

## **IL SISTEMA DI TAVOLE VIBRANTI DEL CENTRO DI RICERCA L.E.D.A.: CARATTERISTICHE E PRESTAZIONI DINAMICHE**

**G. Navarra, F. Lo Iacono**

Università degli Studi di Enna Kore  
Facoltà di Ingegneria ed Architettura  
Via delle Olimpiadi, 94100 Enna, Italy

### ***Sommario***

*Il Centro di Ricerca L.E.D.A., recentemente entrato in funzione presso l'Università di Enna "Kore", comprende importanti infrastrutture di ricerca operanti nel campo dell'ingegneria antisismica e nella dinamica strutturale, come il sistema di due tavole vibranti a sei gradi di libertà. Il versatile sistema di controllo consente l'utilizzo delle tavole sia in maniera disgiunta che simultaneamente. All'occorrenza, le due tavole possono essere collegate tra loro, formando un'unica tavola di 10 x 4 metri. Il sistema così formato consente di eseguire prove sismiche su modelli in scala ridotta o a scala reale, prove di qualifica su dispositivi di controllo innovativi per la protezione sismica delle strutture, ma anche analisi dinamiche su grandi macchinari o su sistemi meccanici in genere. In questo lavoro vengono mostrate le capacità del sistema di controllo di riprodurre fedelmente le storie temporali di accelerazione desiderate, naturali o artificiali. La corretta esecuzione delle prove su tavola vibrante, infatti, dipende fortemente dalla eliminazione delle eventuali distorsioni tra i segnali desiderati e quelli riprodotti che dipendono essenzialmente dalle caratteristiche dinamiche dell'intero sistema composto da massa di reazione – sistema di attuazione oleodinamica – modello strutturale in prova. Le capacità delle tavole vibranti del L.E.D.A. nel riprodurre storie temporali di accelerazione sono state verificate secondo diverse configurazioni di prova: tavola singola senza carico; tavola singola con 40 t di carico; entrambe le tavole senza connessione meccanica in moto sincrono con carico da 22 t; tavole unite con carico da 66 t. Queste prove hanno avuto lo scopo di valutare e misurare l'accuratezza e la fedeltà con cui le tavole vibranti sono in grado di riprodurre i segnali in ingresso.*

## 1 INTRODUZIONE

I moderni prodotti dell'ingegneria sono caratterizzati da un elevato livello di affidabilità soprattutto dovuto alle consolidate modalità di progettazione e produzione implementati su scala industriale. Una caratteristica rilevante di tali modalità è quella di affiancare il percorso che va dalla ideazione di un prodotto, alla prototipizzazione, alla ingegnerizzazione e, finalmente, alla produzione di massa e alla messa in esercizio con numerose ed importanti prove sperimentali. Infatti, è ben noto che tra le previsioni progettuali ottenute mediante una modellazione solo analitica e gli effettivi comportamenti dei sistemi reali, rilevati sperimentalmente, possano verificarsi notevoli differenze.

Tali prove sperimentali possono essere classificate in quattro grosse tipologie: le *prove di caratterizzazione* hanno lo scopo di analizzare i parametri del sistema al fine di pervenire ad una calibrazione dei modelli analitici e di migliorare la progettazione; le *prove di qualifica* hanno lo scopo di verificare che il dimensionamento del progetto sia adatto a consentire che quell'oggetto possa compiere la funzione per cui è stato ideato anche in presenza di condizioni estreme e nell'eventuale rispetto di particolari normative o specifiche; le *prove di produzione* hanno la funzione di far emergere guasti latenti, spesso generati dal processo produttivo stesso, che rischiano di manifestarsi, in seguito, durante la vita utile del prodotto; infine le *prove di esercizio* sono utili a studiare il comportamento del prodotto durante il suo normale funzionamento, anche con lo scopo di verificarne lo stato di degrado.

Con specifico riferimento ai comportamenti di tipo meccanico, va posto in grande rilievo il comportamento dinamico del sistema sotto esame. Infatti, a causa delle proprietà elastiche ed inerziali dei materiali costituenti, la maggior parte dei sistemi esprimono un comportamento di tipo vibratorio quando sottoposti a sollecitazioni esterne. Gli effetti delle vibrazioni sulle strutture e sulle costruzioni risultano essere di gran lunga più gravose delle corrispondenti azioni statiche per effetto di fenomeni quali quello della *risonanza*, ovvero una abnorme amplificazione delle vibrazioni prodotte quando le forze esterne agiscono con frequenze prossime a quelle caratteristiche del sistema.

Con particolare riferimento al settore della ingegneria civile emerge uno stridente contrasto tra la pratica corrente ed il processo progettuale-produttivo appena delineato. Sicuramente, una delle cause di questa profonda atipicità dell'ingegneria civile è la circostanza che i prodotti di essa sono pezzi unici, sia dal punto di vista geometrico che nella estrema varietà dei materiali e delle soluzioni tecniche adottate, sebbene possano essere individuate altre importanti ragioni di carattere culturale, come la artigianalità dei metodi di produzione e di posa in opera.

Nonostante le prove di qualificazione ed accettazione dei materiali e prodotti per uso strutturale possano essere ritenute simili alle prove di caratterizzazione descritte in precedenza, e le prove di carico durante un collaudo ricordino lo scopo delle prove di qualifica, l'iter produttivo di un manufatto dell'ingegneria civile soffre della mancanza di una conoscenza accurata del prodotto realizzato.

Per quanto riguarda nello specifico l'ingegneria sismica, dal punto di vista storico le metodologie di progettazione si sono evolute secondo un tipico meccanismo di tentativo ed errore, in cui il concetto strutturale veniva sottoposto al terremoto, inteso come esperimento naturale e, dalle osservazioni sui danni riportati, si potevano trarre spunti e suggerimenti per migliorare la progettazione. Questo metodo, oltre a rendere estremamente lento il progresso verso la affidabilità e la sicurezza, risulta essere non accettabile per il tributo in termini di vite umane e danni economici che richiede.

Negli ultimi decenni, a causa anche dello sviluppo delle analisi numeriche, come ad esempio il metodo agli elementi finiti, l'Ingegneria Sismica ha compiuto enormi passi avanti nella comprensione del comportamento delle strutture soggette al sisma e nel fornire soluzioni tecniche per la mitigazione della vulnerabilità.

Malgrado ciò, gli eventi sismici più recenti hanno messo in luce la fragilità del patrimonio costruito italiano, a causa sia di alcune caratteristiche intrinseche come l'elevata pericolosità sismica del suo territorio che della estrema diffusione di metodologie costruttive, specie quelle dell'edilizia storica, non adeguata a resistere a sismi anche medio-deboli. Inoltre, è evidente una notevole differenza rispetto all'entità dei danni provocati da terremoti simili in altri paesi ad alto rischio sismico come il Giappone o gli Stati Uniti d'America, paesi in cui da tempo attive politiche di sostegno alla ricerca [1]-[3].

## **2 LA SPERIMENTAZIONE A GRANDE SCALA**

Al fine di raggiungere conoscenze approfondite della risposta sismica di strutture non è possibile utilizzare solamente le modellazioni analitiche, ma è necessario ricorrere a grandi e costose infrastrutture di ricerca in cui è possibile condurre prove sismiche su modelli in grande scala.

Ciò è assolutamente necessario per lo sviluppo di nuovi prodotti, materiali e soluzioni per la mitigazione del rischio sismico, ed è complementare all'utilizzo di analisi numeriche per l'analisi del comportamento di strutture esistenti e per accrescere la affidabilità dei modelli stessi. Inoltre, costituisce un supporto essenziale per la scrittura e la validazione dei nuovi codici di progettazione sismica delle nuove strutture.

Accanto alle due metodologie di prova più abordabili, sia dal punto di vista delle risorse tecniche che materiali, ovvero le prove statiche monotoniche e le prove quasi-statiche monotoniche e cicliche, esistono altre due principali approcci complementari per studiare gli effetti di un sisma in laboratorio: le prove pseudo-dinamiche con struttura di reazione, di cui si farà cenno nel seguito, e le prove dinamiche su tavola vibrante, cui sarà dedicata la sezione seguente.

