



Rete dei Laboratori Universitari  
di Ingegneria Sismica e Strutturale

# Convegno ReLUIs



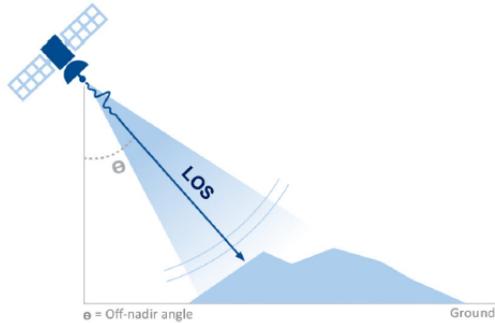
**Progetto DPC\_ReLUIs 2022-2024**  
**Esposizione delle attività svolte e prospettive**

**Roma, 7 novembre 2023**

**WP 6 – MONITORAGGIO E DATI SATELLITARI**

**Proff. Marco SAVOIA, Felice Carlo PONZO**

## La tecnologia radar satellitare



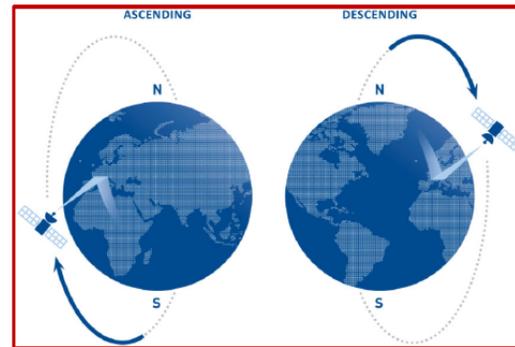
I satelliti **SAR** (*Synthetic Aperture Radar*) sono equipaggiati con emettitori ed antenne che permettono di **acquisire immagini radar della superficie terrestre**.

Il principio di funzionamento è analogo a quello del radar terrestre. Un segnale viene emesso dal satellite verso la superficie della terra ed **una parte di esso viene riflessa e acquisita** dall'antenna montata sul satellite.

La **fase del segnale** rilevato dipende dalla **distanza tra il satellite ed il bersaglio a terra**, oltre che da una serie di disturbi legati alle condizioni atmosferiche e al rumore.

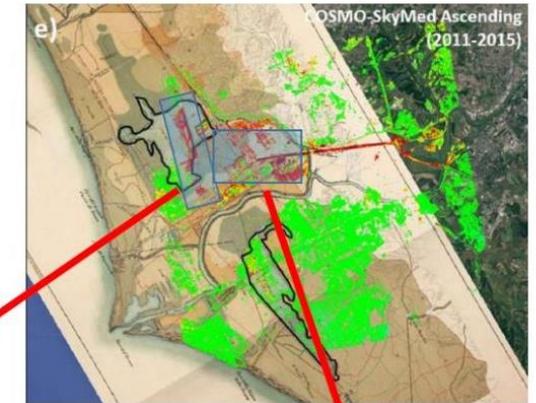
Il satellite emette il segnale lungo una direzione denominata «**linea di vista**» o **LOS** (*Line of sight*), caratterizzata da una certa **inclinazione  $\theta$**  rispetto alla **verticale**.

In particolare, il satellite può osservare il medesimo bersaglio a terra percorrendo un'**orbita ascendente** oppure un'**orbita discendente**.

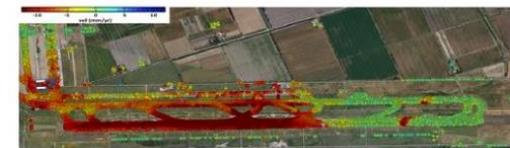


## Ambiti di applicazione consolidati dei dati satellitari

### Subsidenza



Velocità media di spostamento / anno



Rome "La Sapienza" e NHAZCA (2015)



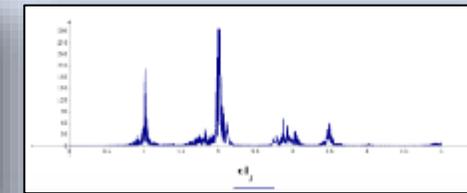
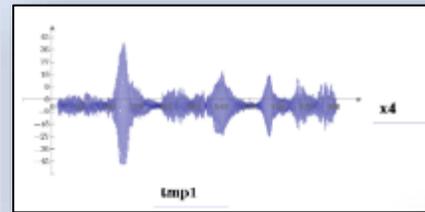
**La sfida – passaggio da analisi territoriali a studi su singole costruzioni**



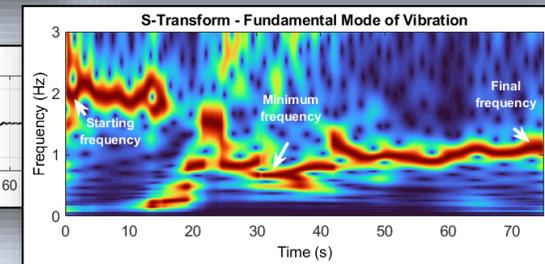
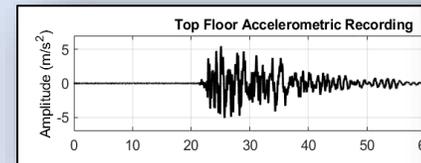
- Quali tipi di movimenti possono essere rilevati?
- Quali tipi di costruzioni possono essere monitorate?
- Quali fenomeni di danno sulle costruzioni possono essere seguiti?

- Messa a punto di metodologie per il **monitoraggio di strutture e infrastrutture di interesse strategico**, in grado di integrare dati acquisiti direttamente sulle strutture monitorate mediante tecniche e metodologie diagnostiche non distruttive a bassa invasività con quelli acquisiti via satellite.
- Identificare precocemente eventuali **anomalie comportamentali**, in maniera automatica o semi-automatica, su un numero elevato di strutture per una più efficace gestione della **manutenzione ordinaria e straordinaria**, comprese eventuali **emergenze**.

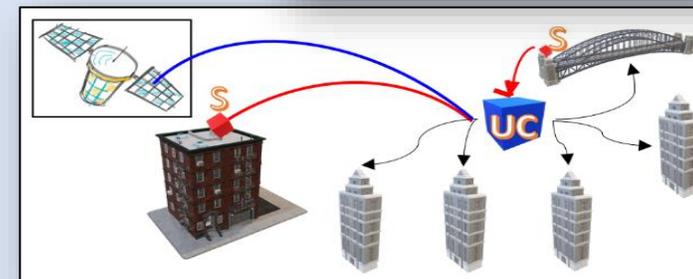
- **Monitoraggio di strutture e infrastrutture durante le normali condizioni di esercizio.**



- **Monitoraggio, in real-time e quasi real-time, di strutture e infrastrutture a valle di eventi calamitosi.**



- **Integrazione dei dati provenienti dai sistemi di monitoraggio on site e satellitari in sistemi di Early-Warning per l'allertamento e la gestione delle emergenze (terremoti, Frane, Alluvioni ecc...).**



Favorire l'integrazione tra le diverse tecniche di monitoraggio considerando differenti tipologie di strutture o infrastrutture

**WP 6.1:** Edifici ordinari e di importanza strategica in c.a.

**WP 6.2:** Edifici ordinari e di importanza strategica in muratura

**WP 6.3:** Infrastrutture rilevanti (ponti, viadotti)

**WP 6.4 :** Edifici di interesse storico-monumentale ed aree archeologiche



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

**Gruppo  
di lavoro  
ReLUIIS**

## WP 6 – MONITORAGGIO E DATI SATELLITARI

Task	titolo	Responsabile
6.1	Utilizzo di dati ottenuti da interferometria satellitare	Maria Pina Limongelli (Manuela Bonano)
6.2	Sistemi innovativi di monitoraggio on site	Loris Vincenzi
6.3	Integrazione dei sistemi di monitoraggio basati su dati satellitari e on site	Giovanni Fabbrocino
6.4	Casi di studio	Anna Saetta / Rocco Ditommaso
6.5	Redazione di linee guida per l'utilizzo di misure satellitari per il monitoraggio	Marco Savoia / Felice Ponzo

### Definizione coordinatori di task e di attività

Ciascuno dei task 6.1, 6.2 e 6.3 è suddiviso in Attività (AT)

Attività	titolo	Responsabile
AT 1	Edifici ordinari e di importanza strategica in calcestruzzo armato	Andrea Prota
AT 2	Edifici ordinari e di importanza strategica in muratura	Serena Cattari
AT 3	Infrastrutture rilevanti (ponti, viadotti)	Alberto Meda
AT 4	Edifici di interesse storico-monumentale ed aree archeologiche	Anna Saetta



**ReLUIs**  
Consorzio Interuniversitario  
Rete dei Laboratori Universitari  
di Ingegneria Sismica e strutturale



**CNR-IREA**  
Consiglio Nazionale delle Ricerche  
Istituto per il Rilevamento  
Elettromagnetico dell'Ambiente

**LINEE GUIDA PER L'UTILIZZO DEI DATI INTERFEROMETRICI  
SATELLITARI AI FINI DELL'INTERPRETAZIONE DEL  
COMPORAMENTO STRUTTURALE DELLE COSTRUZIONI**

**Ottobre 2023**

**Documento sottoposto a inchiesta pubblica**

*Il documento è sottoposto a inchiesta pubblica fino al 15 Novembre 2023*

*Commenti possono essere inviati all'indirizzo mail: [wp6@reluis.it](mailto:wp6@reluis.it)*

con il supporto di



1. Introduzione
2. Nozioni fondamentali per la corretta interpretazione del dato interferometrico
3. Elaborazione dei risultati dell'interferometria satellitare nel campo delle costruzioni esistenti
4. Interpretazione del comportamento strutturale attraverso l'utilizzo dei dati satellitari
5. Edifici ordinari e di importanza strategica in muratura
6. Edifici ordinari e di importanza strategica in calcestruzzo armato
7. Infrastrutture rilevanti (ponti, viadotti, gallerie)
8. Opere di interesse storico-monumentale ed aree archeologiche
9. Utilizzo dell'interferometria satellitare per il monitoraggio strutturale – considerazioni generali
10. Casi studio

## **WP 6.1: Edifici ordinari e di importanza strategica in c.a.**

UTILIZZO DEI DATI DiNSAR AI FINI DELLO SHM A SCALA DI SINGOLA COSTRUZIONE (IN COLLAB. CON UR TOR VERGATA E UR IUAV)

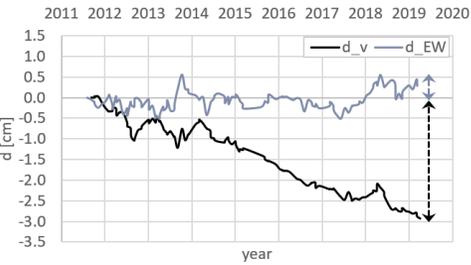
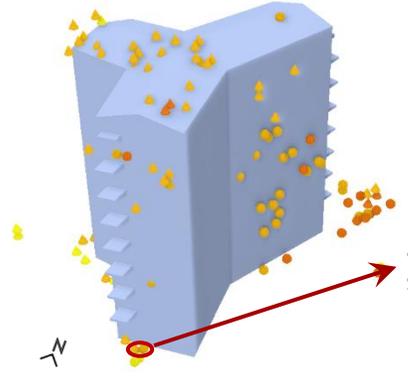
CASI STUDIO

Caso Studio: Torri Stellari (1949-1952, Roma) – edifici in c.a. a telaio

STIMA DEGLI SPOSTAMENTI CUMULATI

APPROCCIO 1

Combinazione delle componenti di spostamento lungo la LOS in ogni istante di acquisizione



