

Attività di monitoraggio sismico
degli edifici strategici e
formazione del volontariato
di protezione civile

READINESS
AGENDA
STRATEGICA



Risultati del monitoraggio sismico della Torre di Ingegneria dell'UnivPM



Prof. Ing. Fabrizio Gara
f.gara@univpm.it



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA



Caratterizzazione dinamica e modellazione

- ❖ Strumentazione utilizzata e configurazioni di misura
- ❖ Risultati identificazione dinamica e modellazione FEM
- ❖ Calibrazione modello FEM

Monitoraggio continuo

- ❖ Installazione del sistema di monitoraggio
- ❖ Risultati del monitoraggio
- ❖ Dipendenza dei parametri modali da temperatura e vento
- ❖ Non linearità
- ❖ Rimozione degli effetti delle condizioni ambientali

Monitoraggio e riduzione del rischio sismico

- ❖ Utilità del monitoraggio
- ❖ Monitoraggi con sensori low-cost
- ❖ Prestazioni di alcuni sensori low-cost

Caratterizzazione dinamica e modellazione

- ❖ Strumentazione utilizzata e configurazioni di misura
- ❖ Risultati identificazione dinamica e modellazione FEM
- ❖ Calibrazione modello FEM

Monitoraggio continuo

- ❖ Installazione del sistema di monitoraggio
- ❖ Risultati del monitoraggio
- ❖ Dipendenza dei parametri modali da temperatura e vento
- ❖ Non linearità
- ❖ Rimozione degli effetti delle condizioni ambientali

Monitoraggio e riduzione del rischio sismico

- ❖ Monitoraggio lato struttura
- ❖ Diffusione dei monitoraggi dinamici tramite l'utilizzo di sensori MEMS
- ❖ Prestazioni dei sensori MEMS

Caratterizzazione dinamica e modellazione

Strumentazione utilizzata e configurazioni di misura



Accelerometri PCB 393B31

Ceramic Flexural ICP
Sensitivity ($\pm 5\%$) 10.0 V/g
Broadband Resolution: 0.000001 g rms
Measurement range: 0.5 g pk
Frequency range: 0.1 to 200 Hz



Schede di acquisizione NI 9234

Four channel dynamic signal
acquisition module
ADC resolution 24 bits
Signal ranges: ± 5 V
Sample Rate: 51.2 kS/s/ch



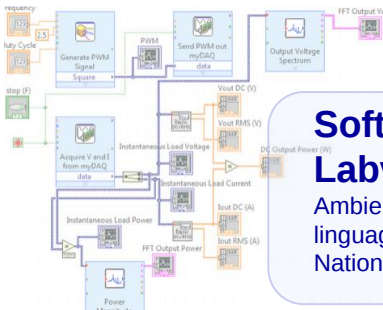
NI cDAQ 9178

Chassis CompactDAQ
USB a 8 slot



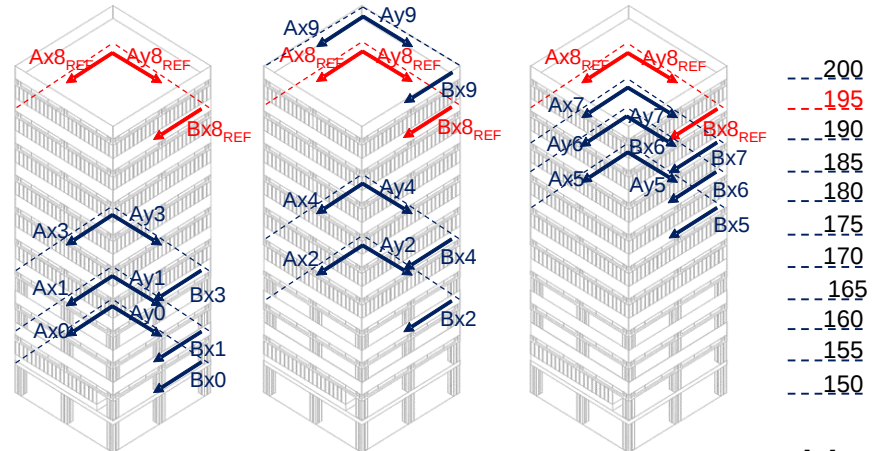
Cavi coassiali con connettori BNC

(lunghezze varie da 30 a 100 m
collegabili in serie)



Software di acquisizione Labview

Ambiente di sviluppo integrato per il
linguaggio di programmazione visuale di
National Instruments



Conf. 1

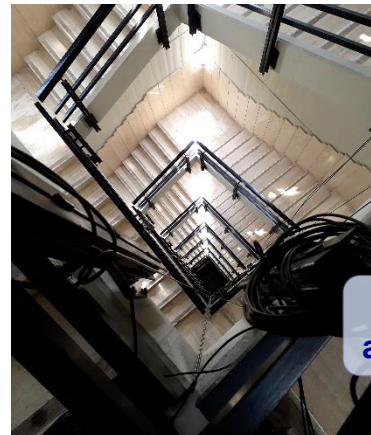
Conf. 2

Conf. 3

[m]
a.s.l.

Configurazioni di misura

- 3 accelerometri per piano
- Ipotesi di piano indeformabile
- $F_s = 2048$ Hz
- RegISTRAZIONI di 30 minuti

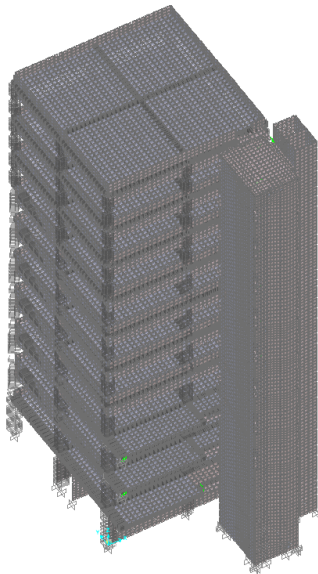


Qualche difficoltà legata
all'utilizzo di sensori cablati

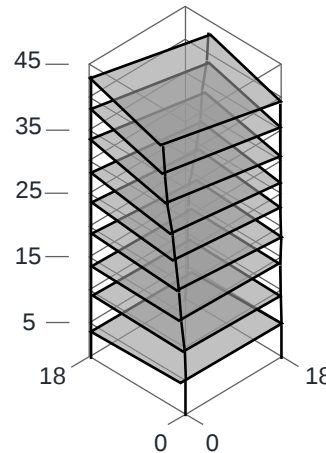
Caratterizzazione dinamica e modellazione