Le prove pseudo-dinamiche sono una metodologia di prova ibrida sperimentale-numerica, condotte allo scopo di osservare sperimentalmente la risposta di una struttura o di una apparecchiatura soggetta a carichi dinamici [4]. La storia temporale di accelerazioni da riprodurre, unitamente alla modellazione delle forze inerziali e viscosi viene utilizzata per determinare numericamente gli spostamenti orizzontali subiti dalla struttura ad ogni passo di carico. Tali spostamenti vengono quindi imposti alla struttura reale mediante attuatori servo-idraulici fissati ad un sistema di contrasto e vengono così misurate le forze di richiamo necessarie per raggiungere gli spostamenti richiesti, completando le informazioni del modello analitico che, quindi, potrà fornire la configurazione deformata al passo successivo.

Le prove pseudo-dinamiche consentono di eseguire sperimentazioni su strutture a scala reale senza limiti di massa. Inoltre, essendo le prove condotte lentamente, è possibile avere un continuo monitoraggio dell'evoluzione del danno sulla struttura. Altri vantaggi risiedono nella possibilità di implementare prove con sotto-strutturazione, e di svolgere più test virtuali simultanei, anche in diversi laboratori distanti chilometri. D'altra parte, la natura ibrida sperimentale-numerica del metodo, comporta la necessità di una discretizzazione numerica della struttura, che verrà considerata come un sistema a masse concentrate, rendendo il metodo non adeguato per strutture a massa distribuita (pareti in muratura, etc.); inoltre, dal momento che la struttura da testare è rigidamente vincolata alla piastra di reazione, il metodo è intrinsecamente limitato alle sole componenti orizzontali dell'azione sismica.

La migliore alternativa alle prove pseudo dinamiche è costituita dalle prove dinamiche su tavola vibrante, ampiamente utilizzate fin dagli anni 1970 [5]. Questa tecnica consiste nell'imporre alla base del sistema in prova storie temporali in termini di spostamenti o accelerazioni mediante l'uso di attuatori oleodinamici ed in modo tale da indurre gli stessi effetti inerziali e viscosi che la struttura subirebbe durante un sisma reale. I maggiori vantaggi nell'esecuzione di prove con tavola vibrante risiedono nella possibilità di applicare simultaneamente i carichi sismici verticali e orizzontali nonché di ottenere un comportamento reale dei materiali in funzione della velocità di deformazione impressa. Di contro, i principali svantaggi legate alle prove dinamiche sono connesse alle limitazioni sulla potenza idraulica disponibile, per cui spesso è necessario condurre prove sperimentali su strutture a scala ridotta e alla maggiore difficoltà nel monitorare l'evoluzione del danno sulla struttura dal momento che la prova si svolge in tempo reale.

In definitiva, le prove su tavola vibrante costituiscono uno dei più avanzati strumenti di ricerca per lo studio del comportamento dinamico delle strutture e delle strategie di mitigazione del rischio sismico sia per strutture civili che per le apparecchiature meccaniche, e ciò è comprovato dai crescenti investimenti compiuti in tutto il mondo per la realizzazione di nuove e sempre più performanti tavole vibranti. [5]-[9].

I parametri caratterizzanti le tavole vibranti sono essenzialmente i gradi di libertà che possiedono (una tavola vibrante a 6 gradi di libertà, ad esempio, può riprodurre tutti i movimenti nello spazio), il *payload*, ovvero la massa dell'oggetto in prova che la tavola è in grado di movimentare, e le prestazioni cinematiche in termini di accelerazione massima, spostamenti massimi e intervallo di frequenza.

Dalle considerazioni precedenti emerge che i due metodi di prova consentono di analizzare aspetti diversi ma sono tra loro complementari al fine del raggiungimento di una accurata conoscenza del comportamento delle strutture sottoposte ad azioni sismiche.

### **3 IL CENTRO DI RICERCA L.E.D.A.**

Nel contesto europeo dei centri di ricerca nel settore dell'ingegneria sismica sono presenti diverse realtà all'avanguardia per entrambe le tecniche di prova descritte in precedenza. In particolare, la Commissione Europea ha creato nel 1992 il laboratorio ELSA (European Laboratory for Structural Assessment), all'interno del Centro di Ricerca Comune Europeo (JRC –Joint Research Center) che rappresenta il più importante laboratorio al mondo per le prove pseudo-dinamiche [10].

Dal punto di vista della diffusione delle tavole vibranti, invece, esiste una notevole differenza tra la numerosità e le dimensioni delle infrastrutture europee rispetto a quelle americane e giapponesi [11]. Al fine di colmare questo ritardo e di aumentare la competitività delle infrastrutture di ricerca europee, la Commissione Europea ha finanziato diversi progetti avente proprio lo scopo di studiare le caratteristiche di una nuova infrastruttura di ricerca.

Proprio sulla base delle considerazioni finali del progetto EFAST (design study of a European Facility for Advanced Seismic Testing) [12] è stato realizzato presso la Facoltà di Ingegneria e Architettura dell'Università di Enna "Kore", attraverso un finanziamento PON Ricerca e Competitività 2007-2013, il Centro di Ricerca L.E.D.A. - *Laboratory of Earthquake engineering and Dynamic Analysis*, dotato di grandi attrezzature e strumentazioni scientifiche all'avanguardia nel settore dell'Ingegneria sismica e della dinamica sperimentale. La Figura 1 mostra una vista esterna dell'edificio del L.E.D.A. ed una immagine interna, in cui è visibile sia il muro di contrasto che il sistema di tavole vibranti.



Figura 1. Centro di Ricerca L.E.D.A. a) Vista esterna; b) Vista interna.

Entrambe le maggiori infrastrutture di ricerca sono contenute in un unico ambiente servito da un carroponete ad elevata capacità (fino a 200 kN). Nel medesimo complesso si trovano anche l'unità di potenza idraulica, spazi esterni per la costruzione dei modelli in prova, piccola officina meccanica, diversi altri laboratori per lo studio dei materiali e della dinamica dei sistemi nonché uffici per i ricercatori ed il personale amministrativo ed aule didattiche.

L'idea alla base del progetto L.E.D.A. è stata quella di realizzare un laboratorio che avrebbe consentito l'esecuzione di prove sismiche in modo da sfruttare pienamente la complementarità tra entrambe le tradizionali tecniche della dinamica e della pseudo-dinamica ed esplorare contemporaneamente anche gli avanzati metodi di prova ibridi. Tale caratteristica peculiare, colloca il Centro L.E.D.A. in una posizione privilegiata nel panorama nazionale e internazionale dei grandi laboratori per prove sperimentali.

Il muro di reazione (il secondo più alto d'Europa ed il sesto al mondo) può essere

utilizzato, insieme alla piastra di reazione, per condurre prove statiche e pseudo-dinamiche, nonché prove ibride, grazie alla presenza di una serie di attuatori servo-idraulici completi del loro sistema di controllo. Nel seguente paragrafo si tratterà con più dettaglio del sistema di tavole vibranti, mentre la campagna per la valutazione delle loro prestazioni dinamiche verrà affrontata nelle sezioni seguenti.

### 3.1 Il sistema di tavole vibranti del L.E.D.A.

La principale infrastruttura di ricerca della sezione è costituita dal sistema di due tavole vibranti a sei gradi di libertà illustrato nella Figura 2. Ognuna delle due tavole vibranti identiche ha forma quadrata con lato di 4 m e possibilità di movimento sui sei gradi di libertà.



Figura 2. Tavole vibranti del L.E.D.A. in posizione di parcheggio.

Sfruttando le potenzialità del sistema di controllo, ognuna delle tavole può essere utilizzata per la riproduzione di storie temporali definite in termini di spostamenti o accelerazioni, nell'intervallo di frequenze da 0.01 Hz fino a 60 Hz, ben più ampio del contenuto in frequenza tipico di un terremoto.

Le tavole possono essere utilizzate sia in modo separato che simultaneo. Infatti, grazie alla versatilità del sistema di controllo, è possibile condurre prove sperimentali su una tavola o su entrambe le tavole con moto sincrono o asincrono ad esempio per lo studio degli effetti dinamici su edifici a grandi campate, travate da ponte, edifici industriali, condutture, etc. Il campo di utilizzo delle tavole vibranti è esteso anche all'esecuzione di prove dinamiche su grandi sistemi meccanici o apparecchiature complesse ovvero per lo studio e qualifica di dispositivi di controllo delle vibrazioni per la protezione sismica. La Tabella 1 riporta i parametri limite di funzionamento delle tavole vibranti in corrispondenza del valore massimo del carico pagante, pari a 60 t per singola tavola e per moto uniassiale sinusoidale.