APPROCCIO 2

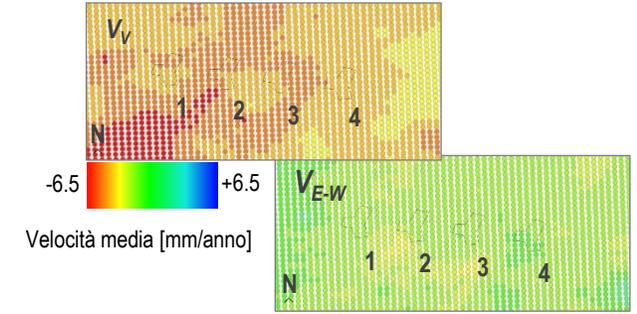
Combinazione delle componenti di velocità lungo la LOS su tutto il periodo di acquisizione

$$V_V = -0.381 \text{ cm/anno}$$

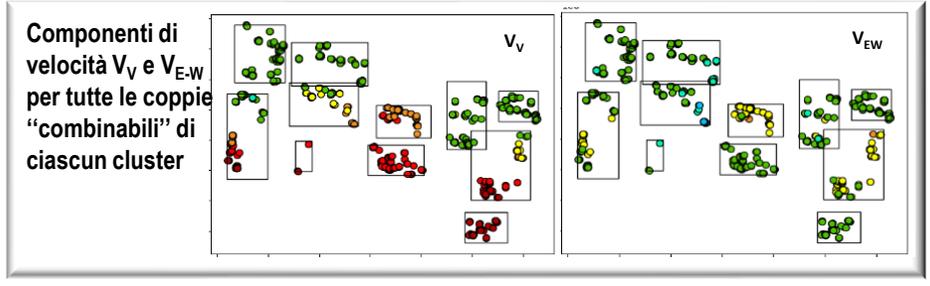
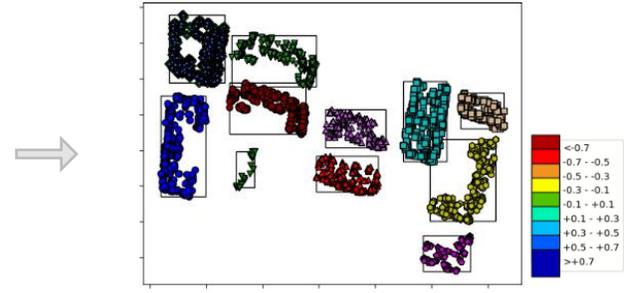
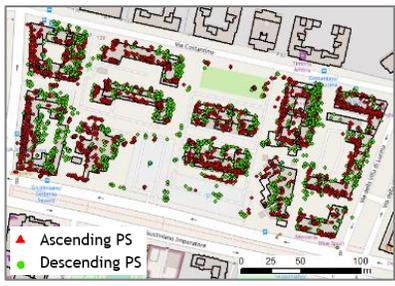
$$V_{EW} = +0.017 \text{ cm/anno}$$

APPROCCIO 3

Mappe di velocità media continue ottenute da interpolazione spaziale

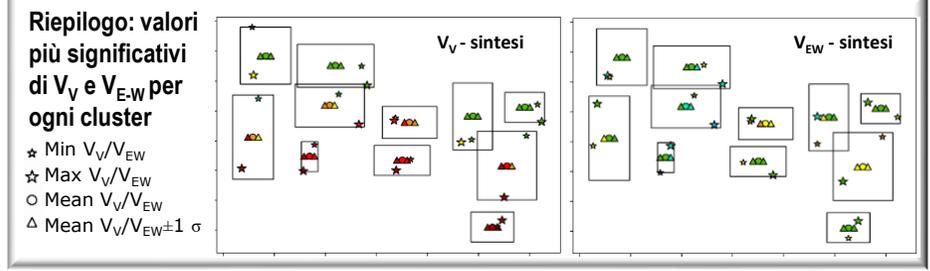


IDENTIFICAZIONE PRELIMINARE DELLE STRUTTURE CRITICHE SULLA BASE DI ALGORITMI DI INTELLIGENZA ARTIFICIALE



**FINALITA':**  
Implementare un algoritmo che, a partire dai PS distribuiti su un'area, consenta di:

- Individuare la posizione degli edifici a partire solo dai dati SAR (**clusterizzazione**);
- Per ogni edificio, cioè per ogni cluster, fornire delle prime informazioni su quanto e come si sta deformando;
- Automatizzare il processo di creazione di mappe di deformazione a scala territoriale.



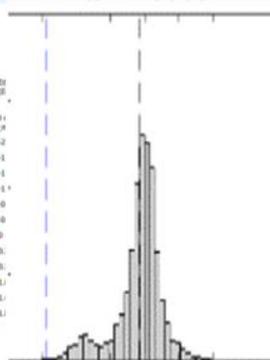
Gruppo di lavoro Unimore: Loris Vincenzi, Elisa Bassoli, Francesco Mancini, Francesca Grassi

**Task 6.1 Elaborazione dati satellitari** + procedura per l'identificazione dei **cedimenti di fondazioni in edifici ordinari a scala TERRITORIALE** - assunzione di movimenti di corpo rigido  
→ caso studio di Modena

**Cartografia** per identificazione edifici

Identificazione componenti moto da dati SAR

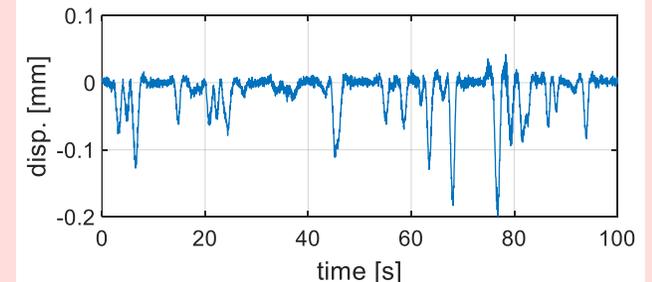
Valutazione delle **incertezze**

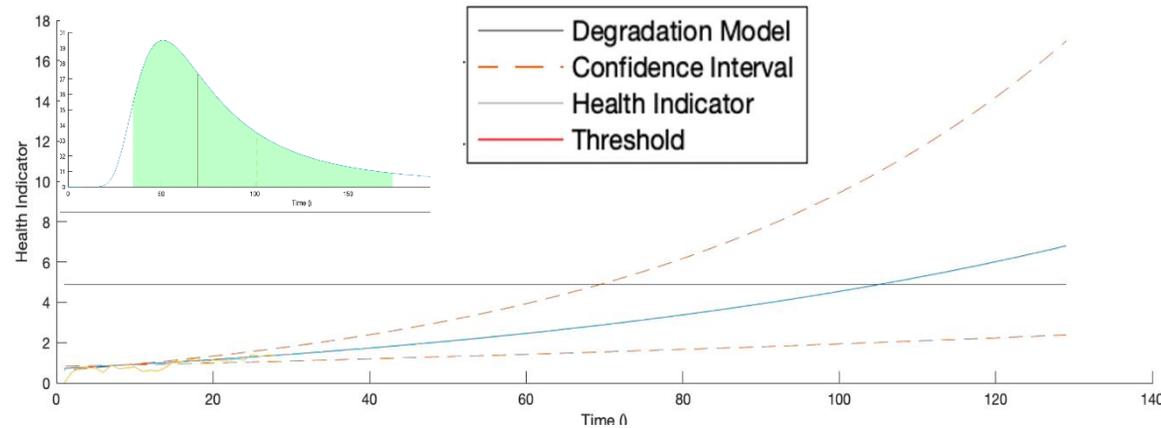


Individuazione edifici a comportamento «anomalo»

**Task 6.2** . Monitoraggio di ponti con **Radar terrestre MIMO** (86 antenne)

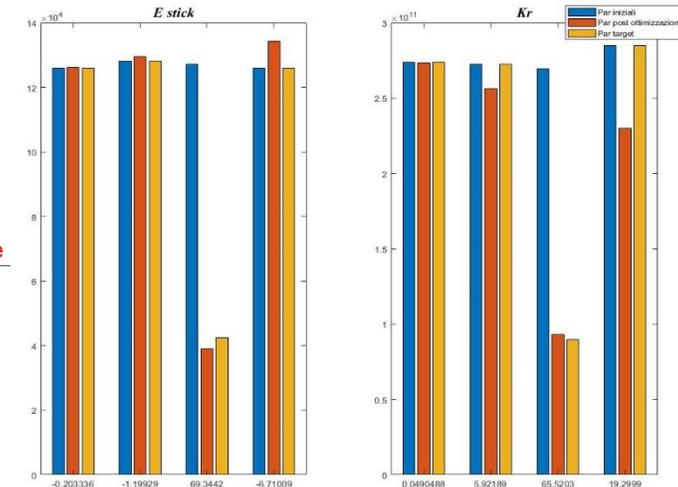
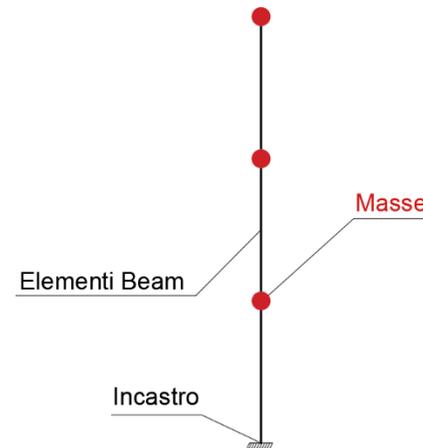
- **Contactless,**
- **Spostamenti di molti punti,**
- **Elevata accuratezza (0.01 mm)**





Sviluppo e applicazione di un modello di previsione stocastica per stimare l'andamento del cedimento differenziale nel tempo a partire dai dati satellitari.

Valutazione effetto dei cedimenti sulle proprietà modali dell'edificio. Simulazione con «digital twin» a pochi gradi di libertà. Parametri stimati con ottimizzazione numerica minimizzando la differenza fra parametri modali stimati e calcolati (da misure sul campo)



**WP 6.2: Edifici ordinari e di importanza strategica in muratura**

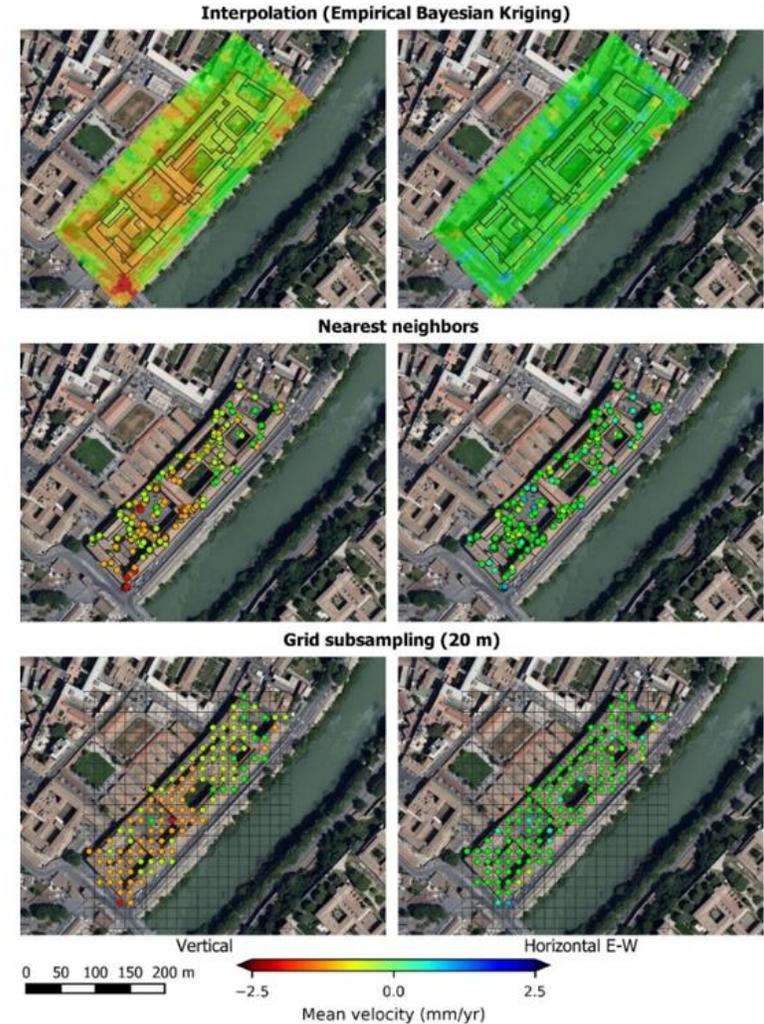
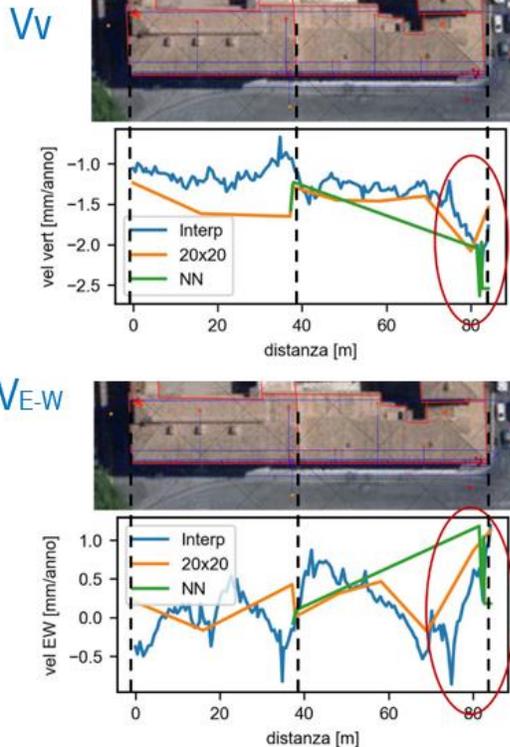
**WP 6.4 : Edifici di interesse storico-monumentale ed aree  
archeologiche**

