

CON IL
PATROCINIO



VII Giornata Nazionale della Prevenzione Sismica Programma Formativo



CONSIGLIO NAZIONALE
DEGLI ARCHITETTI
PIANIFICATORI
PAESAGGISTI
E CONSERVATORI

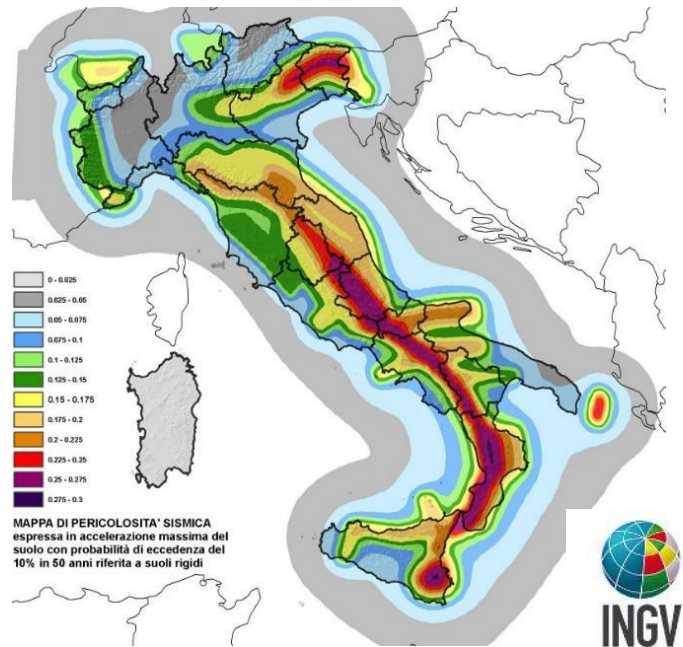
WEBINAR N.3 (3 CFP)
venerdì 28.02.2025 – ore 15:30
Beni culturali

Monitoraggio strutturale on site e remoto

Prof. Felice Carlo Ponzo
Dipartimento di Ingegneria
Università degli Studi della Basilicata



Pericolosità Sismica

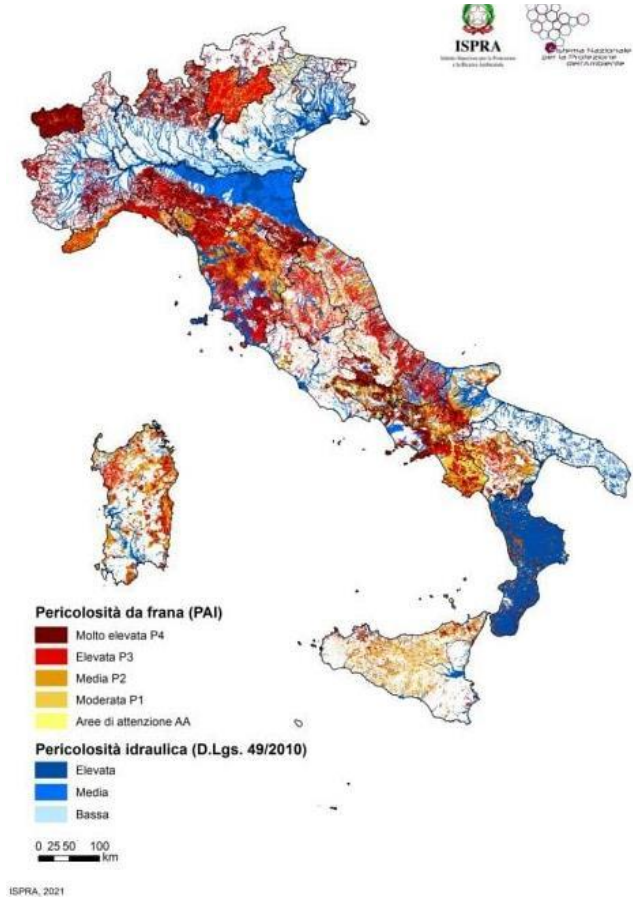


Oltre **30.000 eventi** registrati in Italia negli ultimi 1000 anni, di cui 220 intensità $\geq$ VIII MCS;

Invecchiamento costruzioni

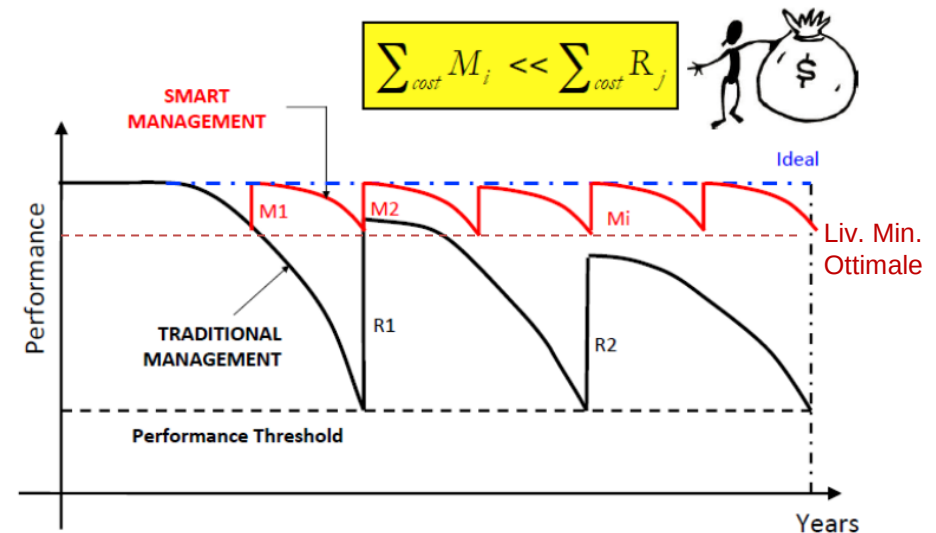
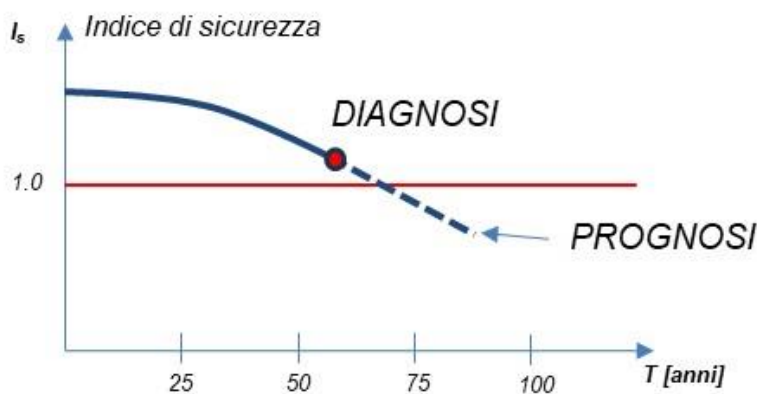
- **Edifici:** Circa il 72% degli edifici ha più di 40 anni. Inoltre, il 15% degli edifici è stato costruito prima del 1918. Interventi recenti sull'edilizia esistente hanno riguardato prevalentemente gli aspetti energetici.
- **Ponti e Viadotti:** Oltre il 50% delle infrastrutture di ponti e viadotti presenti in Italia supera i **50 anni di età**. Si tratta di strutture costruite durante il boom economico del dopoguerra, spesso senza norme specifiche sulla durabilità e la qualità dei materiali.

Pericolosità Idrico-Geologica



Sistemi di sorveglianza e monitoraggio

- **Consentire la valutazione delle condizioni dell'opera (Diagnosi)**, con riferimento alla sua idoneità all'uso previsto.
- **Stimare tendenze evolutive (Prognosi)**;
- **Pianificare interventi di manutenzione ordinaria e straordinaria**



THE INTERNATIONAL EMERGENCY MANAGEMENT SOCIETY
Newsletter - ISSUE 33 - July 2018

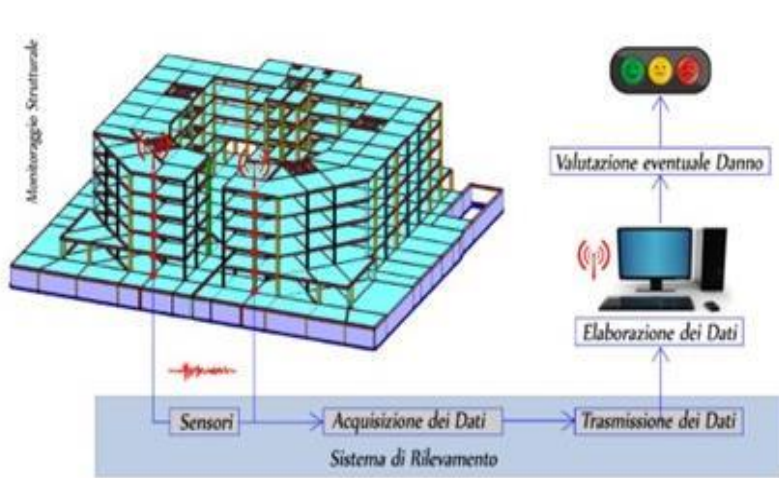
ISSN 2033-1614

A HOLISTIC APPROACH TO LONG TERM SHM OF TRANSPORT
INFRASTRUCTURES

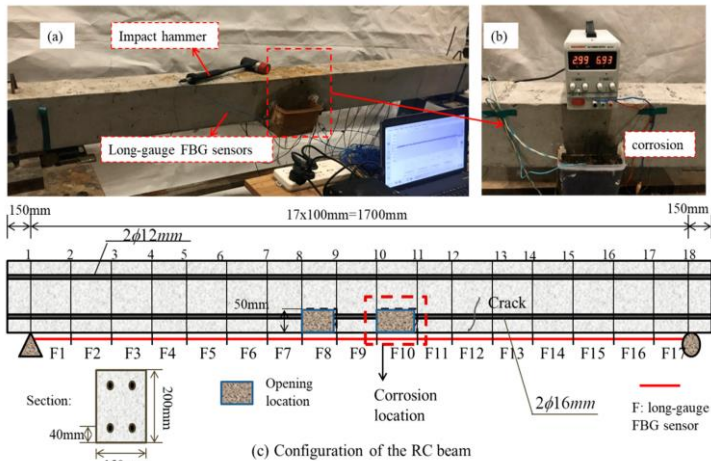
Vincenzo Cuomo¹, Francesco Soldovieri², Felice Carlo Ponzo³, Rocco Ditommaso³

MONITORAGGIO ON SITE

Monitoraggio dinamico o vibrazionale

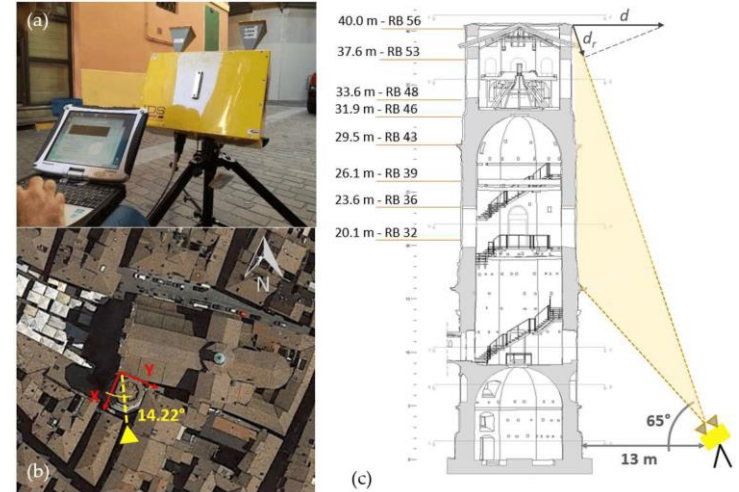


Monitoraggio con estensimetri ottici



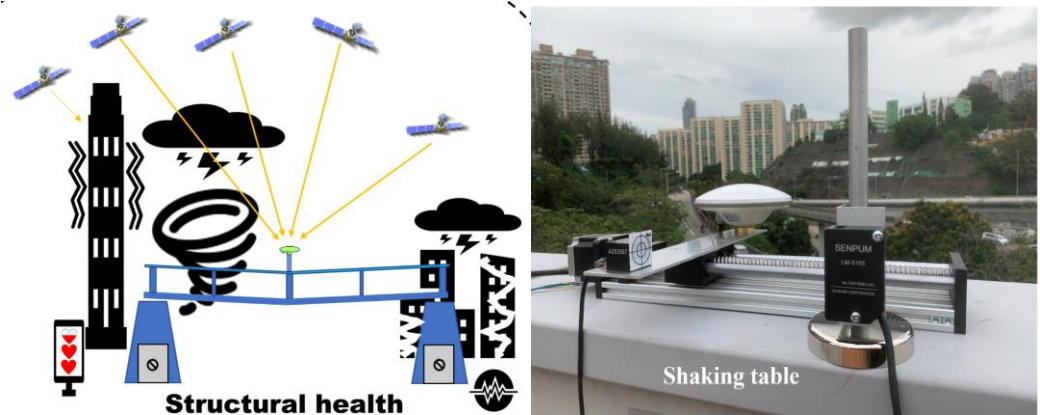
Cheng, Y.; Zhao, C.; Zhang, J.; Wu, Z. Application of a Novel Long-Gauge Fiber Bragg Grating Sensor for Corrosion Detection via a Two-level Strategy. *Sensors* **2019**, *19*, 954. <https://doi.org/10.3390/s19040954>

Monitoraggio strutturale con radar terrestre



Castagnetti, C.; Bassoli, E.; Vincenzi, L.; Mancini, F. Dynamic Assessment of Masonry Towers Based on Terrestrial Radar Interferometer and Accelerometers. *Sensors* **2019**, *19*, 1319. <https://doi.org/10.3390/s19061319>

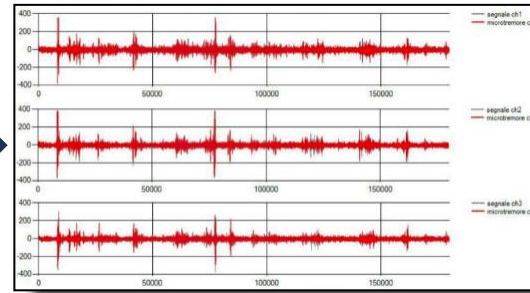
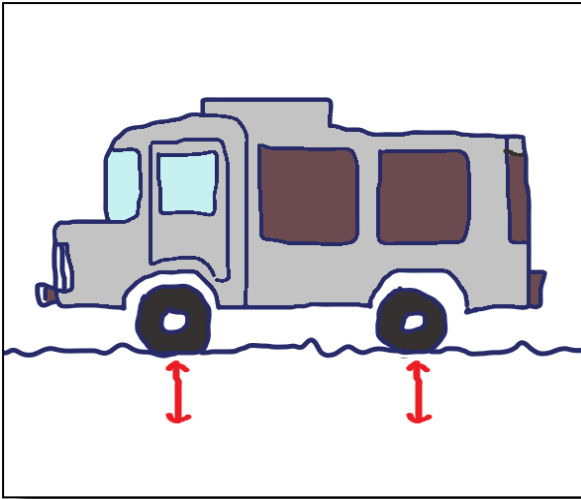
Monitoraggio strutturale mediante tecniche GNSS



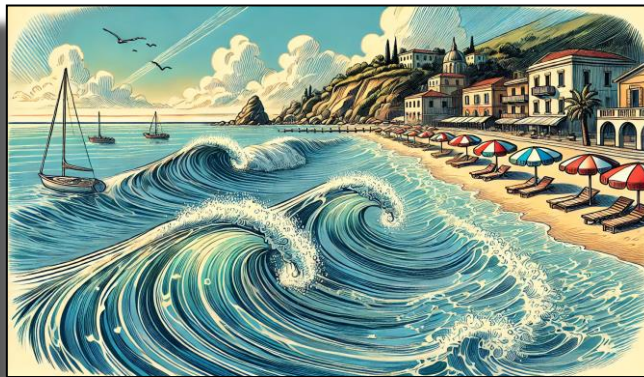
Qu, X.; Shu, B.; Ding, X.; Lu, Y.; Li, G.; Wang, L. Experimental Study of Accuracy of High-Rate GNSS in Context of Structural Health Monitoring. *Remote Sens.* **2022**, *14*, 4989. <https://doi.org/10.3390/rs14194989>

MONITORAGGIO DINAMICO ON SITE

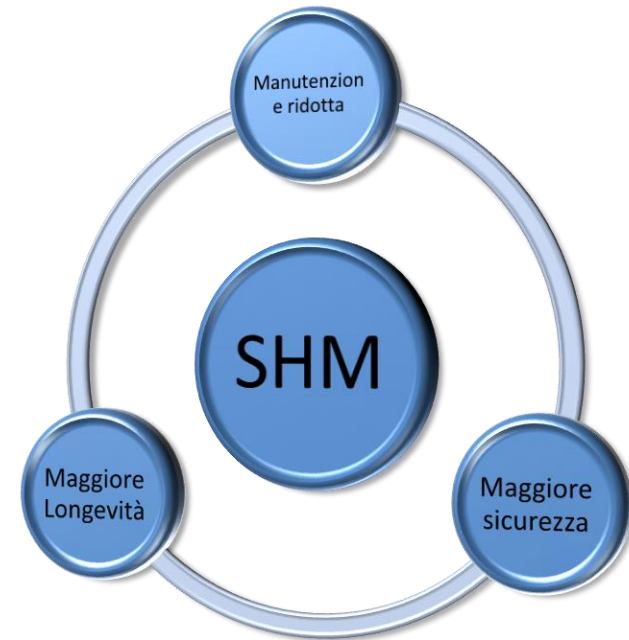
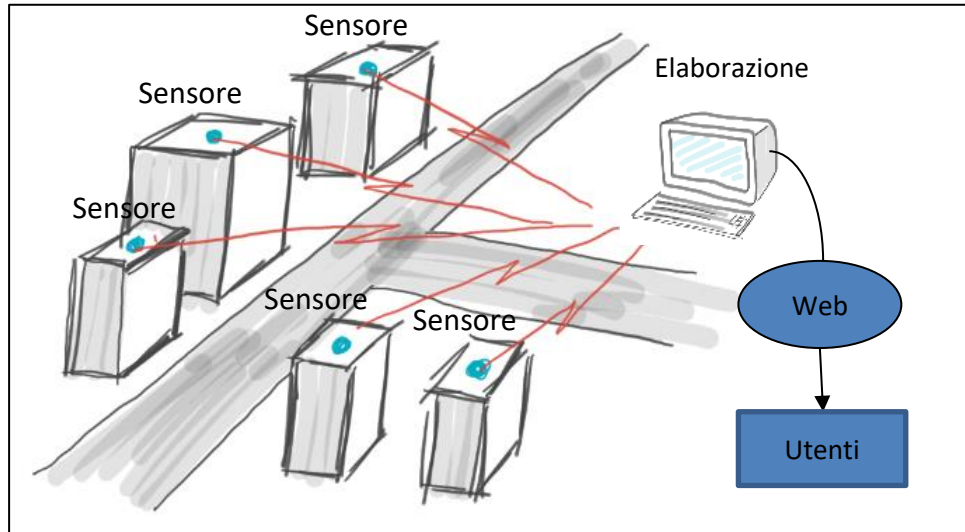
Durante il normale funzionamento le strutture vibrano. L'origine di tali vibrazioni è da attribuire a forzanti, che possono essere sia di origine naturale che antropica, e possono avere ampiezza molto variabile.



Nella maggior parte dei casi le vibrazioni sono impercettibili e misurabili solo con strumentazione adeguata (velocimetri/accelerometri)



TECNICHE DI IDENTIFICAZIONE DINAMICA E SISTEMI DI MONITORAGGIO



Valutazione delle caratteristiche dinamiche delle strutture

- Frequenze
- Deformate modali
- Caratteristiche dissipative globali

**Impronte digitali
della strutture**



Variazione nel tempo

- Valutazione presenza di danno e della sua evoluzione

- **Variazione delle frequenze (lenta e veloce)**

Le sole frequenze possono fornire indicazioni sull'entità del danno ma non sulla localizzazione

- **Variazione dello smorzamento modale**

L'identificazione del smorzamento comporta grandi deviazioni standard dei risultati e di conseguenza scarsa affidabilità

- **Variazione delle forme modali**

Forme modali superiori: MAC, COMAC, forme modali accoppiate a frequenze

- **Variazione delle curvature modali in campo lineare e non lineare**

Ricavate dalle accelerazioni o dalle deformazioni. Richiedono un numero elevato di sensori

- **Metodi basati sulle serie temporali**

Parametri dei modelli autoregressivi (AR, ARMA, ARMAX). Maggiore sensibilità al danno delle caratteristiche modali

Metodi Machine Learning

Neural Networks, Convolutional Neural Networks, Long Terms Memory Neural Network. Necessario apprendimento della rete neurale, non sempre di semplice realizzazione.

Comportamento Elastico-Lineare – Non è sempre possibile individuare in maniera corretta lo stato di danneggiamento dell'opera monitorata

Segnali

Stazionari

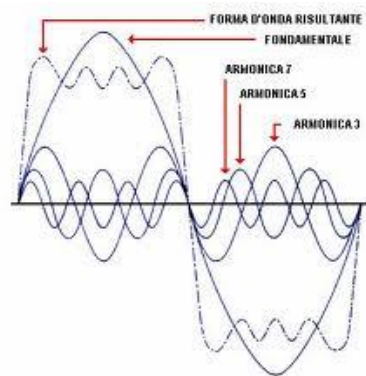
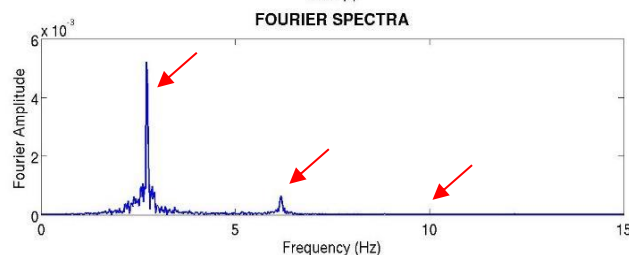
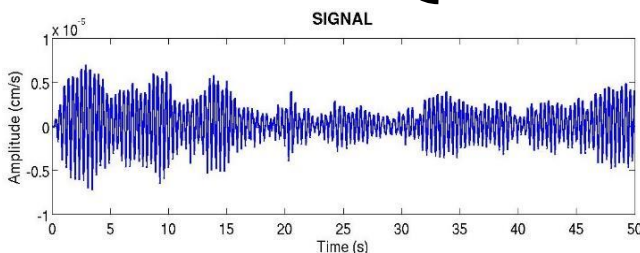
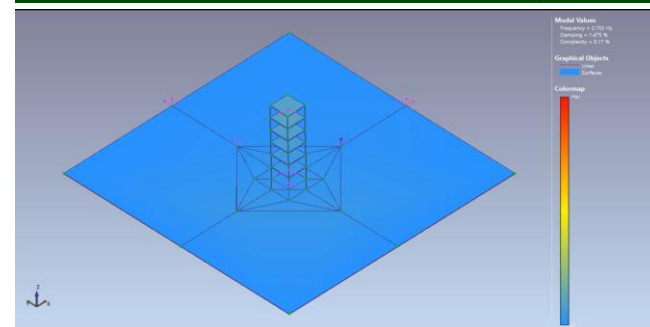
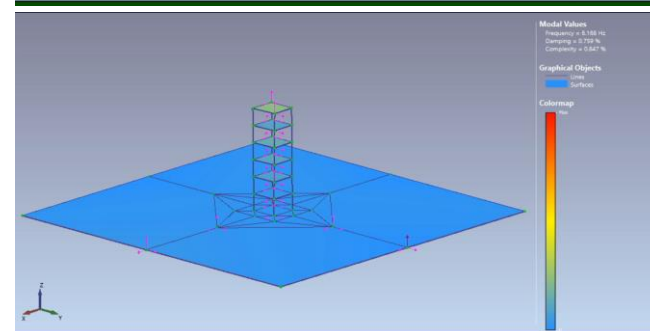
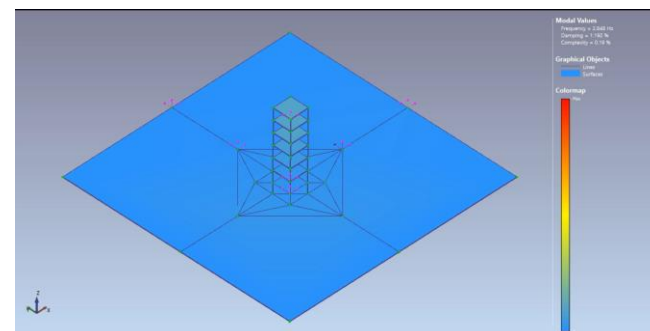
Trasformata di Fourier

$$H(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) \cdot e^{-i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t} dt$$



Analisi nel dominio delle frequenze: (Es. Funzioni di Trasferimento, OMA, EMA, etc.)

