



Identificazione del comportamento dinamico di pareti non strutturali nell'antichità: il caso di Pompei

Prof.ssa Ing. Dora Foti

Polytechnic University of Bari, Italy

Rischio sismico e prevenzione: scuole, ospedali
ed altre strutture strategiche

Matera, 18.05.2026



POMPEII

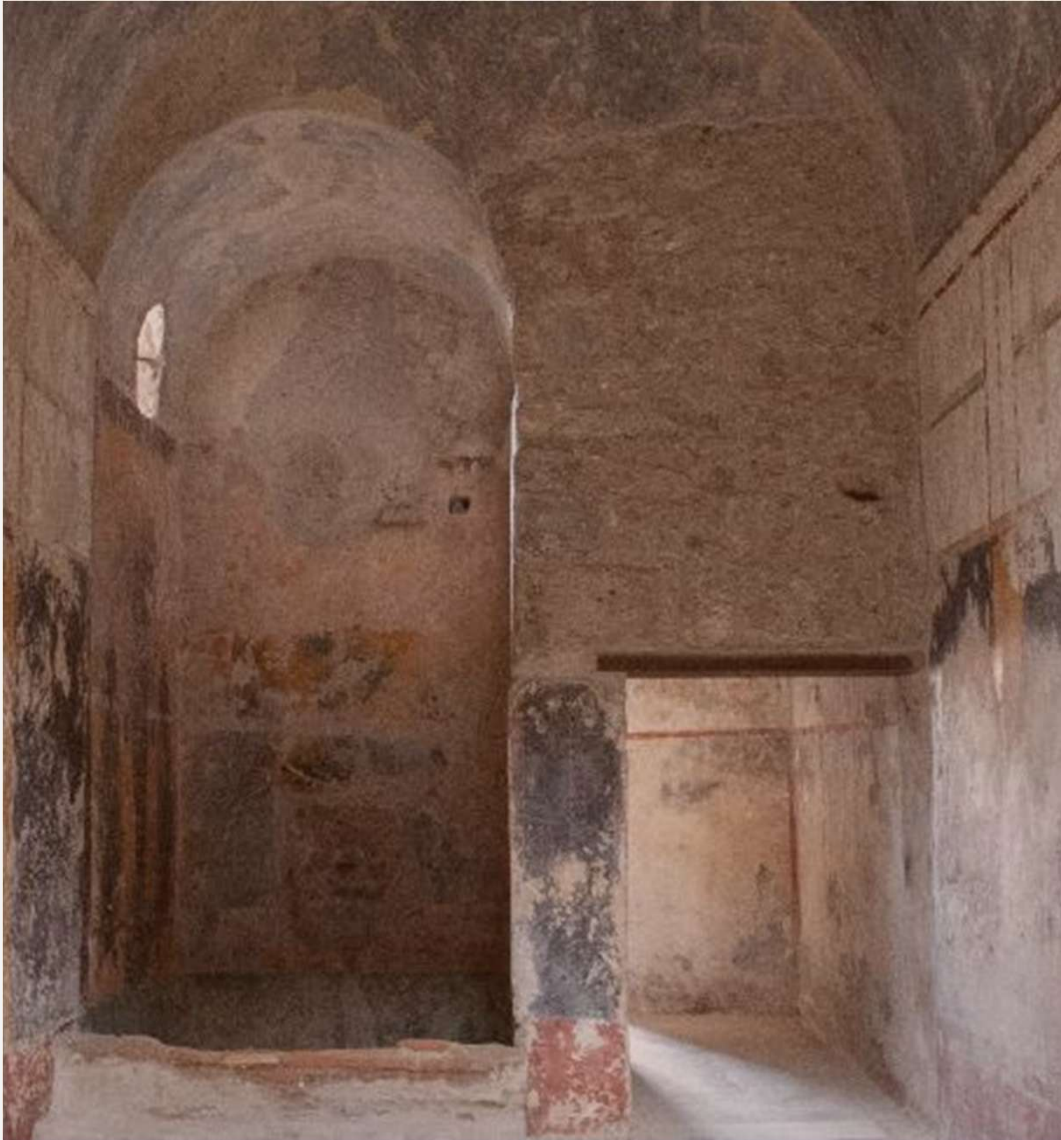
PARCO
ARCHEOLOGICO
DI POMPEI

ANTEL



COMMISSIONE
SISMICA - GLIS





Le Sfide della Conservazione

- Pompei è un sito estremamente vulnerabile
 - Zona Sismica 2 - PGA fra 0,15 e 0,25 g
 - Vesuvio (vulcano attivo, scosse)
 - Campi Flegrei (sciami sismici)



