sv(t,\xi)\,dt \tag{5}$$

L' integrale dello spettro di velocità è una misura della capacità del terremoto di provocare danni ad una popolazione di strutture il cui periodo fondamentale di vibrazione è compreso tra i limiti dell'integrale. E' una variante dell'indice di Housner in cui i limiti dell'integrale sono: t_1=0.1 sec, t_2=2.5 sec. L'indice di Housner fornisce una buona correlazione per strutture con periodo elevato.

I periodi caratteristici 0.15sec, 0.4sec, 0.5sec, 2sec, 3sec,4sec consentono di definire lo spettro di risposta sismica per terreni tipo A, B, C ed E secondo la normativa italiana e di ottenere lo spettro di accelerazione Sa e di energia Se.

- Sa(T,ζ) "Spettro di Accelerazione" è la risposta di una batteria di oscillatori ad 1GDL con periodo proprio T e con coefficiente di smorzamento ζ.
  Una struttura con periodo proprio T e coefficiente di smorzamento ζ sottoposta a quella specifica time history avrebbe una accelerazione massima pari ad Sa.

- Se(T, ζ) "Spettro di Energia" è il valore dell'energia di deformazione elastica massima dell'oscillatore ad 1 GDL sottoposto al sisma.

Il confronto è stato realizzato considerando tutti e quattro gli input sismici scalati al 30%.

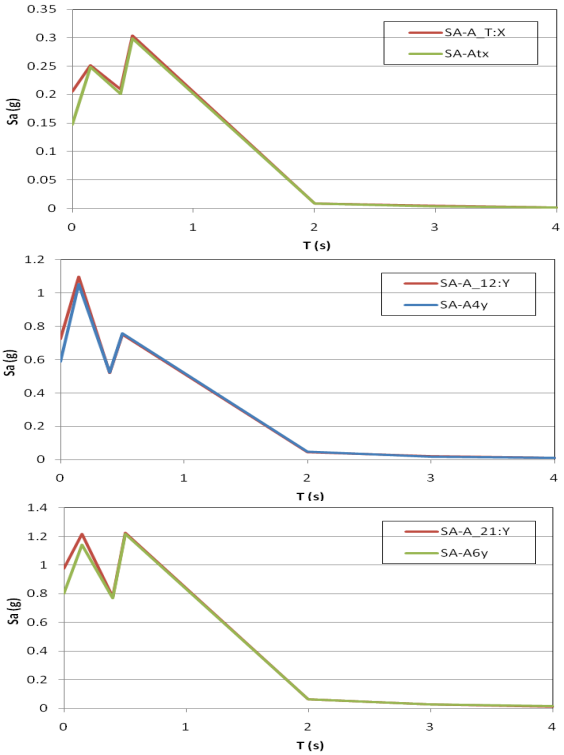


Figura 7. Spettro di accelerazione Confronto ai diversi livelli marker (sistema 3DVision) – accelerometri.

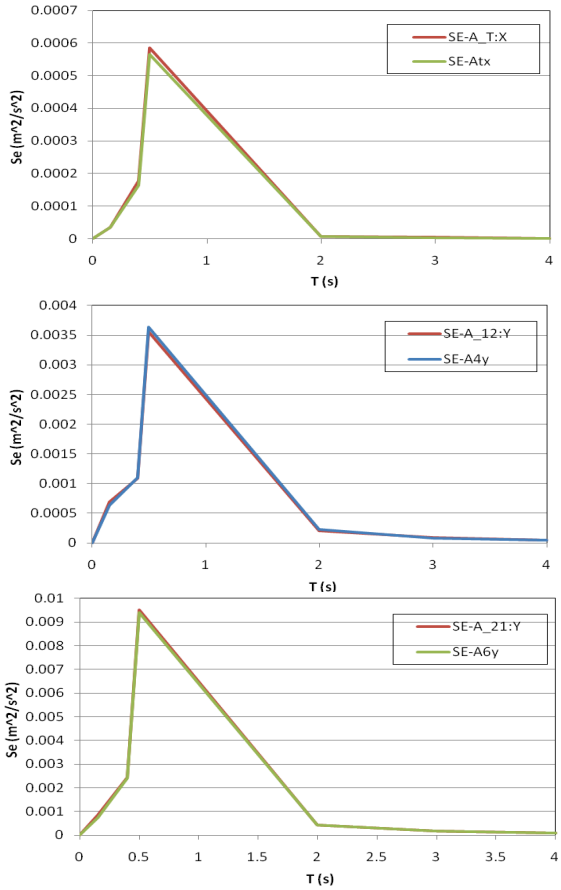


Figura 8. Spettro di energia: confronto ai diversi livelli marker (sistema 3DVision) – accelerometri.