Un aspetto di peculiarità del sistema di tavole vibranti del L.E.D.A. consiste nel fatto che, caso unico in Europa, per modelli più grandi e carichi più elevati è possibile congiungere meccanicamente le due tavole, così come mostrato in Figura 3, realizzando così un'unica tavola vibrante a 6 gradi di libertà dalle dimensioni in pianta di 10 x 4 m. In questo caso, le prestazioni massime del sistema sono riportate nella terza colonna della Tabella 1.





Figura 3. Tavole vibranti del L.E.D.A. nella configurazione connessa (tavola a 6 GdL 10 m × 4 m).

Tabella 1. Caratteristiche principali del sistema di tavole vibranti.

Caratteristica	Singola tavola	Tavole connesse
Dimensioni	4 x 4 m	10 x 4 m
Carico pagante massimo	60 ton	100 ton
Intervallo operativo di frequenza	0.01 ÷ 60 Hz	
Corsa (assi orizzontali)	±400 mm	
Corsa (assi verticali)	±250 mm	
Velocità (assi orizzontali)	± 2.2 m/s	± 1.1 m/s
Velocità (asse verticale)	± 1.5 m/s	± 0.75 m/s
Accelerazione* (assi orizzontali)	± 1.5 g	± 1.05 g
Accelerazione* (assi verticali)	± 1.0 g	± 0.7 g
Momento ribaltante	60 ton·m (test triassiale)	100 ton·m (test triassiale)
	100 ton·m (test monoassiale)	
Sistema di controllo	Trio Sistemi RT-3V - control loop 2 kHz in posizione, velocità e accelerazione	

\* prestazione valutata in corrispondenza del massimo carico pagante.

Ogni tavola è movimentata da otto attuatori oleodinamici Bosch Rexroth ad alte prestazioni, di cui due assicurano il movimento per ognuna delle direzioni orizzontali e quattro sono posti in verticale in corrispondenza degli spigoli della tavola. Tra gli attuatori e la tavola sono posizionati dei giunti sferici a gioco nullo con ridottissimi valori di attrito.

Ognuno degli attuatori orizzontali può esercitare forze statiche massime di 500 kN ad una pressione dell'olio di 280 bar ed è controllato attraverso due servo-valvole a tre stadi Bosch Rexroth aventi ciascuna una portata massima di 890 l/min, mentre per ognuno degli attuatori verticali le caratteristiche corrispondenti sono forza massima pari a 300 kN e presenza di una sola servo-valvola.

I carichi gravitazionali dovuti alla tavola stessa nonché alla massa del modello in prova e di tutte le altre parti mobili sono supportati da uno speciale attuatore statico olio-azoto le cui capacità possono essere modificate dall'utente e calibrate in funzione della massa del modello e delle specifiche esigenze della singola prova.

L'unità di potenza idraulica è capace di fornire una portata continua di 3200 l/min di olio alla pressione di 270 bar. Al fine di aumentare le portate di picco del sistema, sono presenti quattro gruppi di accumulo in pressione con la capacità di 300 l di olio ciascuno, in modo tale da potere raggiungere picchi istantanei di 12000 l/min di portata limitatamente agli istanti in cui sono richieste alte velocità.

Inoltre, ogni attuatore è strumentato in modo da prevedere la presenza di: un sensore di posizione lineare magnetostrittivo MTS Temposonic avente una risoluzione di  $1\ \mu\text{m}$ , un accelerometro MEMS PCB Piezotronics con intervallo di misura di  $\pm 10\ \text{g}$  e risposta in frequenza ad ampiezza costante da DC a  $1.0\ \text{kHz}$ , due sensori di pressione Rexroth con intervallo di misura fino a  $400\ \text{bar}$  per acquisire la pressione differenziale tra le due camere dell'attuatore.

Tutti gli attuatori sono fissati ad una massa sismica di reazione isolata in calcestruzzo armato del peso di  $30\ \text{MN}$  e appositamente progettata per assorbire e dissipare le vibrazioni generate dal Sistema di tavole vibranti durante le prove. Maggiori dettagli sulle fasi di progettazione e realizzazione della massa sismica sono riportati in [9].

### **3.2 Il sistema di controllo**

Il sistema di controllo digitale, appositamente messo a punto per le tavole del centro L.E.D.A., è basato sulla presenza di due controllori RT-3V prodotti da Trio Sistemi e Misure, capaci di lavorare in modo indipendente per la gestione delle due tavole e, quando necessario, in modo sincrono per il controllo simultaneo delle due tavole, sia in modalità connessa (configurazione  $10\ \text{m} \times 4\ \text{m}$ ) che in modalità non connessa.

Il controllore digitale RT-3V presenta elevate caratteristiche di determinismo temporale ed è stato sviluppato sulla piattaforma Real Time di LabView. Particolare attenzione è stata rivolta allo sviluppo di un sincronismo spinto dei due controllori in funzione della gestione della modalità connessa. In questa modalità, infatti, uno dei controllori assume il comando delle operazioni (master) mentre l'altro viene comandato (slave). Il controllore master gestisce e propaga il segnale di clock utile alla acquisizione simultanea di tutti i segnali di comando e di acquisizione.

Il programma di controllo comprende dei cicli di retroazione annidati in tre variabili (3V) con compensazione delle pressioni differenziali e delle forze di equilibrio. Le principali variabili controllate sono gli spostamenti, le velocità e le accelerazioni espresse in termini dei sei gradi di libertà della tavola (calcolati su un riferimento posto sul baricentro geometrico di ogni tavola).

Il controllore, con un clock di  $4\ \text{kHz}$ , esegue l'acquisizione di tutti i segnali (accelerazioni, spostamenti e pressioni) provenienti dai sensori a bordo attuatore. Questi segnali sono quindi utilizzati per calcolare spostamenti, velocità ed accelerazioni in termini di gradi di libertà e i valori ottenuti sono confrontati con i comandi di riferimento. La correzione delle deviazioni tra i riferimenti e la risposta reale viene eseguita ogni mezzo millisecondo ( $2\ \text{kHz}$ ).

Il controllo può avvenire in termini di spostamento o accelerazione. La prima modalità è preferibile per le basse frequenze, mentre il controllo in accelerazione è maggiormente indicato per frequenze medio-alte. In funzione della strategia di controllo adottata, solo una delle variabili di stato è assunta come variabile di controllo principale e le altre sono utilizzate per migliorare la stabilità del sistema. In aggiunta ai classici guadagni proporzionali del loop di controllo 3V, è possibile impostare i parametri di guadagno in azione diretta (anticipi) per gli spostamenti, le velocità, le accelerazioni e le loro derivate (jerk). Le risonanze meccaniche associate con la colonna d'olio del sistema idraulico o indotte da un modello in prova possono essere compensate attraverso dei filtri di notch regolabili su ognuno dei gradi di libertà.

Prima di eseguire una prova, il sistema di controllo RT-3V può essere regolato al fine di raggiungere una risposta in frequenza unitaria per l'ampiezza desiderata dell'intervallo di frequenze. Le operazioni di regolazione (tuning) si eseguono in genere con rumori a banda larga (solitamente tra  $0$  e  $70\ \text{Hz}$ ) con valori di ampiezza sufficientemente alti da avere un



rapporto segnale-rumore favorevole nelle accelerazioni e quindi potere costruire in modo affidabile le funzioni di trasferimento del sistema. Durante questa fase tutti i parametri di controllo possono essere regolati finché non si raggiunga il comportamento dinamico desiderato. Il programma di controllo comprende anche due ulteriori algoritmi di controllo adattivi ed iterativi per migliorare le prestazioni dinamiche e compensare eventuali fonti di distorsione del segnale sia lineari che non lineari.

Il primo di essi consiste in un anello di controllo esterno rispetto al controllo 3V capace di correggere automaticamente gli errori di ampiezza e fase durante una prova di tipo sinusoidale. Il secondo, invece, agisce durante una prova di riproduzione di onde utilizzando la funzione di trasferimento del sistema per modificare opportunamente i segnali di comando al fine di minimizzare gli errori tra i segnali di riferimento e la risposta reale della tavola vibrante.

Il sistema di gestione delle tavole è in grado di eseguire diverse tipologie di prove, come la riproduzione di storie temporali generiche, rumori a banda larga, sinusoidi e sinusoidi a frequenza variabile (sweep sine) per la ricerca delle frequenze di risonanza dei sistemi dinamici.