5 giugno 2025: una scossa Md 3.2 dei Campi Flegrei (a oltre 30 km) provoca il crollo parziale di un muro e di una porzione di volta nell'Insula Meridionalis del Parco Archeologico di Pompei.

Caso Studio: Terme Femminili del Foro



Un complesso termale unico

1. Edificato nel I secolo a.C.
2. Danneggiato da un terremoto nel 62 d.C.
3. La caratteristica principale sono le sue pareti radianti affrescate, ottenute mediante assemblaggio di particolari laterizi ("Tegulae Mammatae")
4. La struttura di queste pareti è: tegola+intonaco+affresco



Le pareti radianti

Identificazione del comportamento dinamico di pareti non strutturali nell'antichità: il caso di Pompei



Parete Sud



Parete Ovest

Le tegulae mammatae

Identificazione del comportamento dinamico di pareti non strutturali nell'antichità: il caso di Pompei

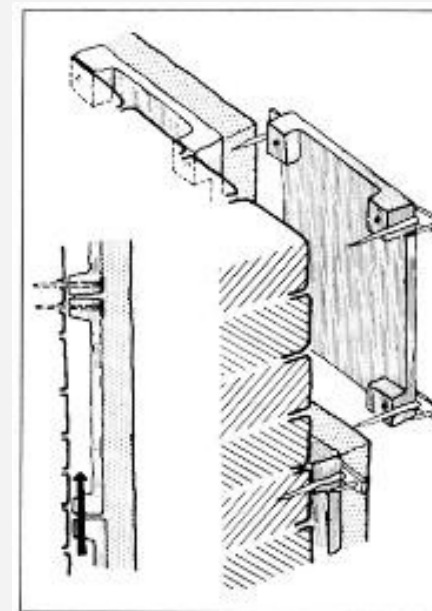
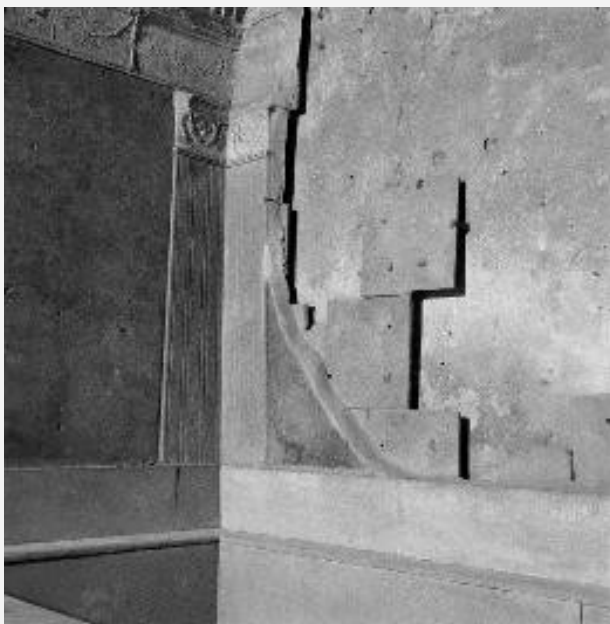


Foto e schema tipologico delle tegole mammate presenti nelle terme maschili di Pompei. Nello schema si nota il dettaglio dei chiodi in ferro usati per la connessione con la struttura portante.

La sfida diagnostica: identificazione dinamica di superfici fragili

Vincolo conservativo

Sugli affreschi originali non è possibile apporre carichi o incollanti.