Deformate Modali



OMA			
Numero del modo	Frequenza [Hz]	Damping [%]	Descrizione del modo
Modo 1	2,710 ± 0,01	2,535	Traslazionale lungo X (WE)
Modo 2	2,855 ± 0,01	1,512	Traslazionale lungo Y (NS)
Modo 3	6,180 ± 0,01	2,997	Rotazionale intorno a Z

Comportamento Lineare e Non Lineare – È possibile individuare Anomalie Comportamentali legate all'insorgere di fenomeni di danneggiamento

Segnali
Non stazionari

Trasformata di Gabor

$$\text{STFT}(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) \cdot w(t - \tau) \cdot e^{-i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t} dt$$

Distribuzione di Wigner-Ville

$$\text{WD}(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h\left(\tau + \frac{t}{2}\right) \cdot h\left(\tau - \frac{t}{2}\right) \cdot e^{-i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t} dt$$

Trasformata Wavelet

$$F(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) \cdot w^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt$$

Trasformata Stockwell

**Analisi nel dominio
tempo-frequenza**

$$S(\tau, f) = \frac{|f|}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) \cdot e^{-\frac{(\tau-t)^2 \cdot f^2}{2}} \cdot e^{-i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t} dt$$

Ottima risoluzione sia nel
dominio del tempo che nel
dominio delle frequenze

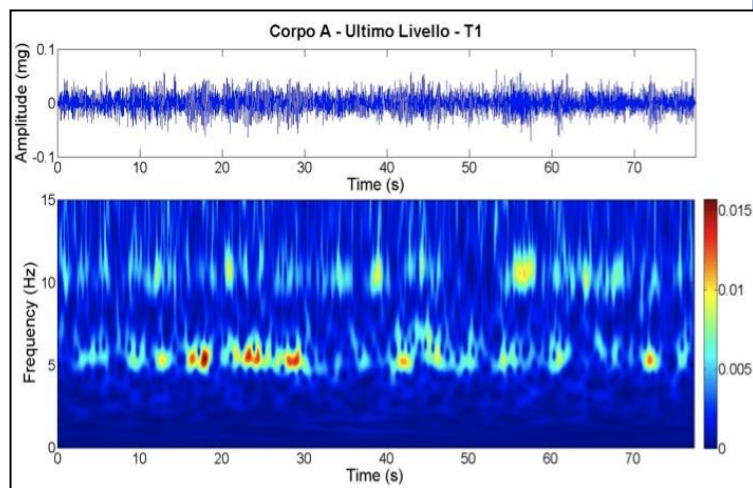
Ampiezze spettrali reali

Invertibilità della
trasformazione



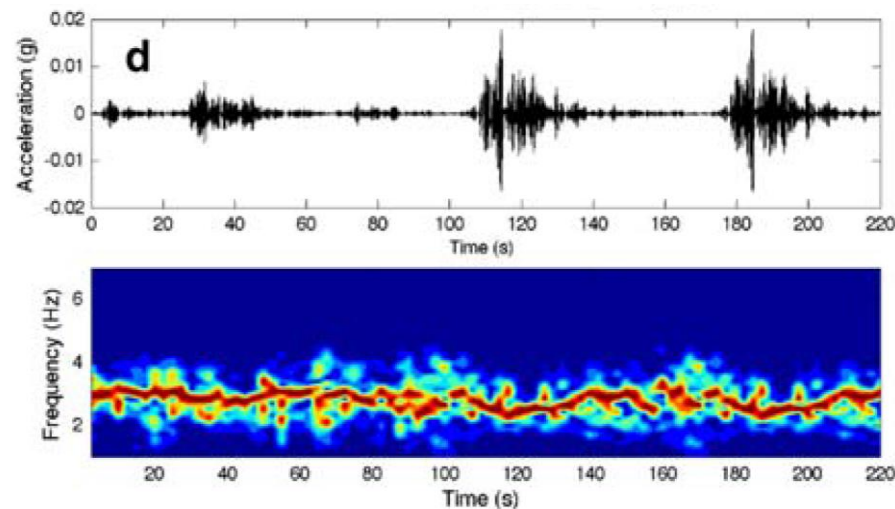
Comportamento Elastico-Lineare

Parametri modali costanti

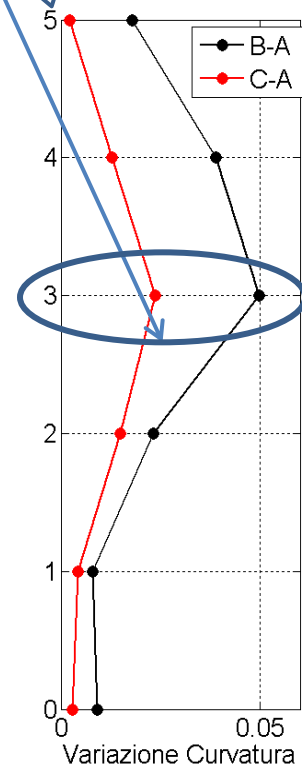
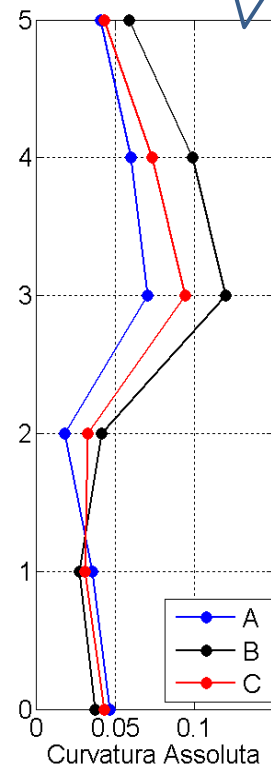
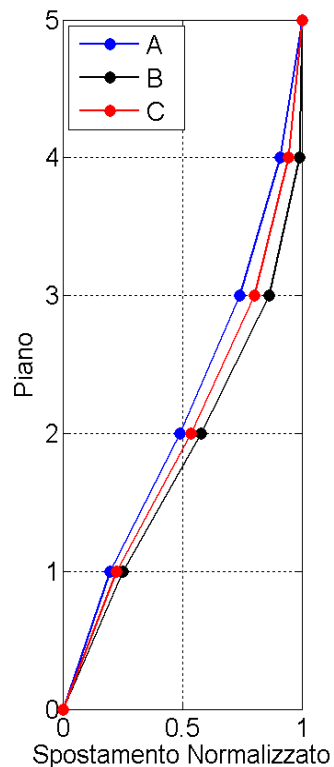
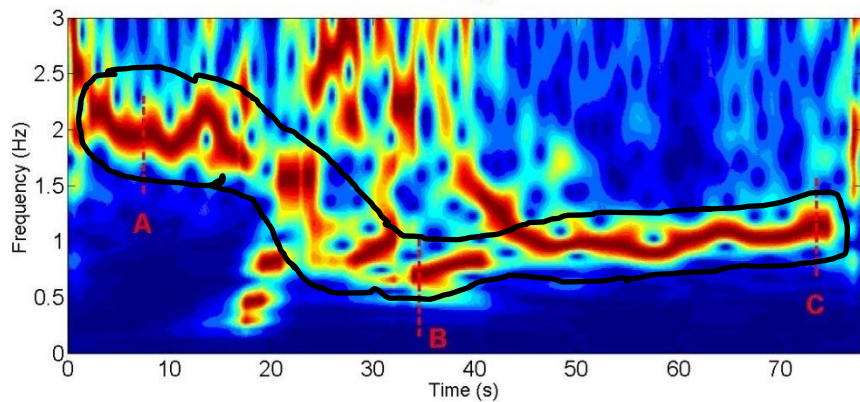
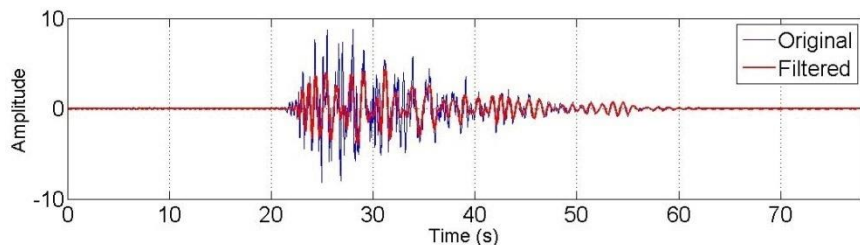
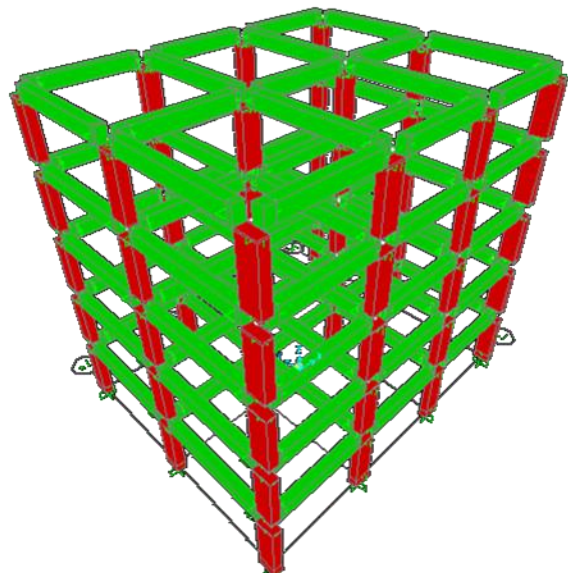


Comportamento Non Lineare

Parametri modali variabili



MONITORAGGIO DINAMICO STRUTTURALE



Livello
Danneggiato

*Filtro a Banda Variabile
attraverso il quale è possibile
isolare correttamente i singoli
modi di vibrare Non Lineari*

Bull Earthquake Eng (2012) 10:895–911
DOI 10.1007/s10518-012-9338-y

ORIGINAL RESEARCH PAPER

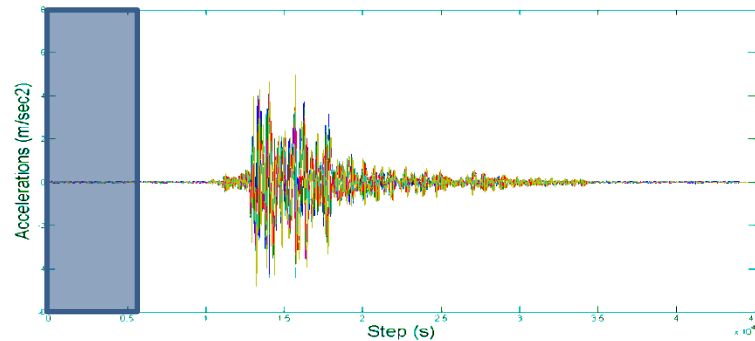
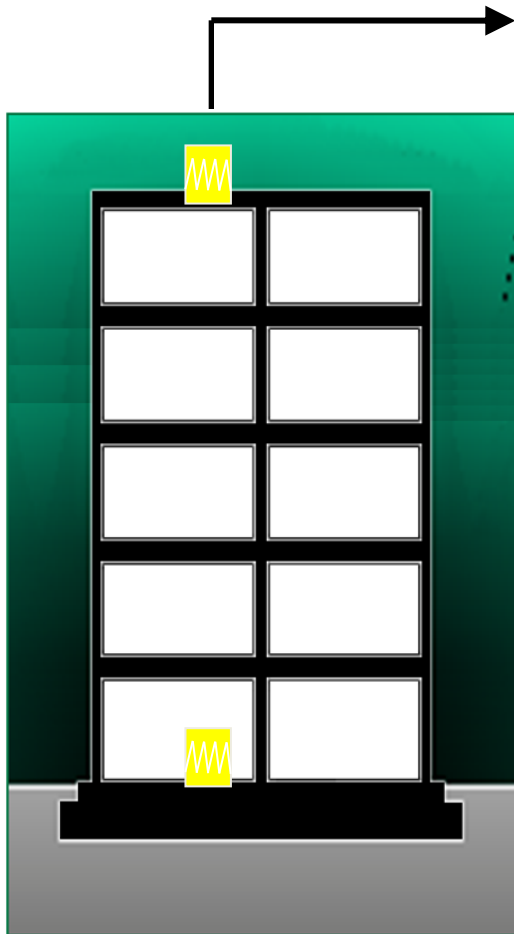
Analysis of non-stationary structural systems
by using a band-variable filter

Rocco Ditommaso · Marco Mucciarelli ·
Felice Carlo Ponzo

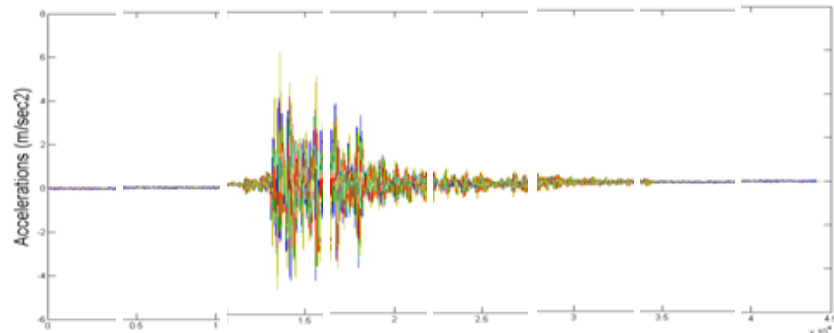
$$h_f(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\int_{-\infty}^{+\infty} [S(\tau, f) * G(\tau, f)] d\tau \right) \cdot e^{i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t} df$$

Short Time Impulse Response Function (STIRF)

Registrazioni accelerometriche acquisite al piano superiore e al piano inferiore con 20-30 s di registrazioni del rumore ambientale prima e dopo il terremoto.

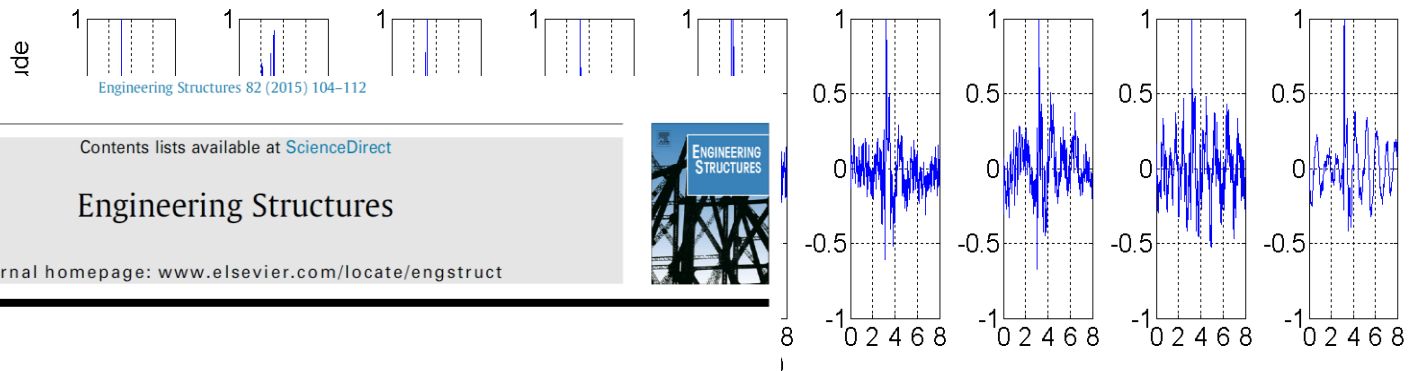


L'Analisi utilizza una finestra temporale mobile per suddividere i segnali del piano superiore e del piano inferiore.



Short Time Impulse Response Function

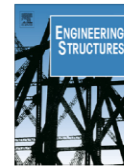
Valutazione della trasformata di Fourier di ogni IRF nel tempo e, per ogni finestra temporale, valutazione della frequenza fondamentale della struttura considerando il valore di frequenza corrispondente al massimo valore assoluto della trasformata di Fourier normalizzata



Contents lists available at ScienceDirect

Engineering Structures

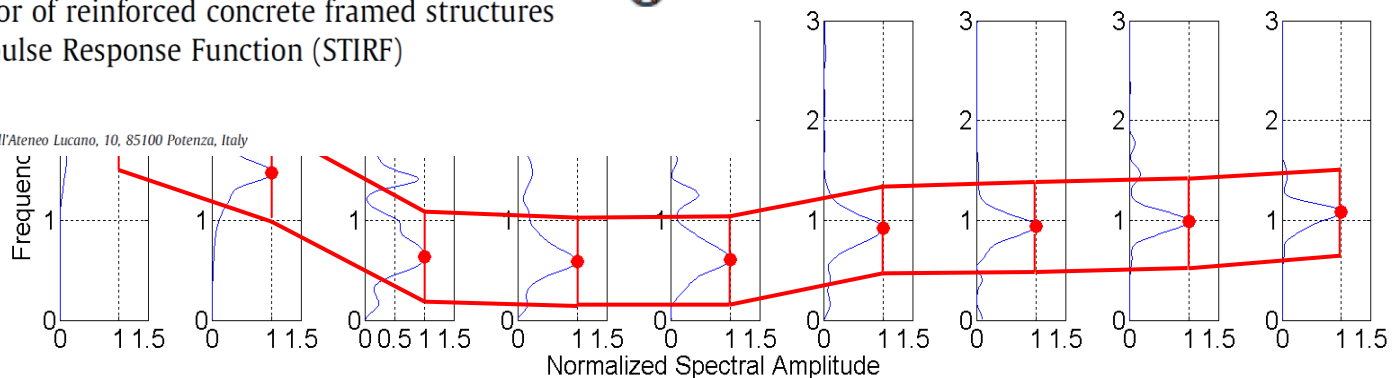
journal homepage: www.elsevier.com/locate/engstruct



Automatic evaluation of the fundamental frequency variations and related damping factor of reinforced concrete framed structures using the Short Time Impulse Response Function (STIRF)

R. Ditommaso*, F.C. Ponzo

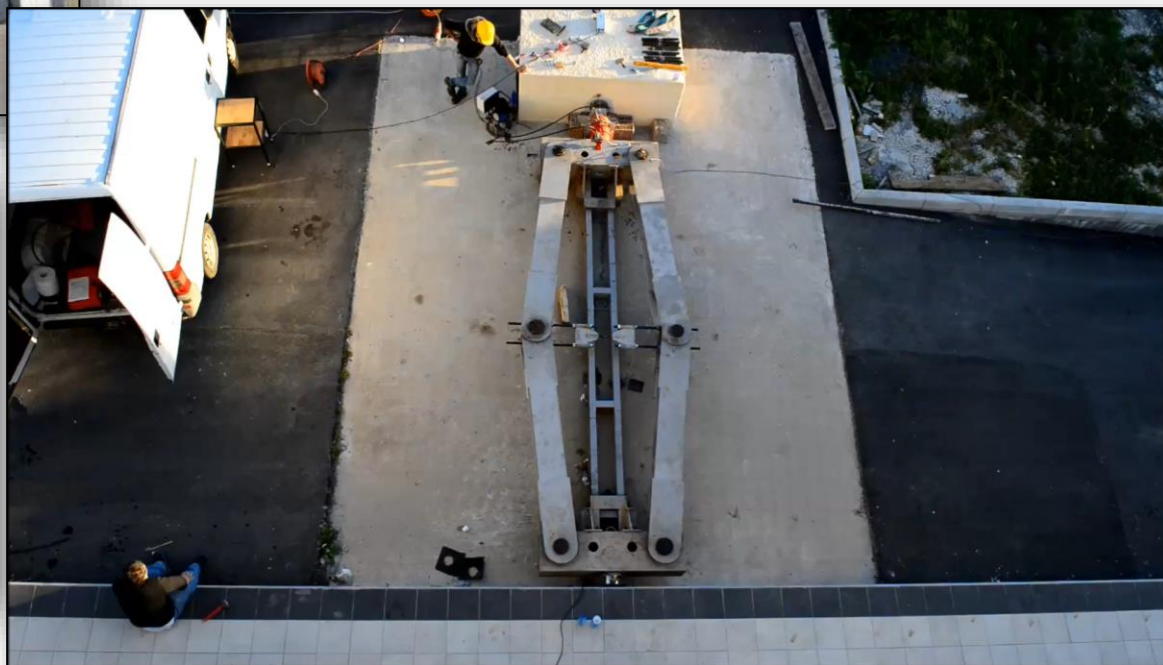
School of Engineering, University of Basilicata, Viale dell'Ateneo Lucano, 10, 85100 Potenza, Italy