## CASO STUDIO - Complesso San Michele (Roma)



Confronto tra diverse tecniche di combinazione per determinare le velocità in direzione verticale e in direzione E-W

- Tecniche di interpolazione
- Combinazione di punti sufficientemente vicini
- Grid subsampling

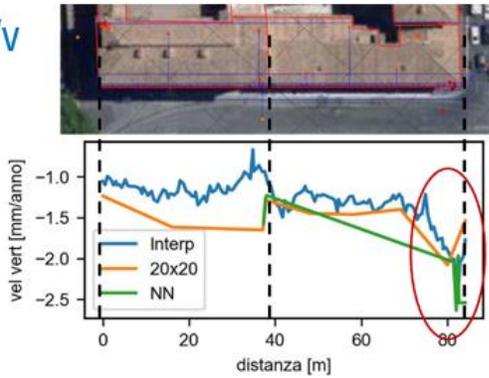


Università IUAV di Venezia - Responsabile scientifico: prof.ssa Anna Saetta  
 Università degli Studi di Napoli "Federico II" - Responsabile scientifico: prof. Andrea Prota  
 Università degli Studi di Roma Tor Vergata - Responsabile scientifico: prof. Alberto Meda

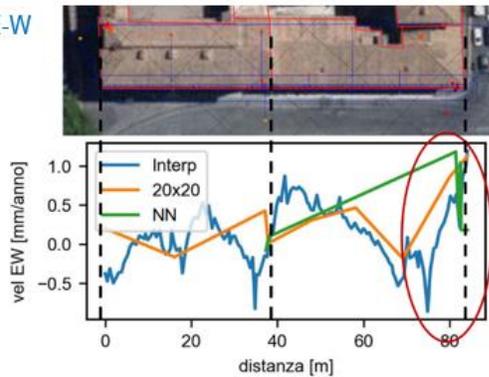
CASO STUDIO - Complesso San Michele (Roma)



Vv



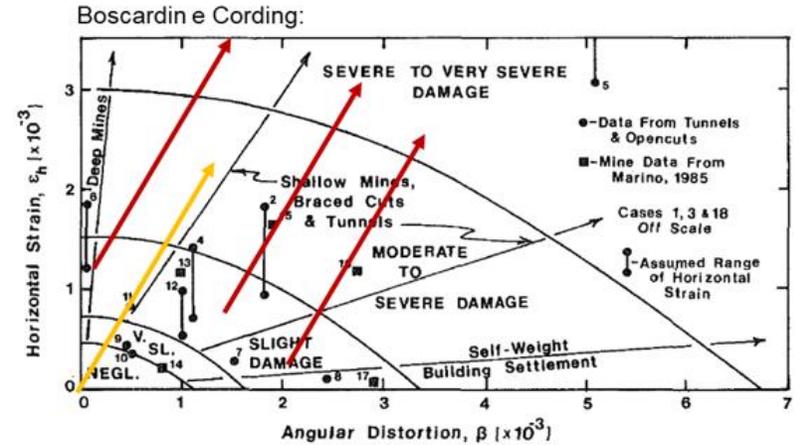
VE-W



Stima del livello di danno attraverso correlazioni di letteratura.



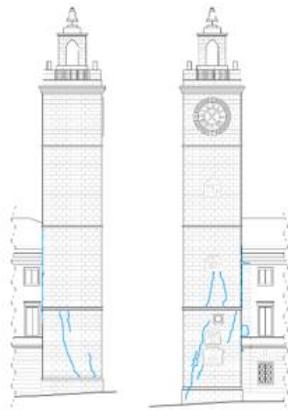
Verifica ed integrazione con lo stato di danno rilevato (*work in progress*)



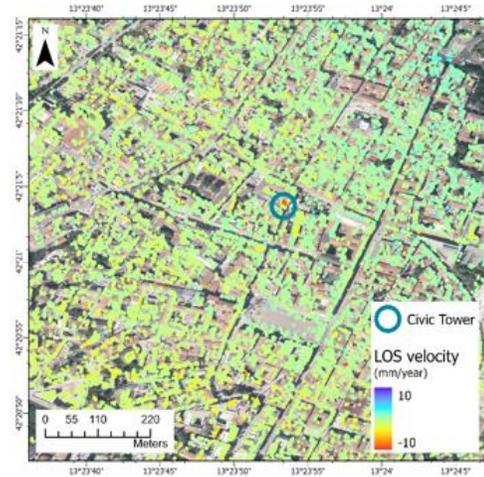
Università IUAV di Venezia - Responsabile scientifico: prof.ssa Anna Saetta  
 Università degli Studi di Napoli "Federico II" - Responsabile scientifico: prof. Andrea Prota  
 Università degli Studi di Roma Tor Vergata - Responsabile scientifico: prof. Alberto Meda

# L'Aquila

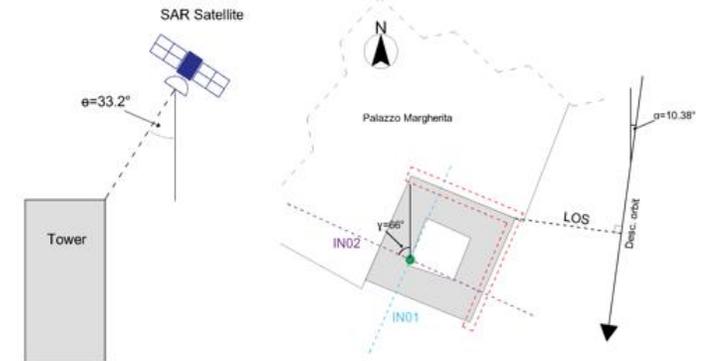
## Caso studio: Torre Civica



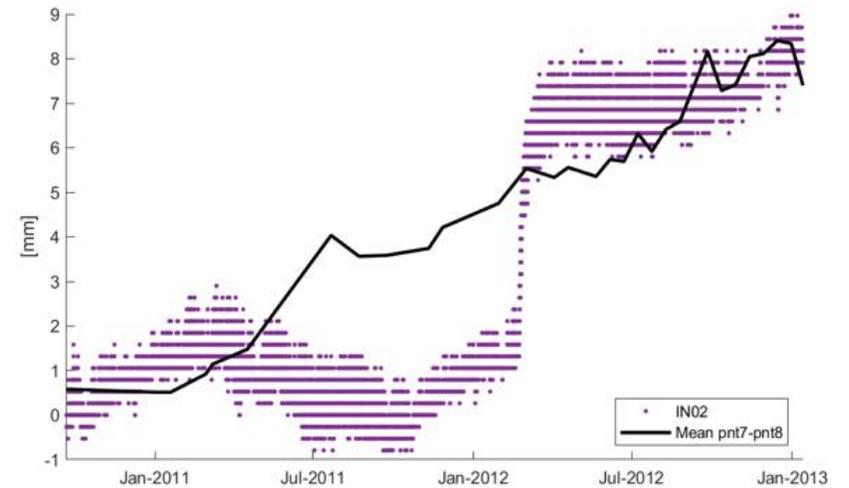
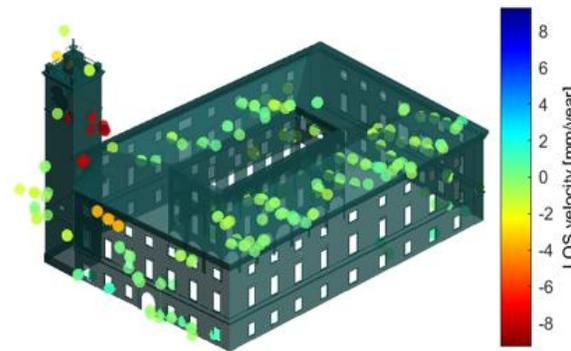
## Analisi su scala urbana



## Integrazione e correlazione monitoraggio on-site vs InSAR



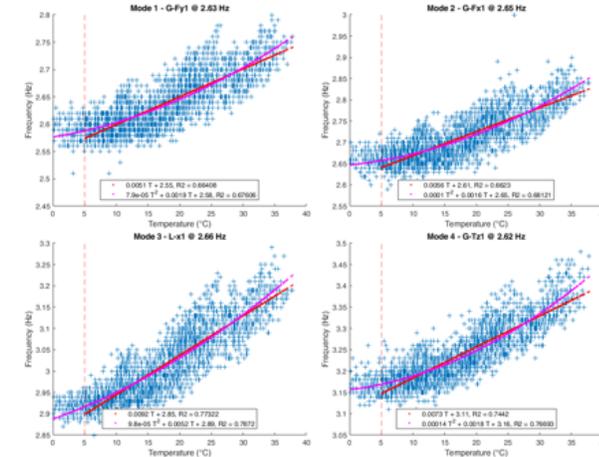
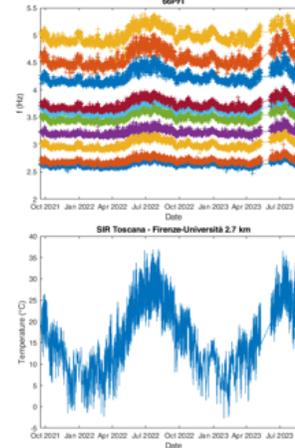
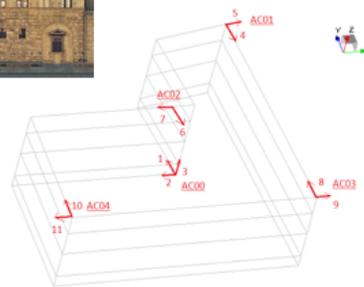
## Analisi del singolo edificio



UniGE sta lavorando in sinergia con l'Osservatorio Sismico delle Strutture (OSS) del DPC (D. Spina, F. Bocchi) nell'analisi di dati di monitoraggio di vibrazione ambientale a cadenza sub-giornaliera su di un parco di **nove edifici in muratura**, perseguendo **tre obiettivi**:

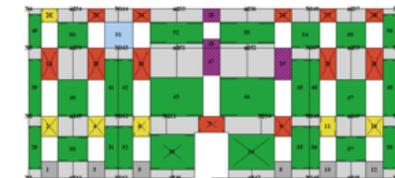
## 1. Tracking frequenze naturali e depurazione effetti ambientali (finestra di osservazione di un anno)

### 66PFI Palazzo Medici Riccardi, Firenze

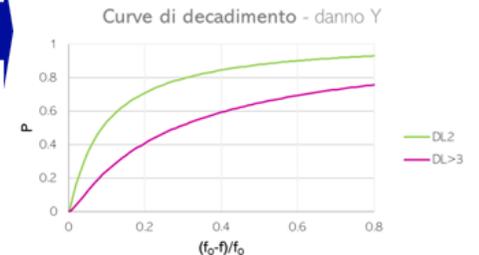
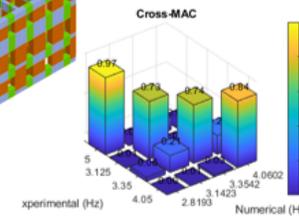
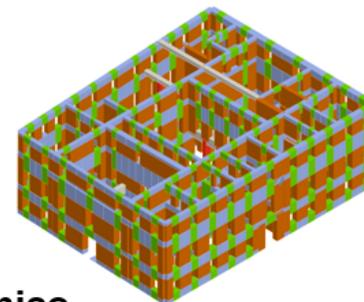