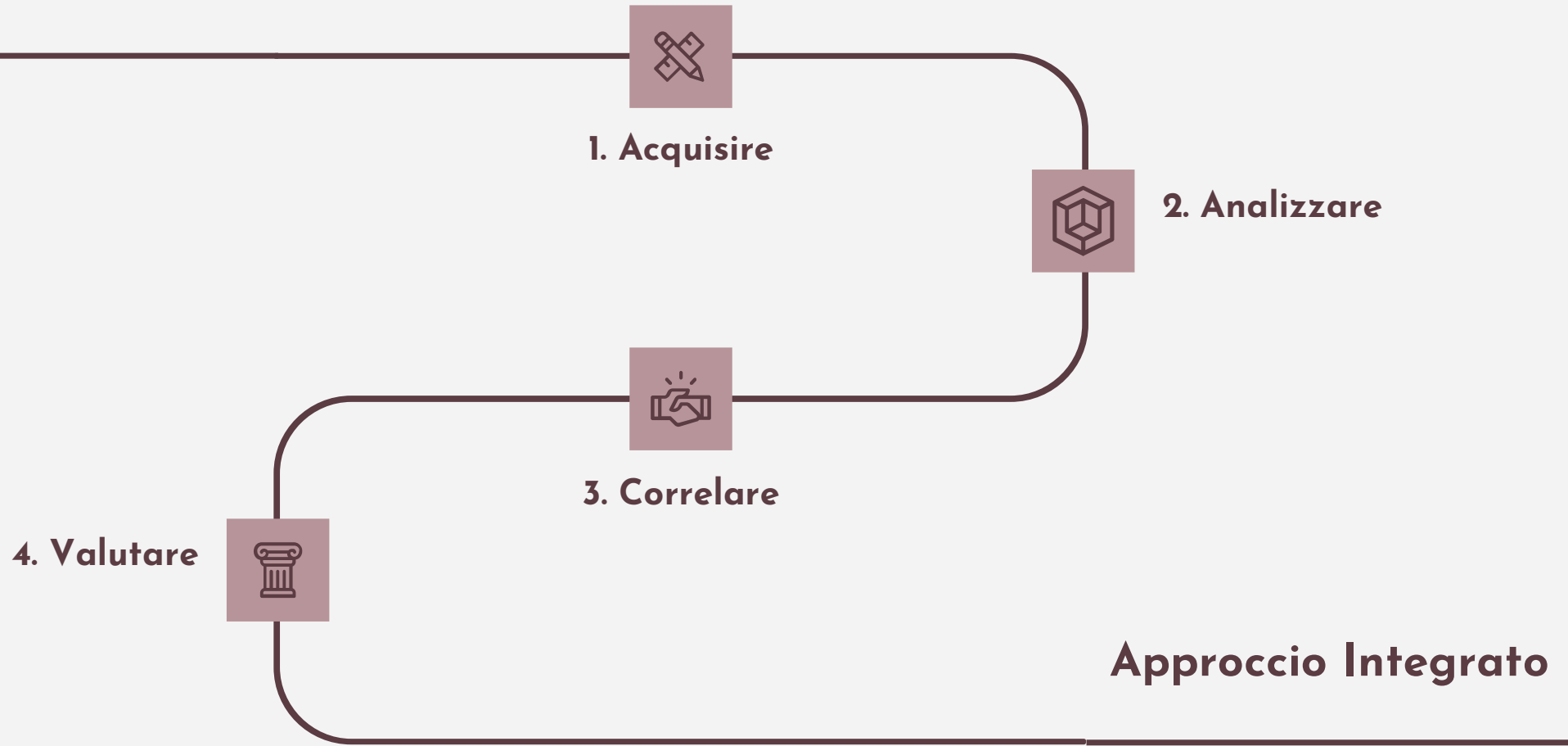
Anche adesivi leggeri possono portare alla corrosione dello strato di pigmento superficiale

Non è possibile utilizzare accelerometri sismici ad alta sensibilità a causa del loro peso

Risposta dinamica multi-scala

La risposta dinamica è piuttosto eterogenea:

- Globalmente l'edificio esibisce frequenze proprie nel range 6 – 20 Hz
- Le pareti radianti mostrano invece dei picchi energetici in frequenza fra 70 e 120 Hz



Approccio Integrato

01

Termografia IR

Rilievo bolometrico del paramento. Identificazione di anomalie termiche e zone di degrado dell'interfaccia intonaco-tegola.