MONITORAGGIO DINAMICO – IN FASE DI COLLAUDO



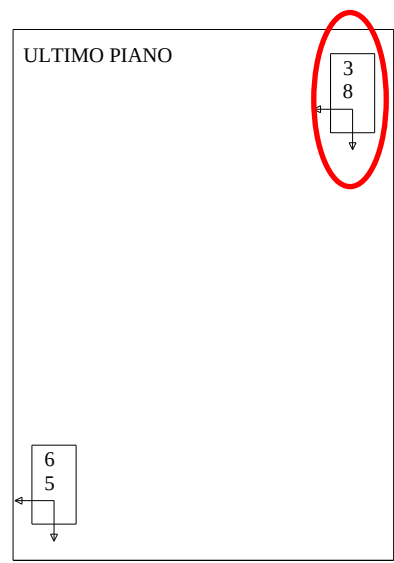
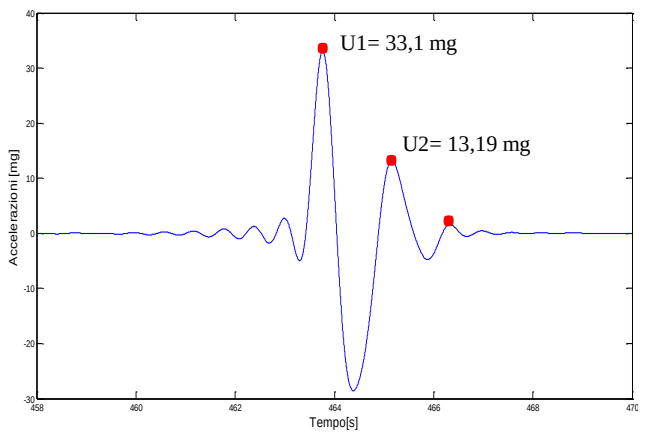
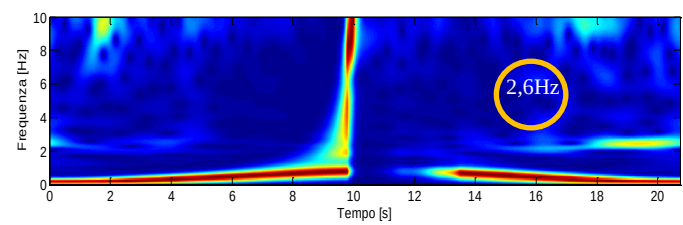
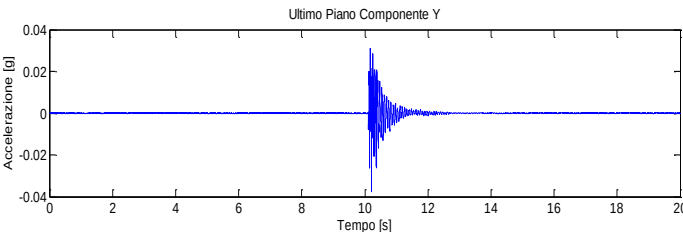
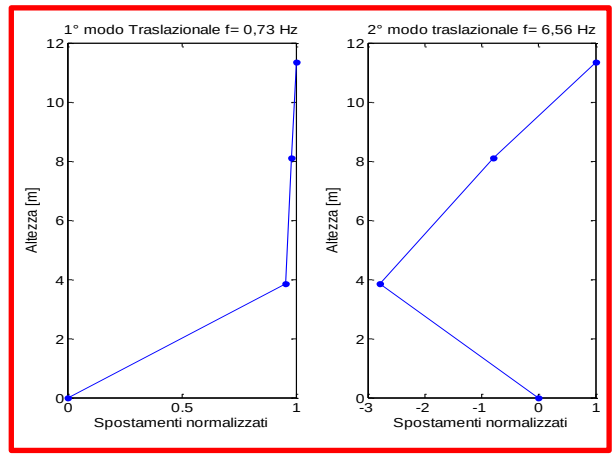
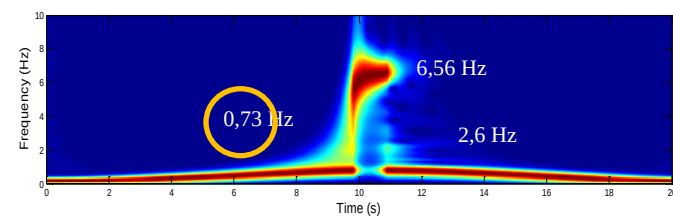
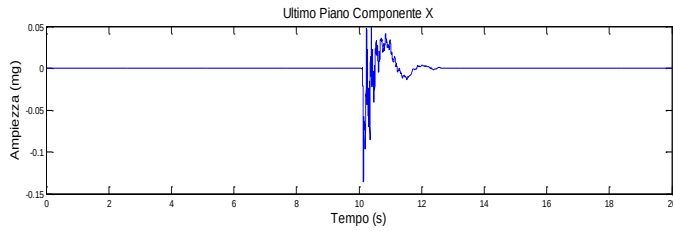
Edificio Industriale - Augusta (SR)



Attività sviluppata in collaborazione con l'Università di Catania – Prof. Giuseppe Oliveto

ESEMPI DI UTILIZZO DEI PARAMETRI DINAMICI STAZIONARI

1st and 2nd mode shapes

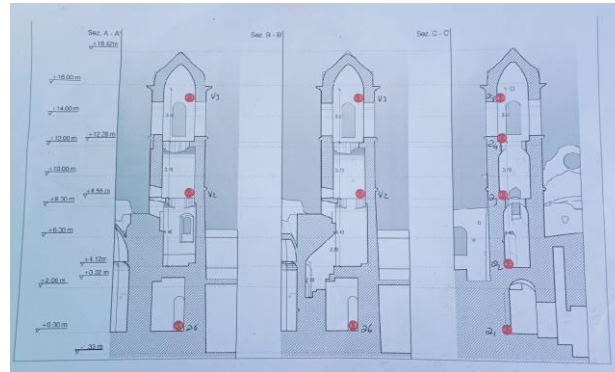


Sensor's position

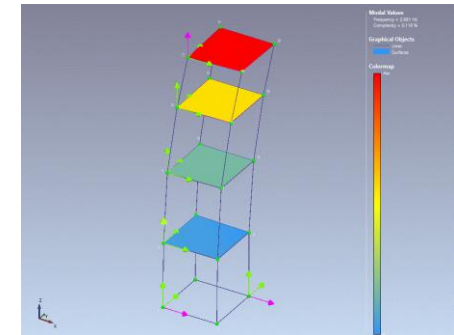
Damping

$\xi = [\log(U1/U2)] / (2 * \pi) = 14,64 \%$

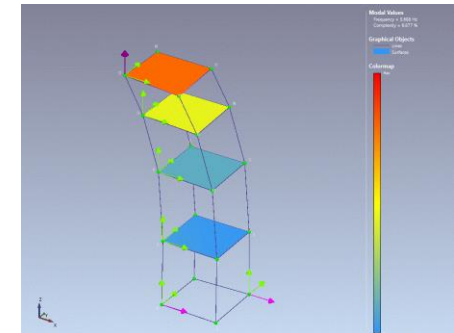
Analisi del comportamento di Torri medievali



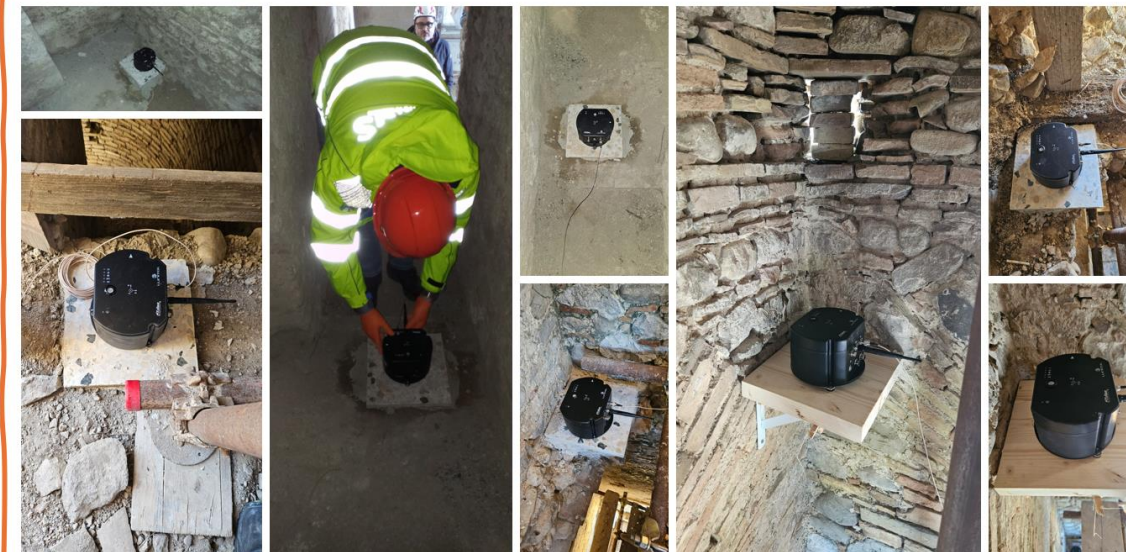
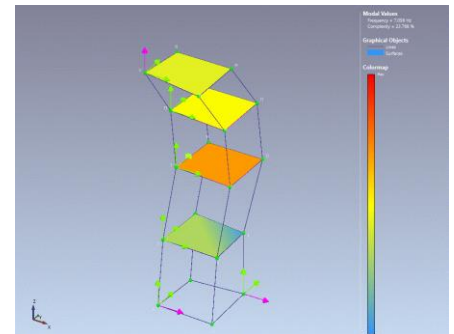
I Modo



II Modo



III Modo



Principali problematiche

- **La forzante è spesso un'azione non nota (traffico, vento...)**

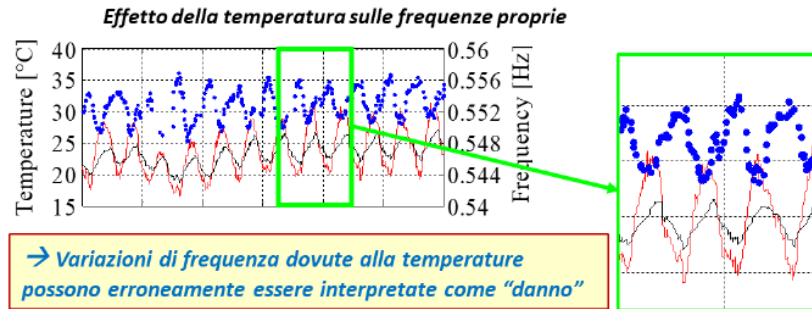
Si utilizzano metodi detti Operational Modal Analysis che considerano la forzante come un '**rumore bianco**' e richiedono finestre temporali sufficientemente lunghe → In caso di eventi estremi e di comportamento non lineare della struttura può essere opportuno utilizzare tecniche di analisi tempo-frequenza

- **Necessario operare per confronto con struttura integra**

struttura di riferimento, in alternativa digital twins opportunamente calibrati

- **La dinamica può essere influenzata dalla variazione di diversi parametri:**

massa (carichi accidentali), effetti ambientali (temperatura)



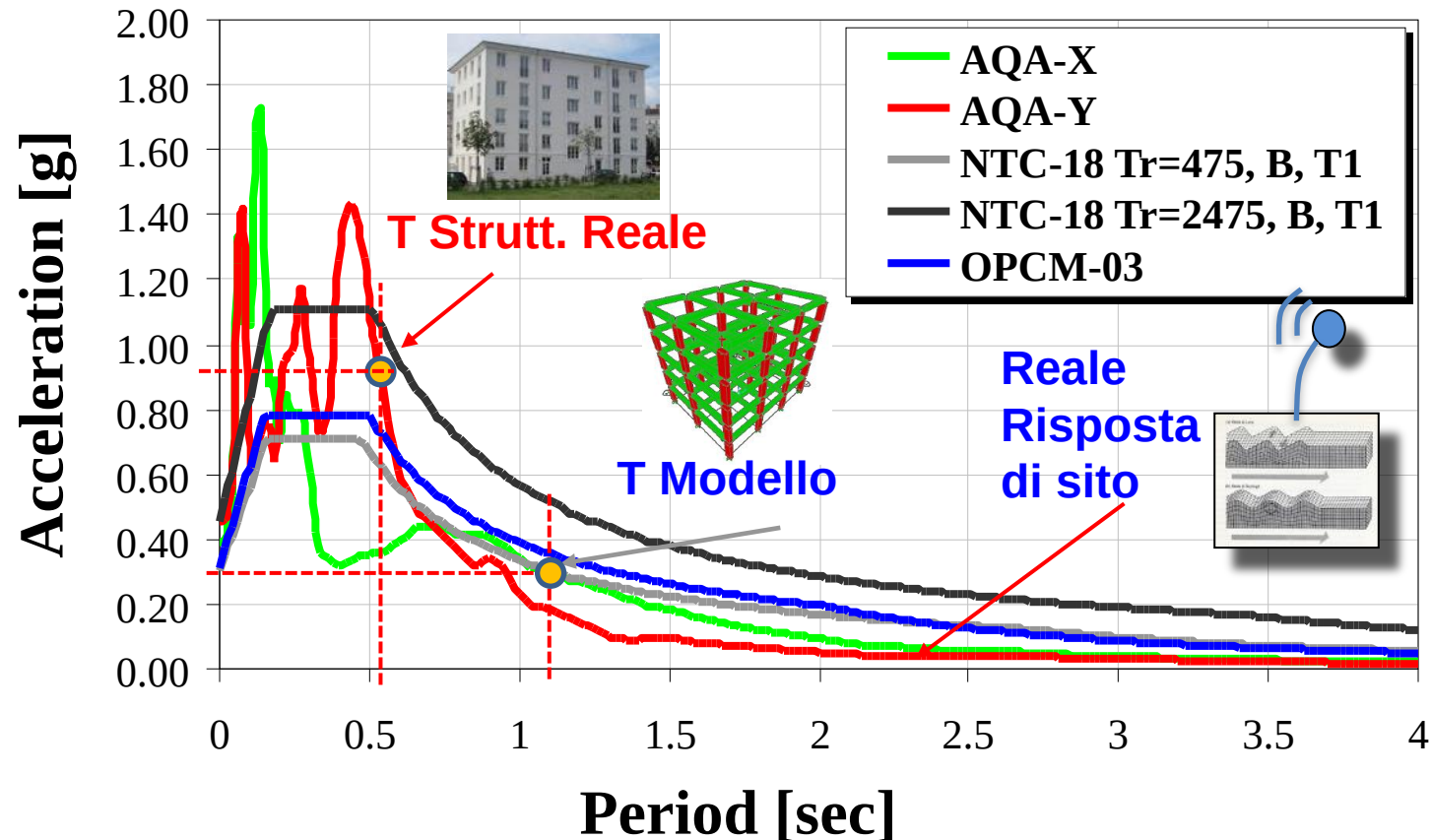
[1] Peeters, B.; Roeck, G.D. One-year monitoring of the Z24-Bridge: Environmental effects versus damage events. Earthq. Eng. Struct. Dyn. **2001**, 30, 149–171

- **Gli effetti del danno sulla variazione della prima frequenza non sempre sono chiaramente evidenti ed è difficile identificare l'occorrenza del danno**

definizione delle soglie di danno

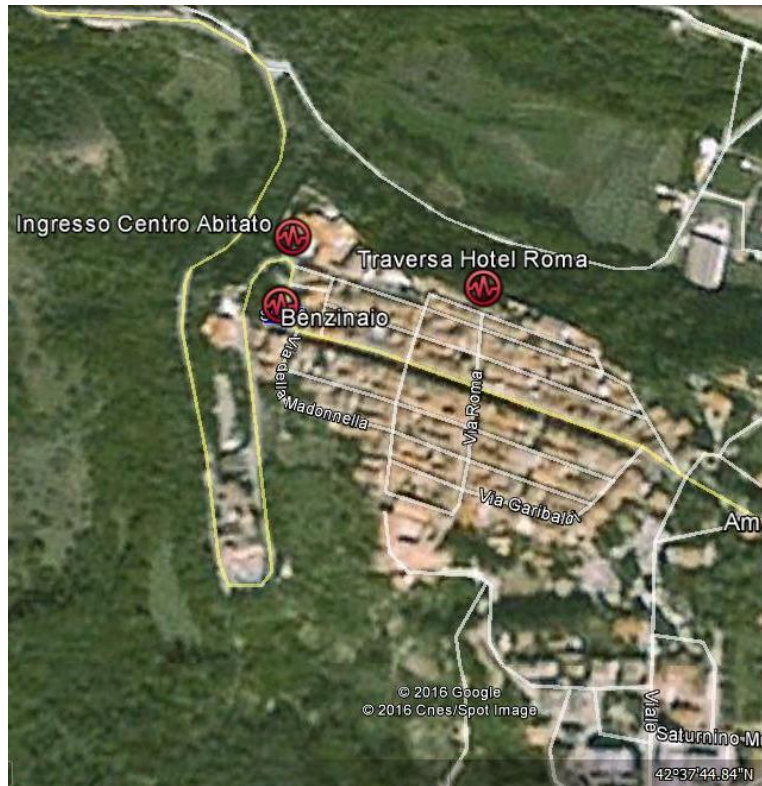
Nel processo di valutazione deterministica della vulnerabilità, trascurare il reale comportamento dinamico del suolo e della struttura può condurre a valutazioni ERRATE.

Pseudo-acceleration vs Period



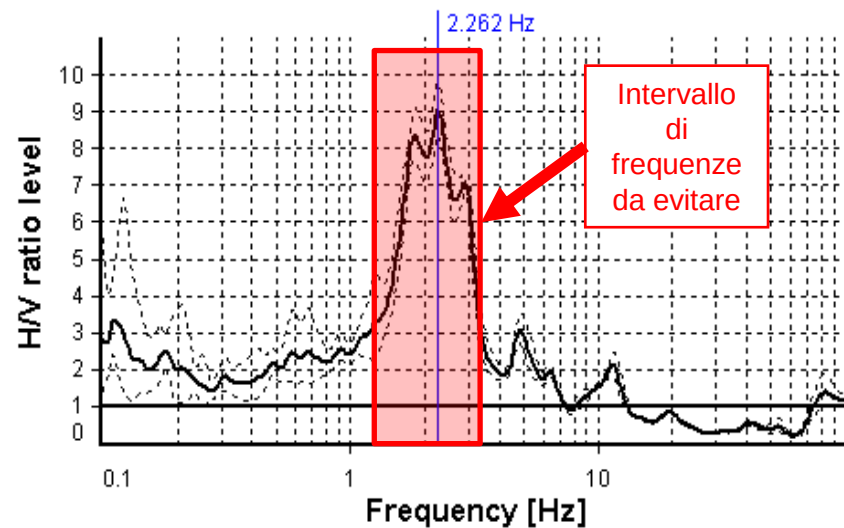
RISONANZA TERRENO - STRUTTURA

EFFETTI DI AMPLIFICAZIONE DEL SUOLO



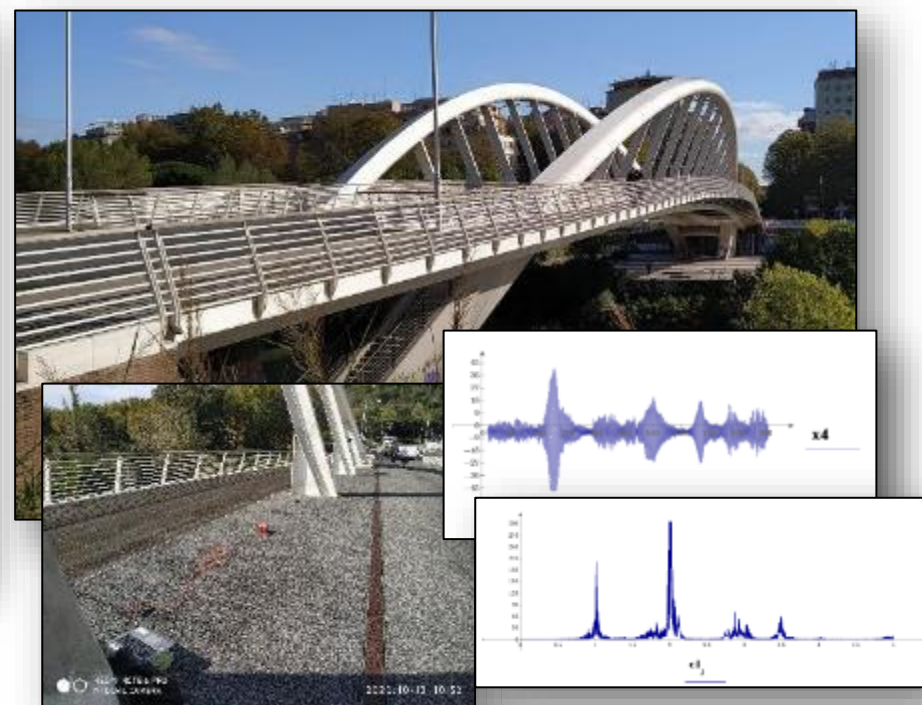
Google Earth

Traversa Hotel Roma - Amatrice



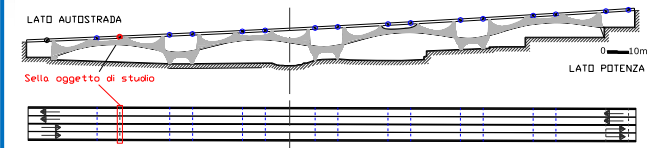
OBIETTIVI

- messa a punto di metodologie per il **monitoraggio di strutture, 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, e di sviluppare una piattaforma per l'interoperabilità con gli Enti gestori e la Protezione Civile.
- Identificare precocemente eventuali **stati di danno strutturale o malfunzionamenti** e in modo affidabile rispetto alle tradizionali operazioni di sorveglianza, per una corretta e più efficace **gestione** di eventuali **emergenze** e per la **manutenzione programmata**.



