Rete dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica e Strutturale

Convegno ReLUIS

PROTEZIONE CIVILE
Presidenza del Consiglio dei Ministri
Dipartimento della Protezione Civile

Progetto DPC_ReLUIS 2024-2026
Esposizione delle attività svolte e prospettive

Napoli, 13 ottobre 2025

WP 6 - MONITORAGGIO E DATI SATELLITARI

Marco Savoia e Felice Carlo Ponzo
Referente DPC Roberta Giuliani

WP 6 – MONITORAGGIO E DATI SATELLITARI – Prog. 2024-2026

N.	RESPONSABILE SCIENTIFICO	UNIVERSITÀ	DIP.	TASK 6.1	TASK 6.2	TASK 6.3	TASK 6.4
1	Savoia Marco	Università degli Studi di Bologna	DICAM		X		X
2	Ditommaso Rocco / Ponzo Felice Carlo	Università degli Studi della Basilicata	SI		X	X	X
3	Prota Andrea	Università degli Studi di Napoli Federico II	Di.St.	X			X
4	Fabbrocino Giovanni	Università degli Studi del Molise	DiBT	X	X	X	X
5	Limongelli Maria Giuseppina	Politecnico di Milano	ABC	X		X	
6	Saetta Anna / Talledo Diego	Università IUAV di Venezia	DCP	X			
7	Ceravolo Rosario	Politecnico di Torino	DISEG		X	X	X
8	Meda Alberto	Università degli Studi di Roma "Tor Vergata"	DICII	X			
9	da Porto Francesca	Università degli Studi di Padova	GEOSCIENZE	X		X	X
10	Cattari Serena	Università degli Studi di Genova	DICCA				X
11	Gattulli Vincenzo	"Sapienza" Università di Roma	DISG	X	X	X	
12	Belleri Andrea	Università degli Studi di Bergamo	DISA	X	X		X
13	Gara Fabrizio	Università Politecnica delle Marche	DICEA		X		
14	Castaldo Paolo	Politecnico di Torino	DISEG	X	X		
15	Vincenzi Loris	Univesità di Modena e Reggio Emilia	DIEF	X	X		
16	Foti Dora / Sabbà Maria Francesca	Politecnico di Bari	ArCoD		X	X	
17	Bozzano Francesca	"Sapienza" Università di Roma	CERI	X	X		
18	Zonta Daniele	Università degli Studi di Trento	DICAM	X		X	
19	Pecce Maria Rosaria / Bilotta Antonio	Università degli Studi di Napoli Federico II	Di.St.		X		X

Task 6.1 Tecniche ed algoritmi per l'elaborazione di dati satellitari per il monitoraggio di strutture ed infrastrutture

Task 6.2 Tecniche innovative per il monitoraggio on-site

Task 6.3 Protocolli per l'integrazione di dati on-site e satellitari

Task 6.4 Utilizzo dei dati dell'Osservatorio Sismico delle Strutture (OSS)

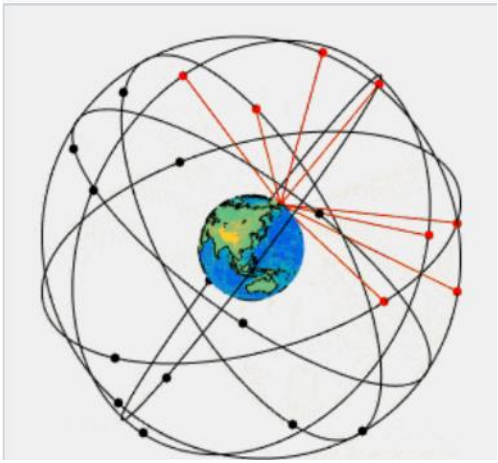
Task 6.1 Tecniche ed algoritmi per l'elaborazione di dati satellitari per il monitoraggio di strutture ed infrastrutture

Task 6.2 Tecniche innovative per il monitoraggio on-site

Task 6.3 Protocolli per l'integrazione di dati on-site e satellitari

Task 6.4 Utilizzo dei dati dell'Osservatorio Sismico delle Strutture (OSS)

Task 6.1 Tecniche ed algoritmi per l'elaborazione di dati satellitari per il monitoraggio di strutture ed infrastrutture

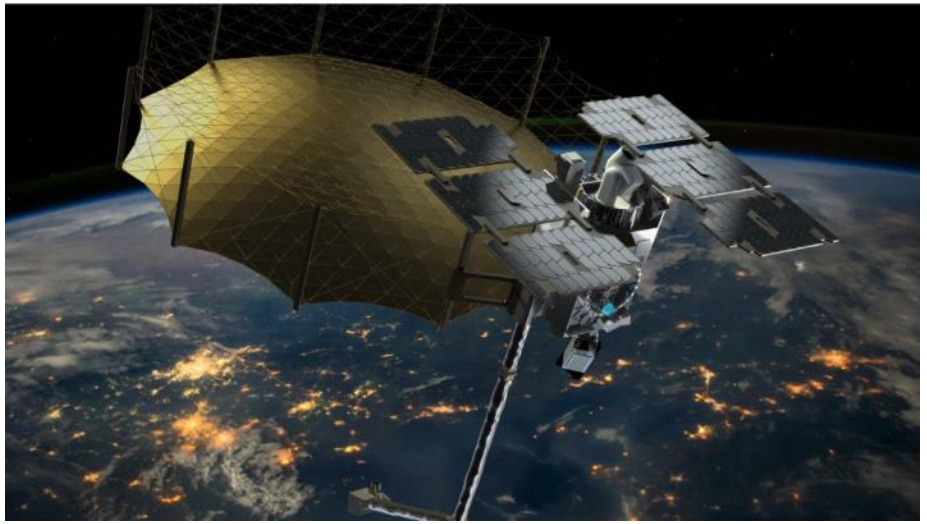


OBIETTIVI

Approfondire le conoscenze sull'uso di varie tecniche di analisi di serie temporali di immagini radar acquisite da satellite al fine di ottenere mappe di spostamenti con elevata risoluzione spaziale e temporale tali da restituire valori attendibili delle deformazioni delle strutture.

ATTIVITA' PREVISTE

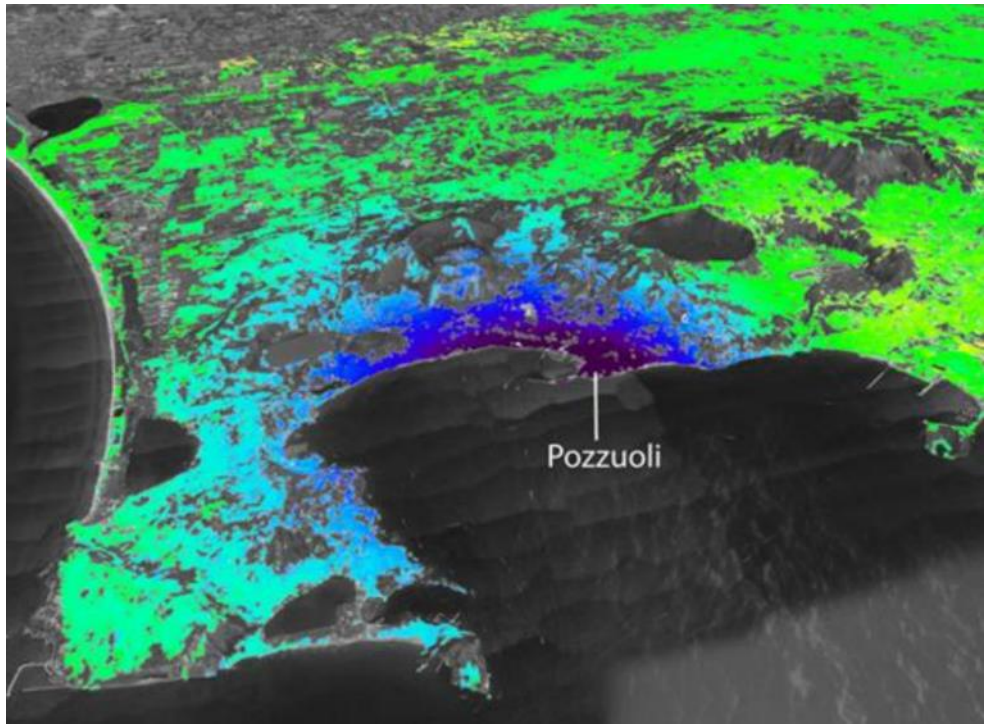
- *Adattamento delle tecniche MT-InSAR al caso di strutture ed infrastrutture;*
- *Validazione interna delle procedure e confronto di diversi algoritmi interpretativi in termini di prestazioni, accuratezza e robustezza, valutazione delle incertezze;*
- *Utilizzo di dati multi-frequenza (prevalentemente banda C, X e L) - Utilizzo di dati ottenuti da costellazioni con diverse inclinazioni orbitali (es. Nimbus, Capella, Iceye) per migliorare la frequenza di acquisizione e la copertura spaziale;*



Task 6.1 Tecniche ed algoritmi per l'elaborazione di dati satellitari per il monitoraggio di strutture ed infrastrutture

ATTIVITA' PREVISTE (segue)

- *Adozione, per alcuni casi studio particolarmente significativi, di soluzioni finalizzate al miglioramento dei dati satellitari, come l'utilizzo di corner reflectors;*
- *Individuazione di una nuova area di studio per l'applicazione delle soluzioni individuate nell'ambito del Task 1. L'area dei Campi Flegrei, interessata negli ultimi anni da un intenso bradisismo, sarà selezionata per l'elevata attività geodetica e la presenza di numerose infrastrutture a rischio soggette a fenomeni deformativi.*



Task 6.1 Tecniche ed algoritmi per l'elaborazione di dati satellitari per il monitoraggio di strutture ed infrastrutture

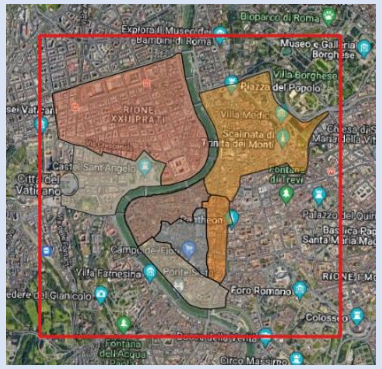
ATTIVITÀ DELLE SINGOLE UNITÀ

DPC/ReLUIS 2024-2026 – WP6 – Monitoraggio e dati satellitari – Task 6.1

UNINA (Prota)
IUAV
UNIROMA TV

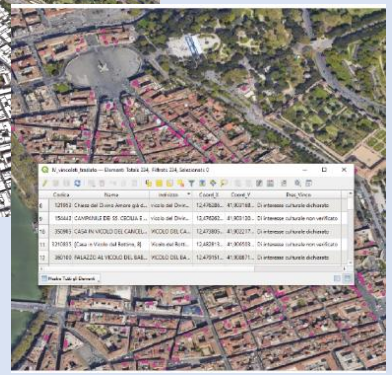
Procedure per il monitoraggio alla scala territoriale di edifici vincolati

Applicazione sperimentale
7 rioni del centro storico di Roma (circa 9 km2)



Selezione edifici di interesse monumentale

Vincoli in rete



Cartografia CTR

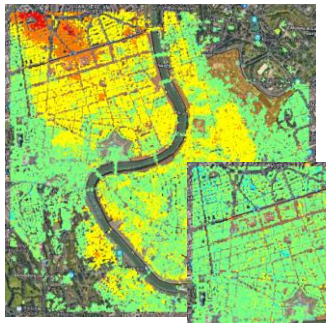
1 Correzione manuale del database

Web

Google Maps

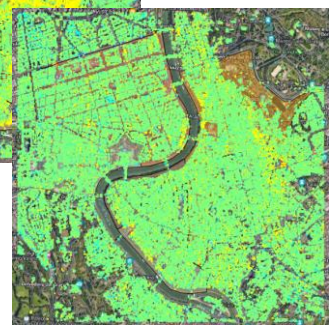
Google Street View

2 Calcolo velocità media annua



Grid-subsampling 10x10m

E-W



Verticale

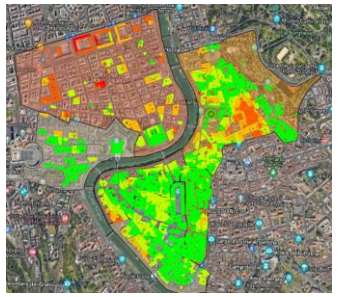
-6.70--5.21
-5.21--3.72
-3.72--2.23
-2.23--0.74
-0.74-0.74
0.74-2.23
2.23-3.72
3.72-5.21
5.21-6.70

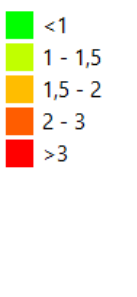
mm/anno

3 Join spaziale dei database

Estrazione parametri sintetici per ogni edificio (media, deviazione standard, valore massimo, minimo, quartili, etc.)

4 Costruzione di mappe tematiche - Correlazione con scale di danno

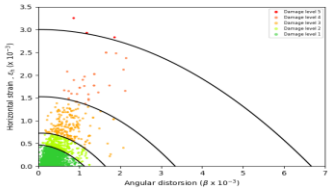


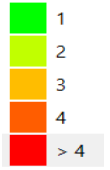


<1
1 - 1,5
1,5 - 2
2 - 3
>3

Numero di dev. standard

Livello di danno (Boscardin e Cording)

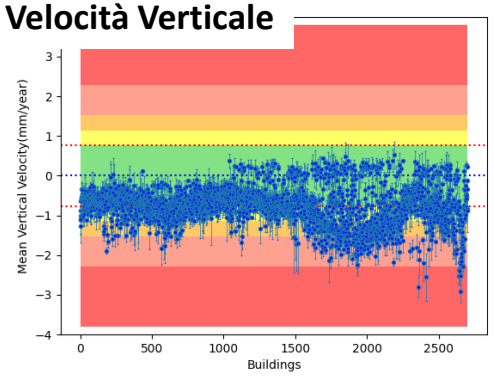




1
2
3
4
> 4

stima deformazione angolare/assiale

Velocità Verticale

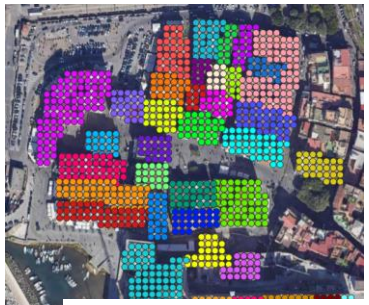


media e dev. standard per ciascun edificio

Procedure per il monitoraggio alla scala territoriale di edifici

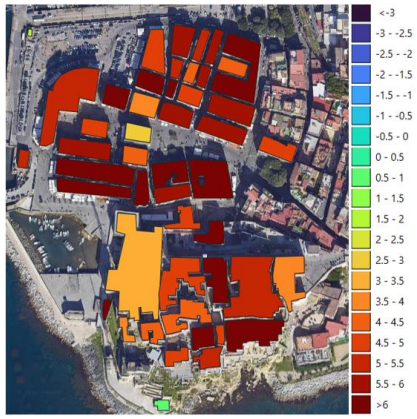
Applicazione su un'area dei Campi Flegrei
(area di circa 200000 m2, circa 50 edifici)

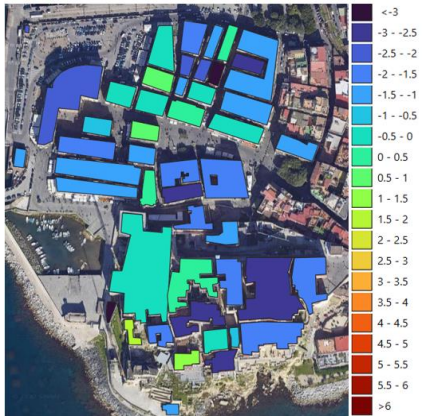
1 **Raccolta dati**



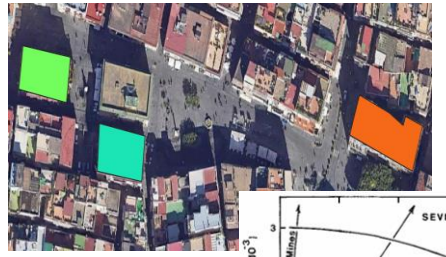
Ricampionamento spaziale con griglie regolari su ogni edificio di maglia 5x5m

2 **Calcolo velocità media annua** (verticale e EW)



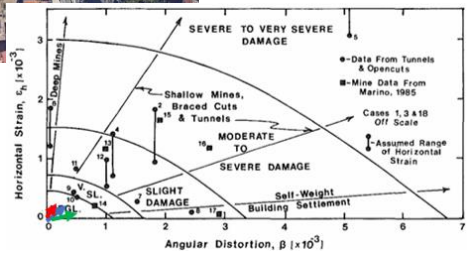


3 **Correlazione con scale di danno**



Stima deformazione angolare/assiale

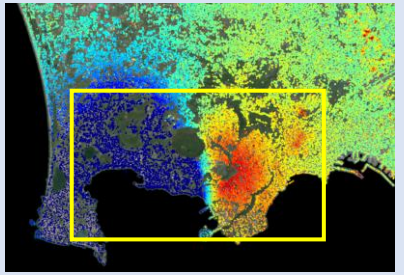
Livello di danno (Boscardin e Cording)



Inizio attività sull'area di studio dei Campi Flegrei

Definizione **"Area di interesse"**

DATI:
- **COSMO-SkyMed**
- **EGMS**



TOR VERGATA UNIVERSITY OF ROME

Università Iuav di Venezia

Sviluppo di una procedura da remoto per la valutazione del danno di edifici soggetti a fenomeni di deformazione lenta

Ispezione macro scalare

Web-mapping temporale

Monitoraggio satellitare

Rilievo geometrico

Identificazione della tipologia strutturale e del funzionamento strutturale

Elaborazione e post-processamento dei dati satellitari

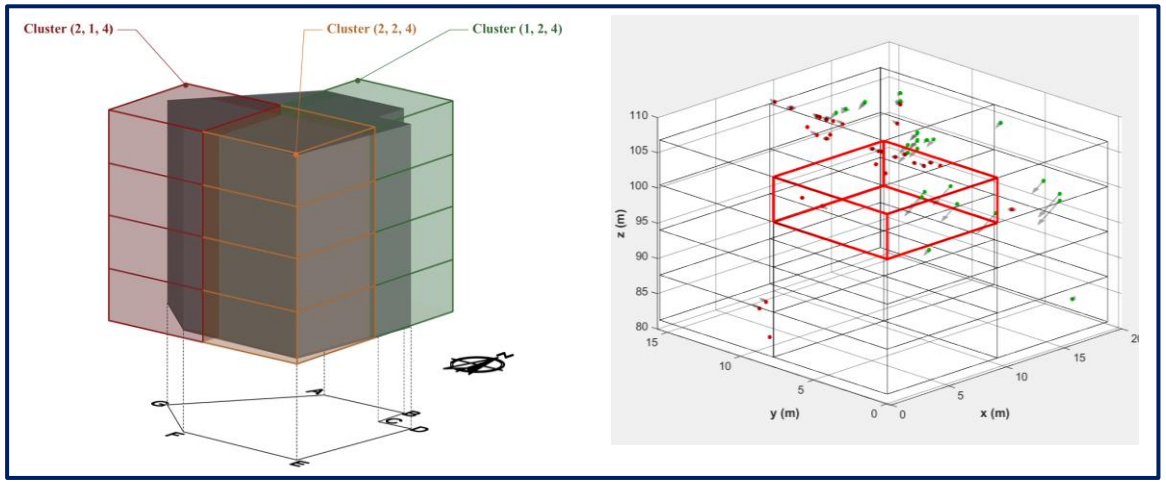
Identificazione anomalie nel comportamento strutturale

Stima delle cause del danno e/o delle anomalie

-Pre-collasso

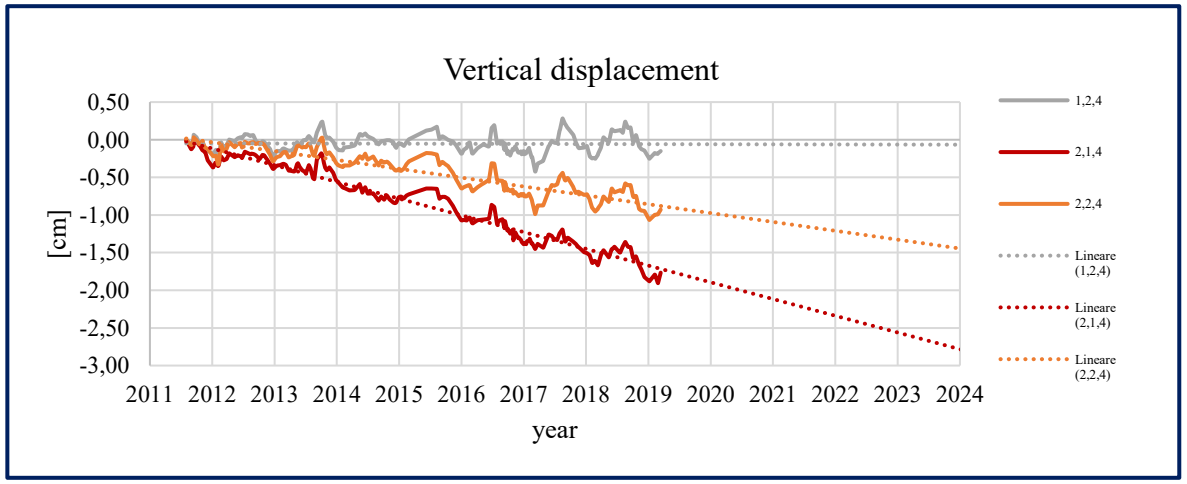
-Post-collasso

Spatially georeferenced Persistent Scatterer (PS) points

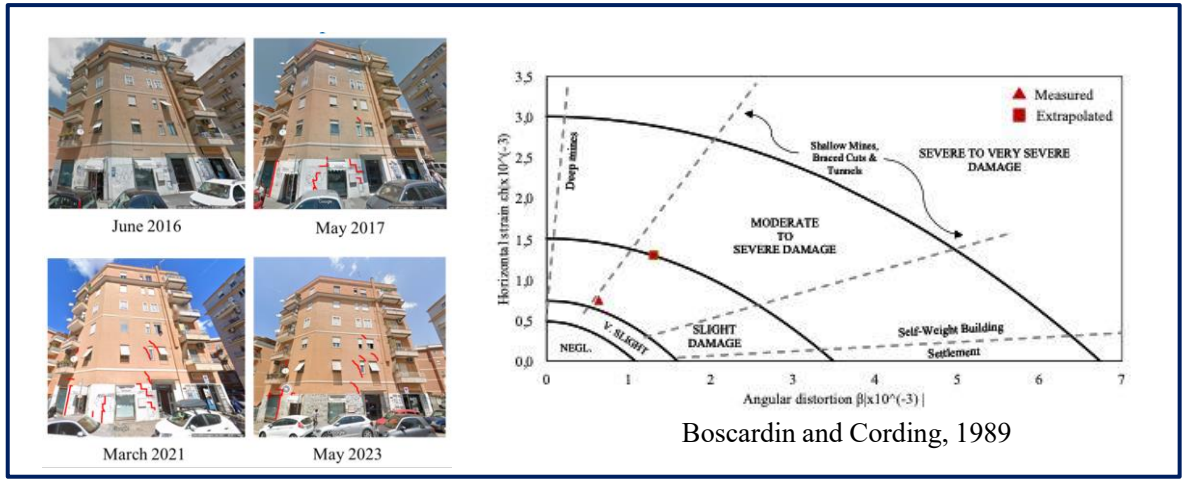


Spatial clustering of PS

Time series of some clusters

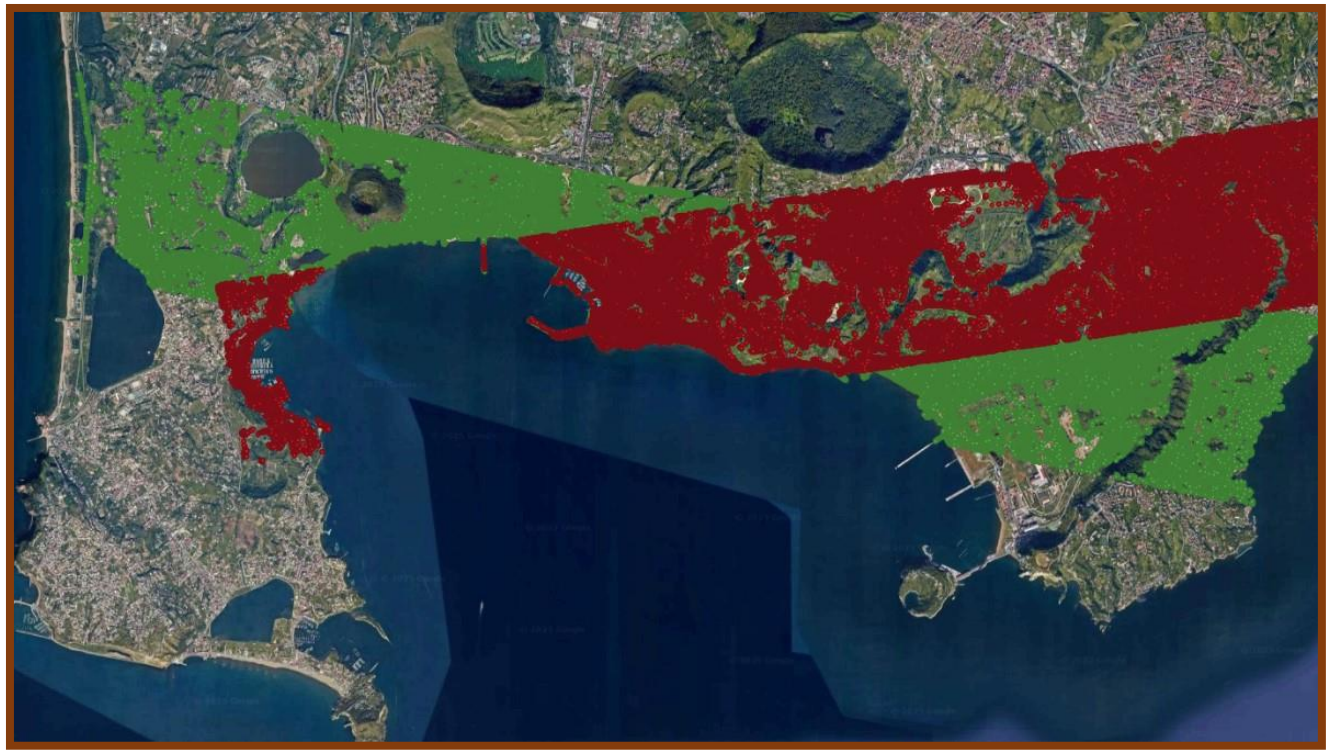


Temporal evolution of damage and assessment

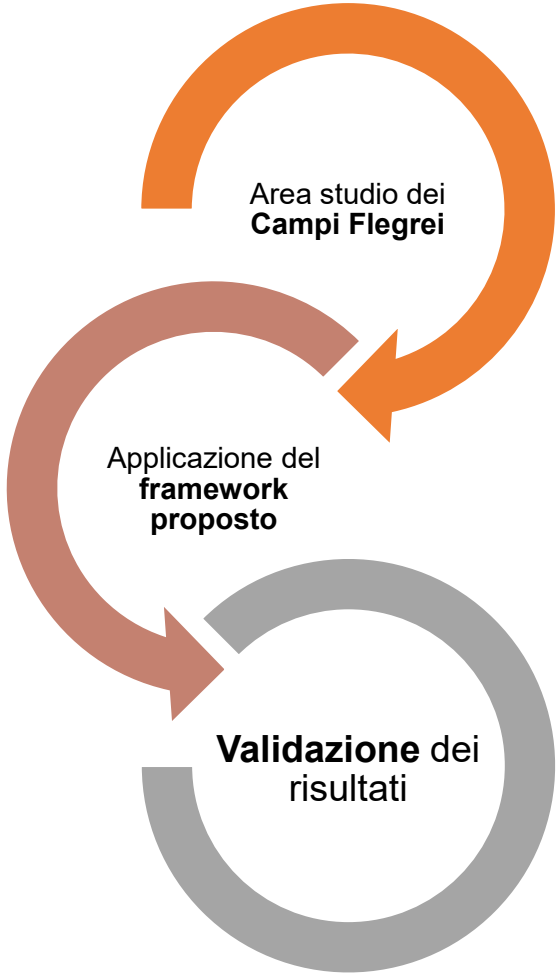


Boscardin and Cording, 1989

Dati satellitari dell'area dei Campi Flegrei di recente consegna



- ASC [strip 11]
- DSC [strip 9]



POLIBA Sapienza (Gattulli)

Localizzazione del Complesso dei Musei Capitolini e dell'Esedra di Marco Aurelio

CASO STUDIO:

Marcus Aurelius Exedra, facente parte del complesso dei Musei Capitolini di Roma in Piazza del Campidoglio.

