

Laboratori Eucentre

Prove di qualifica sismica su tavola vibrante di trasformatori di tensione

Davide Bolognini¹, Filippo Dacarro² ■

Le prove su trasformatori di tensione capacitivi per installazioni esterne sono di particolare interesse perché questi componenti elettrici devono mantenere uno stato di operatività ininterrotta anche quando sottoposti ad un evento sismico. Per questo motivo la loro installazione è vincolata al superamento di specifiche prove di qualifica normate dalle International Standard 62271 “*High-voltage switchgear and controlgear - Part 207: Seismic qualification for gas-insulated switchgear assemblies for rated voltages above 52 kV*”, redatte dall’International Electrotechnical Commission (IEC), organizzazione che si occupa della standardizzazione nel campo dei componenti elettrici ed elettrotecnici. Per la loro applicazione, le IEC-62271-207 sono integrate da ulteriori riferimenti, fra i quali le IEC 60068-2-47 focalizzate sulle modalità di montaggio, le IEC 60068-2-57 e 3-3:1991 su time history e metodi per test sismici. Lo scopo delle prove di qualifica è verificare l’attitudine di un componente elettrico a sopportare le sollecitazioni sismiche; ciò può essere dimostrato tramite test sperimentali oppure ricorrendo a una combinazione di test e analisi. La prova si considera superata se il campione è ancora funzionante e non presenta alcun tipo di danneggiamento, tranne minime deformazioni nel caso di materiali duttili. È implicito, quindi, il motivo per cui la normativa non possa fare riferimento alla sola soluzione analitica.

Per quanto riguarda l’input sismico, le norme prevedono tre livelli di qualifica a cui sono associati differenti spettri orizzontali di riferimento (RRS) e valori di accelerazione a periodo nullo (ZPA), come indicato in Tabella 1 e nelle Figure 1 e 2. La componente verticale della sollecitazione sismica è invece definita applicando un “coefficiente direzionale” pari a 0.5.

Tabella 1 - Differenti livelli di qualifica sismica e parametri associati

Livello di qualifica	Spettro di risposta richiesto (RRS)	Accelerazione iniziale (ZPA)
Alto	Tipo 1	5.00 m/s ²
Moderato	Tipo 2	2.50 m/s ²
Basso	nessuno	0.00

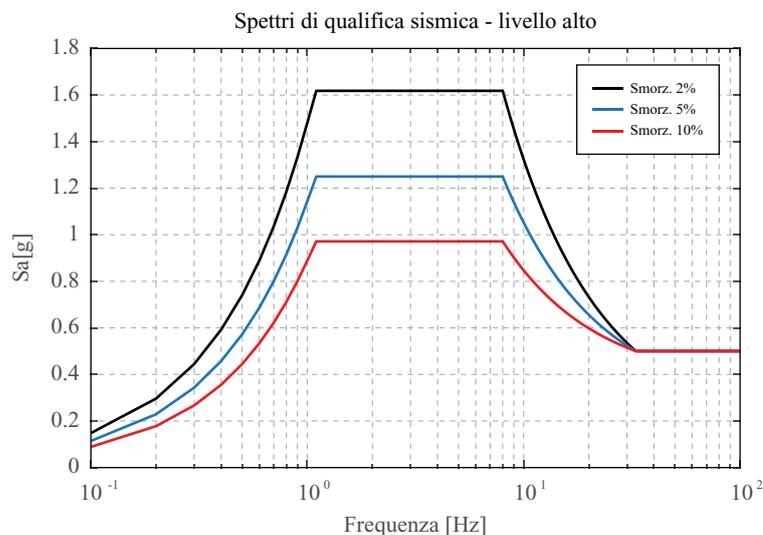
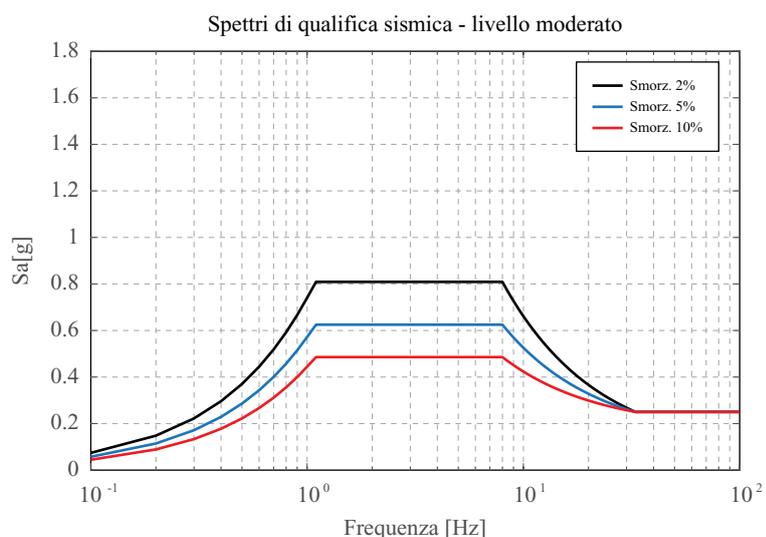


Figura 1
Spettri di risposta di TIPO 1 a diversi valori di smorzamento, richiesti per qualifiche sismiche di livello alto.

¹ Eucentre - Dipartimento Experimental Techniques, Pavia, Italia - davide.bolognini@eucentre.it

² Eucentre - Direttore Dipartimento Experimental Techniques, Delegato responsabile dei Laboratori, Pavia, Italia - filippo.dacarro@eucentre.it

Figura 2
Spettri di risposta di TIPO 2 a diversi valori di smorzamento, richiesti per qualifiche sismiche di livello moderato.



Il laboratorio 6D-Lab di Eucentre si occupa di questo tipo di prove mettendo a disposizione una tavola vibrante di dimensioni in pianta di 4.80 x 4.80 m, guidata da un sistema di 12 attuatori idraulici servocontrollati (Figura 3) che ne gestiscono i vari gradi di libertà sulla base di un preciso schema cinematico. Il progetto esecutivo della tavola prevede il passaggio a inizio 2019 dagli attuali 4 ai 6 gradi di libertà finali (Figura 4), grazie al raddoppio del numero di attuatori che impongono i movimenti nel piano. In tal modo le prestazioni verranno potenziate come indicato in Tabella 2, soprattutto per quanto riguarda la capacità di spostamento nel piano e la relativa velocità di picco che, praticamente, verranno rispettivamente raddoppiata e quadruplicata. Grazie alla nuova configurazione, la tavola vibrante sarà in grado di effettuare prove triassiali cioè prove in cui l'input sismico è applicato contemporaneamente nelle due direzioni nel piano e in direzione verticale.