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

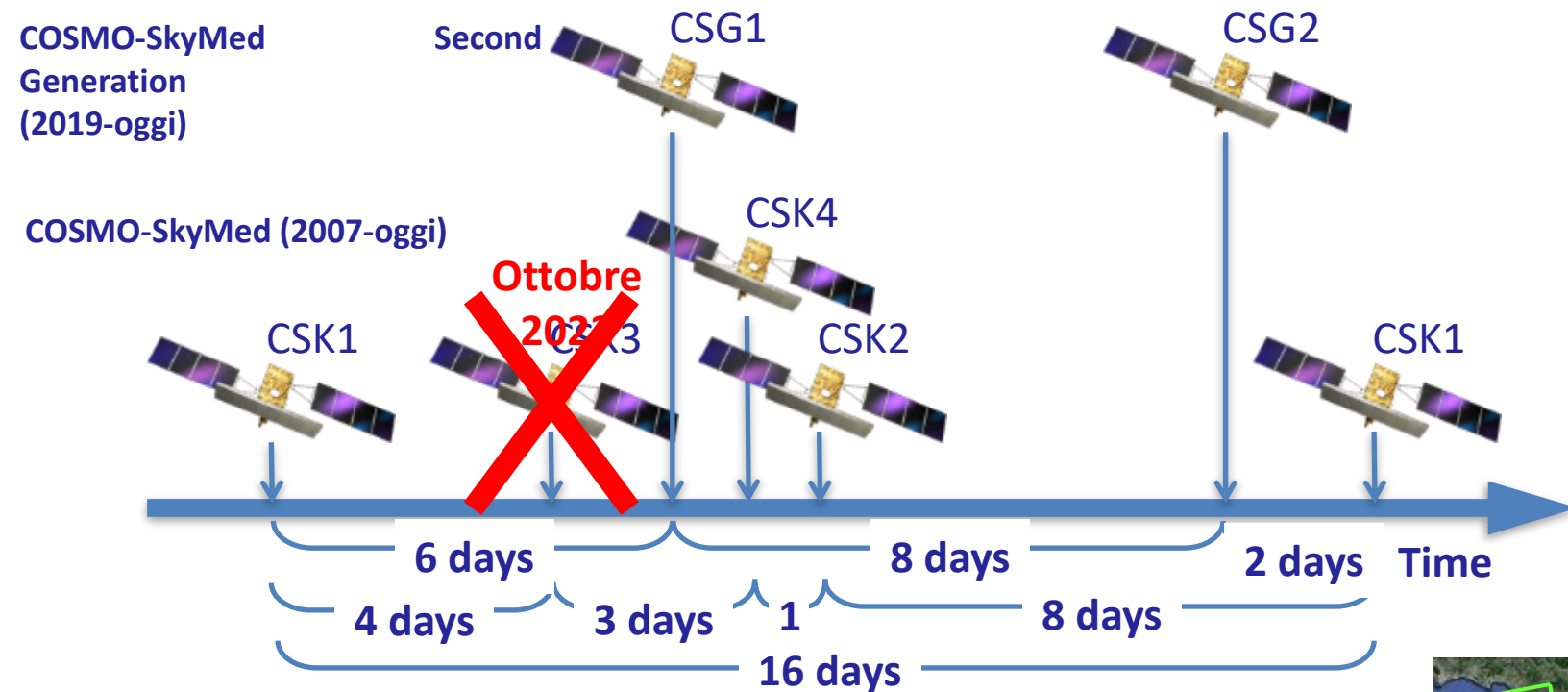
- Le misure interferometriche satellitari possono essere davvero utili a valutare il comportamento strutturale nel tempo?
- Quali tipi di movimenti possono essere rilevati?
- Quali tipi di costruzioni possono essere monitorate?
- Quali fenomeni di danno sulle costruzioni possono essere seguiti?
- Quali caratteristiche debbono avere tali misure, e dunque quali sensori, quali tecnologie interferometriche sono più efficaci e utili alla diagnosi strutturale?
- Quali comportamenti strutturali si possono effettivamente individuare con l'interferometria satellitare e monitorare nel tempo per poter effettuare una diagnosi utile (comportamento Fisiologico – Comportamento patologico)?
- **L'interferometria satellitare, adeguatamente interpretata, è da sola in grado di consentire una diagnosi corretta?**
- **Quali azioni complementari o successive di monitoraggio, modellazione e indagini in sito sono necessarie per arrivare a una diagnosi strutturale corretta?**





Su gentile concessione di
Riccardo Lanari e
Manuela Bonano

COSMO-SkyMed di Prima e Seconda Generazione (CSK/CSG)

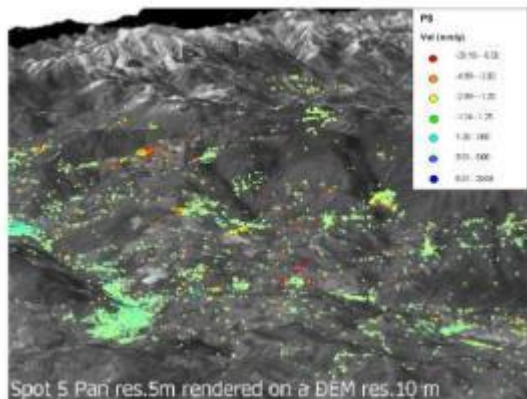


- Risoluzione spaziale (StripMap): 3 m x 3 m
- Copertura (StripMap): 40 km x 40 km
- Banda X ($\lambda \sim 3.1$ cm)
- Missione duale (civile - militare)

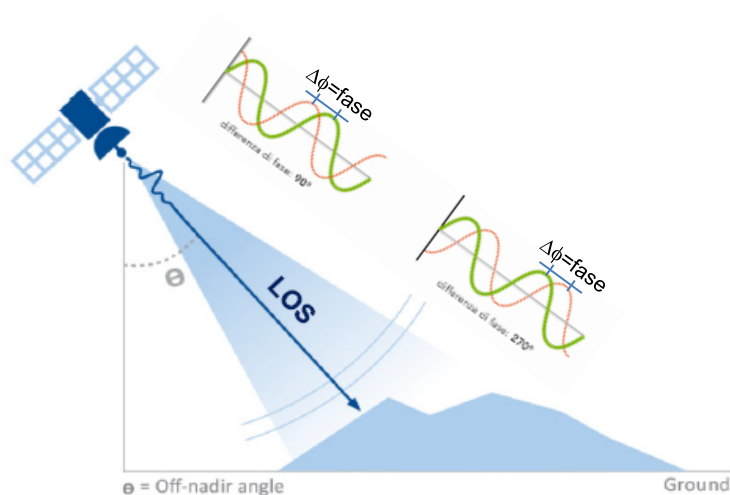


Su gentile concessione dell'Agenzia Spaziale Italiana (ASI) per l'utilizzo dei dati Cosmo SkyMed e del CNR Irea per le elaborazioni con la tecnica DinSAR – SBAS (Riccardo Lanari e Manuela Bonano)

➤ Frane a cinematica lenta



La tecnologia radar satellitare



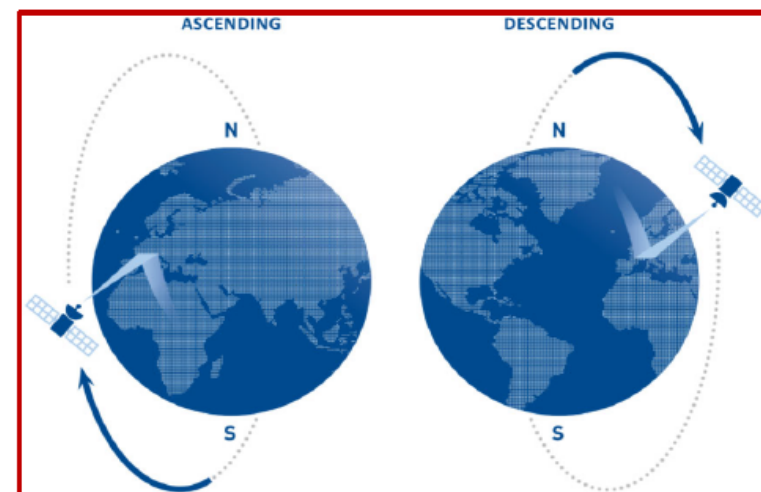
I satelliti **SAR** (*Synthetic Aperture Radar*) sono equipaggiati con emettitori ed antenne che permettono di **acquisire immagini radar della superficie terrestre**.

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.

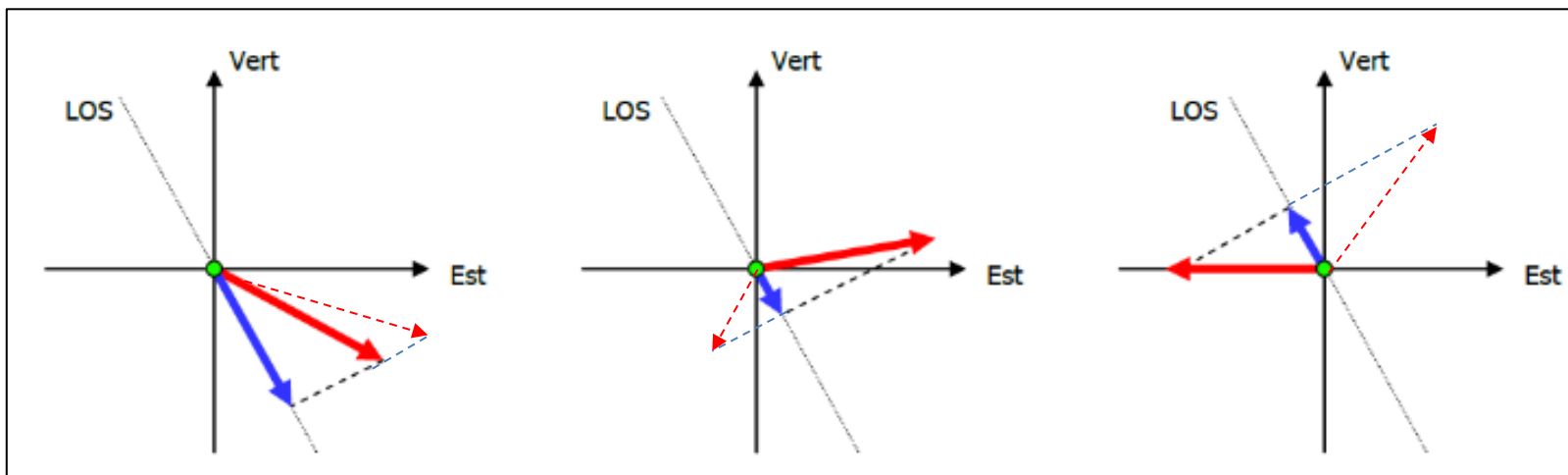
Il satellite emette il segnale lungo una direzione denominata «**linea di vista**» o **LOS** (*Line of sight*), caratterizzata da una certa **inclinazione θ** rispetto alla **verticale**.

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

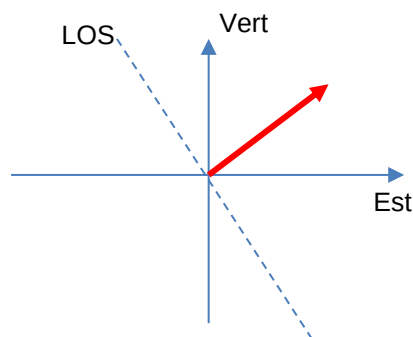


INTERPRETAZIONE ED ELABORAZIONE DEI DATI DA SATELLITE

Conoscere lo spostamento, o la velocità di deformazione, lungo la LOS in una sola geometria non è sufficiente per identificare univocamente lo spostamento reale del punto poiché più spostamenti reali possono dare lo stesso spostamento lungo la LOS.



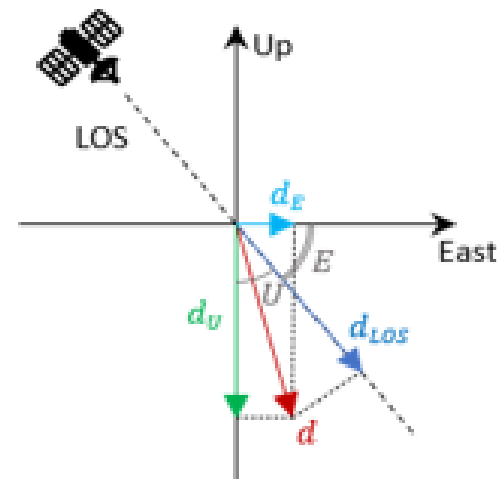
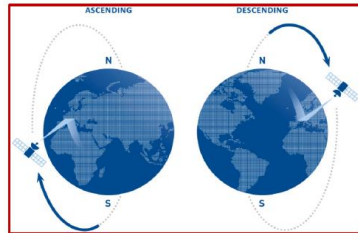
Alcuni spostamenti
potrebbero essere
non rilevabili



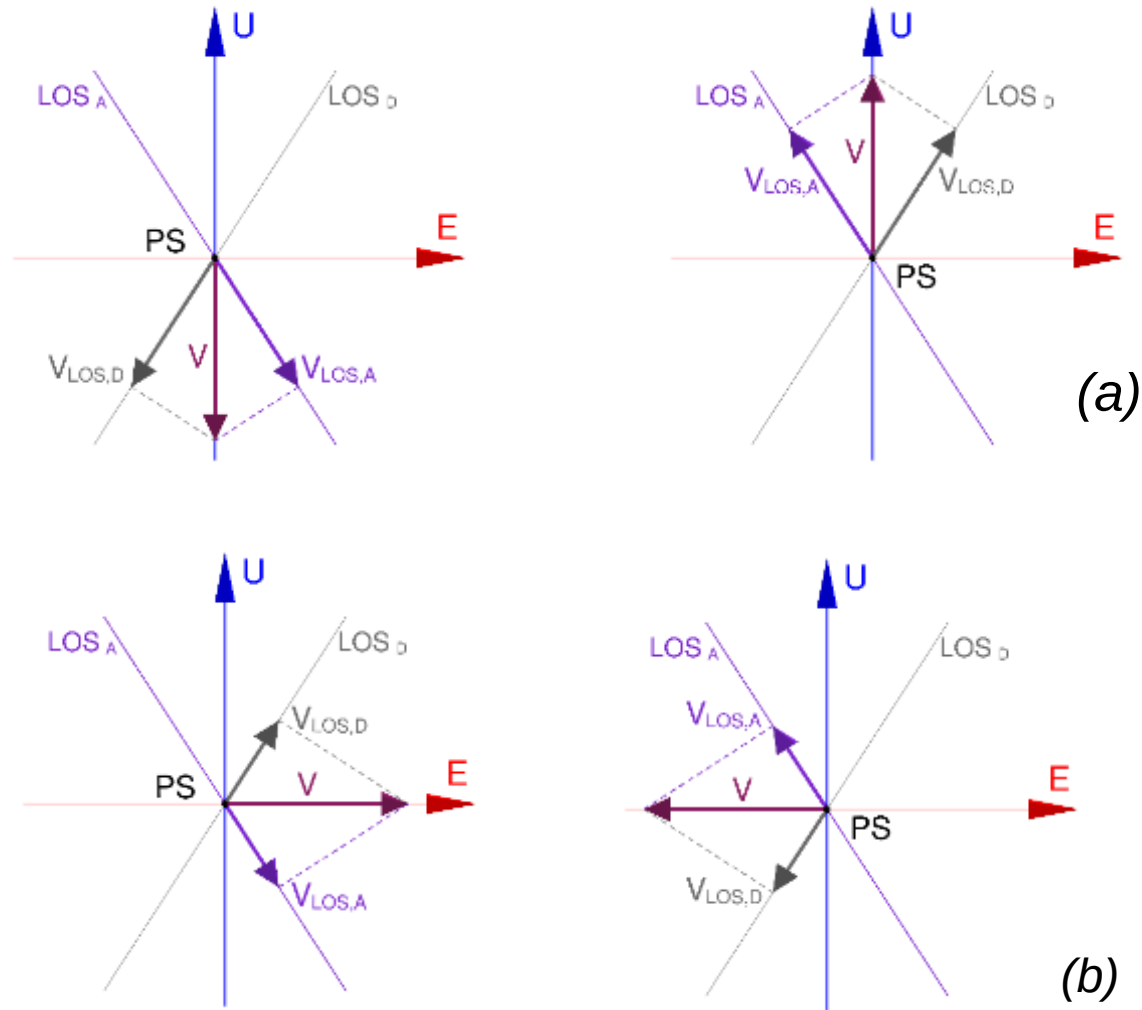
INTERPRETAZIONE ED ELABORAZIONE DEI DATI DA SATELLITE

Per conoscere lo spostamento reale è necessario che per lo stesso punto si disponga dei dati sia per la geometria ascendente che discendente. Il vettore spostamento nelle due geometrie può essere espresso in generale come:

$$\begin{cases} S_{LOS,ASC} = S_{E-W}(\cos E)_{ASC} + S_{N-S}(\cos N)_{ASC} + S_{VERT}(\cos U)_{ASC} \\ S_{LOS,DISC} = S_{E-W}(\cos E)_{DISC} + S_{N-S}(\cos N)_{DISC} + S_{VERT}(\cos U)_{DISC} \end{cases}$$

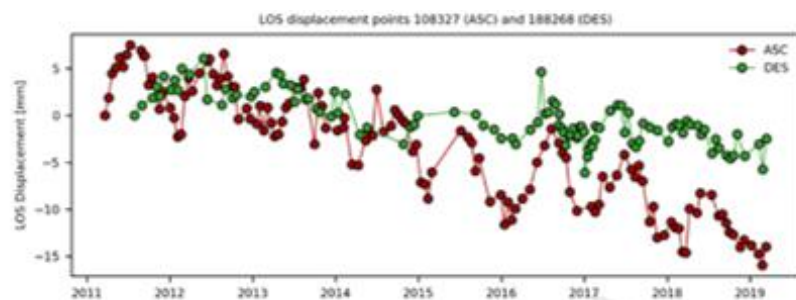


Il numero di incognite (S_{E-W} , S_{N-S} e S_{VERT}) è superiore a quello delle equazioni e quindi esso non è risolvibile. Tuttavia, siccome per la geometria di acquisizione del satellite la componente del moto lungo la direzione S-N / N-S non è rilevabile, si assume ($S_{N-S} = 0$) e si risolve il precedente sistema in modo da risalire all'entità delle componenti del moto in direzione E-O (S_{E-O}) e in direzione verticale (S_{VERT}).



Esempio di scomposizione del vettore di velocità media di spostamento reale in geometria ascendente e discendente. a) velocità verticale; b) velocità orizzontale.

Ricampionamento temporale



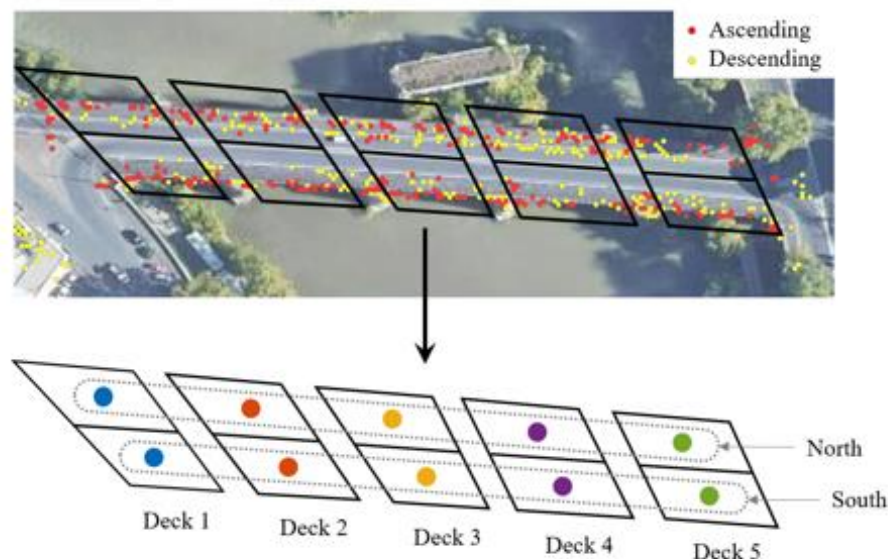
Pixel orbita ascendente



Pixel orbita discendente



Ricampionamento spaziale



PONTE PALATINO:



Politenico di Milano

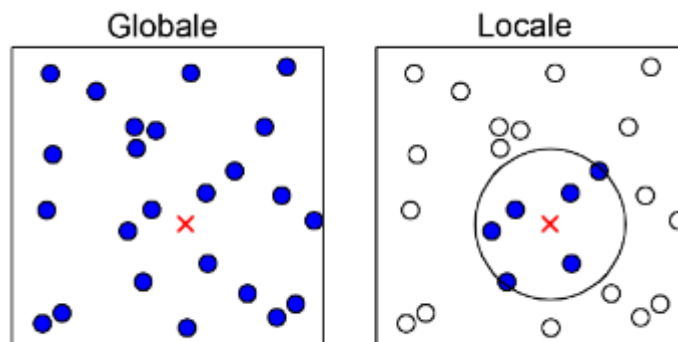
Le tecniche di ricampionamento spaziale possono essere impiegate per ottenere un insieme di punti referenziati spazialmente, cui sono associate le informazioni sugli spostamenti lungo la LOS per entrambe le geometrie di acquisizione

Interpolazione Spaziale

- Un'interpolazione spaziale di dati SAR che ricadono in una certa area ha come obiettivo **l'assegnazione di un valore anche a punti non campionati**.
- Mediamente i **punti vicini hanno valori simili tra loro**, al di là di qualche possibile eccezione che possa causare una discontinuità di valori, e una buona interpolazione deve poter cogliere tali corrispondenze.
- Selezionare le **zone di interpolazione in funzione degli schemi statici** delle costruzioni considerate nonché dei loro potenziali cinematismi.
- L'utilizzo delle **tecniche di interpolazione deve essere limitato all'interno dell'involuppo convesso** (convex hull) dei punti.
- Esistono due principali categorie di metodi di interpolazione:

Deterministici: il legame fra punti vicini è espresso da una legge esplicita i cui parametri hanno significato fisico.

Geostatistici: il legame fra punti vicini è espresso da un legame statistico, che non necessariamente ha un significato fisico (Tecniche Kriging).



✗ Punto in cui si vuole prevedere il valore

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

Edifici Standard, industriali e strategici



Ponti



Edifici Monumentali

Impianti Strategici



Viadotti



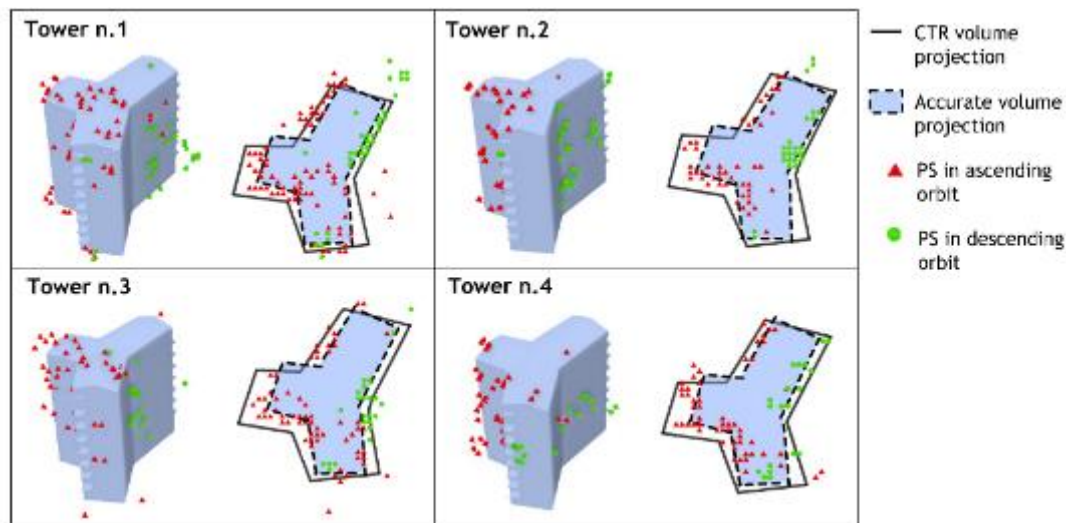
Edifici Monumentali

Interpolazione Spaziale

(UR: [UNINA](#), [UNITV](#) e [IUAV](#))

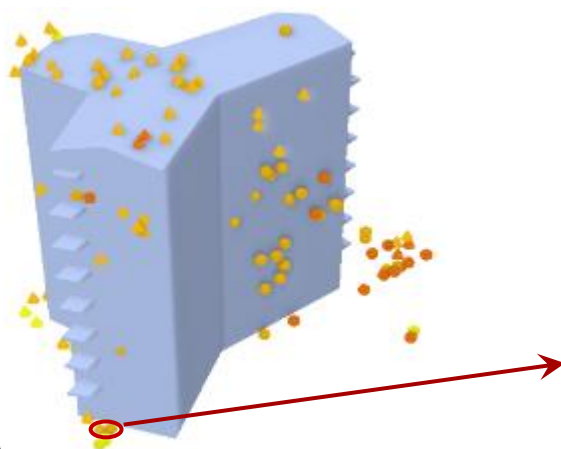
Caso Studio: Torri Stellari (1949-1952, Roma) – edifici in c.a. a telaio

STIMA DEGLI SPOSTAMENTI CUMULATI



Utilizzo dei dati DINSAR ai fini dello SHM a scala di singola costruzione

Selezione Coppie di punti (Orbite Asc. E Disc.)