Coordinate geografiche (41.89299; 12.48261); *Altitudine* ~50 m s.l.m.

OBIETTIVO:

Confronto tra dataset *open source* (EGMS) e dataset *closed source* (CNR-IREA) di dati Satellitari e relativa valutazione della qualità degli stessi.

ELABORAZIONI PRECEDENTEMENTE EFFETTUATE:

- Studio della distribuzione temporale e spaziale;
- Studio delle componenti di deformazione lungo la LOS, Est-Ovest, Verticale;
- Analisi del trend di spostamento medio.

CALCOLO E CONFRONTO DELLE VELOCITÀ MEDIE SULL'INTERO ARCO TEMPORALE COPERTO DAI DATASET

CONFRONTO

Velocità media originaria «VO»
Valore di velocità media fornito originariamente dai dataset per ciascun MP*

**MP: Punto di Misura*

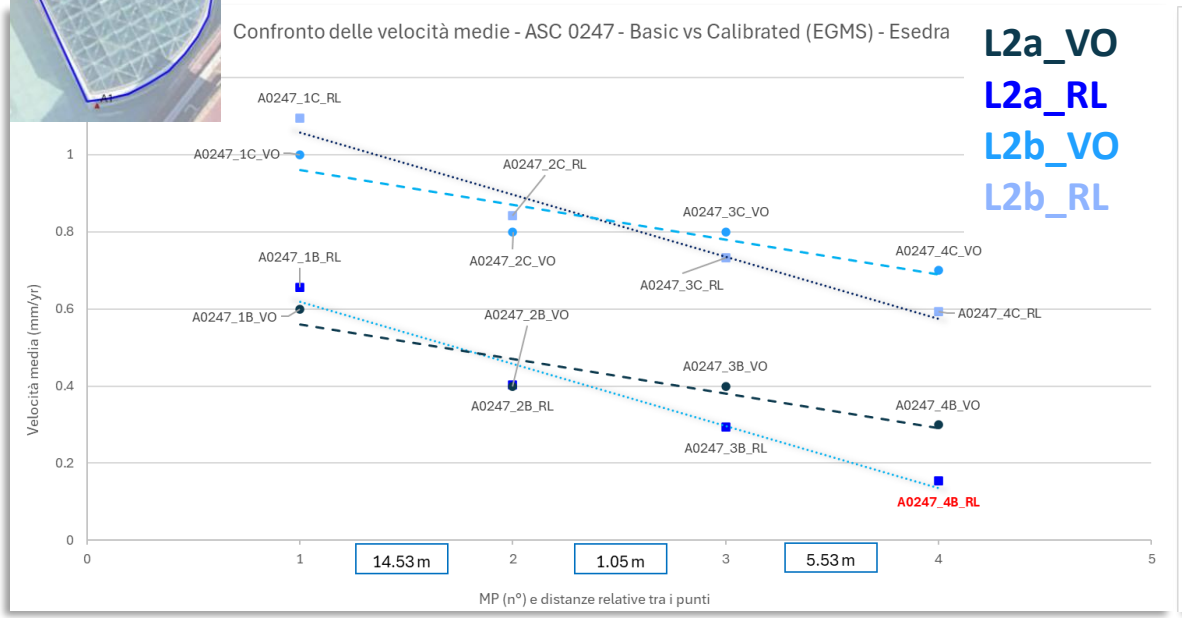
Velocità media ponderata «RL»
Valore di velocità media calcolato mediante regressione lineare

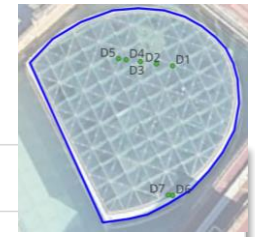
→ Calcolo della variazione percentuale (Var%) dei valori ottenuti

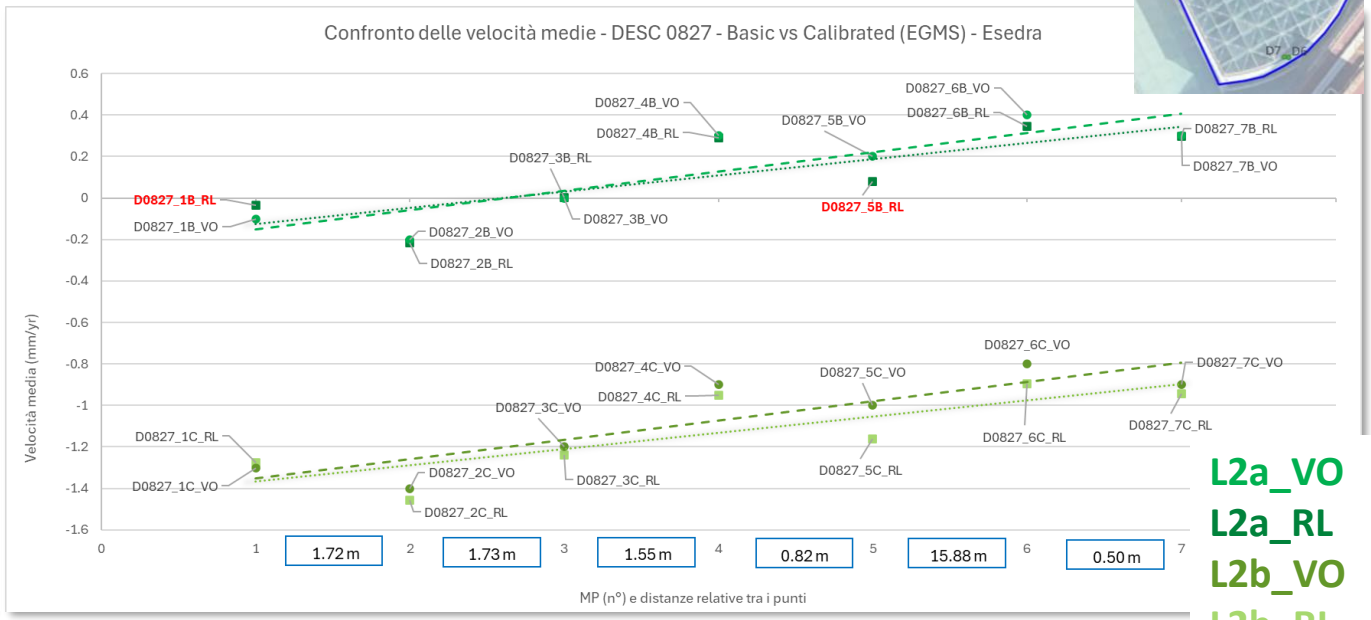
→ Filtraggio di quei MP che presentano una Var% superiore al 30% (**etichetta evidenziata in rosso**) e calcolo della relativa riduzione in termini percentuali (Rid%)

EGMS L2a e L2b
0%<Rid%<41%

CSK
64%<Rid%<100%

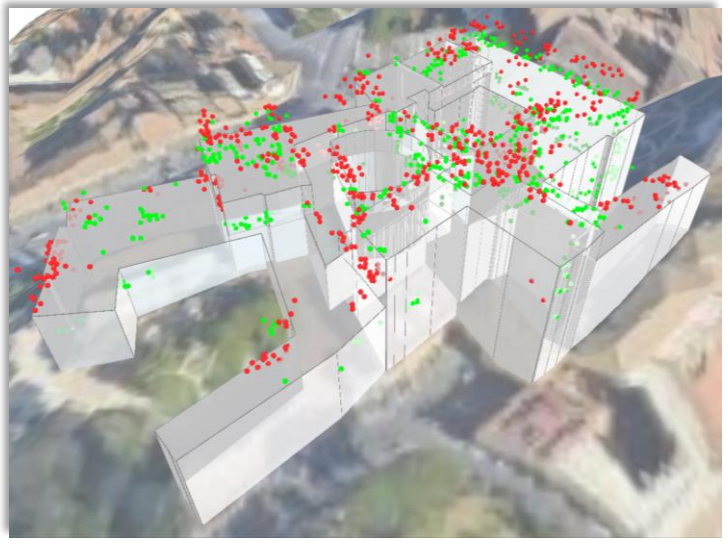




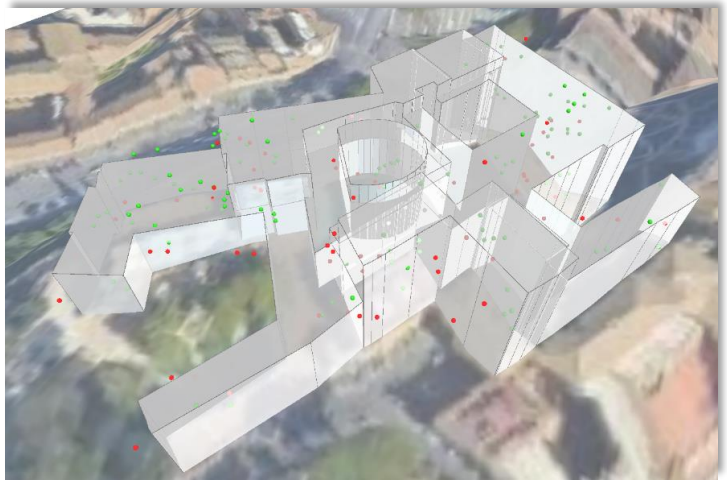


POLIBA
Sapienza
(Gattulli)

ANALISI DEL PARAMETRO «ALTEZZA» DEI PUNTI DI MISURA (MP)



Vista d'insieme dei MP del dataset CSK



Vista d'insieme dei MP del dataset EGMS

CONFRONTO → **Altezza degli edifici** / **Altezza di ciascun MP**

A seguito di un'analisi **tridimensionale**, contrariamente a quanto si evince esclusivamente da una **bidimensionale**, i MP con differenze significative ricadono frequentemente al confine con altri edifici, strade e/o piazze.

ESEMPI SIGNIFICATIVI: MP ricadenti sul perimetro di edifici o sul confine di edifici adiacenti

Es.1_MP vicini posizionati sul confine di edifici adiacenti:

Gli MP indagati presentano altezze sensibilmente differenti rispetto ad altri punti vicini ad essi. Si ipotizza che possano appartenere all'edificio adiacente e che ciò avvenga a causa della griglia di acquisizione del dato, pari a 3×3 m.

- 11 m < Δh < - 4 m

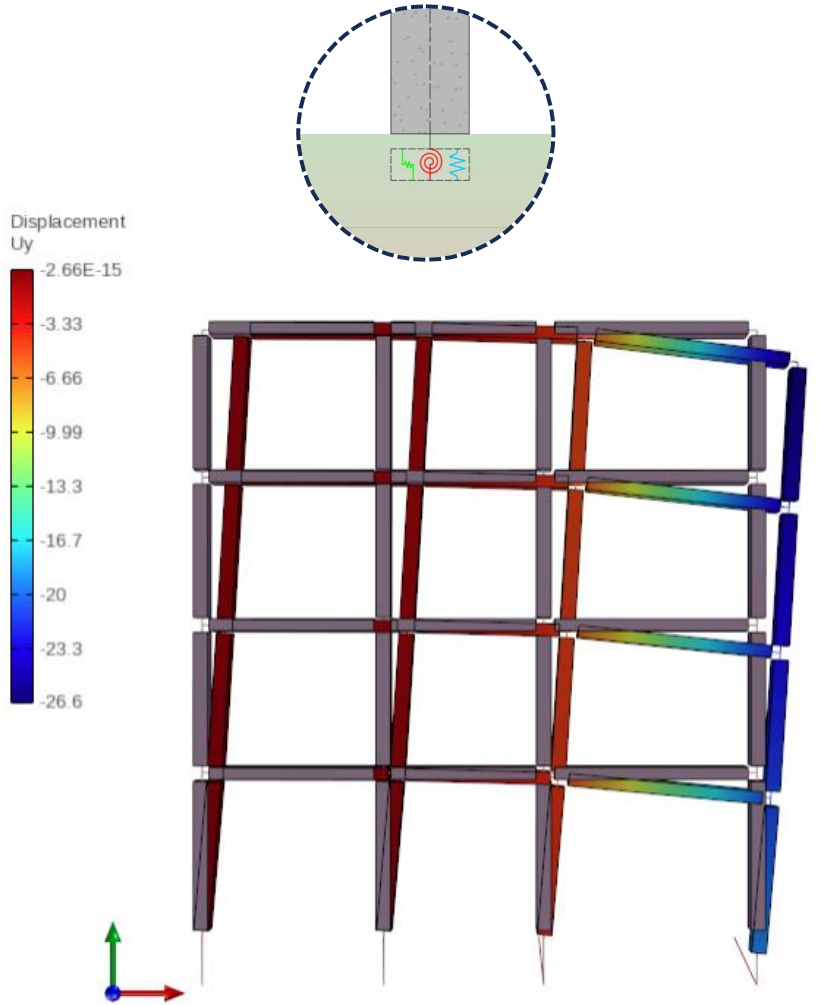
7.50 m < Δh < 11.50 m

Es.2_MP vicini posizionati sul perimetro dell'edificio:

Gli MP selezionati registrano altezze sensibilmente inferiori rispetto agli altri punti appartenenti alla stessa area. Si ipotizza che la loro collocazione possa trovarsi sul piano campagna, piuttosto che sull'edificio di riferimento.

Valutazione della applicazione di indici di danno in caso di cedimenti di fondazione:

CEDIMENTI

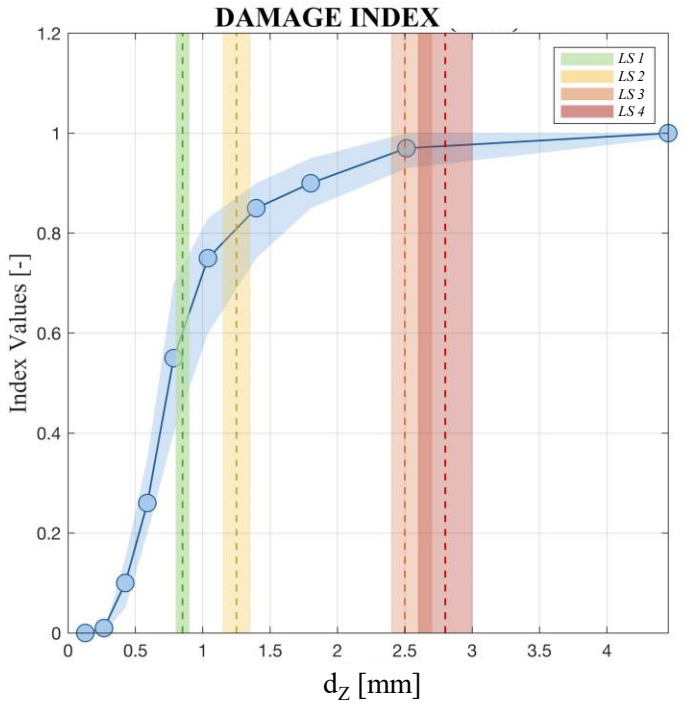


PRIMO METODO DI CALCOLO

- TAGLIO DELLE TRAVI
- ABBASSAMENTO D_Z

SECONDO METODO DI CALCOLO

- MOMENTO FLETTENTE DELLE TRAVI…
- ROTAZIONE TRAVI



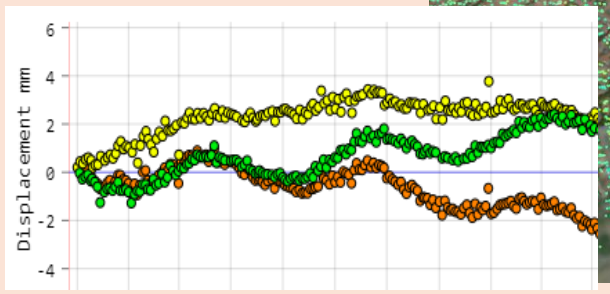
DATI SATELLITARI

Obiettivo:
Elaborazioni autonome di dati satellitari e confronto di risultati ottenuti da diverse costellazioni
1) confronto di risultati provenienti da dati di diverse costellazioni di satelliti, in banda C, X e L;
2) utilizzo e sviluppo di tecniche di fusione dei dati per ottenere informazioni da costellazioni con bande differenti - banda C, X, L.

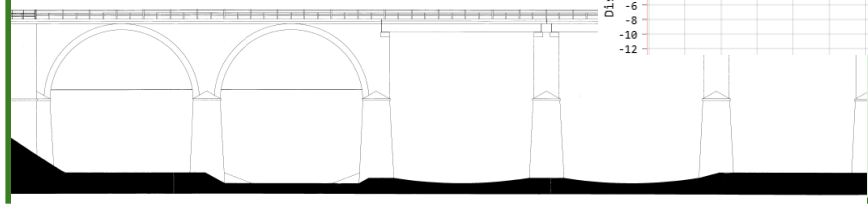
1 - SAOCOM - SAR in Banda-L
2 - Cosmo SkyMed – in banda X
3 - Sentinel – in banda C

Caso Studio 1: **Ponte ferroviario a Modena**

Caso studio 2: **Ponte delle grazie a Faenza**



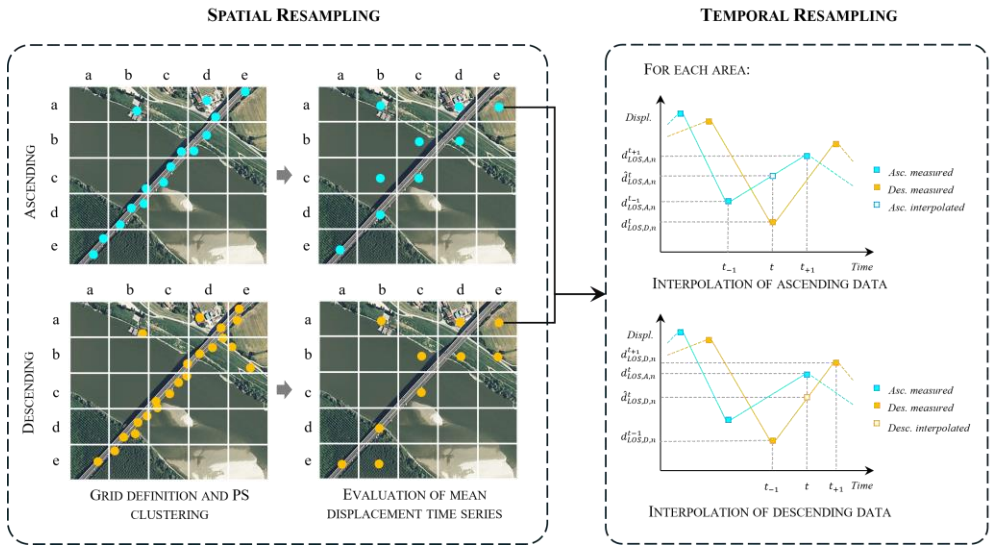
Caso studio 2: **Ponte Savoniero**



Framework for quantifying the uncertainty introduced by spatial and temporal resampling.

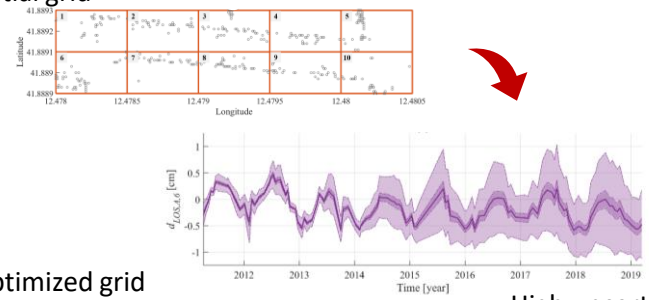
Using classical error propagation theory, we evaluated how spatial and temporal resampling, specifically through **grid subsampling** and **linear temporal interpolation**, affect the precision of reconstructed structural displacements.