#### 4 IL PROGRAMMA DI PROVE

Uno dei problemi più impegnativi nell'affrontare le prove su tavola vibrante è legato alle capacità dell'impianto e del relativo software di controllo di riprodurre accuratamente i segnali sismici desiderati. Negli ultimi decenni sono stati condotti diversi studi su questo argomento [13]-[35] e i risultati ottenuti testimoniano che non vi sono ancora soluzioni definitive in merito allo sviluppo di nuove e migliori strategie di controllo per il miglioramento delle prestazioni di riproduzione di questi complessi sistemi dinamici.

In questo lavoro vengono mostrati i risultati principali di una approfondita campagna di prove volta alla definizione delle prestazioni delle tavole vibranti del L.E.D.A. Ulteriori particolari su tali prove sono riportati in [36].

L'obiettivo è quello di valutare l'accuratezza e la fedeltà del sistema di controllo nel riprodurre alcuni segnali scelti tra le registrazioni di terremoti storici. A questo scopo, i segnali desiderati e quelli ottenuti sperimentalmente verranno confrontati tra loro in termini di valori di picco delle quantità cinematiche coinvolte (spostamenti, velocità e accelerazioni). Verrà, inoltre, fornita una misura dell'errore medio (relative root mean square - RRMS) e una valutazione dell'errore anche nel dominio delle frequenze.

Il programma sperimentale ha previsto le quattro configurazioni di prova descritte nella Tabella 2.

Tabella 2. Configurazioni di prova previste dal programma.

Configurazioni	Descrizione	Note
Configurazione 1	Carico rigido da 40 t	Verifica massime prestazioni
Configurazione 2	Carico elastico, massa centrata	Verifica capacità del sistema di controllo
Configurazione 3	Carico elastico, massa eccentrica	Verifica capacità del sistema di controllo
Configurazione 4	Carico rigido da 2x11.2 t	Verifica sincronismo tra le tavole

La prima di esse è stata eseguita su entrambe le tavole, utilizzando un carico rigido di 40 t. In questo caso, considerando anche l'incidenza della tavola stessa e di tutte altre parti meccaniche coinvolte, la massa totale in movimento è stata di 58.5 t, con un'altezza del baricentro di 0.31 m rispetto la superficie della tavola. Questa configurazione ha avuto lo scopo di determinare le massime prestazioni della singola tavola con un carico rigido elevato

e un momento ribaltante ridotto.

La seconda e la terza configurazione, con lo scopo di sollecitare ulteriormente le capacità del sistema di controllo, sono state seguite utilizzando come carico un telaio a due piani in acciaio, meglio descritto nel seguito, con due diverse disposizioni delle masse.

Il quarto caso, infine, è rappresentato da due carichi rigidi di 11,2 t ciascuno su ognuna delle due tavole vibranti, movimentate contemporaneamente. Lo scopo di questa prova è stato quello di verificare il livello di sincronismo del sistema quando esso opera nella modalità master-slave.

Tutte le prove descritte in precedenza sono state eseguite scegliendo come segnali di riferimento da riprodurre le accelerazioni dei seguenti terremoti storici, nelle tre componenti spaziali:

- Norcia, 30 ottobre 2016 (stazione accelerometrica di Accumuli);
- Friuli, 6 maggio 1976 (stazione accelerometrica di Tolmezzo Centrale);
- Kobe, 16 gennaio 1995 (stazione accelerometrica di Takatori).



Figura 4. Vista del carico rigido da 40 t.

I carichi rigidi sono stati realizzati assemblando tra loro dei blocchi di calcestruzzo armato attraverso l'uso di barre filettate M30 classe 8.8 post-tese sia in direzione verticale che orizzontale. Ogni blocco, appositamente costruito secondo le dimensioni delle tavole vibranti, ha dimensioni in pianta di 4.00 m x 0.80 m ed un'altezza di 0.30 m, in modo tale da avere una massa di circa 2200 kg.

Il carico da 40 t (configurazione 1) è stato, quindi, realizzato con 18 blocchi, disposti come mostrato in Figura 4, mentre i due carichi da 11.2 t, utili per il test di sincronizzazione (configurazione 4), sono stati realizzati utilizzando cinque blocchi per ogni tavola, come mostrato in Figura 5.



Figura 5. Vista delle due tavole vibranti durante le prove di sincronizzazione.

In generale, la presenza di un carico elastico e risonante genera delle forze aggiuntive sulle tavole vibranti che il sistema di controllo deve essere in grado di compensare. Al fine di verificare questa abilità, è stato appositamente progettato e realizzato un telaio in acciaio S355, pensato come la riduzione in scala 1:2 di un elemento strutturale estratto da una tipica costruzione civile in acciaio. Il telaio presenta una campata in ciascuna direzione orizzontale con interasse tra le colonne di 2.80 m e due elevazioni per un'altezza totale di 3.86 m. La struttura in acciaio è composta da quattro colonne HEA 240, otto travi IPE 220 e diverse tipologie di controventi (controventi verticali 2L40x80x8 e 2L40x80x6 e controventi di piano O88.9x6.2). Le connessioni, saldate e bullonate, sono state progettate in modo da facilitare le operazioni di assemblaggio e al fine di potere realizzare diverse configurazioni del telaio variandone la rigidità. Su ogni impalcato possono essere disposti gli stessi blocchi in calcestruzzo utilizzati per il carico rigido, in modo da ottenere molteplici disposizioni delle masse.

In particolare, per gli scopi della presente campagna di indagini, sono state utilizzate due configurazioni. La prima di esse (configurazione 2) è stata realizzata prevedendo due blocchi per ogni piano, come mostrato in Figura 6, mentre per la seconda (configurazione 3) è stato previsto l'utilizzo di un solo blocco per piano, disposto in maniera eccentrica, come illustrato in Figura 7. Le masse equivalenti e le coordinate dei baricentri rispetto al centro geometrico della tavola sono riportate nella Tabella 3.

Allo scopo di identificarne i parametri modali, i telai sono stati dapprima sottoposti a diverse prove dinamiche (sweep sine, random test, vibrazioni con rumore ambientale). La Tabella 4 riporta i parametri dei modi di vibrare ricadenti nell'intervallo fino a 60 Hz, calcolati utilizzando l'algoritmo Stochastic Subspace Identification (SSI) [37]-[38].

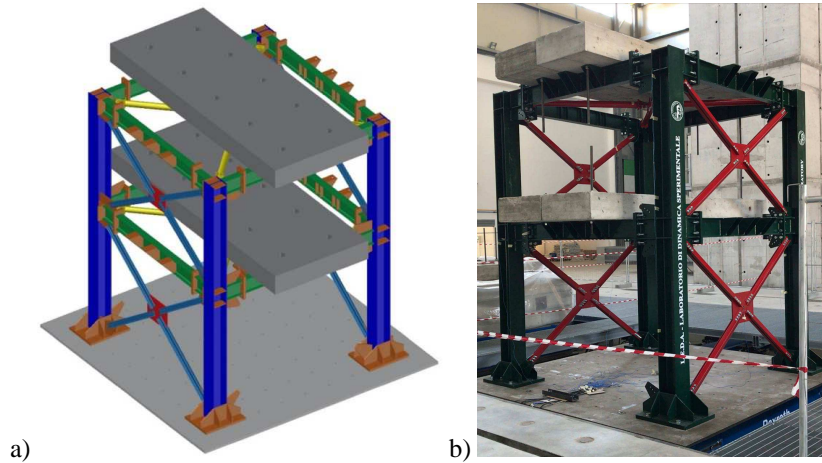


Figura 6. Carico elastico – configurazione 2: a) vista schematica; b) immagine reale;

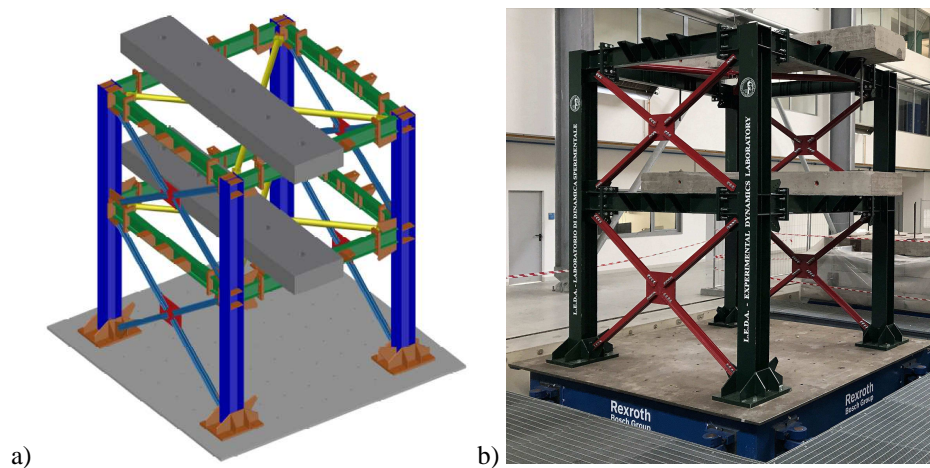


Figura 7. Carico elastico – configurazione 3: a) vista schematica; b) immagine reale;

Tabella 3. Masse equivalenti ai piani per le configurazioni di prova.