APPROCCIO 1

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



Interpolazione Spaziale

(UR: [UNINA](#), [UNITV](#) e [IUAV](#))

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

STIMA DEGLI SPOSTAMENTI CUMULATI

APPROCCIO 2

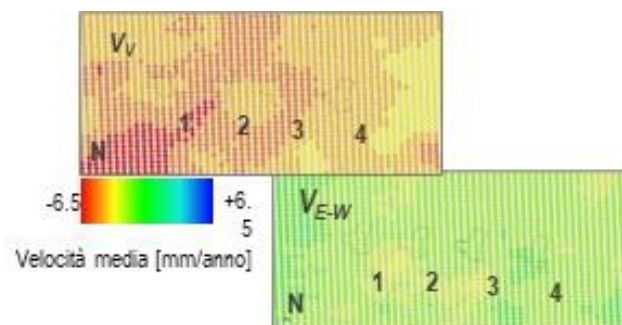
Combinazione delle componenti di velocità lungo la LOS di punti vicini su tutto il periodo di acquisizione

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

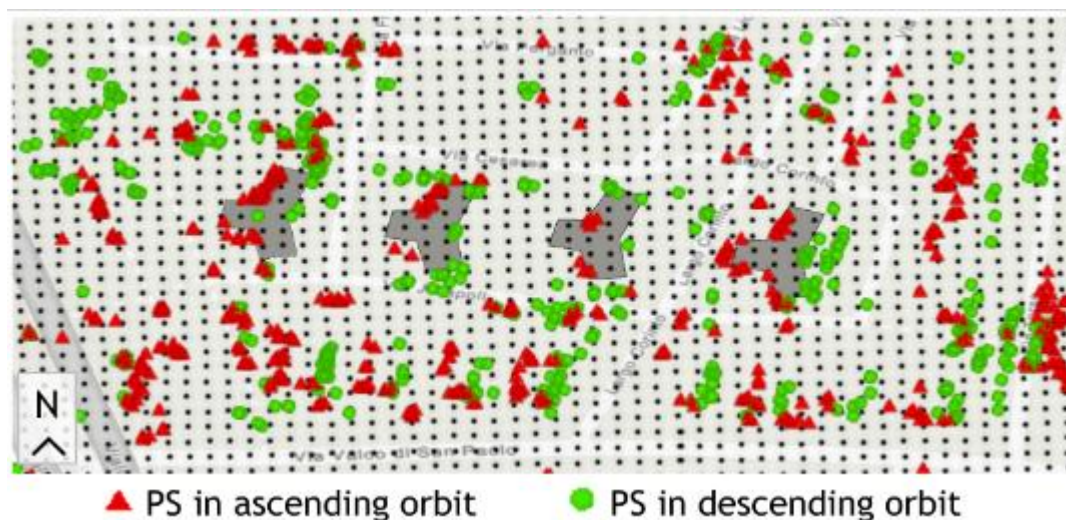
$$V_{EW} = +0.017 \text{ cm/anno}$$

APPROCCIO 3

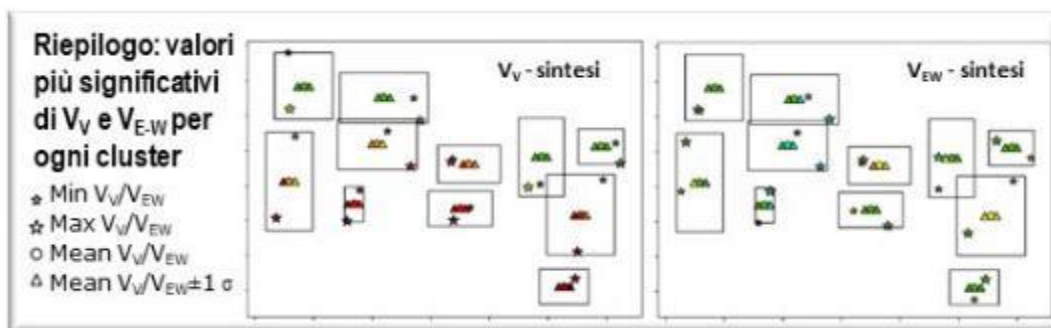
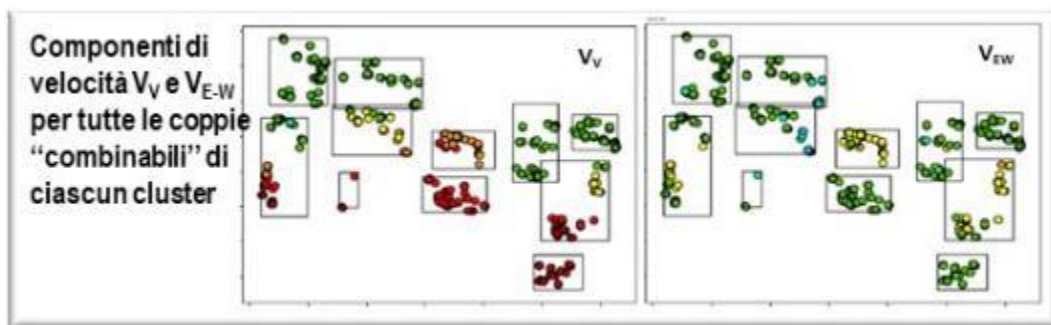
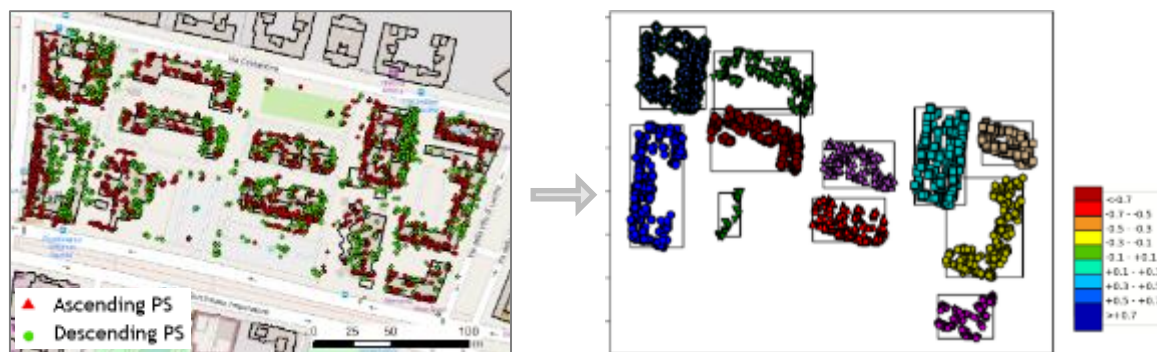
Mappe di velocità media continue ottenute da interpolazione spaziale



Griglia adottata per l'area delle Torri Stellari, con sovrapposti i punti di misura ascendenti (rosso) e discendenti (verde).



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



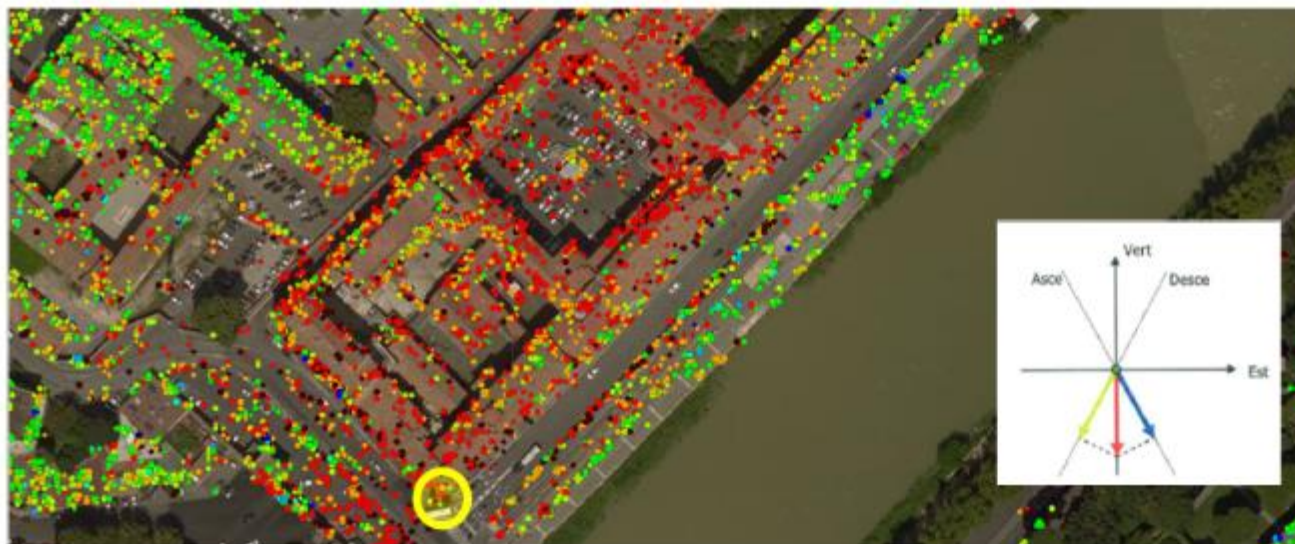
FINALITA':

Implementare un algoritmo che, a partire dai PSs 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.

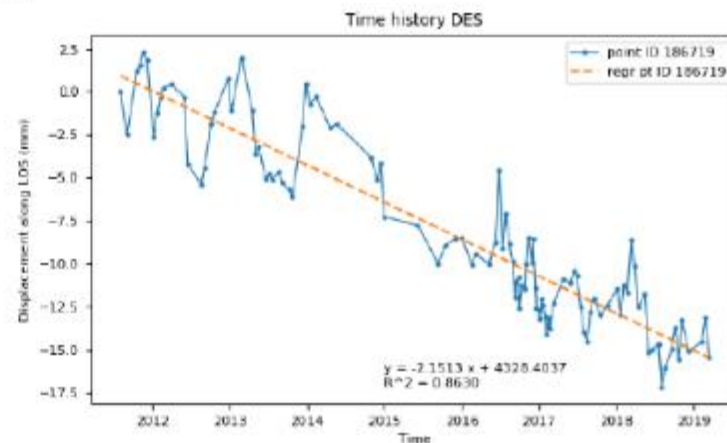
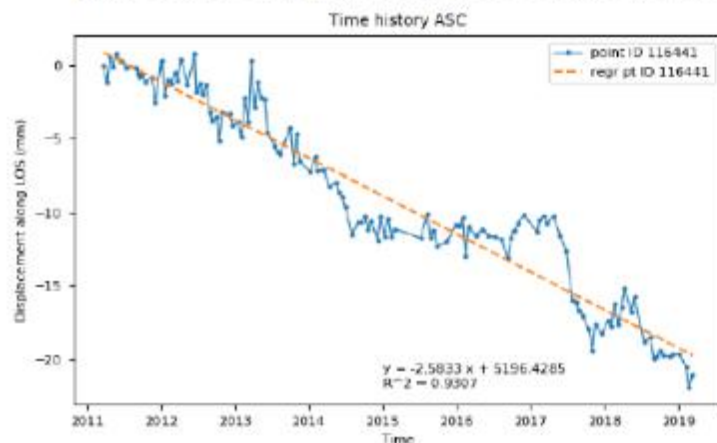
Serie temporali di spostamento lungo la LOS:

(UR: [UNINA](#), [UNITV](#) e [IUAV](#))



Dai due dataset si ricava una velocità media annua molto simile (-2.2 mm/anno e -2.6 mm/anno rispettivamente per DES e ASC),
Questo è indice che il movimento reale ha direzione prevalentemente verticale e rivolta verso il basso.

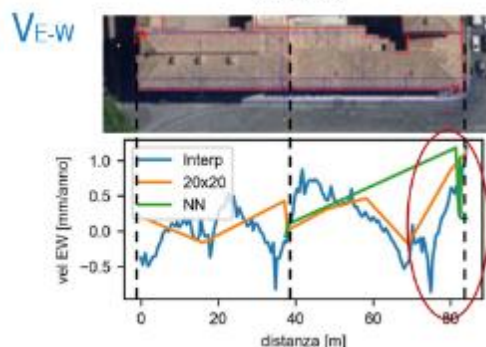
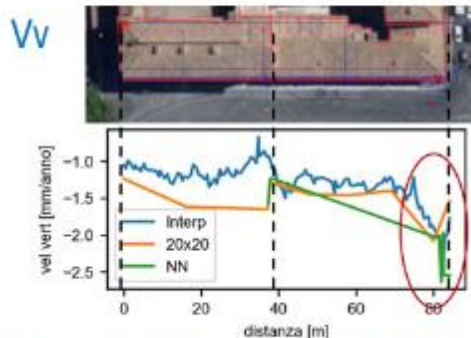
Plot delle storie di spostamento lungo la LoS di due punti molto vicini nella zona cerchiata di giallo (uno del dataset ASC e uno del dataset DES)



Fonte immagini: Progetto RELUIS 2019-2021 WP6 UR IUAV, Responsabile Prof. A. Saetta

(UR: [UNINA](#), [UNITV](#) e [IUAV](#))

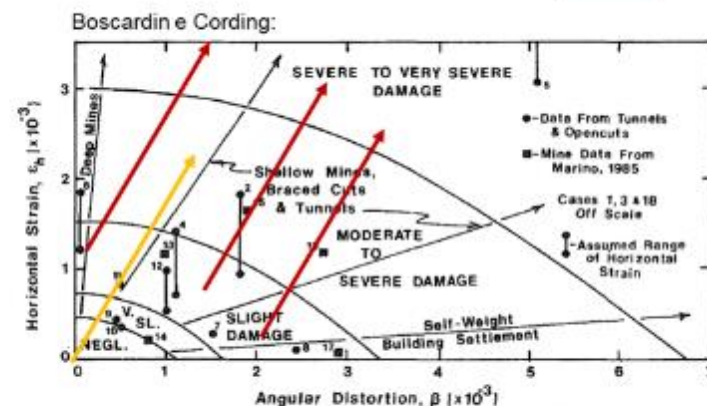
CASO STUDIO - Complesso San Michele (Roma)



Stima del livello di danno attraverso correlazioni di letteratura.

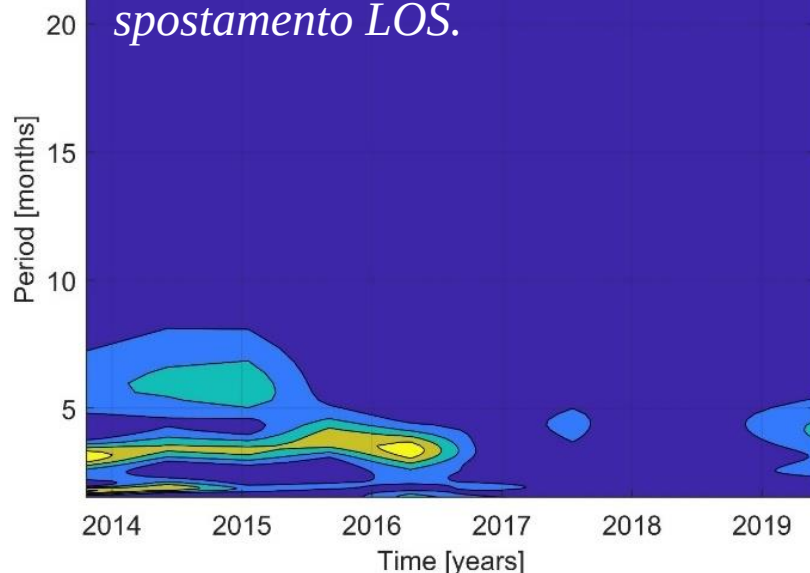


Verifica ed integrazione con lo stato di danno rilevato (*work in progress*)



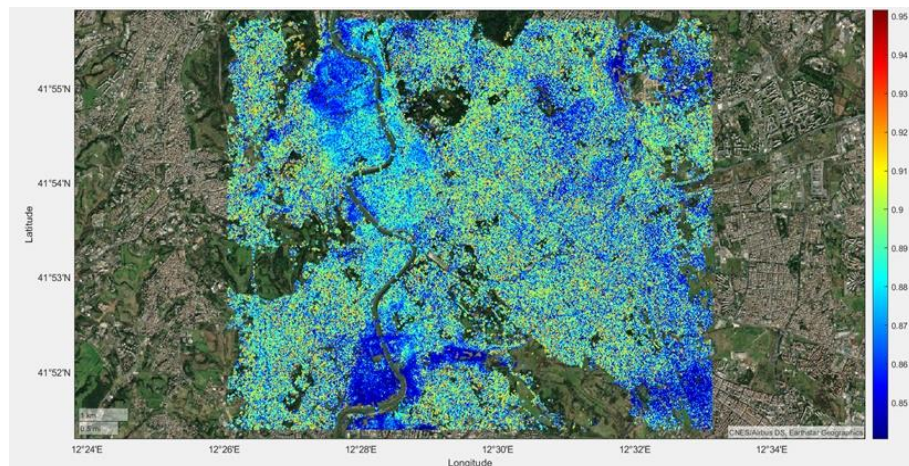
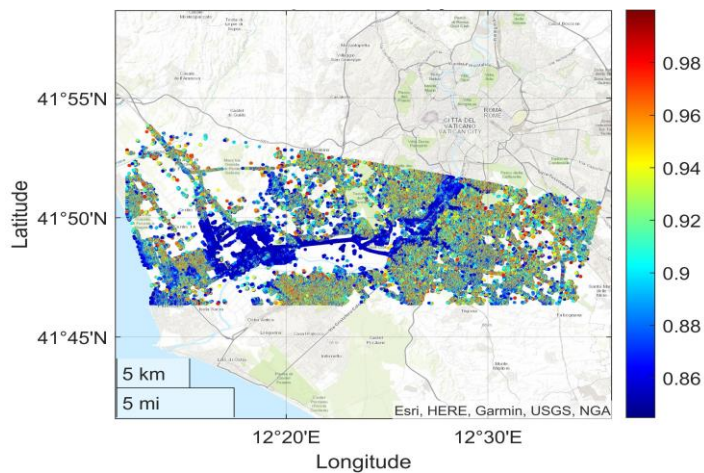
Università IUAV di Venezia - Responsabile scientifico: prof.ssa Anna Saetta
 Università degli Studi di Napoli "Federico II" - Responsabile scientifico: prof. Andrea Prota
 Università degli Studi di Roma Tor Vergata - Responsabile scientifico: prof. Alberto Meda

Esempio di spettrogramma di spostamento LOS.



ELABORAZIONE DEI DATI NEL DOMINIO DELLA FREQUENZA

L'uso dell'entropia spettrale nel campo dello *Structural Health Monitoring* si basa sull'ipotesi che la presenza di danneggiamento incrementi la complessità del sistema (Farrar et al., 2010).



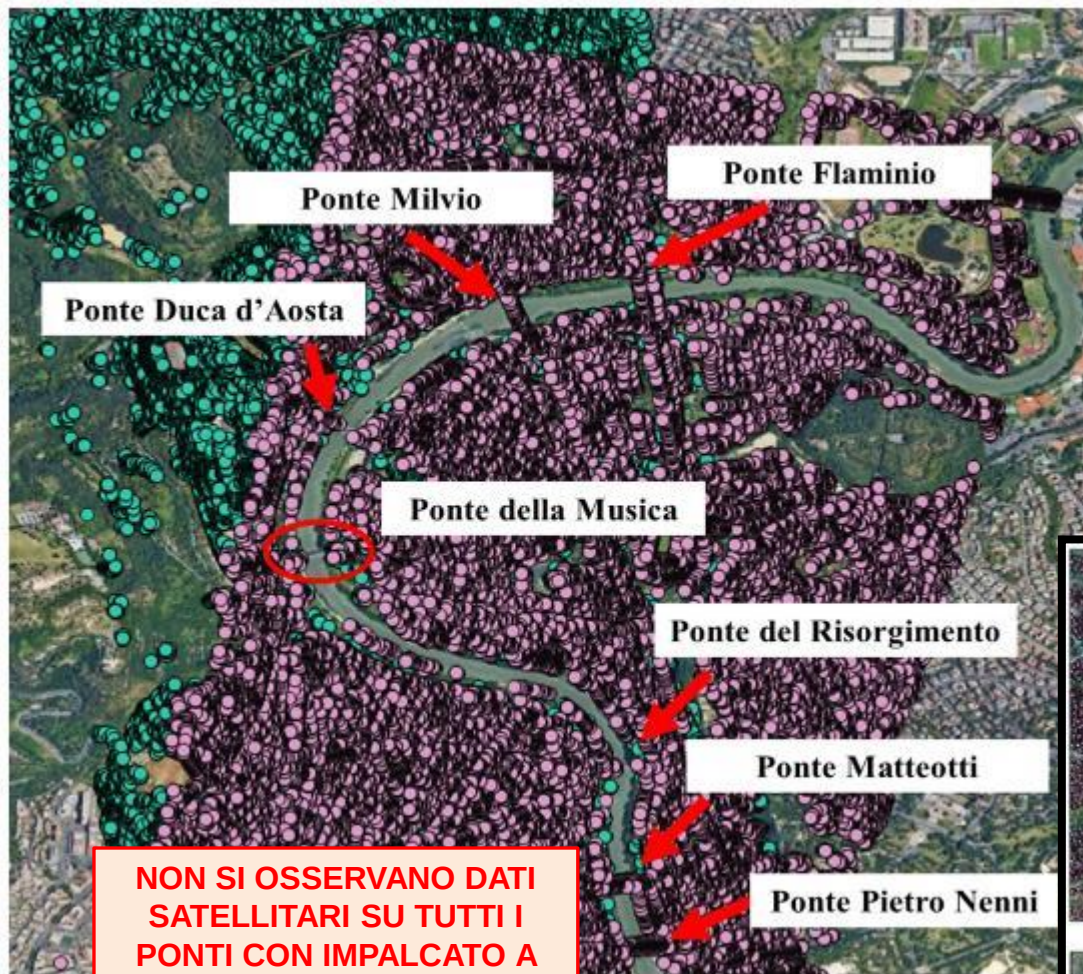
Esempio di rappresentazione di entropia spettrale di spostamento lungo la LOS:

Elaborazione interferometrica multitemporale SBAS-DInSAR a piena risoluzione spaziale di due dataset ascendenti (punti di misura verdi) e discendenti (punti di misura rossi)

100-400 punti/kmq in caso di utilizzo di sensori in banda C (ERS/ENVISAT),
circa 8000 punti/kmq in caso di utilizzo di sensori in banda X (COSMO-SkyMed),