Giordano P.F., Kamariotis A., Giardina G., Chatzi E., Limongelli M.P. Uncertainty propagation in satellite InSAR data analysis for structural health monitoring(2025) Automation in Construction, 177, 106371. DOI: 10.1016/j.autcon.2025.106371



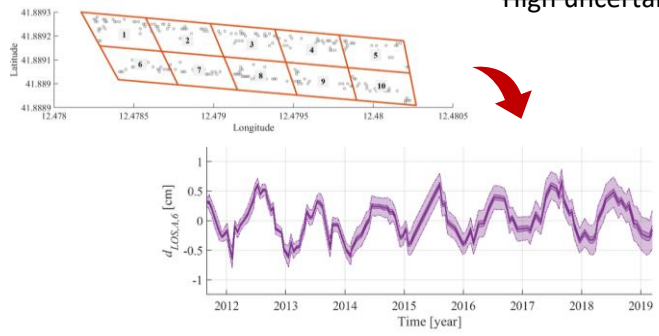
The standard deviation can be used to optimize the grid areas. Case study: Palatino bridge in Rome

Initial grid



High uncertainty

Optimized grid



Small uncertainty

Equations to calculate the standard deviation of the displacements

- Ascending data are directly available; descending data are interpolated:

$$\begin{cases} \sigma^2_{d^t_{E,n}} = \sqrt{a_E^2 \cdot c_1^{t\,2} \cdot \sigma^2_{d^{t-1}_{LOS,D,n}} + a_E^2 \cdot c_2{}^2 \cdot \sigma^2_{d^{t+1}_{LOS,D,n}} + b_E^2 \cdot \sigma^2_{d^t_{LOS,A,n}}} \\ \sigma^2_{d^t_{U,n}} = \sqrt{a_U^2 \cdot \sigma^2_{d^t_{LOS,A,n}} + b_U^2 \cdot c_1^{t\,2} \cdot \sigma^2_{d^{t-1}_{LOS,D,n}} + b_U^2 \cdot c_2{}^2 \cdot \sigma^2_{d^{t+1}_{LOS,D,n}}} \end{cases}$$

- Descending data are directly available; ascending data are interpolated:

$$\begin{cases} \sigma^2_{d^t_{E,n}} = \sqrt{a_E^2 \cdot \sigma^2_{d^t_{LOS,D,n}} + b_E^2 \cdot c_1^{t\,2} \cdot \sigma^2_{d^{t-1}_{LOS,A,n}} + b_E^2 \cdot c_2^{t\,2} \cdot \sigma^2_{d^{t+1}_{LOS,A,n}}} \\ \sigma^2_{d^t_{U,n}} = \sqrt{a_U^2 \cdot c_1^{t\,2} \cdot \sigma^2_{d^{t-1}_{LOS,A,n}} + a_U^2 \cdot c_2^{t\,2} \cdot \sigma^2_{d^{t+1}_{LOS,A,n}} + b_U^2 \cdot \sigma^2_{d^t_{LOS,D,n}}} \end{cases}$$

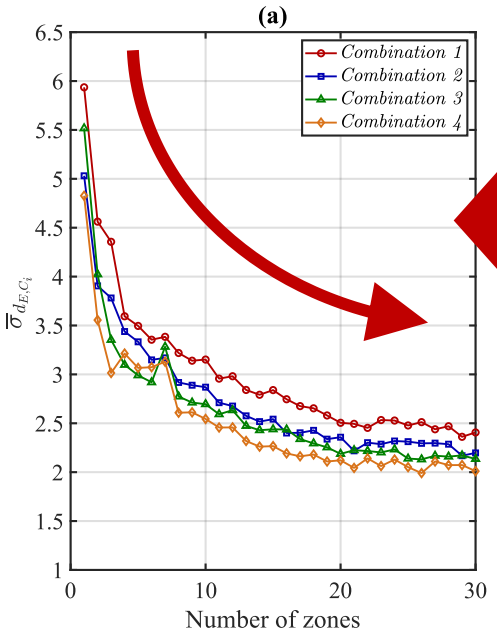
Coefficients c_1^t and c_2^t depend only on data aquisition times

Coefficients $a_{E/U}$ and $b_{E/U}$ depend on the cosine directors

Standard deviations of the displacements inside each cell

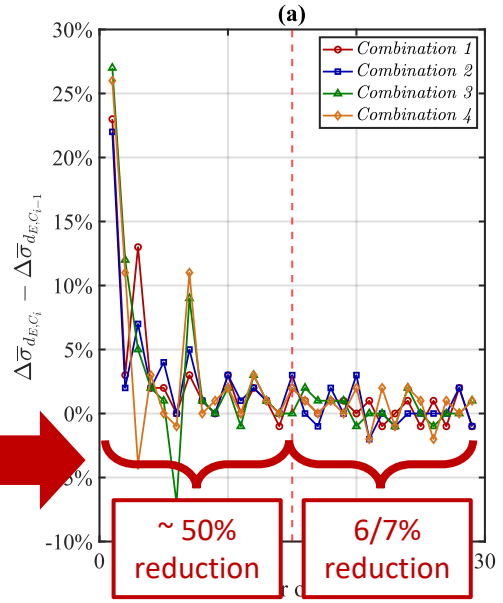
Uncertainty quantification – grid size and dataset selection

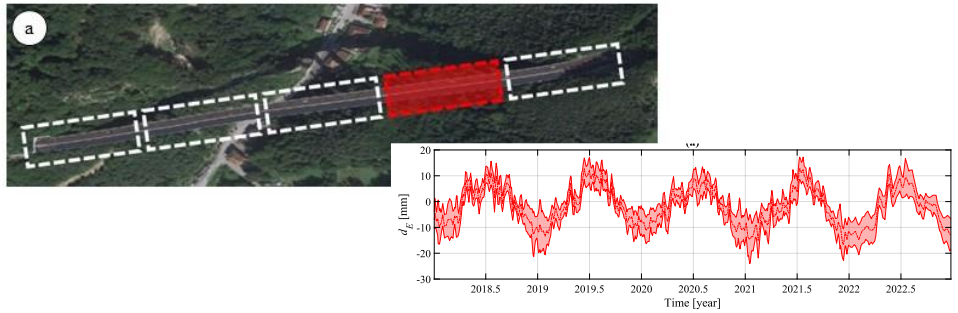
- The objective of the work is to determine the optimal grid subdivision and the best EGMS dataset configuration. Various grid configurations (from 1 to 30 zones) and datasets combinations (2 asc + 2 dsc, 4 combinations) are explored to assess their impact on the uncertainty of structural displacements.
- To this aim, the metric $\bar{\sigma}_{d_{E/U,C_i}}$ is defined representing the mean standard deviation of the displacement within the areas defined in each configuration.
- Case study: Schottwien Viaduct, Austria

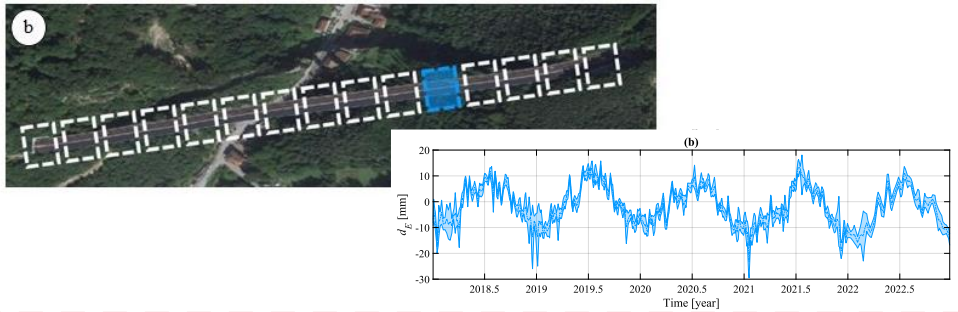


Increasing the number of areas leads to a reduction in standard deviation values.

With the increase of the area number, the uncertainty reduction becomes progressively smaller.







The confidence region (sample standard deviation) significantly decreases as the number of areas increases

- *R. Liuzzo, P.F. Giordano, M.P. Limongelli, Quantifying uncertainty in InSAR-derived displacement measurements for bridge monitoring, in: SPIE, 2025: p. 13. https://doi.org/10.1117/12.3027713*

Misure vibrazionali da SAR satellitare

Obiettivo: usare Micro Motion SAR (MM-SAR) per misure vibrazionali di ponti

Effetto Doppler: in immagine SAR, bersaglio in movimento appare spostato in direzione di volo del satellite (azimut). **Shift** in azimut x dipende dalla velocità del target v_r [1]:

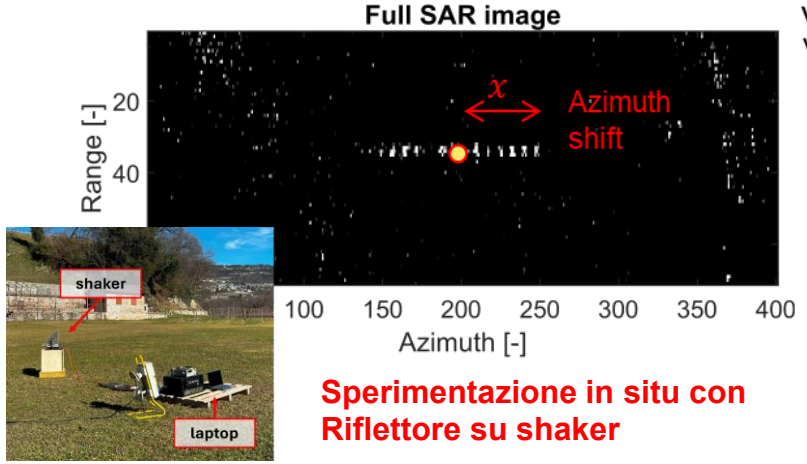
$$x = -\frac{v_r \cdot R}{v_{satellite}}$$

v_r: velocità radiale target

R: distanza satellite e target a terra

$v_{satellite}$: velocità satellite

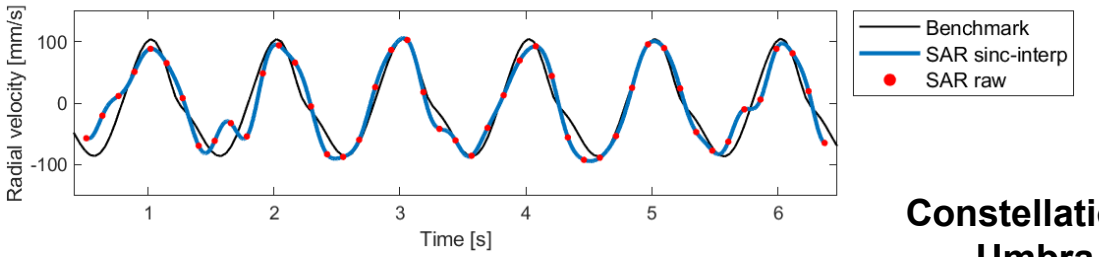
[1] Raney, R. (1971). Synthetic Aperture Imaging Radar and Moving Targets



Sperimentazione in situ con Riflettore su shaker

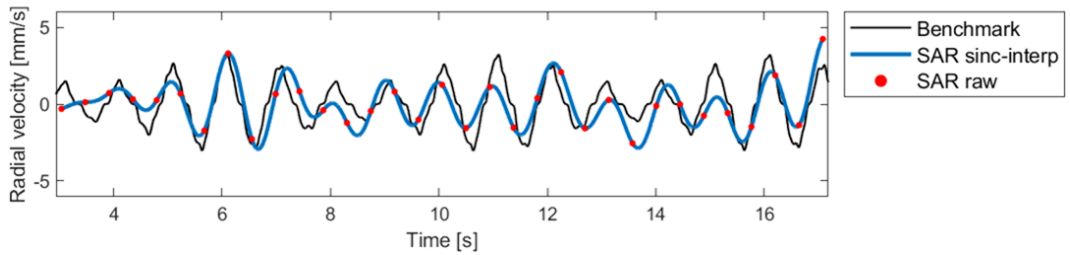
Vertical amplitude = 24 mm, frequency = 1 Hz, $v_{r,max}$ = 95 mm/s

Test 1, t_{sap} = 0.18 s, overlap = 30%, N = 47, f_s = 7.8 Hz



Vertical amplitude = 0.5 mm, frequency = 1 Hz, $v_{r,max}$ = 3.8 m/s

Test 6, t_{sap} = 0.65 s, overlap = 33%, N = 33, f_s = 2.3 Hz



Constellation: Umbra

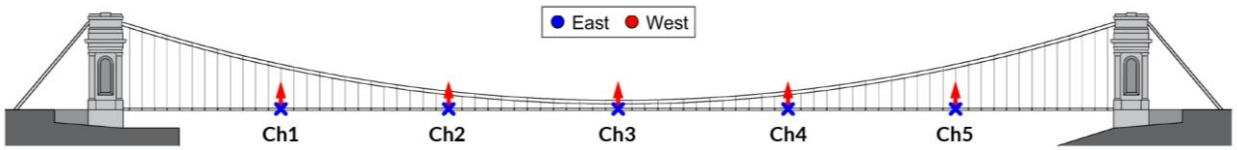
Sommario

- Investigata la possibilità di usare il MM-SAR per misure vibrazionali di ponti
- Potenzialità di eseguire analisi modale sperimentale direttamente dal satellite
- Verifica sperimentale su un riflettore isolato in condizioni ideali, diversi range di ampiezza e frequenza
- Ricostruita storia temporale velocità per moti armonici fino a velocità radiali di 0,003 m/s
- Qualità dell'estrazione aumenta con la velocità di oscillazione

Misure vibrazionali da SAR satellitare

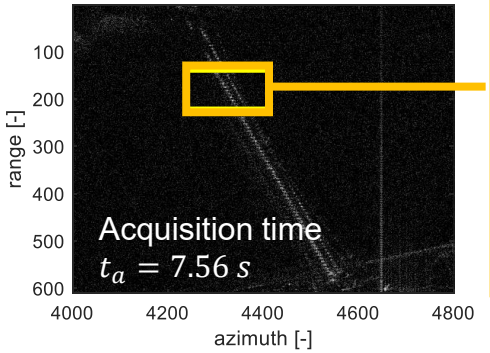
Sommario

- Verifica sperimentale su South Portland St Suspension Bridge, Glasgow UK (passerella pedonale sospesa co con struttura metallica)
- Validazione con sensori installati in situ
- Ricostruita storia temporale velocità per moti armonici fino a velocità radiali di 0,001 m/s
- Estrazione frequenze dominanti nel periodo di acquisizione satellitare (7.56 s)

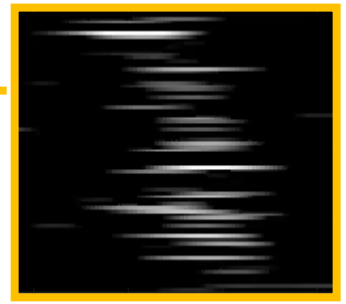


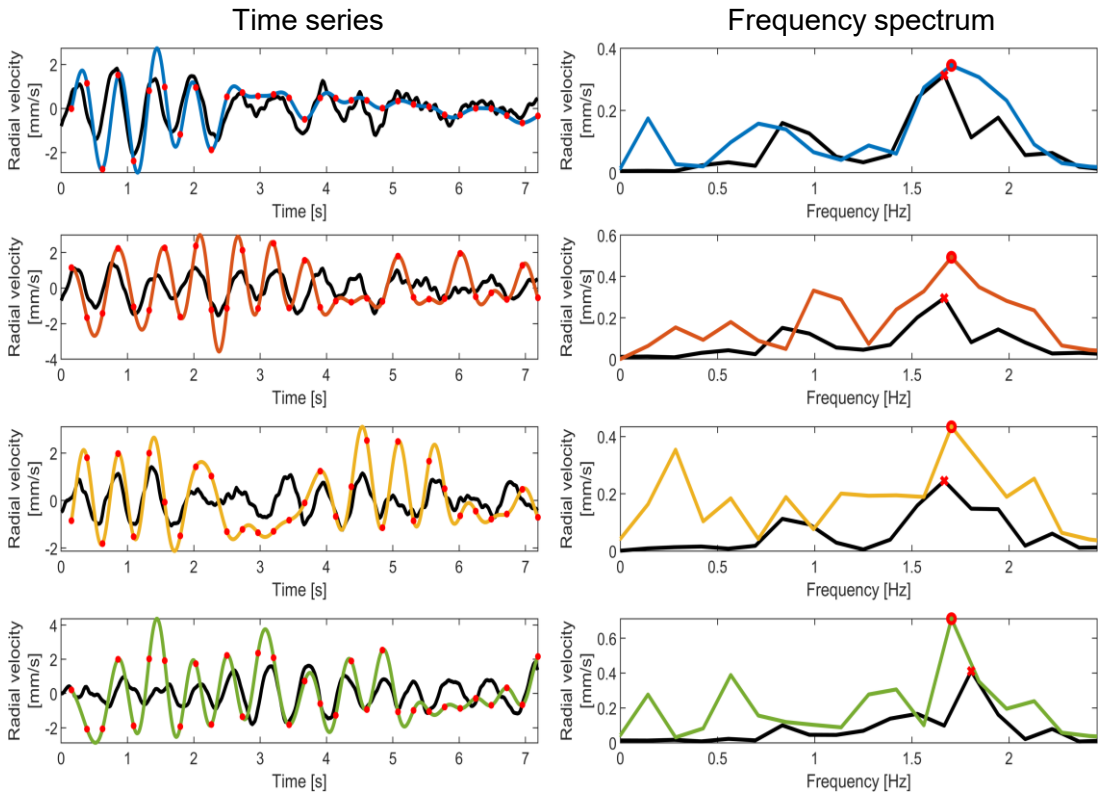
Optical image

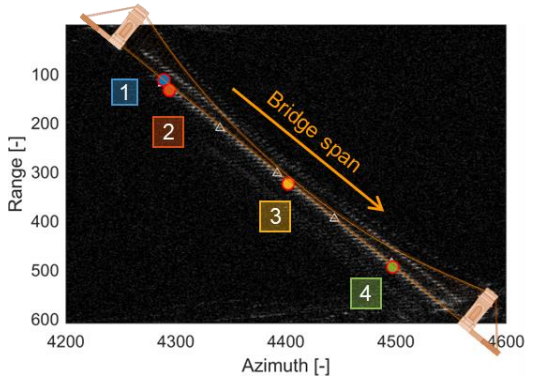
Reflectivity map



Azimuth shifts







Pixel	RMSE	ϵ_f	ρ_t	ρ_f
[-]	[mm/s]	[Hz]	[-]	[-]
1	0.7	0.04	0.66	0.88
2	1.2	0.04	0.52	0.81
3	1.0	0.04	0.59	0.77
4	1.4	0.10	0.46	0.73

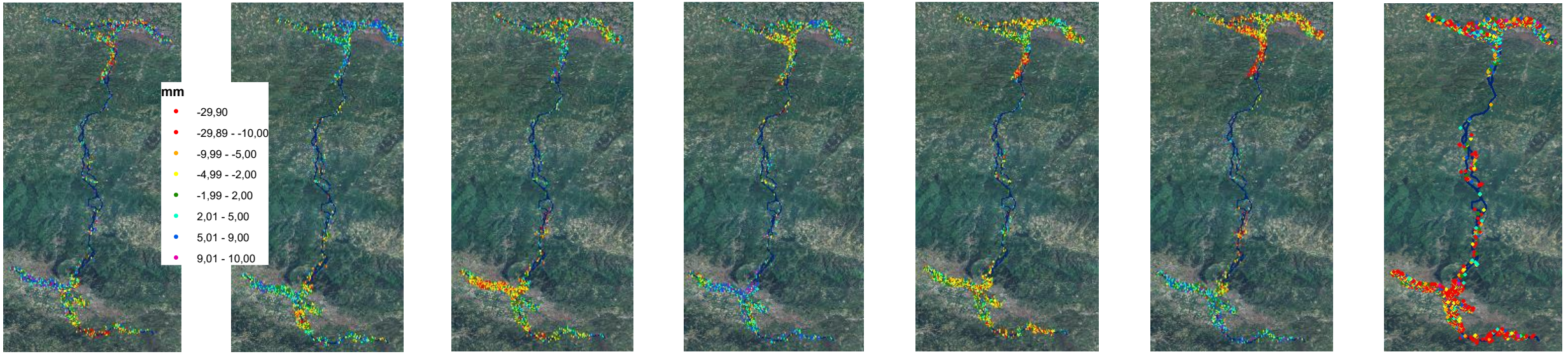
Freq residual ϵ_f
Time corr ρ_t
Freq corr ρ_f

POLITO
Castaldo

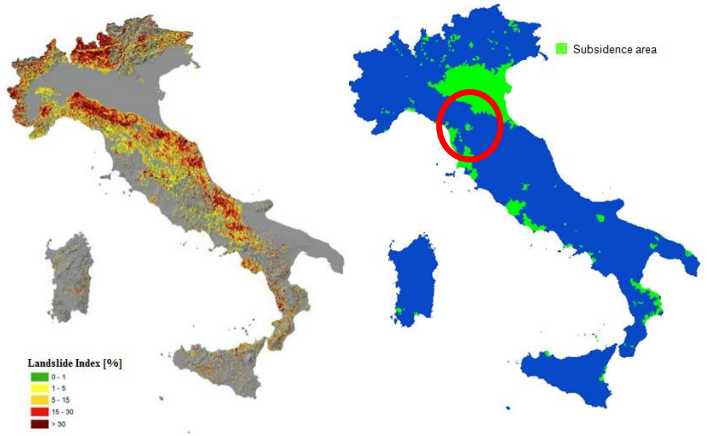
Rete dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica e Strutturale

Bologna-Firenze
SENSORE ENVISAT

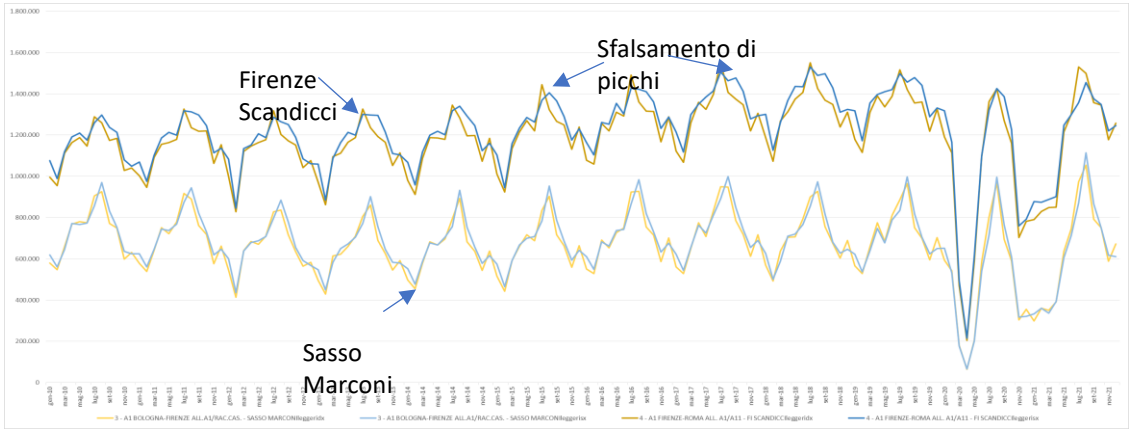
MAPPE TEMPO-VARIANTI - SPOSTAMENTI ORIZZONTALI E VERTICALI



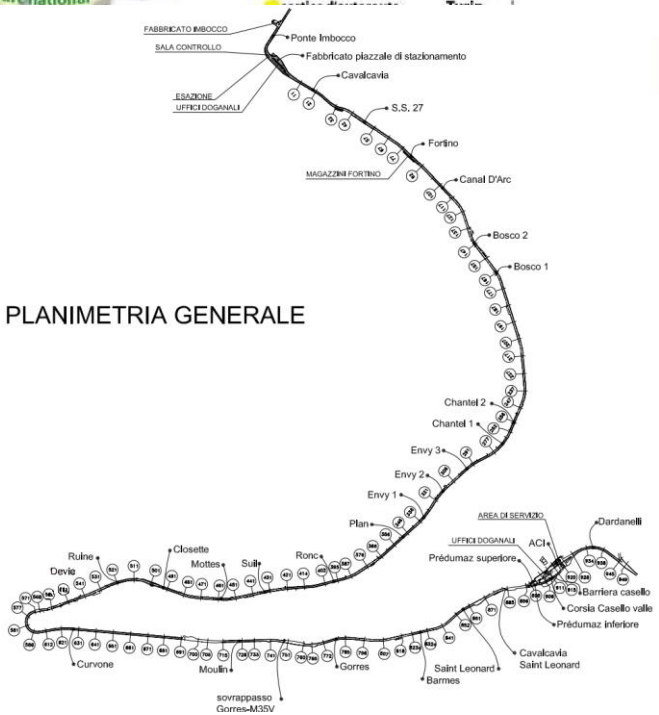
FRANE E SUBSIDENZE



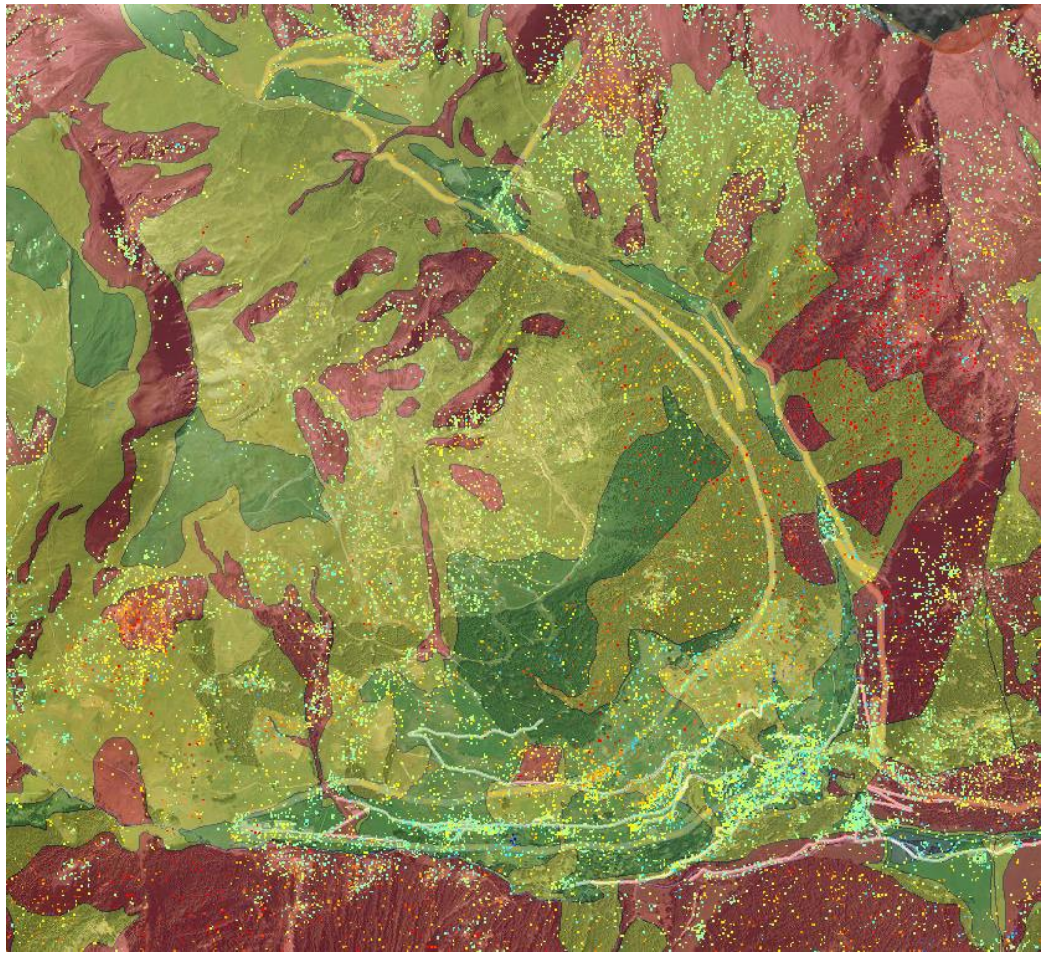
Analisi Preliminare del traffico – Mezzi Leggeri