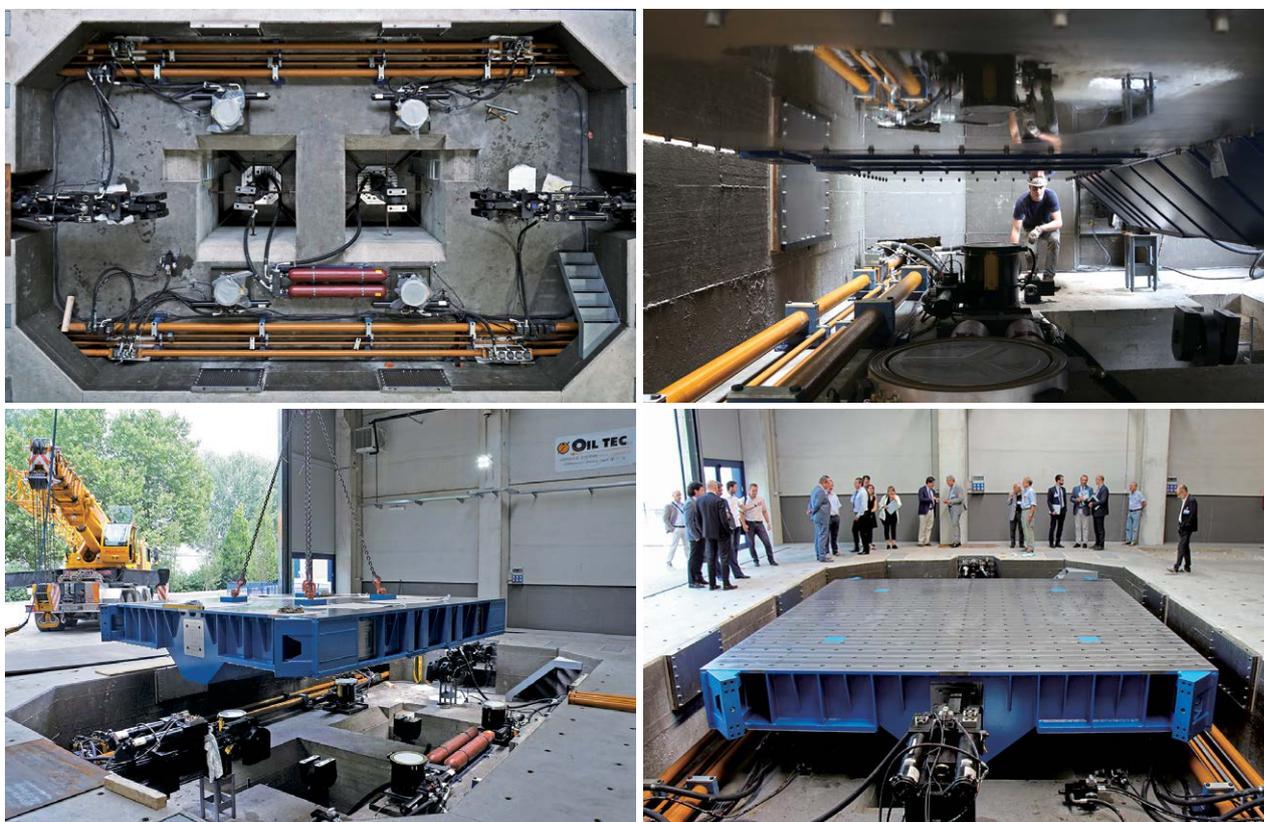
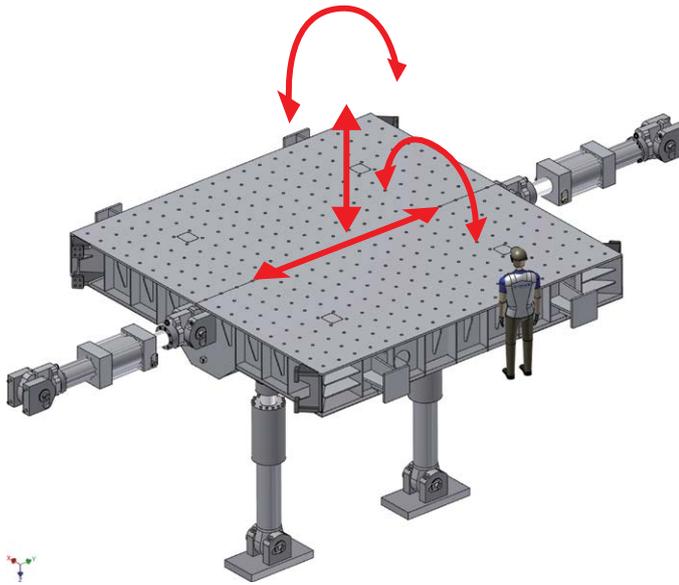


Figura 3 - Alcune fasi del montaggio della tavola vibrante del 6D-Lab, in cui è apprezzabile il sistema di 12 attuatori oleodinamici (non sono visibili i 4 pattini laterali, posizionati in corrispondenza delle piastre di scorrimento sulle pareti verticali).

4 Gradi di Libertà



6 Gradi di Libertà

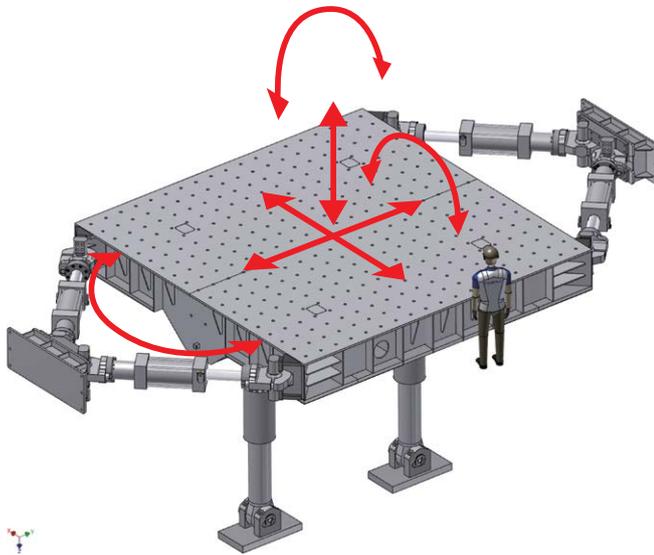


Figura 4
Configurazione a 4 GDL e 6GDL della tavola vibrante situata presso il 6D-LAB di Eucentre.

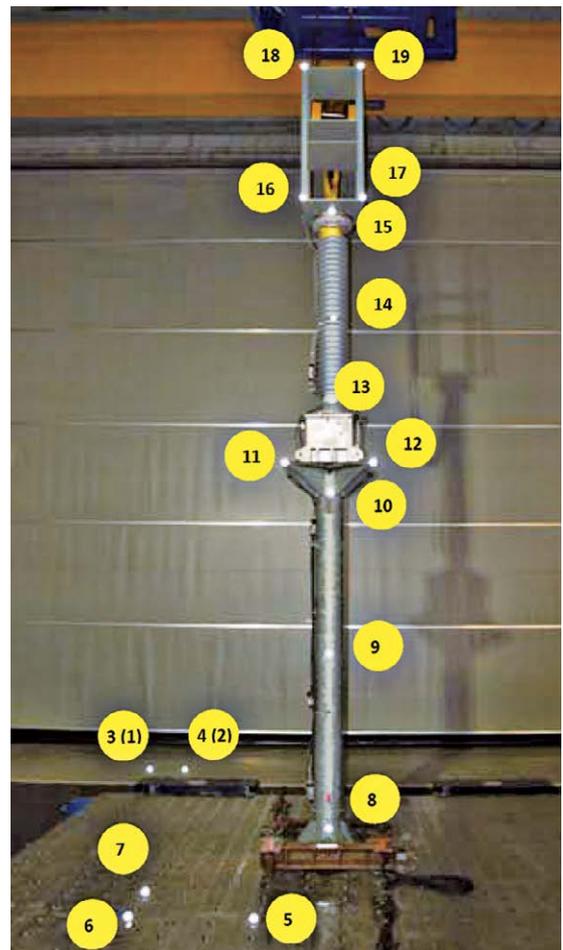
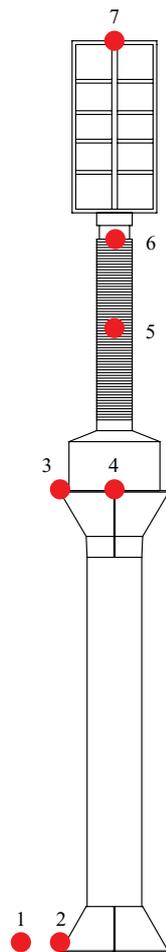
Tabella 2 - Caratteristiche prestazionali della tavola vibrante a 4 e a 6 GDL