I dati sono stati filtrati con un filtro passa-banda Butterworth con prima frequenza di taglio f1= 0.1 Hz, seconda frequenza di taglio f2 = 25 Hz e ordine del filtro pari a 4.

Si evidenzia nelle Figure 7-8 il confronto rispettivamente dello spettro di accelerazione e di energia tra marker ed accelerometri per la prova Nat2 al 30% ai diversi livelli indicati in Figura 5.

2.4 Calibrazione del modello agli elementi finti

I risultati sperimentali ottenuti mediante il sistema 3DVision in corrispondenza dei marker posizionati sulla struttura reale sono stati confrontati in termini di parametri modali con quelli ottenuti per le posizioni nodali definite sul modello FE.

Più precisamente, per la validazione del modello numerico, i dati di spostamento misurati con il sistema di acquisizione 3DVision sono stati usati anche per l'identificazione dei parametri strutturali tramite CC-SSI.

Parallelamente, sulla base dei risultati sperimentali ottenuti durante la campagna sperimentale, il modello FE semplificato, definito nel paragrafo 2.2, è stato opportunamente calibrato aggiornando le schede del codice agli elementi finiti relative a materiali, proprietà di elementi e vincoli.

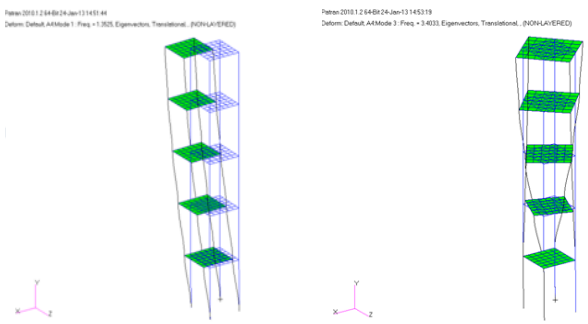


Figura 9. FEA: a) I modo 1.35 Hz; b) II Modo 3.40Hz.

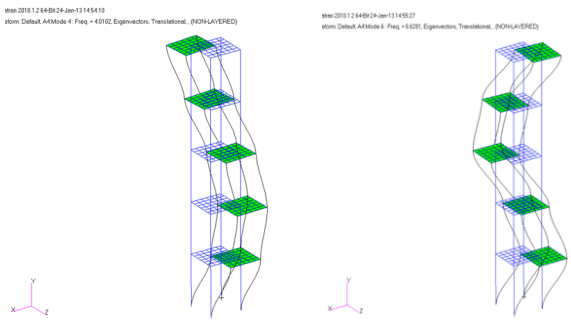


Figura 10. FEA:a) III Modo 4.01 Hz; b) IV Modo 6.82 Hz.

Per tener conto dell'effettiva sezione reale del telaio in acciaio, gli elementi monodimensionali sono stati definiti mediante BEAM a sezione L e la distribuzione delle masse in cls su ogni livello è stata definita mediante elementi a massa concentrata applicati ai nodi degli elementi 2D di ogni livello.

Si riportano in Figura 9 e Figura 10 i risultati ottenuti dal modello numerico in termini di frequenze e forme modali.

2.4.1 Stima dei parametri modali e validazione del modello numerico

I dati di spostamento misurati dai marker del sistema 3DVision sono stati elaborati dall'algoritmo CC-SSI (Dohler M. et al., 2010). La Figura 11 mostra il telaio in acciaio posto su tavola vibrante, mentre in Figura 12 sono rappresentati i relativi diagrammi di stabilizzazione per la stima dei parametri modali.



Figura 11. Telaio in acciaio strumentato e posizionato sulla tavola vibrante. Si notano i marker del 3DVision nelle posizioni nodali.

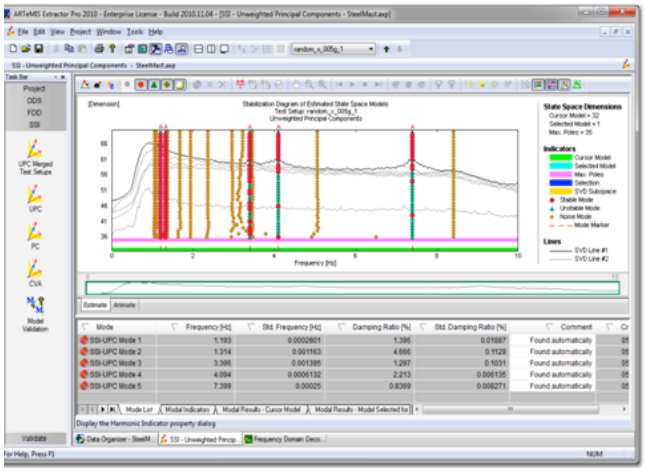


Figura 12. Diagramma di stabilizzazione per la stima dei parametri modali.