02

OMA + LDV

Accelerometri a 3 diversi livelli di sensibilità, posizionati su:

- cordolo marcapiano
- intonaco ricostruito
- parti dell'affresco restaurate (non originali)

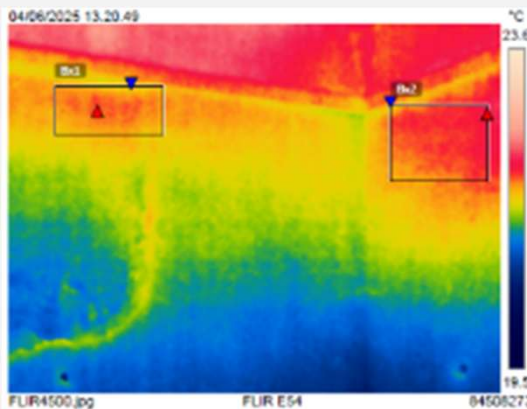
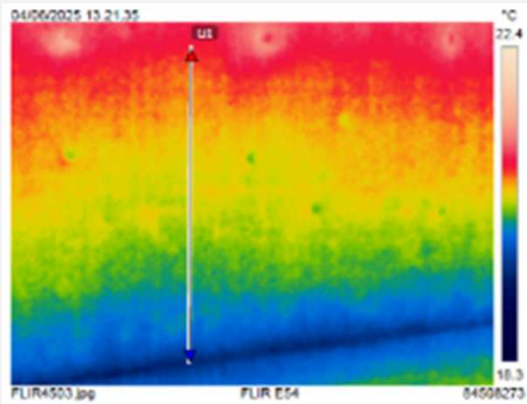
integrati da un vibrometro laser per le superfici affrescate.

03

MEMS continuo

Rete MEMS triassiale (FREDO + SISO) co-localizzata sui punti OMA per il monitoraggio strutturale a lungo termine.

Termografia IR



Camera FLIR E54 · risoluzione 320×240 px · sensibilità <0,05 °C · 8 posizioni · 4 giugno 2025 · 22 °C, 58% UR



1,4 - 1,9 °C/m gradiente termico verticale rilevato

0,54 - 0,91 indice strutturale I_s (interfaccia intonaco-tegola)

1,4 - 7,0 mm spessore equivalente del gap d'aria stimato

Identificazione dei danni mediante termografia

Distacco degli intonaci dalle tegole.