Caratteristiche della tavola vibrante:		4 GDL	6 GDL
Dimensioni in pianta 4.8 m x 4.8 m		4.8 m x 4.8 m	
Gradi di libertà controllati	Traslazioni:	1) longitudinale; 2) verticale;	1) longitudinale; 2) trasversale; 3) verticale;
	Rotazioni:	3) rollio; 4) beccheggio	4) rollio; 5) beccheggio; 6) imbardata
Spostamento di picco longitudinale		±250 mm	±500 mm
Spostamento di picco verticale		140 mm	140 mm
Velocità di picco longitudinale		±500 mm/s	±2000 mm/s
Velocità di picco verticale		±500 mm/s	±500 mm/s
Forza dinamica di picco longitudinale		2000 kN	2000 kN
Forza dinamica di picco verticale		5000 kN	5000 kN
Portata massima		30 t	30 t

La configurazione di prova su tavola vibrante prevede che il trasformatore di tensione sia alloggiato su di un supporto metallico di geometria standard, la cui piastra di base è fissata alla tavola. Il sistema risultante è una sorta di mensola verticale a rigidità variabile, la cui altezza totale dipende fortemente dalla geometria del trasformatore: il caso qui descritto è alto complessivamente circa 6.00 m. Il vincolo a terra è stato realizzato imbullonando la piastra di base del supporto ad una contropiastra di spessore importante, a sua volta bloccata alla tavola mediante un sistema di fermi tirafondati. Il controllo sistematico dell'opportuno valore della coppia di serraggio dei bulloni alla base è parte integrante della procedura di prova.

La risposta sismica del provino, così come le caratteristiche dinamiche pre e post-test, sono determinate attraverso il monitoraggio di accelerazioni e spostamenti. La strumentazione prevista a tale scopo è composta da una serie di accelerometri triassiali disposti a varie quote, in asse sul provino, e da un sistema di acquisizione ottica (Figura 5). Quest'ultimo, sfruttando la triangolazione di telecamere a raggi infrarossi coassiali su un sistema di marker retro-riflettenti, permette di rilevare gli spostamenti relativi nello spazio rispetto ad un punto della tavola, per esempio la base del provino. Quattro segnali di read-out provenienti dal controller della tavola vibrante, precisamente accelerazione e spostamento sia longitudinali che verticali, sono stati trattati alla stregua di strumenti esterni e quindi aggiunti come canali di completamento del sistema di acquisizione. La sincronizzazione fra acquisizione ottica ed esterna è garantita dalla presenza contemporanea dei read-out in spostamento e dei marker vincolati alla tavola. Nelle Tabelle da 3 a 5 sono riassunte le caratteristiche rispettivamente degli accelerometri, dei read-out acquisiti e dei marker usati per l'acquisizione ottica.

Figura 5
Schema degli accelerometri
(a sinistra) e dei marker
(a destra).



Il protocollo di prova adottato, in accordo con le IEC 62271-207, fa riferimento ad un livello di qualifica alto e prevede le seguenti fasi:

- Verifica delle condizioni del provino e del serraggio dei bulloni della piastra di base.
- Test di vibrazione a bassa intensità con onde random ad ampiezza costante per la valutazione delle frequenze di risonanza del provino.
- Una serie di test di simulazione sismica ad intensità crescente mediante time-histories definite in base allo spettro di risposta al 2% di smorzamento richiesto dalla normativa.
- Test di vibrazione a bassa intensità con onde random ad ampiezza costante per la valutazione delle frequenze di risonanza del provino in condizione post-sisma.

I punti (b) e (d) del protocollo di prova servono per valutare le caratteristiche dinamiche del provino prima e dopo il test: una variazione non trascurabile di tali caratteristiche (e.g. riduzione della frequenza) è sintomo della presenza di un danneggiamento del materiale e di una risposta potenzialmente non lineare. Si è optato per un segnale random ad ampiezza costante perché in grado di coprire un ampio intervallo praticamente continuo di frequenze, risultando un metodo di elevata efficacia ed affidabilità rispetto ad altre soluzioni.

Tabella 3 - Posizione degli accelerometri e caratteristiche di taratura

Livello	ID Code	Posizione	Quota [mm]	Offset [mV]	Sens. [mV]
	1X			2499.3	1003.3
#1	1Y	Tavola vibrante	0	2488.9	1015.9
	1Z			2459.4	998.9
	2X			2502.1	1014.9
#2	2Y	Base supporto metallico	65	2491.7	1016.2
	2Z			2471.7	991.5
	3X			2503.5	1003.8
#3	3Y	Capitello supporto metallico	2920	2472.2	999
	3Z			2481.9	1006.9
	4X			2475.3	335.9
#4	4Y	Base trasformatore	3360	2482.4	340.6
	4Z			2473.3	328.4
	5X			2521.8	336
#5	5Y	Stelo trasformatore	4320	2504.3	330.3
	5Z			2484.9	336
	6X			2482.4	338.5
#6	6Y	Sommità trasformatore	5625	2489.3	331.5
	6Z			2488.6	330.1
	7X			2462.6	331.7
#7	7Y	Sommità celle	6333	2492.9	335.5
	7Z			2479.9	329

Tabella 4 - Posizione in quote della strumentazione ottica (marker) per l'acquisizione degli spostamenti

Livello	Quantità	Quota [mm]	Posizione
#1	4	0	Pavimento Laboratorio
#1	3	0	Tavola vibrante
#2	1	220	Piastra di base supporto metallico
#3	1	1450	Stelo supporto metallico
#4	1	2670	Capitello supporto metallico
#5	2	2920	Capitello supporto metallico
#6	1	3120	Base trasformatore
#7	1	4320	Stelo trasformatore
#8	1	5625	Sommità trasformatore
#9	2	5683	Base celle sommitali
#10	2	6333	Testa celle sommitali