	Configurazione 2			Configurazione 3		
	Piano 1	Piano 2	globale	Piano 1	Piano 2	globale
Massa [kg]	6200	5650	11850	3480	2925	6405
X [m]	0.000	0.000	0.000	0.434	0.517	0.474
Y [m]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Z [m]	2.260	4.010	3.094	2.260	4.010	3.059

## 5 TESTING EXECUTION AND RESULTS

L'esecuzione di una prova che prevede la riproduzione di un segnale assegnato è uno dei compiti più importanti per il sistema di controllo e necessita di un elevato grado di affidabilità all'intero sistema di tavole vibranti.

Prima di eseguire la prova, è necessario calcolare la matrice delle funzioni di trasferimento per determinare un modello dell'intero sistema dinamico. A tal fine, si sono utilizzati segnali generati come rumore aleatorio con spettro di frequenza costante nell'intervallo compreso tra 0.1 Hz e 60 Hz e ampiezza di 1.0 m/s<sup>2</sup> RMS per le componenti traslazionali e di 10°/s<sup>2</sup> RMS per le componenti rotazionali, incorrelati per ogni asse e della lunghezza pari a 220 s per ogni asse di movimento.

Tabella 4. Parametri modali per le configurazioni di prova

Configurazione 2		Configurazione 3	
Frequenza [Hz]	Smorzamento [%]	Frequenza [Hz]	Smorzamento [%]
5.05	11.9	5.97	11.4
23.51	3.34	24.96	5.42
29.31	1.75	31.79	0.48
43.48	0.95	38.53	0.65
50.93	0.74	48.80	1.52

Il livello di accelerazione deve essere sufficientemente basso da evitare danni ai campioni, ma sufficiente a produrre una risposta del sistema misurabile. Durante ogni prova, sono stati registrati i segnali di accelerazione per ognuno dei 6 gradi di libertà, al fine di calcolare la matrice delle funzioni di trasferimento. Tale matrice dipende dalle non linearità e delle interazioni dinamiche incrociate tra tutti i componenti del sistema dinamico (modello in prova, massa sismica di reazione, dinamica degli attuatori, risposta delle servo-valvole e così via) rispetto alla tavola vibrante. Invertendo matematicamente la matrice delle funzioni di trasferimento, è possibile ottenere la matrice delle funzioni di impedenza meccanica del sistema, che viene utilizzata dal sistema di controllo per compensare i segnali di comando durante le simulazioni.

Per ogni simulazione condotta, è possibile calcolare l'errore tra il segnale di riferimento e la misura reale per ognuno dei 6 gradi di libertà. Una frazione pesata di tale errore può essere sommata al segnale di comando della successiva esecuzione per accelerare il processo di convergenza.

Al fine di valutare le prestazioni dinamiche delle tavole vibranti, sono stati definiti diversi criteri prestazionali sia nel dominio del tempo che della frequenza. Tra questi vi sono il confronto diretto tra le storie temporali di accelerazione, i valori di picco delle accelerazioni e il confronto tra gli spettri di risposta calcolati per il segnale di riferimento e per l'accelerazione effettiva della tavola. Al fine di stabilire una misura cumulativa dell'errore nella riproduzione del segnale, si è fatto ricorso all'errore RMS relativo, definito come [25]:

$$e_{RRMS} = \frac{\sqrt{\left(\frac{1}{N}\right) \sum_{i=1}^N (\ddot{x}_{fbk}(i) - \ddot{x}_{ref}(i))^2}}{\sqrt{\left(\frac{1}{N}\right) \sum_{i=1}^N (\ddot{x}_{ref}(i))^2}} \times 100 \quad (1)$$

in cui  $\ddot{x}_{fbk}$  e  $\ddot{x}_{ref}$  sono rispettivamente le storie temporali misurate e di riferimento e  $N$  indica il numero degli istanti di misura considerati. Per le registrazioni sismiche si è scelto di definire l'intervallo temporale di interesse come quello compreso tra i valori del 5% e del 95% della intensità di Arias, definita come:

$$A = \int_0^{T_f} \ddot{x}_{ref}^2(t) dt \quad (2)$$

in cui  $T_f$  rappresenta l'intera durata del segnale di riferimento.

La capacità della tavola vibrante di riprodurre lo spettro di risposta dei sismi di riferimento è un altro importante criterio prestazionale adottato. In particolare, per ogni prova di riproduzione sismica, sono stati calcolati e confrontati gli spettri di risposta a partire dalle tre componenti spaziali delle accelerazioni di riferimento e da quelle effettivamente misurate,



nell'intervallo di frequenza compreso tra 0.2 Hz e 60 Hz, in corrispondenza di un valore di smorzamento pari al 5%.

### 5.1 Configurazione di prova 1

Inizialmente le prove sono state eseguite per ogni tavola singolarmente in presenza di un carico rigido di 40 t e per ognuno dei terremoti storici definiti in precedenza secondo la seguente procedura di prova:

1. Regolazione della tavola utilizzando rumore a banda larga a ridotta intensità;
2. Acquisizione delle funzioni di trasferimento e calcolo della matrice di impedenza;
3. Esecuzione della prova sismica triassiale al 50% di ampiezza;
4. Calcolo dell'errore e correzione del segnale di comando;
5. Esecuzione della prova sismica triassiale al 100% di ampiezza;
6. Calcolo dell'errore e correzione del segnale di comando;
7. Iterazione dei punti 5 e 6 fino ad ottenere valori di errore RRMS soddisfacenti.

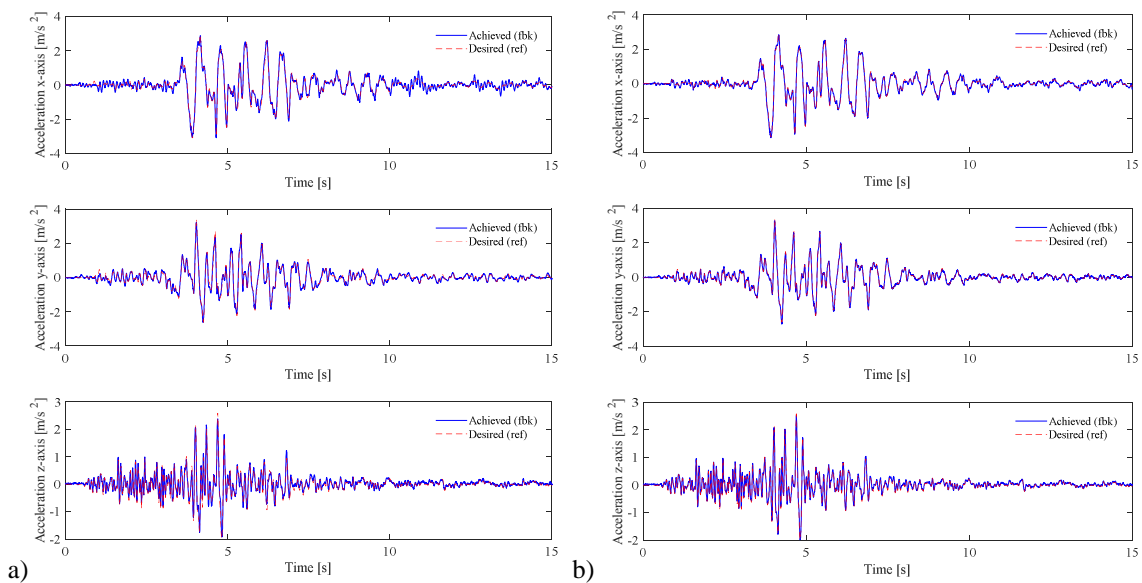


Figura 8. Riproduzione del sisma del Friuli al 100% di ampiezza; a) prima esecuzione dopo la calibrazione; b) risultato dopo 6 iterazioni.