Individuazione dei gap di aria stimati dalla termografia

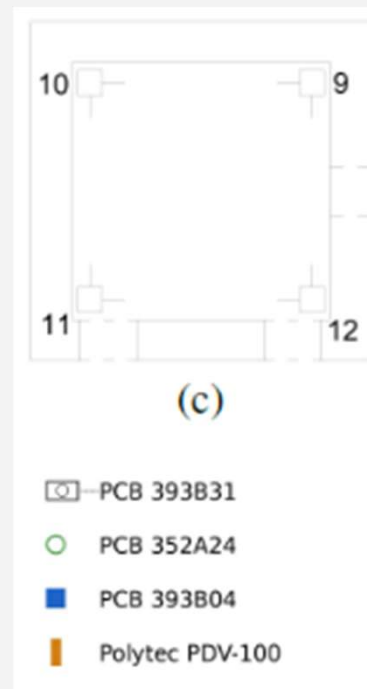
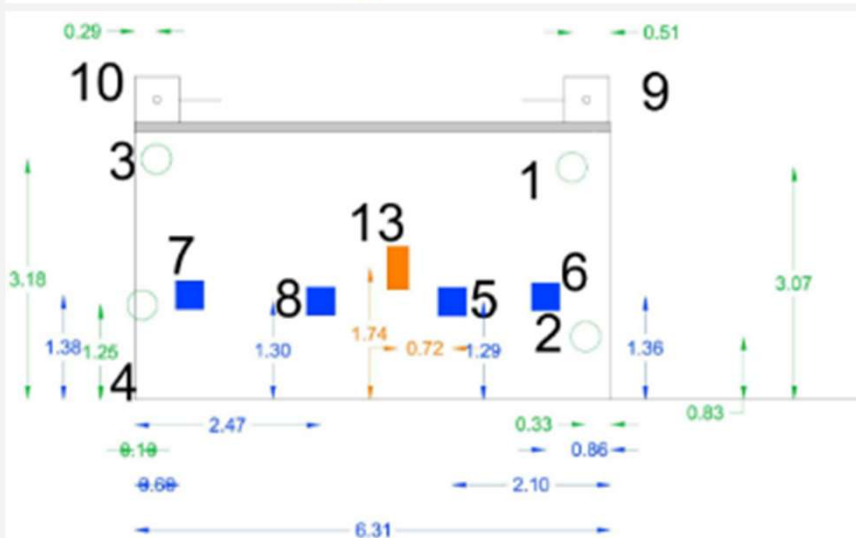
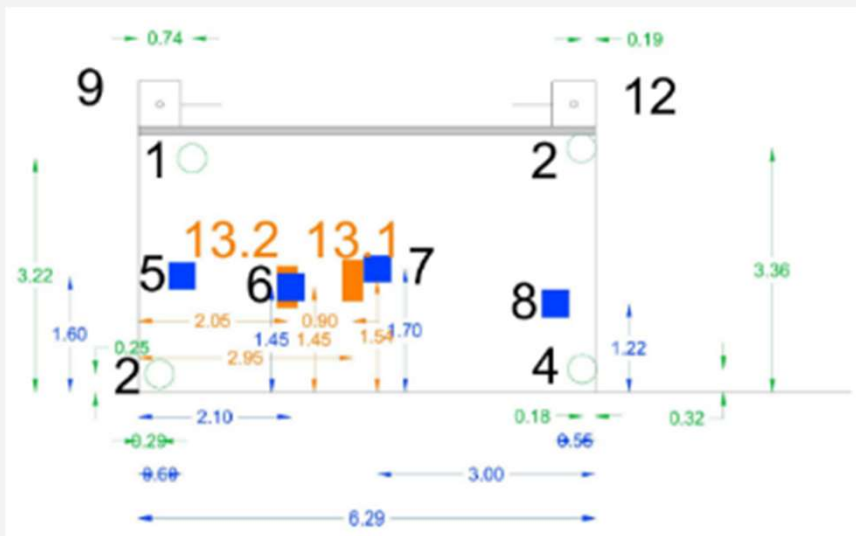


Identificazione dinamica OMA+LDV

| Sensore | Posizione | Caratteristiche | Q.tà |
|-----------------|------------------------------------|---|------|
| PCB 393B31 | Cordolo c.a. (cordolo marcapiano) | 10 V/g · 0,1–200 Hz · noise 0,01 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ · 635 g | 8 |
| PCB 393B04 | Intonaco degradato | 1000 mV/g · 0,06–450 Hz · noise 0,04 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ · 50 g | 4 |
| PCB 352A24 | Punti su intonaco di restauro | 100 mV/g · 1–8000 Hz · 0,8 g (massa trascurabile) | 4 |
| Polytec PDV-100 | Affresco originale (target remoto) | 0,5 Hz–22 kHz · risoluz. <0,02 $\mu\text{m}/\text{s}/\sqrt{\text{Hz}}$ · non a contatto | 1 |

La definizione delle tipologie di sensori, e le loro posizioni, sono state determinate sulla base di una modellazione numerica preliminare, che ha fornito dei possibili intervalli di frequenza.