Tabella 5 - Tipologia e caratteristiche dei read-out della tavola vibrante

Livello	ID Code	Oggetto	Quota [m]	Range in V	Range in unità ingegneristiche
#1	AX, AY	Accelerazione longitudinale e trasversale	0.00	±10	±98.1 m/s ²
#1	SX, SY	Spostamento longitudinale e trasversale	0.00	±10	±0.275 m
#1	AZ	Accelerazione verticale	0.00	±10	±98.1 m/s ²
#1	SZ	Spostamento verticale	0.00	±10	0.15 m

Le prove sono state realizzate con la tavola vibrante in una configurazione intermedia a 4 gradi di libertà; il provino è stato sottoposto prima a test con sollecitazioni contemporaneamente in direzione longitudinale e verticale, poi ruotato di 90° nel piano e quindi eccitato nelle direzioni trasversale e verticale. È implicito che, a breve, non appena il progetto esecutivo della tavola sarà portato a compimento, garantendo così i 6 gradi di libertà, saranno eseguite direttamente prove triassiali vere e proprie, senza alcuna necessità di ruotare il provino. La fase di post-processo dei dati prodotti da ciascun test ha previsto la conversione in unità ingegneristiche ed un filtraggio del segnale. In aggiunta, la sincronizzazione fra acquisizione esterna ed acquisizione ottica è stata fatta allineando i segnali comuni ad entrambe, in questo caso lo spostamento alla base della tavola. Una volta effettuato questo passaggio e noti sia accelerazioni, sia spostamenti ai vari livelli, il post-processo è stato distinto in due casi, a seconda della necessità di trattare i dati per valutare le caratteristiche dinamiche del provino (casi (b) e (d)), oppure per determinare la risposta sismica (caso (c)).

Per quanto riguarda il primo caso, le frequenze proprie pre e post-test del provino sono state determinate valutando le condizioni di risonanza prodotte dall'eccitazione tramite segnale random ad ampiezza costante. In particolare, per ogni accelerometro sono stati generati sia il modulo della trasformata di Fourier, sia la funzione di trasferimento rispetto alla base. Nelle Figure da 6 a 13, così come riassunto in Tabella 6, si notano tre frequenze fondamentali di risonanza in direzione orizzontale (circa 1.70 Hz, 6.90 Hz e 19 Hz) e una lungo quella verticale (circa 47 Hz). Ciò è dovuto al fatto che il provino è costituito da differenti componenti a diversa rigidità: la colonna metallica inferiore molto rigida, il trasformatore vero e proprio, più flessibile, e le celle sommitali, che sembrano essere la parte più flessibile in assoluto dell'intero sistema. L'elevato valore della frequenza verticale, inoltre, è giustificato dalla notevole rigidità del sistema lungo tale direzione.

È interessante inoltre osservare, nelle figure sopraccitate, la risposta orizzontale in funzione della quota: mentre la base oscilla ad una frequenza molto elevata rigidamente vincolata alla tavola, salendo in quota risultano mobilitate le frequenze via via più basse.

Tabella 6 - Caratteristiche dinamiche del provino.

ID test	Direzione globale	Direzione locale	Tipo test	Frequenze [Hz]		
				1	2	3
1	Longitudinale	X	Pre-sisma	1.69	6.88	19.14
2	Verticale	Z		47.66	–	–
3	Longitudinale	X	Post sisma	1.68	6.86	18.93
4	Verticale	Z		46.75	–	–

Figura 6
Test #1 (Tabella 6):
modulo FFT accelerometro 1
(quota 0 mm, tavola).

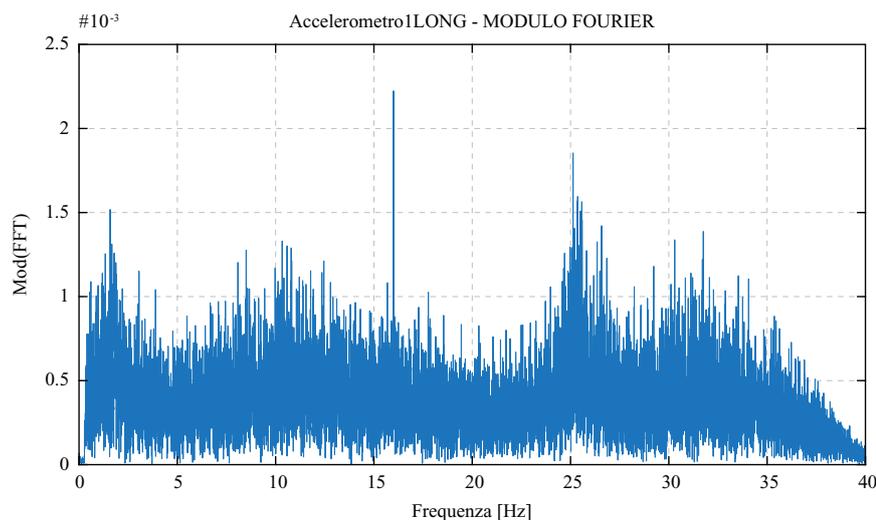
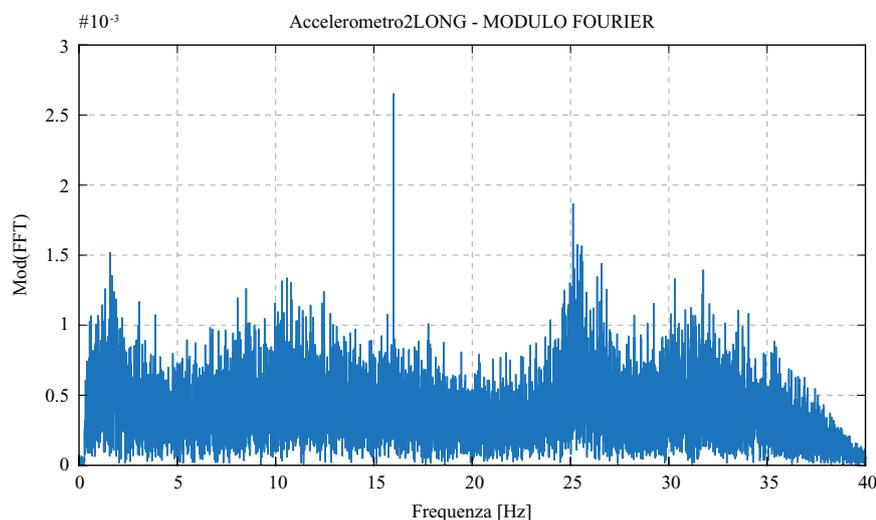


Figura 7
Test #1 (Tabella 6):
modulo FFT accelerometro 2
(quota 65 mm, base provino).