Risultati identificazione dinamica e calibrazione modello FEM

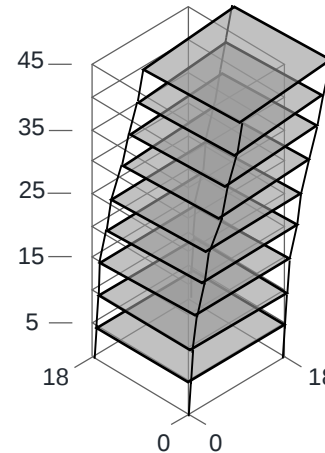
- ❖ **Pre-trattamento** delle registrazioni (controllo visivo, individuazione eventuali spike, filtraggio, ricampionamento a 51.2 Hz, rimozione andamenti spuri)
- ❖ **Elaborazione** delle acquisizioni tramite algoritmo **SSI** (stochastic subspace identification)
- ❖ **Scalatura** delle forme modali rispetto al riferimento (tramite tecnica **POSER**)



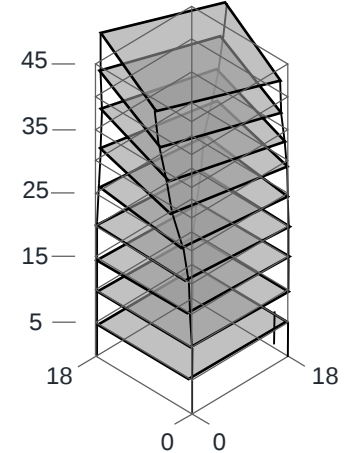
1° Modo
 $f = 1.05 \text{ Hz}$
 $\xi = 5.52 \%$



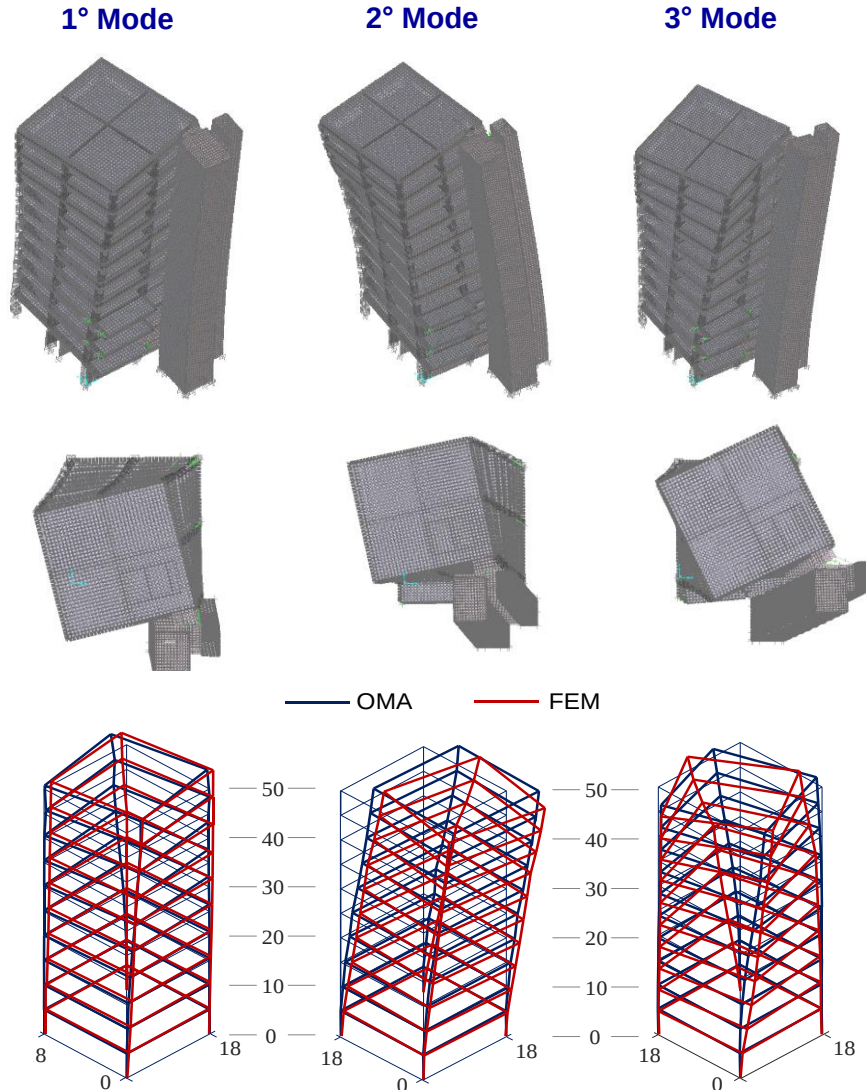
2° Modo
 $f = 1.19 \text{ Hz}$
 $\xi = 1.57 \%$



3° Modo
 $f = 1.44 \text{ Hz}$
 $\xi = 1.34 \%$



- ❖ **Travi e pilastri** modellate mediante elementi **frame**
- ❖ **Solai, tamponature esterne e interne, pareti** scala-ascensori modellate con elementi **shell**
- ❖ **Modulo elastico** degli elementi in c.a. **incrementato del 20 %** rispetto ai risultati delle prove statiche
- ❖ **Interazione torre-corpo scala-ascensori** tramite link lineari
- ❖ Modello finalizzato a riprodurre il comportamento della struttura in condizioni operative, calibrato sulla base dei risultati delle prove di vibrazione ambientali



- ❖ Risultati dell'**analisi modale** eseguita sul modello agli elementi finiti
- ❖ **Confronto** dei risultati ottenuti dall'identificazione dinamica con i risultati dell'analisi FEM: frequenze e forme modali (indice MAC - Modal Assurance Criterion)

modo	sperimentale f [Hz]	modello FEM f [Hz]	Errore [%]
1°	1.05	1.07	7.2
2°	1.21	1.18	-0.53
3°	1.51	1.49	1.19

Modi identificati	95,96%	9,62%	3,43%
	46,98%	90,17%	1,58%
	1,83%	2,71%	98,10%
Modello FEM			

$$MAC_{i,j} = \frac{|\varphi_i^T \varphi_j|^2}{(\varphi_i^T \varphi_i)(\varphi_j^T \varphi_j)} \leq 1$$