Setup di acquisizione



Dimensioni

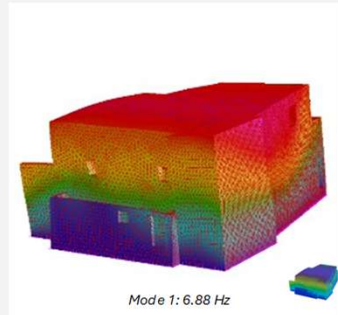
West wall $\approx 6,3 \times 3,4$ m

South wall $\approx 6,3 \times 3,1$ m

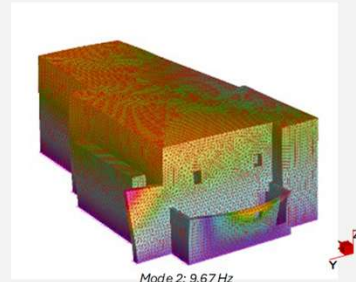
Tegule $\approx 51 \times 51 \times 2$ cm

Cavità ≈ 12 cm

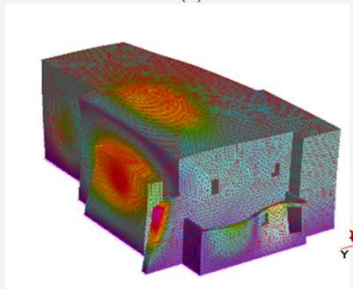
Modello numerico preliminare



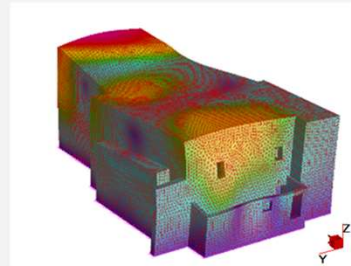
(a)



(b)



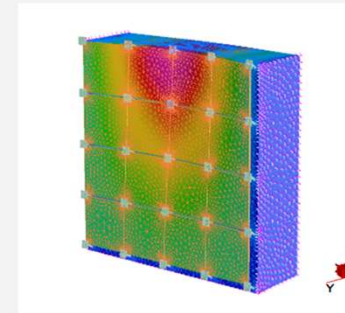
(c)



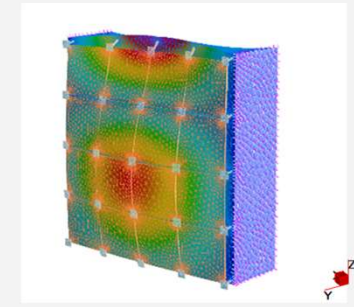
(d)

Modi globali

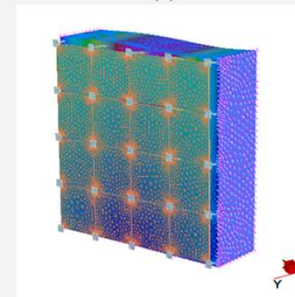
- Frequenze proprie della struttura fra 6 e 12 Hz.
- Incertezza legate allo stato "interno" delle parti strutturali che governa il risultato numerico.
- La principale fonte di incertezza risulta essere il valore del modulo elastico da adottare per la muratura.



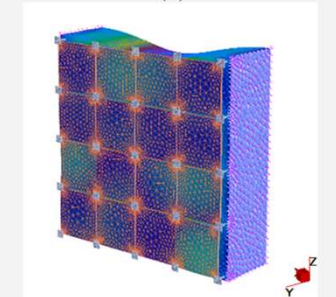
(a)



(b)



(c)



(d)

Modi locali

- Modi locali delle pareti radianti a frequenze comprese fra i 70 e i 120 Hz.
- Forme modali incerte, in quanto legate alle semplificazioni assunte nel modello.
- Necessità di raffinare ulteriormente la modellazione delle connessioni in ferro.

Setup di acquisizione



PCB 352A24 intonaco restaurato



PCB 393B04 intonaco degradato



Protocollo di acquisizione OMA

AVT · Ambient Vibration Tests

5 prove × 5 minuti

Test 0 — pioggia (eccitazione broadband)

Test 1 — basso rumore ambientale

Identificazione delle frequenze proprie globali in regime stocastico (ipotesi white-noise).