## 2. Calibrazione modelli a telaio equivalente (due completati, uno in corso)

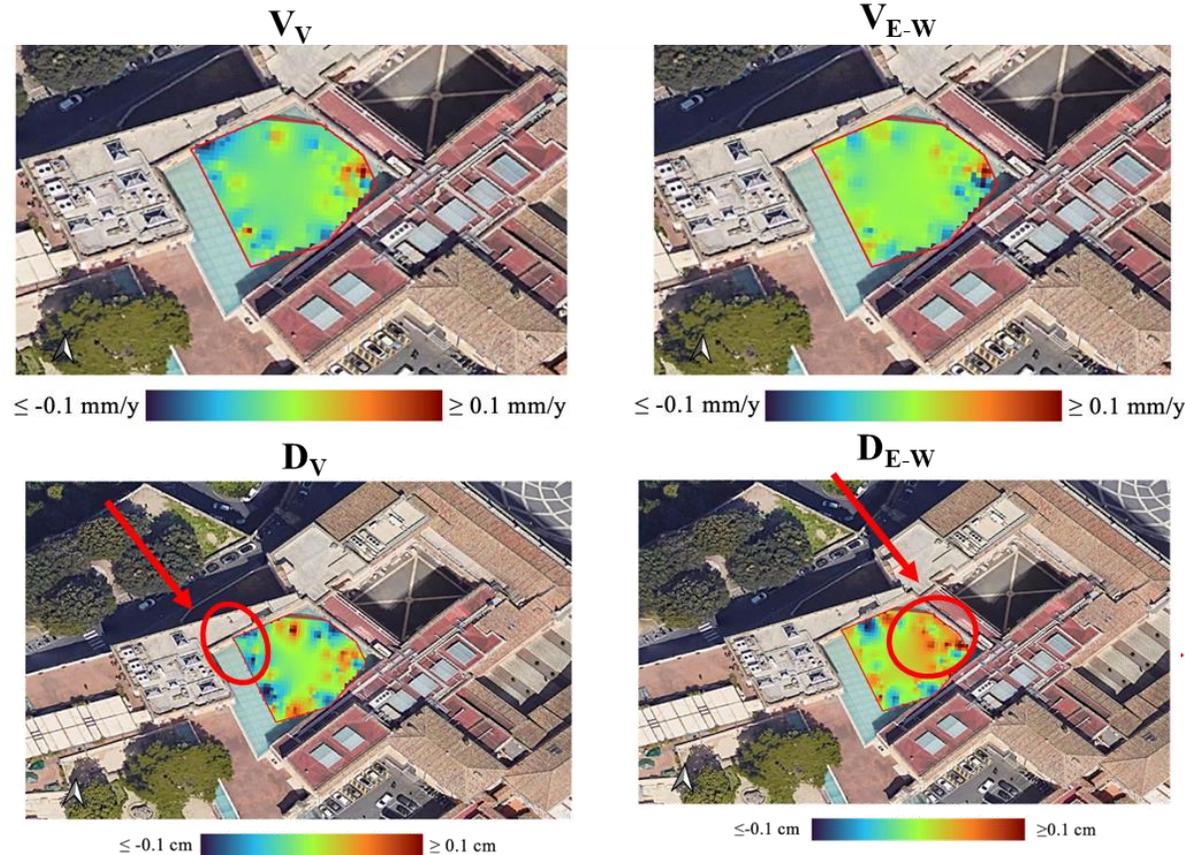
### SSN14 Palazzo degli Elefanti, Catania



## 2. Uso modelli calibrati per lo sviluppo di curve decadimento frequenza-danno da ADNL utili per fornire supporto decisionale nella fase post-evento sismico

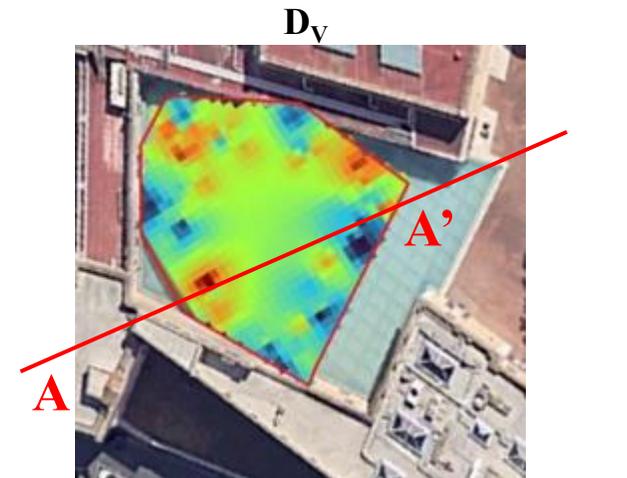


Vertical and E-W components of the mean velocity maps and displacements of the Marcus Aurelius Exedra in Rome

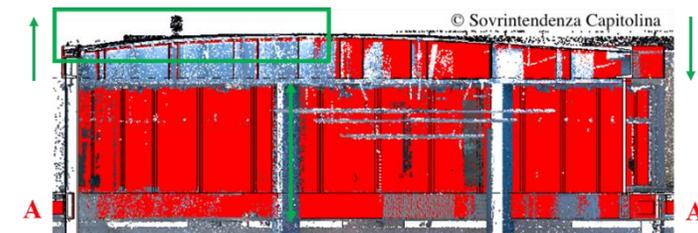


An ongoing deformation phenomenon can be observed. The vertical component is prevailing, showing downward movements with values of  $V_V$  lower than  $0.42 \text{ mm/y}$ . By analyzing the displacement maps, it is possible to identify that east-directed displacements characterize the east area of the structure (mean deformation velocity of  $0.36 \text{ mm/y}$ ).

Integration of Satellite data and on-site measurements in structural monitoring



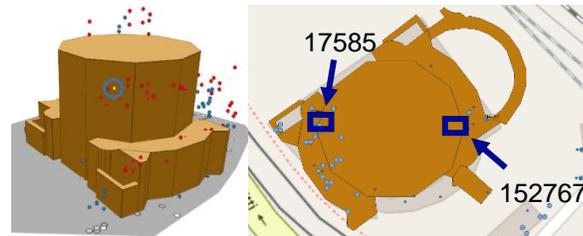
BIM 'As Design' + 3D Point Cloud



Both models (the  $D_V$  map from satellite data and the as-built model from the Terrestrial Laser Scanner), show a differential elevation shift.



Urban context



Selected point with max annual velocity

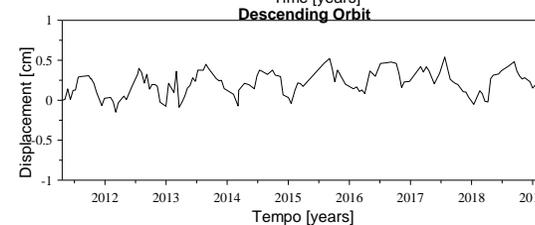
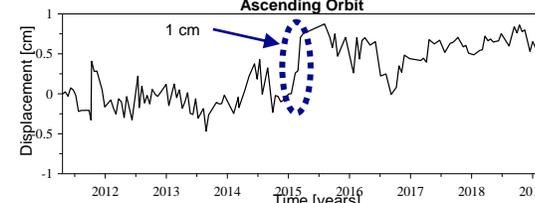
Gauge point	Max velocity [cm/y]	Coherence
17585	0.0816	0,553
152767	0.0618	0,638

Table with points of max annual velocity

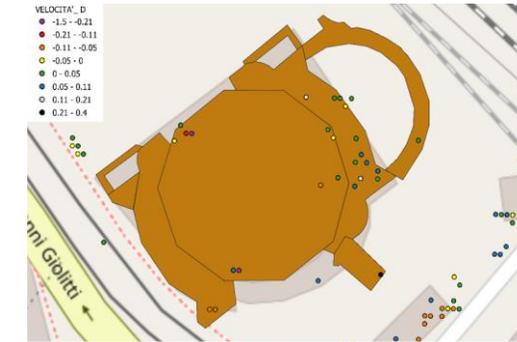
## Temple of Minerva in Rome



Mean velocity maps for the ascending orbit



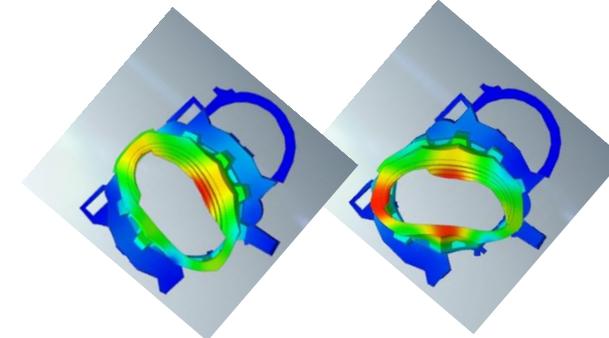
Displacements of the points with max velocity [cm/y]



Mean velocity maps for the descending orbit

1<sup>st</sup> mode

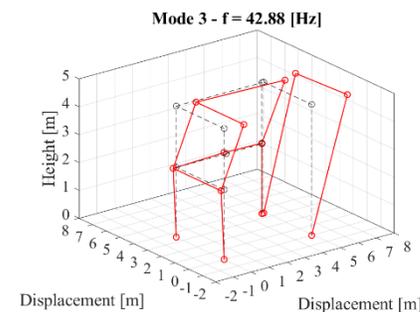
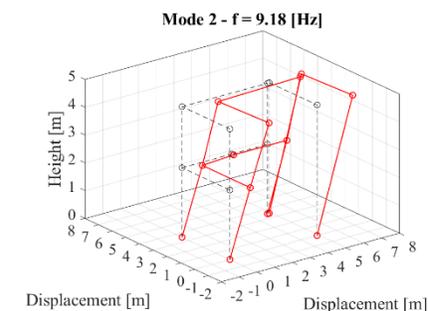
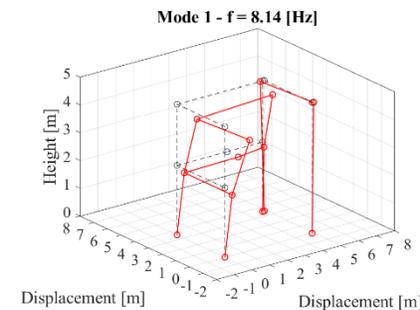
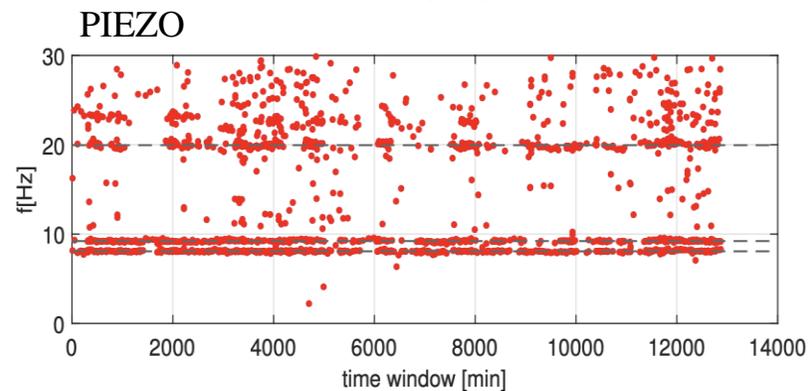
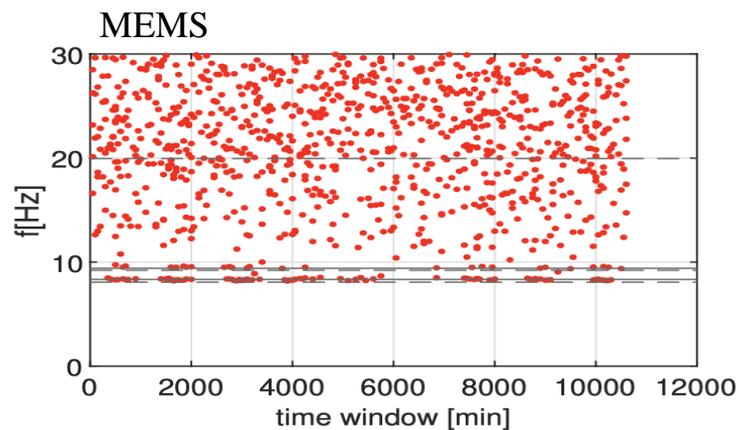
2<sup>nd</sup> mode