Utilizzo dati satellitari dai geoportali



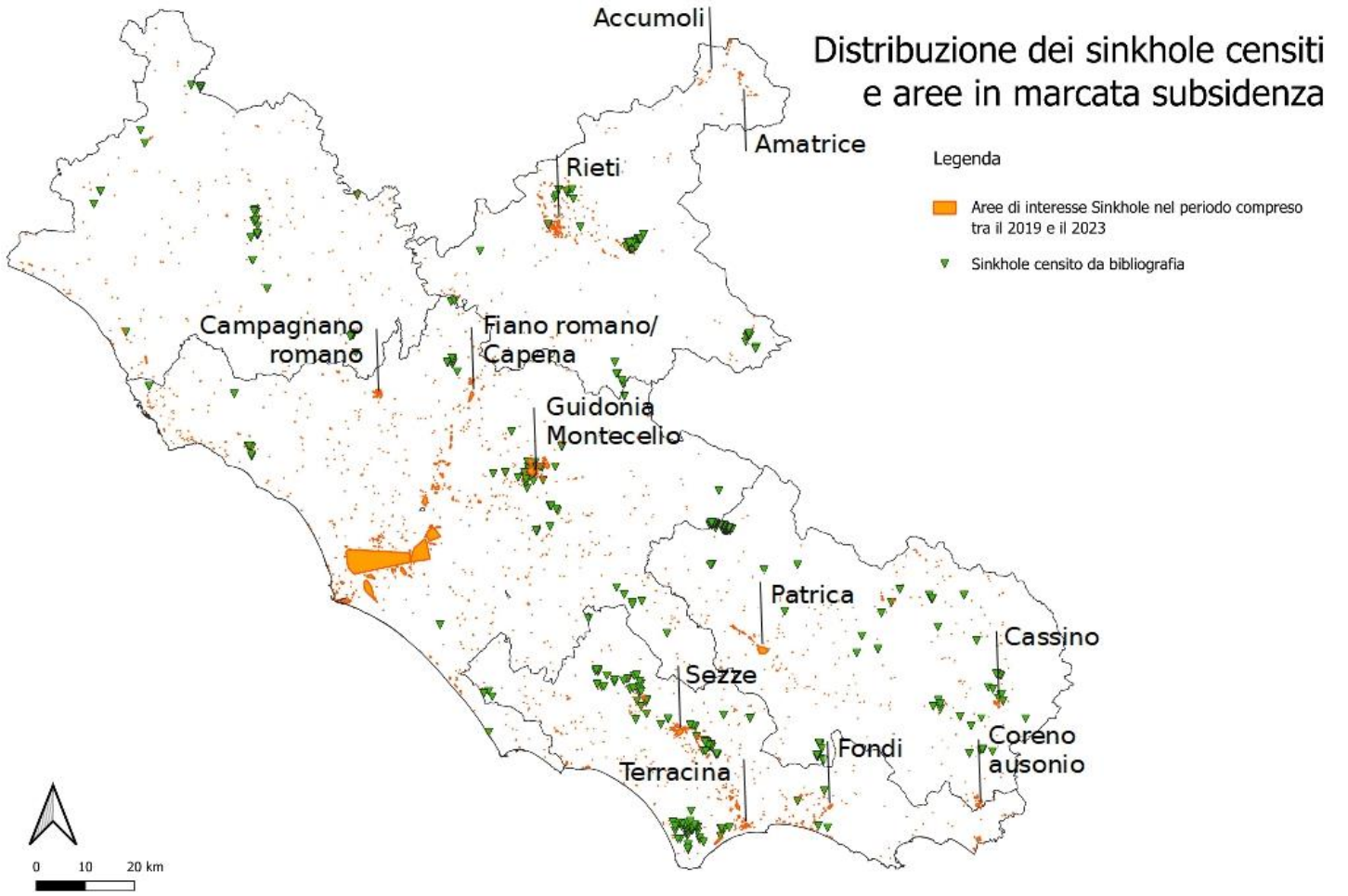
Tratta T2 – Valle D'Aosta



UNIRM Sapienza (Bozzano)

REGIONE LAZIO:

- individuazione a scala regionale e tramite dati interferometrici EGMS della aree del territorio della regione Lazio soggette ad abbassamento (vedi mappa con indicazione delle aree e mappatura dei sinkholes censiti nella regione – in coordinamento con Accordo istituzionale CERI-Regione Lazio))
- selezione delle aree di maggiore estensione e/o coinvolgimento di aree abitate (piana di Rieti; zona di Guidonia-Tivoli; piana di Fiumicino; piana pontina tra Sezze e Terracina; zona di Cassino)
- raccolta dei dati per ricostruzione geologica 3D del sottosuolo funzionale all'interpretazione dei processi monitorati tramite interferometria satellitare



Task 6.1 Tecniche ed algoritmi per l'elaborazione di dati satellitari per il monitoraggio di strutture ed infrastrutture

Task 6.2 Tecniche innovative per il monitoraggio on-site

Task 6.3 Protocolli per l'integrazione di dati on-site e satellitari

Task 6.4 Utilizzo dei dati dell'Osservatorio Sismico delle Strutture (OSS)

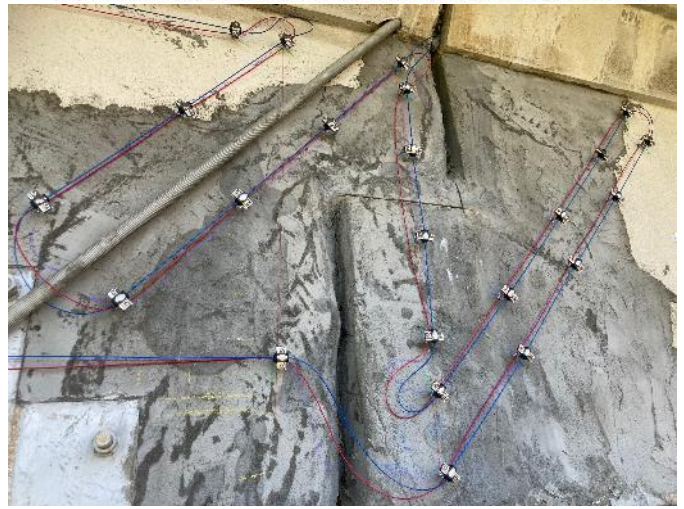
Task 6.2 Tecniche innovative per il monitoraggio on-site

OBIETTIVI

Approfondire ed integrare **le tecniche e le tecnologie più recenti per il monitoraggio on-site** per migliorare gli algoritmi esistenti per la valutazione dello stato di salute di strutture e infrastrutture.

ATTIVITA' PREVISTE

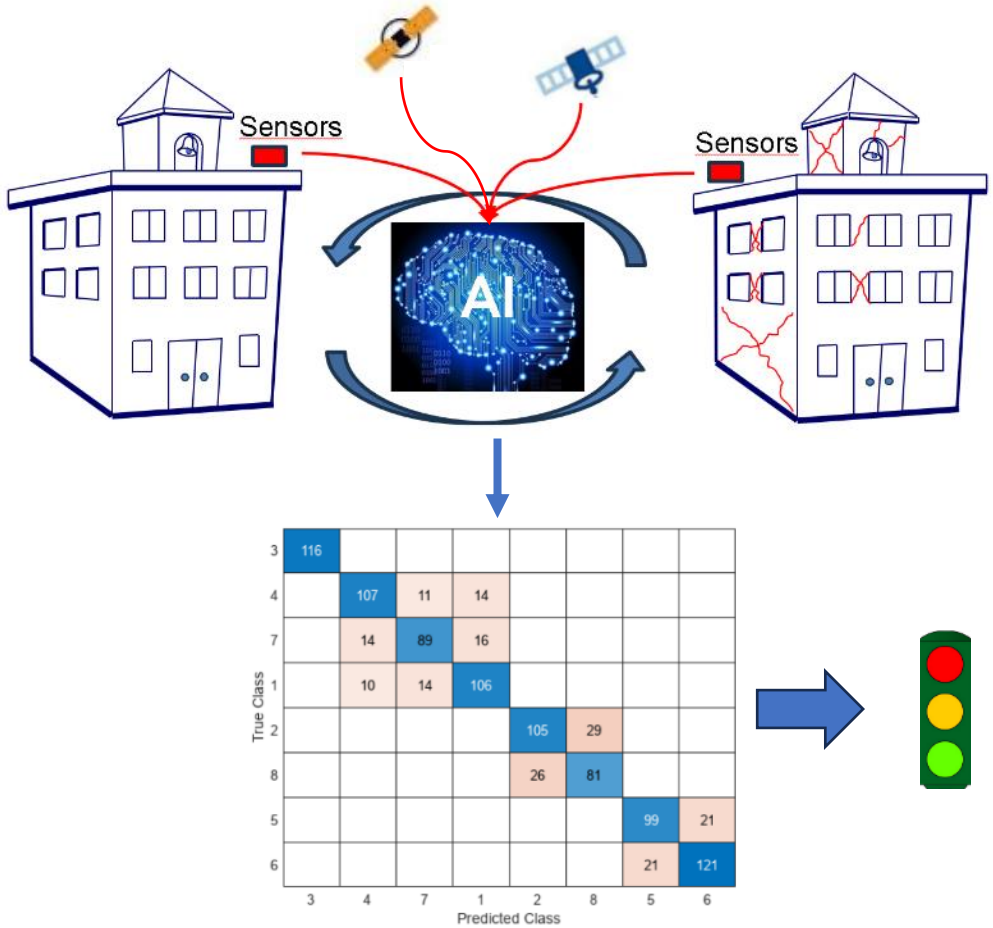
- *Definizione di algoritmi sempre più performanti per valutare il comportamento delle strutture esistenti, al fine di monitorarne la sicurezza e stimare la durabilità e strategie di monitoraggio particolarizzate alle diverse tipologie strutturali.*
- *Integrazione di diverse strumentazioni per il monitoraggio dinamico, per l'identificazione precoce di anomalie comportamentali. Le indagini vibrazionali, mediante l'uso di sensori come Force-Balance, Piezoelettrici, MEMS e Velocimetri possono essere integrate con strumenti laser per il rilievo degli spostamenti, sistemi GPS e GNSS, e fibre ottiche per il monitoraggio preciso e in tempo reale degli spostamenti e deformazioni*



Task 6.2 Tecniche innovative per il monitoraggio on-site

ATTIVITA' PREVISTE

- *Formulazione di Criteri per la Definizione di Soglie di Attenzione e di Allarme. Consentono di attivare tempestivamente interventi di manutenzione o di emergenza. Tali soglie devono essere stabilite sulla base di dati storici, modelli computazionali e normative vigenti, come le NTC e le norme UNI TR 11634:2016, che forniscono linee guida per il monitoraggio strutturale;*
- *Tecniche di Integrazione dei Dati relativi a sistemi di monitoraggio on-site. L'integrazione dei dati raccolti on-site mediante tecniche e protocolli avanzati è cruciale per l'analisi complessiva dello stato di salute delle strutture, consentendo di prendere decisioni informate sulla gestione e la manutenzione delle stesse. A tale scopo verranno aggiornati e sviluppati nuovi protocolli per l'integrazione delle informazioni fornite dai diversi sistemi di monitoraggio on-site*



Task 6.2 Tecniche innovative per il monitoraggio on-site

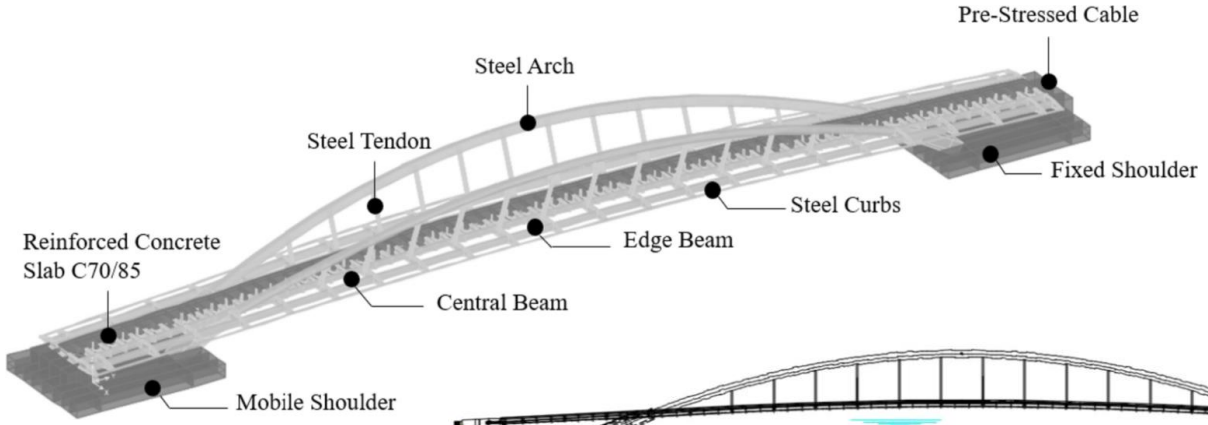
ATTIVITÀ DELLE SINGOLE UNITÀ

UNIBAS Sapienza (Bozzano)

PONTE DELLA MUSICA (ROMA):

- Progettazione monitoraggio **tramite rete GPS, a supporto della modellazione del comportamento del Ponte della Musica** (esempio di struttura «non monitorabile» tramite interferometria satellitare)

Attività svolta in collaborazione con UR 17 - Bozzano



Sistema di monitoraggio Modulare base costituito da **2 punti di misura** controllo da installare presso il POnte della Musica - Roma :

Punto di Riferimento /Monitoraggio su punto Comprensivo di :

- Sistema di aggancio alla struttura metallica
- Antenna Gps Multicostellazione
- Centrale di controllo alimentato a pannelli solari o dalla linea di illuminazione, Gps con sistema interno di memorizzazione dei dati e router di comunicazione
- Pannello solare
- 1 anno di traffico dati 10 gb mese
- 1 anno manutenzione inclusa

Termometri

Monumenti e supporti

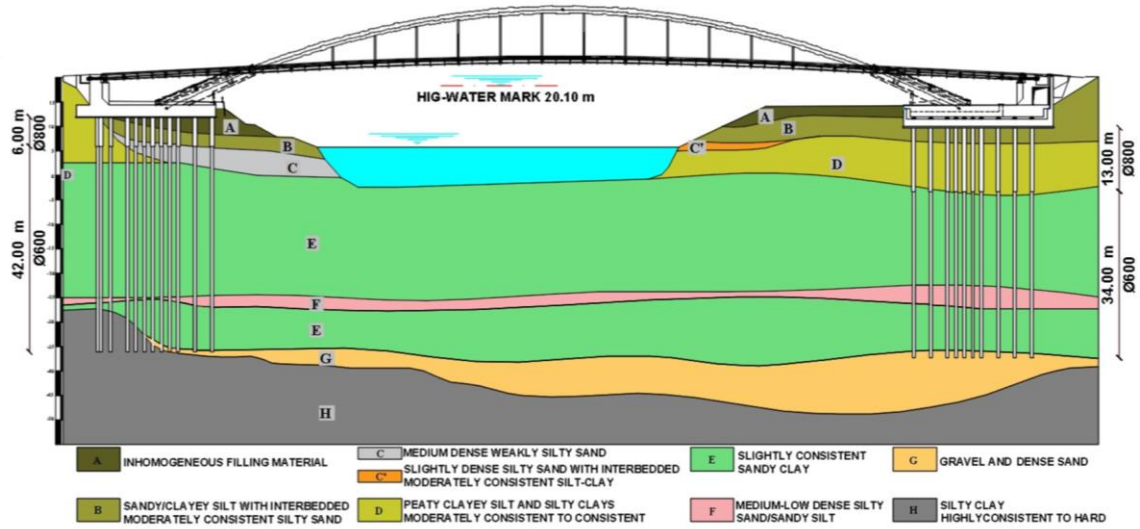
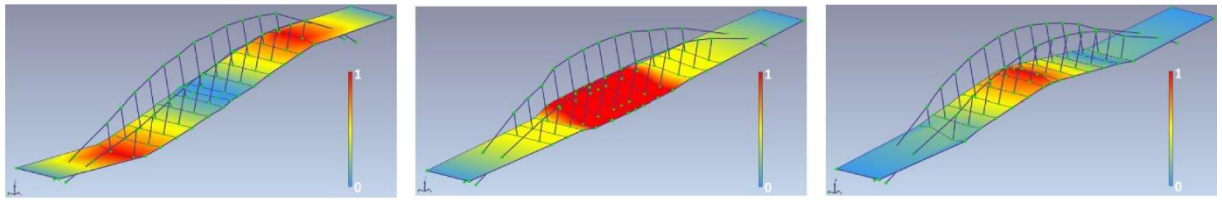
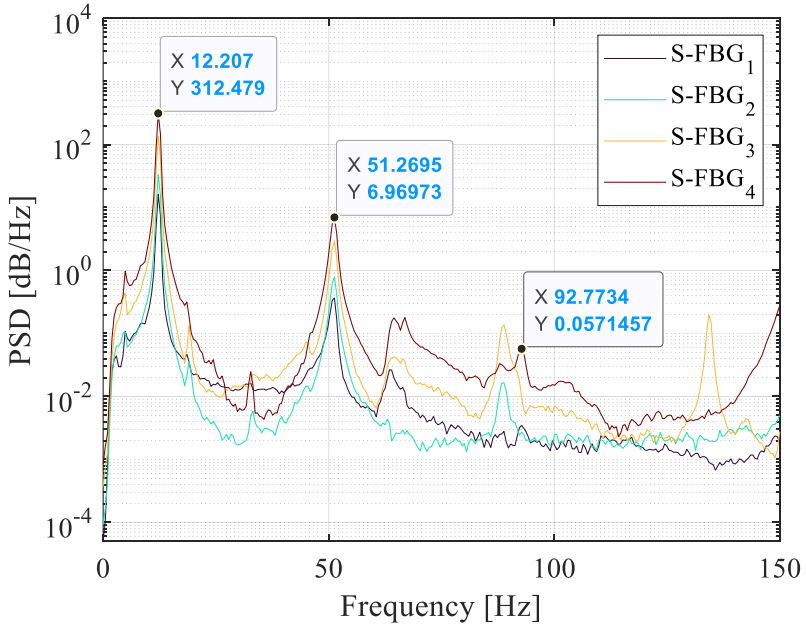


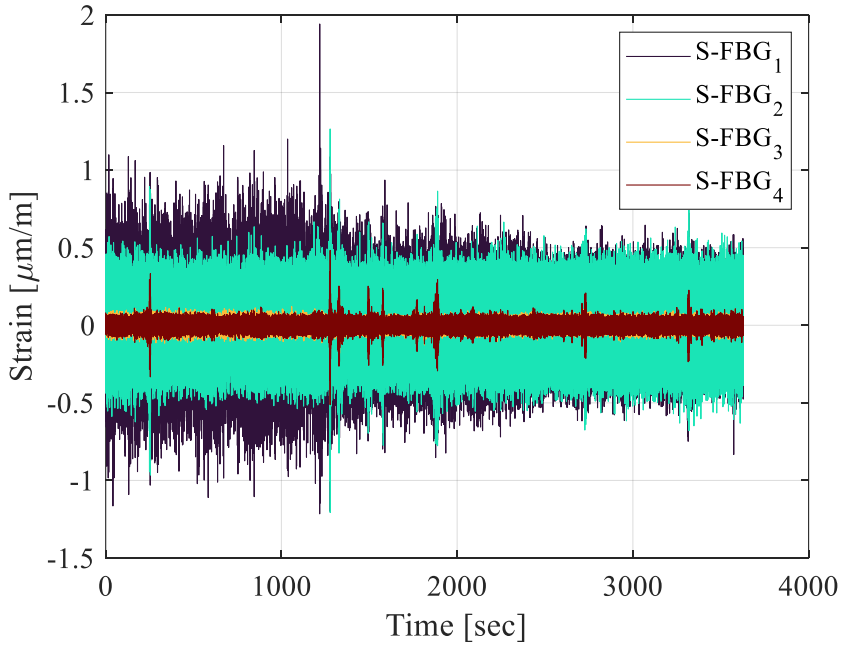
Fig. 6 Geological section of the site [29]



Task 6.2 – Monitoraggio dinamico di deformazioni tramite fibre ottiche con sensori FBG

Sperimentazione in laboratorio su travi in CA per studiare la possibilità di misurare deformazioni prodotte da vibrazioni ambientali ai fini dell'identificazione dinamica. Studiata sia applicazione diretta di sensori FBG e sia tramite amplificatori meccanici di deformazione.



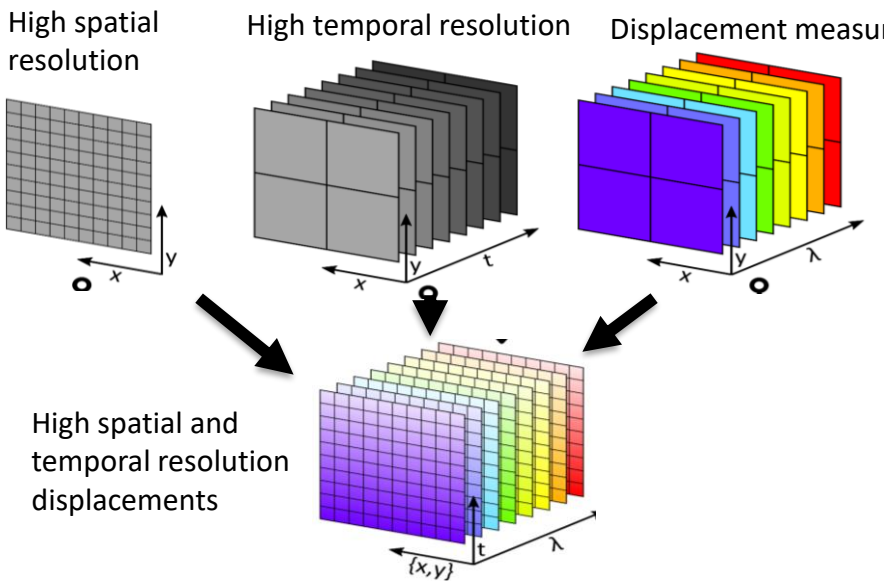


PROCEDURE DI DATA-FUSION

Obiettivo:

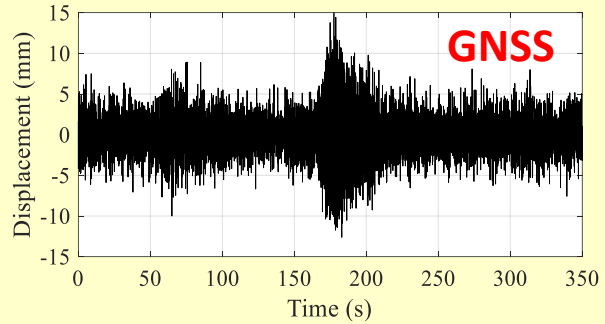
studiare, validare e proporre algoritmi o procedure per la fusione di dati provenienti da diversi sistemi di monitoraggio, con particolare interesse alla integrazione di diverse strumentazioni per il monitoraggio dinamico, utilizzando accelerazioni provenienti da sistemi MEMS con spostamenti acquisiti tramite GNSS o spostamenti ottenute da tecniche di elaborazione delle immagini.

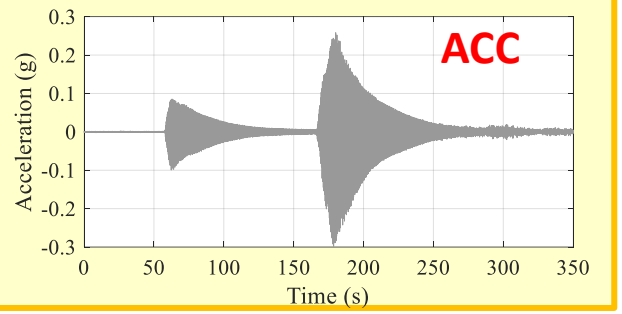
TEST IN LABORATORIO E SU STRUTURE AL VERO



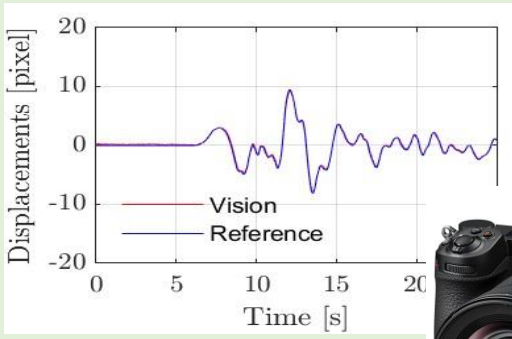
Fusione di accelerazioni provenienti da sistemi MEMS con spostamenti acquisiti tramite GNSS

Test passerella pedonale





2) Fusione di accelerazioni con spostamenti ottenute da tecniche di elaborazione delle immagini.