Allo scopo di investigare sulla capacità del controllore di ridurre l'errore, la procedura di correzione iterativa è stata ripetuta per un numero di volte compreso tra quattro a sei. In particolare, in Figura 8a viene mostrato il confronto tra i segnali di riferimento e quelli misurati per ognuna delle tre componenti spaziali del sisma del Friuli, riprodotto con ampiezza del 100%, dopo avere eseguito solamente i punti da 1 a 3 della procedura. I segnali sono già in buon accordo e gli errori RRMS variano tra il 13% ed il 22%, in accordo con analoghi risultati presenti in letteratura. [25], [31].

La procedura è stata, quindi, completata fino a quando i valori di RRMS rimanevano costanti tra una iterazione e la precedente. La Figura 8b. mostra il confronto tra i segnali di riferimento e quelli misurati dopo sei iterazioni, quando si è ottenuta una quasi perfetta riproduzione e valori di RRMS compresi tra il 5% ed il 7%.

La Figura 9 mostra l'andamento degli errori RRMS per ogni componente spaziale rispetto al numero delle iterazioni eseguite, per ognuno dei sismi di riferimento selezionati.



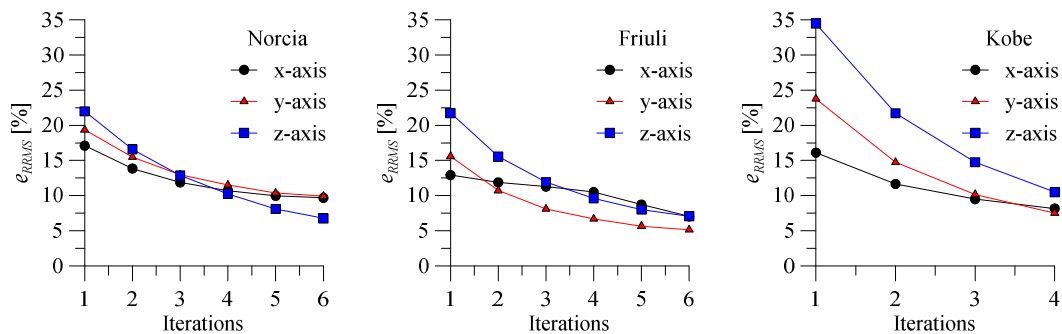


Figura 9. Errori RRMS al variare delle iterazioni per le prove con 40 t di carico rigido.

## 5.2 Configurazioni di prova 2 e 3

La riduzione dell'errore RRMS, quindi, può essere ovviamente ottenuta aumentando il numero delle iterazioni, ma non sempre questo approccio è perseguibile. Infatti, in presenza di un modello molto flessibile o fragile, un elevato numero di iterazioni può aumentare il rischio di indurre danni sul modello in prova. Per questo motivo, è stata messa a punto una procedura di prova alternativa e si è verificato il suo funzionamento utilizzando come carico il telaio in acciaio nelle due configurazioni descritte in precedenza. La nuova procedura può essere sintetizzata come di seguito:

1. Regolazione della tavola utilizzando rumore a banda larga a ridotta intensità;
2. Acquisizione delle funzioni di trasferimento e calcolo della matrice di impedenza;
3. Esecuzione della prova sismica triassiale al 25% di ampiezza;
4. Calcolo dell'errore e correzione del segnale di comando;
5. Esecuzione della prova sismica triassiale al 50% di ampiezza;
6. Calcolo dell'errore e correzione del segnale di comando;
7. Esecuzione della prova sismica triassiale al 100% di ampiezza;

Sono state condotte numerose prove su entrambe le configurazioni del telaio elastico e per i tre terremoti storici selezionati. Gli errori RRMS calcolati in corrispondenza della Configurazione 2 sono risultati compresi tra il 5% ed il 12% per il terremoto di Norcia e per quello del Friuli, e nell'intervallo tra 8% e 15% per il terremoto di Kobe. Le stesse prove sono state eseguite anche per la disposizione eccentrica delle masse del telaio (configurazione 3) e gli errori RRMS sono risultati essere leggermente maggiori rispetto al caso precedente (tra 8% e 15% per il terremoto di Norcia, tra il 6% ed il 13% per il terremoto del Friuli e tra il 10% ed il 18% per il terremoto di Kobe). Ciò è dovuto principalmente alla distribuzione di masse asimmetrica e alla corrispondente attivazione dei modi torsionali del telaio, che hanno una influenza negativa sulla capacità di riproduzione del sistema di controllo.

Inoltre, al fine di verificare l'efficacia della tavola vibrante di riprodurre il contenuto in frequenza dell'accelerazione sismica, sono stati calcolati gli spettri di risposta per tutti i segnali registrati e confrontati con gli spettri di risposta generati a partire dai segnali di riferimento. In Figura 10 vengono confrontati gli spettri di risposta per le tre componenti spaziali del sisma del Friuli e del terremoto di Kobe. I grafici mostrati in figura indicano un ottimo livello di fedeltà di riproduzione raggiunta, anche in corrispondenza di un numero molto ridotto di iterazioni e correzioni eseguite. Gli errori percentuali in termini di spettri di risposta sono risultati essere sempre inferiori al 8%.

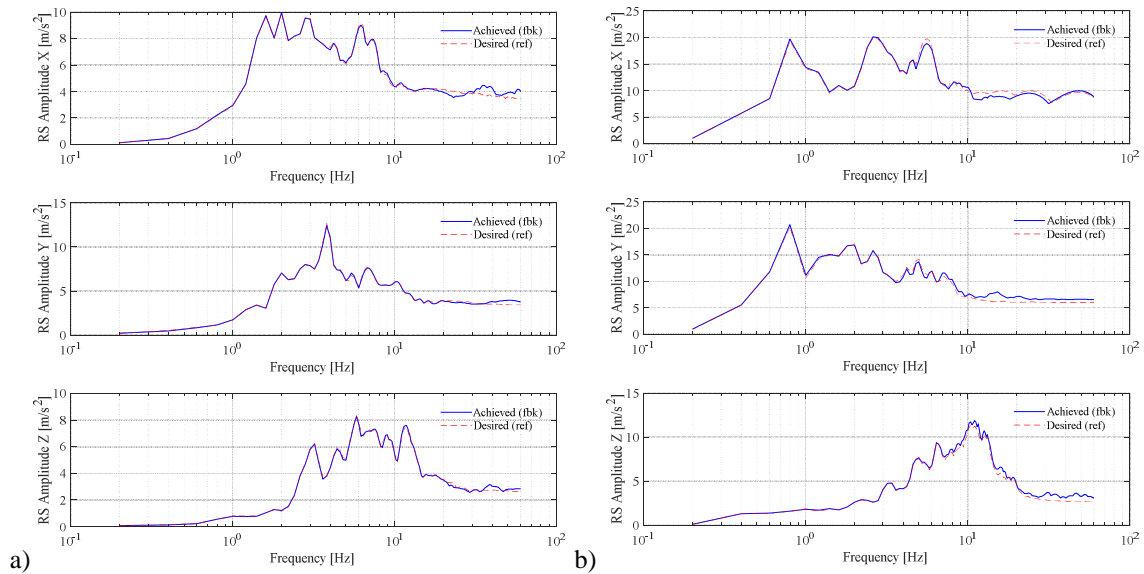


Figura 10. Prove sul telaio elastico (configurazione 2): confronto tra gli spettri di risposta per le tre componenti spaziali; a) terremoto del Friuli; b) terremoto di Kobe;

### 5.3 Configurazione di prova 4

Un'altra importante caratteristica del sistema di tavole vibranti del L.E.D.A. è che le due tavole identiche possono essere utilizzate contemporaneamente nelle seguenti modalità; moto asincrono (ogni tavola vibrante esegue una storia temporale diversa), moto sincrono con tavole non connesse; moto nella configurazione connessa. Nel primo caso, i due controllori lavorano in maniera autonoma ed è possibile che le due prove inizino allo stesso istante, ovvero in due momenti diversi.