Caratterizzazione dinamica e modellazione

- ❖ Strumentazione utilizzata e configurazioni di misura
- ❖ Risultati identificazione dinamica e modellazione FEM
- ❖ Calibrazione modello FEM

Monitoraggio continuo

- ❖ Installazione del sistema di monitoraggio
- ❖ Risultati del monitoraggio
- ❖ Dipendenza dei parametri modali da temperatura e vento
- ❖ Non linearità
- ❖ Rimozione degli effetti delle condizioni ambientali

Monitoraggio e riduzione del rischio sismico

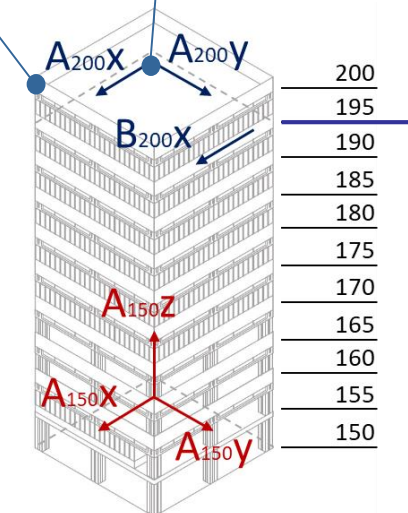
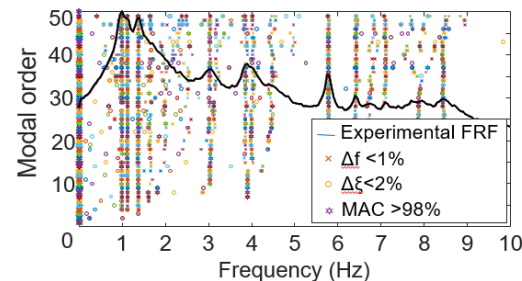
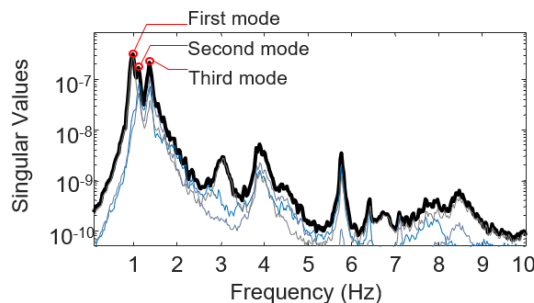
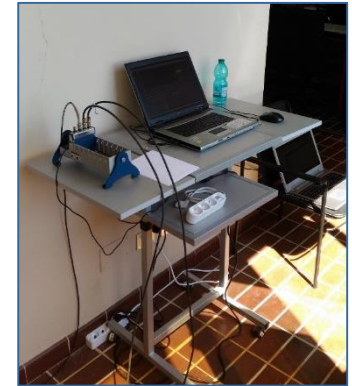
- ❖ Monitoraggio lato struttura
- ❖ Diffusione dei monitoraggi dinamici tramite l'utilizzo di sensori MEMS
- ❖ Prestazioni dei sensori MEMS

Installazione del sistema di monitoraggio

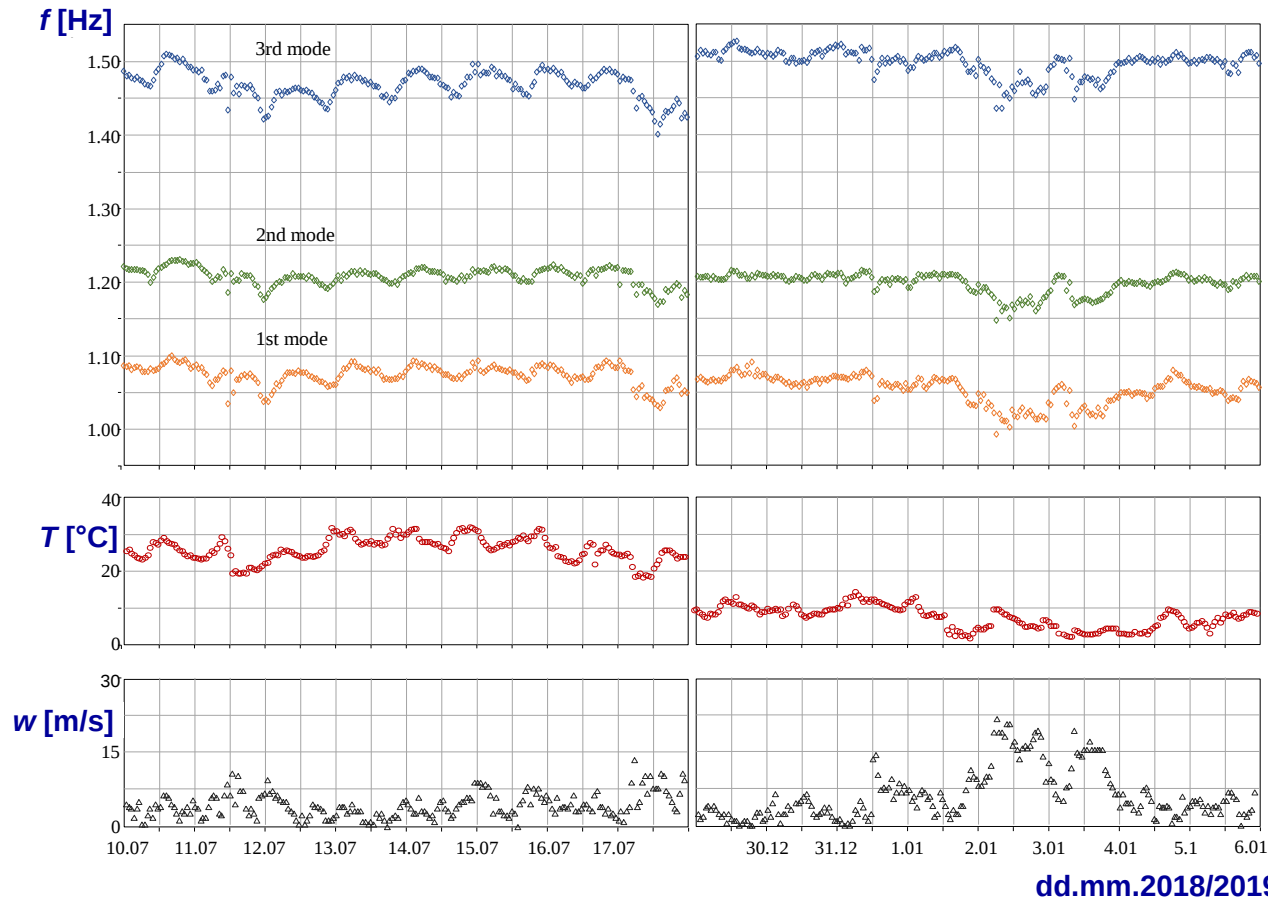
- ❖ Installazione di un **sistema di acquisizione permanente**, cablato, composto da **tre accelerometri** all'ultimo piano della torre oltre che un **velocimetro in fondazione**
- ❖ Sviluppo di una routine per l'**estrazione automatica dei parametri modali**; vengono correttamente rilevati i **primi 3 modi** di vibrare della torre
- ❖ Ad ogni acquisizione, registrazione dei valori di:
 - **temperatura**
 - **vento**: velocità e direzione