Forme modali e frequenze dei primi quattro modi sono riportati in Figura 13 e Figura 14.

I risultati elaborati dall'analisi CC-SSI degli spostamenti sono stati confrontati con quelli ottenuti in termini di Risposta in Frequenza (FRF) tra l' accelerazione misurata alla base della struttura ed in corrispondenza del quinto livello (De Canio et al. 2011).

I grafici di Figura 15 e Figura 16 rappresentano le FRF misurate alla base ed al V livello della struttura. I primi tre picchi delle FRF sono confrontabili con i modi flessionali elaborati con l' algoritmo CC-SSI a 1.193Hz, 4.094 Hz e 7.399 Hz. Il modo torsionale a 3.396 Hz è evidenziato in Figura 13b.

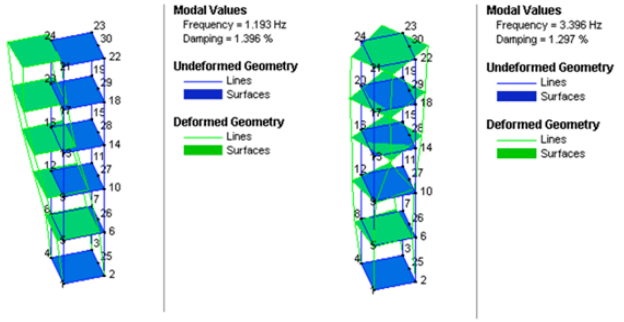


Figura 13. CCS-SSI : a) I modo (flessione) 1.193 Hz; b) II modo (torsione) 3.396 Hz.

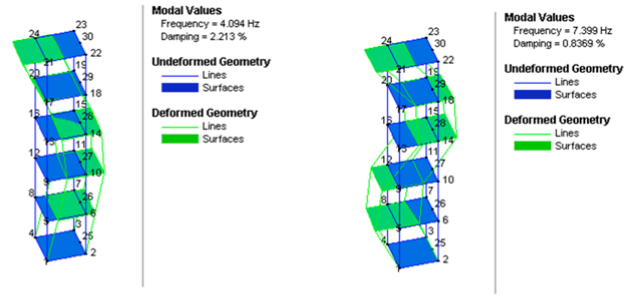


Figura 14. CCS-SSI: a) II modo (flessione) 4.094 Hz; b) III modo (flessione) 7.399Hz.

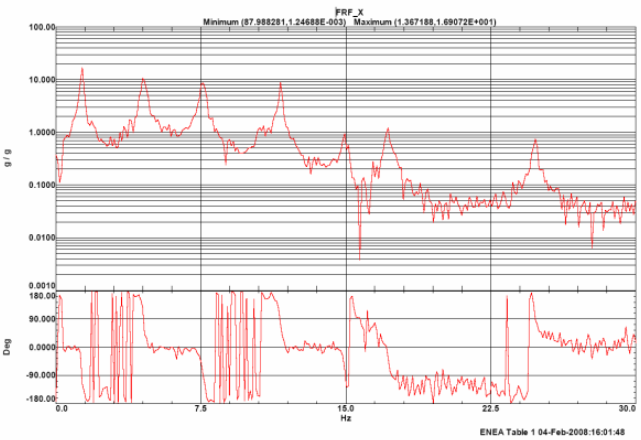


Figura 15. FRF_X (A6X/ATX)

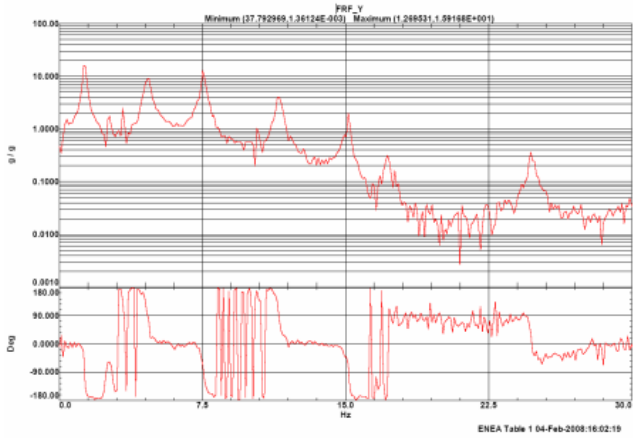


Figura 16. FRF_Y (A6Y/ATY).