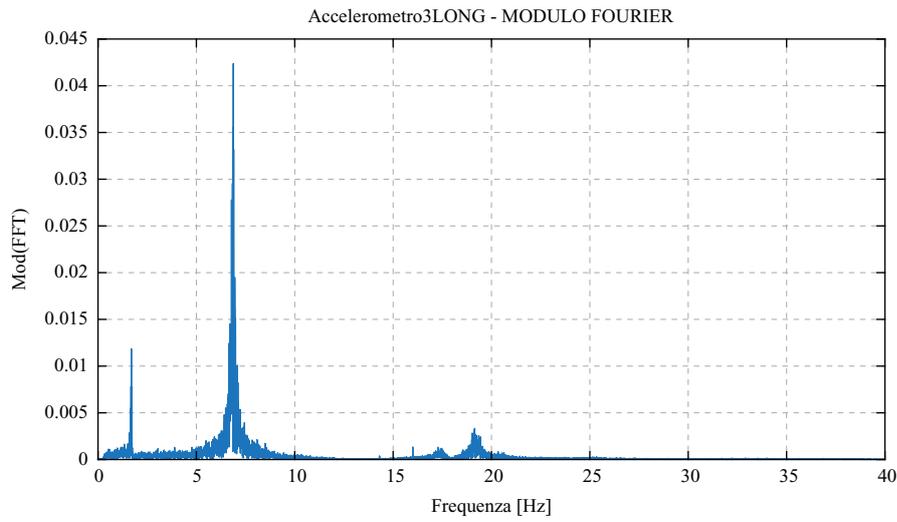


Figura 8
Test #1 (Tabella 6): modulo
FFT accelerometro 3 (quota
2910 mm, testa colonna).

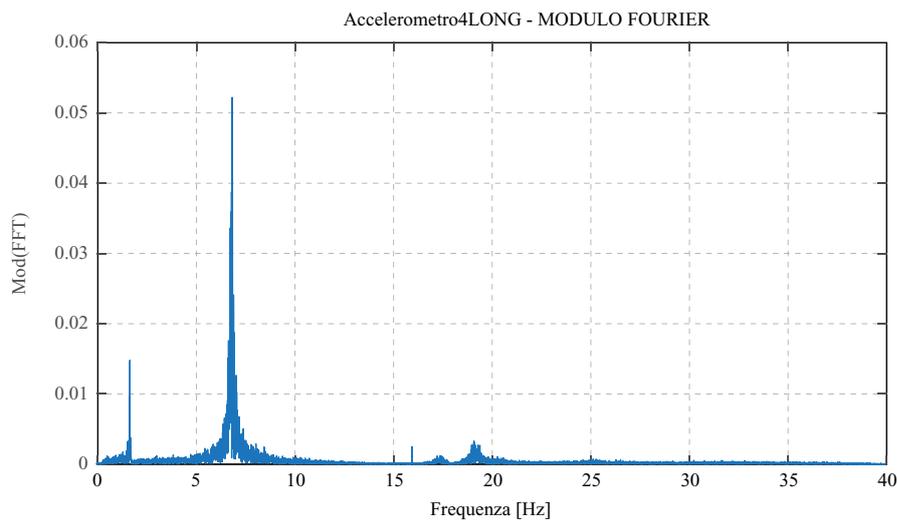


Figura 9
Test #1 (Tabella 6): modulo
FFT accelerometro 4
(quota 3360 mm, base
trasformatore).

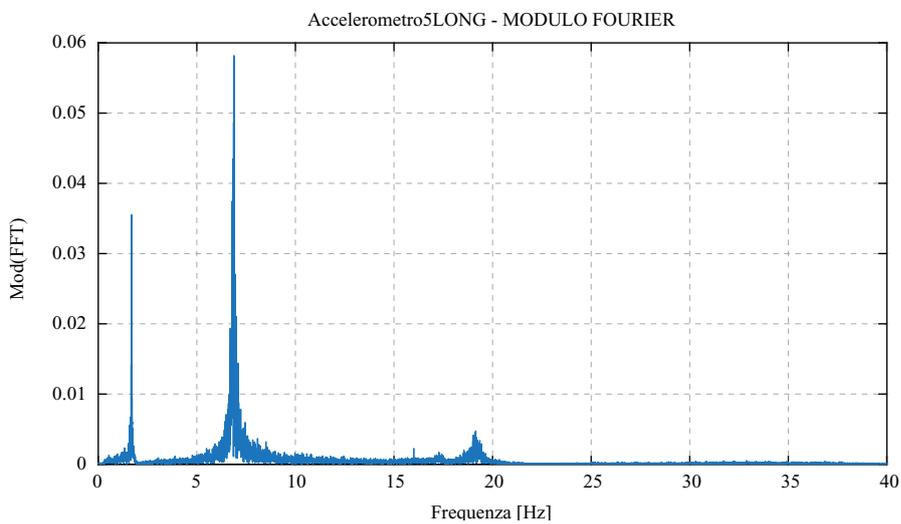


Figura 10
Test #1 (Tabella 6):
modulo FFT accelerometro
5 (quota 4320 mm, stelo
trasformatore).

Figura 11
 Test #1 (Tabella 6): modulo
 FFT accelerometro 6
 (quota 5625 mm, testa
 trasformatore).

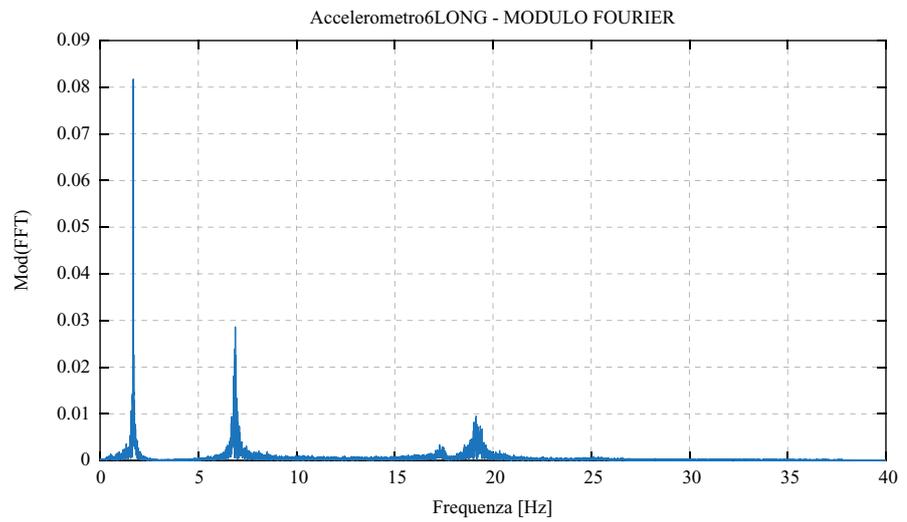


Figura 12
 Test #1 (Tabella 6): modulo
 FFT accelerometro 7
 (quota 6333 mm, testa celle
 sommitali).