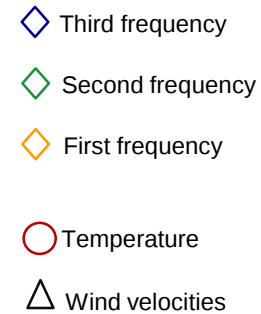
Weather station
DAVIS VANTAGE
PRO2 WIRELESS



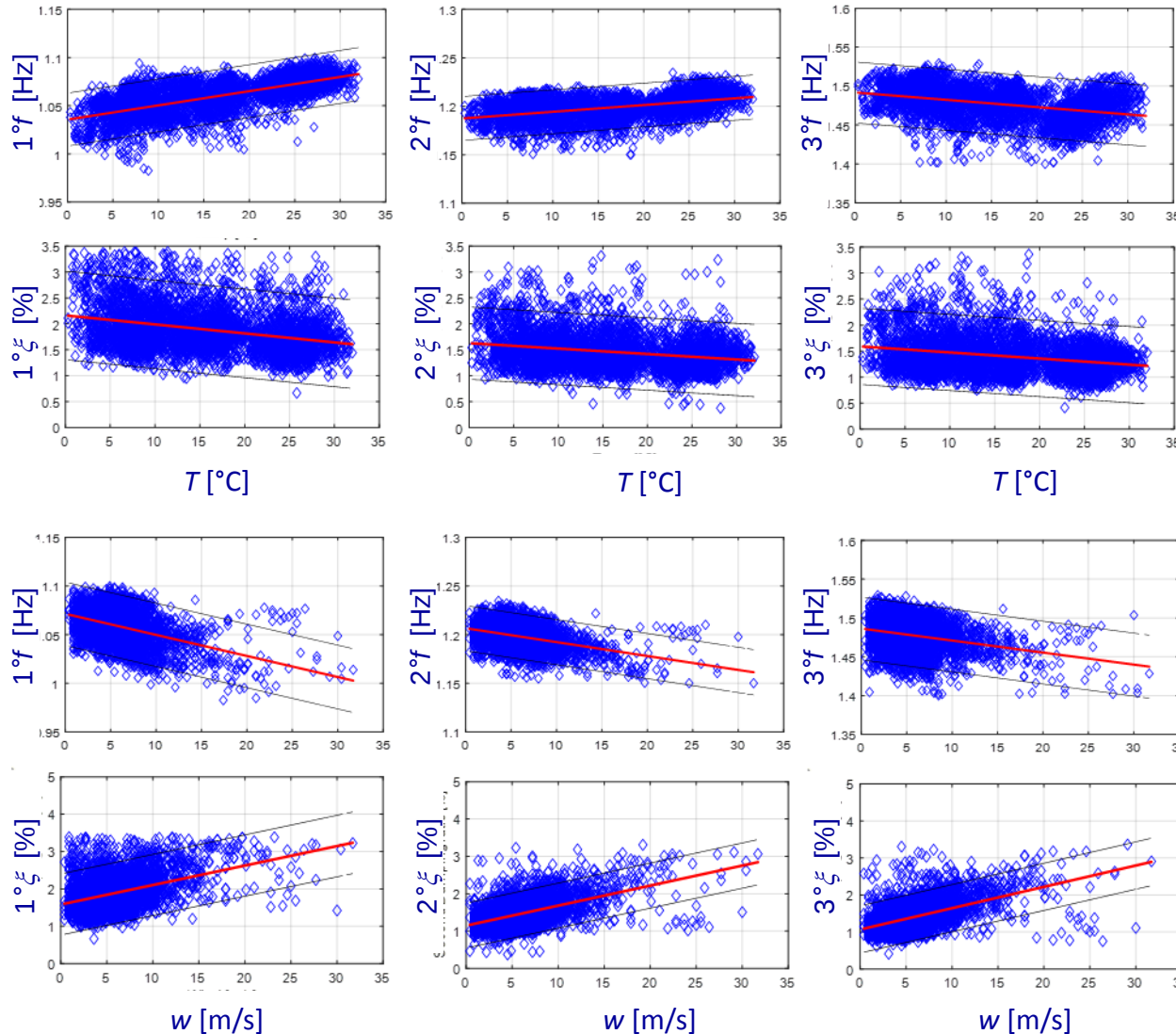
Risultati del monitoraggio



- ❖ Necessità di indagare in modo più approfondito le correlazioni tra parametri modali e condizioni ambientali
- ❖ Dipendenza evidente tra i parametri modali e le condizioni ambientali