Test in LAB

OPTIMAL SENSOR PLACEMENT (OSP)

Studio e implementazione di metodi per l'OSP da letteratura su casi studio reali inerenti a strutture di ingegneria civile.

Metodi di OSP selezionati:

1) Effective Independence (EI)

2) Information Entropy (IE)

3) Eigenvalue Vector Product (EVP)

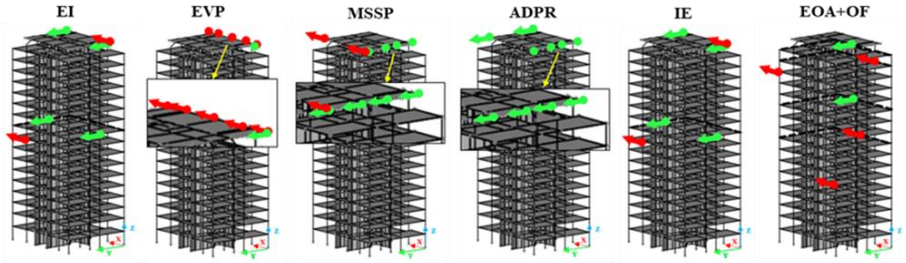
4) Mode Shape Summation Plot (MSSP)

5) Average Driving Point Residue (ADPR)

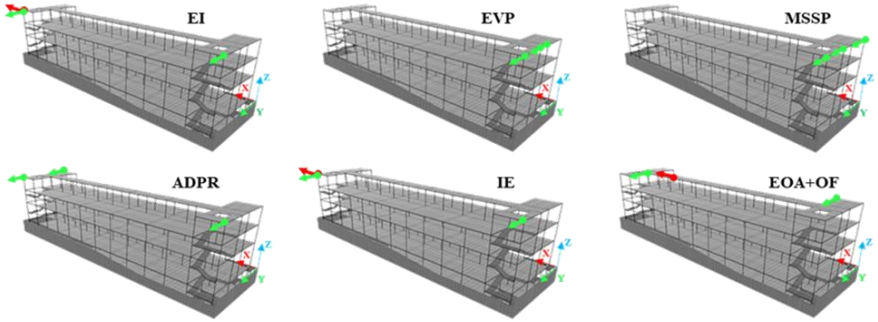
6) Minimizzazione di una Objective Function (OF) mediante Particle Swarm Optimization (PSO)

$$OF = \frac{\sum_m \sum_n (\boldsymbol{AutoMAC\_R - I})}{N}$$

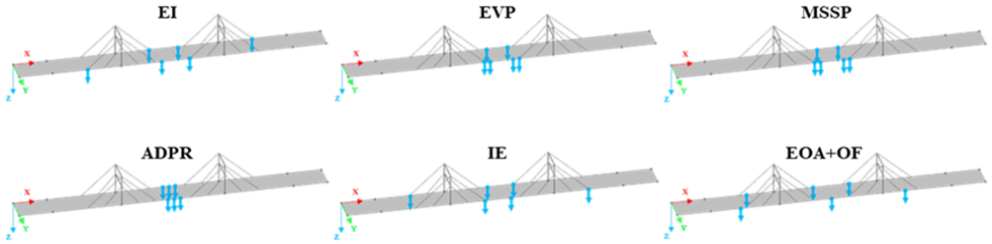
Tall Building



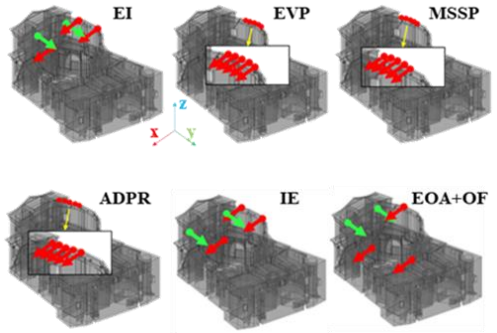
4-storey Building



Footbridge



Masonry Church



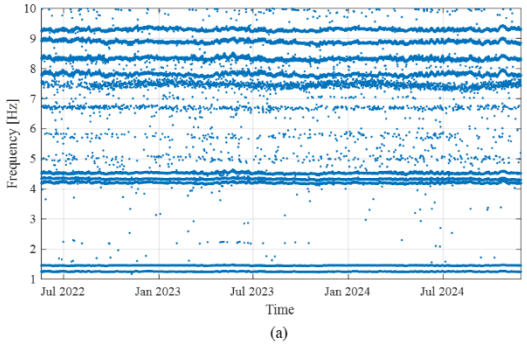
Discussione dei risultati:

- I metodi EI, IE e EOA+OF generalmente forniscono i migliori risultati (sensori ben diffusi)
- I metodi EVP, MSSP, e ADPR concentrano i sensori nelle zone di maggiori spostamenti modali (metodi energetici)
- I metodi EI e IE forniscono risultati paragonabili a quelli dell'algoritmo genetico (EOA+OF), ma in tempi di calcolo molto minori

MODAL TRACKING

Definizione di una procedura di modal tracking sviluppata a partire da studi della letteratura esistente.

Applicazione della procedura di modal tracking a 2 casi studio reali: edificio e ponte

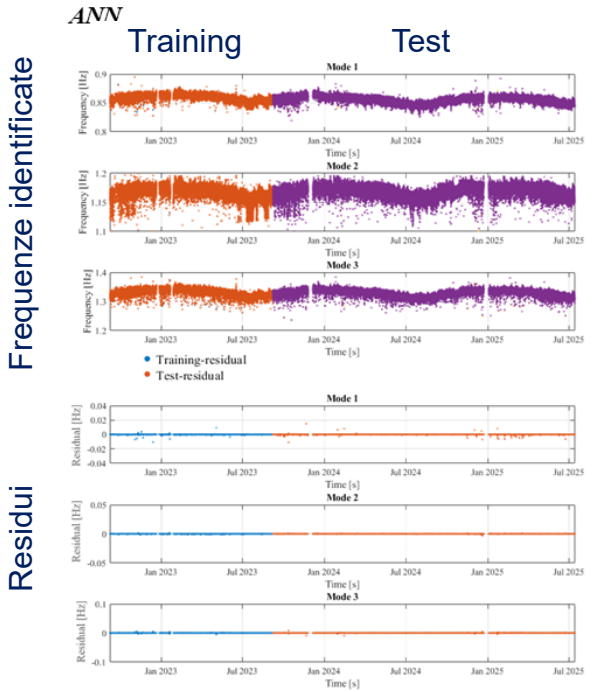


NORMALIZZAZIONE DEI RISULTATI DINAMICI

Applicazione di metodi noti per studiare l'influenza dei parametri ambientali e operativi sul comportamento dinamico delle strutture.

Metodi testati su casi studio reali:

	Lineare	Non-lineare
Input-output	Regressione lineare multivariata (MLR)	Feedforward neural network (FNN)
Output-only	Analisi delle componenti principali (PCA)	Autoassociative neural network (ANN)



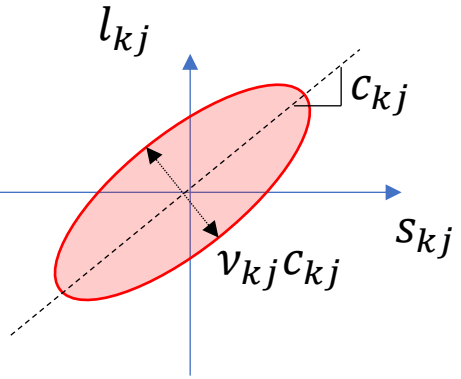
Calcolo dei residui:

$$\mathbf{R} = \mathbf{F}_{mod} - \mathbf{F}_{id}$$

$\mathbf{F}_{mod}$ Frequenze calcolate con il modello statistico

$\mathbf{F}_{id}$ Frequenze identificate sperimentalmente

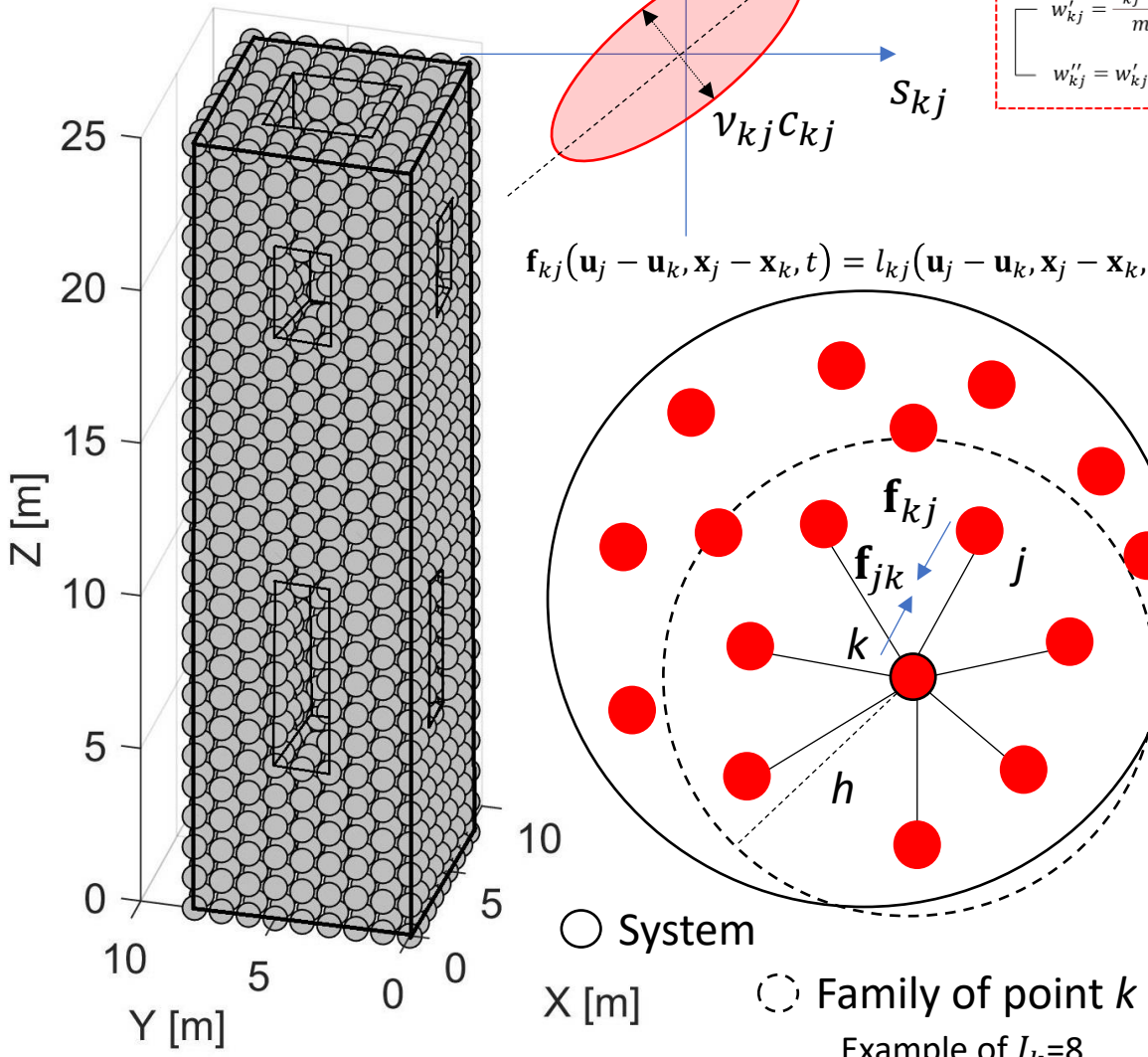
POLITO
Ceravolo

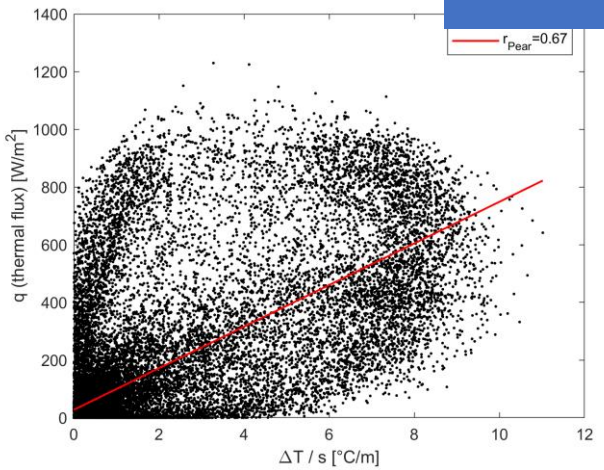


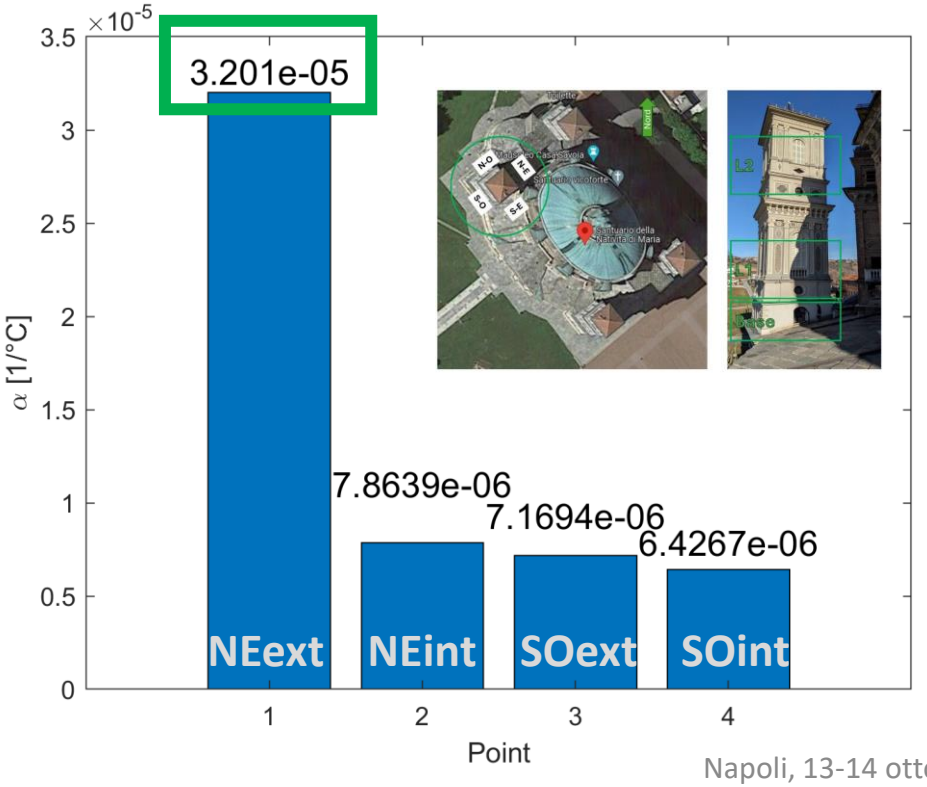
$$w'_{kj} = \frac{c_{kj} V_j V_k}{m_k}$$ Bond Extremity Acceleration (BEA)

$$w''_{kj} = w'_{kj} v_{kj}$$ Bond Extremity Velocity (BEV)

$$\mathbf{f}_{kj}(\mathbf{u}_j - \mathbf{u}_k, \mathbf{x}_j - \mathbf{x}_k, t) = l_{kj}(\mathbf{u}_j - \mathbf{u}_k, \mathbf{x}_j - \mathbf{x}_k, t) \frac{\mathbf{y}_j(t) - \mathbf{y}_k(t)}{\|\mathbf{y}_j(t) - \mathbf{y}_k(t)\|}$$

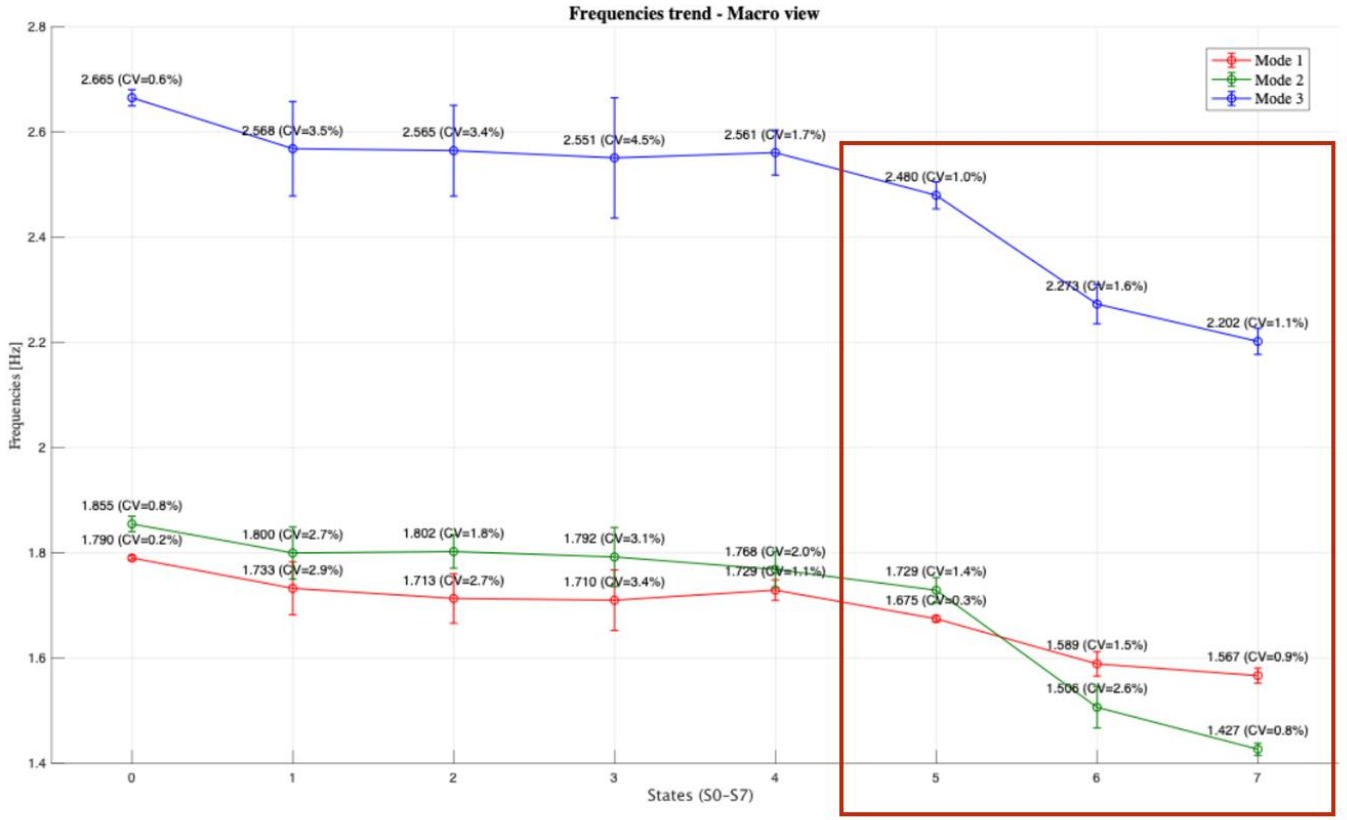






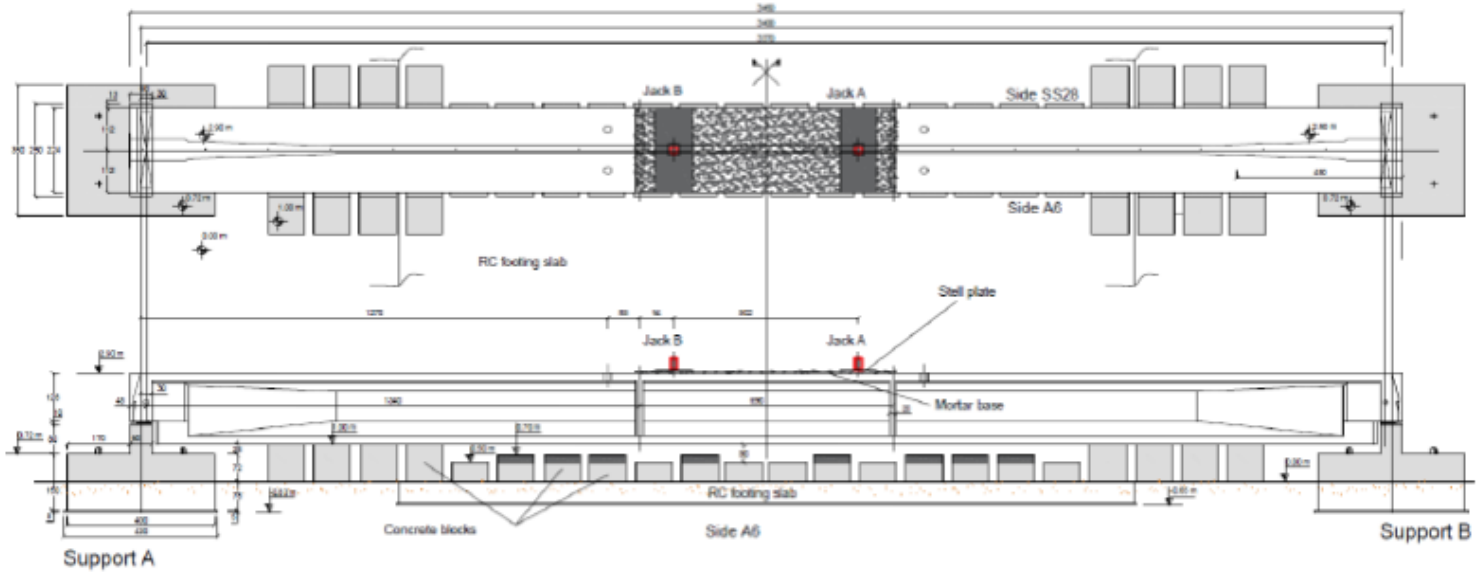
TEST SU UN EDIFICIO DI 10 PIANI IN STRUTTURA COLD-FORMED IN ACCIAIO SU TAVOLA VIBRANTE A SAN DIEGO (CALIFORNIA)

- Variazione dei parametri modali estratti mediante tecniche di OMA al progredire del danno
- Variazione dei parametri risetto alle condizioni ambientali (correlazione)
- Incertezza nei parametri modali (approccio statistico)

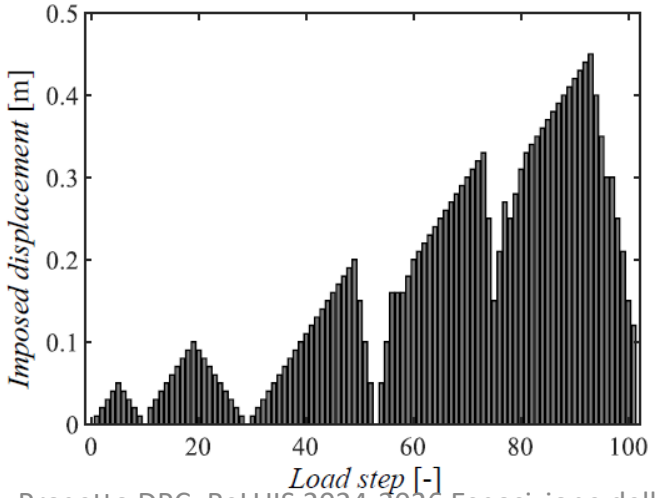


TEST SPERIMENTALE DI UNA TRAVE IN C.A.P. (SCALA 1:1)