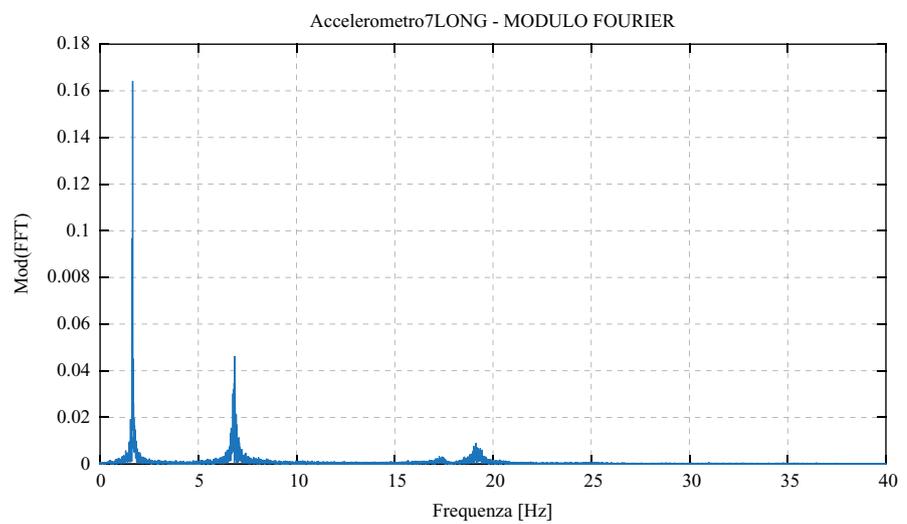
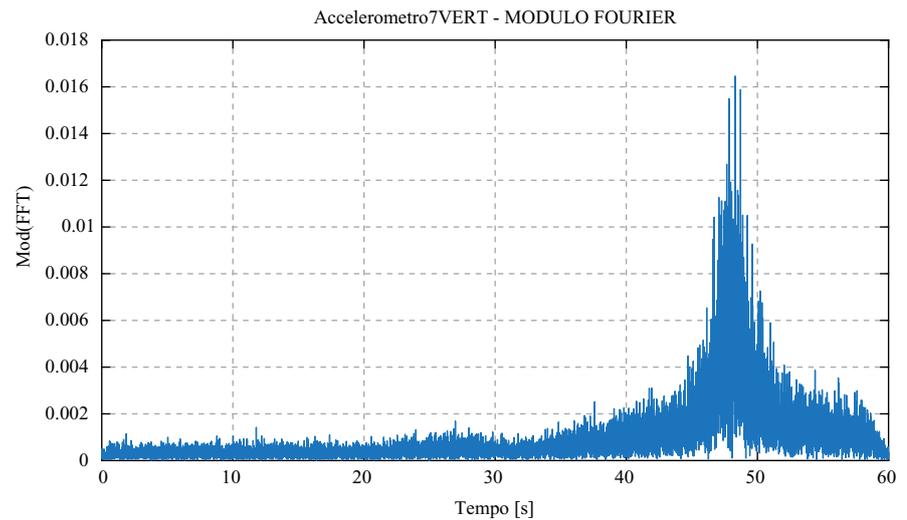


Figura 13
 Modulo della trasformata
 di Fourier valutato in
 direzione verticale per
 l'accelerogramma 7 (Livello
 #6) prima dei test sismici in
 direzione XZ.



Per quanto riguarda i test sismici veri e propri, invece, sono state prodotte informazioni riguardanti sia le accelerazioni, sia gli spostamenti. In particolare, le accelerazioni orizzontali e verticali, determinate per ogni quota a cui sono stati posizionati gli strumenti, hanno permesso di apprezzare l'amplificazione del segnale con l'altezza: in corrispondenza della sommità delle celle si raggiungono valori superiori a 3.5 g e 2.0 g rispettivamente in direzione orizzontale e verticale (Figura 14). Considerando che la PGA dello spettro amplificato al 100% è di 0.5 g, la massima amplificazione orizzontale risulta essere superiore a 7. Un altro aspetto interessante, oltre

all'amplificazione in altezza, è l'effetto dello smorzamento per oscillazioni libere riscontrato nella coda del segnale, in particolar modo ancora una volta per quanto riguarda le componenti più flessibili situate nella parte sommitale del provino; si vedano a tal proposito le Figure da 15 a 21, in particolar modo le ultime due.

Come atteso, l'amplificazione in funzione della quota è stata notata anche nei segnali in spostamento, con valori massimi assoluti in sommità pari a circa 280 mm (Figura 22), cioè il 4.4% dell'altezza.

Un ultimo aspetto delle elaborazioni ha riguardato il confronto, positivo, fra il segnale di input ed il relativo feedback in termini di spettro teorico da normativa e spettro di risposta in accelerazione registrato alla quota della tavola (Figure 23 e 24).

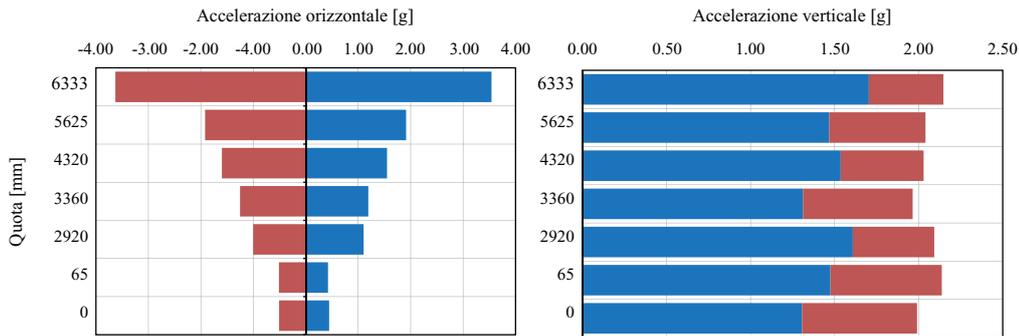


Figura 14
Distribuzione delle accelerazioni massime e minime lungo l'altezza per test sismici - amplificazione 100% - direzione orizzontale (a sinistra) e verticale (a destra).

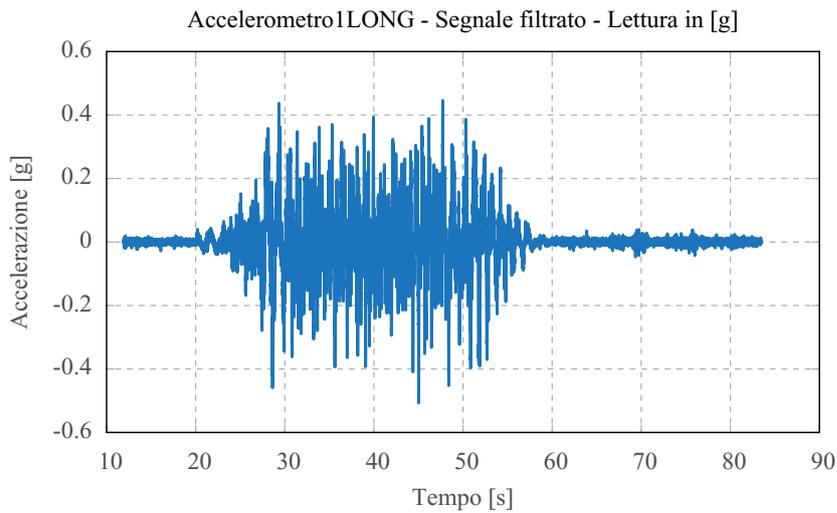


Figura 15
Accelerometro 1 (quota 0 mm, tavola) – segnale in direzione orizzontale per test sismici con amplificazione 100%.