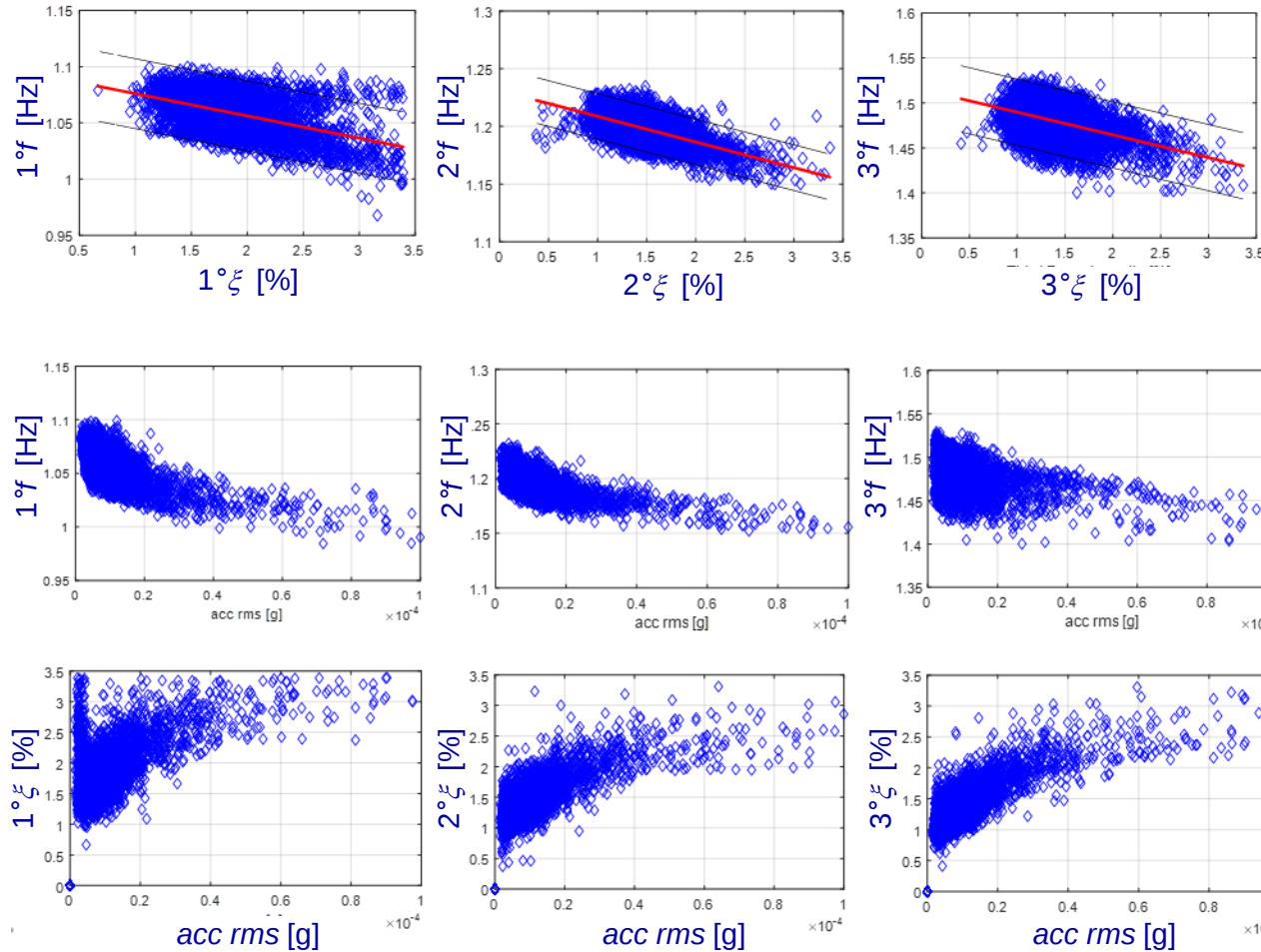
Dipendenza di frequenze e smorzamenti da temperatura e vento



- ❖ **Interazione positiva** tra 1° e 2° frequenza f di vibrazione e temperatura T
- ❖ **Interazione negativa** tra la **terza** frequenza di vibrazione e la temperatura
- ❖ Interazione tra **smorzamento** e temperatura di **difficile interpretazione**

- ❖ Marcata **interazione negativa** tra i valori di **frequenza** di vibrazione e i valori misurati di intensità del **vento**
- ❖ Marcata **interazione positiva** tra i valori del fattore di **smorzamento** associato ai tre modi e i valori misurati di intensità del **vento**

Non linearità



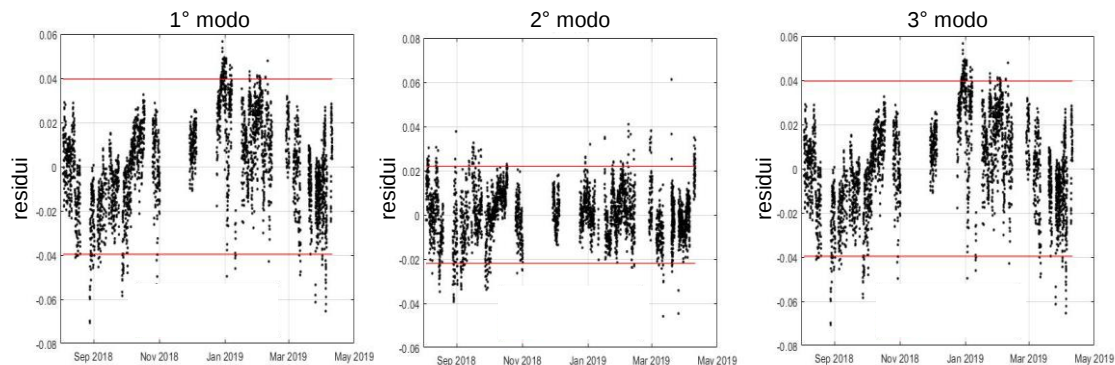
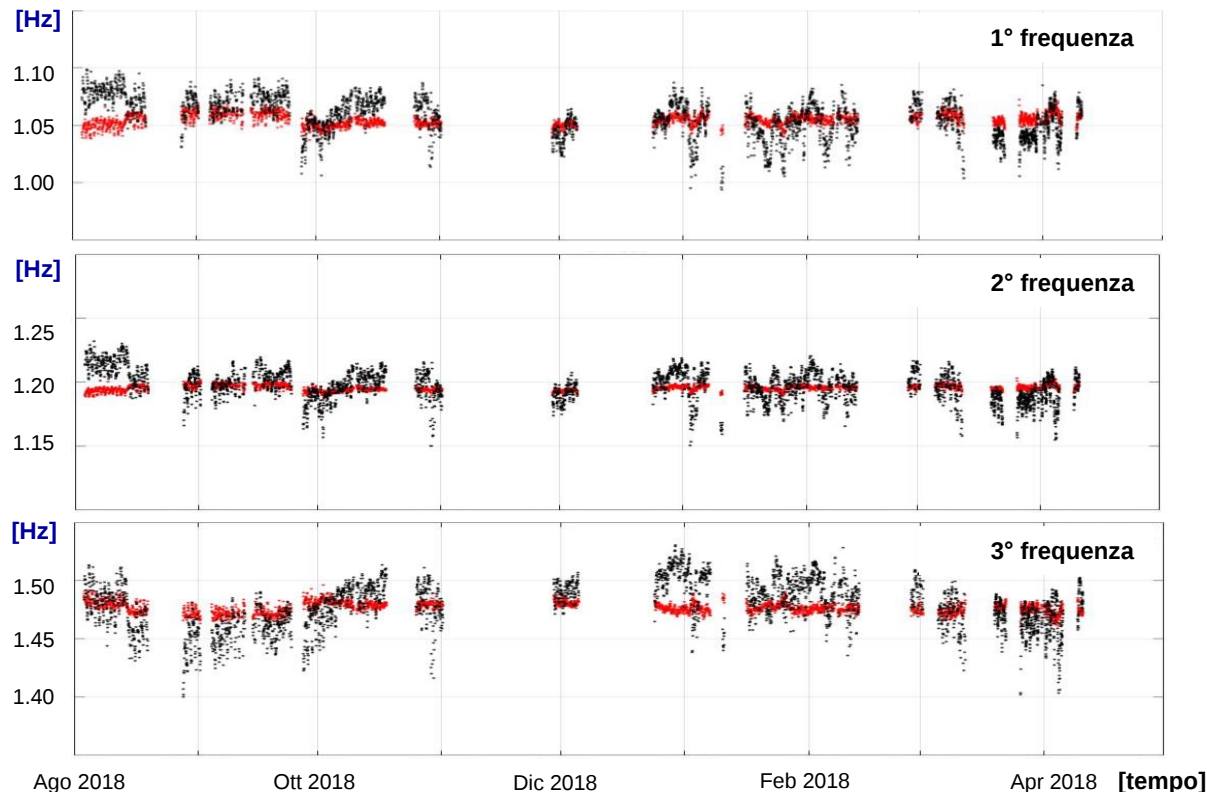
❖ Alla **diminuzione delle frequenze** di vibrazione corrisponde, statisticamente, un **aumento dei valori del fattore di smorzamento**