POLITO
Castaldo

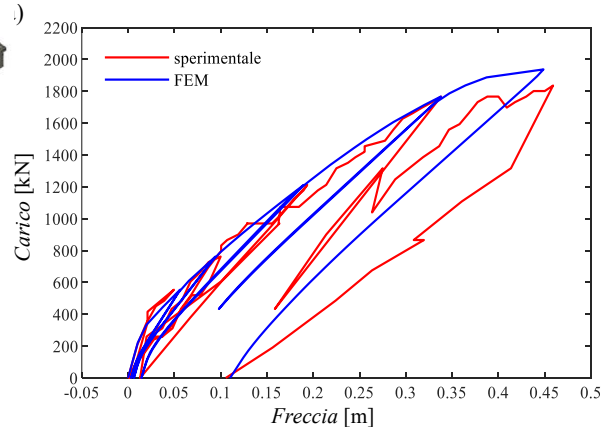


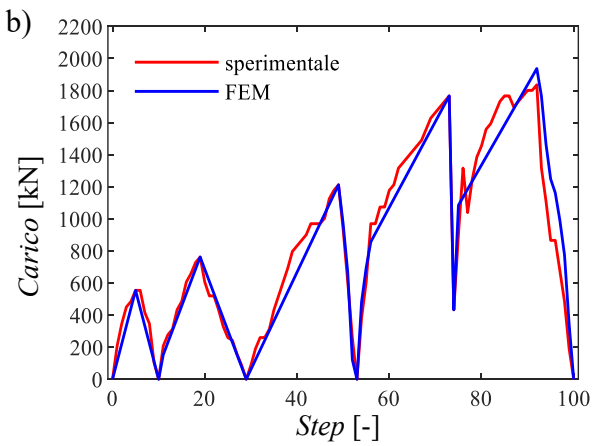
Monitoraggio in-situ



Modellazione FEM 3D

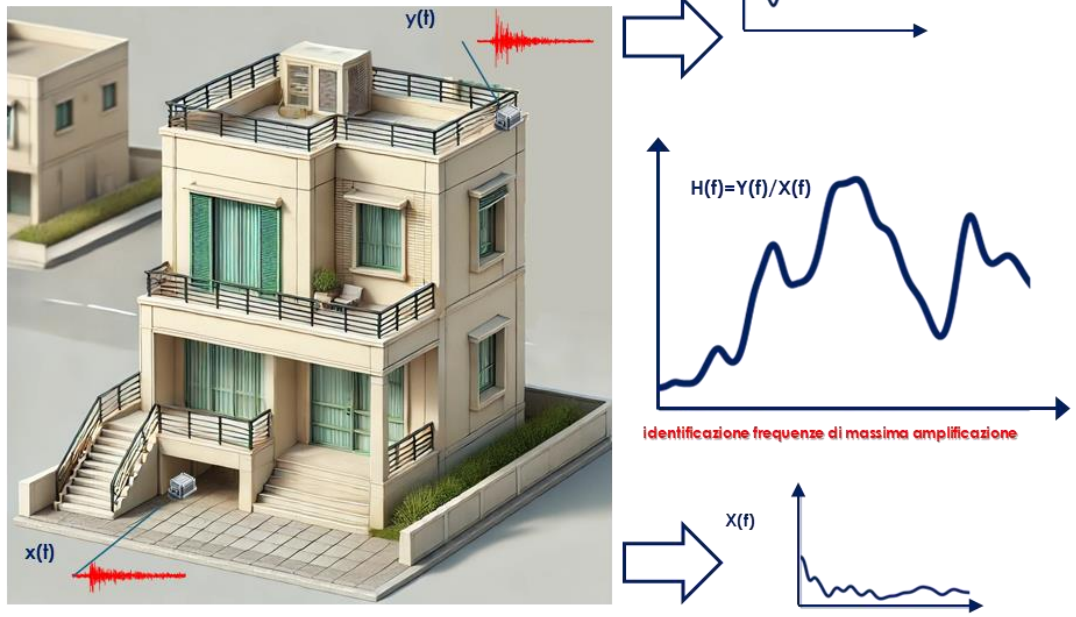
Confronto sperimentale-numerico





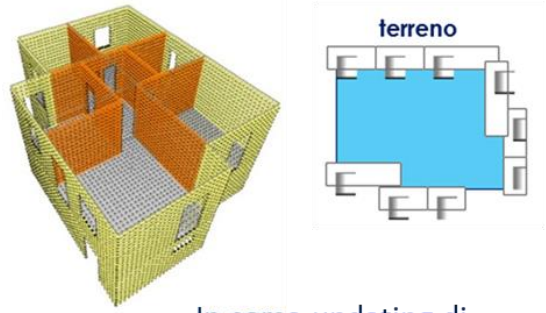
Metodologia: Sistema a basso costo con due accelerometri (base + sommità) – Task 6.2

Funzioni di trasferimento



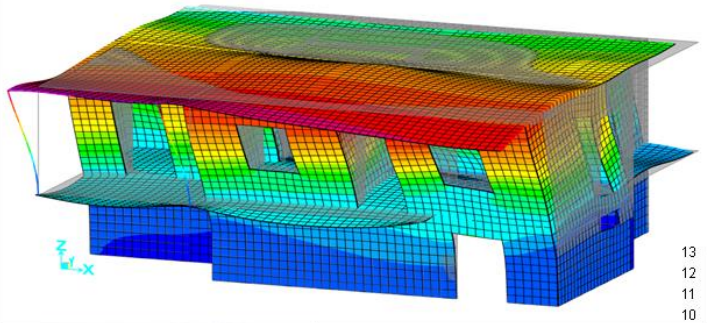
Caso studio Bacoli

Modello FEM
con partizioni interne

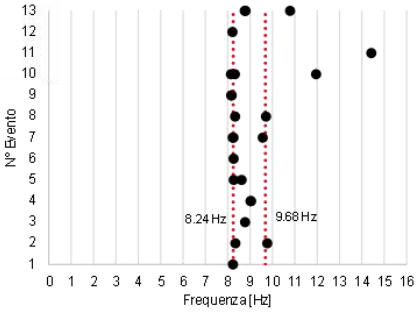


In corso updating di modello considerando l'effetto del terreno nella zona seminterrata

1° Modo: 9.42Hz



Installati accelerometri permanenti wireless



Attività di ricerca

- ✓ Funzione di trasferimento → frequenze naturali
- ✓ Analisi statistica dei dati registrati
- ✓ Su alcuni casi studio valutazione della frequenza propria con tecnica di identificazione OMA e analisi numeriche con modello FEM
- ✓ Validazione con installazione su edifici prototipo in area flegrea valutando la risposta ai frequenti eventi sismici
- ✓ Sviluppo di algoritmo di AI per calibrazione delle soglie di allarme

Bibliografia di riferimento: metodi e casi applicativi

- G. McVerry (1979). Frequency domain identification of structural models from earthquake records. PhD thesis
- Dong, Y., Tian, H., Zhang, M., & Wei, L. (2021). Long-term monitoring of dynamic characteristics of high-rise and super high-rise buildings using strong motion records. Advances in Mechanical Engineering, 13(12), 1–23.
- Wei, L., Dong, Y., & Tian, H. (2022). Prediction of structural dynamic response based on transfer function. Vibroengineering Procedia, 43, 35–38.

UNINA
Bilotta/Pecce

Applicazione procedura data driven a edifici del OSS del DPC - Task 6.4

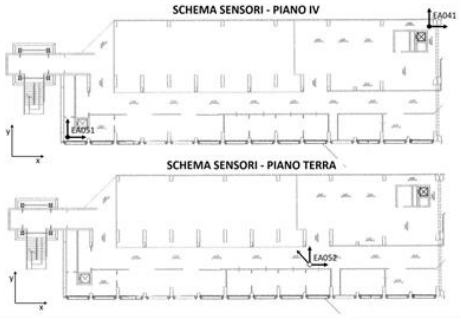
Link

WP 6.4

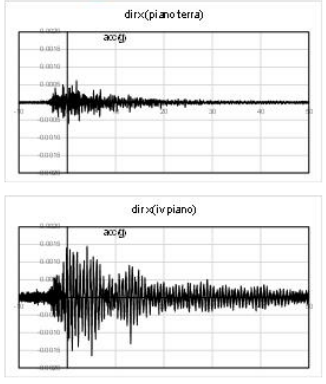
WP 6.2

Analisi dati raccolti su caso studio
Pozzuoli (Ospedale Santa Maria delle Grazie)

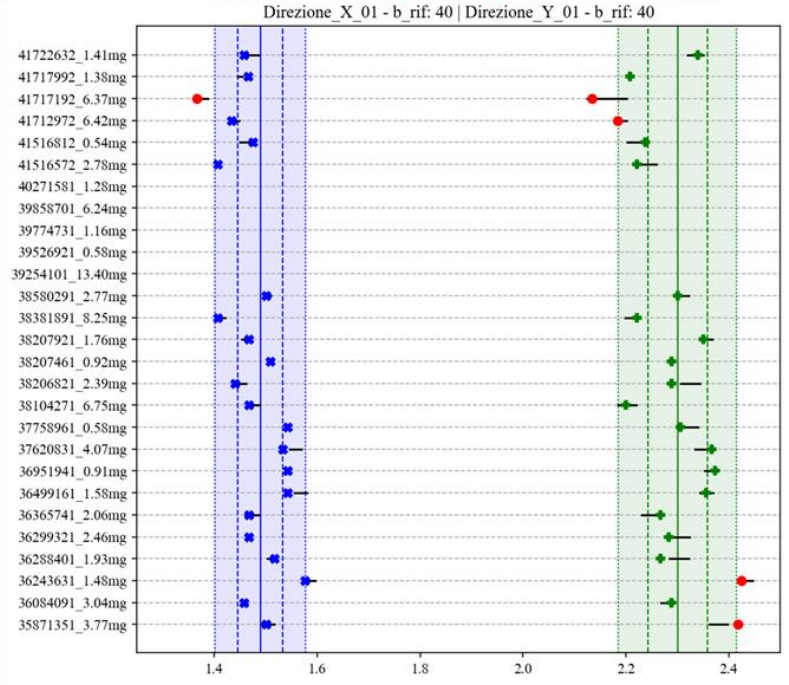
Layout sensori



Esempio: evento sismico del 3 luglio 2024



Definizione delle frequenze di riferimento



Montaggio strumenti su altri prototipi

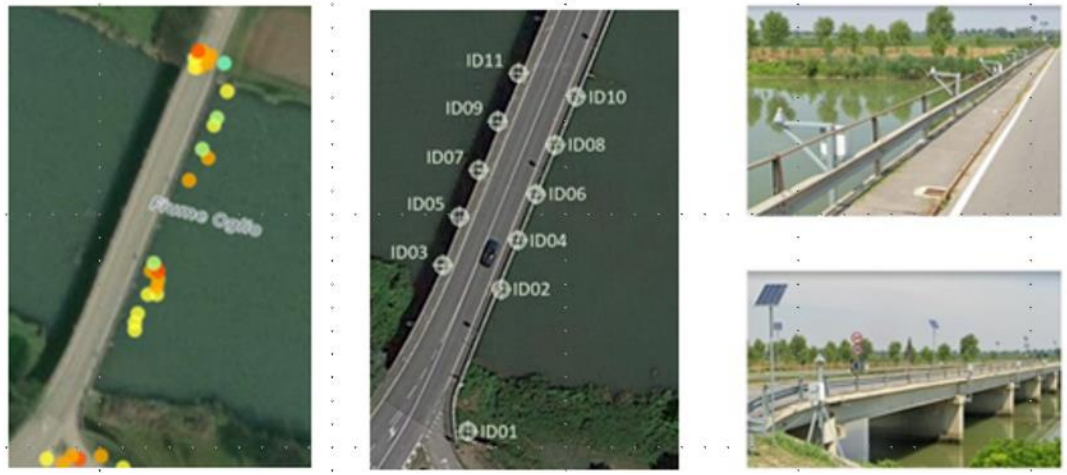
Task 6.1 Tecniche ed algoritmi per l'elaborazione di dati satellitari per il monitoraggio di strutture ed infrastrutture

Task 6.2 Tecniche innovative per il monitoraggio on-site

Task 6.3 Protocolli per l'integrazione di dati on-site e satellitari

Task 6.4 Utilizzo dei dati dell'Osservatorio Sismico delle Strutture (OSS)

Task 6.3 Protocolli per l'integrazione di dati on-site e satellitari



OBIETTIVI

Definire nuove strategie, o al miglioramento di quelle esistenti, per **integrare le informazioni ricavabili utilizzando diversi sistemi di monitoraggio on-site e da satellite**

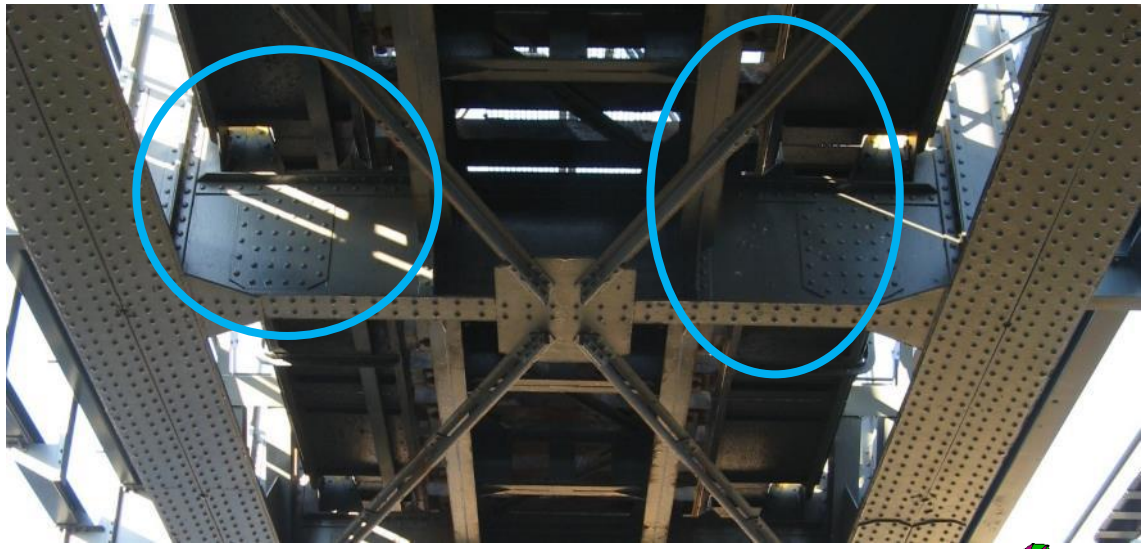
ATTIVITA' PREVISTE

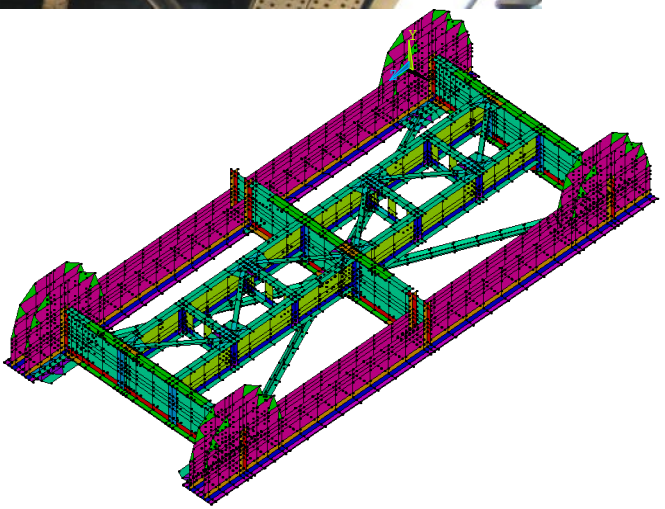
- *Individuazione di strutture benchmark su cui valutare l'affidabilità dei risultati e delle tecniche proposte. In questo contesto potranno essere utilizzati anche i dati forniti dall'OSS;*
- *Stabilire criteri per la definizione di soglie di attenzione e di allarme per i sistemi di monitoraggio strutturale particolarizzando soglie e metodologie alle diverse tipologie strutturali prese in considerazione;*

Task 6.3 Protocolli per l'integrazione di dati on-site e satellitari

ATTIVITA' PREVISTE

- *Valutazione delle incertezze epistemiche di modelli FEM a partire dall'integrazione dei dati satellitari con i dati on-site;*
- *Definizione di protocolli per integrare i dati provenienti dai sistemi di monitoraggio on-site con i dati provenienti forniti dai sistemi di monitoraggio satellitare al fine di migliorare l'accuratezza, la robustezza e l'affidabilità dei risultati.*





Obiettivo del WP

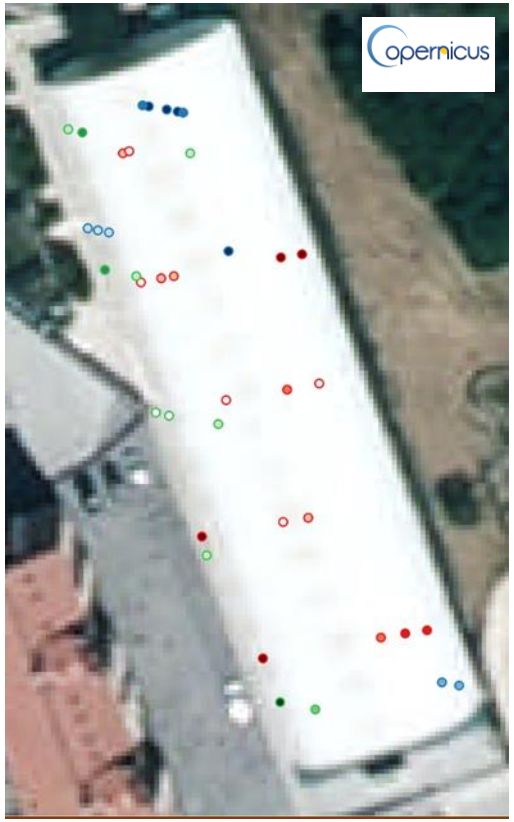
Position paper su criteri e requisiti per il rilievo e l'utilizzo di dati satellitari per il monitoraggio di strutture ed infrastrutture.

Task 6.3 Protocolli per l'integrazione di dati on-site e satellitari

ATTIVITÀ DELLE SINGOLE UNITÀ

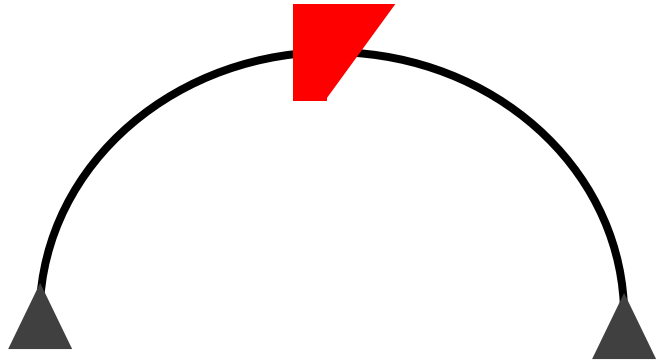
Integrazione satellitare – on site

Satellite interferometry



Vs

On-site model based

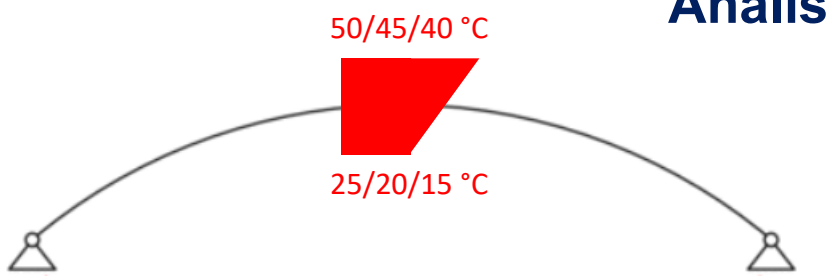


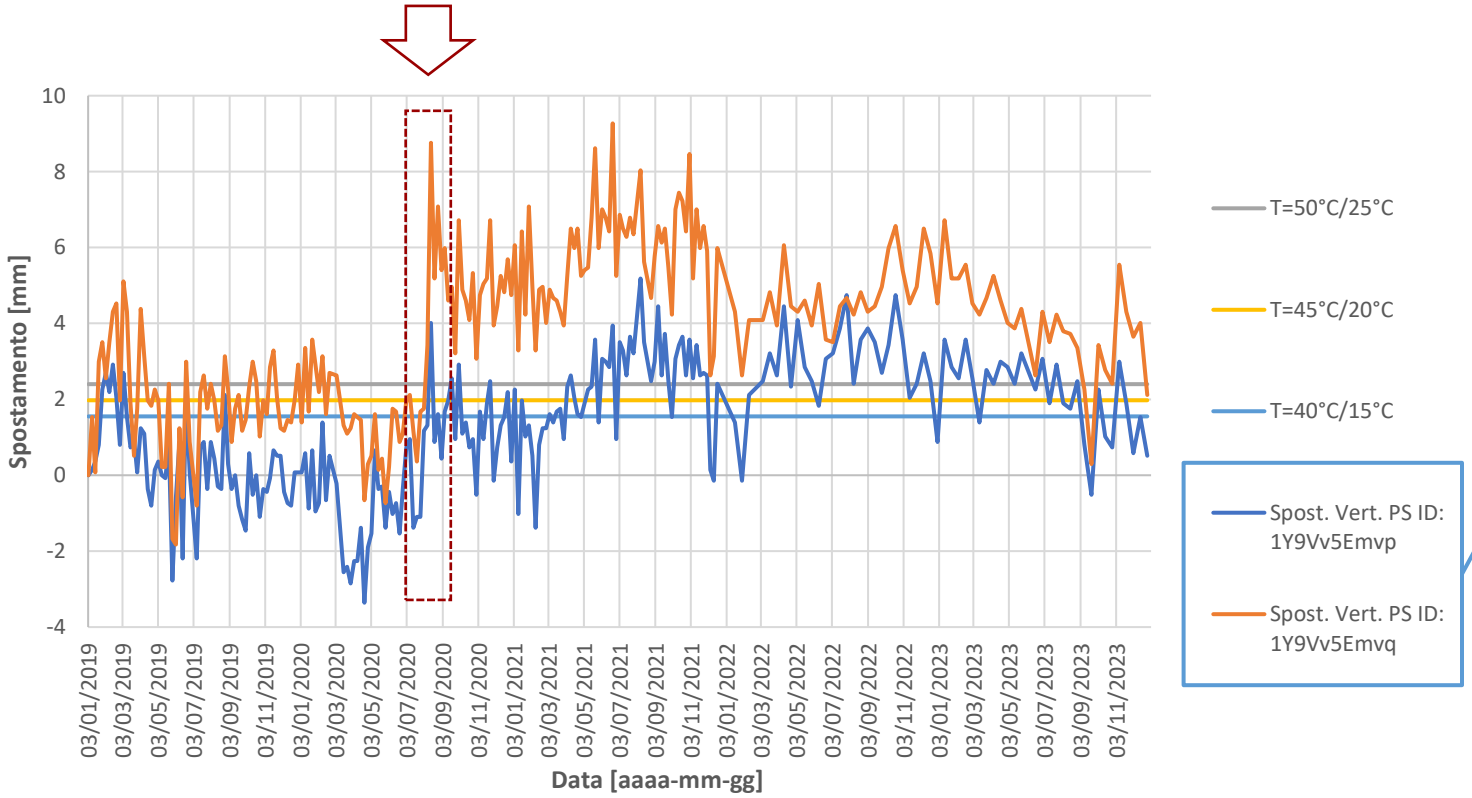
Modello
numerico e analitico

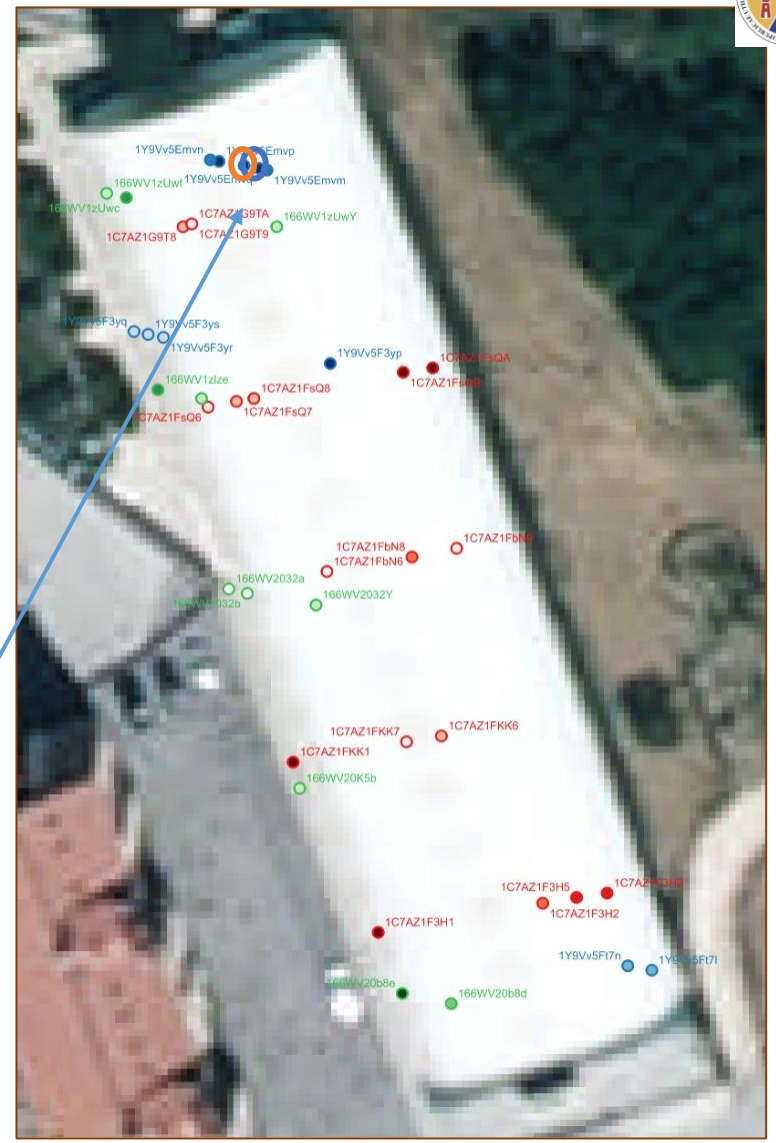
Fase preparatoria a misure on-site

Comparison of displacement measures for **model updating**

Analisi effetti termici







Task 6.3 Integrazione dei sistemi di monitoraggio – confronto dati satellitari e on site