FVT · Forced Vibration Tests

5 prove · sweep onda quadra

Test 2-3 — banda 1-120 Hz (broad)

Test 4 — banda 70-110 Hz (target locale)

Sorgente: altoparlante omnidirezionale 10 W. Eccitazione totalmente non a contatto: nessuna interferenza con le superfici fragili.

Elaborazione: PSD con metodo Welch ($M = 4096$, finestra Hamming, overlap 50%, $\Delta f \approx 0,25$ Hz) · 85 registrazioni · normalizzazione cross-test e calcolo del gain ratio.

Risultati delle acquisizioni

Modi globali

6 - 11 Hz

Picco dominante a ~11,25 Hz

rilevato dai sensori sul cordolo c.a. in tutte le 5 prove.

Modi locali

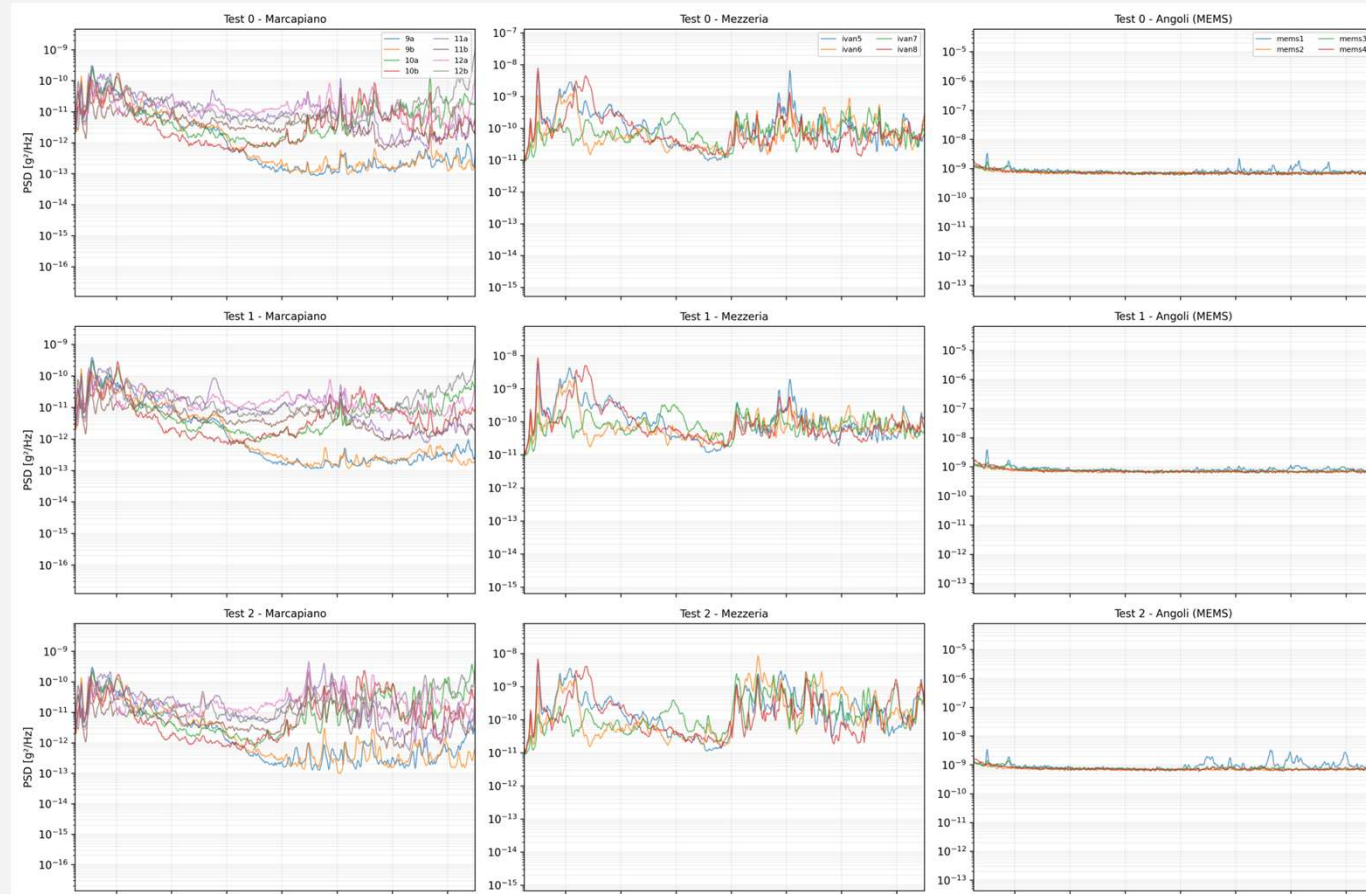
~ 101 Hz

Picco stabile in AVT e FVT.

Test 4 (sweep 70-110 Hz):
RMS 2,49 mg, peak 10,32 mg

Gain ratio fino a 2845
($>10\times$ rispetto al broadband ambientale).

Conferma sperimentale della natura multi-scala della risposta dinamica



Monitoraggio in continuo

FREDO

Modi globali

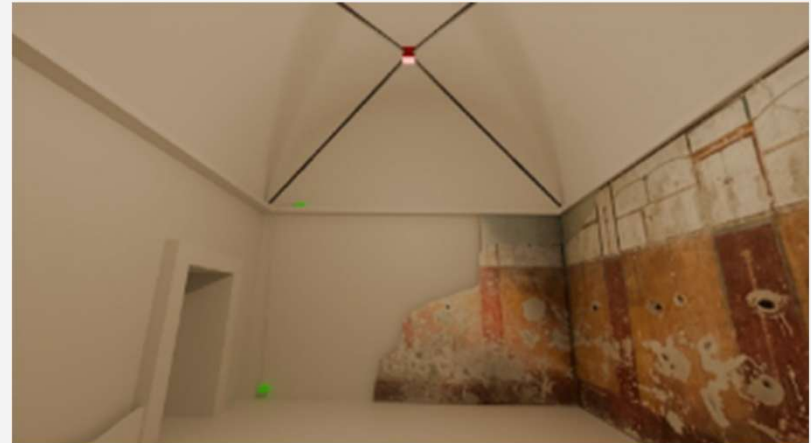
- noise floor < $3 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ (0–100 Hz)
- risposta in freq. 9–460 Hz (–6 dB)
- f_s 1000 Hz · dynamic range 114 dB
- IP67 · Ethernet PoE · sync < 50 μs



SISO

Modi locali

- noise floor < $25 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$
- banda fino a 4000 Hz
- f_s fino a 4 kHz · 24-bit