❖ **Non linearità** della risposta della torre a variazioni dell'intensità dell'eccitazione

❖ Per **accelerazione maggiori** (valori medi) si registrano valori di:

- **frequenza di vibrazione inferiori**
- **fattore di smorzamento maggiori**

Rimozione degli effetti delle condizioni ambientali



- ❖ Rimozione della variabilità dei parametri modali a causa dei parametri ambientali tramite **analisi delle componenti principali (PCA)**
- ❖ Definizione di **“control charts”** a seguito di un periodo di addestramento sufficientemente lungo (12 – 18 mesi)
- ❖ Introduzione di un parametro **“novelty index”** (residui, norma euclidea, distanza di Mahalanobis) al fine di identificare variazioni nel comportamento strutturale

* residui
— estremo confidenza sup 95%
— estremo confidenza inf 95%

Caratterizzazione dinamica e modellazione

- ❖ Strumentazione utilizzata e configurazioni di misura
- ❖ Risultati identificazione dinamica e modellazione FEM
- ❖ Calibrazione modello FEM

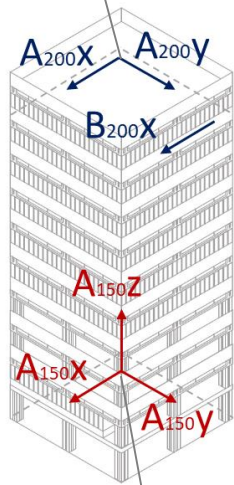
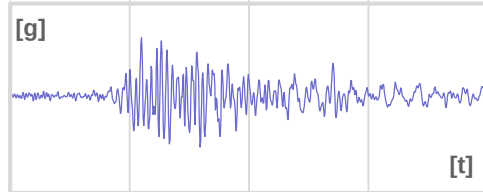
Monitoraggio continuo

- ❖ Installazione del sistema di monitoraggio
- ❖ Risultati del monitoraggio
- ❖ Dipendenza dei parametri modali da temperatura e vento
- ❖ Non linearità
- ❖ Rimozione degli effetti delle condizioni ambientali

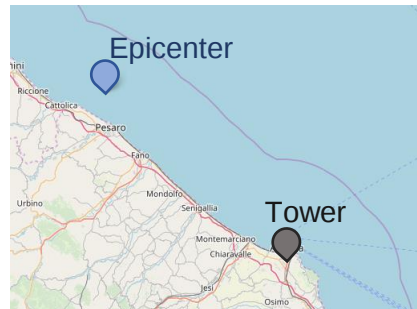
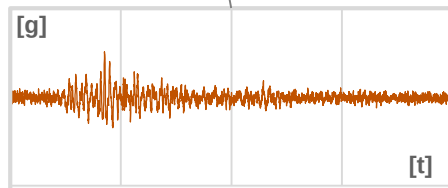
Monitoraggio e riduzione del rischio sismico

- ❖ Monitoraggio lato struttura
- ❖ Utilizzo sensoristica MEMS per monitoraggio
- ❖ Prestazioni dei sensori MEMS

Risposta della struttura

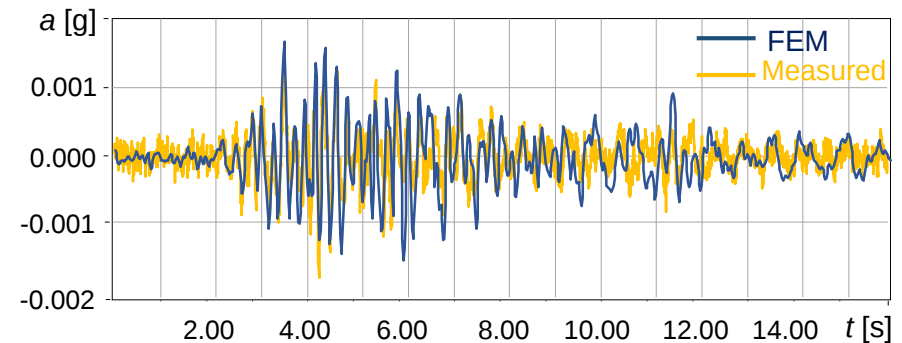


Evento sismico



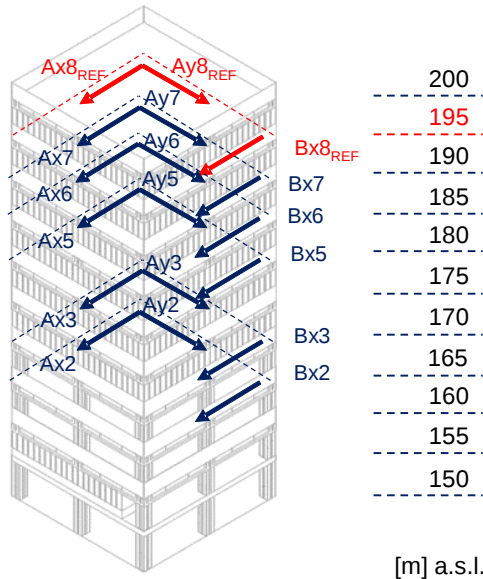
- ❖ Diversi eventi sismici registrati durante il periodo di monitoraggio
- ❖ Evento sismico di magnitudo $M=3.5$ avvenuto in zona: Costa Marchigiana Pesarese (PU) il 31-08-2018
- ❖ Possibilità di registrare la **risposta dell'edificio a terremoti frequenti**
- ❖ Informazioni real time sullo stato di salute dell'edificio pre- e post-evento
- ❖ **Minor incertezze** lato struttura per la valutazione della vulnerabilità