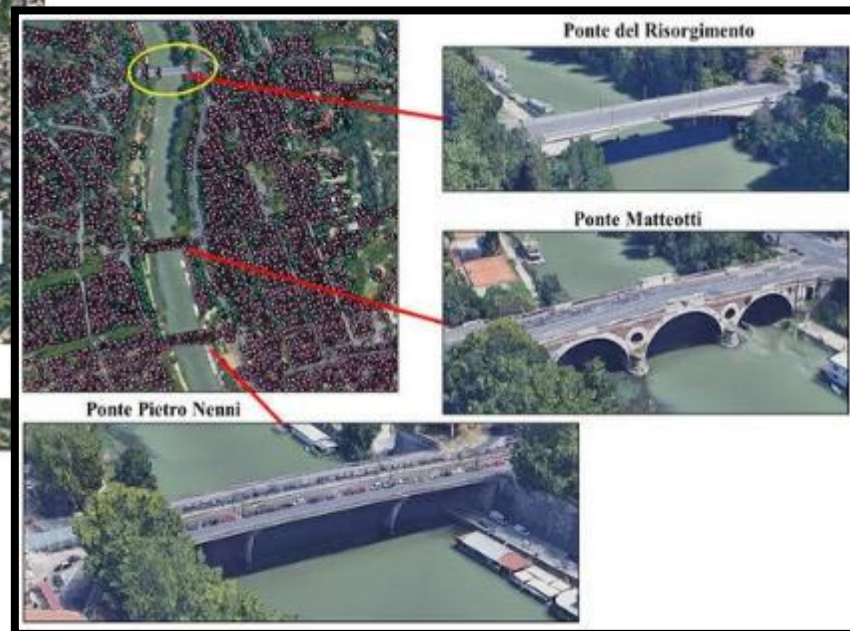
Limiti derivanti dalla procedura interferometrica
Presenza di possibili **zone di «ombra» di punti di misura.**
Scarsa coerenza dei punti riflettenti



**NON SI OSSERVANO DATI
SATELLITARI SU TUTTI I
PONTI CON IMPALCATO A
MAGGIORE
DEFORMABILITÀ
STRUTTURALE**

ANALISI DELLE SERIE TEMPORALI DI SPOSTAMENTO LOS CON TECNICA MULTI- TEMPORALE A PIENA RISOLUZIONE SBAS-DinSAR

- Sequenze di acquisizioni SAR dalla costellazione italiana COSMO-SkyMed (Agenzia Spaziale Italiana)
- Serie temporali: 2011-2019



CASO STUDIO: IL PONTE DELLA MUSICA

IL CASO STUDIO: PONTE DELLA MUSICA- ARMANDO TROVAJOLI (DATI SATELLITARI COMSO SKYMED)

Legenda

UR: UNIBAS

- vel [cm/yr] < -1.0
- -1.0 ≤ vel [cm/yr] < -0.8
- -0.8 ≤ vel [cm/yr] < -0.6
- -0.6 ≤ vel [cm/yr] < -0.4
- -0.4 ≤ vel [cm/yr] < -0.2
- -0.2 ≤ vel [cm/yr] < 0
- 0 ≤ vel [cm/yr] < 0.2
- 0.2 ≤ vel [cm/yr] < 0.4
- 0.4 ≤ vel [cm/yr] < 0.6
- 0.6 ≤ vel [cm/yr] < 0.8
- 0.8 ≤ vel [cm/yr] < 1.0
- vel [cm/yr] ≥ 1.0

CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DEL PONTE:

- Campata centrale $\cong 130$ m;
- Campate di riva $\cong 30$ m;
- Larghezza(0;L) $\cong 17$ m;
- Larghezza(L/2) $\cong 21$ m;

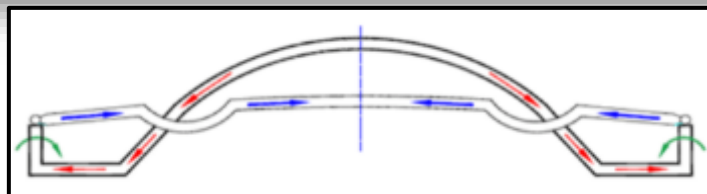
CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DEGLI ELEMENTI STRUTTURALI:

- Archi – goccia asimmetrica;
- Travi centrali – Sezione a Z;
- Travi di bordo – Sezione a cassone;
- Traversi – doppia flangia (h var.);
- Pendini – doppia flangia;
- Soletta – s=18 cm;
- Controventi inf. – UPN240

ASSENZA DI DATI
SATELLITARI SULLA
CAMPATA CENTRALE
DEL PONTE

ORBITA ASCENDENTE

ORBITA DISCENDENTE



UR: UNIBAS

Sperimentale

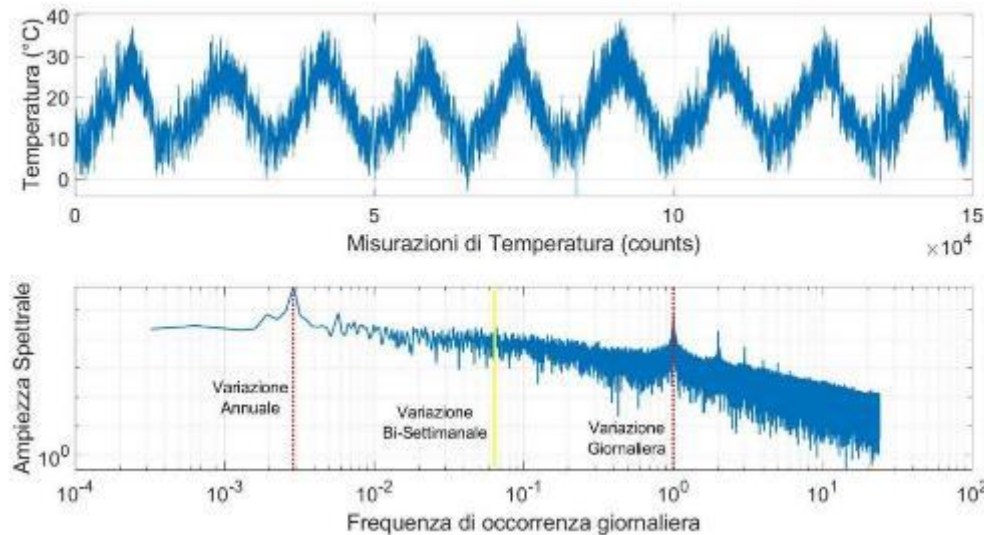
III Modo

	<i>Experimental</i>	<i>Optimal Numerical Model</i>	<i>Percentage Difference</i>
<i>Mode number</i>	<i>Frequency [Hz]</i>	<i>Frequency [Hz]</i>	<i>Rate [%]</i>
<i>Mode 1</i>	0.92±0.01	0.92	0±0.1
<i>Mode 2</i>	1.01±0.01	1.07	5.94±0.1
<i>Mode 3</i>	1.33±0.01	1.33	0±0.1

CASO STUDIO: IL PONTE DELLA MUSICA

ANALISI DATI TERMICI NELLE ORE DI ACQUISIZIONE DEI SATELLITI

UR: UNIBAS

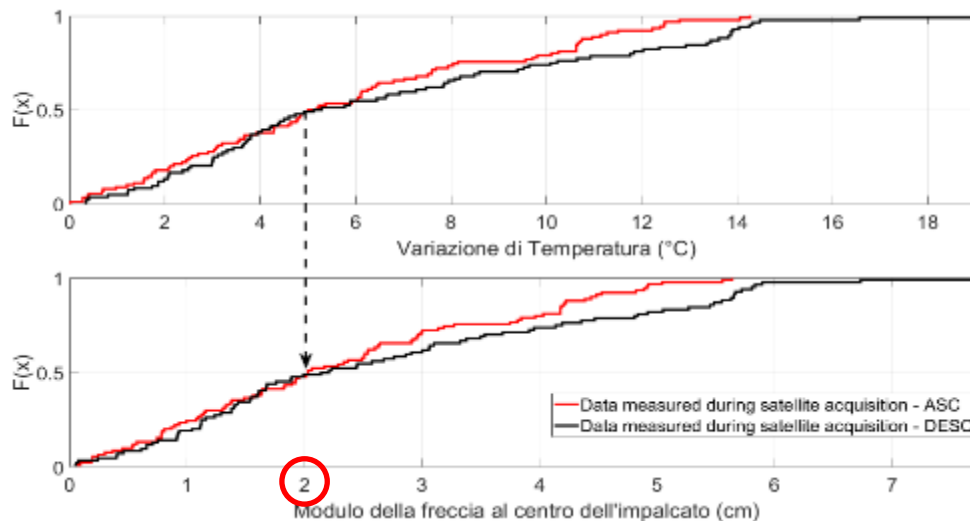


FUNZIONI DI DISTRIBUZIONE DELLA DENSITÀ DI PROBABILITÀ CUMULATA IN TEMPERATURA E SPOSTAMENTO

$$\Delta Z \text{ (cm)} = 0.09 + 0.40 \times \Delta T \text{ (}^{\circ}\text{C)}$$

Dove ΔZ rappresenta la freccia valutata in corrispondenza della mezzeria e ΔT rappresenta la variazione di temperatura rispetto alla temperatura media annuale

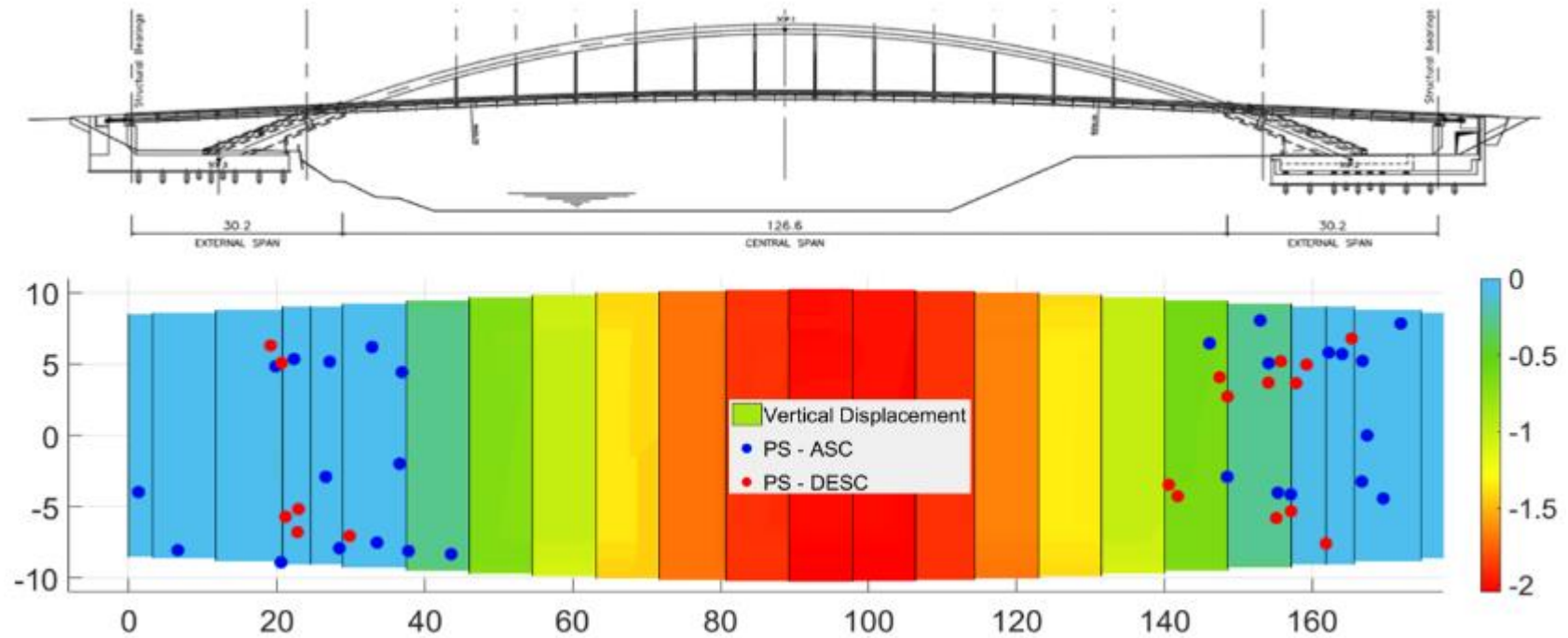
(VARIAZIONE TEMP. NELL'INTERVALLO 12 ORE)



La dipendenza dalla lunghezza d'onda (λ) limita la possibilità di utilizzo del monitoraggio satellitare ai movimenti caratterizzati da intensità di spostamento che non superino nel periodo intercorrente tra un passaggio e il successivo il valore di un quarto della lunghezza d'onda $\lambda/4$ (pari a circa 7,5 mm in banda X)

CASO STUDIO: IL PONTE DELLA MUSICA

CONTOUR LEVEL DELLA DEFORMATA TERMICA CON VARIAZIONE DI TEMPERATURA DI $|\Delta T|=5^{\circ}\text{C}$



Analisi Termo-Meccaniche

DESIGNAZIONE	INTERVALLO DI FREQUENZE IN GIGAHERTZ	INTERVALLO DI LUNGHEZZA D'ONDA IN CENTIMETRI
Banda L	0.390-1.550	76.9-19.3
Banda C	3.900-5.750	7.69-5.20
Banda X	5.75-10.90	5.20-2.75

Cosmo SkyMed $\lambda=3.1\text{ cm} \rightarrow \lambda/4 = 0,775\text{ cm}$

Home > Journal of Civil Structural Health Monitoring > Article

DInSAR—SBAS satellite monitoring of infrastructures: how temperature affects the “Ponte della Musica” case study

Original Paper | Open access | Published: 10 January 2024

Volume 14, pages 745–761, (2024) | Cite this article

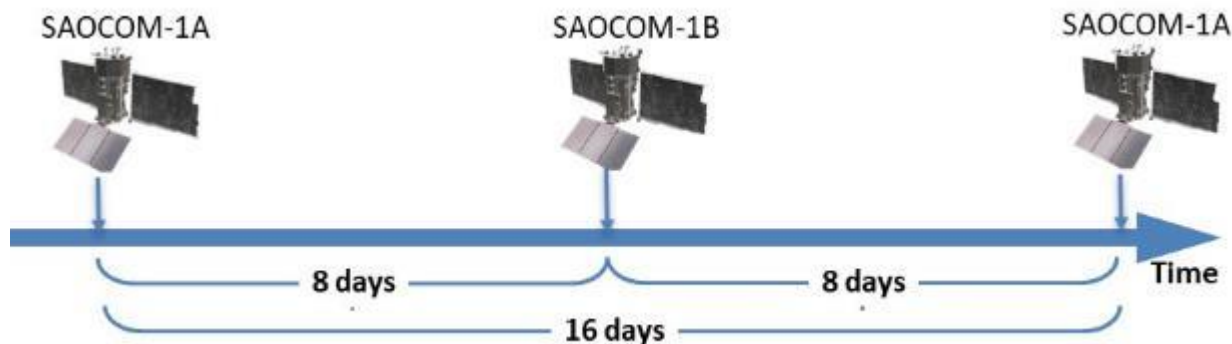
Felice Carlo Ponzio, Gianluca Auletta, Paolo Ielpo & Rocco Ditommaso



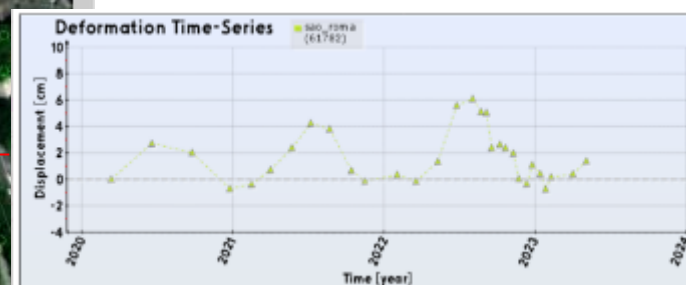
Journal of Civil Structural Health Monitoring

UR: UNIBAS

Costellazione SAOCOM-1 (SAOCOM-1A e -1B)



- La costellazione argentina SAOCOM-1A e 1B e quella italiana COSMO-SkyMed formano il sistema SIASGE.
- Risoluzione spaziale (stripmap mode): **5 m x 5 m** (Single e Dual Pol) **5 m x 6 m** (Quad Pol), Copertura del suolo: **40-60 km** (Single e Dual Pol) **20-30 km** (Quad Pol) - **Banda L** ($\lambda \sim 23.5$ cm) - La regione di esclusività dell'ASI include tutta l'Europa - **Lancio satelliti: 10/2018 (A) – 08/2022 (B)**



Su gentile concessione di Riccardo Lanari
e Manuela Bonano



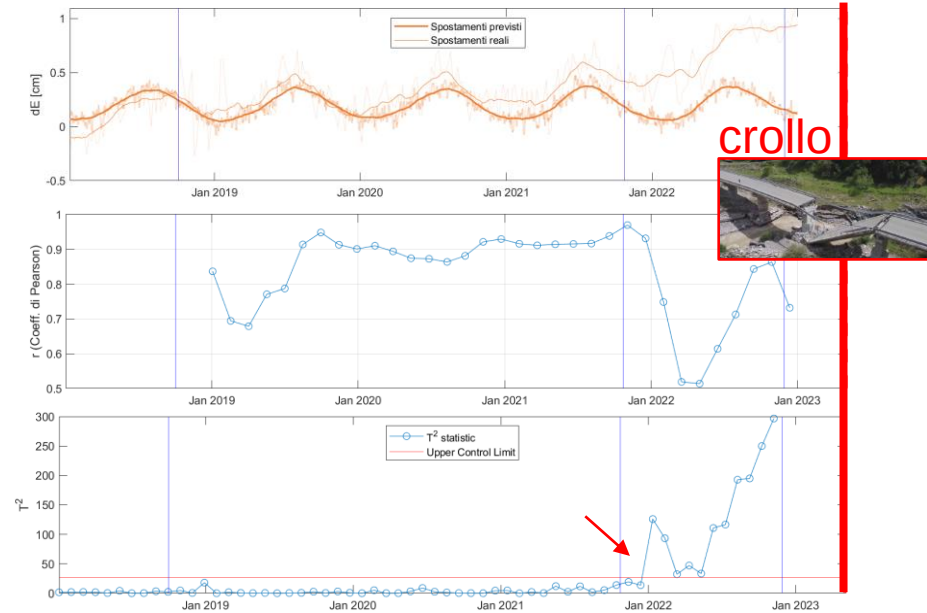
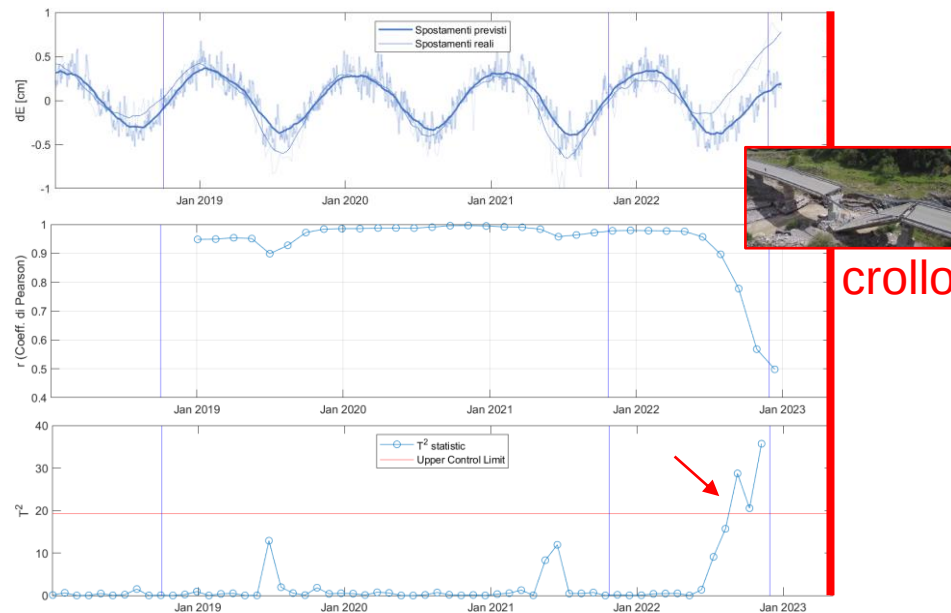
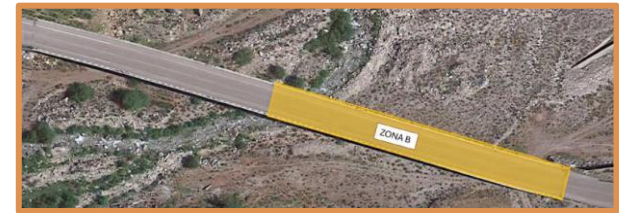
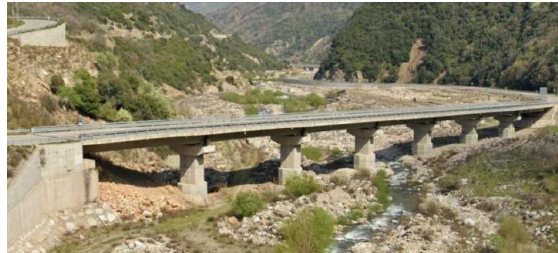
Consiglio Nazionale
delle Ricerche



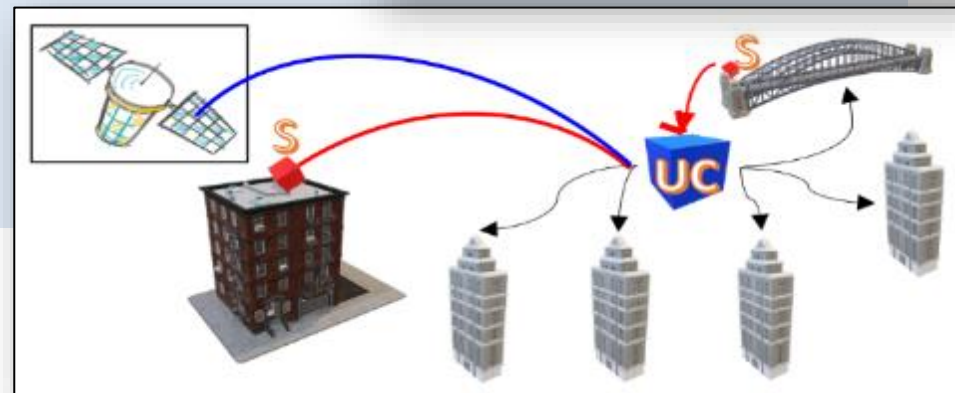
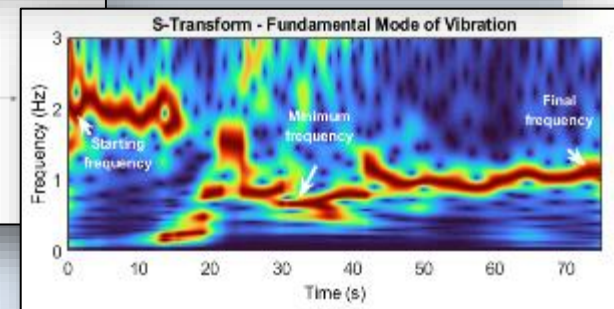
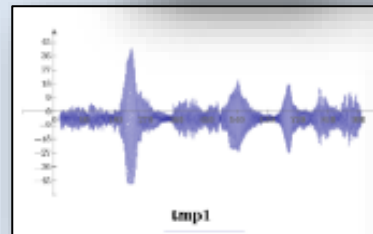
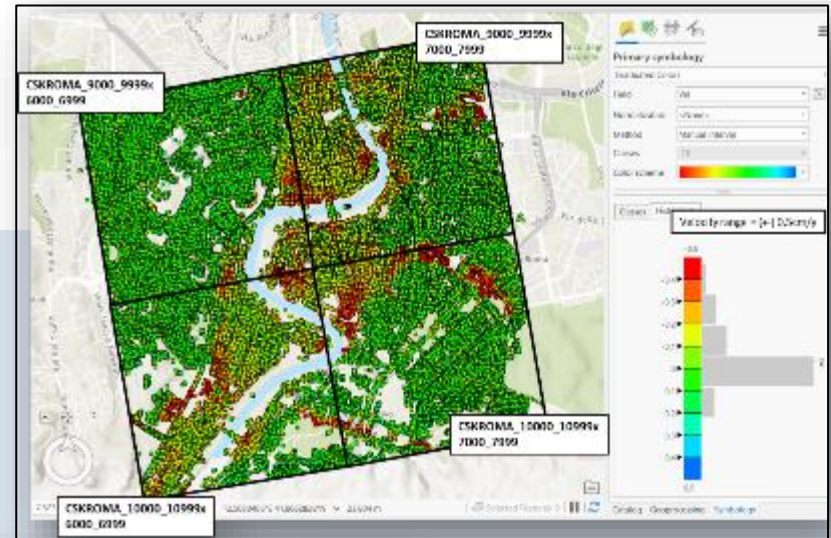
Istituto Nazionale di Geofisica
e Vulcanologia