I risultati ottenuti sulla base delle differenti metodologie descritte (CC-SSI, FRF e FEA) in termini di forme modali e frequenze per i primi quattro modi di vibrare della struttura per l'individuazione dei parametri strutturali modali sono riportati in Tabella 2 (Savitzky et al, 1964).

Come si può notare, le frequenze individuate sono confrontabili ed il modello numerico sopra definito risulta pertanto validato.

Tabella 2. Confronto dei parametri modali - analisi CC-SSI, FRF analysis ed FEA

Modo	CC-SSI Frequenza Hz	FRF Frequenza Hz	FEA Frequenza Hz
I Flessione	1.190	1.35	1.35
II Torsione	3.396	3.40	3.40
III Flessione	4.094	4.68	4.01
IV Flessione	7.399	7.58	6.82

3 CONCLUSIONI

Con il presente lavoro si è descritta la metodologia definita in ENEA per studiare il comportamento dinamico di strutture verificate sperimentalmente su tavola vibrante utilizzando insieme ai sistemi di monitoraggio tradizionali il sistema di acquisizione 3DVision che permette la misura diretta degli spostamenti di alcuni punti significativi della struttura definiti sulla base di un modello agli elementi finiti.

I risultati numerici ottenuti in corrispondenza di alcuni nodi del modello FE, sono stati confrontati con quelli misurati dai marker del sistema 3DVision fissati nelle posizioni corrispondenti del modello reale in modo da valutare le eventuali differenze.

I risultati sperimentali elaborati permettono di aggiornare e calibrare opportunamente il modello numerico in termini di materiali, proprietà, carichi e condizioni al contorno.

L'identificazione dei parametri modali mediante l'algoritmo CC-SSI e l'analisi FRF dei dati sperimentali elaborati ha consentito di validare il modello numerico della struttura in esame, evidenziando una buona coincidenza fra i dati sperimentali ed i risultati numerici.

BIBLIOGRAFIA

Beraldin, J.A., Latouche, C.S., El-Hakim, F., Filiatrault, A., 2004. Applications Of Photogrammetric And Computer Vision Techniques In Shake Table Testing, *13th World Conference on Earthquake Engineering,* Paper N. 3458.

De Canio, G., Andersen, P., Roselli, I., Mongelli, M., Esposito, E., 2011. Displacement Based Approach for a Robust Operational Modal Analysis, in Proc. of IMAC XXIX. *Conference & Exposition On Structural Dynamics.* January 31st – February 3d, Jacksonville, Florida, USA .

De Canio, G., Mongelli, M., Roselli, I., Colucci, A., Di Biagio, F., 2012. An innovative shaking table controller system by 3DVision displacement measures. *5th European Conference on Structural Control*. June 18-20, Genova, Italy.

Dohler, M., Andersen, P., Mevel, L., 2010. Data Merging for Multi- Setup Operational Modal Analysis with Data-Driven SSI. *28th International Modal Analysis Conference*. (IMAC) Jacksonville, Florida USA.

Hutchinson, T.C., Kuester, F., 2004. Monitoring Global Earthquake-Induced Demands Using Vision-Based Sensors. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **53** (1), 31-36.

MacNeal, R.,1994. *Finite Element: Their Design and Performance*, **89**, ISBN: 0-8247-916-2, 21– 662.

Mongelli, M., De Canio, G., Roselli, I., Colucci, A., Tatì, A., 2010. 3D motion capture and FEM Analysis for Shaking Table Tests at ENEA Casaccia Research Center. *14th European Conference On Earthquake Engineering.* 30 August –3 September , Ohrid, Macedonia

Mongelli, M., De Canio, G., Roselli, I., Baldini, M., Colucci, A., Di Biagio, F., Picca, A., Tatì, A., Cancelliere, N., Coniglio, L., Ghersi, A., 2011. *Experimental tests of reinforced concrete buildings and ENEA DySCo Virtual Laboratory*. 5th Internatioanal Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure (SHMII-5), December, 11-15, Cancun Mexico.

Savitzky, A., Golay, M.J.E., 1964. Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. *Analytical Chemistry*, **36** (8), 1627–1639.

Ye, L., Ma, Q., Miao, Z., Guan, H., Zhuge, Y., 2011. Numerical and comparative study of earthquake intensity indices in seismic analysis. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, DOI: 10.1002/tal.693.