data	ora	M	prov.
04/04/2019	04:33:33	2.3	PG
28/03/2019	16:25:54	2	AP
28/03/2019	12:08:30	2.2	AP
28/03/2019	11:12:05	2.4	AP
28/03/2019	10:55:37	3.6	AP
28/03/2019	10:22:26	3.1	AP
28/03/2019	05:34:06	2.1	MC
28/03/2019	03:16:12	2.5	AP
27/03/2019	23:03:50	3.1	AP
27/03/2019	22:00:41	2.9	AP
27/03/2019	21:59:18	3.1	FM
26/03/2019	19:54:47	2.4	PG
22/03/2019	13:35:27	2.2	MC
20/03/2019	02:30:32	2	AP
15/03/2019	15:56:56	2.5	AP

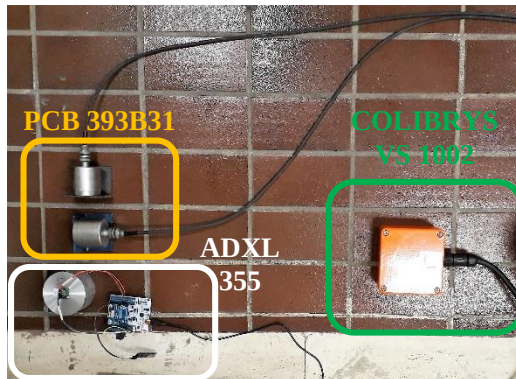


Monitoraggio e riduzione del rischio sismico

Monitoraggi con sensori low-cost



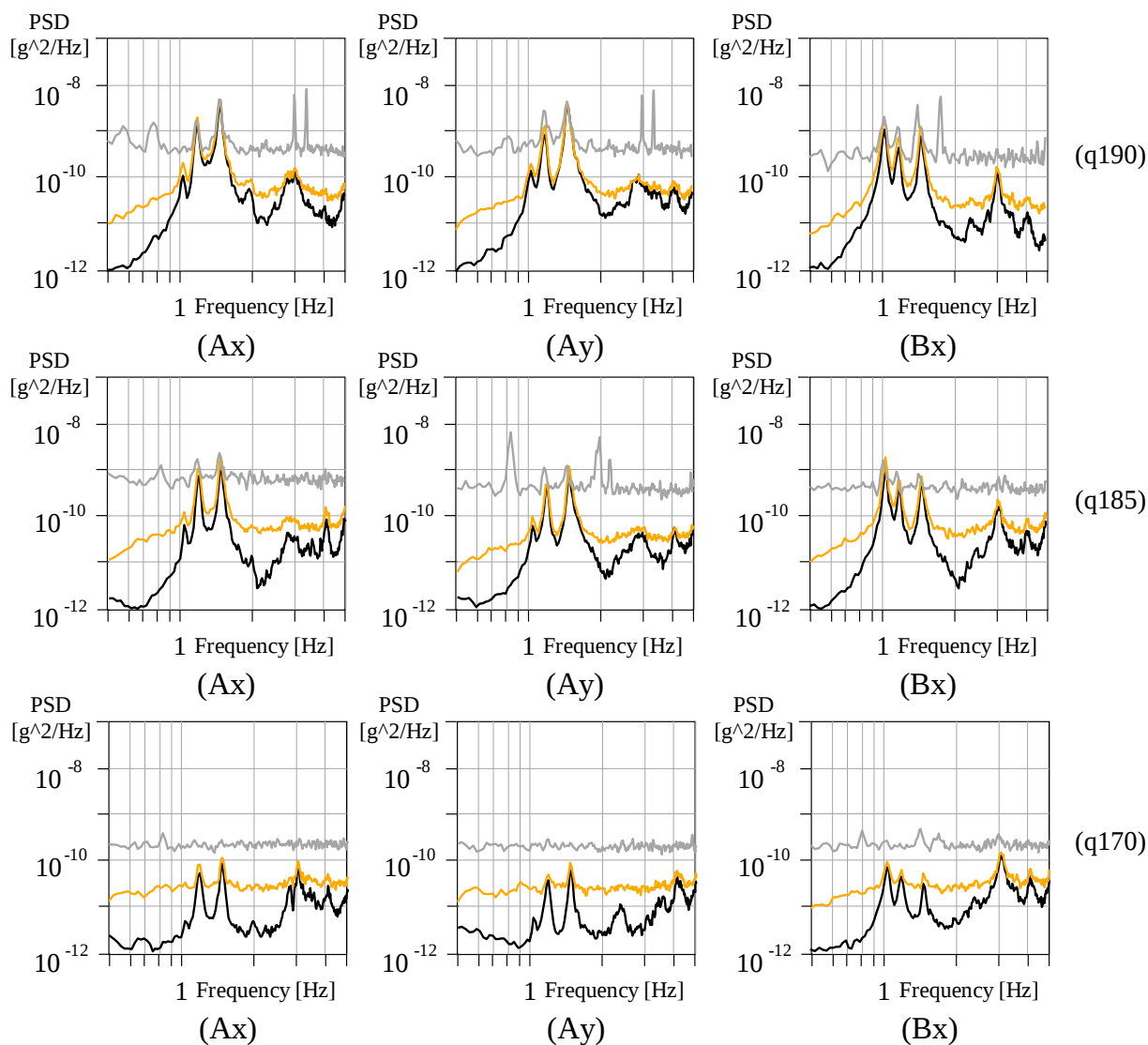
- ❖ Utilizzando come benchmark i risultati dei test dinamici svolti con accelerometri piezoelettrici, sono stati testati due tipologie di sensori MEMS appartenenti a due fasce di prezzo differente:
 - Colibrys VS1002
 - ADXL 355
- ❖ Test svolti tenendo come riferimento i sensori all'ultimo piano e misurando le accelerazioni piano per piano, nei due punti di misura