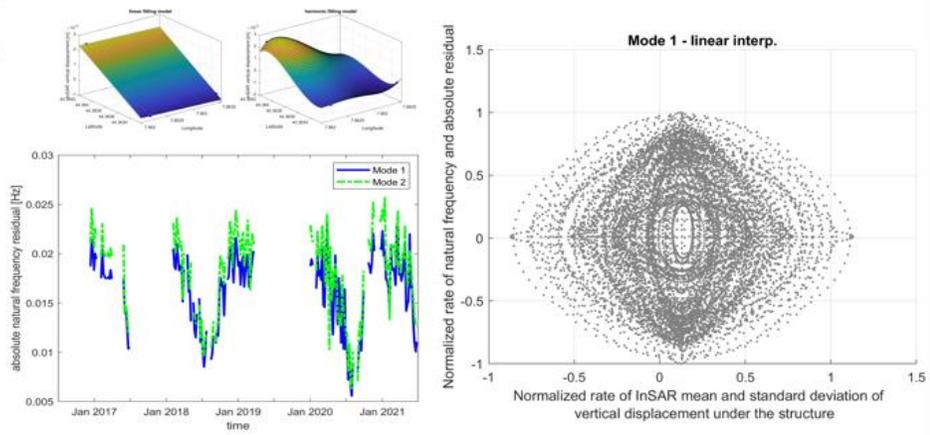
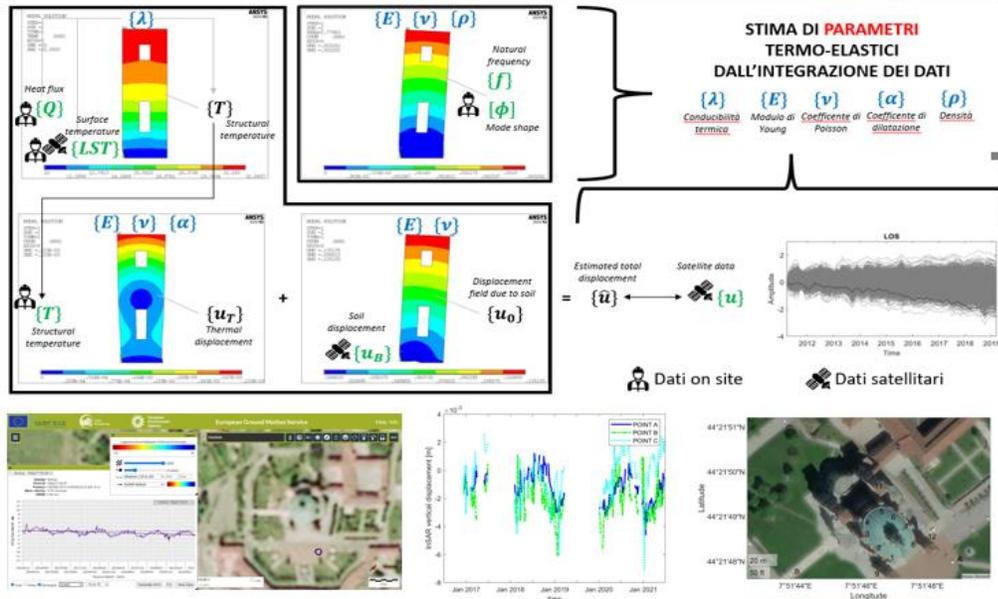
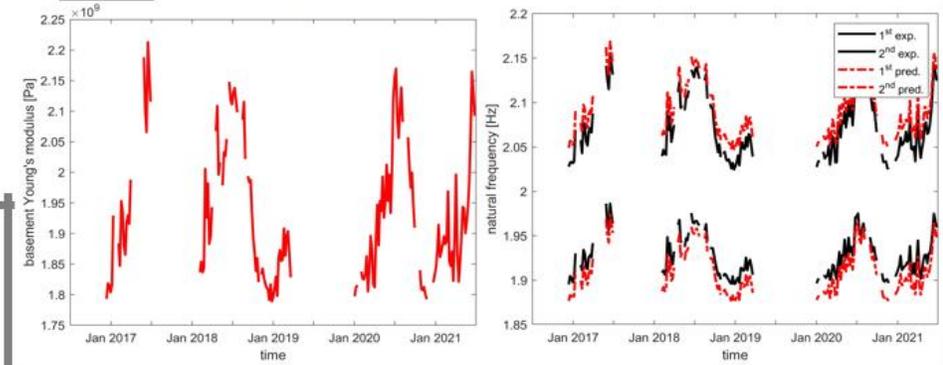
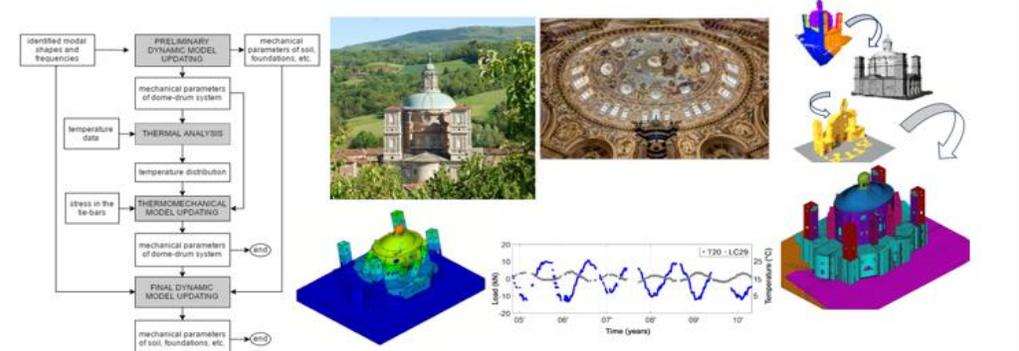
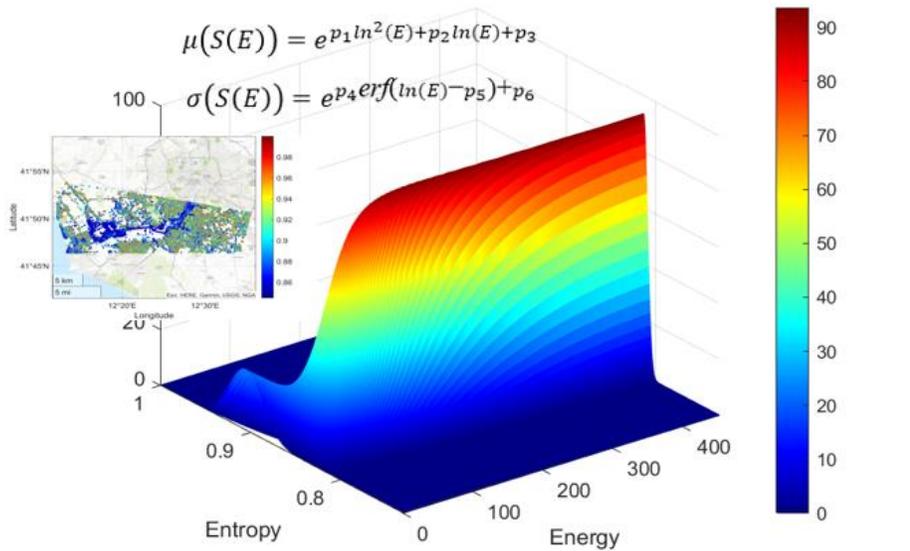
1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> vibration mode of the temple.

Analysing the satellite data with a sufficient coherence, the mean annual velocity is equal to 0.04 cm/y, considering both the ascending and descending orbit. In a second phase the displacements of the gauge point with the maximum annual velocity are considered. For the ascent orbit they show an irregular trend not dependent on thermal fluctuations; in particular, in 2015 the permanent displacement is approximately 1 cm. For the descendent orbit, instead, the movement trend is regular but affected by annual thermal variations. Finally, a numerical model was realized based on the experimental data. The first modes of vibration of the structure presents a deformation that coincides spatially with the points that present the maximum displacement speed.

Analysis of the dynamic identification capacity of low-cost digital MEMS sensors



Feature	PCB/393B12	ISM330DHC3
Sensitivity	10.0 V/g	-
Resolution	0.008 mg RMS	0.061 mg/LSB
Frequency range	0.15 - 1000 Hz	-
Maximum acceleration	± 0.5 g	± 2 g
Spectral Noise	0.32 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	60 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$
Resonant Frequency	≥ 10 kHz	≥ 2 kHz



# Fine prima parte

**WP 6.3: Infrastrutture rilevanti (ponti, viadotti)**

# Ponte della Musica – Armando Trovajoli

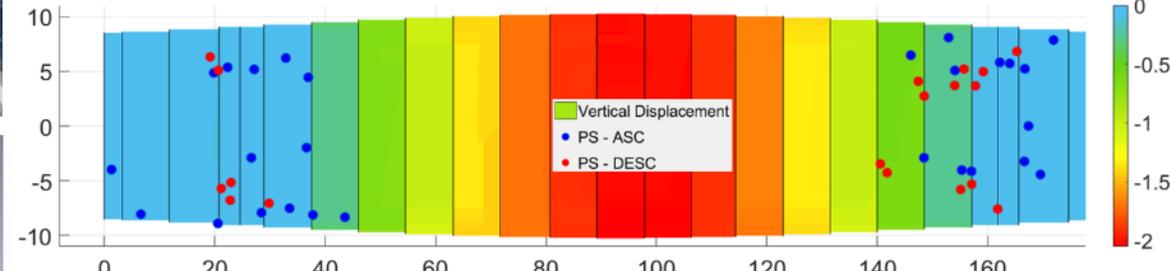
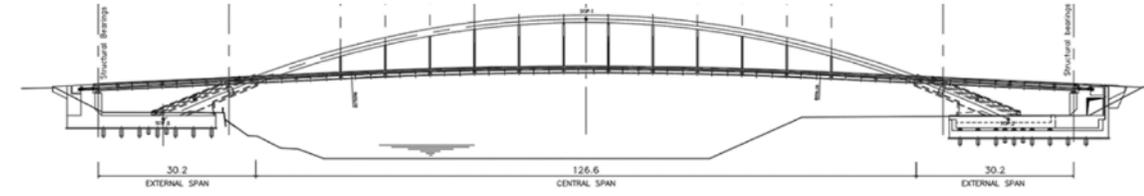
Assenza di PS sull'impalcato centrale

$$d_{LOS} \approx \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \cdot \frac{\lambda}{2}$$

DESIGNATION	WAVELENGTH RANGE (cm)
Banda L	76.9-19.3
Banda C	7.69-5.20
Banda X	5.20-2.75

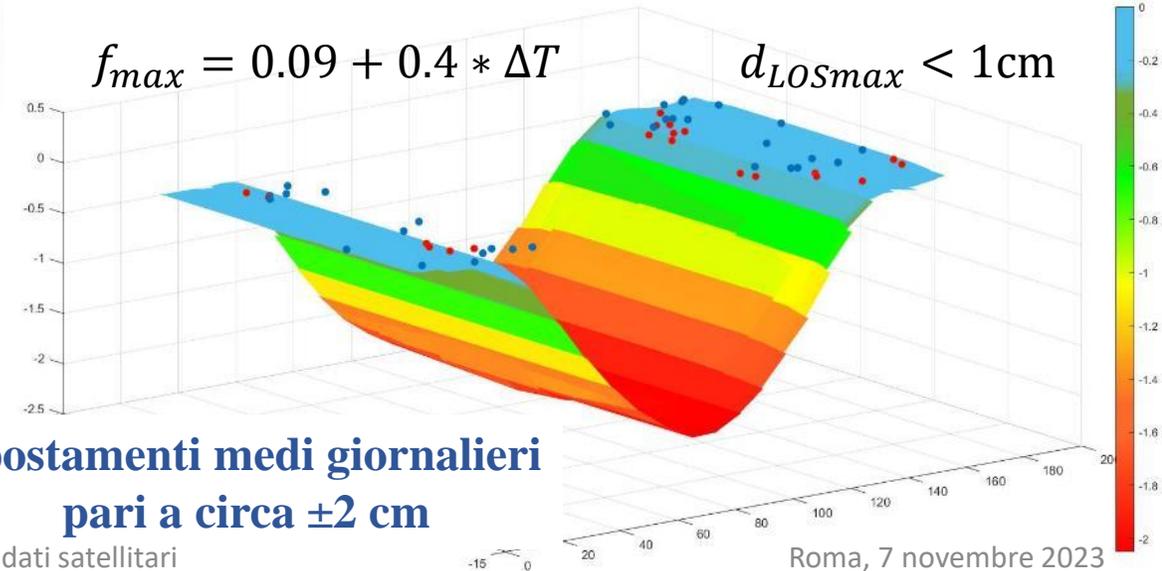


Indagini Dinamiche

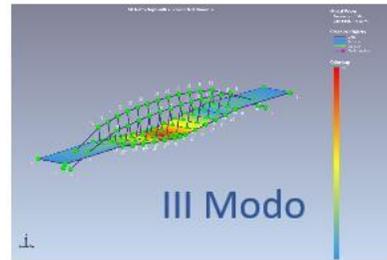
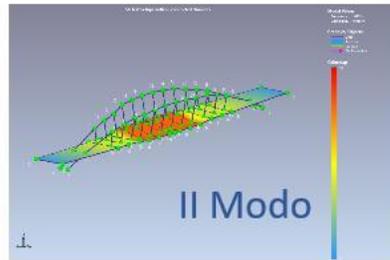
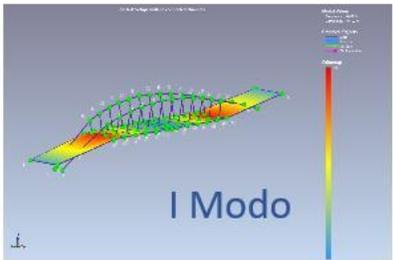


$$f_{max} = 0.09 + 0.4 * \Delta T$$

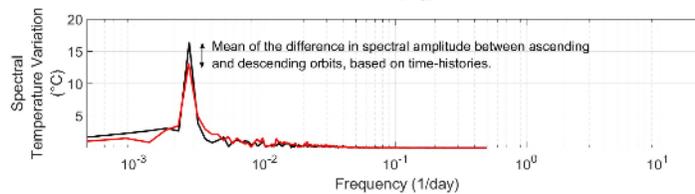
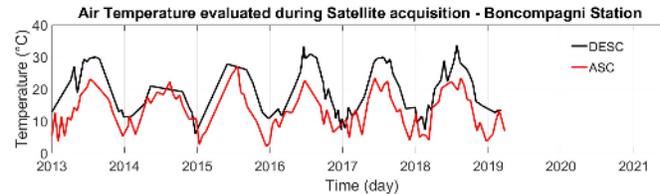
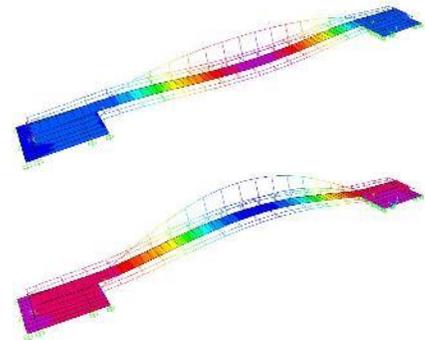
$$d_{LOSmax} < 1cm$$