Una modalità di lavoro molto impegnativa per il sistema di controllo è, invece, l'esecuzione di prove sulle due tavole in modalità sincrona, ma senza l'utilizzo dell'interfaccia di collegamento metallica. In questo caso, il controllore della Tavola 1 (T1) assume la funzione di master, mentre l'altro (T2) si comporta da slave. Ciò significa che il generatore di segnali di T1 funziona anche come generatore di segnale per T2 e gli anelli di controllo in tempo reale sono sincronizzati dallo stesso clock ma eseguiti su macchine diverse. In questa configurazione, è di primaria importanza far sì che le tavole vibranti possano muoversi con un ridottissimo errore relativo, sia in termini di accelerazioni che di spostamenti.

In Figura 11 sono riportate le accelerazioni lungo le tre componenti spaziali riferite alla riproduzione del sisma di Kobe al 75% dell'ampiezza. Il confronto tra le accelerazioni misurate su T1 e su T2 mostra un buon accordo, dal momento che le accelerazioni relative sono state contenute entro il 10% del valore nominale per ognuna delle tre componenti spaziali. Il confronto in termini di spostamento è, invece, riportato in Figura 12. Il valore massimo di spostamento relativo durante la riproduzione del terremoto di Kobe è stato di 4.1 mm, corrispondente al 1.5% circa dello spostamento di picco, dimostrando così la possibilità di ottenere una riproduzione quasi perfetta delle storie temporali desiderate su entrambe le tavole.

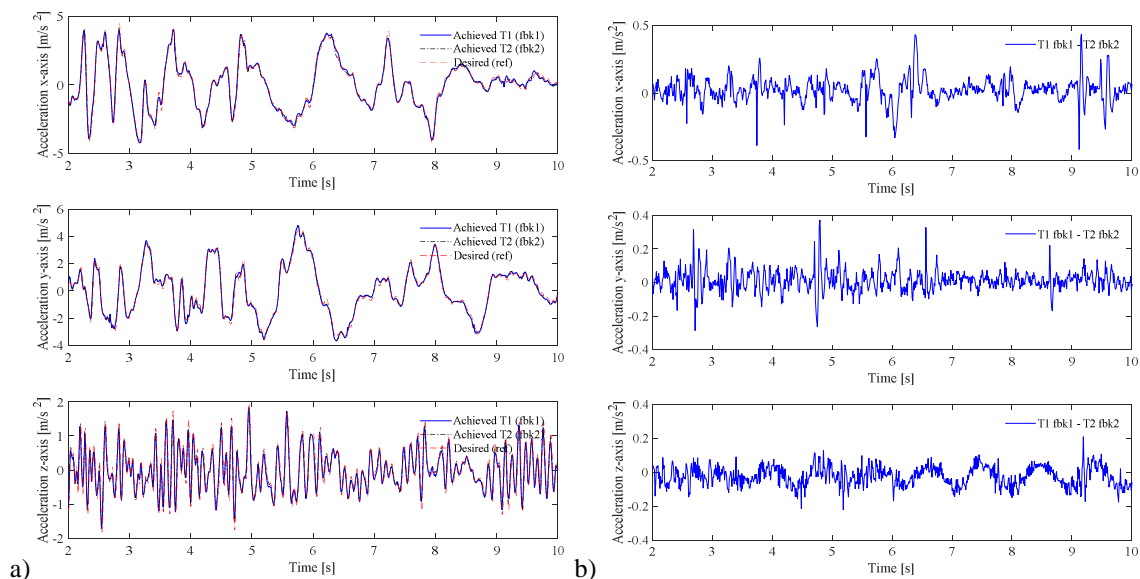


Figura 11. Riproduzione del sisma di Kobe con moto sincrono; a) accelerazioni; accelerazioni relative;

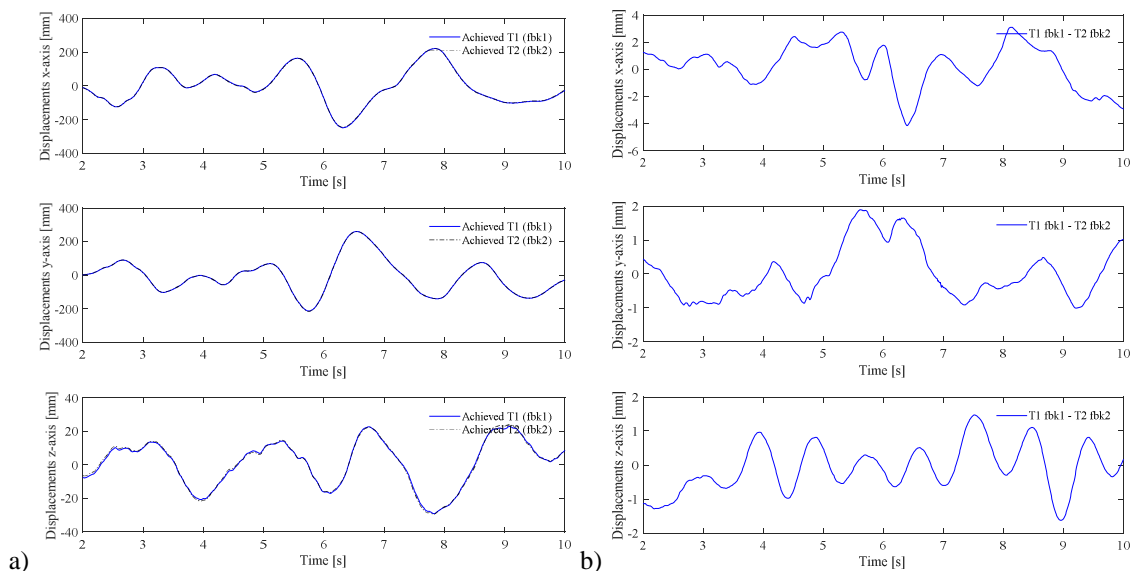


Figura 12. Riproduzione del sisma di Kobe con moto sincrono; a) spostamenti; spostamenti relativi;

## CONCLUSIONI

Nel presente lavoro è stata mostrata da un lato la necessità delle grandi infrastrutture di ricerca per la conduzione di prove sismiche a grande scala, e dall'altro una panoramica delle potenzialità del nuovo Centro di Ricerca L.E.D.A. (Laboratory of Earthquake engineering and Dynamic Analysis) dell'Università degli Studi di Enna "Kore".

Sono stati presentati i risultati di una campagna di prove sperimentali volta a validare le prestazioni dinamiche delle tavole vibranti del L.E.D.A., utilizzando come segnali di riferimento alcuni terremoti storici. Sono state presentate le principali caratteristiche del sistema di controllo RT-3V, prodotto dalla Trio Sistemi e Misure. Con riferimento alla campagna di prove effettuata, possono essere tratte le seguenti conclusioni:

- La procedura di regolazione delle tavole vibranti è altamente dipendente dall'abilità e dall'esperienza dell'operatore. Infatti, il sistema di controllo RT-3V consente di modificare il comportamento del sistema agendo su un gran numero di parametri (guadagni proporzionali, di retroazione, filtri di notch etc.) ma può essere un limite per un operatore non esperto.
- I risultati ottenuti nel confronto tra i segnali di riferimento e quelli effettivamente misurati, in termini di picchi di accelerazione, errore RRMS o spettri di risposta mostrano la capacità del sistema di tavole vibranti del L.E.D.A. nel riprodurre fedelmente gli scenari sismici desiderati, sia in presenza di carichi rigidi che di modelli con marcate risonanze. L'accuratezza nella riproduzione può essere incrementata mettendo a punto procedure iterative di correzione.
- Le prove di sincronizzazione su entrambe le tavole vibranti hanno mostrato che esse possono essere utilizzate con affidabilità per prove su strutture a grande luce e che l'utilizzo delle tavole in maniera congiunta non introduce ulteriori complicazioni nella gestione del sistema.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Kamimura, K., Nakashima, M. "Seismic test facilities for building structures in Japan". In Proceedings of the 4th Engineering Mechanics Division Specialty Conference: Recent Advances in Engineering Mechanics and their Impact on Civil Engineering Practice, West Lafayette, Indiana, USA. Vol. 1, pp. 638-641 (1983).
- [2] EERI, Assessment of earthquake engineering research and testing capabilities in the United States, Earthquake Engineering Research Institute, Committee on Experimental Research, Oakland, CA. Publication No. WP-01, pp. 1-23 (1995).
- [3] NEES, George E. Brown, Jr. Network for Earthquake Engineering Simulation (NEES). 2004-2014 A decade of earthquake engineering reseach, Purdue University, West Lafayette, IN, USA, (2014).
- [4] Marazzi, F., Politopoulos, I. and Pavese, A., "An overview of seismic testing needs in Europe: towards a new advanced experimental facility" Bulletin of Earthquake Engineering, 9(2), 623-640, doi:10.1007/s10518-010-9212-8, (2011).
- [5] M.A. Sozen, S. Otani, P. Gulkan, N.N. Nielsen, The University of Illinois Earthquake Simulator, in *Proceedings of the 4th World Conference on Earthquake Engineering*, Santiago, Chile, Vol. III, (1969).
- [6] K. Ohtani, N. Ogawa, T. Katayama, and H. Shibata, "Construction of a 3-D Full-Scale Earthquake Testing Facility," in *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, 2004.
- [7] J. I. Restrepo, J. P. Conte, J. E. Luco, F. Seible, and L. Van Den Eimde, The NEES@UCSD large high performance outdoor shake table, in *17th ASCE Engineering Mechanics Conference*, Newark, USA, June 13-16, 2004.
- [8] H. Bechtoula, A. Airouche, H. Aknouche, A. Kibboua, M. Remki, and F. Kehila, Performance and Overview of the New 6 Dof Shaking Table of C. G. S. - Algeria, in *Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Istanbul, Turkey, August 25-29, 2014.
- [9] G. Navarra, F. Lo Iacono, M. Oliva, G. Tesoriere, A new research facility: The Laboratory of Earthquake engineering and Dynamic Analysis (L.E.D.A.). In: *Proceedings of XXII Congresso - Associazione Italiana di Meccanica Teorica e*