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

Rilevamento di anomalie nelle serie temporali MT-InSAR

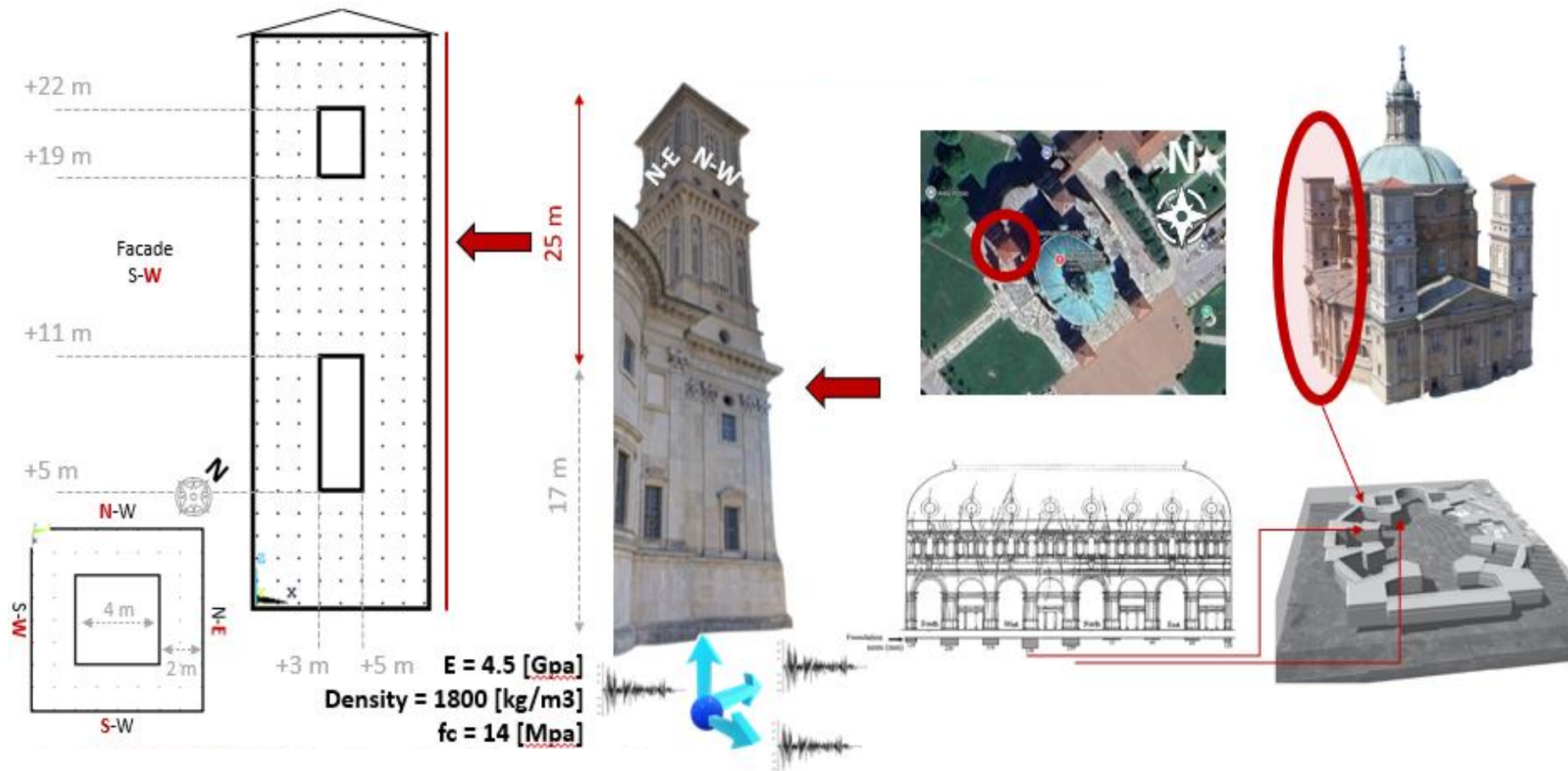


- Monitoraggio di strutture e infrastrutture durante le **normali condizioni di esercizio**.
- Monitoraggio, in real-time e quasi real-time, di strutture e infrastrutture a **valle di eventi calamitosi**.
- Integrazione dei dati provenienti dai sistemi di monitoraggio on site e satellitari in **sistemi di Early-Warning** per l'allertamento e la gestione delle emergenze (terremoti, Frane, Alluvioni ecc...).



CASO STUDIO: CAMPANILE NORD-OVEST SANTUARIO DI VICOFORTE

UR: POLITO



T6.2 Tecniche innovative per il monitoraggio on-site

- L'integrazione di diverse **strumentazioni** per il monitoraggio

Sensore e posizione:

- 2 termometri per muratura (1 N-E + 1 S-W)
- 2 termometri per aria esterna (1 N-E + 1 S-E)
- 2 termometri per aria interna (1 N-W + 1 S-W)
- 2 disto-inclinometri laser (2 spostamenti e 6 rotazioni) (1 S-E → E + 1 S-E → S)
- 2 barre estensimetriche sui paramenti esterni della muratura (1 N-E + 1 S-W)
- 2 barre estensimetriche sui paramenti interni della muratura (1 N-E + 1 S-W)
- 2 accelerometri MEMS Wireless triassiali (assi allineati al campanile, a.l.a.c)
- 1 terna accelerometrica (PIEZOELETTRICI) di base (a.l.a.c)

Quota:

BASE

L1

L2

L2

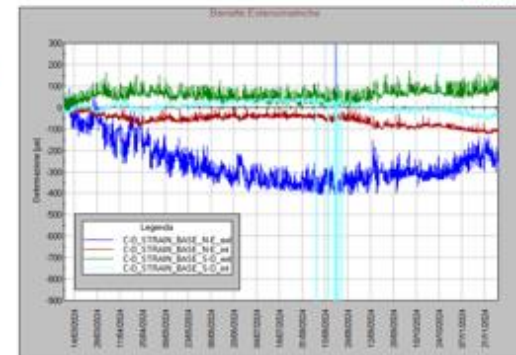
BASE

BASE

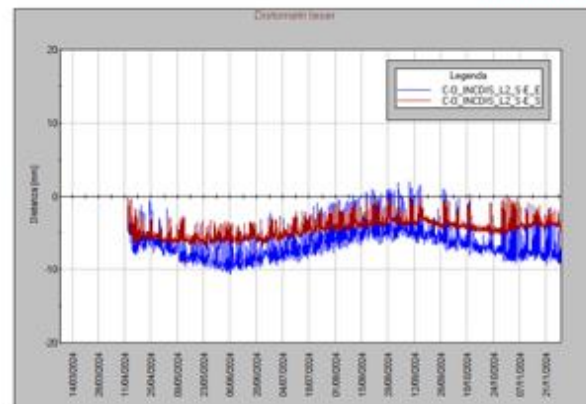
IN CIMA

IN FONDAZIONE

Barre estensimetriche



Distanziometri laser



Integrazione dei **dati** relativi a sistemi di monitoraggio on-site

Calibrazione di **modelli peridinamici avanzati** per il monitoraggio (statico/dinamico) strutturale

$$\ddot{\mathbf{M}}\mathbf{u}(t) + \dot{\mathbf{C}}\mathbf{u}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) = \mathbf{z}(t)$$

Number of points used to discretize the system

$$\xi_{kj} = \mathbf{x}_j - \mathbf{x}_k$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_k & \mathbf{0} & \dots \\ \mathbf{0} & \ddots & \\ \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix}; \mathbf{C} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1, j \neq k}^K \mathbf{c}_{kj} & -\mathbf{c}_{kj} & \dots \\ & \ddots & \\ -\mathbf{c}_{kj} & & \ddots \end{bmatrix}; \mathbf{K} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1, j \neq k}^K \mathbf{K}_{kj} & -\mathbf{K}_{kj} & \dots \\ & \ddots & \\ -\mathbf{K}_{kj} & & \ddots \end{bmatrix}$$

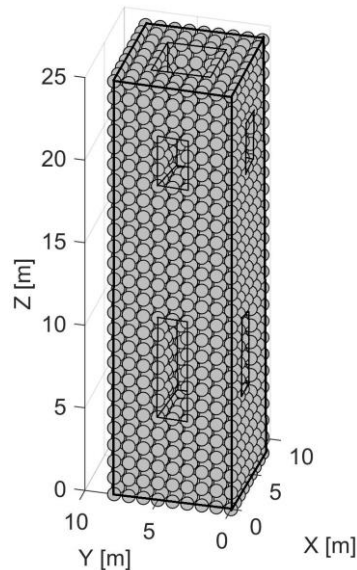
$$\mathbf{K}_{kj} = c_{kj} V_j V_k \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_{kj}$$

$$\mathbf{C}_{kj} = v_{kj} \mathbf{K}_{kj}$$

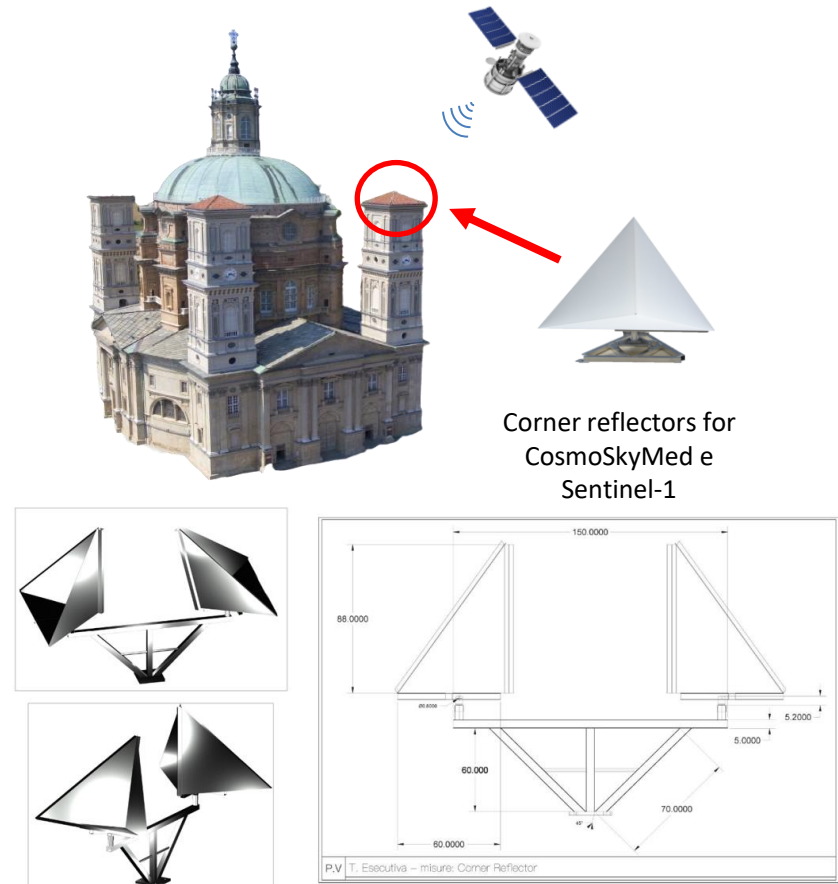
$$\mathbf{M}_k = m_k \mathbf{I}_3$$

$$\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_{kj} = \frac{\xi_{kj} (\xi_{kj}^T)}{\|\xi_{kj}\|^3}$$

$$c_{kj} = \begin{cases} c_{kj} & \text{if } \|\xi_{kj}\| \leq h_{kj} \\ 0 & \text{if } \|\xi_{kj}\| > h_{kj} \end{cases}$$

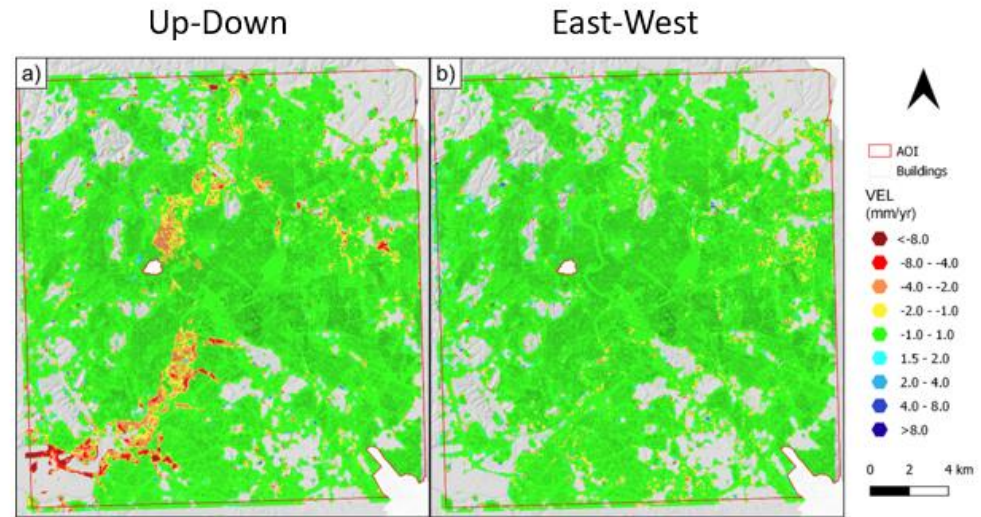
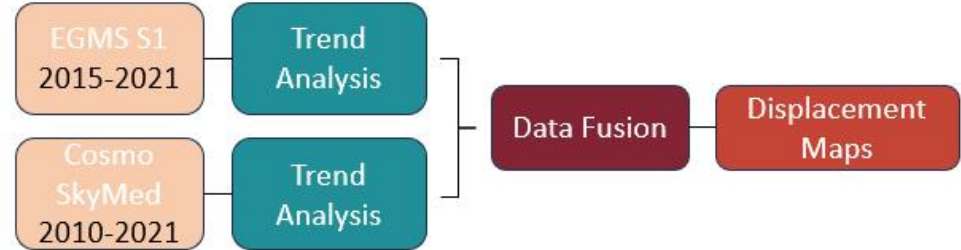
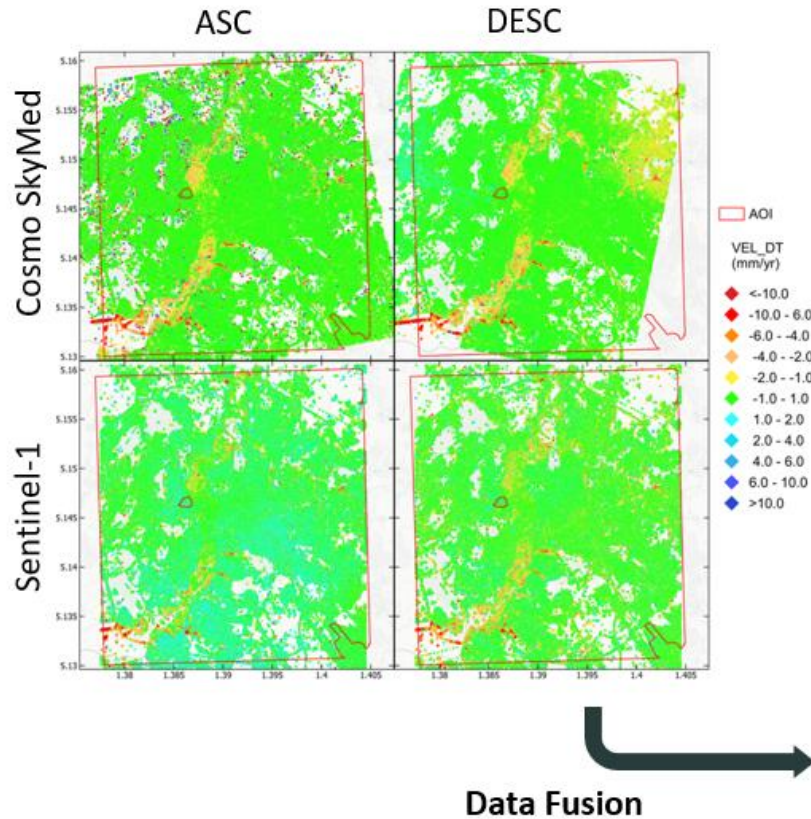


- Valutare l'**affidabilità** dei risultati

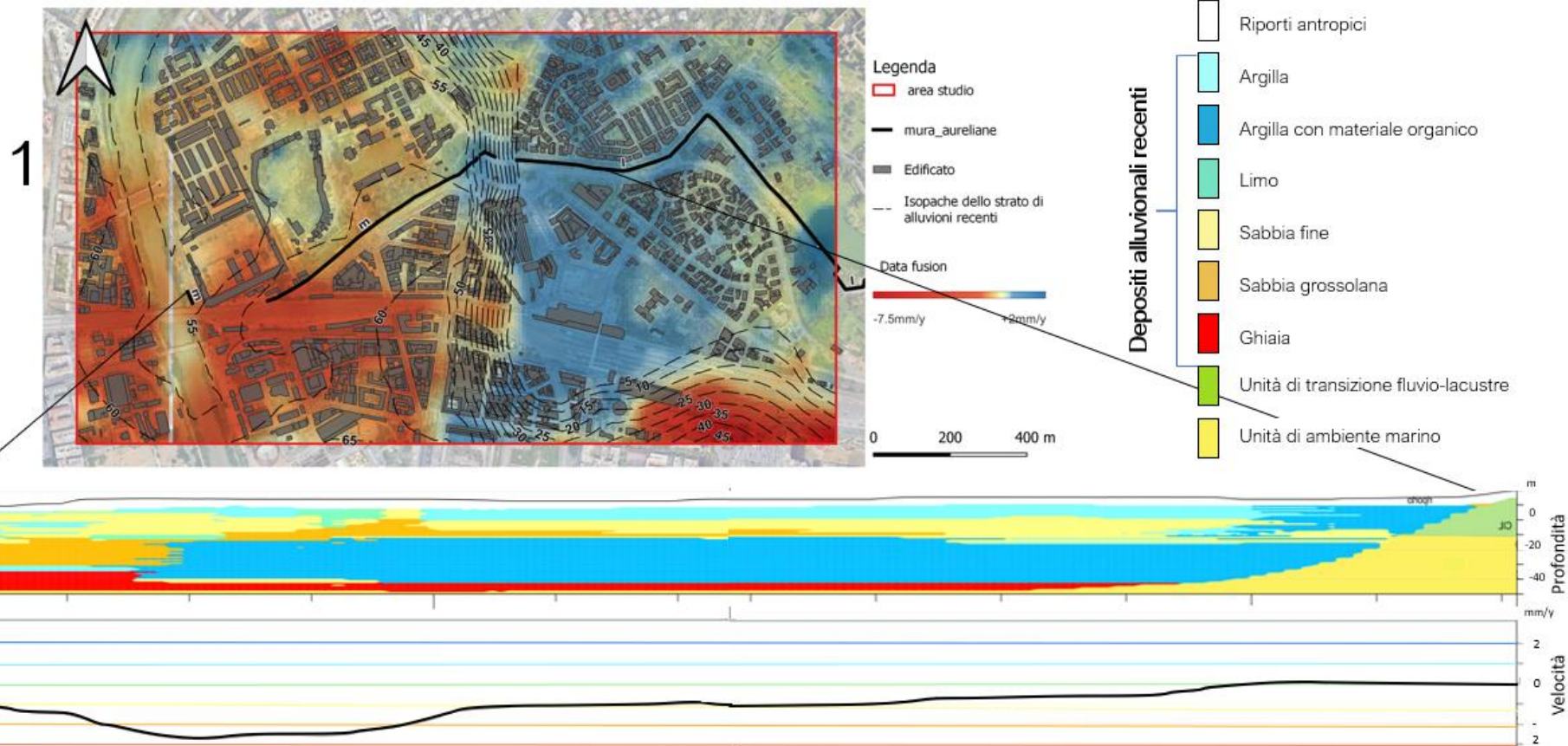


Integrazione dei dati provenienti da sistemi on-site con quelli provenienti da monitoraggio satellitare

Per gentile concessione della Prof. Rosario Ceravolo



Mastrantoni, G., Masciulli, C., Marini, R., Esposito, C., Scarascia Mugnozza, G., & Mazzanti, P. (2023). A novel model for multi-risk ranking of buildings at city level based on open data: the test site of Rome, Italy. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 14(1). <https://doi.org/10.1080/19475705.2023.2275541>



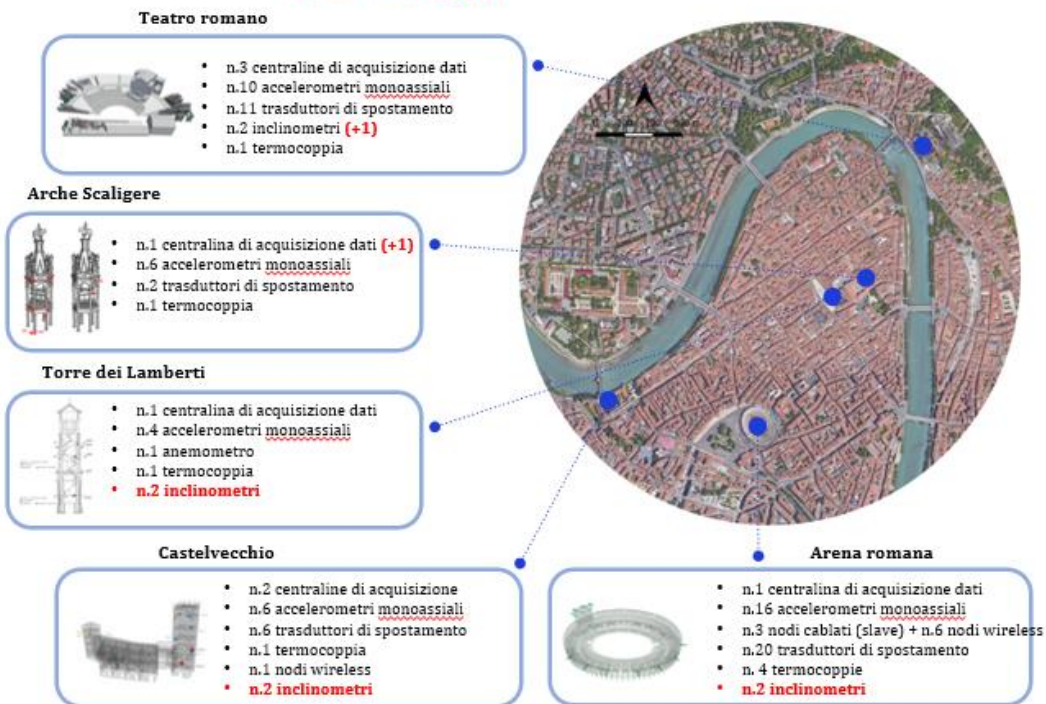
CASO STUDIO: CITTA' DI VERONA

Task 6.1 Utilizzo di dati ottenuti da interferometria satellitare

Task 6.3 Integrazione dei sistemi di monitoraggio basati su dati satellitari e on site