***RETE DI MONITORAGGIO** + sensori da integrare*

Teatro romano

- n.3 centraline di acquisizione dati
- n.10 accelerometri monoassiali
- n.11 trasduttori di spostamento
- n.2 inclinometri (+1)
- n.1 termocoppia

Arche Scaligere

- n.1 centralina di acquisizione dati (+1)
- n.6 accelerometri monoassiali
- n.2 trasduttori di spostamento
- n.1 termocoppia

Torre dei Lamberti

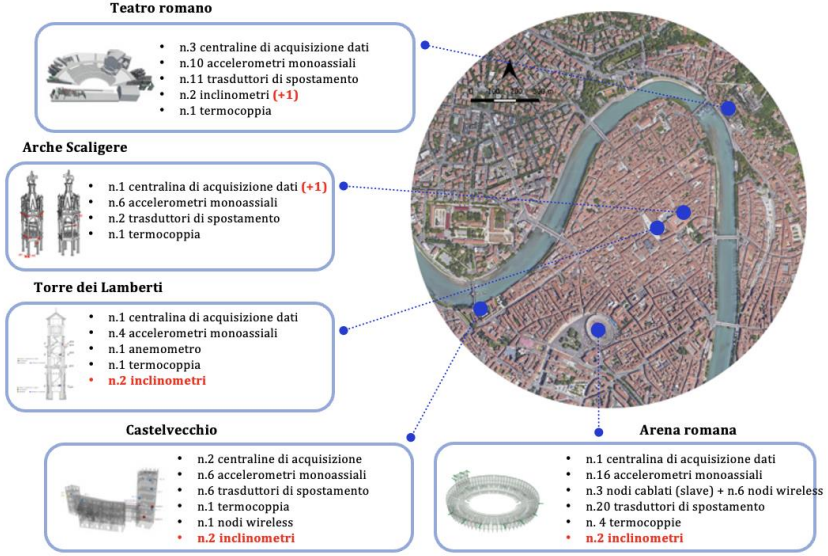
- n.1 centralina di acquisizione dati
- n.4 accelerometri monoassiali
- n.1 anemometro
- n.1 termocoppia
- n.2 inclinometri

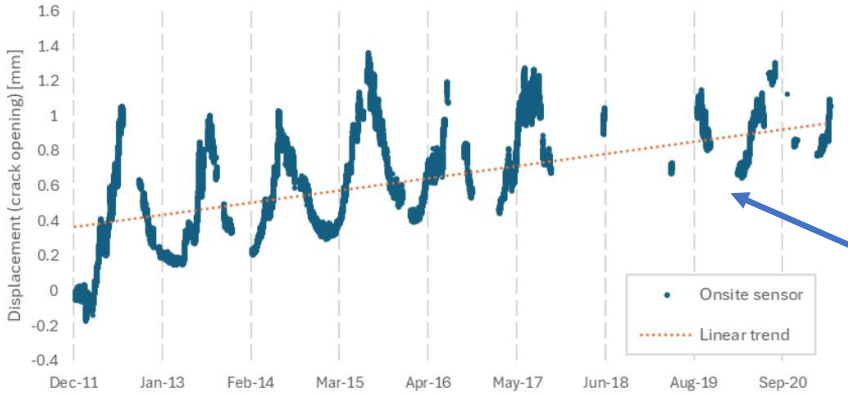
Castelvecchio

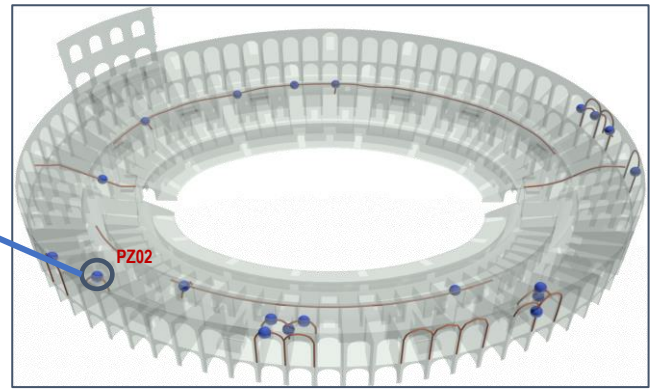
- n.2 centraline di acquisizione
- n.6 accelerometri monoassiali
- n.6 trasduttori di spostamento
- n.1 termocoppia
- n.1 nodi wireless
- n.2 inclinometri

Arena romana

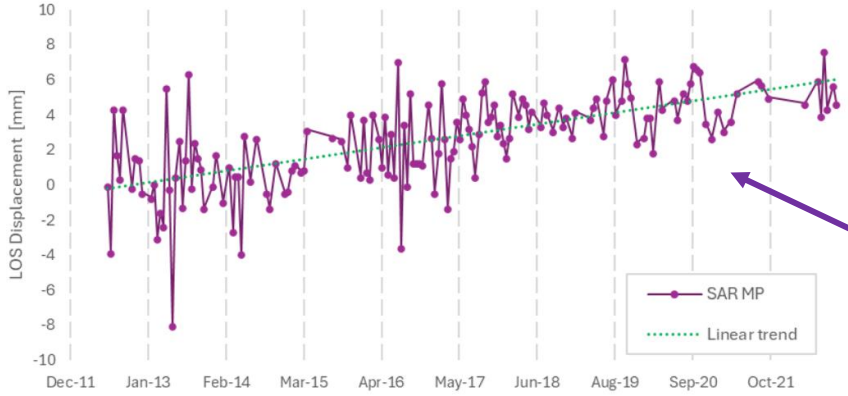
- n.1 centralina di acquisizione dati
- n.16 accelerometri monoassiali
- n.3 nodi cablati (slave) + n.6 nodi wireless
- n.20 trasduttori di spostamento
- n. 4 termocoppie
- n.2 inclinometri

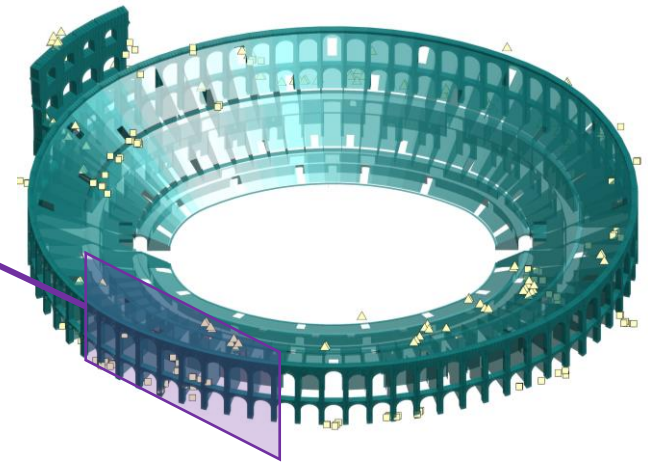






(a)



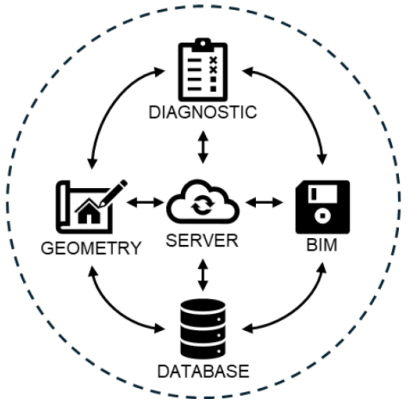


(b)

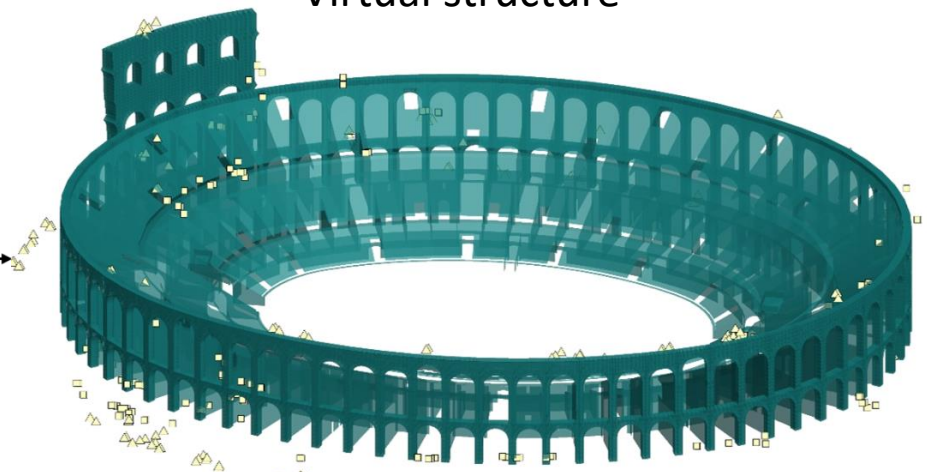
Analisi velocità in LOS

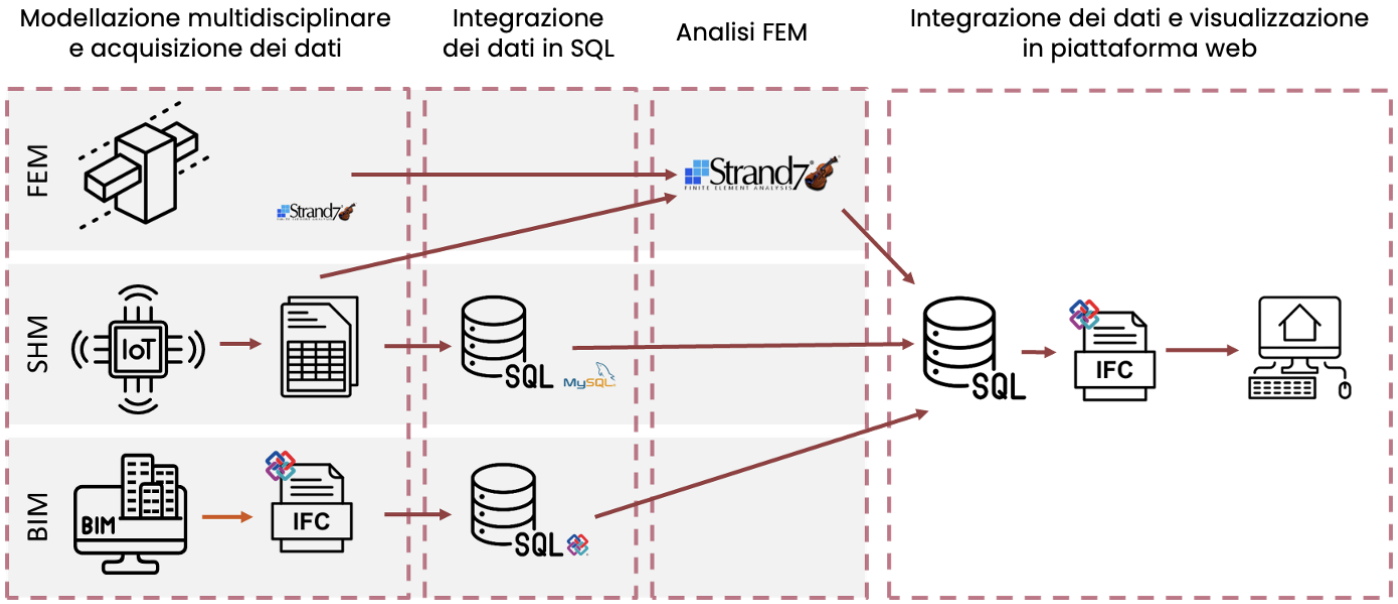
Task 6.3 Integrazione dei sistemi di monitoraggio – gestione interoperabile di modelli e monitoraggi

Real structure



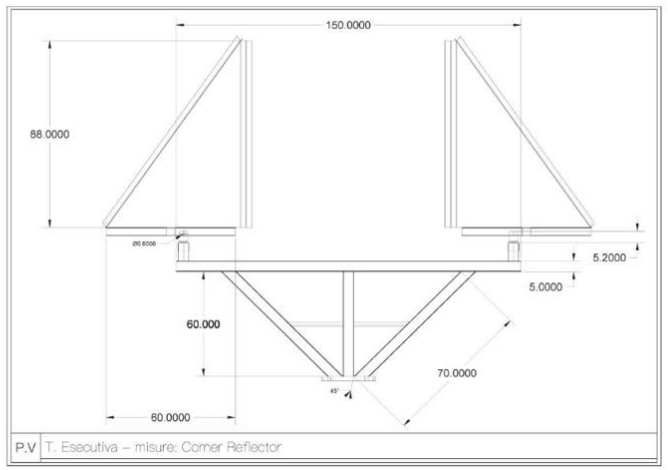
Virtual structure

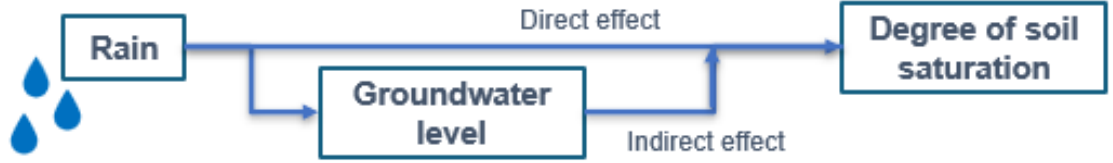


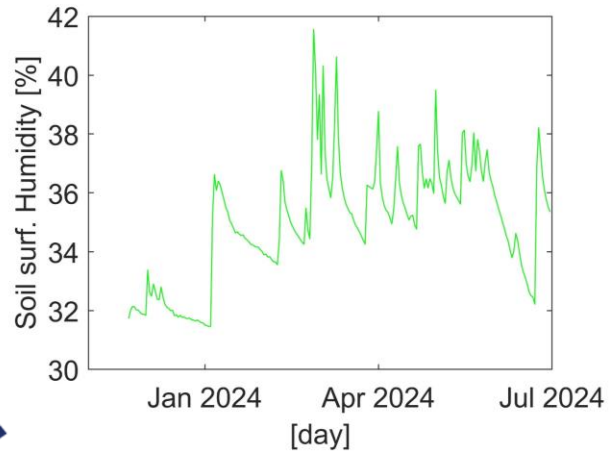


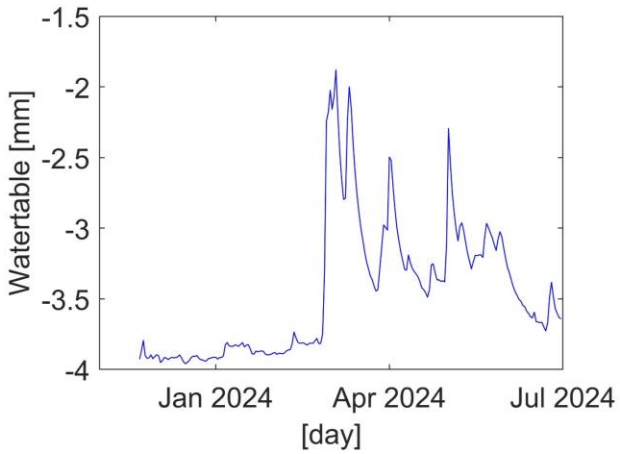
POLITO
Ceravolo

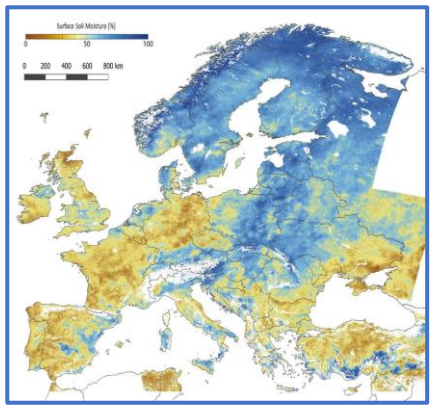
Corner reflectors for CosmoSkyMed e Sentinel-1

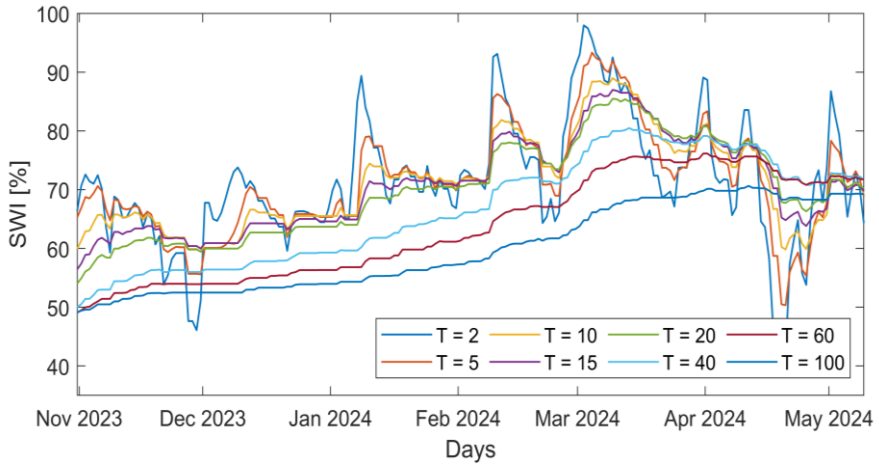








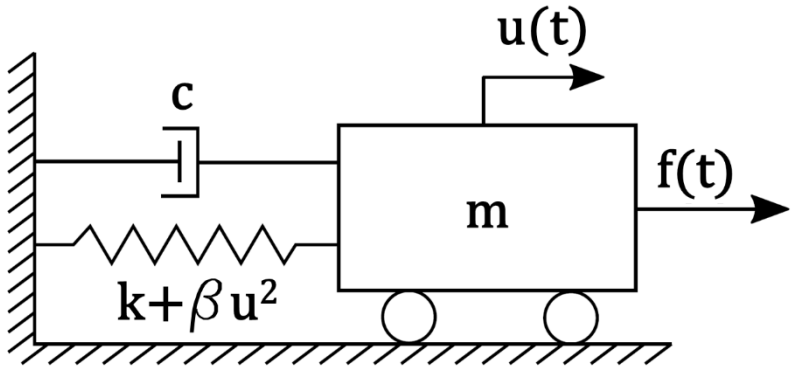




Soil Water Index (SWI)

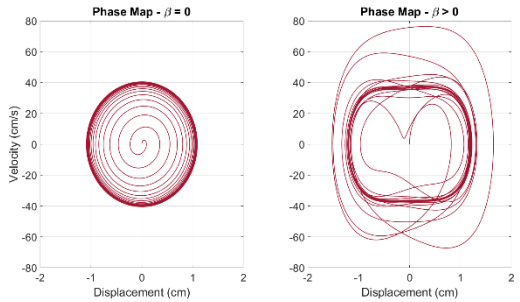
Tecniche per l'analisi, l'integrazione dei dati vibrazionali e la definizione di soglie di danno anche attraverso l'utilizzo di modelli basati sul comportamento dinamico caotico e analisi frattale

Modello Matematico di Riferimento



Equazione di DUFFING

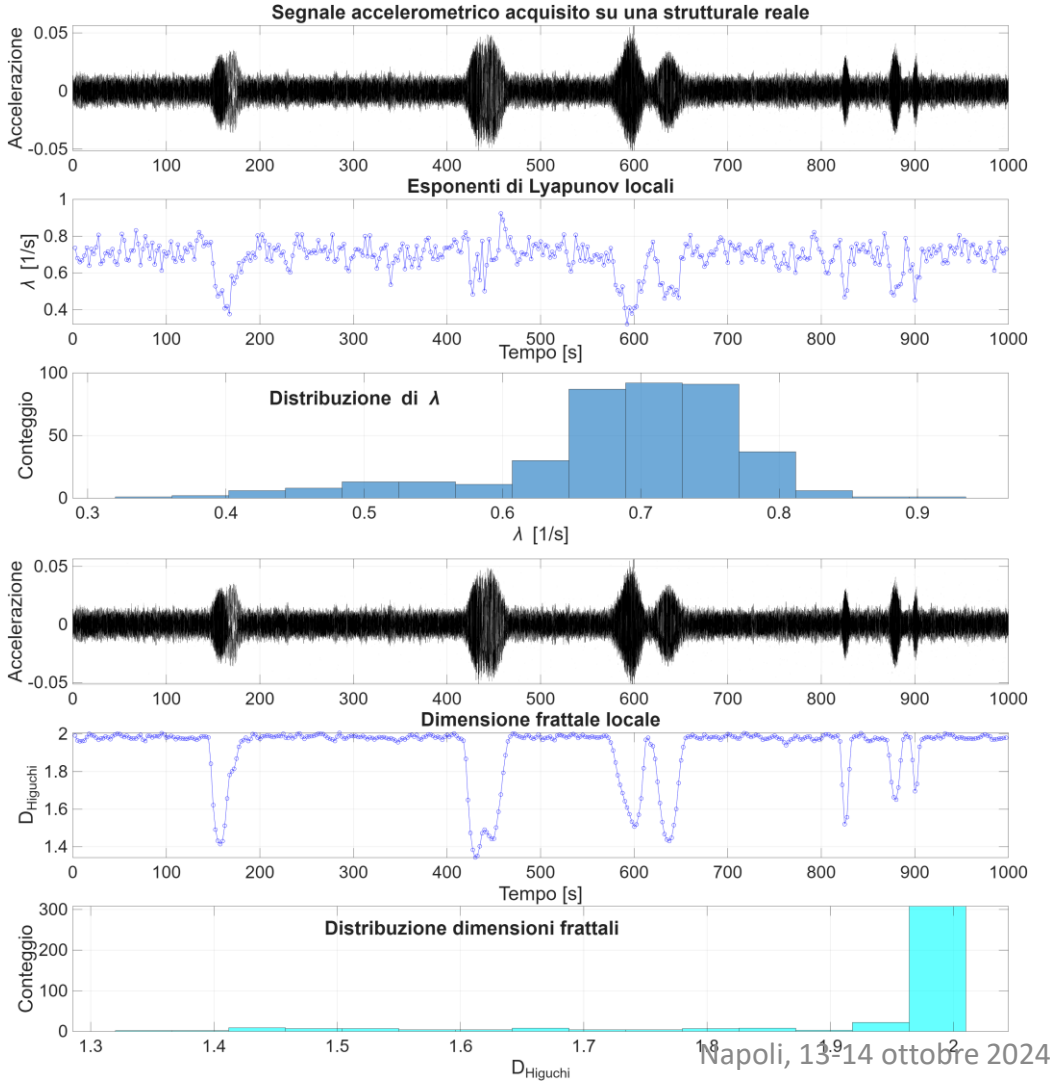
$$m\cdot\ddot{u}(t)+c\cdot\dot{u}(t)+k\cdot u(t)+\beta\cdot u(t)^3=f(t)$$



Applicazioni a Edificio Reale durante Evento Sismico

Variazione Esponenti di Ljapunov in funzione dell'intensità

Variazione Dimensione Frattale di Higuchi in funzione dell'intensità



Task 6.1 Tecniche ed algoritmi per l'elaborazione di dati satellitari per il monitoraggio di strutture ed infrastrutture

Task 6.2 Tecniche innovative per il monitoraggio on-site

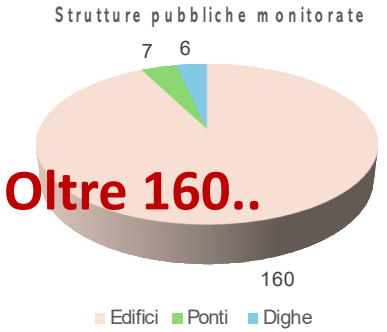
Task 6.3 Protocolli per l'integrazione di dati on-site e satellitari

Task 6.4 Utilizzo dei dati dell'Osservatorio Sismico delle Strutture (OSS)

Task 6.4 Utilizzo dei dati dell'Osservatorio Sismico delle Strutture (OSS)

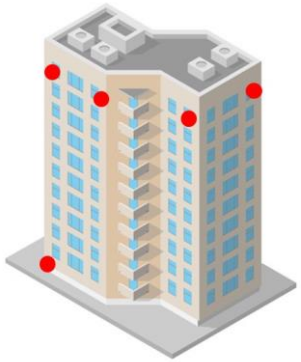
OBIETTIVI

1. Progettazione e prototipazione di un **database interrogabile che possa essere reso disponibile alla comunità scientifica in futuro** di dati sintetici riferiti a tutte le strutture monitorate dall'OSS, che in futuro possa essere impiegato anche per elaborazioni statistiche al fine di evidenziare eventuali trend ricorrenti e stabilire correlazioni tra parametri di risposta strutturale e di input sismico