	PCB 393B31		ADXL 355				COLIBRYS VS 1002			
Mode	f [Hz]	csi [%]	f [Hz]	err. [%]	csi [%]	err. [%]	f [Hz]	err. [%]	csi [%]	err. [%]
1	1.04	1.60	1.03	-0.6%	1.26	-21.2%	1.04	0.00%	1.75	9.1%
2	1.19	1.32	1.19	-0.4%	1.48	12.2%	1.19	-0.15%	1.38	4.7%
3	1.49	1.48	1.49	-0.2%	1.36	-8.1%	1.49	-0.14%	1.45	-1.9%

Monitoraggio e riduzione del rischio sismico

Prestazioni di alcuni sensori low-cost

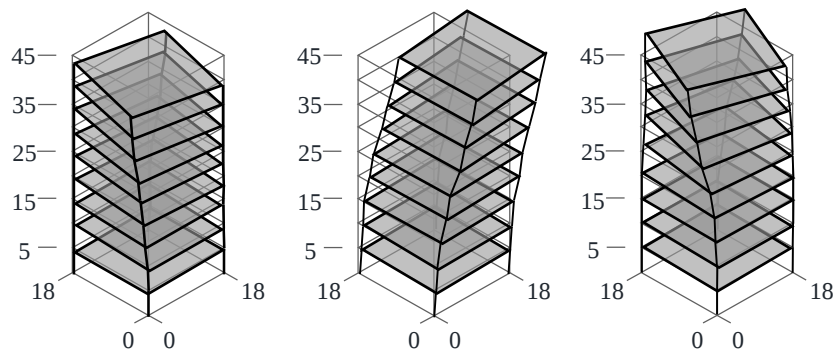


❖ I sensori MEMS Colibrys consentono l'identificazione delle frequenze fondamentali al pari dei piezoelettrici

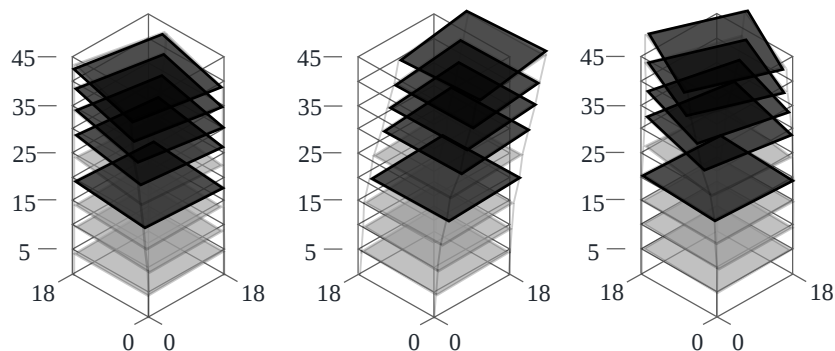
❖ I sensori MEMS ADXL 355 possono essere utilizzati per monitorare tramite OMA gli ultimi piani della torre.

Monitoraggio e riduzione del rischio sismico

Prestazioni di alcuni sensori low-cost



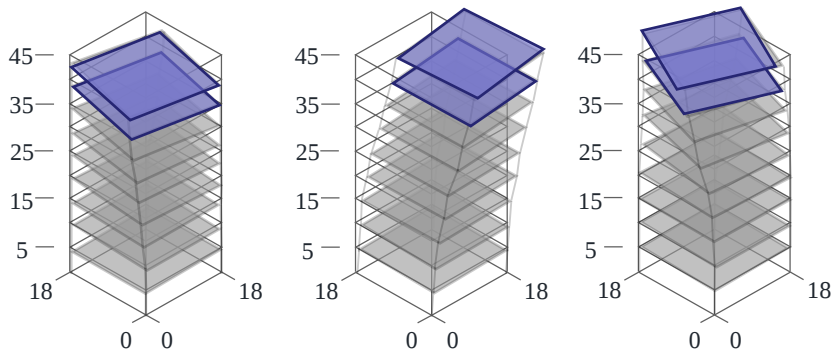
AutoMAC [%]			
3	0.8	3.8	100.0
2	30.6	100.0	3.8
1	100.0	30.6	0.8
	1	2	3



		MAC [%]		
		1	2	3
Colibrys vs1002	3	4.5	2.4	99.3
	2	28.3	99.9	4.1
	1	99.3	26	3.2
		1	2	3

PCB 393b31

❖ Risultati ottenuti con sensori MEMS Colibrys sovrapponibili ai risultati ottenuti con accelerometri piezoelettrici



		MAC [%]		
		1	2	3
ADXL 355	3	0.8	2.5	95.8
	2	34.8	95.8	3.8
	1	95.8	22.1	0.8
		1	2	3

PCB 393b31

❖ Risultati meno precisi utilizzando gli ADXL 355 ma si riesce comunque ad identificare la dinamica degli ultimi due piani

Progetto strategico di Ateneo 2016-2018

“Structural Health Monitoring of Constructions with Wireless Sensor Network (SHM-WSN)”

Dottorato innovativo 2018-2020 (finanziato Regione) – Ing. Arezzo

Riduzione del rischio sismico e monitoraggio di strutture strategiche o di rilevanza culturale

ReLUIS 2019-2021, linee:

- WP4-9 - MAPpe di Rischio e Scenari di danno sismico - Modelli e curve di fragilità dei ponti
- WP6-2 - Monitoraggio e dati satellitari - Infrastrutture rilevanti (ponti, viadotti)
- WP12-9 - Contributi normativi relativi a Costruzioni civili e industriali di acciaio e composte acciaio-calcestruzzo - Ponti con struttura di acciaio o composta acciaio-calcestruzzo

Progetto Cariverona 2020-2022 (domanda in corso di valutazione)

PROTECT - maPping the seismic Risk Of straTEgiC consTructions

Attività di monitoraggio sismico
degli edifici strategici e
formazione del volontariato
di protezione civile

READINESS
AGENDA
STRATEGICA



GRAZIE PER L'ATTENZIONE



Prof. Ing. Fabrizio Gara
f.gara@univpm.it



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