Spostamenti medi giornalieri  
pari a circa  $\pm 2$  cm



## Analisi Termo-Meccaniche



**CASO STUDIO N. 3**  
**PONTE MORANDI ALLA MAGLIANA - (ROMA)**



I  
-  
U  
-  
A  
-  
V  
Università Iuav  
di Venezia



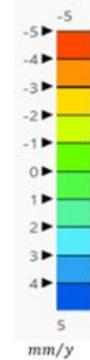
Velocità media di spostamento lungo la LOS



**Dataset ascendente**

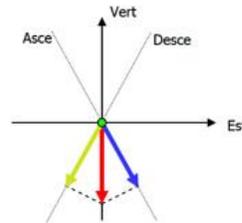


**Dataset discendente**



**Impiego di differenti tecniche di analisi:**

Approccio Nearest Neighbours  
Punti «sufficientemente» vicini

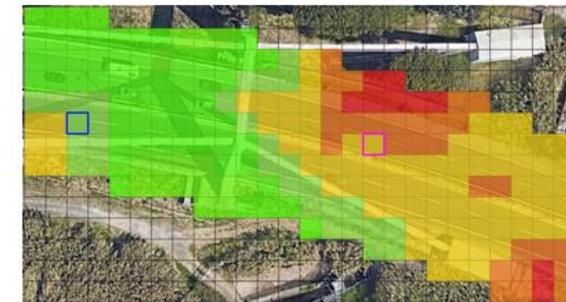


Sotto-campionamento su griglia regolare  
(grid-subsampling)

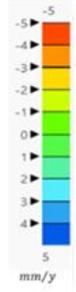


**Velocità verticale**

Interpolazione spaziale



**Velocità verticale**

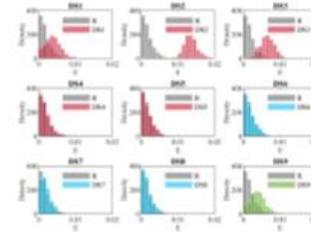


**Task 6.1: Uso dei dati InSAR**

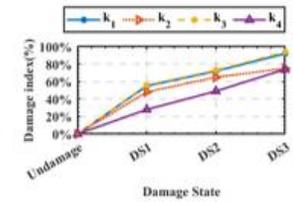


Sviluppo di un processo di elaborazione dei dati satellitari SAR per estrarre le storie temporali di spostamento utilizzando software open source. Processamento di dati a bassa Sentinel-1 e ad alta risoluzione CosmoSKYMED nell'area della Regione Lombardia.

**Task 6.2: Monitoraggio innovativo**

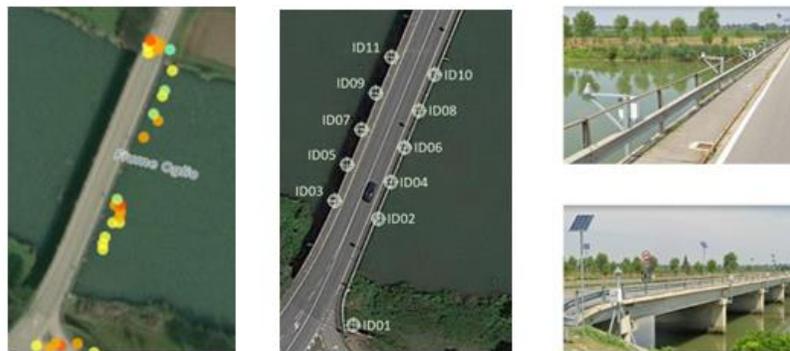


Reti intelligenti di sensori



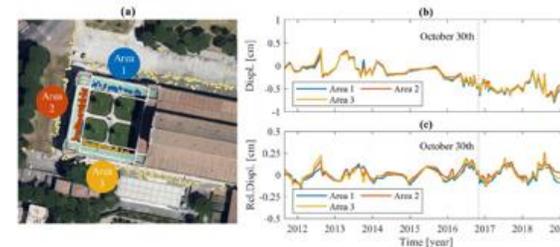
Bayesian updating per la valutazione del danno sismico su strutture civili

**Task 6.3: Uso dei dati InSAR e in situ**



Processamento di dati S1 e CSK e confronto con dati in situ (GNSS)

**Task 6.4: Casi studio**

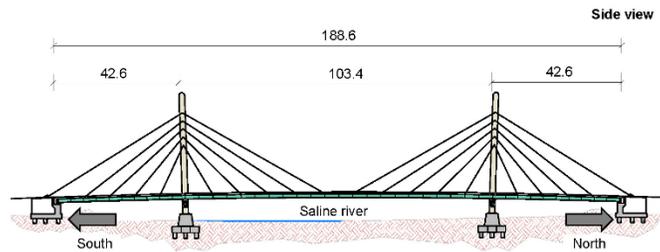


Basilica di San Paolo, Roma. Dati CNR Irea

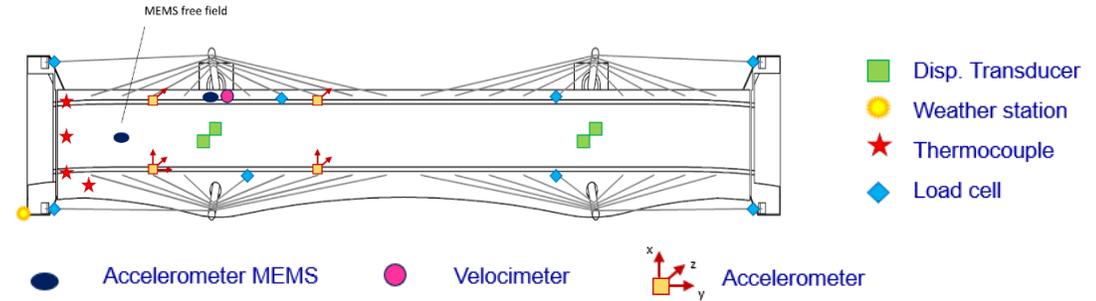
Ponte Palatino, Roma. Uso del portale European Ground Motion Service (EGMS)



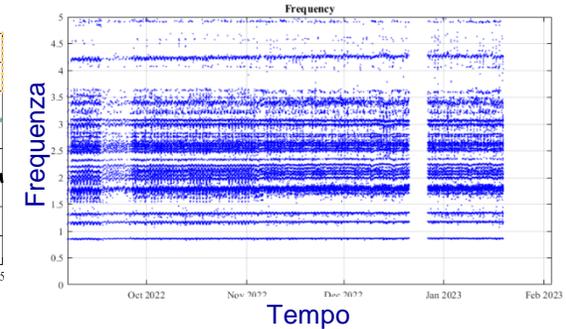
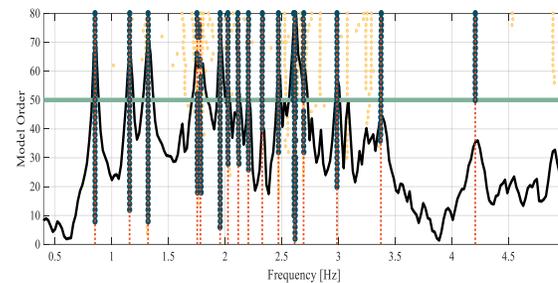
### Caso studio: Ponte Filomena delli Castelli (Montesilvano – PE)



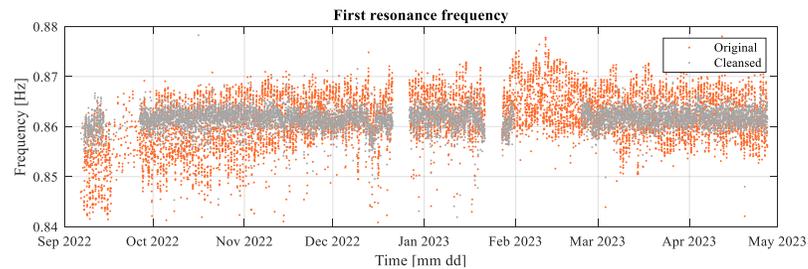
### Sistema di monitoraggio statico-dinamico in continuo



### AutoOMA



### Normalizzazione dei parametri ambientali



$$y = a + \sum b_i x_i$$

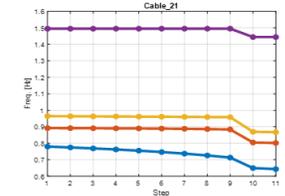
Modello interpretativo  
(regressione lineare multipla)

### Modellazione strutturale e scenari di danno

Scenari di danno indagati:

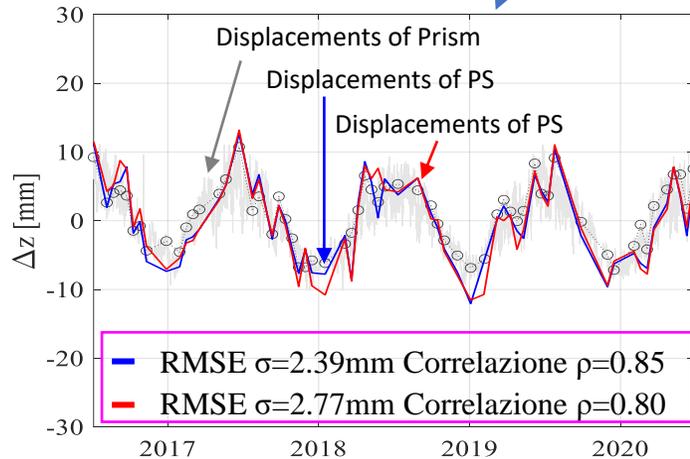
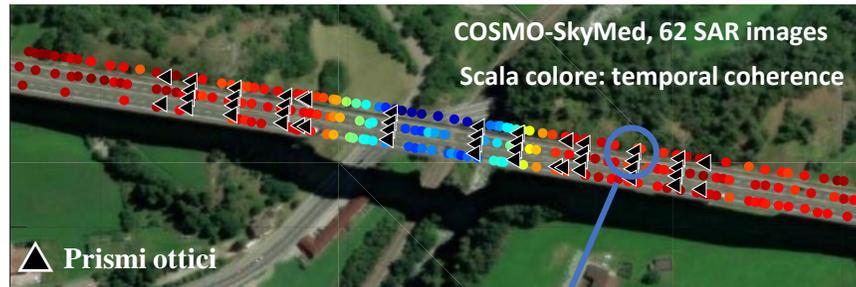
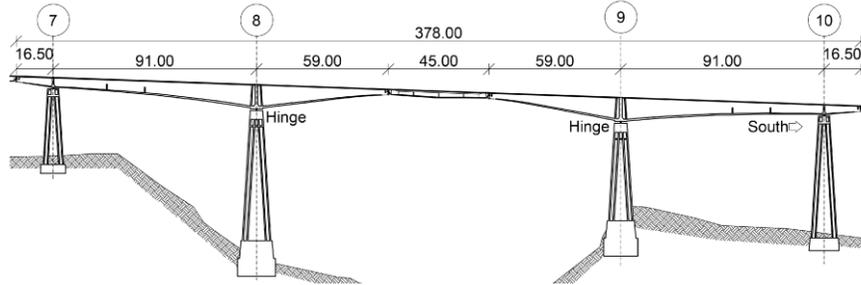
- Degradamento stralli (corrosione)
- Scalzamento fondazioni lato Sud

Variazione delle prime 4  
frequenze dovute alla rimozione  
di uno strallo alla volta