- IP67 · Ethernet o RF · sync GPS



Sintesi dei principali risultati

Massa e sensibilità decrescenti dal cordolo (635 g) all'affresco (LDV non a contatto). Ogni livello sceglie il proprio compromesso massa-rumore.

Gerarchia sensoristica

Sweep acustico in onda quadra: nessuna sorgente meccanica sul costruito. Gain ratio sufficiente per identificare i modi locali in regime quasi-ambientale.

Forzanti senza contatto

La rete OMA definisce la baseline del monitoraggio MEMS permanente: il vincolo conservativo guida sia la fase di indagine che quella di sorveglianza.

Metodologia scalabile

Monitoraggio in continuo

Risultati

- ✓ Protocollo multi-sensore validato (IR + OMA + LDV).
- ✓ Separazione di scala dimostrata: globali 6–11 Hz, locali ~101 Hz.
- ✓ Validazione FEM con scarto contenuto (16%) interpretabile.
- ✓ Strategia preserving-by-design: zero contatto sull'affresco originale.





Prospettive

- Avvio del monitoraggio MEMS continuo (FREDO + SISO).
- Survey GPR per mappatura grappe → riduzione incertezza FEM.
- Decoupling effetti ambientali e anomaly detection automatica.
- Estensione del protocollo ad altri ambienti del Parco.

Grazie per l'attenzione!

Domande?

dora.foti@poliba.it

Polytechnic University of Bari
Via Orabona 4, 70126 Bari, Italy
www.poliba.it

[Linkedin](#) | [Researchgate](#)

in

R^G