Caso studio: Città di Verona

RETE DI MONITORAGGIO + sensori da integrare



	Progetto sistema di monitoraggio/revamping	Acquist o strumentazione	Pianificazione attività on-site	Installazione e messa in funzione
Arena Romana	✓	✓	✓	03/25
Arche Scaligere	✓	✓	✓	✓
Teatro Romano	✓	✓	✓	✓
Torre dei Lamberti	✓	✓	✓	12/24
Castelvechio	✓	✓	✓	12/24

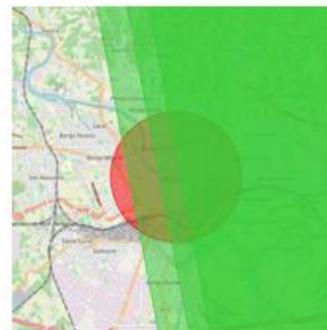
Task 6.1 Utilizzo di dati ottenuti da interferometria satellitare

ACQUISIZIONE DATASET COSMO-SkyMed



Satellite	Acquisition mode	Resolution	Revisiting time	Orbit	Incidence angle	Monitoring period	Satellite images
COSMO-SkyMed	Stripmap	3 m	16 days	Descending	~ 34°	13/04/2010 05/12/2021	157
				Ascending	-	-	-

PROCESSAMENTO PSInSAR



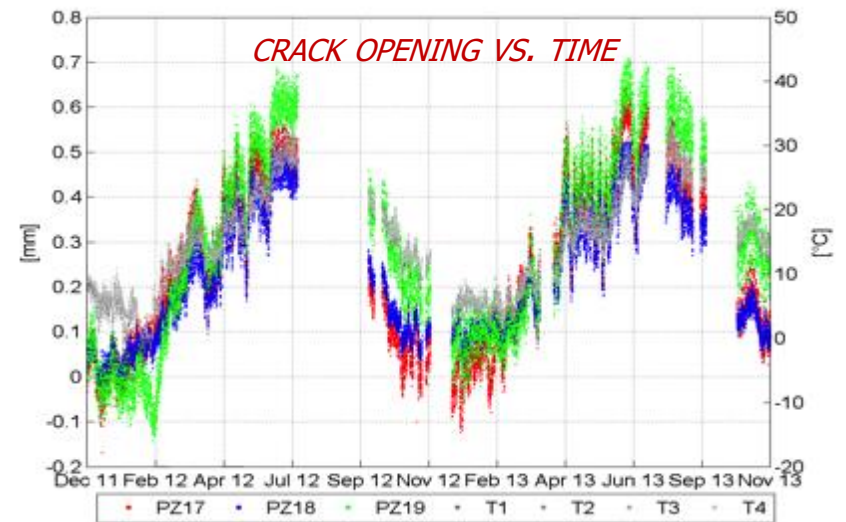
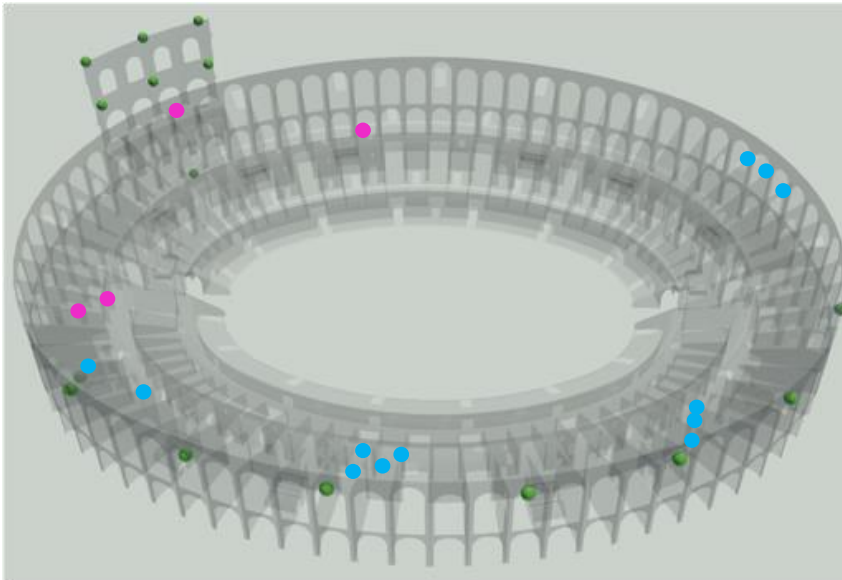
UR: UNIPD

Per gentile concessione della Prof.ssa Francesca Da Porto

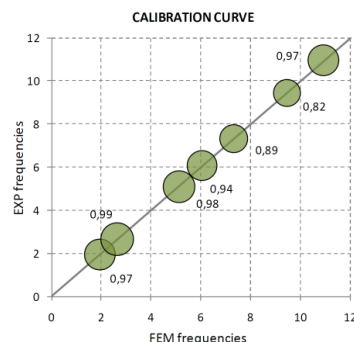
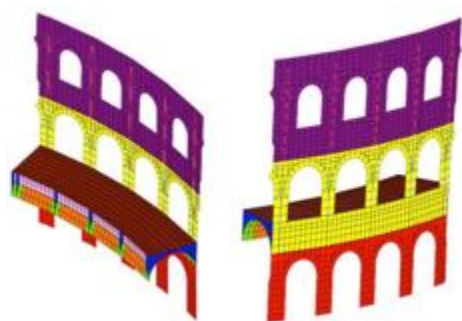
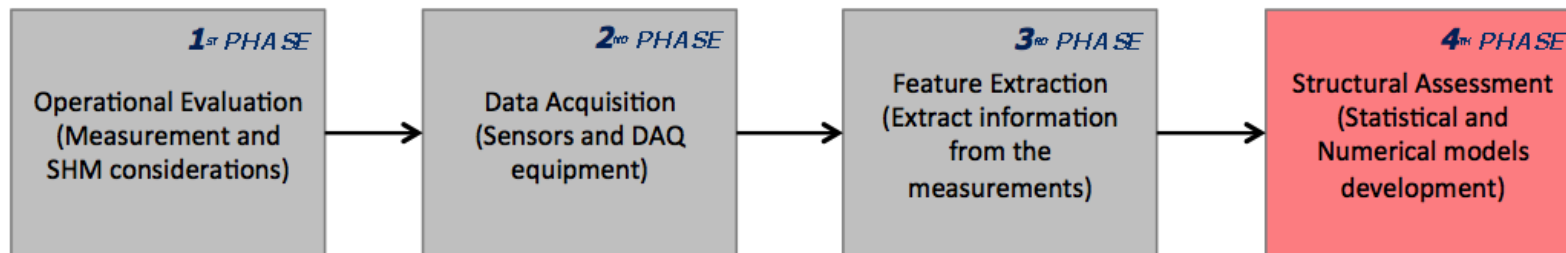
CASO STUDIO: L'ARENA DI VERONA



MONITORAGGIO STATICO, DINAMICO e AMBIENTALE

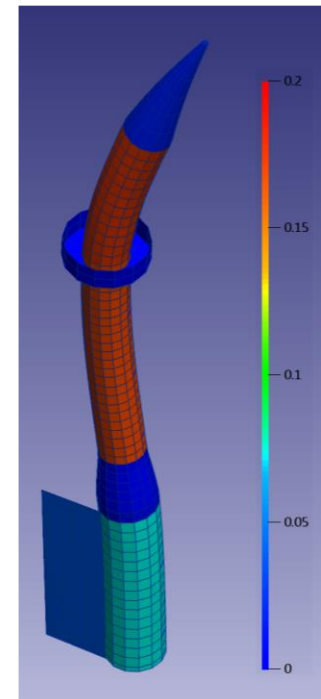
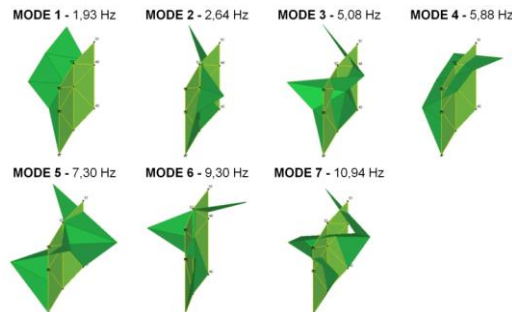
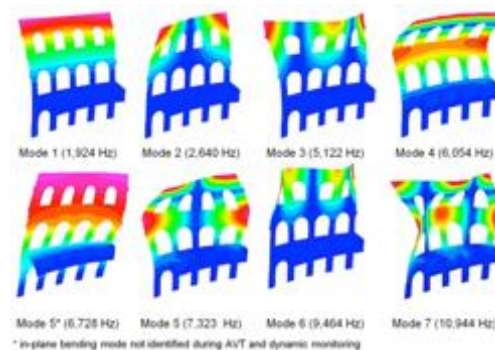


SHM PER LA CALIBRAZIONE DEI MODELLI NUMERICI



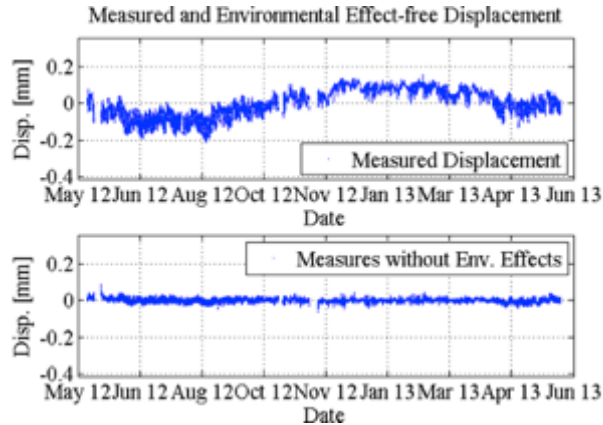
MODAL MATCHING: EXP/FEM RESULTS

MO DE	Type	f_{EXP} [Hz]	f_{FEM} [Hz]	Average error ε [%]	MAC ($\{\psi^{EXP}\}, \{\psi^{FEM}\}$)
1	1 st out-of-plane bend.	1,924	1,924	[0,01]	0,973
2	1 st torsional	2,666	2,640	[1,00]	0,993
3	2 nd torsional	5,103	5,122	[0,36]	0,984
4	2 nd out-of-plane bend.	6,086	6,054	[0,53]	0,936
5	3 rd torsional	7,308	7,323	[0,20]	0,886
6	4 th torsional	9,434	9,464	[0,32]	0,821
7	5 th torsional	10,970	10,944	[0,24]	0,973

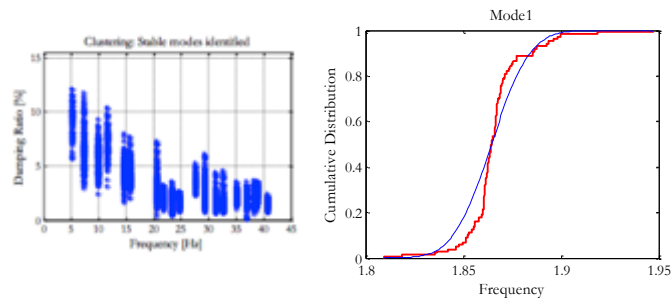


Monitoraggio in condizioni di servizio

• EFFETTI AMBIENTALI



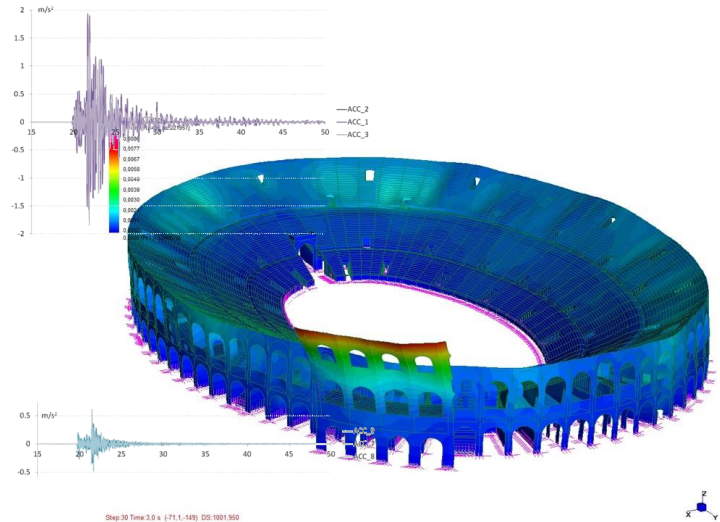
• ANALISI DI AFFIDABILITA'



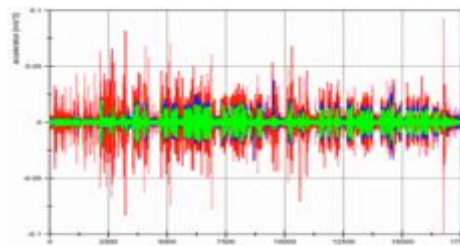
Lorenzoni F., Casarin F., Modena C., Caldon M., Islami K., **da Porto F.** (2013). 'Structural Health Monitoring of the Roman Arena of Verona, Italy'. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*. Springer. 3(4):227-246; DOI 10.1007/s13349-013-0065-0, ISSN: 2190-5452

Monitoraggio Sismico

UR: UNIPD



SHM per l'analisi delle vibrazioni



Evento	Sommit à Ala	Anfiteatro asse minore	Anfiteatro asse maggiore
Esercizio diurno	4.71 dB	4.50 dB	2.14 dB
Concerto 18/05/2012	16.46 dB	11.12 dB	11.93 dB
Concerto 19/05/2012	12.48 dB	15.98 dB	13.18 dB
Concerto 26/05/2012	14.42 dB	13.64 dB	12.85 dB
Sisma 25/01/2012	54.02 dB	35.80 dB	34.29 dB
Sisma 20/05/2012	48.29 dB	41.97 dB	37.05 dB
Sisma 29/05/2012	50.62 dB	42.84 dB	38.32 dB

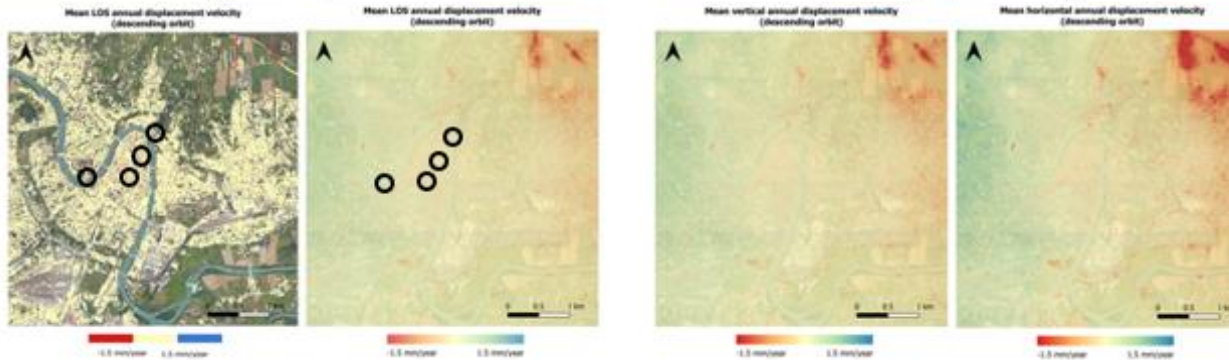
CASO STUDIO: CITTA' DI VERONA

ANALISI URBANA DEL TERRITORIO

Mappe di interpolazione

Valutazione degli spostamenti globali

UR: UNIPD



Torre dei Lamberti



Teatro Romano



Arena Romana



ANALISI LOCALE DEI MONUMENTI

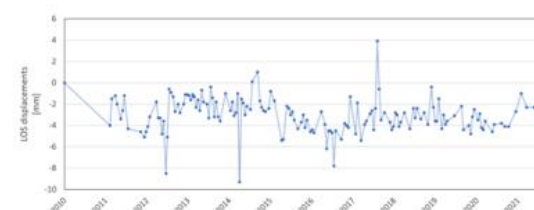
Analisi velocità in LOS



Analisi MP



Analisi serie temporali di spostamento



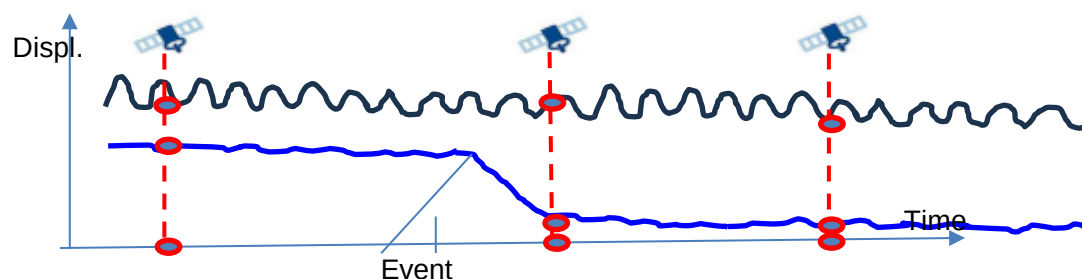
CONSIDERAZIONI SULL'UTILIZZO DEI DATI SATELLITARI

VANTAGGI INTERFEROMETRIA SATELLITARE

- Possibilità di monitorare **grandi porzioni di territorio**.
- Possibilità di utilizzare **storie temporali pregresse** (almeno 10 anni con dati CSK) utili per comprendere l'evoluzione di un fenomeno di interesse.

TUTTAVIA

- **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.



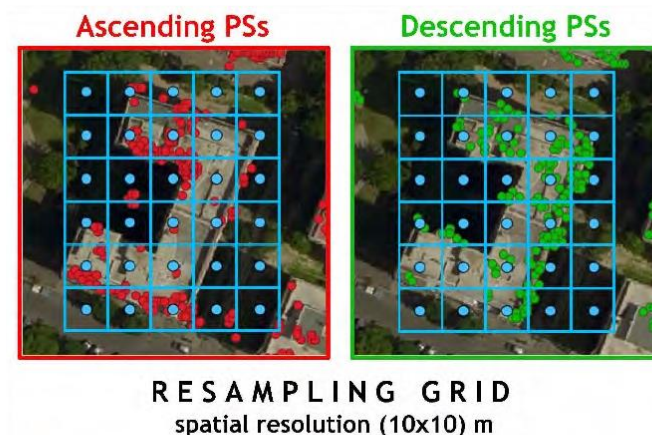
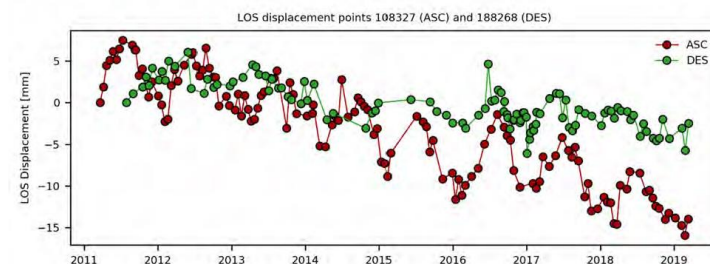
- **Elevata deformabilità** strutturale per effetti termici può limitare l'efficacia dei sensori satellitari.

Bande dei sistemi radar	Intervallo di frequenze [GHz]	Intervallo di lunghezze d'onda [cm]
Banda L	1-2	30-15
Banda C	4-8	7.5-3.75
Banda X	8-12	3.75-2.4

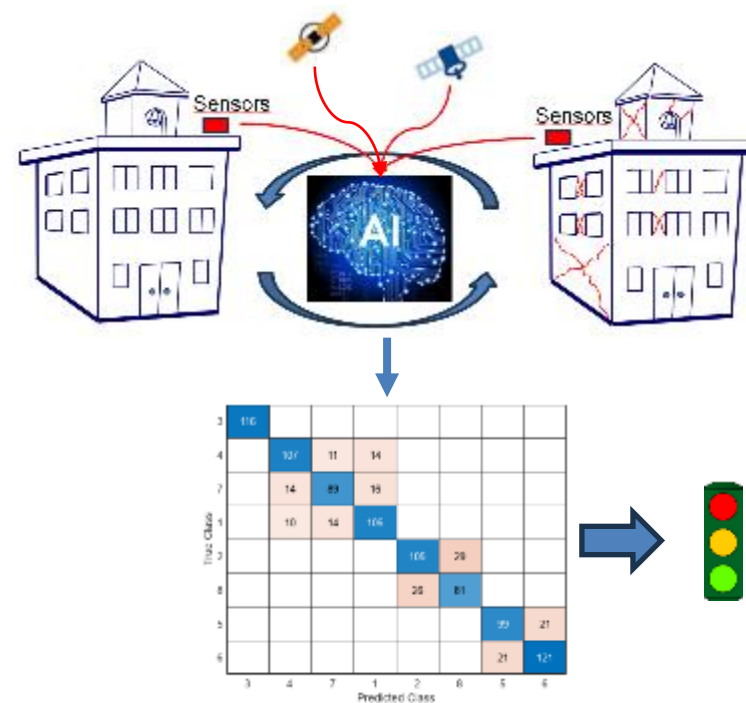
- Gli effetti della **deformazione termica**, inoltre, devono essere opportunamente considerati anche nelle operazioni di **composizione vettoriale** dei dataset appartenenti alle due orbite ascendente e discendente.
- **Localizzazione del punto di misura** (PS), caratterizzata dalle precisioni dell'ordine 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.

CONSIDERAZIONI SULL'UTILIZZO DEI DATI SATELLITARI

- 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.
- la LOS di entrambe le orbite ascendenti e discendenti è sostanzialmente contenuta nel piano verticale E-W, spostamenti in direzione N-S non rilevabili. 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.



- 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**.





Linee guida per l'utilizzo dei dati interferometrici satellitari ai fini dell'interpretazione del comportamento strutturale delle costruzioni

a cura di
Andrea Prota
Marco Savoia
Felice Carlo Ponzo



Guidelines for Interpreting Structural Behavior Using Satellite Interferometric Data

Editors:
Andrea Prota
Marco Savoia
Felice Carlo Ponzo



CON IL
PATROCINIO



VII Giornata Nazionale della Prevenzione Sismica

Programma Formativo



WEBINAR N.3 (3 CFP)
venerdì 28.02.2025 – ore 15:30
Beni culturali

Monitoraggio strutturale on site e remoto

GRAZIE PER LA CORTESE ATTENZIONE

Prof. Felice Carlo Ponso