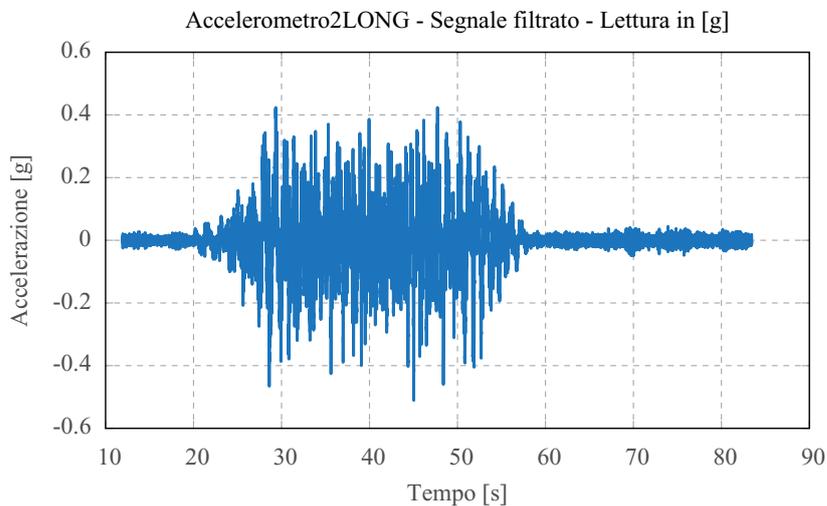


Figura 16
Accelerometro 2 (quota 65 mm, base provino) – segnale in direzione orizzontale per test sismici ad amplificazione 100%.

Figura 17
 Accelerometro 3 (quota 2910 mm, testa colonna) – segnale in direzione orizzontale per test sismici ad amplificazione 100%.

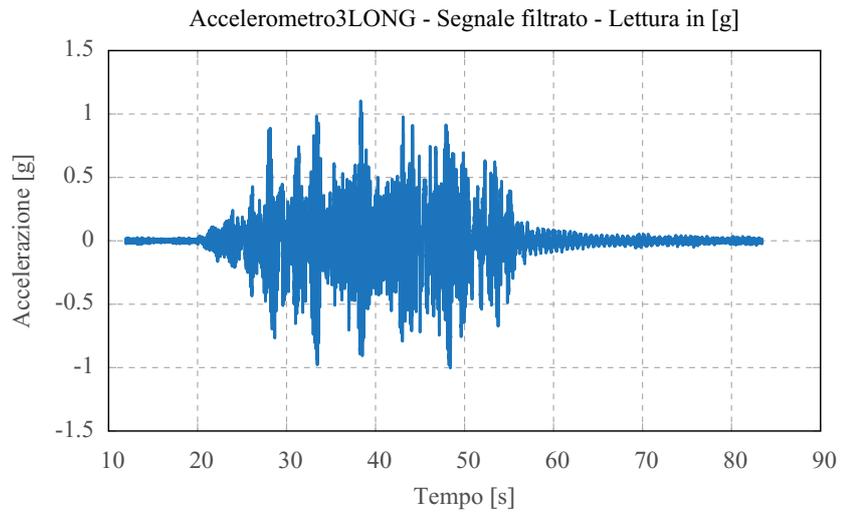


Figura 18
 Accelerometro 4 (quota 3360 mm, base trasformatore) – segnale in direzione orizzontale per test sismici ad amplificazione 100%.

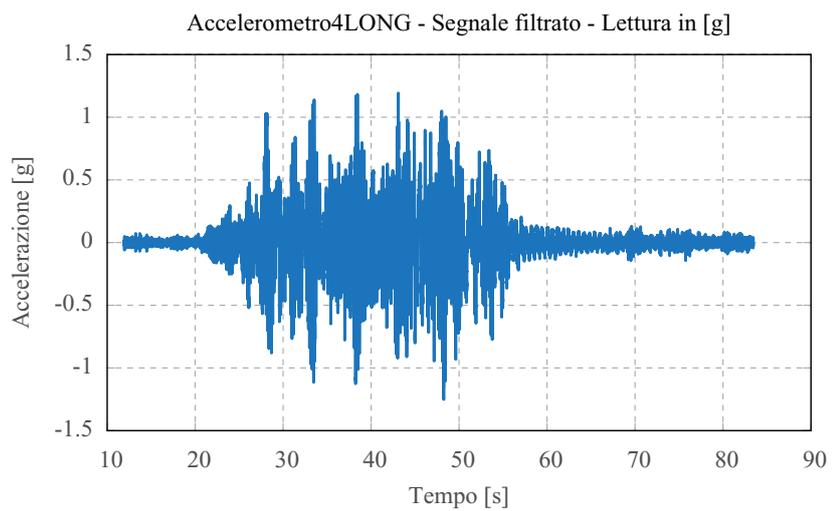
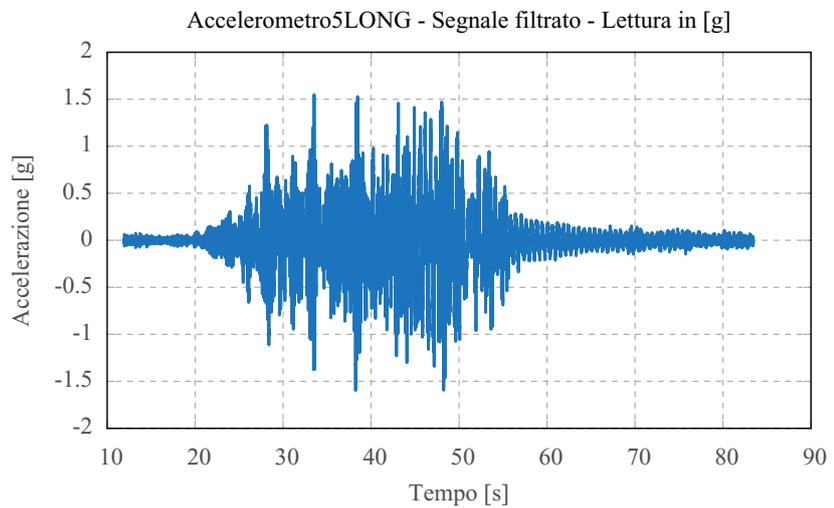


Figura 19
 Accelerometro 5 (quota 4320 mm, stelo trasformatore) – segnale in direzione orizzontale per test sismici ad amplificazione 100%.



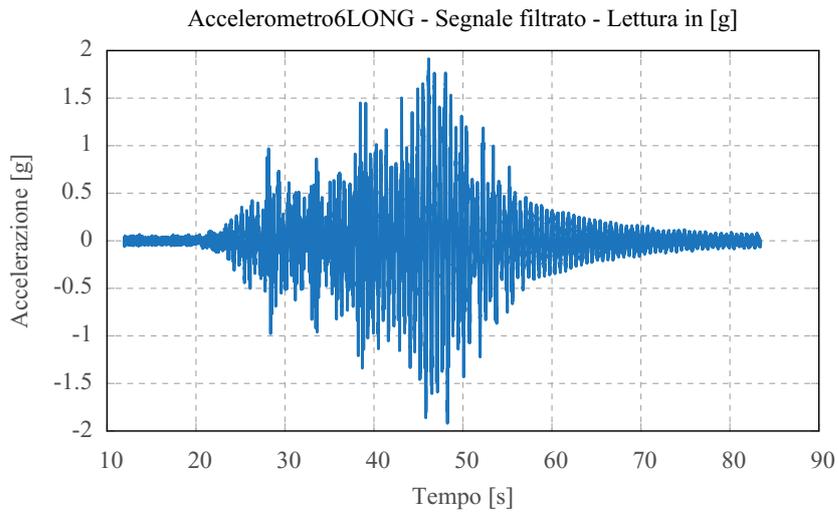


Figura 20
Accelerometro 6 (quota 5625 mm, testa trasformatore) – segnale in direzione orizzontale per test sismici ad amplificazione 100%.