- Applicata - AIMETA 2015*, ISBN 978-88-97752-55-4, 297-306, Genoa, Italy, September 14-17, 2015.
- [10] Donea J, Magonette G, Negro P, Pegon P, Pinto A and Verzeletti G (1996) “Pseudo-dynamic Capabilities of the ELSA Laboratory for Earthquake Testing of Large Structures”, *Earthquake Spectra*, 12: 163-180.
- [11] Fardis, M.N., Rakicevic, Z.T. (eds.), *Role of Seismic Testing Facilities in Performance-Based Earthquake Engineering*, SERIES Workshop in Geotechnical, Geological, and Earthquake Engineering, Springer, Berlin (2012)
- [12] Joint Research Centre, ESFRI Roadmap for the New Research Infrastructure EFAST: EFAST Project (Design Study of a European Facility for Advanced Seismic Testing), Dictus Publishing, Bruxelles, Belgium, (2011).
- [13] O. Ozcelik, J. E. Luco, J. P. Conte, T. L. Trombetti, and J. I. Restrepo, Experimental characterization, modeling and identification of the NEES-UCSD shake table mechanical system, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **37**(2), 243–264, 2008.
- [14] A. J. Clark, Dynamic characteristics of large multiple degree of freedom shaking tables, in *Earthquake Engineering, Tenth World Conference*, 1992.
- [15] J. P. Conte and T. L. Trombetti, Linear dynamic modeling of a uni-axial servo-hydraulic shaking table system, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **29**(9), 1375–1404, 2000.
- [16] L. Van Den Eende et al., Development of the George E. Brown Jr. Network for Earthquake Engineering Simulation (NEES) Large High Performance Outdoor Shake Table at the University of California, San Diego, in *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, 2004.
- [17] B. K. Thoen and P. N. Laplace, Offline Tuning of Shaking Tables, in *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, 2004.
- [18] E. Cosenza, L. Di Sarno, A. Fiorillo, G. Maddaloni, G. Manfredi, and A. Prota, The Base Isolated Mass of the Dynamic Laboratory at University of Naples Federico II, in *14th World Conference on Earthquake Engineering (14WCEE)*, Beijing, China, October 12-17, 2008.
- [19] Airouche et al., Numerical Modeling and Experimental Identification of The EUCENTRE Trees Lab Shake Table, in *14th World Conference on Earthquake Engineering (14WCEE)*, Beijing, China, October 12-17, 2008.
- [20] O. Ozcelik, J. E. Luco, J. P. Conte, T. L. Trombetti, and J. I. Restrepo, Experimental characterization, modeling and identification of the NEES-UCSD shake table mechanical system, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **37**(2), 243–264, 2008.
- [21] O. Ozcelik, J. E. Luco, and J. P. Conte, Identification of the Mechanical Subsystem of the NEES-UCSD Shake Table by a Least-Squares Approach, *J. Eng. Mech.*, **134**(1), 23–34, 2008.
- [22] G. Maddaloni, *Le tavole vibranti biassiali del CRdC AMRA: procedure di calibrazione e progetto di un sistema di isolamento*, Università degli Studi di Napoli Federico II, PhD Thesis, 2008.
- [23] K. Seki, M. Iwasaki, M. Kawafuku, H. Hirai, and K. Yasuda, Adaptive compensation for reaction force with frequency variation in shaking table systems, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, **56**(10), 3864–3871, 2009.
- [24] N. Nakata, Acceleration trajectory tracking control for earthquake simulators, *Eng. Struct.*, **32**(8), 2229–2236, 2010.
- [25] J. E. Luco, O. Ozcelik, and J. P. Conte, Acceleration Tracking Performance of the UCSD-NEES Shake Table, *J. Struct. Eng.*, **136**(5), 481–490, 2010.

- [26] G. Maddaloni, K. P. Ryu, and A. M. Reinhorn, Simulation of floor response spectra in shake table experiments, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **40**(6), 591–604, 2011.
- [27] N. Nakata, Error Analysis of Digitally Controlled Servo Hydraulic Actuators for Structural Testing, *J. Earthq. Eng.*, **15**(6), 901–923, 2011.
- [28] Z. Rakicevic, M. Garevski, N. Naumovski, and I. Markovski, Adaptive Control Techniques for Seismic Testing Systems, in *EACS 2012 – 5th European Conference on Structural Control*, Genoa, Italy, June 18–20, 2012.
- [29] J. Ji, W. Yan, Z. Li, and F. Li, The Large-scale Nine-Shaking-Tables Array System: Development, Construction, Application and Research, in *EACS 2012 – 5th European Conference on Structural Control*, Genoa, Italy, June 18–20, 2012.
- [30] P. Ceresa, F. Brezzi, G. M. Calvi, and R. Pinho, Analytical modelling of a large-scale dynamic testing facility, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **41**(2), 255–277, 2012.
- [31] H. Aknouche, H. Bechtoula, A. Airouche, D. Benouar, Investigation on the performance of the six DOF C.G.S., Algeria, shaking table, *Earthquakes and Structures*, **6**(5), 539–560, 2014.
- [32] G. Guan, H. Wang, and W. Xiong, Multi-input multi-output random vibration control of a multi-axis electro-hydraulic shaking table, *J. Vib. Control*, **21**(16), 3292–3304, 2015.
- [33] P. Chen and C. Lai, Alternative Acceleration Performance Assessment Method for Seismic Shaking Tables, in *Proceedings of the 6th International Conference on Advances in Engineering Structural Engineering*, University of Illinois, Urbana-Champaign, United States, August 1-2, 2015.
- [34] A. R. Plummer, Model-based motion control for multi-axis servo hydraulic shaking tables, *Control Eng. Pract.*, **53**, 109–122, 2016.
- [35] G. Shen, Z.-C. Zhu, X. Li, Q.-G. Wang, G. Li, and Y. Tang, Acceleration waveform replication on six-degree-of-freedom redundant electro-hydraulic shaking tables using an inverse model controller with a modelling error, *Trans. Inst. Meas. Control*, 1-19, 2016.
- [36] F. Lo Iacono, G. Navarra, M. Oliva, D. Cascone, Experimental Investigation Of The Dynamic Performances Of The Leda Shaking Tables System. in *Proceedings of XXIII Congresso - Associazione Italiana di Meccanica Teorica e Applicata - AIMETA 2017*, ISBN 978-889-42484-7-0, p. 897-915, Salerno, Italy, 4-7 September 2017
- [37] P. Van Overschee, B. De Moor. *Subspace Identification for Linear Systems: Theory – Implementation – Applications*, Dordrecht, The Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [38] C. Rainieri, G. Fabbrocino. *Operational Modal Analysis of Civil Engineering Structures - An Introduction and Guide for Applications*, Springer, 2014.