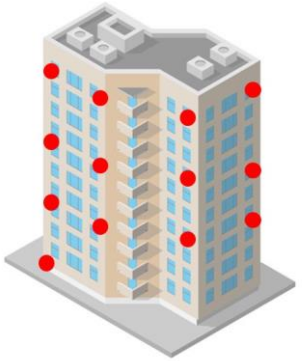
Sistema semplificato

Sensori solo in **sommità** edificio
+ triassiale alla base

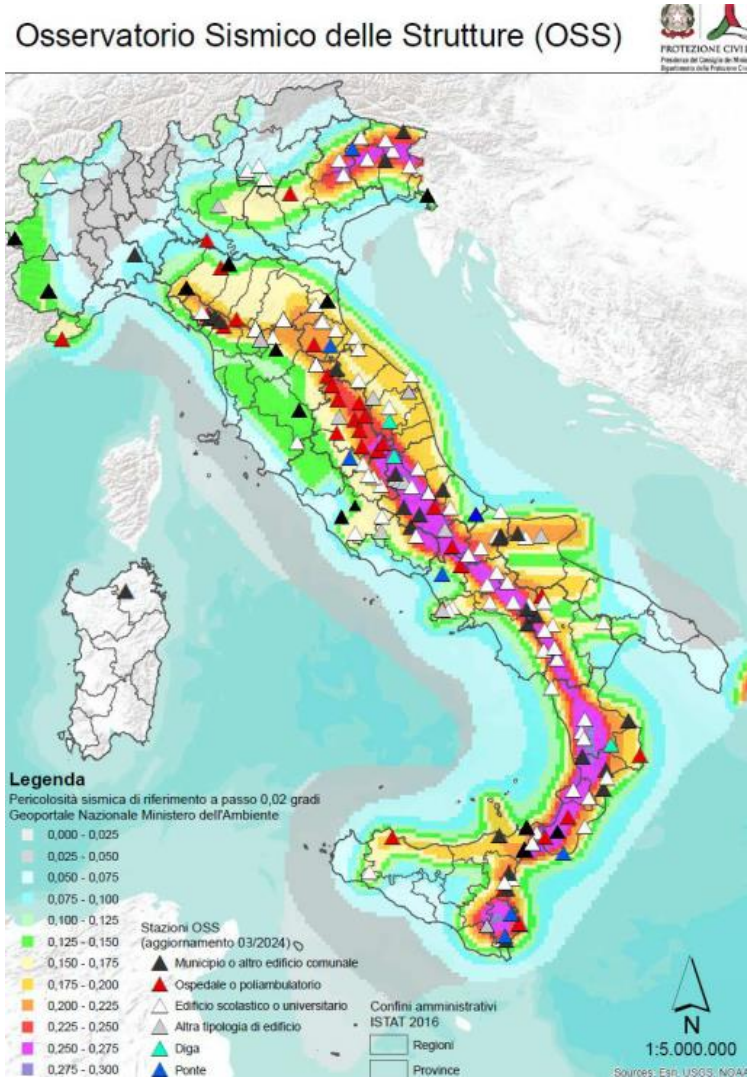


Sistema esteso

Sensori su **tutti i piani** edificio
+ triassiale alla base



SISTEMA **TRIGGER- BASED** (TUTTE LE STRUTTURE) + SPERIMENTAZIONE AVVIATA DAL 2022 PER **ACQUISIZIONE A BASE SUB-GIORNALIERA** (SU SOTTOINSIEME – nel nuovo triennio già avviato su ulteriori strutture)



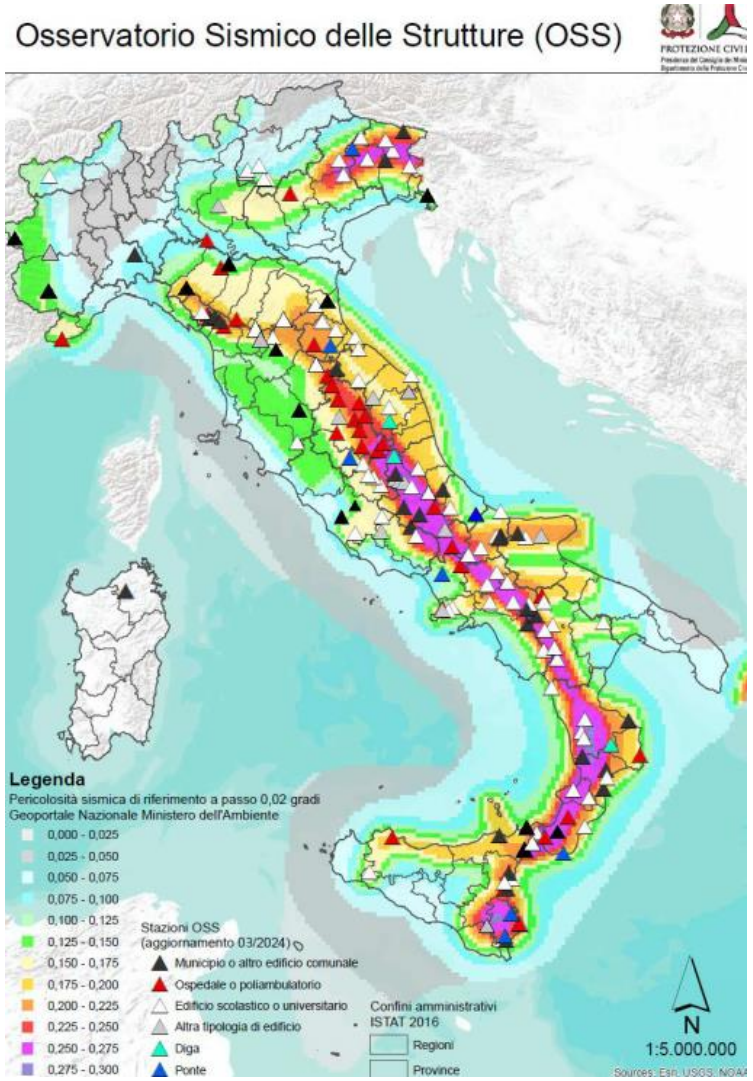
Task 6.4 Utilizzo dei dati dell'Osservatorio Sismico delle Strutture (OSS)

OBIETTIVI

1. Progettazione e prototipazione di un **database interrogabile che possa essere reso disponibile alla comunità scientifica in futuro** di dati sintetici riferiti a tutte le strutture monitorate dall'OSS, che in futuro possa essere impiegato anche per elaborazioni statistiche al fine di evidenziare eventuali trend ricorrenti e stabilire correlazioni tra parametri di risposta strutturale e di input sismico

ATTIVITA' PREVISTE

- *Ricognizione e «verifica» dati disponibili*
- *Definizione dei dati/variabili da fare confluire nel database*
- *Definizione di protocolli interpretativi dei dati per potere riversare in futuro i risultati S²HM nel database*
- *Metodologia condivisa fra le UR e con DPC-OSS*
- *Attività data-driven*
- *Prototipazione del database esteso a TUTTE le strutture monitorate*



Task 6.4 - Utilizzo dei dati dell'Osservatorio Sismico delle Strutture (OSS)

OBIETTIVI

2. Verifica e affinamento dei **modelli interpretativi per l'analisi del danno (sismico).**

ATTIVITA' PREVISTE

- *selezione di alcune strutture dell'OSS (edifici in c.a. e in muratura e qualche ponte) : per alcune di queste le UR si impegnano a fare integrazioni sulla documentazione disponibile anche tramite sopralluoghi da restituire al DPC-OSS perché possa arricchire il «database conoscitivo» sulle costruzioni monitorate*
- *sviluppo, test e confronto di tecniche, sia data-based che model-based*
- *sviluppo e calibrazione di modelli numerici su singoli casi studio per esecuzione di ANALISI DI DETTAGLIO finalizzate all'impiego dei dati del monitoraggio per lo sviluppo di procedure interpretative del danno sismico*

I DATI DELL'OSS SONO UTILI PER MOLTEPLICI SCOPI DEL WP6, quindi anche utili per testare e confrontare tecniche sviluppate in altri tasks e valutare la loro integrazione – ove possibile – con i dati satellitari

Task 6.4 - Utilizzo dei dati dell'Osservatorio Sismico delle Strutture (OSS)

ATTIVITÀ DELLE SINGOLE UNITÀ

1. **Prototipizzazione di un database interrogabile** di dati strutturali relativi alla risposta sismica delle strutture monitorate dall'OSS, da impiegare in futuro per elaborazioni statistiche;

Attività previste nel triennio

- Ricognizione e «verifica» dati disponibili (conclusa)
- Definizione dei dati/variabili da fare confluire nel database (conclusa)
- Definizione di protocolli interpretativi dei dati per poter riversare in futuri i risultati S²HM nel database
- Metodologia condivisa fra le UR e con DPC-OSS
- Attività data-driven
- Prototipazione del database esteso a TUTTE le strutture monitorate

Ricognizione e Verifica Dati Disponibili

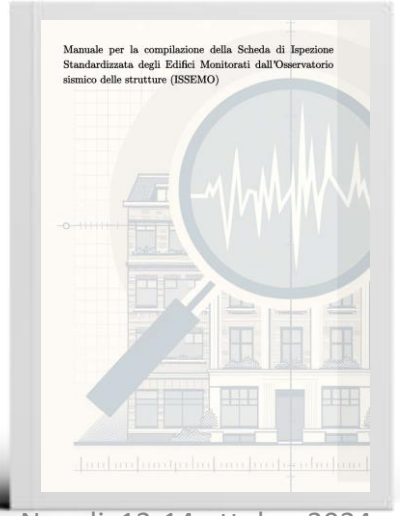
182 Strutture
160 Edifici
9 Strutture Monumentali
7 Ponti
6 Dighe

	50 Edifici in Muratura	98 Edifici in C.A.
planimetria disponibile	62%	63%
relazione tecnica sui rilievi disponibile	64%	64%
assenza completa di documentazione	16%	3%
Sistema monitoraggio completo	96%	81%
Sistema monitoraggio semplificato	4%	19%

SCHEDA DI RACCOLTA DATI STANDARDIZZATA PER DEFINIRE BASE COMUNE PER TUTTI GLI EDIFICI

Manuale per la compilazione della Scheda di Ispezione Standardizzata degli Edifici Monitorati dell'Osservatorio sismico delle strutture (ISSEMO)

- ❑ Dati Generali [DG]
- ❑ Dati Dimensionali [DD]
- ❑ Morfologia Strutturale [MS]
- ❑ Sistema Strutturale [SS]
- ❑ Componenti Strutturali: Struttura Portante Verticale [CSV]
- ❑ Componenti Strutturali: Struttura Portante Orizzontale [CSO]
- ❑ Componenti Strutturali: Copertura [CSC]
- ❑ Dettagli Strutturali e Collegamenti tra Componenti Strutturali [DSC]
- ❑ Componenti Strutturali: Fondazioni [CSF]
- ❑ Componenti Non Strutturali e loro Collegamenti alla Struttura [CNS]



2. Sviluppo e affinamento di modelli interpretativi del danno sismico per supportare processi decisionali sui giudizi di agibilità di strutture monitorate

Modello meccanico-analitico «DBV – Masonry»
Definizione soglie roof drift+ Analisi dinamiche non lineari su SDOF

&

Modelli 3D a telaio equivalente (Tremuri)
Analisi dinamiche non lineari su modelli calibrati come strumento di validazione

Campione dello studio

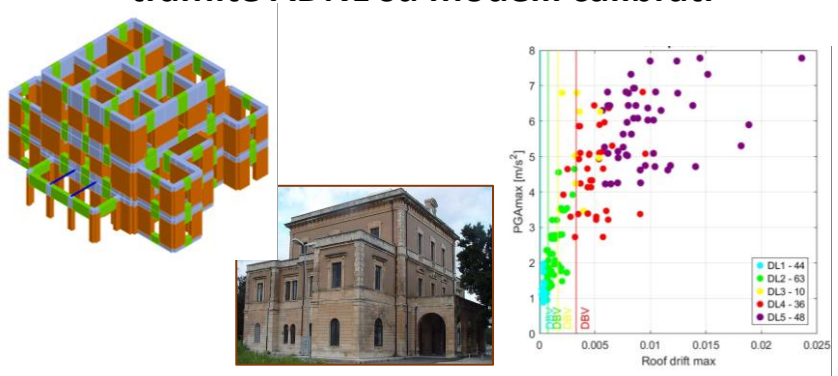
18 edifici in muratura

N	Codice OSS	Nome Struttura	Ubicazione nel territorio
1	BC061	Liceo Classico e Scientifico "Paolo Diacono"	
2	BC053	Tribunale Fabriano	
3	67MBT	Municipio di Borgo Val di Taro - Palazzo Manara	
4	BC044	Direzione Didattica di Cittaducale	
5	SSN12	Palazzina Direzionale ex Ospedale neuropsichiatrico	
6	BC068	Palazzo Comunale	
7	BC051	Scuola Elementare "Campus"	
8	SSN17	Istituto Tecnico L. Einaudi	
9	SSN15	Scuola elementare "Fava"	
10	20IPI	Istituto F.Monigliano	
11	BC039	Municipio di Pizzoli	
12	BC050	Municipio di Borgo Pace	
13	BC054	Centro Scolastico Forni di Sopra	
14	11SAZ	Scuola comunale Elettore di Castell'Azzara	
15	22PPO	Poliambulatorio di Pievepelago	
16	BC064	Scuola media "A. De Gasperi"	
17	BC035	Municipio di Gioia dei Marsi	
18	BC057	Municipio di San Daniele del Friuli	

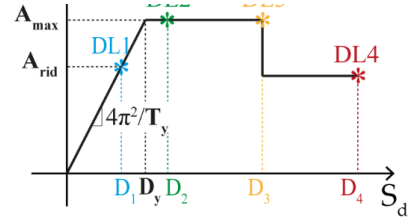
Calcolo soglie roof-drift customizzate

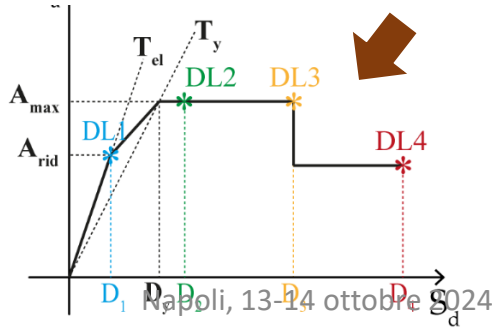
N	Codice OSS	Roofdrift DL1		Roofdrift DL2		Roofdrift DL3		Roofdrift DL4	
		X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
1	BC061	0,015%	0,012%	0,063%	0,053%	0,193%	0,192%	0,367%	0,365%
2	BC053	0,021%	0,020%	0,161%	0,151%	0,202%	0,192%	0,388%	0,368%
3	67MBT	0,025%	0,026%	0,040%	0,040%	0,141%	0,142%	0,258%	0,258%
4	BC044	0,022%	0,027%	0,138%	0,147%	0,222%	0,215%	0,431%	0,415%

Avviata validazione soglie anche tramite ADNL su modelli calibrati



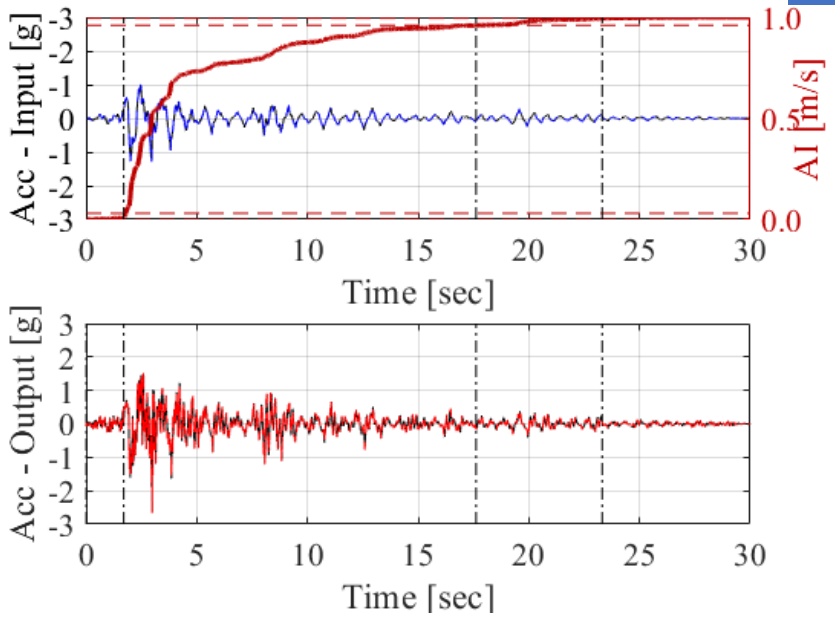
Affinamento del modello DBV-Masonry nella stima del periodo elastico grazie a dati monitoraggio

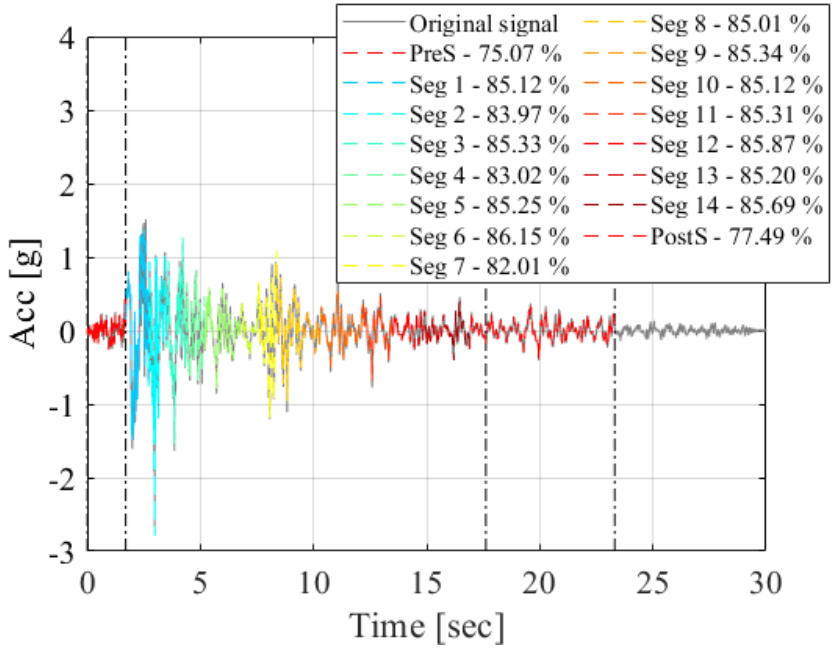


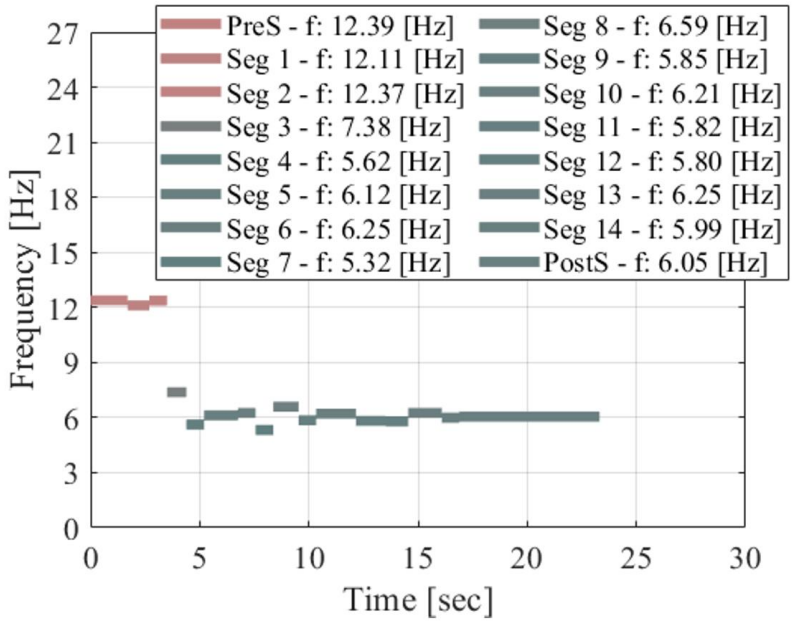


Task 6.4 – Utilizzo dati Osservatorio Sismico delle Strutture

Studiati modelli autoregressivi a media mobile con fattore esogeno per identificare il danneggiamento degli edifici dell'OSS nel corso degli eventi sismici. Dato il comportamento non lineare degli edifici in caso di danneggiamento, i modelli sono applicati all'interno di una **procedura di segmentazione** che suddivide automaticamente le registrazioni accelerometriche in porzioni.







70MCT Municipio di Cesana Torinese PIEMONTE TORINO CESANA TORINESE, Struttura in muratura

1

Progettazione e prototipazione di un **database interrogabile che possa essere reso disponibile alla comunità scientifica in futuro** di dati sintetici riferiti a tutte le strutture monitorate dall'OSS, che in futuro possa essere impiegato anche per elaborazioni statistiche al fine di evidenziare eventuali trend ricorrenti e stabilire correlazioni tra parametri di risposta strutturale e di input sismico

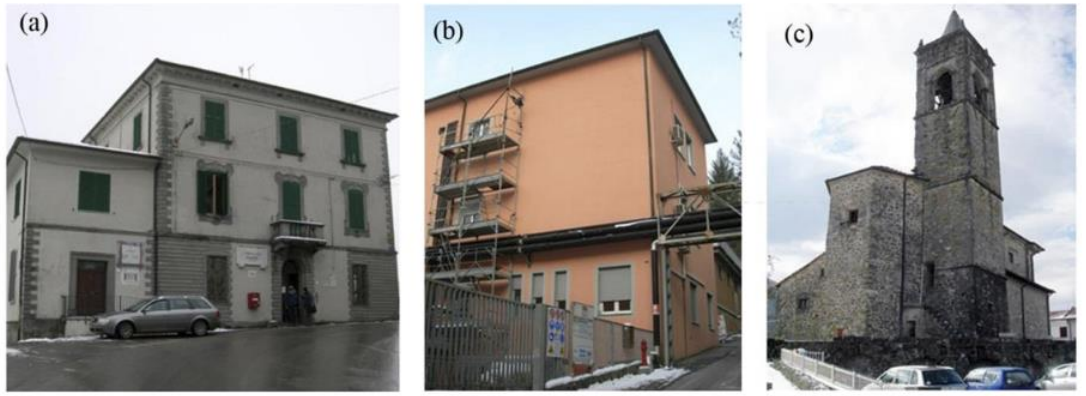
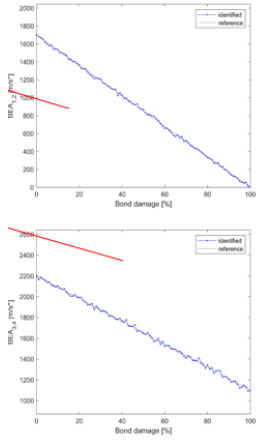


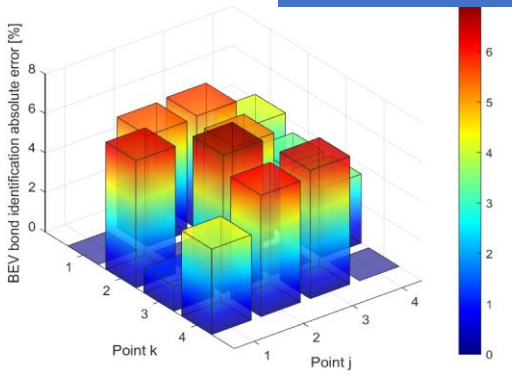
Figure 1. The three selected case-study buildings: (a) city hall of San Romano in Garfagnana (SR); (b) hospital of Castelnuovo di Garfagnana (HC); (c) church of S. Caterina in Collegnago di Fivizzano (CC).

Verifica e affinamento dei **modelli interpretativi per l'analisi del danno**. Le attività prevedono:

- utilizzo dei dati di monitoraggio di vibrazione ambientale per lo sviluppo di tecniche di seismic damage assessment , sia data-based che model-based
- selezione di un certo numero di strutture dell'OSS (edifici in c.a. e in muratura e qualche ponte)
- sviluppo e la calibrazione di modelli numerici su singoli casi studio per esecuzione di ANALISI DINAMICHE NON LINEARI

2

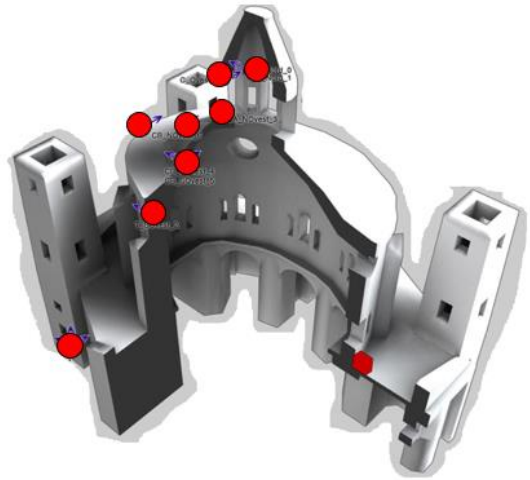
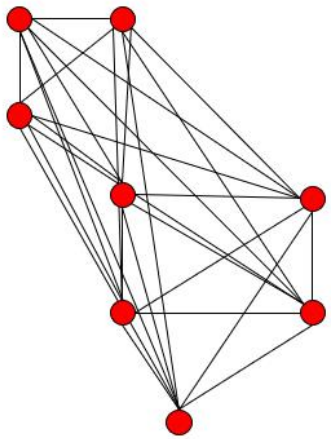




$$w'_k = \frac{E_k}{\rho_k}\frac{r}{h} \qquad w'_k \propto \frac{E_k}{\rho_k} \qquad D_k = \frac{\frac{E_k}{\rho_k} - \frac{E_{0,k}}{\rho_{0,k}}}{\frac{E_{0,k}}{\rho_{0,k}}}$$

$\rho_{0,k}$

Struttura equipaggiata con sistema di monitoraggio vibrazionale



Surrogate system (network equivalente)