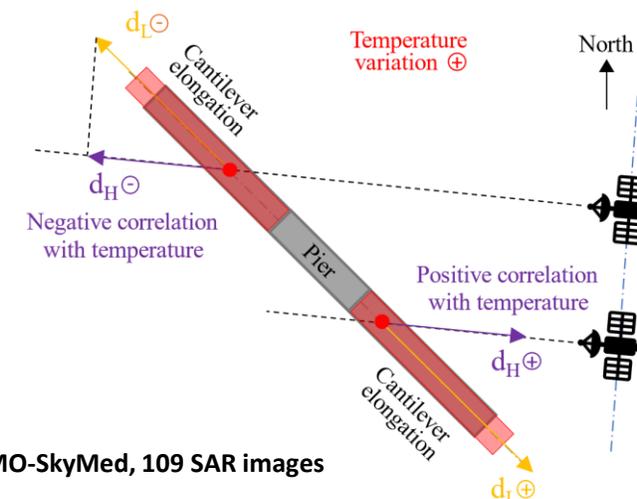


Esempio: rimozione strallo 1

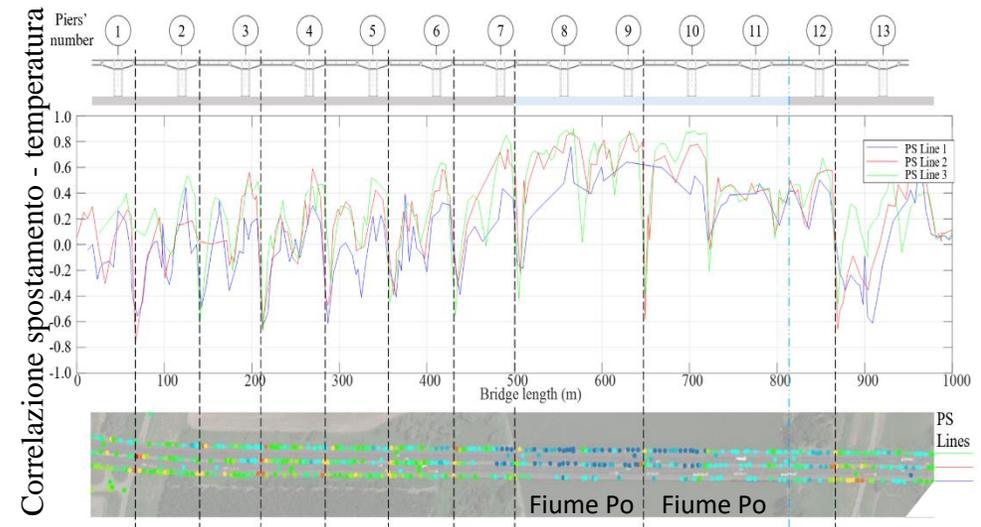
### Confronto diretto tra spostamenti ottenuti tramite InSAR e misure topografiche



### Riconoscimento delle campate di un ponte tramite InSAR e correlazione con temperatura

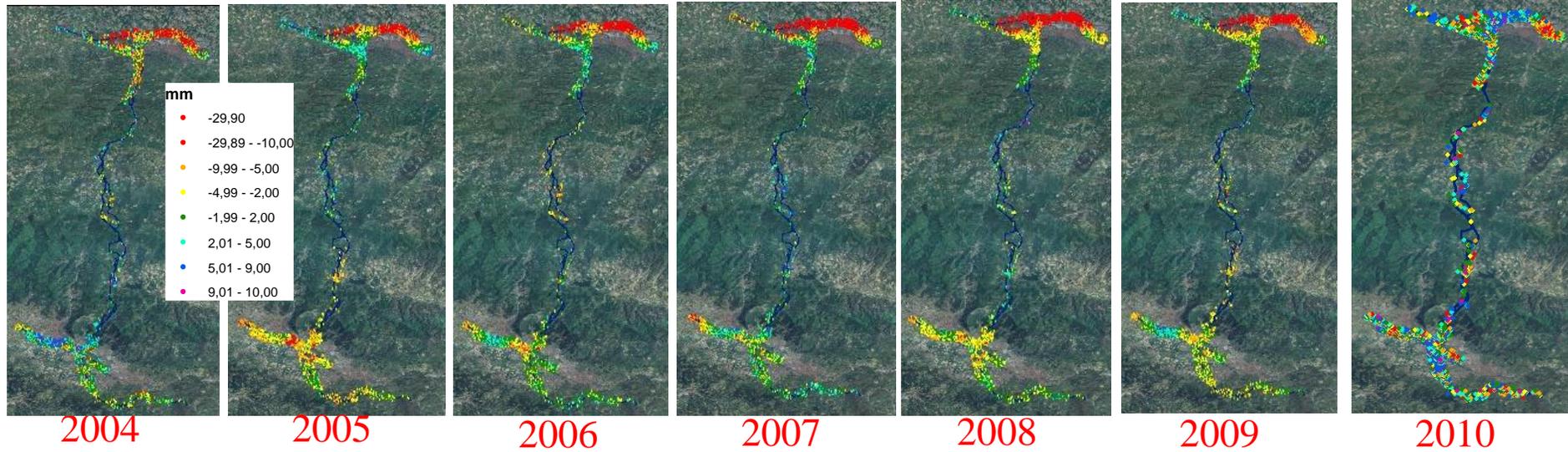


COSMO-SkyMed, 109 SAR images

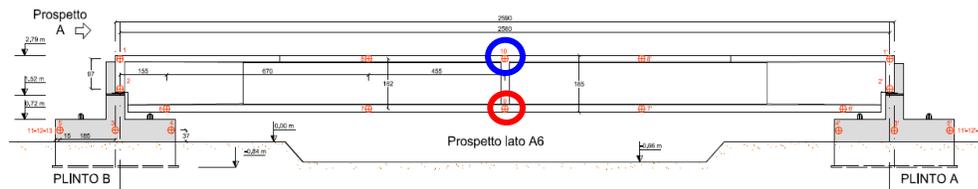


Bologna-Firenze  
SENSORE ENVISAT

MAPPE TEMPO-VARIANTI - SPOSTAMENTI VERTICALI



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

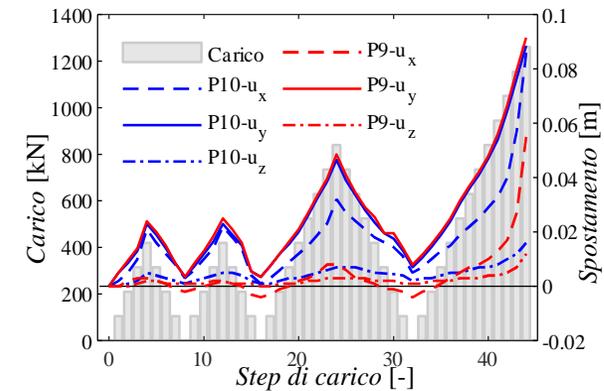


Valutazione soglie di danno



Modellazione FEM

Monitoraggio in-situ



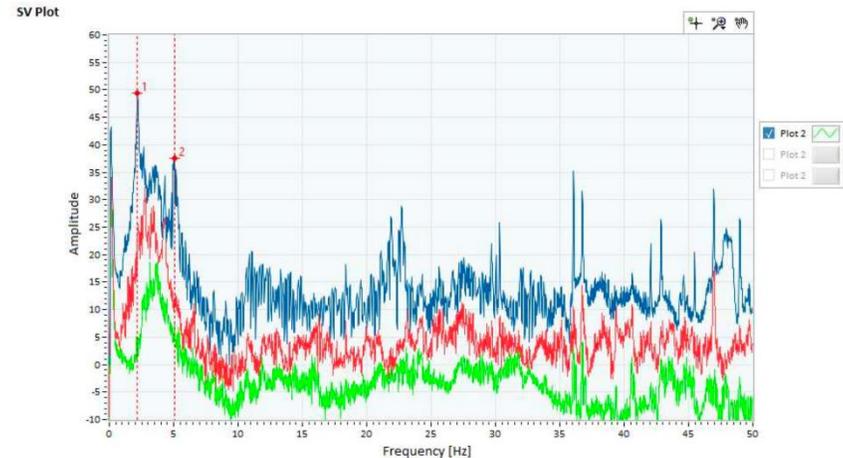
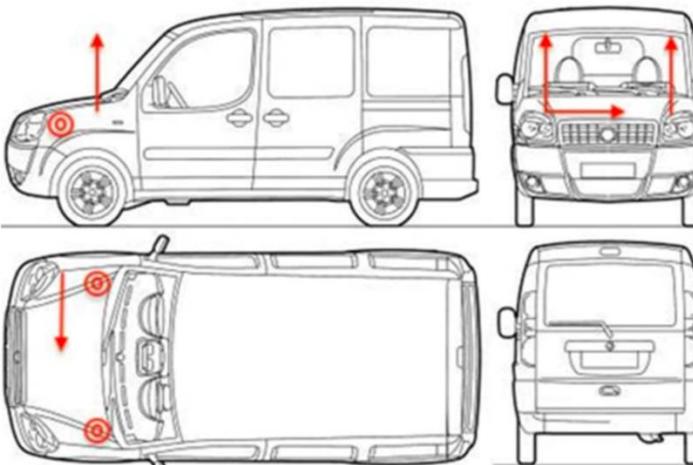
## Quadro delle attività

Crowd-sensing e monitoraggio strutturale	Analisi delle risorse di conoscenza offerte nel campo del monitoraggio strutturale dal crowd-sensing	I Semestre
Remote sensing e ispezioni	Analisi delle prospettive di integrazione ottimale delle informazioni per la validazione dei dati di remote sensing	II Semestre
Monitoraggio dinamico on site	Analisi prestazionale di sistemi di monitoraggio on site con sistemi di misura diretta e indiretta	III Semestre
Model updating e monitoraggio dinamico	Analisi delle prestazioni e prospettive di ottimizzazione di tecniche di model updating	IV Semestre in corso

## Filo conduttore del contributo:

- Fornire un supporto in ambiente digitale all'interpretazione delle misure satellitari;
- Delineare un processo di caratterizzazione in remoto delle strutture e delle infrastrutture;
- Esplorare risorse speditive per l'identificazione dinamica di infrastrutture – Misure su veicoli

## Misure indirette



TEST - 1			
FDD		Cov-SSI	
	f [Hz]	f [Hz]	$\xi$ [%]
1	2.22	2.19	2.26
2	5.02	5.07	2.12
TEST - 2			
FDD		Cov-SSI	
	f [Hz]	f [Hz]	$\xi$ [%]
1	2.20	2.20	2.54
2	5.10	5.18	1.36

Tabella 1 - Tabella riassuntiva frequenze naturali e rapporti di smorzamento.

### INTERPRETAZIONE DI DATI INTERFEROMETRICI SATELLITARI IN CHIAVE GEOLOGICO-TECNICA

#### Cosa abbiamo fatto:

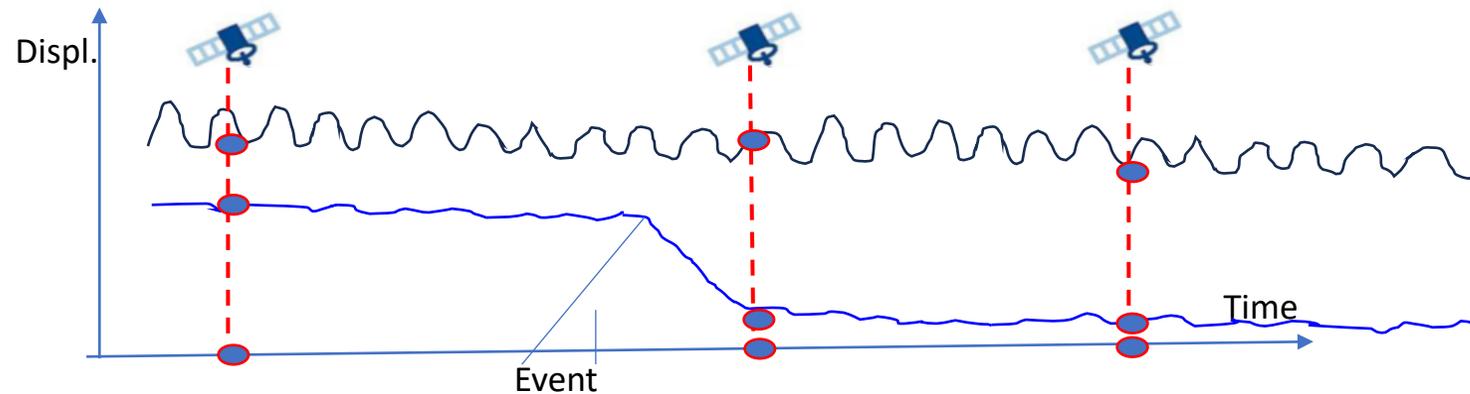
- Casistiche esaminate con altre UR (cfr. Ponte della Musica e zona di Valco San Paolo; vedi modelli 3D integrati del sottosuolo e delle opere)
- Stesura di alcuni paragrafi del capitolo 4 delle linee guida

#### Cosa stiamo facendo:

- trattazione di altre casistiche in area di Roma per interpretare la distribuzione spaziale di spostamenti e trend deformativi (cfr. caso mura Aureliane; effetti deformativi indotti da evoluzione di cavità sotterranee in area di Roma; effetti deformativi indotti da realizzazione di reti infrastrutturali in sottosuolo);
- sperimentazione metodologica di arricchimento di inventari di frana «ufficiali» tramite dati interferometrici a scala regionale e provinciale (area di sperimentazione Regione Lazio) con specifico riferimento al coinvolgimento di aree urbane e reti infrastrutturali