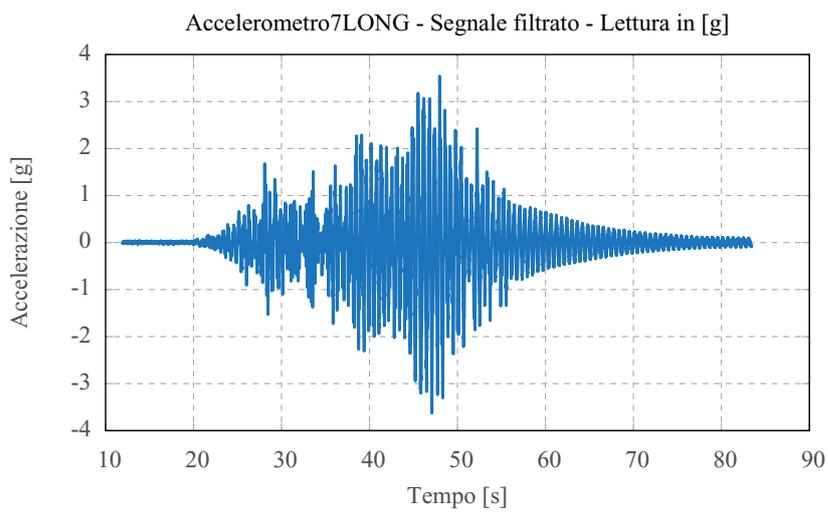


Figura 21
Accelerometro 7 (quota 6333 mm, testa celle sommitali) – segnale in direzione orizzontale per test sismici ad amplificazione 100%.

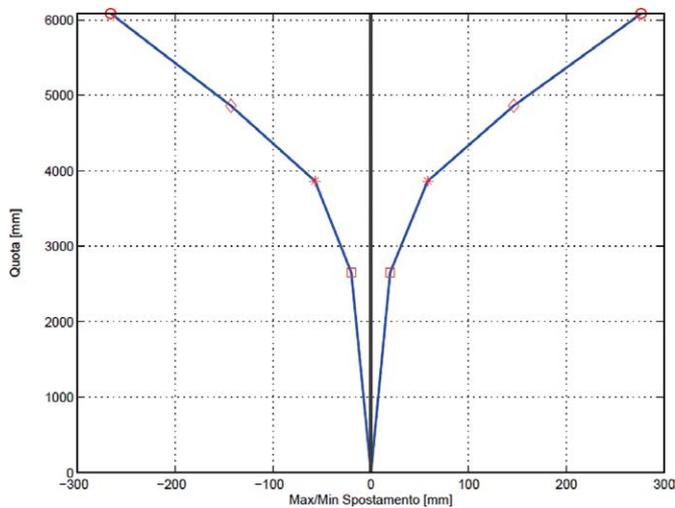


Figura 22
Distribuzione degli spostamenti orizzontali massimi e minimi lungo la quota per test sismici ad amplificazione 100%.

Figura 23
 Confronto fra spettro teorico e sperimentale per test sismici in direzione orizzontale con amplificazione 100%.

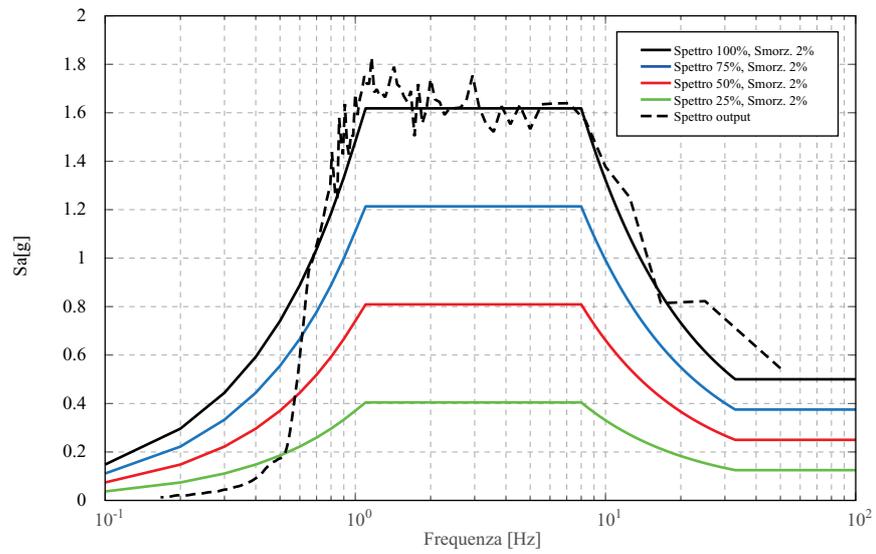
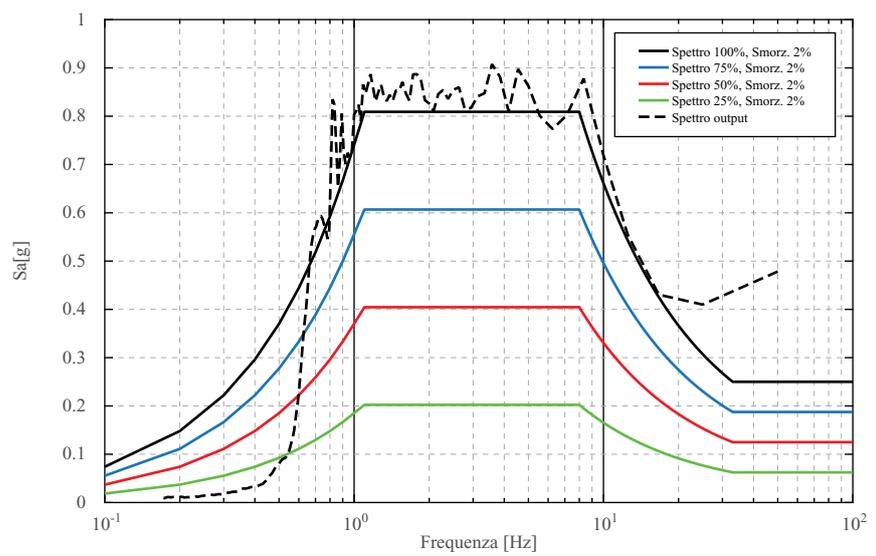


Figura 24
 Confronto fra spettro teorico e sperimentale per test sismici in direzione verticale con amplificazione 100%.



Nel caso specifico descritto in questo contributo, al termine dei test non sono state riscontrate evidenze di danneggiamento sul provino, così come le caratteristiche dinamiche dello stesso non sono mutate di un'entità tale da giustificare la presenza di degrado conseguente alle vibrazioni imposte.