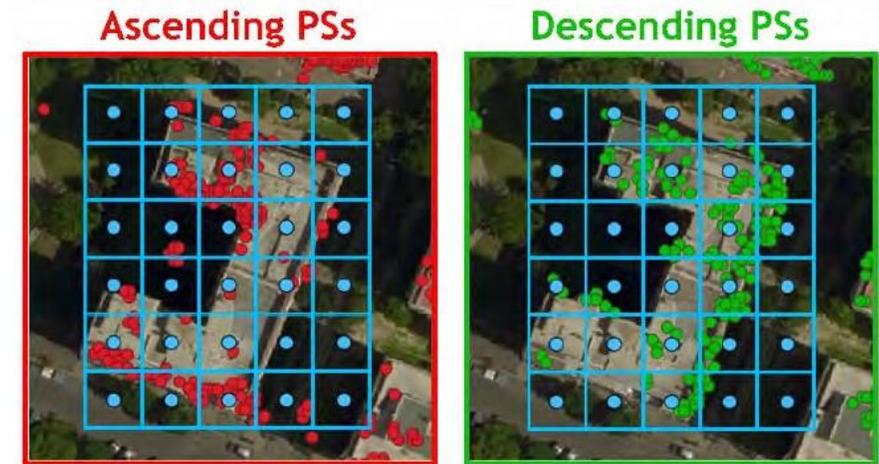
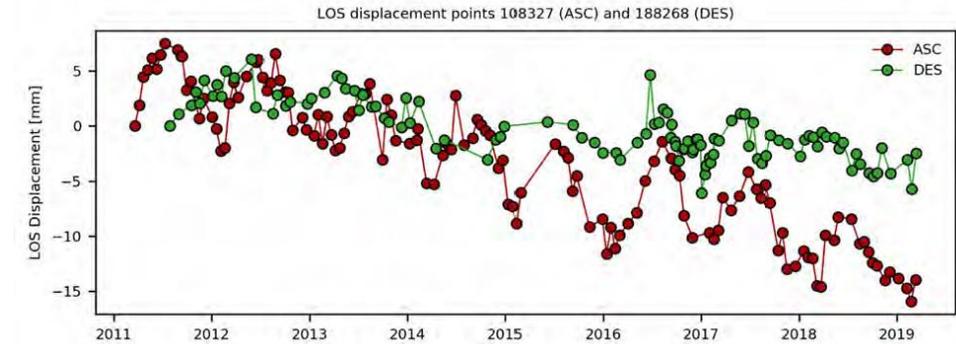
***Partecipanti: Carlo Esposito, Gabriele Scarascia Mugnozza, Paolo Mazzanti, Paolo Ciampi, Ebrahim Ghaderpour***

- **Elevato intervallo di tempo di rivisitazione dei satelliti**, dell'ordine mediamente delle settimane, che permette quindi di monitorare efficacemente solamente fenomeni deformativi lenti caratterizzati da un periodo di sviluppo ben superiore a quello di campionamento.



- **Elevata deformabilità strutturale per effetti termici** può limitare l'efficacia dei sensori satellitari.
- Gli **effetti della deformazione termica**, inoltre, devono essere opportunamente **considerati anche nelle operazioni di composizione vettoriale** dei dataset appartenenti alle due orbite ascendente e discendente.
- **Localizzazione del punto di misura (PS)**, caratterizzata dalle precisioni dell'ordine del metro (COSMO-SkyMed), che può variare in dipendenza delle caratteristiche dei sistemi SAR considerati, inferiore a quella dei sistemi classici di monitoraggio on-site.

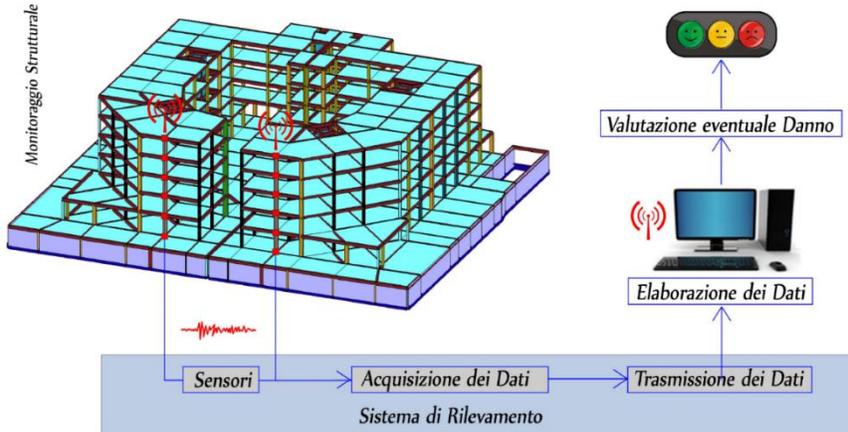
- La condizione per cui due geometrie di acquisizione satellitare (ad es. orbita ascendente e discendente dello stesso satellite) identifichino lo stesso punto di misura risulta verificata raramente. Per poter effettuare la composizione del moto è necessario procedere, a patto che sussistano le condizioni, a un **ricampionamento spaziale** ed eventualmente **temporale dei dati** ottenuti nelle due geometrie di acquisizione.
- **L'interpolazione spaziale** fornisce risultati effettivamente rappresentativi degli spostamenti reali solo quando la tipologia del fenomeno deformativo osservato è caratterizzata da una **distribuzione spaziale di spostamenti correlati** nello spazio.
- Difficoltà intrinseche di molti degli attuali sistemi satellitari ad acquisire informazioni lungo direzioni prossime alla direttrice N-S.
- In alcuni casi particolarmente sfavorevoli l'insorgere di fenomeni patologici su strutture o infrastrutture potrebbe avvenire anche per ampiezze di spostamento **inferiori all'errore associato alla misura satellitare**, diventa di fondamentale importanza poter prevedere misure e **sistemi di monitoraggio on-site** quando il monitoraggio satellitare indica che gli spostamenti rilevati sono tali da poter potenzialmente causare danni alle strutture.



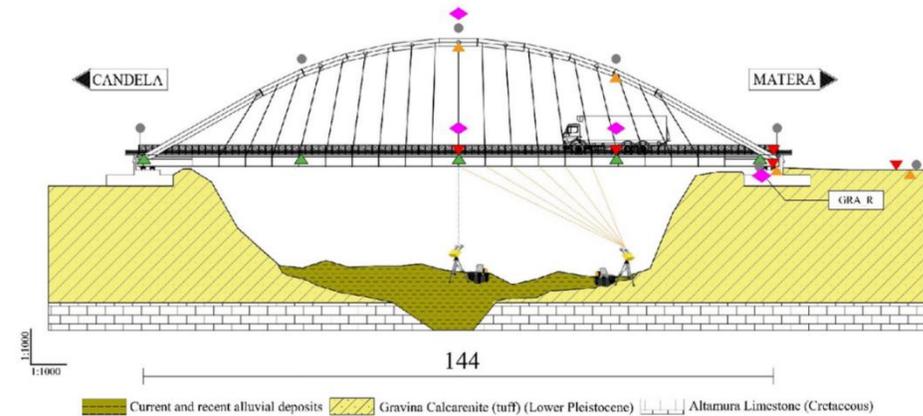
**RESAMPLING GRID**  
spatial resolution (10x10) m

## INTEGRAZIONE CON SISTEMI DI MONITORAGGIO ON SITE

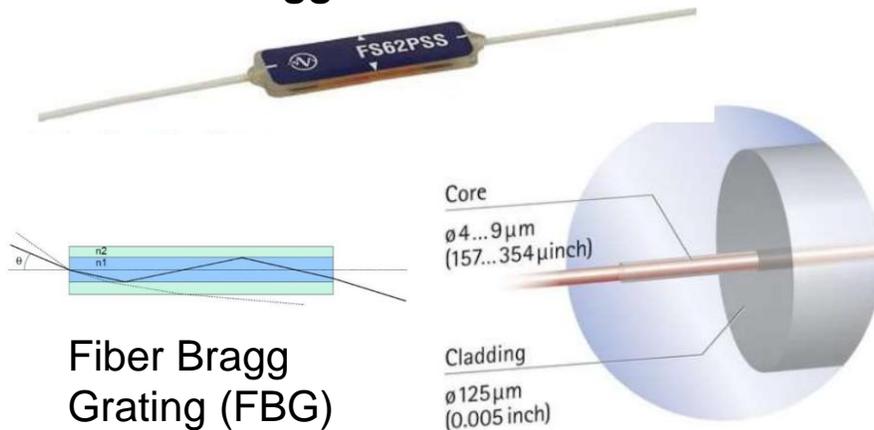
- Monitoraggio dinamico o vibrazionale**



- Monitoraggio strutturale con radar terrestri**



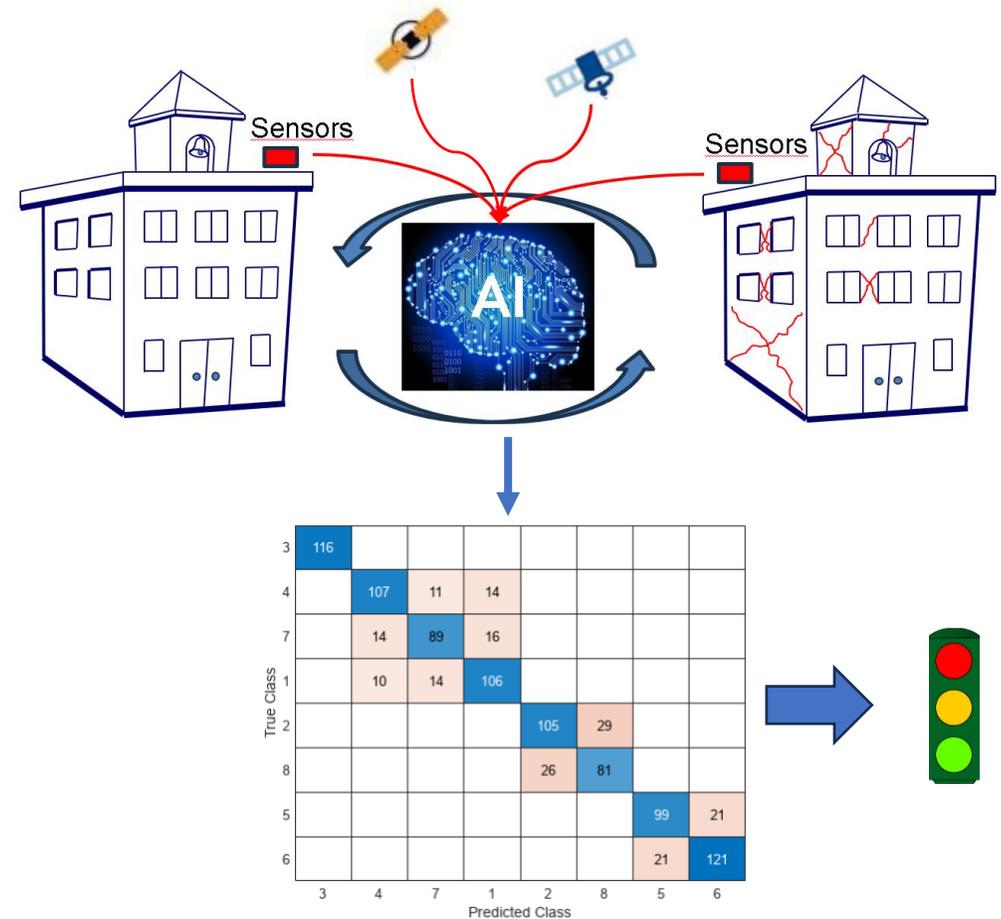
- Monitoraggio con Estensimetri ottici**



- Monitoraggio strutturale mediante tecniche di GNSS (Global Navigation Satellite System)**



- Integrazione dati forniti da costellazioni satellitari operanti in **bande di lunghezza d'onda differenti** (Analisi Multi-Frequenza);
- Sviluppo di Algoritmi (Machine Learning) per stimare lo stato di salute delle strutture a partire dall'integrazione dei dati satellitari con quelli on-site;
- Definizione di soglie di comportamento patologico basandosi anche su **modelli digitali** opportunamente addestrati (**Supervised Learning**), aggiornabili con i dati sperimentali;
- Definizione di tecniche di interpolazione spaziale **physic-based** per ovviare, ove ricorrono le condizioni, all'assenza di dati satellitari su porzioni di strutture;
- Rendere maggiormente robusto il sistema strategico di supporto alle decisioni;
- Filosofia di manutenzione: approccio **condition-based maintenance** sostituisce quello **time-based maintenance**.



**Progetto DPC\_ReLUIIS 2022-2024**  
**Esposizione delle attività svolte e prospettive**

**Roma, 7 novembre 2023**

**WP 6 – MONITORAGGIO E DATI SATELLITARI**  
**Proff. Marco SAVOIA, Felice Carlo PONZO**

**Grazie per la cortese  
attenzione!**